

第二批国家级一流本科课程申报书 (线上线下混合式课程)

课程名称：传热学

专业类代码：0805

课程负责人：魏朝晖

联系电话：18291908660

申报学校：西安航空学院

填表日期：2021年5月10日

推荐单位：陕西省教育厅

中华人民共和国教育部制
二〇二一年四月

填报说明

1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。

2.以课程团队名义申报的，课程负责人为课程团队牵头人；以个人名义申报的，课程负责人为该课程主讲教师。团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。

3.申报课程名称、所有团队主要成员须与教务系统中已完成的学期一致，并须截图上传教务系统中课程开设信息。

4.文中○为单选；□可多选。

5.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

6.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。

7.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

一、课程基本信息

课程名称	传热学	是否曾被推荐	●是 ○否
课程负责人	魏朝晖		
负责人所在单位	西安航空学院		
课程编码+选课编码 (教务系统中的编码)	B0410070		
课程分类	○通识课 ○公共基础课 ●专业课		
	□思想政治理论课 □创新创业教育课 ■教师教育课 □实验课		
课程性质	●必修 ○选修		
开课年级	大三（上）		
面向专业	能源与动力工程		
学 时	总学时：81 线上学时：25 课堂学时：56		
学 分	3.5		
先修（前序）课程名称	高等数学、线性代数、流体力学、工程热力学		
后续课程名称	锅炉原理、供热工程、汽轮机原理		
主要教材	<p>《传热学》，章熙民、任泽霈等，中国建筑工业出版社，2014</p> 		
最近两期开课时间	2019年9月2日—2019年12月6日		

	 <p>2020年9月7日—2020年12月9日</p>
最近两期学生总人数	148人
使用的在线课程	<ul style="list-style-type: none"> 国家级线上一流课程及名称 国家级虚拟仿真实验教学一流课程及名称 ●其他课程（填写课程名称、学校、负责人、网址） 课程名称：传热学 学校：西安航空学院 负责人：魏朝晖
课程链接及查看教学活动的密码等	<p>使用方式： ○MOOC ●SPOC</p> <p>https://mooc1.chaoxing.com/course/204595738.html</p> <p>账号信息： 用户名：184130137 密码：w123456</p>

注：2020年春季学期，因受新冠肺炎疫情影响而采用在线方式进行授课的，如符合教改设计理念并取得预期效果，可视为完成一个教学周期；教务系统截图须至少包含课程编码、选课编码、开课时间、授课教师姓名等信息。

二、授课教师（教学团队）

课程团队主要成员（序号 1 为课程负责人，总人数限 5 人之内）								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	授课任务
1	魏朝晖	1980.11	西安航空学院	无	副教授	18291908660	weizhaohui@xaau.edu.cn	主持设计在线课程；讲授并拍摄教学视频；负责组建在线课程系统；负责运行在线课程；回答学习者提问
2	周亮	1988.01	西安航空学院	无	副教授	13484464486	zhouliang@xaau.edu.cn	讲授并拍摄教学视频；提供各类教学材料，如习题及解答；参与运行在线课程
3	刘琰	1990.03	西安航空学院	无	讲师	18710995687	liuyan@xaau.edu.cn	拍摄教学视频；对接超星公司，为在线课程运行提供技术支持。
4	张倩	1983.12	西安航空学院	无	讲师	18392186394	zhangqian46979773@126.com	拍摄教学视频；负责对课程在线运行进行维护，解答学习者问题
5	何文博	1984.05	西安航空学院	无	讲师	13572911867	bright1899@qq.com	拍摄教学视频；负责参与回答在线学习者提问，对课程在线运行进行维护。
课程负责人和团队其他主要成员教学情况（500 字以内）								
<p>（教学经历：近 5 年来在承担该门课程教学任务、开展教学研究、获得教学奖励方面的情况）</p> <p>1. 课程负责人</p> <p>教学情况</p> <p>魏朝晖兼职中国节能协会节能咨询专家，长期承担本科课程《传热学》、《热质交换原理与设备》等的教学任务。近 4 年承担的本科教学任务 1184 课时，年平均 296 课时。</p> <p>教学科研情况</p> <p>发表本科教研论文 4 篇，其中核心 1 篇</p> <p>2013，陕西省教育科学十二五规划课题（排 3）</p> <p>2016-2018，陕西省教育科学十三五规划课题 3 项（排 1、排 2 和排 3）</p> <p>获奖情况</p> <p>2015，陕西省精品资源共享课《通风空调》（排 3）</p>								

2017, 西安航空学院说课比赛, 二等奖

2017-2019, 西安航空学院校级优秀教学成果奖 2 项 (排 1 和排 2)

2018, 教育部在线研究中心“智慧教学电子教材雨课件”优秀奖 (排 1)

2018, 西安航空学院创新创业优秀指导教师

2019, 《传热学》校级 SPOC (排 1)

2. 团队其他主要成员

团队其他成员均长期从事《传热学》教学或助教等工作, 年平均课时均超 290, 均参加了“智慧教学电子教材雨课件”制作、《传热学》SPOC 建设以及《传热学》混合式教学改革等工作。

周亮, 表学术论文 7 篇, 其中 SCI 共 3 篇, 核心 2 篇, 2019 年获得陕西省自然科学基金青年项目 (排 1), 2018 年获得西安航空学院教学创新设计大赛三等奖。

何文博, 陕西省教育科学十三五规划课题 1 项 (排 5), 2018 和 2020 分别获西安航空学院课堂教学创新大赛二等奖和三等奖, 2018 年参与的互联网+项目获得陕西省银奖 (排 2)。

三、课程目标 (300 字以内)

(结合本校办学定位、学生情况、专业人才培养要求, 具体描述学习本课程后应该达到的知识、能力水平)

西安航空学院是一所地方应用型本科高校, 该校的《传热学》是能源动力类专业的专业技术基础课。课程定位遵从学校高素质应用型人才的育人目标, 坚持“行业性、地方性、应用型”的教学定位。

1. 知识目标

掌握从事能源动力领域所需的热量传递 (导热、热对流和热辐射) 的基本概念、规律、计算和分析问题的方法, 掌握热量传递强化、削弱的方法和间壁式换热器的基本热计算方法。

2. 能力目标

具有综合分析实际传热问题、将实际问题抽象为理论的能力, 并能针对工程复杂传热问题提出合理解决方案。

3. 素质目标

了解能源动力领域传热传质的发展现状，熟悉传热设备的职业规范，勇于承担社会主义一线工作者的责任。

四、课程建设及应用情况（2000 字以内）

(本课程的建设发展历程, 课程与教学改革要解决的重点问题, 混合式教学设计, 课程内容与资源建设及应用情况, 教学方法改革, 课程教学内容及组织实施情况。课程成绩评定方式, 课程评价及改革成效等情况)

1. 建设发展历程

2015.9, 西安航空学院开设本科课程《传热学》;

2018.6, 完成基础知识的 22 课时微课录制;

2018.9, 实施《传热学》线上-线下混合式教学;

2019.11, 西安航空学院校级 SPOC;

2020.9, 建成超星师范教学包。

2021.3, 西安航空学院校级一流课程。

2. 课程与教学改革要解决的重点问题

相对于高水平大学, 二本学生底子薄、接受能力弱。如何针对二本学生认知特点, 将思政元素无痕的融入课程内容, 设计出适合二本类学生混合教学模式以及评价方式, 是一个亟待解决的问题。

(1) 针对二本学生认知特点, 如何将马克思主义方法论融入课程内容, 从思维层面提升学生认知能力, 实现思政与知识同向同行、互相促进。

(2) 以提升二本学生学习能力和分析问题能力为目标, 如何设计教学内容, 实现教授知识的同时提升学生的学习能力。

(3) 在 OBE 教学模式下, 如何更科学合理地评价学生的学习效果和认知能力。

3. 混合式教学设计

《传热学》采用基于 BOPPPS 模型的混合式教学设计。

课前通过“学习任务书”和“在线学习平台”完成目标、前测两个环节。在“学习任务书”中明确学习目标、课前讨论题目以及相关要求。通过“在线学习平台”完成视频学习任务、课前测试环节，并收集学生学习存在的问题，确保教师提前掌握学生学习情况。

课堂完成导入、参与、后测和总结四个环节。线下课堂首先回答学生课前学习中存在的问题，并随机抽取一名学生讲解课程内容，确保线上学习效果。其次，通过近些年热点事件所蕴含的传热知识引出本次课内容。然后，将工程中相对比较新且复杂的问题引入课堂，引导学生深度参与工程问题解决过程，建立分析问题、解决问题的方法。在案例分析与解决过程中，穿插相应的测试题，确保课题学习效果。最后，采用认识论梳理和总结本次课学习内容。

4. 课程内容与资源建设及应用情况

本课程是能源动力类专业的专业技术基础课。

课程采用“马克思主义方法论”教授传热问题分析方法、数学抽象方法，使用归纳与演绎法探索导热、对流换热和辐射换热中蕴含的传热规律和计算方法，综合所学知识分析增强传热的措施，进行间壁式换热器的热计算。课程还将闪蒸、表面沸腾、液体导热等教师研究成果加入教学内容，拓展学生思维。

《传热学》已在“泛雅网络教学平台”上应用，包含了56课时的《传热学》SPOC、1个传热仿真实验和教学资料构架。数字化资源包括44个微课视频共470分钟内容（专业负责人121.73分钟，占比25.9%）、43个PPT学习课件、2套试卷、10个章节复习题和24次测试题的数字化资源。

5. 教学方法改革

《传热学》实施基于BOPPPS的“线上-线下”混合式教学改革，以“学到什么”为核心，对课堂教学过程进行模块化分解，将教学目标分解到各个模块中，通过“过程性评价表”建立过程性评价机制，提升学生学习主动性。课程引入一些最新热点事件，剖析其中所蕴含的传热知识，提升学生学习兴趣。针对地方应用型本科生学习能力较弱的问题，课程引入马克思主义方法论，以“如何学”为核心，强化学生个性化学习方法的建立，提升学生学习能力。

6. 课程教学内容及组织实施情况

基于BOPPPS教学模式完成课内与课外、线上与线下的教学组织，将马克思主义方法论融入课程教学中，提升学生认知能力，并以典型案例贯穿课前线上

学习以及课中课中线下学习中。

课前，学生根据任务书学习在线学习视频、完成测试题，然后采用费曼学习法分组讲授知识点，并查找相关学习案例及资源，分组讨论，定性分析典型案例，交流学习心得，最后班长收集各组问题并反馈给教师。

课中，首先采用翻转课堂等形式检验线上学习成效，然后引入一些近期热点事件，教授学生采用分析、演绎、类比等逻辑学的方法把感性认识深化为理性认识，并引导学生采用框架思维梳理脉络，建立自己的知识图谱。

课后，学生完成作业及在线测试题、绘制思维导图和反思学习过程，教师根据实施情况反思教学设计。

7. 课程成绩评定方式

根据西安航空学院相关文件，《传热学》课程成绩由考试与平时两项组成，比例为 70:30。

平时分由线上和线下组成，比例为 24:6，线上成绩由视频观看时长、章节测验、网站点击率、线上作业、参与讨论等环节组成，线下由出勤和课堂表现组成。

考卷分值按照章节课时占比分布，试题按照布卢姆教育目标分类学出题，从知识和认知历程两个维度分别评价学生对知识的掌握程度，采用模糊层次分析分别评价学生的认知能力，最终得到学生综合评价（见附 14）。

8. 课程评价及改革成效情况

（1）将马克思主义认识论融入《传热学》中，使学生的知识、认知能力共同提升，获得了学院和学生一致好评（见附 14）。

（2）将教师研究成果融入课程内容，运用《传热学》知识分析热点事件，获得行业专家的高度评价（见附 14）。

（3）采用混合式教学，助推学生自主学习。在线视频观看完成率 98%，扩展性讨论题目回复率超过 39%，在线学习优秀率 80%以上，作业平均分 87 分以上，2020 年 12 月，线上平均学习 288 次/天。

（4）2018 年《传热学》获教育部在线研究中心“智慧教学电子教材雨课件”优秀奖，2020 年被超星集团收录为“示范教学包”，2021 年获得西安航空学院校级一流课程建设项目。

五、课程特色与创新（500 字以内）

(概述本课程的特色及教学改革创新点)

1. 课程思政润物细无声

挖掘《传热学》专业知识、工程案例中所蕴含的人生哲理；通过类比法等方法，从传热案例联系到国和家的关怀，通过每个都经历的情感，拉进师生距离，实现师生情感共鸣，提升学生家国情怀。剖析大众关注热点事件所蕴含的传热知识（如温度对嫦娥四号的影响），突显国家战略、国家重大成就。在考试试题中融入科学探索、不畏艰难的思政元素。

2. 从思维模式角度进行教学设计

以提升学生思维深度和学习能力为核心，引导学生梳理梳理传热学知识体系，强化传热学问题数学抽象基本功，建立《传热学》知识点组织地底层模型：从物理、几何的角度分析传热问题→使用流体力学三大方程或热阻建立传热问题数学模型→采用合适的方法求解数学模型→传热规律→应用。将该模型应用到传热案例学习中，根据“验证→修正→扩充”的思路完善思维模型，最终形成个性化学习方法，提升学生学能力。

3. 采用模糊层次分析法评定学生认知能力

以布卢姆认知理论为框架，从知识和认知历程两个维度构建学生认知能力评价指标体系，采用模糊层次分析法确定各指标权重，使用三角形隶属度函数模糊化测验成绩，取其内积，得到学生认知能力的模糊综合评价，为学生后面学习提供方向性建议。

六、课程建设计划（500 字以内）

(今后五年课程的持续建设计划、需要进一步解决的问题，改革方向和改进措施等)

1. 转变思路，知识与思政深度融合

将 OBE 理念应用到课程思政教学中，改变以讲授为主的课程思政授课模式，将学生自我思政教育度作为主要评价指标，探索课程思政目标达成度的评价方

式。

2. 教学资源建设

优化师资队伍。加大教师培养力度，积极参与各种教学比赛，提升团队职称水平，鼓励教师提升学历，建立优秀教师“传、帮、带”年轻教师的措施，加强教师去企业锻炼力度，提升教师科学研究水平，打造双师双能型课程团队。

讲义建设。以产出为导向，以应用为核心，将马克思主义认识论系统地融入教学内容中，建设应用型《传热学》讲义。

推进“MOOC+SPOC+翻转”继续推进《传热学》线上线下混合式教学，加大线上学习的收获，优化全过程评价方式，调动下线学生学习主动性。

完善数字资源。提炼、分析当下大众关心的焦点事件中的传热问题，并形成文字或视频；开展传热科学研究，对课程内容进行有针对性地持续改进。

继续推动师生共建课程机制。鼓励学生从资源、网站维护等方面参与课程建设，提升学生《传热学》课程认知高度。

3. 建立课程效果评价与反馈机制

探索课程效果评价的量化方案，完善“课程目标→课程设计→课程应用→课程效果评价→课程目标”的闭环课程建设模式。

七、附件材料清单

1.课程负责人和团队成员的 10 分钟“说课”视频

附件 1 课程说课视频

如果评审视频无法打开，请访问下面网址。

说课视频网址：

<https://mooc1.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?courseId=204595738&knowledgeId=434515172>



[含课程概述、教学设计思路、教学环境（课堂或线上或实践）、教学方法、

创新特色、教学效果评价与比较等。技术要求：分辨率 720P 及以上，MP4 格式，图像清晰稳定，声音清楚。视频中标注出镜人姓名、单位，课程负责人出镜时间不得少于 3 分钟。“说课”使用的语言及字幕为国家通用语言及文字。]

2.教学设计样例说明

(提供一节代表性课程的完整教学设计和教学实施流程说明,尽可能细致地反映出教师的思考和教学设计,在文档中应提供不少于 5 张教学活动的图片。要求教学设计样例应具有较强的可读性,表述清晰流畅。课程负责人签字。)

3.最近一学期的教学日历

(申报学校教务处盖章。)

4.最近一学期的测验、考试(考核)及答案(成果等)

(申报学校教务处盖章。)

5.最近两学期的学生成绩分布统计

(申报学校教务处盖章。)

6.最近两学期的学生在线学习数据

(申报学校教务处盖章。)

7.最近一学期的课程教案

(课程负责人签字。)

8.最近一学期学生评教结果统计

(申报学校教务处盖章。)

9.最近一次学校对课堂教学评价

(申报学校教务处盖章。)

10.教学(课堂或实践)实录视频

附件 10 教学(课堂或实践)实录视频

如果评审视频无法打开,请访问下面网址。

说课视频网址:

<https://mooc1.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?courseId=2045>

[95738&knowledgeId=434515173](https://mooc1.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?courseId=204595738&knowledgeId=434515173)



提供完整的一节课课堂实录视频（标注课程内容、课程对象、上课时间以及上课地点，至少 40 分钟。技术要求：分辨率 720P 及以上，MP4 格式，图像清晰稳定，声音清楚。教师必须出镜，视频中需标注教师姓名、单位；要有学生的镜头，并须告知学生可能出现在视频中，此视频会公开。少数民族语言视频须配国家通用语言字幕。）

11.课程团队成员和课程内容政治审查意见

（申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审，出具政审意见并加盖党委印章；团队成员涉及多校时，各校党委分别对本校人员出具意见；非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题；课程内容审查包括价值取向是否正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误，对于国家主权、领土表述及标注是否准确，等等。）

12.课程内容学术性评价意见

[由学校学术性组织（校教指委或学术委员会等），或相关部门组织的相应学科专业领域专家（不少于 3 名）组成的学术审查小组，经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。]

13.学校支持混合式教学、认定混合式教学工作量等有关政策文件（选择性

提供)

(申报学校盖章。)

14.其他材料, 不超过 2 份 (选择性提供)

以上材料均可能在网上公开, 请严格审查, 确保不违反有关法律及保密规定。

附件1 课程负责人和团队成员的10分钟“说课”视频（备用）

如果评审视频无法打开，请访问下面网址。

网址：

<https://mooc1.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?courseId=204595738&knowledgeId=434515172>



附件 2 教学设计样例说明

基于 BOPPPS “周期性非稳态导热” 教学设计

课程名称：传热学

讲授内容：周期性非稳态导热

主讲教师：魏朝晖

上课日期：2020 年 10 月 12 日

一、学习目标

- (1) 知识与技能：理解综合温度和蓄热系数的概念，掌握周期性非稳态热的波动特性，掌握温度波的周期性、衰减性、延迟性的特点，并能应用周期性非稳态导热的结论分析简单的周期性非稳态导热问题。
- (2) 过程与方法：通过案例法和讨论法引发学生互动式学习，以生活中再平常不过的气温变化为例，抛出日常中视为理所应当的现象和问题，引导学生结合传热学的理论知识，解释并理解气温变化原因。教学过程以学生为中心，以问题为导向，融会分析思考、讨论理解、讲解解惑与实操训练于一体，激发和培养学生独立思考的主体意识。
- (3) 情感态度与价值观：“思政”理念的融入和运用。学生通过传热学和数学的相关知识，列举生活中周期性非稳态导热的例子，引导学生归纳周期性非稳态导热的特点，利用“演绎法”得出第一类边界条件下非稳态导热的特点，引导学生思考其中蕴含的用马克思主义“认识论”的方法，思索现象后面的本质，从而树立透过现象看本质、利用本质再指导工程实践的意识。

二、学情分析

- (1) 知识背景：经过前面的学习，学生已经掌握了导热微分方程式、单值性条件、非稳态导热的基本概念，了解了生产、生活中一些周期性非稳态导热例子（如墙体等），也对分离变量法有一定的掌握。
- (2) 学生特点：数学功底稍弱；学习主动性不强；学习方法较呆板；动手操作能力强。
- (3) 教学条件：具备本课程教学的 SPOC 课程、多媒体教学条件和意义上的教室，暂时无周期性非稳态导热的实验条件。

三、存在的问题

- (1) 学生学习目标含糊不清，惰性较大，学习主动性不强。
- (2) 受传统教学方法的影响，学生学习方法较呆板，学习效率低下。
- (3) 传统类型的教室影响翻转课堂效果。

四、应对方法

- (1) 将马克思主义“方法论”融入课程，在教授知识的同时教授学生学习方法，提升学生学习能力。
- (2) 结合学校“应用型大学”的定位，强化周期性非稳态导热分析，弱化公式推导过程（只讲思路），加强公式分析与应用。
- (3) 提前安排学生挪动桌椅，布置教室。

五、教学过程

表 1 教学过程

环节	时间	教师活动	学生活动	教材教具
课前学习	课前 7 天	下发学习任务书和过程评价表	在线学习视频； 阅读学习资料	学习通平台或 QQ 群
	课前 5 天	督促学生完成小组讨论	小组讨论	
	课前 3 天	收集学生自主学习中集中存在的问题。	各小组收集问题，班长集中反馈给教师	学习通平台或 QQ 群
导入 / 暖身 Bridge-in	3 分钟	问题导入：一年为何是 365 天、地窖为何能够存储食物、西晒的房屋为什么晚上最热、为什么雪花在树叶可以存留而落在地面就融化了、赤脚在水泥、地毯上行走感觉不同？	观看 PPT、互动思考	电脑、投影仪、翻页笔
学习目标 Objectives	3 分钟	以演讲方式道出知识目标、能力目标、情感目标，做到严谨、准确	观看 PPT、互动思考	电脑、投影仪、翻页笔
参与式学习 Participatory Learning	6 分钟	通过屋顶结构在夏季太阳辐射和室外空气综合作用下的温度变化曲线，引出综合温度的概念	思考房顶温度变化的规律和原因	电脑、投影仪、翻页笔
	5 分钟	回顾中学数学的简谐波知识，并引出温度波	思考简谐波的基本特性	电脑、投影仪、翻页笔
	7 分钟	引导学生理解温度波的周期性特点	思考、讨论并解释一年 365 天的问题	电脑、投影仪、翻页笔
	7 分钟	引导学生理解温度波的衰减性特点	思考、讨论并解释地窖存储的问题	电脑、投影仪、翻页笔
	8 分钟	引导学生理解温度波的延迟性特	思考、讨论并	电脑、投

		点	解释西晒的房屋和雪花融化的问题	影仪、翻页笔
	8 分钟	通过周期性非稳态导热表面热流密度的公式，引导学生理解蓄热系数的概念	思考、讨论并解释赤脚在水泥、地毯上行走感觉不同	电脑、投影仪
课堂小结 Summary	3 分钟	总结课程知识点，再次强调课程学习目标	对相关结论进行巩固和记忆	电脑、投影仪

六、教学设计展示

根据《传热学》教学日历安排，“周期性非稳态导热”采用线上线下混合式教学模式的三个阶段：自主学习、翻转课堂、巩固练习。

(一) 自主学习

- (1) 领取任务书和过程评价表，了解本次课学习目标、内容、任务等，自行分组。
- (2) 在线学习。线上学生自主学习和预习，完成本次课视频学习(11 分钟)，浏览 PPT，完成本节测验题。
- (3) 分组讨论。

表 2 周期性非稳态导热任务书

讨论章节	周期性非稳态导热		
学习小组		组长	各小组自定
小组成员			
激励口号	各小组自定		
任务安排计划：各小组自定			
组长职责：各小组自定			
纪律制度：各小组自定			
讨论任务	<ol style="list-style-type: none"> 1. 自定组织及分工 2. 学习目标 <ol style="list-style-type: none"> 1) 了解其它形状物体的瞬态导热的推导思路； 2) 重点学习周期性非稳态导热 3) 掌握综合温度、波动振幅的概念 4) 掌握温度波的特性 		

	<p>3. 课前讨论题目</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 举几个生产、生活中周期性非稳态导热的例子。 2) 什么是“周期性非稳态导热”、“综合温度”和“波动振幅”？ 3) 为什么周期性非稳态导热没有初始条件？ 4) 针对“第一类边界条件下的周期性非稳态导热”问题，如何建立与简化导热微分方程式，如何建立边界条件？ 5) 什么周期性非稳态导热的周期性，如何计算周期？ 6) 什么周期性非稳态导热的衰减性，如何计算衰减度？影响温度波衰减的主要因素有什么？ 7) 什么周期性非稳态导热的延迟性，如何计算延迟时间？如何计算延迟相位？ 8) 什么周期性非稳态导热的传播性，如何温度波传播的速度和距离？ 9) 周期性变化的第三类边界条件下的温度如何分布？ 10) 如何周期性非稳态导热的热流密度。 11) 什么材料的蓄热系数？如何计算？ 12) 解释 1) 中所举的例子。 <p>13) 案例 1：以一年、一天温度变化对土壤热量传递的影响为例，将本节课所有知识点串联起来。（贯穿线上、线下学习）</p> <p>4. 课中实施分组案例讨论</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 抽取个别讲解课程部分内容。 2) 分组讨论各知识案例，教师随机提问。 3) 定量的分析“案例 1”。 <p>5. 评价</p> <p>评价学生自评、小组互评和教师总结评价。</p>
<p>要求</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 寻找自己的合作对象，以 4-5 人为一小组。 2. 确定组名和口号，提出纪律要求。 3. 选出小组长，制订、明确组长职责。 4. 探讨交流制订小组的任务安排计划。 5. 小组在思维导图、任务书的指导下，自学 MOOC 视频、查找相关资料、讨论疑难点、讨论题目，务必做到人人掌握本次课内容。 6. 及时记录、讨论过程中碰到的问题。 7. 认真写好学习笔记本和心得体会。

表 3 过程评价表

主题：周期性非稳态导热									
学生姓名			评价时间						
阶段	评分项目	分值	评价标准	自评	互评				教师评价
					1	2	3	4	
线上	视频学习	10	观看完成（10分）						
	资料阅读	10	阅读时长（10分）						
课前线下	贡献度	20	自学情况（5分）						
			为同学解惑情况（5分）						
			回答题目情况（5分）						
			提出建设性问题情况（5分）						
	参与度	15	课前讨论情况（5分）						
			课中讨论情况（5分）						
			整理资料情况（5分）						
	协同度	10	听取他人意见情况（5分）						
			表述自己观点情况（5分）						
	掌握情况	15	讲述课程内容——费曼学习法（5分）						
			分析工程问题情况（5分）						
			建设性想法（5分）						
课后	作业	5	完成作业（5分）						
		5	作业表现（5分）						
	线上讨论	5	参与线上讨论（5分）						
	思维导图	5	完成思维导图（5分）						
分项合计									
权总得分		教师×40%+自评×30%+互评×30%							
课程换算分（5%）									
注：“教师评价”为教师根据学生课堂表现给分；“互评”中1、2、3和4分别代表本组成员（无4号空白）；“互评”的总分取组员评分的平均值，要求互评要客观、真实，体现组内排名。									

图 1 学生在《传热学》SPOC 网站上预习（观看视频）

周期性非稳态导热

视频 课件 测试题

周期性非稳态导热

任务点已完成



非稳态导热
5-周期性非稳态导热
主讲人: 何文博
单位: 西安航空学院
所属课程: 传热学

周期性非稳态导热

1x 0:43 / 11:34 标清 公网1

目录 讨论 笔记

- 3.3 导热微分方程式 ✓
- 3.4 导热过程的单值性条件 ✓
- 3.5 复习题 ✓
- 第4章 稳态导热
 - 4.1 通过平壁的导热 ✓
 - 4.2 通过复合平壁的导热 ✓
 - 4.3 具有内热源的平壁导热 ✓
 - 4.4 通过圆筒壁的导热1 ✓
 - 4.5 通过圆筒壁的导热2 ✓
 - 4.6 通过肋壁的导热 ✓
 - 4.7 通过接触面的导热换和二维稳... ✓
 - 4.8 复习题 ✓
- 第5章 非稳态导热
 - 5.1 非稳态导热的概念 ✓
 - 5.2 无限大平壁非稳态导热1 ✓
 - 5.3 无限大平壁非稳态导热2 ✓
 - 5.4 无限大平壁非稳态导热-集总... ✓
 - 5.5 半无限大平壁及其他形状物体... ✓
 - 5.6 周期性非稳态导热 1
 - 5.7 复习题 ✓
- 第6章 导热数值模拟基础
 - 6.1 建立离散方程的方法 ✓
 - 6.2 稳态导热的数值计算 ✓
 - 6.3 非稳态导热的数值计算 ✓
 - 6.4 复习题 ✓
- 第7章 对流传热分析
 - 7.1 对流换热概述 ✓

图 2 学生在《传热学》SPOC 网站上预习（浏览 PPT）

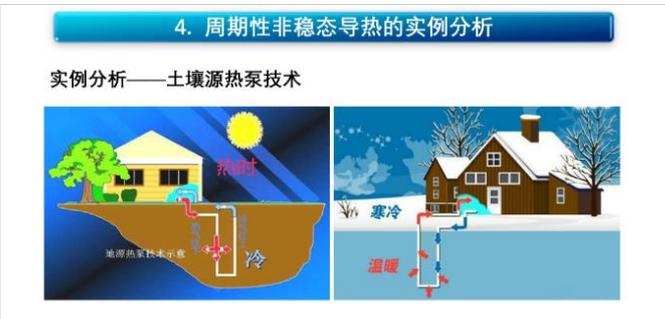
周期性非稳态导热

视频 课件 测试题

课件

4. 周期性非稳态导热的实例分析

实例分析——土壤源热泵技术



热时

冷

土壤源热泵技术示意图

寒冷

温暖

目录 讨论 笔记

- 4.7 通过接触面的导热换和二维稳... ✓
- 4.8 复习题 ✓
- 第5章 非稳态导热
 - 5.1 非稳态导热的概念 ✓
 - 5.2 无限大平壁非稳态导热1 ✓
 - 5.3 无限大平壁非稳态导热2 ✓
 - 5.4 无限大平壁非稳态导热-集总... ✓
 - 5.5 半无限大平壁及其他形状物体... ✓
 - 5.6 周期性非稳态导热 1
 - 5.7 复习题 ✓
- 第6章 导热数值模拟基础
 - 6.1 建立离散方程的方法 ✓
 - 6.2 稳态导热的数值计算 ✓
 - 6.3 非稳态导热的数值计算 ✓
 - 6.4 复习题 ✓
- 第7章 对流传热分析
 - 7.1 对流换热概述 ✓
 - 7.2 对流换热微分方程组 ✓
 - 7.3 流动边界层和热边界层 ✓
 - 7.4 边界层传热微分方程组 ✓

图3 学生在《传热学》SPOC网站上预习（做测试题）

● 任务点

周期性非稳态导热 待做

1 【填空题】

周期性温度波在厚钢板内(设为半无限大)和在土壤中传递时,_____衰减快?

第一空:

Ω π U 上传附件

2 【填空题】

第一类边界条件下温度波的特性包括____、____、延迟性和传播性。

目录 讨论 笔记

- 4.7 通过接触面的导热换和二维稳... ✓
- 4.8 复习题 ✓
- ^ 第5章 非稳态导热
- 5.1 非稳态导热的基本概念 ✓
- 5.2 无限大平壁非稳态导热1 ✓
- 5.3 无限大平壁非稳态导热2 ✓
- 5.4 无限大平壁非稳态导热-龚总... ✓
- 5.5 半无限大平壁及其他形状物体... ✓
- 5.6 周期性非稳态导热 1
- 5.7 复习题 ✓
- ^ 第6章 导热数值模拟基础
- 6.1 建立离散方程的方法 ✓
- 6.2 稳态导热的数值计算 ✓
- 6.3 非稳态导热的数值计算 ✓
- 6.4 复习题 ✓
- ^ 第7章 对流传热分析
- 7.1 对流换热概述 ✓
- 7.2 对流换热微分方程组 ✓
- 7.3 流动边界层和热边界层 ✓
- 7.4 边界层传热微分方程组 ✓

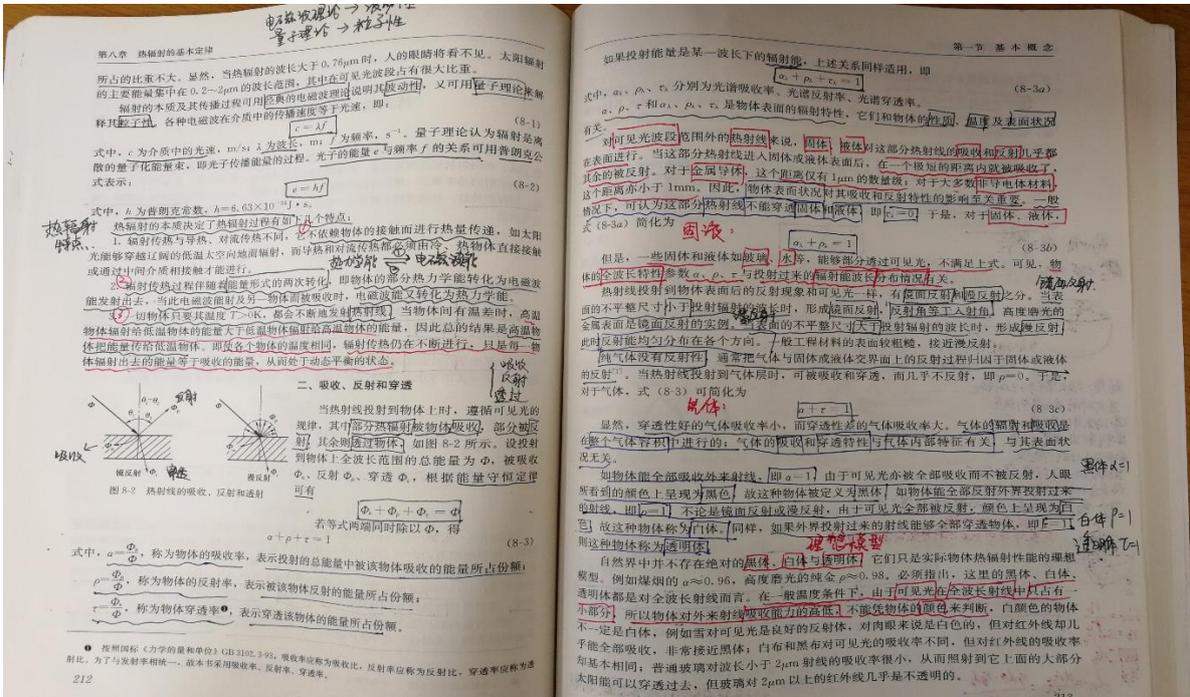
图4 学生课前分组讨论



图5 学生互相讲解学习内容——费曼学习法



图6 学生自主学习教材书面展示



(二) 翻转课堂

- (1) 回顾上次课内容，从知识体系和应用的角度引出本次课内容。
- (2) 集中解答学生课前自主学习中遇到的问题。
- (3) 随机抽取一组讲解一个知识点。
- (4) 分组讨论，教师现场随机提问。

图 7 学生授课

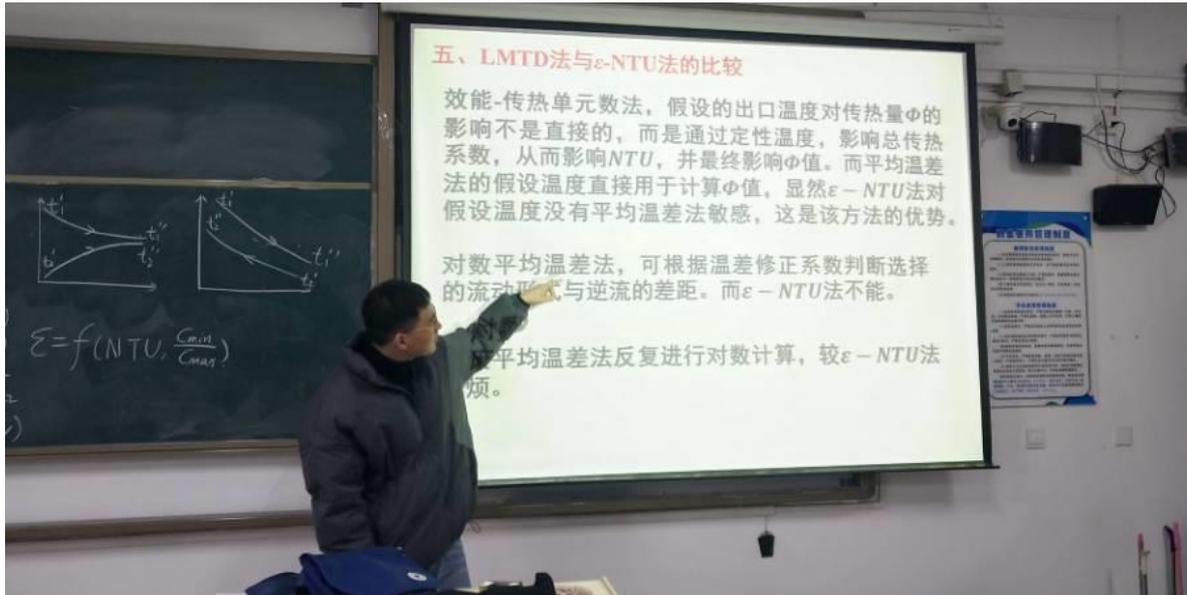


图 8 教师现场随机提问



(三) 巩固练习

- (1) 布置课后作业，要求手写、上传在线课程网站。
- (2) 教师下发在线讨论题目。
- (3) 下发思维导图制作任务。

图 9 作业

作业名称	开始时间	截止时间	提交数	状态
第七次作业-对流换热边界层	2020-10-21 16:00	2020-10-27 23:55	32/35	0 份待批
第六次作业 导热的数值计算	2020-10-17 10:45	2020-10-22 12:00	32/35	0 份待批
第五次作业-集总参数法	2020-09-28 21:58	2020-10-04 18:00	32/35	0 份待批
第四次作业	2020-09-19 19:42	2020-09-22 08:00	30/35	0 份待批
第三次作业	2020-09-16 19:36	2020-09-19 23:36	31/35	0 份待批
第二次作业20200909	2020-09-09 19:33	2020-09-16 23:00	32/35	0 份待批

图 10 线上讨论

魏朝晖 2020-12-08 21:19
太阳把温度传到地球, 为什么太阳到地球之间的太空是冰冷的?
太阳把温度传到地球, 为什么太阳到地球之间的太空是冰冷的?

刘文 2020-12-31 10:50
宇宙是一个真空的状态, 其间可以传导热量的介质微乎其微。光虽然可以在真空中传导, 但是没有可以容纳温度的介质。所以无法把温度保留下来。

周亮 2020-12-16 17:54
从换热表面的结构而言, 强化凝结换热的基本思想是什么? 强化沸腾换热的基本思想是什么?

齐明 2020-12-30 14:29
从换热表面的结构而言, 强化凝结换热的基本思想是尽量减薄粘滞在换热表面上液膜的厚度, 强化沸腾换热的基本思想是尽量增加换热表面的汽化核心数。

七、教学实施

课程采用“基于 BOPPPS 的线上-线下”的混合式教学模式。

课前，教师下发学习目标和学习任务。在教学目标中，教师通过生活、生产案例让学生明确本节内容重要性及一些应用场景，然后从知识、能力和素质几个方面明确学习目标。学生接受到任务后，分别学习视频资源，查找相关学习案例及资源，然后分组讨论，交流学习心得，收集集中存在的问题反馈给班长。

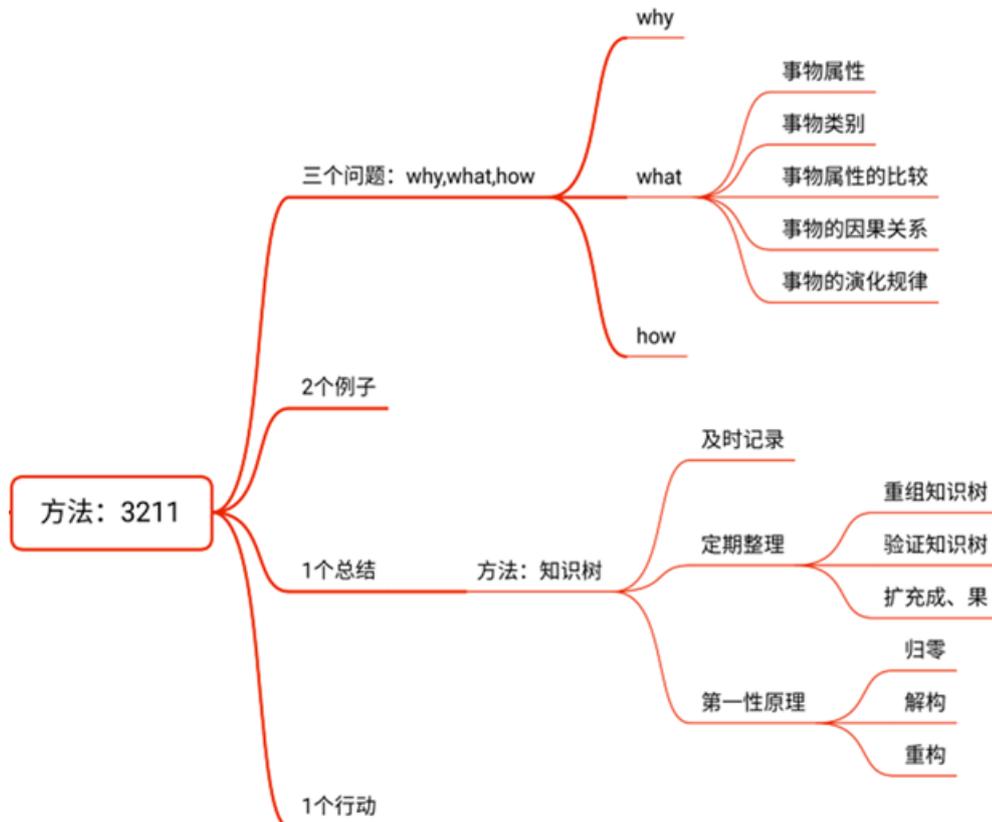
课中，采用集中讲授、讨论、翻转课堂等形式，教师将认识论的相关观点融入知识的理解中，引导学生学会学习、思考，设置开放性问题，激发学生讨论热情，教授学生如何总结、如何反思新学习内容。

课后，学生完成作业及在线测试题，并根据完成情况反思学习过程，引导学生有意识的应用传热知识思考问题；教师根据学生讨论情况、作业及测试题完成情况，反思教学设计。对于学生集中存在的问题，通过学习通集中解答。

(一) 课前实施线上自主学习

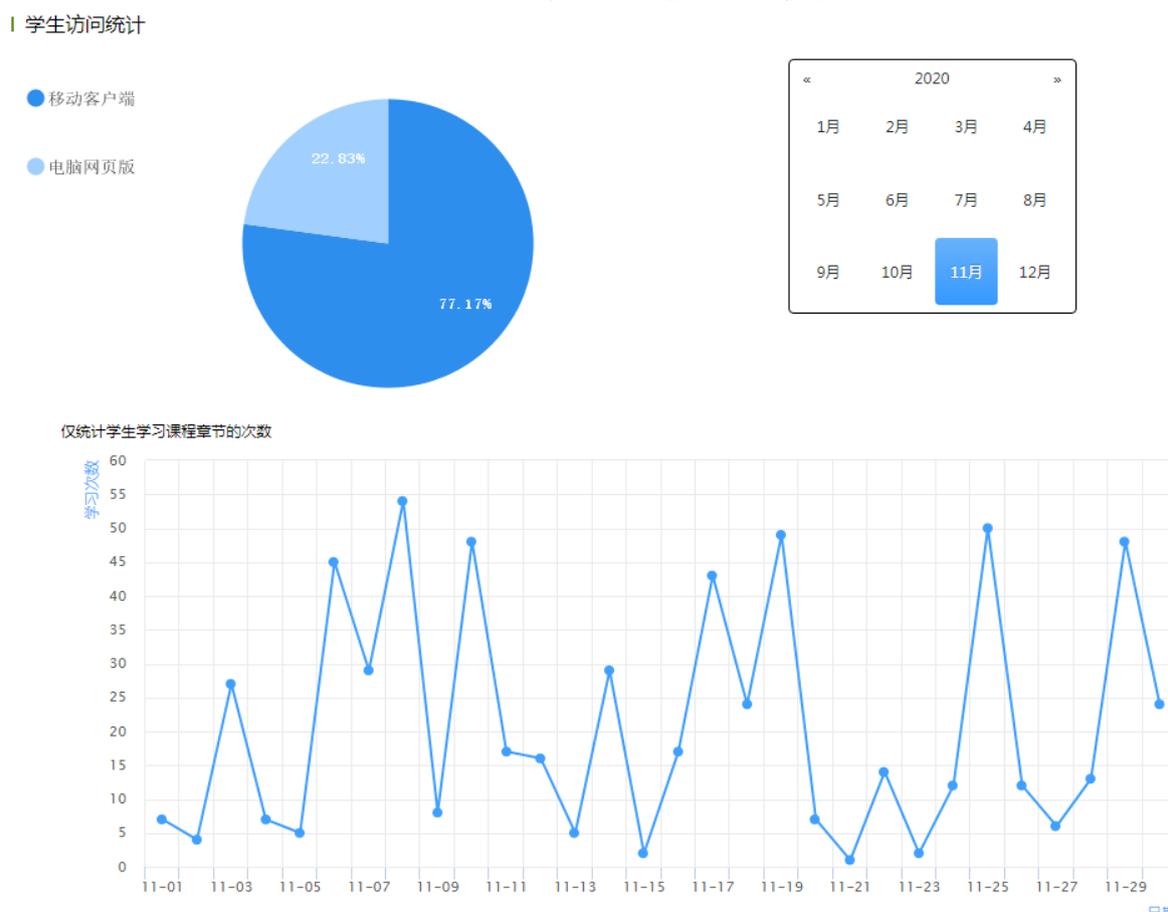
在课前 7 天，教师下发任务书和过程评价表，学生 2 天内完成线上学习，再 2 天内完成进行小组讨论、完成互相讲课和答疑，然后班长收集班级学习疑问，集中反馈给任课教师。为了督促学生自主学习的主动性，实施过程性考核，本组同学根据组内互相讲课和讨论情况进行互评，为了避免互评流于形式，要求互评分数不能相同，要能体现组内排名情况。

图 11 “三二一一”学习法



在线上自主学习过程中，要求学生实施“三二一一”学习法。“三”指的是学生在学习任何知识点的时候，要从 why、what 和 how 三个方面问自己三个问题；“二”指的是学生对任何一个知识要举两个例子，一个书中的例子，一个自己的例子；第一个“一”指的是学生对每次课要总结，尽量将本次课内容凝练成一段或一句话；最后一个“一”指的是练习，即在学习完后要及时做题练习。

图 12 学生 11 月在线视频学习数据



(二) 课中实施翻转课题

在课中线下教学中，实施生讲生评、研讨讨论、案例剖析、平行互动和边讲边练等多种形式的翻转课堂，以一条案例主线贯穿整个课堂，利用知识观中的方法，教授学生如何思考、如何发问、如何分析，引导学生主动运用所学知识分析和解决当前热点问题，设置开放性问题，激发学生讨论热情，教授学生如何总结、如何反思新学习内容，并形成文字。

为了督促遵守学生线上学习的自主性，教师会在课中随机选取一组讲解本节内容的一个知识点，其他组同学可就该组同学讲述内容现场提问、评价。为了提升学生学习兴趣、拓展学生眼界、提高学生思维能力，在线下课题中贯穿教师的研究方向，如液滴闪蒸、表面沸腾等。

图 13 小组讨论



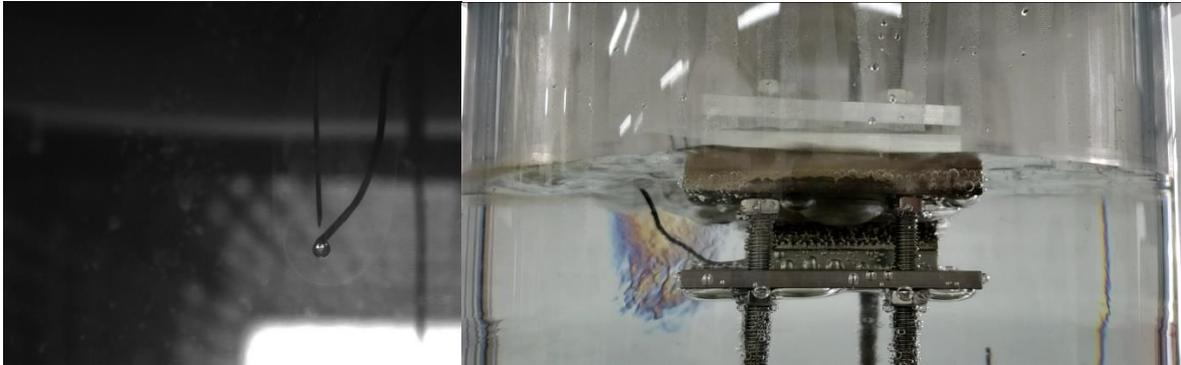
图 14 研讨讨论



图 15 课程中穿插教师科研（闪蒸与表面沸腾实验台）



图 16 闪蒸与表面沸腾实验照片



(三) 课后通过“线上-线下”双线巩固学习成果

课后通过作业、线上讨论和思维导图完成知识巩固。“作业”要求手写，上传课程网站，实施教师批改、生生互评两种方式改作业。将参与“线上讨论”情况纳入过程评价，提升学生参与积极性。对每次课内容要求按学号顺序完成“思维导图”制作，巩固所学内容，提升学生学习能力。

图 17 线上讨论

魏朝晖
2020-12-08 21:19
太阳把温度传到地球, 为什么太阳到地球之间的太空是冰冷的?
太阳把温度传到地球, 为什么太阳到地球之间的太空是冰冷的?
0 3

刘文
2020-12-31 10:50
宇宙是一个真空的状态, 其间可以传导热量的介质微乎其微。光虽然可以在真空下传导, 但是没有可以容纳温度的介质。所以无法把温度保留下来。
0 0

陈卓
2020-12-24 00:10
介于地球与太阳之间的太空却是处于一个完全的真空环境, 在真空环境下不存在任何储存热量的载体, 也就使得太空之中是一片冰冷的, 热量根本不乏在真空环境中逗留, 而是直接将其穿透
0 0

魏朝晖
2020-09-14 21:02
有人认为无内热源、导热系数为常数的稳态导热的物体的温度分布与热导率无关。你同意这种看法吗? 请说明理由
0 5

陈卓
2020-12-24 00:14
不同意, 无内热源、导热系数为常数的稳态传热, 系统各处温度不随时间变化, 但空间上, 不同坐标的温度却是与物体的热导率有关的。
0 0

吴淑怡
2020-12-23 11:05
不同意
因为无内热源导热系数为常数为稳态传热时, 物体的各处温度不随时间变化, 但在空间上各点的温度却是与物体的热导率有关的。
0 0

图 18 线上提交作业

第五次作业-集总参数法

[返回学生列表](#)

姓名: 吴淑怡 班级: 能源动力181 成绩: 100分 隐藏题目

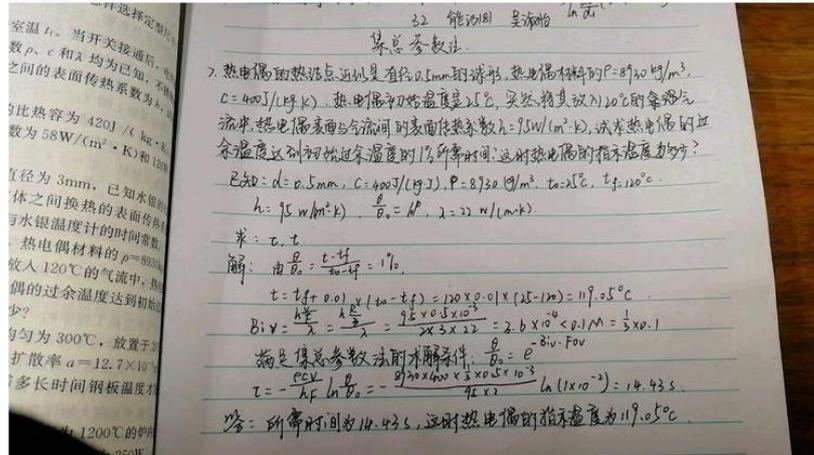
一.简答题 (共2题,100.0分)

1

7. 热电偶的热结点近似认为是直径 0.5mm 的球形, 热电偶材料的 $\rho=8930\text{kg/m}^3$, $c=400\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。热电偶初始温度为 25°C , 突然将其放入 120°C 的气流中, 热电偶表面与气流间的表面传热系数 $h=95\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 试求热电偶的过余温度达到初始过余温度的 1% 时所需的时间为多少? 这时热电偶的指示温度为多少?

正确答案:

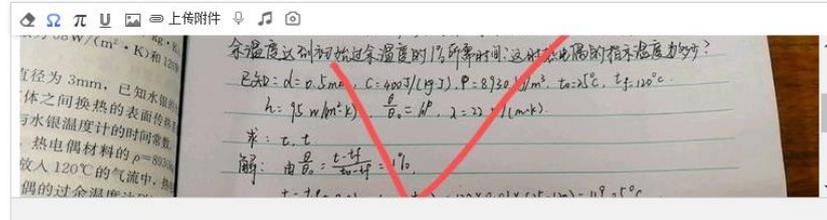
学生答案:



快速打分: A B C D E
 回答正确 回答错误 回答基本正确

[转发至讨论](#)

添加批语



题目分值: 50.0 分
 得分: 分

图 19 学生制作的思维导图



八、课程成绩评定方式

采用形成性评价和终结性评价相结合的评价方式。依托在线教学平台，综合网站访问情况、视频观看情况、参与活动情况、与同学交流情况、与教师交流情况、学习努力程度作为形成性评价，将期末考试成绩作为终结性评价，根据权重得出学生最终成绩。

课程成绩组成：线上成绩 24%+出勤 6%+期末考试 70%。

线上成绩取决于在线视频观看情况、PPT 等资料浏览时长、网站点击次数、测验题以及线上讨论情况组成。

期末考核题目分值按照大纲课时安排比例出题，其中主观题和客观题比例为 60:40。

为了让学生明确自身在知识掌握和认知能力情况，统计了学生各小题集相关知识节点分值，并根据教师教学研究成果“基于模糊层次分析的学生认知能力评价”（已录用，未见刊）从知识维度和认知历程维度对学生认知能力进行评价，从记忆、理解、应用、分析、创造和评价六个方面给学学生认知能力的相对强弱，为学生今后学习提供建议。

图 20 期末各小题得分统计

姓名	填空										小计	选择										小计	判断										小计	简答题				小计	计算题			小计	总分
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		1	2	3	4		1	2	3		
莫天成	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	0	0	1	1	1	7	4	2	8	4	18	0	10	3	12	80		
张凌	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	0	0	1	1	1	7	4	6	6	6	22	0	11	7	18	72		
孟新欣	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9	0	2	0	0	0	2	2	2	2	2	12	1	0	1	0	1	1	1	0	6	4	4	6	5	10	2	12	3	17	63		
陈康	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	16	1	0	1	0	0	1	1	1	6	4	2	6	6	18	6	12	12	30	80		
段天健	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	8	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	1	0	1	1	1	9	4	2	3	3	12	4	12	4	20	65		
秦儒	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	1	0	1	1	1	9	4	4	6	6	20	4	12	5	21	73		
李旭	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	20	1	1	1	0	0	1	1	1	8	4	4	6	6	20	4	12	6	18	76		
彭源	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18	1	1	1	0	0	1	1	1	6	6	4	6	5	21	4	12	6	22	75		
张恒儒	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2	14	1	0	1	1	1	0	1	7	6	0	6	6	18	12	12	4	28	76			
魏杰	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9	0	2	0	0	0	2	2	2	2	2	8	1	0	1	1	1	1	1	9	6	0	6	6	18	4	12	4	20	64			
王松博	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	16	1	1	1	1	0	1	1	1	9	0	0	6	5	11	4	12	2	18	58		
高山	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	5	0	2	0	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	0	1	1	1	8	4	2	6	5	17	0	12	2	14	60			
刘松强	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	9	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	18	1	0	1	0	0	1	1	1	6	6	2	3	5	18	10	12	2	24	72		
陈鑫	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	7	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	14	1	1	1	0	0	1	1	1	8	4	4	6	6	20	4	12	6	22	71		
张小强	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	20	1	1	1	1	1	1	1	0	6	6	6	6	5	23	0	12	2	14	74		
冯强	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2	14	1	0	1	1	1	1	0	1	7	6	0	6	2	14	10	12	4	26	71		
孙家瑞	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	20	1	1	1	0	1	1	1	1	9	6	4	6	6	18	2	12	6	20	77		
王喜康	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	1	0	1	1	1	9	4	0	3	3	10	4	10	2	16	61		
贾文涛	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18	1	1	1	0	1	1	1	1	9	6	6	6	3	21	4	10	8	22	77		
王鑫	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	7	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2	12	1	0	1	1	0	1	1	7	6	0	6	6	18	6	12	4	16	60			
王豪	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	0	1	1	1	9	4	6	3	5	18	6	12	3	24	77			
冯嘉琪	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	0	1	1	1	7	4	6	3	3	16	6	12	4	22	70			
曹强	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	7	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	0	0	1	1	1	7	4	6	6	3	17	6	12	6	24	71		
魏冲	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	8	2	2	0	0	2	2	2	2	2	2	12	1	1	1	1	0	1	1	1	9	6	2	6	5	19	6	12	2	20	68		
李旭东	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	16	1	1	1	1	0	1	1	8	6	0	6	6	18	4	10	4	18	68			
李丹	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18	1	1	1	0	1	1	1	8	2	6	3	3	14	2	12	0	14	80			
张景帆	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	7	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2	14	1	0	0	0	1	1	0	5	6	0	6	6	18	8	10	2	20	64			
曹瑞文	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18	1	1	1	0	1	1	1	9	4	6	3	5	11	0	6	3	9	52			
魏学飞	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	8	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	16	1	1	1	0	1	1	1	6	4	4	6	6	20	2	0	10	62	82			
中力	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	6	2	0	0	0	2	2	2	2	2	0	10	1	1	1	1	0	1	1	9	4	2	6	6	18	6	12	0	18	61			

图 21 学生认知历程维度班级相对排名

学号	姓名	记忆	理解	分析	应用	记忆	理解	分析	应用
1740402211002	惠天成	0.50	0.71	0.50	0.67	1.00	0.00	0.67	0.17
1740402211003	张澳	0.50	0.71	0.83	0.89	1.00	0.00	0.83	0.58
1740402211004	孟新欣	0.88	0.00	0.67	0.44	1.00	0.17	1.00	0.25
1740402211005	陈康	0.63	0.57	0.50	0.89	1.00	0.50	1.00	1.00
1740402211006	段天赐	0.38	1.00	0.50	0.22	1.00	0.33	1.00	0.40
1740402211007	燕恒	0.63	0.57	0.67	0.89	1.00	0.33	1.00	0.50
1740402211008	王旭	1.00	0.86	0.67	1.00	1.00	0.33	1.00	0.20
1740402211009	彭源	0.75	0.57	0.83	0.78	0.67	0.33	1.00	0.60
1740402211010	张恒恒	0.75	0.43	0.50	0.75	1.00	1.00	1.00	0.40
1740402211011	程亮	0.50	0.29	0.50	0.56	1.00	0.33	1.00	0.40

图 22 学生记分册

西安航空学院成绩登记表																																															
人数:共(42)人		班级名称:能源动力2109				课程名称:传热学				任课老师签名:				2019年8月31日																																	
序号	学号	姓名	平时成绩												期末成绩		总分																														
			考勤 (包含请假、迟到、旷课) 平时分的15%												小计	作业				小计	课堂提问 翻转课堂 A/B/C/D 平时分的30%				小计	课堂笔记、课内实验等 学习通 A/B/C/D 平时分的40%				小计	试卷成绩	折算项															
			平时成绩													平时成绩					平时成绩					平时成绩																					
1	1440402180211	宋超	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	A	B	A	A	A	A	13	(8)	14		11	25	95				38	91	75	50.5
2	1440402180331	张宇航	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	B	A	A	A	B	A	A	A	13	(5)	14		7	21	85				34	83	76	53.2
3	1540402190516	周佳华	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	B	A	A	A	A	14	(1)	14		13	27	86				34	90	73	51
4	1640402200722	刘克凡	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	B	A	A	A	A	A	14	(9)	14		8	22	100				40	91	72	59.9
5	1640402200828	董启超	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	C	A	A	A	A	12	(3)	14		10	24	96				32	89	81	52.7
6	1740402210901	魏泽童	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	A	A	B	A	A	A	A	A	14	(5)	14		7	21	117				32	88	73	51.1
7	1740402210902	侯瑞翌	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	A	A	A	B	A	A	A	A	14	(9)	14		10	24	84				32	86	76	53.2
8	1740402210903	李嘉琦	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	A	A	A	A	A	15	(9)	14		10	24	94				32	92	63	49.1
9	1740402210904	郝夏宇	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	A	A	B	A	A	A	13	(8)	15		13	28	88				35	91	75	52.5
10	1740402210905	薛博文	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	A	C	A	A	B	A	A	A	11	(5)	14		7	21	96				32	84	73	51.1
11	1740402210906	李浩杰	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	A	A	A	A	A	C	11	(1)	14		13	27	85				34	87	67	49.9
12	1740402210907	李洋	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	B	A	A	B	A	13	(2)	15		12	27	96				32	93	60	42
13	1740402210908	罗锦锴	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	A	A	A	B	A	A	13	(9)	15		10	25	85				38	91	77	49.7
14	1740402210909	于瑞洋	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	C	A	A	B	B	A	A	A	10	(6)	14		8	22	95				38	84	68	47.6
15	1740402210910	刘双庆	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	B	A	A	A	B	A	13	(1)	14		13	27	83				33	88	63	49.1
16	1740402210911	雷煜航	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	A	B	A	A	A	A	A	B	13	(7)	14		11	25	85				34	86	67	46.9
17	1740402210912	陈卓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	B	A	B	A	A	B	A	B	11	(2)	14		10	24	96				32	88	87	25.9
18	1740402210913	王也民	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	B	A	B	A	A	A	13	(3)	14		7	21	93				32	86	54	47.8
19	1740402210914	刘俊浩	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	A	A	B	A	A	A	13	(2)	14		10	24	80				32	84	68	47.6
20	1740402210915	刘鑫鑫	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	B	A	A	A	A	A	B	B	13	(6)	15		10	25	85				34	87	65	45.5
21	1740402210916	郭丁	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	A	A	A	C	A	A	A	A	12	(9)	14		10	24	97				32	89	69	48.3
22	1740402210917	周喆	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	A	A	A	A	C	A	11	(9)	14		8	22	83				32	81	77	49.7
23	1740402210918	张建	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	A	A	B	A	A	14	(3)	15		9	24	85				34	87	67	49.9
24	1740402210919	李涛	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	B	A	A	B	A	A	A	A	13	(3)	14		7	21	83				32	82	62	46.4
25	1740402210920	孙建业	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	A	A	A	A	A	15	(1)	15		15	30	96				38	98	83	52.1
26	1740402210921	郭超	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	A	A	A	A	A	14	(9)	14		10	24	98				32	92	75	52.5

西安航空学院成绩登记表																																																									
人数:共(42)人			班级名称:能源动力2109					课程名称:传热学					任课老师签名:			2019年8月31日																																									
序号	学号	姓名	平时成绩														期末成绩		总分																																						
			考勤 (包含请假、迟到、旷课)														平时成绩合计	折卷成绩																																							
			平时分的15%																																																						
作业														课程提问		课堂笔记、课内实验等		学习通																																							
A/B/C/D														A/B/C/D		A/B/C/D		A/B/C/D																																							
27	1740402210922	司蕊文	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	12	90	+	115	10	25	87			324.9	92.69	42		
28	1740402210923	强蕊	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	12	90	0	14	13	27	94			321.4	92.71	41
29	1740402210924	梁佳妮	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	13	90	+	15	9	24	87			328	87.60	42
30	1740402210925	余春青	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	14	90	+	14	8	22	82			32.8	84.62	41
31	1740402210926	康佳元	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	12	80		14	11	25	83			32.2	85.64	41
32	1740402210927	冯家豪	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	A	C	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	11	80		14	11	25	83			32.2	79.78	41
33	1740402210928	于盟	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	12	60		14	8	22	89			35.6	84.44	41
34	1740402210929	谢维康	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	14	90	+	15	13	28	89			37.6	90.66	42
35	1740402210930	张依依	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	13	90	+	15	13	28	89			37.6	96.76	42
36	1740402210931	余逸	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	14	60		14	8	22	88			37.2	90.63	41
37	1740402210932	吕小凯	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	14	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	12	70		14	8	22	87			33.8	87.72	41
38	1740402210934	杨赛	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	14	60		14	10	24	84			33.6	87.43	41
39	1740402210935	王海彬	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	B	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	13	90	+	15	12	27	85			38	92.69	41
40	1740402210936	宋子朝	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	14	90	+	15	9	24	83			37.2	86.68	41
41	1740402210937	杨瑞涛	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	B	B	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	11	60		14	7	21	89			39.6	87.69	41
42	1740402210938	白璐	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	15	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	12	60		14	7	21	71			28.4	76.60	41

考勤: 缺1次扣1分;
 缺2次扣2分;
 缺3次扣3分;
 缺4次扣4分;
 缺5次扣5分;
 缺6次,无考试资格。

作业: 此项满分15分。
 ① A扣0分;
 ② B扣1分;
 ③ C扣3分;
 ④ D扣5分。

翻转课堂:
 ① 按组打分;
 ② 讨论课效果良好组长比组员高1分。
 ③ 生生评。根据现场打分,主讲、主问比组员高2分。

学习通:
 成绩来源于学习通网站。

图 23 “模糊理论在学生认知能力评价中的应用”录用通知



International Journal of Continuing Engineering Education and Life-Long Learning

ISSN: 1560-4624

ACCEPTANCE LETTER

Reference of below mentioned manuscript entitled "Application of Fuzzy AHP in the Evaluation of Students' Cognitive Ability" has been accepted to publish in International Journal of Continuing Engineering Education and Life-Long Learning.

ID: IJCELL-49337
 TITLE: Application of Fuzzy AHP in the Evaluation of Students' Cognitive Ability
 AUTHORS: Wei Zhaohui, Luo Ziyang, Sang Peng, Du Juan

We appreciate your excellent paper for the publication in the journal. We also look forward to our future interactions with you as an author, reviewer, or an Editorial Board Member.

Sincerely,

 Editors-in-Chief

九、反思

预先设置问题，采用启发法和讨论法，引导学生主动思考一些传热问题，并分组讨论。针对周期性非稳态问题，提出一些生活、或生产的案例。通过 PPT 发布习题，巩固所学内容，纠正易混淆的知识点。通过学习通上的微课，让学生进行课前预习和课后巩固，加深学习效果。



2021 年 3 月 28 日

附件3 最近一学期的教学日历

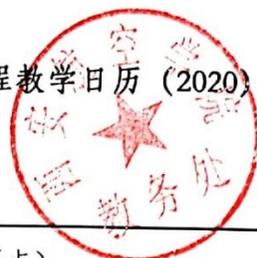
国家级一流本科课程申报课程教学日历 (2020)

申报学校 (盖章):

课程名称: 传热学

课程负责人:

魏朝晖



序号	日期	周次	讲次	学时 (分钟)	教学内容 (要点)	授课地点	学生 人数	教学形式
1	2020.9.7	1	1	2 (90分钟)	绪论: 了解传热学的研究对象及其在工程技术中应用; 记忆、理解热量传递的三种方式的概念、特点; 掌握传热过程的概念以及计算; 通过本次课内容, 使学生能够确定传热学的研究对象及其在工程技术中应用, 熟悉热量传递的三种基本方式, 认识传热过程的初步概念及计算	阎科D177 (能源动力181) 阎教D1234 (能源动力182)	69	线下
2	2020.9.9	1	2	2 (90分钟)	导热的基本定律和导热系数: 记忆、理解和应用导热的基本概念和傅立叶定律; 了解工程材料的导热率; 通过本次课内容, 使学生能够确定导热基本的计算方法及定律, 能够描述工程材料的导热率, 能够通过温度场、等温面、等温线, 温度梯度来描述传热特性	阎教d1218 (能源动力181) 阎教D1214 (能源动力182)	69	线下
3	2020.9.14	2	3	2 (90分钟)	导热微分方程式及导热过程的单值性条件: 记忆、理解导热微分方程式及单值性条件, 并能写出一些较为简单的导热现象的导热微分方程式和单值性条件	阎科D177 (能源动力181) 阎教D1234 (能源动力182)	69	线下
4	2020.9.16	2	4	2 (90分钟)	通过平壁的导热: 记忆、理解通过单层 (多层) 平壁的导热的导热计算; 通过本次课内容, 使学生能够计算简单的单层 (多层) 平壁的导热, 并能分析一些单层 (多层) 平壁的稳态导热现象	阎教d1218 (能源动力181) 阎教D1214 (能源动力182)	69	线下
5	2020.9.21	3	5	2 (90分钟)	通过圆筒壁的导热: 记忆、理解通过单 (多层) 圆筒壁的导热热阻分析法、临界热绝缘直径; 通过本次课内容, 使学生能够计算和分析单 (多层) 圆筒壁的稳态导热现象	阎科D177 (能源动力181) 阎教D1234 (能源动力182)	69	线下
6	2020.9.21- 2020.9.23	3	6	2 (90分钟)	通过肋片的导热: 理解等截面直肋片的导热分析、肋效率; 通过本次课内容, 使学生能够应用等截面直肋导热的知识分析肋片的效率以及肋片强化传热的问题	阎教d1218 (能源动力181) 阎教D1214 (能源动力182)	69	线上+分组讨论与实践

序号	日期	周次	讲次	学时 (分钟)	教学内容(要点)	授课地点	学生 人数	教学形式
7	2020.9.28	4	7	2 (90分钟)	非稳态导热的基本概念和集总参数法;记忆、理解非稳态导热的基本概念、掌握集总参数法;通过本次课内容,使学生能够运用集总参数法分析求解集总体传热问题;理解集总参数法,记忆、理解集总参数法的公式;使学生能够应用本次课学习内容分析、计算集总体传热问题	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线下
8	2020.9.30	4	8	2 (90分钟)	无限大平壁的瞬态:理解无限大平壁的瞬态导热的计算方法,记忆、理解无限大平壁瞬态导热温度场的公式;使学生能够应用本次课学习内容分析、计算无限大平板瞬态导热问题	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线下
9	2020.10.5	5	9	2(90分钟)	半无限大和其它物体的瞬态导热:理解半无限大和其它物体的瞬态导热问题,能分析一些简单的半无限大和其它物体的瞬态导热问题	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线下
10	2020.9.30- 2020.10.7	5	10	2 (90分钟)	周期性非稳态导热:理解周期性非稳态导热问题,记忆周期性非稳态导热的结论,并能应用周期性非稳态导热的结论分析简单的周期性非稳态导热问题	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	翻转课堂+分组案例讨论
11	2020.10.8- 2020.10.12	6	11	2 (90分钟)	建立离散方程的方法和稳态导热问题的数值计算:记忆、理解建立离散方程的方法、步骤,记忆、理解稳态导热问题的数值计算方法,使学生能够应用稳态导热问题数值求解方法离散一些简单稳态方程及边界条件	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	翻转课堂+分组案例讨论
12	2020.10.14	6	12	2 (90分钟)	非稳态导热的数值计算:记忆、理解非稳态导热问题的数值计算方法	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线下
13	2020.9.15- 2020.10.19	7	13	2 (90分钟)	对流换热概述及微分方程组:记忆、理解对流换热的分类、影响因素,记忆、理解对流换热的微分方程组,使学生能够区分对流换热的类型,使学生能应用本次课学习内容简单分析一些对流换热的增强和削弱方法,使学生能够建立一些简单对流换热问题的数学方程	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线上+实践活动
14	2020.10.21	7	14	2 (90分钟)	对流换热的边界层微分方程组:记忆、理解对流换热的边界层微分方程组,使学生能够通过流动边界层和热边界层概念建立对流换热问题的微分方程组及定解条件	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线下

序号	日期	周次	讲次	学时 (分钟)	教学内容(要点)	授课地点	学生 人数	教学形式
15	2020.10.26	8	15	2 (90分钟)	动量传递和热量传递的类比:理解动量传递、热量传递的类比方法,记忆简单雷诺类比律和柯尔朋类比律	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线下
16	2020.10.22- 2020.10.28	8	16	2 (90分钟)	相似理论基础:理解相似理论基础,能够通过相似原理分析典型对流换热准则数的定义式及物理意义	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线上+分组案例讨论
17	2020.10.29- 2020.11.2	9	17	2 (90分钟)	管内受迫流动:记忆、理解管内受迫流动相关知识,使学生能够运用准则方程(实验关联式)计算有限空间自然对流换热问题	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线上+分组案例讨论
18	2020.11.4	9	18	1 (45分钟)	外掠圆管对流换热:记忆、理解外掠圆管对流换热相关知识,使学生能够运用准则方程(实验关联式)计算简单外掠圆管对流换热问题	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线下
19	2020.11.4- 2020.11.9	9-10	19	3 (135分钟)	自然对流换热:记忆、理解自然对流换热的基本知识,使学生能够运用准则方程(实验关联式)计算简单自然对流换热问题	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线上+分组讨论与实践
20	2020.11.11	10	20	2 (90分钟)	凝结换热:记忆、理解凝结换热的基础知识,使学生能够区分凝结与沸腾换热现象及分类,能够运用膜状凝结分析解及实验关联式,能分析影响膜状凝结的因素及强化换热的方法	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线下
21	2020.11.16- 2020.11.18	11	21	3 (135分钟)	沸腾换热:记忆、理解沸腾换热基础知识,使学生能够区分沸腾换热现象及分类,能够说明大容器饱和沸腾曲线的含义,能够应用沸腾换热实验关联式,分析影响沸腾换热的因素及强化换热的方法	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线下
22	2020.11.18- 2020.11.23	11- 12	22	2 (90分钟)	热辐射的基本概念和黑体辐射特性:记忆、理解热辐射的基本概念和黑体辐射特性	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线上+案例分析

序号	日期	周次	讲次	学时 (分钟)	教学内容(要点)	授课地点	学生 人数	教学形式
23	2020.11.23- 2020.11.25	12	23	2 (90分钟)	实际物体辐射特性:记忆、理解实际物体的辐射特性,使学生能够通过相关概念和定律分析热辐射现象	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线上+分组讨论+案例分析
24	2020.11.25- 2020.11.30	12- 13	24	2 (90分钟)	黑体表面间的辐射换热和角系数的确定方法:记忆、理解黑体表面间的辐射换热、角系数的确定方法,使学生能够计算两固体漫灰表面间的辐射换热问题	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线上+分组讨论+案例分析
25	2020.11.30- 2020.12.2	13	25	2 (90分钟)	灰表面间的辐射换热和气体辐射和太阳辐射:记忆、理解灰表面间的辐射换热,了解气体辐射和太阳辐射,使学生能够通过辐射换热等效网络分析法区分表面辐射热阻及空间辐射热阻,并分析辐射换热的强化与削弱的途径	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线下
26	2020.12.2- 2020.12.7	13- 14	26	2 (90分钟)	通过肋片的传热、复合传热的计算和传热的增强和削弱:记忆、理解通过肋片的传热、复合传热的计算、传热的增强和削弱方法,使学生能够计算平壁、圆管传热系数,能够求解临界绝热直径,确定间壁式换热器的主要型式,能够分析强化传热及隔热保温技术措施	阎科D177(能源动力181) 阎教D1234(能源动力182)	69	线上+案例分析
27	2020.12.7- 2020.12.9	14	27	3 (135分钟)	换热器的计算:记忆、理解间壁式换热器的设计、校核方法,使学生能够运用本次课学习内容对简单间壁式换热器进行热设计和热校核	阎教d1218(能源动力181) 阎教D1214(能源动力182)	69	线下

附件 4 最近一学期的测验、考试（考核）及答案（成果等）

西安航空学院课程考试试卷

2020~2021 学年第一学期期末考试

传热学 试卷 A

题号	一	二	三	四	五	总分	总分人
得分							
阅卷人							

适用班级：能源动力 181、能源动力 182、建筑环境 181、建筑环境 182

得分	
----	--

一、填空题（每题 1 分，共 10 分）

- _____ 传递过程的推动力是温差。
- 假定某物体温度分布的表达式为 $t = 50 - 7x$ ，此温度场为_____ 维温度场。
- 一般情况下，金属的导热系数_____（>、<或=）非金属的导热系数。
- 在同样的加热条件下，物体热扩散率 α 的数值愈大，物体内部各处的温度差别愈_____。
- $Fo < 0.2$ 时，是瞬态温度变化的初始阶段（或非正规状况阶段），该阶段各点温度变化速率_____（相同或不同）。
- 一维非稳态内节点显式差分格式的稳定性条件是_____。
- 对流换热过程微分方程式中的 $\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{w,x}$ 指坐标为 $(x, 0)$ 处_____ 的温度梯度。
- 管内强迫对流换热，常物性流体在热充分发展段时，对流换热系数 h 为_____。
- 辐射强度指物体表面朝着某给定方向、对垂直于该方向的单位投影面积而言，在单位时间、单位立体角内所发射的_____ 的能量。
- 同一壳管式换热器，_____ 布置时对数平均温差最大。

得分	
----	--

二、单项选择题（每题 2 分，共 20 分）

- 下列关于导热说法错误的是（ ）。
 - 可以在固体、液体、气体中发生
 - 物体直接接触
 - 不依靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而传递热量
 - 在引力场下单纯的导热只发生在密实的固体中
- 下列导热过程傅立叶定律表述中，不正确的是（ ）。
 - 热流密度与传热面积无关
 - 导热量与温度梯度成正比
 - 热流密度与传热面积成正比
 - 导热量与导热距离成反比
- 双层平壁稳态导热，两层壁厚相同，各层的导热系数分别为 λ_1 和 λ_2 ，其对应的温度差分别为 Δt_1 和 Δt_2 ，若 $\Delta t_1 > \Delta t_2$ ，则（ ）。
 - $q_1 > q_2$
 - $q_1 < q_2$
 - $\lambda_1 > \lambda_2$
 - $\lambda_1 < \lambda_2$
- 导热系数 λ 为常数，无内热源一维稳态单层圆筒壁的导热，在第一类边界条件下其温度场为（ ）。
 - 三次曲线
 - 二次曲线
 - 直线
 - 对数曲线
- 对流换热系数为 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、温度为 20°C 的空气流经面积为 2 m^2 的 50°C 的壁面，其对流换热的热流密度为（ ）。
 - $3000 \text{ W}/\text{m}^2$
 - 3000 W
 - $6000 \text{ W}/\text{m}^2$
 - 6000 W
- 流体混合对流传热的准则方程可写成（ ）。
 - $Nu = f(Re, Gr, Pr)$
 - $Nu = f(Re, Pr)$
 - $Nu = f(Gr, Pr)$
 - $Nu = f(Bi, Pr)$
- 下述哪种手段对提高管内强迫对流传热系数是无效的（ ）。
 - 提高流速
 - 增大管径

西安航空学院课程考试试卷

C. 采用入口效应 D. 采用导热系数大的流体

8、饱和沸腾时，壁温与饱和温度之差称为（ ）。

A. 平均温度 B. 沸腾温差 C. 相对温差 D. 绝对温差

9、发射体每单位面积、单位时间、向半球空间所发射的全波长能量称为（ ）。

A. 有效辐射 B. 辐射强度 C. 辐射力 D. 黑度

10、2011年9月29日，我国天宫一号目标飞行器成功发射，标志着我国全面载人航天飞行进入了新的阶段。天宫一号在轨飞行过程中，由于太阳辐射、本身发动机排气、空气动力加热等因素会经受高温环境，为满足舱内设备运行环境要求，必须采取合适的热控制方法。下列属于隔热措施但隔热效果不大的是（ ）。

A、在天宫一号目标飞行器外采用耐热隔热保温材料减少热量传导

B、外壳表面覆盖特殊涂层减少表面的辐射吸热

C、采取措施减少飞行器表面对流传热

D、在外壳不同部位之间布置热管，将热端热量导向冷端，减少部件、仪器之间的温差

得分	
----	--

三、判断题（每题1分，共10分）

1、热量传递的基本方式是热传导、对流换热和热辐射。 （ ）

2、温度不同的等温面或等温线彼此能相交。 （ ）

3、根据导热微分方程式可以确定具体、特定的导热过程 （ ）

4、冷却率（加热率） m 表示过余温度的相对变化率。 （ ）

5、显式差分格式无条件稳定。 （ ）

6、同名已定特征数相等，那么现象必定相似。 （ ）

7、膜状凝结换热的 h_x 与液膜流态和厚度直接相关，并且沿着重力方向先增大，

后减小。 （ ）

8、沸腾温差 Δt 增加，气泡量减少，对流换热系数 h 增加。 （ ）

9、黑体表面为漫辐射表面。 （ ）

10、有效辐射指的是单位时间内、由灰体的单位表面积所射离的总能量。 （ ）

得分	
----	--

四、问答题（4小题，每题6分，共24分）

1、在寒冷的北方地区，建房用砖采用实心砖还是多孔的空心砖好？为什么？
答：

2、其它条件相同时，同一根管子横向冲刷与纵向冲刷相比，哪个的表面换热系数大？为什么？
答：

西安航空学院课程考试试卷

3、2014年，旨在关注渐冻人症（ALS）的“冰桶挑战”活动风靡全球。为了响应这一活动，俄罗斯科学家 Anton Kononov 用一桶零下 195°C 液氮迎头浇下。为证明桶内液体的真实性，Kononov 还将一根树枝伸进桶中，可以看到，树枝立刻被冰封，并很轻易地在他手中被碾成了碎片。然而被如此寒冷液体浇下后，Kononov 却只是摇了摇头，虽然很冷，但完好无损。为确认他确实安然无恙，他的朋友们还上前触碰他的脸颊，可以看到 Kononov 的皮肤依然是柔软的，而后者却对着镜头哈哈大笑。请从**传热**的角度解释俄罗斯科学家 Kononov 为什么完好无损。

注：题目所叙述的“液氮浇头”实验很危险，请勿尝试。

答：

4、从换热表面的结构而言，强化凝结换热的基本思想是什么？强化沸腾换热的基本思想是什么？

答：

得分	
----	--

五、计算题（3 小题，每题 12 分,共 36 分）

1、一直径为 5cm，长为 30cm 的钢圆柱体，初始温度为 30°C ，将其放入炉温为 1200°C 的加热炉中加热，升温到 800°C 时方可取出。已知钢圆柱体与烟气间的表面传热系数为 $140 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，钢球的比热 $c = 0.48 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，密度 $\rho = 7753 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，导热系数 $\lambda = 33 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。问需要多少时间才能达到加热要求？。

解：

西安航空学院课程考试试卷

2、空气以 10 m/s 速度外掠 0.8 m 长平板, $t_f = 80^\circ\text{C}$, $t_w = 30^\circ\text{C}$, 计算该平板在临界雷诺数 Re_c 下的对流换热系数 h_c 、全板平均表面传热系数以及换热量 (板宽为 1 m, 临界雷诺数 $Re_c = 5 \times 10^5$)。

注: 层流时平板表面局部努塞尔数 $Nu_x = 0.332Re_x^{1/2}Pr^{1/3}$, 平均努塞尔数 $Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3}$ 。

空气物性参数表

	$\lambda[W/(m \cdot K)]$	$\nu(m^2/s)$	Pr
30°C	2.67×10^{-2}	16×10^{-6}	0.701
55°C	2.87×10^{-2}	18.46×10^{-6}	0.697
80°C	3.05×10^{-2}	21.09×10^{-6}	0.692

解:

3、热水瓶瓶胆是一个夹层结构, 且夹层表面涂有水银, 水银层的发射率为 0.04。瓶内存放 100°C 的开水, 周围环境温度为 20°C。设瓶胆内外层的温度分别与水和周围环境温度大致相同, 画出瓶胆的辐射网络图, 并求出瓶胆的散热量。如果用导热系数为 0.04 W/(m·K) 的软木代替瓶胆夹层保温, 试以平壁结构估算, 需要多厚的软木才能达到热水瓶原来的保温效果?

解:

西安航空学院课程考试试卷

2020~2021 学年第一学期期末考试

传热学 试卷 A 答案

适用班级：能源动力 181、能源动力 182、建筑环境 181、建筑环境 182

一、填空题（每题 1 分，共 10 分）

1、热量。2、一。3、>。4、小。5、不同。6、 $Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2}$ 。7、流体。8、常数（定值、不变等）。9、全波长。10、逆流。

二、单项选择题（每题 2 分，共 20 分）

题号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
答案	C	C	D	D	A	A	B	B	C	C

三、判断题（每题 1 分，共 10 分）

题号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
答案	×	×	×	×	×	×	×	×	√	√

四、问答题（4 小题，每题 6 分，共 24 分）

注：意思正确得满分；半对时，改卷教师可根据错误情况酌情扣分（出现小数点时，四舍五入）；完全错误不得分。

全对标准：能用传热学的知识分析问题，且意思与标准答案相同或高度相近。

半对标准：能用传热学的知识分析问题，但意思与标准答案核心部分相同或高度相近。

1、答：多孔空心砖好（2 分）。为了提高建筑节能的效果，必须尽量减少砖墙的散热损失。在其他条件相同时，实心砖的热量传递只是砖的导热（2 分）。而多孔空心砖中充满着不动的空气，其导热包括砖的导热和空气的导热，空气在纯导热时，导热系数很低（2 分），是很好的绝热材料，是提高砖墙导热阻力的有效方法。

2、答：同一根管子横向冲刷比纵向冲刷相比的表面换热系数大（2 分）。因为纵向冲刷时相当于外掠平板的流动，热边界层较厚，热阻较大（2 分）；而横向冲刷时热边界层较薄且在边界层由于分离而产生的旋涡，增加了流体扰动，因而换热

增强（2 分）。

3、答：常压下液氮的沸点是零下 196℃，人体的温度是 36℃左右。当液氮接触到人体表面时，人体与液氮之间的沸腾温差是 232℃左右。根据大容器饱和沸腾曲线知道，此时发生膜态沸腾（3 分），人体与液氮之间产生了液氮的蒸汽，阻碍了液氮与人体之间的热量传递，在极短的时间内，人体与液氮之间的人体之间的热流量极小，不足以伤害人体。所以，俄罗斯科学家 Konovalov“液氮浇头”后才能完好无损（3 分）。

4、答：从换热表面的结构而言，强化凝结换热的基本思想是尽量减薄粘滞层在换热表面上液膜的厚度（3 分）；强化沸腾换热的基本思想是尽量增加换热表面的汽化核心数（3 分）。

五、计算题（3 小题，每题 12 分，共 36 分）

注：意思正确得满分；半对时，改卷教师可根据错误情况酌情扣分（出现小数点时，四舍五入）；完全错误不得分。

全对标准：能用传热学的知识分析问题，且意思与标准答案相同或高度相近。

半对标准：能用传热学的知识分析问题，但意思与标准答案核心部分相同或高度相近。

1.解：首先检验是否可以采用集总参数法。为此计算 Bi_v 数：

$$Bi_v = \frac{h(V/A)}{\lambda} = \frac{h \left[\left(\frac{\pi}{4} d^2 l \right) / \left(\pi d l + 2 \times \frac{\pi}{4} d^2 \right) \right]}{\lambda} = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{dl/4}{l+d/2}$$

$$= \frac{140}{33} \times \frac{0.05 \times 0.3/4}{0.3+0.05/2} = 0.049 \quad (2 \text{ 分})$$

(2 分)

$Bi_v < 0.1M = 0.05$ (或 $Bi_v < 0.05$)，可以采用集总参数法 (2 分)

$$\frac{hA}{\rho c V} = \frac{h}{c \rho} \cdot \left(\frac{V}{A} \right)^{-1} = \frac{h}{c \rho} \cdot \frac{4(l+d/2)}{dl}$$

$$= \frac{140 \times 4 \times (0.3+0.05/2)}{0.48 \times 10^3 \times 7753 \times 0.05 \times 0.3} = 0.326 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

(2 分)

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t-t_{\infty}}{t_0-t_{\infty}} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} \cdot \tau\right)$$

↓

(2 分)

$$\frac{800-1200}{30-1200} = \exp(-0.326 \times 10^{-3} \times \tau)$$

解得， $\tau = 3290 \text{ s} = 0.91 \text{ h}$ (2 分)

西安航空学院课程考试试卷

2.解: (1) 根据临界雷诺数求解由层流转变到紊流时的临界长度:

$$t_m = \frac{t_w + t_f}{2} = \frac{30 + 80}{2} = 55 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2 \text{ 分})$$

此时空气得物性参数为:

$$\lambda = 2.87 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}), \nu = 18.46 \times 10^{-6}, Pr = 0.697$$

$$Re_c = \frac{ux_c}{\nu}$$

$$x_c = \frac{Re_c \cdot \nu}{u} = \frac{5 \times 10^5 \times 18.46 \times 10^{-6}}{10} = 0.92 \text{ m} \quad (2 \text{ 分})$$

因为

$$h_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$$

所以

$$\begin{aligned} h_c &= 0.332 \frac{\lambda}{l} Re^{1/2} Pr^{1/3} = 0.332 \frac{2.87 \times 10^{-2}}{0.8} \times (5 \times 10^5)^{1/2} \times (0.697)^{1/3} \\ &= 7.41 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (2 \text{ 分})$$

$$(2) x_c = 0.92 \text{ m}, Re_l = \frac{ul}{\nu} = \frac{10 \times 0.8}{18.46 \times 10^{-6}} = 4.33 \times 10^5 < Re_c \quad (2 \text{ 分})$$

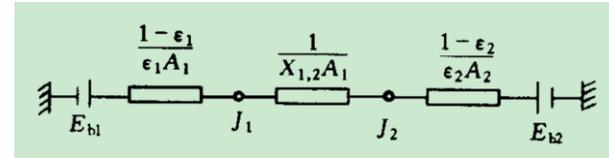
全板平均表面传热系数

$$\begin{aligned} h &= 0.664 \frac{\lambda}{l} Re^{1/2} Pr^{1/3} = 0.664 \times \frac{2.87 \times 10^{-2}}{0.8} \times (4.33 \times 10^5)^{1/2} \times (0.697)^{1/3} \\ &= 13.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (2 \text{ 分})$$

全板平均表面换热量

$$\phi = hA(t_f - t_w) = 13.9 \times 0.8 \times 1 \times (80 - 30) = 557.9 \text{ W} \quad (2 \text{ 分})$$

3.解: 热水瓶瓶胆可视为两灰表面, 则辐射网络图为



(4分: 图形正确得1分, 标注正确得3分)

根据题意, $A_1 = A_2 = A$, $X_{1,2} = X_{2,1} = 1$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.04$ (2分)

瓶胆夹层间辐射传热计算式为

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{X_{1,2} A_1} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \text{ 或 } \Phi_{1,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2 \text{ 分})$$

令面积 A 为单位面积, 则瓶胆散热量为

$$q = \frac{\Phi_{1,2}}{A} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \times (373^4 - 293^4)}{0.04 + 0.04 - 1} = 13.87 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (2 \text{ 分})$$

为实现同样的散热量, 根据平壁导热计算式 $q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta}$, 得出

$$\delta = \lambda \frac{\Delta t}{q} = 0.04 \times \frac{100 - 20}{13.87} = 0.23 \text{ m} \quad (2 \text{ 分})$$

2020~2021 学年第一学期期末考试

传热学 试卷 B

题号	一	二	三	四	五	总分	总分人
得分							
阅卷人							

适用班级：能源动力 181、能源动力 182、建筑环境 181、建筑环境 182

得分	
----	--

一、填空题（每空 1 分，共 10 分）

- 1、热量传递过程的推动力是_____。
- 2、假定某物体温度分布的表达式为 $t = t_{w1} - \frac{(t_{w1} - t_{w2})}{\delta} x$ ，其中 t_{w1} 、 t_{w2} 和 δ 为常数，则此温度场为_____态温度场。
- 3、一般情况下，纯金属的导热系数_____（>、<或=）合金的导热系数。
- 4、第一类边界条件是已知任何时刻物体边界面上的_____。
- 5、 $Fo \geq 0.2$ 时，平壁内所有各点过余温度的对数都随时间按线性规律变化，变化曲线的斜率都_____，初始温度分布的影响已消失，进入了正规状况阶段。
- 6、第三类边界条件下，一维非稳态边界节点显式差分格式的稳定性条件是_____。
- 7、对流换热过程微分方程式 $\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{w,x}$ 中的 λ 指的是_____的导热率。
- 8、管内强迫对流换热，进口段的对流换热系数 h 比充分发展段的 h _____。
- 9、辐射力指的是发射体每单位面积、在单位时间、向半球空间所发射的_____能量。
- 10、同一壳管式换热器，_____布置时对数平均温差最小。

得分

二、选择题（每题 2 分，共 20 分）

- 1、下列关于热辐射说法错误的是（ ）。
 - A. 不需要物体直接接触，可以在真空中传递
 - B. 在辐射换热过程中，没有能量的转换
 - C. 只要温度大于 0K 就有能量辐射
 - D. 高温物体向低温物体辐射热能，而且低温物体向高温物体辐射热能
- 2、第二类边界条件指的是（ ）。
 - A. 已知物体边界上的温度分布
 - B. 已知物体边界上的热流密度
 - C. 已知物体表面与周围介质之间的传热情况
 - D. 已知物体边界上流体的温度与流速
- 3、双层平壁稳态导热，两层壁厚相同，各层的导热系数分别为 λ_1 和 λ_2 ，其对应的温度差分别为 Δt_1 和 Δt_2 ，若 $\Delta t_1 < \Delta t_2$ ，则（ ）。
 - A. $\lambda_1 < \lambda_2$
 - B. $\lambda_1 > \lambda_2$
 - C. $q_1 < q_2$
 - D. $q_1 > q_2$
- 4、第一类边界条件下， λ 为常数、无内热源时通过平壁的一维稳态导热（ ）。
 - A. 呈对数曲线分布
 - B. 呈直线分布
 - C. 呈二次曲线分布
 - D. $q_1 > q_2$
- 5、对流换热系数为 $120 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、温度为 20°C 的空气流经面积为 2 m^2 的 30°C 的壁面，其对流换热的传热量为（ ）。
 - A. $2000 \text{ W}/\text{m}^2$
 - B. 1200 W
 - C. 2400 W
 - D. $2400 \text{ W}/\text{m}^2$
- 6、流体纯强迫对流传热的准则方程可写成（ ）。

西安航空学院课程考试试卷

A、 $Nu = f(Gr, Pr)$

B、 $Nu = f(Re, Gr, Pr)$

C、 $Nu = f(Re, Pr)$

D、 $Nu = f(Bi, Pr)$

7、下列关于单项对流换热说法错误的是 ()。

- A. 流体外掠单管，层流时，Nu 先减小后增大
- B. 流体外掠管束，后几根管子的表面传热系数是第一排的 1.3~1.7 倍
- C. 管内强制对流换热，在常壁温或常热流边界条件下， h_x 先减小后增加
- D. 自然对流与强迫对流的相对强弱可以用 Gr/Re_0^2 的数值大小判断

8、气泡能够存在而不消失的力学条件是 ()

- A. $t_l > t_v$
- B. $p_v - p_l < 2\sigma/R$
- C. $p_v - p_l = 2\sigma/R$
- D. $t_l > t_s$

9、物体表面朝着某给定方向、对垂直于该方向的单位投影面积而言，在单位

时间、单位立体角内所发射的全波长的能量称为 ()。

- A. 有效辐射
- B. 黑度
- C. 辐射力
- D. 辐射强度

10、换热器中流体通过换热器后，可能经历的最大温差是 ()。

- A. 大热容量流体的进出口温差
- B. 小热容量流体的进出口温差
- C. 冷热流体的出口温差
- D. 冷热流体的进口温差

得分	
----	--

三、判断题 (10 小题，共 10 分)

- 1、将保温瓶的双层玻璃中间抽成真空的目的是减小对流与辐射换热。()
- 2、液体的热导率随压力 p 的升高而降低。()
- 3、单值性条件指的是初始条件和边界条件。()
- 4、热扩散系数仅出现在非稳态热量传输过程中，热扩散系数越大，物体各处温度越不均匀。()
- 5、所求节点温度前的系数等于所有相邻节点温度前系数之和，包括热流 (或热流密度) 前的系数。()

6、管内强迫对流换热，管内粗糙度 Δ 大于层流底层厚度 δ 时，换热减弱。()

7、珠状凝结比膜状凝结的表面传热系数小。()

8、气泡膨胀长大，受到的浮升力也增加；当浮升力小于气泡与壁面的附着力时，气泡就脱离壁面升入液体。()

9、对于黑体表面或漫辐射表面，辐射力 E 是任意方向辐射强度 I 的 π 倍。()

10、发射辐射能的能力愈强的物体，其吸收辐射能的能力也愈强。()

得分	
----	--

四、问答题 (4 小题，每题 6 分，共 24 分)

1、强化传热用的肋片高度增加会引起两种效果：肋效率下降及散热表面积增加。因而有人认为，随着肋片高度的增加会出现个临界高度，超过这个高度后，肋片导热热流量反而会下降。该结论是否正确性，为什么？

答：

2、什么叫大空间自然对流换热？什么叫有限自然对流换热？这与强制对流中的外部流动和内部流动有什么异同？

答：

西安航空学院课程考试试卷

3、两滴完全相同的水滴在大气压下分别滴在表面温度为120°C和 400°C的铁板

上，试问滴在哪块板上的水滴先被烧干，为什么？

答：

4、用简明语言说明强化单相强制对流换热的基本思想是什么？强化膜状凝结的

基本思想是什么？

答：

得分

五、计算题（3小题，每题12分，共36分）

1、一温度计的水银泡呈圆柱形，长20mm，内径为4mm，初始温度为 t_0 ，今将其插入到温度较高的储气罐中测量气体的温度。设水银泡同气体间的对流换热表面传热系数 $h = 11.63 W/(m^2 \cdot K)$ ，水银泡一层薄玻璃的作用可以忽略不计，试计算此条件下温度计的时间常数，并确定插入5min后温度计读数的过剩温度为初始过剩温度的百分之几？水银的物性参数为： $c = 0.138 kJ/(kg \cdot K)$ ， $\rho = 13110 kg/m^3$ ， $\lambda = 10.36 W/(m \cdot K)$ 。

解：

西安航空学院课程考试试卷

2、一块宽 20mm、长 200mm 的平板，平均壁温为40°C。常压下20°C的空气以 10m/s 的速度纵向（沿长度方向）流过该板表面，试计算平板的对流换热量。
注：层流时平板表面局部努塞尔数 $Nu_x = 0.332Re_x^{1/2}Pr^{1/3}$ ，平均努塞尔数 $Nu = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3}$ ，临界雷诺数 $Re_c = 5 \times 10^5$ 。

空气物性参数表

	$\lambda[W/(m \cdot K)]$	$\nu(m^2/s)$	Pr
20°C	2.59×10^{-2}	15.06×10^{-6}	0.703
30°C	2.67×10^{-2}	16×10^{-6}	0.701
40°C	2.76×10^{-2}	16.96×10^{-6}	0.699

解：

3、抽真空的保温瓶胆两壁面均涂银，发射率 $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0.02$ ，内壁面温度为 100°C，外壁面温度为 25°C，表面积为 0.25m²。画出瓶胆的辐射网络图，并计算此保温瓶的辐射热损失。若用棉花代替保温瓶胆实现保温，试以平壁结构估算，需要多厚的棉花层才能起到同样的保温效果？棉花导热系数取 0.03W/(m·K)。

解：

西安航空学院课程考试试卷

2020~2021 学年第一学期期末考试

传热学 试卷 B 答案

适用班级：能源动力 181、能源动力 182、建筑环境 181、建筑环境 182

一、填空题（每题 1 分，共 10 分）

- 1、温差。2、稳。3、>。4、温度。5、相等。6、 $Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2Bi_{\Delta}+2}$ 。7、流体。8、大。
9、全波长。10、顺流。

二、单项选择题（每题 2 分，共 20 分）

题号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
答案	B	B	B	B	C	C	C	C	D	D

三、判断题（每题 1 分，共 10 分）

题号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
答案	×	×	×	×	×	×	×	×	√	√

四、问答题（4 小题，每题 6 分，共 24 分）

注：意思正确得满分；半对时，改卷教师可根据错误情况酌情扣分（出现小数点时，四舍五入）；完全错误不得分。

全对标准：能用传热学的知识分析问题，且意思与标准答案相同或高度相近。

半对标准：能用传热学的知识分析问题，但意思与标准答案核心部分相同或高度相近。

1、答：错误，因为当肋片高度达到一定值时，通过该处截面的热流密度为零（3 分）。通过肋片的热流已达到的最大值，不会因为高度的增加而发生变化（3 分）。

2、答：大空间作自然对流时，流体的冷却过程与加热过程互不影响，当其流动时形成的边界层相互干扰时，称为有限空间自然对流（3 分）。这与外部流动和内部流动的划分有类似的地方，但流动的起因不同，一个由外在因素引起的流动，一个是由流体的温度不同而引起的流动（3 分）。

3、答：在大气压下发生沸腾换热时，上述两水滴的过热度分别是 $\Delta t = t_w - t_s = 20^\circ\text{C}$ 和 $\Delta t = 300^\circ\text{C}$ ，由大容器饱和沸腾曲线，前者表面发生的是核态沸腾，后者发

生膜态沸腾（3 分）。虽然前者传热温差小，但其表面传热系数大，从而表面热流反而大于后者。所以水滴滴在 120°C 的铁板上先被烧干（3 分）。

4、答：无相变强制对流换热的强化思路是努力减薄边界层、强化流体的扰动与混合（3 分）；膜状凝结换热强化措施是使液膜减薄和顺利排出凝结液（3 分）。

五、计算题（3 小题，每题 12 分，共 36 分）

注：意思正确得满分；半对时，改卷教师可根据错误情况酌情扣分（出现小数点时，四舍五入）；完全错误不得分。

全对标准：能用传热学的知识分析问题，且意思与标准答案相同或高度相近。

半对标准：能用传热学的知识分析问题，但意思与标准答案核心部分相同或高度相近。

1.解：首先检验是否可以采用集总参数法。考虑到水银泡柱体的上端面不直接受热，故

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi R^2 l}{2\pi R l + \pi R^2} = \frac{Rl}{2(l+0.5R)} = \frac{0.002 \times 0.02}{2 \times (0.02 + 0.001)} = 0.953 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$Bi_v = \frac{h(V/A)}{\lambda} = \frac{11.63 \times 0.953 \times 10^{-3}}{10.36} = 1.07 \times 10^{-3} < 0.1M = 0.05 \quad (2 \text{分})$$

$Bi_v < 0.1M$ （2 分），可以采用集总参数法。（2 分）

时间常数为

$$\tau_c = \frac{\rho c V}{hA} = \frac{13110 \times 0.138 \times 1000 \times 0.953 \times 10^{-3}}{11.63} = 148\text{s} \quad (2 \text{分})$$

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} \cdot \tau\right) = \exp\left(-\frac{11.63 \times 5 \times 60}{13110 \times 0.138 \times 1000 \times 0.953 \times 10^{-3}}\right)$$

$$= \exp(-2.02) = 0.133 \quad (2 \text{分})$$

所以，时间常数为 148s，插入 5min 后温度计读数的过余温度为初始过余温度的 13.3%。（2 分）

2.解：(1)根据临界雷诺数求解由层流转变到紊流时的临界长度

$$t_m = \frac{t_w + t_f}{2} = \frac{40 + 20}{2} = 30^\circ\text{C} \quad (2 \text{分})$$

此时空气得物性参数为：

西安航空学院课程考试试卷

$$\lambda = 2.67 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}), v = 16 \times 10^{-6}, Pr = 0.701 \quad (2 \text{ 分})$$

根据 $Re_c = \frac{ux_c}{v}$

$$x_c = \frac{Re_c \cdot v}{u} = \frac{5 \times 10^5 \times 16 \times 10^{-6}}{10} = 0.8 \text{ m} \quad (2 \text{ 分})$$

(2)板末端的雷诺数为:

$$Re_l = \frac{ul}{v} = \frac{10 \times 0.2}{16 \times 10^{-6}} = 1.25 \times 10^5 \quad (2 \text{ 分})$$

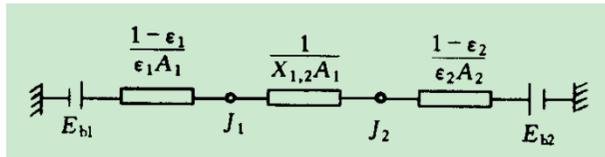
全板平均表面传热系数:

$$h = 0.664 \frac{\lambda}{l} Re^{1/2} Pr^{1/3} = 0.664 \times \frac{2.67 \times 10^{-2}}{0.2} \times (1.25 \times 10^5)^{1/2} \times (0.701)^{1/3} \\ = 27.84 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (2 \text{ 分})$$

全板平均表面换热量

$$\phi = hA(t_f - t_w) = 27.84 \times 0.2 \times 0.02 \times (40 - 20) = 2.23 \text{ W} \quad (2 \text{ 分})$$

3.解: 热水瓶瓶胆可视为两灰表面, 则辐射网络图为



(4分: 图形正确得1分, 标注正确得3分)

根据题意, $A_1 = A_2 = A$, $X_{1,2} = X_{2,1} = 1$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.02$ (2分)

瓶胆夹层间辐射传热计算式为

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{X_{1,2} A_1} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \text{ 或 } \Phi_{1,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2 \text{ 分})$$

则瓶胆散热量为

$$\Phi_{1,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = \frac{0.25 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (373^4 - 298^4)}{\frac{1}{0.02} + \frac{1}{0.02} - 1} = 1.64 \text{ W} \quad (2 \text{ 分})$$

为实现同样的散热量, 根据平壁导热计算式 $\Phi = A\lambda \frac{\Delta t}{\delta}$, 得出

$$\delta = A\lambda \frac{\Delta t}{\Phi} = 0.25 \times 0.03 \times \frac{100 - 25}{1.64} = 0.34 \text{ m} \quad (2 \text{ 分})$$

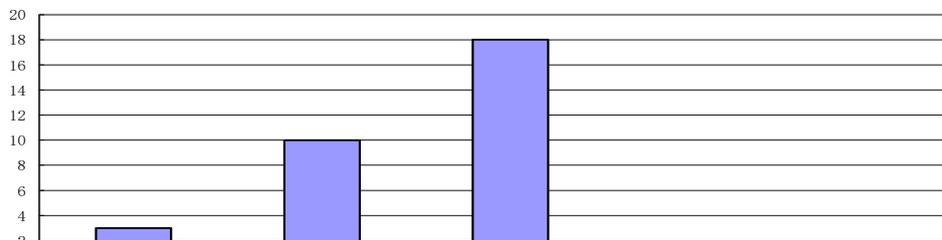
附件 5 最近两学期的学生成绩分布统计

西安航空学院试卷及成绩分析表 (试卷类)

20 20 -20 21 学年第 1 学期 开课单位: 能源与建筑学院

课程性质: <input checked="" type="checkbox"/> 必修, <input type="checkbox"/> 选修		课程名称: 传热学			
任课教师: 魏朝晖		班级: 能源动力 181			
考试时间: 120 分钟					
试卷来源: <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它		卷别: <input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B		考核方式: <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它	
卷面 质量 分析	考题要求	基本知识	理解分析	综合运用	合计
	分值	40	24	36	100
1、试卷出错: <input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> 有; 原理性错误 (图表、数据等) 0 处, 一般性错误 0 处。					
命题 质量 分析	<p>(1) “传热学”课程为是建筑环境与能源应用工程、能源与动力工程等专业的一门重要学科与技术基础教育课程, 课程性质为必修课, 总学时 56 学时。在 A 卷、B 卷各自 100 分的试卷中, “绪论” 2 课时, 对应试卷 4 分; “导热理论基础” 4 课时, 对应试卷 6 分; “稳态导热” 6 课时, 对应试卷 11 分; “非稳态导热” 8 课时, 对应试卷 14 分; “导热问题的数值求解” 4 课时, 对应试卷 2 分; “对流换热” 8 课时, 对应试卷 16 分; “单相流体对流换热” 6 课时, 对应试卷 11 分; “凝结与沸腾换热” 5 课时, 对应试卷 10 分; “热辐射的基本定律和辐射换热计算” 8 课时, 对应试卷 17 分; “传热和换热器” 5 课时, 对应试卷 9 分。“导热问题的数值求解”对应考核内容偏少, 因为这部分难度偏大, 大学本科毕业生在工作中用到的较少, 由于定位、培养要求等方面原因, 这部分内容所占分值有所减少。“热辐射的基本定律和辐射换热计算”对于试卷考核内容略多, 因为这部分内容在学生将来工作中作用较大, “建筑环境与能源应用”专业学生多会涉及到冷、热负荷的计算, “能源与动力工程专业”的学生会涉及到锅炉炉膛燃烧情况, 这些均属于“热辐射的基本定律和辐射换热计算”的内容, 所以这部分内容相对课时比例多了 1-2 分。总体而言, “传热学”试卷基本涵盖了教学大纲要求的大部分知识点, 占比基本符合课程教学大纲课时分配比例要求, 且考核都是学生以后工作中要用到的知识。</p> <p>(2) 试题中主客观题的比例为 4:6。考试题型有: 填空题、选择题、判断题、简答题、计算题四种题型进行了考查。其中填空题总分 10 分, 主要考查学生对基本概念、基本原理的记忆与理解; 选择题总分 20 分, 主要考查学生对基本概念和基本原理的理解与应用; 判断题总分 10 分, 主要考查学生对基本概念和基本原理的理解与辨析; 简答题总分 24 分, 主要考查学生分析常见问题的能力和对知识的综合应用能力; 计算题总分 36 分, 主要考查学生分析和解决传热问题的能力。因此, 试卷 A、试卷 B 题型丰富, 基本上考查了学生对知识的记忆、理解、比较、分析、综合等能力, 基本上能测验出对基本概念、基于原理的记忆、理解和比较, 也能测验出知识之间的比较、灵活应用、方法比选以及分析问题和解决问题的能力。</p> <p>(3) 虽然试卷考查了学生对基本概念以及利用基本概念分析应用问题的能力, 分析题、计算题有针对性的对主要知识点进行了考查, 考查知识较全面, 题型丰富, 但试卷命题难度适中, 符合人才培养方案定位, 符合大纲要求, 符合地方应用型大学学生的水平, 能测验出学生真实水平, 达到了考核的目的。</p> <p>(4) A、B 两套试卷重复率小于 5%, 与以往使用过的试卷重复率小于 5%, 符合学校规定要求。试题命题符合“传热学”语言习惯表示, 没有概念、原理、计算等方面错误。</p>				

成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
人数	3	10	18	1	0	86	53	70.16	90.62%
百分比	9.38%	31.25%	56.25%	3.12%	0%				



(1) 柱状图说明。从能源动力 181 班的柱状图可以看出，该班学生试卷成绩分布近似呈正态分布，其中 60 分以下的有 3 名学生，占比 9.38%；60 到 69 分的有 10 名学生，占比 31.25%；70 到 79 分的有 18 名学生，占比 56.25%；80 到 89 分的有 1 名学生，占比 3.12%；90 分的有 0 名学生，占比 0%。

(2) 各大题难度。第一道大题是填空题，类型是客观题，满分 10 分，难度系数是 0.9，学生普遍得分情况良好。第二道大题是选择题，类型是客观题，满分 20 分，难度系数是 0.6，学生普遍得分情况一般。第三大题是判断题，类型是客观题，满分 10 分，难度系数是 0.78，学生普遍得分情况中等。第四道大题是简答题，类型是主观题，满分 24 分，难度系数是 0.7，学生普遍得分情况中等。第五道大题是计算题，类型是主观题，满分 36 分，难度系数是 0.64，学生普遍得分情况一般。

(3) 各大题的答题或得分情况。第一道大题填空题，最高分 10 分，最低分 6 分，第一个填空题得分率只有 40%，说明学生对知识细节把握不牢固，未能理解“热量传递的驱动力是温差”这个知识点，学生只是单纯记住了“温差”很重要，但未理解“温差”热量传递的意义所在。第二道大题选择题，最高分 18 分，最低分 10 分，其中第二、七小题得分率只有 19%，第三小题得分率 20%，第 10 小题低分率 10%，其他小题得分情况良好，说明学生对单个知识掌握良好，但未理解知识的本质，对相近概念的联系与区别掌握较差，不能综合运用所学知识分析问题。第三道大题判断题，最高分 9 分，最低分 6 分，其中第四小题得分率为 20%，第 10 小题得分率 6%，这两道小题考核的均是概念，只是有个别字的区别，说明学生对知识的掌握浮于表面，未能深入理解知识的背景与本质。第四道大题简答题，最高分 19 分，最低分 4 分，其中第三得分率最低，得分率仅为 50%，但这不能说明学生对该知识点掌握不好，得分率低主要是因为标准答案不能覆盖所有说法，很多同学的论述意思基本正确，但具体说法与标准答案有所出入，因此判卷教师为了符合学校的判卷要求，只能根据标准答案判断，造成该题得分率低，究其原因，该题的问题也不是标准答案的问题，因为主观类题目的答案比较开放，没有严格统一的答案。第五道大题简答题，最高分 28 分，最低分 12 分，其中第一小题错的最多，得分率仅为 50%，说明学生非稳态导热的集总参数法没有掌握好，公式记忆不牢靠，应用知识的能力较弱。综合考虑，学生没掌握好的知识，内容难度均不高，试题难度也不大，主要是学生复习中，忽视了这部分简单的内容。

(4) 失分和得分较多的题目。综合看各题得分情况，学生失最多的是第一道大题的第一小题、第二大题的第三小题、第二大题的第七小题、第二大题的第十小题、第三

	<p>大题的第四小题、第三大题的第十小题、第四道大题的第三小题以及第五大题的第一小题。这些题目要考核的是非稳态导热的集总参数法的概念和计算、一些基本的概念以及知识的应用，说明学生对一些学生知识单纯记忆了知识，未能理解知识，不能灵活应用知识解决实际问题。</p> <p>(5) 总体掌握程度分析。对于“传热学”课程，能源动力 181 班学生对知识细节、背景和本质掌握不好，但单纯的记忆的内容掌握良好，说明学生学习方法存在问题，同时改变同学课堂回答问题情况一般，积极回答问题的人不多。</p>
学风分析	<p>(1) 能源动力 181 班，总体出勤情况良好，基本上能做到全勤，即使病事假等不可控因素的缺勤情况很少，主要是因为学校、学院本学期对学生出勤考核严格。</p> <p>(2) 能源动力 181 班，课下作业完成情况较好，但存在个别抄袭现象，经教育后能及时改正，大多数同学作业整洁；绝大多数同学完成了“学习通”作业，并匿名评审了其他同学的作业，表现较好，个别未及时提交作业的同学，主要学业任务较重，未及时提交作业，事后已与任课教师进行及时说明。</p> <p>(3) 在能源与建筑学院“优良学风工程”的作用下，能源动力 181 班大多数同学能抢占前排，自觉将手机交给班长管理，课上基本没有玩手机现象。</p> <p>(4) 答疑情况良好。每堂课课间，均有学生积极主动问问题。在学院安排的集中答疑时间，前来答疑解惑的学生较多，问的问题也是经过思考后提问的。</p> <p>(5) 能源动力 181 班学生出勤情况良好，课下作业完成情况良好、在线作业完成较及时、能及时观看学习通视频，个别同学需要教师催促，才能完成各项任务。</p> <p>(6) 能源动力 181 班学生学习主动性、课堂气氛活跃度、作业完成情况略有欠缺。</p>
存在的问题及改进措施	<p>1. 存在的问题</p> <p>(1) 学生对于各知识点的综合利用能力，还达不到融会贯通的程度，表现在考核知识点的形式改变后，学生就找不到关键所在，容易跑偏。</p> <p>(2) 学生对部分简单内容反而掌握不好，对部分难度问题掌握反而好。</p> <p>(3) 学生学习主动性低。</p> <p>(4) 由于学校考试制度的要求，考题必须有标准答案，而一些结合最新研究或时事的主观性应用的开放题目，不太可能有严格的标准的，就造成了教师改卷难，学生得高分难的情况。</p> <p>2. 改进措施</p> <p>(1) 在今后的教学中，应该摒弃死板的教条式理论授课，多结合生活或者工程上的实例，多引导学生思考，多鼓励学生讨论，并尽量多地累计教学素材，让学生获取更多的传热知识。</p> <p>(2) 在教学过程中，应渗透学习方法的讲解。</p> <p>(3) 进一步强化“优良学风提升工程”的推行力度。</p> <p>(4) 建议放开一些出题、改卷的权限给教师，使教师出一些开放性题目。</p>
<p>任课教师（签字）： <u>魏朝晖</u></p> <p>教研室主任（签字）： <u>刘琰</u> 2021 年 1 月 8 日</p>	

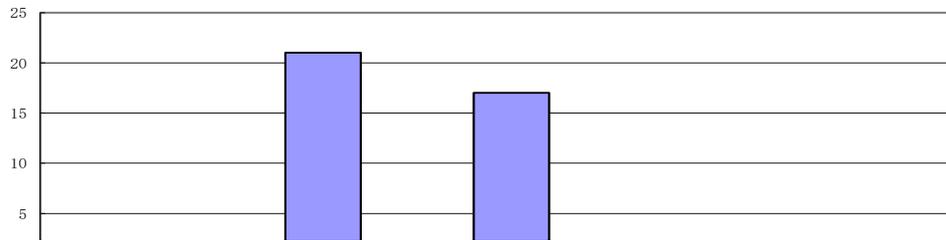
注：表中使用的字符■□，选中的用■，未选中的用□。红色的说明文字请删除

西安航空学院试卷及成绩分析表 (试卷类)

20 20 -20 21 学年第 1 学期 开课单位: 能源与建筑学院

课程性质: <input checked="" type="checkbox"/> 必修, <input type="checkbox"/> 选修		课程名称: 传热学			
任课教师: 魏朝晖		班级: 能源动力 182			
考试时间: 120 分钟		试卷来源: <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它		卷别: <input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B	考核方式: <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它
卷面 质量 分析	考题要求	基本知识	理解分析	综合运用	合计
	分值	40	24	36	100
1、试卷出错: <input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> 有: 原理性错误(图表、数据等) <u>0</u> 处, 一般性错误 <u>0</u> 处。					
命题 质量 分析	<p>(1) “传热学”课程为是建筑环境与能源应用工程、能源与动力工程等专业的一门重要学科与技术基础教育课程, 课程性质为必修课, 总学时 56 学时。在 A 卷、B 卷各自 100 分的试卷中, “绪论” 2 课时, 对应试卷 4 分; “导热理论基础” 4 课时, 对应试卷 6 分; “稳态导热” 6 课时, 对应试卷 11 分; “非稳态导热” 8 课时, 对应试卷 14 分; “导热问题的数值求解” 4 课时, 对应试卷 2 分; “对流换热” 8 课时, 对应试卷 16 分; “单相流体对流换热” 6 课时, 对应试卷 11 分; “凝结与沸腾换热” 5 课时, 对应试卷 10 分; “热辐射的基本定律和辐射换热计算” 8 课时, 对应试卷 17 分; “传热和换热器” 5 课时, 对应试卷 9 分。“导热问题的数值求解” 对应考核内容偏少, 因为这部分难度偏大, 大学本科毕业生在工作中用到的较少, 由于定位、培养要求等方面原因, 这部分内容所占分值有所减少。“热辐射的基本定律和辐射换热计算” 对于试卷考核内容略多, 因为这部分内容在学生将来工作中作用较大, “建筑环境与能源应用” 专业学生多会涉及到冷、热负荷的计算, “能源与动力工程专业” 的学生会涉及到锅炉炉膛燃烧情况, 这些均属于“热辐射的基本定律和辐射换热计算” 的内容, 所以这部分内容相对课时比例多了 1-2 分。总体而言, “传热学” 试卷基本涵盖了教学大纲要求的大部分知识点, 占比基本符合课程教学大纲课时分配比例要求, 且考核都是学生以后工作中要用到的知识。</p> <p>(2) 试题中主客观题的比例为 4:6。考试题型有: 填空题、选择题、判断题、简答题、计算题四种题型进行了考查。其中填空题总分 10 分, 主要考查学生对基本概念、基本原理的记忆与理解; 选择题总分 20 分, 主要考查学生对基本概念和基本原理的理解与应用; 判断题总分 10 分, 主要考查学生对基本概念和基本原理的理解与辨析; 简答题总分 24 分, 主要考查学生分析常见问题的能力和对知识的综合应用能力; 计算题总分 36 分, 主要考查学生分析和解决传热问题的能力。因此, 试卷 A、试卷 B 题型丰富, 基本上考查了学生对知识的记忆、理解、比较、分析、综合等能力, 基本上能测验出对基本概念、基于原理的记忆、理解和比较, 也能测验出知识之间的比较、灵活应用、方法比选以及分析问题和解决问题的能力。</p> <p>(3) 虽然试卷考查了学生对基本概念以及利用基本概念分析应用问题的能力, 分析题、计算题有针对性的对主要知识点进行了考查, 考查知识较全面, 题型丰富, 但试卷命题难度适中, 符合人才培养方案定位, 符合大纲要求, 符合地方应用型大学学生的水平, 能测验出学生真实水平, 达到了考核的目的。</p> <p>(4) A、B 两套试卷重复率小于 5%, 与以往使用过的试卷重复率小于 5%, 符合学校规定要求。试题命题符合“传热学” 语言习惯表示, 没有概念、原理、计算等方面错误。</p>				

成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
人数	0	21	17	0	0	79	60	68.5	100%
百分比	0%	55.26%	44.74%	0%	0%				



教学效果分析

(1) 柱状图说明。从能源动力 182 班的柱状图可以看出，该班学生试卷成绩均超过 60 分，0 到 59 分的有 0 名学生，占比 0%；60 到 69 分的有 21 名学生，占比 55.26%；70 到 79 分的有 17 名学生，占比 44.74%；80 到 89 分的有 0 名学生，占比 0%；90 分的有 0 名学生，占比 0%。

(2) 各大题难度。第一道大题是填空题，类型是客观题，满分 10 分，难度系数是 0.8，学生普遍得分情况良好。第二道大题是选择题，类型是客观题，满分 20 分，难度系数是 0.6，学生普遍得分情况一般。第三大题是判断题，类型是客观题，满分 10 分，难度系数是 0.75，学生普遍得分情况中等。第四道大题是简答题，类型是主观题，满分 24 分，难度系数是 0.8，学生普遍得分情况良好。第五道大题是计算题，类型是主观题，满分 36 分，难度系数是 0.62，学生普遍得分情况一般。

(3) 各大题的答题或得分情况。第一道大题填空题，最高分 10 分，最低分 4 分，第一、七、十个填空题得分率为 60%，说明学生对知识细节把握不牢固，学生只是单纯记住各知识点，但未理解概念、公式中具体每个词或符号含义。第二道大题选择题，最高分 16 分，最低分 4 分，其中第二、三、七、试小题得分率分别为 18%、10%、21%、10%，其他小题得分情况良好，第二题考核的是学生对传热学基本概念的理解及区别，第三、七、十题考核学生应用传热学知识解决实际问题的能力，这四道小题得分低，说明学生单纯记忆了传热学基本概念，但未能理解概念内涵以及概念间联系与区别，进而造成学生综合分析传热问题的能力薄弱。第三道大题判断题，最高分 9 分，最低分 5 分，其中第四小题得分率为 20%，第 10 小题得分率 0%，这两道小题考核的均是概念，这两道题得分率低，说明学生对知识的掌握浮于表面，未能深入理解知识的背景与本质。第四道大题简答题，最高分 21 分，最低分 16 分，其中第三得分率最低，得分率仅为 50%，但这不能说明学生对该知识点掌握不好，得分率低主要是因为标准答案不能覆盖所有说法，很多同学的论述意思基本正确，但具体说法与标准答案有所出入，因此判卷教师为了符合学校的判卷要求，只能根据标准答案判断，造成该题得分率低，究其原因，该题的问题也不是标准答案的问题，因为主观类题目的答案比较开放，没有严格统一的答案。第五道大题简答题，最高分 30 分，最低分 12 分，其中第一小题错的最多，得分率仅为 30%，说明学生对非稳态导热的集总参数法内容掌握较差，公式记忆不牢靠，应用知识的能力较弱。综合考虑，学生没掌握好的知识，内容难度均不高，试题难度也不大，主要是学生复习中，忽视了这部分简单的内容。

(4) 失分和得分较多的题目。综合看各题得分情况，学生失最多的是第二道大题的第二小题、第三大题的第三小题、第二大题的第十小题、第三大题的第四小题、第三

	<p>大题的第十小题、第四道大题的第三小题以及第五大题的第一小题。这些题目要考核的是非稳态导热的集总参数法的概念和计算、一些基本的概念以及知识的应用，说明学生对一些学生知识单纯记忆了知识，未能理解知识，不能灵活应用知识解决实际问题，综合分析和解决问题的能力较弱。</p> <p>(5) 总体掌握程度分析。对于“传热学”课程，相对能源动力 181 班，虽然能源动力 182 班没有卷面不及格学生，但该班同学在传热知识应用题目失分情况严重，说明该班学生熟记了传热学基本知识，但未能理解知识的内涵，不能很好的应用传热学知识分析实际问题。</p>
学风分析	<p>(1) 能源动力 182 班，总体出勤情况良好，基本上能做到全勤，即使病事假等不可控因素的缺勤情况很少，主要是因为学校、学院本学期对学生出勤考核严格。</p> <p>(2) 能源动力 182 班，课下作业完成情况较好，但存在个别抄袭现象，经教育后能及时改正，大多数同学作业整洁；绝大多数同学完成了“学习通”作业，并匿名评审了其他同学的作业，表现较好，个别未及时提交作业的同学，主要学业任务较重，未及时提交作业，事后已与任课教师进行及时说明。</p> <p>(3) 在能源与建筑学院“优良学风工程”的作用下，能源动力 182 班大多数同学能抢占前排，自觉将手机交给班长管理，课上基本没有玩手机现象。</p> <p>(4) 答疑情况良好。每堂课课间，均有学生积极主动问问题。在学院安排的集中答疑时间，前来答疑解惑的学生较多，问的问题也是经过思考后提问的。</p> <p>(5) 能源动力 182 班学生出勤情况良好，课下作业完成情况良好、在线作业完成较及时、能及时观看学习通视频，个别同学需要教师催促，才能完成各项任务。</p> <p>(6) 能源动力 182 班学生学习主动性、课堂气氛活跃度、作业完成情况略有欠缺。</p>
存在的问题及改进措施	<p>1. 存在的问题</p> <p>(1) 学生对于各知识点的综合利用能力，还达不到融会贯通的程度，表现在考核知识点的形式改变后，学生就找不到关键所在，容易跑偏。</p> <p>(2) 学生对部分简单内容反而掌握不好，对部分难度问题掌握反而好。</p> <p>(3) 学生学习主动性低。</p> <p>(4) 由于学校考试制度的要求，考题必须有标准答案，而一些结合最新研究或时事的主观性应用的开放题目，不太可能有严格的标准的，就造成了教师改卷难，学生得高分难的情况。</p> <p>2. 改进措施</p> <p>(1) 在今后的教学中，应该摒弃死板的教条式理论授课，多结合生活或者工程上的实例，多引导学生思考，多鼓励学生讨论，并尽量多地累计教学素材，让学生获取更多的传热知识。</p> <p>(2) 在教学过程中，应渗透学习方法的讲解。</p> <p>(3) 进一步强化“优良学风提升工程”的推行力度。</p> <p>(4) 建议放开一些出题、改卷的权限给教师，使教师出一些开放性题目。</p>
任课教师（签字）： <u>魏朝晖</u>	教研室主任（签字）： <u>刘琰</u> 2021 年 1 月 8 日

注：表中使用的字符■□，选中的用■，未选中的用□。红色的说明文字请删除

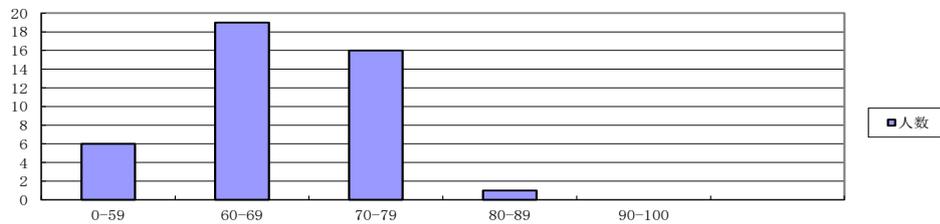
西安航空学院试卷及成绩分析表 (试卷类)



20 19 -20 20 学年第 1 学期 开课单位: 能源与建筑学院

课程性质: <input checked="" type="checkbox"/> 必修, <input type="checkbox"/> 选修		课程名称: 传热学			
任课教师: 魏朝晖		班级: 能源动力 2109			
考试时间: 120 分钟		试卷来源: <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它		卷别: <input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B	考核方式: <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它
卷面 质量 分析	考题要求	基本知识	理解分析	综合运用	合计
	分值	40	24	36	100
	1、试卷出错: <input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> 有: 原理性错误(图表、数据等) <u>0</u> 处, 一般性错误 <u>0</u> 处。				
命题 质量 分析	<p>(1) “传热学”课程为是建筑环境与能源应用工程、能源与动力工程等专业的一门重要学科与技术基础教育课程, 课程性质为必修课, 总学时 56 学时。在 A 卷、B 卷各自 100 分的试卷中, “绪论” 2 课时, 对应试卷 4 分; “导热理论基础” 4 课时, 对应试卷 6 分; “稳态导热” 6 课时, 对应试卷 11 分; “非稳态导热” 8 课时, 对应试卷 14 分; “导热问题的数值求解” 4 课时, 对应试卷 2 分; “对流换热” 8 课时, 对应试卷 16 分; “单相流体对流换热” 6 课时, 对应试卷 11 分; “凝结与沸腾换热” 5 课时, 对应试卷 10 分; “热辐射的基本定律和辐射换热计算” 8 课时, 对应试卷 17 分; “传热和换热器” 5 课时, 对应试卷 9 分。“导热问题的数值求解” 对应考核内容偏少, 因为这部分难度偏大, 大学本科毕业生在工作中用到的较少, 由于定位、培养要求等方面原因, 这部分内容所占分值有所减少。“热辐射的基本定律和辐射换热计算” 对于试卷考核内容略多, 因为这部分内容在学生将来工作中作用较大, “建筑环境与能源应用” 专业学生多会涉及到冷、热负荷的计算, “能源与动力工程专业” 的学生会涉及到锅炉炉膛燃烧情况, 这些均属于“热辐射的基本定律和辐射换热计算” 的内容, 所以这部分内容相对课时比例多了 1-2 分。总体而言, “传热学” 试卷基本涵盖了教学大纲要求的大部分知识点, 占比基本符合课程教学大纲课时分配比例要求, 且考核都是学生以后工作中要用到的知识。</p> <p>(2) 试题中主客观题的比例为 4:6。考试题型有: 填空题、选择题、判断题、简答题、计算题四种题型进行了考查。其中填空题总分 10 分, 主要考查学生对基本概念、基本原理的记忆与理解; 选择题总分 20 分, 主要考查学生对基本概念和基本原理的理解与应用; 判断题总分 10 分, 主要考查学生对基本概念和基本原理的理解与辨析; 简答题总分 24 分, 主要考查学生分析常见问题的能力和对知识的综合能力; 计算题总分 36 分, 主要考查学生分析和解决传热问题的能力。因此, 试卷 A、试卷 B 题型丰富, 基本上考查了学生对知识的记忆、理解、比较、分析、综合等能力, 基本上能测验出对基本概念、基于原理的记忆、理解和比较, 也能测验出知识之间的比较、灵活应用、方法比选以及分析问题和解决问题的能力。</p> <p>(3) 虽然试卷考查了学生对基本概念以及利用基本概念分析应用问题的能力, 分析题、计算题有针对性的对主要知识点进行了考查, 考查知识较全面, 题型丰富, 但试卷命题难度适中, 符合人才培养方案定位, 符合大纲要求, 符合地方应用型大学学生的水平, 能测验出学生真实水平, 达到了考核的目的。</p> <p>(4) A、B 两套试卷重复率小于 5%, 与以往使用过的试卷重复率小于 5%, 符合学校规定要求。试题命题符合“传热学” 语言习惯表示, 没有概念、原理、计算等方面错误。</p>				

成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
人数	6	19	16	1	0	83	37	66.48	85.71%
百分比	14.29%	45.24%	38.1%	2.38%	0%				



(1) 柱状图说明。从能源动力 2109 班的柱状图可以看出，该班学生试卷成绩分布呈正态分布，其中 60 分以下的有 6 名学生，60 到 69 分的有 19 名学生，70 到 79 分的有 16 名学生，80 到 89 分的有 1 名学生，90 分的有 0 名学生。

(2) 各大题难度。第一道大题是填空题，类型是客观题，满分 10 分，难度系数是 0.82，学生普遍得分情况良好。第二道大题是选择题，类型是客观题，满分 20 分，难度系数是 0.78，学生普遍得分情况中等。第三大题是判断题，类型是客观题，满分 10 分，难度系数是 0.75，学生普遍得分情况中等。第四道大题是简答题，类型是主观题，满分 24 分，难度系数是 0.71，学生普遍得分情况中等。第五道大题是计算题，类型是主观题，满分 36 分，难度系数是 0.5，学生普遍得分情况不理想。

(3) 各大题的答题或得分情况。第一道大题填空题，最高分 10 分，最低分 6 分，其中第五小题错的最多，得分率仅为 18.6%，说明学生对热电偶时间常数的概念没有掌握好。第二道大题选择题，最高分 20 分，最低分 10 分，其中第八小题错的最多，得分率仅为 60%，说明学生对特征尺寸的概念没有掌握好。第三道大题判断题，最高分 10 分，最低分 4 分，其中第四、八小题错的最多，得分率仅为 50%，说明学生对热扩散系数、导热微分方程式和周期性非稳态导热没有掌握好。第四道大题简答题，最高分 24 分，最低分 6 分，其中第二小题错的最多，得分率仅为 62%，说明学生流体物性对管内流体传热情况的影响内容没有掌握好。第五道大题简答题，最高分 32 分，最低分 4 分，其中第一小题错的最多，得分率仅为 30%，说明学生非稳态导热的集总参数法没有掌握好。综合考虑，学生没掌握好的知识，内容难度均不高，试题难度也不大，主要是学生复习中，忽视了这部分简单的内容。

(4) 失分和得分较多的题目。综合看各题得分情况，学生失最多的是第一道大题的第五小题、第四道大题的第一小题。这两个题主要考核的是非稳态导热的集总参数法的概念、计算，而在授课过程中，学生普遍反映这部分内容较简单，容易掌握，但学生的失分情况较严重，说明学生在复习中重视难度系数大的内容，忽视了难度系数较小的内容。

(5) 总体掌握程度分析。对于“传热学”课程，能源动力 2109 班对于比较难的“相似理论”反而得分率较高，比较容易的内容得分率不理想，总体掌握程度一般。在后期教学实施中，建议增强学风建设，强化学习方法教授。

学风分析	<p>(1) 能源动力 2109 班，总体出勤情况良好，基本上能做到全勤，个别人缺勤主要是因为病事假等不可控因素。</p> <p>(2) 能源动力 2109 班，课下作业完成情况较好，但存在个别抄袭现象，经教育后能及时改正，大多数同学作业整洁；绝大多数同学完成了“学习通”作业，并匿名评审了其他同学的作业，表现较好，个别未及时提交作业的同学，主要学业任务较重，未及时提交作业，事后已与任课教师进行及时说明。</p> <p>(3) 在能源与建筑学院“优良学风工程”的作用下，能源动力 2109 班大多数同学能抢占前排，自觉将手机交给班长管理，课上基本没有玩手机现象。</p> <p>(4) 答疑情况良好。每堂课课间，均有学生积极主动问问题。在学院安排的集中答疑时间，前来答疑解惑的学生较多，问的问题也是经过思考后提问的。</p> <p>(5) 总体而言，能源动力 2109 班学生出勤情况良好，课下作业完成情况良好、在线作业完成较及时、能及时观看学习通视频，个别同学需要教师催促，才能完成各项任务。</p> <p>(6) 与能源动力 2110 班相比，能源动力 2109 班学生学习主动性、课堂气氛活跃度、作业完成情况略有欠缺。</p>
存在的问题及改进措施	<p>1. 存在的问题</p> <p>(1) 学生对于各知识点的综合利用能力，还达不到融会贯通的程度，表现在考核知识点的形式改变后，学生就找不到关键所在，容易跑偏。</p> <p>(2) 学生对部分内容反而掌握不好，对部分难度问题掌握反而好。</p> <p>(3) 学生学习主动性低。</p> <p>2. 改进措施</p> <p>(1) 在今后的教学中，应该摒弃死板的教条式理论授课，多结合生活或者工程上的实例，多引导学生思考，多鼓励学生讨论，并尽量多地累计教学素材，让学生获取更多的传热知识。</p> <p>(2) 在教学过程中，应渗透学习方法的讲解。</p> <p>(3) 进一步强化“优良学风提升工程”的推行力度。</p>
<p>任课教师（签字）： <u>魏朝晖</u></p> <p>教研室主任（签字）： <u>刘琰</u> 2020 年 1 月 13 日</p>	

注：表中使用的字符 ，选中的用 ，未选中的用 。红色的说明文字请删除

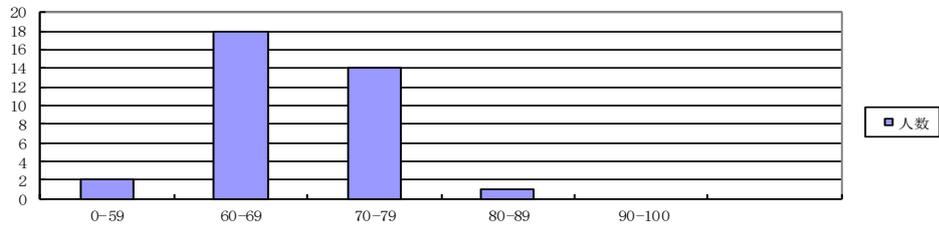
西安航空学院试卷及成绩分析表 (试卷类)

20 19 -20 20 学年第 1 学期 开课单位: 能源与建筑学院



课程性质: <input checked="" type="checkbox"/> 必修, <input type="checkbox"/> 选修		课程名称: 传热学			
任课教师: 魏朝晖		班级: 能源动力 2110			
考试时间: 120 分钟		试卷来源: <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它		考核方式: <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它	
卷面 质量 分析	考题要求	基本知识	理解分析	综合运用	合计
	分值	40	24	36	100
	1、试卷出错: <input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> 有: 原理性错误(图表、数据等) <u>0</u> 处, 一般性错误 <u>0</u> 处。				
命题 质量 分析	<p>(1) “传热学”课程为是建筑环境与能源应用工程、能源与动力工程等专业的一门重要学科与技术基础教育课程, 课程性质为必修课, 总学时 56 学时。在 A 卷、B 卷各自 100 分的试卷中, “绪论” 2 课时, 对应试卷 4 分; “导热理论基础” 4 课时, 对应试卷 6 分; “稳态导热” 6 课时, 对应试卷 11 分; “非稳态导热” 8 课时, 对应试卷 14 分; “导热问题的数值求解” 4 课时, 对应试卷 2 分; “对流换热” 8 课时, 对应试卷 16 分; “单相流体对流换热” 6 课时, 对应试卷 11 分; “凝结与沸腾换热” 5 课时, 对应试卷 10 分; “热辐射的基本定律和辐射换热计算” 8 课时, 对应试卷 17 分; “传热和换热器” 5 课时, 对应试卷 9 分。“导热问题的数值求解” 对应考核内容偏少, 因为这部分难度偏大, 大学本科毕业生在工作中用到的较少, 由于定位、培养要求等方面原因, 这部分内容所占分值有所减少。“热辐射的基本定律和辐射换热计算” 对于试卷考核内容略多, 因为这部分内容在学生将来工作中作用较大, “建筑环境与能源应用” 专业学生多会涉及到冷、热负荷的计算, “能源与动力工程专业” 的学生会涉及到锅炉炉膛燃烧情况, 这些均属于“热辐射的基本定律和辐射换热计算” 的内容, 所以这部分内容相对课时比例多了 1-2 分。总体而言, “传热学” 试卷基本涵盖了教学大纲要求的大部分知识点, 占比基本符合课程教学大纲课时分配比例要求, 且考核都是学生以后工作中要用到的知识。</p> <p>(2) 试题中主客观题的比例为 4:6。考试题型有: 填空题、选择题、判断题、简答题、计算题四种题型进行了考查。其中填空题总分 10 分, 主要考查学生对基本概念、基本原理的记忆与理解; 选择题总分 20 分, 主要考查学生对基本概念和基本原理的理解与应用; 判断题总分 10 分, 主要考查学生对基本概念和基本原理的理解与辨析; 简答题总分 24 分, 主要考查学生分析常见问题的能力和对知识的综合应用能力; 计算题总分 36 分, 主要考查学生分析和解决传热问题的能力。因此, 试卷 A、试卷 B 题型丰富, 基本上考查了学生对知识的记忆、理解、比较、分析、综合等能力, 基本上能测验出对基本概念、基于原理的记忆、理解和比较, 也能测验出知识之间的比较、灵活应用、方法比选以及分析问题和解决问题的能力。</p> <p>(3) 虽然试卷考查了学生对基本概念以及利用基本概念分析应用问题的能力, 分析题、计算题有针对性的对主要知识点进行了考查, 考查知识较全面, 题型丰富, 但试卷命题难度适中, 符合人才培养方案定位, 符合大纲要求, 符合地方应用型大学学生的水平, 能测验出学生真实水平, 达到了考核的目的。</p> <p>(4) A、B 两套试卷重复率小于 5%, 与以往使用过的试卷重复率小于 5%, 符合学校规定要求。试题命题符合“传热学” 语言习惯表示, 没有概念、原理、计算等方面错误。</p>				

成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
人数	2	18	14	1	0	80	52	67.03	94.29%
百分比	5.71%	51.43%	40%	2.86%	0%				



教学效果分析

(1) 柱状图说明。从能源动力 2110 班的柱状图可以看出，该班学生试卷成绩分布呈正态分布，其中 60 分以下的有 2 名学生，60 到 69 分的有 18 名学生，70 到 79 分的有 14 名学生，80 到 89 分的有 1 名学生，90 分的有 0 名学生。

(2) 各大题难度。第一道大题是填空题，类型是客观题，满分 10 分，难度系数是 0.63，学生普遍得分情况一般。第二道大题是选择题，类型是客观题，满分 20 分，难度系数是 0.64，学生普遍得分情况一般。第三大题是判断题，类型是客观题，满分 10 分，难度系数是 0.62，学生普遍得分情况一般。第四道大题是简答题，类型是主观题，满分 24 分，难度系数是 0.57，学生普遍得分情况不理想。第五道大题是计算题，类型是主观题，满分 36 分，难度系数是 0.43，学生普遍得分情况不理想。

(3) 各大题的答题或得分情况。第一道大题填空题，最高分 10 分，最低分 4 分，其中第五小题错的最多，得分率仅为 23%，说明学生对热电偶时间常数的概念没有掌握好。第二道大题选择题，最高分 20 分，最低分 8 分，其中第八小题错的最多，得分率仅为 60%，说明学生对特征尺寸的概念没有掌握好。第三道大题判断题，最高分 9 分，最低分 5 分，其中第四小题错的最多，得分率仅为 40%，说明学生对热扩散系数、导热微分方程式没有掌握好。第四道大题简答题，最高分 22 分，最低分 10 分，其中第二小题错的最多，得分率仅为 40%，说明学生流体物性对管内流体传热情况的影响内容没有掌握好。第五道大题简答题，最高分 30 分，最低分 9 分，其中第一小题错的最多，得分率仅为 30%，说明学生非稳态导热的集总参数法没有掌握好。综合考虑，学生没掌握好的知识，内容难度均不高，试题难度也不大，主要是学生复习中，忽视了这部分简单的内容。

(4) 失分和得分较多的题目。综合看各题得分情况，学生失最多的是第一道大题的第五小题、第四道大题的第一小题。这两个题主要考核的是非稳态导热的集总参数法的概念、计算，而在授课过程中，学生普遍反映这部分内容较简单，容易掌握，但学生的失分情况较严重，说明学生在复习中重视难度系数大的内容，忽视了难度系数较小的内容。

(5) 总体掌握程度分析。对于“传热学”课程，能源动力 2110 班对于比较难的“相似理论”反而得分率较高，比较容易的内容得分率不理想，总体掌握程度一般。在后期教学实施中，建议增强学风建设，强化学习方法教授。

学风分析	<p>(1) 能源动力 2110 班，总体出勤情况良好，基本上能做到全勤，个别人缺勤主要是因为病事假等不可控因素。</p> <p>(2) 能源动力 2110 班，课下作业完成情况较好，但存在个别抄袭现象，经教育后能及时改正，大多数同学作业整洁；绝大多数同学完成了“学习通”作业，并匿名评审了其他同学的作业，表现较好，个别未及时提交作业的同学，主要学业任务较重，未及时提交作业，事后已与任课教师进行及时说明。</p> <p>(3) 在能源与建筑学院“优良学风工程”的作用下，能源动力 2110 班大多数同学能抢占前排，自觉将手机交给班长管理，课上基本没有玩手机现象。</p> <p>(4) 答疑情况良好。每堂课课间，均有学生积极主动问问题。在学院安排的集中答疑时间，前来答疑解惑的学生较多，问的问题也是经过思考后提问的。</p> <p>(5) 总体而言，能源动力 2110 班学生出勤情况良好，课下作业完成情况良好、在线作业完成较及时、能及时观看学习通视频，个别同学需要教师催促，才能完成各项任务。</p> <p>(6) 与能源动力 2109 班相比，能源动力 2110 班学生学习主动性、课堂气氛活跃度、作业完成情况较好，但仍然有提高的空间，相比上一届能源动力专业学生差。</p>
存在的问题及改进措施	<p>1. 存在的问题</p> <p>(1) 学生对于各知识点的综合利用能力，还达不到融会贯通的程度，表现在考核知识点的形式改变后，学生就找不到关键所在，容易跑偏。</p> <p>(2) 学生对部分简单内容反而掌握不好，对部分难度问题掌握反而好。</p> <p>(3) 学生学习主动性低。</p> <p>(4) 学生学习方法有待提高。</p> <p>2. 改进措施</p> <p>(1) 在今后的教学中，应该摒弃死板的教条式理论授课，多结合生活或者工程上的实例，多引导学生思考，多鼓励学生讨论，并尽量多地累计教学素材，让学生获取更多的传热知识。</p> <p>(2) 在教学过程中，应渗透学习方法的讲解。</p> <p>(3) 进一步强化“优良学风提升工程”的推行力度。</p>
<p>任课教师（签字）： <u>魏朝晖</u></p> <p>教研室主任（签字）： <u>刘璇</u> 2020 年 1 月 13 日</p>	

注：表中使用的字符■□，选中的用■，未选中的用□。红色的说明文字请删除

附件 6 最近两学期的学生在线学习数据

课程数据信息表 (2021 年)

课程基本信息			
课程名称	传热学		
学校名称	西安航空学院		
课程负责人	魏朝晖		
单期课程开设周数	21		
课程运行平台名称	泛雅网络教学平台		
开放程度	○完全开放：自由注册，免费学习		
	√有限开放：仅对学校（机构）组织的学习者开放或付费学习		
课程链接	https://mooc1.chaoxing.com/course/204595738.html		
课程学生总数	294		
课程访问量	293948		
章节学习次数	35344		
总讨论数	1002		
通知发放数	81		
章节测验参与总人次	2836		
作业参与总人次	1286		
课程开设情况			
开设学期	起止时间	选课人数	
1	2019-09-01 至 2020-01-31	155	
2	2020-09-01 至 2021-01-31	138	
课程资源与学习数据			
	数据项	第 (1) 学期	第 (2) 学期
授课视频	总数量 (个)	44	44
	总时长 (分钟)	470	470
非视频资源	数量 (个)	160	160
测验和作业	总次数 (次)	142	124
	习题总数 (道)	261	261
	参与人数 (人)	126	133
互动交流情况	发帖总数 (帖)	100	1061
	教师发帖数 (帖)	100	94
	参与互动人数 (人)	0	84



课程平台单位承诺

1. 本单位已认真填写并检查此表格中的数据，保证内容真实准确；
2. 本单位同意按照要求为此次在线开放课程认定工作提供必要的技术支持；
3. 如果此课程被认定为“国家精品在线开放课程”，本单位承诺，自认定结果公布开始，平台将该课程面向高校和社会学习者开放不少于5年，并按教育部要求提供年度运行数据，接受监督和管理。

课程平台单位（公章）：

联系人及电话：陈瑶 15909272412 填表日期：2021年03月30日



学生综合完成情况

课程: 传热学 班级: 能源动力181 导出时间: 2021-03-28 13:12:38

学生姓名	学号/工号	班级	任务完成数	任务点完成百分比	课程视频进度	章节测验进度	视频观看时长	讨论数	章节学习次数
陈卓	1740402210912	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	450.8分钟	16	184
李佳乐	184130102	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	326.4分钟	14	152
殷一宸	184130104	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	338.8分钟	17	156
王伟斌	184130105	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	476.9分钟	7	254
王超	184130106	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	495.5分钟	16	159
李根	184130107	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	348.5分钟	16	216
冯鑫鑫	184130108	能源动力181	63/82	76.83%	41/44	9/24	274.8分钟	0	124
原栋梁	184130109	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	336.7分钟	0	151
李凯辉	184130110	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	11.8分钟	0	41
汪思俊	184130112	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	471.3分钟	0	107
陈卓	184130114	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	474.7分钟	0	136
郭恒	184130115	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	477.4分钟	10	200
杨旭	184130118	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	436.1分钟	6	132
许驰	184130119	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	537.4分钟	17	236
王佳星	184130120	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	550.5分钟	17	190
常耀元	184130121	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	466.0分钟	5	196
张争光	184130123	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	422.4分钟	17	164
张聪	184130124	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	483.4分钟	11	246
李传林	184130125	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	107.2分钟	12	65
张行	184130126	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	489.6分钟	1	336
惠宇轩	184130127	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	474.3分钟	0	129
廖威	184130128	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	289.4分钟	1	125
徐胤凯	184130129	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	0.0分钟	0	19
李馨	184130130	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	344.9分钟	10	200

杨甜	184130131	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	527.8分钟	18	272
吴淑怡	184130132	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	376.3分钟	16	116
王晨阳	184130133	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	496.6分钟	17	301
任佳妮	184130134	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	472.0分钟	14	343
刘阳	184130135	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	578.9分钟	12	221
刘文	184130136	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	552.3分钟	15	232
王鸽	184130137	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	539.2分钟	17	293
高婵	184130138	能源动力181	80/82	97.56%	44/44	22/24	511.9分钟	20	169

学生综合完成情况

课程：传热学 班级：能源动力182 导出时间：2021-03-28 13:24:33

学生姓名	学号/工号	班级	任务完成数	任务点完成百分比	课程视频进度	视频观看时长	讨论数	章节学习次数
陈旭飞	1740402211001	能源动力182	66/82	80.49%	44/44	300.9分钟	13	119
史佳佳	1740402211015	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	299.0分钟	0	157
赵一凡	184130201	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	322.3分钟	1	196
王朔	184130202	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	485.8分钟	4	133
刘存杰	184130203	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	470.6分钟	0	75
李骋昊	184130204	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	507.5分钟	0	141
王宇龙	184130205	能源动力182	66/82	80.49%	44/44	508.5分钟	1	167
陈小平	184130206	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	478.7分钟	15	267
赵勇	184130207	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	74.5分钟	15	179
余旺	184130208	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	293.4分钟	15	141
胡鹏	184130209	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	470.4分钟	1	82
李佳诺	184130210	能源动力182	79/82	96.34%	44/44	353.1分钟	13	124
李纪鑫	184130211	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	493.9分钟	14	209
兰晨阳	184130212	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	506.5分钟	15	126
吴辰东	184130213	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	338.7分钟	2	138
丁晓通	184130214	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	828.3分钟	6	268
郭龙杰	184130215	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	471.3分钟	0	73
马勇进	184130216	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	544.0分钟	1	111
磨浩浩	184130217	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	275.4分钟	14	198
马嘉兴	184130219	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	488.5分钟	0	148
张伟荣	184130220	能源动力182	72/82	87.8%	43/44	326.9分钟	0	116
顾李晗	184130221	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	470.9分钟	3	99
王世杰	184130222	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	520.8分钟	15	253
惠栋	184130223	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	465.3分钟	0	117

余星	184130224	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	326.7分钟	2	205
吴润楠	184130225	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	264.5分钟	15	144
胡志垚	184130226	阎良校区	80/82	97.56%	44/44	478.8分钟	5	197
马可睿	184130227	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	493.2分钟	1	203
王霖	184130228	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	470.0分钟	1	177
温竟翼	184130229	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	354.0分钟	15	152
李杨慧睿	184130230	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	471.0分钟	0	93
董雨	184130231	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	475.4分钟	0	151
吕珩珠	184130232	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	470.7分钟	0	73
尚紫渲	184130233	能源动力182	67/82	81.71%	44/44	481.7分钟	15	150
马子沁	184130234	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	472.2分钟	0	121
张育	184130235	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	439.2分钟	5	150
张慧辰	184130236	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	471.2分钟	0	88
文梦娜	184130237	能源动力182	80/82	97.56%	44/44	471.2分钟	12	135

学生综合完成情况

课程：传热学 班级：能源动力2109 导出时间：2021-03-28 13:41:56

学生姓名	学号/工号	专业	任务完成数	任务完成百分比	课程视频进度	视频观看时长	章节学习次数	学习情况
宋超	1440402180211	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	416.9分钟	108	已学习
张宇航	1440402180331	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	424.3分钟	113	已学习
周佳华	1540402190516	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	438.3分钟	146	已学习
刘克凡	1640402200722	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	465.7分钟	178	已学习
董启超	1640402200828	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	475.7分钟	115	已学习
魏泽童	1740402210901	能源动力2109	38/82	46.34%	38/44	484.4分钟	124	已学习
侯瑞翌	1740402210902	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	270.9分钟	122	已学习
李嘉琦	1740402210903	能源动力2109	44/82	53.66%	44/44	109.6分钟	102	已学习
郝夏宇	1740402210904	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	518.8分钟	185	已学习
薛博文	1740402210905	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	335.9分钟	89	已学习
李浩杰	1740402210906	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	297.6分钟	124	已学习
李洋	1740402210907	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	407.9分钟	106	已学习
罗锦锟	1740402210908	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	432.0分钟	82	已学习
于瑞泽	1740402210909	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	278.8分钟	77	已学习
刘双庆	1740402210910	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	481.0分钟	84	已学习
雷煜航	1740402210911	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	496.3分钟	138	已学习
陈卓	1740402210912	能源动力181	48/82	58.54%	43/44	509.5分钟	102	已学习
王也民	1740402210913	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	69.8分钟	57	已学习
刘俊洁	1740402210914	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	456.8分钟	90	已学习
刘鑫鑫	1740402210915	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	728.4分钟	130	已学习
郭丁	1740402210916	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	36.1分钟	130	已学习
周喆	1740402210917	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	100.5分钟	110	已学习
张建	1740402210918	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	431.3分钟	136	已学习
李涛	1740402210919	能源动力2109	44/82	53.66%	44/44	301.5分钟	80	已学习

孙建业	1740402210920	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	290.1分钟	124	已学习
郭超	1740402210921	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	450.6分钟	141	已学习
司荔文	1740402210922	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	428.1分钟	131	已学习
强冕	1740402210923	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	413.2分钟	115	已学习
梁佳妮	1740402210924	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	442.9分钟	176	已学习
余奉青	1740402210925	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	243.0分钟	81	已学习
康佳元	1740402210926	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	36.1分钟	89	已学习
冯家豪	1740402210927	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	270.4分钟	122	已学习
于盟	1740402210928	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	462.2分钟	204	已学习
谢维康	1740402210929	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	341.1分钟	137	已学习
张依依	1740402210930	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	438.4分钟	158	已学习
余绵	1740402210931	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	436.8分钟	114	已学习
吕小凯	1740402210932	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	575.3分钟	194	已学习
杨赞	1740402210934	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	391.3分钟	98	已学习
王海彬	1740402210935	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	301.4分钟	123	已学习
宋子朝	1740402210936	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	466.2分钟	85	已学习
杨瑞涛	1740402210937	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	435.8分钟	153	已学习
白璐	1740402210938	能源动力2109	43/82	52.44%	43/44	456.7分钟	85	已学习

学生综合完成情况

课程: 传热学 班级: 能源动力2110 导出时间: 2021-03-28 13:42:19

学生姓名	学号/工号	专业	任务完成数	任务点完成百分比	课程视频进度	视频观看时长	章节学习次数	学习情况
惠天成	1740402211002	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	420.6分钟	97	已学习
张澳	1740402211003	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	416.0分钟	89	已学习
孟新欣	1740402211004	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	345.4分钟	84	已学习
陈康	1740402211005	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	357.9分钟	115	已学习
段天赐	1740402211006	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	439.3分钟	90	已学习
燕恒	1740402211007	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	495.1分钟	179	已学习
王旭	1740402211008	能源动力2110	57/82	69.51%	43/44	448.0分钟	99	已学习
彭源	1740402211009	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	343.6分钟	74	已学习
张恒恒	1740402211010	能源动力2110	42/82	51.22%	42/44	428.2分钟	117	已学习
程亮	1740402211011	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	250.9分钟	72	已学习
王杨博	1740402211012	能源动力2110	58/82	70.73%	44/44	243.2分钟	91	已学习
吕山	1740402211013	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	456.1分钟	79	已学习
刘柯迪	1740402211014	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	515.9分钟	116	已学习
贺鑫	1740402211016	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	467.6分钟	99	已学习
张小瑞	1740402211017	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	324.5分钟	104	已学习
冯琅	1740402211018	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	428.9分钟	81	已学习
孙家腾	1740402211019	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	368.1分钟	124	已学习
王富康	1740402211020	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	367.0分钟	80	已学习
党文涛	1740402211021	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	475.2分钟	192	已学习
王鑫	1740402211022	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	544.0分钟	175	已学习
王卓	1740402211023	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	440.7分钟	93	已学习
冯晨琨	1740402211024	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	439.6分钟	191	已学习
唐烨	1740402211025	能源动力2110	58/82	70.73%	44/44	479.9分钟	130	已学习
裴冲	1740402211026	能源动力2110	42/82	51.22%	42/44	280.5分钟	114	已学习

车旭东	1740402211027	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	247.3分钟	179	已学习
李丹	1740402211028	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	443.1分钟	115	已学习
胡晨松	1740402211029	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	256.1分钟	29	已学习
薛雅文	1740402211030	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	433.8分钟	95	已学习
黄宇飞	1740402211031	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	426.4分钟	89	已学习
宁力	1740402211032	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	227.8分钟	67	已学习
王冯涛	1740402211033	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	470.1分钟	91	已学习
权张涛	1740402211034	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	437.7分钟	115	已学习
郭子谊	1740402211035	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	461.8分钟	99	已学习
祖英泽	1740402211037	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	418.9分钟	126	已学习
邱文超	1740402211038	能源动力2110	43/82	52.44%	43/44	274.8分钟	122	已学习

附件 7 最近一学期的课程教案

西安航空学院

教 案

2020~2021 第 1 学期

课程名称	传热学			课程编号	B0410070
系、部	能源与建筑学院	教研室	能动教研室	学 分	3.5
授课教师	魏朝晖 周亮		职 称	副教授, 讲师	
课程性质	必修课 (✓)			选修课 ()	
授课对象	班级: 能源动力 181/182, 建筑环境 181/182 共 4 个班				
课程学时	56 学时	周学时	4 学时	起止周	第 1 周~第 14 周
学时分配	理论讲授: 56 实验: 0 学时; 上机: 0 学时				
授课方式	课堂讲授 (✓); 实践课 ()		考核方式	考试 (✓); 考查 ()	
使用教材	教材名称: 《传热学》 作者: 章熙民、任泽霏等 出版社: 中国建筑工业出版社 出版日期: 2014				
主要参考资料	1. 杨世铭 陶文铨, 《传热学》(第四版), 高等教育出版社, 2006。 2. (美) 霍尔曼, 传热学(英文版, 原书第 10 版), 机械工业出版社, 2011 3. 张靖周, 常海萍, 《传热学》, 科学出版社, 2015				
审核意见	学院主任(签字):  2020年 8 月 30 日				

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑学院	任课教师	魏朝晖	
授课题目	绪论 1: 热量传递的三种方式		授 课 时间长度	_90_ 分钟
授课进度	第_1_周, 总第_1_次	授课对象	能源动力 181/182 建筑环境 181	
教学目标	要求学生了解本门课的主要学习内容, 了解传热学与工程热力学的区别和联系, 掌握热量传递的三种基本方式, 能用传热学思想解释一些简单的传热问题。			
教学重点	热量传递的三种基本方式			
教学难点	热量传递的三种基本方式			
教学方法分析	主要采用启发教学法。对于基本概念, 以现实生活和生产的例子引入传热的概念; 对于三种热量传递的方式, 要求学生理解并记忆。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体+板书			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	课题及课程要求_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	让学生了解课程相关信息以及课程、课堂要求。	通过 PPT 讲解讲明课程信息、课程要求及课堂要求,	认真听课	使学生了解本门课的重要性, 了解课程和课堂要求。

第二步 (80分钟)	讲授新的课程内容：传热学概述、热量传递的三种基本方式。	利用课件展示基本概念和基本理论；通过图片和实物的展示深入剖析传热质等。	认真聆听老师讲授内容，结合生产所观察的具体实例展开联想。	利用课件和实物等让学生掌握传质相关的基本概念、基本理论和具体技术，并提升专业信念。
第三步 (5分钟)	总结与布置作业	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。

讲义

传热学是研究温差作用下热量传递过程和传递速率的科学。

一、热传递的基本方式

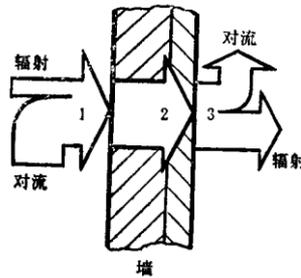


图 0—1 墙壁的散热

一、导热

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t A \quad (\text{W}) \quad (0-1a)$$

或热流密度（每平方米的热流量）

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-1b)$$

式中 A— 壁面积，

— 壁厚， m；

Δt — 壁两侧表面的温差， ， °C；

— 比例系数，称为热导率或导热系数，其意义是指单位厚度的物体具有单位温度差时，在它的单位面积上每单位时间的导热量，它的国际单位是 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。它表示材料导热能力的大小。导热系数一般由实验测定，例如，普通混凝土 $\lambda = 0.75 \sim 0.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，纯铜的将近 $400 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

热流密度： $q = \text{温度差热阻} \quad (0-2)$

$$q = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda} = \frac{\Delta t}{R_\lambda} \quad (0-1c)$$

用表示导热热阻，则平壁导热热阻为 $R_\lambda = \delta / \lambda$, $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ 。

二、热对流

$$q = mc_p(t_2 - t_1) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-3)$$

“牛顿冷却公式”，即：

$$q = h(t_w - t_f) = h\Delta t \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-4a)$$

或面积 $A \text{ m}^2$ 上的热流量： $\Phi = h(t_w - t_f) A = h\Delta t A \quad (\text{W}) \quad (0-4b)$

式中 t_w ——壁表面温度， $^\circ\text{C}$ ；

t_f ——流体温度， $^\circ\text{C}$ ；

Δt ——壁表面与流体间温度差， $^\circ\text{C}$ ；

h ——表面传热系数，其意义是指单位面积上，流体与壁之间在单位温差下及单位时间内所能传递的热量。

按式(0-2)式提出的热阻概念改写式(0—4a)得

$$q = \frac{\Delta t}{1/h} = \frac{\Delta t}{R_h} \quad (0-4c)$$

式中 $R_h = 1/h$ 即为单位壁表面积上的对流换热热阻 [$\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$]，利用式(0—4b)，则表面积为 $A \text{ m}^2$ 的壁面上的对流换热热阻为 $1 / (h \cdot A)$ ，单位是 K / W 。

三、热辐射

斯蒂芬—玻尔茨曼定律：

$$E_b = \sigma_b T^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2)$$

$$\Phi = \sigma_b T^4 A \quad (\text{W}) \quad (0-5a)$$

上式亦可写作：

$$E_b = C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2)$$

$$\Phi = C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 A \quad (\text{W}) \quad (0-5b)$$

式中 ——黑体辐射力， W/m^2 ；

σ_b ——斯蒂芬—玻尔茨曼常量，亦称黑体辐射常数， $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8}$

W/(m²·K⁴)

——黑体辐射系数， $C_b = 5.67 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

T——黑体表面的热力学温度，K。

一切实际物体的辐射力都低于同温度下黑体的辐射力，等于

$$E = \varepsilon \sigma_b T^4 \quad (\text{W/m}^2)$$

$$E = \varepsilon C_b \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-5c)$$

$$q = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-5d)$$

或 A m² 上的辐射热流量 $\Phi = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] A \quad (\text{W}) \quad (0-5e)$

式中 $C_{1,2}$ 称为 1 和 2 两表面间的系统辐射系数

作业内容

效果分析与改进措施

传热学的第一次课，为了引起学生的兴趣，多将一些有意思的传热现象，以增强教学效果和提升学生学习积极性。

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑学院	任课教师	魏朝晖	
授课题目	绪论 2: 传热过程; 第一章 导热的理论基础 1-基本概念及傅里叶定律	授课时间长度	90 分钟	
授课进度	第 1 周, 总第 2 次	授课对象	能源动力 181/182 建筑环境 181	
教学目标	要求学生掌握传热过程, 掌握温度场、等温线和等温面的概念, 掌握傅立叶定律及其应用。			
教学重点	传热过程; 傅立叶定律及其应用			
教学难点	傅立叶定律及其应用			
教学方法分析	主要采用启发教学法。复习欧姆定律, 引入类比的思想, 讲解传热过程; 复习速度差的概念, 引入温度场, 讲解等温线和等温面的概念。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导 5 分钟; 授新课内容 80 分钟; 讨论与提问 0 分钟; 总结与布置作业 5 分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习热量传递的三种方式, 引入新的内容。	讲授新内容传热过程; 傅立叶定律及其应用。	听课并回忆上次课学习内容。	根据上次课的复习, 引导学生思考如何计算传热量和热流密度。

第二步 (80分钟)	讲授新的课程内容：传热过程、傅立叶定律及其应用。	利用课件展示基本概念和基本理论；通过图片和实物的展示深入剖析推导传热过程和傅立叶定律及其应用等。	认真聆听老师讲授内容，理解热阻的概念、温度场、等温面及傅里叶定律。	利用课件和图片等让学生掌握传热过程的理论及类比的方法、使学生掌握温度场、等温线、等温面及傅立叶定律。
第三步 (5分钟)	总结与布置作业	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。

讲义

二、传热过程

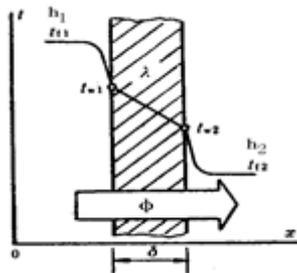


图 0-2 两流体间的热传递过程

$$q = h_1(t_{f1} - t_{w1})$$

$$q = h_2(t_{w2} - t_{f2})$$

在稳态情况下，以上三式的热流密度 q 相等，把它们改写为：

$$t_{f1} - t_{w1} = q/h_1$$

$$t_{w1} - t_{w2} = q/\left(\frac{\lambda}{\delta}\right)$$

$$t_{w2} - t_{f2} = q/h_2$$

三式相加，消去 t_{w1} 及 t_{w2} ，整理后得该壁传热热流密度

$$q = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}(t_{f1} - t_{f2}) = k(t_{f1} - t_{f2}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-6a)$$

对 A 的平壁，传热热流量 Φ 则为：

$$\Phi = qA = k(t_{f1} - t_{f2})A \quad (\text{W}) \quad (0-6b)$$

式中

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (0-7)$$

k 称为传热系数，它表明单位时间、单位壁面积上，冷热流体间温差 1 度时所传递的热量， k 的单位是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，故 k 值的大小反映了传热过程的强弱。

为理解它的意义，按热阻形式改写式(0-6 a)，得

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{k}} = \frac{\Delta t}{R_k} \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-6c)$$

R_k 即为平壁单位面积传热热阻：

$$R_k = \frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}) \quad (0-8)$$

§ 2-1 导热基本定律

一、温度场

1、概念

温度场是指在各个时刻物体内部各点温度分布的总称。

由傅立叶定律知：物体导热热流量与温度变化率有关，所以研究物体导热必涉及到物体的温度分布。一般地，物体的温度分布是坐标和时间的函数。

即：
$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (2-1)$$

式中： x 、 y 、 z 为空间笛卡儿坐标； τ 为时间坐标。

2、温度场分类

1) 稳态温度场（定常温度场）：是指在稳态条件下物体各点的温度分布不随时间的改变而变化的温度场称稳态温度场，其表达式：

$$t = f(x, y, z) \quad (2-2)$$

在特殊情况下，物体的温度仅在一个坐标方向上有变化，如图 1.1 所示的两个各自保持均匀温度的平行平面间的导热就是一个例子。这种情况下的温度场称为一维稳态温度场。

2) 非稳态温度场（非定常温度场）：是指在变动工作条件下，物体中各点的温度分布随时间而变化的温度场称非稳态温度场，其表达式为式（2-1）。

3、等温面及等温线

1) 等温面：对于三维温度场中同一瞬间同温度各点连成的面称为等温面。

2) 等温线

(1) 定义：在任何一个二维的截面上等温面表现为等温线。一般情况下，温度场用等温面图和等温线图表示。

(2) 等温线的特点：物体中的任何一条等温线要么形成一个封闭的曲线，要么终止在物体表面上，它不会与另一条等温线相交。

(3) 等温线图的物理意义：若每条等温线间的温度间隔相等时，等温线的疏密可反映出不同区域导热热流密度的大小。若 Δt 相等，且等温线越疏，则该区域热流密度越小；反之，越大。

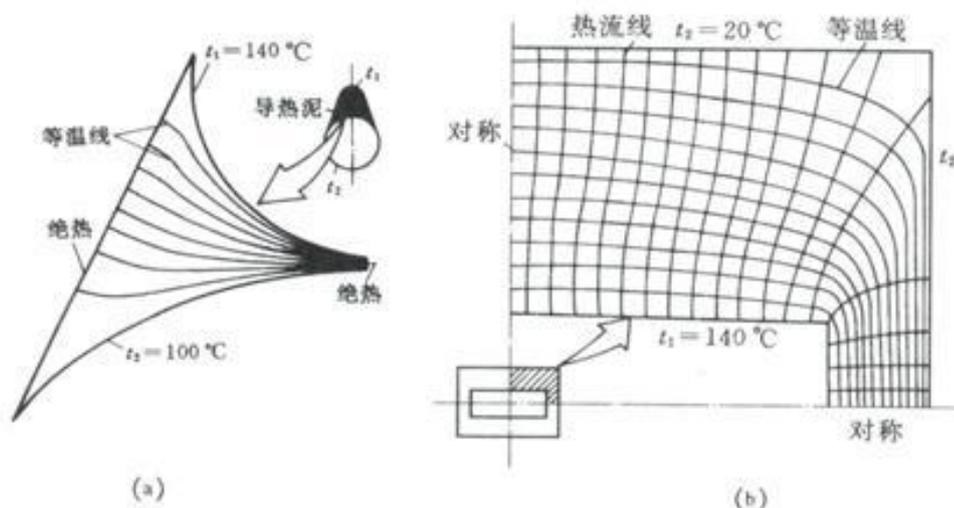


图 2-1 温度场的图示

二、导热基本定律

教材 (1-1)、(1-2) 式的适用条件：(1) 一维导热 (2) 一块平板两侧表面温度分别维持各自均匀的温度。

1、导热基本定律 (傅立叶定律)

1) 定义：在导热现象中，单位时间内通过给定截面所传递的热量，正比例于垂直于该截面方向上的温度变化率，而热量传递的方向与温度升高的方向相反，即：

$$\frac{\Phi}{A} \sim \frac{\partial t}{\partial x}$$

此处， x 是垂直于面积 A 的坐标轴。

2) 数学表达式：

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2-3)$$

傅里叶定律用热流密度 q 表示为：

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2-4)$$

式中： $\frac{\partial t}{\partial x}$ 是物体温度沿 x 方向的变化率； q 是沿 x 方向传递的热流密度（严格说热流密度是矢量，所以 q 是热流密度矢量在 x 方向的分量）。当物体的温度是三个坐标的函数时，三个坐标方向上的单位矢量与该方向上热流密度分量乘积合成一个热流密度矢量，记为 q 。傅里叶定律的一般数学表达式为：

$$q = -\lambda \text{grad} t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} n \quad (2-5)$$

式中： $\text{grad} t$ 是空间某点的温度梯度； n 是通过该点的等温线上的法向单位矢量，指向温度升高的方向； q 为该处的热流密度矢量。

2、温度梯度与热流密度矢量的关系

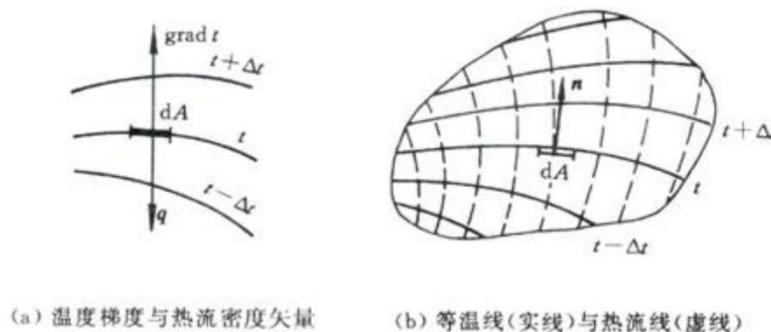


图 2-2 等温线与热流线

如图 2-2 (a) 所示，表示了微元面积 dA 附近的温度分布及垂直于该微元面积的热流密度矢量的关系。

- 1) 热流线：热流线是一组与等温线处处垂直的曲线，通过平面上任一点的热流线与该点的热流密度矢量相切。
- 2) 热流密度矢量与热流线的关系：在整个物体中，热流密度矢量的走向可用热流线表示。如图 2-2 (b) 所示，其特点是相邻两个热流线之间所传递的热流密度矢量处处相等，构成一热流通道。

作业内容

自学热导率；

效果分析与改进措施

这次课的概念比较多，应尽量给学生剖析清楚概念。

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第一章-导热的理论基础 3 - 导热微分方程式和单值性条件	授 课 时间长度	_90_ 分钟	
授课进度	第_2_周, 总第_3_次	授课对象	能源动力 181/182 建筑环境 181	
教学目标	要求学生了解导热微分方程式的推导过程, 掌握导热微分方程式的推导思想, 掌握导热微分方程式。			
教学重点	导热微分方程式			
教学难点	导热微分方程式			
教学方法分析	主要采用启发教学法。回顾流体力学动量方程, 引入导热微分方程式的推导思路, 推导导热微分方程式, 讲解导热微分方程式各项的物理意义。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5分钟)	复习传热过程和傅里叶定律。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (80分钟)	讲授新的课程内容：导热微分方程式。	在黑板上画图讲解导热微分方程的推导思想，利用 PPT 推导导热微分方程式，讲解导热微分方程式各项的物理意义。	认真聆听老师讲授内容，理解导热微分方程式推导思想，熟记导热微分方程式。	利用课件和图片等让学生掌握导热微分方程式推导思想，能随手写出导热微分方程式。
第三步 (5分钟)	总结与布置作业	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。

讲义

2-2 导热微分方程式及定解条件

由前可知：

- (1) 对于一维导热问题，根据傅立叶定律积分，可获得用两侧温差表示的导热热量。
- (2) 对于多维导热问题，首先获得温度场的分布函数 $t = f(x, y, z)$ ，然后根据傅立叶定律求得空间各点的热流密度矢量。

一、导热微分方程

1、定义：根据能量守恒定律与傅立叶定律，建立导热物体中的温度场应满足的数学表达式，称为导热微分方程。

2、导热微分方程的数学表达式

导热微分方程的推导方法，假定导热物体是各向同性的。

1) 针对笛卡儿坐标系中微元平行六面体

由前可知，空间任一点的热流密度矢量可以分解为三个坐标方向的矢量。

同理，通过空间任一点任一方向的热量也可分解为 x 、 y 、 z 坐标方向的分热量，

如图 2-3 所示。

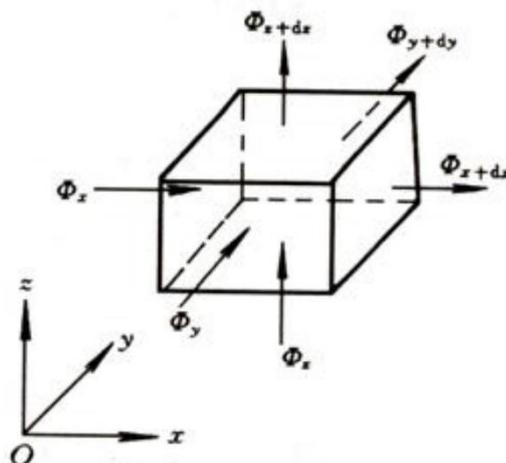


图 2-3 微元平行六面体的导热分析

通过 $x = x$ 、 $y = y$ 、 $z = z$ 三个微元表面而导入微元体的热流量： Φ_x 、 Φ_y 、 Φ_z 的计算式。

根据傅立叶定律得：

$$\left. \begin{aligned} \Phi_x &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dydz \\ \Phi_y &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} dxdz \\ \Phi_z &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} dydx \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

② 通过 $x = x + dx$ 、 $y = y + dy$ 、 $z = z + dz$ 三个微元表面而导出微元体的热流量的计算式。

根据傅立叶定律得：

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{x+dx} &= \Phi_x + \frac{\partial \Phi}{\partial x} dx = \Phi_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dydz \right) dx \\ \Phi_{y+dy} &= \Phi_y + \frac{\partial \Phi}{\partial y} dy = \Phi_y + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} dxdz \right) dy \\ \Phi_{z+dz} &= \Phi_z + \frac{\partial \Phi}{\partial z} dz = \Phi_z + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} dydx \right) dz \end{aligned} \right\} \quad (b)$$

③ 对于任一微元体根据能量守恒定律，在任一时间间隔内有以下热平衡关系：

导入微元体的总热流量 + 微元体内热源的生成热 = 导出微元体的总热流量 + 微元体热力学能（内能）的增量 (c)

其中：微元体内能的增量 $= \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dxdydz$ (d)

微元体内热源生成热 $= \dot{\Phi} dxdydz$ (e)

其中 ρ 、 c 、 $\dot{\Phi}$ 及 τ 分别为微元体的密度、比热容、单位时间内单位体积内热源的生成热及时间。

将式 (a)、(b)、(d)、(e) 代入式 (c)，并整理得：

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (2-7)$$

这是笛卡尔坐标系中三维非稳态导热微分方程的一般表达式。

物理意义：反映了物体的温度随时间和空间的变化关系。

讨论：

① $\lambda = \text{const}$ 时：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} \quad (2-8)$$

其中 $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ 称扩散系数（热扩散率）。

② 物体内无内热源，即 $\dot{\Phi} = 0$ ，且 $\lambda = \text{const}$ 时：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (2-9)$$

③ 若 $\lambda = \text{const}$, 且属稳态, 即: $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ 时:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\dot{\phi}}{\lambda} = 0 \quad (2-10)$$

即数学上的泊松方程。该微分方程属常物性、稳态、三维、有内热源问题的温度场控制方程式。

④ 常物性、稳态、无内热源:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (2-11)$$

即数学上的拉普拉斯方程。

2) 圆柱坐标系中的导热微分方程(r, ϕ, z)

$$x = r \cos \phi, y = r \sin \phi, z = z$$

$$q_r = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r}, \quad q_\phi = -\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial \phi}, \quad q_z = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z}$$

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\phi} \quad (2-12)$$

3) 球坐标系中的导热微分方程(r, θ, ϕ)

$$x = r \sin \theta \cos \phi, y = r \sin \theta \sin \phi, z = r \cos \theta$$

$$q_r = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r}, \quad q_\theta = -\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial \theta}, \quad q_\phi = -\lambda \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial t}{\partial \phi}$$

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \sin \theta \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) + \dot{\phi} \quad (2-13)$$

综上所述:

- (1) 导热问题仍然服从能量守恒定律;
- (2) 等号左边是单位时间内微元体热力学能的增量 (非稳态项);
- (3) 等号右边前三项之和是通过界面的导热使微分元体在单位时间内增加的能量 (扩散项);
- (4) 等号右边最后项是源项;
- (5) 若某坐标方向上温度不变, 该方向的净导热量为零, 则相应的扩散项即从导热微分方程中消失。

通过导热微分方程可知, 求解导热问题, 实际上就是对导热微分方程式的求解。预知某一导热问题的温度分布, 必须给出表征该问题的附加条件。

二、定解条件

1、定义: 是指使导热微分方程获得适合某一特定导热问题的求解的附加条件。

2、分类:

1) 初始条件: 初始时间温度分布的初始条件;

2) 边界条件: 导热物体边界上温度或换热情况的边界条件。

说明: ①非稳态导热定解条件有两个;

②稳态导热定解条件只有边界条件, 无初始条件。

3 、导热问题的常见边界条件可归纳为以下三类:

1) 第一类边界条件: 规定了边界上的温度值, 即 $t_w = const$ 。对于非稳态导热这类边界条件要求给出以下关系, $\tau > 0$ 时, $t_w = f_1(\tau)$;

2) 第二类边界条件: 规定了边界上的热流密度值;

对于非稳态导热这类边界条件要求给出以下关系式:

$$\text{当 } \tau > 0 \text{ 时, } -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = f_2(\tau)$$

式中 n ——为表面 A 的法线方向。

3) 第三类边界条件: 规定了边界上物体与周围流体间的表面传热系数 h 以及周围流体的温度 t_f 。

$$\text{以物体被冷却为例: } -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f)$$

对于非稳态导热, 式中 h 、 t_f 均是 τ 的函数。

三、有关说明

1 、热扩散率的物理意义

由热扩散率的定义: $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ 可知:

1) λ 是物体的导热系数, λ 越大, 在相同温度梯度下, 可以传导更多的热量。

2) ρc 是单位体积的物体温度升高 1°C 所需的热量。 ρc 越小, 温度升高 1°C 所吸收的热量越少, 可以剩下更多的热量向物体内部传递, 使物体内部温度更快的随界面温度升高而升高。由此可见 a 的物理意义:

① a 越大, 表示物体受热时, 其内部各点温度扯平的能力越大。

② a 越大, 表示物体中温度变化传播的越快。所以, a 也是材料传播温度变化能力大小的指标, 亦称导温系数。

2 、导热微分方程的适用范围

1) 适用于 q 不很高, 而作用时间长。同时傅立叶定律也适用该条件。

2) 若时间极短, 而且热流密度极大时, 则不适用。

3) 若属极低温度 (接近于 0K) 时的导热不适用。

学习了导热微分方程及边界条件后, 对于导热的绝大多数问题都可以通过给出该问题的完整数学描写后进行求解, 求出物体内的温度分布, 进而结合傅里叶定律求出热流

量或者热流密度等其它需要求解的问题。对于工程实际的一些问题，完全可以对实际问题进行适当的简化并求解，同学们要掌握解决实际问题的方法。下面通过几个例题来说明。

例题 1：一直径为 d 、长为 l 的圆杆，两端分别与温度为 t_1 及 t_2 的表面接触，杆的导热系数 λ 为常数。试对下列两种稳态情形列出杆中温度的微分方程式及边界条件，并求之：

(1) 杆的侧面是绝热的；

(2) 杆的侧面与四周流体间有稳定的对流换热，平均表面传热系数为 h ，流体温度 t_f 小于 t_1 及 t_2 。

拿到问题后，首先要分析属于什么类型的问题，并对微分方程进行简化，而后其边界条件。

$$\text{解：(1) } \begin{cases} \frac{d^2 t}{dx^2} = 0 \\ t|_{x=0} = t_1 \\ t|_{x=l} = t_2 \end{cases}$$

解方程得温度分布函数为： $t = \frac{t_2 - t_1}{l} x + t_1$

$$(2) \begin{cases} \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{4h}{\lambda d}(t - t_f) = 0 \\ t|_{x=0} = t_1 \\ t|_{x=l} = t_2 \end{cases} \quad \text{引入过剩温度 } \theta = t - t_f, \text{ 有：}$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{4h}{\lambda d} \theta = 0 \\ \theta|_{x=0} = \theta_1 = t_1 - t_f \\ \theta|_{x=l} = \theta_2 = t_2 - t_f \end{cases} \quad \text{解方程，得 } \theta = \frac{\theta_1 ch[m(x-l)] + \theta_2 sh(mx)}{ch(ml)}$$

例题 2：核反应堆的辐射防护壁因受 γ 射线的照射而发热，这相当于防护壁内有 $\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0 e^{-ax}$ 的内热源，其中 $\dot{\Phi}_0$ 是 $x=0$ 的表面的发射率， a 为已知常数。已知 $x=0$ 处

$t = t_1$ ， $x = \delta$ 处 $t = t_2$ ，防护壁内温度分布满足 $\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0$ ，导热系数 λ 为常数。试导出该

防护壁中温度分布的表达式及最高温度所在的位置。

解：该问题的完整数学描写为：

$$\begin{cases} \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0 \\ t(x=0) = t_1 \\ t(x=\delta) = t_2 \end{cases}, \text{ 也即 } \begin{cases} \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\dot{\Phi}_0}{\lambda} e^{-ax} = 0 \\ t(x=0) = t_1 \\ t(x=\delta) = t_2 \end{cases}$$

积分，得 $t = -\frac{\dot{\Phi}_0}{a^2 \lambda} e^{-ax} + c_1 x + c_2$

$$\text{代入边界条件, 得} \begin{cases} c_1 = \frac{t_2 - t_1}{\delta} + \frac{\dot{\varphi}_0}{a^2 \lambda \delta} (e^{-a\delta} - 1) \\ c_2 = t_1 + \frac{\dot{\varphi}_0}{a^2 \lambda} \end{cases}$$

将 c_1 、 c_2 值代入温度分布表达式中, 得温度分布为:

$$t = -\frac{\dot{\varphi}_0}{a^2 \lambda} e^{-ax} + \left[\frac{t_2 - t_1}{\delta} + \frac{\dot{\varphi}_0}{a^2 \lambda \delta} (e^{-a\delta} - 1) \right] x + t_1 + \frac{\dot{\varphi}_0}{a^2 \lambda}$$

最高温度应满足 $\frac{dt}{dx} = 0$

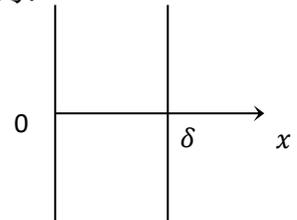
求得最高温度所在的位置为:

$$x = -\frac{1}{a} \ln \frac{\lambda a^2 (t_1 - t_2) - \dot{\varphi}_0 (e^{-a\delta} - 1)}{\dot{\varphi}_0 \delta a}$$

例题 3: 一厚为 δ 的无限大平板, 其一侧被加热, 热流密度 q_w 为常数, 另一侧向温度为 t_∞ 的环境散热, 表面传热系数为 h , 平板导热系数 λ 为常数。试列出平板中稳态温度场的微分方程式及边界条件, 并求出平板内的温度分布函数。

解: 建立如右图所示的坐标, 则该问题的微分方程式及边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 t}{dx^2} = 0 \\ -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = q_w \\ -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=\delta} = h(t|_{x=\delta} - t_\infty) \end{cases}$$



求解微分方程, 得 $t = c_1 x + c_2$

将两边界条件代入, 解得 $c_1 = -\frac{q_w}{\lambda}$, $c_2 = \frac{q_w}{h} + \frac{q_w}{\lambda} \delta + t_\infty$

则单层平壁内的温度分布表达式为: $t = \frac{q_w}{\lambda} (\delta - x) + \frac{q_w}{h} + t_\infty$

作业内容

教材 16 页第 1、3 题

效果分析与改进措施

导热最重要的内容, 与流体力学联系很紧密, 课前要求学生提前复习流体力学的知识。

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课 题目	第二章 稳态导热 1-平壁导热		授 课 时间长度	_90_ 分钟
授课 进度	第_2_周, 总第_4_次	授课对象	能源动力 181/182 建筑环境 181	
教学 目标	要求学生了解平板稳态导热热流量和热流密度的计算过程, 能根据生产需求, 分析平板的稳态导热过程, 建立平板的导热微分方程式, 并求解平板导热微分方程式, 根据求解结果定性分析平板的温度场。			
教学 重点	平板稳态导热建模、分析及求解。			
教学 难点	平板稳态导热建模、分析及求解			
教学 方法 分析	主要采用启发教学法。回顾导热微分方程式, 通过建筑围护结构导热问题引入平板稳态导热, 并讲解平板稳态导热的分析方法及思路。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学 手段 分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程 设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课 类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5分 钟)	复习导热微分方程式, 引入本次课内容。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (80分钟)	讲授新的课程内容：单层平壁稳态导热、复合平壁的导热、具有内热源平壁的导热。	在黑板上画图讲解平板稳态导热的分析、建模及方程简化。	认真聆听老师讲授内容，理解平板稳态导热的分析、建模、求解及应用。	利用课件和图片等使学生能够分析、建模及求解一般工程中的平板稳态导热问题。
第三步 (5分钟)	总结与布置作业	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。

讲义

通过平壁的导热

一、通过平壁的导热

1、单层平壁

已知：单层平壁两侧恒温且为 t_1 、 t_2 ，壁厚 δ m，如图 2-4 所示，建立坐标系，温度只在 x 方向变化，属一维温度场。

试确定温度分布并求 q 。

1) 温度分布

当 $\lambda = \text{const}$ 时，无内热源的一维稳态导热完整的数学描写为：

$$\begin{cases} \frac{d^2 t}{dx^2} = 0 \\ t|_{x=0} = t_1 \\ t|_{x=\delta} = t_2 \end{cases}$$

对微分方程积分得其通解（连续积分两次）：

$$t = c_1 x + c_2$$

其中 c_1 、 c_2 为常数，由边界条件确定。

代入边界条件，得该条件下其温度分布为： $t = \frac{t_2 - t_1}{\delta} x + t_1$

由上式可知物体内部温度分布成线性关系，即温度分布曲线的斜率是常数（温度梯度） $\frac{dt}{dx} = \frac{t_2 - t_1}{\delta}$ 。

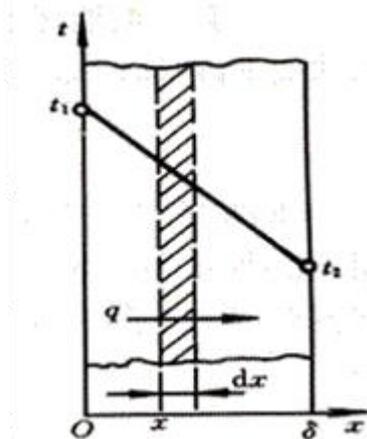


图 2-4 单层平壁

2) 热流密度 q

根据傅立叶定律，结合温度分布函数，得通过平壁的热流密度为：

$$q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{\delta} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \quad (2-18)$$

若表面积为 A ，通过平壁的导热热流量则为：

$$\Phi = \frac{\lambda A(t_1 - t_2)}{\delta} = A \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \quad (2-19)$$

此两式是通过平壁导热的计算公式，它们揭示了 q 、 Φ 与 λ 、 δ 和 Δt 之间的关系。

2 、热阻的含义

热量传递是自然界的一种转换过程，与自然界的其他转换过程类同，如：电量的转换，动量、质量等的转换。其共同规律可表示为：过程中的转换量=过程中的动力/过程中的阻力，由前可知：

在平板导热中导热热流量： $\Phi = A \frac{\lambda}{\delta} \Delta t$ ，即：

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda A}} \quad (2-21)$$

式中： Φ -----热流量，为导热过程的转移量；

Δt -----温差，为导热过程的动力；

$\frac{\delta}{\lambda A}$ -----为导热过程的阻力。

由此引出热阻的概念：

1) 热阻定义：热转移过程的阻力称为热阻。

2) 热阻分类：不同的热量转移有不同的热阻，其分类较多，如：导热阻、辐射热阻、对流热阻等。对平板导热而言又分：

面积热阻 R_A ：位面积的导热热阻称面积热

阻。

热阻 R ：整个平板导热热阻。

3) 热阻的特点：

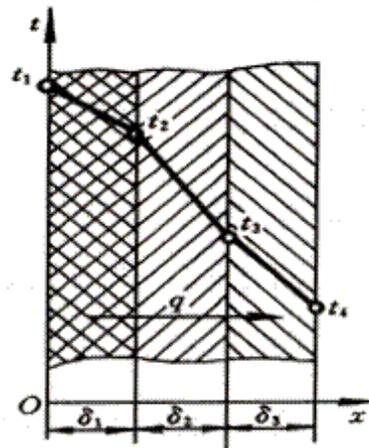


图 2-5 多层平壁

串联热阻叠加原则：在一个串联的热量传递过程中，若通过各串联环节的热流量相同，则串联过程的总热阻等于各串联环节的分热阻之和。因此，稳态传热过程热阻的组成是由各个构成环节的热阻组成，且符合热阻叠加原则。

3、复合壁的导热情况

复合壁（多层壁）：就是由几层不同材料叠加在一起组成的复合壁。如图 2-5 所示。

以下讨论三层复合壁的导热问题，如图 2-5 所示：

假设条件：层与层间接触良好，没有引起附加热阻（亦称为接触热阻）也就是说通过层间分界面时不会发生温度降。

已知各层材料厚度为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 ，对应导热系数为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ，多层壁内外表面温度为 t_1 、 t_4 ，其中间温度 t_2 、 t_3 未知， $\lambda = \text{const}$ 。

试求：通过多层壁的热流密度 q 。

解：根据平壁导热公式可知各层热阻为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{t_1 - t_2}{q} &= \frac{\delta_1}{\lambda_1} \\ \frac{t_2 - t_3}{q} &= \frac{\delta_2}{\lambda_2} \\ \frac{t_3 - t_4}{q} &= \frac{\delta_3}{\lambda_3} \end{aligned} \right\}$$

根据串联热阻叠加原理得多层壁的总热阻为（适用条件：无内热源，一维稳态导热）：

$$\frac{t_1 - t_4}{q} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}$$

则多层壁热流密度计算公式为：

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad (2-22)$$

依次类推， n 层多层壁的计算公式是：

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (2-23)$$

解得热流密度后，层间分界面上的未知温度 t_2 、 t_3 即可求出：

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} \quad (2-24)$$

说明：当导热系数 λ 对温度有依变关系时，即导热系数是温度的线性函数 $\lambda = \lambda_0(1+bt)$ 时，只需求得该区域平均温度下的 λ 值，代入以上公式即可求出正确结果。

具有内热源的导热及多维导热

一、具有内热源的导热

以上各节讨论的都是一维无内热源的导热问题。实际上，在工程技术领域中常常遇到有内热源的导热问题，例如电器及线圈中有电流通过时的发热，化工中的放热、吸热反应以及核能装置中燃料元件的放射反应等所引起的热传递等。这里作为示例，仅讨论平壁中具有均匀内热源的情形。

设图 2-19 所示的平壁具有均匀的内热源 $\dot{\Phi}$ ，其两侧同时与温度为 t_f 的流体发生对流换热，表面传热系数为 h ，现在要确定平板中任一 x 处的温度及通过该截面处的热流密度。

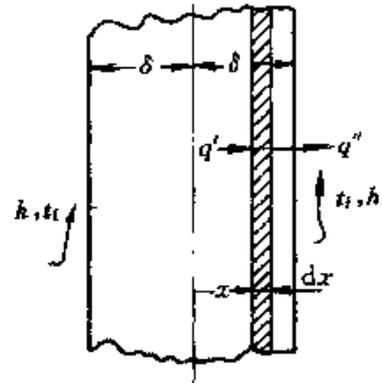


图 2-19 具有均匀内热源的平壁

由于对称性，只要研究板厚的一半即可。这样，在板的中心截面上应为第二类边界条件中的绝热边界，而在板的外表面应为第三类边界条件，因此这一问题的数学描写为：

$$\begin{cases} \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0 \\ x = 0, \frac{dt}{dx} = 0 \\ x = \delta, -\lambda \frac{dt}{dx} = h(t - t_f) \end{cases} \quad (2-42)$$

对微分方程作两次积分，得：

$$t = -\frac{\dot{\Phi}}{2\lambda} x^2 + c_1 x + c_2$$

其中常数 c_1 、 c_2 由两个边界条件式确定。

$$\begin{aligned} c_1 &= 0 \\ c_2 &= \frac{\dot{\Phi}}{2\lambda} \delta^2 + \frac{\dot{\Phi} \delta}{h} + t_f \end{aligned}$$

最后可得平板中的温度分布为：

$$t = \frac{\dot{\Phi}}{2\lambda} (\delta^2 - x^2) + \frac{\dot{\Phi} \delta}{h} + t_f \quad (2-43)$$

任一位置 x 处的热流密度仍然可由温度分布按傅里叶定律得出：

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = \dot{\Phi}_x \quad (2-44)$$

由此可见，与无内热源的平壁解相比，热流密度不再是常数，温度分布也不再是直线而是抛物线，这些都是由内热源引起的变化。

值得指出，对于给定壁面温度的情形可以看成是当表面传热系数趋于无穷大而流体温度等于壁面温度时的一个特例，当平壁两侧均为给定壁温 t_w 时平壁中的温度分布可由式 (2-43) 得出，为：

$$t = \frac{\dot{\Phi}}{2\lambda} (\delta^2 - x^2) + t_w \quad (2-45)$$

多维导热作为了解内容，要求学生自行学习。

作业内容
效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课 题目	第二章 稳态导热 2-通过圆筒壁的导热		授 课 时间长度	_90_ 分钟
授课 进度	第_3_周, 总第_5_次	授课对象	能源动力 181/182 建筑环境 181	
教学 目标	能根据第一类和第三类边界条件下圆筒壁的的导热问题, 简化圆柱坐标导热微分方程式, 能定性判断圆筒壁温度变化趋势; 能理解“临界热绝缘直径”的概念, 并熟悉常规的工程应用。			
教学 重点	临界热绝缘直径; 在第一类、第三类边界条件下, 圆筒壁温度变化趋势。			
教学 难点	临界热绝缘直径			
教学 方法 分析	混合式教学。学生在线学习“通过圆筒壁的导热”, 第一小节, 学生课上分组讨论教师所提的问题, 并给随时回答教师临时提出的问题, 第二小节学生分组讲解例题, 并回答教师和其他学生的疑问。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学 手段 分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程 设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课 类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5分 钟)	复习导热微分方程式, 引入本次课程内容。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (40 分钟)	教师就本次课核心内容思考题，学生课上分组讨论，巩固学生所学习的内容。	教师就本次课核心内容思考题，并随时听学生讨论情况，随时提问，并记录学生讨论情况。	学生分组讨论教师所提的问题，并形成一致意见，随时准备教师的提问。	学生课前学习“通过圆筒壁导热”内容，提升学生自学能力，课时讨论巩固知识，并锻炼学生沟通能力。
第三步 (30 分钟)	通过例题讲解，巩固学生掌握知识，锻炼学生演讲能力。	倾听学生对圆筒壁导热问题的理解，记录问题所在。	课前准备 PPT，课上讲解通过圆筒壁导热的例题。	通过学生授课，加深学生对圆筒壁导热问题的理解。
第四步 (15 分钟)	总结与布置作业	梳理本课程学习内容，并对学生讨论情况和例题讲解情况予以点评，并指出优点与不足。	倾听教师点评，记录本次收获。	通过教师的总结，使学生系统的掌握圆筒壁导热问题，并锻炼学生逻辑思维能力。

讲义

通过圆筒壁的导热

第一部分 学生自学环节

根据圆筒壁的导热内容，学生使用在线课程自主自学教材上 37 页到 43 页的相关内容。

第二部分 学生思考环节

根据教材内容，学生分为 6 人一组，以组的形式，共同思考并解答以下问题

1. 平直壁面的单位面积热阻、面积为 A 时的导热热阻和对流热阻，表达式与单位分别是什么？
2. 单位长度下圆筒壁的导热热阻、长度为 1 下圆筒壁的导热热阻、单位长度下圆筒壁的对流热阻，达式与单位分别是什么？
3. 试说明串联热阻叠加原则的内容及其使用条件？
4. 柱坐标系下导热微分方程式的形式？
5. 写出柱坐标直角坐标系中，径向一维稳态无内热源常导热系数导热问题的导热微分方程表达式，并请说明导热问题常见的三类边界条件形式。

6. 一维径向单层圆筒壁导热问题，第一类、第三类边界条件下的热流密度计算式，分别是什么？

7. 在之前进行“通过平壁的导热”学习者，温度在平壁厚度方向温度梯度为常数，也即热流密度是常数。那么在通过圆筒壁的导热中，请思考，热流密度沿着圆筒半径方向是否仍为常数呢？

8. “热得快”为什么要及时清除水垢？

9. 在生活和工程应用中，管道的保温是越厚越好吗？

10. 如果圆筒壁外表面温度较内表面温度为高，这时壁内温度分布曲线的情形如何？

11. 两根直径不同的蒸汽管道，外表面附设厚度相同、材料相同的绝热层。若管子外表面和绝热层外表面温度分别相等，试问两根管子每米长的热损失是否相同？

12. 发生在一个短圆柱中的导热问题，在哪些情形下可以按一维问题处理？

13. 假定人体对冷热的感觉以皮肤表面的热损失作为衡量依据。设人体脂肪层的厚度为3mm，其内表面温度为36℃且保持不变，无风条件下，裸露的皮肤外表面与空气的表面传热系数为 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；有风时，表面传热系数为 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，人体脂肪层的导热系数为 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。试确定：

①要使无风天的感觉与有风天气温-15℃时的感觉一样，则无风天气温是多少？

②在同样是-15℃的气温下，无风和刮风天，人皮肤单位面积上的热损失之比是多少？

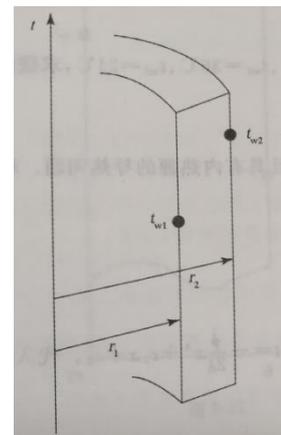
14. 某管道外径为 $2r$ ，外壁温度为 t_1 ，外包两层厚度均为 δ

($\delta_2 = \delta_3 = r$)，导热系数分别为 λ_2 和 λ_3 ($\lambda_2 = 2\lambda_3$) 的保温材料，外层表面温度为 t_2 。如果将两层保温材料的位置对调，其它条件不变，保温情况如何变化？由此能得出什么结论？

15. 如图所示，通过圆筒壁的一维稳态导热，设壁体导热系数为常数，壁温 $t_{w1} < t_{w2}$ ，圆筒壁内半径之比 $r_1/r_2 = 0.9$ 。试求：

(1) 绘出壁内的温度分布曲线。

(2) 内外壁表面温度梯度的比值。



16. 对于球壁，保温层有无“临界热绝缘直径”问题？若有， d_c 应如何计算？

17. 一直径为3mm的铜导线，每米的电阻为 $2.22 \times 10^{-3} \Omega$ 。导线外包有厚1mm、热导率为 $0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的绝缘层，绝缘层的最高耐温为65℃，环境温度为0℃，空气与绝缘层外表面的表面传热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。试确定在这种条件下导线中允许通过的最大电流。

第三部分 学生讲解环节

选择以下重点知识点，请学生进行重点讲解，并说明注意点。

1. 外径为100mm的蒸汽管道，覆盖密度为20kg/m³的抄麦玻璃棉毡保温。已知蒸汽管道外壁温度为400℃，希望保温层外表面温度不超过50℃，且每米管道上散热量小于163W，试确定所需要的保温层厚度。

2. 某外径 $d_2=15\text{mm}$ 的管道需要保温, 若保温层外表面与空气之间的换热系数 $h_2=12\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 试求

(1) 采用导热系数 $\lambda_x=0.12\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的石棉制品作为保温层材料是否合适?

(2) 采用导热系数 $\lambda_x=0.07\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的矿渣棉作为保温层材料是否合适?

(3) 若因环境条件改变, 保温层外表面与空气之间的换热系数增加为 $h_2=20\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 采用导热系数 $\lambda_x=0.12\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的石棉制品作为保温层材料是否合适?

3. 一蒸汽锅炉炉膛中的蒸发受热面管壁受到温度为 1000°C 的烟气加热, 管内沸水温度为 200°C , 烟气与受热面管子外壁间的复合换热表面传热系数为 $100\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 沸水与内壁间的表面传热系数为 $5000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 管壁厚 6mm , 管壁 $\lambda=42\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 外径为 52mm 。试计算下列三种情况下受热面单位长度上的热负荷。

(1) 换热表面是干净的

(2) 外表面结了一层厚为 1mm 的烟灰, 其 $\lambda=0.08\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

(2) 内表面上有一层厚为 2mm 的水垢, 其 $\lambda=1\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

第四部分 教师解答总结

教师根据学生学习情况和效果, 支出学习过程中的问题、不足, 总结本节课的知识点和学习结果。

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第二章 稳态导热 3-通过肋壁的导热、通过接触面的导热	授课时间长度	_90_ 分钟	
授课进度	第_3_周, 总第_6_次	授课对象	能源动力 181/182 建筑环境 181	
教学目标	能认识能源动力工程专业中常见的肋片; 能分析等截面直肋稳态导热的传热规律; 能从散热的角度评价加装肋片后换热效果; 能分析接触表面热阻大小的影响因素。			
教学重点	掌握物理问题数学化的分析方法; 能熟练运用导热微分方程解决一维稳态导热问题; 能准确的写出等截面直肋的温度分布及通过肋片的散热量。			
教学难点	对于非计算区域边界交换热量的处理; 能够准确写出物理模型的数学描写			
教学方法分析	混合式教学。实施生授生评, 教师总结的授课方式。学生分组讲解本次课内容, 教师予以总结。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5分钟)	复习导热微分方程式, 引入本次课内容。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (80 分钟)	学生分组授课，完成“肋片导热”、“肋片效率”和“接触面的导热”的授课。	教师课前将学生分组，并不下达授课任务；课上认证听学生讲课，并记录学生授课情况。	学生分组讲授“肋片导热”、“肋片效率”和“接触面的导热”，其他组提疑问。	通过学生授课，强化学生自学能力，加强学生对知识的理解与运用能力。
第四步 (15 分钟)	总结与布置作业	梳理本课程学习内容，并对学生授课情况予以点评，并指出优点与不足；总结本次课内容。	倾听教师点评，记录本次收获。	通过教师的总结，使学生系统的掌握肋片导热问题，并锻炼学生逻辑思维能力。

讲义

通过肋片的导热

一、基本概念

- 1、肋片：依附于基础表面上的扩展表面。
- 2、常见肋片的结构：针肋、直肋、环肋、大套片。
- 3、肋片导热的作用及特点：
 - 1) 作用：增大对流换热面积及辐射散热面，以强化换热。
 - 2) 特点：在肋片伸展的方向上有表面的对流换热及辐射散热，肋片中沿导热热流传递的方向上热流量是不断变化的。即： 。
- 4、分析肋片导热解决的问题：
 - 一是确定肋片的温度沿导热热流传递的方向是如何变化的？
 - 二是确定通过肋片的散热热流量有多少？

肋片在工程实际的换热设备中，常用于强化对流换热，如散热器外加肋片，翅片管换热器等都是应用肋片强化换热的典型例子。肋片的型式多种多样，其中最简单的就是等截面直肋。

二、通过等截面直肋的导热

如图 2-7 所示，已知肋根温度为 t_{f0} ，周围流体温度为 t_f ，且 h 为复合换热的表面传热系数。试确定：肋片中的温度分布及通过肋片的散热量。

解：假设：1) 肋片在垂直于纸面方向（即深度方向）很长，不考虑温度沿该方向的变化，因此取单位长度分析；

- 2) 材料导热系数 λ 及表面传热系数 h 均为常数，沿肋高方向肋片横截面积 A 不变；
- 3) 表面上的换热热阻 $1/h$ 远大于肋片的导热热阻 δ/λ ，即肋片上任意截面上的温度均匀不变；
- 4) 肋片顶端视为绝热，即 $q_x = 0$ ；

在上述假设条件下，复杂的肋片导热问题就转化为一维稳态导热，如图 2.7 (b)。但是肋片导热不同于前面的平壁和圆筒壁的导热。从图 2-7 中可以看出，肋片的边界为肋根和肋端，分别添加

第一和第二类边界条件，但肋片的周边也要与周围流体进行对流换热，将该项热量作为肋片的内热源进行处理，这样肋片的导热问题就简化成了一维有内热源的稳态导热问题。

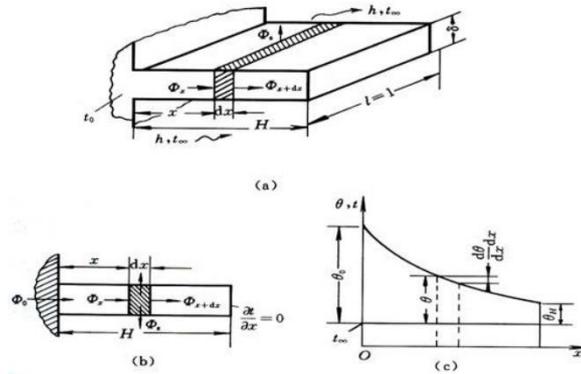


图 2-7 通过肋片的热量传递

其相应的导热微分方程为：

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\dot{\phi}}{\lambda} = 0 \quad (a)$$

计算区域的边界条件是：

$$\begin{cases} x = 0 & t = t_0 \\ x = H & dt/dx = 0 \end{cases} \quad (b)$$

针对长度为 dx 的微元体，参与换热的截面周长为 P ，则微元表面的总散热量为：

$$\dot{\Phi}_s = (Pdx)h(t - t_\infty) \quad (c)$$

微元体的体积为 $V = A_c dx$ ，那么，微元体的折算源项为：

$$\dot{\phi} = -\frac{\dot{\Phi}_s}{A_c dx} = -\frac{Ph(t-t_\infty)}{A_c} \quad (d)$$

负号表示肋片向环境散热，所以源项取负。

将式 (d) 代入式 (a)，得：

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{Ph(t-t_\infty)}{\lambda A_c} \quad (e)$$

该式为温度 t 的二阶非齐次常微分方程。为求解方便，引入过剩温度 θ ，使式 (e) 变形成为二阶齐次方程，可得所研究问题的完整数学描写为：

$$\begin{cases} \frac{d^2 \theta}{dx^2} = m^2 \theta \\ x = 0 & \theta = \theta_0 = t_0 - t_\infty \\ x = H & \frac{d\theta}{dx} = 0 \end{cases} \quad (2-35)$$

式中 $m = \sqrt{hP/(\lambda A_c)}$ 为一常量。

式 (2-35) 是一个二阶线性齐次常微分方程，求解得其通解为：

$$\theta = c_1 e^{mx} + c_2 e^{-mx} \quad (f)$$

其中 c_1, c_2 为积分常数，由边界条件确定。将边界条件代入得：

$$c_1 + c_2 = \theta_0 \quad c_1 m e^{mH} - c_2 m e^{-mH} = 0 \quad (g)$$

求解，得：

$$\begin{cases} c_1 = \theta_0 \frac{e^{-mH}}{e^{mH} + e^{-mH}} \\ c_2 = \theta_0 \frac{e^{mH}}{e^{mH} + e^{-mH}} \end{cases}$$

将 c_1 、 c_2 代入通解中，得肋片中的温度分布为：

$$\theta = \theta_0 \frac{e^{mx} + e^{2mH} e^{-mx}}{1 + e^{2mH}} = \theta_0 \frac{ch[m(x-H)]}{ch(mH)} \quad (2-36)$$

令 $x = H$ ，即可从上式得出肋端温度的计算式：

$$\theta_H = \frac{\theta_0}{ch(mH)} \quad (2-37)$$

据能量守恒定律知，由肋片散入外界的全部热流量都必须通过处的肋根截面。将式(2-36)的代入傅里叶定律的表达式，即得通过肋片散入外界的热流量为：

$$\Phi_{x=0} = -\lambda A_c \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0} = -\lambda A_c \theta_0 (-m) \frac{ch(mH)}{sh(mH)} = \lambda A_c \theta_0 m th(mH) = \frac{hP}{m} \theta_0 m th(mH) \quad (2-38)$$

说明：1) 上述结论是在假设肋端绝热的情况下推出的，即 $x = H \quad dt/dx = 0$ 。可应用于大量实际肋片，特别是薄而长结构的肋片，可以获得实用上足够精确的结果。若必须考虑肋端的散热，则 $x = H, dt/dx \neq 0$ ，上述公式不适用，此时可在肋端添加第三类边界条件进行求解；

2) 计算热流量 $H' = H + \frac{\delta}{2}$ 的比较简便的方法。若肋片的厚度为 δ ，引入假想高度代替实际肋高仍按式(2-38)计算 Φ 。这种处理，实际上是基于这样一种想法，即为了照顾末梢端面的散热而把端面面积铺展到侧面上去。

三、肋片效率

前面推导的等截面直肋的情况是肋片求解中一种最为简单的情况。变截面直肋或等厚度环肋的情况要复杂一些，因为对于这些情况，截面积 A_c 不能再作为常量处理，因而其基本微分方程的求解要复杂得多。为了表征肋片散热的有效程度，引入肋效率的概念，它有以下物理意义：

$$\eta_f = \frac{\text{实际散热量}}{\text{假设整个肋表面处于肋基温度下的散热量}} \quad (2-39)$$

已知肋效率 η_f 即可计算出肋片的实际散热量。对于等截面直肋，其肋效率为：

$$\eta_f = \frac{\frac{hP}{m} \theta_0 m th(mH)}{hPH\theta_0} = \frac{th(mH)}{mH} \quad (2-40)$$

对于直肋，假定肋片长度 l 比其厚度 δ 要大得多，所以可取出单位长度来研究。其中参与换热的周界 $P=2$ ，于是有：

$$mH = \sqrt{\frac{hP}{\lambda A_c}} H = \sqrt{\frac{2h}{\lambda \delta \times 1}} H = \sqrt{\frac{2h}{\lambda \delta}} H \quad (h)$$

对于环肋，理论分析表明，肋效率也是参数 mH 的单值函数。假定环的内半径远大于其厚度，则上式同样成立。将上式的分子分母同乘以 $H^{1/2}$ ，得：

$$mH = \sqrt{\frac{hP}{\lambda\delta H}} H^{3/2} = \sqrt{\frac{2h}{\lambda A_L}} H^{3/2} \quad (2-41)$$

式中， $A_L = \delta H$ 代表肋片的综剖面积。实用上，往往采用以肋效率 η_f 与式(2-41)所示的 mH 或

$\sqrt{\frac{2h}{\lambda A_L}} H^{3/2}$ 为坐标的曲线，来表示各种肋片的理论解的结果。图2-14、2-15(见教材41页)分别示出了直肋和环肋的这种曲线图。

四、接触热阻

两个名义上互相接触的固体表面，实际上接触仅发生在一些离散的面积元上，如图2-18所示。在未接触的界面之间的间隙中常常充满空气，热量将以导热及辐射的方式穿过这种气隙层。这种情况与两固体表面真正完全接触相比，增加了附加的传递阻力，称为接触热阻。对于需要强化换热的情形，如肋片表面，接触热阻是有害的。当采用在圆管上缠绕金属带以生成环肋，或在管束间套以金属薄片形成管片式换热器时，采用胀管或浸镀锡液的操作都是为了有效地减少接触热阻。当界面间有了接触热阻时界面上的温度就不再连续，如图2-18所示。目前，不同接触情况下的接触热阻主要靠实验测定。

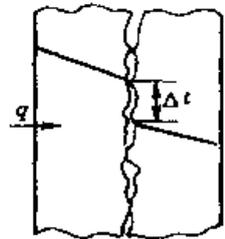


图2-18 固体表面间的实际接触情况

例题(习题2-69): 一种利用对比法测定材料导热系数的装置示意图如附图所示。用导热系数已知的材料A及待测导热系数的材料B制成相同尺寸的两个长圆柱体，并垂直地安置于温度为 t_s 的热源上，采用相同的方法冷却两个柱体，并在离开热源相同的距离 x_1 处测定两柱体的温度 t_A 及 t_B 。已知 $\lambda_A = 200\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， $t_A = 75^\circ\text{C}$ ， $t_B = 65^\circ\text{C}$ ， $t_s = 100^\circ\text{C}$ ， $t_\infty = 25^\circ\text{C}$ 。试确定 λ_B 之值。



习题2-69附图

解: 这是一个应用肋片导热进行实际问题分析的典型。根据

肋片导热的分析知，肋片温度分布函数为： $\theta = c_1 e^{mx} + c_2 e^{-mx}$ ，对于长肋片，由于肋端温度为有限大小，则只有 $c_1 = 0$ ，所以其温度分布函数简化为 $\theta = c_2 e^{-mx}$ ，当 $x = 0$ 时， $\theta = \theta_s = t_s - t_\infty$ ，则 $\theta = (t_s - t_\infty) e^{-mx}$ 。对于柱体A和B，分别得：

$$t_A - t_\infty = (t_s - t_\infty) e^{-m_A x_1}$$

$$t_B - t_\infty = (t_s - t_\infty) e^{-m_B x_1}$$

上两式联立，解得 $\lambda_B = \lambda_A \left(\frac{\ln \frac{t_A - t_\infty}{t_s - t_\infty}}{\ln \frac{t_B - t_\infty}{t_s - t_\infty}} \right)^2$

与该题类似，也可以在柱体A和B上测得温度相同的点，进而确定另一柱体的导热系数，同学们可以根据以上方法进行求解。

五、教学总结

本次课程通过分析肋片的导热问题，进一步巩固学生对复杂的工程传热问题经过适当简化建立起合理的物理与数学模型，从而运用已有的数学及传热学知识进行求解的一整套分析方法。难点在于对于非计算区域边界传递的热量的处理。

通过多元化的教学方法使课堂学习由传统的“灌输”过程变为分析问题解决问题的实际演练过程，注重思路和方法传授。教学方法以课堂讲授法为主；采用层层递进、分析推导的方法突出重点，用分析证明的方法突破难点。采用新的教学理念，讲课过程根据教学内容的特点采用师生角色互换，师生合作的方式提出问题解决问题。通过提问，启发，引导等方式激发学生的学习欲望，活跃学生思维，使学生由被动式学习变为主动运用知识解决问题。将课堂教学由枯燥的公式推导过程变为分析问题解决问题的实际演练过程。教学手段以传统的口述、粉笔加黑板为主，ppt的手段为辅。根据课程内容，设计适当的多媒体课件，丰富学生视野，激发学生学习兴趣，提高课堂教学效率。融知识传授、能力培养、素质教育于一体。真正为培养厚基础，能力强的人才模式服务，使学生能真正掌握应用所学内容理论分析和解决实际问题的思路和方法。

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课 题目	第三章 非稳态导热 1-非稳态导热的基本概念和集总参数法		授 课 时间长度	_90_ 分钟
授课 进度	第_4_周, 总第_7_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学 目标	能识别非稳态导热的三个阶段; 能利用毕焐数和傅里叶数分析一些简单非稳态导热问题; 能将利用集中参数法分析一些简单的工程问题;。			
教学 重点	非稳态导热的分类; 集中参数法			
教学 难点	集中参数法			
教学 方法 分析	主要采用启发式和讨论式教学法。通过一些工程和生活中实例引入基本概念。通过工程实际问题, 引入集中参数法, 并利用板书讲解集中参数法。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学 手段 分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程 设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课 类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习通过肋片导热, 引入本次课内容。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出本次课重点内容	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (80 分钟)	讲授新的课程内容：非稳态导热的基本概念、集中参数法。	利用课件展示基本概念和基本理论；通过图片和实物的展示深入剖析推导集中参数法。	认真聆听老师讲授内容，理解非稳态导热的概念、集中参数法。	利用课件和图片等让学生掌握传热过程的理论及类比的方法、使学生掌握非稳态导热的基本概念和集中参数法。
第四步 (15 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

非稳态导热的基本概念和集总参数法

一、非稳态导热

1、定义：物体的温度随时间而变化的导热过程称非稳态导热。

2、分类：根据物体内部温度随时间而变化的特征不同分：

1) 物体的温度随时间的推移逐渐趋于恒定值，即： $\tau \uparrow t = const$;

2) 物体的温度随时间而作周期性变化。如墙体的温度在一天内随室外气温的变化而作周期性变化，在一年内随季节的变化而作周期性变化。

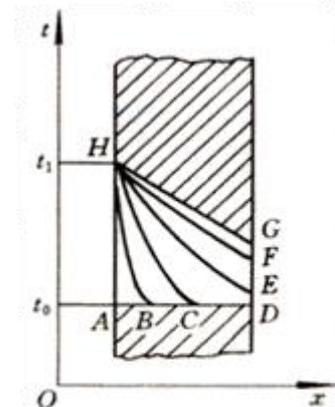


图 3-1 非稳态导热过程中的温度分布

我们仅分析前一种非稳态导热过程的特点。如图 3-1 所示，设一平壁，其初始温度为 t_0 ，令其左侧的表面温度突然升高到 t_1 并保持不变，而右侧仍与温度为 t_0 的空气接触，试分析物体温度场的变化过程。

物体的温度分布通常要经历以下的变化过程。首先，物体与高温表面靠近部分的温度很快上升，而其余部分仍保持原来的 t_0 。如图中曲线 HBD。随着时间的推移，由于物体导热温度变化波及范围扩大，以致在一定时间后，右侧表面温度也逐渐升高，图中曲线 HCD、HE、HF 示意性地表示了这种变化过程。最终达到稳态时，温度分布保持恒定，如图中曲线 HG（若 $\lambda = const$ ，则 HG 是直线）。

以上分析表明，在上述非稳态导热过程中，物体中的温度分布存在着两个不同阶段。

(1) 非正规状况阶段（右侧面不参与换热）

温度分布呈现出主要受初始温度分布控制的特性。在这一阶段，物体中的温度分布受初始温度分布很大的影响。

(2) 正规状况阶段 (右侧面参与换热)

当过程进行到一定深度时，物体初始温度分布的影响逐渐消失，物体中的温度分布主要取决于边界条件及物性。正规状况阶段的温度变化规律是本章讨论的重点。

2) 二类非稳态导热的区别：前者存在着有区别的两个不同阶段，而后者不存在。

3. 特点：

非稳态导热过程中，在与热流量方向相垂直的不同截面上热流量不相等，这是非稳态导热区别于稳态导热的一个特点。

原因：由于在热量传递的路径上，物体各处温度的变化要积聚或消耗能量，所以，在热流量传递的方向上 $\Phi \neq const$ 。

图 3-2 定性地示出了图 3-1 所示的非稳态导热平板，从左侧面导入的热流量 Φ_1 及从右侧面导出的热流量 Φ_2 随时间变化的曲线。在整个非稳态导热过程中，这两个截面上的热流量是不相等的，但随着过程的进行，其差别逐渐减小，直至达到稳态时热流量相等。图中有阴影线部分就代表了平板升温过程中所积聚的能量。

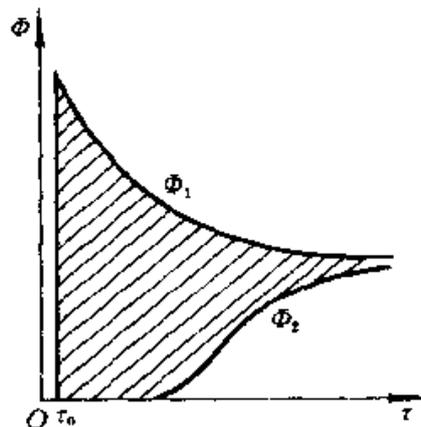


图 3-2 平板非稳态导热过程中两侧表面上导热量随时间的变化

4. 非稳态导热的初始条件

导热微分方程式连同初始条件及边界条件一起，完整地描写了一个特定的非稳态导热问题。非稳态导热问题的求解，实质上归结为在规定的初始条件及边界条件下求解导热微分方程式。这是本章的主要任务。初始条件的一般形式是：

$$t(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \tag{3-1}$$

一个实用上经常遇到的简单特例是初始温度均匀，即：

$$t(x, y, z, 0) = t_0 \tag{3-2}$$

边界条件的表示方法已在第二章中讨论过。

二. 物体温度分布与边界条件的关系

1. 物体温度分布与边界条件的关系

为了说明第三类边界条件下非稳态导热时物体中的温度变化特性与边界条件参数的关系，分析一简单情形。

已知：设有一块厚 2δ 的金属平板，初始温度为 t_0 ，突然将它置于温度为 t_∞ 的流体中进行冷却，表面传热系数为 h ，平板导热系数为 λ 。

由于面积热阻 δ/λ 与 $1/h$ 的相对大小的不同,平板中温度场的变化会出现以下三种情况(如图3-3所示):

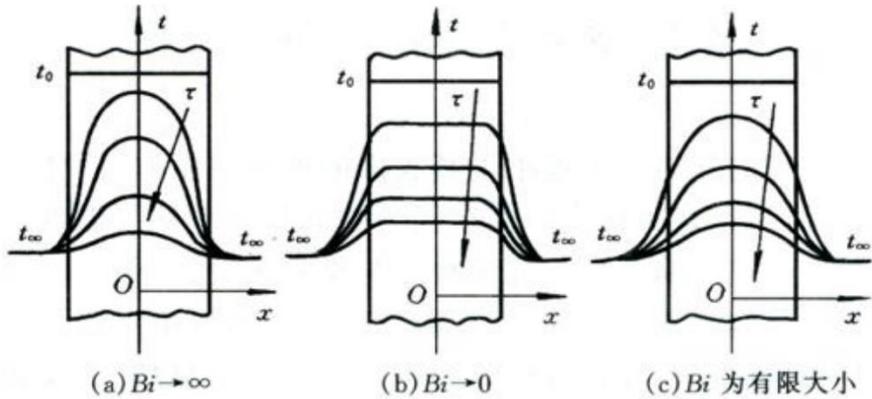


图 3-3 毕渥数 Bi 对平板温

(1) $1/h \ll \delta/\lambda$

这时, 由于表面对流换热热阻 $1/h$ 几乎可以忽略, 因而过程一开始平板的表面温度就被冷却到 t_∞ 。随着时间的推移, 平板内部各点的温度逐渐下降而趋近于 t_∞ , 如图3-3(a)。

(2) $\delta/\lambda \ll 1/h$

这时, 平板内部导热热阻 δ/λ 几乎可以忽略, 因而任一瞬间平板中各点温度接近均匀, 并随着时间的推移整体地下降, 逐渐趋近于 t_∞ , 如图3-3(b)。

(3) $1/h$ 与 δ/λ 的数值比较接近

这时, 平板中不同时刻的温度分布介于上述两种极端情况之间, 如图3-3(c)。

2. 与非稳态导热有关的准则数

由此可见, 表面对流换热热阻 $1/h$ 与导热热阻 δ/λ 的相对大小对物体中非稳态导热温度场的分布有重要影响。因此, 引入表征二者比值的无量纲数:

毕渥数:

(1) 定义式:

$$Bi = \frac{\delta/\lambda}{1/h} = \frac{\delta h}{\lambda} \quad (3-3)$$

毕渥数属特征数(准则数)。

(2) Bi 的物理意义: Bi 是固体内部导热热阻与其界面上换热热阻之比。其大小反映了物体在非稳态条件下内部温度场的分布规律。

(3) 特征数(准则数): 表征某一物理现象或过程特征的无量纲数。

(4) 特征长度: 是指特征数定义式中的几何尺度。

3-2 集总参数法的简化分析

一、集总参数法

1. 定义: 当固体内的 $\delta/\lambda \ll 1/h$ 时, 固体内的温度趋于一致, 此时可认为整个固体在同一瞬间均处于同一温度下, 这时求解的温度仅是时间的一元函数, 而与坐标无关, 好象该固体原来连续

分布的质量与热容量汇总到一点上，而只有一个温度值那样。这种忽略物体内部导热热阻的简化分析方法称为集总参数法。

2. 集总参数法的计算方法

已知：有一任意形状的物体，其体积为 V ，面积为 A ，初始温度为 t_0 ，在初始时刻，突然将其置于温度恒为 t_∞ 的流体中，且 $t_0 > t_\infty$ ，固体与流体间的表面传热系数 h ，固体的物性参数均保持常数。设同一时刻物体内部温度相等。

试根据集总参数法确定物体温度随时间的依变关系及在一段时间 τ 内物体与流体间的换热量。

解：（1）建立非稳态导热数学模型

方法一：据非稳态有内热源的导热微分方程：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\phi}}{\rho c}$$

∵ 物体内部导热热阻很小，忽略不计。

∵ 物体温度在同一瞬间各点温度基本相等，即 t 仅是 τ

的一元函数，而与坐标 x 、 y 、 z 无关，即

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

则：

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\dot{\phi}}{\rho c} \quad (a)$$

∵ $\dot{\phi}$ 可视为广义热源，而且热交换的边界不是计算边界（零维无任何边界）。

∴ 界面上交换的热量应折算成整个物体的体积热源，即：

$$-\dot{\phi}V = hA(t - t_\infty) \quad (b)$$

∵ $t > t_\infty$ ，物体被冷却。∴ $\dot{\phi}$ 应为负值。

由（a）、（b）式得：

$$\rho c V \frac{dt}{d\tau} = -hA(t - t_\infty) \quad (3-4)$$

上式即为导热微分方程式。

注意：若 $t > t_\infty$ ，物体被冷却，上述导热微分方程式仍然成立，大家可考虑一下。

方法二：根据能量守恒原理，建立物体的热平衡方程，即：

物体与环境的对流散热量 = 物体内能的减少

则有： $\rho c V \frac{dt}{d\tau} = -hA(t - t_\infty)$ ，与方法一建立的微分方程相同。

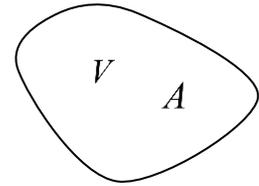
（2）物体温度随时间的依变关系

引入过余温度： $\theta = t - t_\infty$

则式（3-4）表示成： $\rho c V \frac{d\theta}{d\tau} = -hA\theta$

其初始条件为： $\theta(0) = t_0 - t_\infty$

将 $\rho c V \frac{d\theta}{d\tau} = -hA\theta$ 分离变量求解微分方程 $\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{hA}{\rho c V} d\tau$



h, t_∞

集总参数法的简化分析

对时间 τ 从0 \rightarrow τ 积分, 则:

$$\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = - \int_0^{\tau} \frac{hA}{\rho cV} d\tau$$

$$\ln \frac{\theta}{\theta_0} = - \frac{hA}{\rho cV} \tau$$

即:
$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t-t_{\infty}}{t_0-t_{\infty}} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho cV} \tau\right) \quad (3-5)$$

其中:
$$\frac{hA}{\rho cV} \tau = \frac{hV}{\lambda A} \frac{\lambda}{(V/A)^2 \rho c} \tau = \frac{h(V/A)}{\lambda} \frac{a\tau}{(V/A)^2} = Bi_V Fo_v \quad (3-6)$$

V/A 是具有长度的量纲, 记为 l ; 则:

毕渥数: $Bi_V = \frac{hl}{\lambda}$; 傅立叶数: $Fo_v = \frac{a\tau}{l^2}$;

说明: Bi_V 、 Fo_v 中的特征长度为 V/A 。

故得:
$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t-t_{\infty}}{t_0-t_{\infty}} = \exp(-Bi_V Fo_v) \quad (3-7)$$

由此可见, 采用集总参数法分析时, 物体内的过剩温度随时间成指数曲线关系变化。而且开始变化较快, 随后逐渐变慢。

指数函数中的 $\frac{hA}{\rho cV}$ 的量纲与 $1/\tau$ 的量纲相同, 如果时间 $\tau = \frac{hA}{\rho cV}$, 则:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t-t_{\infty}}{t_0-t_{\infty}} = \exp(-1) = 0.368 = 36.8\%$$

则: $\frac{hA}{\rho cV}$ 称时间常数, 记为 τ_c 。

τ_c 的物理意义: 表示物体对外界温度变化的响应程度。

当时间 $\tau = \tau_c$ 时, 物体的过剩温度已是初始过剩温度值的 36.8% 。

(3) 换热量的计算:

确定从初始时刻到某一瞬间这段时间内, 物体与流体所交换的热量, 首先求得瞬时热流量:

将 $\frac{dt}{d\tau}$ 代入瞬时热流量的定义式得:

$$\Phi = -\rho cV \frac{dt}{d\tau} = -\rho cV(t_0 - t_{\infty}) \left(-\frac{hA}{\rho cV}\right) \exp\left(-\frac{hA}{\rho cV} \tau\right) = hA(t_0 - t_{\infty}) \exp\left(-\frac{hA}{\rho cV} \tau\right)$$

式中负号是为了使 Φ 恒取正值而引入的。

若 $t_0 < t_{\infty}$ (物体被加热), 则用 $t_{\infty} - t_0$ 代替 $t_0 - t_{\infty}$ 即可。

然后求得从时间 $\tau = 0$ 到 τ 时刻间的总热流量:

$$Q_{\tau} = \int_0^{\tau} \Phi d\tau = -\rho cV \frac{dt}{d\tau} = (t_0 - t_{\infty}) \int_0^{\tau} hA \exp\left(-\frac{hA}{\rho cV} \tau\right) d\tau = (t_0 - t_{\infty}) \rho cV \left[1 - \exp\left(-\frac{hA}{\rho cV} \tau\right)\right]$$

(3-9)

3. 集总参数法的判别条件

对形如平板、圆柱和球这一类的物体, 如果毕渥数满足以下条件:

$$Bi_V = \frac{h(V/A)}{\lambda} < 0.1M \quad (3-10)$$

则物体中各点间过余温度的偏差小于 5%。其中 M 是与物体几何形状有关的无量纲数。

无限大平板: $M = 1$;

无限长圆柱: $M = 1/2$;

球: $M = 1/3$ 。

毕渥数的特征长度为 V/A , 不同几何形状, 其值不同:

厚度为 2δ 的平板: $\frac{V}{A} = \frac{A\delta}{A} = \delta$;

半径为 R 的圆柱: $\frac{V}{A} = \frac{\pi R^2 l}{2\pi R l} = \frac{R}{2}$

半径为 R 的球: $\frac{V}{A} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{4\pi R^2} = \frac{R}{3}$ 。

由此可见, 对平板: $Bi_V = Bi$;

对圆柱: $Bi_V = Bi/2$;

对球体: $Bi_V = Bi/3$ 。

因此, 集总参数法的判别条件也可写为: $Bi = \frac{hl}{\lambda} \leq 0.1$, 这里 l 是特征长度, 对于平板是指平板的半厚 δ ; 对于圆柱体和球体, 是指半径 R 。

二、毕渥数 Bi_V 与傅立叶数 Fo_v 的物理意义

1. Bi_V

(1) 定义: 表征固体内部单位导热面积上的导热热阻与单位面积上的换热热阻 (即外部热阻) 之比, 即:

$$Bi_V = \frac{h(V/A)}{\lambda}$$

Bi_V 越小, 表示内热阻越小, 外部热阻越大。此时采用集总参数法求解的结果就越接近实际情况。

(2) 物理意义: Bi_V 的大小反映了物体在非稳态导热条件下, 物体内部温度场的分布规律。

2. Fo_v

(1) 定义: Fo_v 表征两个时间间隔相比所得的无量纲时间。

$$Fo_v = \frac{\tau}{(l^2/a)}$$

分子 τ 是从边界上开始发生热扰动的时刻起到所计时刻为止的时间间隔。分母可视为边界上发生的有限大小的热扰动穿过一定厚度的固体层扩散到 l^2 的面积上所需的时间。

(2) 物理意义: 表示非稳态导热过程进行的程度, Fo_v 越大, 热扰动就越深入地传播到物体内部, 因而物体内部各点的温度越接近周围介质的温度。

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第三章 非稳态导热 2-瞬态导热		授课时间长度	90 分钟
授课进度	第 4 周, 总第 8 次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	能粗略地描绘出大平壁非稳态导热的温度场; 掌握无限大平壁在第三类边界条件下非稳态导热分析解的结论及其应用。			
教学重点	无限大平壁非稳态导热分析解的方法; 无限大平壁在第三类边界条件下非稳态导热分析解的结论及其应用			
教学难点	无限大平壁在第三类边界条件下非稳态导热分析解的结论及其应用			
教学方法分析	采用了启发式对话式的教学方法, 注重培养学生在非稳态导热方面的创造性思维和分析问题解决问题的能力; 采用问题教学法, 在教学过程中注重培养学生参与分析问题和解决问题的习惯, 教授学生掌握科学的学习方法, 培养良好的学习能力。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导 5 分钟; 授新课内容 80 分钟; 讨论与提问 0 分钟; 总结与布置作业 5 分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习非稳态导热的基本概念和集总参数法, 引入本次课内容。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (80 分钟)	讲授新的课程内容：平板加热或冷却过程的分析解法、Fo 准则对平板温度分布的影响、Bi 准则对平板温度分布的影响。	采用板书与课件结合的方式讲解课程内容，深入剖析傅里叶数和毕渥数对大平板非稳态导热温度场的影响。	认真聆听老师讲授内容，理解大平板非稳态导热问题求解思路，理解大平板非稳态导热问题的结论。	利用课件和图片等让学生掌握平板加热或冷却过程的分析解法、Fo 准则对平板温度分布的影响、Bi 准则对平板温度分布的影响。
第三步 (5 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

瞬态导热

一、限大平板的分析解

已知：厚度 2δ 的无限大平板，初温 t_0 ，初始瞬间将其放于温度为 t_∞ 的流体中，而且 $t_\infty > t_0$ ，流体与板面间的表面传热系数为一常数。试确定在非稳态过程中板内的温度分布。

解：平板两面对称受热，所以其内温度分布以其中心截面为对称面。

对于 $x \geq 0$ 的半块平板，其导热微分方程及定解条件为：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (0 < x < \delta, \tau > 0) \quad (3-11)$$

$$t(x, 0) = t_0 \quad (0 \leq x \leq \delta) \quad (3-12)$$

$$\left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3-13)$$

$$h[t(\delta, \tau) - t_\infty] = -\lambda \left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta} \quad (3-14)$$

引入过余温度 $\theta = t(x, \tau) - t_\infty$ ，上列四式化为：

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (0 < x < \delta, \tau > 0) \quad (3-15)$$

$$\theta(x, 0) = \theta_0 \quad (0 \leq x \leq \delta) \quad (3-16)$$

$$\left. \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3-17)$$

$$h\theta(\delta, \tau) = -\lambda \left. \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta} \quad (3-18)$$

对偏微分方程 $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$ 分离变量求解得：

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(\beta_n \delta)^2 \frac{a\tau}{\delta^2}} \frac{\sin(\beta_n \delta) \cos\left[(\beta_n \delta) \frac{x}{\delta}\right]}{\beta_n \delta + \sin(\beta_n \delta) \cos(\beta_n \delta)} \quad (3-19)$$

其中离散值 β_n 是下列超越方程的根，称为特征值：

$$\tan(\beta_n \delta) = \frac{Bi}{\beta_n \delta}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3-20)$$

其中 Bi 是以 δ 为特征长度的毕渥数。

由此可见：平板中的无量纲过余温度 θ/θ_0 与三个无量纲数有关：以平板厚度一半 δ 为特征长度的傅立叶数、毕渥数及 x/δ ，即：

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t(x, \tau) - t_\infty}{t_0 - t_\infty} = f\left(Fo, Bi, \frac{x}{\delta}\right) \quad (3-21)$$

二、非稳态导热的正规状况阶段

1. 平板中任一点的过余温度与平板中心的过余温度的关系

前述得到的分析解是一个无穷级数，计算工作量大，但对比计算表明，当 $Fo > 0.2$ 时，采用该级数的第一项与采用完整的级数计算平板中心温度的误差小于1%，因此，当 $Fo > 0.2$ 时，用级数的第一项代替整个级数，所带来的误差工程计算是可以允许的，此时采用以下简化结果：

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = \frac{2 \sin(\beta_1 \delta)}{\beta_1 \delta + \sin(\beta_1 \delta) \cos(\beta_1 \delta)} e^{-(\beta_1 \delta)^2 \frac{\alpha \tau}{\delta^2}} \cos\left[\left(\beta_1 \delta\right) \frac{x}{\delta}\right] \quad (3-22)$$

其中特征值 β_n ($n = 1, 2, \dots$) 之值与 Bi 数有关。从式(3-20)还可看出，作为该超越方程的根 $\beta_n \delta$ 是作为整体而求解的，为方便起见，用 μ_n 表示 $\beta_n \delta$ 。

由式(3-22)可知： $Fo > 0.2$ 以后平板中任一点的过余温度 $\theta(x, \tau)$ 与平板中心的过余温度 $\theta(0, \tau) = \theta_m(\tau)$ 之比为：

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_m(\tau)} = \cos\left(\mu_1 \frac{x}{\delta}\right) \quad (3-23)$$

此式反映了非稳态导热过程中一种很重要的物理现象，即当 $Fo > 0.2$ 以后，虽然 $\theta(x, \tau)$ 与 $\theta_m(\tau)$ 各自均与 τ 有关，但其比值则与 τ 无关，而仅取决于几何位置 (x/δ) 及边界条件 (Bi 数)。也就是说，初始条件的影响已经消失，无论初始条件分布如何，只要 $Fo > 0.2$ ， $\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_m(\tau)}$ 之值是一个常数，也就是无量纲的温度分布是一样的。非稳态导热的这一阶段就是前面已提到的正规状况或充分发展阶段。确认正规状况阶段的存在具有重要的工程实用意义。因为工程技术中关心的非稳态导热过程常常处于正规状况阶段，此时的计算可以采用简化公式(3-22)。

2. 非稳态导热过程中传递的热量

(1) 从物体初始时刻到平板与周围介质处于热平衡，这一过程中传递的热量为：

$$Q_0 = \rho c V (t_0 - t_\infty) \quad (3-24)$$

此值为非稳态导热过程中传递的最大热量。

(2) 从初始时刻到某一时间 τ ，这段时间内所传递的热量 Q 为：

$$Q = \rho c \int_V [t_0 - t(x, \tau)] dV$$

(3) Q 与 Q_0 之比：

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\rho c \int_V [t_0 - t(x, \tau)] dV}{\rho c V (t_0 - t_\infty)} = \frac{1}{V} \int_V \frac{(t_0 - t_\infty) - (t - t_\infty)}{(t_0 - t_\infty)} dV = 1 - \frac{1}{V} \int_V \frac{(t - t_\infty)}{(t_0 - t_\infty)} dV = 1 - \frac{\bar{\theta}}{\theta_0} \quad (3-25)$$

其中： $\bar{\theta} = \bar{\theta}(\tau)$ 是时刻 τ 物体的平均过余温度， $\bar{\theta} = \frac{1}{V} \int_V (t - t_\infty) dV$ 。

对于无限大平板，当 $Fo > 0.2$ 后，将式（3-22）代入 $\bar{\theta}$ 的定义式，可得：

$$\frac{\bar{\theta}(\tau)}{\theta_0} = \frac{1}{V} \int_V \frac{t - t_\infty}{t_0 - t_\infty} dV = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1} e^{-(\mu_1^2 Fo) \frac{\sin \mu_1}{\mu_1}} \quad (3-26)$$

圆柱体与球是工程中常见的另外两种简单的典型几何形体。在第三类边界条件下，它们的一维（温度仅在半径方向发生变化）非稳态导热问题也可用分离变量法获得用无穷级数表示的精确解。对圆柱体、球体，当以半径为特征长度的傅里叶数 $Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2} > 0.2$ 时，无穷级数的解也可用第一项近似代替，并且 $\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0}$ 及 $\bar{\theta}(\tau)$ 的表达式均可写成类似于式（3-22）及（3-26）的形式，即：

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = A \exp(-\mu_1^2 Fo) f(\mu_1 \eta) \quad (3-27)$$

$$\bar{\theta}(\tau) = A \exp(-\mu_1^2 Fo) B \quad (3-28)$$

其中： η 为无量纲几何位置，对平板 $\eta = x/\delta$ ，对柱体及球体 $\eta = r/R$ ， R 为外表面半径，系数 A 、 B 及函数 $f(\mu_1 \eta)$ 的表达式取决于几何形状，见教材表 3-2 所示。

表 3-2 系数 A 、 B 及函数 $f(\mu_1 \eta)$ 的表达式

几何形状	A	B	$f(\mu_1 \eta)$
平板	$\frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1}$	$\frac{\sin \mu_1}{\mu_1}$	$\cos(\mu_1 \eta)$
圆柱	$\frac{2J_1(\mu_1)}{\mu_1 [J_0^2(\mu_1) + J_1^2(\mu_1)]}$	$\frac{2J_1(\mu_1)}{\mu_1}$	$J_0(\mu_1 \eta)$
球	$2 \frac{\sin \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1}{\mu_1 - \sin \mu_1 \cos \mu_1}$	$3 \frac{\sin \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1}{\mu_1^3}$	$\frac{\sin(\mu_1 \eta)}{\mu_1 \eta}$

表 3-2 中的 J_0 、 $J_1(\mu_1)$ 称为第一类贝塞尔函数，其值可从附录中查出。

三、正规阶段状况的实用计算方法

当 $Fo > 0.2$ 时，可采用上述计算公式求得非稳态导热物体的温度场及交换的热量，也可采用简化的拟合公式和诺模图求得。

1. 诺模图：工程技术中，采用按分析解的级数第一项绘制的一些图线，叫诺模图。
2. 海斯勒图：诺模图中用以确定温度分布的图线，称海斯勒图。

以无限大平板为例，首先根据（3-22）式给出 $\frac{\theta_m}{\theta_0}$ 随 Fo 及 Bi 变化的曲线（此时 $x/\delta = 0$ ），然后根据（3-23）确定 $\frac{\theta}{\theta_m}$ 的值，于是平板中任意一点 $\frac{\theta}{\theta_0}$ 的值便为：

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\theta_m}{\theta_0} \frac{\theta}{\theta_m} \quad (3-30)$$

同样，从初始时刻到时刻 τ 物体与环境间所交换的热量，可采用（3-24）、（3-25）作出 $\frac{Q}{Q_0}$
 $=f(Fo, Bi)$ 的图线。无限大平板的 θ_m/θ_0 、 θ/θ_m 及 Q/Q_0 的计算图线示于教材图 3-6、3-7
 及 3-8 中。圆柱体及球体的相应图线见书后附录。

3. 诺模图法评述

优点：简洁方便。 缺点：准确度有限，误差较大。

目前，随着计算技术的发展，直接应用分析解及简化拟合公式计算的方法受到重视。

四、分析解应用范围的推广及讨论

1. 推广范围

- (1) 对物体被冷却的情况也适用；
- (2) 也适于一侧绝热，另一侧为第三类边界条件的厚为 δ 的平板；

(3) 当固体表面与流体间的表面传热系数 $h \rightarrow \infty$ 时，即表面换热热阻趋近于零时，固体的表面温度就趋近于流体温度，所以 $Bi \rightarrow \infty$ 时的上述分析解就是固体表面温度发生一突然变化然后保持不变时的解，即第一类边界条件的解。

2. 讨论 Bi 与 Fo 对温度场的影响：

(1) 傅立叶数 Fo ：

由（3-19）、（3-22）式及诺模图可知，物体中各点的过余温度随时间 τ 的增加而减小；而 Fo 与 τ 成正比，所以物体中各点过余温度亦随 Fo 的增大而减小。

(2) 毕渥数 Bi ：

Bi 对温度的影响从以下两方面分析：

一方面，从教材图 3-6 可知， Fo 相同时， Bi 越大， θ_m/θ_0 越小。因为 Bi 越大，意味着固体表面的换热条件越强，导致物体的中心温度越迅速地接近周围介质的温度；当 $Bi \rightarrow \infty$ 时，意味着在过程开始瞬间物体表面温度就达到介质温度，物体中心温度变化最快，所以在诺模图中 $1/Bi = 0$ 时的线就是壁面温度保持恒定的第一类边界条件的解。

另一方面 Bi 的大小决定于物体内部温度的扯平程度。如：对于平板，从诺模图 3-7 中可知：

当 $1/Bi > 10$ （即 $Bi < 0.1$ ）时，截面上的过余温度差小于 5%，当 Bi 下限一直推到 0.01 时，其分析解与集总参数法的解相差极微。

综上可得如下结论：介质温度恒定的第三类边界条件下的分析解；当 $Bi \rightarrow \infty$ 时，转化为第一类边界条件下的解， $Bi \rightarrow 0$ 时，则与集总参数法的解相同。

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第三章 非稳态导热 3-半无限大、其它和周期性非稳态导热	授课时间长度	_ 90 _ 分钟	
授课进度	第 <u>5</u> 周, 总第 <u>9</u> 次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	能用半无限大导热的结论分析一般工程中半无限大物体导热问题; 能用周期性非稳态导热的结论分析一般生活、生产中的周期性非稳态导热; 能利用圆柱体、无限大平壁的温度场导出无限长直角柱体、有限长圆柱体和六面体的温度场。			
教学重点	半无限大物体导热; 周期性非稳态导热。			
教学难点	周期性非稳态导热			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生先线上学习本次课内容, 并制作 PPT。在课堂上, 随机抽签, 学生分组讲授本次课内容, 其他组进行点评, 教师进行综合点评。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导 <u>5</u> 分钟; 授新课内容 <u>80</u> 分钟; 讨论与提问 <u>0</u> 分钟; 总结与布置作业 <u>5</u> 分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	分组、并布置本次课授课任务。	将学生分组, 并说明讲课要点、点评要点等。	认真听教师安排, 并准备授课。	点明本次课主要内容, 并引起学生重视。

第二步 (75 分钟)	学生讲授新的课程内容：半无限大、其它和周期性非稳态导热。	认真听学生讲课，并记录学生授课过程中存在问题、优点。	各组代表讲授本科内容，其它组员补充，其它组认证听讲，并点评、提问。	采用学生授课的方式，提升学生自学能力、沟通能力、提升学生对知识的认知。
第三步 (10 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	梳理本课程学习内容，并对学生讨论情况和例题讲解情况予以点评，并指出优点与不足。	倾听教师点评，记录本次收获。	通过教师的总结，使学生系统的掌握半无限大、其它和周期性非稳态导热，并锻炼学生逻辑思维能力。

讲义

瞬态导热

第一部分 学生自学环节

根据半无限大、其他形状瞬态导热与周期性非稳态导热的教学内容，学生观看“学习通”上相应的网络视频课程，并自学教材上 69 页到 83 页的相关内容。

第二部分 学生讲授环节

本节课内容分为 5 部分（见下图），对本节课所有内容知识，每组均制作完整的教学 PPT 课件，并熟练讲解。10 月 12 日（周一）课堂上每组随机抽签，决定各组讲解哪一个部分。

课堂上，每组派一位代表进行讲解；各组相互听取、相互学习、相互提问、相互解答。在讲解过程中，其所有人对讲课组打分（10 分制），临下课时，将打分情况交给组长，组长进行平均计算后，再交给班长。讲课组将每个人贡献情况交给班长。班长绘制各组打分情况，求取平均值，并计算每个人分值，将计算结果以及原始资料交给教师。

注意：各个组均需制作、熟悉完整的教学 PPT；课堂讲授前，将 PPT 发送给学委，学委再统一转发给教师。

序号	组号（待课堂抽签决定）	内容	要求
1	抽号 1	半无限大均质物体的瞬态导热	建议 15 分钟左右
2	抽号 2	其他形状的瞬态导热	建议 20 分钟左右
3	抽号 3	周期性非稳态导热现象	建议 15 分钟左右
4	抽号 4	温度波的特性 1	建议 15 分钟左右
5	抽号 5	温度波的特性 2	建议 15 分钟左右

内容讲解要求

每组内容讲解必须包括三部分（可多余三部分）：基础知识、实际应用（生产生活中的案例）、例题。

第三部分 教师解答总结

教师根据学生讲解情况和效果，指出问题、不足，总结本节课的知识点。

讲义

一、半无限大物体的瞬态导热

(一) 半无限大物体的概念

几何上是指从 $x = 0$ 的界面开始可以向正的 x 方向及其他两个坐标 (y, z) 方向无限延伸的物体，称半无限大物体。

实际中不存在这样的半无限大物体，但研究物体中非稳态导热的初始阶段，则有可能把实际物体当作半无限大的物体来处理。例如，假设有一块几何上为有限厚度的平板，起初具有均匀温度，后其一侧表面突然受到热扰动，或者壁温突然升高到一定值并保持不变，或者突然受到恒定的热流量密度加热，或者受到温度恒定的流体的加热或冷却。当扰动的影响还局限在表面附近，而尚未深入到平板内部中去时，就可有条件地把该平板视为“半无限大”物体。工程导热问题中有不少情形可按半无限大物体处理。

(二) 第一类边界条件下半无限大物体非稳态导热温度场的分析解

设如图 3-11 所示，一个半无限大物体初始温度均匀为 t_0 ，在 $\tau = 0$ 时刻， $x = 0$ 的一侧表面温度突然升高到 t_w ，并保持不变，试确定物体内部温度随时间的变化和在时间间隔 τ 内的热流量。

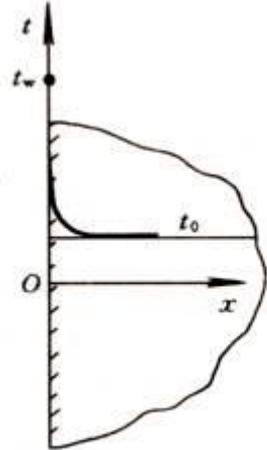


图 3-11 半无限大物体温度分布示意图

1. 物体内的温度分布

根据半无限大物体的定义，这一问题的数学描写为：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

初始条件为： $\tau = 0, t(x, 0) = t_0$

边界条件为： $x = 0, t(0, \tau) = t_w$ ； $x \rightarrow \infty, t(x, \tau) = t_0$

引入过余温度： $\theta = t(x, \tau) - t_w$ ，则有： $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$

$$\tau = 0, \theta(x, 0) = \theta_0 = t_0 - t_w$$

$$x = 0, \theta(0, \tau) = t_w - t_w = 0; x \rightarrow \infty, \theta(\infty, \tau) = t_0 - t_w$$

将微分方程 $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$ 分离变量并求解得分析解为：

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_w}{t_0 - t_w} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}} e^{-\eta^2} d\eta = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) = \operatorname{erf}\eta$$

其中：无量纲变量 $\eta = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$ ； $\operatorname{erf}\eta$ 称为误差函数，它随 η 的变化而变化，由附录表可知：

当 $\eta = 2$ 时， $\frac{\theta}{\theta_0} = 0.9953$ ，就是说当 $\eta \geq 2$ 即 $\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \geq 2$ 时，该处的温度仍认为等于 t_0 （无量纲过余温度的变化小于 5%），由此得到以下两个重要参数：

① 从几何位置上说，若 $x \geq 4\sqrt{a\tau}$ ，则时刻 τ 时 x 处的温度可认为未发生变化。

所以，对一块初始温度均匀的厚为 2δ 的平板，当其一侧温度突然变化到另一恒定温度时，若 $\delta \geq 4\sqrt{a\tau}$ ，则在 τ 时刻之前该平板中瞬时温度场的计算可采用半无限大物体模型处理。

②从时间上看，如果 $\tau \leq \frac{x^2}{16a}$ ，则此时 x 处的温度可认为完全不变，所以把 $\frac{x^2}{16a}$ 视为惰性时间，即当 $\tau < \frac{x^2}{16a}$ 时 x 处的温度可认为仍等于 t_0 。

2. 表面上的瞬时热流密度及在 $[0, \tau]$ 时间间隔内放出或吸收的热量：

物体中任意一点的热流密度为：
$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = -\lambda(t_0 - t_w) \frac{\partial}{\partial x}(\text{erf}\eta) = \lambda \frac{t_w - t_0}{\sqrt{\pi a \tau}} e^{-x^2/(4a\tau)}$$

则表面上的热流密度为：
$$q_w = \lambda \frac{t_w - t_0}{\sqrt{\pi a \tau}}$$

在 $[0, \tau]$ 时间间隔内，流过面积 V 的总热流流量为：

$$Q = A \int_0^\tau q_w d\tau = A \int_0^\tau \lambda \frac{t_w - t_0}{\sqrt{\pi a \tau}} d\tau = 2A \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \sqrt{\rho c \lambda} (t_w - t_0)$$

由此可见：

①半无限大物体在第一类边界条件影响下被加热或冷却时，界面上的瞬时热流量与时间的平方根成反比；

②在时间 $[0, \tau]$ 内交换的总热量则正比于 $\sqrt{\rho c \lambda}$ 及时间的平方根。

其中： $\sqrt{\rho c \lambda}$ 称为吸热系数，表示物体与其接触的高温物体吸热的能力。

(三) 半无限大物体概念的适用范围

只适于物体非稳态导热的初始阶段，当物体表面上的热扰动已深入传递到物体内部时，就不再适用，则应采用前述分析方法。

二、其他形状物体的瞬态导热

(一) 无限长圆柱体和球体

对无限长圆柱体和球体的瞬态导热，可以用前述的分离变量法得到温度分布的分析解：

$$\frac{\theta}{\theta_0} = f\left(Bi, Fo, \frac{r}{R}\right) \quad Bi = \frac{hR}{\lambda} \quad Fo = \frac{a\tau}{R^2}$$

与无限大平壁类似，对于无限长圆柱体和球体瞬态导热， $Fo > 0.2$ 时，加热或冷却过程进入正常状况阶段。 $Bi < 0.1$ 时，可以用集总参数法分析。

$Fo \geq 0.2$ 时时，无限长圆柱体和球体的瞬态导热可以用计算线图（诺谟图）

$$\frac{\theta(r, \tau)}{\theta_0} = \frac{\theta(r, \tau)}{\theta_m(\tau)} \cdot \frac{\theta_m(\tau)}{\theta_0}$$

经过 τ 秒钟、每米圆柱体放出或吸收的热量：

$$\frac{\Phi_\tau}{\Phi_0} = f(Fo, Bi)$$

$\Phi_0 = \pi R^2 \rho c \theta_0$ ——每 m 圆柱体 $t_0 \rightarrow t_\infty$

(二) 无限长直角柱体、有限长圆柱体和六面体

1、无限长直角柱体中的瞬态导热

直角柱体的截面： $2\delta_x \times 2\delta_y$ ，可以看成是厚度为 $2\delta_x$ 和厚度为 $2\delta_y$ 的两块无限大平壁垂直相交形成的。

可以证明：无限长直角柱体的温度场是这两块无限大平壁温度场的乘积（要求初始、边界条件一致）。

$$\frac{\theta(x, y, \tau)}{\theta_0} = \frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} \frac{\theta(y, \tau)}{\theta_0}$$

2、有限长圆柱体中的瞬态导热

长度： 2δ ；半径： R

可以看成是半径为 R 的无限长圆柱体和厚度为 2δ 的无限大平壁垂直相交形成的

$$\frac{\theta(r, x, \tau)}{\theta_0} = \frac{\theta(r, \tau)}{\theta_0} \frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0}$$

3、六面体中的瞬态导热

六面体截面： $2L_1 \times 2L_2 \times 2L_3$ ，可以看成是厚度分别为 $2L_1$ 、 $2L_2$ 和 $2L_3$ 的三块无限大平壁垂直相交形成的。

$$\frac{\theta(x, y, z, \tau)}{\theta_0} = \frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} \frac{\theta(y, \tau)}{\theta_0} \frac{\theta(z, \tau)}{\theta_0}$$

两块无限大物体垂直相交形成的物体的瞬态导热过程：

$$\left(\frac{Q}{Q_0}\right)_{total} = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_1 + \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_2 \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_1\right]$$

三块无限大物体垂直相交形成的物体的瞬态导热过程：

$$\left(\frac{Q}{Q_0}\right)_{total} = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_1 + \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_2 \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_1\right] + \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_3 \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_1\right] \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_0}\right)_2\right]$$

三、周期性非稳态导热

（一）周期性非稳态导热现象

周期性非稳态导热：物体温度按一定的周期发生变化。

（二）半无限大物体在周期性变化边界条件下的温度波

1、第一类边界条件下的温度场

半无限大物体：以无限大的 $y-z$ 平面为界面，在正 x 方向延伸至无穷远的物体。

均质半无限大物体导热方程：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

周期性变化边界条件的特点：边界条件周期性变化 → 物体中各处温度周而复始地周期性变化 → 不存在初始条件。边界条件可以认为是一个简谐波。

边界条件： $x = 0: \theta(0, \tau) = t(0, \tau) - t_m = A_w \cos\left(\frac{2\pi}{T} \tau\right)$

$$x \rightarrow \infty: \theta(\infty, \tau) = t(\infty, \tau) - t_m = 0$$

$\theta(x, \tau) = t(x, \tau) - t_m$ ，任意位置、某一时刻过余温度

2、温度波的特性

$$\theta(x, \tau) = A_w e^{-\sqrt{\frac{\pi}{aT}}x} \cos\left(\frac{2\pi}{T}\tau - \sqrt{\frac{\pi}{aT}}x\right)$$

(1) 温度波的周期性；(2) 温度波的衰减特性；(3) 温度波的延迟；(4) 温度波的传播特性。

3、周期性变化的第三类边界条件下的温度分布

$$\theta_f(\tau) = t_f(\tau) - t_{fm} = A_f \cos\left(\frac{2\pi}{T}\tau\right)$$

$$\theta(x, \tau) = \varphi A_f e^{-\sqrt{\frac{\pi}{aT}}x} \cos\left(\frac{2\pi}{T}\tau - \sqrt{\frac{\pi}{aT}}x - \psi\right)$$

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第四章-导热问题的数值求解 1-建立离散方程的方法和稳态导热问题的数值计算		授 课 时间长度	_90_ 分钟
授课进度	第_5_周, 总第_10_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	掌握导热问题数值解法的基本思路; 能利用热平衡法和泰勒级数展开法建立稳态导热问题的节点的离散方程。			
教学重点	掌握导热问题数值解法的基本思路; 能利用热平衡法和泰勒级数展开法建立稳态导热问题的节点的离散方程			
教学难点	利用热平衡法和泰勒级数展开法建立稳态导热问题的节点的离散方程			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容, 课上, 教师就重点问题予以讲解, 并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习半无限大物体的非稳态导热、其它形状物体的非稳态导热以及周期性非稳态导热。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (75 分钟)	讲授新的课程内容：建立离散方程的方法和稳态导热问题的数值计算。	采用板书与课件相结合的方式讲解课程内容，深入剖析数值解法的基本原理，以稳态导热方程的离散化强化数值解法的思想。	认真聆听老师讲授内容，理解导热问题数值解法的基本思想，掌握稳态导热方程离散化的方法。	利用课件和图片等让学生掌握方程、空间、时间离散化的方法。
第三步 (10 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

建立离散方程的方法和稳态导热问题的数值计算

一. 数值解法的基本概念

1. 实质：

对物理问题进行数值解法的基本思路可以概括为：把原来在时间、空间坐标系中连续的物理量的场，如导热物体的温度场等，用有限个离散点上的值的集合来代替，通过求解按一定方法建立起来的关于这些值的代数方程，来获得离散点上被求物理量的值。该方法称为数值解法。

这些离散点上被求物理量值的集合称为该物理量的数值解。

2. 基本思路：数值解法的求解过程可用框图 4-1 表示。由此可见：

- (1) 物理模型简化成数学模型是基础；
- (2) 建立节点离散方程是关键；
- (3) 一般情况微分方程中，某一变量在某一坐标方向所需边界条件的个数等于该变量在该坐标方向最高阶导数的阶数。

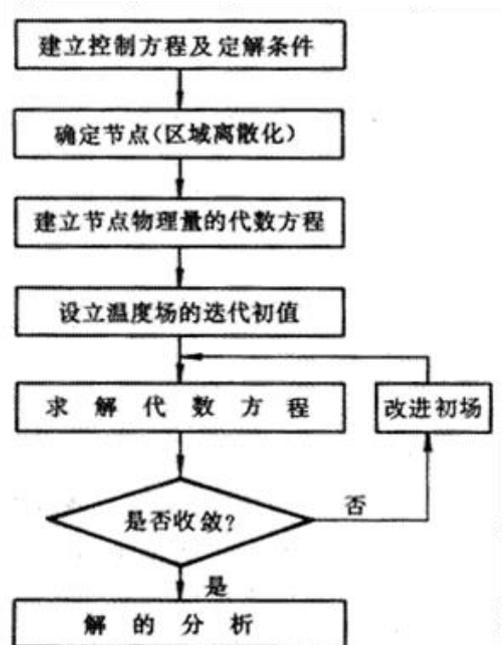


图 4-1 物理问题的数值求解过程

二. 数值求解的步骤

如图 4-2 (a), 二维矩形域内无内热源、稳态、常物性的导热问题采用数值解法的步骤如下:

(1) 建立控制方程及定解条件

控制方程: 是指描写物理问题的微分方程。针对图示的导热问题, 它的控制方程 (即导热微分方程) 为:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{a})$$

边界条件: $x = 0$ 时, $t = t_0$;

$x = H$ 时,

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=H} = h_2 [t(H, y) - t_f]$$

当 $y = 0$ 时,

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_1 [t(x, 0) - t_f]$$

当 $y = W$ 时,

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=W} = h_3 [t(x, W) - t_f]$$

(2) 区域离散化 (确立节点)

用一系列与坐标轴平行的网格线把求解区域划分成若干个子区域, 用网格线的交点作为需要确定温度值的空间位置, 称为节点 (结点), 节点的位置用该节点在两个方向上的标号 m, n 表示。

相邻两节点间的距离称步长, 计为 $\Delta x, \Delta y$ 。每个节点都可以看成是以它为中心的一个小区域的代表, 把节点代表的小区域称为元体 (又叫控制容积), 如图 4-2 (b)。

(3) 建立节点物理量的代数方程 (离散方程)

节点上物理量的代数方程称离散方程。其过程如下: 首先划分各节点的类型; 其次, 建立节点离散方程; 最后, 代数方程组的形成。

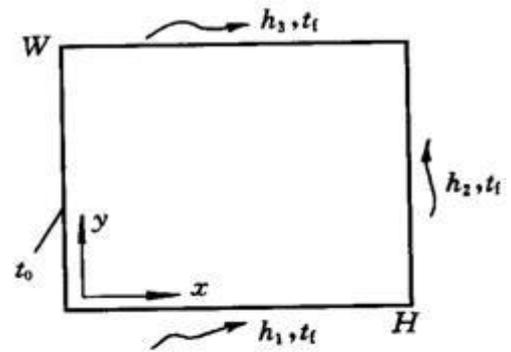
对节点 (m, n) 的代数方程, 当 $\Delta x = \Delta y$ 时, 有:

$$t_{m,n} = \frac{1}{4} (t_{m+1,n} + t_{m-1,n} + t_{m,n+1} + t_{m,n-1}) \quad (\text{b})$$

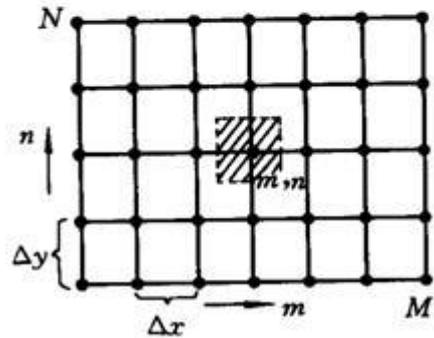
(4) 设立迭代初场

代数方程组的求解方法有直接解法与迭代解法, 传热问题的有限差分法中主要采用迭代法。采用迭代法求解时, 需对被求的温度场预先设定一个解, 这个解称为初场, 并在求解过程中不断改进。

(5) 求解代数方程组



(a)



(b)

图 4-2 导热问题数值求解示例

如图 4-2 (b), 除 $m=1$ 的左边界上各节点的温度已知外, 其余 $(M-1)N$ 个节点均需建立离散方程, 共有 $(M-1)N$ 个方程, 则构成一个封闭的代数方程组。求解时遇到的问题: ① 线性; ② 非线性; ③ 收敛性等。

①线性代数方程组: 代数方程一经建立, 其中各项系数在整个求解过程中不再变化;

②非线性代数方程组: 代数方程一经建立, 其中各项系数在整个求解过程中不断更新。

③是否收敛判断: 是指用迭代法求解代数方程是否收敛, 即本次迭代计算所得之解与上一次迭代计算所得之解的偏差是否小于允许值。

关于变物性(物性为温度的函数)导热问题, 建立的离散方程, 四个邻点温度的系数不是常数, 而是温度的函数。在迭代计算时, 这些系数应不断更新, 这是非线性问题。

(6) 解的分析

通过求解代数方程, 获得物体中的温度分布, 根据温度场应进一步计算通过的热流量, 热应力及热变形等。因此, 对于数值分析计算所得的温度场及其它物理量应作详细分析, 以获得定性或定量上的结论。

三、稳态导热中位于计算区域内部的节点离散方程的建立方法

1. 基本概念

(1) 内节点: 位于计算区域内部的节点, 称内节点。

(2) 差分格式: 差商中的差分可以用向前、向后、中心差分表示的格式称差分格式。

2. 基本方法

方法: ① 泰勒级数展开法; ② 热平衡法。以下分述之。

(1) 泰勒级数展开法

如图 4-3 所示, 以节点 (m, n) 处的二阶偏导数为例, 对节点 $(m+1, n)$ 及 $(m-1, n)$ 分别写出函数 t 对 (m, n) 点的泰勒级数展开式:

对 $(m+1, n)$:

$$t_{m+1,n} = t_{m,n} + \Delta x \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{m,n} + \frac{\Delta x^2}{2} \left. \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right|_{m,n} + \frac{\Delta x^3}{6} \left. \frac{\partial^3 t}{\partial x^3} \right|_{m,n} + \frac{\Delta x^4}{24} \left. \frac{\partial^4 t}{\partial x^4} \right|_{m,n} + \dots \quad (c)$$

对 $(m-1, n)$:

$$t_{m-1,n} = t_{m,n} - \Delta x \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{m,n} + \frac{\Delta x^2}{2} \left. \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right|_{m,n} - \frac{\Delta x^3}{6} \left. \frac{\partial^3 t}{\partial x^3} \right|_{m,n} + \frac{\Delta x^4}{24} \left. \frac{\partial^4 t}{\partial x^4} \right|_{m,n} + \dots \quad (d)$$

(a) + (b) 得:

$$t_{m+1,n} + t_{m-1,n} = 2t_{m,n} + \Delta x^2 \left. \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right|_{m,n} + \frac{\Delta x^4}{12} \left. \frac{\partial^4 t}{\partial x^4} \right|_{m,n} + \dots \quad (e)$$

变形为 $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \Big|_{m,n}$ 的表示式得:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \Big|_{m,n} = \frac{t_{m+1,n} + t_{m-1,n} - 2t_{m,n}}{\Delta x^2} + 0(\Delta x^2) \quad (f)$$

上式是用三个离散点上的值计算二阶导数 $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \Big|_{m,n}$ 的严格表达式, 其中: $0(\Delta x^2)$ 称截断误差, 误差量级为 Δx^2 , 即表示未明确写出的级数余项中 Δx 的最低阶数为 2。

在数值计算时, 用三个相邻节点上的值近似表示二阶导数的表达式即可, 则相应的略去 $0(\Delta x^2)$ 。于是得:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \Big|_{m,n} = \frac{t_{m+1,n} + t_{m-1,n} - 2t_{m,n}}{\Delta x^2} \quad (4-1a)$$

同理:
$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \Big|_{m,n} = \frac{t_{m,n+1} + t_{m,n-1} - 2t_{m,n}}{\Delta y^2}$$

(4-1b)

根据导热问题的控制方程(导热微分方程) $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0$ 得:

$$\frac{t_{m+1,n} + t_{m-1,n} - 2t_{m,n}}{\Delta x^2} + \frac{t_{m,n+1} + t_{m,n-1} - 2t_{m,n}}{\Delta y^2} = 0 \quad (4-2)$$

若 $\Delta x = \Delta y$, 则有: $t_{m,n} = \frac{1}{4}(t_{m+1,n} + t_{m-1,n} + t_{m,n+1} + t_{m,n-1})$

(2) 热平衡法:

其本质是傅里叶导热定律和能量守恒定律的体现。对每个元体, 可用傅里叶导热定律写出其能量守恒的表达式。如图 4-3 所示, 元体在垂直纸面方向取单位长度, 通过元体界面 (w, e, n, s) 所传导的热量可以对有关的两个节点根据傅里叶定律写出:

从节点 $(m-1, n)$ 通过界面 w 传导到节点 $(m,$

$n)$ 的热流量为:

$$\Phi_w = \lambda \Delta y \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta x} \quad (g)$$

同理: 通过界面 e, n, s 传导给节点 (m, n) 的热流量:

$$\Phi_e = \lambda \Delta y \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta x} \quad (h)$$

$$\Phi_w = \lambda \Delta x \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\Delta y} \quad (i)$$

$$\Phi_s = \lambda \Delta x \frac{t_{m,n-1} - t_{m,n}}{\Delta y} \quad (j)$$

对元体 (m, n) , 根据能量守恒定律可知:

$$\Phi_w + \Phi_e + \Phi_n + \Phi_s = 0 \quad (4-3)$$

其中规定: 导入元体 (m, n) 的热流量为正; 导出元体 (m, n) 的热流量为负。

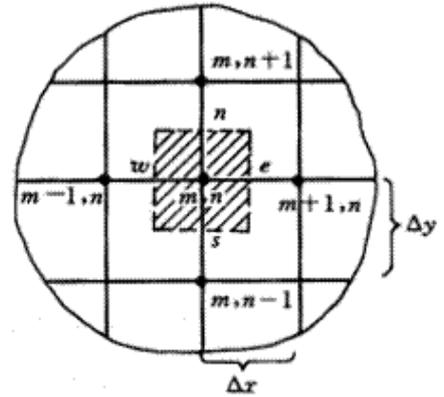


图 4-3 内节点离散方程的建立

将式 (g)、(h)、(i)、(j) 代入式 (4-3)，当 $\Delta x = \Delta y$ 时即得式 (b)。

说明：

- ① 上述分析与推导是在笛卡儿坐标系中进行的；
- ② 热平衡法概念清晰，过程简捷；
- ③ 热平衡法与 2—2 建立微分方程的思路与过程一致，但不同的是前者是有限大小的元体，后者是微元体。

4-2 边界节点离散方程的建立及代数方程的求解

对于第一类边界条件的导热问题，所有内节点的离散方程组成一个封闭的代数方程组，即可求解；第二类或第三类边界条件的导热问题，所有内节点的离散方程组成的代数方程组是不封闭的，因未知边界温度，因而应对位于该边界上的节点补充相应的代数方程，才能使方程组封闭，以便求解。

一、用热平衡法导出典型边界点上的离散方程

在下面的讨论中，先把第二类边界条件及第三类边界条件合并起来考虑，并以 q_w 代表边界上已知的热流密度值或热流密度表达式，用热平衡方法导出三类典型边界节点的离散方程，然后针对 q_w 的三种不同情况使导得的离散方程进一步具体化，为使结果更具一般性，假设物体具有内热源 $\dot{\phi}$ (不必均匀分布)。

1. 位于平直边界上的节点

如图 4-4 所示有阴影线的区域，边界节点 (m, n) 只能代表半个元体，设边界上有向该元体传递的热流密度为 q_w ，据能量守恒定律对该元体有：

$$\lambda \Delta y \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta x} + \lambda \frac{\Delta x}{2} \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\Delta y} + \lambda \frac{\Delta x}{2} \frac{t_{m,n-1} - t_{m,n}}{\Delta y} + \frac{\Delta x \Delta y}{2} \dot{\phi}_{m,n} + \Delta y q_w = 0 \quad (4-4a)$$

$$\text{若 } \Delta x = \Delta y \text{ 时，则： } t_{m,n} = \frac{1}{4} \left(2t_{m-1,n} + t_{m,n+1} + t_{m,n-1} + \frac{\Delta x^2 \dot{\phi}_{m,n}}{\lambda} + \frac{2\Delta x q_w}{\lambda} \right) \quad (4-4b)$$

2.

部角点

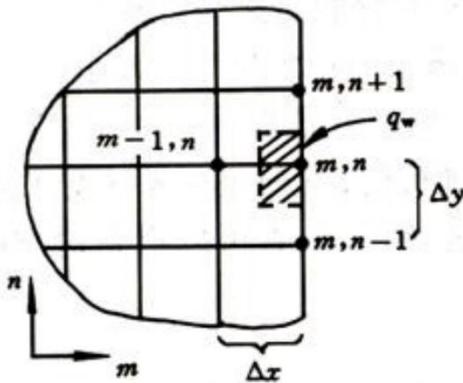


图 4-4 平直边界上的节点

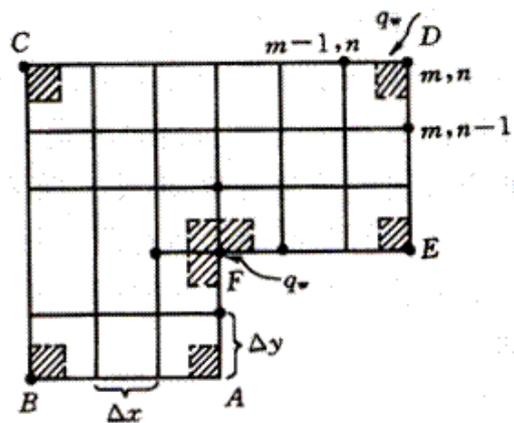


图 4-5 外部角点与内部角点

外

如图 4-5 所示，二维墙角计算区域中，节点 A~E 均为外部角点，其特点是每个节点仅代表 1/4 个以 Δx 、 Δy 为边长的元体。假设边界上有向该元体传递的热流密度为 q_w ，则据能量守恒定律得其热平衡式为：

$$\lambda \frac{\Delta y}{2} \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta x} + \lambda \frac{\Delta x}{2} \frac{t_{m,n-1} - t_{m,n}}{\Delta y} + \frac{\Delta x \Delta y}{4} \dot{\phi}_{m,n} + \frac{\Delta x + \Delta y}{2} q_w = 0 \quad (4-5a)$$

$$\text{若 } \Delta x = \Delta y \text{ 时，则：} \quad t_{m,n} = \frac{1}{2} \left(t_{m-1,n} + t_{m,n-1} + \frac{\Delta x^2 \dot{\phi}_{m,n}}{2\lambda} + \frac{2\Delta x q_w}{\lambda} \right) \quad (4-5b)$$

3. 内部角点：

图 4-5 中的 F 点为内部角点，代表了 3/4 个元体，同理得：

$$\lambda \Delta y \frac{t_{m-1,n} - t_{m,n}}{\Delta x} + \lambda \Delta x \frac{t_{m,n+1} - t_{m,n}}{\Delta y} + \lambda \frac{\Delta x}{2} \frac{t_{m,n-1} - t_{m,n}}{\Delta y} + \lambda \frac{\Delta y}{2} \frac{t_{m+1,n} - t_{m,n}}{\Delta x} + \frac{3\Delta x \Delta y}{4} \dot{\phi}_{m,n} + \frac{\Delta x + \Delta y}{2} q_w = 0$$

(4-6a)

若 $\Delta x = \Delta y$ 时，则：

$$t_{m,n} = \frac{1}{6} \left(2t_{m-1,n} + 2t_{m,n+1} + t_{m,n-1} + t_{m+1,n} + \frac{3\Delta x^2 \dot{\phi}_{m,n}}{2\lambda} + \frac{2\Delta x q_w}{\lambda} \right) \quad (4-6b)$$

4. 讨论有关 q_w 的三种情况：

(1) 若是绝热边界

则 $q_w = 0$ ，即令上式 $q_w = 0$ 即可。

(2) 若时 $q_w \neq 0$

则以给定的 q_w 值代入上述方程，注意：流入元体， q_w 取正，流出元体， q_w 取负。

(3) 若属对流边界

则 $q_w = h(t_f - t_{m,n})$ ，将此表达式代入式 (4-4) ~ (4-6)，并将此项中 $t_{m,n}$ 与等号前的 $t_{m,n}$ 合并。对于 $\Delta x = \Delta y$ 的情形，有：

平直边界：

$$2 \left(\frac{h\Delta x}{\lambda} + 2 \right) t_{m,n} = 2t_{m-1,n} + t_{m,n+1} + t_{m,n-1} + \frac{\Delta x^2 \dot{\phi}_{m,n}}{\lambda} + \frac{2h\Delta x}{\lambda} t_f \quad (4-7)$$

对外角点：

$$2 \left(\frac{h\Delta x}{\lambda} + 1 \right) t_{m,n} = t_{m-1,n} + t_{m,n-1} + \frac{\Delta x^2 \dot{\phi}_{m,n}}{2\lambda} + \frac{2h\Delta x}{\lambda} t_f \quad (4-8)$$

对内角点：

$$2 \left(\frac{h\Delta x}{\lambda} + 3 \right) t_{m,n} = 2t_{m-1,n} + 2t_{m,n+1} + t_{m,n-1} + t_{m+1,n} + \frac{3\Delta x^2 \dot{\phi}_{m,n}}{2\lambda} + \frac{2h\Delta x}{\lambda} t_f \quad (4-9)$$

其中无量纲数 $\frac{h\Delta x}{\lambda}$ 是以网格步长 Δx 为特征长度的毕渥数，即为 Bi_Δ ，是在对流边界条件的离散过程中引入的。

二、代数方程的求解方法

1. 直接解法：通过有限次运算获得精确解的方法，如：矩阵求逆、高斯消元法等。这一方法的缺点是计算所需的计算机内存较大，当代数方程的数目较多时使用不便。

2. 迭代法：先对要计算的场作出假设（设定初场），在迭代计算中不断予以改进，直到计算前的假定值与计算结果相差小于允许值为止的方法，称迭代计算收敛。目前应用较多的是：（1）高斯—赛德尔迭代法：每次迭代计算，均使用节点温度的最新值。（2）用雅可比迭代法：每次迭代计算，均用上一次迭代计算出的值。

设有一个三元方程组，记为：

$$\begin{cases} a_{11}t_1 + a_{12}t_2 + a_{13}t_3 = b_1 \\ a_{21}t_1 + a_{22}t_2 + a_{23}t_3 = b_2 \\ a_{31}t_1 + a_{32}t_2 + a_{33}t_3 = b_3 \end{cases} \quad (a)$$

其中 $a_{i,j}(i = 1,2,3; j = 1,2,3)$ 及 $b_i(i = 1,2,3)$ 是已知的系数（设均不为零）及常数。采用高斯—赛德尔迭代法的步骤：

（1）将三元方程变形为迭式方程：

$$\begin{cases} t_1 = \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}t_2 - a_{13}t_3) \\ t_2 = \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}t_1 - a_{23}t_3) \\ t_3 = \frac{1}{a_{33}}(b_3 - a_{31}t_1 - a_{32}t_2) \end{cases} \quad (b)$$

（2）假设一组解（迭代初场），记为： $t_1^{(0)}$ 、 $t_2^{(0)}$ 、 $t_3^{(0)}$ ，并代入迭代方程求得第一次解 $t_1^{(1)}$ 、 $t_2^{(1)}$ 、 $t_3^{(1)}$ ，每次计算都用 t 的最新值代入。例如当由式（b）中的第三式计算 $t_3^{(1)}$ 时代入的是 $t_1^{(1)}$ 及 $t_2^{(1)}$ 之值。

（3）以计算所得之值作为初场，重复上述计算，直到相邻两次迭代值之差小于允许值，则称迭代收敛，计算终止。

三、判断迭代收敛的准则

判断迭代是否收敛的准则一般有以下三种：

$$\max |t_i^{(k)} - t_i^{(k+1)}| \leq \varepsilon \quad (4-10a)$$

$$\max \left| \frac{t_i^{(k)} - t_i^{(k+1)}}{t_i^{(k)}} \right| \leq \varepsilon \quad (4-10b)$$

$$\max \left| \frac{t_i^{(k)} - t_i^{(k+1)}}{t_{\max}^{(k)}} \right| \leq \varepsilon \quad (4-10c)$$

其中上角标 k 及 $k+1$ 表示迭代次数， $t_{\max}^{(k)}$ 为第 k 次迭代计算所得的计算区域中的最大值。若计算区域中有接近于零的 t 时，采用式（4-10c）比较合适。

说明：（1）对于一个代数方程组，若选用的迭代方式不合适，有可能导致发散，即称迭代过程发散；

(2) 对于常物性导热问题组成的差分方程组，迭代公式的选择应使一个迭代变量的系数总是大于或等于该式中其他变量系数绝对值的代数和，此时，结果一定收敛。这一条件数学上称主对角线占优（对角占优），即：

$$\frac{|a_{12}|+|a_{13}|}{a_{11}} \leq 1, \frac{|a_{21}|+|a_{23}|}{a_{22}} \leq 1, \frac{|a_{31}|+|a_{32}|}{a_{33}} \leq 1$$

(3) 采用热平衡法导出差分方程时，若每一个方程都选用导出该方程中心节点的温度作为迭代变量，则上述条件必满足，迭代一定收敛。

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第四章 导热问题的数值求解 2-非稳态导热的数值计算	授课时间长度	_ 90 _ 分钟	
授课进度	第_6_周, 总第_11_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	能利用热平衡法和泰勒级数展开法建立非稳态导热问题的节点的离散方程。			
教学重点	非稳态项离散的方法; 扩散项离散时所取时间层的不同对计算带来的影响			
教学难点	扩散项离散时所取时间层的不同对计算带来的影响			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容, 课上, 教师就重点问题予以讲解, 并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5分钟)	复习导热数值计算的思想、稳态导热方程的离散方法。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点上上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

<p>第二步 (75 分钟)</p>	<p>讲授新的课程内容：非稳态导热数值解法的特点、内部节点的显式差分格式、内部节点的隐式差分格式和边界节点温度差分方程。</p>	<p>采用板书与课件结合的方式讲解内部节点的显式和隐式差分格式的基本原理及离散方法、边界节点温度差分方程基本原理及离散方法。</p>	<p>认真聆听老师讲授内容，理解掌握非稳态导热方程离散化的方法。</p>	<p>利用课件和图片等让学生掌握非稳态导热数值解法。</p>
<p>第三步 (10 分钟)</p>	<p>快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容</p>	<p>随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。</p>	<p>全面总结复习，为下次课准备。</p>	<p>快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容</p>

讲义

非稳态导热问题的数值解法

一、一维非稳态导热时间-空间区域的离散化

1. 基本概念

如图 4-8 所示， x 为空间坐标， τ 为时间坐标。

(1) 时间步长 $\Delta\tau$ ：指从一个时间层到下一个时间层的时间间隔 $\Delta\tau$ 。

(2) 节点 (n, i) 表示空间网格线与时间网格线的交点，即表示了时间-空间区域中一个节点的位置，相应的记为 $t_n^{(i)}$ 。

2. 非稳态项的离散

非稳态项的离散有三种不同的格式，向前差分、向后差分、中心差分。

(1) 向前差分

将函数 t 在节点 $(n, i+1)$ 对点 (n, i) 作泰勒展开，则有：

$$t_n^{(i+1)} = t_n^{(i)} + \Delta\tau \left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{n,i} + \frac{\Delta\tau^2}{2} \left. \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} \right|_{n,i} + \dots \quad (a)$$

于是有：

$$\left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{n,i} = \frac{t_n^{(i+1)} - t_n^{(i)}}{\Delta\tau} + O(\Delta\tau) \quad (b)$$

其中 $O(\Delta\tau)$ 表示余项中 $\Delta\tau$ 的最低阶为一次。

由式 (b) 可得在点 (n, i) 处一阶导数的向前差分表示式：

$$\left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{n,i} = \frac{t_n^{(i+1)} - t_n^{(i)}}{\Delta\tau} \quad (4-11)$$

(2) 向后差分

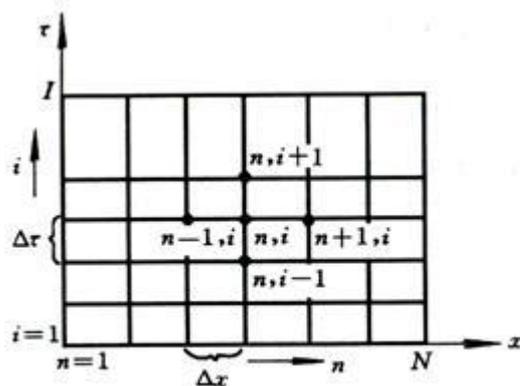


图 4-8 一维非稳态导热时间-空间区域的离散化

将 t 在节点 $(n, i-1)$ 对点 (n, i) 作泰勒展开, 可得 $\frac{\partial t}{\partial \tau}|_{n,i}$ 的向后差分表示式:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}|_{n,i} = \frac{t_n^{(i)} - t_n^{(i-1)}}{\Delta \tau} \quad (4-12)$$

(3) 中心差分

$\frac{\partial t}{\partial \tau}|_{n,i}$ 的向前差分与向后差分之和, 即得 $\frac{\partial t}{\partial \tau}|_{n,i}$ 的中心差分表达式:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}|_{n,i} = \frac{t_n^{(i+1)} - t_n^{(i-1)}}{2\Delta \tau} \quad (4-13)$$

二、一维非稳态导热微分方程的离散方法

1. 泰勒级数展开法

(1) 显式差分格式

一维非稳态导热微分方程中的扩散项离散与稳态导热微分方程中的方法相同, 对一维非稳态导热微分方程中的扩散项采用中心差分; 非稳态项采用向前差分。则有:

$$\frac{t_n^{(i+1)} - t_n^{(i)}}{\Delta \tau} = a \frac{t_{n+1}^{(i)} - 2t_n^{(i)} + t_{n-1}^{(i)}}{\Delta x^2} \quad (4-14a)$$

变形得:

$$t_n^{(i+1)} = \frac{a\Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{n+1}^{(i)} + t_{n-1}^{(i)}) + \left(1 - \frac{2a\Delta \tau}{\Delta x^2}\right) t_n^{(i)} \quad (4-14b)$$

求解非稳态导热微分方程, 是从已知的初始温度分布出发, 根据边界条件依次求得以后各个时间层上的温度值。由此可见, 只要 i 时层上各节点的温度已知, 那么 $i+1$ 时层上各节点的温度即可算出, 且不需设立方程组求解。此关系式即为显式差分格式。

优点: 计算工作量小;

缺点: 受时间及空间步长的限制。

(2) 隐式差分格式

对一维非稳态导热微分方程中的扩散项在 $(i+1)$ 时层上采用中心差分, 非稳态项在节点 $(n, i+1)$ 处对节点 (n, i) 采用向前差分, 得:

$$\frac{t_n^{(i+1)} - t_n^{(i)}}{\Delta \tau} = a \frac{t_{n+1}^{(i+1)} - 2t_n^{(i+1)} + t_{n-1}^{(i+1)}}{\Delta x^2} \quad (4-15)$$

式中已知的是 i 时层上的值 $t_n^{(i)}$, 而未知量有 3 个, 因此不能直接由上式立即算出 $t_n^{(i+1)}$, 而必须求解 $(i+1)$ 时层上的一个联立方程组, 才能算出 $(i+1)$ 时层各节点的温度, 此种差分格式称隐式差分格式。

优点: 不受时间及空间的步长影响;

缺点: 计算工作量大。

综上所述: ① 非稳态导热微分方程中, 扩散项采用中心差分, 非稳态项采用向前差分得到显式差分格式; ② 非稳态导热微分方程中, 扩散项采用中心差分, 非稳态项采用向后差分得到隐式差分格式。

2. 热平衡法

(1) 优点：①不受网格是否均匀限制；

②不受物性是否为常数限制。

(2) 求解方法

以一维非稳态导热边界节点为例，应用热平衡法建立节点离散方程。如图 4-9 所示，一无限大平板，右侧面受周围流体的冷却，表面传热系数为 h ，此时边界节点 N 代表了宽为 $\frac{\Delta x}{2}$ 的元体。

根据傅立叶定律，在 i 时层上，从节点 (N-1) 传导给节点 N 的热量，即从 (N-1) 传给元体 $\frac{\Delta x}{2}$ 单位面积的热流量为：

$$q_{N-1,N}^{(i)} = \lambda \frac{t_{N-1}^{(i)} - t_N^{(i)}}{\Delta x} \quad (a)$$

根据牛顿冷却公式，平板右侧被冷却时，在 i 时层上其单位面积的热流量为：

$$q_c = h(t_f - t_N^{(i)}) \quad (b)$$

在 i 时层上元体热力学能的增量为：

$$q = \rho c \left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{N,j} \cdot \frac{\Delta x}{2} = \rho c \frac{\Delta x}{2} \frac{t_N^{(i+1)} - t_N^{(i)}}{\Delta \tau} \quad (c)$$

据能量守恒定律可知：在 i 时层通过导热和对流进入元体的能量应等于元体热力学能的变化量，则有：

$$\lambda \frac{t_{N-1}^{(i)} - t_N^{(i)}}{\Delta x} + h(t_f - t_N^{(i)}) = \rho c \frac{\Delta x}{2} \frac{t_N^{(i+1)} - t_N^{(i)}}{\Delta \tau}$$

经整理得：

$$t_N^{(i+1)} = t_N^{(i)} \left(1 - \frac{2h\Delta\tau}{\rho c \Delta x} - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2} \right) + \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2} t_{N-1}^{(i)} + \frac{2h\Delta\tau}{\rho c \Delta x} t_f$$

其中 $\frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2}$ 是以 Δx 为特征长度的傅里叶数，称网格傅里叶

数，记为： Fo_{Δ} 。

$\frac{h\Delta\tau}{\rho c \Delta x}$ 一项可作如下变化：

$$\frac{h\Delta\tau}{\rho c \Delta x} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \frac{h\Delta x}{\lambda} = Fo_{\Delta} Bi_{\Delta}$$

$\frac{h\Delta x}{\lambda}$ 称为网格毕渥数，记为 Bi_{Δ} 。

于是式 (4-16b) 可改写为：

$$t_N^{(i+1)} = t_N^{(i)} (1 - 2Fo_{\Delta} Bi_{\Delta} - 2Fo_{\Delta}) + 2Fo_{\Delta} t_{N-1}^{(i)} + 2Fo_{\Delta} Bi_{\Delta} t_f \quad (4-16c)$$

说明：对多维非稳态导热问题应用热平衡法来建立离散方程的原则与过程与之类似。

至此，可以把第三类边界条件下、厚度为 2δ 的无限大平板的数值计算问题作一归纳。由于问题的对称性，只要求解一半厚度即可，其数学描写见式 (3-11) 到 (3-14)。此处不再重复。设将

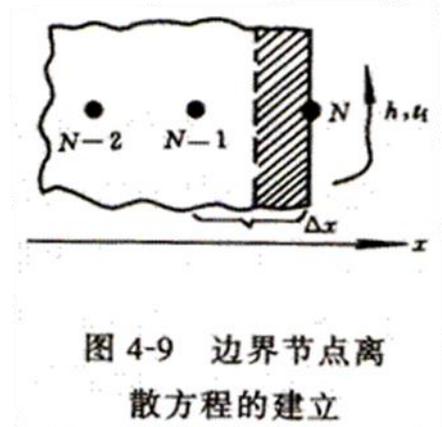


图 4-9 边界节点离散方程的建立

计算区域等分为 $(N-1)$ 等份 (N 个节点), 节点 1 为绝热的对称面, 节点 N 为对流边界, 则与微分形式的数学描写相对应的离散形式为:

$$t_n^{(i+1)} = Fo_{\Delta} (t_{n+1}^{(i)} + t_{n-1}^{(i)}) + (1 - 2Fo_{\Delta}) t_n^{(i)} \quad n = 1, 2, \dots, N-1$$

$$t_n^{(1)} = t_0, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4-18)$$

$$t_N^{(i+1)} = t_N^{(i)} (1 - 2Fo_{\Delta} Bi_{\Delta} - 2Fo_{\Delta}) + 2Fo_{\Delta} t_{N-1}^{(i)} + 2Fo_{\Delta} Bi_{\Delta} t_f \quad (4-19)$$

$$t_2^{(i)} = t_{-1}^{(i)} \quad (4-20)$$

其中式 (4-20) 是绝热边界的一种离散方式, 在确定 $t_1^{(i+1)}$ 之值时需要用到 $t_{-1}^{(i)}$ 。根据对称性该值等于 $t_2^{(i)}$ 。这样从已知的初始分布 t_0 出发, 利用式 (4-17) 至 (4-19) 可以依次求得第二时层、第三时层直到 I 时层上的温度值 (见图 4-8)。至于空间步长 Δx 及时间步长 $\Delta \tau$ 的选取, 原则上步长越小, 计算结果越接近于精确解, 但所需的计算机内存及计算时间则大大增加。此外, $\Delta \tau$ 与 Δx 之间的关系还受到显式格式稳定性的影响。

三、讨论一维导热问题显式差分格式稳定性限制的物理意义

从离散方程的结构分析, 对于一维导热显式格式的内节点方程, 点 n 上 $i+1$ 时刻的温度是在该点 i 时刻温度的基础上计及了左右两邻点温度的影响后得出的。若两邻点的影响保持不变, 则合理的情况是: $t_n^{(i)}$ 越高, 则 $t_n^{(i+1)}$ 越高; $t_n^{(i)}$ 越低, 则 $t_n^{(i+1)}$ 越低。

在上式中, 满足这种合理性是有条件的, 即上式中 $t_n^{(i)}$ 前的系数必大于等于零, 即:

$$Fo_{\Delta} = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (4-21)$$

否则, 将出现不合理情况。若 $1 - 2Fo_{\Delta} < 0$, 则表明节点 (n, i) 在 i 时刻的 $t_n^{(i)}$ 越高, 经 $\Delta\tau$ 时段后, $t_n^{(i+1)}$ 越低, 这种节点温度随时间的跳跃式变化是不符合物理规律的, 所以称该方程具有不稳定性。

对于一维导热显示格式的对流边界节点方程, 得出合理条件的条件是:

$$1 - 2Fo_{\Delta} Bi_{\Delta} - 2Fo_{\Delta} \geq 0 \quad (4-22a)$$

$$\text{即:} \quad Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2 + Bi_{\Delta}} \quad (4-22b)$$

由此可见: (1) 对流边界节点要得到的合理的解, 其限制条件比内节点更为严格, 所以, 当由边界条件及内节点的稳定性条件得出的 Fo_{Δ} 不同时, 应选较小的 Fo_{Δ} 来确定允许采用的时间步长 $\Delta\tau$ 。

(2) 对于第一、二类边界条件, 其限制条件只有内节点的限制条件。

(3) 内边界节点差分方程的稳定性条件不同, 但在数值计算时, 二节点又必须选择相同的 Δx 、 $\Delta\tau$ 。因此, 在选择 Δx 后, 则 $\Delta\tau$ 的选择就要受到稳定条件的限制, 不能任意选择, 而必须按两节点的稳定性条件分别计算 $\Delta\tau$, 取其中较小的 $\Delta\tau$ 作为时间步长, 方能满足二者稳定性要求。

四、数值解法的求解步骤

1. 首先选择空间坐标间隔 Δx ，即距离步长。对二维问题一般使 $\Delta x = \Delta y$ ；
2. 对显式格式差分方程，根据方程的稳定性条件选择允许的最大时间步长 $\Delta \tau$ ；在稳定性条件允许范围内， $\Delta \tau$ 越大，计算工作量越小，但精度较差；对一维问题，一般取 $\frac{1}{4} \leq Fo_{\Delta} \leq \frac{1}{2}$ ，即可满足工程精度要求；对于隐式差分方程， Δx 、 $\Delta \tau$ 可任意选取，不必进行稳定性条件校核；
3. 按题意给定的初始温度分布，确定各节点上的温度初值 $t_n^{(0)}$ ；
4. 根据建立的差分方程组，求 $\Delta \tau$ 时刻各节点的温度 $t_n^{(1)}$ ；
5. 再由 $t_n^{(1)}$ 为初值，重复计算得出 $t_n^{(2)}$ ，如此反复，最后得到 i 时刻的 $t_n^{(i)}$ 。

例题：4-6 极坐标中常物性、无内热源的非稳态导

热方程为：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \phi^2} \right)$$

试利用本题附图中的符号，列出节点 (i, j) 的差分方程式。

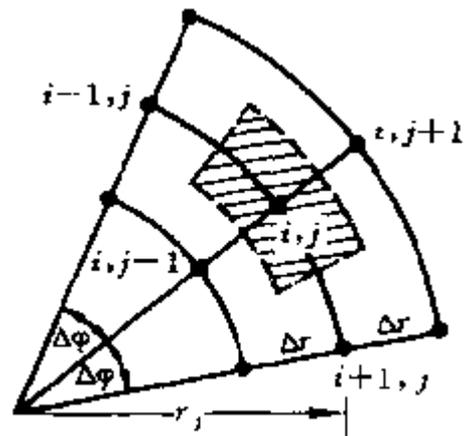
解：利用热平衡法，对 (i, j) 节点列出能量平衡式，

有 $\Phi_{in} = \Delta E$

$$\begin{aligned} \Delta E = \rho c V \frac{t_{i,j}^{(k+1)} - t_{i,j}^{(k)}}{\Delta \tau} &= \rho c \Delta r \cdot r_j \cdot \Delta \phi \frac{t_{i,j}^{(k+1)} - t_{i,j}^{(k)}}{\Delta \tau} \\ \Phi_{in} &= \lambda \left(r_j - \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta \phi \frac{t_{i,j-1}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{\Delta r} + \lambda \left(r_j + \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta \phi \frac{t_{i,j}^{(k)} - t_{i,j+1}^{(k)}}{\Delta r} \\ &\quad + \lambda \Delta r \frac{t_{i-1,j}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{r_j \Delta \phi} + \lambda \Delta r \frac{t_{i+1,j}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{r_j \Delta \phi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{整理，得：} \frac{t_{i,j}^{(k+1)} - t_{i,j}^{(k)}}{\Delta \tau} &= a \left[\frac{\left(r_j - \frac{\Delta r}{2} \right) t_{i,j-1}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{r_j \Delta r^2} + \frac{\left(r_j + \frac{\Delta r}{2} \right) t_{i,j}^{(k)} - t_{i,j+1}^{(k)}}{r_j \Delta r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{t_{i-1,j}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{(r_j \Delta \phi)^2} + \frac{t_{i+1,j}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{(r_j \Delta \phi)^2} \right] \end{aligned}$$

与由控制方程得到的结果相同。



作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第五章-对流换热分析 1-概述与方程组		授 课 时间长度	_90_ 分钟
授课进度	第_7_周, 总第_13_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	能分析一般对流换热问题的影响因素; 能对一般对流换热问题列出对流换热微分方程组。			
教学重点	对流换热及其影响因素; 对流换热微分方程组			
教学难点	对流换热微分方程组			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容, 课上, 教师就重点问题予以讲解, 并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习非稳态导热数值解法的特点、内部节点的显式差分格式、内部节点的隐式差分格式和边界节点温度差分方程。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (75 分钟)	讲授新的课程内容：对流换热及其影响因素、表面传热系数的确定方法。	采用板书与课件结合的方式，通过举生产、生活常见的对流换热例子讲解对流换热的影响因素，通过复习流体力学 N-S 方程，用传热的观点重新审视三大方程。	认真聆听老师讲授内容，理解对流换热的影响因素、对流换热微分方程组。	利用课件和图片等让学生掌握对流换热的基本概念、影响因素以及微分方程组。
第三步 (10 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

5-1 对流换热概述

一. 对流换热过程的影响因素

影响对流换热的因素不外是影响流动的因素及影响流体中热量传递的因素。具体为：

1. 流体流动的起因

由于流动起因的不同，对流换热可以区别为强制对流换热与自然对流换热两大类。

(1) 强制对流换热：有泵、风机或其他外部动力源的驱动。

(2) 自然对流换热：通常是由流体内部的密度差所引起。

两种流动的成因不同，流体中的速度场也有差别，所以换热规律不一样。

2. 流体有无相变

在流体没有相变时对流换热中的热量交换是由于流体显热的变化而实现，而在有相变的换热过程中(如沸腾或凝结)，流体相变热(潜热)的释放或吸收常常起主要作用，因而换热规律与无相变时不同。

3. 流体的流动状态

流体力学的研究已经查明，粘性流体存在着两种不同的流态——层流及湍流。层流时流体微团沿着主流方向作有规则的分层流动，而湍流时流体各部分之间发生剧烈的混合，因而在其他条件相同时湍流换热的强度自然要较层流强烈。

4. 换热表面的几何因素

这里的几何因素指的是换热表面的形状、大小、换热表面与流体运动方向的相对位置以及换热表面的状态(光滑或粗糙)。例如，图 5-1 (a) 所示的管内强制对流流动与流体横掠圆管的强制对流流动是截然不同的。前一种是管内流动，属于所谓内部流动的范围；后一种是外掠物体流动，属于所谓外部流动的范围。这两种不同流动条件下的换热规律必然是不相同的。在自然对流领域里，不仅几何形状，几何布置对流动亦有决定性影响，例如图 5-1 (b) 所示的水平壁，热面朝上散热的流动与热面朝下散热的流动就截然不同，它们的换热规律也是不一样的。

5. 流体的物理性质

流体的热物理性质对于对流换热有很大的影响。以无相变的强制对流换热为例，流体的密度 ρ 、动力粘度 ν 、导热系数 λ 以及比定压热容 c_p 等都会影响流体中速度的分布及热量的传递，因而影响对流换热。内冷发电机的冷却介质从空气改成水可以提高发电机的出力，就是利用了水的热物理性质有利于强化对流换热这一事实。

由上述讨论可见，影响对流换热的因素很多，由于流动动力的不同、流动状态的差别、流体有否相变及换热表面几何形状的区别构成了多种类型的对流换热现象，因而表征对流换热强弱的表面传热系数是取决于多种因素的复杂函数；以单相强制对流换热为例，在把高速流动排除在外时，表面传热系数可表示为：

$$h = f(u, l, \rho, \eta, \lambda, c_p) \quad (5-2)$$

式中 l 是换热表面的一个特征长度。

二. 对流换热过程的分类

由于对流换热是发生在流体和固体界面上的热交换过程，流体的流动和固体壁面的几何形状以及相互接触的方式都会不同程度影响对流热交换的效果，由此也构成了许许多多复杂的对流换热过程。因此，为了研究问题的条理性和系统性，以及更便于把握对流换热过程的实质，按不同的方式将对流换热过程进行分类。然后再分门别类地进行分析处理。

在传热学中对流换热过程的习惯性分类方式是：

按流体运动的起因，可分为自然对流换热和受迫对流换热；

按流体与固体壁面的接触方式，可分为内部流动换热和外部流动换热；

按流体的运动状态，可分为层流流动换热和紊流流动换热；

按流体在换热中是否发生相变或存在多相的情况，可分为单相流体对流换热 和多相流体对流换热。

紊流流动极为普遍，从自然现象看，收获季节的麦浪滚滚，旗帜在微风中轻轻飘扬，都是由空气的紊流引起的。紊流的运动服从某种统计规律，而不是杂乱无章。香烟的烟在静止的空气中上升，可以看到从层流到紊流的转化。紊流会消耗能量（同摩擦力消耗能量一样），没有紊流的世界是不可想象的。如果没有紊流，把酱油倒进汤里，花半小时酱油才能和汤混合，用汤匙一搅，依靠紊流几秒钟它们就混合在一起了。如果没有紊流的掺混，烟囱浓烟中的有害物质将长期积聚，危害人类环境。

对于实际的对流换热过程的，按照上述的分类，总是可以将其归入相应的类型之中。例如，在外力推动下流体的管内流动换热是属于受迫内部流动换热，可以为层流亦可为紊流，也可以有相变发生，使之从单相流动变为多相流动；再如，竖直的热平板在空气中的冷却过程是属于外部自然对流换热（或称大空间自然对流换热），可以为层流亦可为紊流，在空气中冷却不可能有相变，应为单相流体换热；但是如果是在饱和水中则会发生沸腾换热，这就是带有相变的多相换热过程。

在本章中，将按照上述分类对一些典型的对流换热过程进行分析。具体步骤为，先讨论单相流体受迫对流换热，其中分层流和紊流、管内流动和掠过平板或管子的外部流动，之后讨论大空间自然对流换热。

三. 对流换热的研究方法

研究对流换热的方法，即获得表面传热系数 h 的表达式的方法，大致有以下四种：

(1)分析法；(2)实验法；(3)比拟法；(4)数值法。

1. 分析法：主要是指对描写某一类对流换热问题的偏微分方程及相应的定解条件进行数学求解，从而获得速度场和温度场的分析解的方法。由于数学上的困难，虽然目前只能得到个别简单的对流换热问题的分析解，但分析解能深刻揭示各个物理量对表面传热系数的依变关系，而且是评价其他方法所得结果的标准与依据，因而本书将作适当介绍。

2. 实验法：通过实验获得的表面传热系数的计算式仍是目前工程设计的主要依据，

因此是初学者必须掌握的内容。为了减少实验次数，提高实验测定结果的通用性，传热学的实验测定应当在相似原理指导下进行。可以说，在相似原理指导下的实验研究是目前获得表面传热系数关系式的主要途径，也是本章的讨论重点。

3. 比拟法：是指通过研究功量传递及热量传递的共性或类似特性，以建立起表面传热系数与阻力系数间的相互关系的方法。应用比拟法，可通过比较容易用实验测定的阻力系数来获得相应的表面传热系数的计算公式。在传热学发展的早期，这一方法曾广泛用来获得湍流换热的计算公式。随着实验测试技术及计算机技术的迅速发展，近年来这一方法已较少应用。但是，这一方法所依据的动量传递与热量传递在机理上的类似性，对理解与分析对流换热过程很有帮助，因而本章仍将作一定介绍。

4. 数值法：对流换热的数值求解方法在近 20 年内得到了迅速发展，并将会日益显示出其重要的作用。与导热问题的数值求解方法相比，对流换热的数值求解增加了两个难点，即对流项的离散及动量方程中的压力梯度项的数值处理。这两个难点的解决要涉及到很多专门的数值方法，因而本章将不作介绍，有兴趣的读者可参考有关文献。但是对流换热中的一种常见情况——平直等截面管道中层流充分发展的对流换热，因其控制方程为导热型的方程，已可用读者现有的知识求解，所以将在本章的练习中有所涉及。

四. 对流换热微分方程式

在分析解法及数值解法中，求解所得到的直接结果是流体中的温度分布。那么，如何从流体中的温度分布来进一步得到表面传热系数呢？下面我们来揭示表面传热系数 h 与流体温度场之间的关系。

当粘性流体在壁面上流动时，由于粘性的作用，在靠近壁面的地方流速逐渐减小，而在贴壁处流体将被滞止而处于无滑移状态。换句话说，在贴壁处流体没有相对于壁面的流动，流体力学中称为贴壁处的无滑移边界条件。图 5-3 示意性地表示了这种近壁面处流速的变化。贴壁处这一极薄的流体层相对于壁面是不流动的，壁面与流体间的热量传递必须穿过这个流体层，而穿过不流动的流体层的热量传递方式只能是导热。因此，对流换热量就等于贴壁流体层的导热热量。将傅里叶定律应用于贴壁流体层，可得：

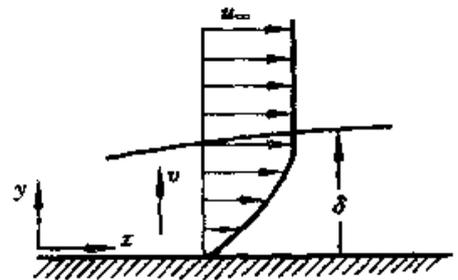


图 5-3 壁面附近速度分布示意图

$$q = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (5-3)$$

式中： $\left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0}$ 为贴壁处壁面法线方向上的流体温度变化率； λ 为流体的导热系数； A 为换热面积。从过程的热平衡可知，这些通过壁面流体层传导的热量最终是以对流换热的方式传递到流体中去的，将牛顿冷却公式 (5-1a) 与上式联立，即得以下关系式：

$$h = -\frac{\lambda}{\Delta t} \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (5-4)$$

式 (5-4) 称为换热微分方程式，它给出了计算对流换热壁面上热流密度的公式，也确定了对流换热系数与流体温度场之间的关系。它清晰地告诉我们，要求解一个对流换热问题，获得该问题的对流换热系数或交换的热量，就必须首先获得流场的温度分布，即温度场，然后确定壁面上的温度梯度，最后计算出在参考温差下的对流换热系数。所以换热系数与流场的温度分布有关，因此，它与流速、流态、流动起因、换热面

的几何因素、流体物性均有关。所以换热系数不是物性参数。对流换热问题犹如导热问题一样，寻找流体系统的温度场的支配方程，并力图求解方程而获得温度场是处理对流换热问题的主要工作。由于流体系统中流体的运动影响着流场的温度分布，因而流体系统的速度分布（速度场）也是要同时确定的，这也就是说，速度场的场方程也必须找出，并加以求解。不幸的是，对于较为复杂的对流换热问题，在建立了流场场方程之后，分析求解几乎是不可能的。此时，实验求解和数值求解是常常被采用的。尽管如此，实验关系式的形式及准则的确定还是建立在场方程的基础上的，数值求解的代数方程组也是从场方程或守恒定律推导得出的。

5-2 对流换热问题的数学描写

对流换热问题完整的数学描写包括对流换热微分方程组及定解条件，前者包括质量守恒、动量守恒及能量守恒这三大守恒定律的数学表达式。

为了简化分析，对于影响常见对流换热问题的主要因素，推导时作下列简化假设：
 (1) 流动是二维的；(2) 流体为不可压缩的牛顿型流体；(3) 流体物性为常数、无内热源；
 (4) 粘性耗散产生的耗散热可以忽略不计。除高速的气体流动及一部分化工用流体的对流换热外，对工程中常见的对流换热问题大都可以作上述假定。二维的假设仅是为了书写的简洁，从二维推广到三维是很方便的。

一. 连续性方程

由质量守恒定律导出，对于不可压缩流体，从各方向流入、流出微元体的质流量的差值的总和应等于零。因为是二维问题，可以撇开z方向，而只考虑图 4-5 所示的x、y两个方向上的质流量的差值。如右图所示。

x方向流入的质量流量： $\rho u dy$

x方向流出的质量流量：

$$\left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx\right) dy$$

y方向流入的质量流量： $\rho v dx$

y方向流出的质量流量： $\left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy\right) dx$

根据质量守恒，各方向质流量差值的总和等于零。于是得：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0$$

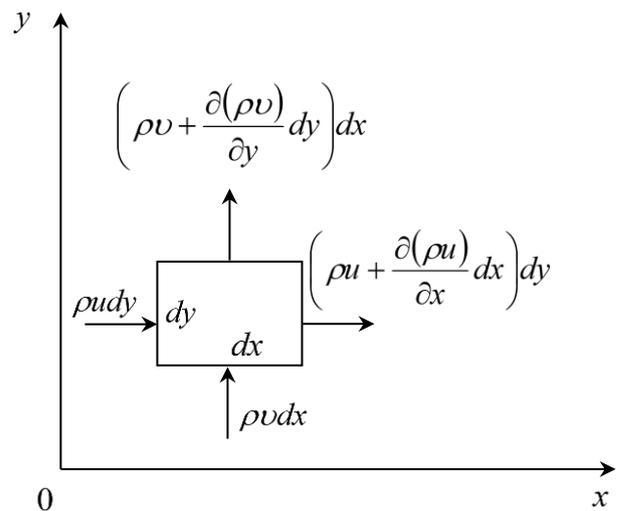
考虑到常物性，上式化为： $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$

这就是二维常物性不可压缩流体的连续性方程。

二. 动量微分方程

由动量定理导出，对于如下图所示流动流体的微元体，动量守恒可表示如下：作用于微元体表面和内部的所有外力的总和，等于微元体中流体动量的变化率。也即：质量×加速度=作用力。

1. 微元体的质量×加速度



微元体的质量×加速度为： $\rho dx dy \frac{DU}{d\tau}$

x方向： $\frac{Du}{d\tau} = \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}$

y方向： $\frac{Dv}{d\tau} = \frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}$

2.微元体所受的外力

微元体所受的外力，可分为体积力和表面力两类，令 F_x 、 F_y 分别表示单位体积的积力在x、y方向的分量，则

x、y方向的体积力为：

x方向： $F_x dx dy$

y方向： $F_y dx dy$

表面力有垂直于表面的法向应力，以及速度变化时由粘性引起的切向应力，如右图所示，微元体在x和y方向的表面力为：

$$\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\right) dx dy$$

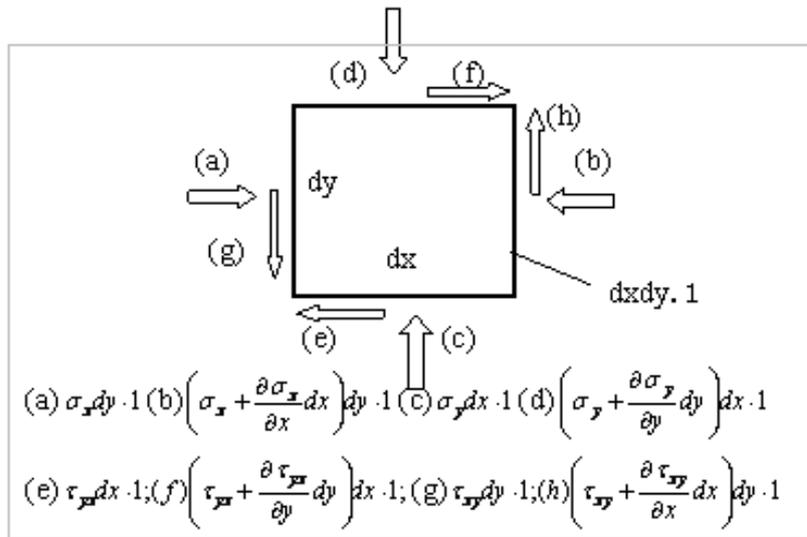
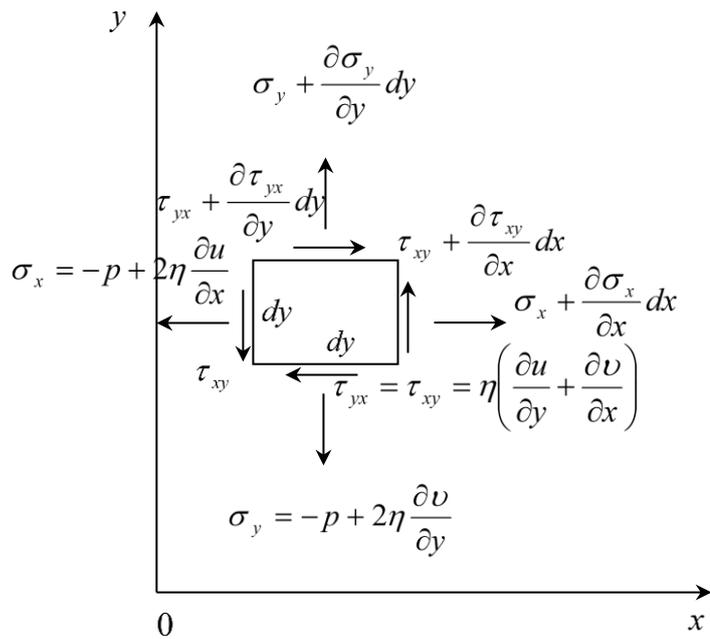


图 4-4 流场中微元体受力示意图

$$\left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}\right) dx dy$$

微元体的表面力用 p 、 u 、 v 等表示时有以下形式：

$$\left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right] dx dy$$

$$\left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right] dx dy$$

3. 动量微分方程

x 和 y 方向上动量定理的表达式可表示为:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$= F_y - \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$+ \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

三. 能量微分方程

是描述流动流体的温度与有关物理量的联系。在解得速度场后，它是求取流体温度场的基本微分方程，是根据能量守恒定律得出的。

以右图所示微元体为研究对象，对于二维问题，根据热力学第一定律，有：由导热进入微元体的热量 Q_1 + 由对流进入微元体的热量 Q_2 = 微元体中流体的焓增。

由导热微分方程的推导可知 $Q_1 = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) dx dy d\tau$ ，由对流进入微元体的热量的分析可参看右图，在 $d\tau$ 时间内，由 x 处的截面进入微元体的热量为：

$$Q_x' = \rho c_p t u dy d\tau$$

由 $x + dx$ 处的截面流出微元体的热量为：

$$Q_{x+dx}' = \rho c_p \left(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right) \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) dy d\tau$$

则 x 方向流入微元体的净热量为：

$$Q_x' - Q_{x+dx}' = -\rho c_p \left(u \frac{\partial t}{\partial x} + t \frac{\partial u}{\partial x} \right) dx dy d\tau$$

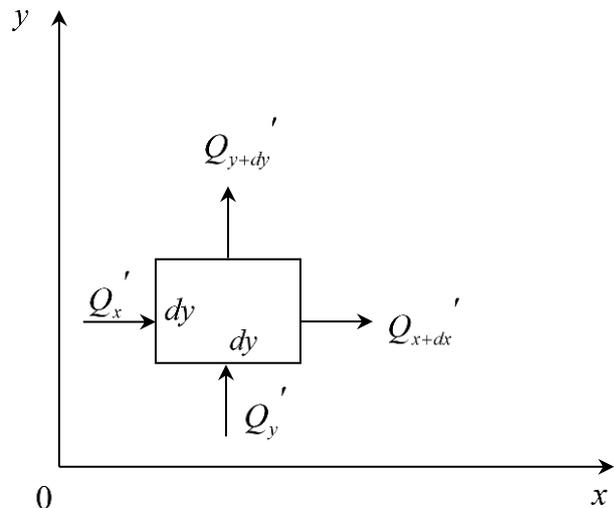
同理， y 方向流入微元体的净热量为：

$$Q_y' - Q_{y+dy}' = -\rho c_p \left(v \frac{\partial t}{\partial y} + t \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dy d\tau$$

所以由对流进入微元体的热量 Q_2 为：

$$Q_2 = -\rho c_p \left[\left(u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} \right) + t \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] dx dy d\tau$$

$$= -\rho c_p \left(u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} \right) dx dy d\tau$$



在 $d\tau$ 时间内，微元体中流体温度改变了 $\frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$ ，其焓增 ΔH 为：

$$\Delta H = \rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy d\tau$$

将 Q_1 、 Q_2 及 ΔH 代入能量守恒方程得：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right)$$

上式即为对流换热能量方程，可以指出，流体不流动时， $u = v = 0$ ，上式退化为无内热源的导热微分方程。能量方程中包括对流项 $u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y}$ ，这对于理解对流换热是对流与导热两种基本热量传递方式的联合作用是有意义的。流动着的流体，除了有导热的本领之外，还依靠流体的宏观位移来传递热量。

四.对流换热微分方程组

1. 对流换热微分方程组

至此，可以把描写对流换热的完整微分方程组作一汇总。对于不可压缩、常物性、无内热源的二维问题，这一微分方程组为：

质量守恒方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5-7)$$

动量守恒方程：

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5-8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (5-9)$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (5-10)$$

其中 F_x 、 F_y 是体积力在 x 、 y 方向的分量。动量守恒方程式(5-8)、(5-9)又称纳维—斯托克斯方程，质量守恒方程式(5-7)又称连续性方程，它们是描写粘性流体流动过程的控制方程，对于不可压缩粘性流体的层流及湍流流动都适用。用于湍流时，式中的速度、压力等均为脉动物理量的瞬时值。

2. 对流换热的定解条件

作为对流换热问题完整的数学描写还应该对定解条件作出规定，包括初始时刻的条件及边界上与速度、压力及温度等有关的条件。以能量守恒方程为例，可以规定边界上流体的温度分布(第一类边界条件)，或给定边界上加热或冷却流体的热流密度(第二类边界条件)。由于获得表面传热系数是求解对流换热问题的最终目的，因此一般地说求解对流换热问题时没有第三类边界条件。但是，如果流体通过一层薄壁与另一种流体发生热交换，则另一种流体的表面传热系数可以出现在所求解问题的边界条件中。对流换热问题的定解条件的数学表达比较复杂，这里不再深入讨论。但对于对流换热问题的一种简化情形—外掠平板的边界层流动，将给出其定解条件的表达式作为示例。

3. 对流换热微分方程组的求解

式(5-7)~(5-10)共4个方程,其中包含了4个未知数(u, v, p, t)。虽然方程组是封闭的,原则上可以求解,然而由于纳维-斯托克斯方程的复杂性和非线性特点,要针对实际问题在整个流场内数学上求解上述方程组却是非常困难的。这种局面直到1904年德国科学家普朗特)提出著名的边界层概念,并用它对纳维-斯托克斯方程进行了实质性的简化后才有突破,使数学分析解得到很大发展。后来,波尔豪森又把边界层概念推广应用于对流换热问题,提出了热边界层的概念,使对流换热问题的分析求解也得到了很大发展。下一节首先复习边界层的概念,并把它应用于能量微分方程,从而导出边界层问题的对流换热微分方程组。

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

本次课程内容设计流体力学的内容较多,需要学生提前复习流体力学相关知识,在充分理解与掌握纳维尔-斯托克斯方程的基础上,学习本次课内容相对比较轻松。

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第五章-对流换热分析 2-对流换热的边界层微分方程组		授课时间长度	_90_ 分钟
授课进度	第_7_周, 总第_14_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	能用边界层理论分析流体外掠平板的一般流动与传热问题。			
教学重点	流动边界层; 热边界层; 边界层换热微分方程组			
教学难点	热边界层; 边界层换热微分方程组			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容, 课上, 教师就重点问题予以讲解, 并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习对流换热的基本概念、分类、影响因素、对流换热微分方程式和对流换热微分方程组。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (75 分钟)	讲授新的课程内容：流动边界层；热边界层；边界层换热微分方程组。	采用板书与课件结合的方式，以平板为例，讲解流动边界层，采用量纲分析法简化三大方程，重点讲解层流边界层方程组解的结论。	认真聆听老师讲授内容，理解并记忆流动边界层、热边界层和对流换热方程组的解分析。	利用课件、图片、板书分析等让学生理解流动边界层、热边界层、量纲分析法以及外掠平板层流换热边界层微分方程式分析解。
第三步 (10 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

对流换热的边界层微分方程组

一、边界层的概念

边界层的概念是 1914 年普朗特提出的。

1. 速度边界层

(1) 定义

流体流过固体壁面时，由于壁面层流体分子的不滑移特性，在流体粘性力的作用下，近壁流体流速在垂直于壁面的方向上会从壁面处的零速度逐步变化到来流速度，如图 5-5 所示。流体流速变化的剧烈程度，即该方向上的速度梯度，与流体的粘性力和速度的大小密切相关。普朗特通过观察发现，对于低粘度的流体，如水和空气等，在以较大的流速流过固体壁面时，在壁面上流体速度发生显著变化的流体层是非常薄的。因而把在垂直于壁面的方向上流体流速发生显著变化的流体薄层定义为速度边界层，而把边界层外流体速度变化比较小的流体流场视为势流流动区域。这样，引入边界层的概念之后，流体流过固体壁面的流场就人为地分成两个不同的区域，其一是边界层流动区，这里流体的粘性力与流体的惯性力共同作用，引起流体速度发生显著变化；其二是势流区，这里流体粘性力的作用非常微弱，可视为无粘性的理想流体流动，也就是势流流动。

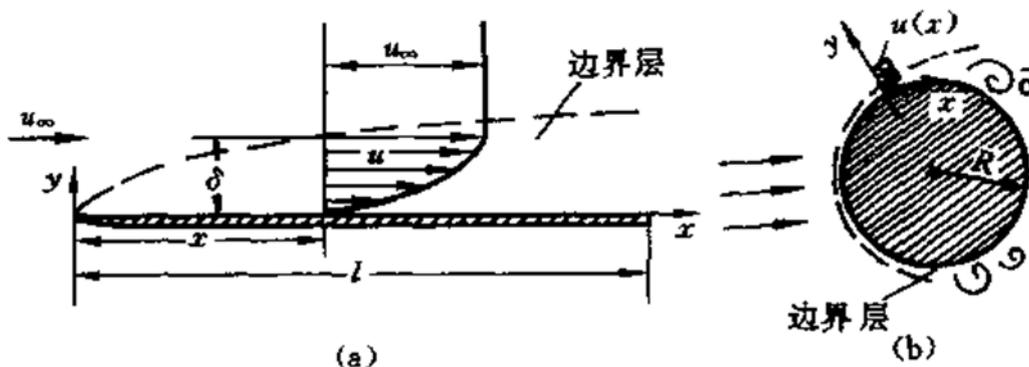


图 5-5 边界层示意图

(2) 边界层厚度

边界层是壁面上方流速发生显著变化的薄层，但其边缘所在的位置是模糊的。在实际分析边界层问题时通常约定，当速度变化达到主流速度 99% 的空间位置为速度边界层的外边缘，那么从这一点到壁面的距离就是边界层的厚度，记为 δ 。随着流体流动沿 x 方向（主流方向）向前推进，边界层的厚度会逐步增大。流动边界层 δ 薄到什么程度呢？以

温度为 20℃ 的空气沿平板的流动为例，在不同来流速度 u_∞ 下， δ 沿平板长度的变化示于图 5-6。由图可见，相对于平板长度 l ， δ 是一个比 l 小一个数量级以上的小量。而在这样小的薄层内，流体的速度要从 0 变化到接近于主流流速，所以流体在垂直于主流方向上的速度变化是十分剧烈的。

从此式我们不难发现，要使边界层的厚度远小于流动方向上的尺度，也就是所说的边界层是一个薄层，这就要求雷诺数必须足够的大。因此，对于流体流过平板，满足边界层假设的条件就是雷诺数足够大。由此也就知道，当速度很小、黏性很大时或在平板的前沿，边界层是难以满足薄层性条件。

(3) 流体外掠平板边界层的形成和发展

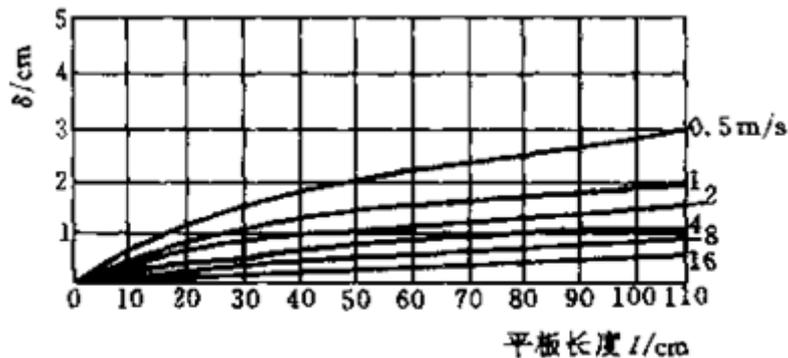


图 5-6 空气沿平板流动时边界层增厚的情况

在 5-1 节中已指出，流体的流动可区别为层流和湍流两类。流动边界层在壁面上的发展过程也显示出，在边界层内也会出现层流和湍流两类状态不同的流动。图 5-7 示出了流体掠过平板时边界层的发展过程。流体以 u_∞ 的流速沿平板流动。在平板的起始段， δ 很薄。随着 x 的增加，由于壁面粘滞力的影响逐渐向流体内部传递，边界层逐渐增厚，但在某一距离 x_c 以前会一直保持层流的性质。此时流体作有秩序的分层流动，各层互不干扰。这时的边界层称层流边界层。沿流动方向随着边界层厚度的增加，边界层内部粘滞力和惯性力的对比向着惯性力相对强大的方向变化，促使边界层内的流动变得不稳定起来。自距前缘 x_c 处起，流动朝着湍流过渡，最终过渡为旺盛湍流。此时流体质点在沿 x 方向流动的同时，又作着紊乱的不规则脉动，故称湍流边界层。边界层开始从层流向湍流过渡的距离 x_c 由临界雷诺数 $Re_c = u_\infty x_c / \nu$ 确定。对掠过平板的流动， Re_c 根据来流湍流度的不同而在 2×10^5 到 3×10^6 之间。来流扰动强烈、壁面粗糙时，雷诺数甚至在低于下限值时即发生转变。在一般情况下，可取 $Re_c = 5 \times 10^5$ 。

已经查明，湍流边界层的主体核心虽处于湍流流动状态，但紧靠壁面处粘滞力仍占主导地位，致使贴附于壁面的一极薄层内仍保持层流的性质。这个极薄层称为湍流边界层的层流底层(又称粘性底层)。在湍流核心与层流底层之间存在着起过渡性质的缓冲层(图 5-7 只着重勾划出层流底层)。

图 5-7 给出了边界层内的速度分布曲线，它们与流动状态相对应。层流边界层的速度分布为抛物线状。在湍流边界层中，层流底层的速度梯度较大，近于直线，而在湍流核心，质点的脉动强化了动量传递，速度变化较为平缓。

(4) 边界层理论的四个基本要点

综合以上讨论，可以总结出边界层理论的四个基本要点：

① 当粘性流体沿固体表面流动时，流场可划分为主流区和边界层区。边界层区域内，流速在垂直于壁面的方向上发生剧烈的变化，而在主流区流体的速度梯度几乎等于零。

②边界层厚度 δ 与壁面尺寸 l 相比是个很小的量，远不只小一个数量级。

③主流区的流动可视为理想流体的流动，用描述理想流体的运动微分方程求解。而在边界层内应考虑粘性的影响，要用粘性流体的边界层微分方程描述，其特点是主流方向流速的二阶导数项略而不计。

④在边界层内流动状态分层流与湍流，而湍流边界层内紧靠壁面处仍有极薄层保持层流状态，称层流底层。

这里应指出，边界层类型的流动仅当流体不脱离固体表面时才存在。对于图 5-5 (b) 所示的在圆柱后半周出现的脱体流动(流体离开固体表面而形成旋涡)，边界层的概念不再适用，应当采用完全的纳维—斯托克斯方程来描述。

2. 热(温度)边界层。

(1) 定义

当流体流过平板而平板的温度 t_w 与来流流体的温度 t_∞ 不相等时，对于上述的低粘性流体，如果流体的热扩散系数也很小，在壁面上方也能形成温度发生显著变化的薄层，常称为热边界层。

(2) 热边界层厚度

仿照速度边界层的约定规则，当壁面与流体之间的温差达到壁面与来流流体之间的温差的 0.99 倍时，此位置就是边界层的外边缘，而该点到壁面之间的距离则是热边界层厚度，记为 δ_t 。

如果整个平板都保持温度 t_w ，那么， $x = 0$ 时， $\delta_t = 0$ ，且随着 x 值的增大逐步增厚。在同一位置上热边界层厚度与速度边界层厚度的相对大小与流体的普朗特数 Pr 有关，也就是与流体的热扩散特性和动量扩散特性的相对大小有关。

除液态金属及高粘性的流体外，热边界层的厚度 δ_t 在数量级上是个与运动边界层厚度 δ 相当的小量。于是对流换热问题的温度场也可区分为两个区域：热边界层区与主流区。在主流区，流体中的温度变化率可视为零，这样就可把要研究的热量传递的区域集中到热边界层之内。图 5-8 示意性地画出了固体表面附近速度边界层及温度边界层的大致情况。

二、边界层微分方程组

利用上述的边界层的概念，可以应用数量级分析的方法对流体流过平板的对流换热微分方程组进行相应的简化。

1. 数量级分析法

所谓数量级分析，是指通过比较方程式中各项数量级的相对大小，把数量级较大的项保留下来，而舍去数量级较小的项，实现方程式的合理简化。数量级分析法在工程问题分析中具有广泛的实用意义。至于怎样确定各项的数量级，可视分析问题的性质而不同。这里采用各量在作用区间的积分平均绝对值的确定方法。例如，在速度边界层内，从壁面到 $y = \delta$ 处，主流方向流速 u 的积分平均绝对值显然远远大于垂直主流方向的流速 v 的积分平均绝对值。因而，如果把边界层内 u 的数量级定为 1，则的 v 数量级必定是个小量，用符号 δ 表示。采用这样的方法可以对能量守恒方程中有关量的数量级作出如表 5-1 的分析。至于导数的数量级则可将因变量及自变量的数量级代入导数的表达式而得出。

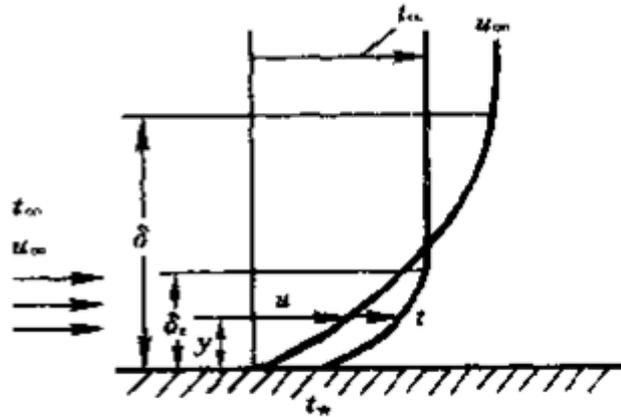


图 5-8 速度边界层与温度边界层

例如 $\frac{\partial t}{\partial x}$ 的数量级为 $\frac{1}{1} = 1$, 而 $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)$ 的数量级则为 $\left(\frac{1}{\delta} \right) / \delta = \frac{1}{\delta^2}$ 。于是边界层中二维稳态且忽略重力情况下方程组的各项数量级可分析如下:

$$\text{连续性方程:} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\text{数量级:} \quad \begin{array}{cc} \frac{1}{1} & \frac{\delta}{\delta} \\ 1 & 1 \end{array}$$

动量守恒方程:

$$x \text{ 方向:} \quad \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]$$

$$\text{数量级:} \quad \begin{array}{cccccc} 1 & \left(1 \frac{1}{1} \right) & \delta & \frac{1}{\delta} & 1 & \delta^2 \left[\frac{1}{1} \left(\frac{1}{1} \right) \right. \\ & 1 & 1 & 1 & 1 & \left. \frac{1}{\delta} \left(\frac{1}{\delta} \right) \right] \\ & & & & & \delta^2 & 1 \end{array}$$

$$y \text{ 方向:} \quad \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]$$

$$\text{数量级:} \quad \begin{array}{cccccc} 1 & \left(1 \frac{\delta}{1} \right) & \delta & \frac{\delta}{\delta} & \delta & \delta^2 \left[\frac{1}{1} \left(\frac{\delta}{1} \right) \right. \\ & \delta & \delta & \delta & \delta & \left. \frac{1}{\delta} \left(\frac{\delta}{\delta} \right) \right] \\ & & & & & \delta^3 & \delta \end{array}$$

$$\text{能量守恒方程:} \quad u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) \right]$$

$$\text{数量级:} \quad \begin{array}{cccccc} 1 & \frac{1}{1} & \delta & \frac{1}{\delta} & \delta^2 \left[\frac{1}{1} \left(\frac{1}{1} \right) \right. \\ & 1 & 1 & \delta^2 & \left. \frac{1}{\delta} \left(\frac{1}{\delta} \right) \right] \\ & & & & & \delta^2 & 1 \end{array}$$

2. 边界层换热微分方程组

从以上对连续性方程、动量守恒方程及能量守恒方程的数量级分析可见, 连续性方程中各项数量级相同, 均保留; 动量守恒方程中 y 方向的数量级较 x 方向小得多, 因此 y 方向的动量守恒方程在方程组中可去除, 而 x 方向的动量守恒方程中可舍去 $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$; 能量守恒方程中可舍去 $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$, 因此可得二维、稳态、无内热源的边界层换热微分方程组为:

$$\text{连续性方程:} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5-14)$$

$$\text{动量守恒方程:} \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5-15)$$

$$\text{能量守恒方程:} \quad u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} = a \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \quad (5-16)$$

注意: 式 (5-15) 中的 $\frac{dp}{dx}$ 是已知量, 它可由边界层外理想流体的伯努利方程确定。

这样, 3 个方程包括 3 个未知数 u 、 v 及 t , 方程组是封闭的。

3. 边界条件

对上述微分方程组配上定解条件即可求解。对于主流场是均速 u_∞ 、均温 t_∞ , 并给定恒壁温, 即 $y = 0$ 时 $t = t_w$ 的问题, 定解条件可表示为:

$$y = 0 \text{ 时} \quad u = 0, \quad v = 0, \quad t = t_w$$

$$y = \infty \text{ 时 } \quad u = u_{\infty}, \quad t = t_{\infty}$$

4. 流体外掠平板方程组的解

对于平板, $\frac{dp}{dx} = -\rho u_{\infty} \frac{du_{\infty}}{dx}$, 而 $u_{\infty} = \text{const}$, 则 $\frac{dp}{dx} = 0$, 分析求解上述方程组可得局部表面传热系数 h_x 的表达式如下:

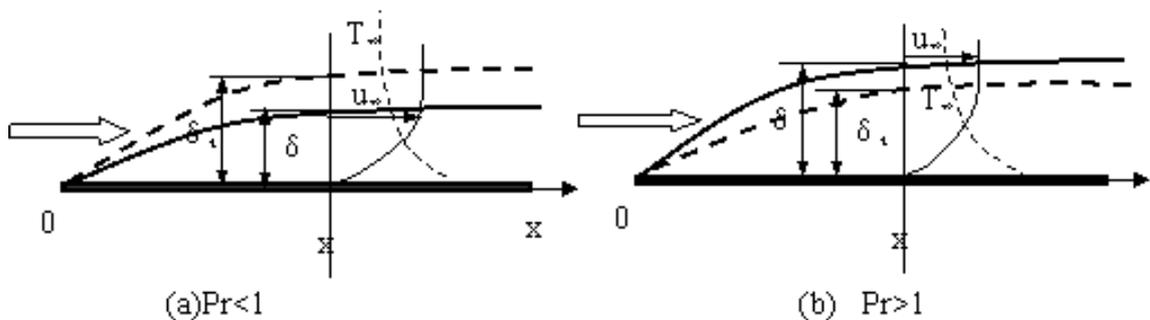
$$h_x = 0.332 \frac{\lambda}{x} \left(\frac{u_{\infty} x}{\nu} \right)^{1/2} \left(\frac{\nu}{a} \right)^{1/3} \quad (5-17)$$

三、速度边界层厚度与热边界层厚的关系

现在, 来分析热边界层厚度 δ_t 与流动边界层厚度 δ 之间的关系。为此, 考虑一个掠过平板的强制对流换热问题。在这类强制对流中, 重力场可忽略不计, 且压力梯度为零, 于是式 (5-15) 简化为:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5-18)$$

将此式与边界层能量微分方程式 (5-16) 相比较, 发现它们在形式上是完全类似的。只要 $\nu = a$, 且 u 与 t 具有相同的边界条件, 例如 $y = 0$ 时 $t = t_w$, $u = u_w$ ($u_w = 0$ 并不影响讨论), 及 $y \rightarrow \infty$ 时, $u \rightarrow u_{\infty}$, $t \rightarrow t_{\infty}$, 则式 (5-16) 与式 (5-18) 有相同形式的无量纲形式的解, 即 $\frac{u-u_w}{u_{\infty}-u_w}$ 与 $\frac{t-t_w}{t_{\infty}-t_w}$ 的分布完全相同。换句话说, 当 $\nu/a = 1$ 时, 如果热边界层的厚度的定义与流动边界层厚度的定义相同 (例如均取来流值的 99% 的位置作为边界层的外边界), 则有 $\delta_t = \delta$ 。可见比值 ν/a 可以表征热边界层与流动边界层的相对厚度。称 $\nu/a = c_p \eta / \lambda$ 为普朗特数, 记为 Pr , 它反映了流体中动量扩散与热扩散能力的对比。除液态金属的 Pr 数为 0.01 的数量级外, 常用流体的 Pr 数在 0.6~4000 之间, 例如各种气体的 Pr 数大致在 0.6~0.7 之间。流体的运动粘度反映了流体中由于分子运动而扩散动量的能力。这一能力越大, 粘性的影响传递得越远, 因而流动边界层越厚。可以对热扩散率作出类似的讨论。因而 ν 与 a 的比值, 即 Pr 数, 反映了流动边界层与热边界层厚度的相对大小。在液态金属中, 流动边界层厚度远小于热边界层厚度; 对空气, 两者大致相等, 如上图所示; 而对高 Pr 数的油类 (Pr 在 $10^2 \sim 10^3$ 的量级), 则速度边界层的厚度远大于热



边界层的厚度。

最后, 把式 (5-17) 改写为:

$$\frac{h_x x}{\lambda} = 0.332 \left(\frac{u_{\infty} x}{\nu} \right)^{1/2} \left(\frac{\nu}{a} \right)^{1/3}$$

式中： $\frac{\nu}{\alpha}$ 是 Pr 数； $\frac{u_{\infty}x}{\nu}$ 是以当地坐标 x 为特征长度的 Re 数，记为 Re_x 。它们都是无量纲量，因此 $\frac{h_x x}{\lambda}$ 也必为无量纲量，称为努塞尔（Nusselt）数，记为 Nu_x ，下标 x 表示以当地几何尺度为特征长度。于是，外掠等温平板的无内热源的层流对流换热问题的分析解为：

$$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (5-19)$$

这种以特征数形式表示的对流换热计算式称为特征数方程，习惯上称准则方程或关联式。获得不同换热条件下的特征数方程是研究对流换热的根本任务。下一节将简要介绍通过求解边界层积分方程组及应用比拟理论获得这种特征数方程的方法。

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

本次课内容引入的量纲分析，学生相对比较陌生，需要以通俗的语言解释量纲分析。另外，对于流体外掠平板层流的解需要教师着重讲解。

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第五章-对流换热分析 3-动量传递和热量传递的类比		授课时间长度	_90_ 分钟
授课进度	第_8_周, 总第_15_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	了解湍流动量传递和热量传递类比; 掌握雷诺类比律; 了解外掠平板紊流换热。			
教学重点	动量传递和热量传递类比的基本原理及其在紊流对流换热中的应用。			
教学难点	动量传递和热量传递类比的基本原理。			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容, 课上, 教师就重点问题予以讲解, 并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5分钟)	复习流动边界层; 热边界层; 边界层换热微分方程组。。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点上上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (75 分钟)	讲授新的课程内容：湍流动量传递和热量传递类比、雷诺类比律、外掠平板紊流换热。	采用板书与课件结合的方式，讲解紊流发展，增强学生对传热学的兴趣，复习牛顿粘性定律和傅里叶定律，讲解雷诺类比率，讲解外掠平板紊流换热	认真聆听老师讲授内容，理解对流换热的类比率。	通过紊流的发展引起学生学习传热学的兴趣，强化学生对类比率的理解。
第三步 (10 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

动量传递和热量传递的类比

紊流是工业领域里各种对流换热应用中存在最普遍的流动状态。紊流时流体的动量、热量交换水平都大大高于层流。但是紊流运动规律作分复杂，它的机理迄今尚未被完全掌握，甚至还缺少一个严格统一的定义。

一、紊流动量传递和热量传递机理

1、传递机理

紊流传递过程中，除了在层流换热中分析过的分子扩散传递作用外，还存在流体质点紊流脉动所引起的附加动量和热量传递作用。

其中分子扩散传递：

$$\tau_t = \rho \nu \frac{du}{dy}; \quad q_t = \rho \alpha_f a \frac{dt}{dy}$$

流体质点紊流脉动所引起的附加动量和热量传递：

$$\tau_t = \rho \varepsilon_m \frac{du}{dy}; \quad q_t = \rho \varepsilon_h \frac{dt}{dy}$$

其中 ε_m 为紊流动量扩散率（紊流粘度）， ε_h 为紊流热量扩散率，均不是流体的物理性质，是与紊流强度有密切关系的物理量，单位为 m^2/s 。

2、紊流边界层结构

雷诺的一层结构模型：认为流动边界层完全由紊流核心区组成。

普朗特的二层结构模型：认为流动边界层由层流底层和紊流核心区组成。

冯·卡门的三层结构模型：认为流动边界层由层流底层、缓冲层和紊流核心区组成。

二、类比律

1、雷诺类比律与柯尔朋类比律

雷诺 1874 年按照紊流边界层一层结构模型，提出雷诺类比方程 $\frac{q}{\tau} = c_f \frac{dt}{du}$ ，得：

$$\frac{h}{\rho_p u_\infty} = \frac{\tau_w}{\rho u_\infty^2} = \frac{C_f}{2}, \quad St = \frac{Nu}{Re Pr} = \frac{h}{\rho_p u_\infty} = \frac{C_f}{2}$$

此即雷诺类比律，这样，已知摩擦系数，即可推算表面传热系数。

雷诺类比律只适用于 $Pr=1$ 的流体，以及流体阻力仅限于摩擦阻力的场合。

当 $Pr \neq 1$ 时，可用 $Pr^{2/3}$ 修正，得出柯尔朋类比律：

此即雷诺类比律，这样，已知摩擦系数，即可推算表面传热系数。

雷诺类比律只适用于 $Pr=1$ 的流体，以及流体阻力仅限于摩擦阻力的场合。

当 $Pr \neq 1$ 时，可用 $Pr^{2/3}$ 修正，得出柯尔朋类比律：

$$St Pr^{2/3} = \frac{C_f}{2}$$

柯尔朋类比律适用于 $Pr=0.5-50$ 。

2、泰勒—普朗特类比律

1901 年在二层结构模型的前提下，得到泰勒—普朗特类比律：

$$St = \frac{h}{\rho_p u_0} = \frac{C_f/2}{1 + 2.12 Re^{-0.1} (Pr - 1)}$$

3、卡门类比律

在三层结构模型的前提下，得到卡门类比律：

$$St = \frac{h}{\rho_p u_0} = \frac{0.0294 Re^{-0.2}}{1 + 0.171 Re^{-0.1} \left[5(Pr - 1) + 5 \ln \left(\frac{5Pr + 1}{6} \right) \right]}$$

适用条件： $Pr = 0.5 - 50, Re = 5 \times 10^5 - 10^7$

上述类比律表达式是针对外掠平板对流换热而言的，对于管内对流换热可参考其他文献，另外使用时，定性温度为 $t_m = \frac{t_w + t_f}{2}$ 。

三、基本要求及例题

从基本概念讲需理解紊流流动量传递和热量传递机理及可类比的原因；从定量计算角度讲，掌握雷诺类比律与柯尔朋类比律在对流换热中的应用。

例题 1、空气以 40m/s 的速度流过长宽均为 0.2m 的薄板， $t_f=20^\circ\text{C}$ ， $t_w=120^\circ\text{C}$ ，实测空气掠过此板上下两表面时的摩擦力为 0.075N，试计算此板与空气间的换热量（设此板仍作为无限宽的平板处理，不计宽度 z 方向的变化）。

解：应用柯尔朋类比律

$$\frac{\tau_w}{\rho u_w^2} = \frac{C_f}{2} = St Pr^{2/3} = \frac{h}{\rho c_p u_w} Pr^{2/3}$$

其中 ρ 、 c_p 用定性温度 $t_m = \frac{t_w + t_f}{2} = 70^\circ\text{C}$ 确定干空气的热物理性质：

$$\rho = 1.029 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad c_p = 1.009 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}, \quad Pr = 0.694, \quad \text{带入上式}$$

$$\frac{0.075 / (0.2^2 \times 2)}{1.029 \times 40^2} = \frac{h}{1.029 \times 1.009 \times 10^3 \times 40} \times 0.694^{2/3}, \quad \text{得 } h = 30.17 \text{ W/m}^2\text{K},$$

换热量：

$$\Phi = hA(t_w - t_f), \quad A = 0.2 \times 0.2 \times 2 \text{ m}^2$$

$$\Phi = 30.17 \times (0.2^2 \times 2) \times (120 - 20) = 241.4 \text{ W}$$

例题 2 为什么热量传递和动量传递过程具有类比性？

答案：如果用形式相同的无量纲方程和边界条件能够描述两种不同性质的物理现象，就称这两种现象是可类比的，或者可比拟的。把它们的有关变量定量地联系起来的关系式就是类比律。

可以证明，沿平壁湍流时的动量和能量微分方程就能够表示成如下形式：

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re}_L} \left(1 + \frac{\varepsilon_m}{\nu} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}; \quad U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re}_L \text{Pr}} \left(1 + \frac{\varepsilon_h}{a} \right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}$$

其中 $X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}; \theta = \frac{t - t_w}{t_f - t_w}, U = \frac{u}{u_w}, V = \frac{v}{u_w}$

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第五章-对流换热分析 4-相似理论基础		授课时间长度	_90_ 分钟
授课进度	第_8_周, 总第_16_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	理解几何相似和物理相似; 掌握相似性质、相似原理; 掌握常用特征数。			
教学重点	相似的概念; 相似原理; 特征数物理意义;			
教学难点	相似原理; 特征数物理意义。			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容, 课上, 教师就重点问题予以讲解, 并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5分钟)	复习湍流动量传递和热量传递类、雷诺类比律、外掠平板紊流换热。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (75 分钟)	讲授新的课程内容：物理相似的基本概念、相似原理和模型实验和实验数据的整理方法。	采用板书与课件结合的方式，通过复习几何相似引入相似的概念，并延伸到物理相似，分析得到相似原理；根据实际应用讲解模型实验和实验数据的整理方法	认真聆听老师讲授内容，通过几何相似理解物理相似，通过案例理解相似原理，通过教师的分析理解模型实验和实验数据的整理方法。	通过几何相似引出物理相似，通过案例理解相似原理和模型实验和实验数据的整理方法。
第三步 (10 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

相似理论基础

如何进行实验研究？

$$h = f(\bar{v}, t_w, t_f, \lambda, c_p, \rho, \alpha, \mu, l, \Omega)$$

相似理论指导下的实验研究

在对换热进行实验研究之前，需要解决几个问题

- (1) 实验中应测哪些量、如何设计实验系统
- (2) 实验数据如何整理
- (3) 实验结果如何推广运用于实际现象

一. 相似原理的基本内容

相似原理所研究的是相似物理现象之间的关系。应该指出，只有同类的物理现象之间才能谈论相似问题。

1. 同类现象：是指那些用相同形式并具有相同内容的微分方程式所描写的现象。描写电场与导热物体的温度场的微分方程虽然形式相仿，但内容不同，因此不是同类现象。电场与温度场之间只有“类比”或者“比拟”，但不存在相似。同样，微分方程式(5-33)与(5-34)虽然形式相同，但内容不同，因此速度场和温度场之间也只能比拟，不存在相似。

2. 相似现象：对于两个同类的物理现象，如果在相应的时刻与相应的地点上，与现象有关的物理量一一对应成比例，则称此两现象彼此相似。例如，对于两个稳态的对流换热现象，如果彼此相似，则必有换热面几何形状相似、温度场分布相似、速度场分布相似及热物性场相似等。凡是相似的物理现象，其物理量的场一定可以用一个统一的无量纲的场来表示。两个圆管内的层流充分发展的流动是两个

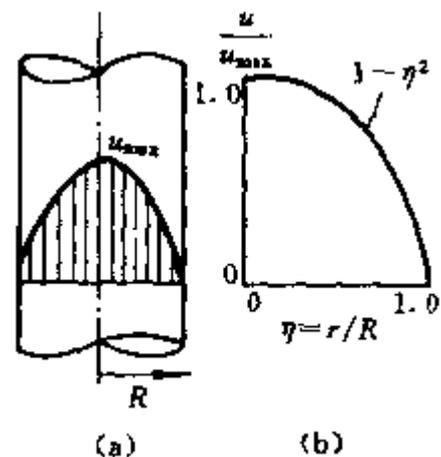


图 5-12 圆管内层流充分发展流动的速度分布

相似的流动现象。其截面上的速度分布可以用一个统一的无量纲场 $(\frac{u}{u_{max}} \sim \frac{r}{R})$ 来表示，如图 5-12 所示。

3. 相似现象的特性：凡是被此相似的现象，都有一个十分重要的特性，即描写该现象的同名特征数（即准则）对应相等。现在以流体与固体表面间的对流换热现象来说明。如图 5-13 所示，在固体壁面上按牛顿冷却定律所定义的 h 与流体中的温度场有如下关系：

$$h(t_w - t_f) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (5-4)$$

现在以 $(t_w - t_f)$ 作为温度的标尺，以换热面的某一特征性尺寸 l 作为长度标尺把上式无量纲化，有

$$\frac{hl}{\lambda} = \frac{\partial[(t_w - t)/(t_w - t_f)]}{\partial(y/l)} \Big|_{y=0}$$

按前述相似现象的定义，其无量纲的同名物理量的场是相同的，因而无量纲的梯度也相等。上式右端是无量纲温度场在壁面上的梯度，因而对两个相似的对流换热现象 1 与 2，应有：

$$\left(\frac{hl}{\lambda}\right)_1 = \left(\frac{hl}{\lambda}\right)_2 \quad (5-44)$$

$\frac{hl}{\lambda}_{y=0}$ 为努塞尔数，因而相似的对流换热现象的努塞尔数相等，即 $Nu_1 = Nu_2$ 。

4. 相似的条件

判断两个同类现象相似的条件是：（1）同名的已定特征数相等；（2）单值性条件相似。已定特征数是由所研究问题的已知量组成的特征数。例如，在研究对流换热现象时， Re 数及 Pr 数是已定特征数，而 Nu 数为待定特征数，因为其中的表面传热系数是需要求解的未知量。所谓单值性条件，是指使被研究的问题能被唯一地确定下来的条件，它包括：

（1）初始条件：指非稳态问题中初始时刻的物理量的分布。稳态问题不需要这一条件。

（2）边界条件：所研究系统边界上的温度（或热流密度）、速度分布等条件。

（3）几何条件：换热表面的几何形状、位置以及表面的粗糙度等。

（4）物理条件：物体的种类与物性。

值得指出，实质上，这里的单值性条件与分析解法中数学描写的定解条件是一致的，只是在相似原理中，为了强调各个与现象有关的量之间的相似性。特别增加了几何条件与物理条件两项。而在数学求解的定解条件中，给定所求解问题的几何条件与物理条件则被认为是不言而喻的。

5. 相似特征数间的相互关系

各物理现象中的各个物理量不是单个独立地起作用的，而是与其他物理量之间相互影响、相互制约的。描写该物理现象的微分方程组及定解条件就给出了这种相互影响与制约所应满足的基本关系。以一维非稳态导热问题为例进一步说明各无量纲数间的相互关系。

以过余温度为求解变量的常物性、无内热源、第三类边界条件的一维非稳态导热问

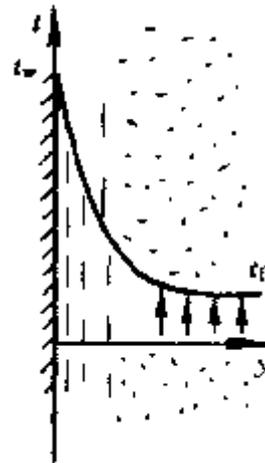


图 5-13 流体中的温度分布

题的数学描写为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (\text{a})$$

$$x = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (\text{b})$$

$$x = \delta, \quad -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = h\theta \quad (\text{c})$$

$$\tau = 0, \quad \theta = \theta_0 \quad (\text{d})$$

今以 $\theta_0 = t_0 - t_\infty$ 为温度的标尺, 以平板半厚 δ 作为长度标尺, 以 δ^2/a 作为时间的标尺, 将式 (a) ~ (d) 无量纲化, 得

$$\frac{\partial(\theta/\theta_0)}{\partial(a\tau/\delta^2)} = a \frac{\partial^2(\theta/\theta_0)}{\partial(x/\delta)^2} \quad (\text{e})$$

$$\frac{x}{\delta} = 0, \quad \frac{\partial(\theta/\theta_0)}{\partial(x/\delta)} = 0 \quad (\text{f})$$

$$\frac{x}{\delta} = 1, \quad -\lambda \frac{\partial(\theta/\theta_0)}{\partial(x/\delta)} = -\frac{h\delta}{\lambda} \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right) \quad (\text{g})$$

$$\frac{a\tau}{\delta^2} = 0, \quad \frac{\theta}{\theta_0} = 1 \quad (\text{h})$$

注意, 式 (g) 中无量纲数 $\frac{h\delta}{\lambda}$ 中的 λ 为固体的导热系数, 因而这一无量纲量是 Bi 数。把无量纲过余温度 $\frac{\theta}{\theta_0}$ 记为 θ , 而 $\frac{a\tau}{\delta^2}$ 为傅里叶数, 因而有

$$\frac{\partial \theta}{\partial (Fo)} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial (x/\delta)^2} \quad (\text{i})$$

$$\frac{x}{\delta} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial (x/\delta)} = 0 \quad (\text{j})$$

$$\frac{x}{\delta} = 1, \quad -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial (x/\delta)} = -Bi\theta \quad (\text{k})$$

$$Fo = 0, \quad \theta = 1 \quad (1)$$

由此可见, 无量纲过余温度 θ 的解必为 Fo 、 Bi 及 $\frac{x}{\delta}$ 的函数, 即

$$\theta = \left(Fo, Bi, \frac{x}{\delta} \right) \quad (5-45)$$

式 (5-45) 表明, 与一维无限大平板的非稳态导热有关的 4 个无量纲量以一定的函数形式联系在一起, 而且对两个一维无限大平板的非稳态导热问题而言, 只要单值性条件相似[表现为式 (j) ~ (1) 对两个系统均成立], Fo 、 Bi 及 $\frac{x}{\delta}$ 之值对应相等 (即已定准则相等), 则两个平板的 θ 值必相同, 即非稳态导热现象相似。

如前所述, 式 (5-45) 那样的表示物理现象的解的无量纲量之间的函数关系式称为特征数方程。为了通过实验获得无量纲量间的具体函数形式, 首先要查明与所研究现象有关的无量纲量是哪一些。

二. 导出相似特征数的常用方法

为获得与所研究现象有关的无量纲量可采用方程分析法及量纲分析法。方程分析法

以所研究现象的微分方程及单值性条件为基础，或者通过将它们无量纲化来获得无量纲量，如上述得出式（5-45）的过程，或者采用相似分析的途径来得出有关的无量纲量。

1. 相似分析法

相似分析法根据相似现象的基本定义—各个物理量的场对应成比例，对与过程有关的量引入两个现象之间的一系列比例系数（称相似倍数），然后应用描述该过程的一些数学关系式，来导出制约这些相似倍数间的关系，从而得出相应的相似准则数。仍以图5-13所示的两个对流换热现象1与2为例，对它们分别写出式（5-4），有：

$$\text{现象 1:} \quad \dot{h}' = -\frac{\lambda'}{\Delta t'} \frac{\partial t'}{\partial y'} \Big|_{y'=0} \quad (\text{m})$$

$$\text{现象 2:} \quad \dot{h}'' = -\frac{\lambda''}{\Delta t''} \frac{\partial t''}{\partial y''} \Big|_{y''=0} \quad (\text{n})$$

与现象有关的各物理量场应分别相似，即

$$\frac{\dot{h}'}{\dot{h}''} = c_h, \quad \frac{\lambda'}{\lambda''} = c_\lambda, \quad \frac{t'}{t''} = c_t, \quad \frac{y'}{y''} = c_l \quad (\text{o})$$

将式（o）代入式（m），整理后得

$$\frac{c_h c_l}{c_\lambda} \dot{h}'' = -\frac{\lambda''}{\Delta t''} \frac{\partial t''}{\partial y''} \Big|_{y''=0} \quad (\text{p})$$

比较式（p）和式（n），必然有以下关系：

$$\frac{c_h c_l}{c_\lambda} = 1 \quad (\text{q})$$

式（q）表达了换热现象相似时相似倍数间的制约关系，再将式（o）代入式（q），即得：

$$\frac{\dot{h} y'}{\lambda'} = \frac{\dot{h} y''}{\lambda''} \quad (\text{r})$$

因为习惯上用换热表面的特征长度表示几何量，且有 $\frac{y'}{y''} = \frac{l'}{l''} = c_l$ ，固上式可改写为：

$$\frac{\dot{h} l'}{\lambda'} = \frac{\dot{h} l''}{\lambda''}$$

即

$$\left(\frac{\dot{h} l}{\lambda}\right)_1 = \left(\frac{\dot{h} l}{\lambda}\right)_2$$

这就是式（5-44）所得到的结果。

采用相似分析，从动量微分方程式（5-15）可导出：

$$\frac{u' l'}{\nu'} = \frac{u'' l''}{\nu''}$$

即

$$Re' = Re''$$

这说明，若两流体的运动现象相似，其雷诺数 Re 必定相等。

同理，从能量微分方程式（5-16）可导出

$$\frac{u' l'}{a'} = \frac{u'' l''}{a''}$$

即

$$Pe' = Pe''$$

如两热量传递现象相似，其贝克来数 Pe 必定相等。克来数可分解为下列形式：

$$Pe = \frac{\nu ul}{a \nu} = PrRe$$

$Pr = \nu/a$ 即为普朗特数。

对于自然对流流动，动量微分方程式（5-15）右侧需增加体积力项。体积力与压力梯度合并成浮升力：

$$\text{浮升力} = (\rho_{\infty} - \rho)g = \rho\alpha\theta g$$

式中： α ——液体的体胀系数， K^{-1} ；

g ——重力加速度， m/s^2 ；

θ ——过余温度（ $= t - t_{\infty}$ ）， $^{\circ}C$ 。

改写后适用于自然对流的动量微分方程为：

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \rho\alpha\theta + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5-46)$$

对此式进行相似分析，可得出一个新的无量纲量：

$$Gr = \frac{g\alpha\Delta t l^3}{\nu^2}$$

式中： Gr 称为格拉晓夫数， $\Delta t = t_w - t_{\infty}$ 。

以上导得的 Re 、 Pr 、 Nu 、 Gr 几个无量纲量是研究稳态无相变对流换热问题所常用的特征数。这些特征数反映了物理量间的内在联系，都具有一定的物理意义。

2. 量纲分析法

量纲分析是获得无量纲量的又一种方法。它的长处是方法简单，并对还列不出微分方程而只知道影响现象的有关物理量的问题，也可以求得结果。它的缺点是在有关物理量漏列或错列时不能得出正确的结果。就讨论的对流换热之类的问题而论，绝大多数情况都可列出微分方程式，漏列或错列有关物理量的情况并不存在。由于这种缘故，许多基础传热学教材都采用量纲分析法来导出无量纲量。

量纲间的内在联系，体现在量纲分析的基本依据 π 定理上。其内容是：一个表示 n 个物理量间关系的量纲一致的方程式，一定可以转换成包含 $n - r$ 个独立的无量纲物理量群间的关系式。 r 指 n 个物理量中所涉及到的基本量纲的数目。我们的着眼点在于学会应用这条定理。应用的核心在于确认 n 和 r 的数目，用一定技巧把各个无量纲物理量群（即无量纲量）的内涵确定下来。

下面以单相介质管内对流换热问题为例，应用量纲分析法来导出其有关的无量纲量。据式（5-43）有：

$$h = f(u, d, \lambda, \eta, \rho, c_p)$$

应用量纲分析法获得特征数的步骤如下：

（1）找出组成与本问题有关的各物理量量纲中的基本量的量纲

本例有7个物理量，它们的量纲均由4个基本量的量纲——时间的量纲 T 、长度的量纲 L 、质量的量纲 M 及温度的量纲 θ 组成，即 $n = 7$ ， $r = 4$ ，故可以组成三个无量纲量。同时，选定4个物理量作为基本物理量，该基本物理量的量纲必须包括了上述4个基本量的量纲。本例中取 u 、 d 、 λ 及 η 为基本物理量。

（2）将基本量逐一与其余各量组成无量纲量

无量纲量总采用幂指数形式表示，其中指数值待定。用字母 π 表示无量纲量，对本例则有：

$$\pi_1 = hu^{a_1} d^{b_1} \lambda^{c_1} \eta^{d_1} \quad (s)$$

$$\pi_2 = \rho u^{a_2} d^{b_2} \lambda^{c_2} \eta^{d_2} \quad (t)$$

$$\pi_3 = c_p u^{a_3} d^{b_3} \lambda^{c_3} \eta^{d_3} \quad (u)$$

(3) 应用量纲和谐原理来决定上述待定指数 $a_1 \sim a_3$ 等。

以 π_1 为例可列出各物理量的量纲如下：

$\dim h = M\Theta^{-1}T^{-3}$; $\dim d = L$; $\dim \lambda = ML\Theta^{-1}T^{-3}$; $\dim \eta = ML^{-1}T^{-1}$; $\dim u = LT^{-1}$
将上述结果代入式 (s)，并将量纲相同的项归并到一起，得：

$$\pi_1 = L^{a_1+b_1+c_1-d_1} M^{c_1+d_1+1} \Theta^{-1-c_1} T^{-a_1-3c_1-d_1-3}$$

上式等号左边为无量纲量，因而等号右边各量纲的指数必为零（量纲和谐原理），故得：

$$\left. \begin{aligned} a_1 + b_1 + c_1 - d_1 &= 0 \\ c_1 + d_1 + 1 &= 0 \\ -1 - c_1 &= 0 \\ -a_1 - 3c_1 - d_1 - 3 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

由此得：

$$\left\{ \begin{aligned} b_1 &= 1 \\ d_1 &= 0 \\ c_1 &= -1 \\ a_1 &= 0 \end{aligned} \right.$$

故有

$$\pi_1 = hu^0 d^1 \lambda^{-1} \eta^0 = \frac{hd}{\lambda} = Nu$$

类似地可得：

$$\pi_2 = \frac{\rho u d}{\eta} = Re$$

$$\pi_3 = \frac{\eta c_p}{\lambda} = Pr$$

π_1 及 π_2 分别是以管子内径为特征长度的努塞尔数及雷诺数。至此，式 (5-43) 可转化为

$$Nu = f(Re, Pr()) \quad (5-47)$$

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第六章-单向流对流换热 1-管内受迫对流换热		授 课 时间长度	_90_ 分钟
授课进度	第_9_周, 总第_16-17_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	能定性分析单相对流换热问题; 能针对工程中常见的管道内单相对流换热问题进行计算, 并提出优化与改进方向。			
教学重点	管内强迫对流换热的特点; 影响对流换热的几个因素; 管内强迫对流换热的计算			
教学难点	管内强迫对流换热的计算			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容, 课上, 教师就重点问题予以讲解, 并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习物理相似、相似原理。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

<p>第二步 (75 分钟)</p>	<p>讲授新的课程内容：管内强迫对流换热的特点、影响对流换热的几个因素、管内强迫对流换热的计算。</p>	<p>采用板书与课件结合的方式，通过举生产、生活常见的对流换热例子讲解管内强迫对流换热的流动与传热现象，重点强迫对流换热的计算。</p>	<p>认真聆听老师讲授内容，理解管内强迫对流换热的影响因素、计算方法。</p>	<p>利用课件和图片等让学生掌握对流换热的基本概念、影响因素以及微分方程组。</p>
<p>第三步 (10 分钟)</p>	<p>快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容</p>	<p>随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。</p>	<p>全面总结复习，为下次课准备。</p>	<p>快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容</p>

讲义

管内受迫对流换热

一、一般分析

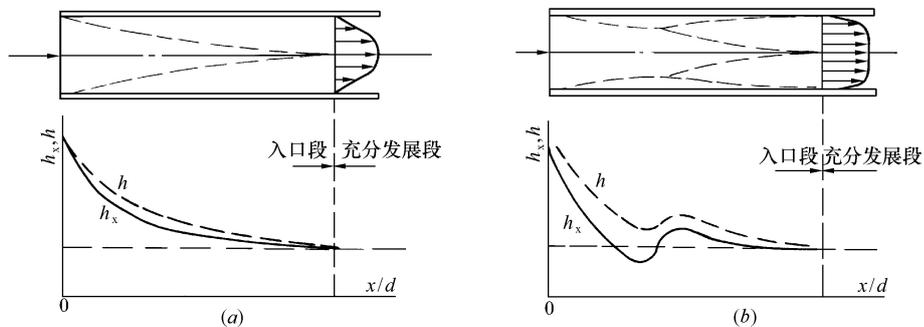


图 6 - 1 管内局部表面传热系数及平均 h 的变化

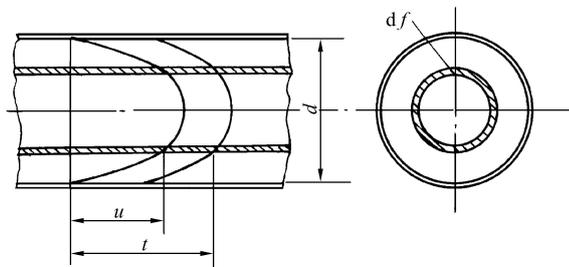


图 6-2 管断面平均流速及平均温度的计算

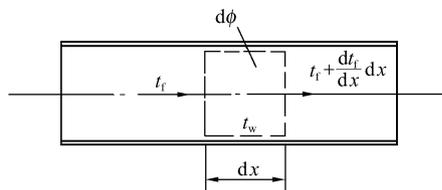


图 6-3 管内换热热平衡

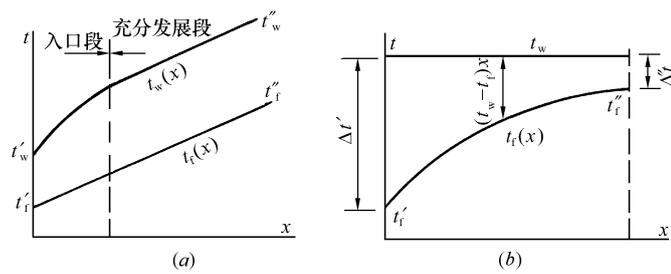


图 6-4 管内换热时流体温度变化

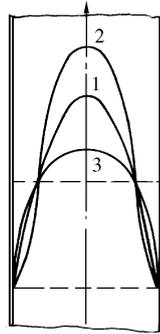


图 6-5 黏度变化对速度场的影响

流体的流动被限制在一特定的空间内，给管内流动及换热带来一些特殊的影响：进口段与充分发展段；平均速度与平均温度；温度场不均匀性引起的物性场不均匀性；管子的几何特征等。

1. 进口段与充分发展段

$Re < 2300$	层流
$2300 < Re < 10^4$	过渡状态
$Re > 10^4$	旺盛紊流

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 ; \quad v = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{t_w - t}{t_w - t_f} \right) = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{t_w - t}{t_w - t_f} \right)_{r=R} = \frac{-(\frac{\partial t}{\partial r})_{r=R}}{t_w - t_f} = const \quad (1b)$$

$$\frac{-(\frac{\partial t}{\partial r})_{r=R}}{t_w - t_f} = \frac{h}{\lambda} = const \quad (2)$$

常壁温：

$$\left(\frac{l}{d} \right)_l \approx 0.05 Re \cdot Pr \quad (3a)$$

常热流：

$$\left(\frac{l}{d} \right)_l \approx 0.07 Re \cdot Pr \quad (3b)$$

2. 管内流体平均速度及平均温度

(1) 管内流体平均速度

$$u_m = \int_0^f u df / f = \frac{2}{\pi R^2} \int_0^R \pi r u dr = \frac{V}{f} \quad (6-1)$$

(2) 管内流体平均温度

$$t_f = \frac{\int_f \rho c_p t u df}{\int_f \rho c_p u df} = \frac{2}{R^2 u_m} \int_0^R t u r dr \quad (6-2)$$

$$d\Phi = \dot{h}_x (t_w - t_f)_x 2\pi R dx = \rho c_p u_m \pi R^2 dt_f \quad (4)$$

$$d\Phi = q 2\pi R dx \quad (5)$$

$$\frac{dt_f}{dx} = \frac{2q}{\rho c_p u_m R} \quad (6)$$

$$\frac{dt_f}{dx} = \frac{2\dot{h}_x (t_w - t_f)_x}{\rho c_p u_m R} \quad (7)$$

常热流边界条件 ($q = \text{const}$):

$$t_f = (t_f' + t_f'') / 2 \quad (6-3a)$$

$$\frac{dt_w}{dx} = \frac{dt_f}{dx} \quad (8)$$

$$\Delta t = (\Delta t' + \Delta t'') / 2 \quad (6-3b)$$

式中, 进口端流体与管壁温差 $\Delta t' = t_w' - t_f'$; 出口端 $\Delta t'' = t_w'' - t_f''$;

常壁温边界条件 ($t_w = \text{const}$):

$$-\frac{d(t_w - t_f)_x}{(t_w - t_f)_x} = \frac{2\dot{h}_x dx}{\rho c_p u_m R} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta t'}{\Delta t''} = \exp\left(-\frac{2\dot{h}_x}{\rho c_p u_m R} x\right) \quad (10)$$

$$\Delta t_m = \frac{(t_w - t_f') - (t_w - t_f'')}{\ln \frac{(t_w - t_f')}{(t_w - t_f'')}} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \quad (6-3c)$$

Δt_m 称对数平均温差.

$$t_f = t_w \pm \Delta t_m \quad (6-3d)$$

3. 物性场不均匀

4. 管子的几何特征

二、管内受迫对流换热

1. 紊流换热

$$Nu = C Re^n Pr^m$$

迪图斯-贝尔特 (Dittus-Boelter) 公式:

$$\text{加热流体} \quad Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (t_w > t_f) \quad (6-4a)$$

$$\text{冷却流体} \quad Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.3} \quad (t_w < t_f) \quad (6-4b)$$

西得和塔特 (Sieder-Tate) 推荐的关联式

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{1/3} (\mu_f / \mu_w)^{0.14} \quad (6-5)$$

关于物性变化的修正

格尼林斯基建议的关联式和实验数据

对于气体, $0.6 < Pr_f < 1.5$; $0.5 < \frac{T_f}{T_w} < 1.5$; $2300 < Re_f < 10^4$

$$Nu_f = 0.0214 (Re_f^{0.8} - 100) Pr_f^{0.4} \left[1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{2/3} \right] \left(\frac{T_f}{T_w}\right)^{0.45} \quad (6-6a)$$

对于液体, $1.5 < Pr_f < 500$; $0.05 < \frac{Pr_f}{Pr_w} < 20$; $2300 < Re_f < 10^4$

$$Nu_f = 0.012 (Re_f^{0.87} - 280) Pr_f^{0.4} \left[1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{2/3} \right] \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.11} \quad (6-6b)$$

对于非圆形管

$$d_e = \frac{4f}{U} \quad (6-7)$$

对于螺旋形管

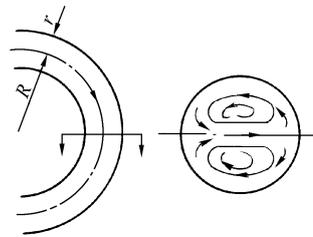


图 6-6 弯曲管二次环流

$$\text{气体} \quad \varepsilon_R = 1 + 1.77 \frac{d}{R} \quad (6-8a)$$

$$\text{液体} \quad \varepsilon_R = 1 + 10.3 \left(\frac{d}{R}\right)^3 \quad (6-8b)$$

$$h = f(u^{0.8}, \lambda^{0.6}, c_p^{0.4}, \rho^{0.8}, \mu^{-0.4}, d^{-0.2})$$

[例 6-2]

$$t_f'' \text{ (设定)} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{物性} \rightarrow Re \rightarrow Nu \rightarrow h_1 \text{ (准则方程计算)} \\ c_p \rightarrow \Phi \rightarrow h_2 = \frac{\Phi}{A(t_w - t_f)} \text{ (换热量计算)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{要求 } h_1 \approx h_2 \\ \text{否则重新设定 } t_f'' \end{array}$$

设定 t_f'' , 是为了启动计算。

[例 6-3]

涉及流量的准则 Nu 数与 Re 数展开为下式:

$$Nu_f = \frac{hd}{\lambda_f} = \frac{Mc_p(t_f'' - t_f')}{\pi dl \Delta t_m} \times \frac{d}{\lambda_f}$$

$$Re_f = \frac{u_m d}{v_f} = \frac{M}{\pi/4 \times d^2 \times \rho} \times \frac{d}{v_f}$$

$$M = \left[0.023 \times \left(\frac{1}{\frac{\pi}{4} d \rho v_f} \right)^{0.8} \times Pr_f^{0.4} \times \frac{\pi l \Delta t_m \lambda_f}{c_p (t_f'' - t_f')} \right]^5 \quad \text{kg/s}$$

2. 层流换热

西得和塔特关联式

$$Nu_f = 1.86 Re_f^{1/3} Pr_f^{1/3} \left(\frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (6-9a)$$

$$Nu_f = 1.86 (Pe_f \frac{d}{l})^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (6-9b)$$

$$\left[\left(Re \cdot Pr \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \right] \leq 2$$

$$Nu_f = 4.36 \quad (q = \text{const}) \quad (6-10a)$$

$$Nu_f = 3.66 \quad (t_w = \text{const}) \quad (6-10b)$$

3. 过渡流换热

4. 粗糙管壁的换热

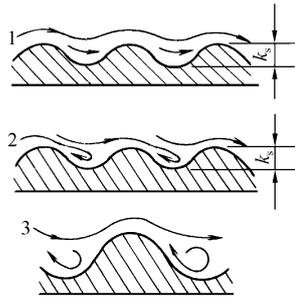


图 6-7 流体在粗糙壁上的流动

$$\Delta p = f \frac{l}{d} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (11)$$

$$\tau_w l \pi d = \Delta p \frac{\pi}{4} d^2$$

$$\tau_w = \frac{\Delta p d}{4 l} \quad (12)$$

$$\tau_w = \frac{f}{8} \rho u_m^2 \quad (13)$$

$$\frac{h}{\rho c_p u_m} = \frac{\tau_w}{\rho u_m^2} \quad (14)$$

$$St = \frac{f}{8} \quad (15)$$

$$St \times Pr^{2/3} = \frac{f}{8} \quad (6-11)$$

$$f = [2 \times \lg \left(\frac{R}{k_s} \right) + 1.74]^{-2} \quad (6-12)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

作业内容
见教材
效果分析与改进措施

项目 管道单相对流换热分析

一、主要教学方法

项目教学理念、小组合作学习、探究学习方法。

二、学习目标的支持课程目标的支持

1. 项目目标

项目目标 1：能分析生活和一般工程中管道单相对流换热的强烈程度。

项目目标 2：能针对工程中常见管道单相对流换热问题进行分析 and 计算并提出较为合理的解决或改进方案

2. 任务目标对课程目标的支持

课程目标	课程目标内容	学习目标	
		1	2
目标1	能够运用从传热的角度解释生活、生产中常见的传热问题。	0.5	0.5
目标2	能够运用热量传递的基本概念、基本理论和基本计算方法发现工程中的常见传热问题，并能够运用传热学的知识提出初步解决方案	0.2	0.8
目标3	能够针对工程中存在的常见传热问题进行理论分析与计算，并得到较为合理的解决与改进方案。	0.2	0.8

三、项目教学设计方案的设计思想和设计理念

本项目《管道单相对流换热分析》设计思路以“项目+任务为主线、教师为主导、学生为主体”的理念为指导，以工程（尤其是电厂和供热）中管道传热问题为载体，选取换热设备管道、介质输送管道的传热分析为学习任务。通过具体的任务，引导学生自主掌握传热方式的基本计算、传热过程的基本计算、增强或削弱对流换热的

措施；能对工程中管道对流换热问题进行传热分析与计算；能分析与解决工程中常见对流换热问题的增强和削弱问题；训练学生信息收集和筛选的能力，掌握制订工作计划、独立决策和实施的能力；培养学生与人合作交流和协作以及发现问题、分析问题、解决问题的能力。

学生以小组为单位，采取协作学习方式，结合专业，分别选择不同类别的管道单项对流换热问题，并经过明确任务、分析与讨论任务、分解任务、处理任务、讨论与总结等环节，完成管道单项对流换热问题。通过对模拟工程对流换热问题的实际分析与解决过程，观察和思考取得学习成果，并在与之相似的真实工程案例中促进知识的广泛迁移，体验学习的成就感。

四、项目书

1. 项目名称：管道单相对流换热分析

2. 项目实施条件：《传热学》SPOC

3. 项目实施对象分析

本项目实施对象是能源与动力工程专和建筑环境与能源应用专业三年级学生，他们具备一定的高等数学、流体力学、工程热力学的知识，且自主学习能力较强，有一定的探索、创新精神。所有学生均经过了“认识实习”，对专业有一定的感性认识，对流体在管道中流动有一定的了解。这都为“管道单相对流换热分析”实施项目教学法提供了必要保证，也进一步激发学习积极性，培养创新能力、分析问题和解决问题的能力。

4. 项目实施目标：

①学生 4-5 人为一学习小组，在协作过程中着重培养团队合作能力及个人独立解决问题的能力。

②通过教师的指导，各学习小组讨论交流，合作探究，培养学生的学习能力、分析和解决问题的能力、培养学生从网络资源中搜集和处理信息的能力、获取新知识的能力。

③通过对项目的分析，并对任务进行分解，每个学生亲自参与项目实施的全过程，在实践中掌握相关知识，形成操作技能，将抽象的理论一步步深化内化，达到“温故而知新”的教学效果。

④本项目从学生的学习兴趣和实际生活出发，项目设计的难度与学生的知识基础和职业技能的发展水平相适应，体现了因材施教、分层教学的思想，让好的学生接受挑战，中等学生有所突破，靠后的学生学到更多的知识。

⑤通过学习小组自评互评，培养学生客观公正的评价他人和自己，取长补短；教师

给予确切的评价和鼓励，让学生感受成功的喜悦，进一步激发学生的学习兴趣。

5. 项目实施的任务设置及学时分配

序号	任务名称	学习内容	能力目标	教学时数
1	管内强制对流换热的流动和换热	1. 管内强迫对流换热的特点。 2. 影响对流换热的几个因素。 3. 管内强迫对流换热的计算。	1. 能定性分析单相对流换热问题。 2. 能针对工程中常见的管道内单相对流换热问题进行计算，并提出优化与改进方向。	2
2	管外强制对流换热的流动和换热	1. 单管外流体强制对流换热。 2. 管束外流体对流强制对流换热。	1. 能定性分析单管和管束外流体对流换热问题。 2. 能针对工程中常见的流体外掠单管或管束问题进行计算，并提出优化与改进方向。	1
合计			3	

五、项目完成评价书

主题：管道单相对流换热分析									
学生姓名			评价时间						
阶段	评分项目	分值	评价标准	自评	互评				教师评价
					1	2	3	4	
线上	视频学习	10	观看完成 (10分)						
	资料阅读	10	阅读时长 (10分)						
课 前 线 下	贡献度	20	自学情况 (5分)						
			为同学解惑情况 (5分)						
			回答题目情况 (5分)						
			提出建设性问题情况 (5分)						
	参与度	15	课前讨论情况 (5分)						

			课中讨论情况 (5分)						
			整理资料情况 (5分)						
	协同度	10		听取他人意见情况 (5分)					
				表述自己观点情况 (5分)					
	掌握情况	15		互相讲述课程内容——费曼 (5分)					
				分析工程问题情况 (5分)					
				建设性想法 (5分)					
	课后	作业	5	完成作业 (5分)					
			5	作业表现 (5分)					
线上讨论		5	参与线上讨论 (5分)						
思维导图		5	完成思维导图 (5分)						
分项合计									
权重得分		教师×40%+自评×30%+互评×30%							
课程换算分 (5%)									
注：“教师评价”为教师根据学生课堂表现给分；“互评”中1、2、3和4分别代表本组成员（无4号空白）；“互评”的总分取组员评分的平均值。									

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第六章-单向流对流换热 2-外掠圆管对流换热		授 课 时间长度	_ 90 _ 分钟
授课进度	第_9_周, 总第_18_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	能用边界层理论分析流体外掠平板的一般流动与传热问题。			
教学重点	流动边界层; 热边界层; 边界层换热微分方程组			
教学难点	热边界层; 边界层换热微分方程组			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容, 课上, 教师就重点问题予以讲解, 并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟; 授新课内容_80_分钟; 讨论与提问_0_分钟; 总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习对流换热的基本概念、分类、影响因素、对流换热微分方程式和对流换热微分方程组。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

<p>第二步 (75 分钟)</p>	<p>讲授新的课程内容：流动边界层；热边界层；边界层换热微分方程组。</p>	<p>采用板书与课件结合的方式，以平板为例，讲解流动边界层，采用量纲分析法简化三大方程，重点讲解层流边界层方程组解的结论。</p>	<p>认真聆听老师讲授内容，理解并记忆流动边界层、热边界层和对流换热方程组的解分析。</p>	<p>利用课件、图片、板书分析等让学生理解流动边界层、热边界层、量纲分析法以及外掠平板层流换热边界层微分方程式分析解。</p>
<p>第三步 (10 分钟)</p>	<p>快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容</p>	<p>随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。</p>	<p>全面总结复习，为下次课准备。</p>	<p>快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容</p>

讲义

外掠圆管对流换热

外掠圆管对流换热

一、外掠单管

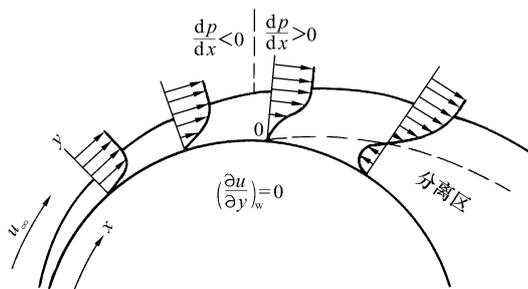


图 6-8 外掠圆管流动边界层

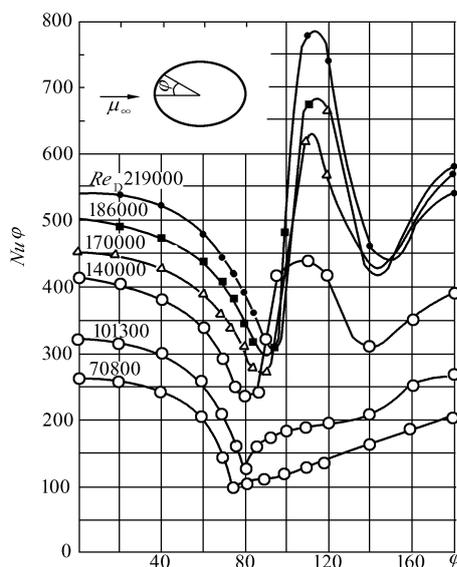


图 6-9 外掠圆管局部表面传热系数的变化图

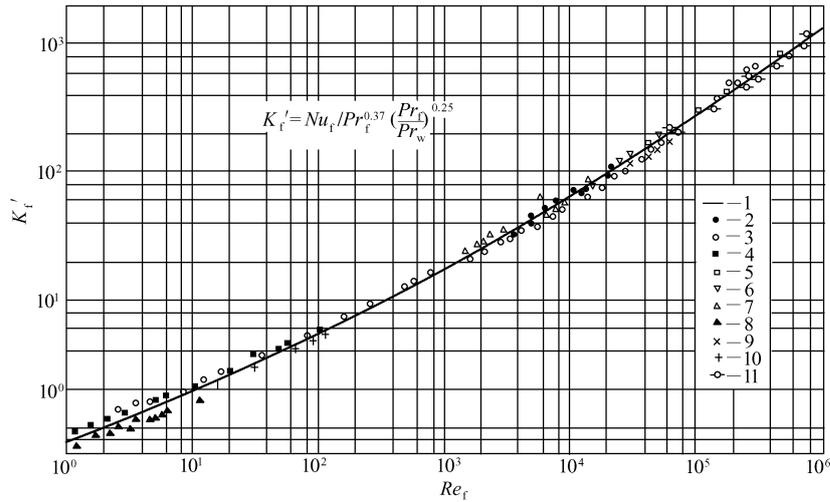


图 6-10 外掠单圆管平均 Nu ($K_r' = Nu_f / (Pr_f^{0.37} (\frac{Pr_f}{Pr_w})^{0.25})$)

$$\frac{Nu_f}{Pr_f^{0.37} (\frac{Pr_f}{Pr_w})^{0.25}} = C Re_f^n \quad (6-13)$$

式(6-13)的 C 及 n 值 表 6-1

Re	C	n
1~40	0.75	0.4
40~1 × 10 ³	0.51	0.5
1 × 10 ³ ~2 × 10 ⁵	0.26	0.6
2 × 10 ⁵ ~1 × 10 ⁶	0.076	0.7

二、外掠管束

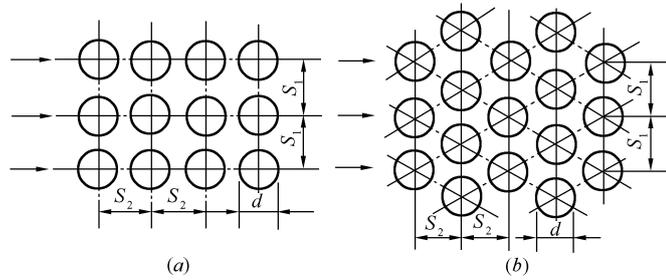


图 6-11 顺排与叉排管束

$$Nu = f \left[Re, Pr, \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25}, \frac{S_1}{d}, \frac{S_2}{d}, \epsilon_z \right]$$

$$Nu = C Re^n Pr^m \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^p \epsilon_z \quad (6-14)$$

管束平均表面传热系数准则关联式 表 6-2

排列方式	适用范围 $0.7 < Pr_f < 50$ 0	准则关联式 Nu_f		对空气或烟气的 简化式 $Pr=0.7$ Nu_f
顺排	$Re_f = 10^3 \sim 2 \times 10^5,$	$0.027 Re_f^{0.63} Pr_f^{0.36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25}$		$0.024 Re_f^{0.63}$
	$Re_f = 2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6,$	$0.021 Re_f^{0.84} Pr_f^{0.36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25}$		$0.018 Re_f^{0.84}$
叉排	$Re_f = 10^3 \sim 2 \times 10^5$	$\frac{S_1}{S_2} \leq 2$	$0.35 Re_f^{0.6} Pr_f^{0.36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25} \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.2}$	$0.31 Re_f^{0.6} \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0.2}$
		$\frac{S_1}{S_2} > 2$	$0.40 Re_f^{0.6} Pr_f^{0.36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25}$	$0.24 Re_f^{0.63}$
	$Re_f = 2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$	$0.022 Re_f^{0.84} Pr_f^{0.36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25}$		$0.019 Re_f^{0.84}$

排数修正系数表

表 6-3

排数	1	2	3	4	5	6	8	12	16	20
顺排	0.69	0.80	0.86	0.90	0.93	0.95	0.96	0.98	0.99	1.0
叉排	0.62	0.76	0.84	0.88	0.92	0.95	0.96	0.98	0.99	1.0

对于供热通风工程，空气加热器和冷却器等都大量采用带肋片的管束(参见图 5-1)，品种规格多，流动及换热与管束结构参数密切有关，情况较复杂，一般根据实际结构进行实验研究，将数据制作成线图，供工程设计查用。读者可参阅本书第十章的叙述及文献 [13]pp. 225-230。

【例 6-6】

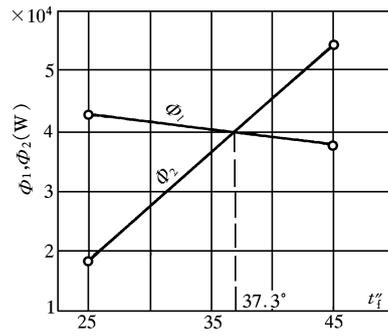


图 6-12 例 6-6 附图

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传 热 学 课 程 授 课 教 案

课程号：B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第六章-单向流对流换热 3-自然对流换热		授 课 时间长度	_ 90 _ 分钟
授课进度	第 10 周，总第 19-20 次	授课对象	能源动力 181/182，建筑环境 181	
教学目标	了解湍流动量传递和热量传递类比；掌握雷诺类比律；了解外掠平板紊流换热。			
教学重点	动量传递和热量传递类比的基本原理及其在紊流对流换热中的应用。			
教学难点	动量传递和热量传递类比的基本原理。			
教学方法分析	采用线上、线下混合式教学。学生通过学习通线上学习本次课内容，课上，教师就重点问题予以讲解，并针对重点知识点进行课堂练习、讨论。			
	教学方式：讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体			
	教学手段：板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导_5_分钟；授新课内容_80_分钟；讨论与提问_0_分钟；总结与布置作业_5_分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5分钟)	复习流动边界层；热边界层；边界层换热微分方程组。。	通过 PPT 复习上次内容，通过板书点上上次课重点内容。	通过教师的复习，巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容，引入本次课内容。

第二步 (75 分钟)	讲授新的课程内容：湍流动量传递和热量传递类比、雷诺类比律、外掠平板紊流换热。	采用板书与课件结合的方式，讲解紊流发展，增强学生对传热学的兴趣，复习牛顿粘性定律和傅里叶定律，讲解雷诺类比率，讲解外掠平板紊流换热	认真聆听老师讲授内容，理解对流换热的类比率。	通过紊流的发展引起学生学习传热学的兴趣，强化学生对类比率的理解。
第三步 (10 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

自然对流换热

一、无限空间自然对流换热

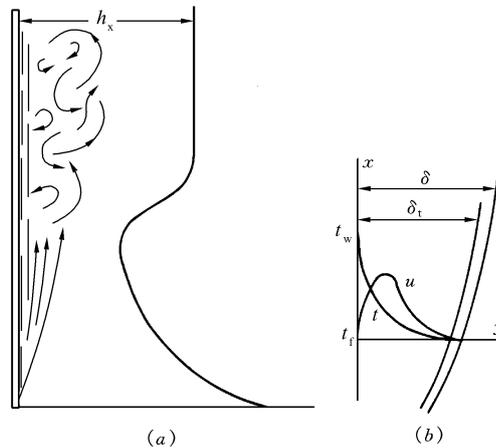


图 6-13 自然对流换热边界层及局部表面传热系数的变化

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dx} = -\rho_f g \quad (2)$$

$$-\rho_f g - \frac{dp}{dx} = (\rho_f - \rho) g \quad (3)$$

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\rho_f - \rho}{t_f - t} \right) \quad (4)$$

$$-\alpha \rho (t_f - t) = \rho_f - \rho \quad (5)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\rho g \alpha (t - t_f) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5-44)$$

引用无因次温度 $\theta = \frac{t - t_f}{t_w - t_f}$

(6-15)

自然对流换热准则关联式

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{g \alpha \Delta t l}{u_0^2} \theta + \frac{1}{Re_0} \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}$$

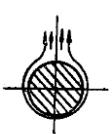
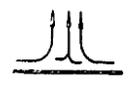
$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n = C Ra^n \quad (6-16)$$

在常热流边界条件下采用 Gr^* (称修正 Gr) 代替 Gr

$$Gr^* = Nu \cdot Gr = \frac{g \alpha q l^4}{\lambda \nu^2} \quad (6)$$

$$Nu_x = C(Gr_x^* \cdot Pr)^n \quad (6-17)$$

式(6-16)或式(6-17)中的 C 、 n 值 表 6-5

壁面形状、位置及边界条件	流动情况示意图	n 、 C 、 n			定型尺寸	适用范围
		流态	C	n		
$t_w = \text{const}$ 竖平壁 竖直圆筒, 平均 Nu , 式(6-16)		层流	0.59	1/4	高度 h	$Gr \cdot Pr$ $10^4 \sim 10^9$
		紊流	0.1	1/3		$10^9 \sim 10^{13}$
$q = \text{const}$ 竖平壁或 竖直圆筒, 局部 Nu_x , 式(6-17)		层流	0.6	1/5	局部点的高度 x	$Gr_x^* \cdot Pr$ $10^5 \sim 10^{11}$
紊流	0.17	1/4	$2 \times 10^{13} \sim 10^{16}$			
$t_w = \text{const}$ 水平圆筒 平均 Nu , 式(6-16)		层流	1.02	0.148	外径 d	$Gr \cdot Pr$ $10^{-2} \sim 10^2$
			0.85	0.188		$10^2 \sim 10^4$
0.48	0.250	$10^4 \sim 10^7$				
		紊流	0.125	1/3	$10^7 \sim 10^{12}$	
$t_w = \text{const}$ 热面朝上 或冷面朝下的水平壁, 平均 Nu , 式(6-16)		层流	0.54	1/4	矩形取两个边长的平均值; 非规则形取面积与周长之比; 圆盘取 $0.9d$	$Gr \cdot Pr$ $2 \times 10^4 \sim 8 \times 10^6$
		紊流	0.15	1/3		$8 \times 10^6 \sim 10^{11}$
$t_w = \text{const}$ 热面朝下 或冷面朝上的水平壁, 平均 Nu , 式(6-16)		层流	0.58	1/5	同上	$Gr \cdot Pr$ $10^5 \sim 10^{11}$

竖直圆筒(管)换热

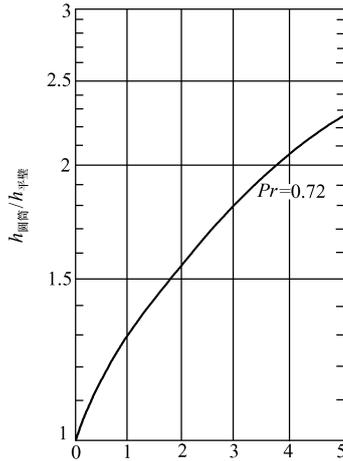


图 6-14 竖直圆筒自然对流换热平均表面传热系数校正系数

$$\frac{d}{H} \geq \frac{35}{Gr_h^{1/4}} \quad (6-18)$$

丘吉尔(Churchill)和朱(Chu)推荐竖壁^①和水平圆筒^②自然对流换热准则关联式

竖壁:
$$Nu_H = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_H^{1/6}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (6-19)$$

适用范围: Ra_d 由 $10^{-6} \rightarrow \infty$

水平圆筒:

$$Nu_d = \left\{ 0.60 + \frac{0.387Ra_d^{1/6}}{[1+(0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (6-20)$$

适用范围: Ra_d 由 $10^{-6} \rightarrow \infty$

二、有限空间中的自然对流换热

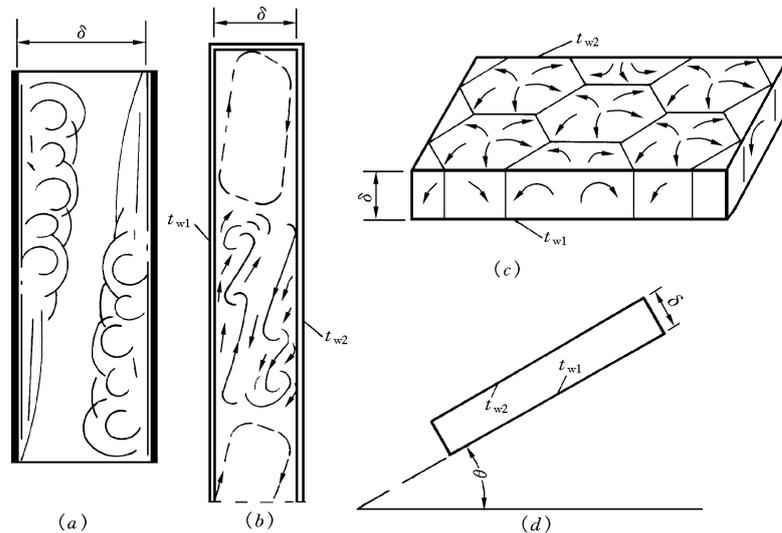


图 6-15 有限空间自然对流换热

对于竖直壁封闭夹层的自然对流换热问题可分为三种情况:

- (1) 夹层厚度 δ 与高度 H 之比 $\frac{\delta}{H}$ 较大(大于 0.3)

① Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, p.1049, 1975.

② Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, p.1323, 1975.

(2) 在夹层内冷热两股流动边界层能相互结合

(3) 竖直壁夹层 $Gr_{\delta} = \frac{g\alpha\Delta t\delta^3}{\nu^2} \leq 2000$ 时

对于水平封闭夹层可分为两种情况:

(1) 热面在上

(2) 热面在下

至于倾斜夹层, 它与水平夹层相类似, 当 $Gr_{\delta} \cdot Pr$ 超过 $1700 / \cos \theta$ 时, 将发生蜂窝状流动。

封闭夹层空间换热准则关联式形式

$$Nu_{\delta} = C(Gr_{\delta} \cdot Pr)^m \left(\frac{\delta}{H}\right)^n \quad (6-22)$$

把封闭夹层的换热强弱用当量导热系数 λ_e 表达

$$q = \frac{\lambda_e}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) \quad (9)$$

$$q = \frac{\lambda_e}{\lambda} \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) \quad (10)$$

$$Nu_{\delta} = \frac{\lambda_e}{\lambda} \quad (11)$$

有限空间自然对流换热准则关联式

表 6-7

夹层位置	Nu_{δ} 准则关联式	适用范围
竖直夹层 (气体)	=1 (导热)	$Gr_{\delta} \leq 2000$
	=0.18 $Gr_{\delta}^{1/4} \left(\frac{\delta}{H}\right)^{1/9}$ (层流)	$2000 < Gr_{\delta} < 2 \times 10^5$;
	=0.065 $Gr_{\delta}^{1/3} \left(\frac{\delta}{H}\right)^{1/9}$ (紊流)	$2 \times 10^5 < Gr_{\delta} < 2 \times 10^7$
水平夹层(热面在下)(气体)	=0.059 $(Gr_{\delta} \cdot Pr)^{0.4}$	$1700 < (Gr_{\delta} \cdot Pr) < 7000$
	=0.212 $(Gr_{\delta} \cdot Pr)^{1/4}$	$7000 < (Gr_{\delta} \cdot Pr) < 3.2 \times 10^5$
	=0.061 $(Gr_{\delta} \cdot Pr)^{1/3}$	$(Gr_{\delta} \cdot Pr) > 3.2 \times 10^5$
倾斜夹层(热面在下与水平夹角为 θ)(气体)	=1	$1708 < (Gr_{\delta} \cdot Pr \cdot \cos \theta) < 5900$
	+ 1.446 $\left(1 - \frac{1708}{Gr_{\delta} \cdot Pr \cdot \cos \theta}\right)$	$5900 < (Gr_{\delta} \cdot Pr \cdot \cos \theta) < 9.23 \times 10^4$
	=0.229 $(Gr_{\delta} \cdot Pr \cdot \cos \theta)^{0.252}$	$9.23 \times 10^4 < (Gr_{\delta} \cdot Pr \cdot \cos \theta) < \times 10^6$

【例 6-9】

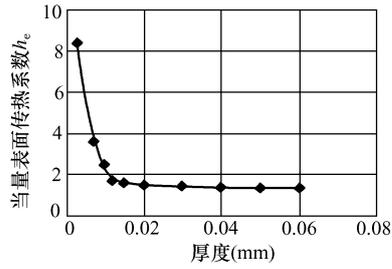


图 6-16 [例 6-9] 封闭空气夹层 h_e 随厚度 δ 的变化
 三、自然对流与受迫对流并存的混合对流换热

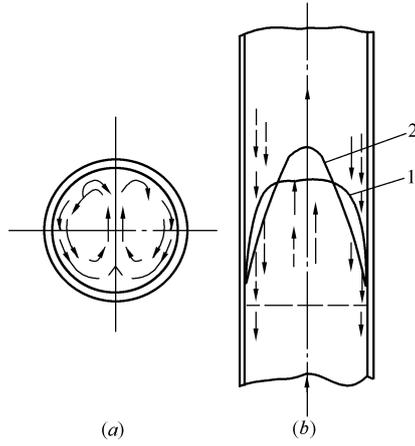


图 6-17 自然对流对速度场的干扰
 单相流体受迫流动换热、自然对流换热的综合比较表 (P. 179 页)

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传 热 学 课 程 授 课 教 案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第七章-凝结与沸腾换热 1-凝结换热		授 课 时间长度	_ 90 _ 分钟
授课进度	第 <u>11</u> 周, 总第 <u>21-22</u> 次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	知识目标	了解珠状凝结和膜状凝结的特点; 掌握竖平壁、竖管、横管液膜流动特征与换热特征; 了解竖平壁、竖管、横管膜状凝结换热的计算方法; 握膜状凝结强化换热的措施		
	能力目标	能判断凝结换热的类型, 并进行分析与计算; 能分析总结汽轮机对应设备的传热特点; 能分析汽轮机主要辅助设备的传热过程, 并提出强化传热的方案		
	德育目标	教育学生节省能源, 努力学习, 提高能源利用率		
教学重点	膜状凝结换热; 影响凝结换热的因素; 增强凝结换热的措施			
教学难点	膜状凝结换热			
教学方法分析	通过汽轮机辅助设备的介绍, 引导学生思考凝结换热的重要性, 引起学生对凝结换热的兴趣, 然后按照物理想象到数学描述, 再到结果分析, 最后到应用的套路讲解本次课内容。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体、板书			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导 <u>5</u> 分钟; 授新课内容 <u>80</u> 分钟; 讨论与提问 <u>0</u> 分钟; 总结与布置作业 <u>5</u> 分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教 学 步 骤 设 计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (5 分钟)	复习湍流动量传递和热量传递类比、雷诺类比律、外掠平板紊流换热。	通过 PPT 复习上次内容, 通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习, 巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容, 引入本次课内容。

第二步 (80 分钟)	讲授新的课程内容：凝结换热的现象、膜状凝结换热、影响凝结换热的因素、增强凝结换热的措施。	采用板书与课件相结合的方式，通过举生产、生活常见的凝结换热例子讲解膜状凝结换热的计算、影响因素以及措施。	认真聆听老师讲授内容，理解膜状凝结换热的影响因素、计算方法。	利用课件和图片等让学生掌握膜状凝结换热的基本概念、影响因素以及措施。
第三步 (5 分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

凝结换热

气态工质在饱和温度下，由气态转变为液态的过程称为凝结或冷凝；而液态工质在饱和温度下以产生气泡的形式转变为气态的过程称为沸腾。

一、概述

凝结换热：蒸气被冷却凝结成液体的换热过程。

分类：膜状凝结、珠状凝结、均相凝结、直接接触式凝结（容积内凝结、雾的生成）。

膜状凝结：凝液能较好润湿壁面，在壁面上形成液膜；凝结时蒸气放出的潜热通过液膜传至壁面。条件：表面张力 < 附着力，润湿表面。

珠状凝结：凝液不能润湿壁面，而在壁面上形成小液珠。条件：表面张力 > 附着力，不润湿表面

二、膜状凝结换热

1. 层流膜状凝结理论解

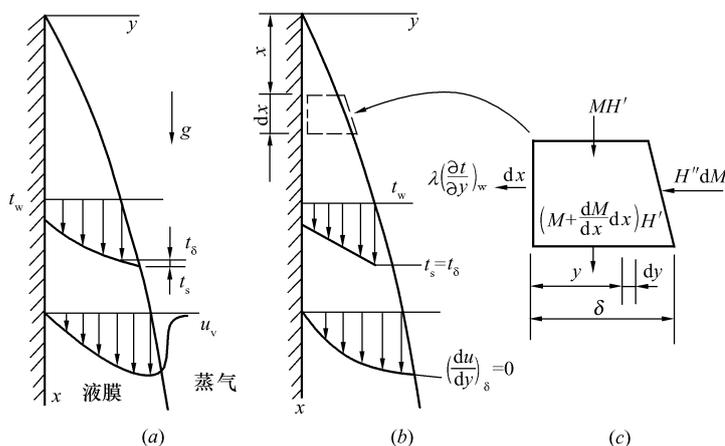


图 7-1 膜状凝结换热膜内温度及速度场

- (1) 纯蒸气层流液膜，物性为常量
- (2) 液膜表面温度 t_δ 等于 t_s （饱和温度）
- (3) 蒸气是静止的
- (4) 液膜很薄且流动速度缓慢
- (5) 凝结热以导热方式通过液膜
- (6) 忽略液膜的过冷度

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho g - \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dx} = \rho_v g$$

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} + (\rho - \rho_v) g = 0 \quad (2)$$

$$y = 0, \quad u = 0;$$

$$y = \delta, \quad \frac{du}{dy} = 0$$

$$\rho \gg \rho_v$$

$$u = \frac{\rho g}{\mu} \left(\delta y - \frac{1}{2} y^2 \right) \quad (3)$$

$$\frac{d^2 t}{dy^2} = 0 \quad (4)$$

$$y = 0; \quad t = t_w$$

$$y = \delta; \quad t = t_s$$

$$t = t_w + (t_s - t_w) \frac{y}{\delta} \quad (5)$$

$$M = \int_0^\delta \rho u dy = \frac{\rho^2 g \delta^3}{3\mu} \quad \text{kg / s} \quad (6)$$

$$\frac{dM}{dx} dx = \frac{dM}{d\delta} d\delta$$

$$= \frac{dM}{d\delta} d\delta$$

$$dM = \frac{\rho^2 g \delta^2}{\mu} d\delta \quad (7)$$

$$H'' dM + M H' = \lambda \left(\frac{dt}{dy} \right)_w dx + H' \left(M + \frac{dM}{dx} dx \right)$$

$$r = H'' - H'$$

$$r \frac{\rho^2 g \delta^2}{\mu} d\delta = \lambda \left(\frac{t_s - t_w}{\delta} \right) dx$$

$$\delta^3 d\delta = \frac{\lambda \mu (t_s - t_w) dx}{\rho^2 g r} \quad (8)$$

$$\delta = \left[\frac{4\mu \lambda x (t_s - t_w)}{\rho^2 g r} \right]^{1/4} \quad (9)$$

$$\dot{h}_x (t_s - t_w) dx = \lambda \frac{(t_s - t_w)}{\delta} dx$$

$$\delta = \frac{\lambda}{\dot{h}_x}$$

$$\dot{h}_x = \left[\frac{\rho^2 g \lambda^3 r}{4\mu x (t_s - t_w)} \right]^{1/4} \quad (7-1a)$$

$$\dot{h} = \frac{1}{l} \int_0^l \dot{h}_x dx = \frac{3}{4} \dot{h}_{x=l} = 0.943 \left[\frac{\rho^2 g \lambda^3 r}{\mu l (t_s - t_w)} \right]^{1/4} \quad \text{W / (m}^2 \cdot \text{K)} \quad (7-1b)$$

$$h = 0.725 \left[\frac{\rho^2 g \lambda^3 r}{\mu d (t_s - t_w)} \right]^{1/4} \quad \text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (7-2a)$$

2. 层流膜状凝结换热准则关联式

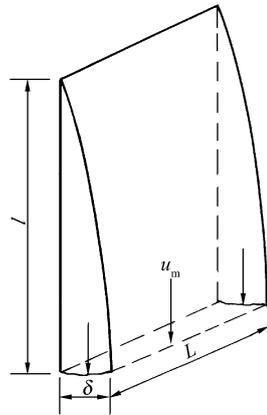


图 7-2 液膜的流动

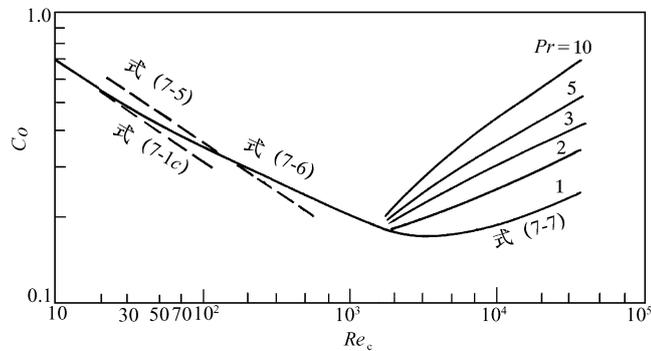


图 7-3 垂直壁膜状凝结理论解与实验关联式的比较

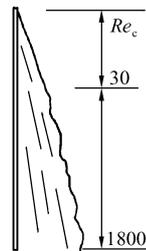


图 7-4 层流液膜表面波动

凝结液膜雷诺数 Re_c

$$Re_c = \frac{d_e u_m}{\nu} = \frac{d_e u_m \rho}{\mu} \quad (10)$$

润湿周边 $U = L$ ，液膜断面积 $f = L \cdot \delta$ ， $d_e = \frac{4f}{U} = 4\delta$ 。

$$Re_c = \frac{4\delta u_m \rho}{\mu} = \frac{4M}{\mu} \quad (7-3)$$

$$h(t_s - t_w)l = rM \quad (11)$$

$$Re_c = \frac{4hl(t_s - t_w)}{\mu r} \quad (7-4)$$

凝结准则 Co

$Co = h \left[\frac{\lambda^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right]^{-1/3}$ 为无量纲数群 $Co = \frac{hl}{\lambda} \left[\frac{gl^3}{\nu^2} \right]^{-1/3} = Nu \cdot Ga^{-1/3}$, (Ga 伽利略准则)。

垂直壁理论解 $Co = 1.47 Re_c^{-1/3} \quad (7-1c)$

水平管理论解 $Co = 1.51 Re_c^{-1/3} \quad (7-2b)$

$$h = 1.13 \left[\frac{\rho^2 g \lambda^3 r}{\mu l (t_s - t_w)} \right]^{1/4} \quad W/(m^2 \cdot k) \quad (7-5a)$$

$$Co = 1.76 Re_c^{-1/3} \quad (7-5b)$$

Kutateladze 推荐的准则关联式 (7-6)。

$$Co = \frac{Re_c}{1.08 Re_c^{1.22} - 5.2} \quad (7-6)$$

3. 紊流膜状凝结

当 $Re_c > 1800$ 时

$$Co = \frac{Re_c}{8750 + 58 Pr^{-0.5} (Re_c^{0.75} - 253)} \quad (7-7)$$

$$h = h_l \frac{x_c}{l} + h_t \left(1 - \frac{x_c}{l} \right) \quad (12)$$

4. 水平管内凝结换热

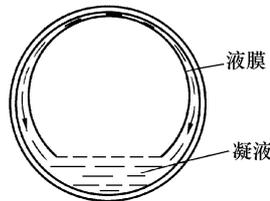


图 7-5 水平管内低速蒸气凝结

$$Re_V = \frac{\rho_V u_{m,V} d}{\mu_V} = \frac{G_V d}{\mu_V}$$

$Re_V < 35000$ 时

$$h = 0.555 \left[\frac{g \rho (\rho - \rho_V) \lambda^3 r'}{\mu d (t_s - t_w)} \right]^{1/4} \quad (7-8)$$

$$r' = r + \frac{3}{8} c_p (t_s - t_w) \quad (7-9)$$

5. 水平管束管外平均表面传热系数

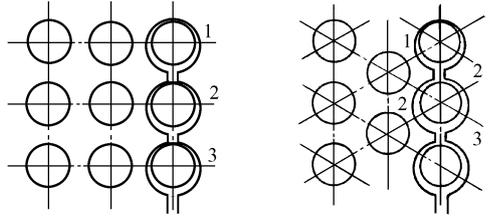


图 7-6 水平管束凝结液

三、影响膜状凝结的因素及增强换热的措施

1. 影响因素

- (1). 蒸气速度
- (2). 蒸气含不凝气体
- (3). 表面粗糙度
- (4). 蒸气含油
- (5). 过热蒸气

2. 增强凝结换热的措施

- (1). 改变表面几何特征
- (2). 有效地排除不凝气体
- (3). 加速凝液的排除 加装中间导流装置、使用离心力、低频振动和静电吸引等方法加速凝液的排泄。
- (4). 采用能形成珠状凝结的表面

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑		任课教师	魏朝晖	
授课题目	第七章-凝结与沸腾换热 2-沸腾换热			授课时间长度	90 分钟
授课进度	第 12 周, 总第 22-23 次		授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	知识目标	掌握大容器沸腾换热的流动和换热特征, 了解计算方法; 了解管内沸腾换热的流动和换热特征; 了解沸腾传热恶化发生的原因。			
	能力目标	目标 1	能利用本次课学习内容分析总结锅炉中沸腾受热面的传热特点		
		目标 2	能分析锅炉各受热面的传热过程, 并提出强化传热的方案		
德育目标	教育学生节省能源, 努力学习, 提高能源利用率				
教学重点	大容器沸腾换热的流动和换热特征				
教学难点	大容器沸腾换热的流动和换热特征				
教学方法分析	通过锅炉受热面的介绍, 引导学生思考锅炉受热面的作用, 引起学生对沸腾换热的兴趣, 然后按照物理想象到数学描述, 再到结果分析, 最后到应用的套路讲解本次课内容。				
	教学方式: 讲授 <input type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 讨论课 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
教学手段分析	多媒体、板书				
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
过程设计	复习与引导 5 分钟; 授新课内容 80 分钟; 讨论与提问 0 分钟; 总结与布置作业 5 分钟				
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				

教学步骤设计

步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第零步 (课前准备)	学生自学“沸腾换热”, 准备讨论课所需资料; 教师准备课堂运行资料。	1. 布置自学任务。 2. 对学生分组。 3. 点出本次课知识点分布、学习要求。 4. 制作、打印评分表。 5. 准备课堂讨论内容。	1. 学生通过“学习通”自学“沸腾换热”。 2. 按组讨论不懂的知识点。 3. 准备讨论课(电	准备讨论课所学材料; 培养学生自主学习能力。

			脑、图书等)。	
第一步 (5分钟)	布置讨论任务	通过生产生活的实例,引入本科内容,布置讨论问题,提出讨论要求。	认真听讨论要求及讨论任务,在小组分配任务。	接受到任务后,学生有团队意识。
第二步 (80分钟)	讨论题目	随时观察、倾听每组讨论情况,并在适当时机提出新的问题,制定学生回答,对每组讨论、回答问题等情况打分。	认真讨论“沸腾换热”题目,务必做到小组内所有学生都会的目标;随时准备回答教师的临时问题。	使学生掌握本次课内容,能用本次课内容分析简单工程问题,并了解“沸腾换热”对火电生产的重要性;培养学生团队协作能力。
第三步 (5分钟)	总结知识点	教师总结“沸腾换热”的知识点,并总结本次讨论课的情况。	认真听教师总结,思考自己及小组的不足。	使学生了解自己的优点及不足。

讨论问题

一、任务目标对课程目标的支持

课程目标	课程目标内容	学习目标	
		1	2
目标1	能够运用从传热的角度解释生活、生产中常见的传热问题。	0.4	0.6
目标2	能够运用热量传递的基本概念、基本理论和基本计算方法发现工程中存在的常见传热问题,并能够运用传热学的知识提出初步解决方案	0.4	0.6
目标3	能够针对工程中存在的常见传热问题进行理论分析与计算,并得到较为合理的解决与改进方案。	0.4	0.6

二、分组

利用“雨课堂”或“学习通”分组功能课前分组。

三、“沸腾换热”思维导图

四、讨论任务书

1. 任务书见附件1

2. 讨论题目

1) 从泡态沸腾机理分析,为什么大容器核态沸腾时,沸腾液体具有一定的过热度?
[分析]气泡处于既不长大,又不缩小的平衡状态时,必须满足的力平衡条件和热平衡条件分别为:

$$P_0 - P_1 = \frac{2\sigma}{R} \quad t_v = t_1$$

当忽略液柱静压差时, $p_i = p_s$, 与 p_s 对应的饱和温度为 t_s , 与 p_0 对应的蒸气饱和温度为 t_v 。由于 $p_v > p_s$, $t_v > t_s$, 由热平衡条件可知, $t_v = t_1 > t_s$ 。

令 $\delta_t = t_1 - t_s$, 可以看出, 沸腾液体总是具有一定的过热度 δ_t 。

- 2) 当液体在一定压力下做大容器饱和沸腾时, 欲使表面传热系数增加 10 倍, 沸腾温差应增加几倍? 如果同一液体在圆管内充分发展段做单相湍流换热, 为使表面传热系数增加 10 倍, 流速应增加多少倍? 维持流体流动所消耗的功将增加多少倍? 设物性为常数。

【解】 ①由米洛耶夫公式:

$$\begin{cases} h_1 = 0.122 \Delta t_1^{2.33} p^{0.5} \\ h_2 = 0.122 \Delta t_2^{2.33} p^{0.5} \end{cases}$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \right)^{2.33} = 10$$

故

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = 10^{1/2.33} = 2.69$$

即当 h 增大 10 倍时, 沸腾温差是原来的 2.69 倍。

②如为单相流体对流换热, 由 D-B 公式可知 $h \propto u_m^{0.8}$, 即

$$h_1 = cu_{m1}^{0.8}, h_2 = cu_{m2}^{0.8}$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{u_{m2}}{u_{m1}} \right)^{0.8} = 10 \quad \text{故} \quad \frac{u_{m2}}{u_{m1}} = 10^{1/0.8} = 17.8$$

即 h_2 为 h_1 的 10 倍时, u_{m2} 是 u_{m1} 的 17.8 倍。

$$\textcircled{3} \Delta p = f \frac{l \rho u_m}{d 2}$$

$$\text{由布拉修斯公式, } f = 0.3164 Re^{-1/4} = 0.3164 \left(\frac{u_m d}{\nu} \right)^{-1/4}$$

$$\text{故 } \Delta p = 0.3164 \left(\frac{l}{d} \right) \left(\frac{\nu}{d} \right)^{1/4} \frac{\rho}{2} u_m^{7/4} = cu_m^{7/4} \quad (c = \text{常数})$$

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \left(\frac{u_{m2}}{u_{m1}} \right)^{7/4} = (17.8)^{7/4} = 154$$

即 u_{m2} 是 u_{m1} 的 17.8 倍时, 压强增大了 154 倍。耗功量 $N = \Delta P A u_m$, 故

$$\frac{N_2}{N_1} = 154 \times 17.8 = 2741$$

耗功量增大了 2741 倍。因此, 以增大流速来提高表面传热系数, 将使耗功率增大了若干倍, 从而增大了换热器的运行成本。

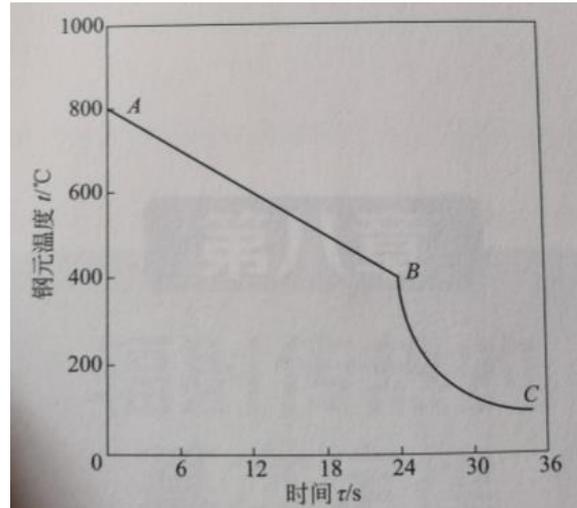
- 3) 试从沸腾过程分析, 为什么用电加热时容易发生电热管壁被烧毁的现象? 而采用蒸汽加热则不会?

[分析] 用电加热时, 加热方式是控制表面的热流密度。而采用蒸气加热则是壁面温度可控的情形。由大容器饱和沸腾曲线可知, 采用电加热, 当电功率 q 稍超过 q_{\max}

值时,工况将沿着 q_{\max} 虚线(见教材图 9.9)跃至膜态沸腾线,使壁面温度飞升,导致设备烧毁。

4) 已知:直径为 6mm 的合金钢元在 98°C 水中淬火时的冷却曲线如图 7-4 所示,钢元初温为 800°C 。试分析曲线各段所代表的换热过程的性质。

解: AB 段钢元的温度随时间的变化较平缓,代表了膜态沸腾区换热特性,BC 段的上半部分钢元温度随时间而急剧下降,呈现出核态沸腾的特点,而到 BC 段的下部,温度曲线再次变得平缓,反映出对流换热逐渐进入以自然对流为主的区域。



5) 两滴完全相同的水滴在大气压下分别滴在表面温度为 120°C 和 400°C 的铁板上,试问滴在哪块板上的水滴先被烧干?

答:在大气压下发生沸腾换热时,上述两水滴的过热度分别是 $\Delta t=20^{\circ}\text{C}$ 和 $\Delta t=300^{\circ}\text{C}$ 。由大容器饱和沸腾曲线,前者表面发生的是核态沸腾,后者发生膜态沸腾。虽然前者传热温差小,但其表面的传热系数大,从而表面热流反而大于后者。所以水滴滴在 120°C 的铁板上先被烧干。

6) 一名游泳者刚从游泳池上来,其皮肤上有一层水,这时是阴天且有风,请分析其皮肤上所发生的所有传热过程。用传热学解释为什么这时会比皮肤完全干时感觉要冷得多?如果正在这时太阳出来了,发生在他身上的传热过程又会怎么样?

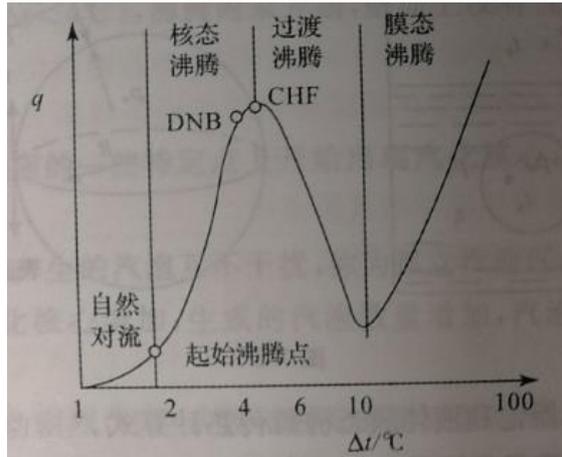
答:此时存在多种传热形式:皮肤与水膜对流换热、水膜导热、水膜外表面与空气的对流换热,还有皮肤对环境的辐射换热。由于空气不饱和使得水膜有较强的蒸发能力,相变换热的表面传热系数比非相变换热要高两个数量级,所以这时感觉会比皮肤干时要冷得多。太阳出来后,对水膜和皮肤表面进行辐射,水的蒸发热由太阳辐射进行补偿,感觉要暖和得多。

7) 什么是沸腾传热的临界热流密度?当沸腾传热达到临界热流密度时,在什么条件下才会对换热设备造成危害?为什么?

解:对于大容器饱和沸腾,核态沸腾和过度沸腾之间热流密度的峰值称为临界热流密度。当沸腾传热达到临界热流密度时,高温下恒热流密度加热时会对换热设备造成危害。在高温下恒热流密度加热时,当热流密度超过临界热流密度,壁温会突然剧烈上升,使设备烧毁。

8) 粗略绘出大容器内饱和水在大气压力下沸腾的 $q-\Delta t$ 曲线,并注明各换热阶段的特点及临界热流密度的位置。

解:



随着过热度 $\Delta t = t_w - t_s$ 的增加，会有四个换热规律全热不同的区域：

(1) 自然对流区：壁面过热度小时 ($\Delta t < 4^\circ\text{C}$)，沸腾尚未开始，换热规律服从单项自然对流规律。

(2) 核态沸腾区：从起始沸腾点开始，在加热面的某些特定点上(汽化核心)产生汽泡。开始阶段汽化核心产生的汽泡彼此互不干扰，称孤立汽泡区。随着 Δt 进一步增加，汽化核心增加，汽泡互相影响，并会合成汽块及汽柱。核态沸腾又称泡状沸腾。特点是温差小，换热强，一般工业应用都设计在这个范围。这个区域的重点是临界热流密度点(CHF)。

(3) 过渡沸腾：从峰值点进一步 提高 Δt ，热流密度不仅不升高，反而越来越降低。这是因为汽泡产生的速度大于它脱离加热面的速度，汽泡汇聚覆盖在加热面上，传热过程只依靠蒸汽的导热和辐射，因而传热恶化。这种情况持续到最低热流密度为止。过渡过程很不稳定。

(4) 稳定膜态沸腾区：从最低热流密度起，换热规律再次发生转折，这时随着 t_w 的提高，辐射换热量占据的比例越来越大，所以 q 随 Δt 的增加而增加。不过换热系数比凝结时小得多。

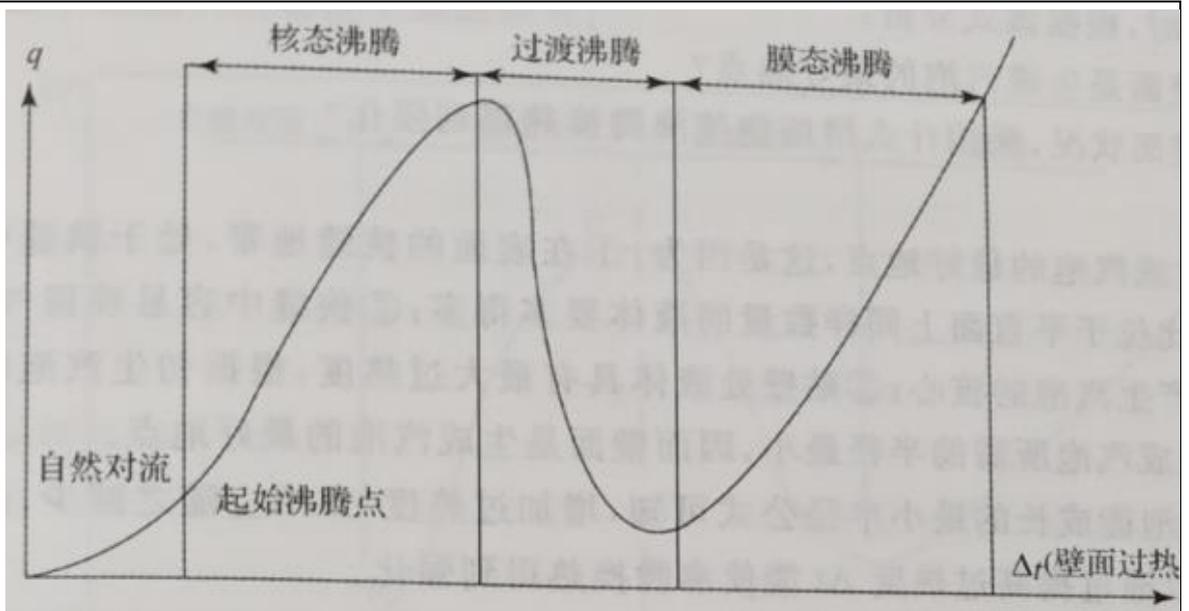
9) 请分别就控制热流和控制壁温两种加热方式，说明确定临界热流密度的意义。

答：对于控制热流的加热方式，当热流密度超过 q_{\max} 时，表面传热系数会大大降低，将会使壁温飞升，导致设备烧毁。

对于控制壁温的加热方式，当热流密度超过 q_{\max} 时，尽管 $\Delta t = t_s - t_w$ 增加，但是由于表面传热系数大大减小，因而热流密度反而下降。

物理意义：工业应用中采用控制加热的热流密度，使其不致于烧毁；控制壁温，保证传热效率不会下降。

10) 请画出大容器沸腾 $q-\Delta t$ 的曲线，并分别说明各部分的换热机理。



- 答：(1) 自然对流: 当壁面过热度较小时，换热服从单相自然对流规律。
 (2) 核态沸腾: 从起始沸腾点开始，加热面上某些特定点上产生气泡，在孤立气泡区内，汽压核心产生的气泡彼此互不干扰。随着 Δt 的增加产生汽块、汽流，气泡扰动剧烈，换热系数与热流密度急剧增加，核态沸腾有温压小、换热强的特点。
 (3) 过渡沸腾: 随着 Δt 增加，气泡汇聚覆盖在加热面上，热流密度下降，传热恶化。
 (4) 膜态沸腾: 加热面上形成稳定的蒸汽膜层，壁面辐射增强，随着 Δt 增加，换热量 q 增大。

11) 大空间沸腾传热时，随着沸腾温度差 Δt 的变化可出现哪 3 种沸腾状态? 其中哪种沸腾状态是热力设备运行的最佳区域? 为什么?

答：随着 Δt 的不断增大，可依次出现对流沸腾、核态沸腾(泡状沸腾)和膜态沸腾 3 种沸腾状态。

核态沸腾是热力设备运行的最佳区域。因为对流沸腾的沸腾温度差 Δt 很小，产生的气泡重少，不会长大、上升，因此沸腾换热微弱; 而对于膜态沸腾气膜覆盖了加热表面，使沸腾换热大为减弱，当沸腾温度差过大时极易烧毁加热表面; 核态沸腾介于对流沸腾和膜态沸腾之间，在这一区域中，气泡扰动剧烈，传热系数和热流密度都急剧增大，因而核态沸腾具有温压小、传热强的特点。综上分析可知，核态沸腾是热力设备运行的最佳运行区。

12) 从核态沸腾机理的分析可知，大空间沸腾时初生气泡(气泡核)能成长的最小半径为:

$$R_{min} = \frac{2\sigma T_s}{r\rho_v\Delta t}$$

当沸腾压力一定时，根据该式分析:

- (1) 为什么壁面是生成气泡的最好地点?
- (2) 不改变壁面状况，采用什么措施能使沸腾换热得到强化?

解：(1) 壁面是生成气泡的最好地点，这是因为: ①在表面的狭缝地带，处于狭缝中的液体所受到的加热的影响比位于平直面上同样数量的液体要多得多; ②狭缝中容易残留气体，这种残留气体就自然成为产生气泡的核心; ③贴壁处液体具有最大过热度，根据初生气泡核的最小半径公式可知，壁面生成气泡所需的半径最小，因而壁面是生成气泡的

最好地点。

(2)从初生汽泡能成长的最小半径公式可知,增加过热度 Δt , R_{min} 随之减少,这样初生汽泡更容易成长。所以通过提高过热度 Δt 能使沸腾换热得到强化。

13) 在烧开水的某个阶段,在锅底形成的汽泡在上升途中会逐渐消失,试解释其原因。

答:这是因为汽泡上升过程中,逐渐降温、冷却,热胀冷缩,并有汽泡携带的水蒸气在低于沸点时冷凝为水,汽泡就会越来越小,逐渐消失。

14) 饱和水在水平加热表面上沸腾(壁面温度可控)时,随着壁面过热度的增加,沸腾传热表面传热系数是否也增加?为什么?

答:在自然对流区和核态沸腾区,随着壁面过热度 $\Delta t = t_w - t_s$ 的增加,沸腾换热表面传热系数是增加的,因随 Δt 的增加产生汽泡的核心数增加,汽泡对流体的扰动剧增,表面传热系数增加。

当进一步提高 Δt 时,进入过渡沸腾区。这时,由于 Δt 的增加,在加热表面上形成一层汽膜,汽膜的导热系数较小,热阻增加,致使沸腾换热表面传热系数下降。

再提高 Δt ,进入稳定膜态沸腾区,加热表面上形成稳定的汽膜层。这时汽化只能在汽-液交界面上进行。汽化所需热量靠导热、对流、辐射通过汽膜传递。因这时壁温很高,辐射热量急剧增加,沸腾传热表面传热系数又随 Δt 的增加而增加。

15) 何为过冷沸腾和饱和沸腾?大容器饱和沸腾曲线可以分为哪几个区域?

解:过冷沸腾:大容器沸腾中流体主要部分的温度低于相应压力下的饱和温度,则这种沸腾称为过冷沸腾。

饱和沸腾:大容器沸腾中流体主要部分的温度等于相应压力下的饱和温度,则这种沸腾称为饱和沸腾。

大容器饱和沸腾曲线分为:核态沸腾区、过渡沸腾区和膜态沸腾区。

16) 一个平底紫铜锅的底部直径为0.3m.由电加热器维持在118℃.计算使锅中的水沸腾所需的功率。蒸发速率是多少?临界热流密度呢?

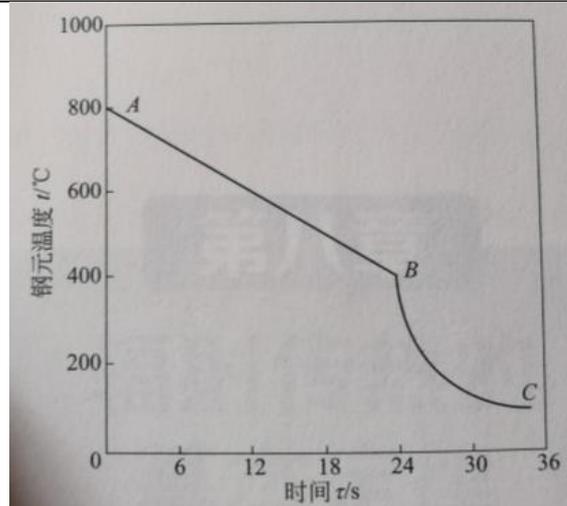
17) 已知:在实验室内进行压力为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 的大容器沸腾实验时,采用大电流通过小直径不锈钢管的方法加热。选定定的不锈钢管的直径为3mm,长为100mm。要能在电压不高于220V的情形下演示整个核态沸腾区域。求:估算所需的不锈钢管的每米长电阻应为多少。

五、讨论过程评价书(附件2)

作业内容	
见教材	
效果分析与改进措施	

附件 1 讨论任务书

讨论章节	沸腾换热		
学习小组		组长	各小组自定
小组成员			
激励口号	各小组自定		
任务安排计划：各小组自定			
组长职责：各小组自定			
纪律制度：各小组自定			
讨论任务	1. 自定组织及分工		
	2. 讨论题目 1) 从泡态沸腾机理分析,为什么大容器核态沸腾时,沸腾液体具有一定的过热度? 2) 当液体在一定压力下做大容器饱和沸腾时,欲使表面传热系数增加 10 倍,沸腾温差应增加几倍?如果同一液体在圆管内充分发展段做单相湍流换热,为使表面传热系数增加 10 倍,流速应增加多少倍?维持流体流动所消耗的功将增加多少倍?设物性为常数。 3) 试从沸腾过程分析,为什么用电加热时容易发生电热管壁被烧毁的现象?而采用蒸汽加热则不会? 4) 已知:直径为 6mm 的合金钢元在 98° C 水中淬火时的冷却曲线如图 7-4 所示,钢元初温为 800°C。试分析曲线各段所代表的换热过程的性质。		



- 5) 两滴完全相同的水滴在大气压下分别滴在表面温度为 120°C 和 400°C 的铁板上, 试问滴在哪块板上的水滴先被烧干?
- 6) 一名游泳者刚从游泳池上来, 其皮肤上有一层水, 这时是阴天且有风, 请分析其皮肤上所发生的所有传热过程。用传热学解释为什么这时会比皮肤完全干时感觉要冷得多? 如果正在这时太阳出来了, 发生在他身上的传热过程又会怎么样?
- 7) 什么是沸腾传热的临界热流密度? 当沸腾传热达到临界热流密度时, 在什么条件下才会对换热设备造成危害? 为什么?
- 8) 粗略绘出大容器内饱和水在大气压力下沸腾的 $q-\Delta t$ 曲线, 并注明各换热阶段的特点及临界热流密度的位置。
- 9) 请分别就控制热流和控制壁温两种加热方式, 说明确定临界热流密度的意义。
- 10) 请画出大容器沸腾 $q-\Delta t$ 的曲线, 并分别说明各部分的换热机理。
- 11) 大空间沸腾传热时, 随着沸腾温度差 Δt 的变化可出现哪 3 种沸腾状态? 其中哪种沸腾状态是热力设备运行的最佳区域? 为什么?
- 12) 从核态沸腾机理的分析可知, 大空间沸腾时初生汽泡 (汽泡核) 能成长的最小半径为:

$$R_{min} = \frac{2\sigma T_s}{r\rho_v\Delta t}$$

当沸腾压力一定时, 根据该式分析:

- (1) 为什么壁面是生成汽泡的最好地点?
- (2) 不改变壁面状况, 采用什么措施能使沸腾换热得到强化?
- 13) 在烧开水某个阶段, 在锅底形成的汽泡在上升途中会逐渐消失, 试解释其原因。
- 14) 饱和水在水平加热表面上沸腾 (壁面温度可控) 时, 随着壁面过热度的增加, 沸腾传热表面传热系数是否也增加? 为什么?
- 15) 何为过冷沸腾和饱和沸腾? 大容器饱和沸腾曲线可以分为哪几个区域?
- 16) 一个平底紫铜锅的底部直径为 0.3m. 由电加热器维持在 118°C. 计算使锅中的水沸腾所需的功率。蒸发速率是多少? 临界热流密

	<p>度呢?</p> <p>17) 已知:在实验室内进行压力为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 的大容器沸腾实验时,采用大电流通过小直径不锈钢管的方法加热。设选定的不锈钢管的直径为 3mm,长为 100mm。要能在电压不高于 220V 的情形下演示整个核态沸腾区域。求:估算所需的不锈钢管的每米长电阻应为多少。</p> <p>3. 评价。</p> <p>评价学生自评、小组互评和教师总结评价</p>
<p>要 求</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 寻找自己的合作对象,以 4—5 人为一小组。 2. 确定组名和口号,提出纪律要求。 3. 选出小组长,制订、明确组长职责。 4. 探讨交流制订小组的任务安排计划。 5. 小组在思维导图、任务书的指导下,自学 MOOC 视频、查找相关资料、讨论疑难点、讨论题目,务必做到人人掌握本次课内容。 6. 及时记录、讨论过程中碰到的问题。 7. 认真写好学习笔记和心得体会。

附件2 讨论过程评价书

学生姓名_____

评价时间_____

评 分 目 标	分 值	评 分 标 准	自 评		互 评		教 师 评 价	
			扣 分	得 分	扣 分	得 分	扣 分	得 分
贡献度	30	自学情况（5分）						
		为同学解惑情况（5分）						
		回答题目情况（10分）						
		提出建设性问题情况（10分）						
参与度	20	课前讨论情况（5分）						
		课中讨论情况（10分）						
		整理资料情况（5分）						
协同度	20	听取他人意见情况（10分）						
		表述自己观点情况（10分）						
掌握情况	30	掌握了本次课所有知识点（10分）						
		利用本次课知识分析工程问题情况（15分）						
		对本次课问题提出建设性想法（5分）						
分项合计			/		/		/	
教师、自己、小组加权总分		教师评分×50%+评分×25%+互评×25%=						
课程换算分（5%）								

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑		任课教师	魏朝晖	
授课题目	第八章 热辐射的基本定律			授 课 时间长度	_ 90 _ 分钟
授课进度	第 13 周, 总第 24-25 次		授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学 目 标	知识目标	掌握热辐射的本质和特点; 掌握黑体、白体和透明体的概念; 掌握辐射力、辐射强度的概念以及辐射强度、单色辐射轻度、单色辐射力、定向辐射力、单色定向辐射力之间的关系; 掌握普朗克定律、维恩位移定律、史蒂芬玻尔兹曼定律、兰贝特定律和基尔霍夫定律; 掌握灰体、漫辐射表面的概念; 掌握发射率和吸收率的概念。			
	能力目标	目标 1	能利用本次课学习内容分析总结生产、生活中的辐射换热的特点		
	价值目标	目标 2	能分析生产、生活中的辐射换热现象		
教学 重难点	<p>重难点 1: 普朗克定律、维恩位移定律、史蒂芬玻尔兹曼定律、兰贝特定律和基尔霍夫定律。解决: 通过大量生活实例来辅助分析。</p> <p>重难点 2: 辐射强度、单色辐射轻度、单色辐射力、定向辐射力、单色定向辐射力、灰体、漫辐射表面的概念。解决: 板书、多媒体结合, 对概念讲解透彻, 并举例。</p>				
教学 方法 分析	主要分组讨论法, 教师旁听提问; 个别组上讲台; 教师就学生遇到疑难问题集中讲解。				
教学 手段 分析	教学方式: 讲授 <input type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 讨论课 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
授 课 类 型	多媒体、板书				
过 程 设 计	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
过 程 设 计	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
过 程 设 计	引导 2 分钟; 讨论与提问 68 分钟; 优秀组授课 15 分钟; 集中讲解疑难问题 45 分钟; 测试 25 分钟; 讲解测试题 18 分钟; 总结及布置作业 2 分钟。				
教 学 步 骤 设 计					
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图	
第一步 (2 分钟)	说明课堂安排, 公布本次课需要讨论的问题。	口述本次课安排, 公布本次课讨论题目。	听教师课堂安排。	让学生了解本次课讨论内容及课堂安排。	

第二步 (68 分钟)	讨论教师设置的题目。	教师认真旁听每组讨论情况，并现场提问；记录每组讨论情况，梳理学生疑难问题；选出优秀 2 组。	分组讨论教师设置的题目，并回答教师提出的问题。	让学生成为课堂的主人，教师引导学生主动思考。
第三步 (15 分钟)	优秀组展示	教师认真听优秀组授课，并点评。	优秀组就个别问题给全班问题授课。全班学生听取教师对优秀组点评。	引导学生想优秀组学习，勾起学生上进心。
第四步 (45 分钟)	讲解疑难问题	教师现场讲解学生集中存在问题的知识点。	学生认真听教师讲解疑难问题。	解答学生集中存在的疑问。
第五步 (25 分钟)	测试讨论情况	教师现场公布测试题	学生答测试题	考核学生对知识点掌握情况
第六步 (18 分钟)	讲解测试题	教师现场讲解测试题，并与学生现场讨论。	学生听讲，并与教师现场讨论疑问	引导学生主动思考问题，并回答学生疑问。

讨论问题

一、任务目标对课程目标的支持

课程目标	课程目标内容	任务目标		
		1	2	3
目标1	能够运用从传热的角度解释生活、生产中常见的传热问题。	0.6	0.4	
目标2	能够运用热量传递的基本概念、基本理论和基本计算方法发现工程中存在的常见传热问题，并能够运用传热学的知识提出初步解决方案	0.3	0.5	0.2
目标3	能够针对工程中存在的常见传热问题进行理论分析与计算，并得到较为合理的解决与改进方案。	0.3	0.5	0.2

二、分组

利用“雨课堂”分组功能课前分组。

三、“沸腾换热”思维导图



四、讨论任务书

1. 任务书见附件 1

2. 讨论题目

(1) 为什么太阳灶的受热面做成粗糙的黑色表面，而辐射供热板不需要做成黑色？

答：太阳辐射能量中 99%集中在 $0.2 \leq \lambda \leq 3\mu\text{m}$ 的波长范围内，其中可见光部分 ($0.38 \leq \lambda \leq 0.76\mu\text{m}$) 占 43%，做成粗糙的是因为可以吸收各个方向的辐射能，因此太阳灶的受热面要作成粗糙的黑色。辐射采暖板的表面温度较低，它的辐射能量主要处于红外波长范围，它的发射率对白色和黑色基本相同。

(2) 在选择太阳能集热器的表面涂层时，该涂层表面的光谱吸收比随着波长变化的最佳曲线是什么？有人认为取暖用的辐射采暖片也需涂上这种材料，你认为合适吗？

答：最佳的曲线应是在短波 (如 $\lambda < 3\mu\text{m}$) 部分光谱吸收比 $\alpha_\lambda=1$ ，而长波部分 (如 $\lambda > 3\mu\text{m}$) $\alpha_\lambda=0$ ，这样吸收太阳能最多，而向外辐射散热却为 0。对辐射采暖器，其表面温度不高，而大部分辐射位于长波范围，此时若 $\alpha_\lambda=0$ ，由基尔霍夫定律， $\varepsilon_\lambda=0$ 反而阻碍其表面散热，因而涂上这种材料不合适。

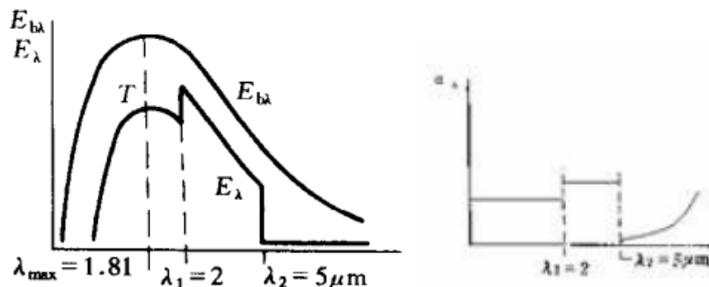
(3) 窗玻璃对红外线几乎是不透过的，但为什么隔着玻璃却使人感到暖和？

答：窗玻璃对红外线几乎不透过，但对可见光则是可透过的，当隔着玻璃晒太阳时，太阳光可以穿过玻璃进入室内，而室内物体发出的红外线却被阻隔在室内，因房间内温度越来越高，从而感到暖和。

(4) 深秋及初冬季节的清晨在屋面上常常会看到结霜，试从传热与辐射的观点分析 (1) 有霜出现的早上总是晴天；(2) 室外空气是否一定要低于零度？(3) 结霜屋面的热阻 (表面对流传热热阻及屋面材料导热热阻) 对结霜有何影响？

答：(1) 屋面结霜的一个重要原因是，在晴天无云的条件下屋面能与太空进行辐射换热，由于太空温度较低，使得屋面上的水 (汽) 失去了大量的热，温度降低，低于冰点形成霜。所以有霜出现必然是晴天。当阴天地面发出去的热量有一部分会被空中的云层给反射回来，这在一定程度上降低了地面热量的减少，使地面温度不会太低。因此冬天阴天不易结霜而晴天容易结霜。(2) 不是一定要低于 0°C ，因为结霜的主要原因是由于屋面与太空之间的辐射传热，辐射传热是通过电磁波来传递能量，并不是借助于物质传递能量。(3) 结霜屋面的保温效果好。因为如果保温效果不好，那么屋面温度受到室内温度的影响较大，这样很难达到较低温度形成结霜的条件。

(5) 实际物体表面在某一温度 T 下的光谱辐射力 E_λ 随波长 λ 的变化曲线与他的光谱吸收率 α_λ 的变化曲线有何联系？如已知其光谱辐射力变化曲线如图所示，试定性地画出他的光谱吸收率变化曲线。



答：从图中可以分析出，该物体表面为非灰体。根据基尔霍夫定律， $\alpha_\lambda=\varepsilon_\lambda=E_\lambda/E_{b,\lambda}$ ，即为同一波长线②与线①之比。

(6) 在什么条件下物体表面的发射率等于他的吸收率 ($\varepsilon=\alpha$)？在什么情况下 $\varepsilon \neq \alpha$ ？当 $\varepsilon \neq \alpha$ 时，是否意味着物体的辐射违反了基尔霍夫定律？

答：对于漫-灰表面 $\varepsilon=\alpha$ ，非漫-灰表面 $\varepsilon \neq \alpha$ ；当 $\varepsilon \neq \alpha$ 时，并不意味着物体的辐射违反了基尔霍夫定律，因为基尔霍夫定律的表达式为 $\varepsilon_{\lambda,\theta,T}=\alpha_{\lambda,\theta,T}$ 。

(7) 太阳能集热器采用选择性表面涂层，它对太阳辐射的吸收率为 0.9，它本身的发射率为 0.3，

这一现象是否违背基尔霍夫定律？为什么？

答：这一现象与基尔霍夫定律不矛盾。 $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) = \alpha(\lambda, \theta, \phi, T)$ 。它表明：在热平衡条件下，表面的定向光谱发射率等于它的定向光谱吸收比。太阳能集热器的吸收板表面上覆盖的选择性涂层，它所吸收的阳光来源于太阳，它对阳光的吸收比是针对太阳温度而言的；而它本身的发射率是针对其自身的温度。太阳的温度与太阳能集热器吸收板表面的温度显然不同。温度不同使阳光与太阳能集热器吸收板表面自身辐射的光谱分布也不同。所以，这种选择性涂层能使表面吸收阳光的能力与本身辐射的能力不一样与基尔霍夫定律并不矛盾。

(8) 按照基尔霍夫定律的要求，物体表面的黑度等于其吸收率在什么条件下成立？灰体是否需要这些条件？为什么？

答：按照基尔霍夫定律的要求，物体表面的黑度应等于其对同温度的黑体辐射的吸收率，条件就是，发射体为黑体，且温度与吸收体的温度相同。由于灰体是单色吸收率为常数的物体，那么它对来自不同温度的如何物体都有相同的吸收率，因而是无条件具有黑度等于其吸收率。

(9) I 、 I_λ 、 E 、 E_λ 、 E_θ 、 $E_{\lambda\theta}$ 之间的关联是什么？

答：见课件

(10) 有人说：“常温下呈红色的物体表示该物体在常温下红色光的光谱发射率较其它单色光（黄、绿、蓝等）的光谱发射率高”，你认为这种说法正确吗？为什么？

答：不正确。因为常温下物体呈现的颜色是由于物体对可见光中某种单色光的反射造成的。红色物体正是由于物体对可见光中的黄、绿、蓝色光吸收比较大，反射比较小，而对红光的吸收比较小，反射比较大所致。根据基尔霍夫定律， $\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$ ，可见红光的光谱发射率较其它单色光的光谱发射率低，而不是高。

(11) 观察点火，为什么发现火焰的颜色越来越鲜亮？

答：见课件

(12) 温室效应

答：玻璃对太阳能具有强烈的选择性吸收，大部分的太阳能能够穿过玻璃进入有吸热面的腔内，而吸热面发出的常温的长波辐射却被阻隔在腔内，从而产生了所谓温室效应。工业发展排放了大量的对红外波段的辐射具有一定吸收率的气体，如 CO_2 、CFC 制冷剂，聚集在地球外围，一方面好像给地球罩上了一层玻璃窗，以可见光为主的太阳能可以到达地球表面，无法散发到宇宙中，使得地球表面温度升高；另一方面，CFC 分解出来的氯气对于臭氧层有严重的破坏，太阳对地表的辐射增强。导致了温室效应。

(13) 某楼房室内是用白灰粉刷的，但即使在晴朗的白天，远眺该楼房的窗口时，总觉得里面黑洞洞的，这是为什么？

答：窗口相对于室内面积来说较小，当射线(可见光射线等)从窗口进入室内时在室内经过多次反复吸收、反射，只有极少的可见光射线从窗口反射出来，由于观察点距离窗口很远，故从窗口反射出来的可见光到达观察点的份额很小，因而就很难反射到远眺人的眼里，所以我们就觉得窗口里面黑洞洞的。

(14) 在波长 $\lambda < 2 \mu\text{m}$ 的短波范围内，木板的光谱吸收比小于铝板，而在长波 $\lambda > 2 \mu\text{m}$ 的范围内则相反。在木板和铝板同时长时间放在太阳下时，那个温度更高？为什么？

答：太阳的辐射能力主要集中在 $\lambda < 2 \mu\text{m}$ 的波段，而对常温下的物体，其辐射波长一般大于 $\lambda > 2 \mu\text{m}$ 。在同样的太阳辐射条件下，铝板吸收的太阳能多，而在此时，其向外辐射能力却少于木板（在长波范围内，铝板吸收比小于木板，由基尔霍夫定律，其发射率亦小于木板）。因此，铝板温度高。

(15) 温度为 T 的灰体，其有效辐射辐射是否有可能大于同温度下的黑体辐射？

答：有可能。因为有效辐射等于自身辐射与投入辐射的反射部分之和，反射部分越大，有效辐射也越大，因此，完全有可能某一温度下的物体其有效辐射大于同温度下的黑体辐射。

(16) 善于发射的物体必善于吸收，即物体辐射能力越大，其吸收比也越大。你认为对吗？为什么？

答：基尔霍夫定律对实际物体成立必须满足两个条件：物体与辐射源处于热平衡，辐射源为黑体。也即物体辐射能力越大，其对同样温度的黑体辐射吸收比也越大，善于发射的物体，必善于吸收同温度下的黑体辐射。所以上述说法不正确。

五、讨论过程评价书（附件2）

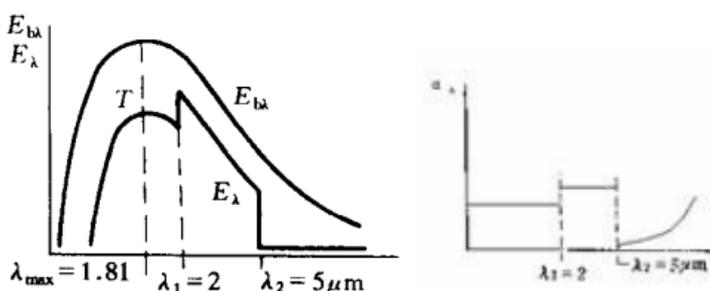
作业内容

见学习通作业功能

效果分析与改进措施

预先设置问题，采用启发法和讨论法，引导学生主动思考一些传热问题，并分组讨论。针对辐射换热问题，提出一些生活、或生产的案例。通过雨课堂发布随堂习题，巩固所学内容，纠正易混淆的知识点。通过学习通上的微课，让学生进行课前预习和课后巩固，加深学习效果。

附件 1 讨论任务书

讨论章节	沸腾换热		
学习小组		组长	各小组自定
小组成员			
激励口号	各小组自定		
任务安排计划：各小组自定			
组长职责：各小组自定			
纪律制度：各小组自定			
讨论任务	<p>1. 自定组织及分工</p> <p>2. 讨论题目</p> <p>(1) 为什么太阳灶的受热面做成粗糙的黑色表面，而辐射供热板不需要做成黑色？</p> <p>(2) 在选择太阳能集热器的表面涂层时，该涂料表面的光谱吸收比随着波长变化的最佳曲线是什么？有人认为取暖用的辐射采暖片也需涂上这种材料，你认为合适吗？</p> <p>(3) 窗玻璃对红外线几乎是不透过的，但为什么隔着玻璃却使人感到暖和？</p> <p>(4) 深秋及初冬季节的清晨在屋面上常常会看到结霜，试从传热与辐射的观点分析（1）有霜出现的早上总是晴天；（2）室外空气是否一定要低于零度？（3）结霜屋面的热阻（表面对流传热热阻及屋面材料导热热阻）对结霜有何影响？</p> <p>(5) 实际物体表面在某一温度 T 下的光谱辐射力 E_λ 随波长 λ 的变化曲线与他的光谱吸收率 α_λ 的变化曲线有何联系？如已知其光谱辐射力变化曲线如图所示，试定性地画出他的光谱吸收率变化曲线。</p>		
	 <p>(6) 在什么条件下物体表面的发射率等于他的吸收率 ($\epsilon=\alpha$)？在什么情况下 $\epsilon\neq\alpha$？当 $\epsilon\neq\alpha$ 时，是否意味着物体的辐射违反了基尔霍夫定律？</p> <p>(7) 太阳能集热器采用选择性表面涂层，她对太阳辐射的吸收率为 0.9，它本身的发射率为 0.3，这一现象是否违背基尔霍夫定律？为什么？</p> <p>(8) 按照基尔霍夫定律的要求，物体表面的黑度等于其吸收率在什么条件下成立？灰体是否需要这些条件？为什么？</p> <p>(9) I、I_λ、E、E_λ、E_θ、$E_{\lambda,\theta}$ 之间的关联是什么？</p> <p>(10)有人说：“常温下呈红色的物体表示该物体在常温下红色光的光谱发射率较其它单色光(黄、</p>		

	<p>绿、蓝等)的光谱发射率高”,你认为这种说法正确吗?为什么?</p> <p>(11) 观察点火,为什么发现火焰的颜色越来越鲜亮?</p> <p>(12) 温室效应</p> <p>(13) 某楼房室内是用白灰粉刷的,但即使在晴朗的白天,远眺该楼房的窗口时,总觉得里面黑洞洞的,这是为什么?</p> <p>(14) 在波长 $\lambda < 2 \mu\text{m}$ 的短波范围内,木板的光谱吸收比小于铝板,而在长波 $\lambda > 2 \mu\text{m}$ 的范围内则相反。在木板和铝板同时长时间放在太阳下时,那个温度更高?为什么?</p> <p>(15) 温度为 T 的灰体,其有效辐射辐射是否有可能大于同温度下的黑体辐射?</p> <p>(16) 善于发射的物体必善于吸收,即物体辐射能力越大,其吸收比也越大。你认为对吗?为什么?</p> <p>3. 评价。</p> <p>评价学生自评、小组互评和教师总结评价</p>
<p>要 求</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 寻找自己的合作对象,以 4—5 人为一小组。 2. 确定组名和口号,提出纪律要求。 3. 选出小组长,制订、明确组长职责。 4. 探讨交流制订小组的任务安排计划。 5. 小组在思维导图、任务书的指导下,自学 MOOC 视频、查找相关资料、讨论疑难点、讨论题目,务必做到人人掌握本次课内容。 6. 及时记录、讨论过程中碰到的问题。 7. 认真写好学习笔记和心得体会。

附件2 讨论过程评价书

学生姓名_____

评价时间_____

评 分 项 目	分 值	评 分 标 准	自 评		互 评		教 师 评 价	
			扣 分	得 分	扣 分	得 分	扣 分	得 分
贡献度	30	自学情况（5分）						
		为同学解惑情况（5分）						
		回答题目情况（10分）						
		提出建设性问题情况（10分）						
参与度	20	课前讨论情况（5分）						
		课中讨论情况（10分）						
		整理资料情况（5分）						
协同度	20	听取他人意见情况（10分）						
		表述自己观点情况（10分）						
掌握情况	30	掌握了本次课所有知识点（10分）						
		利用本次课知识分析工程问题情况（15分）						
		对本次课问题提出建设性想法（5分）						
分项合计			/		/		/	
教师、自己、小组加权总分		教师评分×50%+评分×25%+互评×25%=						
课程换算分（5%）								

“热辐射的基本定律”测试题

一、记忆性题目

1. 可见光波长在_____微米到_____微米之间。
1. 太阳辐射主要能量集中在_____微米波长范围。
1. 随着温度 T 增高, λ_{\max} 向_____波方向移动。
1. 太阳所发射的辐射能约 44.6%(43%)在_____范围。
1. 黑体的温度越高, 其最大辐射力波长越短, 描述这一性质的物理定律叫_____定律。
1. 黑体的温度越高, 其单色辐射力最大值随对应的波长则越小。()
2. 环绕发射表面的半球空间立体角为_____。
2. 灰体: 假设其光谱发射率 E_{λ} (或光谱黑度) 和光谱吸收率 α_{λ} 与_____无关。
2. 在热辐射分析中, 把光谱吸收比与波长无关的物体称为 ()
A、黑体 B、透明体 C、灰体 D、绝对白体
2. 灰体的吸收比与投射辐射的波长分布 ()
A. 无关 B. 有关 C. 具有选择性 D. 具有一定函数关系
2. 实际物体的辐射力比同温度下黑体的辐射力 (B)
A. 大 B. 小 C. 一样 D. 差不多
3. 普朗克定律揭示了真空中黑体的光谱辐射力 $E_{b\lambda}$ 与_____、_____之间的函数关系。
3. 1879 年斯蒂芬依靠实验确定了 $E_{b\lambda}$ 与_____的关系。
3. 对于黑体表面或漫辐射表面, 辐射力 E 是任意方向辐射强度 I 的_____倍。

3. 公式 $E_b = \left(\frac{T}{100} \right)^4$ (其中 $C_0=5.67W/(m^2K^4)$) 是什么定律的表达式? 其中 E_b 指的是什么? ()
A. 基尔霍夫定律, 黑体辐射力
B. 斯蒂芬—波尔兹曼定律, 黑体辐射力
C. 普朗克定律, 光谱辐射力
D. 四次方定律, 背景辐射力

二、理解性题目

1. 热辐射是各类物质的固有属性 ()
2. 不需要介质的存在, 在真空中就可以传递能量。()
2. 辐射换热过程伴随能量形式的转换。()
2. 白色物体是白体。()
2. 黑色物体是黑体。()
2. 黑体是客观存在的。()
2. 辐射强度指的是物体表面朝着某给定方向、对_____该方向的单位投影面积而言, 在单位时间、单位立体角内所发射的全波长的能量。
2. 辐射力指的是_____每单位面积、在单位时间、向半球空间所发射的全波长能量。
2. 黑度 ϵ 的大小表征实际物体的辐射能力与_____黑体辐射能力的接近程度。
2. 黑度取决于物体本身的条件: 种类、表面状况和_____。
2. 实际物体的吸收率 α 不仅取决于物体本身材料的种类、温度及表面性质, 还与投入辐射的_____分布有关。
3. $d\Phi=I \cdot dA_1 \cdot d\Omega$ 在什么情况下成立 (A)
A. $\theta=0$; B. 灰体; C. 漫辐射表面; D. 黑体

三、运用性题目

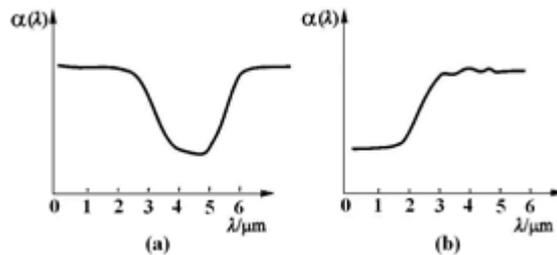
1. 将一个黑体表面的温度由 30°C 增加到 333°C ，该表面的辐射力增加了_____倍。
2. 夏天人们喜欢穿白色的衣服，是因为白颜色对可见光有较大的（ ）
 - A. 辐射率
 - B. 吸收率
 - C. 透射率
 - D. 反射率
3. 两个物体的温度分别为 100°C 和 200°C ，若将其温度各提高 450°C 并维持其温差不变，其辐射换热热流量（ ）
 - A. 变小
 - B. 变大
 - C. 不变
 - D. 不能确定
3. 测得对应于太阳最大单色辐射力 $E_{\text{bl,max}}$ 的峰值波长 λ_{max} 约为 $0.5\mu\text{m}$ ，若太阳可以近似作为黑体看待，太阳表面温度为_____K。

四、分析性题目

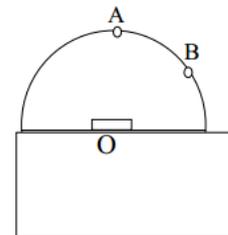
1. 颜色对红外线的吸收几乎没有影响。（ ）
2. 辐射强度概念中单位可见面积指的是（ ）
 - A. dA_1 ;
 - B. dA_2 ;
 - C. dA_2 在垂直于辐射方向的单位投影面积;
 - D. dA_1 在垂直于辐射方向的单位投影面积;
2. 为了减少室外设备的热损失，保温层外所包的一层金属皮应该是（ ）
 - A. 表面光滑，颜色较浅;
 - B. 表面粗糙，颜色较深;
 - C. 表面粗糙，颜色较浅;
 - D. 表面光滑，颜色较深;
3. 北方深秋季节的清晨，树叶叶面上常常结霜。试问树叶上、下表面的哪一面上容易结霜？为什么？

五、评价性题目

1. 根据下图判断，当温度均为 37°C 的两个物体同置于太阳光的照射下，那种物体可作为灰体处理，为什么？



2. （ ）是在相同温度条件下辐射能力最强的物体。
 - A. 灰体
 - B. 磨光玻璃
 - C. 涂料
 - D. 黑体
2. 一半球真空辐射炉，球心处有一尺寸不大的圆盘形辐射加热元件的定向辐射强度和辐射量有_____关系。



件，加热

- A. $I_{OA} > I_{OB}$, $q_A > q_B$
 - B. $I_{OA} < I_{OB}$, $q_A < q_B$
 - C. $I_{OA} = I_{OB}$, $q_A > q_B$
 - D. $I_{OA} = I_{OB}$, $q_A < q_B$
2. 有一台放置于室外的冷库，从减小冷库冷量损失的角度出发，冷库外壳的颜色应涂成深色。（ ）
 2. 在波长 $\lambda < 2\mu\text{m}$ 的短波范围内，木板的光谱吸收比小于铝板，而在长波 $\lambda > 2\mu\text{m}$ 的范围内则相反。在木板和铝板同时长时间放在太阳下时，木板温度高。（ ）
 3. 甲、乙、丙三物体的绝对温度之比为 $1:3:2$ ，黑度之比为 0.6 ，下列说法正确的是（ ）
 - A. 甲辐射力最大
 - B. 乙辐射力最大
 - C. 丙辐射力最大
 - D. 三者辐射力相同

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第九章-辐射换热 1-黑表面间的辐射换热		授课时间长度	90 分钟
授课进度	第 11 周, 总第 21-22 次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	知识目标	充分理解角系数的定义和性质(相对性、完整性和可加性)。了解角系数是纯几何因子及其成立条件。掌握常见几何结构的角系数的计算方法。重点掌握有效辐射的概念,了解封闭腔的意义。掌握简单几何条件下,被透明介质隔开的漫灰表面间辐射传热的计算。掌握二个和三个表面之间的辐射传热的计算。掌握辐射传热的强化与削弱的途径。		
	能力目标	能用代数分析法及图线法计算常见几何结构的角系数;能用有效辐射概念或网络法对二个和三个表面之间的辐射传热的计算;能对生活或工程中常见辐射换热问题提出强化与削弱的方案。		
	德育目标	教育学生节省能源,努力学习,提高能源利用率		
教学重点	角系数的计算;二个和三个表面之间的辐射传热的计算;辐射传热的强化与削弱的途径			
教学难点	角系数的计算;二个和三个表面之间的辐射传热的计算			
教学方法分析	通过锅炉炉膛的介绍,引导学生思考辐射换热的重要性,引起学生对辐射换热的兴趣,然后按重点讲解角系数的计算、二个和三个表面之间的辐射传热的计算。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体、板书			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导 5 分钟;授新课内容 80 分钟;讨论与提问 0 分钟;总结与布置作业 5 分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图

第一步 (5分钟)	复习热辐射的本质和特点、辐射能强度、辐射力、普朗克定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律、兰贝特定律等。	通过PPT复习上次内容，通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习，巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容，引入本次课内容。
第二步 (80分钟)	讲授新的课程内容：黑表面间的辐射换热、灰表面间的辐射换热、角系数的确定方法。	采用板书与课件结合的方式，通过举生产、生活常见的辐射换热例子讲解角系数的计算、辐射换热量的计算。	认真聆听老师讲授内容，理解黑体和灰体表面间的辐射换热的基本概念及相关计算。	利用课件和图片等让学生掌握黑体和灰体辐射换热的计算。
第三步 (5分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

第九章 辐射换热计算

第一节 黑表面间的辐射换热

一、任意位置两非凹黑表面间的辐射换热

1. 黑表面间的辐射换热

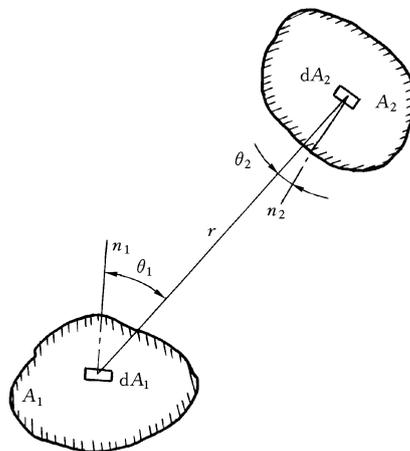


图 9-1 任意位置两非凹黑表面的辐射换热

$$d^2\Phi_{dA_1-dA_2} = I_{b1} dA_1 \cos \theta_1 d\omega_1$$

$$E_{b1} = \pi I_{b1};$$

$$d\omega_1 = \frac{dA_2 \cos \theta_2}{r^2}$$

$$d^2\Phi_{dA_1-dA_2} = E_{b1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

$$d^2\Phi_{dA_2-dA_1} = E_{b2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

$$d^2\Phi_{dA_1, dA_2} = d^2\Phi_{dA_1-dA_2} - d^2\Phi_{dA_2-dA_1} = (E_{b1} - E_{b2}) \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

$$\Phi_{1,2} = \iint_{A_1 A_2} d^2\Phi_{dA_1, dA_2} = (E_{b1} - E_{b2}) \iint_{A_1 A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (9-1)$$

2. 角系数

$$X_{dA_1, dA_2} = \frac{d^2\Phi_{dA_1-dA_2}}{d\Phi_{dA_1}} = \frac{E_{b1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2}{E_{b1} dA_1} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_2$$

$$X_{dA_1, A_2} = \frac{d^2\Phi_{dA_1-A_2}}{d\Phi_{dA_1}} = \frac{\int_{A_2} d^2\Phi_{dA_1-dA_2}}{d\Phi_{dA_1}} = \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_2$$

$$X_{1,2} = \frac{\Phi_{A_1-A_2}}{\Phi_{A_1}} = \frac{\iint_{A_1 A_2} d^2\Phi_{dA_1-dA_2}}{\Phi_{A_1}} = \frac{1}{A_1} \iint_{A_1 A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (9-2a)$$

$$X_{2,1} = \frac{\Phi_{A_2-A_1}}{\Phi_{A_2}} = \frac{1}{A_2} \iint_{A_1 A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (9-2b)$$

$$X_{1,2} A_1 = X_{2,1} A_2 \quad (9-3)$$

3. 辐射空间热阻

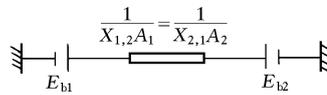


图 9-2 辐射空间热阻

$$\Phi_{1,2} = (E_{b1} - E_{b2}) X_{1,2} A_1 = (E_{b1} - E_{b2}) X_{2,1} A_2 \quad (9-4)$$

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{X_{1,2} A_1}}$$

$$\Phi_{1,2} = (E_{b1} - E_{b2}) A = \sigma_b (T_1^4 - T_2^4) A$$

二、封闭空腔诸黑表面间的辐射换热

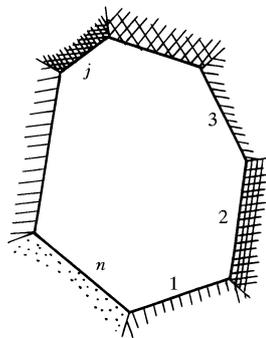


图 9-3 多个黑表面组成的空腔

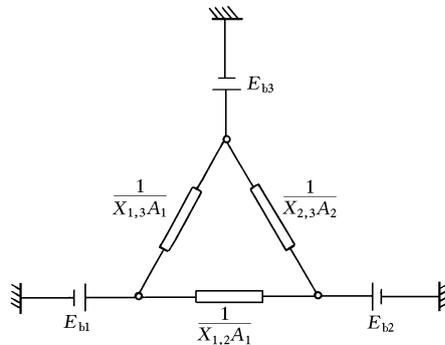


图 9-4 三个黑表面组成空腔的辐射网络

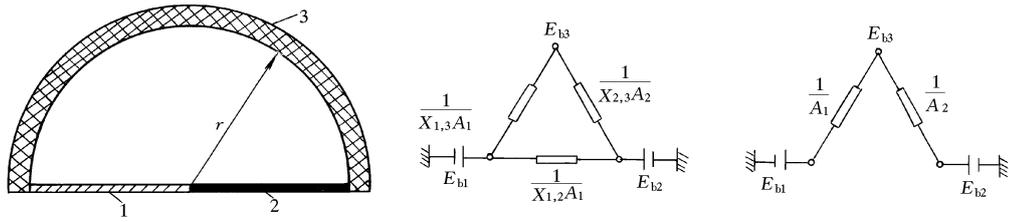


图 9-5 例 9-1 附图

$$\Phi_i = \Phi_{i,1} + \Phi_{i,2} + \dots + \Phi_{i,n} = \sum_{j=1}^n \Phi_{i,j}$$

将上式除以 Φ_i ，按角系数定义，可得

$$1 = X_{i,1} + X_{i,2} + \dots + X_{i,n} = \sum_{j=1}^n X_{i,j} \quad (9-5)$$

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \sum_{j=1}^n \Phi_{i,j} = \sum_{j=1}^n (E_{b_i} - E_{b_j}) X_{i,j} A_i = \sum_{j=1}^n E_{b_i} X_{i,j} A_i - \sum_{j=1}^n E_{b_j} X_{i,j} A_i \\ \Phi_i &= E_{b_i} A_i - \sum_{j=1}^n E_{b_j} X_{j,i} A_j \end{aligned} \quad (9-6)$$

第二节 灰表面间的辐射换热

一、有效辐射

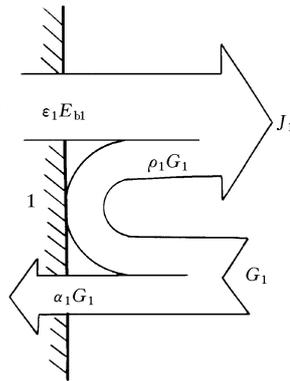


图 9-6 有效辐射示意图

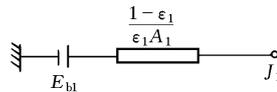


图 9-7 辐射表面热阻

1. 有效辐射

$$J_1 = \epsilon_1 E_{b1} + \rho_1 G_1 = \epsilon_1 E_{b1} + (1 - \alpha_1) G_1 \quad \text{W/m}^2 \quad (a)$$

2. 辐射表面热阻

$$\frac{\Phi_1}{A_1} = J_1 - G_1 = \epsilon_1 E_{b1} - \alpha_1 G_1 \quad \text{W/m}^2 \quad (b)$$

$$\Phi_1 = \frac{\epsilon_1}{1 - \epsilon_1} A_1 (E_{b1} - J_1) = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} \quad \text{W} \quad (9-7)$$

二、组成封闭腔的两灰表面间的辐射换热

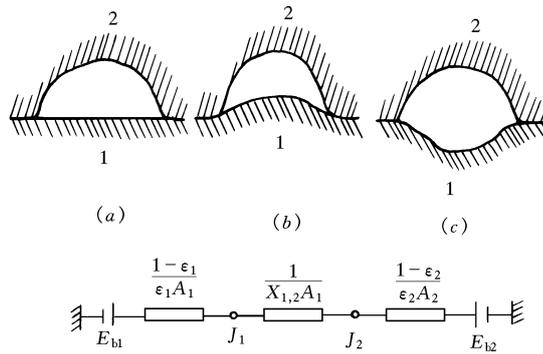


图 9-8 两个灰表面组成封闭腔的辐射换热网络

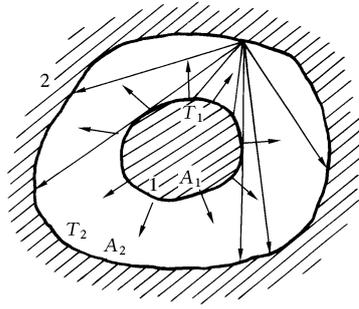


图 9-9 空腔与内包壁面间的辐射换热

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{X_{1,2} A_1} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad W \quad (9-8a)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{1,2} &= \frac{A_1 (E_{b1} - E_{b2})}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \\ &= \epsilon_s X_{1,2} A_1 (E_{b1} - E_{b2}) \quad W \end{aligned} \quad (9-8b)$$

$$\epsilon_s = \frac{1}{1 + X_{1,2} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) + X_{2,1} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}$$

1. 无限大平行灰平壁的辐射换热

$A_1 = A_2 = A$, 且 $X_{1,2} = X_{2,1} = 1$,

$$\Phi_{1,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = \epsilon_s A \sigma_b (T_1^4 - T_2^4) \quad W \quad (9-9)$$

$$\epsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

2. 其中一个表面为平面或凸表面的辐射换热

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1 (E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \quad W \quad (9-10)$$

$A_2 \gg A_1$, 且 ϵ_2 的数值较大

$$\Phi_{1,2} = \epsilon_1 A_1 (E_{b1} - E_{b2}) \quad W \quad (9-11)$$

三、封闭空腔中诸灰表面间的辐射换热

1. 网络法求解

四、遮热板

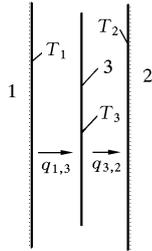
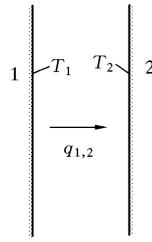


图 9-14 遮热板原理

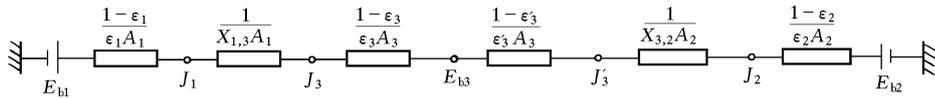


图 9-15 两平行大平壁或管壁中间有一块遮热板时的辐射网络

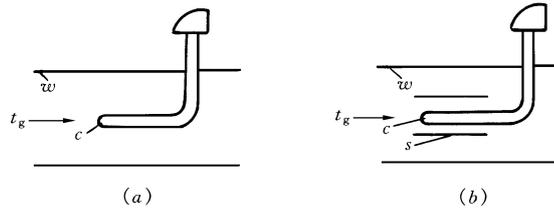


图 9-16 例 9-8 附图

$$q_{1,2} = \frac{\sigma_b(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (1)$$

$$q_{1,3} = \frac{\sigma_b(T_1^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1} \quad (2)$$

$$q_{3,2} = \frac{\sigma_b(T_3^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (3)$$

稳态

$$q_{1,3} = q_{3,2} = q_{1,2}$$

$$T_3^4 = \frac{1}{2}(T_1^4 + T_2^4)$$

$$q_{1,2} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_b(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4)$$

第三节 角系数的确定方法

一、积分法确定角系数

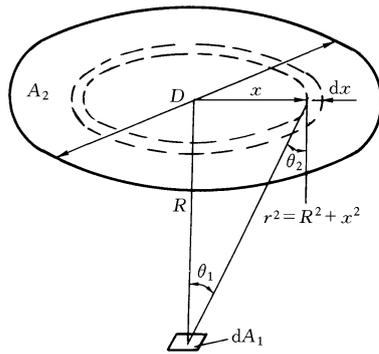


图 9-17 确定角系数的积分方法示例

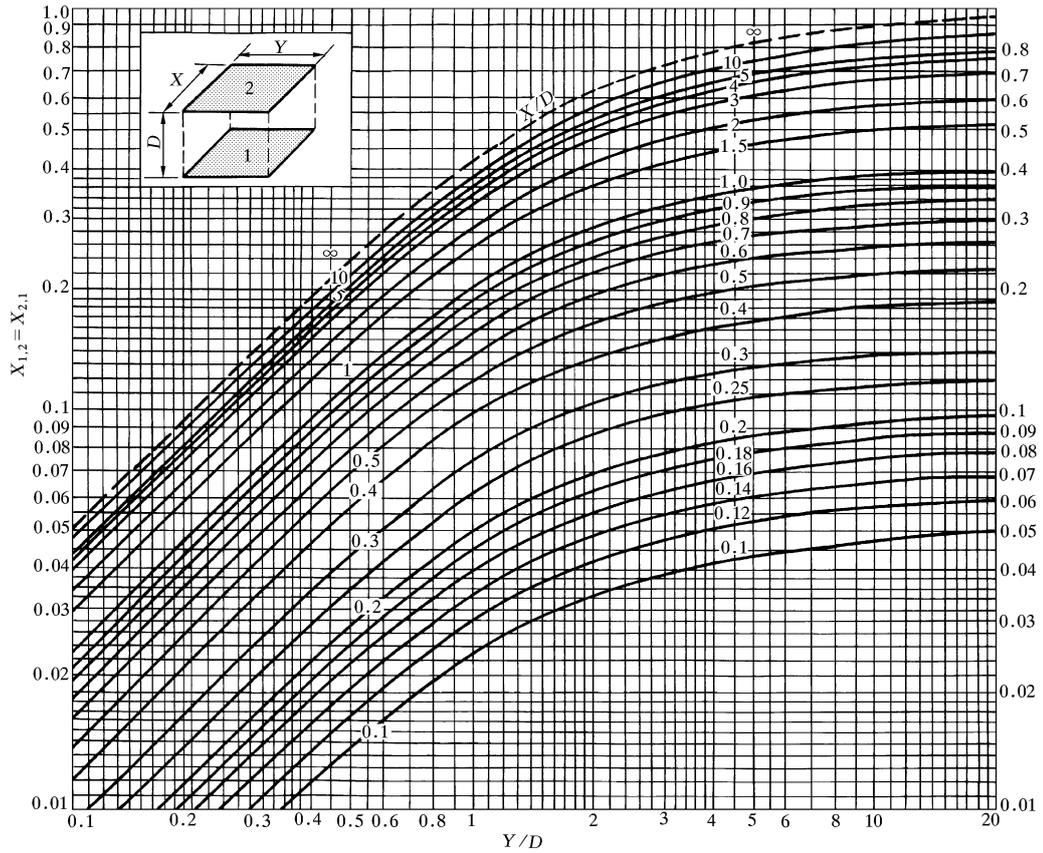


图 9-18 平行长方形表面间的角系数

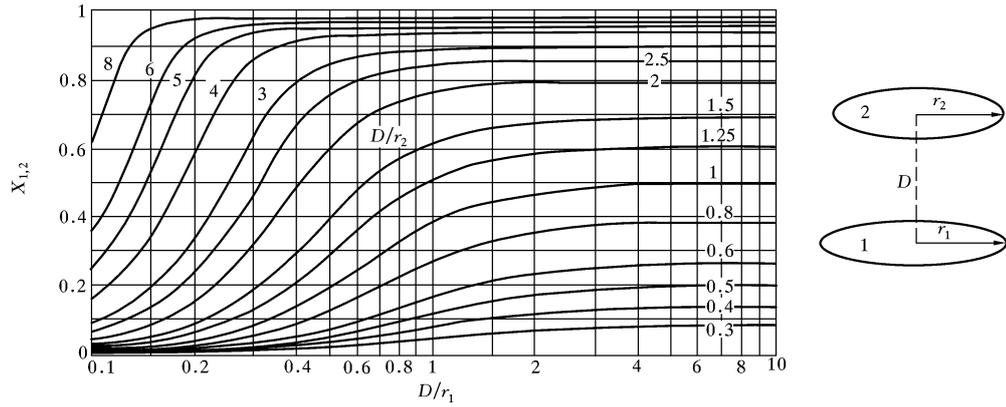


图 9-19 两同轴平行圆盘间的角系数

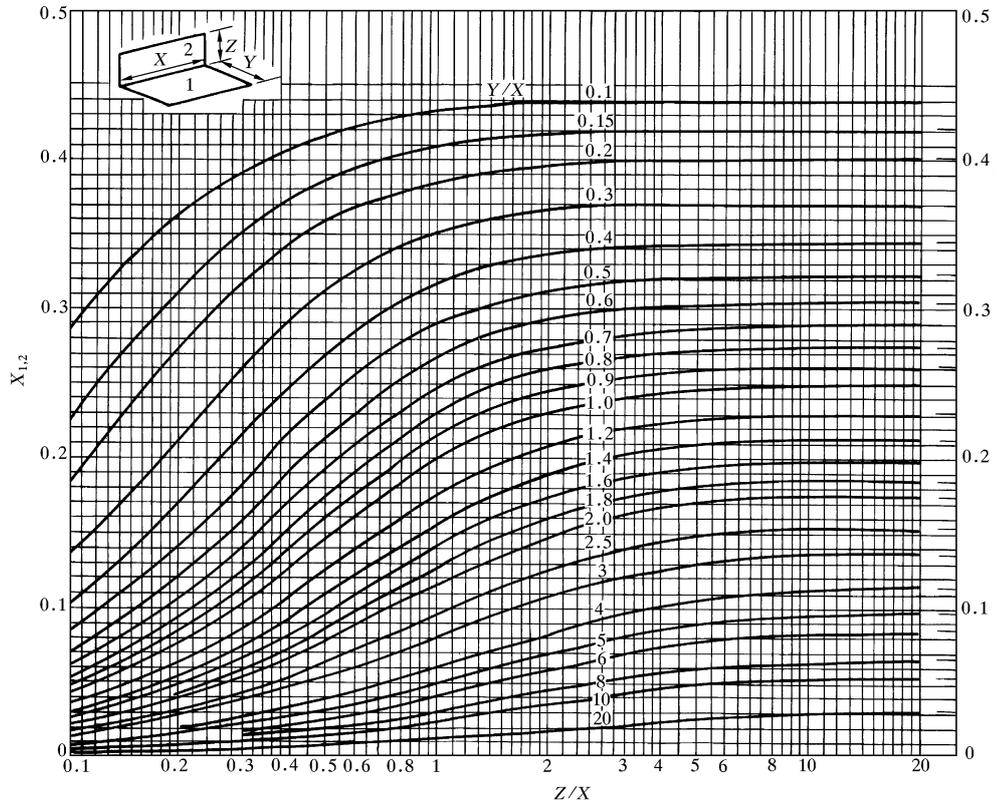


图 9-20 相互垂直两长方形表面间的角系数

$$\theta_1 = \theta_2, \quad r = \sqrt{R^2 + x^2}, \quad \cos \theta_1 = \cos \theta_2 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

$$X_{dA_1, A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2$$

$$= \int_{A_2} \frac{R^2 2\pi x dx}{\pi (R^2 + x^2)^2}$$

$$= R^2 \int_0^{D/2} \frac{dx^2}{(R^2 + x^2)^2}$$

$$= -R^2 \left[\frac{1}{R^2 + x^2} \right]_0^{D/2}$$

$$= \frac{D^2}{4R^2 + D^2}$$

二、代数法确定角系数

$$A_i X_{i,j} = A_j X_{j,i}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{i,j} = 1 \quad i=1, 2, \dots, n$$

$$A_1 X_{1,2} = A_3 X_{3,2} + A_4 X_{4,2} \quad (9-17a)$$

$$A_1 X_{1,2} = A_1 X_{1,5} + A_1 X_{1,6} \quad (9-17b)$$

$$A_i X_{i,j} = \sum_{k=1}^n \sum_{p=1}^m A_{ik} X_{ik,jp} \quad (9-17c)$$

3 个非凹形表面

$$X_{1,2}A_1 + X_{1,3}A_1 = A_1$$

$$X_{2,1}A_2 + X_{2,3}A_2 = A_2 \quad (1)$$

$$X_{3,1}A_3 + X_{3,2}A_3 = A_3$$

$$X_{1,2}A_1 = X_{2,1}A_2$$

$$X_{1,3}A_1 = X_{3,1}A_3 \quad (2)$$

$$X_{2,3}A_2 = X_{3,2}A_3$$

$$X_{1,2}A_1 + X_{1,3}A_1 + X_{2,3}A_2 = (A_1 + A_2 + A_3) / 2$$

$$X_{2,3}A_2 = (A_2 + A_3 - A_1) / 2$$

$$X_{1,3}A_1 = (A_1 + A_3 - A_2) / 2$$

$$X_{1,2}A_1 = (A_1 + A_2 - A_3) / 2$$

$$\left. \begin{aligned} X_{1,2} &= \frac{A_1 + A_2 - A_3}{2A_1} \\ X_{1,3} &= \frac{A_1 + A_3 - A_2}{2A_1} \\ X_{2,3} &= \frac{A_2 + A_3 - A_1}{2A_2} \end{aligned} \right\} \quad (9-18)$$

$$X_{ab,ac} = \frac{ab+ac-bc}{2ab} \quad (4)$$

$$X_{ab,bd} = \frac{ab+bd-ad}{2ab} \quad (5)$$

$$X_{ab,cd} = \frac{(bc+ad)-(ac+bd)}{2ab} \quad (9-19)$$

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑		任课教师	魏朝晖	
授课题目	第九章-辐射换热 2- 气体辐射及太阳辐射			授课时间长度	90 分钟
授课进度	第 13 周, 总第 25-26 次		授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	知识目标	理解气体辐射特点, 了解影响气体辐射发射率的因素, 能应用图表计算二氧化碳、水蒸气混合物的发射率、吸收比。了解温室效应原理。			
	能力目标	目标 1	能利用本次课学习内容分析总结生产、生活中的气体和太阳辐射换热的特点		
		目标 2	能分析生产、生活中的气体和太阳辐射换热的现象		
	德育目标	教育学生节省能源, 努力学习, 提高能源利用率			
教学重难点	<p>重难点: 气体辐射特点、气体辐射发射率的因素、二氧化碳、水蒸气混合物的发射率、吸收比。</p> <p>解决: 结合锅炉辐射讲解。</p>				
教学方法分析	采用生讲生评的教学方法。				
	教学方式: 讲授 <input type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
教学手段分析	多媒体、板书				
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
过程设计	引导 2 分钟; 讨论与提问 68 分钟; 优秀组授课 15 分钟; 集中讲解疑难问题 45 分钟; 测试 25 分钟; 讲解测试题 18 分钟; 总结及布置作业 2 分钟。				
教学步骤设计					
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图	
第一步 (2 分钟)	说明课堂安排, 讲解本次学生授课的要求。	口述本次课安排与要求。	听教师课堂安排。	让学生了解本次课讨论内容及课堂安排。	
第二步 (78 分钟)	实施生讲生评的教学。	教师认真旁听每组讲解与评价情况, 及时记录。	分组讲解所负责的内容, 全班提问, 评价组进行点评。	让学生成为课堂的主人, 教师引导学生主动思考。	

第三步 (10分钟)	总结	教师对本次生讲生评教 学进行总结。	学生根据教师的 总结了解自己的 优点与不足，并 思考如何改进。	引导学生主动思考 问题。
---------------	----	----------------------	--	-----------------

讨论问题

一、任务目标对课程目标的支持

课程 目标	课程目标内容	学习目标	
		1	2
目标1	能够运用从传热的角度解释生活、生产中常见的传热问题。	0.4	0.6
目标2	能够运用热量传递的基本概念、基本理论和基本计算方法发现工程中存在的常见传热问题，并能够运用传热学的知识提出初步解决方案	0.4	0.6
目标3	能够针对工程中存在的常见传热问题进行理论分析与计算，并得到较为合理的解决与改进方案。	0.4	0.6

二、分组

利用“雨课堂”或“学习通”分组功能课前分组。

三、“气体辐射及太阳辐射”思维导图



四、要求

1. 每组课前将本次课所有内容的 PPT 准备出来，课前考入讲课电脑（班级准备）。
2. 教师现场临时抽取讲解内容及评价组。

五、生讲生评评价书（附件 1）

作业内容

见学习通作业功能

效果分析与改进措施

预先设置问题，采用启发法和讨论法，引导学生主动思考一些传热问题，并分组讨论。针对气体和太阳辐射换热问题，提出一些生活、或生产的案例。通过雨课堂发布随堂习题，巩固所学内容，纠正易混淆的知识点。通过学习通上的微课，让学生进行课前预习和课后巩固，加深学习效果。

附件 1 生讲生评评价书

学生姓名_____

评价时间_____

评 分 项 目	分 值	评 分 标 准	自 评		互 评		教 师 评 价	
			扣 分	得 分	扣 分	得 分	扣 分	得 分
贡献度	30	自学情况（5分）						
		为同学解惑情况（5分）						
		回答题目情况（10分）						
		提出建设性问题情况（10分）						
参与度	20	课前讨论情况（5分）						
		课中讨论情况（10分）						
		整理资料情况（5分）						
协同度	20	听取他人意见情况（10分）						
		表述自己观点情况（10分）						
掌握情况	30	掌握了本次课所有知识点（10分）						
		利用本次课知识分析工程问题情况(15分)						
		对本次课问题提出建设性想法（5分）						
分项合计			/		/		/	
教师、自己、小组加权总分			教师评分×50%+评分×25%+互评×25%=					
课程换算分（5%）								

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第十章 传热过程与换热器 1		授课时间长度	90 分钟
授课进度	第 14 周, 总第 27 次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	知识目标	了解复合传热过程的计算方法, 了解辐射传热表面传热系数的概念。掌握传热过程的概念。掌握总传热系数及其核算面积以及传热量的计算方法。理解传热系数的组成, 掌握强化与削弱传热的原则和手段。掌握热阻分离方法, 了解污垢热阻及其工程确定方法。		
	能力目标	能应用热阻的概念分析综合性的热量传递过程。能对 1~2 个传热问题进行综合分析。		
	德育目标	教育学生节省能源, 努力学习, 提高能源利用率		
教学重点	传热过程, 强化与削弱传热, 总传热系数, 改变传热系数的各种方式。			
教学难点	传热过程			
教学方法分析	通过生产、生活实例, 引导学生思考强化与削弱传热的措施, 进而引出传热过程、总传热系数的内容。			
	教学方式: 讲授 <input checked="" type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体、板书			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	复习与引导 5 分钟; 授新课内容 80 分钟; 讨论与提问 0 分钟; 总结与布置作业 5 分钟			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图

第一步 (5分钟)	复习气体辐射特点、气体辐射发射率的因素、二氧化碳、水蒸气混合物的发射率、吸收比。	通过PPT复习上次内容，通过板书点出上次课重点内容。	通过教师的复习，巩固上次课学习内容。	巩固上次课学习内容，引入本次课内容。
第二步 (80分钟)	讲授新的课程内容：传热过程，强化与削弱传热，总传热系数，改变传热系数的各种方式。	采用板书与课件结合的方式，通过举生产、生活常见的例子，讲解强化与削弱传热的方法。	认真聆听老师讲授内容，理解传热过程、强化与削弱传热的方法。	利用课件和图片等让能应用热阻的概念分析综合性的热量传递过程。能对1~2个传热问题进行综合分析。。
第三步 (5分钟)	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容	随老师总结快速记忆和复习，记录作业内容。	全面总结复习，为下次课准备。	快速展示幻灯片和口头总结本次课程内容；板书布置作业内容

讲义

第一节 通过肋壁的传热

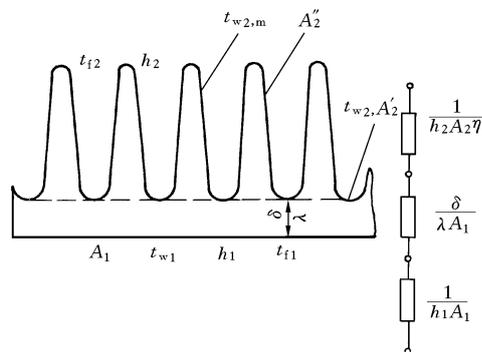


图 10-1 通过肋壁传热

$$\Phi = h_1 A_1 (t_{f1} - t_{w1}) \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} A_1 (t_{w1} - t_{w2}) \quad (2)$$

$$\Phi = h_2 A_2' (t_{w2} - t_{f2}) + h_2 A_2'' (t_{w2,m} - t_{f2}) \quad (3)$$

肋片效率

$$\eta_f = \frac{h_2 A_2'' (t_{w2,m} - t_{f2})}{h_2 A_2'' (t_{w2} - t_{f2})} = \frac{t_{w2,m} - t_{f2}}{t_{w2} - t_{f2}} \quad (4)$$

$$\Phi = h_2 (A_2' + A_2'' \eta_f) (t_{w2} - t_{f2}) = h_2 A_2 \eta (t_{w2} - t_{f2}) \quad (5)$$

肋壁总效率 $\eta = \frac{A_2' + A_2'' \eta_f}{A_2}$ 。

肋壁传热公式:

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\delta}{\lambda A_1} + \frac{1}{h_2 A_2 \eta}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{A_1}{h_2 A_2 \eta}} A_1 \quad \text{W} \quad (10-1)$$

$$\Phi = k_1 A_1 (t_{f1} - t_{f2}) \quad \text{W} \quad (10-2)$$

k_1 —光壁面面积 A_1 为基准的传热系数

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2 \beta \eta}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (10-3)$$

$$\beta = \frac{A_2}{A_1}$$

k_2 — A_2 为基准的传热系数, 用 k_2 表示, 即

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{A_2}{h_1 A_1} + \frac{\delta A_2}{\lambda A_1} + \frac{1}{h_2 \eta}} A_2 = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} \beta + \frac{\delta}{\lambda} \beta + \frac{1}{h_2 \eta}} A_2 = k_2 A_2 (t_{f1} - t_{f2})$$

式中:

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} \beta + \frac{\delta}{\lambda} \beta + \frac{1}{h_2 \eta}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (10-5)$$

对 k_1 热阻 $(\frac{\delta}{\lambda} + R_f)$

对 k_2 热阻 $(\frac{\delta}{\lambda} + R_f)\beta$

第二节 复合换热时的传热计算

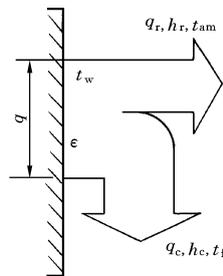


图 10-2 复合换热

对流与辐射并存的换热称为“复合换热”

对流换热: $q_c = h_c (t_w - t_f) \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1)$

辐射换热: $q_r = \varepsilon C_b \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{am}}{100} \right)^4 \right] \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (2)$

$$q_r = \left. \begin{aligned} &\varepsilon \cdot C_b \frac{\left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{am}}{100} \right)^4 \right]}{t_w - t_f} (t_w - t_f) \\ &= h_r (t_w - t_f) \end{aligned} \right\} \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (3) \quad h_r = \varepsilon$$

$$C_b \frac{T_w^4 - T_{am}^4}{T_w - T_f} \times 10^{-8} \quad (10-6)$$

复合换热热:

$$q = q_c + q_r = (h_c + h_r)(t_w - t_f) = h(t_w - t_f) \quad (10-7)$$

传热的增强和削弱

一、增强传热的原则

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}} = \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}$$

$$\frac{h_1}{h_1 + h_2} \text{ 或 } \frac{h_2}{h_1 + h_2} < 1。$$

1. 扩展传热面
2. 改变流动状况
 - (1) 增加流速
 - (2) 流道中加插入物增强扰动
 - (3) 采用旋转流动装置
 - (4) 采用射流方法喷射传热表面
3. 改变流体物性
4. 改变表面状况
 - (1) 增加粗糙度
 - (2) 改变表面结构
 - (3) 表面涂层
5. 改变换热面形状和大小

6. 改变能量传递方式

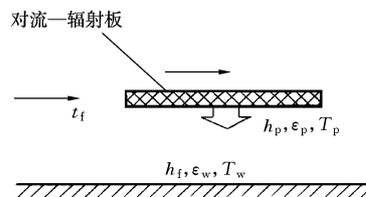


图 10-3 对流-辐射板

7. 靠外力产生振荡，强化换热

- (1) 用机械或电的方法产生振动；
- (2) 施加声波或超声波，增加脉动；
- (3) 外加静电场；

二、削弱传热的原则

1. 覆盖热绝缘材料

- (1) 泡沫热绝缘材料
- (2) 超细粉末热绝缘材料，粒径 $d < 10 \mu m$ 量级
- (3) 真空热绝缘层 真空达 $10^{-4} Pa$ 或更低。多层真空屏蔽夹层的热绝缘体，表观导热系数可达 $1.6 \times 10^{-4} \sim 10^{-5} W/(m \cdot K)$ 。(12~150 层，密度 $40 kg/m^3$, $-120^\circ C$)。

2. 改变表面状况和材料结构

- (1) 改变表面的辐射特性采用选择性涂层；
- (2) 附加抑制对流的元件
- (3) 在

保温材料表面或内部添加憎水剂，使其不吸湿不受潮，对室外保温工程特别有利；(4) 利用空气夹层隔热。

第四节 换热器的型式和基本构造

一、管壳式换热器

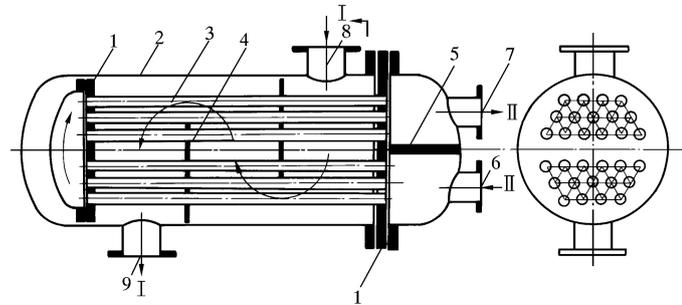


图 10-4 管壳式换热器示意图

1-管板； 2-外壳； 3-管子； 4-挡板 5-隔板；
6、7-管程进口及出口； 8、9-壳程进口及出口

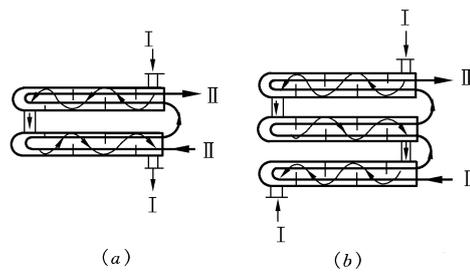


图 10-5 多壳程与多管程换热器

(a) 2 壳程 4 管程； (b) 3 壳程 6 管程

二、肋片管式换热器

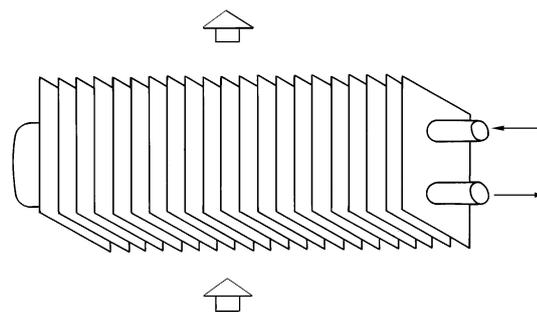


图 10-6 肋片管式换热器

三、板式换热器

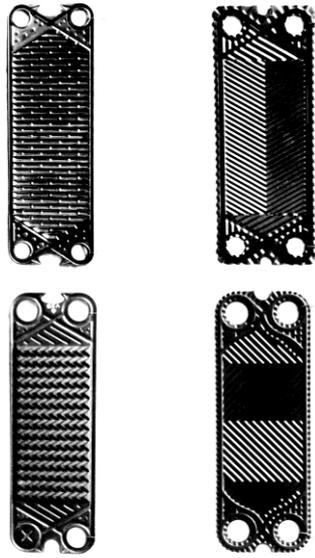


图 10-7 板式换热器的板片

四、板翅式换热器

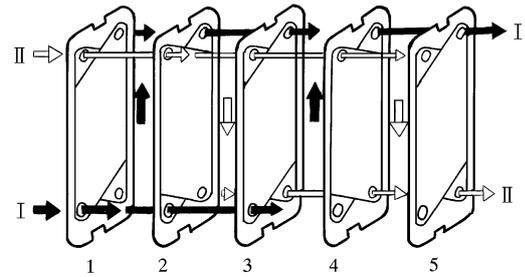


图 10-8 板式换热器工作原理图

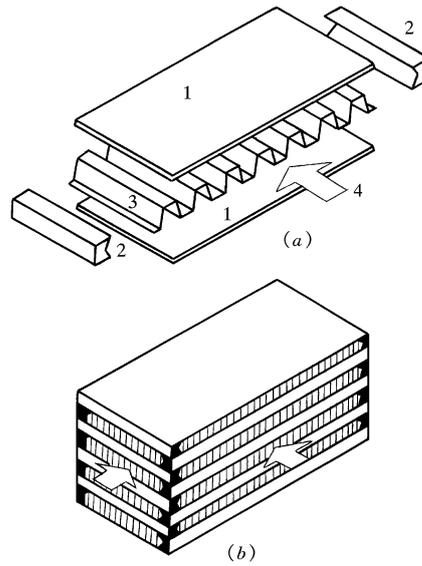


图 10-9 板翅式换热器结构原理

1-平隔板；2-侧条；3-翅片；4-流体

五、螺旋板式换热器

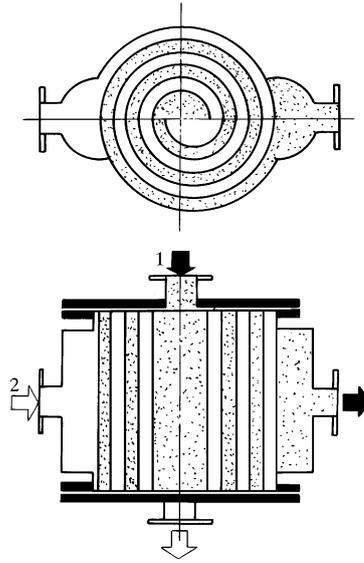


图 10-10 螺旋板换热器结构原理

作业内容

见教材

效果分析与改进措施

传热学 课程授课教案

课程号: B0410070

学院	能源与建筑	任课教师	魏朝晖	
授课题目	第十章 传热过程与换热器 2-间壁式换热器的热计算		授 课 时间长度	_ 90 _ 分钟
授课进度	第_14_周, 总第_28_次	授课对象	能源动力 181/182, 建筑环境 181	
教学目标	知识目标	理解对数平均温差法和效能——传热单元数法的推导和掌握其计算方法。		
	能力目标	目标 1	能用平均温差法进行换热器的热计算	
		目标 2	能用效能——传热单元数法进行换热器的热计算	
	德育目标	教育学生节省能源, 努力学习, 提高能源利用率		
教学重难点	重难点 1 : 平均温差法。 解决 : 板书、多媒体结合, 对概念讲解透彻, 并举例。			
	重难点 2 : 效能——传热单元数法。 解决 : 板书、多媒体结合, 对概念讲解透彻, 并举例。			
教学方法分析	主要分组讨论法, 教师旁听提问; 个别组上讲台; 教师就学生遇到疑难问题集中讲解。			
	教学方式: 讲授 <input type="checkbox"/> 探究 <input checked="" type="checkbox"/> 问答 <input checked="" type="checkbox"/> 实验 <input type="checkbox"/> 演示 <input type="checkbox"/> 练习 <input type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
教学手段分析	多媒体、板书			
	教学手段: 板书 <input checked="" type="checkbox"/> 多媒体 <input checked="" type="checkbox"/> 模型 <input type="checkbox"/> 实物 <input type="checkbox"/> 标本 <input type="checkbox"/> 挂图 <input type="checkbox"/> 音像 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
授课类型	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 练习课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>			
过程设计	引导_2_分钟; 讨论与提问_68_分钟; 优秀组授课_15_分钟; 集中讲解疑难问题_45_分钟; 测试_25_分钟; 讲解测试题_18_分钟; 总结及布置作业_2_分钟。			
教学步骤设计				
步骤时间	主要任务	教师活动	学生活动	目的意图
第一步 (2分钟)	说明课堂安排, 公布本次课需要讨论的问题。	口述本次课安排, 公布本次课讨论题目。	听教师课堂安排。	让学生了解本次课讨论内容及课堂安排。
第二步 (68分钟)	讨论教师设置的题目。	教师认真旁听每组讨论情况, 并现场提问; 记录每组讨论情况, 梳理学生疑难问题; 选出优秀2组。	分组讨论教师设置的题目, 并回答教师提出的问题。	让学生成为课堂的主人, 教师引导学生主动思考。
第三步 (15分钟)	优秀组展示	教师认真听优秀组授课, 并点评。	优秀组就个别问题给全班问题授	引导学生想优秀组学习, 勾起学生上进

			课。全班学生听取教师对优秀组点评。	心。
第四步 (45 分钟)	讲解疑难问题	教师现场讲解学生集中存在问题的知识点。	学生认真听教师讲解疑难问题。	解答学生集中存在的疑问。
第五步 (25 分钟)	测试讨论情况	教师现场公布测试题	学生答测试题	考核学生对知识点掌握情况
第六步 (18 分钟)	讲解测试题	教师现场讲解测试题，并与学生现场讨论。	学生听讲，并与教师现场讨论疑问	引导学生主动思考问题，并回答学生疑问。
第一步 (2 分钟)	说明课堂安排，公布本次课需要讨论的问题。	口述本次课安排，公布本次课讨论题目。	听教师课堂安排。	让学生了解本次课讨论内容及课堂安排。

讨论问题

六、任务目标对课程目标的支持

课程目标	课程目标内容	学习目标	
		1	2
目标1	能够运用从传热的角度解释生活、生产中常见的传热问题。	0.5	0.5
目标2	能够运用热量传递的基本概念、基本理论和基本计算方法发现工程中存在的常见传热问题，并能够运用传热学的知识提出初步解决方案	0.5	0.5
目标3	能够针对工程中存在的常见传热问题进行理论分析与计算，并得到较为合理的解决与改进方案。	0.5	0.5

七、分组

利用“雨课堂”或“学习通”分组功能课前分组。

八、“间壁式换热器的热计算”思维导图

九、讨论任务书

1. 任务书见附件 1

2. 讨论题目

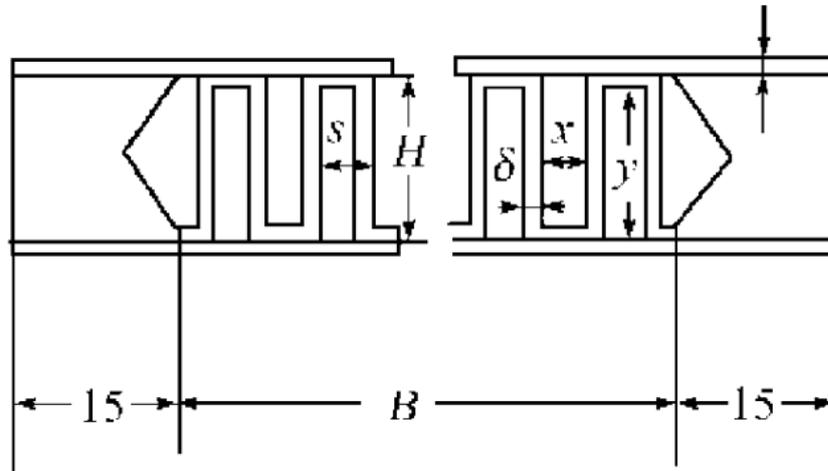
(1) 试对固定管板的管壳式煤油冷却器进行传热计算、结构计算和阻力计算。在该热交换器中, 要求将 14t/h 的 T-1 煤油由 140℃冷却到 40℃, 冷却水的进、出口水温为 30℃和 40℃, 煤油的工作表压力为 0.1 MPa, 水的工作表压力为 0.3 MPa。

(2) 试设计一台螺旋板式热交换器, 将质量流量 3000 kg/h 的煤油从 $t_1' = 140^\circ\text{C}$ 冷却到 $t_1'' = 40^\circ\text{C}$ 。冷却水入口温度 $t_2' = 30^\circ\text{C}$, 冷却水量为 $M_2 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(3) 今欲将流量为 900 kg/h 的热水从 110℃冷却到 40℃, 冷水的入口温度为 35℃, 出口温度为 65℃, 压降最大不超过 50 kPa, 试进行一台板式热交换器热力设计计算。

(4) 试设计一台空分装置板翅式液态空气过冷器(液态空气与氮气的换热)。已知的其原始设计数据为: 热负荷 $Q = 85545 \text{ J/s}$, 氮气流量 $V_{N_2} = 23500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (N 指标准状态下

流量), 氮气平均压力 $P_{N_2} = 123kPa$, 氮气进口温度 $t'_c = 80.6K$ 及出口温度 $t''_c = 90K$. 氮气侧允许压降 $\Delta P = 2kPa$. 液态空气流量 $V_A = 16500 Nm^3/h$, 平均压力 $P_A = 0.554MPa$, 进口温度 $t'_h = 99.5K$, 出口温度 $t''_h = 92.6K$ (如下图)。



十、讨论过程评价书 (附件 2)

作业内容

见学习通作业功能

效果分析与改进措施

预先设置问题, 采用启发法和讨论法, 引导学生主动思考一些传热问题, 并分组讨论。针对对数平均温差法和效能——传热单元数法, 提出一些生活、或生产的案例。通过雨课堂发布随堂习题, 巩固所学内容, 纠正易混淆的知识点。通过学习通上的微课, 让学生进行课前预习和课后巩固, 加深学习效果。

附件 1 讨论任务书

讨论章节	间壁式换热器的热计算		
学习小组		组长	各小组自定
小组成员			
激励口号	各小组自定		
任务安排计划：各小组自定			
组长职责：各小组自定			
纪律制度：各小组自定			
讨论任务	<p>1. 自定组织及分工</p> <p>2. 讨论题目</p> <p>(1) 试对固定管板的管壳式煤油冷却器进行传热计算、结构计算和阻力计算。在该热交换器中, 要求将 14t/h 的 T-1 煤油由 140℃ 冷却到 40℃, 冷却水的进、出口水温为 30℃ 和 40℃, 煤油的工作表压力为 0.1 MPa, 水的工作表压力为 0.3 MPa。</p> <p>(2) 试设计一台螺旋板式热交换器, 将质量流量 3000 kg/h 的煤油从 $t'_1 = 140^\circ\text{C}$ 冷却到 $t''_1 = 40^\circ\text{C}$。冷却水入口温度 $t'_2 = 30^\circ\text{C}$, 冷却水量为 $M_2 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$。</p> <p>(3) 今欲将流量为 900 kg/h 的热水从 110℃ 冷却到 40℃, 冷水的入口温度为 35℃, 出口温度为 65℃, 压降最大不超过 50 kPa, 试进行一台板式热交换器热力设计计算。</p> <p>(4) 试设计一台空分装置板翅式液态空气过冷器(液态空气与氮气的换热)。已知的其原始设计数据为: 热负荷 $Q = 85545 \text{ J/s}$, 氮气流量 $V_{N_2} = 23500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (N 指标准状态下流量), 氮气平均压力 $P_{N_2} = 123 \text{ kPa}$, 氮气进口温度 $t'_c = 80.6 \text{ K}$ 及出口温度 $t''_c = 90 \text{ K}$。氮气侧允许压降 $\Delta P = 2 \text{ kPa}$。液态空气流量 $V_A = 16500 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 平均压力 $P_A = 0.554 \text{ MPa}$, 进口温度 $t'_h = 99.5 \text{ K}$, 出口温度 $t''_h = 92.6 \text{ K}$ (如下图)。</p>		

	<p>3. 评价。</p> <p>评价学生自评、小组互评和教师总结评价</p>
要 求	<ol style="list-style-type: none">1. 寻找自己的合作对象，以 4—5 人为一小组。2. 确定组名和口号，提出纪律要求。3. 选出小组长，制订、明确组长职责。4. 探讨交流制订小组的任务安排计划。5. 小组在思维导图、任务书的指导下，自学 MOOC 视频、查找相关资料、讨论疑难点、讨论题目，务必做到人人掌握本次课内容。6. 及时记录、讨论过程中碰到的问题。7. 认真写好学习笔记和心得体会。

附件2 讨论过程评价书

学生姓名_____

评价时间_____

评 分 目 录	分值	评 分 标 准	自评		互评		教师评价	
			扣分	得分	扣分	得分	扣分	得分
贡献度	30	自学情况（5分）						
		为同学解惑情况（5分）						
		回答题目情况（10分）						
		提出建设性问题情况（10分）						
参与度	20	课前讨论情况（5分）						
		课中讨论情况（10分）						
		整理资料情况（5分）						
协同度	20	听取他人意见情况（10分）						
		表述自己观点情况（10分）						
掌握情况	30	掌握了本次课所有知识点（10分）						
		利用本次课知识分析工程问题情况(15分)						
		对本次课问题提出建设性想法（5分）						
分项合计			/		/		/	
教师、自己、小组加权总分		教师评分×50%+评分×25%+互评×25%=						
课程换算分（5%）								

附件 8 最近一学期学生评教结果统计

“传热学”学生评教记录

序号	学期	开课单位	课程名称	教师工号	教师姓名	班级名称	评价时间	学生评教分数
1	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2020-12-29 16:17:32.0	100
2	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2020-12-28 16:24:42.0	100
3	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-23 09:37:38.0	100
4	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2021-01-05 13:15:13.0	100
5	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-23 19:20:23.0	100
6	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-23 09:43:53.0	100
7	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-23 09:39:51.0	100
8	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 14:12:51.0	100
9	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-23 09:34:49.0	100
10	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 16:14:41.0	100
11	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-23 18:42:19.0	100
12	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-23 09:59:45.0	100
13	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 16:25:14.0	100
14	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 21:54:59.0	100
15	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-29 16:52:41.0	100
16	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2021-01-05 13:38:38.0	100
17	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-11-14 12:32:00.0	100
18	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2020-12-29 20:00:47.0	100
19	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 16:23:00.0	100
20	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2021-01-06 16:01:08.0	100
21	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-28 16:59:08.0	99.8
22	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 21:55:24.0	99.7
23	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-25 18:04:23.0	99.5
24	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 18:29:08.0	99.2
25	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2021-01-06 16:11:30.0	99
26	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 17:37:55.0	99
27	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 20:15:55.0	98.8
28	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-23 13:13:36.0	98.8
29	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-28 18:10:18.0	98.1
30	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2020-12-31 08:28:03.0	98.1
31	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2021-01-05 13:25:20.0	98.1
32	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-23 09:43:20.0	96.4
33	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2020-12-28 20:06:07.0	96
34	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-28 16:56:39.0	95.1
35	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力182	2021-01-05 11:40:40.0	94.6
36	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-23 21:49:30.0	94
37	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力181	2020-12-23 21:50:25.0	93.7

序号	学期	开课单位	课程名称	教师工号	教师姓名	班级名称	评价时间	学生评教分数
38	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-23 10:02:50.0	93.6
39	2020-2021-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	建筑环境181	2020-12-23 09:56:47.0	92.9
学期平均分								98.57

序号	学期	开课单位	课程名称	教师工号	教师姓名	班级名称	评价时间	学生评教分数
1	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-17 00:32:55.0	100
2	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2109	2019-11-21 07:41:16.0	100
3	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-16 15:16:14.0	100
4	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-16 14:53:41.0	100
5	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-21 07:25:11.0	100
6	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-17 22:56:29.0	100
7	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-16 19:09:44.0	100
8	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-18 13:17:55.0	100
9	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-16 18:27:14.0	100
10	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2109	2019-11-24 12:09:58.0	100
11	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-18 00:40:10.0	100
12	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2109	2019-11-24 11:58:18.0	100
13	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-16 19:08:25.0	100
14	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2109	2019-11-24 12:05:07.0	100
15	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-17 14:52:08.0	99.4
16	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-17 00:35:14.0	99.3
17	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2109	2019-11-18 23:05:51.0	99.2
18	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-17 00:35:55.0	99.2
19	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-17 00:34:23.0	99.2
20	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-17 00:33:24.0	98.8
21	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-16 14:00:11.0	97.8
22	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2109	2019-11-19 11:21:31.0	97.8
23	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-16 19:28:55.0	97.6
24	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2110	2019-11-16 13:53:30.0	97.5
25	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2109	2019-11-23 22:47:18.0	96.5
26	2019-2020-1	能源与建筑学院	传热学	200906001	魏朝晖	能源动力2109	2019-11-19 13:48:01.0	89
学期平均分								98.90

教学质量监控与评价处
2021年4月16日

附件 9 最近一次学校对课堂教学评价

西安航空学院《传热学》课程教学督导评价意见

课程名称	传热学	课程负责人	魏朝晖
督导姓名	张立玮	职务	教授

依托单位学术委员会学术性评价意见：

西安航空学院魏朝晖老师团队的《传热学》课程是能源与动力工程专业的专业技术基础课程。该课程与 2017 年以来，坚持采用“线上-线下混合式”教学，教学效果良好，获得了师生一致好评。该课程教学目标明确，教学资料（大纲、授课计划、教材、教案）完整，线上资源齐全、丰富。课程组教师结构合理，教师爱岗敬业、治学严谨，能有效的将理论与实践结合。该课程围绕“节能”的时代主题，以导热、对流换热和辐射换热的基本概念、原理和计算为基本内容，融入了一些“传热学”前沿性的知识，引用近些热门话题和案例，体现了该课程的时代性和前沿性。

该课程在组织与实施过程中，针对西安航空学院学生认知特点，有效地将马克思主义方法论融入课程教学中，线上实施学生自主学习，线下实施翻转课题与传统讲授相结合的方式，采用学习通、QQ 群等工具实现师生无障碍交流，教学环节规范，且有创意，课程评价采用过程性和终结性相结合的评价评价方式，且采用模糊层次分析法分析学生认知能力，充分体现了“以学生为中心”的理念。本人及校级督导组其他多位老师听课后，一致认为该课程组教师精神饱满，教学内容贴合时代主题，教学方法先进，教学设计合理，教学效果良好。

教学督导签名：张立玮

2021 年 4 月 29 日



西安航空学院能源与建筑学院对《传热学》的评价

《传热学》是能源与建筑学院中能源动力和建筑环境两个专业的专业基础课，经过多年的课程讲授、经验积累与改进优化，已经建立了较为优秀的教学团队，储备了较为丰富的教学资源，为本院优质课程库的积累和建立树立了一个参照和榜样。

授课教师基于多年的授课经验，并借鉴国内外知名院校的在该课程上的优势，同时总结分析本校生源的特点，经过不断的尝试和改进，形成了适合本校学生学习的授课模式。

1. 该课程针对地方应用型本科生的特点，以师生情感交流、情感共鸣等方式为手段，将“马克思主义方法论”融入《传热学》课程教学中，从思维高度、学习方法等方面提升学生认知能力，将传热知识与社科人文相结合，提升了学生的思维广度和深度。

2. 《传热学》课程以“节能减排”为核心，突出其在工程领域的应用性，依据陕西地方经济、社会的需求，优化导热、对流传热和辐射换热等《传热学》内容，抽象、提炼了生产、生活中最基本的传热案例作为基础学习内容，将闪蒸、热管等教师科学研究融入课程内容，从《传热学》的角度剖析当下中国所取得的一些科学成就，并探寻传热模型建立、求解等传热分析问题方法，总结热量传递地规律和应用场景。

3. 《传热学》课程以提升学生思维深度和学习能力为核心，引导学生使用“马克思主义方法论”分析问题和建立个人思维模型，并采用教师的教研成果分析学生认知能力，为学生下一步学习提供建议，有效的促进了学生认知能力的提升。

4. 《传热学》课程紧跟国家政策，追求时代先进性，积极体现 OBE 理念和课程思政特色，尤其是基于生活中的各类传热现象，提炼有趣的传热科学问题。该课程是西安航空学院率先“线上线下混合式”教学的课程之一，授课教师建立了精简、有趣且时长合理的视频课程，作为课下学习的辅助手段，帮助学生多角度得掌握和理解知识点。



西安航空学院能源与建筑学院
2020年12月20日

附件 10 教学实录视频-沸腾换热（备用）

如果评审视频无法打开，请访问下面网址。

网址：

<https://mooc1.chaoxing.com/nodedetailcontroller/visitnodedetail?courseId=204595738&knowledgeId=434515173>



附件 11 课程团队成员和课程内容政治审查意见

关于魏朝晖等同志的政治审查意见

魏朝晖，男，汉族，1980年11月21日生，陕西咸阳人，群众，西安航空学院教师。
周亮，女，汉族，1988年01月29日生，陕西西安人，中共党员，西安航空学院教师。
刘琰，男，汉族，1990年03月05日生，陕西韩城人，中共党员，西安航空学院教师。
张倩，女，汉族，1983年12月24日生，河南周口人，中共党员，西安航空学院教师。
何文博，男，汉族，1984年05月22日生，陕西洛南人，群众，西安航空学院教师。

以上5位同志在西安航空学院能源与建筑学院任职以来，拥护党的路线方针政策，坚持党的教育方针，关心时事，认真贯彻教书育人的思想，遵循教师职业道德规范，认真贯彻国家的教育方针，遵守学校的规章制度，忠诚于党的教育事业。在工作中，具有高度的责任心，严谨的工作作风和良好的思想素养，热爱、关心学生，帮助学生梳理正确的人生观、科学的世界观。

《传热学》课程为机械、航天、土建等工科专业的基础课，课程的所有资料均未发现有政治方向不正确、价值取向错误的部分。

中国共产党西安航空学院委员会

2021年5月15日



附件 12 课程内容学术性评价意见

《传热学》课程学术性评价意见

课程名称	传热学	课程负责人	魏朝晖
单位	西安航空学院	院系	能源与建筑学院

依托单位学术委员会学术性评价意见：

西安航空学院魏朝晖老师团队的《传热学》课程实施“线上-线下混合式”教学，教学效果良好。该课程定位准确，抓住地方应用型本科生学习效率低的痛点，将马克思主义方法论融入教学中，并采用模糊层次分析法评价学生认知能力，为学生个性化学习提供建议，改革与创新效果良好。课程瞄准国内外先进的教学体系、方法，并将教师的科研与教研成果融入课程内容，使得课程教学改革具有先进性、前沿性、适用性，具有较高的科学性水平。课程内容丰富，相对于地方应用性本科生具有一定的挑战度，在线资源齐全，可以满足在线教学要求。课程能够提取当下热点事件中蕴含的传热知识，及时更新教学案例，极大增强了学生学习兴趣。课程采用“学习通”将线上-线下教学有机结合起来，线上采用在线学习、讨论、辅导、答疑、测试题等，线下采用翻转课堂、讨论等多种形式，极大地提升了学生学习积极性。

该课程知识体系科学，资源配置全面合理，适合在线学习和混合式教学。课程教学方法科学，教学手段合理，评价方式先进，且能将一些学科新发展融入教学中，线上线下结合效果好，有效的提高了教学质量，具有一定的示范性和推广性。

评价组织：西安航空学院教学工作委员会
成员签名：

2021年5月10日

西安航空学院文件

西航院字〔2015〕162号

关于印发《西安航空学院 教育教学质量工程奖励办法（试行）》的通知

各单位：

《西安航空学院教育教学质量工程奖励办法（试行）》经学校研究通过，现印发给你们，请遵照执行。



2015年12月22日

西安航空学院教育教学质量工程奖励办法（试
行）

第一章 总则

第一条 为充分调动广大教职工从事教学工作的主动性和积极性,促进学校学科专业建设、课程及教材建设、实验室建设、人才培养模式创新、教育教学改革等,努力提高教育教学水平和人才培养质量,特制订本办法。

第二条 各类“质量工程项目”是指经过学校立项或上级文件所确定的教育教学项目,包括学科专业、课程教材、教学团队、实验室、教育教学成果、教学竞赛、学科技能竞赛等方面的各类项目。获奖项目是依据学校或上级教育主管部门的奖励文件或表彰决定,由教务处负责统计。

第三条 本办法奖励对象为我校各级各类教育教学获奖项目团队和获奖个人,其获奖个人和获奖项目团队成员的第一完成人(负责人)须是我校在职教职工。

第二章 奖励标准

第四条 学科专业、课程教材、教学团队、实验室、教育教学改革等方面的获奖项目,通过专业认证、学士学位评审等进行奖励,奖励标准如下:

序号	项目名称	项目级别	奖励金额(万元)
1	特色(重点)专业、专业综合改革	国家级	10.0
		省级	3.0
		校级	1.0
2	精品课程(开放课程、MOOCs、课程教学内容改革创新等)	国家级	6.0
		省级	3.0
		校级	1.0
3	教学团队	国家级	6.0
		省级	3.0
		校级	0.5

序号	项目名称	项目级别		奖励金额（万元）
4	教学名师	国家级		2.0
		省级		1.0
		校级		0.5
5	实验教学示范中心（重点实验室、虚拟仿真实验室、优秀实验室）	国家级		6.0
		省部级		3.0
		校级		0.5
6	人才培养模式创新实验区	国家级		6.0
		省级		3.0
		校级		0.5
7	双语教学示范课程	国家级		3.0
		省级		1.0
		校级		0.5
8	规划教材	国家级		2.0
		省级		1.0
9	优秀教材	国家级	一等奖	3.0
			二等奖	1.0
		省级	特等奖	2.0
			一等奖	1.0
			二等奖	0.5
		校级		0.3
10	教学成果奖	国家级	特等奖	50.0
			一等奖	30.0
			二等奖	15.0
		省级	特等奖	6.0
			一等奖	3.0
			二等奖	1.0
		校级	特等奖	1.0
			一等奖	0.5
			二等奖	0.2
11	通过专业认证	10.0（每专业）		
12	通过学士学位授权评审	1.0（每专业）		

第五条 教育教学改革项目

教育教学改革项目的奖励标准如下：

序号	项目名称	项目级别		奖励金额
1	教育教学改革项目	国家级	重大项目	按到账经费的 40%奖励，最高不超过 10.0 万元。
			重点项目	按到账经费的 35%奖励，最高不超过 6.0 万元。
			一般项目	按到账经费的 30%，最高不超过 3.0 万元。
		省部级	重大或攻关项目	按到账经费的 30%奖励，最高不超过 2.0 万元。
			重点	按到账经费的 35%奖励，最高不超过 1.0 万元。
			一般	按到账经费的 30%奖励，最高不超过 0.8 万元。

注：（1）以上教育教学改革项目的奖励须在完成结题后给予奖励。

（2）验收评定结果为优秀的项目在上述奖励标准基础上，奖金增加20%。

第六条 教学竞赛

各类教师教学竞赛获奖及教学质量优秀的奖励标准如下：

序号	项目名称	项目级别		奖励金额（万元）
1	微课竞赛	国家级	一等奖	2.0
			二等奖	1.0
			三等奖	0.6
			优秀奖	0.2
		省部级	一等奖	0.5
			二等奖	0.2
			三等奖	0.1
			优秀奖	0.05
		校级	一等奖	0.1
			二等奖	0.05

序号	项目名称	项目级别		奖励金额（万元）
2	教学竞赛	省级	一等奖	2.0
			二等奖	1.0
			三等奖	0.5
			优秀奖	0.1
		校级	一等奖	0.15
			二等奖	0.10
			三等奖	0.08
校级教坛新秀、优秀教师		0.3		
3	教学质量优秀	校级教学质量优秀		0.2
		校级优秀本科毕业设计（论文）指导教师		0.1
		校级优秀实习指导（带队）教师		0.1
		学生大学英语四级考试通过率（以历年本科最高通过率为基准）		每年递增1%奖励 1.0万元

第七条 指导学生参加学科技能竞赛

对指导学生参加各级各类学科技能竞赛获奖、指导学生创新创业训练计划项目及指导学生参加各级各类体育竞技获奖的指导教师进行奖励，奖励标准如下：

序号	项目名称	项目级别		奖励金额（万元）	
1	指导学生参加学科技能竞赛活动	国家级	本科类三人及以上团队	特等奖	1.0
				一等奖	0.5
				二等奖	0.3
				三等奖	0.2
			本科类单人或两人团队	特等奖	0.5
				一等奖	0.3
				二等奖	0.2

序号	项目名称	项目级别			奖励金额 (万元)
		省部级	本科类三人及以上团队	三等奖	0.1
				特等奖	0.3
				一等奖	0.2
				二等奖	0.1
				三等奖	0.05
			本科类单人、单人或两人团队	特等奖	0.2
				一等奖	0.1
				二等奖	0.05
				三等奖	0.03
			校级（各学院部立项、学校批准的竞赛项目）	第一名	0.05
		第二名		0.03	
		第三名		0.02	
		2	学生创新创业训练计划项目	校级	一等奖
二等奖	0.3				
三等奖	0.1				

注：（1）本专科混合类学科技能竞赛奖励按照“本科类”竞赛各等级奖励标准奖励。专科类按照“本科类”竞赛各等级奖励标准×0.8奖励。奖励经费的分配按照《西安航空学院大学生科技创新实践活动管理办法》的规定执行。

（2）学科技能竞赛活动获奖含“互联网+”大学生创新创业大赛、创新创业团队等项目获奖。

第三章 奖励的程序

第八条 奖励工作由教务处负责具体实施。

第九条 奖励的程序：

（一）1. 按年度由个人或单位在规定时间内向教务处提交

获奖项目的相关材料；

（二）2. 教务处对提交的相关材料进行审核；

（三）在校内对获奖项目的基本情况公示；

（四）4. 公示期结束后，对获奖项目公示无异议的，将相关材料提交学校教学工作委员会审议；

（五）报校长办公会审定获奖项目及奖励金额并予以实施。

第十条 对奖励工作有异议的单位或个人，应在获奖项目公示期间向教务处提交书面材料和说明，由教务处组织专家重新审核并提出处理意见。

第四章 附则

第十一条 奖励经费的管理按学校有关规定执行，个人奖励涉及个人所得税问题按国家相关法规执行。

第十二条 本规定中其他未涉及的获奖项目，由学校教学工作委员会参照相关获奖项目的奖励标准讨论后确认。

第十三条 学科技能竞赛项目级别，由学校教学工作委员会下设的学科技能竞赛评审小组认定后确定。

第十四条 本办法自印发之日起实施，由教务处负责解释。原有文件中与本办法不一致的，按照本办法执行。

抄送：校领导、党委委员。

西安航空学院党政办公室

2015年12月22日印发

西安航空学院（处室）文件

西航教通字〔2018〕59号

关于我校通识教育类课程教学改革的通知

各二级学院（部）：

为推动信息技术与教育教学深度融合，促进优质教育资源应用与共享，提高本科教学质量，根据《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》和《教育部关于加强高等学校在线开放课程建设应用与管理的意见》（教高〔2015〕3号）精神，我校相继建设了《计算机文化基础》《航空航天概论》等10门在线开放课程资源，根据学校工作安排，计划对2018级《计算机文化基础》和《航空航天概论》课程进行课程改革，采用多样化教学方式，提高教学效果，现就主要改革内容安排如下：

一、《计算机文化基础》课程

1. 改革授课方式

课程性质仍为必修课，自2018级开始采用传统授课与在线课程授课两种授课方式，其中飞行器学院、机械工程学院、电子工程学院、车辆工程学院、材料学院按照自然班排课，采用传统课堂授课，共计3学分48学时；经济管理学院、人文学院、外国语学院、理学院、能源与建筑学院基于我校网络课程平台采用线上线下相结合的授课方式，由学生根据实际需要，在大学1-7学期春、秋两季自由选课，教务

处按照选课情况安排教学班排课，共计 3 学分，总学时线上 24 学时，线下 24 学时。

2. 改革考核方式

在线课程授课考核方式采用网络课程平台过程考核、在线考试及上机考试相结合的方式，考核比例由计算机学院核定。

二、《航空航天概论》课程

1. 改革授课方式

课程性质仍为必修课，课程自 2018 级开始采用传统授课与在线课程授课两种授课方式，人文学院、外国语学院、计算机学院、理学院基于我校网络课程平台采用线上线下相结合的授课方式，其余学院仍采用传统自然班授课。在线课程授课方式，由学生根据实际需要，在大学 1-4 学期春、秋两季自由选课，教务处按照选课情况安排教学班排课，共计 1.5 学分，总学时线上 14 学时，线下 10 学时。

2. 改革考核方式

在线课程授课考核方式采用网络课程平台过程考核与在线考试相结合的方式，考核比例由飞行器学院核定。

以上教学内容改革自 2018 级开始实施，经一个学期试运行后推广到学校范围实施。



抄送：校领导

西安航空学院教务处

2018年6月29日印

发

西安航空学院（处室）文件

西航教通字〔2020〕139号

关于报送我校 2020-2021-1 学期教学改革类课程 相关授课资料的通知

根据《关于我校通识教育类课程教学改革的通知》（西航教通字〔2018〕59号）及《西安航空学院教学改革课程工作量计算办法（试行）》文件精神，我处对本学期实施教学改革的课程按照新的工作量计算办法执行，请各二级学院组织教学改革类课程提交课程改革相关支撑材料，教务处将按照改革类课程课酬计算方法进行计算并报人事处切块核拨。具体报送要求如下：

一、混合式改革课程

- （1）教学日历
- （2）授课计划
- （3）混合式课程教学大纲
- （4）线上教学数据分布
- （5）教案

二、双语课程

- （1）授课计划
- （2）双语课程教学大纲

(3) 教案

以上教学改革课程需是教务处立项认定课程，非立项课程不予认定。材料请采用文件袋封装，加装封皮，写明课程名称、课程代码、学分学时、授课教师、授课班级、所在学院等基本信息。各类材料务必12月24日下班前报送至教学主楼0913教务处教学研究科，教案审定后退回。

联系人：梁娇 联系电话：84253783



2020年12月23日

抄送：校领导

西安航空学院教务处

2020年12月23日印发

附件 14 其他材料（行业专家、学生评价和模糊层次分析法录用通知）

行业专家对《传热学》线上线下混合式课程评价

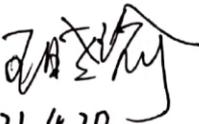
西安航空学院魏朝晖老师主讲的《传热学》课程通过超星学习通平台实施“线上-线下混合式”已有两个学期。该课程负责人教学功底扎实、教学经验丰富。该课程教学理念明确，课程质量优秀，应用效果显著。具体评价如下：

（1）该课程深挖《传热学》专业知识蕴含的人生哲理，如热力学第一定律蕴含了人的精力有限，需要把有限的精力用力有意义的事情上。通过类比法等方法，从专业知识联系到家的关怀，进而延伸到家、国的意义，实现师生情感交流、情感共鸣，提升学生家国情怀。

（2）该课程以节能减排为中心，通过热量传递的三种方式（导热、对流传热和辐射换热）为内容展现形式，抽象、提炼了生产、生活中最基本的传热案例作为基础学习内容，通过最新案将课程内容串联，将闪蒸、环路热管、表面沸腾等比较前沿的问题融入课程中，既夯实了学生基础，又提升了学生对知识的应用能力。

（3）该课程将“马克思主义方法论”融入课程教学中，重视学生思维能力的提升，讲授过程中突出传热问题的分析过程与应用过程，通过费曼、知识树等学习法提升学生学习能力，效果明显。

（4）该课程教学方法和手段先进，充分利用多媒体、动画、课堂演示等多种教学手段，极大地调动学习者的积极性和主动性。

评价专家姓名： 王晓瑜
评价专家职称、职务： 教师；陕西能源与动力专指委专家
评价专家单位： 西安航学院
评价专家签名： 
日期： 2021.4.20

能源与建筑学院学生对《传热学》的评价

《传热学》是本专业非常重要的一门专业基础课，经常作为考研的专业科目。大三期间开设的《传热学》课程，用到了《高等数学》、《线性代数》、《流体力学》等的基础课程的知识，有一定的综合运用性，并且课时较多，因此学生初次学习和认识的过程中，在理解和掌握时或多或少都存在一定的问题和疑惑。

为了便于我们学习和掌握，李鬼老师从多方面对该课程进行了改进。首先，利用学习通和雨课堂等手段，开展混合式教学，丰富了课程内容，增加了学习过程的多元性、便捷性和拓展性。其次，授课中介绍了传热学与流体力学领域的众多知名科学家，通过他们的有趣事迹强化了学生的专业素养，培养学生的探索求知欲。再次，几乎每节课都通过大量生活中的各类有趣的传热现象，引导学生发现问题、思考问题，同时帮助学生理解知识点；通过实物现象、切身感受和理论知识相结合，教授学生要透过现象看本质，使学生对知识点掌握得更加深刻，理解得更加透彻。

姓名：王晨阳

班级：能源动力181

**International Journal of Continuing Engineering Education and
Life-Long Learning**

ISSN: 1560-4624

ACCEPTANCE LETTER

Reference of below mentioned manuscript entitled "Application of Fuzzy AHP in the Evaluation of Students' Cognitive Ability" has been accepted to publish in International Journal of Continuing Engineering Education and Life-Long Learning.

ID: IJCEELL-49337

TITLE: Application of Fuzzy AHP in the Evaluation of Students' Cognitive Ability

AUTHORS: Wei Zhaohui, Luo Ziyan, Sang Peng, Du Juan

We appreciate your excellent paper for the publication in the journal. We also look forward to our future interactions with you as an author, reviewer, or an Editorial Board Member.

Sincerely,



Editors-in-Chief

*Inderscience Publishers
World Trade Centre Building II
29, route de Pre-Bois
Case Postale 856
CH-1215 Genève 15
SWITZERLAND
Fax: +41 22 9295600*