

第二批国家级一流本科课程申报书 (线下课程)

课程名称: 工程材料与机械制造基础 A

专业类代码: 0802

课程负责人: 李逸仙

联系电话: 15929312709

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。

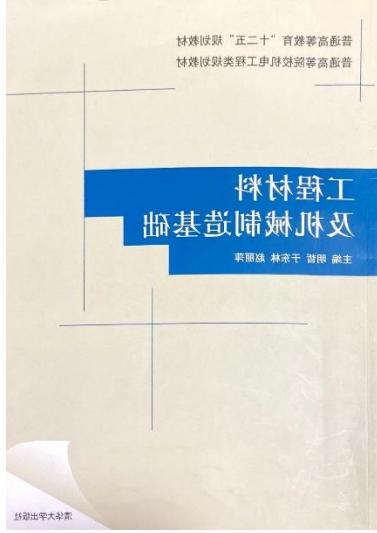
4.文中○为单选；□可多选。

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	工程材料与机械制造基础 A	是否曾被推荐	○是 ●否
课程负责人	李逸仙		
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)	B0210370		
课程分类	<input type="radio"/> 通识课 <input type="radio"/> 公共基础课 ●专业课 <input type="checkbox"/> 思想政治理论课 <input type="checkbox"/> 创新创业教育课 ■教师教育课 <input type="checkbox"/> 实验课		
课程性质	●必修 ○选修		
开课年级	大学二年级、专升本一年级		
面向专业	机械设计制造及其自动化		
学 时	56		
学 分	3.5		
先修（前序）课程名称	理论力学，材料力学，工程制图，互换性与测量技术		
后续课程名称	机械制造工艺学，机械制造装备设计，机械 CAD/CAM 技术，数控加工技术，特种加工		
主要教材	工程材料及机械制造基础、978-7-302-29977-6、明哲，于东林、北京：清华大学出版社、2012.10. 		
最近两期开课时间	2020 年 3 月 1 日—2020 年 6 月 15 日工程材料与机械制造基础 A 李逸仙		

我的课表							
学年学期: 2019-2020 学年上学期 切换学期							
节次/周次	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日
第一节	工程材料与机械制造基础 A(B0210370.01)		工程材料与机械制造基础 A(B0210370.01)				
第二节	(1-12, 17-18, 周数(1224))		(1-12, 18, 周数(1422))				
第三节	工程材料与机械制造基础 A(B0210370.03)		工程材料与机械制造基础 A(B0210370.01)				
第四节	(1-12, 17-18, 周数(1228))		(1-12, 19, 周数(1328))				
第五节			(17, 公差与测量(1407))				
第六节	工程材料与机械制造基础 A(B0210370.02)		工程材料与机械制造基础 A(B0210370.02)				
第七节	(1-12, 17-18, 周数(1336))		(1-12, 18, 周数(1328))				
第八节			(17, 公差与测量(1407))				
第九节							
第十节							
第十一节							

2020 年 9 月 1 日—2020 年 12 月 15 日工程材料与机械制造基础 A 李逸仙

我的课表						
学年学期: 2020-2021 学年上学期 切换学期						
节次/周次	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六
第一节	工程材料与机械制造基础 A(B0210370.01)		工程材料与机械制造基础 A(B0210370.01)			
第二节	(2-13, 周数(1407))		(14, 公差与测量(1407))			
第三节			(2-13, 周数(1308))			
第四节			工程材料与机械制造基础 A(B0210370.02)		机械公差(00210850.03)	
第五节	工程材料与机械制造基础 A(B0210370.02)		(14, 公差与测量(1407))			
第六节	(4-9, 8-13, 周数(1225))		(4-13, 周数(112))			
第七节	(6-7, 周数(1225))		(2-3, 周数(1416))			
第八节	机械公差(00210850.03)		机械公差(00210850.03)			
第九节	(8-13, 周数(1118))		(8-13, 周数(1324))			
第十节	工程材料与机械制造基础 A(B0210370.01)		工程材料与机械制造基础 A(B0210370.02)			
第十一节	(14, 公差与测量(1407))		(7-12, 周数(1134))			

最近两期学生人数

161

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	李逸仙	1986.11	机械工程学院	教师	讲师	15929312709	371340059@qq.com	理论讲解
2	王莹	1979.12	机械工程学院	教师	副教授	13669180176	29444590@qq.com	理论讲解
3	孙俊茹	1974.3	机械工程学院	教师	高级工程师	15353589599	646596291@qq.com	实践教学

			学院		师		com	
4	杨武成	1976.9	校办工厂	工程训练中心主任	教授	13319204680	372847061@qq.com	现场教学

课程负责人和团队其他主要成员教学情况（500 字以内）

（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）

李逸仙，西安航空学院机械工程学院机械制造教研室青年骨干教师，博士研究生。近年来一直从事《工程材料与机械制造基础 A》和《机械企业管理》的理论课程教学工作，机械制造工艺课程设计和机械设计与制造创业实践课程设计的实践教学工作，年均指导本科毕业设计 7 人，具备一定的机械制造类理论、实践与学科前沿相关知识。师德师风优秀，教学经验丰富，教学理念先进，积极参加多项学科建设、教学改革工作以及教学竞赛活动，荣获 2020 年校级课堂教学创新大赛二等奖，发表教改论文 1 篇。先后参与“机械设计制造及其自动化”，“智能制造工程”专业的人才培养方案修订，并负责编写课程教学大纲 4 份；参与学校网络示范公开课建设；参与校级教改项目 1 项。以第一作者公开发表学术论文 4 篇，其中 SCI 收录 2 篇，EI 收录 2 篇，授权发明专利 1 项，实用新型专利 2 项，申请发明专利 1 项，实用新型专利 1 项。

团队其他成员近年来发表教改论文 1 篇，SCI 论文 1 篇，发明专利 2 项，实用新型专利 20 余项。

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）

本课程是一门高等学校工科机械类专业必修的技术基础课。该课程主要研究机械零件常用材料及其加工方法，即从选择材料，制造毛坯，直到加工出零件全

过程的综合性课程。通过本课程的学习，学生能够获得较为系统的常用工程材料及零件加工工艺的基础知识，方法和必要的应用技能。培养出学生工艺分析的初步能力，使其能够完成机械零件的选材以及制造工艺路线的制定。具备工程材料试验必要的实验技能和实验数据处理能力；逐步培养学生学习专业知识的能力以及理论联系实际的能力，为后继机械类相关课程的学习打下专业基础；同时培养学生的创新素质和严谨求实的科学态度以及自学能力。

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，课程内容与资源建设及应用情况，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）

（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，课程内容与资源建设及应用情况，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。）

（一）本课程发展历程

《工程材料与机械制造基础 A》是我校 2012 年升本以后，为“机械设计制造及其自动化”专业设置的一门专业基础课程，该课程基于原国家级精品课程《机械制造技术》，省级精品资源共享课《机械制造技术基础》发展而来，课程组在多年的课程建设中，积累了丰富的教学经验，紧跟行业发展现状，不断对课程内容和知识体系进行修改完善，多次就教学方法与教学手段的改革问题开展研讨，并采取了一定措施。

（二）本课程教学改革重点问题

根据 OBE 教学理念，结合学生在选材、工艺制定及实物制作方面的具体能力培养成果，进行教学内容、教学方法以及考核方式的改革，注重教学目标完成情况的评估反馈。加强理实结合，让实践深化理论，让理论引导实践，围绕学以致用，增强学生学科相关理论知识储备的同时着力于培养其实践创新能力。

借助学校地处阎良航空城，紧密联系航空制造业的产业优势，结合航空零件加工制造的具体项目案例，推广新知识、新技术、新工艺。紧扣学科前沿，凝练航空特色。

（三）课程内容与资源建设及应用情况

课程团队与航空制造企业长期建立良好的校企合作关系，根据企业生产一线的技术需求，对课程内容进行系统设计优化，在日常授课中将理论、实践、思政以及学科前沿信息有机融合在一起，丰富了课程内容的宽度与深度。

教学课件中包含文字、图片、动画及视频的多种素材，内容丰富，形式多样；授课时充分利用雨课堂等先进互联网工具，发布课程相关教学资源，线上线下加强师生互动，显著调动了学生学习积极性，增强提高学习效果。

（四）课程教学内容及组织实施情况

教学内容：课程内容整体上涵盖工程材料和机械制造基础两大模块，前者重点介绍常用金属材料的结构、性能、热处理工艺等知识，使学生具备零件选材的能力，后者主要介绍铸造、锻造、焊接以及切削加工等各种加工制造工艺的基本原理、常用方法以及设计原则，旨在培养学生制定加工工艺路线的能力。二者相关性较强，且同时涵盖理论和实践两方面内容。

组织实施：课前发布预习要点和素材。课堂注重设计和控制，包括加强知识点的逻辑性、趣味性设计，选取代入感、冲击性较强的航空实例，融合具体知识

点和课程思政、从 What-Why-How-use 四个方面系统性一体化的进行讲授，使学生获得较为透彻和感性的理解认识。课后不定期进行网络答疑辅导。以学生学习质量提升作为总目标，制定全面质量管理的 PDCA 循环。基于 OBE 教学理念，循环往复的根据学生学情、课程特点以及学生课程考试成绩和后续实践应用中的能力评估反馈，与能力培养目标进行对比，对教学内容和方案持续改进优化，保障学生学习效果持续上升。

（五）成绩评定方式

本课程的成绩评定包括过程性考核（30%）和期末考试成绩（70%）两部分，其中，过程性考核包括学生的课堂表现、课后作业和课内实验的完成情况。

（六）课程评价

近两年学生评教、教师互评对该课程授课教师的满意度均达到 95%以上。通过课程学习，学生具备了一定的零件选材和加工能力，能够有效支撑了工训比赛和机械设计大赛中结构设计和实物制作环节的知识和技能需求。助力我院学生在第九届全国大学生机械创新设计大赛陕西赛区获得一等奖 5 项、二等奖 6 项。

（七）改革成效等情况

学生课堂积极性和知识吸收率有效提高。教学手段上采用多媒体教学、小组讨论、课堂练习、实物讲解等多种手段，增强师生互动，确立了学生课堂主角的地位。

学生教师实践能力普遍加强。通过教师深入企业发掘问题带入课堂，结合部分实验室或实训中心的现场实物讲授，有针对性的弥补了学生对具体加工工艺的感性认识。

将“课程思政”引入专业课的课堂教育，以润物细无声的方式，将正能量的

思想观念传授给学生，切实贯彻落实“德育为先、能力为重、全面发展”的教育理念。

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、突出 OBE 教学理念，以学生学习质量提升为总目标进行教学设计和改革

基于 OBE 教学理念，以学生学习效果为导向，制定 PDCA 循环，对学生的学习质量进行全面管理。定期总结评价并追踪学生在后续课程设计、工程训练、创新设计大赛等实践环节对知识的运用能力，进行教学内容和教学方法的反向设计和调整优化，制定下期教学计划，通过课程知识实际运用的成果反馈来逐步改进原有的课程设计和课程教学，确保学生学习质量逐年稳步提升。

2、实践教学深入融合，突出航空特色

课程团队教师多次深入航空制造企业将具体工程和需求 and 先进制造技术带回学校，教学中深入发掘课程知识点与航空企业实际需求之间内在联系，从“概念-原理-方法-应用”方面进行系统剖析，以航空制造中的具体零件或工艺为切入点，采用项目化的教学设计，借助校企合作、实训基地等具体实践平台，进行现场演示、课堂教具使用、在线实践教学或录制实践教学素材等方式，使学生获得深入透彻和直观感性的认识，增强应用型能力的培养。

3、“课程思政”引入课堂教学

将“课程思政”植入专业教育，加深学生对制造业、社会效益和国家利益相互关系的理解，提升学生个人政治素养，构建协同、有效、有力的思政教育大格局。

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） 基于 OBE 教学理念，对教学内容和教学手段进行优化改革

紧扣 OBE 教学理念，以学生在工程实践中的选材、工艺制定及实物加工制作能力为起点，反向进行课程内容和教学方法的设计。确立以学生为中心的教学模式，注重教学中细节设计。通过反复换位思考，采用雨课堂、现场讨论、视频图像、小游戏等丰富立体的教学手段确保学生对重要知识点的吸收掌握。精准定位一流课程在人才培养过程中的地位和作用，系统构建能够充分体现现代教育理念，并符合应用型本科人才培养目标的教学内容。

（2） 加强航空特色建设

加大学校与航空制造企业的校企合作力度，打破学生参观、教师实习的常规化校企合作方式。拓展新型深入化的合作方式，如团队教师深入企业采集进行现场操作视频，加强企业教学资源建设；在课堂上与企业技术人员网络连线，有针对性的进行制造工艺的现场演示并就具体实践问题进行在线讨论。

（3） 加强多元化的师资队伍建设

通过多渠道培养或引入具有一定航空制造企业工作经验的实践型师资人才和具有较强理论水平的科研型师资人才，丰富教学团队整体的理论、实践和学科前沿相关知识储备，逐步构建一支结构合理、人员稳定、教学水平高、教学效果好的教学梯队。

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

[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，课程负责人出境时间不得少于 3 分钟。“说课”使用的语言及字幕为国家通用语言及文字。]

见说课视频附件

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。）

见附录 1

3.最近一学期的教学日历

（申报学校教务处盖章。）

见附录 2

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。）

见附录 3

5.最近两学期的学生成绩分布统计

（申报学校教务处盖章。）

见附录 4

6.最近一学期的课程教案

（课程负责人签字。）

见附录 5

7.最近一学期学生评教结果统计

(申报学校教务处盖章。)

见附录 6

8.最近一次学校对课堂教学评价

(申报学校教务处盖章。)

见附录 7

9.教学（课堂或实践）实录视频

提供完整的一节课堂实录视频（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。)

见实录课程视频附件

10.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。)

见附录 8

11.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。]

见附录 9

12.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。

附录 1：教学设计样例说明

教学设计方案

（一）课程的一般信息（课程名称、课程类型、教学对象、教具准备、主讲教师、参赛学院）；

课程名称：工程材料与机械制造基础 A

课程类型：专业基础课、本科考试课

教学对象：机械制造设计及其自动化专业本科学生

教具准备：暂无

主讲教师：李逸仙

参赛学院：机械工程学院

（二）学情分析；

该课程主要针对的是机械制造设计及其自动化专业大二的本科生，学生除具有一定机械制图基础，其他机械类课程尚未学习，教学中应注重深入浅出，夯实基础，理论多联系实际。考虑到大二年纪本科生学习任务较重，多门基础课同时开设，学生课外能分配到本课程的时间有限，更应注重学生课内知识的吸收率，提高学习效率。

（三）教学目标设计；

本节课教学内容为“铸造理论基础”，通过讲述使学生能够初步掌握金属铸造工艺的基本流程，了解其应用场合及优势。理解金属的铸造性能，及其具体表现方面，能够根据性能指标分析合金的铸造性能，掌握铸造过程中缺陷的产生原因及其预防措施。

（四）教学重难点及处理；

本节教学重点为金属的铸造工艺过程，金属铸造性能的具体表现方面及其影响因素。针对前者教学过程中以播放短视频的方式向学生直观展示工艺过程，并在播放过程中实时

提问，调动学生课堂思考积极性。而对于金属铸造性能的影响因素此类理论问题的讲述中借助雨课堂的互动平台，采用投票式提出问题，推动学生全员参与并主动思考，陈述兼启发式讲解，课后预留思考问题巩固加深理解。

（五）教学媒体与资源选择；

多媒体、PPT、雨课堂

（六）课堂教学创新点；

采用多种互动方式，确保学生实时在线，兴趣饱满，对课堂重难点内容有较深的理解，并对其中重要片段、场景有较深刻的印象，利于学生课后针对特定知识点进行拓展学习。

（七）课程思政元素体现及切入点；

将“可持续发展”的观念渗入到专业课堂教学中，引导学生树立正确的价值观。

具体切入点为我国铸造生产的发展方向：优质、高效、低耗、清洁、可持续发展。

（八）教学过程设计（包含信息化教学设计）；

教学环节	教学内容	教师活动	学生活动	设计意图	计划时间
指出任务点	任务点的说明	阐述本节教学重点和要求	思考、铭记	上课初始阶段阐述教学任务点，有助于学生明确学习目标和方向。	1min
导入	液态成形技术，液态成形技术与金属的铸造有什么关系？	枚举案例，引导学生理解液态成形技术，阐明液态成形技术与技术铸造的关系	学生思考	由生活中常见的液态成形技术引出金属的铸造	4min
知识讲解	教师讲解铸造工艺的基本概念和发展	展示古代铸件图片，简要介绍其成形工艺。并介绍该工艺在当前航空发动机风扇叶片成形中的应用。针对日常生	聆听讲解，思考问题，课堂回答	由精美的古代铸件图片展开铸造工艺发展及优势的介 绍，调动学生积极性，激发学生民族自豪感。加强学生对工艺知识的理解	3min

教学环节	教学内容	教师活动	学生活动	设计意图	计划时间
		活中的铸件举例提问。		和记忆。	
观看视频	观看砂型铸造工艺视频	播放视频，现场针对视频中具体操作提问，引导学生思考，主动在视频中寻找答案，加深学生的理解和认识	观看视频，思考问题，寻找答案	通过观看视频，使学生对铸造工艺的基本流程产生直观认识。	4min
启发式提问	讲解合金的铸造性能的定义，及其表现方面	讲解概念，提问学生“适合铸造的合金一般应具有什么性能？”，引导学生逐一回答	聆听讲解，跟随老师引导思考问题并回答	学生带着问题学习，提高学生学习的兴趣，加深学生对问题的认识理解	5min
知识讲解	合金的流动性及其影响因素	由日常案例对比材料的流动性差异，引出流动性衡量标准，随后深入分析金属流动性对铸造工艺的影响。	聆听并思考	通过教师讲解使学生理解合金流动性的衡量标准及其对铸造性能的影响，同时结合课程前期知识说明合金流动性的影响因素	7min
课堂练习	对合金流动性方面习题练习	发送习题并现场讲解	完成习题，巩固知识	针对刚讲解的理论知识进行现场练习，可很好的巩固所学知识。	3min
知识讲解	合金的收缩性及收缩过程的三个阶段	结合前半部分课程知识讲解概念	聆听讲解、回忆前期知识	让学生对收缩性有一定认识，为后续投票环节奠定基础	3min
投票	针对后续即将讲授知识点进行预判性的投票	发布课堂投票	根据个人理解进行投票	通过让学生学习前根据个人理解预期性的投票，增强学生对后续知识的期待，从而提高学生对知识点的兴趣。	1min
课堂讲授	合金收缩性的影响因素	讲授影响因素，并比对学生前期投票结果进行分析。	聆听讲解，比对个人理解进行思考。	在学生已有心理预期的基础上进行知识点讲授，有助于提高学生对知识点的理解和记忆。	6min

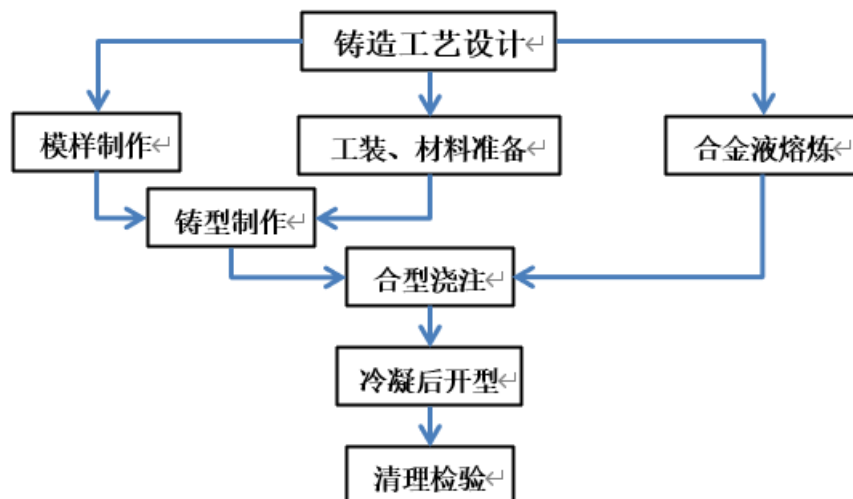
教学环节	教学内容	教师活动	学生活动	设计意图	计划时间
课堂讲授	收缩过程中缩孔和缩松产生，以及具体防止措施	深入浅出的阐明产生原因，据此提出防止措施	聆听，思考	通过由原因到结果，再到预防措施的系统性讲述，有助于学生对该知识点全面深入的理解。	7min
小结	比对课前提出的本节任务点，总结概括本节重点，并提出后续章节重要知识点	针对前期提出的任务点对学生进行提问，督促学生对下节重点内容进行课前预习	回顾本节内容，回答问题。	帮助学生对全课程内容进行回顾，激发学生主动寻找课前问题答案，加深学生理解认识。给出后续重要知识点，给学生指出预习方向。	1min

（九）课件或板书设计；

板书设计：

标题：铸造理论基础

一、铸造工艺流程



二、金属的铸造性能

主要包括：流动性、收缩性、吸气性、偏析

（十）教学评价与反思等。

教学评价：充分考虑课程性质和本校学生自身接受程度，制定了“启发-讲授-练习”的系统性教学方案。对于实践性知识点，通过观看知识点相关网络视频资源并有针对性的实

时提问，启发学生思考其理论依据，随后伴随现场提问进行循序渐进的知识点讲解，最终通过课堂练习巩固加强。

理论性知识点方面加大教学技巧的运用，采用“雨课堂”等教学软件的互动功能，进行“讲前投票、讲中连线、讲后练习”的系列教学方法，充分激发学生的求知欲，增强学生的关注力，确保学生全程参与，并对知识点具有较高的理解和掌握程度。

反思：我国的铸造业产能很大，但铸件质量与欧美铸造强国尚有较大差距。仍需潜心研究理论基础，及时了解前沿技术，力求从根源上提高铸件的综合性能、精度、表面质量并兼顾节能环保要求，开发出性能优异的铸造合金，这将是今后铸造业和机械人的重要追求目标之一。



图 1 课堂讲授

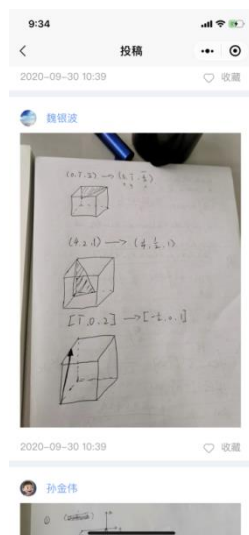


图 2 雨课堂投稿



图 3 雨课堂课件“不懂”标注



图 4 现场投票互动



图 5 针对视频问题学生讲解



图 6 学生分组讨论



图 7 实物现场讲解



图 8 学生操作

李逸仙

国家级一流本科课程申报课程教学日历 (2020)

课程名称: 工程材料与机械制造基础A

课程负责人: 李逸仙



线下一流课程

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	9月7日	1	1	90	第1章 材料的原子结合方式及性能: (1) 固态物质的结合方式及原子结合键; (2) 工程材料的分类	阎教 dl407/dl416	64	理论
2	9月9日	1	2	90	第1章 材料的原子结合方式及性能: 工程材料的性能	阎教 dl407/dl416	64	理论
3	9月14日	2	3	90	第2章 材料的晶体结构: 晶体结构及其表达	阎教 dl407/dl416	64	理论
4	9月16日	2	4	90	布氏硬度测试实验	材料性能测试 实验室	64	实践
5	9月21日	3	5	90	第2章 材料的晶体结构: 金属晶体结构的特点	阎教 dl407/dl416	64	理论
6	9月23日	3	6	90	第3章 材料的固体与相图: (1) 结晶与凝固特性及其影响因素; (2) 纯金属的结晶	阎教 dl407/dl416	64	理论
7	9月28日	4	7	90	第3章 材料的固体与相图: 合金的结晶与结晶相图	阎教 dl407/dl416	64	理论
8	9月30日	4	8	90	第4章 铁碳合金: 铁碳合金系相图	阎教 dl407/dl416	64	理论
9	10月10日	5	9	90	第4章 铁碳合金: 铁碳合金平衡结晶过程及其分析	阎教 dl407/dl416	64	理论
10	10月12日	6	10	90	第4章 铁碳合金: (1) 碳钢; (2) 铸铁	阎教 dl407/dl416	64	理论
11	10月14日	6	11	90	第5章 钢铁热处理: 热处理过程钢的组织转变	阎教 dl407/dl416	64	理论

附录 2: 最近一学期的教学日历

12	10月16日	6	12	90	第5章 钢铁热处理：（1）钢的整体热处理工艺及其特征；（2）钢的表面热处理与化学热处理	阎教 dl407/dl416	64	理论
13	10月19日	7	13	90	第5章 钢铁热处理：铸铁热处理；（2）热处理与机械零件设计制造的关系	阎教 dl407/dl416	64	理论
14	10月21日	7	14	90	第6章 金属材料的塑性变形	阎教 dl407/dl416	64	理论
15	10月26日	8	15	90	第7章 合金钢：概述及常用结构钢	阎教 dl407/dl416	64	理论
16	10月28日	8	16	90	第7章 合金钢：（1）合金工具钢；（2）特殊性能钢及合金	阎教 dl407/dl416	64	理论
17	11月2日	9	17	90	第8章 有色金属及其合金	阎教 dl407/dl416	64	理论
18	11月4日	9	18	90	第9章 其他常用工程材料	阎教 dl407/dl416	64	理论
19	11月9日	10	19	90	第10章 铸造工艺性：铸造的理论基础	阎教 dl407/dl416	64	理论
20	11月11日	10	20	90	第10章 铸造工艺性：（1）砂型铸造方法；（2）特种铸造方法（3）铸造工艺设计；（4）铸造结构工艺性	阎教 dl407/dl416	64	理论
21	11月16日	11	21	90	第11章 塑性成形：（1）塑性成形理论基础；（2）金属的加热与锻件冷却	阎教 dl407/dl416	64	理论
22	11月18日	11	22	90	第11章 塑性成形：（1）塑性成形方法；（2）塑性成形工艺设计；（3）塑性加工方法的结构工艺性	阎教 dl407/dl416	64	理论
23	11月23日	12	23	90	第12章 焊接：焊接的理论基础	阎教 dl407/dl416	64	理论
24	11月25日	12	24	90	第12章 焊接：（1）焊接方法；（2）焊接结构的工艺设计	阎教 dl407/dl416	64	理论
25	11月30日	13	25	90	第13章 切削加工：（1）切削加工概述；（2）刀具的几何角度	阎教 dl407/dl417	64	理论
26	12月2日	13	26	90	第13章 切削加工：（1）切削加工方法；（2）切削加工的结构工艺性设计	阎教 dl407/dl417	64	理论

27	12月7日	14	27	90	显微组织观察	金相制备实验室	64	实践
28	12月9日	14	28	90	刀具几何角度测量	公差与测量技术实验室	64	实践

- 说明：
1. 请按照最近已完成的一学期实际课程开设情况填写。
 2. 推荐类别为“线下一流课程”、“线上线下混合式一流课程”、“社会实践一流课程”中的一种。
 3. 日期须写清年月日，授课地点须填写具体地点（教室），如果是非集中的在线学习，填写“在线”即可。
 4. 教学形式请填写：线上、课堂、理论、实践等。
 5. 不得变动表格行、列的位置和布局，表格内容按照时间顺序依次填写，序号应连续且不重复。所有列的值请保持为“文本型”，包括日期。

附录 3：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 1 学期期末考试									
工程材料与机械制造基础 A 试卷 A									
题号	一	二	三	四	五	六	七	八	总分
得分									
阅卷人									

适用班级：机械设计 205A、机械设计 206A、重修

得分

一、填空题（每空 2 分，共 30 分）标题要求小四号宋体

- 马氏体的晶体结构是_____。
- 为消除或减轻成分偏析，生产上广泛采用_____的方法，以达到消除偏析的目的。
- 根据晶体的几何形态特征判断，晶体中的空位、置换原子等属于_____缺陷，位错属于_____缺陷。
- 在实际生产中，若要将钢热锻或者热轧时，必须把钢加热到_____相区。
- W18Cr4V 钢淬火后回火温度一般为_____，得到的组织是_____。
- 主偏角是在_____内测量的主切削平面与_____间的夹角。
- 可锻铸铁的组织是钢的基体上分布着_____状的_____。
- 反应材料抵抗脆性断裂能力的性能指标是_____。
- 从滑移系数目来看，三种典型金属晶格的塑性变形能力比较_____。

10. 按照自由锻工序的性质和变形量不同归类，错移属于_____工序。

得分

二、选择题（每题 2 分，共 20 分）

- 洛氏硬度 C 标尺使用的压头是（ ）。
A 金刚石圆锥 B 淬火钢球
C 136°金刚石四棱锥 D 硬质合金球
- 金属材料、陶瓷材料和高分子材料的本质区别在于它们的（ ）不同。
A 性能 B 结构 C 结合键 D 熔点
- 下列材料中，铸造性能最好的是（ ）。
A Q195 B ZG200-400 C 奥氏体状态的碳钢 D 共晶成分铸铁
- 下列钢中淬透性最好的是（ ）。
A 45 钢 B T8 C T12 D 40Cr
- 提高钢耐蚀的途径不包括（ ）。
A 表面淬火 B 提高电极电位 C 形成钝化膜 D 形成单相组织
- 简单白铜为（ ）。
A 铜锌二元合金 B 铜镍二元合金 C 铜锡合金 D 铜铝合金
- 下列几种锻件的结构设计中，不能有加强筋、表面凸台及锥面结构的是（ ）。
A 自由锻 B 曲柄压力机上模锻 C 胎膜锻 D 锤上模锻
- 低碳钢和低合金结构钢薄板的焊接最适宜的方法是（ ）。
A 氩弧焊 B 手工电弧焊 C CO₂ 焊 D 软钎焊

西安航空学院课程考试试卷									
2020~2021 学年第 1 学期期末考试									
工程材料与机械制造基础 A 试卷 A									
题号	一	二	三	四	五	六	七	八	总分
得分									
阅卷人									

适用班级：机械设计 205A、机械设计 206A、重修

得分

三、判断题（每题 1 分，共 10 分）

- 因为单晶体是各向异性的，所以实际应用的金属材料在各个方向上的性能也是不相同的（ ）。
- 实际金属的结晶中，非均匀形核往往起着优先和主导的作用。（ ）
- 间隙相不是一种固溶体，而是一种金属间化合物。（ ）
- 多晶体的塑性变形是均匀变形。（ ）
- S 易造成冷脆、P 易造成热脆，都是有害元素。（ ）
- 铸件产生变形、开裂的主要原因是凝固的过程中固态收缩受阻而产生内应力。（ ）
- 热变形是指将金属加热后进行塑性变形。（ ）
- GCr9 是含铬量 0.9% 的滚动轴承钢。（ ）
- 橡胶是室温下处于高弹态，弹性极高，变形量可达 100~1000%。（ ）
- TB1 钛合金属于 α 钛合金，多在 350℃ 下使用，可用于制作飞机构件和紧固件。（ ）

10. 下列关于复合材料性能描述中有误的是（ ）。

A 断裂安全性高 B 模量高 C 减震性能好 D 抗疲劳性能

10. 对高锰钢 ZGMn13 加热到 1000~1100℃ 以上，适当保温，使碳化物完全溶入奥氏体中，然后迅速水淬，得到单相奥氏体组织的工艺是（ ）。

A 表面淬火 B 固溶强化 C 水韧处理 D 时效强化

得分

四、问答题（5 小题，共 30 分）

- 作图表示立方晶系（123）、 $(0\bar{1}2)$ 和（421）晶面。（本题 6 分）
- 下列情况下是否有相变发生，为什么？（本题 6 分）
(1) 液态金属的结晶；
(2) 冷变形金属的再结晶；
(3) 同素异构转变。

西安航空学院课程考试试卷

3. 简述焊缝布置的基本原则（本题 6 分）。

5. 简述车削的工艺特点（4 分），可达到的加工公差等级和表面粗糙度（2 分）？（本题 6 分）

4. 合金的充型能力不好时，易产生哪些缺陷（3 分）？设计铸件时应如何考虑充型能力（3 分）？（本题 6 分）

得分	
----	--

五、综合分析题（3 小题，共 25 分）

1. 用冷却曲线表示 S 点成分的铁碳合金的平衡结晶过程（3 分），画出室温组织示意图并标出组织组成物（2 分），计算室温平衡组织中组成相和组织组成物的相对量（4 分）。（本题 9 分）

西安航空学院课程考试试卷

2. 为下列零件毛坯选择具体的生产方法。（每个 1 分，本题 6 分）

- （1）发动机活塞；
- （2）机床主轴；
- （3）汽轮机叶片；
- （4）船体
- （5）金属餐盘
- （6）大口径铸铁污水管

3. 有一个 45 钢制造的机床床头箱齿轮，其工艺路线为：下料→锻造→（①正火）→机加工→（②）→（③）→精磨

（1）请补充完整热处理工艺路线中的②、③工序（2 分）；

（2）分别说明①、②、③工序的目的（3 分）；

（3）请依次写出①、②、③工序后机床床头箱齿轮的组织各是什么（5 分）？（本题 10 分）

2020~2021 学年第 1 学期期末考试

工程材料与机械制造基础 A 试卷 A

参考答案及评分标准

一、填空题（每空 1 分，共 15 分）

1. 体心正方/bcc 2. 扩散退火/均匀化退火 3. 点、线 4. 奥氏体/A 5. 560℃、
极细 M 回+粒状碳化物+A' 6. 基面、假定工作平面 7. 团絮、石墨 8. 断裂韧度
/断裂韧性 9. 面心立方、体心立方、密排六方 10. 基本

二、选择题（每题 2 分，共 20 分）

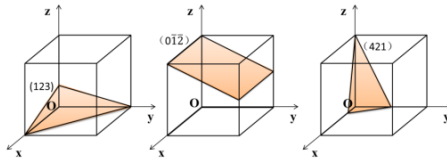
1.A 2.C 3.D 4.D 5.A 6.B 7.A 8.C 9.B 10.C

三、判断题（每题 1 分，共 10 分）

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

四、简答题（5 小题，共 30 分）

1. 答：



（每个 2 分，共 6 分）

2. 答：（1）有，由液相变为固相（2 分）。（2）没有，再结晶前后新旧晶粒的晶格类型和成分完全相同（2 分）（3）有，同素异构转变发生了晶格类型的转变（2 分）。（本题 6 分）

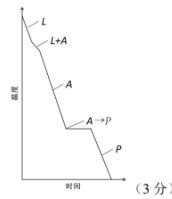
3. 答：（1）应变与焊接操作；（2）焊缝应避开应力最大或应力集中部位；（3）焊缝的布置应尽可能的分散；（4）焊缝的布置不得交叉；（5）焊缝的位置应尽可能对称布置；（6）焊缝应尽量远离机械加工面。（每个 1 分，共 6 分）

4. 答：合金充型能力不好时：（1）在浇注过程中铸件内部易存在气体和非金属夹杂物（1 分）；（2）容易造成铸件尺寸不精确，轮廓不清晰（1 分）；（3）流动性不好，金属液得不到及时补充，易产生缩孔和疏松缺陷（1 分）。设计时应考虑每种合金所允许的最小铸出壁厚，铸件的结构尽量均匀对称，尽可能改善浇注条件等，以保证合金的充型能力（3 分）。（本题 6 分）

5. 答：工艺特点：（1）易于保证工件各加工面的位置精度（1 分）；（2）切削过程比较平稳（1 分）；（3）适用于有色金属零件的加工（1 分）；（4）刀具简单（1.5 分）。加工公差等级可达 IT9-IT8（1 分），表面粗糙度为 Ra1.6-0.8μm（1 分）。（本题 6 分）

五、问答题（3 小题，共 25 分）

1. 答：



（3 分）



（2 分）

室温下组织组成物： $w_P = 100\%$ （2 分）

室温下相组成物

$$w_\alpha = \frac{6.69-0.77}{6.69-0.0008} \times 100\% = 88.5\% \quad (1 \text{ 分})$$

$$w_{Fe3C} = 1 - w_\alpha = 11.5\% \quad (1 \text{ 分}) \quad (\text{本题共 9 分})$$

2 答：（1）金属型铸造；（2）自由锻；（3）熔模铸造；（4）埋弧焊；（5）拉深；
（6）离心铸造。（每个 1 分，共 6 分）

3 答：（1）②—表面淬火（1 分）；③—低温回火（1 分）。

（2）正火的目的是消除锻造缺陷和内应力，细化组织，调整硬度，为后续表面淬火做好组织准备（1 分）；表面淬火的目的是使齿轮表面获得高的硬度和耐磨性，心部仍保持正火后的组织和性能，具有一定的强度和韧性（1 分）；低温回火的目的消除表面淬火产生的残余内应力，降低马氏体的脆性（1 分）。

（3）正火后：F+S（1 分）；表面淬火后：心部为 F+S、表面为 M+A'（2 分）；低温回火后：心部为 F+S、表面为 M 回+A'（2 分）

西安航空学院课程考试试卷

2020~2021 学年第 1 学期期末考试

工程材料与机械制造基础 A 试卷 B

题号	一	二	三	四	五	六	七	八	总分	总分
得分										
阅卷人										

适用班级：机械设计 205A、机械设计 206A、重修

得分

一、填空题（每空 1 分，共 15 分）

1. 5g 的工业纯铁在室温下的晶体结构是_____，在 1000℃时的晶体结构是_____。
2. 陶瓷材料中的结合键主要为_____和_____。
3. 合金钢按照用途可分为_____、合金工具钢和_____。
4. 淬火钢在_____℃回火时出现第二类回火脆性，可通过添加_____来消除。
5. 20Cr 的含铬量是_____。
6. 麻口铸铁中碳以_____形式存在，又以游离石墨形式存在。
7. 玻璃钢是一种以_____为基体的，_____增强复合材料。
8. 含碳量 4.3% 的铁碳合金一般采用的凝固方式为_____。
9. 按照自由锻工序的性质和变形量不同归类，压钳口属于_____工序。

10. 刃倾角取_____值时，会使切屑排向已加工表面。

得分

二、选择题（每题 2 分，共 20 分）

1. 工程上为了防止一些形状复杂和尺寸稳定性要求较高的重要铸件变形和开裂，需进行（ ）。

A 球化退火 B 去应力退火 C 扩散退火 D 再结晶退火
2. 下列对共晶反应的表述中错误的是（ ）。

A 反应式为 $L \rightarrow \alpha + \beta$ B 反应时 L、 α 、 β 三相共存

C 恒温反应 D 反应时 α 和 β 相的成分随反应进行程度而变
3. A 是一种（ ）。

A 间隙相 B 间隙化合物 C 间隙固溶体 D 金属间化合物
4. 下列钢中淬硬性最好的是（ ）。

A 45 钢 B T8 C T12 D 40Cr
5. 下列转变中发生相变的是（ ）。

A 回复 B 塑性变形 C 再结晶 D 重结晶
6. 渗碳层的厚度主要取决于（ ）。

A 加热温度 B 保温时间 C 冷却速度 D 冷却介质
7. 经过固溶处理的铝合金在室温放置一段时间后，其性能不会出现（ ）。

A 强度、硬度下降 B 塑性下降 C 硬度提高 D 强度提高
8. 耐热钢要求具有的性能不包括（ ）。

A 高的热强性 B 高的热稳定性

西安航空学院课程考试试卷

- C 低热传导性和高热膨胀性 D 高温下组织稳定

9. 焊接电弧中产生的热量主要集中在（ ）。

- A 阳极区 B 阴极区 C 弧柱 D 工件表面

10. 锻造时，一般锻造比取（ ）时，工件中的组织细化，各个方向上性能均有显著提高。

- A <2 B 2 C 2~5 D >5

得分

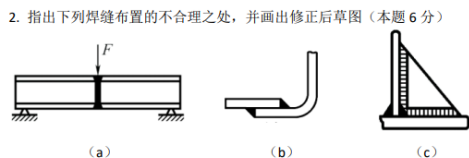
三、判断题（每题 1 分，共 10 分）

1. 金属中的固溶体一般塑性比较好，而金属化合物的硬度比较高。（ ）
2. 1 级晶粒较细，8 级晶粒较粗。（ ）
3. 表示塑性大小的指标包括伸长率和断面收缩率，其中断面收缩率更接近材料的真实应变。（ ）
4. 滑移变形会引起金属晶体结构的变化。（ ）
5. 感应加热过程中，电流频率越大，电流渗入深度越大，加热层越厚。（ ）
6. 高碳低合金工具钢的预先热处理工艺为球化退火。（ ）
7. 后角是在正交平面内测量的几何角度，可取正、负和零值。（ ）
8. “顺序凝固”就是在铸件厚部安放冷铁，使铸件各部分温度基本相同，减轻铸件热应力。（ ）
9. 陶瓷材料中包含晶相、玻璃相和气相，其中玻璃相可起到降低烧结温度的作用。（ ）
10. 金属锻造温度范围以始锻温度为下限，终锻温度为上限。（ ）

得分

四、简答题（5 小题，共 30 分）

1. 过冷度与冷却速度有何关系？（2 分）对铸件晶粒大小有何影响？（2 分）除冷却速度外，影响过冷度的因素还有哪些？（2 分）（本题 6 分）



2. 指出下列焊缝布置的不合理之处，并画出修正后草图（本题 6 分）

西安航空学院课程考试试卷

3. 简述金属型铸造及其特点。(本题 6 分)

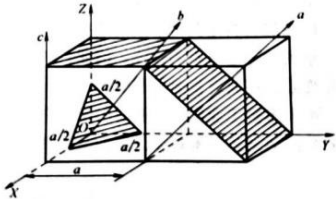
5.简述铣削的工艺特点 (3 分)，铣削方式 (1 分)，以及可达到的加工公差等级和表面粗糙度 (2 分)？ (本题 6 分)

4. 简述自由锻工艺规程的制定过程 (本题 6 分)

得分

五、综合分析题 (3 小题，共 25 分)

1. 标出下图阴影线所示晶面指数和 a、b、c 三个晶向的晶向指数 (本题 9 分)



西安航空学院课程考试试卷

2. 分析 60 钢的平衡结晶过程 (3 分)，画出室温组织示意图并标出组织组成物 (3 分)，计算室温平衡组织中组成相和组织组成物的相对量 (4 分)。(本题 10 分)

3. 6 个直径为 5mm 的 40 钢小样，3 个试样加热到 740℃，保温后分别进行炉冷、空冷、水冷。3 个试样加热到 840℃，保温后分别进行退火、正火、油淬。6 个试样各得到什么组织？ (本题 6 分)

西安航空学院课程考试试卷

2020~2021 学年第 1 学期期末考试

工程材料与机械制造基础 A 试卷 B

参考答案及评分标准

一、填空题（每空 1 分，共 15 分）

1. 体心立方/bcc, 面心立方/fcc 2. 共价键、离子键 3. 合金结构钢、特殊性能钢
4. 450~650、合金元素 5. 0.7~1.0%<1% 6. Fe₃C/渗碳体、 7. 树脂、纤维 8. 逐层凝固 9. 辅助 10. 负

二、选择题（每题 2 分，共 20 分）

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

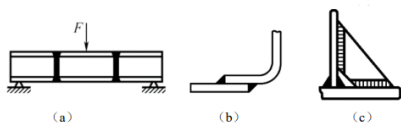
三、判断题（每题 1 分，共 10 分）

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

四、问答题（5 小题，共 30 分）

1. 答：冷却速度越快过冷度越大。（2 分）过冷度大时晶核生长速度大于晶粒长大速度，形核率高，铸件晶粒得到细化。（2 分）影响因素还包括金属的种类和纯度。（2 分）（本题 6 分）

2. 答：



3. 答：金属型铸造是将金属液浇入到金属铸型内而获得铸件的方法。（2 分）

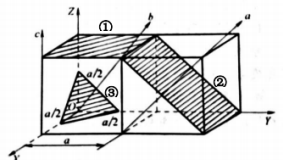
特点：（1）金属型铸造实现了“一型多铸”，生产效率高、成本低、便于机械化和自动化；（2）铸件精度较高，表面质量较好；（3）铸件冷却速度快，晶粒细，力学性能好；（4）铸型制造成本高、周期长不适合单件小批量。（4 分）（本题 6 分）

4 答：（1）绘制锻件图；（2）计算坯料的质量和尺寸；（3）确定锻造工序；（4）确定锻造设备及其型号；（5）确定锻造温度范围；（6）填写锻造工艺卡（每个 1 分，本题 6 分）

5 答：工艺特点：（1）生产效率高（1 分）；（2）容易产生振动（1 分）；（3）刀具散热条件好（1 分）。铣削方式有周铣法和端铣法（1 分）。加工公差等级可达 IT8-IT7（1 分）；表面粗糙度为 Ra3.2μm~1.6μm

五、综合分析题（3 小题，共 25 分）

1. 答：



晶面指数：①—（001）；②—（011）③—（111）

晶向指数：a—[011]；b—[111]；c—[001]

（每个 1.5 分，共 9 分）

2. 答：

西安航空学院课程考试试卷

2. 答：60 钢含碳量约为 0.6%（1 分）

平衡结晶过程：L→L+A→A→A+F→P+F（3 分）

室温组织示意图：



（2 分）

组成相相对量：

$$w_{\alpha} = \frac{6.69 - 0.6}{6.69 - 0.0008} \times 100\% = 91.04\% \quad (1 \text{ 分})$$

$$w_{Fe_3C} = 1 - w_{\alpha} = 8.96\% \quad (1 \text{ 分})$$

组织组成物相对量：

$$w_P = w_{\gamma_{727}} = \frac{0.6 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \times 100\% = 77.28\% \quad (1 \text{ 分})$$

$$w_F = 1 - w_P = 22.72\% \quad (1 \text{ 分})$$

（本题 10 分）

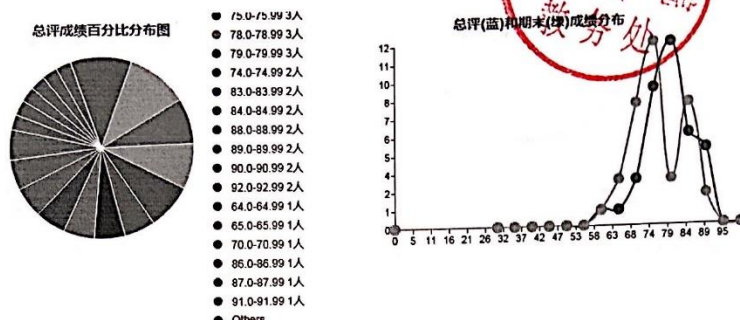
3. 答：740℃：炉冷——F+P；空冷——F+S；水冷——F+M+A'

840℃：退火——P；正火——S；油淬——T+M+A'

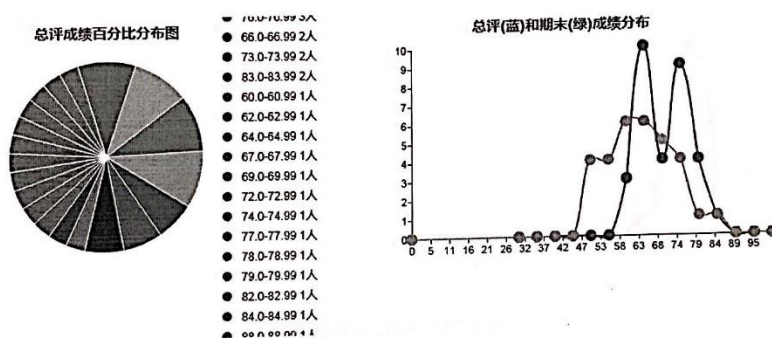
（每个 1 分，本题 6 分）

附录 4: 最近两学期的学生成绩分布统计

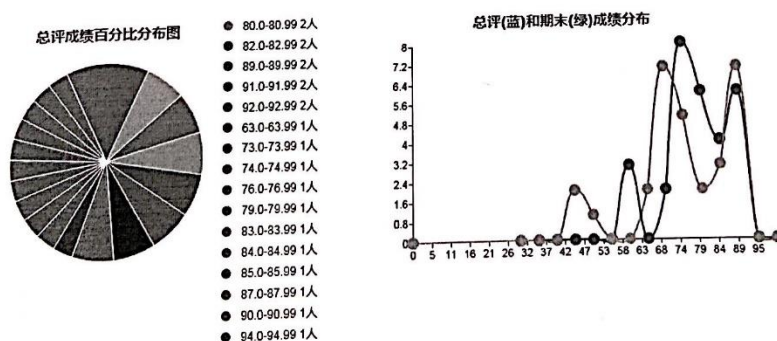
2019-2020-2 学期工程材料与机械制造基础 A 成绩分布



机械设计 181 成绩分布



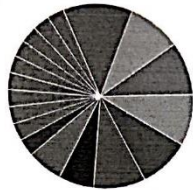
机械设计 182 成绩分布



机械设计 183 成绩分布

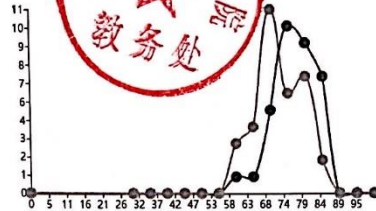
2020-2021-1 学期工程材料与机械制造基础A 成绩分布

总评成绩百分比分布图



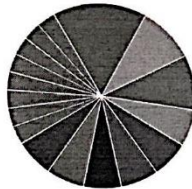
- 86.0-86.99 4人
- 74.0-74.99 3人
- 76.0-76.99 3人
- 79.0-79.99 3人
- 80.0-80.99 3人
- 84.0-84.99 3人
- 75.0-75.99 2人
- 85.0-85.99 2人
- 64.0-64.99 1人
- 68.0-68.99 1人
- 70.0-70.99 1人
- 73.0-73.99 1人
- 77.0-77.99 1人
- 78.0-78.99 1人
- 81.0-81.99 1人
- 82.0-82.99 1人
- 83.0-83.99 1人
- 88.0-88.99 1人
- Others

总评(蓝)和期末(绿)成绩分布



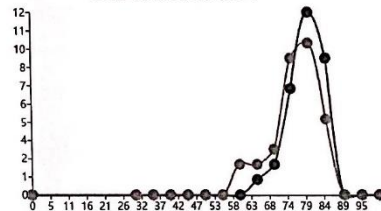
机械设计 205A 成绩分布

总评成绩百分比分布图



- 84.0-84.99 5人
- 77.0-77.99 3人
- 87.0-87.99 3人
- 78.0-78.99 2人
- 81.0-81.99 2人
- 82.0-82.99 2人
- 83.0-83.99 2人
- 86.0-86.99 2人
- 88.0-88.99 2人
- 69.0-69.99 1人
- 73.0-73.99 1人
- 74.0-74.99 1人
- 75.0-75.99 1人
- 79.0-79.99 1人
- 80.0-80.99 1人
- 85.0-85.99 1人
- 88.0-88.99 1人
- Others

总评(蓝)和期末(绿)成绩分布



机械设计 206A 成绩分布

附录 5：最近一学期的课程教案

教案

工程材料及机械制造基础 A 课 第 1 讲 主讲人 李逸仙

课 题 (第 1 章) 固态物质的结合方式及原子结合键
工程材料的分类

目的任务 掌握晶体与非晶体的定义，特点及原子键合的基本类型（金属键、共价键、离子键、分子键）。了解工程材料的分类

重点难点

晶体与非晶体的定义；原子键合的基本类型

教学方法 课堂讲授、启发式提问相结合

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批 教研室主任（签字）：李逸仙

年 月 日

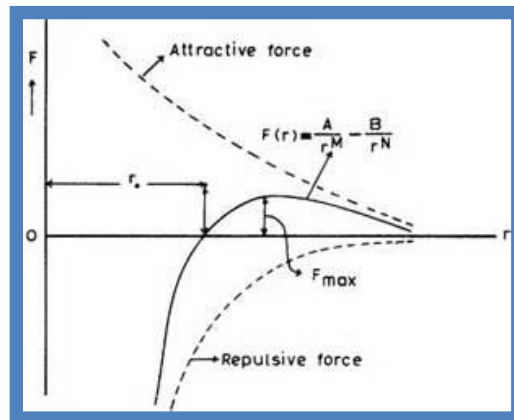
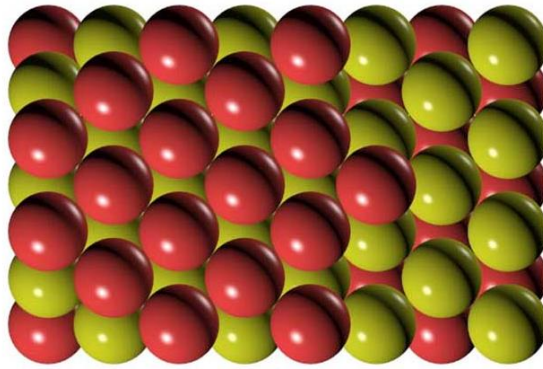
抽 查

系主任（签字）：_____

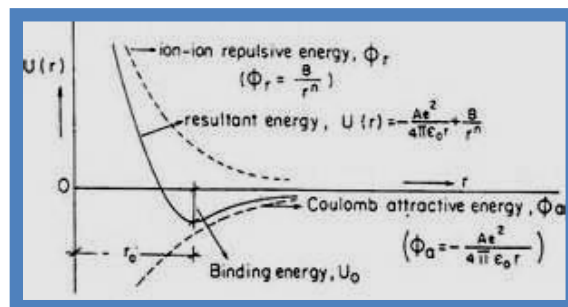
_____年 月 日

教学内容与过程	
<p>授课过程设计：</p> <p>提问：为什么不同的材料其性能不一样？由此引出本讲的问题。</p> <p>1. 课程概述（8min）</p> <p>2. 工程材料概述</p> <p>2.1 工程材料定义（2min）</p> <p>提问：什么是材料？（树木长在森林里和做成家具）</p> <p>突出材料“有用”，“物质基础”的特点</p> <p>2.2 工程材料发展史（5min）</p> <p>举例：“服装材料、建筑材料、记录材料”发展变迁引出材料发展与人类社会进步的相关性</p> <p>总结人类历史上材料的发展历程</p> <p>3. 原子的结合方式</p> <p>3.1 晶体与非晶体（15min）</p> <p>提问：学生举例晶体与非晶体，并说明二者宏观性质的差异？</p> <p>引出并讲授晶体与非晶体之间的微观区别——原子的排列方式差异</p> <p>讨论：晶体与非晶体能否相互转换？</p> <p>3.2 原子的结合键</p> <p>3.2.1 金属键</p> <p>讲授金属键及其特点，以及具有离子键的材料性能特点（6min）</p> <p>3.2.2 共价键</p> <p>讲授共价键及其特点，以及具有离子键的材料性能特点（6min）</p> <p>3.2.3 离子键</p> <p>讲授离子键及其特点，以及具有离子键的材料性能特点（6min）</p> <p>3.2.4 分子键</p> <p>讲授分子键及其特点，以及具有离子键的材料性能特点（6min）</p> <p>3.2.5 氢键</p> <p>讲授氢键及其特点，以及具有氢键的材料性能特点（6min）</p> <p>3.2.6 原子结合键小结（3min）</p>	课后分析

<p>对比五种键型在作用力、键强以及形成晶体的特点。</p> <p>3.2.7 键合的多重性（5min）</p> <p>提问：硫酸镁晶须的结合键是什么？</p> <p>引出大多数工程材料内同时存在多种结合键。</p> <p>具体讲授金属、陶瓷、高分子材料、石墨以及复合材料中的键合类型。</p> <p>雨课堂练习（2min）</p> <p>4. 讲授工程材料的分类（15min）</p> <p>5. 课堂小结（5min）</p> <p>总结课堂讲授重点材料性能，提出下节课预习重点</p> <p>具体授课内容：</p> <p>一、绪论</p> <table><tr><td>设计</td><td>既要满足使用要求，又要满足工艺要求（考虑经济性）</td></tr><tr><td>工艺准备</td><td>决定生产方案，制定有关工艺流程，备材等</td></tr><tr><td>毛坯生产</td><td>铸造、锻造、焊接等</td></tr><tr><td>切削加工</td><td>车、钳、铣、磨（中间有热处理工艺）</td></tr><tr><td>装配调试</td><td>零件、部件、整机</td></tr><tr><td>使用</td><td>要满足设计要求</td></tr></table> <p>材料按照用途可以分为：工程材料（用途、原子聚集状态、化学成分和结构）</p> <p>功能材料</p> <p>二、晶体与非晶体</p> <p>晶体的定义：是指原子在其内部沿三维空间呈周期性重复排列的一类物质。</p> <p>晶体的主要特点：</p> <p>结构有序；物理性质各向异性；有固定的熔点；规则的几何外形</p> <p>非晶体的定义：原子在其内部沿着三维空间呈紊乱、无序排列。</p> <p>非晶体主要特点：</p> <p>结构无序；物理性质各向同性；没有固定熔点；热导率和膨胀性小；在相同应力作用下，非晶体塑性变形大；化学成分变化范围大</p> <p>晶体与非晶体之间可以相互的转化（T_g）</p> <p>三、原子间的结合力与结合能</p>	设计	既要满足使用要求，又要满足工艺要求（考虑经济性）	工艺准备	决定生产方案，制定有关工艺流程，备材等	毛坯生产	铸造、锻造、焊接等	切削加工	车、钳、铣、磨（中间有热处理工艺）	装配调试	零件、部件、整机	使用	要满足设计要求	
设计	既要满足使用要求，又要满足工艺要求（考虑经济性）												
工艺准备	决定生产方案，制定有关工艺流程，备材等												
毛坯生产	铸造、锻造、焊接等												
切削加工	车、钳、铣、磨（中间有热处理工艺）												
装配调试	零件、部件、整机												
使用	要满足设计要求												



原子间结合力



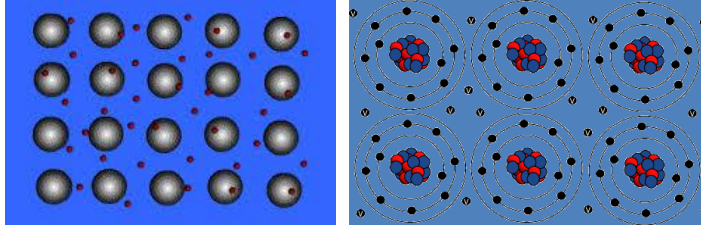
原子间结合能

四、原子结合键类型

金属键：金属原子之间的结合键。

金属键的特点：公有化自由电子，即“电子云”。无方向性和饱和性。

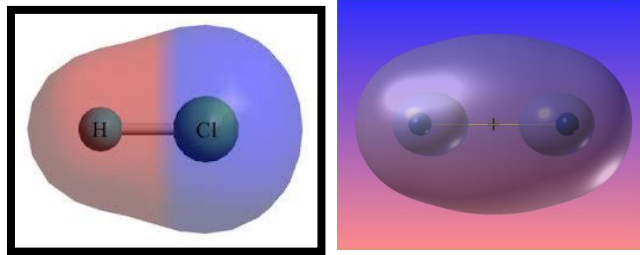
具有金属键材料的特点：良好的导电性、导热性、正电阻温度系数、具有金属光泽。



共价键：原子间依靠公用电子对相结合。

共价键特点：饱和性和方向性。

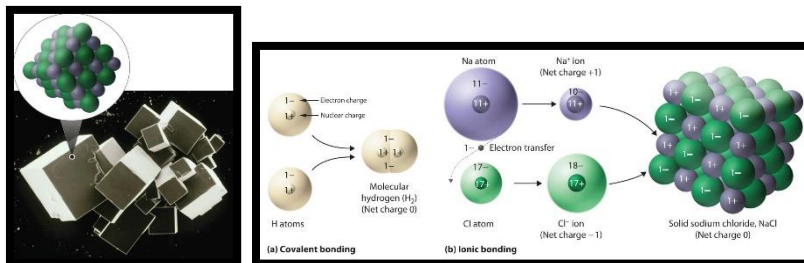
具有共价键材料的特点：熔（沸）点高、挥发性低。



离子键：外层电子的重新排布和正、负离子间的静电作用相互结合。

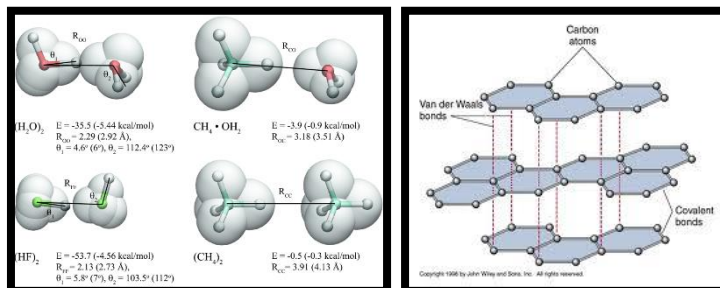
离子键的特点：没有方向性和饱和性。

具有离子键材料的特点：硬度高、强度大、热胀系数小，脆性大、常温下不导电。



分子键：借助于原子之间的偶极吸引力结合。

分子键的特点：结合力弱、易滑动、易变形。



不同结合键的比较

结合键种类	结构特点	热力学性能	力学性能	电学性能	结合能(kJ/mol)
金属键	无方向性	导热（电）性好	强度、塑性 有高低	导电性良 好	113-660

共价键	有方向性	熔点高，热膨胀系数小	强度高、硬度大	不导电、熔体非导体	150-712
离子键	无方向性	熔点高，热膨胀系数小	强度高、硬度大	不导电，熔体为导体	586-1047
分子键	有方向性	熔点低，热膨胀系数大	强度低、硬度低	不导电	< 42

实际材料中单一键合类型不多见，大多数材料内部原子键合往往是各种键合的混合体。

五、工程材料的分类

1、金属材料

黑色：铁、锰、铬

有色：除黑色以外

轻金属、重金属、贵金属、稀有金属、稀土等

2、陶瓷材料

传统陶瓷材料：普通陶瓷，以天然材料为原料，主要用作建材

特种陶瓷材料：精细陶瓷，以高熔点的硅、碳化物、氮化物、硅化物为原料，用作耐热、耐磨、耐蚀零件

金属陶瓷材料：金属与各种化合物粉末的烧结体，主要用于制作工具和模具

3、高分子材料：聚合物，是以分子键和共价键结合为主的材料

塑料：

橡胶：

合成纤维：

4、复合材料

金属基复合材料：

陶瓷基复合材料：

聚合物基复合材料：

教 案

工程材料与机械制造基础 课 2 讲

主讲人 李逸仙

课 题 工程材料的性能

目的任务 了解材料的使用性能和工艺性能
掌握强度、硬度的定义及表示方法
了解冲击吸收功、疲劳强度和断裂韧度

重点难点 静载荷和动载荷下材料的力学行为、力学指标及测定方法

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

李逸仙

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>授课过程设计：</p> <p>引入：由材料失效事故案例引入疲劳，低温脆断等性能的重要性（3min）</p> <p>1 材料性能分类</p> <p>讲授材料的性能分类（5min）</p> <p>2 低碳钢拉伸时的力学性能</p> <p>讲授低碳钢应力拉伸试验时应力-应变的变化特点，引出材料强度和塑性定义（20min）</p> <p>3 硬度</p> <p>3.1 布氏硬度</p> <p>讲授布氏硬度测量原理、表示方法及适用范围（9min）</p> <p>课堂练习（1min）</p> <p>3.2 洛氏硬度</p> <p>讲授洛氏硬度测量原理、表示方法及适用范围（9min）</p> <p>课堂练习（1min）</p> <p>3.2 维氏硬度</p> <p>讲授洛氏硬度测量原理、表示方法及适用范围（4min）</p> <p>课堂练习（1min）</p> <p>4 断裂韧性</p> <p>讲授断裂韧性测量原理及定义（6min）</p> <p>5 疲劳</p> <p>讲授材料疲劳定义、疲劳曲线及疲劳极限的定义（7min）</p> <p>6 冲击韧性</p> <p>讲授材料摆锤实验原理及冲击韧性定义（6min）</p> <p>观看摆锤实验视频（3min）</p> <p>7 工艺性能</p> <p>讲授材料各类工艺性能基本定义(10min)</p> <p>8. 课堂小结（5min）</p> <p>具体授课内容：</p> <p>1、力学性能</p> <p>材料的力学性能就是材料在外载荷作用下其强度和变形方面所表现的性能。它是进行强度、刚度、稳定性计算和选择材料的重要依据。材料的力学性能是通过试验的方法测定的, 其不仅决定于材料本</p>	

身，而且决定于加载方式、应力状态和温度。这里只讨论常温、静载条件下的力学性能。常温就是指室温；静载就是指加载速度缓慢平稳。

在常温、静载条件下，工程材料根据其性能常分为塑性材料和脆性材料两大类。工程中应用广泛的低碳钢和铸铁就是这两类材料的典型代表，它们在拉伸和压缩时表现的力学性能也比较典型。所以，下面重点讨论它们在常温、静载条件下的力学性能。

1) 静拉伸试验

静载拉伸和压缩试验是研究材料的力学性能最常用的试验。试验用的材料，须按国标规定加工成标准试件（图 5-8），标准试件的相关规格可参阅有关国家标准。试验在万能试验机上进行。试验时，将试件的两端装卡在上、下夹头中，然后对其缓慢加载，直到把试件拉断为止。一般试验机均有自动绘图装置，在试验过程中能自动绘制拉力 F 和对应的绝对变形 ΔL 的关系曲线，此曲线称为 $F-\Delta L$ 曲线或拉伸图。图 5-9 为低碳钢 Q235 的 $F-\Delta L$ 曲线。

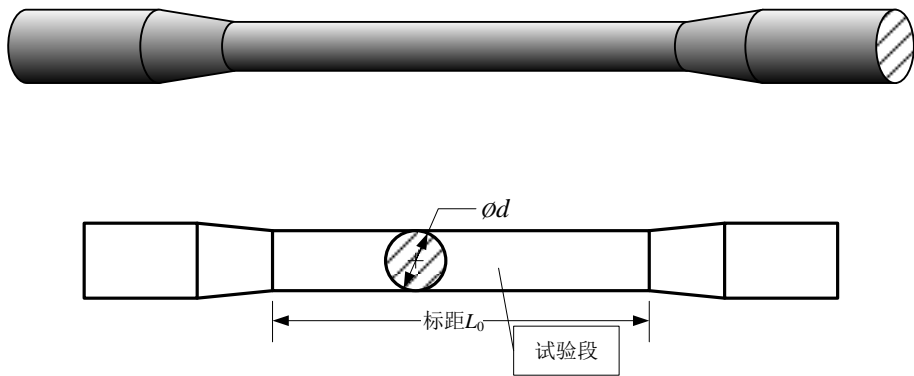


图 5-8 拉伸试件

由于试件标距 L 和横截面面积影响 ΔL 的大小，因此，当试件规格不同时，即使是同一材料，其拉伸图也不同。为了消除试件几何尺寸的影响，反映材料本身的力学性能，将载荷 F 除以横截面面积 A ，得到应力 σ ；将绝对变形 ΔL 除以试件标距 L ，得到应变 ε ，这样得到的就是 $\sigma-\varepsilon$ 曲线或应力—应变图。图 5-10 为低碳钢 Q235 的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线。

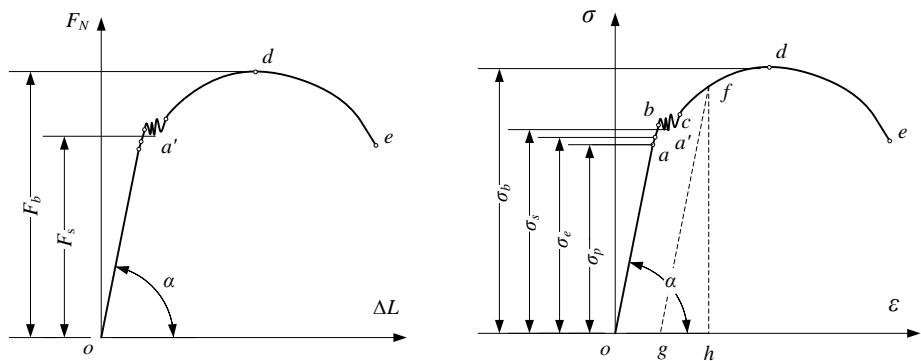


图 5-9 低碳钢拉伸时 $F_N-\Delta L$ 曲线图 5-10 低碳钢拉伸时 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

现以 $\sigma-\varepsilon$ 曲线来分析低碳钢 Q235 的力学性能，其中包含曲线的四个阶段，两个重要的强度、塑性指标和材料的冷作硬化现象。

1. 弹性阶段 $0a'$

由图 5-10 可看出， $0a$ 是直线，这说明在该段范围内应力与应变成正比，材料符合虎克定律，即 $\sigma = E\varepsilon$ 。弹性模量 E 为直线的斜率， $E = \sigma/\varepsilon = \tan \alpha$ 。直线部分的最高点 a 对应的应力值 σ_p ，称为材料的比例极限。Q235 钢的比例极限 $\sigma_p \approx 200\text{MPa}$ 。

曲线超过 a 点后， $a a'$ 段不再是直线，说明应力与应变已不成正比，虎克定律也不再适用。但在 $0 a'$ 段内，只要应力值不超过 a' 点所对应的应力 σ_e ，如卸去外力，变形也随之全部消失，说明材料在 $0 a'$ 段发生弹性变形， $0 a'$ 段称为弹性阶段。 a' 点所对应的应力值 σ_e 称为材料的弹性极限。由于弹性极限与比例极限非常接近，所以工程实际中对两者不作严格区分，将二者视为相等。

2. 屈服阶段 bc

当应力超过弹性极限后， $\sigma-\varepsilon$ 曲线上出现了一段接近水平的锯齿形线段 bc ，说明这一阶段应力虽有小的波动，但不再增大，而应变却迅速增长，好象材料失去了抵抗变形的能力，这种现象称为材料的屈服。 bc 段既为屈服阶段。屈服阶段的最低应力值 σ_s ，称为材料的屈服点应力或屈服极限。Q235 钢的屈服极限 $\sigma_s \approx 235\text{MPa}$ 。

屈服阶段，在试件的光滑表面可以观察到出现许多与其轴线成 45° 的条纹（图 5-11），这些条纹称为滑移线。这表明材料内部的晶粒沿着 45° 的斜截面发生相互滑移，产生了卸载后将不能消失的塑性变形。工程中，一般都不允许构件发生过大的塑性变形，当构件应力达到材料的屈服极限 σ_s 时，认为其已丧失正常工作的能力。所以屈服极限 σ_s 衡量材料强度的重要指标。

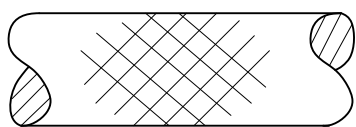


图 5-11 滑移线

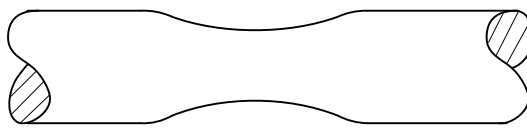


图 5-12 颈缩

3. 强化阶段 cd

屈服阶段后，出现上凸的曲线 cd ，表明要使材料继续变形，必须增加应力，材料又恢复了抵抗变形的能力。这种现象称为材料的强化。 cd 段称为材料的强化阶段。曲线最高点 d 所对应的应力是试件断裂前所能承受的最大应力值 σ_b ，称为材料的强度极限。强度极限是衡量材料强度的另一个重要指标。Q235 钢的强度极限 $\sigma_b \approx 400\text{MPa}$ 。

4. 颈缩阶段 de

材料达到强度极限前，试件的变形是均匀的。而在此之后，变形将集中在试件薄弱的局部，纵向变形显著增加，横向收缩也显著加剧，出现颈缩现象（图 5-12）。由于颈缩处横截面面积急速减小，试件很快被拉断。

5. 塑性指标

试件拉断后，弹性变形完全消失，残留下的是塑性变形，工程中用这种塑性变形来衡量材料的塑性。常用的塑性指标有两个：伸长率 δ 和断面收缩率 ψ ，既

$$\text{伸长率} \quad \delta = \frac{L_l - L}{L} \times 100\% \quad (5-11)$$

$$\text{断面收缩率} \quad \psi = \frac{A_l - A}{A} \times 100\% \quad (5-12)$$

式中： L_l 是试件拉断后的标距， L 是原标距； A_l 为颈缩处最小横截面面积， A 为原横截面面积。

显然 δ 、 ψ 值越大，材料的塑性越好。工程上，通常把 $\delta \geq 5\%$ 的材料称为塑性材料，如钢、铜等；把 $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料，如铸铁、玻璃等。Q235 钢的 $\delta = 25 \sim 27\%$ ， $\psi = 60\%$ 左右，是典型的塑性材料。

屈服强度：

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} (MPa)$$

σ_s 材料产生屈服现象时的最小应力

F_s ：试样屈服时所承受的拉伸力

A_0 ：试样原始横截面积

条件屈服极限：有些塑性较低的材料没有明显的屈服点，难于确定产生塑性变形的最小应力。故规定当试样产生 0.2% 的塑性变形时所对应的应力作为材料开始产生明显塑性变形时的屈服强度，称为条件屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 。

抗拉强度：

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} (MPa)$$

零件设计时对塑性材料采用屈服强度；

脆性材料采用抗拉强度

塑性：

塑性是材料在静载荷作用下产生塑性变形而不破坏的能力。评定指标是伸长率和断面收缩率。

1、伸长率

2、断面收缩率

2) 硬度

布氏硬度法

洛氏硬度法

3) 冲击韧度和断裂韧度

基本概念

静载荷和冲击载荷

断裂：材料在外力作用下分为两个或者两个以上部分的现象。

断裂的分类：韧性断裂和脆性断裂

断裂过程：裂纹萌生和裂纹扩展

韧性：表示材料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力。

冲击韧性及衡量指标：

1、冲击韧性：材料在冲击载荷下吸收塑性变形功和断裂功的能力，是材料强度和塑性的综合表现。

2、衡量指标：冲击吸收功 A_k 冲击韧度 a_k ($a_k = A_k / F_k$)

3、应用：评价材料韧性的好坏，与屈服强度结合用于一般零件抗断裂设计。

4、低温冲击试验：(材料的韧脆转变温度 T_K)

断裂韧度：

1、断裂韧度 K_{IC} ：是评定材料抵抗脆性断裂的力学性能指标，指的是材料抵抗裂纹失稳扩展的能力。单位： $MPa \cdot m^{1/2}$ 或者 $MN \cdot m^{-3/2}$

2、应用（判断构件是否安全，合理选材）

$K_I < K_{IC}$ 构件安全

$K_I > K_{IC}$ 构件发生脆性断裂

$K_I = K_{IC}$ 构件发生低应力脆性断裂的临界条件

3、应用场合：主要用于高强度钢制造的飞机、导弹和火箭的零件，或者用中低强度钢制造气轮机转子、大型发电机转子等。

4) 疲劳极限和耐磨性

5) 材料的工艺性能

 铸造性能

 锻造性能

 切削加工性能

 焊接性能

 热处理性能

教 案

工程材料与机械制造基础 课 3 讲

主讲人 李逸仙

课 题 晶体结构及其表达（第二章）

目的任务 掌握晶格结构、晶胞、致密度的概念

掌握晶向指数和晶面指数的表示方法

掌握金属晶格类型

重点难点

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：李逸仙

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课过程设计：</p> <p>复习（5min）</p> <p>1. 晶格与晶胞</p> <p>讲授晶格与晶胞的定义（10min）</p> <p>画图区分空间点阵与晶体结构的区别（5min）</p> <p>讲授晶格常数表征参数（2min）</p> <p>讲授 14 中布拉菲点阵（10min）</p> <p>提问：有没有底心正方点阵？</p> <p>教师画图解释（3min）</p> <p>提问：有没有面心正方点阵</p> <p>学生画图后发送雨课堂投稿（3min）</p> <p>教师现场点评（1min）</p> <p>2. 常见金属晶格类型</p> <p>讲授配位数与致密度的概念（2min）</p> <p>2. 1bcc</p> <p>讲授 bcc 结构，教师演示各个参数计算过程（10min）</p> <p>2. 2fcc</p> <p>讲授 fcc 结构（1min）</p> <p>学生课堂计算各个参数（4min）</p> <p>教师总结点评（1min）</p> <p>2. 3hcp</p> <p>讲授 hcp 结构（1min）</p> <p>学生课堂计算各个参数（3min）</p> <p>教师总结点评（1min）</p> <p>3. 晶面指数和晶向指数</p> <p>讲授晶向指数和晶面指数的定义（2min）</p> <p>结合例题讲授晶向指数的标定方法和晶向绘制（10min）</p> <p>学生课堂练习并利用雨课堂投稿（5min）</p> <p>教师点评（1min）</p> <p>讲授晶面指数的标定方法和晶面绘制方法（10min）</p> <p>预留课后完成练习题</p> <p>课堂小结（5min）</p>	

具体授课内容:

一. 晶格结构与晶胞

便于研究晶体中原子、分子或离子的排列情况,近似地将晶体看成是无错排的理想晶体,忽略其物质性,抽象为规则排列于空间的无数几何点。这些点代表原子(分子或离子)的中心,也可是彼此等同的原子群或分子群的中心,各点的周围环境相同。这种点的空间排列称为空间点阵,简称点阵,从点阵中取出一个仍能保持点阵特征的最基本单元叫晶胞。将阵点用一系列平行直线连接起来,构成一空间格架叫晶格。

晶胞选取应满足下列条件:

- (1) 晶胞几何形状充分反映点阵对称性。
- (2) 平行六面体内相等的棱和角数目最多。
- (3) 当棱间呈直角时,直角数目应最多。
- (4) 满足上述条件,晶胞体积应最小。
- (5) 晶胞的尺寸和形状可用点阵参数来描述,它包括晶胞的各边长度和各边之间的夹角。

根据以上原则,可将晶体划分为 7 个晶系。用数学分析法证明晶体的空间点阵只有 14 种,故这 14 种空间点阵叫做布拉菲点阵,分属 7 个晶系,空间点阵虽然只可能有 14 种,但晶体结构则是无限多的。

材料的晶体结构

金属键具有无方向性特点,金属大多趋于紧密,高对称性的简单排列。共价键与离子键材料为适应键、离子尺寸差别和价引起的种种限制,往往具有较复杂的结构。

典型金属的晶体结构

最常见的金属的晶体结构有体心立方、面心立方和密排立方。

晶胞中原子数

晶体由大量晶胞堆砌而成,故处于晶胞顶角或周面上的原子就不会为一个晶胞所独,只有晶胞内的原子才为晶胞所独有。

假设相同的原子是等径钢球,最密排方向上原子彼此相切,两球心距离之半便是原子半径。

二、配位数与致密度

晶体中原子排列的紧密程度是反映晶体结构特征的一个重要因素。为了定量地表示原子排列的紧密程度,通常应用配位数和致密度这两个参数。配位数是指晶体结构中,与任一原子最近邻并且等距离的原子数。

体心立方对面心立方结构致密度为,的密排六方结构($G / 1.633$)配位数也是 12,致密度也是 0.74。

晶体中原子的堆垛方式

面心立方与密排六方虽然晶体结构不同,但配位数与致密度却相同,为搞清其原因,必须研究晶体中原子的堆垛方式。

面心立方与密排六方的密排 {111} 与 (0001) 原子排列情况完全相同,密排六方结构可看成由 (0001) 面沿[001]方向逐层堆垛而成,即按 ABAB.....顺序堆垛即为密排六方结构。

面心立方结构堆垛方式,它是以(111)面逐层堆垛而成的,即按 ABCABC.....顺序堆垛。原子排列的紧密程度,故两者都是最紧密排列。

晶体体结构中的间隙

由原子排列的刚球模型可看出球与球之间存在许多间隙,分析间隙的数量、大小及位置对了解材料的相结构、扩散、相变等问题都是很重要的。面心立方八面体间隙比体心立方中间隙半径较大的四方

体间隙半径还大，因此面心立方结构的—Fe 的溶碳量大大超过体心立方结构的。密排六方的间隙类型与面心立方相同，同类间隙的形状完全相同，仅位置不同，在原子半径相同的条件下这两种结构同类间隙的大小完全相同。

纯金属常见的晶体结构

结构特点:以金属键结合，失去外层电子的金属离子与自由电子的吸引力。无方向性，对称性较高的密堆结构。

三、常见立方结构：

体心立方 bcc Body-centered cubic

面心立方 fcc Face-centered cubic

密堆六方 cph Close-packed hexagonal

1.面心立方

原子位置 立方体的八个顶角和每个侧面中心

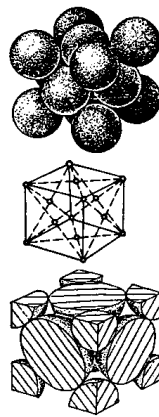
单胞的原子数 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$

点阵常数 a

原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$

配位数 12

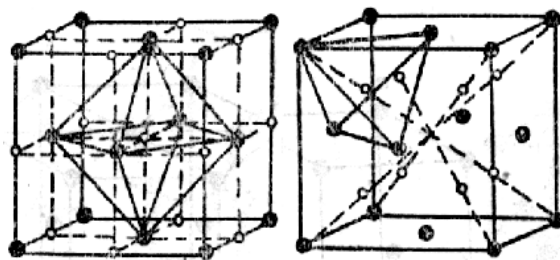
致密度 $\frac{4 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3}{a^3} = 0.74$



在面心立方晶格中密排面为{111}，密排方向为<110>

面心立方中的间隙

将原子假定为刚性球，他们在堆垛排列时必然存在间隙。在面心立方晶格中存在的间隙主要有两种形式：



面心立方中的原子间隙

八面体间隙：

位置 体心和棱中点

单胞数量 $12/4 + 1 = 4$

大小 $(2\sqrt{2}r - 2r)/2 = 0.414r$

四面体间隙：

位置 四个最近邻原子的中心

单胞数量 8

大小 $(\sqrt{3} - \sqrt{2})a/4 = 0.225r$

2. 体心立方

原子位置 立方体的八个顶角和体心

单胞的原子数 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$

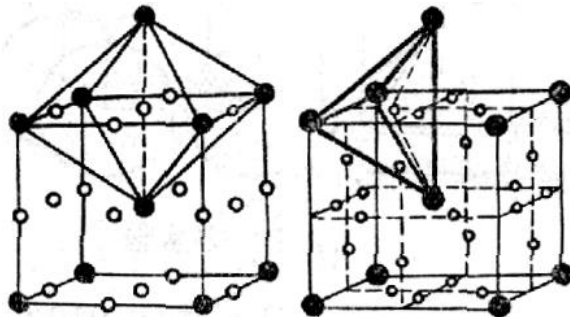
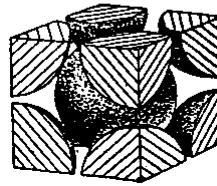
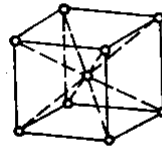
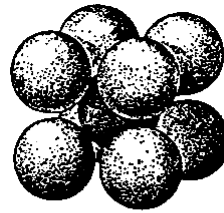
点阵常数 a

原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$

配位数 晶体中与任一原子最近邻且等距离的原子数目。 = 8

致密度 $\frac{\text{原子本身的体积}}{\text{原子所占有的空间体积}}$

$$\frac{2 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3}{a^3} = 0.68$$



体心立方晶胞中的八面体间隙和四面体间隙

在体心立方晶格中密排面为{110}，密排方向为<111>

体心立方中的间隙

八面体间隙：

位置 面心和棱中点

单胞数量 $12/3 + 6/2 = 6$

大小 $(2 - \sqrt{3})a/2 = 0.155r$

四面体间隙：

侧面中心线 1/4 和 3/4 处 8 个

大小 $(\sqrt{5} - \sqrt{3})a/4 = 0.291r$

3. 密堆六方

原子位置 12 个顶角、上下底心和体内 3 处

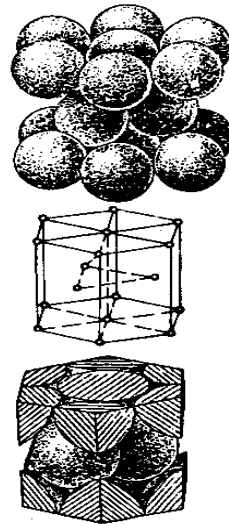
单胞的原子数 $12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$

点阵常数 a, c ($c/a = \sqrt{8/3} = 1.633$)

原子半径 $r = \frac{1}{2}a$

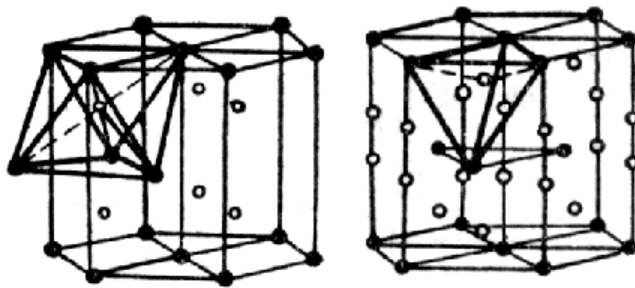
配位数 12

致密度 $\frac{6 \cdot \frac{4}{3}\pi \left(\frac{a}{2}\right)^3}{\frac{3\sqrt{3}}{2}a^2 \cdot \sqrt{\frac{8}{3}}a} \approx 0.74$



在密堆六方晶格中密排面为 $\{0001\}$ ，密排方向为 $\langle 1120 \rangle$

密堆六方中的间隙



密排六方的四面体间隙和八面体间隙

八面体间隙：

位置 体内

单胞数量 6

大小 $(2\sqrt{2}r - 2r)/2 = 0.414r$

四面体间隙：

位置 棱和中心线的 $1/4$ 和 $3/4$ 处

单胞数量 12

大小 $(\sqrt{3} - \sqrt{2})a/4 = 0.225r$

3. 晶向指数与晶面指数

常常涉及到晶体中某些原子在空间排列的方向（晶向）；和某些原子构成的空间平面(晶面)。为区分不同的晶向和晶面，需采用一个统一的标号来标定它们，这种标号叫晶向指数与晶面指数。

1. 晶向指数和标定

(1)以晶格中某结点为原点，取点阵常数为三坐标轴的单位长度，建立右旋坐标系，定出欲求晶向上任意两个点的坐标。

(2)“末”点坐标减去“始”点坐标，得到沿该坐标系各轴方向移动的点阵参数的数目。

(3)将这三个值化成一组互质整数，加上一个方括号即为所求的晶向指数 $[u\ v\ w]$ ，如有某一数为负值，则将负号标注在该数字上方。

2. 晶面指数的标定

(1)建立如前所述的参考坐标系，但原点应位于待定晶面之外，以避免出现零截距。

(2)找出待定晶面在三轴的截距，如果该晶面与某轴平行，则截距为无穷大。

(3)取截距的倒数，将其化为一组互质的整数，加圆括号，得到晶面指数 $(h\ k\ l)$

3. 晶面族与晶向族

在晶体中有些晶面原子排列情况相同，面间距也相等，只是空间位向不同，属于同一晶面族用 $\{h\ k\ l\}$ 表示。晶向族用 $\langle u\ v\ w \rangle$ 表示，代表原子排列相同，空间位向不同的所有晶相。

教 案

工程材料与机械制造基础 课 4 讲

主讲人 王莹

课 题 金属晶体结构的特点

目的任务 掌握单晶体和多晶体的概念
了解晶体中缺陷类型

重点难点

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：李逸仙
年 月 日

抽 查

系主任（签字）：
年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课过程安排：</p> <p> 复习（5min）</p> <p> 1. 单晶体与多晶体</p> <p> 讲授单晶体与多晶体的概念及区别（5min）</p> <p> 2. 晶体缺陷</p> <p> 2.1 点缺陷</p> <p> 讲授点缺陷产生的原因（3min）</p> <p> 动画演示各种类型点缺陷形成（10min）</p> <p> 讲授点缺陷对结构和性能的影响（5min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p> <p> 2.2 线缺陷</p> <p> 讲授位错的发现过程（5min）（课程思政：善于发现问题、思考问题）</p> <p> 讲授刃型位错的结构及特点（10min）</p> <p> 观看刃型位错形成及运动视频（2min）</p> <p> 讲授螺型位错的结构及特点（10min）</p> <p> 观看螺型位错形成及运动视频（2min）</p> <p> 讲授混合型位错的结构及特点（5min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p> <p> 2.3 面缺陷</p> <p> 讲授晶界与亚晶界的结构及特点（10min）</p> <p> 讲授界面的特点（3min）</p> <p> 雨课堂练习（5min）</p> <p> 3. 课堂小结（5min）</p> <p> 总结课堂讲授重点，提出下节课预习重点</p> <p>具体授课内容：</p> <p>一、单晶体与多晶体的概念</p> <p> 金属的实际晶体结构</p> <p> 单晶体：晶格位向完全一致的晶体叫做单晶体。</p> <p> 实际使用的金属材料，由于受结晶条件和其它因素的限制，其内部结构都是由许多尺寸很小，各</p>	

自结晶方位都不同的小单晶体组合在一起的多晶体构成。

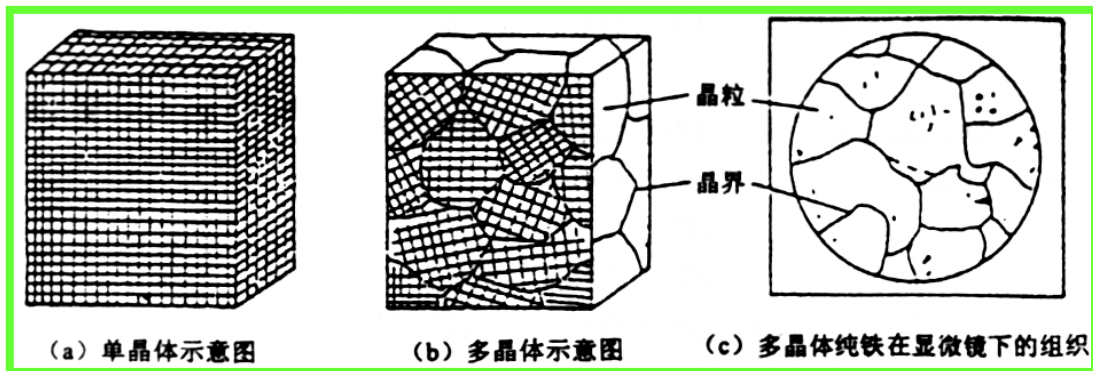
多晶体：由多晶粒构成的晶体称为多晶体。

晶粒：多晶体材料内部以晶界分开的、晶体学位向相同的晶体称为晶粒。

晶界：两晶粒之间的交界处称为晶界。

单晶体在不同方向上的物理、化学和力学性能不同，即各向异性。

实际为多晶结构，故从宏观上显示出各向同性。



二、晶体中的缺陷

晶体缺陷

理想晶体中原子完全为规则排列，但实际中金属内部存在大量的缺陷。晶体缺陷对金属的性能有很大的影响。

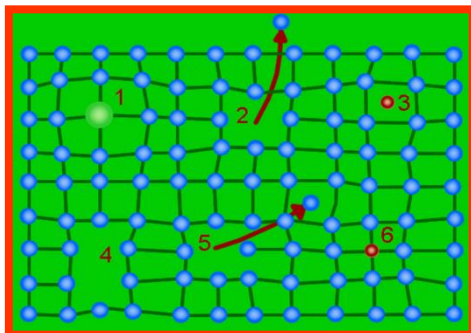
实际晶体中存在的晶体缺陷，按缺陷几何特征可分为三种：

点缺陷、线缺陷、面缺陷。

a. 点缺陷：点缺陷是晶体中成点状的缺陷，即在三维空间上的尺寸都很小的晶体缺陷。

在实际晶体结构中，晶格的某些结点，往往未被原子所占据，这种空着的位置称为空位。

同时又可能在个别空隙处出现多余的原子，这种不占有正常的晶格位置，而处在晶格空隙之间的原子称为间隙原子。



←点缺陷的几种形式

图中：2——空位；

1, 6置换原子；

3——间隙原子；

4——空位对；

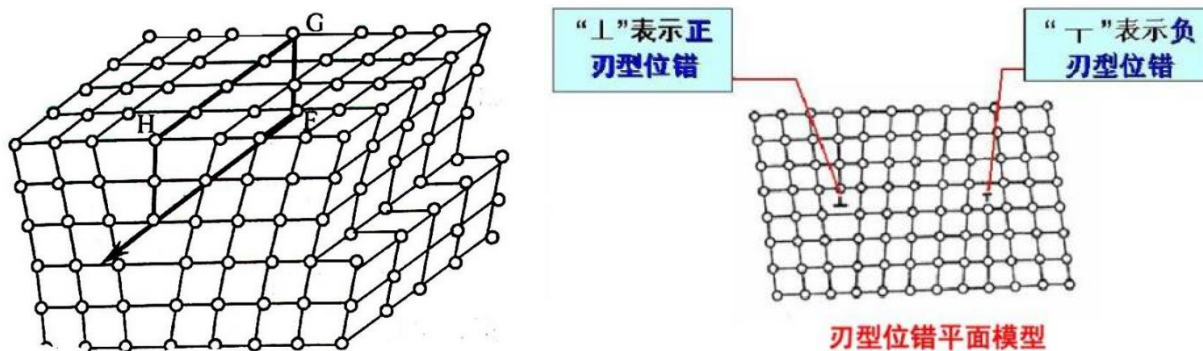
5——空位与间隙原子。

b. 线缺陷：线缺陷是指在三维空间的两个方向上尺寸都很小的晶体缺陷。

晶体中，某处有一列或若干列原子发生有规律的错排现象，称为位错。

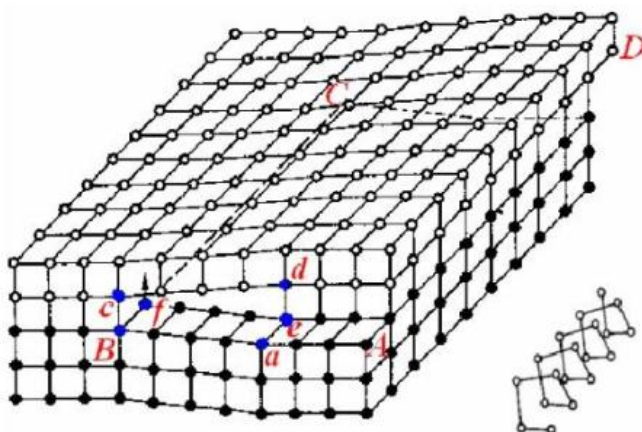
其特征是在一个方向上的尺寸很长，而另两个方向的尺寸很短。

位错的主要类型有刃型位错和螺旋位错。



(a) 刃型位错立体图

(b) 正刃型位错和负刃型位错



螺型位错

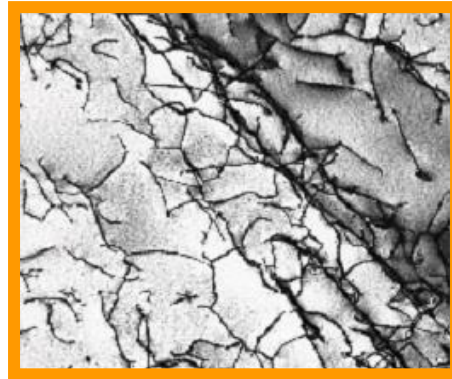
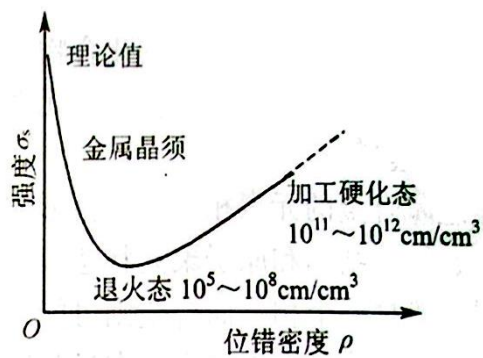
由于错位的存在，造成金属晶格畸变，并对金属的性能，如强度、塑性、疲劳及原子扩散、相变过程等都将产生重要影响。

位错对晶格规律性的影响

在位错线附近，原子的错排使晶格发生畸变。

位错对晶体性能的影响

位错的存在可降低晶体的强度。当位错大量产生后，又可提高强度，同时使晶体的塑性和韧性降低。



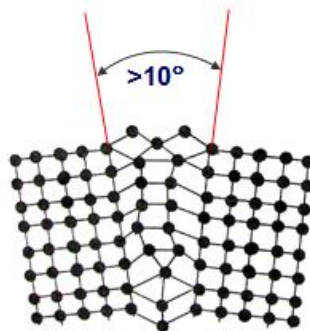
位错密度与屈服强度的关系

透射电镜观察到的晶体中的位错

c. 面缺陷：面缺陷是指二维尺度都很大，在第三个方向上的尺寸却很小，呈面状分布的缺陷。

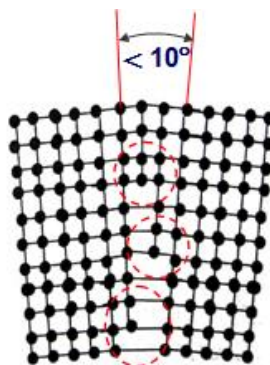
晶体中存在一个方向上尺寸很小，另外两个方向上的尺寸相对较大，呈面状分布的缺陷。有晶界、亚晶界和相界等。

①晶界：



晶界示意图

②亚晶界



亚晶界示意图

在晶界处，由于原子呈不规则排列，使晶格处于畸变状态，它在常温下对金属的塑性变形起阻碍

作用，从而使金属材料的强度和硬度都有所提高。



(a) Au-Ni 合金中的亚晶粒



(b) 亚晶界结构示意图

晶界等面缺陷对晶体性能的影响
晶界等面缺陷能同时提高晶体的强度和塑性
细化晶粒是改善金属力学性能的有效手段

教 案

工程材料与机械制造基础 课 5 讲

主讲人 李逸仙

课 题 (1) 结晶与凝固特性及其影响因素；(2) 纯金属的结晶
(第三章)

目的任务 掌握凝固与结晶概念，了解其影响因素
掌握纯金属结晶的冷却曲线、结晶过程及晶粒大小的控制

重点难点 纯金属的结晶过程及晶粒大小的控制途径

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

李逸仙

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课过程计划：</p> <p>复习（5min）</p> <p>引入：为什么要知道材料的凝固过程？（3min）</p> <p>什么是相？</p> <p>提示：结晶过程将影响材料的使用性能和使用寿命</p> <p>此外，如需进一步加工，研究结晶有什么意义？</p> <p>研究合金的结晶的意义？</p> <p>1. 液态金属的结构特点</p> <p>讲授气态、液态、固态三者的原子排列区别（5min）</p> <p>讲授液态金属的结构特点（5min）</p> <p>2. 纯金属结晶的条件</p> <p>提问：结晶与凝固的区别？玻璃和金属的凝固过程有什么区别？（5min）</p> <p>讲授金属结晶的热力学条件（5min）</p> <p>讲授过冷度的概念及其影响因素（10min）</p> <p>提问：结晶的冷却曲线为什么出现恒温阶段引出结晶潜热</p> <p>讲授结晶潜热的概念（3min）</p> <p>雨课堂练习（2min）</p> <p>3. 纯金属结晶的过程</p> <p>讲授形核+长大的基本过程（3min）</p> <p>讲授晶核形成的条件和过程（3min）</p> <p>讲授自发形核和非自发形核的区别（2min）</p> <p>提问：自发形核与非自发形核哪种更容易？（2min）</p> <p>讲授晶核长大的基本过程（2min）</p> <p>讲授均匀长大与树枝状长大的区别，提问谁更容易发生？（3min）</p> <p>4. 晶粒大小</p> <p>讲授晶粒度概念（5min）</p> <p>讲授晶粒大小影响因素（10min）</p> <p>讲授晶粒大小对力学性能的影响（3min）</p> <p>重点强调细晶强化，对比复习弥散强化和固溶强化（2min）</p>	

讲授晶粒度大小的控制方式（5min）

雨课堂练习（2min）

4. 课堂小结（5min）

总结课堂讲授重点，提出下节课预习重点

具体授课内容：

一、结晶与凝固特性及其影响因素

1、概念：

凝固：指物质从液态冷却转变为固态的过程。

结晶：金属材料的生产一般都要经过由液态到固态的凝固过程，如果凝固的固态物质是晶体，则这种凝固又称为结晶。**一切物质的结晶都具有严格的平衡结晶温度**。高于此温度，液态；低于此温度，结晶；处在此温度，液态与固态共存。

一切非晶体物质均无此明显的平衡结晶温度，即**它们没有明显的凝固点或是没有明显的熔点**，从液态到非晶固态是逐渐过渡的。

由于固态金属大都是晶体，所以**金属材料的凝固是最典型的结晶过程**，金属结晶后获得的原始组织称为铸态组织，它对金属的工艺性能及使用性能有直接影响。因此，了解金属从液态结晶为固体的基本规律是十分必要的。

2、液态金属的结构和性质

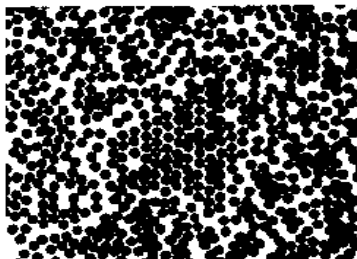


图 3-1 液态金属结构示意图

研究表明，液态物质内部（不同于气态原子的无规则排列），在小规则范围内，原子呈现出近似于固态结晶的规则排列，即形成近程有序的原子集团（如图 3-1）。这些原子集团尺寸不等，取向各异且不稳定，时聚时散，瞬时形成又瞬间消失。由此可知，结晶实质上是由近程有序状态转变为长程有序状态的过程。

广义上讲，物质从一种原子排列状态（晶态或非晶态）过渡为另一种原子规则排列状态（晶态）的转变过程称之为结晶。

结晶分为：一次结晶 二次结晶

通常把金属由液态转变为固态晶体的过程称之为一次结晶，而把金属从一种固态转变成另一种固态晶体的过程称为二次结晶。

3、凝固状态特性的影响因素

材料凝固后呈现晶态还是非晶态，主要受以下两个因素的影响：

(1) 熔融液体的黏度

黏度—表征流体中发生相对运动的阻力。F——流体的摩擦力

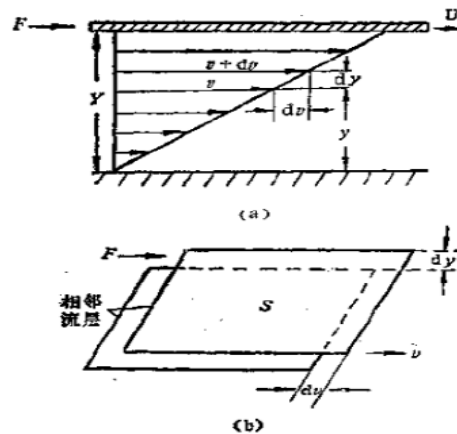


图 3-2 两平行流体内摩擦示意图

当两平行流体层相对移动时，流体的内摩擦力 F 的大小为：

$$F = \eta \cdot S \frac{dv}{dy}$$

式中：S—流体层的面积， m^2

$\frac{dv}{dy}$ —相对移动的速率梯度， $1/\text{s}$ ；

η —黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$

黏度表示，当速度梯度变为 1 单位时，在相接处的两流体层单位面积内摩擦力的大小。它是材料内部结合键性质和结构情况的宏观表现。 η 越大，表示流体越黏稠，流体层间的摩擦力就越大，相对运动也就越困难，甚至使原子无法迁移排成晶体。这样，凝固时很容易形成无规则的原子排列结构，如陶瓷材料中的玻璃结构、高分子材料中的非晶态结构。

研究表明，金属材料熔体的 η 值极小，熔点附近原子的迁移能力极强，绝大多数能凝固为晶体。

(2) 熔融液体的冷却速度

冷却速度对凝固的过程也产生重要的影响。

冷却速度越大，在单位时间内逸散的热量越多，熔融液体的温度便降得越低。它直接制约着原子的扩散能力，如前所示，当冷却速度大于 10^6°C 时，则可阻止金属材料中原子的迁移，从而获得非晶态的金属材料。

二、纯金属的结晶

1、纯金属的冷却曲线与冷却现象

纯金属都有一个固定的熔点（或称结晶温度），因此纯金属的结晶过程总是在一个恒定的温度下进行的。

纯金属的结晶过程可用热分析等实验测绘的冷却曲线来描述。

（1） 过冷现象

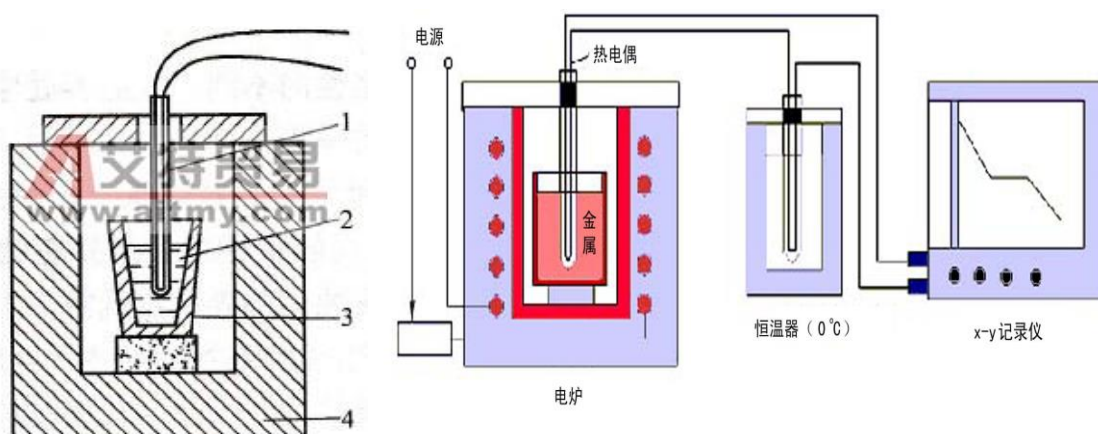


图 3-3 热分析装置示意图

1-热电偶；2-金属液体；3-坩埚；4-电阻炉；5-冰水；6-恒温器；7-记录仪。

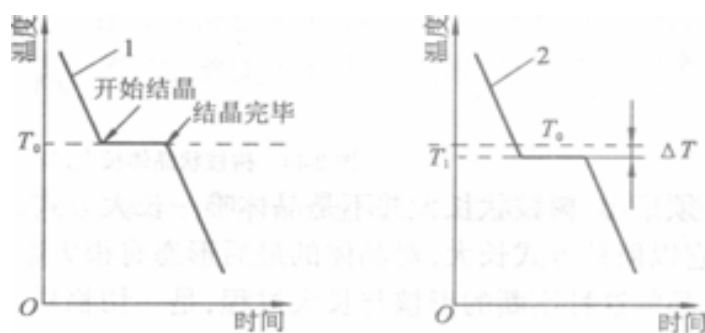


图 3-4 纯金属冷却曲线

由冷却曲线 1 可知，金属液缓慢冷却时，随着热量向外散失，温度不断下降，当温度降到 T_0 时，开始结晶。由于结晶时放出的结晶潜热补偿了其冷却时向外散失的热量，故结晶过程中温度不变，即冷却曲线上出现了水平线段，水平线段所对应的温度称为理论结晶温度（ T_m ，即熔点）。在理论结晶温度 T_m 时，液体金属与其晶体处于平衡状态，这时液体中的原子结晶为晶体的速度与晶体上的原子溶入液体中的速度相等。结晶结束后，固态金属的温度继续下降，直到室温。

在宏观上看， T_m 时既不结晶也不溶化，晶体与液体处于平衡状态，只有温度低于理论结晶温度 T_m 的某一温度（ T_n ）时，才能有效地进行结晶。

在实际生产中，金属结晶的冷却速度都很快。因此，金属液的实际结晶温度 T_n 总是低于理论结晶温度 T_m 。如图 2-12 曲线 2 所示。金属结晶时的这种现象称为过冷，两者温度之差称为过冷度，以 ΔT 表示，即 $\Delta T = T_m - T_n$ 。

实际上金属总是在过冷的情况下结晶的，但同一金属结晶时的过冷度并不是一个恒定值，而与其冷却速度、金属的性质和纯度等因素有关。冷却速度越大，过冷度就越大，金属的实际结晶温度就越低。过冷度随金属的本性和纯度的不同，以及冷却速度的差异，可以在很大的范围内变化。

金属不同，过冷度也不同。金属纯度越高，则过冷度越大。当以上两因素确定以后，过冷度 ΔT 的大小主要取决于冷却速度，冷却速度越大，则过冷度越大，即实际结晶温度越低。反之，冷却速度越慢，则过冷度越小，实际结晶温度越接近理论结晶温度。但，不管结晶多么缓慢，也不可能在理论温度进行结晶，即对于一定的金属来说，过冷度有一最小值，若过冷度小于这个值，则结晶过程就不能进行。

过冷是金属结晶的必要条件。

（2）结晶潜热：

物质从一个相转变为另一个相时，伴随着放出或吸收的热量称为相变潜热。

金属融化时固相转变为液相，吸收热量。熔化潜热

结晶时液态转变为固相则放出热量。结晶潜热

结晶潜热可以从冷却曲线上反映出来，当液态金属的温度到达结晶温度 T_n 时，由于结晶潜热的释放，补偿了散失到周围环境的热量，所以在冷却曲线上出现了平台，平台的延续时间就是结晶过程所用的时间，结晶过程结束，结晶潜热释放完毕，冷却曲线便又继续下降。冷却曲线上的第一个转折点，对应着结晶过程的开始，第二个转折点对应着结晶过程的结束。

2、结晶的一般过程

纯金属的结晶过程是晶核形成和核长大的过程。如下图示。金属液在达到结晶温度时，首先形成一些极细小的微晶体（即晶核）。随着时间的推移，液体中的原子不断向晶核聚集，使晶核长大；与此同时液体中会不断有新的晶核形成并长大，直到每个晶粒长大到相互接触，液

体消失为止，得到了多晶体的金属结构。

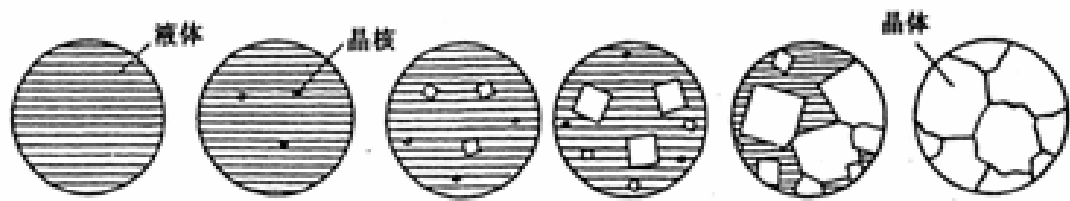


图 3-5 结晶过程示意图

纯金属结晶过程：

在液态金属中形成细小的晶体，称为晶核→不断吸附周围原子而长大，同时在液态金属中又会产生新的晶核→直到所有液态金属结晶完毕，形成许多外形不规则、大小不等的小晶体。

所以，液态金属的结晶包括：晶核的形成核长大。

1. 晶核的形成：在一定过冷条件下，仅仅依靠本身的原子有规则排列而形成晶核。

实验证实，当液态金属非常纯净时，其内部的微小区域也存在一些原子排列规则的，极不稳定的原子集团。当液态金属冷却到结晶温度以下时，这些微小的原子集团变成稳定的结晶核心（形成晶核），成为自发形核。形成晶核的另一种形式，是当液态金属中有杂质时（自带或人工加入），这些杂质在冷却时就会变成结晶核心并在其表面形成非自发形核。

自发形核的条件：过冷度的增大。

非自发形核：

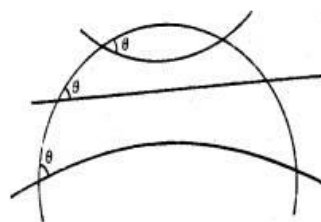


图 2-12 基底表面形态对形核的影响

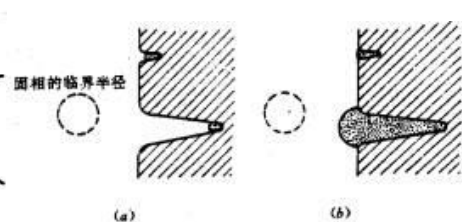


图 2-13 铸模壁缝隙处的非均匀形核
(a) 临界晶核；(b) 上面的晶核不能长出裂缝，而下面的则能够长出

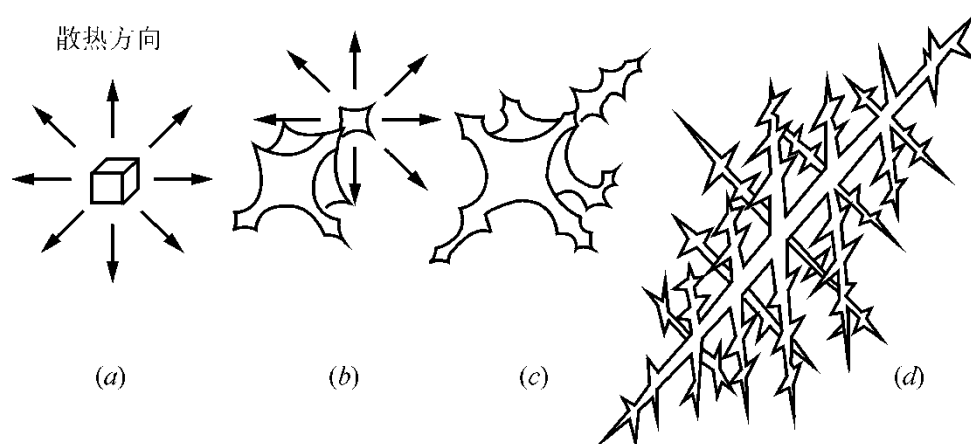
活化粒子：杂质表面上的微裂纹，小孔是凹曲面的一种特殊情况。这种由于表面形状的作用而促进形核的杂质粒子称为活化粒子。

活性去除：如果加热温度较高，活化粒子凸起部分熔解而使表面平滑，缝隙微孔减少，促进非均匀形核的作用逐渐消失，这种现象称活性去除。

自发形核与非自发形核同时存在于金属液中，但非自发形核往往比自发形核更重要，起优先和主导作用。

晶核长大的实质：原子由液体向固体表面转移。

在晶核开始长大的初期，由于其内部原子规则排列，其外形大多较规则。但随着晶核的长大，晶体棱角的形成，顶角、棱角处的散热条件优于其它部位，因而得到优先成长，如树枝一样，先长出枝干，再长出分支（即一次晶轴、二次晶轴），如此往复，直至把晶间填满，液态金属全部消失，最后形成一个树枝状的晶体，这种长大方式叫“树枝状长大”，简称为枝晶。



综上所述，纯金属的结晶总是在恒温条件下进行的，结晶时总有结晶潜热放出，结晶过程总是遵循形核和核长大规律，在有过冷度的条件下才能进行结晶。

2、金属结晶后的晶粒大小及控制

（1）晶粒大小对金属力学性能的影响

在常温下，晶粒越细小，金属的强度、硬度就越高，塑性、韧性也越好。反之则力学性能差。因此，生产实践中总是希望使金属及其合金获得较细的晶粒组织。

高温下工作的材料晶粒过大和过小都不好，一般细晶粒，高温易蠕变，易腐蚀，粗晶粒正好相反。在有些情况下希望晶粒越大越好，例如制造电动机和变压器的硅钢片。

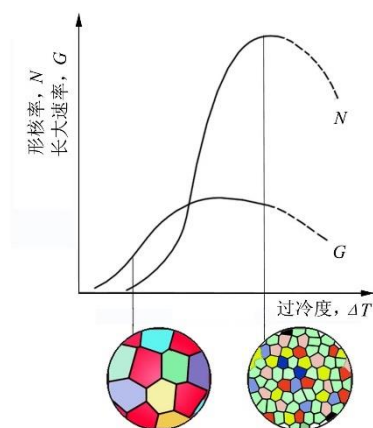


图 3-7 晶粒大小与 N, G 的关系

晶粒的大小主要取决于形核速率 N （简称形核率）和长大速率 G （简称长大率）。

形核率：是指单位时间内在单位体积中产生的晶核数。

长大率：是指单位时间内晶核长大的线速度。

凡是促进形核率，抑制长大率的因素，都能细化晶粒。生产中为细化晶粒，提高金属的力学性能，常采用以下方法：

Z_v 单位体积内的晶粒数目

Z_s 单位面积上的晶粒数目

影响晶粒大小（晶粒度）的主要因素是形核率和长大速率。

单位时间内，单位体积产生的晶核数称为形核率 N ，其单位为 形核数/ $(s \cdot cm^3)$ 。单位时间内晶体长大的线长度称为长大速率 G ，单位 cm/s 。

N 越大，结晶后的晶粒越多，晶粒越细小。若 N 不变，晶核的长大速率越小，则结晶所需时间越长，能产生的核心越多，晶粒就越细。

Z_v 和 Z_s 与 N 和 G 之间的关系：

$$Z_v = 0.9(N/G)^{\frac{3}{4}}$$

$$Z_s = 1.1(N/G)^{\frac{1}{2}}$$

多晶体纯铁的晶粒大小与力学性能			
晶粒直径	抗拉强度	屈服强度	伸长率
7.0mm	180MPa	38MPa	30.6%
0.1mm	278MPa	116MPa	50%

（2）晶粒大小的控制

①提高冷却速度，增大过冷度可使晶粒细化。冷却速度越大，过冷度越大。所以，控制金属结晶时的冷却速度就可以控制过冷度，从而控制晶粒的大小。

例如：冷却速度对 A356 铝合金铸件组织的影响分析

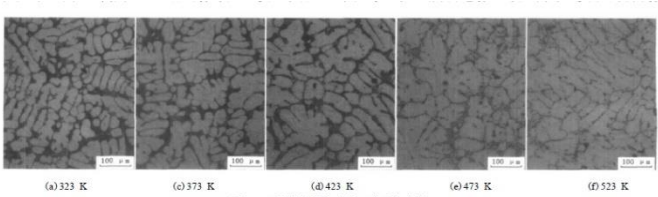


图 3 不同模具温度条件下的金相组织

随着冷却速度的提高，凝固组织中的共晶含量增多，而且初生相组织的形态也由粗大的树

<p>枝晶逐步向蔷薇状枝晶演变</p> <p>②变质处理（孕育处理）：就是在浇注前，向液体中加入某种物质（称变质剂），促进非自发形核或抑制晶核的长大速度，从而细化晶粒的方法。</p> <p>例如，在铁水中加入硅铁、硅钙合金，未熔质点的增加使石墨变细；在浇注高锰钢时加入锰铁粉；向铝液中加入 TiC、VC 等作为脱氧剂，其氧化物可作为非自发晶核，使形核率增大；在铝硅铸造合金中加入钠盐，钠能附着在硅的表面，降低 Si 的长大速度，阻碍大片状硅晶体形成，使合金组织细化。这些都是变质处理在实际生产中的应用。</p> <p>在生产中，用快冷只适合较小的铸件。对于尺寸较大、形状较复杂的铸件，用快冷容易产生各种缺陷。生产中常采用变质处理的方法来细化晶粒。</p> <p>③附加振动：在金属液结晶过程中，也可以采用机械振动、超声波振动、电磁振动等措施，使正在长大的晶粒破碎，从而细化晶粒。</p>	
---	--

教 案

工程材料与机械制造基础 课 6 讲

主讲人 李逸仙

课 题 合金的相结构及性能

目的任务 掌握合金相结构的分类
掌握合金相结构与合金性能的关系

重点难点 固溶体相和金属间化合物对合金性能的影响

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：李逸仙
年 月 日

抽 查

系主任（签字）：
年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课过程计划：</p> <p> 复习（5min）</p> <p> 引入：</p> <p> 上一讲，已对金属的晶体结构与结晶，进行讲解，重点讲解了金属晶体的结构对金属性能的影响，并在此基础上讲解了细化晶粒的目的与常见方法（提问细化晶粒的目的与常见方法？）。那么常见的合金的晶体结构与结晶过程又是怎么样的呢？首先对合金的晶体结构中的基本相结构进行讲解, 然后引入合金的概念</p> <p> 1. 合金的概念</p> <p> 讲授合金的合金、相、组元、组织的概念（10min）</p> <p> 提问：为什么要发展合金？</p> <p> 2. 固溶体</p> <p> 讲授固溶体的定义、形成及结构特点（5min）</p> <p> 讲授置换固溶体与间隙固溶体的结构特点及异同（5min）</p> <p> 讲授有限固溶体与无限固溶体结构特点及异同（5min）</p> <p> 讨论:无限固溶体的形成条件（3min）</p> <p> 讲授有序固溶体与无序固溶体的结构特点及异同（5min）</p> <p> 讲授固溶体的性能特点（5min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p> <p> 3. 金属化合物</p> <p> 讲授金属化合物的形成、结构及性能特点，极其与固溶体的区别（5min）</p> <p> 讲授正常价化合物的概念及结构特点（5min）</p> <p> 讲授电子化合物的概念及结构特点（8min）</p> <p> 讲授间隙相及间隙化合物的概念及结构特点（10min）</p> <p> 讨论：间隙相、间隙化合物及间隙固溶体有什么区别？（2min）</p> <p> 讲授金属化合物的性能特点（5min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p> <p> 4. 机械混合物</p> <p> 讲授机械混合物的概念及结构特点（3min）</p> <p> 4. 课堂小结（5min）</p> <p> 板书总结合金中相结构的基本分类情况，提出下节课预习重点</p> <p>具体授课内容：</p> <p>合金的基本概念</p> <p>合金：由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素组成的具有金属特征的物质。</p> <p>组元：组成合金的基本的物质叫组元。</p> <p>相：在合金中具有相同成分、相同结构、相同性质的均匀部分，并与其它相有明显界面之分。</p>	

组织：指用肉眼或借助于放大镜、显微镜观察到的材料内部的形态结构。

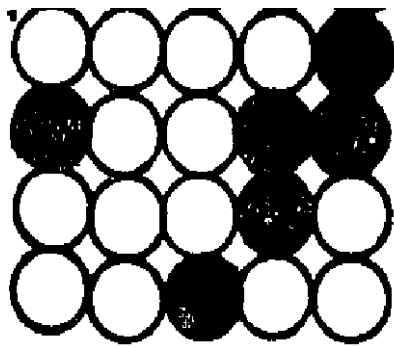
1. 固溶体

合金在固态下，组元间仍能互相溶解而形成的均匀相，称为固溶体。（不改变溶剂的点阵类型）

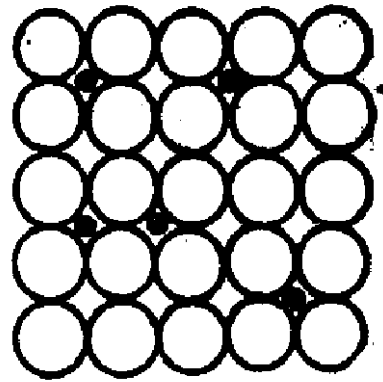
固态合金中的相，按其组元原子的存在方式可分为固溶体和金属化合物两大基本类型

1) 固溶体的两种分类

① 置换固溶体



置换固溶体



间隙固溶体

溶质原子溶于固溶体中的量，称为固溶体的浓度。

按溶质组元在溶剂中的溶解度有无限制，置换固溶体又可分为有限固溶体和无限固溶体。

大部分固溶体均为有限固溶体。

固溶体性能：晶格畸变，金属的强度，硬度很高。**固溶强化**

2、金属化合物

合金组元间发生相互作用而生成的一种晶格类型和性能完全不同于原来任一组元的新固相称为金属间化合物，具有一定程度的金属性质。

与普通化合物不同，除离子键和共价键之外，金属键也发挥作用。

金属化合物的结构特点与组元具有完全不同的晶格类型。

金属化合物性能：复杂的晶体结构，熔点高，硬度高，而脆性大。弥散强化

当合金中含有金属化合物时，其强度、硬度和耐磨性提高，而塑性及韧性有所下降。

金属化合物的分类:

1) 正常价化合物

形成: 电负性相差大的组元结合而成, 分子式符合化合价规律。

特点: 成分固定不变, 可用化学式表示。

如 Mg_2Si 、 Mg_2Sn 、 MgSe 、 MgS 、 MnS 、 ZnS 等。具有较高的硬度, 脆性较大。性能偏向离子晶体, 少数具有半导体的性质。常作为有色金属的强化相。

NaCl ? SiO_2 ?

2) 电子化合物

不遵守化合价规律, 而是按一定的电子浓度的比值形成的化合物。电子浓度不同, 化合物的晶格类型也不同。

——硬、脆, 有色金属强化的相

特点: (1) 晶体结构类型和电子浓度有关;

(2) 主要以金属键结合, 具有明显金属特性, 可以导电, 不能作为合金的基体相。

3) 间隙相和间隙化合物

过渡族元素和原子半径较小的氢、氮、碳、硼组成 (间隙原子)。

形成: 金属原子与间隙原子形成的化合物

$r_{\text{非}} / r_{\text{金}} < 0.59$ 时, 形成简单结构的间隙化合物——间隙相。

$r_{\text{非}} / r_{\text{金}} > 0.59$ 时, 形成复杂晶体结构的间隙化合物——间隙化合物。

类型	简单结构间隙化合物							复杂结构间隙化合物	
化学式	TiC	ZrC	VC	NbC	TaC	WC	MoC	Cr_{23}C_6	Fe_3C
硬度HV	2850	2840	2010	2050	1550	1730	1480	1650	~800
熔点/℃	3140	3805	3023	3680 ± 50	3983	2785 ± 5	2527	1577	1227

(1) 间隙相

间隙相特点:

1) 具有金属特性;

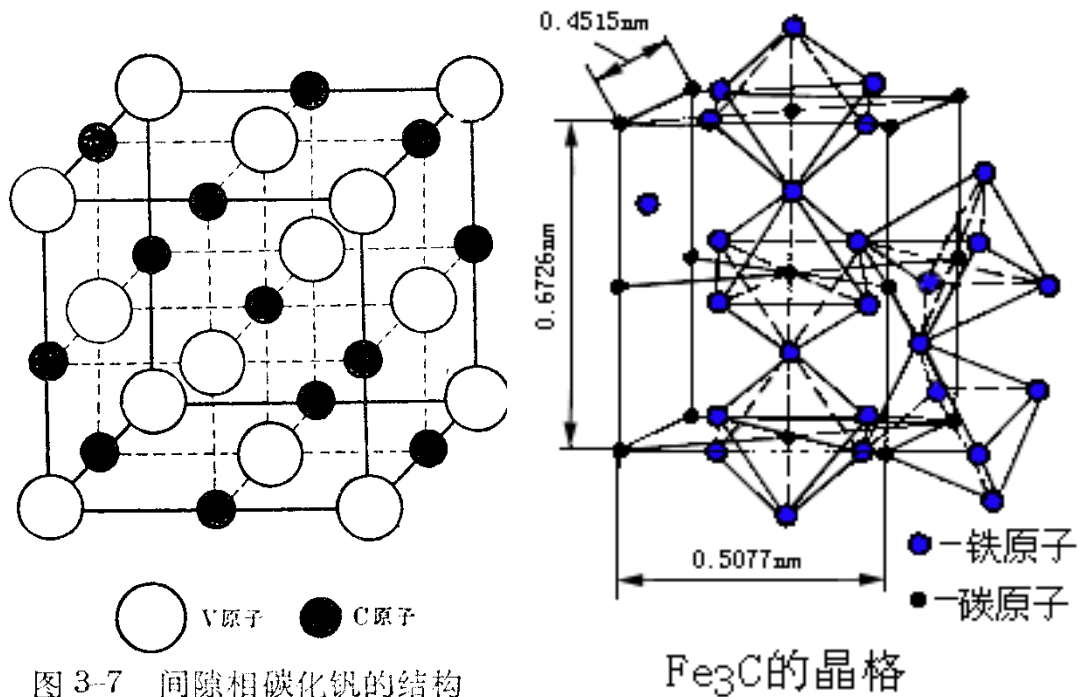
2) 结合键: 既有共价键又有金属键的性质;

3) 具有极高的熔点及硬度, 但很脆, 常用于工具中表面或高硬度层 (高合金钢和硬质合金)

(2) 间隙化合物

形成：Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Mo、W 和 C 易形成间隙化合物。

如钢中的 Fe_3C 、 Cr_23C_6 、 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 等。



金属化合物的性能：

- (1) 具有复杂的结合键及晶体结构，表现出高熔点、硬度和脆性；
- (2) 具有一定的金属特性，但不能作为合金的基体相；
- (3) 当其以细小的尺寸弥散分布时，可使合金得到强化，提高其强度、硬度、耐磨性及高切削性，是合金钢中重要的组成相（又叫第二相）；
- (4) 还可用于一些特殊的功能材料中。

4) 机械混合物

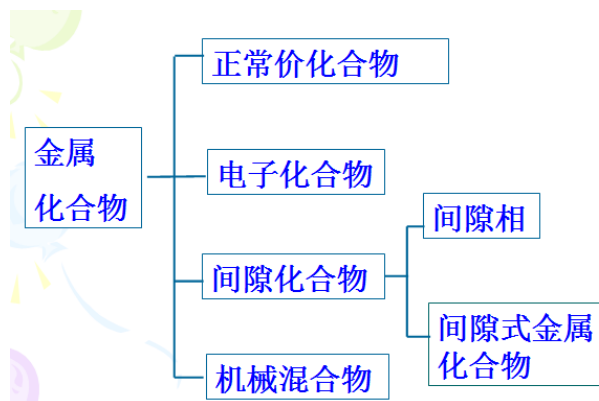
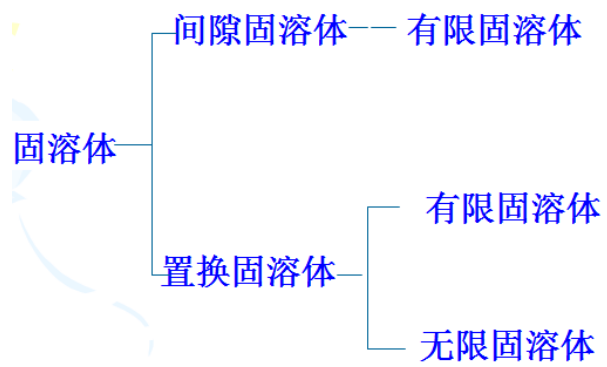
形成：由两种或两种以上的相按一定的质量分数组合成的物质称为机械混合物。

特点： 1) 混合物中各组成相仍保持自己的晶格类型；

2) 其性能主要取决于各组成相的性能以及相的分布状态。

工程上使用的大多数金属合金的组织都是由固溶体与少量金属化合物组成的机械混合物，其力学性能通过调整固溶体的溶质含量及金属化合物的数量、大小、形态和分布状态来控制。

小结:



教 案

工程材料与机械制造基础 课 7 讲

主讲人 李逸仙

课 题 二元合金相图

目的任务 掌握二元合金相图的基本概念
掌握合金的结晶过程及相图的建立

重点难点 二元合金的结晶过程及相图的建立

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：李逸仙
年 月 日

抽 查

系主任（签字）：
年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课过程安排：</p> <p>复习（5min）</p> <p>1. 概述</p> <p>引入：合金中各相的数量及其分布规律与合金的成分、结晶过程有直接的关系。与纯金属的结晶相比，合金的结晶有它自身的特点。首先，合金的结晶不一定在恒温下进行，很多是在一个温度范围内完成的，而纯金属的结晶是在固定的温度下进行的；其次，合金的结晶不仅会发生晶体结构的变化，还会伴有化学成分的变化，而纯金属的结晶，只会发生晶体结构的变化。因此，对于合金这种复杂的结晶过程必须用合金相图来进行分析。</p> <p>讲授纯金属与合金结晶过程的区别，引出相图的必要性（3min）</p> <p>讲授相图相关基础概念（2min）</p> <p>2. 二元相图的建立</p> <p>讲授热分析法建立 Cu-Ni 二元匀晶相图（5min）</p> <p>总结相图的意义（3min）</p> <p>雨课堂练习（2min）</p> <p>3. 匀晶相图</p> <p>讲授匀晶相图中基本的点线区的含义（3min）</p> <p>讲授匀晶相图平衡结晶过程（5min）</p> <p>讲授杠杆定律的原理及例题（10min）</p> <p>4. 共晶相图</p> <p>讲授共晶相图中基本的点线区的含义（10min）</p> <p>讲授共晶相图平衡结晶过程（10min）</p> <p>课堂练习：共晶相图杠杆定律计算（5min）</p> <p>5. 包晶相图</p> <p>讲授包晶相图中基本的点线区的含义（7min）</p> <p>讲授包晶相图平衡结晶过程（10min）</p> <p>讲授包晶结晶过程（2min）</p> <p>6. 共析相图</p> <p>对比共晶相图讲授共析相图基本含义（3min）</p> <p>4. 课堂小结（5min）</p> <p>总结课堂讲授重点，提出下节课预习重点</p> <p>具体教学内容：</p>	

一、相图的建立

1、相图的相关概念

合金结晶的特点：

1) 纯金属结晶后只能得到单相，而合金结晶后，既可以获得单相固溶体，又可以获得单相的金属化合物，更多的时候得到的是既有固溶体又有金属化合物的多相组织；

2) 合金的组元不同，获得的固溶体和化合物的类型也不同，即使组元确定后，结晶后所获得的相的性质、数目及其相对含量也随着合金成分和温度的变化而变化，即在不同的成分和温度时，合金将以不同的状态存在；

相图：表示合金系中各个合金结晶过程的图，反映了合金在平衡条件下（极缓慢冷却或加热）的平衡状态下相或者组织与温度、成分间关系的图形，又称状态图或平衡图。用来研究合金系的状态、温度、压力及成分之间的关系。

二元相图（两个组元配成的合金体系）

三元相图（三个组元配成的合金体系）

用途：在工业生产中，相图是制定合金冶炼、铸造、焊接、热处理等工艺的重要依据，也是研究金属材料的一个十分重要的工具。

几个相关概念：

(1) 合金系

由两个或两个以上的组元按照不同比例配制而成的一系列不同成分的合金，总称为合金系，如 Pb-Sb 合金系，Al-Si 合金系，Fe-C 合金系，Au-Ag 合金系，Fe-Cr 合金系。

(2) 平衡相、平衡组织

如果合金在某一个温度停留任意长时间，合金中各个相的成分都是均匀不变的，各相的相对质量也不变，那么该合金就处于相平衡状态，此时合金中的各相称为平衡相，而这些平衡相所构成的组织称为平衡组织。平衡相是合金的自由能处于最低的状态，也就是合金最稳定的状态。合金总是力图通过原子扩散趋于这种状态。

(3) 平衡结晶

如果合金在其结晶过程中或相变过程中的冷却速度非常缓慢，那么由于其原子有充分的时间进行扩散，所以合金中的各相将近似于平衡状态，这种冷却方式称为平衡冷却，而这种处于相平衡状态的结晶或相变方式称为平衡结晶。

2、二元相图的确定

测定不同成分合金的转变温度，将所有的开始转变点连接起来，将所有的转变结束点连接起来。

计算方法

实测方法：

热分析法

金相分析法

硬度测定法

X 射线结构分析法

膨胀法

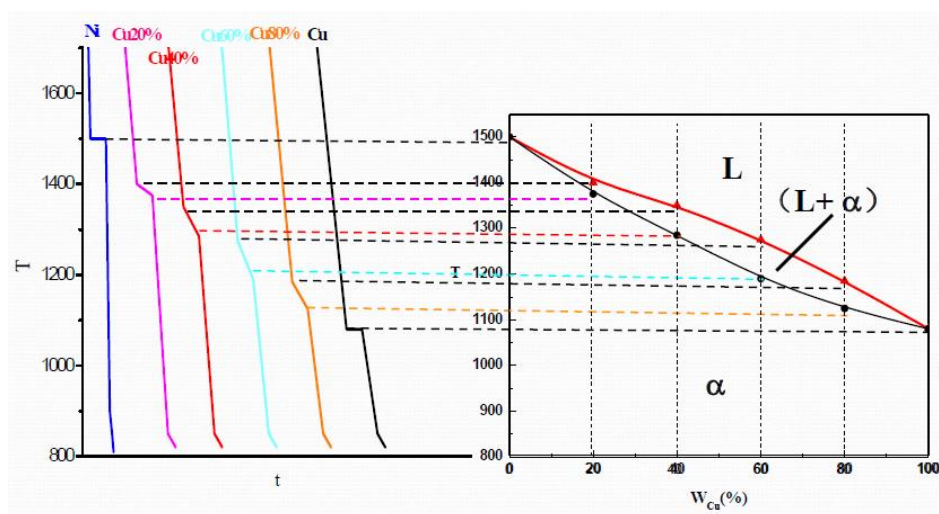
磁性法

相图建立步骤:

- 配制合金
- 熔化后冷却测冷却曲线
- 确定临界点并标在相图中
- 汇总
- 相图建立步骤

下面以热分析法为例介绍 Cu-Ni 合金（白铜）相图的建立过程:

Cu-Ni 合金相图如下图所示。图中纵坐标表示温度，横坐标表示合金成分。横坐标从左到右表示合金成分的变化,即镍的质量分数 W_{Ni} 由 0 向 100%逐渐增大,而铜的质量分数 W_{Cu} 相应地 由 100%向 0 逐渐减少。在横坐标上任何一点都代表一种成分的合金,例如 C 点代表 W_{Ni} 为 40%+ W_{Cu} 为 60%的合金,而 D 点代表 W_{Ni} 为 80%+ W_{Cu} 为 20%的合金。



(2) 二元合金相图的建立 相图是通过实验方法建立的。利用热分析法测定 Cu-Ni 合金的临界点（发生相变的温度，也称相变点或转折点），说明二元合金相图的建立。

(3) 二元合金相图的基本类型 在二元相图中，有的相图简单（如 Cu-Ni 相图），有的相图复杂（如 Fe-C 相图），但不管多么复杂，任何二元相图都可以看成是几个基本类型的相图的叠加、复合而成的。

二、二元合金的结晶与相图

1、二元匀晶反应的合金结晶相图

与纯金属相比，固溶体合金凝固过程有两个特点： 固溶体合金凝固时析出的固相成分

与原液相成份不同 需成份起伏。 α 晶粒的形核位置是那些结构起伏、能量起伏和成分起伏都满足要求的地方。固溶体合金凝固时依赖于异类原子的互相扩散。

两组元在液态和固态下均可以以任意比例相互溶解，即在固态下形成无限固溶体的结晶规律所组成的合金相图称为匀晶相图。例如 Cu-Ni, W-Mo, Fe-Ni 等都是匀晶相图。在这类合金中，结晶都是从液相中结晶出单相的固溶体，这种结晶过程称为匀晶转变。现以 Cu-Ni 相图为例进行分析。

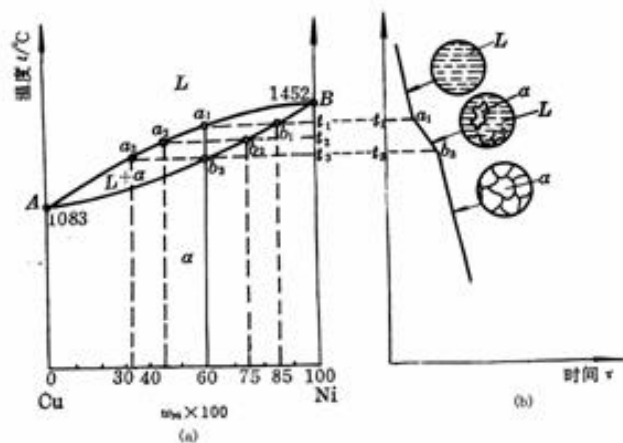


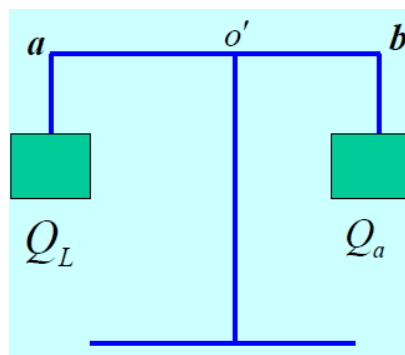
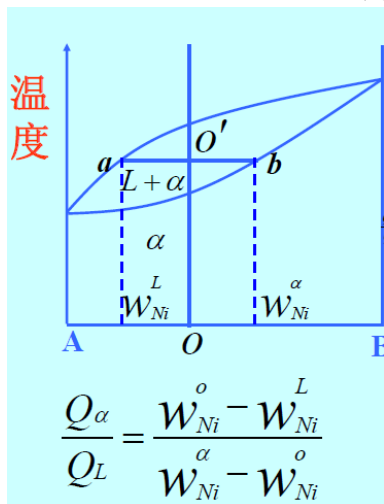
图 3-12 Cu-Ni 合金相图及冷却曲线
(a) Cu-Ni 合金相图 (b) 冷却曲线

1) 平衡结晶过程

①相图分析 图 3-12 (a) 为匀晶相图。该相图由两条封闭的曲线组成——液相线、固相线。在这两条曲线上有两个特性点：A 点，B 点。由特性点 A, B 连接的液相线和固相线称为特性线，它们把相图分成三个相区，即液相区，以 L 表示；固相区，是由 Cu、Ni 形成的无限固溶体，用 α 表示；两相共存区，以 $L + \alpha$ 表示。

2) 二元相图的杠杆定律

在二元合金相图的两相区内，温度一定时，两相的重量比是一定的。



②不平衡结晶——枝晶偏析（晶内偏析）及其危害和消除方法

· 晶内偏析（枝晶偏析）

- 定义：晶粒内部出现的成份不均匀现象。
- 通过扩散退火或均匀化退火，使异类原子互相充分扩散均匀，可消除晶内偏析。

2、二元共晶反应的合金结晶相图

1. 相图分析

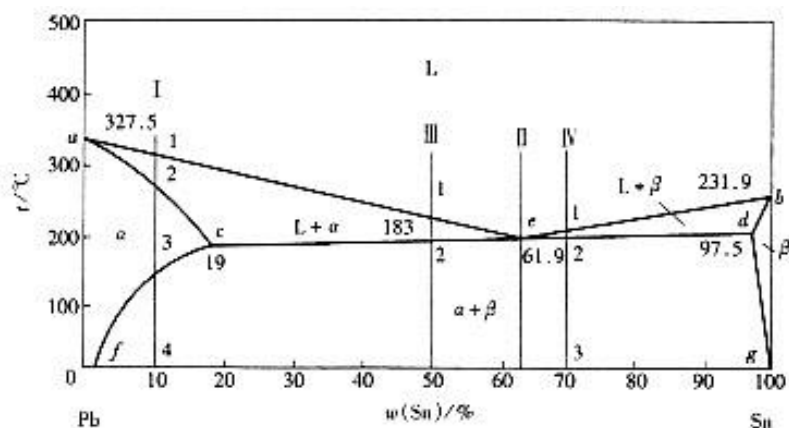


图 8-17 Pb-Sn 相图

线：

液相线 AE、BE

固相线 AM、BN

固溶度线（溶解度曲线） MF、NG

共晶线 MEN，成分位于共晶线上的合金，可发生共晶转变

相区

- 单相区 $\begin{cases} \text{液相区 } L \\ \text{固相区 } \alpha, \beta \end{cases} f = \alpha - 1 + 1 = 2$
- 两相区 $L + \alpha, L + \beta, \alpha + \beta f = 2 - 2 + 1 = 1$
- 三相区 CED $L_e = \alpha_M + \beta_N f = 2 - 3 + 1 = 0$

2. 共晶系合金的平衡凝固

I 合金

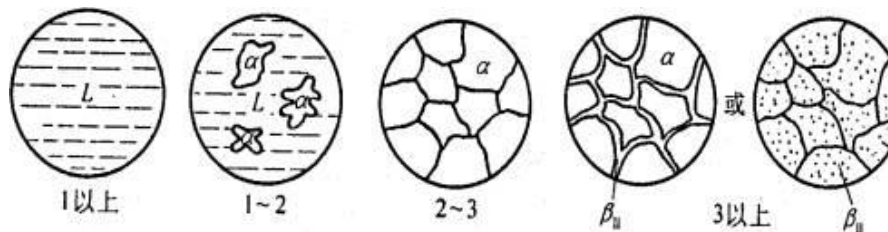


图 3.26 含锡量为 10% 的 Pb-Sn 合金平衡结晶过程

II 合金

$$W_{\alpha} = \frac{EN}{MN} \times 100\% = \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19} \times 100\% = 45.4\%$$

$$W_{\beta} = \frac{ME}{MN} \times 100\% = \frac{61.9 - 19}{97.5 - 19} \times 100\% = 54.6\%$$

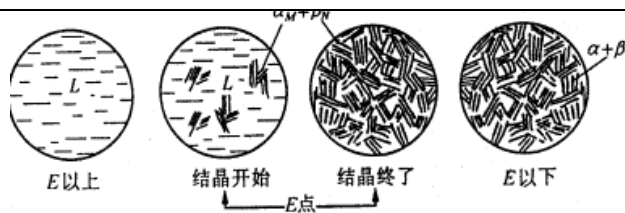
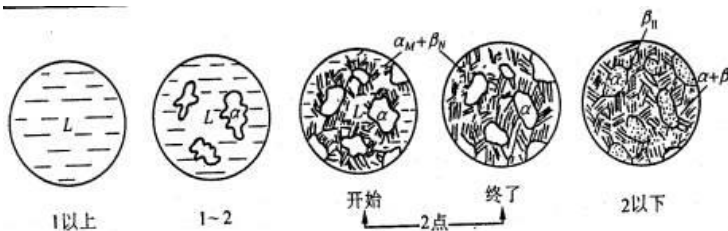


图 3.28 共晶合金的平衡结晶过程

亚共晶合金 (III 合金) 组织:

组织 $\alpha + (\alpha + \beta) + \beta_{II}$



过共晶合金 (VI 合金)

组织 $\alpha + \beta_{II} + (\alpha + \beta)$

3. 共晶组织形态及其形成机理

3、包晶相图

(1) 相图分析

线条的含义:

液相线 AGB

固相线 AP, DB

固溶线 PE, DF

包晶线 PDC

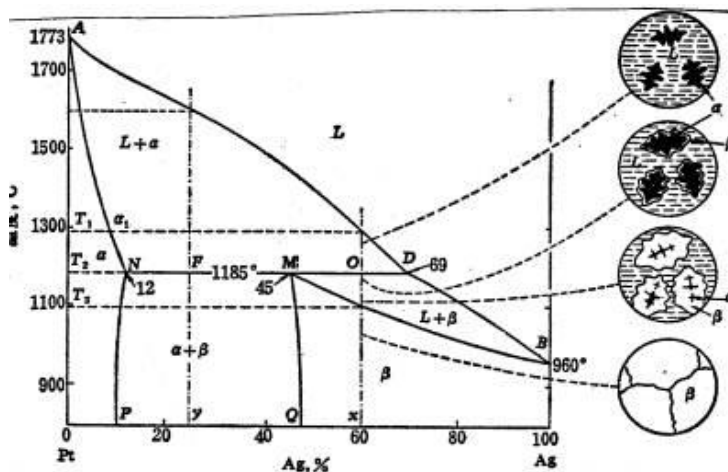


图 3-42 Pt-Ag相图及合金的凝固

相区

单相区 L, α , β

两相区 L+ α , L+ β , β

三相区 水平线

PDC f=0

(2) 包晶系合金的平衡凝固和组织

x1 合金

组织 $\beta + \alpha$ II

1186 °C :

$$W_{\alpha} = 1 - W_L = 42.9\%$$

$$W_L = \frac{PD}{DC} = \frac{42.4 - 10.5}{66.3 - 10.5} = 57.1\%$$

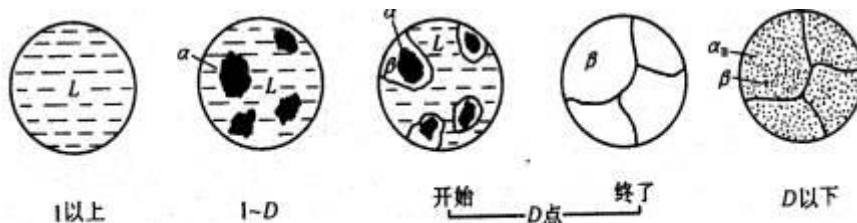


图 3.42 合金 I 的平衡结晶过程

X3 合金

组织: $\beta + \alpha$ II

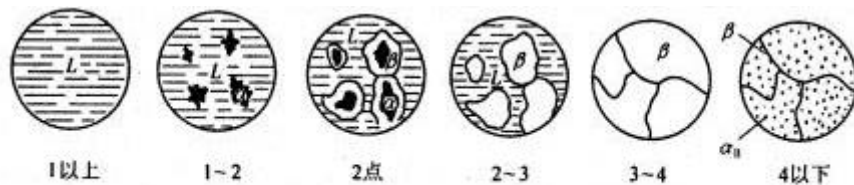
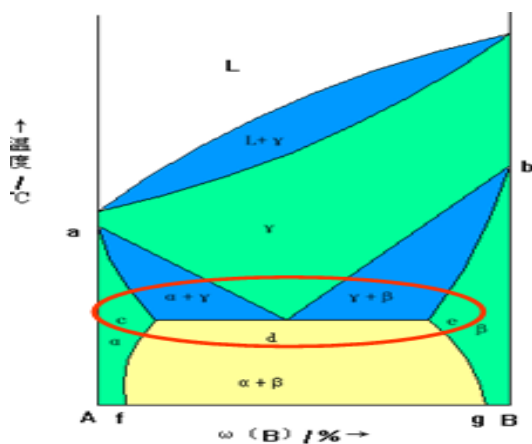


图 3.44 合金 III 的平衡结晶过程

4、共析相图:

共析反应(共析转变)是指在一定温度下,由一定成分的固相同时析出两个成分和结构完全不同的新固相的过程。共析转变也是固态相变。



教 案

工程材料与机械制造基础 课 8 讲

主讲人 李逸仙

课 题 铁碳合金系相图及平衡结晶过程分析（第四章）

目的任务 掌握铁碳相图的特性点、线、区域的含义
掌握典型合金的平衡结晶过程及室温组织

重点难点 铁碳合金相图典型位置含义及结晶过程分析

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：李逸仙
年 月 日

抽 查

系主任（签字）：
年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课计划：</p> <p>第一讲：</p> <p> 复习（5min）</p> <p> 引入：前面我们已经给大家讲述了二元合金相图以及一些基本的结晶过程，那么作为我们最关心的钢（铁碳合金）它的结晶过程又是如何呢？下面我们就来看一下铁碳合金的结晶反应。</p> <p> 1. 概述</p> <p> 讲授铁碳合金相图中各个组元的结构及其性能特点（10min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p> <p> 2. 铁碳合金的相图分析</p> <p> 讲授铁碳合金相图中各个点的含义（5min）</p> <p> 讲授铁碳合金相图中各个线的含义（5min）</p> <p> 讲授铁碳合金相图中各个区的含义（5min）</p> <p> 总结铁碳相图中涉及的平衡反应（5min）</p> <p> 3. 铁碳合金平衡结晶过程分析</p> <p> 讲授工业纯铁平衡结晶过程以及运用杠杆定律计算其室温下的组织组成物和相组成物质相对量（10min）</p> <p> 讲授共析钢平衡结晶过程以及运用杠杆定律计算其室温下的组织组成物和相组成物质相对量（10min）</p> <p> 学生现场分析亚共析钢平衡结晶过程（4min）</p> <p> 教师点评（2min）</p> <p> 学生课堂运用杠杆定律计算亚共析钢室温下的组织组成物和相组成物质相对量（8min）</p> <p> 教师点评讲解（2min）</p> <p> 学生现场分析过共析钢平衡结晶过程（4min）</p> <p> 教师点评（2min）</p> <p> 讲授杠杆定律计算其室温下的组织组成物和相组成物质相对量（5min）</p> <p> 雨课堂练习（1min）</p> <p> 4. 课堂小结（5min）</p> <p> 总结课堂讲授重点，提出下节课预习重点</p> <p>第二讲：</p> <p> 复习（5min）</p> <p> 1. 铁碳合金平衡结晶过程分析</p>	

讲授共晶白口铸铁平衡结晶过程以及运用杠杆定律计算其室温下的组织组成物和相组成物质相对量（15min）

学生现场分析亚共晶白口铸铁平衡结晶过程（5min）

教师点评（3min）

讲授运用杠杆定律计算亚共晶白口铸铁室温下的组织组成物和相组成物质相对量（10min）

学生现场分析过共晶白口铸铁平衡结晶过程（5min）

教师点评（3min）

讲授杠杆定律计算共晶白口铸铁室温下的组织组成物和相组成物质相对量（10min）

2. 铁碳和合金相图总结

总结铁碳合金相图中各成分下室温组织（5min）

总结铁碳合金相图中涉及的组织和相（5min）

总结铁碳合金相图中碳含量与相组成物和组织组成物相对量的关系变化（7min）

雨课堂练习（5min）

讲述铁碳相图成分与性能之间的关系（10min）

雨课堂练习（2min）

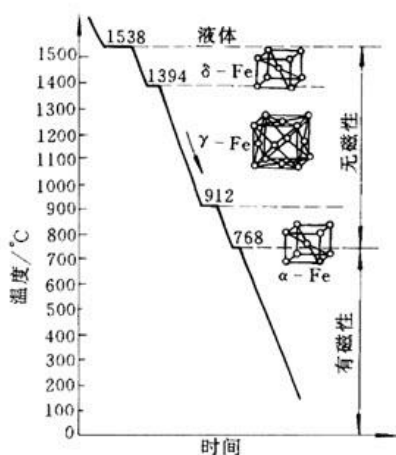
4. 课堂小结（5min）

总结课堂讲授重点，提出下节课预习重点

具体授课内容：

1 铁碳合金的基本组元

1.1 纯铁



1.2 铁碳合金的基本相

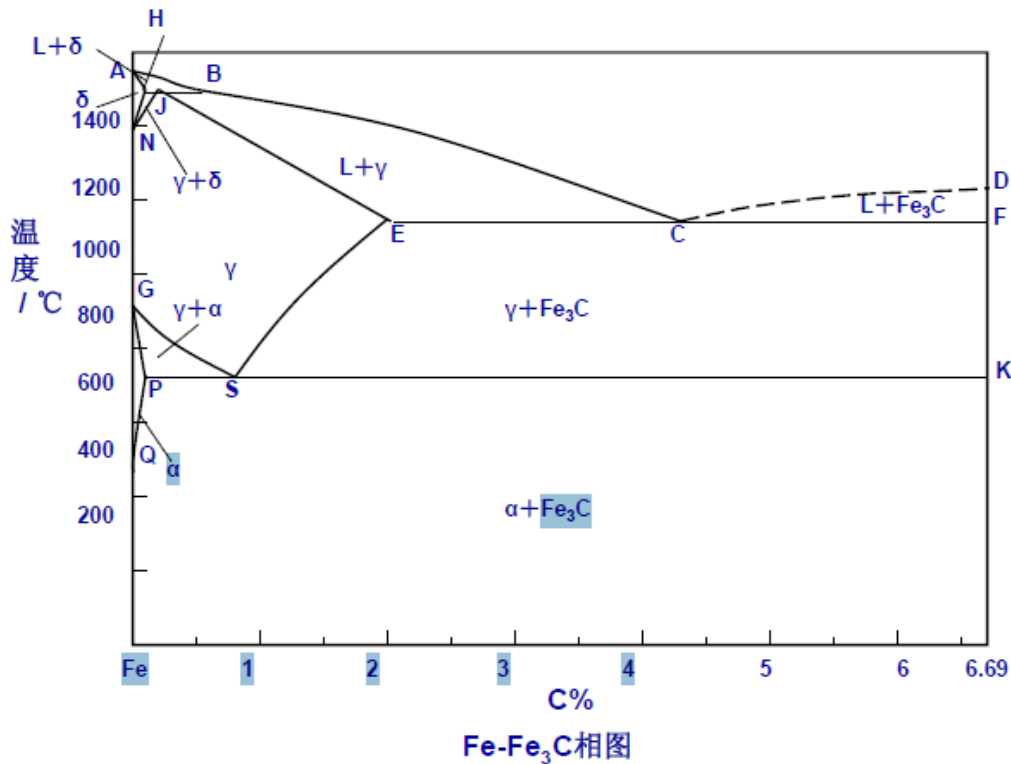
1) 铁素体: C 溶于 α -Fe 的晶格中形成间隙固溶体, 保持 α -Fe 的 bcc 结构, 记为 “F” 或 “ α ”。

2) 奥氏体: C 溶于 γ -Fe 的晶格中形成间隙固溶体, 保持 γ -Fe 的 fcc 结构, 记为 “A” 或 “ γ ”

3) 渗碳体: Fe 与 C 组成的具有复杂晶体结构的间隙化合物。记为“ Fe_3C ”或“ C_m ”。

2 铁碳合金相图分析

2.1 铁碳合金相图中的合金



铁碳合金的分类: 工业纯铁、钢和白口铸铁三类;

工业纯铁: $W_c < 0.0218\%$;

钢: 亚共析钢 $W_c = 0.0218\% - 0.77\%$;

共析钢 $W_c = 0.77\%$;

过共析钢 $W_c = 0.77\% - 2.11\%$

白口铸铁: 亚共晶白口铸铁 $W_c = 2.11\% - 4.3\%$; 共晶白口铸铁 $W_c = 4.3\%$; 过共晶白口铸铁 $W_c = 4.3\% - 6.69\%$

(1) 相图中的点:

P— α 相中最大溶 C 量

S—共析点

E— γ 相中最大溶 C 量

C—共晶点

F— Fe_3C

(2) 相图中的线

ABCD——液相线

AHJECF——固相线

HJB——包晶线

ECF——共晶线

PSK——共析线

GS—— α 相开始析出线

ES——C 在 γ 相中的溶解度曲线

PQ——C 在 α 相中的溶解度曲线

(3) 相图中的区

单相区: L、 δ 、 α 、 γ 、 Fe_3C

两相区: L + δ 、L + γ 、L + Fe_3C 、 γ + δ 、 γ + α 、 γ + Fe_3C 、 α + Fe_3C

三相区: L + γ + δ 、L + γ + Fe_3C 、 γ + α + Fe_3C

(4) 相图中的相变反应

包晶反应: $L_B + \delta_H \rightarrow \gamma_J$

共晶反应: $L_C \rightarrow \gamma_E + \text{Fe}_3\text{C}$

共析反应: $\gamma_s \rightarrow \alpha_P + \text{Fe}_3\text{C}$

匀晶反应: $L \rightarrow \delta$

$L \rightarrow \gamma$

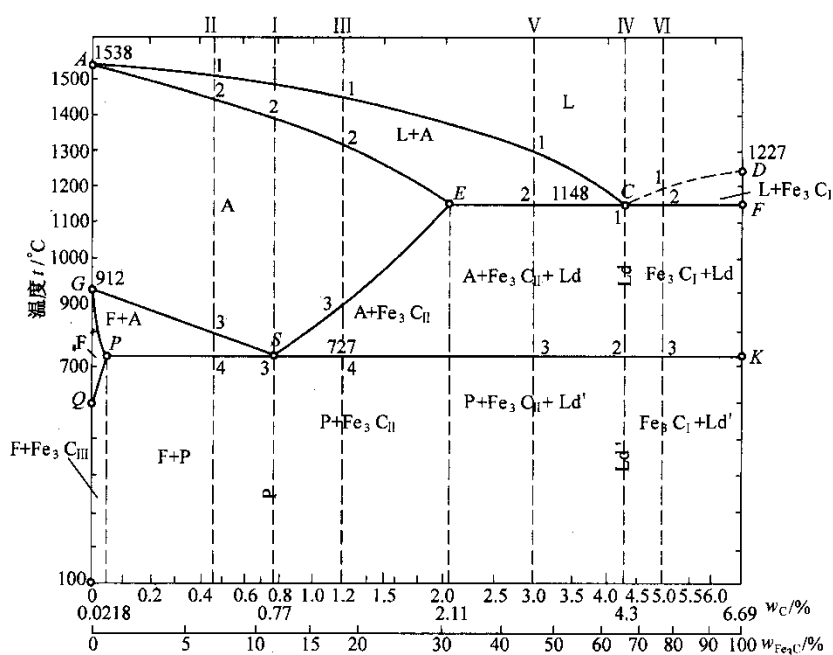
$L \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$

脱溶转变: $\gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{C II}$

$\alpha \rightarrow \text{Fe}_3\text{C III}$

同素异构转变: $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$

2.2 共析钢的结晶过程分析



如图示, 过 $w_C=0.77\%$ 的点作一条垂直于横轴的垂线 (合金线) I, 与相图

分别交于 1、2、3 (S) 点温度, 以这三点温度为界, 分析其冷却过程。

1 点以上全部为液相(L), 当缓冷至与 AC 线相交的 1 点温度时, 开始从液相中结晶出奥氏体(A), 奥氏体的量随温度下降而增多, 其成分沿 AE 线变化, 剩余液相逐渐减少, 其成分沿 AC 线变化。冷至 2 点温度时, 液相全部结晶为与原合金成分相同的奥氏体。2~3 点(即 S 点)温度范围内为单一奥氏体。冷至 3 点(727℃)时, 发生共析转变, 从奥氏体中同时析出铁素体和渗碳体, 构成交替重叠的层片状两相组织, 称为珠光体。

其组织转变过程为: $L \rightarrow L+A \rightarrow A \rightarrow F+Fe_3C(P)$

2.3 共析钢的结晶过程分析 (以 $w_c=0.45\%$ 为例)

过 $w_c=0.45\%$ 的亚共析钢作合金线, 与相图分别交于 1、2、3、4 点温度。

3 点以上的冷却过程与共析钢在 3 点以上相似。当合金冷至与 GS 线相交的 3 点时, 开始从奥氏体中析出铁素体。随温度降低, 铁素体量不断增多, 其成分沿 GP 线变化, 而奥氏体量逐渐减少, 其成分沿着 GS 线变化, 在 3~4 点之间, 组织为奥氏体和铁素体, 温度缓冷至 4 点时, 剩余奥氏体的碳的质量分数达到共析成分 ($w_c=0.77\%$), 发生共析转变形成珠光体。温度继续下降, 由铁素体中析出极少量的三次渗碳体 (可忽略不计)。故其室温组织为铁素体和珠光体。

其组织转变如下: $L \rightarrow L+A \rightarrow A \rightarrow A+F \rightarrow F+P$

所有亚共析钢的冷却过程均相似, 其室温组织都是由铁素体和珠光体组成。所不同的是随碳的质量分数的增加, 珠光体量增多, 铁素体量减少。

2.4 过共析钢结晶过程分析 ($w_c=1.2\%$ 的过共析钢为例)

图中合金 III 为 $w_c=1.2\%$ 的过共析钢。合金 III 在 3 点以上的冷却过程与共析钢在 3 点以上相似。当合金冷至与 ES 线相交的 3 点时, 奥氏体中碳的质量分数达到饱和, 碳以二次渗碳体 Fe_3C_{II} 的形式析出, 呈网状沿奥氏体晶界分布。继续冷却, 二次渗碳体量不断增多, 奥氏体量不断减少, 剩余奥氏体的成分沿 ES 线变化。当冷却到与 PSK 线相交的 4 点时, 剩余奥氏体碳的质量分数达到共析成分 ($w_c=0.77\%$), 故奥氏体发生共析转变, 形成珠光体。继续冷却, 组织基本不变。其室温组织为珠光体和网状二次渗碳体。

其组织转变过程为: $L \rightarrow L+A \rightarrow A \rightarrow A+Fe_3C_{II} \rightarrow P+Fe_3C_{II}$

所有过共析钢的室温组织都是由珠光体和网状二次渗碳体组成的。不同的是随碳的质量分数的增加, 网状二次渗碳体量增多, 珠光体量减少。

2.5 共晶白口铸铁的结晶过程分析 (见图中合金 IV)

(结晶过程略)

组织转变过程为: $L \rightarrow L_d \rightarrow L_d+Fe_3C_{II} \rightarrow L_d' (P+Fe_3C_{II}+Fe_3C)$

2.6 亚共晶白口铸铁结晶过程分析 (见图中合金 V)

组织转变过程为: $L \rightarrow L+A \rightarrow A+L_d \rightarrow A+Fe_3C_{II}+L_d \rightarrow P+Fe_3C_{II}+L_d'$

2.7 过共晶白口铸铁结晶过程分析 (见图中合金 VI)

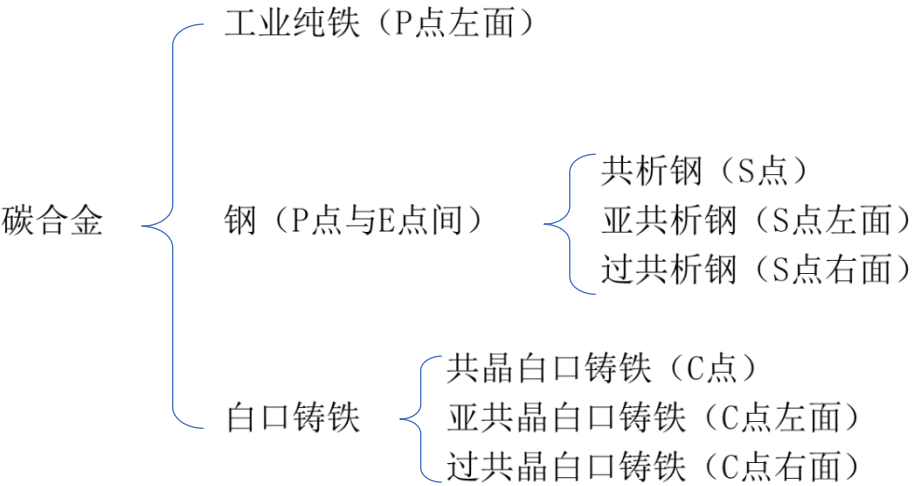
组织转变过程为： $L \rightarrow L + Fe_3C \text{ I} \rightarrow Fe_3C \text{ I} + Ld \rightarrow Fe_3C \text{ I} + Ld'$

3 铁碳合金相图的总结

3.1 组织和相汇总

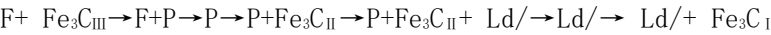
组织	相组成	符号
铁素体	$\alpha、\delta$	F、 δ
奥氏体	γ	A
渗碳体	Fe_3C	$Fe_3C \text{ I}、Fe_3C \text{ II}、Fe_3C \text{ III}$
珠光体	$\alpha + Fe_3C$	P
高温莱氏体	$\gamma + Fe_3C$	Ld
低温莱氏体	$P + Fe_3C$	Ld'

3.2 工业分类



3.2 含碳量、组织与力学性能的关系

室温时，随碳的质量分数的增加，铁碳合金的组织变化如下：



$w_c < 0.9\%$ 时，随着碳的质量分数增加，钢的强度和硬度直线上升，而塑性和韧性不断下降。

当钢的 $w_c > 0.9\%$ 以后，二次渗碳体沿晶界形成较完整的网，因此钢的强度开始明显下降，但硬度仍在增高，塑性和韧性继续降低。

$w_c > 2.11\%$ 的白口铸铁，由于组织中有大量的渗碳体，硬度高，塑性和韧性极差，既难以切削加工，又不能用锻压方法加工，故机械工程上很少直接应用。

3.3 铁碳合金相图的应用

3.3.1 在选材方面的应用

要求塑性、韧性好的各种型材和建筑用钢，应选用碳的质量分数低的钢；承受冲击载荷，

并要求较高强度、塑性和韧性的机械零件，应选用碳的质量分数为 0.25%~0.55%的钢；要求硬度高、耐磨性好的各种工具，应选用碳的质量分数大于 0.55%的钢；形状复杂、不受冲击、要求耐磨的铸件(如冷轧辊、拉丝模、犁铧等)，应选用白口铸铁。

3.3.2 在铸造方面的应用

共晶成分的合金熔点最低，结晶温度范围最小，故流动性好、分散缩孔少、偏析小，因而铸造性能最好。所以，在铸造生产中，共晶成分附近的铸铁得到了广泛的应用。常用铸钢的碳的质量分数规定在 0.15%~0.6%之间，在此范围的钢，其结晶温度范围较小，铸造性能较好。

3.3.3 在锻造和焊接方面的应用

复相组织，塑性较差，变形困难，当将其加热到单相奥氏体状态时，可获得良好的塑性，易于锻造成形。

3.3.4 在热处理方面的应用

教 案

工程材料与机械制造基础 课 9 讲

主讲人 李逸仙

课 题 第 4 章 铁碳合金：（1）碳钢；（2）铸铁

目的任务 了解碳钢和铸铁的牌号、分类及应用

重点难点 常用的碳钢及铸铁牌号

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：李逸仙
年 月 日

抽 查

系主任（签字）：
年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课计划：</p> <p> 复习（5min）</p> <p> 引入： 前面我们已经给大家讲述了钢（铁碳合金）的平衡结晶过程，那么铁碳合金的结晶过程及铁碳相图对于工程的实际应用意义都有哪些呢？下面我们就分别来看一下碳钢和铸铁的牌号及应用。</p> <p> 1. 碳钢</p> <p> 1.1 讲授碳钢的分类，拓展钢中 S、P 含量过高的危害（5min）</p> <p> 1.2 普通碳素结构钢</p> <p> 讲授普通碳素结构钢的牌号、特点及应用（5min）</p> <p> 1.3 优质碳素结构钢</p> <p> 讲授优质碳素结构钢的牌号、特点及应用（5min）</p> <p> 1.4 碳素工具钢</p> <p> 讲授碳素工具钢的牌号、特点及应用（5min）</p> <p> 1.5 铸钢</p> <p> 讲授铸钢的牌号、特点及应用（5min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p> <p> 2. 铸铁</p> <p> 2.1 铸铁概述</p> <p> 讲授铸铁的特点及应用（5min）</p> <p> 2.2 铸铁的石墨化</p> <p> 讲授铸铁石墨化的过程及最终组织（15min）</p> <p> 2.3 铸铁的分类</p> <p> 讲授铸铁的分类及石墨的特点（5min）</p> <p> 2.4 灰铸铁</p> <p> 讲授灰铸铁的牌号、特点及应用（5min）</p> <p> 2.5 球墨铸铁</p> <p> 讲授球墨铸铁的牌号、特点及应用（5min）</p> <p> 2.6 可锻铸铁</p> <p> 讲授可锻铸铁的牌号、特点及应用（5min）</p> <p> 2.7 蠕墨铸铁</p> <p> 讲授蠕墨铸铁的牌号、特点及应用（5min）</p> <p> 雨课堂练习（5min）</p> <p> 3. 课堂小结（5min）</p> <p>具体授课内容：</p> <p> 一、铁碳合金的分类</p> <p> 工业纯铁 含碳量小于等于 0.0218%</p>	

钢 含碳量在 0.0218~2.11%之间。可细分为亚共析钢（含碳量 0.0218~小于 0.77%）、共析钢（含碳量等于 0.77%）、过共析钢（含碳量大于 0.77~2.11%）

白口铁 含碳量 2.11~6.69%。可细分为亚共晶白口铁（含碳量 2.11~小于 4.3%）、共晶白口铁（含碳量等于 4.3%）、过共晶白口铁（含碳量大于 4.3~6.69%）。

注意：共析反应的产物叫珠光体，是铁素体与渗碳体的机械混合物，记为 P。共晶反应的产物叫莱氏体，记为 L。

二、碳对铁碳合金组织和性能的影响

强度：先升后降，含碳量 0.9%时为最大值。主要是因为细小、弥散、均匀分布的 Fe_3C 起强化作用，使强度升高。而含碳量超过 0.9%时， Fe_3C 沿晶界分布成网状，易产生裂纹，强度反而降低。

硬度：随含碳量升高而不断增加。

塑性：随含碳量升高而降低。

韧性：随含碳量升高而降低。

三、铁碳合金相图的应用

第一，在选材方面的应用：低碳钢（0.10~0.25%）强度一般不高，塑性、韧性好，适宜制作建筑结构、容器等。中碳钢（0.25~0.60%）强度、塑性、韧性都较好，且可在很大范围内控制，适宜制作机械零件。高碳钢（0.60~1.30%）硬度高、耐磨性好，适宜制作工具等。白口铁硬度高、耐磨性很好、脆性大，适宜制作不受冲击的零件（拉丝模、冷轧辊、球磨机的铁球）等。

第二，在铸造方面的应用：合金熔点低、结晶温度区间窄有利于增加流动性，对铸造有利。所以，铸钢通常含碳量为 0.15~0.60%，铸铁含碳量为 4.30%左右。

第三，在锻轧方面的应用：锻轧时要求钢处于单相区域，具有良好的塑性。开锻/轧温度应在固相线以下，终锻/轧温度应在共析以上。

第四，在热处理方面的应用：热处理需要将钢加热到单一的奥氏体区域，或加热到与临界点有关的某个温度，而相图则清晰反应了铁碳合金成分、温度、组织的关系。

四、碳钢

碳钢：含碳量在 0.02~1.3%之间的铁碳合金。

碳钢中，除了铁和碳之外，通常还含有 Mn、Si、S、P，其中 S、P 是铁矿石带入的，对性能有害；Mn、Si 是脱氧残留的，对性能有益。

碳钢按含碳量分成低碳钢（小于等于 0.25%C）、中碳钢（0.25~0.60%C）、高碳钢（大于 0.60%C）三种。按质量分成普通碳素钢（S、P 含量比较高）、优质碳素钢（S、P 含量较低）和高级优质碳素钢（S、P 含量低）三种。按用途分成结构钢和工具钢两种。

第一，普通碳素结构钢

命名方法：Q（屈服强度屈的声母）、屈服强度、质量等级、脱氧方法四个部分按顺序组成

(GB/T700)。仅保证机械性能。

典型牌号：Q195、Q215、Q235、Q255、Q275 等。

典型用途：型材、薄板、焊管、桥梁结构、标准件、连杆、简单的齿轮或轴。不热处理直接使用。

第二，优质碳素结构钢

命名方法：名义含碳量 1 万倍的 2 位数字、含量较高的合金元素符号、脱氧方法（GB/T699）。

典型牌号：10、45、60、16Mn、70Mn、08F 等。

典型用途：一般，低碳钢制作冲压制件，中碳钢制作齿轮、轴等机械零件，55~65 制作弹簧。一般经热处理提高力学性能。

第三，碳素工具钢

命名方法：T（碳的声母）、名义含碳量 1 千倍的 2 位数字、合金元素符号、A（GB/T1298）。

典型牌号：T8、T8Mn、T10、T13、T8A、T12A 等。

典型用途：含碳量稍低的 T7、T8 制作冲头、锤子、手锯等；含碳量较高的 T9~T11 制作车刀、钻头、冲模等；含碳量高的 T12、T13 制作量块、塞规、刮刀等。

第四，铸造碳素钢

命名方法：ZG（铸钢的声母）、最低屈服强度、-、最低强度极限（GB/T11352）。

典型牌号：ZG200-400、ZG270-500、ZG340-640 等。

典型用途：受力不大、韧性良好、可焊接的机座、壳体；强度较高、有一定塑性、可焊接的轧钢机机架、连杆、曲轴；高强度、高耐磨性、能切削加工的齿轮、棘轮等。

铸铁

灰口铸铁

球墨铸铁

可锻铸铁

蠕墨铸铁

特殊性能铸铁

铸铁牌号的表示方法(摘自 GB5612-85)

牌号名称	牌号举例	表示方法说明
灰铸铁	HT100	铸铁牌号是有代码加化学元素符号或加力学性能组成； 1、代号——由表示铸铁特征的汉语拼音的第一个大写字母组成。 同一名称铸铁需要细分时，取其细化特点的汉语拼音第一个大写 字母，排列在后
蠕墨铸铁	RuT100	
球墨铸铁	QT400-17	
黑心可锻铸铁	KTH300-06	
白心可锻铸铁	KTB350-04	
珠光体可锻铸铁	KTZ450-06	

耐磨铸铁	MTCu1PTi—150	2、元素符号、名义含量的质量分数——采用国际化学元素符号表
抗磨白口铸铁	KmTBMn5Mo2Cu	示，混合稀土符号用“RE”表示。名义含量的质量分数用阿拉伯
抗磨球墨铸铁	KmTQMn6	数字表示
冷硬铸铁	LTCrMoR	3、力学性能——用阿拉伯数字表示
耐腐铸铁	STSi15R	4、牌号中的常规碳、硅、锰、磷元素，一般不标出，有特殊
耐腐球墨铸铁	STQS15Si5	作用
耐热铸铁	RTCr2	时才标注其元素符号及质量分数。含金元素按递减序排列，
耐热球墨铸铁	RTQA16	含量
		相等，按字母顺序排列
		QT 400 - 17：
		QT——球墨铸铁代号；400——抗拉强度；17——伸长率
		ST Si 15 Mo 4 Cu：
		ST——耐蚀铸铁代号；Si——硅元素符号；15——硅的名义
		质量
		百分数；Mo——钼元素符号；4——钼的名义质量百分数；
		Cu——铜元素符号
		MT Cu 1 P Ti - 150：
		MT——耐磨铸铁代号；Cu——铜元素符号；1——铜的名义质
		量分
		数；P——磷元素的符号；Ti——钛元素符号；150——抗拉
		强度

铸铁、铸钢及铸造合金细分类与统一数字代号	
统一数字代号	铸铁、铸钢及铸造合金细分类
C0××××	铸铁(包括灰口铸铁、球墨铸铁、黑心可锻铸铁、珠光体可锻铸铁、白心可锻铸铁、抗磨白口铸铁、中锰抗磨球墨铸铁、高硅耐蚀铸铁、耐热铸铁等)
C1××××	铸铁(暂空)
C2××××	非合金铸钢(一般非合金铸钢、含锰非合金铸钢、一般工程和焊接结构用非合金铸钢、特殊专用非合金铸钢等)

C3××××	低合金铸钢	
C4××××	合金铸钢(不锈钢耐热铸钢、铸造永磁钢除外)	
C5××××	不锈钢耐热铸钢	
C6××××	铸造永磁钢和合金	
C7××××	铸造高温合金和耐蚀合金	
C8××××	(暂空)	
C9××××	(暂空)	

教 案

工程材料与机械制造基础 课 10-11 讲

主讲人 李逸仙

课 题 5.1 热处理过程钢的组织转变

目的任务 掌握钢在热处理加热和冷却过程中的组织转变及特点

重点难点 奥氏体的转化以及影响因素

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 上课时间 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

李逸仙

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课过程计划：</p> <p>第一讲</p> <p>1. 提问复习（5min）</p> <p>2. 视频短片引导：古代制刀中钢的热处理应用, 初步了解热处理的基本工艺过程及作用（5min）</p> <p>3. 热处理工艺概述</p> <p>3.1. 指出热处理的基本工艺过程：加热-保温-冷却（5min）</p> <p>强调热处理的总体目的;提高性能、延长寿命，</p> <p>引出深层意义：节约材料能源，引申至可持续发展的社会意义（课程思政）</p> <p>分步讲解加热、保温及冷却的目的意义</p> <p>3.2. 热处理原理（10min）</p> <p>提问 1：钢为什么能够热处理？</p> <p>提问 2：钢如何实现热处理？即简单的加热-保温-冷却三步为什么能够改变钢的性能？</p> <p>中涉及的组织转变，强调热处理工艺即根据热处理原理制定具体的加热温度、保温时间、冷却方式等参数。</p> <p>3.3 热处理的分类（10min）</p> <p>讲授常用热处理方法及分类、对比预备热处理和最终热处理的目的意义，常用工艺。</p> <p>3.4 热处理的应用（2min）</p> <p>概述热处理在各领域中的应用量，强调其重要性</p> <p>4. 钢在加热过程中的组织转变</p> <p>4.1 临界转变温度（5min）</p> <p>提问：根据铁碳相图分析，各钢种若需完全奥氏体化需加热的理论临界温度是多少？</p> <p>讲解临界加热温度 Ac_1、Ac_3、$Accm$</p> <p>4.2 讲授奥氏体的形成过程(共析钢)及形成机理（7min）</p> <p>4.3 讲授奥氏体的形成过程(非共析钢)（3min）</p> <p>4.4 播放形成过程视频+雨课堂练习（5min）</p> <p>4.5 简单讲授影响奥氏体化的因素+雨课堂习题（8min）</p> <p>5. 奥氏体晶粒的大小及影响因素</p> <p>5.1 讲授奥氏体晶粒度的三个不同概念（5min）</p> <p>强调本质晶粒度不表示晶粒大小的实际度量，表示晶粒长大倾向的高低。</p>	

讲授本质细晶钢和本质粗晶粒钢，强调热处理用钢均为本质细晶粒钢。

提问：是不是本质粗晶粒钢的晶粒一定粗而本质细晶粒钢晶粒就一定细？

5.2 讲授影响奥氏体晶粒度的因素（3min）

5.3 雨课堂练习（3min）

6. 等温冷却曲线建立过程（部分）

6.1 冷却方式（2min）

等温冷却和连续冷却对比讲授

6.2 过冷奥氏体等温转变曲线的建立

过冷奥氏体的概念讲授（2min）

对比相图建立过程，讲授 TTT 曲线的建立过程（5min）

7. 课程小结

串讲+启发提问：热处理的步骤及各步意义、常用方法、加热过程的临界温度、奥氏体化的基本过程及影响因素、本质晶粒度、冷却方式（5min）

第二讲：

1. 提问复习（5min）

2. 共析碳钢 TTT 曲线的分析（10min）

提问：TTT 曲线上能够获得哪些信息？

讲授孕育期的概念及影响因素

3. 转变产物的组织与性能

3.1 珠光体型(P)转变（15min）

3.1.1 详细讲授片状珠光体的形成机理，概括转变特点“ Fe_3C 和 F “交替形核、端向长大”

3.1.2 讲授珠光体型转变产物

提问：S、T 的片层结构由哪两相组成？

引申：解决问题时候注意透过现象看本质，抓住主要点（课程思政）

3.1.3 表格对比 P、S、T 的转变温度区间、结构及性能

3.1.4 雨课堂练习

3.2 贝氏体型(B)转变（10min）

3.2.1 详细讲授转变的温度区间、特征、转变过程

3.2.2 讲授上贝氏体和下贝氏体的形态特点及性能特征

3.2.3 雨课堂练习

3.3 马氏体型(M)转变（20min）

3.3.1 讲授马氏体的结构

3.3.2 讲授马氏体的转变特点，播放马氏体转变过程视频

3.3.3 讲授马氏体的分类和性能，强调马氏体的性能主要取决于含碳量

3.3.4 雨课堂练习

3.4 影响 C 曲线的因素（5min）

讲授+雨课堂练习

4. 过冷奥氏体的连续转变曲线（20min）

4.1 共析钢连续转变曲线与等温转变曲线对比，总结其特点，指出其意义

4.2 共析钢连续冷却曲线分析

重点讲授马氏体转变区、珠光体转变区域

提问：根据课堂学习知识回答 ppt 中 $v_1 \sim v_4$ 的冷却速度下发生了哪些转变、产物是什么？

验证冷却速度不同时，转变产物组织也不同，进而材料性能各异。

引出下节课知识内容炉冷、油冷、水冷、空冷，提出预习要求

4.3 讲授 CCT 曲线与 C 曲线的差异

提问：CCT 曲线上有没有贝氏体反应区？

重点讲授临界冷却速度 v_k

4.4 雨课堂练习

5. 课程小结

串讲+提问：过冷奥氏体、等温冷却曲线中各种组织 P、S、T、B_上、B_下、M 的特点，连续冷却曲线的临界冷却速度。

具体授课内容：

1. 热处理概述

1.1 热处理工艺

定义：热处理时的加热温度、保温时间和冷却速度等工序的总和称为热处理工艺。

包括三个环节：

（1）到预定的温度（加热）；

（2）在预定温度下适当保温（保温），保温的时间与工件的尺寸和性能有关；

（3）以预定的冷却速度冷却（冷却）。

为满足不同的加工和使用性能的要求，须进行不同的热处理

目的：通过改变内部组织，改善钢的工艺性能和使用性能。充分挖掘钢材的潜力，延长零件的使用寿命，提高产品质量，节约材料和能源。

原理：钢的组织转变的规律是热处理的理论基础，称为“热处理原理”。

1.2 常见的热处理方法

根据热处理时加热和冷却方法的不同，常用的热处理方法大致分类如下：

普通热处理：退火、正火、淬火、回火

表面热处理：火焰加热表面淬火、感应加热表面淬火、激光加热表面淬火、化学物理气相沉积

化学热处理：渗碳、渗氮、碳氮共渗

2. 钢在加热时的组织转变

钢在加热时的转变实质上是奥氏体的形成。

热处理的第一步就是把这些原始组织加热，使其转变为奥氏体。这第一步质量的好坏，直接影响到最终热处理后钢件的工艺性能和使用性能。

奥氏体化前的组织（平衡组织）

亚共析钢→F+P 共析钢→P 过共析钢→Fe₃C II+P

2.1 奥氏体的形成温度与 Fe-Fe₃C 状态图的关系

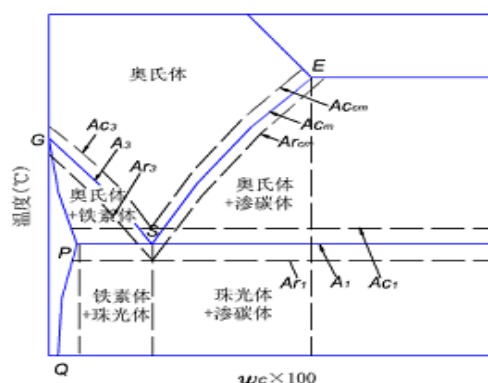
Fe-Fe₃C 相图是表示铁碳合金在接近平衡状态下相与成分和温度间的关系图，图中的临界点 A₁、A₃ 和 A_{cm} 也只是在这样的条件下才适用的。

然而，生产中不可能以无限缓慢的速度加热和冷却，其相变是在非平衡的条件下进行的，研究发现这种非平衡的组织转变有滞后现象。

加热：非平衡条件下的相变温度高于平衡条件下的相变温度；

冷却：非平衡条件下的相变温度低于平衡条件下的相变温度。

这个温差叫滞后度：加热转变→过热度；冷却转变→过冷度。且加热与冷却速度越大，温度提高与下降的幅度就越大，导致热度与过冷度越大。此外，过热度与过冷度的增大会导致相变驱动力的增大，从而使相变容易发生。

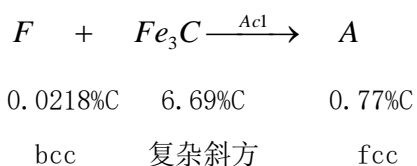


钢在加热和冷却时的相变临界点

2.2 共析钢奥氏体的形成过程

当钢由室温加热到 A_{c1} 以上温度时，珠光体将转变为奥氏体。

当加热到 A_{cm} 以上温度时 P→A，即



可见，这一转变是由化学成分、晶体结构都不相同的两相组织，转变为另一成分和晶体结构的单相固溶体。

研究表明，由于新形成的 A 和原来的 F 以及 Fe_3C 的含碳量和晶体结构相差很大。因而 A 的形成是一个 Fe_3C 的溶解，F 到 A 的点阵重构以及 C 在 A 中扩散的过程。A 的形成符合一般的规律，即通过形核长大完成的。

平衡条件下的临界点：

A_1 A_3 A_{cm}

非平衡加热的临界点：

Ac_1 Ac_3 $Accm$

非平衡冷却的临界点：

Ar_1 Ar_3 $Arcm$

整个奥氏体的形成过程分为四个阶段：A 晶核形成、A 晶核长大、残余渗碳体的溶解和 A 均匀化。

（1）奥氏体晶粒的形成：

珠光体是由铁素体和渗碳体两相片层交替组成的，在 F 和 Fe_3C 两相交界处，原子排列处于过渡状态，能量较高，碳浓度的差别也比较大，有利于在奥氏体形成时碳原子的扩散。此外，由于界面原子排列的不规则，也有利于 Fe 原子的扩散，导致晶格的改组重建，这样为奥氏体晶核的形成提供了能量、浓度和结构条件，因此，奥氏体优先在 F 和 Fe_3C 的界面处形核。

（2）奥氏体晶核长大：

刚形成的奥氏体晶核内部的碳浓度是不均匀的，与渗碳体相接的界面上碳浓度大于与铁素体相接的界面浓度。由于存在碳的浓度梯度，使碳不断从 Fe_3C 界面通过奥氏体晶核向低浓度的铁素体界面扩散，这样破坏了原来 F 和 Fe_3C 界面的碳浓度关系，为维持原界面的碳浓度关系，铁素体通过 Fe 原子的扩散（短程），晶格不断改组为奥氏体，而 Fe_3C 则通过碳的扩散，不断溶入奥氏体中，结果奥氏体晶粒不断向铁素体和渗碳体两边长大，直至铁素体全部转变为奥氏体为止。

（3）残余渗碳体的溶解：

由于 Fe_3C 的晶格结构和含碳量与奥氏体的差别远大于铁素体与奥氏体的差别。所以铁素体优先转变为奥氏体后，还有一部分渗碳体残留下来，被奥氏体包围，这部分残余的 Fe_3C 在保温过程中，通过碳的扩散继续溶于奥氏体，直至全部消失。

（4）奥氏体成分的均匀化：

Fe_3C 刚全部溶解时，奥氏体中原先属 Fe_3C 的部位含碳较高，属于 F 部位含碳较低，随着保温时间的延长，通过碳原子的扩散，奥氏体的含碳量逐渐趋于均匀。



2.3 亚共析钢和过共析钢的奥氏体形成过程

亚共析钢和过共析钢与共析钢的区别是有先共析相。其奥氏体的形成过程是先完成珠光体向奥氏体的转变，然后再进行先共析相的溶解。这个 $P \rightarrow A$ 的转变过程同共析钢相同，也是经过前面的四个阶段。

对于亚共析钢，平衡组织 $F+P$ ，当加热到 AC_1 以上温度时， $P \rightarrow A$ ，在 $AC_1 \sim AC_3$ 的升温过程中，先共析的 F 逐渐溶入 A ，同样，对于过共析钢，平衡组织是 $Fe_3C_{II}+P$ ，当加热到 AC_1 以上时， $P \rightarrow A$ ，在 $AC_1 \sim AC_{cm}$ 的升温过程中，二次渗碳体逐步溶入奥氏体中。

2.4 影响奥氏体形成速度的因素

奥氏体的形成是通过形核与长大实现的，所以凡是影响形核与长大的因素，都影响奥氏体的形成速度。

(1) 加热速度的影响

加热速度越快，奥氏体化温度越高，过热度越大，相变驱动力也越大；同时由于奥氏体化温度高，原子扩散速度也加快，提高形核与长大的速度，从而加快奥氏体的形成。

(2) 化学成分的影响

钢中含碳量增加，碳化物数量相应增多， F 和 Fe_3C 的相界面增多，奥氏体晶核数增多，其转变速度加快。

钢中的合金元素不改变奥氏体的形成过程，但能影响奥氏体的形成速度。因为合金元素能改变钢的临界点，并影响碳的扩散速度，且它自身也存在扩散和重新分布的过程，所以合金钢的奥氏体形成速度一般比碳钢慢，尤其高合金钢，奥氏体化温度比碳钢要高，保温时间也较长。

(3) 原始组织的影响

钢中原始珠光体越细，其片间距越小，相界面越多，越有利于形核，同时由于片间距小，碳原子的扩散距离小，扩散速度加快导致奥氏体形成速度加快。同样片状 P 比粒状 P 的奥氏体形成速度快。

3. 奥氏体晶粒大小及其影响因素

奥氏体晶粒大小对后续的冷却转变以及转变产物的性能有重要的影响。如奥氏体晶粒细，后续冷却转变产物就既强度高又韧性好。一般情况下，奥氏体的晶粒每细化一级，其转变产物的 a_k 值就提高 $2-4\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

3.1 奥氏体的晶粒度及其分类

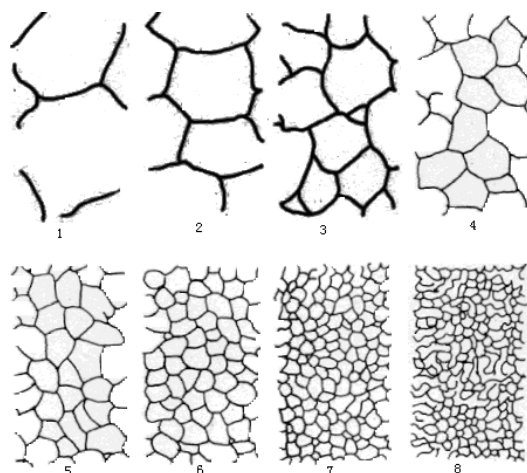
晶粒度是表示晶粒大小的一种尺度。为了研究上的方便，首先要区分三种晶粒度的概念。

(1) 起始晶粒度：是指在临界温度以上，奥氏体形成刚刚完成，其晶粒边界刚刚接触时的晶粒大小。

(2) 实际晶粒度：是指在某一具体的热处理加热条件下所得到的晶粒尺寸。

(3) 本质晶粒度：根据标准试验方法，在 $930 \pm 10^\circ\text{C}$ 保温足够时间（3-8 小时）后测定的钢中晶粒的大小。

为了区别奥氏体的晶粒度，冶金部规定的标准，将奥氏体的晶粒度分为 8 级。一般认为 1-3 级为粗晶粒，4-6 级为中等晶粒，7-8 级为细晶粒，晶粒度的级别越高，晶粒愈细。



具体测定晶粒度的方法：制成金相试样，放在 100 倍的显微镜下与标准晶粒度等级进行比较，与哪一级的一样大就是哪一级。

生产中发现，不同牌号的钢，其奥氏体晶粒的长大倾向是不同的。有些钢的奥氏体晶粒随着加热温度升高会迅速长大；而有些钢的奥氏体晶粒则不容易长大，只有加热到更高温度时才开始迅速长大。一般称前者称为“本质粗晶粒钢”，后者为“本质细晶粒钢”。

在实际生产中遇到一块钢料，如何区分它是本质粗晶粒钢还是本质细晶粒钢，不可能去作一条加热温度与晶粒直径的关系曲线，看是哪种长大趋势。所以抓住这两条曲线的主要特征， 930°C 左右晶粒大小相差最明显，这一条件下测得的晶粒度正是本质晶粒度。利用测定本质晶粒度的级别就可确定这一钢料是本质粗晶粒钢还是本质细晶粒钢，1-4 级本质粗晶粒钢，5-8 级本质细晶粒钢。

是不是本质粗晶粒钢的晶粒一定粗而本质细晶粒钢的晶粒就一定细？

从前面的分析中知，本质晶粒度只代表钢在加热时奥氏体晶粒长大倾向的大小。本质粗晶粒钢在较低加热温度下可获得细晶粒，而本质细晶粒钢若在较高温度下加热也会得到粗晶粒。

3.2 影响奥氏体晶粒大小的主要因素

(1) 加热条件

加热温度越高，保温时间足够长，奥氏体晶粒越容易自发长大粗化。当加热温度确定后，

加热速度越快，相变时过热度越大，相变驱动力也越大，形核率提高，晶粒越细，所以快速加热，短时保温是实际生产中细化晶粒的手段之一。

加热温度一定时，随保温时间延长，晶粒也会不断长大。但保温时间足够长后，奥氏体晶粒就几乎不再长大而趋于相对稳定。若加热时间很短，即使在较高的加热温度下也能得细小晶核。

加热速度越大，过热度越大，形核率越高，奥氏体起始晶粒越小。

对同一种钢而言，当奥氏体晶粒细小时，冷却后的组织也细小，其强度较高，塑性、韧性较好；当奥氏体晶粒粗大时，在同样冷却条件下，冷却后的组织也粗大。粗大的晶粒会导致钢的机械性能下降，甚至在淬火时形成裂纹。所以，凡是重要的工件，如高速切削刀具等，淬火时都要对奥氏体晶粒度进行金相评级，以保证淬火后有足够的强度和韧性。可见，加热时如何获得细小晶粒的奥氏体晶粒常常成为保证热处理的关键问题之一。

(2) 钢的化学成分

碳：当钢中的碳以固溶态存在时， $C \uparrow$ ， $D \uparrow$ ，晶粒粗化，当钢中的碳以碳化物形成存在时，有阻碍晶粒长大的作用。

对于钢中的合金元素，碳化物形成元素能阻碍晶粒长大，非碳化物形成元素有的阻碍晶粒长大如：Cu、Si、Ni 等；有的促进晶粒长大，如 P、Mn。

实际生产中因加热温度不当，使奥氏体晶粒长大粗化的现象叫“过热”，过热后将使钢的性能恶化，因此控制奥氏体晶粒大小，是热处理和热加工制定加热温度时必须考虑的重要问题。

4. 等温冷却曲线的建立

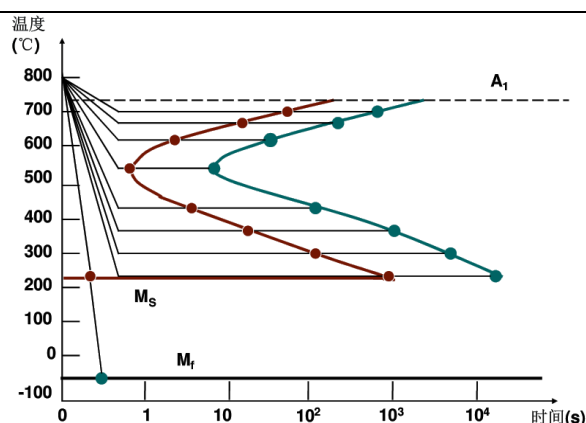
4.1 冷却方式

连续冷却：将奥氏体化的钢连续冷却到室温。

等温冷却：将奥氏体化的钢迅速冷却到临界温度以下的某一温度进行保温，让奥氏体在等温条件下进行转变，待组织转变结束后再以某一速度冷却到室温。

4.2 等温冷却曲线的建立

将共析钢奥氏体急速冷却到 A_1 以下某一温度保温，测定在各种不同温度下的保温过程中转变量与转变时间之间关系的曲线。确定转变开始和终了时间标注并连接，从而获得等温转变开始线和终了线。



TTT(Time Temperature Transformation)曲线，简称C曲线

反映了过冷奥氏体在不同温度下等温开始和终了的时间及转变产物之间的关系。

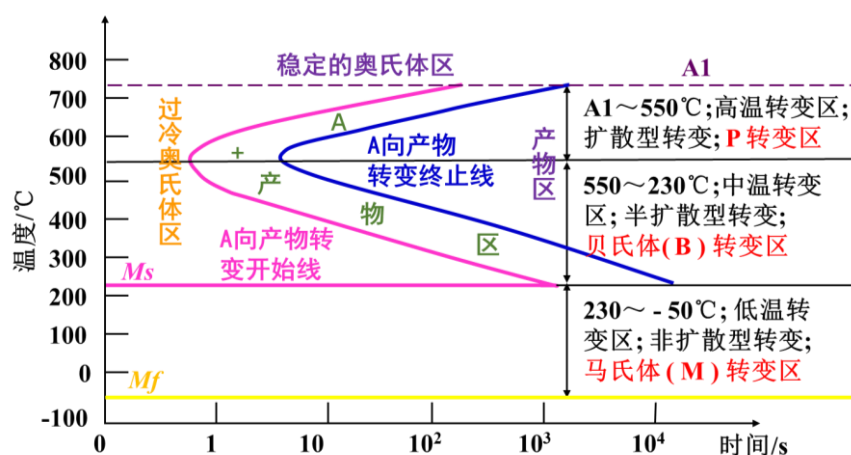
1. C 曲线的分析

1.1 过冷奥氏体

过冷奥氏体：在临界温度以下存在的不稳定的且将要发生转变的奥氏体，称为过冷奥氏体。

当温度在 A_1 以上时，奥氏体是稳定的；当温度降低到 A_1 以下后，奥氏体即处于过冷状态，这种奥氏体称为过冷奥氏体；（非稳定组织，迟早要发生转变）过冷奥氏体是不稳定的，会转变为其它的组织。钢在冷却时的转变，实际上是过冷 A 的转变。

1.2 共析钢过冷奥氏体等温转变曲线分析



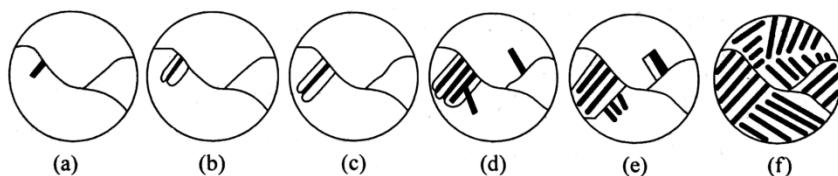
A_1 以上是奥氏体稳定区域； A_1 以下、转变开始线以左的区域是过冷奥氏体区

过冷奥氏体在各个温度下等温转变时，都要经过一段孕育期

在三个不同温度区间，共析碳钢的过冷奥氏体可以发生三种不同的转变：珠光体型、贝氏体型、马氏体型

（1）高温珠光体转变

形成：奥氏体过冷到 A_1 以下温度，首先在奥氏体晶界处形成渗碳体晶核，然后依靠渗碳体片的不断分枝，向奥氏体晶粒内部平行长大。



层状珠光体的性能主要取决于片层间距。转变温度越低，即过冷度越大，片层间距越小。
分类：

在 $A_1 \sim 650^\circ\text{C}$ 范围内，形成片间距较粗的珠光体，成为普通片状珠光体，用符号“P”表示。

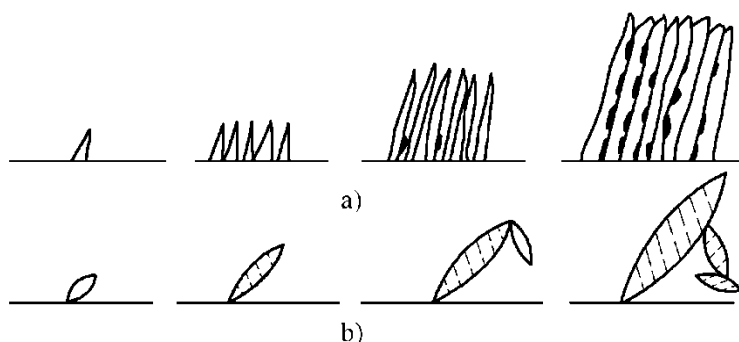
在 $650 \sim 600^\circ\text{C}$ 范围内，形成片层间距较小的珠光体，称为细珠光体或索氏体，用符号“S”表示。

在 $600 \sim 550^\circ\text{C}$ 范围内形成的片层间距极小的珠光体，称为极细珠光体或托氏体，用符号“T”表示。

孕育期：过冷奥氏体等温转变开始前所经历的等待时间。孕育期的长短表示了过冷奥氏体稳定性的高低。孕育期最短处称为C曲线的鼻尖，该温度下过冷奥氏体最不稳定，转变速度最快。

(2) 中温贝氏体转变

贝氏体是由含过饱和碳的铁素体与弥散分布的渗碳体（或碳化物）组成的非层状两相组织，用符号“B”表示。



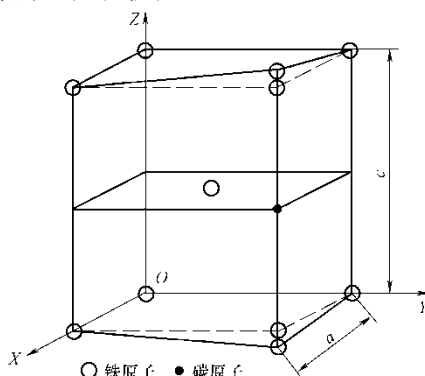
形成：贝氏体形成过程与珠光体不同，它是先在过冷奥氏体晶界或晶内贫碳区形成过饱和碳的铁素体，随后在铁素体生长过程中，通过碳原子扩散，在铁素体中陆续析出极细的渗碳体或 ϵ 碳化物。

性能：贝氏体力学性能主要取决于铁素体条（片）粗细、铁素体中碳的过饱和度和渗碳体（或其它结构的碳化物）的大小、形状与分布。上贝氏体强度小，塑性变形抗力低；下贝氏体不仅具有高的强度、硬度与耐磨性，同时具有良好的塑性和韧性。

(3) 低温马氏体转变

过冷奥氏体在 M_s 温度以下将发生马氏体转变。马氏体用符号“M”表示，详细内容将在讲解过冷奥氏体的连续冷却转变之后讨论。

1) M 是碳在 $\alpha - \text{Fe}$ 中的过饱和间隙固溶体，马氏体的晶体结构属体心正方晶格 (bct)。晶格常数 c/a 称为马氏体的正方度。C% 越高， c/a 越大，晶格畸变



越严重，硬度越高。因此，钢中获得马氏体组织是强化钢铁材料的重要手段之一

2) 形态：钢中马氏体组织形态主要有片状和板条状两种基本类型。

针状/片状马氏体的立体形态呈双凸透镜状，而显微镜下所看到的则是金相试样面上的马氏体截面形态，故呈针片状。碳质量分数 $>1\%$ ，主要出现在高碳钢中，亚结构为孪晶，又称高碳马氏体、孪晶马氏体

板条马氏体的立体形态呈扁条状或薄板状，其金相试样面上的截面形态呈细长的条状或板状。在光学显微镜下，可以看到板条马氏体是由许多位向不同的板条束组成。主要出现在低碳钢中，碳质量分数 $<0.2\%$ ，亚结构为高密度的位错，又称低碳马氏体、位错马氏体

3) 性能：马氏体的强度和硬度主要取决于马氏体的含碳量。随着马氏体含碳量的增高，其强度与硬度也随之增高。马氏体的塑性和韧性随含碳量增高而急剧降低

4) 体积：钢中不同组织的比体积是不同的。马氏体的比体积最大，奥氏体的比体积最小，珠光体居中。

5) 马氏体转变的特点：

马氏体转变过程和其他相变一样，也是由形核和长大两个基本过程所组成。但它和其他相变比较，又有以下几方面特点：

- ①马氏体转变是无扩散型相变
- ②马氏体转变的速度极快
- ③马氏体转变发生在一定温度范围内
- ④马氏体转变不完全性

1.3 亚共析碳钢与过共析碳钢过冷奥氏体的等温转变

与C曲线对比：

(1) 三者都具有过冷奥氏体转变开始线与转变终了线；

(2) 在亚共析碳钢的C曲线上，多出一条先析铁素体析出线；亚共析钢随着碳含量的增加，C曲线位置往右移，同时 M_s 、 M_f 线往下移。

(3) 在过共析碳钢C曲线上，多出一条先析渗碳体（二次渗碳体）析出线。当加热温度为 A_{c1} 以上 $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 时，过共析钢随着碳含量的增加，C曲线位置向左移，同时 M_s 、 M_f 线往下移。

(4) 转变温度越低时，先析相的量就越少，先析铁素体可以呈块状（等轴状）或网状，先析渗碳体一般呈网状

1.4 影响C曲线的因素

(1) 含碳量：共析钢的过冷奥氏体最稳定，C曲线最靠右。由共析钢成分开始，含碳量增加或减少都使C曲线左移。 M_s 与 M_f 点随含碳量增加而下降。

(2) 合金元素：

除 Co 外，所有溶入奥氏体的合金元素均使奥氏体稳定性增加，C 曲线向右移；

除 Co 和 Al 以外，所有合金元素都是 Ms 和 Mf 点下降；

一些碳化物形成元素还将改变 C 曲线的形状。例如 Cr、Mo、W 等。

(3) 加热温度和保温时间: 奥氏体化温度提高或延长保温时间促使奥氏体成分均匀、晶粒粗大、晶界面积减少，从而使得过冷奥氏体转变形核率减小，稳定性增加，C 曲线右移。该方法易使晶粒粗大，一般不采用

2. CCT 曲线的分析

2.1 共析碳钢过冷奥氏体连续冷却转变曲线

实际生产中，过冷奥氏体转变大多是在连续冷却过程中进行，并且是在不同冷却条件下连续冷却，其转变开始及转变终止时间与温度之间的关系称为连续转变图或 CCT (Continuous—Cooling—Transformation) 曲线。

建立：过冷奥氏体连续冷却转变曲线常用膨胀法测定

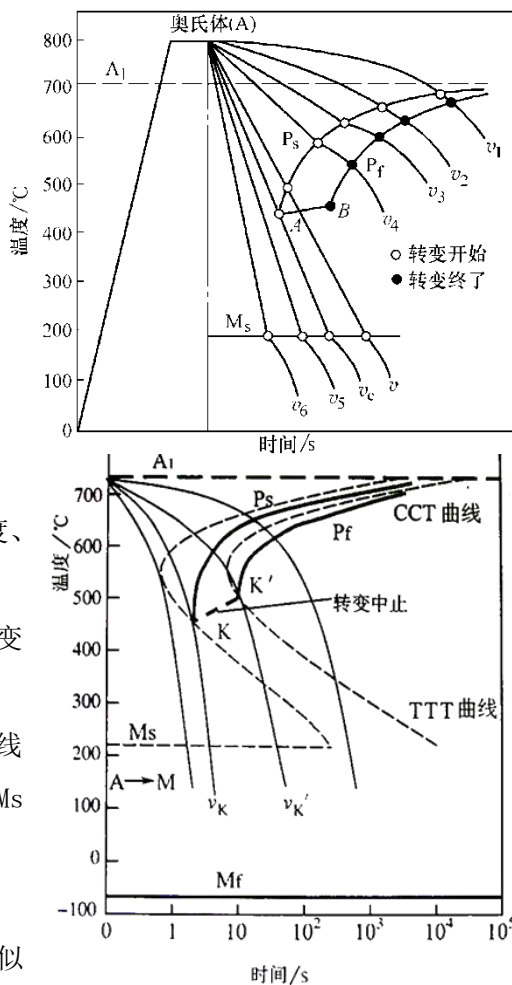
CCT 曲线反映了不同冷却速度下转变的开始时间、终了时间、产物类型、转变量与转变温度、转变时间的关系。

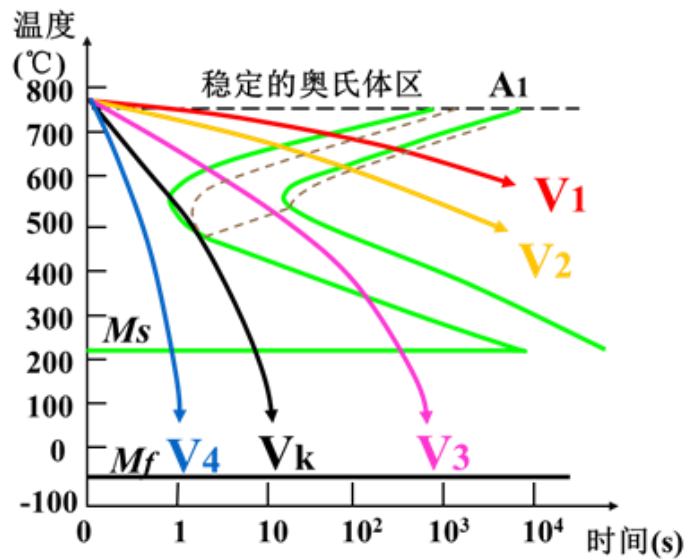
组织转变：包括珠光体转变区和马氏体转变区，没有贝氏体型转变。

中止线的意义：当冷却曲线碰到中止线时, A→P 转变终止，随后，未转变的 A 在冷至 Ms 点以下将转变为 M。

过冷奥氏体等温转变曲线在连续冷却中应用

常应用过冷奥氏体等温转变曲线定性地、近似地来分析奥氏体在连续冷却中的转变。





v_1 相当于炉冷速度；

v_2 相当于空冷的速度；

v_3 相当于油冷的速度；

v_4 相当于水冷的速度；

v_k 与 C 曲线鼻尖相切，为该钢的马氏体临界冷却速度。

2.2 CCT 曲线与 C 曲线对比

连续冷却转变有以下一些主要特点：

(1) 连续冷却转变曲线只有 C 曲线的上半部分，而没有下半部分。

(2) 冷却曲线碰到 AB 线时，过冷奥氏体就不再发生珠光体转变，而一直保留到 M_s 点以下，直接变为马氏体。

(3) 与过冷奥氏体连续冷却转变曲线鼻尖相切的冷却速度，称为马氏体临界冷却速度，用 v_c 表示。

(4) 在连续冷却过程中，过冷奥氏体的转变是在一个温度区间内进行的，随着冷却速度的增加，转变温度区间逐渐移向低温，并随之加宽，而转变时间则缩短。

(5) 过冷奥氏体的连续冷却转变是在一个温度区间内进行，在同一冷却速度下，因转变开始温度高于转变终了温度，则先后获得的组织粗细不均匀。

教 案

工程材料与机械制造基础 课 12-14 讲

主讲人 李逸仙

课 题 5.2 钢的热处理工艺及其特征

目的任务 掌握钢的退火、正火、淬火和回火整体热处理工艺及其应用；

了解表面淬火和化学热处理工艺及应用

重点难点 (1) 钢的整体热处理工艺及其特征；

(2) 钢的表面热处理与化学热处理

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 **上课时间** 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

李逸仙

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课过程设计：</p> <p>第一讲：</p> <p>复习（5min）</p> <p>引入：如何用加工工艺改善钢的性能，对实际工程中，有哪些热处理工艺可以被应用？</p> <p>1. 钢的退火</p> <p>1.1 讲授退火工艺的概念及目的（10min）</p> <p>1.2 讲授退火工艺的分类（3min）</p> <p>提问：临界温度以上和以下的退火工艺有什么原理上的区别？（2min）</p> <p>1.3 讲授完全退火工艺概念、组织及其目的（5min）</p> <p>提问：完全退火是否可用于过共析钢？（2min）</p> <p>1.4 讲授等温退火工艺概念、组织及其目的（5min）</p> <p>1.5 讲授球化退火工艺概念、组织及其目的（8min）</p> <p>1.6 讲授扩散退火工艺概念、组织及其目的（3min）</p> <p>1.7 讲授去应力退火工艺概念、组织及其目的（2min）</p> <p>2. 钢的正火</p> <p>2.1 讲授正火的概念及目的（7min）</p> <p>2.2 对比总结正火与各种退火的温度区间（3min）</p> <p>2.3 介绍正火后的组织（3min）</p> <p>提问：正火是否就是空冷？（3min）</p> <p>2.3 介绍正火和退火的区别（5min）</p> <p>2.4 讲授正火与退火如何选用（7min）</p> <p>雨课堂练习（3min）</p> <p>3. 钢的淬火</p> <p>3.1 讲授淬火的基本概念及目的（5min）</p> <p>3.2 讲授淬火温度选择（5min）</p> <p>雨课堂练习（1min）</p> <p>课程小结（2min）</p> <p>第二讲：</p> <p>1. 复习（5min）</p> <p>2. 钢的淬火</p> <p>2.1 讲授淬火的定义（2min）</p>	

<p>2.2 讲授的淬火工艺参数</p> <p>2.2.1 淬火温度的选择及其组织组成（10min）</p> <p>雨课堂练习（1min）</p> <p>2.2.2 加热时间的确定（2min）</p> <p>2.2.3 淬火冷却介质（10min）</p> <p>2.2.4 讲授淬火工艺（10min）</p> <p>雨课堂练习（1min）</p> <p>2.2.5 讲授淬火中容易出现缺陷（4min）</p> <p>2.2.6 讲授淬透性和淬硬性的概念及区别（8min）</p> <p>雨课堂练习</p> <p>3. 钢的回火</p> <p>3.1 讲授钢回火的必要性及其注意事项（3min）</p> <p>3.2 讲授钢回火中的组织转变（10min）</p> <p>3.3 讲授钢回火的种类（8min）</p> <p>3.4 讲授回火后性能的变化（5min）</p> <p>雨课堂练习（3min）</p> <p>4. 课堂小结（5min）</p> <p>总结课堂讲授重点材料性能，提出下节课预习重点</p> <p>第三讲：</p> <p>1. 复习（5min）</p> <p>2. 钢的表面热处理</p> <p>2.1 引入（5min）</p> <p>提问：曲轴、齿轮类的零件采用前面所学的哪种热处理工艺较为合适？</p> <p>引出部分零件不同部位对性能要求不同，需要进行表面热处理。</p> <p>2.2 表面淬火</p> <p>讲授表面淬火的概念、目的、分类及应用（5min）</p> <p>讲授表面淬火用钢（5min）</p> <p>讲授表面淬火后的回火及组织（5min）</p> <p>讲授感应加热表面淬火的原理及方法（5min）</p> <p>观看视频（5min）</p> <p>讲授火焰加热表面淬火的原理及方法（2min）</p> <p>观看视频（3min）</p> <p>讲授激光加热表面淬火的方法及特点（3min）</p>	
---	--

2.3 化学热处理

讲授化学热处理的定义、种类、目的及过程（7min）

讲授渗碳工艺及其特点（10min）

雨课堂练习（2min）

讲授渗氮工艺及其特点（5min）

讲授碳氮共渗工艺及其特点（3min）

对比表面淬火、渗碳、渗氮及碳氮共渗工艺的区别（5min）

3. 讲授热处理工件的结构工艺性（5min）

4. 讲授常用热处理工艺的工序位置安排（5min）

5. 课堂小结（5min）

总结课堂讲授重点材料性能，提出下节课预习重点

具体授课内容：

5.2 钢的整体热处理

整体热处理是对工件整体进行穿透加热。常用的方法有退火、正火、淬火和回火

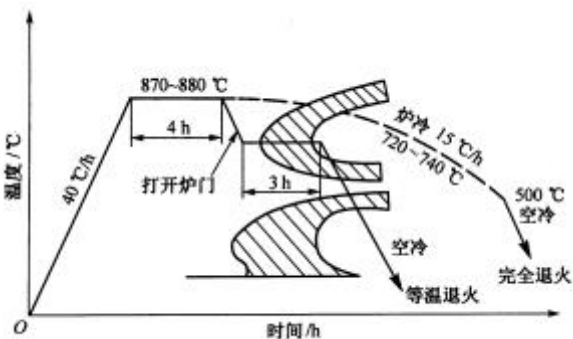
1. 钢的退火与正火

(1) 退火与正火的目的

在机器零件和工模具等工件的加工制造过程中，退火和正火经常作为预备热处理工序，安排在铸、锻、焊工序之后、切削（粗）加工之前，用以消除前一工序所带来的某些缺陷，为随后的工序做准备。例如，在铸造或锻造等热加工以后，钢件中不但存在残余应力，而且组织粗大不均匀，成分也有偏析，这样的钢件力学性能低劣，淬火时也容易造成变形和开裂。又如，在铸造或锻造等热加工以后，钢件硬度经常偏低或偏高，而且不均匀，严重影响切削加工性能。

退火和正火的主要目的有：

- ① 调整硬度以便进行切削加工；
- ② 消除残余应力，防止钢件的变形、开裂；
- ③ 细化晶粒，改善组织以提高钢的力学性能；
- ④ 为最终热处理作好组织准备。



(2) 退火工艺及应用

钢的退火是将钢件加热到适当温度，保温一定时间，然后缓慢冷却，以获得接近平衡组织状态的热处理工艺。

① 完全退火与等温退火 完全退火是指将钢件完全奥氏体化（加热至 A_{c3} 以上 $30\sim 50^{\circ}C$ ）后，随之缓慢冷却，获得接近平衡组织的退火工艺。生产中为提高生产率，一般随炉冷至 $600^{\circ}C$ 左右，将工件出炉空冷。

完全退火的主要缺点：

图 5-15 高速工具钢的完全退火与等温退火工艺曲线 完全退火主要用于：

为缩短完全退火时间，生产中常采用等温退火工艺，即将钢件加热到 A_{c3} 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ （亚共析钢）或 A_{c1} 以上 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ （共析钢、过共析钢），保温适当时间后，较快冷却到珠光体转变温度区间的适当温度并保持等温，使奥氏体转变为珠光体类组织，然后在空气中冷却的退火工艺。

等温退火与完全退火目的相同，但转变较易控制，所用时间比完全退火缩短约 $1/3$ ，并可获得均匀的组织性能。特别是对某些合金钢，生产中常用等温退火来代替完全退火或球化退火。图5-15为高速工具钢完全退火与等温退火的比较。

② 球化退火 是指将共析钢或过共析钢加热到 A_{c1} 点以上 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，保温一定时间后，随炉缓冷至室温，或快冷到略低于 A_{r1} 温度，保温一段时间，然后炉空至 600°C 左右空冷，使钢中碳化物球状化的退火工艺，如图5-16所示。

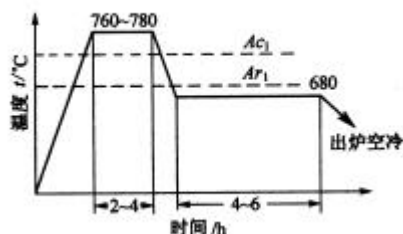


图 5-16 T10钢的球化退火工艺曲线

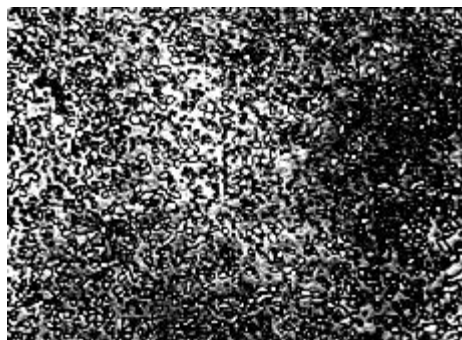


图 5-17 粒状珠光体显微组织

过共析钢及合金工具钢热加工后，组织中常出现粗片状珠光体和网状二次渗碳体，钢的硬度和脆性不仅增加，钢的切削性变差，且淬火时易产生变形和开裂。为消除上述缺陷，可采用球化退火，使珠光体中的片状渗碳体和钢中网状二次渗碳体均呈球（粒）状，这种在铁素体基体上弥散分布着球状渗碳体的复相组织，称为“球化体”，如图5-17所示。

对于存在有严重网状二次渗碳体的钢，可在球化退火前，先进行一次正火。

近些年球化退火的发展与应用（自阅）

③ 去应力退火（见书）

若采用高温退火（如完全退火），也可以更彻底地消除应力，但会使氧化、脱碳严重，还会产生高温变形，故为了消除应力，一般是采用低温退火。

④ 扩散退火（均匀化退火）（见书）

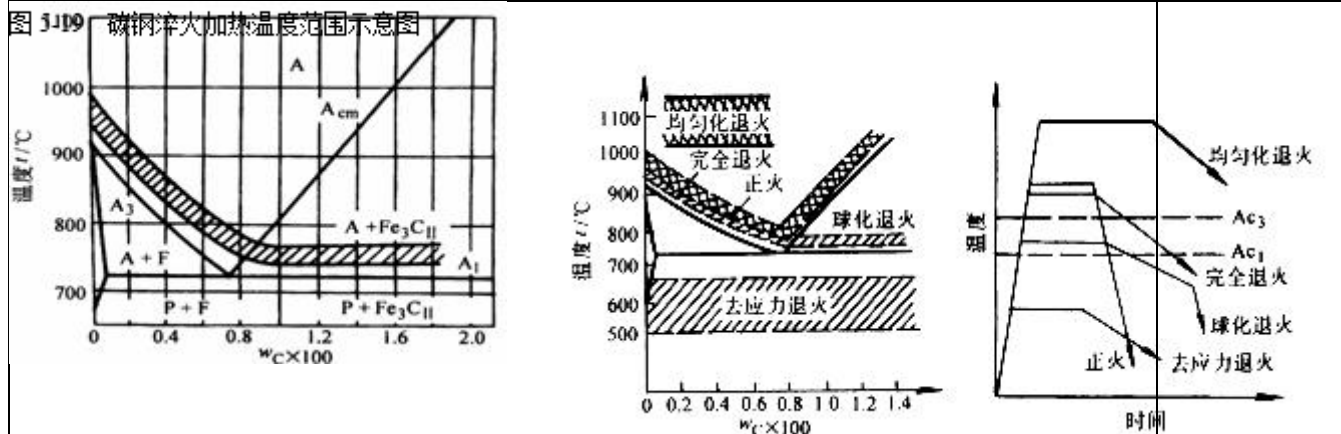
（3）正火工艺及应用

正火是指将钢件加热到 A_{c3} （亚共析钢）或 A_{cm} （过共析钢）以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，经保温后在空气中冷却的热处理工艺。

正火与退火的主要区别是正火冷却速度稍快，得到的组织较细小，强度和硬度有所提高，操作简便，生产周期短，成本较低。低碳钢和低碳合金钢经正火后，可提高硬度，改善切削加工性能（ $170\sim 230\text{HBS}$ 范围内金属切削加工性较好）；对于中碳结构钢制作的较重要件，可作为预先热处理，为最终热处理作好组织准备；对于过共析钢，可消除网状二次渗碳体为球化退火作好组织准备。对于使用性能要求不高的零件，以及某些大型或形状复杂的零件，当淬火有开裂危险时，可采用正火作为最终热处理。

几种退火与正火的加热温度范围及热处理工艺曲线，如图5-18所示。

图 5-19 碳钢淬火加热温度范围示意图



(a) 加热温度范围

(b) 热处理工艺曲线

图 5-18 几种退火与正火工艺示意图

2. 钢的淬火与回火

(1) 淬火

是将钢加热至临界点 (Ac_3 或 Ac_1) 以上, 保温后以大于 V_k 的速度冷却, 使奥氏体转变成马氏体 (或下贝氏体) 的热处理工艺。

淬火的目的: 为了得到马氏体组织, 是钢的最主要的强化方式。

1) 淬火工艺

① 淬火加热温度 在选择淬火加热温度时, 应尽量使获得的组织硬度越大越好; 获得的晶粒越小越好。

对于亚共析钢, 淬火温度一般为 Ac_3 以上 $30\sim 50^\circ C$, 淬火后得到均匀细小的 M 和少量残余奥氏体, 若淬火温度过低, 则淬火后组织中将会有 F, 使钢的强度、硬度降低; 若加热温度超过 Ac_3 以上 ($30\sim 50^\circ C$), 奥氏体晶粒粗化, 淬火后得到粗大的 M, 钢的力学性能变差, 且淬火应力增大, 易导致变形和开裂。

对于共析钢或过共析钢, 淬火加热温度为 Ac_1 以上 $30\sim 50^\circ C$, 淬火后得到细小的马氏体和少量残留奥氏体 (共析钢), 或细小的马氏体、少量渗碳体和残留奥氏体 (过共析钢), 由于渗碳体的存在, 钢硬度和耐磨性提高。若温度过高, 如过共析钢加热到 Ac_{cm} 以上温度, 由于渗碳体全部溶入奥氏体中, 奥氏体的碳的质量分数提高, M_s 温度降低, 淬火后残留奥氏体量增多, 钢的硬度和耐磨性降低。此外, 因温度高, 奥氏体晶粒粗化, 淬火后得到粗大的马氏体, 脆性增大。若加热温度低于 Ac_1 点, 组织没发生相变, 达不到淬火目的。碳钢淬火加热温度范围如图 3-19 所示。

对于合金钢, 由于大多数合金元素有阻碍奥氏体晶粒长大的作用, 因而淬火加热温度比碳钢高, 使合金元素在奥氏体中充分溶解和均匀化, 以获得较好的淬火效果。

实际生产中, 淬火加热温度的确定, 尚需考虑工件形状尺寸、淬火冷却介质和技术要求等因素。

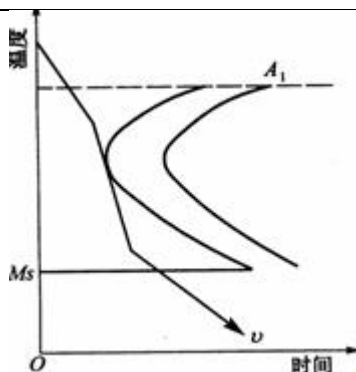
② 淬火加热时间 加热时间包括升温 and 保温时间。通常以装炉后温度达到淬火加热温度所需时间为升温时间, 并以此作为保温时间的开始; 保温时间是指钢件烧透并完成奥氏体均匀化所需时间。

加热时间受钢件成分、形状、尺寸、装炉方式、装炉量、加热炉类型、炉温和加热介质等影响。

图5-20 理想淬火冷却速度曲线

③ 淬火冷却介

质 钢进行
 淬火时冷却是最关键的工序，淬火的冷却速度必
 须大于临
 界冷却速度，快冷才能得到马氏体，但快冷总会
 带来内应
 力，往往会引起工件的变形和开裂。那么，怎样
 才能既得
 到马氏体而又减小变形和开裂呢？理想的淬火
 冷却介质
 如图3-20所示。



质 钢进行
 须大于临
 带来内应
 才能既得
 冷却介质

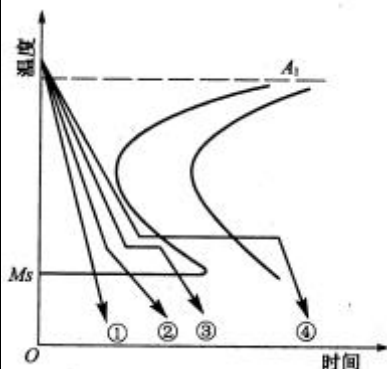
类水溶液。
 的冷却介
 冷却能力，

图 5-21 常用淬火方法示意图

水是最常用
 质，它有较强的

且成本低，但其缺点是在650~400℃范围内冷却能力不够强，而在300~200℃范围内冷却能力又很大，因此常会引起淬火钢的内应力增大，导致工件变形开裂，因此，水在生产中主要用于形状简单、截面较大的碳钢零件的淬火。

如在水中加入盐或碱类物质，能增加在650~400℃范围内的冷却能力，这对保证工件，特别是碳钢的淬硬是非常有利的，但盐水仍具有清水的缺点，即在300~200℃范围内冷却能力很大，工件变形开裂倾向很大。常用的盐水浓度为10%~15%，盐水对工件有锈蚀作用，淬火后的工件应仔细清洗。盐水比较适用于形状简单、硬度要求高而均匀、表面要求光洁、变形要求不严格的碳钢零件。



淬火常用的油有机油、变压器油、柴油等。油在300~200℃范围内的冷却速度比水小，有利于减小工件变形和开裂，但油在650~400℃范围内冷却速度也比水小，不利于工件淬硬，因此只能用于低合金钢与合金钢的淬火，使用时油温应控制在40~100℃内。

为了减少工件淬火时的变形，可采用盐浴作为淬火介质，如熔化的 NaNO_3 、 KNO_3 等。主要用于贝氏体等温淬火，马氏体分级淬火。其特点是沸点高，冷却能力介于水于油之间，常用于处理形状复杂、尺寸较小和变形要求严格的工件。

2) 淬火方法

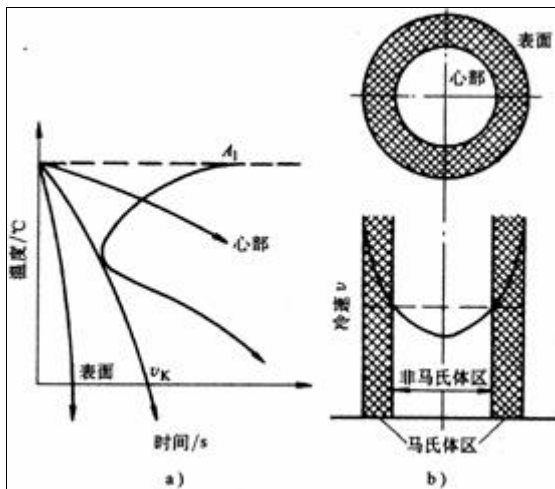
由于目前还没有理想的淬火介质，因而在实际生产中应根据淬火件的具体情况采用不同的淬火方法，力求达到较好的效果。常用的淬火方法如图3-21所示。

① 单液淬火 这种方法操作简单，易实现机械化。通常形状简单、尺寸较大的碳钢件在水中淬火，合金钢件及尺寸很小的碳钢件在油中淬火。

② 双液淬火 先浸入冷却能力强的介质中，在组织将要发生马氏体转变时立即转入冷却能力弱的介质中冷却的淬火工艺。常用的有先水后油，先水后空气等。此种方法操作时，如能控制好工件在水中停留的时间，就可有效的防止淬火变形和开裂，但要求有较高的操作技术。主要用于形状复杂的高碳钢件和尺寸较大的合金钢件。

③ 马氏体分级淬火 是将钢件浸入温度稍高或稍低于 M_s 点的盐浴或碱浴中，保持适当时间，待工件整体达到介质温度后取出空冷，以获得马氏体组织的淬火工艺，此法操作比双介质淬火容易控制，能减小热应力、相变应力和变形，防止开裂。主要用于截面尺寸较小（直径或厚度 $<12\text{mm}$ 、形状较复杂工件的淬火。

④ 等温淬火 是将钢件加热到奥氏体化后，随之快冷到贝氏体转变温度区间保持等温，使奥氏体转变为贝氏体的淬火工艺。此法淬火后应力和变形很小，但生产周期长，效率低。



主要用于形状复杂、尺寸要求精确，并要求有较高强韧性的小型工、模具及弹簧的淬火。

⑤ 冷处理 为了尽量减少钢中残余奥氏体，以获得最大数量的马氏体，可采用冷处理，即把钢淬冷至室温后，继续冷却至 $-70\sim-80^{\circ}\text{C}$ （或更低温度），保持一定时间，使残余奥氏体在继续冷却过程中转变为M，这样可提高钢的硬度和耐磨性，并稳定钢件尺寸。获得低温的办法是采用干冰（固态 CO_2 ）和酒精的混合剂或冷冻机冷却。只有特殊的冷处理才置于 -103°C 的液化乙烯或 -192°C 的液态氮中进行。

进行。

（2）淬火缺陷

① 变形与开裂；② 氧化和脱碳；③ 过热和过烧

（3）钢的淬透性

淬透性是钢的主要热处理工艺性能，它对合理选用材料及正确制定热处理工艺，具有十分重要的意义。

1) 淬透性的概念

图 3-22 工件淬透层深度与冷却速度的关系示意图

淬透性，从组织上讲，是指钢淬火时全部或部分地获得马氏体组织的难易程度；从硬度上讲，是指钢淬火时获得较深淬硬层或中心被淬硬（淬透）的能力。淬硬层越深，表明钢的淬透性越好。

从理论上讲，淬硬层深度应是工件整个截面上全部淬成马氏体的深度。但实际上，一般规定从工件表面向里至半马氏体区（马氏体与非马氏体组织各占一半处）的垂直距离作为有效淬硬层深度。用半马氏体处作淬硬层界限，只要测出截面上半马氏体硬度值的位置，即可确定出淬硬层深度。零件淬火所能获得的淬硬层深度是变化的，随钢的淬透性、零件尺寸和形状以及工艺规范的不同而变化。

实际淬火工作中，如果整个截面都得到马氏体，即表明工件已淬透。但大的工件经常是表面淬成了马氏体，而心部未得到马氏体，这是因为淬火时，表层冷却速度大于临界冷却速度 V_k 而心部小于 V_k 的缘故，如图3-22所示。

2) 注意区分两对易混淆的概念

① 淬透性与淬硬性的区别

淬透性：表明钢淬火时获得马氏体的能力。过冷奥氏体越稳定，C曲线越向右移，马氏体临界冷却速度 V_k 越小，钢的淬透性越好（越高）。它主要取决于奥氏体合金含量。

淬硬性：表示钢淬火后能达到最高硬度的能力。淬火后硬度越高，淬硬性越好（越高）。它主要取决于马氏体碳的质量分数，合金元素含量对淬硬性没有显著影响。

所以说，淬透性好的钢，其淬硬性不一定高。

例题 1：比较 T10、20CrMnTi、40Cr 三种钢的淬透性和淬硬性的高低。

请选择： 最高 较高 最低

	T10	20CrMnTi	40Cr
淬透性	最低	最高	较高
淬硬性	最高	最低	较高

②淬透性和具体条件下具体零件的淬透层深度的区别

在同样奥氏体条件下，同一种钢的淬透性是相同的，但不能说同一种钢水淬与油淬时的有效淬透层深度相同。钢的淬透层深度与钢的临界冷却速度、工件的截面尺寸和介质的冷却能力有关。同样条件下，钢的临界冷却速度越小，工件的淬透层深度越深，而的淬透性却不随工件形状、尺寸 和介质的冷却能力改变。

例题 2：试说明下列各组零件的淬透性情况

- ① $\phi 30\text{mm}$ 与 $\phi 300\text{mm}$ 的两根轴，均为 45 钢，奥氏体化条件相同；
- ② $\phi 30\text{mm}$ 的两个 45 钢零件，奥氏体化条件相同，一个水淬，一个油淬；
- ③ 四个 $\phi 30\text{mm}$ 的零件—其材料分别为：40 钢、60 钢、Cr12 钢、40Cr 钢，均油淬。

答：①②中各自两零件材料化学成分相同，奥氏体化条件相同，淬透性也相同；③ 因四个零件材料化学成分不同，淬透性则不同，从 40 钢、60 钢、40Cr 钢到 Cr12 钢淬透性依次提高。

3)淬透性的测定方法（简介）

①末端淬火法

②临界直径（D）法

4）淬透性的实际意义

力学性能是机械设计中选材的主要依据，而钢的淬透性又会直接影响热处理后的力学性能。因此选材时，必须对钢的淬透性有充分了解。

对于截面尺寸较大和在动载荷下工作的许多重要零件，以及承受拉和压应力的连接螺栓、拉杆、锤杆等重要零件，常常要求零件的表面与心部力学性能一致，此时应选用高淬透性的钢制造，并要求全部淬透。

对于承受弯曲或扭转载荷的轴类、齿轮零件，其表面受力最大、心部受力最小，则可选用淬透性较低的钢种，只要求淬透层深度为工件半径或厚度的1/2~1/3即可。

对于某些工件，不可选用淬透性高的钢。例如焊件，若选用高淬透性钢，易在焊缝热影响区内出现淬火组织，造成焊件变形开裂。

（4）淬火钢的回火转变

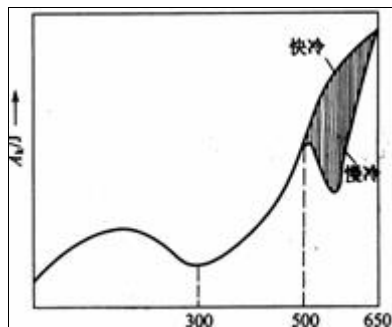
淬火后的钢组织为马氏体和少量的残余奥氏体，它们都是亚稳定组织，有自发转变为F+Fe₃C两相的平衡组织的倾向。淬火后的钢随着加热温度，发生如下转变：

① 马氏体分解（100~350℃）

100℃以上回火时，马氏体中的碳开始以化学式为Fe_{2.4}C的过渡型碳化物（称为ε 碳化物）的形式析出，马氏体中碳的过饱和程度逐渐降低，到350℃左右，α 相碳的质量分数降到接近平衡成分，马氏体分解基本结束，但此时α 相仍保持针状特征。这种由过饱和度较低的α 相与极细的ε 碳化物组成的组织，称为回火马氏体。其显微组织如图5-25所示。由于ε 碳化物析出，晶格畸变降低，淬火应力有所减小，但硬度基本不降低。

② 残留奥氏体分解（200~300℃）

残留奥氏体从200℃开始分解，到300℃左右基本结束，转变为下贝氏体。在此温度范



围内，马氏体仍在继续分解，因而淬火应力进一步减小，硬度无明显降低。

③ 碳化物转变（250～400℃）

250℃以上， ϵ 碳化物逐渐向稳定的渗碳体转变，到400℃全部转变为高度弥散分布的、极细小的粒状渗碳体。因 ϵ 碳化物不断析出，此时 α 相的碳的质量分数降到平衡成分，即实际上已转变成铁素体，但形态仍为针状。于是得到由针状铁素体和极细小粒状渗碳体组成的复相组织，称为回火托氏体，其显微组织如图3-26所示。此时，淬火应力基本消除，硬度降低。

④ 渗碳体聚集长大和 α 相再结晶（>400℃）

400℃以上，高度弥散分布的极细小粒状渗碳体逐渐转变为较大粒状渗碳体，到600℃以上渗碳体迅速粗化。此外，在450℃以上， α 相发生再结晶，铁素体由针状转变为块状(多边形)。这种在多边形铁素体基体上分布着粗粒状渗碳体的复相组织，称为回火索氏体，其显微组织如图3-27所示。淬火应力完全消除，硬度明显下降。

由上可知，淬火钢回火时的组织转变，是在不同温度范围内进行的，但多半又是交叉重叠进行的，即在同一回火温度，可能进行几种不同的转变。淬火钢回火后的性能取决于组织变化，随着回火温度的升高，强度、硬度降低，而塑性、韧性提高，如图3-28所示。温度越高，其变化越明显。

（5）淬火钢件回火的目的

- ① 调整淬火钢的组织与性能，获得工件的使用性能。
- ② 稳定工件的尺寸，以保证工件在使用过程中不发生尺寸和形状的变化。
- ③ 降低脆性，减少或消除内应力，防止工件变形开裂。

（6）回火的种类及应用

按回火温度的不同，可将回火分为以下三种

① 低温回火（150～250℃）

回火后组织为回火马氏体。其目的是减小淬火应力和脆性，保持淬火后的高硬度（58～64HRC）和耐磨性。主要用于刀具、量具、模具、滚动轴承以及渗碳、表面淬火的零件。

② 中温回火（350～500℃）

回火后组织为回火托氏体。其目的是获得高的弹性极限、屈服点和较好的韧性。硬度一般为35～50HRC。主

图 5-29 回火温度与合金钢韧性的关系

要用于各种弹簧、锻模等。

③ 高温回火（500～650℃）

回火后的组织为回火索氏体。其目的是获得强度、塑性、韧性都较好的综合力学性能，硬度一般为200～350HBS。广泛用于各种重要结构件（如轴、齿轮、连杆、螺栓等），也可作为某些精密零件的预先热处理。

钢件淬火并高温回火的复合热处理工艺称为调质。钢经调质后的硬度与正火后的硬度相近，但塑性和韧性却显著高于正火。常用钢的淬火、回火温度与硬度对照表，见附表IV。

（7）回火脆性

回火温度升高时，钢的冲击韧性变化规律如图3-29所示。由图可见，在250～350℃和500～650℃两个温度区间冲击韧性显著降低，也就是脆性增加，这种脆化现象称为回火脆性。

① 低温回火脆性（也称第一类回火脆性）

低温回火脆性是指在250~350℃回火时出现的脆性。几乎所有的工业用钢都有这类脆性。这类脆性的产生与冷却速度无关，为避免这类回火脆性，一般不在此温度回火。

② 高温回火脆性（也称第二类回火脆性）

高温回火脆性是指在 500~650℃回火时出现的脆性。这类回火脆性具有可逆性，即将已产生此类回火脆性的钢，重新加热至 650℃以上温度，然后快冷，则脆性消失；回火保温后缓冷，则脆性再次出现。这类回火脆性主要发生在含有 Cr、Ni、Si、Mn 等合金元素的结构钢。尽量减少钢中杂质元素的含量以及采用含 W、Mo 等的合金钢来防止第二类回火脆性。

5.3 钢的表面热处理与化学热处理

表面热处理是指为改变工件表面的组织和性能，仅对工件表层进行的热处理工艺。

1、表面淬火

钢的表面淬火是将工件表面快速加热到淬火温度，迅速冷却，使工件表面得到一定深度的淬硬层，而心部仍保持未淬火状态的组织的热处理工艺。表面淬火的方法很多，目前广泛应用的有感应加热表面淬火、火焰加热表面淬火等。

（1）感应淬火

感应淬火是指利用感应电流通过工件所产生的热量，使工件表层、局部或整体加热并快速冷却的淬火。

1) 感应淬火频率的选用

在生产中，根据对零件表面有效淬硬层深度的要求，选择合适的频率。

①高频感应淬火 常用频率为200~300KHz，淬硬层深度为0.5~2mm。主要用于要求淬硬层较薄的中、小模数齿轮和中、小尺寸轴类零件等。

②中频感应淬火 常用频率为2500~8000Hz，淬硬层深度为2~10mm。主要用于大、中模数齿轮和较大直径轴类零件。

③工频感应淬火 电流频率为50Hz，淬硬层深度为10~20mm。主要用于大直径零件（如轧辊、火车车轮等）的表面淬火和直径较大钢件的穿透加热。

④超高频感应淬火 电流频率一般为20~40KHz，它兼有高、中频加热的优点，淬硬层深度略高于高频，而且沿零件轮廓均匀分布。所以，它对用高、中频感应加热难以实现表面淬火的零件有着重要作用，适用于中小模数齿轮、花键轴、链轮等。

2) 感应淬火加热的特点

与普通加热淬火相比，感应加热表面淬火有以下特点：

①感应加热速度极快 一般只需要几秒至几十秒时间就可以达到淬火温度。

②工件表层获得极细小的马氏体组织，使工件表层具有比普通淬火稍高的硬度（高2~3HRC）和疲劳强度，且脆性较低。

③工件表面质量好 由于快速加热，工件表面不易氧化、脱碳、且淬火时工件变形小。

④生产效率高 便于实现机械化、自动化，淬硬层深度也易控制。

上述特点使感应加热表面淬火得到广泛应用，但其工艺设备较贵，维修调整困难，不易处理形状复杂的零件。

感应淬火最适宜的钢种是中碳钢（如40钢、45钢）和中碳合金钢（如40Cr钢、40MnB钢等），也可用于高碳工具钢、含合金元素较少的合金工具钢及铸铁等。

一般表面淬火前应对工件正火或调质，以保证心部有良好的力学性能，并为表层加热作好组织准备。表面淬火后应进行低温回火，以降低淬火应力和脆性。

(2) 火焰淬火 (见书)

2、钢的化学热处理

化学热处理是指将工件置于适当的活性介质中加热、保温，使一种或几种元素渗入其表层，以改变化学成分、组织和性能的热处理工艺。

化学热处理的基本过程是：活性介质在一定温度下通过化学反应进行分解，形成渗入元素的活性原子；活性原子被工件表面吸收，即活性原子溶入铁的晶格形成固溶体或与钢中某种元素形成化合物；被吸收的活性原子由工件表面逐渐向内部扩散，形成一定深度的渗层。

目前常用的化学热处理有：渗碳、渗氮、碳氮共渗等。

(1) 渗碳

所谓渗碳是将工件放入渗碳气氛中，并在900~950℃的温度下加热、保温，以提高工件表层碳的质量分数并在其中形成一定的碳的质量分数梯度的化学热处理工艺。其目的是使工件表面具有高的硬度和耐磨性，而心部仍保持一定强度和较高的韧性。齿轮、活塞销等零件常采用渗碳处理。

1) 渗碳的方法 渗碳所用介质称为渗碳剂，根据渗碳剂的不同，渗碳的方法分为固体渗碳、气体渗碳、真空渗碳和液体渗碳等。

2) 渗碳用钢、渗碳后组织及热处理 渗碳用钢为低碳钢和低碳合金钢，碳的质量分数一般为0.1%~0.25%。碳的质量分数提高，将降低工件心部的韧性。

工件渗碳后其表层碳的质量分数通常为0.85%~1.05%范围。渗碳缓冷后，表层为过共析组织，与其相邻为共析组织，再向里为亚共析组织的过渡层，心部为原低碳钢组织。

一般规定，从渗碳工件表面向内至碳的质量分数为规定值处(一般 $W_c=0.4\%$)的垂直距离为渗碳层深度。工件的渗碳层深度取决于工件尺寸和工作条件，一般为0.5~2.5mm。

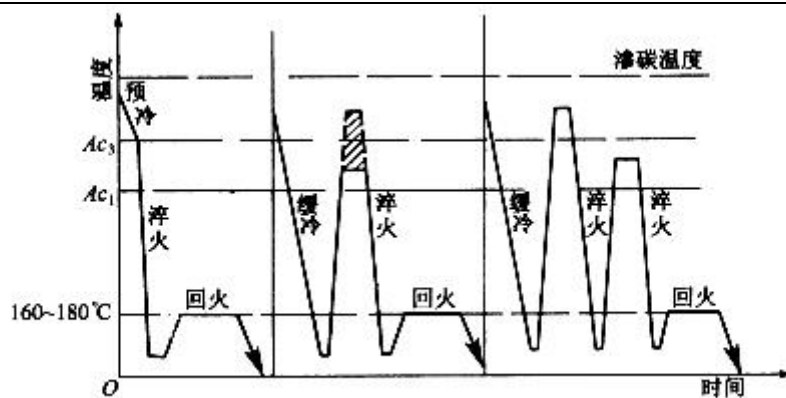
工件渗碳后必须进行适当的热处理，即淬火并低温回火，才能达到性能要求。渗碳件的热处理工艺有三种，如图5-35所示。

①直接淬火法 先将渗碳件自渗碳温度预冷至某一温度（一般为850~880℃），立即淬入水或油中，然后再进行低温回火。预冷是为了减少淬火应力和变形。直接淬火法操作简便，不需重新加热，生产率高，成本低，脱碳倾向小。但由于渗碳温度高，奥氏体晶粒易长大，淬火后马氏体粗大，残留奥氏体也较多，所以工件耐磨性较低，变形较大。此法适用于本质细晶粒钢或受力不大，耐磨性要求不高的零件。

②一次淬火法 工件渗碳后出炉缓冷，然后再重新加热进行淬火、低温回火。由于工件在重新加热时奥氏体晶粒得到细化，因而可提高钢的力学性能。此法应用比较广泛。

③二次淬火法 第一次淬火是为了改善心部组织和消除表面网状二次渗碳体，加热温度为 A_{c3} 以上30~50℃。第二次淬火是为细化工件表层组织，获得细马氏体和均匀分布的粒状二

次 渗 碳 体



(a) 直接淬火 (b) 一次淬火 (c) 二次淬火

图 5-35 渗碳体常用的热处理方法

加热温度为 Ac_1 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。二次淬火法工艺复杂，生产周期长，成本高，变形大，只适用于表面耐磨性和心部韧性要求高的零件或本质粗晶粒钢。

渗碳件淬火后应进行低温回火（一般 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ）。直接淬火和一次淬火经低温回火后，表层组织为回火马氏体和少量渗碳体，二次淬火表层组织为回火马氏体和粒状渗碳体。渗碳、淬火回火后的表面硬度均为 $58\sim 64\text{HRC}$ ，耐磨性好，心部组织取决于钢的淬透性，低碳钢一般为铁素体和珠光体，硬度 $137\sim 183\text{HBS}$ 。低碳合金钢一般为回火低碳马氏体、铁素体和托氏体，硬度 $35\sim 45\text{HRC}$ ，并具有较高的强度、韧性和一定的塑性。

(2) 钢的氮化（渗氮）

它是指在一定温度下（一般在 Ac_1 以下），使活性氮原子渗入钢件表面的化学热处理工艺。其目的是使工件表面获得高硬度、高耐磨性、高疲劳强度和高热硬性和良好耐蚀性，因氮化温度低，变形小，应用广泛。常用的氮化方法有：气体渗氮和离子渗氮。

① 气体渗氮 它是利用氨气在加热时分解产生的活性氮原子渗入工件表面形成氮化层，同时向心部扩散的热处理工艺。常用方法是工件放入通有氨气的井式渗氮炉中，加热到 $500\sim 570^{\circ}\text{C}$ ，使氨气分解出活性氮原子 $[\text{N}]$ ，活性氮原子 $[\text{N}]$ 被工件表面吸收，并向内部逐渐扩散形成渗氮层。

应用最广泛的渗氮用钢是 38CrMoAl 钢，钢中 Cr 、 Mo 、 Al 等元素在渗氮过程中形成高度弥散、硬度很高的稳定氮化物(CrN 、 MoN 、 AlN)，使渗氮后工件表面有很高的硬度（ $1000\sim 1200\text{HV}$ ，相当于 72HRC ）和耐磨性，因此渗氮后不需再进行淬火。且在 600°C 左右时，硬度无明显下降，热硬性高。

渗氮前零件须经调质处理，以保证心部的强度和韧性。对于形状复杂或精度要求较高的零件，在渗氮前精加工后还要进行消除应力的退火，以减少渗氮时的变形。

渗氮主要用于耐磨性和精度要求很高的精密零件或承受交变载荷的重要零件，以及要求耐热、耐蚀、耐磨的零件，如精密机床的主轴、蜗杆、发动机曲轴、高速精密齿轮等。但由于氮化温度低，所需时间特别长，一般氮化 $30\sim 60\text{h}$ ，才能获得 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 的氮化层，因此限制了它的应用。

② 离子氮化 它是一种较先进的工艺，是指在低真空的容器内，保持氮气的压强为 $133.32\sim 1333.32\text{Pa}$ ，在 $400\sim 700\text{V}$ 的直流电压作用下，迫使电离后的氮离子高速冲击工件（阴极），被工件表面吸收，并逐渐向内部扩散形成渗氮层。

离子氮化的特点是：渗氮速度快，时间短（仅为气体渗氮的 $1/5\sim 1/2$ ）；渗氮层质量好，

<p>对材料的适应性强。</p> <p>目前离子氮化已广泛应用于机床零件（如主轴、精密丝杠、传动齿轮等）、汽车发动机零件（如活塞销、曲轴等）及成型刀模具等。但对形状复杂或截面相差悬殊的零件，渗氮后很难同时达到相同的硬度和渗氮层深度。</p> <p>③ 碳氮共渗 是指在工件表面同时渗入碳和氮，并以渗碳为主的化学热处理工艺。其主要目的是提高工件表面的硬度和耐磨性。常用的是气体碳氮共渗。</p> <p>碳氮共渗后要进行淬火、低温回火。共渗层表面组织为回火马氏体、粒状碳氮化合物和少量残留奥氏体，渗层深度一般为 0.3~0.8mm。气体碳氮共渗用钢，大多为低碳或中碳的碳钢、低合金钢及合金钢。</p>	
--	--

教

主讲人 李逸仙

系主任（签字）： 年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排:</p> <p>具体授课计划:</p> <p>第一讲:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 提问复习 (5min) 2. 合金元素在钢中的作用 (25min) <ol style="list-style-type: none"> 2.1 引入 (2min) <p>提问: 问什么碳钢常用水淬而合金钢多用油淬?</p> 2.2 讲授合金钢的定义及常用合金元素 (3min) <p>强调合金元素是人为加入, 与 C、Si、Mn、S、P 不同</p> 2.3 讲授合金元素在改善钢的热处理工艺性能方面的作用 (12min) <p>回答为什么碳钢常用水淬而合金钢多用油淬</p> 2.4 讲授合金元素在改善钢的性能方面的作用 (5min) 2.5 雨课堂习题巩固 (3min) 3. 合金结构钢 (40min) <ol style="list-style-type: none"> 3.1 讲授合金结构钢的编号方式及常用分类 (5min) 3.2 普通低合金钢 (7min) <p>讲授普通低合金钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p>对比 Q235、Q345 及 Q420 在桥梁建筑方面的典型应用, 强调提高钢的性能能够提高桥梁质量且节省钢材 (课程思政)</p> 3.3 合金渗碳钢 (5min) <p>讲授合金渗碳钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p>分别对比低淬透性、中淬透性及高淬透性合金渗碳钢的典型牌号及应用。强调合金元素含量对淬透性的影响</p> 3.4 合金调质钢 (8min) <p>讲授合金调质钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p>举例: 合金调制钢典型牌号 40Cr 制内燃机曲轴工艺路线。</p> 3.5 合金弹簧钢 (7min) <p>讲授合金弹簧钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p>举例: 冷卷弹簧和热卷弹簧的工艺路线</p> 3.6 滚动轴承钢 (5min) <p>讲授滚动轴承钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> 3.7 雨课堂习题巩固 (3min) 4. 合金工具钢 <ol style="list-style-type: none"> 4.1 讲授合金工具钢的编号方式及常用分类 (5min) 4.2 低合金刀具钢 (10min) <p>讲授低合金刀具钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺、室温组织及工程应用</p> <p>讲授红硬性的概念</p> <p>讨论: 12SiCr 含碳量多少? 是结构钢还是工具钢?</p> 5 课程小结 (5min) <p>第二讲:</p>	

<p>1. 提问复习 (5min)</p> <p>2. 合金工具钢 (30min)</p> <p>2.1 高速钢 (高碳高合金刀具钢) (15min)</p> <p> 讲授高速钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途, 强调典型牌号 W18Cr4V(18-4-1)</p> <p> 举例: 分析 W18Cr4V(18-4-1) 制造刀具的工艺路线</p> <p> 讨论: 为什么三墩三拔? 为什么高温淬火? 为什么三次回火?</p> <p>2.2 冷作模具钢 (5min)</p> <p> 讲授冷作模具钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p> 对比一次硬化法和二次硬化法</p> <p>2.3 热作模具钢 (3min)</p> <p> 讲授热作模具钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p>2.4 量具钢 (5min)</p> <p> 讲授量具钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p> 提问: 为什么要进行冷处理?</p> <p> 讲授时效处理</p> <p>2.5 雨课堂巩固练习 (2min)</p> <p>3. 特殊性能钢 (27min)</p> <p>3.1 讲授特殊性能钢的牌号及分类 (5min)</p> <p>3.2 不锈钢 (10min)</p> <p> 讲授金属的腐蚀机理</p> <p> 分析防止电化学腐蚀的措施</p> <p> 讲授常用不锈钢分类</p> <p> 画图讲授铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢的防腐蚀原理</p> <p>3.3 耐热钢 (2min)</p> <p> 讲授耐热钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p>3.4 耐磨钢 (5min)</p> <p> 讲授耐磨钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p> 讲授水韧处理的原理</p> <p>3.5 低温钢 (2min)</p> <p> 讲授低温钢的成分含量、典型牌号、性能特点、热处理工艺及用途</p> <p>3.6 雨课堂巩固练习 (3min)</p> <p>4. 有色金属及其合金</p> <p>4.1 铝及其合金 (10min)</p> <p> 讲授工业纯铝的性能、用途及牌号</p> <p> 讲授变形铝合金和铸造铝合金的成分、性能及分类</p> <p> 重点讲授铝合金的时效处理</p> <p> 雨课堂巩固练习</p> <p>4.2 铜及其合金 (8min)</p> <p> 讲授铜及其合金的性能、分类及用途</p> <p> 雨课堂巩固练习</p>	
---	--

4.3 钛及其合金（4min）

讲授钛及其合金的性能、分类及用途

5. 课程小节（5min）

具体授课内容：

第七章 合金钢

7.1 合金钢

教学过程：

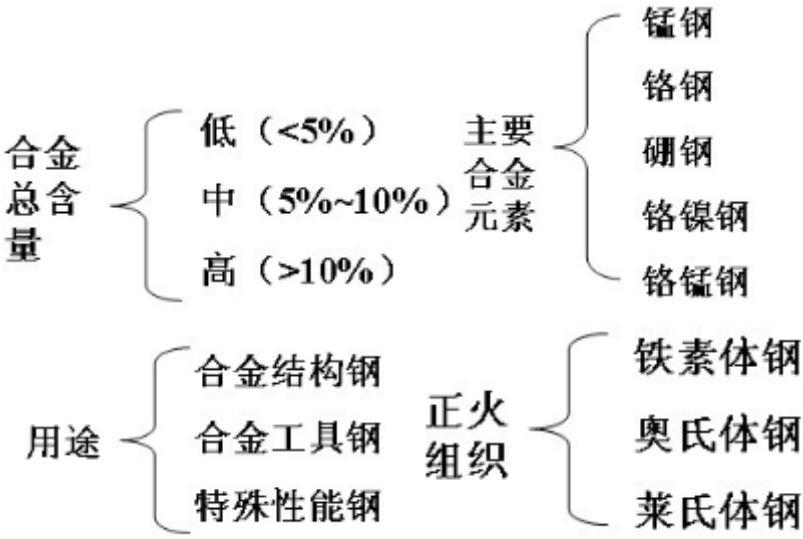
案例导入：

之前的课题已经研究了钢的热处理工艺方式（提问：有哪些热处理方式？）。本节将对合金钢这类重要材料的知识进行讲解。

教学内容：

7.1 .1 合金钢的分类与编号

1. 合金钢的分类



2. 合金钢的编号

- 1) 低合金高强度结构钢：Q+屈服极限+质量等级例如：Q295A
- 2) 合金结构钢：两位数字（平均含碳量的万倍）+元素符合+数字+(A)
后位数字为合金质量分数，低于 1.5%不标；1.5%~2.5%为 2；2.5%~3.5%为 3；……40Cr，38CrMoAlA
- 3) 滚动轴承钢：G+Cr+数字（Cr 的质量分数的千倍）+（另外元素）全是高级优质钢，不加 A， GCr15；元素表示同合金结构钢
- 4) 合金工具钢：Wc<1%时，用一位数字表示碳的含量的千倍； Wc>1%时，不标； 其余元素同合金结构钢，高速工具钢例外，含碳量不标） 例 Cr12MoV； 9SiCr
- 5) 不锈钢与耐热钢：Wc<0.03%时，00+其他元素； Wc 在 0.03%~0.08%时，0+其他元素；>0.08%时，含碳质量分数的千倍，其余同合金结构钢。例 3Cr13， 00Cr17Ni14Mo2， 0Cr19Ni9

- 参
- 考：碳素钢的编号
 - 7.1.2 合金结构钢
 - 1. 低合金高强度合金钢（Q345）
 - 2. 合金渗碳钢（渗碳+淬火+低回；淬透性低、中、高）

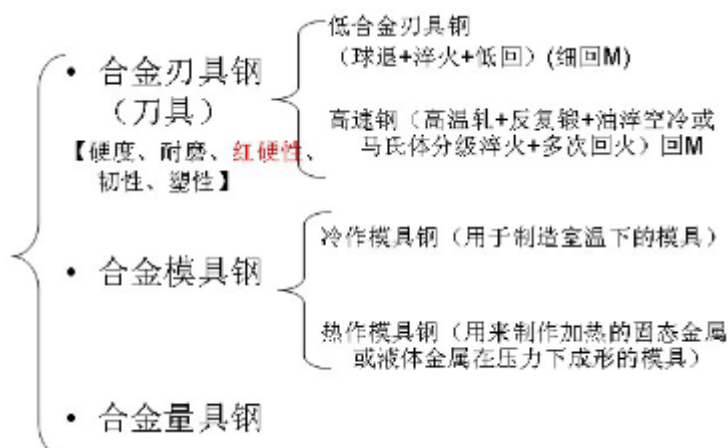
<p>3. 合金调质钢（回火 S/淬透性低、中、高）</p> <p>4. 合金弹簧钢(热成形【d 大、回火屈】、冷成形【d 小、回 S+冷拔】) (60Si2Mn、60Si2CrVA、50CrVA)</p> <p>5. 滚动轴承钢(GCr9、GCr15)</p> <p>1. 低合金高强度合金钢</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 特点：以加 Mn 为主，合金总含量在 3%以内，与碳素结构钢比，强度高，塑性，韧性好，良好的焊接工艺性，较好的耐腐蚀性和低的冷脆性转变温度。 ▪ 含碳量在 0.16%—0.20%。Q295;Q345;Q390;Q420;Q460. ▪ 热轧、正火，组织为 F+P（少） ▪ 合金元素作用：M、Si、Cr、Ni 强化 F;V、Nb、Ti 细化 F;合金元素使共析点 S 左移，增加 P; C 化物形成元素（V、Nb、Ti）及 N 化物形成元素（Al），使细小化合物从固溶体中析出，产生弥散强化作用。 <p>2. 合金渗碳钢</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 用途：强烈冲击磨损的渗碳零件。动载荷和重载的汽车变速箱齿轮、汽车后桥齿轮和内燃机里的凸轮轴、活塞销等。 ▪ 特点：渗碳、淬火+低回，表面具有高的强度和耐磨性，心部具有较高的强度和足够的韧性。 ▪ 渗碳前：含碳量 0.10%—0.25%。碳素渗碳钢的淬透性低，心部改善不大。加入合金元素可改善淬透性。Cr、Ni、Mn、B、Ni 的效果最好。为了细化晶粒，加入 Ti、V、Mo，形成的碳化物高温渗碳时不溶解有效遏制渗碳时的过热现象。 ▪ 热处理方式：渗碳+淬火+低回 ▪ 渗碳后，表层含碳量 0.85%—1.05%，热处理后，变成合金渗碳体+回火 M+残余 A（少）。硬度可达 58—64HRC，心部组织与钢的淬透性及零件的截面有关：全部淬透时，为低回 M，硬度 40—48HRC;未淬透，为 P+F 或低回 M+F 的混合组织，硬度 25—40HRC ▪ 淬透性分为：低、中、高 <p>3. 合金调质钢</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 用途：重要零件，机床主轴、汽车底盘的半轴、柴油机连杆螺栓等。 ▪ 0.25%—0.50%，（中碳钢）【为什么？】 ▪ 过低不易淬硬，回火达不到所需要的强度；过高，则零件韧性较差 ▪ 主加元素：Cr、Ni、Mn、Si、B，以增加淬透性、强化 F;Mo、W 防止第二类回火脆性，并增加回火稳定性；V、Ti 的作用是细化晶粒。 ▪ 预先热处理：完全退火—改善切削加工性。 ▪ 最终热处理：淬火+高温回火（500—650），S 回 ▪ 分类：淬透性，低、中、高 <p>4. 合金弹簧钢</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 工作条件：冲击、振动、周期性扭转、弯曲等交变应力，不允许有塑性变形。 ▪ 0.5%—0.7% ▪ Si、Mn，提高钢的淬透性和强化 F. ▪ 尺寸不同：热成形弹簧钢与冷成形弹簧钢。 ▪ 热成形【d 大、中回（350—500）、喷丸处理、强化表面、回屈】 ▪ 冷成形【d 小、铅浴或盐浴中等温度冷却（500—550）、S 回、多次冷拔不用淬火，在 200—300 去应力退火】） ▪ 60Si2Mn、60Si2CrVA、50CrVA <p>5. 滚动轴承钢</p>	
--	--

- 用途：滚动轴承；形状复杂的工具；冷冲模具；精密量具；硬度高、耐磨性高的结构件
- 高碳低铬钢，0.95%—1.15%，属于过共析钢。（耐磨性）。铬的作用是**提高淬透性**，使组织均匀，增强回火稳定性。含 S/P 很少。
- 热处理：预处理—球化退火；最终热处理—淬火+低回；组织：极细 S 回+均匀分布的细小碳化物+A（少）。硬度：61—65HRC。精密场合，可淬火后立刻要冷处理（-60—-80），减少残余 A，再进行低回+磨削加工，最后稳定化处理（在 120-130 保温 10-20h）
- 典型牌号：GCr9、GCr15、GCr15-SiMn

提问 1：查阅以下牌号钢的主要用途：

Q345；20Cr；20CrMn；20Cr2Ni4；45；40Cr；38CrMoAlA；GCr15

7.1.3 合金工具钢



1. 合金刀具钢

- 用途：制造各种切削刀具的钢
- (1) 低合金刀具钢
- 性能要求：高硬度、高耐磨性、高的红硬性、一定的塑性和韧性

0.75—1.45%。加入 Si、Cr、Mn 提高淬透性；回火稳定性；红硬性。W 形成特殊碳化物，不溶于 A，使得 A 保持细小，细化晶粒。

- 热处理工艺：预处理：球退；终处理：淬火+低回
- 室温组织：M 回 +粒状合金碳化物+A 残
- 典型钢号：Cr12、CrWMn、9SiCr、Cr2、Cr12MoV
- 2) 高速钢
- 红硬性高达 600 度，可以高速切削。含有较高的碳和大量形成碳化物的元素 W、Mo、Cr、V、Co、Al。碳含量 0.7-1.6%。合金元素含量大于 10%。莱氏体钢。不能热处理。只能高温轧制，反复锻造将共晶碳化物击碎。等温球化退火消除残余应力。（在 830—880 度保温，快冷到 720-760 度保温）。淬火方法：油淬空冷的双介质或马氏体分级。淬火后组织：隐针 M+粒状碳化物+20%-25%的 A；多次回火后组织：极细 M+较多粒状碳化物+少量的 A；
- 三类：W 系；W-Mo 系；超硬系。

2. 合金模具钢

- 用途：制造各种模具的钢
- 性能：高硬度、高耐磨性、一定的韧性和塑性
- 1) 冷作模具钢
- 热处理工艺：油淬火+低回

- 室温组织：回火马氏体
- 典型钢号：CrWMn、9Mn2V、Cr2、9SiCr、9Cr2、Cr12
- 2) 热作模具钢
- 分类：热锻模具钢、压铸模钢
- 热处理工艺：油淬火+中、高温回火
- 室温组织：回火屈氏体
- 典型钢号：5CrNiMo、铬系热作模具（4Cr5MoSiV【H11】）、3Cr2W8V

3. 合金量具钢

- 用途：制造游标卡尺、千分尺、量块、塞规
- 性能：较高硬度、较高耐磨性、足够韧性、尺寸稳定
- 热处理工艺：油淬火+低回+时效处理
- 室温组织：回火马氏体
- 典型钢号：CrWMn、9Mn2V、GCr15

7. 1. 4 特殊性能钢



1. 不锈钢

用途：在腐蚀介质下使用的钢

防锈原理：

- 1) Cr 的含量>11.7%, 使得 Cr 溶于固溶体，提高基体电极电位
- 2) 室温只有均匀单相组织，减少原电池形成的可能性
- 3) 加大量合金元素，使表面形成氧化膜，隔绝周围介质

典型牌号：

1Cr13、2Cr13、3Cr13、7Cr17、1Cr17、0Cr19Ni9

2. 耐热钢

- 用途高温环境下使用的钢
- 性能：高温抗氧化性和热强性
- 蠕变：钢材在高温下除氧化外其强度也大大降低，当工作温度接近材料再结晶温度时，会缓慢地发生塑性变形，且随时间的延长而增大，最后导致金属破坏的现象
- 典型牌号：15CrMo、4Cr9Si2、0Cr18Ni11Ti

3. 耐磨钢

- 使用场合：冲击和磨损条件下使用的高锰钢
- 使用形态：铸造成形后【单相 A 不稳定易变冷强化】
- 水韧处理：将高锰钢铸件加热到 1000~1100° C，使碳化物全部溶解到 A 中，然后水中急冷，获得均匀、单一的过饱和 A 组织。【强度、硬度虽不高，但塑性、韧性好】
- 典型型号：ZGMn13-1

三、小结：合金钢的分类、编号、性能与用途

四、有色金属

案例导入：

之前的章节已经对铁碳合金及合金钢等主要工程材料的力学性能及提高力学性能的方法进行了讲解，同学们对钢铁材料选材、毛坯件性能改善方面具备了一定的知识。但是仅有钢铁材料方面的知识，是不够得。钢铁材料本身性能的局限性，无法满足日趋广泛现代机械制造领域要求，为此，需要同学们掌握常见的有色金属及其他材料的性能，才能更好地具备合理选材、合理提高毛坯件性能的能力。那么常见的有色金属材料有哪些呢？它们有着什么样的性能及应用呢？

教学内容：

8.1. 1 铝及铝合金

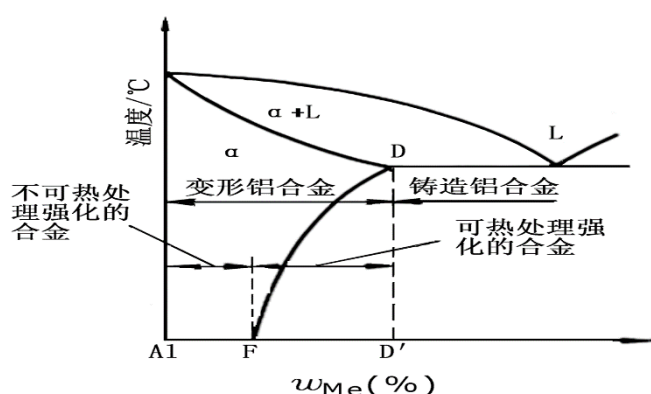
铝及其合金是航空工业中的主要结构材料，是有色金属中应用最广泛的结构材料。

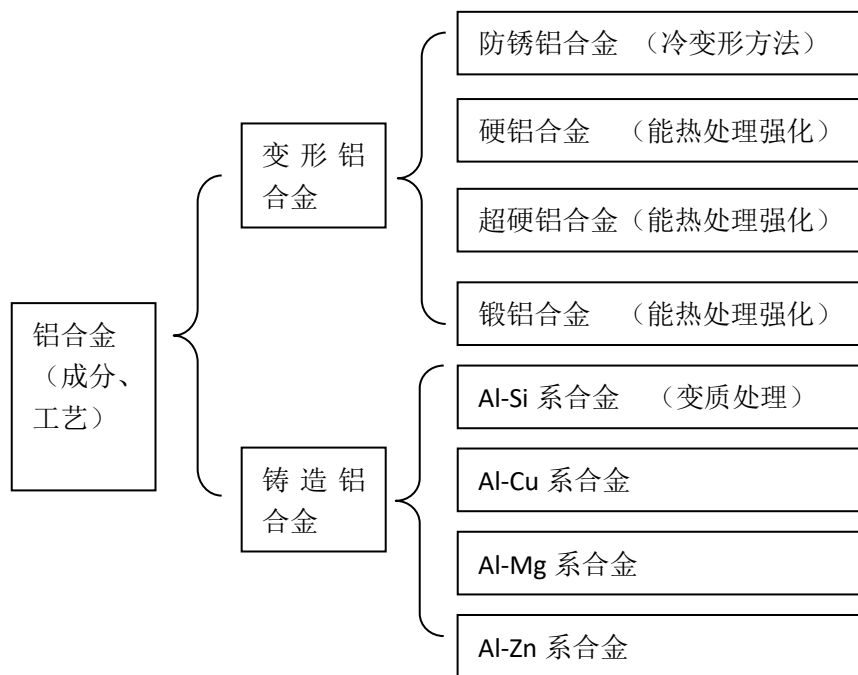
1. 工业纯铝：呈银白色，是一种轻金属，面心立方晶格、无同素异晶转变，熔点低、密度小，具有优良的加工工艺性能、电导性、热导性和耐大气腐蚀能力。工业纯铝是WA1=99.00~99.80%的纯铝，主要用来制作电线、电缆、散热片、配置合金等。

其牌号用A1**.*表示。最后三位数字表示铝的最低百分含量，如A199.6。

2. 铝合金

- (1) 定义：加入Si、Cu、Mg、Zn、Mn等提高强度。用作于承受一定载荷的结构件。
- (2) 分类：铝合金分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。变形铝合金又分为不能热处理强化的铝合金和能热处理强化的铝合金。





(3) 铝合金的牌号表示:

- 1) 变形铝合金牌号: 采用四位字符牌号, 铝合金的牌号用 $2 \times \times \times \sim 8 \times \times \times$ 系列表示。第一位数字: 铝合金的组别; 第二位字母: 原始合金的改型情况, A 为原始合金, B-Y 为原始合金的改型合金。最后两位数字: 区分同一组中不同的铝合金。例: 5A05。
- 2) 铸造铝合金牌号。用“ZL+三位数字”表示。第一数字是合金类别。后两位为顺序号。例: ZL102。

(4) 铝合金的热处理

固溶处理和时效。

- 1) 固溶热处理 (俗称淬火): 将合金加热到单相 α 固溶体状态, 并水冷至室温, 获得过饱和 α 固溶体组织。
- 2) 时效强化 (时效): 固溶热处理后的合金在室温或加热至一定温度放置, 随放置时间的延长, 因过饱和 α 固溶体不稳定而析出细小分散的过渡相, 使强度显著增高、塑性降低的现象。

铝合金经固溶处理后, 强度和硬度不会明显升高, 塑性会显著提高。但这种组织是不稳定的, 经时效处理, 强度和硬度显著升高, 塑性下降。

(5) 应用: 参阅书中表格 1.5.1 及 1.5.2

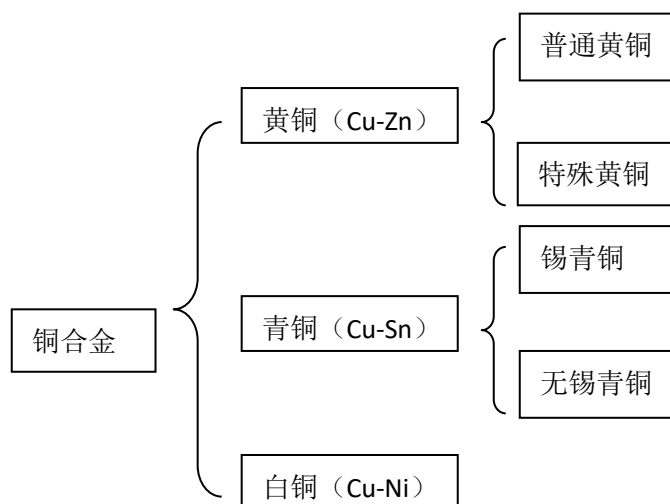
8.1.2 铜及铜合金

1 工业纯铜

纯铜呈紫红色, 熔点 1083°C , 密度为 8.96 g/cm^3 , 面心立方晶格、无同素异晶转变, 良好的导电性、热导性、耐蚀性、抗磁性和加工工艺性能。纯铜主要用于制作电线、电缆、导热材料及配置合金。

工业纯铜的代号用“T”加顺序号表示, 共有 T1、T2、T3、T4 四个牌号。序号越大, 纯度越低。

2 铜合金



(1) 黄铜：

黄铜的牌号用“H+数字”表示。如 H68。单相黄铜 H68，有较高的强度，冷、热变形能力，较好的耐蚀性，用于制造形状复杂、耐蚀的零件。双相黄铜 H62，有较高的强度，可进行热变形加工，广泛用于制作热轧、热压零件或由棒材经机加工制造各种零件。

特殊黄铜是在普通黄铜中加入其他合金元素的黄铜。加入的合金元素有铅、锡、铝、硅、锰、铁、镍等，以改善切削加工性、提高耐蚀性、铸造性能和力学性能等。特殊黄铜的牌号用“H+主加合金元素符号+铜的百分含量-合金元素的百分含量”表示，例：HPb59-1。

(2) 青铜：

1) 锡青铜：以锡为主要添加元素的铜基合金。常用锡青铜一般 $W_{Sn}=3\%-14\%$ ，其中压力加工锡青铜 $W_{Sn}<7\%$ 。锡青铜的耐磨性好、无磁性和冷脆现象，可用于制作轴承、轴套等耐磨零件及弹簧等弹性元件。锡青铜的铸造收缩率小，用于铸造形状复杂、致密性要求不高，耐磨、耐蚀的零件。

2) 无锡青铜：是含铝、铍、硅、铅、锰等合金元素的铜基合金。主要有铝青铜、铍青铜等。铝青铜缺点是可焊性较差。铸造铝青铜用来制造齿轮、轴套、涡轮等强度耐磨性较高的摩擦零件。铍青铜用于弹性元件及钟表、仪器的零件，电焊机电机等

8.1.3 滑动轴承合金

(1) 用途：制造滑动轴承中的轴瓦及内衬的合金。

(2) 性能和组织特点：

轴承支承轴进行工作，会与轴颈产生摩擦。为减少轴承对轴颈的磨损，对轴承合金有如下要求：

- 1) 较高的抗压强度和疲劳强度；
- 2) 摩擦系数小、表面能储存润滑油，耐磨性好；
- 3) 良好的抗蚀性、热导性和较小的膨胀系数；
- 4) 良好的磨合性；
- 5) 加工性能好，原料来源广，价格便宜。

组织特点：软基体上分布硬质点或硬基体上分布软质点。软基体上分布硬质点，常用材料为锡基或铅基轴承合金（巴氏合金）；硬基体上分布软质点常用材料为铜基及铝基轴承合金。

(3) 常见轴承合金：

- 1) 锡基轴承合金：Z+基体元素+主加元素及含量+辅加元素及含量。膨胀系数小，减摩擦好，并具有良好的导热性、塑性和耐腐蚀性，适用于制造汽车、拖拉机、汽轮机的高速轴瓦。ZSnSb11Cu6
- 2) 铅基轴承合金：价格便宜，铸造性好，低速、低负载的轴承使用。如汽车、拖拉机的曲轴轴承及电动机轴承等。ZPbSb16Cu2
- 3) 铜基轴承合金：铅青铜（ZCuPb30）、锡青铜（ZCuSn10Pb1）。铅青铜具有高的疲劳强度和承载能力，优良的耐磨性、导热性和低的摩擦系数，承受高载荷、高速度的重要轴承。如航空发动机、高速柴油机等。锡青铜能承受较大的载荷，广泛用于中等速度及承受较大的固定载荷。如电动机、泵、金属切削机床的轴承。
- 4) 铝基轴承合金：铝锑镁轴承合金、铝锡轴承合金。新型减磨材料，具有密度小、导热性好、疲劳强度高和耐腐蚀性好等优点。

8.1.4 镁及镁合金

镁合金牌号所表明的镁合金加工，是以镁为基加入其他元素组成的合金加工。其特点是：密度小（ 1.8g/cm^3 镁合金左右），比强度高，弹性模量大，消震性好，承受冲击载荷能力比铝合金大，耐有机物和碱的腐蚀性能好。主要合金元素有铝、锌、锰、铈、钍以及少量锆或镧等。目前使用最广的是镁铝合金，其次是镁锰合金和镁锌锆合金。主要用于航空、航天、运输、化工、火箭等工业部门。在实用金属中是最轻的金属，镁的比重大约是铝的 $\frac{2}{3}$ ，是铁的 $\frac{1}{4}$ 。它是实用金属中的最轻的金属，高强度、高刚性。

镁合金加工的特点

镁合金牌号的镁合金加工过程及腐蚀和力学性能有许多特点：质量轻、刚性好、具有一定的耐蚀性和尺寸稳定性、抗冲击、耐磨、衰减性能好及易于回收；另外还有高的导热和导电性能、无磁性、屏蔽性好和无毒的特点。

应用范围：镁合金广泛用于携带式的器械和汽车行业中，达到轻量化的目的。镁合金的比重虽然比塑料重，但是，单位重量的强度和弹性率比塑料高，所以，在同样的强度零部件的情况下，镁合金的零部件能做得比塑料的薄而且轻。另外，由于镁合金的比强度也比铝合金和铁高，因此，在不减少零部件的强度下，可减轻铝或铁的零部件的重量。镁合金相对比强度（强度与质量之比）最高。比刚度（刚度与质量之比）接近铝合金和钢，远高于工程塑料。

在弹性范围内，镁合金受到冲击载荷时，吸收的能量比铝合金件大一倍，所以镁合金具有良好的抗震减噪性能。镁合金熔点比铝合金熔点低，压铸成型性能好。镁合金铸件抗拉强度与铝合金铸件相当，一般可达 250MPa ，最高可达 600 多 Mpa 。屈服强度，延伸率与铝合金也相差不大。镁合金还有个有良好的耐腐蚀性能，电磁屏蔽性能，防辐射性能，可做到 100% 回收再利用。镁合金件稳定性较高压铸件的铸造加工尺寸精度高，可进行高精度机械加工。

根据有关研究，汽车所用燃料的 60% 是消耗于汽车自重，汽车自重每减轻 10% ，其燃油效率可提高 5% 以上；汽车自重每降低 100kg ，每百公里油耗可减少 0.7L 左右，每节约 1L 燃料可减少 CO_2 排放 2.5g ，年排放量减少 30% 以上。所以减轻汽车重量对环境的影响非常大，汽车的轻量化成必然趋势。

镁合金牌号的应用相对比较广泛，镁合金是航空器、航天器和火箭导弹制造工业中使用的最轻金属结构材料。镁的重量比铝轻，比重为 1.8 ，强度也较低，主要用于制造低承力的零件。镁合金在潮湿空气中容易氧化和腐蚀，因此零件使用前，表面需要经过化学处理或涂漆。随着中国相关加工业和制造业的发展，中国的自有的镁合金牌号也将成为世界上具有广泛影响力的镁合金牌号之一。牌号是指镁合金所对应的牌号，主要是为了识别镁合金的产品表示。

目前，国际上倾向于采用美国试验材料协会(ASTM)使用的方法来标记镁合金。

镁合金中合金元素代号见表 1-1，1-2。

元素代号	元素名称
A	铝
B	铍
C	铜
D	镉
E	稀土
F	铁
G	钙
H	铋
K	铉
L	镱

元素代号	元素名称
M	锰
N	镍
P	铅
Q	铈
R	铈
S	硅
T	锡
W	钨
Y	铀
Z	锆

镁合金：英文字母（两个）+数字（两个） +英文字母

前面两个字母：第一个字母：含量最大的合金元素；

第二个字母：含量为第二的合金元素；

数字：表示两个主要合金元素的含量：

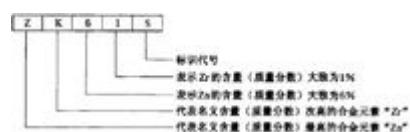
第一个数字：第一个字母的重量%；

第二个数字：第二字母的重量%。

最后面的英文字母：

后缀字母 A、B、C、D、E 为标识代号，用以标识各具体组成元素相异或元素含量有微小差别的不同合金。

如 AZ91E 表示主要合金元素为 Al 和 Zn，其名义含量分别为 9%和 1%，E 表示 AZ91E 是含 9%Al 和 1%Zn 合金系列的第五位。



目前国外在工业中应用较广泛的镁合金是压铸镁合金，主要有以下 4 个系列：AZ 系列 Mg-Al-Zn；AM 系列 Mg-Al-Mn；AS 系列 Mg-Al-Si 和 AE 系列 Mg-Al-RE。

8.1.5 钛及其合金

<p>一、钛的基本性质</p> <p>1) 钛有两种同素异构体 α 及 β。α 在 882℃ 以下稳定, hcp 结构; β 稳定于 882℃-熔点间, bcc 结构。</p> <p>(2) 钛比强度高, 熔点高, 塑性好, 高的比强度可保持到 550-600℃。</p> <p>(3) 具有优良的耐蚀性, 在室温很快生成一层保护性钝化层。</p> <p>(4) 低温机械性能好。</p> <p>(5) 弹性模量较低, 约为铁的 54%。</p> <p>(6) 导热系数和线膨胀系数都较低。</p> <p>二、钛合金中的合金元素与气体杂质元素</p> <p>(1) α 相稳定元素, 提高 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变温度。</p> <p>如铝, 有效强化 α 相, 提高低温和高温 (550℃ 以下) 的强度。</p> <p>(2) 有效强化 α 相, 它们在 α 和 β 相中均有大的固溶度, 但对 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变温度影响较小, 称为中性强化元素。如锡、锆。</p> <p>(3) β 相稳定元素, 降低 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变温度。</p> <p>第一类: 产生 β 相共析分解的元素, 如铬、锰、铁、铜、镍、钴和钨等, 随温度降低, β 相发生共析分解, 析出 α 相及金属间化合物。</p> <p>第二类: 不产生 β 相共析分解, 但慢冷时析出 α 相, 快冷时有 α' 马氏体转变。如钼、钒、铌、钽等。</p> <p>稳定 β 相的能力是钼 > 钒 > 铌 > 钽。</p> <p>(4) 氧</p> <p>稳定 α 相元素, 提高 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变温度占据八面体间隙位置, 产生点阵畸变, 提高强度、降低塑性。</p> <p>(5) 氮</p> <p>与氧类似, 是强稳定 α 相元素, 提高 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变温度, 强烈提高强度而降低塑性。</p> <p>(6) 氢</p> <p>稳定 β 相, 降低塑性和韧性。</p> <p>三、钛合金的分类</p> <p>1、α-钛合金</p> <p>显微组织是 α 相, 含有 α 相稳定元素及一些中性强化元素。主要元素是铝、锆、锡等。典型合金有 Ti-8Al-1Mo-1V。</p> <p>2、$\alpha + \beta$ 钛合金</p> <p>显微组织是 $\alpha + \beta$ 相, 含有较多的 α 相稳定元素和 β 相稳定元素。</p> <p>3、β 钛合金和近 β 钛合金</p> <p>含有大量的 β 相稳定元素, 多数还含有铝、锆、锡等。室温强度可达到 $\alpha + \beta$ 钛合金水平, 但具有更佳的工艺性能, 不过高温强度比不上 $\alpha + \beta$ 合金。</p> <p>近 β 钛合金的显微组织是 $\alpha + \beta$ 相, α 强化相分布在 β 相基体上。</p> <p>四、钛合金的热处理基础</p> <p>通过控制冷却速度来控制 β 相变, 以获得不同的相组成或不同的组织形态, 得到不同的性能。</p> <p>五、钛合金的强韧化、应用与发展</p> <p>1、近 α 和 α 钛合金</p> <p>这类合金的机械性能对热处理不敏感, 因为总是 α 相没有相变。通过冷加工和随后退火控制 α 相形态和大小, 通过固溶强化强化 α 相。</p> <p>经 β 相热加工冷却得到片状魏氏组织; α 相热加工冷却得到等轴组织; 经 $\alpha + \beta$ 相热加工也得到等轴组织。</p>	
--	--

魏氏组织 α 片的断裂韧性和抗疲劳裂纹扩展性能很好，而等轴 α 相的低周疲劳性能和拉伸强度较高。

典型合金 Ti-5Al-2.5Sn, 在 300℃ 以下使用, 可以焊接, 但冷加工困难。

发展方向: 加入更多的 α 稳定元素, 提高蠕变性能, 但制备困难, 在制备和使用过程中易产生脆性。由于 Al 当量的限制, 该合金的发展受到限制。

进一步发展方向: 时效硬化 α 合金, Ti-25Cu, 可冷加工和焊接, 广泛用于发动机铸件和法兰盘等。

2、 $\alpha + \beta$ 钛合金

加入 4-6% 的 β 稳定元素, 从而使 α 和 β 两个相都有较多数量, 而且抑制 β 相在冷却时发生转变, 只在随后的时效时析出, 产生强化。

可在退火态或淬火时效态使用, 既可以在 $\alpha + \beta$ 相区也可以在 β 相进行热加工, 使组织和性能有较大调整余地。

典型合金 Ti-6Al-4V, 用量占整个钛合金的一半。广泛用于压气机盘件、叶片和其他锻件。

3、 β 钛合金和近 β 钛合金

β 钛合金的 β 相可以残留到室温, 但却是不稳定的, 随后时效析出 α 第二相强化。其强度可优于 $\alpha + \beta$ 钛合金, 同时韧性也优于 $\alpha + \beta$ 钛合金。但若控制不当, β 合金可产生严重脆性。

控制第二相的数量、大小和分布。

典型合金 Ti-13V-11Cr-3Al, 经固溶淬火冷成形及时效处理, 可获得高强度。该合金已成功制作 SR-71 飞机的蒙皮。

要进一步提高强度, 先要解决韧性低问题。

细化 β 晶粒可以提高塑性, 但不能提高断裂韧性; 通过形变热处理改善断裂韧性。

钛有两种同素异构体: α 钛 (密排六方)、 β 钛 (体心立方)。882.5℃ 发生同素异构转变。

工业纯钛牌号有 TA1、TA2、TA3, 数字越大钛含量越低。

变形钛合金按照加入元素对同素异构转变的影响, 分成 α 钛合金、 β 钛合金和 $\alpha + \beta$ 钛合金三类。并命名为 TA、TB、TC 加上编号, 变形钛合金应用最广的是 TC 类。铸造钛合金则在前加 Z。

典型变形钛合金牌号及用途: TC4 火箭发动机外壳/航空发动机压气机盘和叶片。

教 案

工程材料与机械制造基础 课 18-19 讲

主讲人 李逸仙

课 题 铸造工艺性（第 10 章）

教学目的： 讲解常见的铸造工艺及铸造结构工艺性的设计

教学要求： 1、了解各种铸造的特点
2、掌握各种铸造的使用场合，能够根据不同零件选择合适的铸造方式

教学重点： 1、铸造的理论基础
2、砂型、特种铸造方法
3、铸造工艺设计
4、铸造结构设计

教学难点： 分型面的选取、铸造工艺及结构的设计

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 **上课时间** 年 月 日

审 批 教研室主任（签字）：李逸仙
年 月 日

抽 查 系主任（签字）：
年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课过程计划：</p> <p>第一讲：</p> <p>引入：在前面的学习中我们已将掌握了工程材料相关的组织结构、性能等方面的基础知识，但具体使用的零件是有一定的形状结构特征的，从原材料到零件还需要成型。从本讲开始，我们将带大家认识材料的成型工艺，今天先给大家人类发展中运用最早的一门热加工工艺——铸造。已有约 6000 年的历史，中国商朝的后母戊鼎、战国时期的曾侯乙尊盘、西汉的透光镜都是古代铸造的代表作品。</p> <p>铸造是比较经济的毛坯成形方法，对于形状复杂的零件更能显示出它的经济性。如汽车发动机的缸体、缸盖，船舶螺旋桨以及精致的艺术品等。</p> <p>1 概述</p> <p>讲授铸造的基本工艺过程，展示古代铸造精品——曾侯乙尊盘，激发学生弥足自豪感（课程思政）</p> <p>曾侯乙尊盘铸造工艺在现今航空制造业中的应用：航空涡轮发动机叶片的熔模铸造工艺（5min）</p> <p>观看砂型铸造工艺过程视频，现场就一些知识要点进行提问，了解学生基本情况，并调动后续学习积极性（10min）</p> <p>2 铸造工艺性</p> <p>2.1 铸造工艺性概述</p> <p>雨课堂投票：合金的铸造工艺性应包含哪些方面因素？</p> <p>动图展示，引导学生思考回答（8min）</p> <p>提出铸钢与铸铁的铸造性能谁好？（1min）</p> <p>2.2 流动性</p> <p>讲授合金的流动性，及其不足时易产生的铸件曲线</p> <p>画图解释“浇不足”与“冷隔”的区别（8min）</p> <p>讲授流动性的影响因素（7min）</p> <p>雨课堂练习（2min）</p> <p>2.3 收缩性</p> <p>讲授合金的收缩性概念及收缩的基本阶段（5min）</p> <p>讲授合金的凝固方式及其影响因素（10min）</p> <p>讲授缩孔与缩松的形成原理及预防措施（10min）</p> <p>讲授铸造应力的产生原理及预防措施（10min）</p> <p>雨课堂练习（2min）</p>	

<p>2.4 偏析与吸气性</p> <p> 讲授合金偏析出现的原因及预防措施（2min）</p> <p> 讲授合金吸气性与气孔形成的原因及预防措施（3min）</p> <p> 回答铸钢与铸铁铸造性能优劣问题（1min）</p> <p>3. 课堂小结（5min）</p> <p>第二讲：</p> <p>1. 提问复习（5min）</p> <p>2. 砂型铸造（15min）</p> <p>2.1 砂型铸造的生产过程（3min）</p> <p> 以空心圆柱型零件为例，讲授制芯、制型、合箱、浇注、落砂、清理的砂型铸造基本过程。</p> <p>2.2 手工造型方法（10min）</p> <p> 讲授基本造型方法；</p> <p> 提问：挖砂造型怎么改进后可省略挖砂步骤？</p> <p> 提问：活块造型怎么起模？</p> <p>2.3 雨课堂巩固练习（2min）</p> <p>3. 特种铸造（42min）</p> <p>3.1 金属型铸造（10min）</p> <p> 讲授金属型铸造的基本原理、优缺点及适用范围。</p> <p> 针对 ppt 中活塞类铸件的起模方式现场提问，引发学生思考？</p> <p>3.2 熔模铸造（10min）</p> <p> 讲授熔模铸造的工艺流程、基本原理、优缺点及适用范围。</p> <p> 回顾前期课程展示工艺品示例，指出其制造方式为熔模铸造</p> <p>3.3 压力铸造（5min）</p> <p> 讲授压力铸造的基本原理、优缺点及适用范围。</p> <p>3.4 低压铸造（5min）</p> <p> 讲授低压铸造的基本原理、优缺点及适用范围。</p> <p>3.5 离心铸造（5min）</p> <p> 讲授离心铸造的基本原理、优缺点及适用范围。</p> <p> 提问：离心铸造能否生产非对称结构的铸件？</p> <p>3.6 消失模铸造（5min）</p> <p> 讲授消失模铸造的基本原理、优缺点及适用范围。</p> <p>3.7 雨课堂巩固练习（2min）</p>	
--	--

4. 铸造结构设计原则 (23min)

4.1 浇注位置的选择 (5min)

以具体示例讲授浇注位置选择原则

4.2 分型面的选择 (8min)

以具体示例讲授分型面选择原则

针对个别示例现场提问设计原因

4.3 砂型铸造工艺对铸件结构的要求 (8min)

以具体示例讲授砂型铸造工艺对铸件结构的要求

4.4 雨课堂巩固练习 (2min)

5. 课程小节 (5min)

§ 10.1 铸造的理论基础

铸造是人类掌握的比较早的一种金属热加工工艺，已有约 6000 年的历史，中国商朝的后母戊鼎、战国时期的曾侯乙尊盘、西汉的透光镜都是古代铸造的代表作品。

铸造时比较经济的毛坯成形方法，对于形状复杂的零件更能显示出它的经济性。如汽车发动机的缸体、缸盖，船舶螺旋桨以及精致的艺术品等。

1 铸造概述

将固态金属熔炼成液态，浇入与零件形状相适应的铸型型腔中，冷凝后获得铸件的工艺过程。是一种最成熟、最常见的液态成型技术。

优点：

(1) 具有较强的适应性

{ 重量：几克~几百吨
尺寸：几毫米~十几米
壁厚：0.2mm~1m
结构：复杂外形、内腔
材质：不限，特别是脆性材料

(2) 铸件成本低

原材料——来源广、价格低、投资少、易生产

铸件——机械加工量相对较小，成本低

缺点：

(1) 废品率较高，生产过程难以控制；

(2) 铸件力学性能较差，

(3) 砂型铸造铸件精度较差。

2. 合金的铸造性能

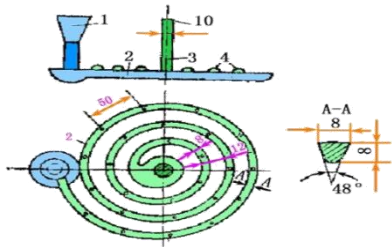
合金的铸造性能是指液态合金在铸造过程中获得外形准确、内部健全的铸件的能力，是材料工艺性能的一种。铸造性能主要包括：

流动性、收缩性、吸气性、偏析。

2.1 流动性

液态金属的流动性是指金属液的流动能力。流动性越好的金属液，充型能力越强，越不易出现浇不足、冷隔等缺陷

流动性的衡量指标：在特定情况下用金属液浇注的螺旋形试样的长度来衡量。



影响合金流动性的因素：

(1) 化学成分

- 铸铁的流动性优于碳钢
- 共晶成分的合金流动性最好
- 亚共晶铸铁流动性随含碳量增加而增加

(2) 浇注条件

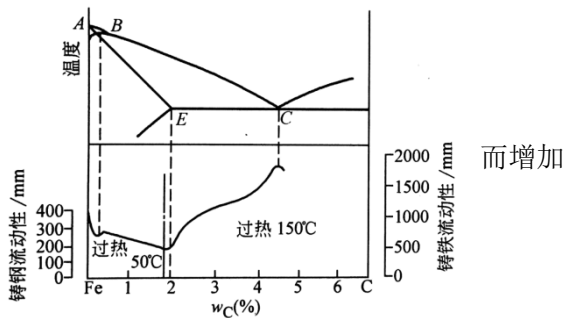
- 温度↑ → 流动性↑
- 温度↑ → 缺陷↑

(3) 铸型特性（铸型材料、结构等）

流动性：砂型>金属型

为了改善铸型的填充条件，在设计铸件时必须保证其壁厚不小于规定的“最小壁厚”。

提高直接浇口高度、增设出气冒口可提高合金流动性



2.2 收缩性

铸件在冷却过程中，其体积现象称为收缩，它是铸造合金固质。

铸件凝固过程中，温度变化引起收缩。

收缩的三个阶段：

- 液态收缩
- 凝固收缩
- 固态收缩

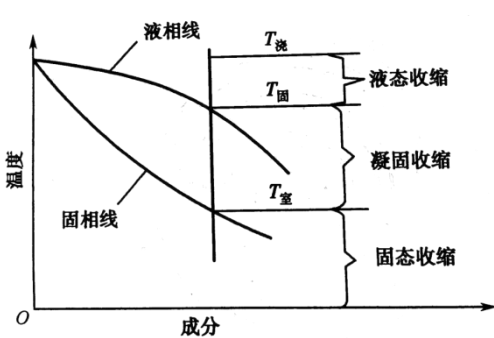


图 3-2 金属由液态向固态的冷却收缩过程

和尺寸缩小的有的物理性很大，必然会

影响收缩性的因素：

(1) 化学成分

含碳量 $\uparrow \rightarrow$ 凝固收缩 \uparrow 、固态收缩 \downarrow

线收缩率：灰铸铁 (0.7%~1.0%) < 非铁金属 (1.0%~1.6%) < 碳钢 (1.6%~2.0%)

(2) 浇注温度

浇注温度 $\uparrow \rightarrow$ 过热度 $\uparrow \rightarrow$ 液态收缩 \uparrow

(3) 铸件结构与铸型条件

铸件冷却不均匀产生阻力

铸型和型芯收缩的机械阻力

后果：

- ① 缩孔、缩松（液态 \rightarrow 固态）
- ② 热应力、机械阻碍应力（固态）
- ③ 变形、开裂

2.3 偏析

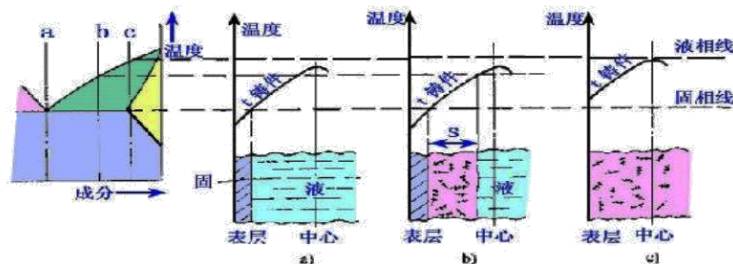
在铸件中出现化学成分不均匀的现象。分晶内偏析（扩散退火消除）和区域偏析（浇注时搅拌金属液）。

2.4 吸气性

合金在熔炼和浇注时吸收气体的性能。易形成夹杂和气孔。可通过精炼除气、或真空熔炼等措施加以预防。

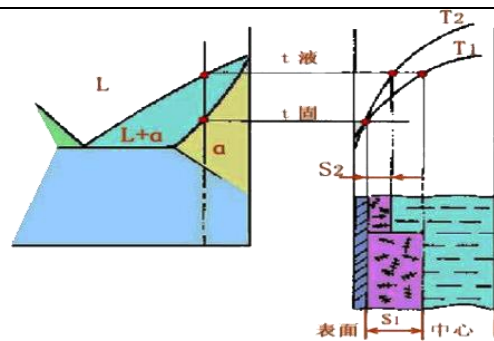
3. 金属的凝固方式

铸件的凝固通常是铸件断面上由内外向内进行的，除纯金属和合金外铸件断面存在固相区、凝固区和液相区三个区。按凝固区的宽度可分为逐层凝固、中间凝固和糊状凝固



合金的结晶温度范围越小、凝固区域越窄、越倾向于逐层凝固——内因

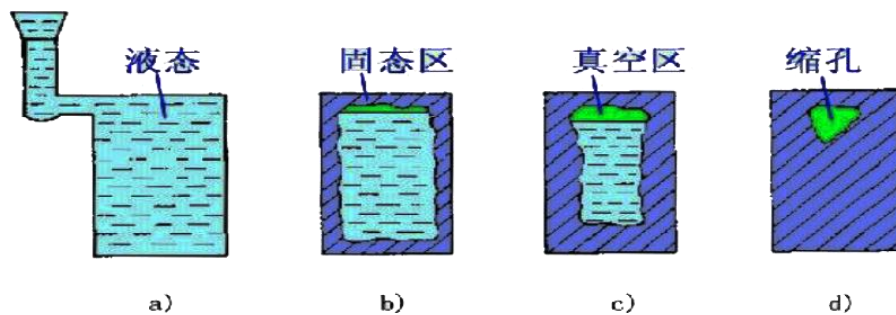
对于一定成分的合金，结晶温度范围已定，凝固方式取决于铸件截面的温度梯度，温度梯度越大，对应的凝固区越窄，越趋向于逐层凝固——外因



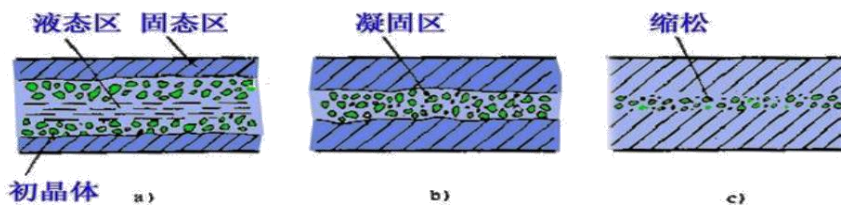
4. 铸件常见缺陷

4.1 缩孔与缩松

铸件的凝固过程中，由于金属液态收缩和凝固收缩造成的体积减小得不到液态金属的补充，在铸件最后凝固的部位形成孔洞。其中容积较大而集中的称缩孔，细小而分散的称缩松。



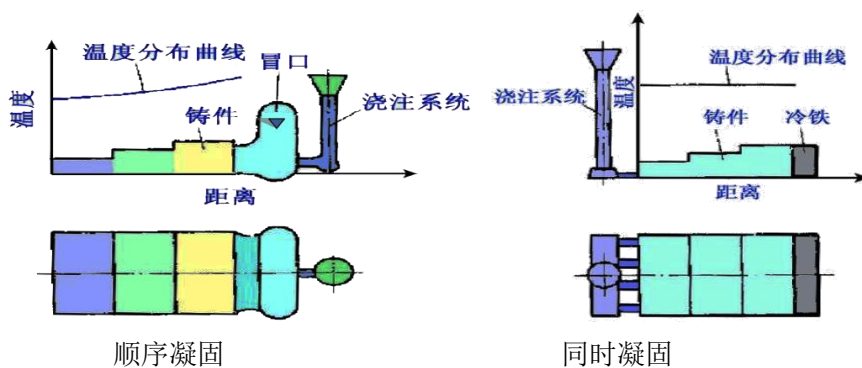
缩孔产生原理



缩松产生原理

预防措施：

- ①控制凝固方式，有效补缩——顺序凝固，易产生缩孔处加冒口
- ②加冷铁，改变局部凝固速度。



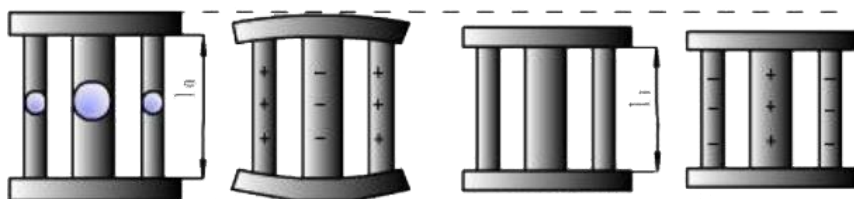
4.2 铸造内应力

各部分冷却、收缩、阻力不一致造成的内应力→变形与开裂
分类：

热应力——铸件的壁厚不均匀，各部分的冷却速度不同，以致在同一阶段内各部分收缩不一致而引起的。

机械应力——铸件在固态收缩时，因受到铸型、型芯、浇冒口等方面的阻碍而产生的应力。

热应力变形：



热应力产生原理

厚壁部分或心部为拉应力，薄壁部分或表层为压应力。铸件的壁厚差别越大（或壁厚越大），冷却速度越大，合金的线收缩系数越大，弹性模量越大，产生的热应力也越大。

减少铸造热应力的根本措施是采用“同时凝固原则”

预防措施：同时凝固

§ 10.2 铸造方法

按铸件的成形条件和制备铸型的材料不同，铸造方法可以分为：砂型铸造、熔模铸造、压力铸造、金属型铸造、离心铸造、低压铸造、陶瓷型铸造等。砂型铸造是普遍采用的方法，其他方法都属于特种铸造。

一、金属型铸造

用金属材料（铸铁或钢）制造铸型生产铸件的方法。

亦称永久型铸造（可使用上千次）。

按分型面的状态，金属型可分为水平式、垂直式和复合式。见图 4.11

金属材料导热速度快、无退让性，无透气性，耐火性比型砂差等，易产生浇不足、冷隔、裂纹及白口等缺陷。由于金属型反复受灼热金属液的冲刷，寿命会降低，应采用相应的工艺措施。

1. 喷刷涂料：导热能力较强的耐火材料（氧化锌、石墨料）

作用：①隔绝液态金属与金属型型腔的直接接触，方便铸件出型。

②避免高温液体金属直接冲刷金属型腔表面，减弱液体金属对铸型热冲击的作

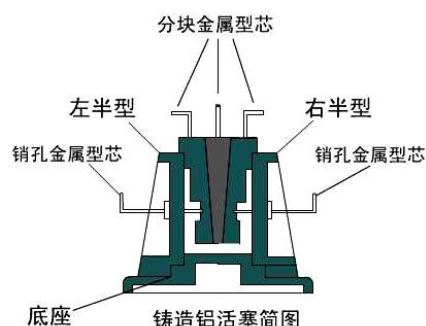


图 4.11 铸造铝活塞筒图

用，延长铸型的使用寿命。

③减缓铸件的冷却速度，防止铸件产生裂纹和白口组织等缺陷。

2. 保持合适的工作温度

既对金属型要预热才能使用，预热温度为铸铁件 250~350℃、有色金属件 100~250℃。

预热的目的是减缓铸型对金属的激冷作用，利于金属液的充型和避免产生浇不足、裂纹或白口缺陷，减小所浇金属与铸型的温差，提高铸型的寿命。

3. 控制开型时间

浇注后开型太晚，铸型会阻碍铸件收缩而使其产生裂纹，增大取件和抽出型芯的难度，对灰口铸铁还将增厚白口层。

但开型过早也会影响铸件成形和使铸件变形过大。通常开型时间为 10~60 秒，大多通过实验确定合适的开型时间。

4. 浇注灰口铸铁件要防止产生白口组织

铸铁件壁厚应大于 15mm。铁水中的碳、硅总量应高于 6%，涂料中应掺有硅铁粉，以使铸件表面的含硅量稍高而减弱白口倾向。从铸型中取出铸件后，应放入缓冷环境（如干砂坑、草灰坑或保温炉）中冷却。

金属型铸造的特点和应用：

优点：①节省造型材料、设备及工时，可“一型多铸”，便于自动化生产，生产效率高；

②金属型冷却速度快，获得铸件的组织致密，晶粒细小，力学性能好，较砂型铸件的强度提高约 20%；

③铸件尺寸精度高，公差等级为 IT12~IT16，表面粗糙度较低， $Ra < 12.5 \mu m$ 。

缺点：铸型制造周期长、成本高、工艺参数要求严格，易出现大量同一缺陷的废品等缺点。

应用：主要用于熔点较低的有色金属的大批量生产铸件，如飞机、汽车、内燃机等用的铝合金活塞、汽缸体、汽缸盖、水泵壳体及铜合金轴瓦、轴套等。

黑色金属类铸件只限于形状简单的中、小型铸铁件。

二、熔模铸造（精密铸造、失蜡铸造）

采用易熔的蜡料制成模样来生产铸件的工艺方法。该法制作的铸型无分型面，从而提高了铸件的精度，故又称为“精密铸造”。生产过程中模样主要由蜡质材料来制造，经熔化从铸型中流出，故又称为“失蜡铸造”。

1. 模样及铸型材料

用来制造模样的易熔材料有蜡基模料、树脂（松香）基模料、含水无机盐模料及水银模料等。目前工业生产中主要采用前两种模料制造模样。

2. 工艺过程（图 4.12）

蜡模制造（图 4.13）

压型制造：压型是制造蜡模的专用模具。

高精度、大批量时采用钢、铜或铝制造。

小批量时采用低熔点合金、塑料或石膏。

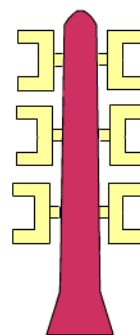
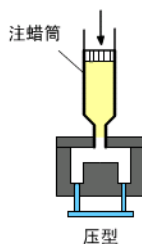


图 4.13 蜡模制造

②蜡模压制：将配好的模料加热成糊状后，

以 2~3 个大气压的用压力注入压型，待其冷却、凝固后取出。

③蜡模组装：将若干个带有内浇口的单个蜡

模粘接在直浇口棒上，形成蜡模组，以提高生产率。

（2）结壳：在蜡模组上涂挂耐火材料，以制成一定强度的耐火型壳过程。

①浸挂涂料：把蜡模放在由石英粉、粘结剂（水玻璃、硅酸乙酯等）组成的糊状混合物中浸泡，使涂料均匀地覆盖在模组表层，使型腔获得光洁的内表面。

②撒砂，在已浸渍涂料的蜡模组上，均匀地撒上一层石英砂。为使型壳迅速增厚，撒砂时，第一、二层所用砂的粒度较细，后面几层所用砂的粒度较粗。

③硬化，撒砂后，为使耐火材料层结成坚固的型壳，需要进行硬化处理。

硬化后应在空气中干燥。为使型壳具有较高的强度，上述结壳过程要重复多次，以便形成 5~10mm 厚的硬化耐火型壳。

（3）脱蜡：取出蜡模以形成铸型空腔。

热水法：将结壳后的蜡模浇口朝上浸泡在热水中（一般 85~95℃），使其中的蜡料熔化，浮在水面；

高压蒸汽法：将型壳浇口朝下放在高压釜内，向釜内通入 0.2~0.5MPa 的高压蒸汽，使蜡料熔出。

模样为树脂基时，无需脱蜡过程，而是在焙烧过程中将模样燃烧掉。

（4）焙烧

将脱蜡后的型壳送入加热炉内，加热到 800~1000℃进行焙烧，以去除型壳中的水分、残余蜡料及其他杂质，还能增大型壳强度。

（5）填砂造型：将脱蜡后的型壳置于铁箱中，周围用粗砂填实以加固型壳，防止浇注时型壳变形或开裂。图 4.14

（6）浇注：焙烧出炉后趁热（600~700℃）浇注，以提高铸造合金的充型能力，同时也防止浇不足、冷隔等缺陷。

（7）落砂及清理：铸件冷却凝固之后，打碎型壳，取出铸件，并用氧乙炔焰切除浇、冒口，清理毛刺。

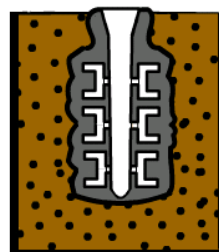


图 4.14 待浇注的铸型

3. 熔模铸造的特点及适用范围：

(1) 铸型没有分型面，型腔表面极为光洁，起模过程无振动，型腔变形很小，故铸件精度及表面质量好；

(2) 铸型在预热（600~700℃）后浇注，可生产出形状复杂的薄壁件（最小壁厚可达0.7mm）；

(3) 适用各种合金的铸造，结壳材料耐火度高，可浇注高熔点合金及难切削合金如（高锰钢、耐热合金等）；

(4) 生产批量不受限制，既适应成批生产，又适应单件生产；

(5) 原材料价格昂贵，工艺过程复杂，生产周期长，铸件成本高，铸件尺寸、重量受限。

适用范围：(1) 高熔点合金精密铸件的成批、大量生产。

(2) 形状复杂、难以切削加工的小零件。

三 压力铸造（压铸）

液态金属 5~150MPa(高压) 铸型 压力下结晶 铸件

0.001~0.2S（快速）

1. 压铸机及压铸工艺过程

压铸机可分为热压室式和冷压室式两大类。

热室式压铸机压室与合金熔化炉成一体或压室浸入熔化的液态金属中，用顶杆或压缩空气产生压力进行压铸。热压室式压铸机压力较小，压室易被腐蚀，一般只用于铅、锌等低熔点合金的压铸，生产中应用较少。

冷室式压铸机压室和熔化金属的坩埚是分开的。压铸机结构简单，生产率高，液体金属进入型腔流程短，压力损失小，故使用较广。

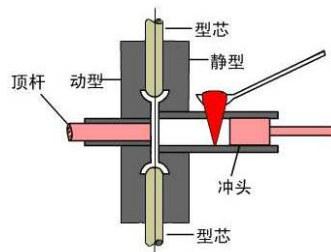


图 4.15 冷室式压铸机

冷室式卧式压铸机工艺过程, 见图 4.15:

(1) 注入金属

喷刷涂料→闭合压型→液态金属经压室上的注液孔注入压室。

(2) 压铸

压射冲头向前推进，金属液压入压型中，保压、凝固

(3) 取出铸件

铸件凝固后，型腔两侧型芯同时抽出→动型左移开型→铸件被冲头顶离压室→铸件被顶杆顶出动型

2. 压铸的特点和适用范围

(1) 精度和表面质量高于其他铸造方法，少、无切削加工。

(2) 压铸件强度、硬度较高，力学性能好

(3) 可压铸出形状复杂的薄壁件，镶嵌件，最小壁厚 0.4mm

(4) 生产率很高

(5) 设备投资高，铸型制造周期长

适合压铸的合金种类有限，压铸件不能采用热处理改性，不能承受冲击载荷

适用范围：大批量的有色金属铸件，缸体、齿轮、箱体、支架等

四. 低压铸造

低压铸造是介于重力铸造（如砂型、金属型铸造）和压力铸造之间的一种铸造方法。液态合金在压力作用下，自下而上地充填型腔，并在压力下结晶形成铸件的工艺过程。所用压力较低，一般为 0.02~0.07MPa。

1. 工艺过程

密闭的保温坩埚用于熔炼与储存金属液体，垂直的升液管使金属液与铸型朝下的浇口相通，铸型可用砂型、金属型等，其中金属型最为常用，但金属型必须预热并喷刷涂料。浇注前紧锁上半型，浇注时，先缓慢向坩埚室通入压缩空气→金属液在升液管内平稳上升，直至充满铸型→升压到所需压力（工作压力）→保压、凝固结晶→撤压，升液管和浇口中未凝固的金属液体在重力作用下流回坩埚内→由气动装置开启上型→取出铸件。见图 4.17。

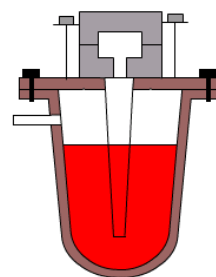


图 4.17 低压铸造

2. 低压铸造的特点和适用范围

(1) 充型时的压力和速度便于控制和调节，充型平稳，液体合金中的气体较容易排出，气孔、夹渣等缺陷较少；

(2) 低压作用下，升液管中的液态合金源源不断地补充铸型，有效防止了缩孔、缩松的出现，尤其是克服了铝合金的针孔缺陷；

(3) 省掉了补缩冒口，使金属利用率提高到 90~98%；

(4) 铸件组织致密、力学性能好；

(5) 压力提高了液态合金的充型能力，有助于大型薄壁件的铸造。

适用范围：主要用于质量要求较高的铝、镁合金铸件的大批量生产，如气缸、曲轴、高速内燃机活塞、纺织机零件等。

五. 离心铸造

将液态金属浇入高速旋转（250~1500r/min）的铸型中，使金属液体在离心力作用下充填铸型，以获得铸件的铸造方法。

1 基本工艺

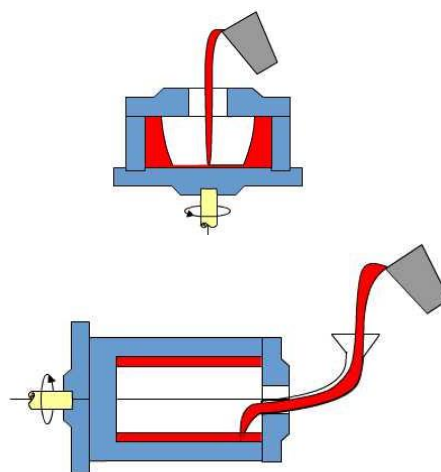


图 4.18 圆筒件的离心铸造

立式：铸型绕垂直轴旋转，用于生产圆环铸件；
卧式：铸型绕水平轴旋转，用于生产管类和套类铸件。
离心铸造的铸型主要使用金属型，也可以用砂型。

2. 离心铸造的特点和适用范围

- (1) 铸造圆筒形铸件时，可节省型芯和浇注系统，省工省料，降低成本；
- (2) 铸件组织致密，极少有缩孔、缩松、气孔、夹渣等缺陷；
- (3) 合金充型能力得到了提高，可以浇注流动性较差的合金铸件和薄壁铸件，如涡轮、叶轮等；
- (4) 便于制造双金属件，如轧辊、钢套、镶铜衬、滑动轴承等。

适用范围：铸铁管、气缸套、双金属轴承、特殊钢的无缝管坯。

六. 陶瓷型铸造

在砂型铸造和熔模铸造基础上发展形成的一种精密铸造工艺。

1. 工艺过程(见图 4.19)

- (1) 砂套造型：

目的：节约昂贵的陶瓷材料及提高铸型的透气性

材料：水玻璃砂

制造过程与砂型铸造相同，只是砂套木模 B 比铸件木模 A 大一个陶瓷料厚度。

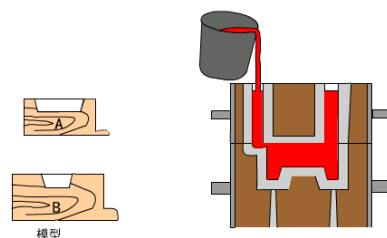


图 4.19 陶瓷型铸造工艺过程

- (2) 灌浆与胶结：制造陶瓷面层

将铸件木模固定于平板上，刷上分型剂，扣上砂套。把陶瓷浆由浇口注满，几分钟后陶瓷浆开始结胶变硬，形成陶瓷面层。

陶瓷浆由刚玉粉（耐火材料）、硅酸乙脂（粘结剂）、氢氧化钙（催化剂）及双氧水（透气剂）等组成。

(3) 起模与喷烧：灌浆约十几分钟后，在浆料尚有一定弹性时起出模型，然后用明火喷烧整个型腔以加速固化。

(4) 焙烧与合箱：浇注前陶瓷型要加热到 350~550℃焙烧几个小时，去除残留在陶瓷型中的乙醇及水分，并进一步提高铸型强度。

- (5) 浇注与凝固 浇注时，温度要略高，冷却凝固后获得成形好的铸件。

§ 10.3 铸造工艺设计

工艺规程包括：铸造方法、绘制铸件工艺图、选择工艺参数等。其核心内容：绘制铸件工艺图（在零件图上用各种各种工艺符号表示出铸造工艺方案的图形）。

一、选择浇注位置：浇注时铸件在铸型中所处的空间位置。

确定原则如下：

(1) 铸件重要工作面或主要加工面应朝下或呈侧立状态

防止砂眼、气孔、夹渣等缺陷(缩孔)

朝下：图 4.1 侧立：图 4.2

(2) 铸件大平面或薄壁结构应朝下或呈侧立状态

防止砂眼、气孔、夹渣及夹砂和浇不足

朝下：图 4.3 侧立：图 4.4

(3) 浇注位置应有利于补缩、防止产生缩孔

将铸件厚大部分置于铸件的上部位置，以便安放冒口，实现自下而上的顺序凝固，图 4.2

二、确定分型面：铸型间的接触表面

确定原则如下：

(1) 应能方便、顺序地取出模样或铸件

一般选在铸件地最大横截面处

(2) 应尽量与浇注位置一致，并尽量满足浇注位置的要求(图 4.5)

(3) 分型面应避免曲折，数量应少，最好是一个且为平面，机器造型时，分型面只能有一个(图 4.6)

(4) 应尽量使型腔全部或大部分置于同一个砂型内，最好使型腔或使加工面与基准面位于下型中。

(5) 应使型芯数量少，并便于安放和稳定。

三、确定工艺参数

1. 机械加工余量：铸造时在零件的加工表面增加的供切削加工用的余量。

2. 拔模斜度

为便于把模样(或型芯)从砂型中(或从芯盒中)取出，铸件上垂直分型面的各个侧面应具有的斜度。

拔模斜度在铸造工艺图中标出，其大小取决于立壁的高度、造型方法、模样材质和该侧

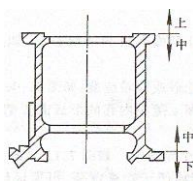


图 4.1 车床床身浇注位置

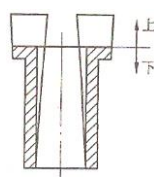


图 4.2 起重机卷筒浇注位置

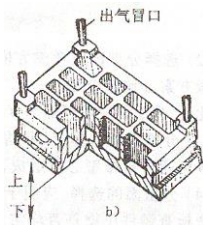


图 4.3 大平面铸件浇注位置

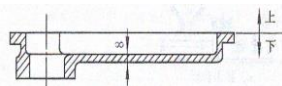


图 4.4 薄件浇注位置

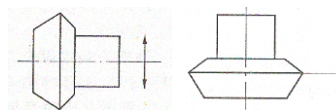


图 4.5 伞齿轮分型面方案

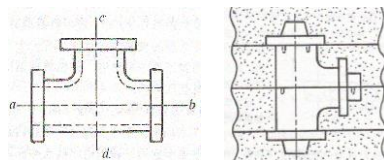


图 4.6 三通铸件分型面方案

面在型腔中的所处位置。通常在 $15' \sim 3^\circ$ ，见图 4.8

3. 型芯及型芯头

型芯：铸件孔形和各种内腔，简化模样的外形，铸出铸件上局部妨碍拔模的凸台、凹槽等结构。按照在型腔中所处的状态，一般分为水平型芯和垂直型芯。

型芯头：浇注时不与液体金属接触，起到定位、支撑型芯及导引型芯中气体排出的作用。

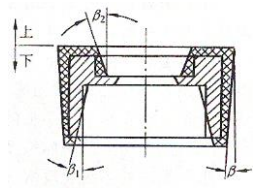


图 4.8 拔模斜度

§ 10.4 铸件结构设计

铸件结构设计，首先要保证铸件使用要求，同时应根据铸造工艺特点，避免铸造缺陷，简化铸造工艺，降低铸造成本。

一. 避免铸造缺陷的结构设计

1. 铸件壁厚应合理取值

①允许最小壁厚值（表 4.2）不同铸造方法，不同种类的铸造合金，充型能力有较大差异，允许的最小壁厚值也各不相同。

②增设加强筋，减小壁厚（图 4.23）

③铸件各壁冷却速度均匀相近（图 4.24，表 1.4.3）

2. 铸件壁厚力求均匀，避免局部过厚形成热节（图 4.25）

3. 铸件各壁之间应均匀过渡，两个非加工表面所形成内角应设计成结构圆角。

不同壁厚联结应逐步过渡，以避免出现应力集中和裂纹。图 4.26

直角结构易产生缺陷：（图 4.27）

- ①难成形、易夹砂、金属聚集，缩孔、缩松
- ②应力集中，易出现裂纹
- ③柱状晶晶粒分界面，积聚杂质，形成薄弱环节

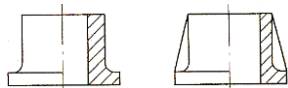


图 4.23 采用加强筋减小壁厚

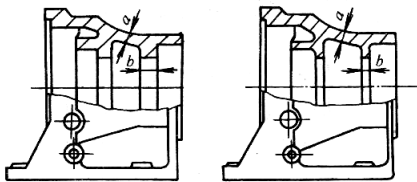


图 4.24 铸件内部壁厚相对减薄

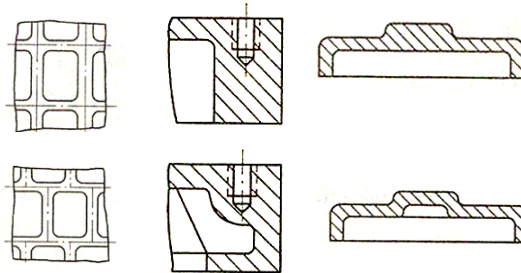


图 4.25 壁厚均匀实例

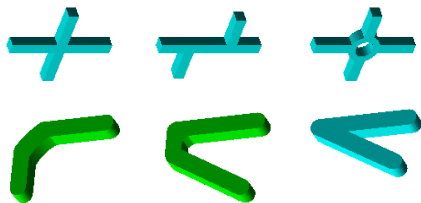


图 4.26 接头结构

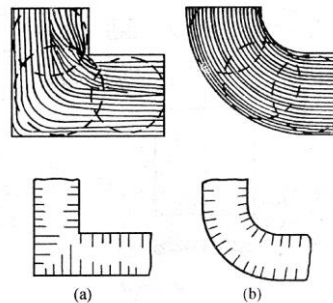


图 4.27 圆角结构

4. 避免产生翘曲变形和大的平面结构

①细长或平板形结构，当断面不对称时，会产生翘曲变形，应设计成对称结构（图 4.28）

②大的水平平面结构，易产生弯曲变形，应增加筋条，易产生浇不足、夹砂、缺肉等缺陷，应修改结构。（图 4.29）

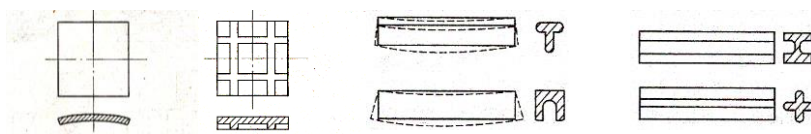


图 4.28 防止变形的铸件结构

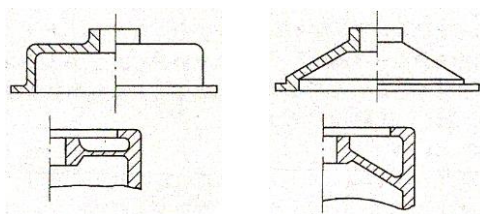


图 4.29 避免大水平平面的铸件结构

二. 简化工艺过程的合理结构

1. 分型面数量应少，且平直，便于取出模型。

2. 合理设计凸台，避免侧壁的局部凹陷结构。

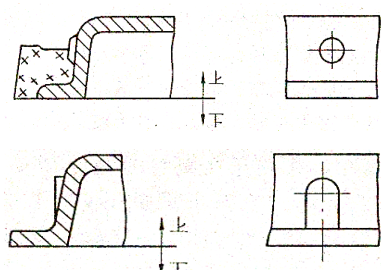


图 4.30 凸台结构设计

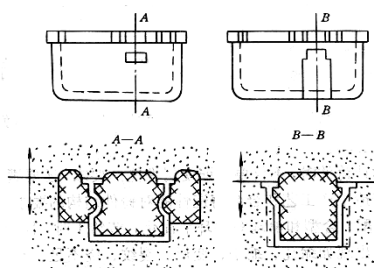


图 4.31 侧凹结构设计

3. 合理确定结构斜度

结构斜度：零件设计时，垂直于分型面的非加工表面均应设计出斜度，以便于造型时拔模，确保型腔质量。结构斜度在零件图上标出，数值可较大。见图 4.32，表 4.5。

铸件结构应有利于型芯的固定、排气和清理（见图 4.33）

型芯在铸型中不能牢固安放时，就会产生偏芯，气孔、砂眼等缺陷。

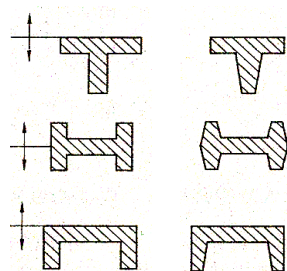


图 4.32 结构斜度

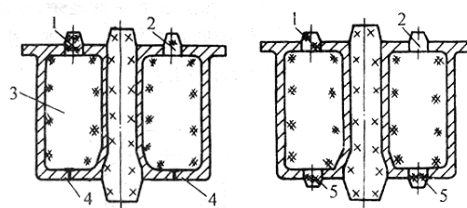


图 4.33 活塞结构实例

三. 结合铸造方法的合理结构

1. 熔模铸造的铸件结构

①便于从压型中取出蜡模

②为便于浸挂涂料和撒砂，孔、槽不宜过小或过深。

孔 $d > 2\text{mm}$, $h < 4d$ 槽 $t > 2\text{mm}$, $h < 4t$

③壁厚均匀、避免过多的分散热节。

2. 金属型铸造的铸件结构

①应顺利出型，方便抽芯，确定合理分型面

②壁厚均匀，不能过薄

③便于型芯安放和抽芯，孔径不宜过小，过深。

3. 压铸件结构

①尽可能采用薄壁，均匀结构，最小壁厚可铸螺纹、孔、齿形、图案等具体尺寸应按标准选定

②非加工表面应设计结构斜度和圆角

③发挥镶嵌件的优越性，但应确保连接牢固，使用可靠。

教 案

工程材料与机械制造基础 课 20-21 讲

主讲人 李逸仙

课 题 金属的塑性成形（第 6+11 章）

教学目的 1、理解单晶体和多晶体塑性变形特征，掌握回复和再结晶的概念及区分热加工和冷加工的标准

2、掌握金属塑性变形机理，金属可锻性概念及金属的加热与锻件的冷却方法

3、了解塑性成形的轧制、拉拔、挤压、锻造、冲压基本工艺，掌握塑性成形的工艺设计过

教学要求 1、认识金属材料的塑性变形及热塑性变形

2、掌握各种常用塑性加工方法

3、掌握自由锻造工艺设计

重点难点 （1）塑性变形的特点、方式、组织及性能

（2）冷加工和热加工的目的

（3）自由锻工艺设计

教学方法 课堂讲授，启发式提

使用教具 多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 **上课时间** 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：李逸仙

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体内容安排：</p> <p>具体授课设计：</p> <p>第一讲：金属的塑性成形原理</p> <p>引入：金属在外力作用下将产生变形，其变形过程包括弹性变形和塑性变形两个阶段。塑性变形不仅能用于成形加工，还会对金属的组织 and 性能产生很大影响。</p> <p>1. 单晶体的塑性变形</p> <p>由单晶体的弹性变形引申至单晶体的塑性变形，指出单晶体塑性变形的条件和主要形式。（5min）</p> <p>1.1 滑移</p> <p>讲解滑移的宏观和微观现象（2min）</p> <p>讲授滑移系的概念，介绍三种典型金属晶格的滑移系数量，引申至滑移系数量与金属塑性的关系（8min）</p> <p>讲授临界分切应力概念并推导其公式，分析其影响因素（5min）</p> <p>1.2 孪生</p> <p>讲授孪生变形发生的机理及其特点（5min）</p> <p>1.3 滑移与孪生对比</p> <p>对比滑移与孪生变形条件、位移量以及位向改变方面的差异（3min）</p> <p>雨课堂练习（2min）</p> <p>2. 多晶体的塑性变形</p> <p>2.1 多晶体塑性变形的实质</p> <p>分析介绍多晶体塑性变形的发生过程（5min）</p> <p>拓展多晶体塑性变形中如何实现细晶强化（2min）</p> <p>雨课堂练习（3min）</p> <p>2.2 多晶体塑性变形的特点</p> <p>讲授多晶体塑性变形不同位向的顺序和变形量之间的差异（3min）</p> <p>2.3 多晶体塑性变形对性能的影响</p> <p>讲授纤维组织的形成过程及其对力学性能的影响（5min）</p> <p>讲授加工硬化现象及原理（5min）</p> <p>讲授塑性变形后金属内残余内应力及其引起的材料失效和性能改变（5min）</p> <p>2.4 雨课堂练习（3min）</p> <p>3. 回复与再结晶</p> <p>3.1 回复</p> <p>讲授回复过程中的组织性能改变，以及回复的主要特点及影响因素（8min）</p> <p>贯穿讲授回复过程的变化原理-结构改变-性能变化-工业应用（5min）</p> <p>3.2 再结晶</p> <p>讲授再结晶过程中的组织性能改变，以及再结晶的主要特点及影响因素（8min）</p> <p>贯穿讲授再结晶过程的变化原理-结构改变-性能变化-工业应用（5min）</p>	

3.3 雨课堂练习（3min）

4. 课程小结（5min）

第二讲：金属的锻造工艺

1. 提问复习（5min）

2.1 塑性加工概述（5min）

2.2 碳钢的可锻性（15min）

讲授可锻性指标及锻造的温度范围；可锻性的影响因素；

提问：碳钢的平衡相图。

提问：金属挤压和拉拔的应力状态；

回顾碳钢可锻区间的温度及相组成。

2.2 锻造成形（15min）

讲授自由锻概念和自由锻工艺规程的制定；

提问：什么是锻件余量和锻件敷料？

提问：如何绘制锻件工艺图？

2.3 模锻成形：（12min）

讲授不同的模锻方式以及模锻的工艺规程制定过程；

提问：什么是分模面？

提问：如何确定模锻工步？

2.4 雨课堂巩固练习（3min）

3. 板料冲压成形

3.1 概述及分类（5min）

3.2 分离工序和变形工序（10min）

讲授分离工序和变形工序；

提问什么是拉深成形？

提问什么是弯曲成形？

3.3-3.7 讲授各种塑性加工成形工艺（13min）

3.3 挤压成形

3.4 轧制成形

3.5 拉拔成形

3.6 雨课堂巩固练习（2min）

课程小结（5min）

具体授课内容：

一、金属材料的塑性变形

塑性变形的实质

1. 单晶体的塑性变形

单晶体的变形方式有滑移和孪生两种。

【滑移】看作是晶体的一部分相对于另一部分产生错动的结果，如图所示。实际金属中，滑

移是通过晶体内位错缺陷沿着滑移面移动来实现的。

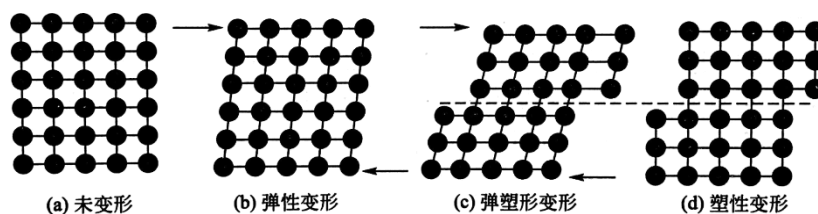
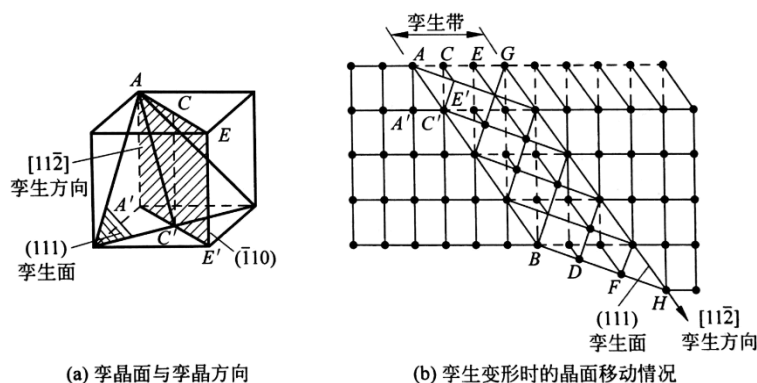


图 2.16 单晶体的变形过程

【孪生】是晶体的一部分相对于另一部分发生切变, 而且发生切变的部分与未切变部分的晶体结构呈对称形式分布



2. 多晶体的塑性变形

各个晶粒塑性变形的综合结果。此外, 在多晶体晶粒之间还有少量的相互移动和转动, 这部分塑性变形为晶间变形, 如图所示。由于每个晶粒在塑性变形时都要受到周围晶粒及晶界的影响和阻碍, 故多晶体塑性变形时的抗力要比单晶体高得多。

3. 2. 2 变形后金属的组织 and 性能

1. 加工硬化、回复和再结晶

【冷变形强化】在冷变形时, 随着变形程度的增加, 金属材料的所有强度指标和硬度都有所提高, 但塑性有所下降的现象。变形后, 金属的晶格严重畸变, 变形金属的晶粒被压扁或拉长, 形成纤维组织, 如图所示。冷变形强化使金属的可锻性降低, 冲压时产生“制耳”, 制件厚度不均等缺陷。退火处理

【回复】是指将冷变形后的金属加热至一定温度后, 使原子回复到平衡位置, 晶内残余应力大大减小的现象。

回复时不改变晶粒形状, 金属的强度、硬度略有下降; 塑性、韧性有所回升; 内应力有较明显下降。某些物理、化学性能则显著减小。

冷拔弹簧钢丝绕制弹簧后常进行低温退火 (也称定形处理), 其实质就是利用回复保持冷拔钢丝的高强度, 消除冷卷弹簧时产生的内应力。

【再结晶】当加热温度较高时, 塑性变形后的金属组织与性能在加热时全部恢复的过程, 也是被拉长了的晶粒重新生核长大, 变为细小、均匀等轴晶粒的过程。

再结晶恢复了变形金属的可锻性。

【再结晶温度】再结晶是在一定的温度范围内进行的，开始产生再结晶现象的最低温度称为再结晶温度。

纯金属的再结晶温度为： $T_{\text{再}} \approx 0.4 T_{\text{熔}}$

金属的再结晶温度与变形程度、杂质（或合金元素）的含量及加热速度、加热时间等有关。如变形程度愈大，再结晶温度便愈低。

再结晶退火：经过塑性变形的金属，加热到再结晶温度以上，使其发生再结晶的处理称为再结晶退火。

再结晶退火可以消除金属材料的冷变形强化，提高其塑性，便于其继续锻压加工。如冷轧、冷拉、冷冲压过程中，需在各工序中穿插再结晶退火。

晶粒长大

冷变形的金属，通过再结晶一般都能得到细小而均匀的等轴晶粒。但是如果加热温度过高或加热时间过长，则晶粒会明显长大，成为粗晶粒组织。

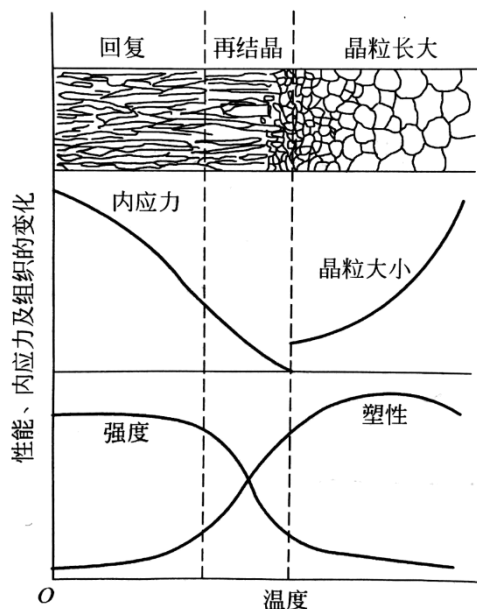


图 6-10 变形金属在不同加热温度时晶粒大小与性能的变化

热变形对金属组织和性能的影响

【热变形】在再结晶温度以上的变形。

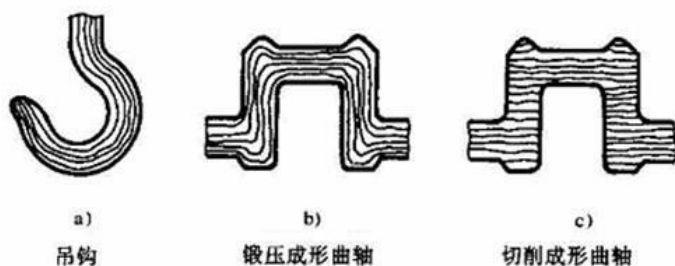
【冷变形】在再结晶温度以下的变形。

大多数锻件的锻压加工是在再结晶温度以上进行的，这样，由变形引起的强化现象，会因随后的再结晶过程而消失，所以锻造毛坯可以连续地锻压变形。只要终锻温度控制好，锻件的晶粒是细小的。再加之锻坯中孔洞的被压合，所以热变形可提高金属材料的力学性能。

【锻造流线】也称流纹，在锻造时，金属的脆性杂质被打碎，顺着金属主要伸长方向呈碎粒状或链状分布；塑性杂质随着金属变形沿主要伸长方向呈带状分布，这样热锻后的金属组织就具有一定的方向性。

锻造流线使金属性能呈现异向性；沿着流线方向（纵向）抗拉强度较高，而垂直于流线方向（横向）抗拉强度较低。生产中若能利用流线组织纵向强度高的特点，使锻件中的流线组织连续分布并且与其受拉力方向一致，则会显著提高零件的承载能力。

例如，吊钩采用弯曲工序成形时，就能使流线方向与吊钩受力方向一致（下图 a），从而提高吊钩承受拉伸载荷的能力。图 b 所示锻压成形的曲轴中，其流线的分布是合理的。图 c 是切削成形的曲轴，由于流线不连续，所以流线分布不合理。



二、锻造工艺

§ 11.1 锻造成形

（一）可锻性

1. 可锻性：衡量材料通过塑性加工获得优质零件难易程度的工艺性能。

2. 可锻性指标：

塑性： ψ 截面收缩率； δ 延伸率； α_K 冲击韧性

变形抗力：在变形过程中金属抵抗工具作用的力 P

塑性 \uparrow ，变形抗力 \downarrow ，可锻性 \uparrow

3. 可锻性的影响因素：

（1）金属本质（内在因素）：

①化学成分： $C\% \uparrow$ ，塑性 \downarrow ，可锻性 \downarrow ，纯金属好于合金

②金属组织：晶体结构：面心 $>$ 体心 $>$ 密排六方

组织状态：铸态组织 \downarrow ，晶粒粗大 \downarrow ，碳化物 \downarrow ，纯金属及固溶体 \uparrow

（2）加工条件（外在因素）

①变形温度：提高金属变形时的温度，是改善金属可锻性的有效措施

变形温度 $T \uparrow$ ，材料塑性 $\delta \uparrow$ ，变形抗力 $P \downarrow$ ， \rightarrow 可锻性 \uparrow

碳素结构钢，加热温度超过 A_3 线，组织为单一 A，固很适宜塑性加工

锻造温度范围的确定（图 2.20）：

始锻温度：固相线以下 200°C 左右

终锻温度： A_1 线以上 $800\sim 750^\circ\text{C}$ 之间

注意事项：温度过高将产生过热、过烧、脱碳和严重氧化等缺陷，甚至使锻件报废。

②变形速度（应变速率 $\dot{\epsilon}$ ）单位时间内的变形程度

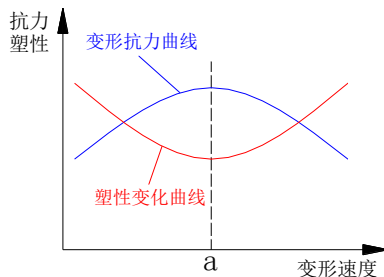


图 2.21 变形速度对塑性及变形抗力的影响

$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ 应变对时间的导数，量纲 1/s

$\dot{\varepsilon} \leq \alpha$ 时: $\dot{\varepsilon} \uparrow$, 变形抗力 \uparrow 、塑性 \downarrow , 可锻性 \downarrow

$\dot{\varepsilon} \geq \alpha$ 时: $\dot{\varepsilon} \uparrow$, 塑性 \uparrow 、变形抗力 \downarrow , 可锻性 \uparrow

原因: 塑性变形引起的“热效应”。

当 $\dot{\varepsilon} \leq \alpha$ 时, 变形速度相对较小, 当 $\dot{\varepsilon}$ 增加时, 相应的加工硬化现象也很显著和剧烈, 使得变形抗力上升, 塑性下降, 导致可锻性下降。

当 $\dot{\varepsilon} \geq \alpha$ 时, 变形速度整体上处于较高阶段, 随着 $\dot{\varepsilon}$ 增加, 金属内部变形剧烈, 晶粒间摩擦加剧, 使一部分塑性变形功转化为热能, 使金属温度升高, 称为热效应现象, 消除了加工硬化现象, 导致可锻性提高。

通常情况下的塑性加工过程, $\dot{\varepsilon}$ 均小于 α , 只有在高速锤上锻造时, 才会出现 $\dot{\varepsilon} \geq \alpha$ 情况。不同金属材料, 其 α 值也不同。

(3) 应力状态的影响

应力状态对可锻性的影响非常复杂。有时对提高塑性有利的应力状态对降低变形抗力却不利。而变形抗力低的应力状态, 其塑性又不好。

工程上常以塑性指标为主来考虑应力状态对可锻性的影响。

应力状态对塑性的影响:

受力物体压应力的数目越多, 金属的塑性越好。

拉应力的数目越多, 金属的塑性越差。

应力状态对变形抗力的影响:

物体受力时: 同号应力状态下, 变形抗力 \uparrow

异号应力状态下, 变形抗力 \downarrow

原因: 根据金属塑性变形的屈服准则:

Mises 准则: $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s$

Tresca 准则: $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$

当 $\sigma_1 \sigma_3$ 同号, $|\sigma_1 - \sigma_3|$ 数值很小, 不易达到 $\beta \sigma_s / \sigma_s$

当 $\sigma_1 \sigma_3$ 异号, $|\sigma_1 - \sigma_3|$ 数值较大, 容易达到 $\beta \sigma_s / \sigma_s$

(二) 锻造成形

一. 自由锻

自由锻是利用冲击力或压力使金属在上、下两个抵铁之间产生塑性变形, 从而得到所需锻件的锻造方法。

特点: (1) 金属流动自由

(2) 形状、尺寸精度由操作者操作技术保证

(3) 生产率、产品精度较低

(4) 通用性; 强, 小到大型、巨型锻件都可以生产, 特别在重型机械制造中特别重要。

自由锻设备:

(1) 锻锤: 空气锤 小型锻件 150 公斤以下

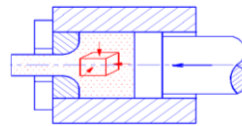


图 2.22 挤压时金属应力状态

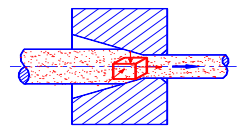


图 2.23 拉拔时金属应力状态

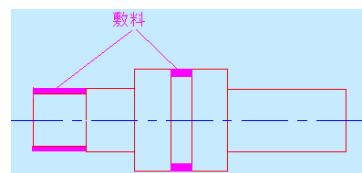


图 5.1a 锻件敷料

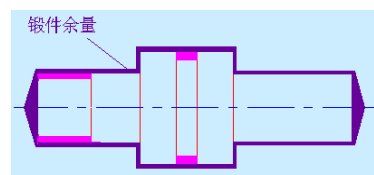


图 5.1b 锻件余量;;

蒸汽—空气锤 小于 1500 公斤锻件

(2) 压力机：主要是水压机，可锻造质量达 500t 锻件，常用于大型和巨型锻件。

1. 自由锻工序：

基本工序：使金属产生一定程度的塑性变形，以达到所需形状及尺寸的工艺过程，完成锻件的基本工艺过程。

辅助工序：为基本工序操作方便而进行的预先变形工序。

精整工序：为减少锻件表面缺陷而进行的工序

2. 自由锻工艺规程的制定

(1) 绘制锻件图：工艺规程中的核心内容。

以零件图为基础，结合自由锻工艺特点绘制而成。

①敷料：简化锻件形状，便于进行锻造而增加的一部分材料，也称为余块。图 5. 1a

②余量：零件的加工表面上增加供切削加工用的材料，具体数值结合生产的实际条件查表确定。图 5. 1b

③公差：锻件名义尺寸的允许变动量。根据锻件形状、尺寸并考虑到生产实际情况加以选取。

(2) 坯料质量及尺寸计算

质量计算： $G_{\text{坯料}} = G_{\text{锻件}} + G_{\text{烧损}} + G_{\text{料头}}$

式中： $G_{\text{坯料}}$ —坯料质量；

$G_{\text{锻件}}$ —锻件质量；

$G_{\text{烧损}}$ —加热时坯料表面氧化而烧损的质量。

第一次加热时取被加热金属的 2%~3%，以后各次加热取 1.5%~2%；

$G_{\text{料头}}$ —在锻造过程中冲掉或切掉的金属的质量。如冲孔时坯料中部的料芯，修切端部产生的料头等。

(3) 选择锻造工序：根据工序特点和锻件形状

盘类件：镦粗(或拔长及镦粗)、冲孔；

轴类锻件：拔长(或镦粗及拔长)、切肩和锻台阶；

筒类锻件：镦粗(或拔长及镦粗)、冲孔、在心轴上拔长；

环类锻件：镦粗(或拔长及镦粗)、冲孔、在心轴上扩孔；

曲轴类锻件：拔长(或镦粗及拔长)、错移、锻台阶、扭转；

弯曲类锻件：拔长、弯曲等。

二. 模锻：

在高强度金属锻模上预先制出与锻件形状一致的模膛，使坯料在模膛内受压变形的锻造方法。

模锻特点：(与自由锻相比)

①生产率较高

②锻件尺寸精确，加工余量小

③可锻出形状复杂锻件

④材料利用率高

模锻设备：模锻锤、模锻压力机

1. 锤上模锻：

设备有蒸汽—空气锤，无砧座锤，高速锤

模锻蒸汽—空气锤原理：图 5. 3

与自由锻蒸汽—空气锤相比：

①模锻锤锤头与导轨间间隙比自由锻锤小，且机架与砧座相连

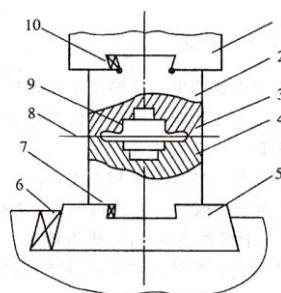


图 5.4 锤上锻模

②模锻锤一般均由一名工人操纵

(1) 锻模结构: (图 5.4) 包括上、下模, 模膛, 分模面

①模锻模膛

预锻模膛: 使坯料变形到接近锻件的形状和尺寸。在进行终锻时, 金属容易充满终锻模膛。减小终锻模膛磨损, 延长寿命, 无飞边槽, 斜度、圆角大。

终锻模膛: 使坯料最后变形到锻件所要求的形状和尺寸, 模膛形状应和锻件的形状相同; 锻件冷却时要收缩, 终锻模膛的尺寸应比锻件尺寸放大一个收缩量。

有飞边槽, 斜度、圆角小

②制坯模膛: 形状复杂的模锻件, 使金属能合理分布, 接近锻件形状, 更容易地充满模膛

I 拔长模膛: 减少坯料某部分的横截面积, 以增加该部分的长度 (图 5.6)

模锻件沿轴向横截面积相差较大时使用。

II 滚压模膛: 减少坯料某一部分的横截面积, 以增加另一部分的横截面积

(图 5.7)

III 弯曲模膛: 对于弯曲的杆类模锻件进行弯曲 (图 5.8a)

IV 切断模膛: 在上模与下模的角上组成一对刃口, 用来切断金属 (图 5.8b)

(2) 制定模锻工艺规程

①绘制模锻件图

I 分模面: 上下锻模在模锻件上的分界面

表示方法: a-----a

确定原则: 图 5.9

i 确保模锻件能从模膛中取出, 应选在模锻件最大尺寸的截面上。

ii 上下模膛在分模面处轮廓一致, 以防止发生错模

iii 选在能使模膛深度最浅的位置处, 便于充满模膛

iv 应使零件上所加的敷料最少

v 分模面应为一个平面, 使模膛深度基本一致, 差别不宜过大, 便于制造锻模综合分析, 图 5.9 中的 d-d 面是最合理的分模面。

II 余量、公差、敷料及冲孔连皮

余量一般为 1~4mm, 公差一般取在 $\pm(0.3 \sim 3)$ mm 之间。

当模锻件孔径 $d > 25\text{mm}$ 时孔应锻出, 但需留冲孔连皮。

冲孔连皮的厚度与孔径 d 有关, 当孔径为 30~80mm 时, 冲孔连皮的厚度为 4~8mm。

III 模锻斜度

模锻件上平行于锤击方向的表面必须具有斜度, 以便于从模膛中取出锻件。

对于锤上模锻, 模锻斜度一般为 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。模锻斜度与模膛深度和宽度有关。模膛深度与宽度的比值 (h/b) 越大, 取的斜度值也越大。

$$\alpha_2 = \alpha_1 + (2^\circ \sim 5^\circ)$$

α_1 外壁斜度 (即当锻件冷却时锻件与模壁离开的表面)

α_2 内壁斜度 (即当锻件冷却时锻件与模壁夹紧的表面)

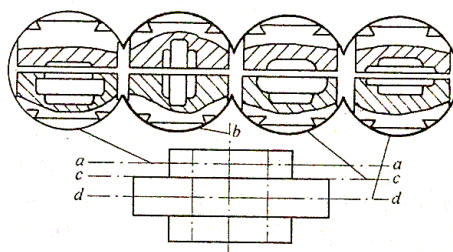


图 5.9 分模面的选择

IV 模锻圆角半径

在模锻件上所有两平面的交角处均需做成圆角

目的：增大锻件强度

便于金属流动，充满模膛

避免锻模上的内尖角处产生裂纹（应力集中）

减缓锻模外尖角处的磨损，从而提高锻模的使用寿命。

$$R = (2 \sim 3) r$$

R 内圆角半径，r 外圆角半径 $r = 1.5 \sim 12 \text{mm}$

模膛深度越深，圆角半径取值就越大。

②确定模锻工步

主要根据模锻件的形状和尺寸来确定

I 长轴类模锻件（图 5.13， 5.15）

锻件长度与宽度之比较大，锻造过程中锤击方向垂直于锻件的轴线。

常采用拔长、滚压、弯曲、预锻、终锻等。

II 盘类模锻件（图 5.14）

长、宽比近似为 1 的锻件，常选用镦粗、终锻等工步

③修整工序

I 切边和冲孔 切去飞边和连皮

II 校正：切边之后，锻件变形，在终锻模膛及专门的校正模中进行校正

III 热处理：清除模锻件的过热组织或加工硬化组织，使模锻件具有所需的力学性能，正火或退火

IV 清理：去除氧化皮、油污及其他表面缺陷（残余毛刺）酸洗、滚筒处理、喷丸处理

2. 压力机上模锻

用于模锻生产的压力机有摩擦压力机、曲柄压力机、平锻压力机、模锻水压机等。

（1）摩擦压力机上模锻（螺旋压力机）

I 原理：图 5.18

II 吨位：机械：80000KN 常用 10000KN 以下

液压：120000KN（国内）

III 模锻特点：

i 滑块行程不固定，具有锤的功能。ii 滑块运动速度慢，再结晶过程可以充分进行，特别适合于锻造低塑性合金钢和有色金属（如铜合金）等。

iii 滑块打击速度慢，设备有顶料装置，可以使用整体式锻模，组合模具，锻件形状可以非常复杂，简化加工，省料，降低成本。iv 承受偏心载荷能力差，适于单膛模锻。对于形状复杂的锻件，需要在自由锻设备或其它设备上制坯。

（2）曲柄压力机上模锻

I 原理：图 5.20

II 吨位：2000~125000KN（种类、吨位规格很多）

III 模锻特点：

i 行程固定，有良好的导向和顶料装置，锻件精度高。
ii 可采用组合模具，制造简单，更换容易，节省贵重模具材料，降低成本。iii 设备有顶料装置，可用于杆类件的端部镦

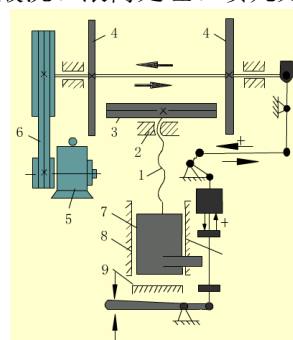


图 5.18 摩擦压力机传动简图

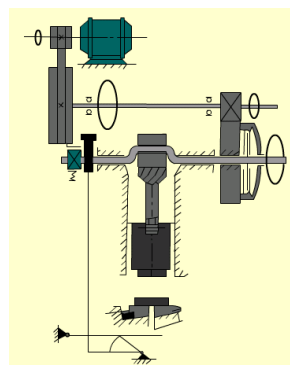


图 5.20 曲柄压力机传动简图

粗。iv 滑块行程一定，只能一次成形，复杂件应采用多台设备成形，不宜进行拔长和滚压工步。V 适于大批量生产，但设备复杂，造价高

§ 11.2 板料冲压成形

板料冲压：利用模具使板料产生分离或成形的加工方法。（一般板料厚度 $<4\text{mm}$ ，不需加热，亦称冷冲压。8~10mm 以上时，热冲压）

特点：（1）零件形状复杂，废料少。

（2）产品精度高，互换性好

（3）产品质量小，材料消耗少，强度、刚度高

（4）操作简单，生产率高，成本低

冲压设备：

（1）剪床：下料用设备，将板料剪成一定宽度的条料，以供冲压之用。

（2）冲床：实现冲压工序，制成所需形状和尺寸的产品的设备，最大吨位可达40000kN。

冲压工序：分离工序和成形工序两大类

一. 分离工序

使坯料的一部分相对另一部分发生分离的工序

1. 冲裁：使坯料沿封闭轮廓分离的工序

落料：制坯工序，被分离部分为成品，周边是废料

冲孔：加工工序，被分离部分是废品，周边是成品

（1）冲裁变形过程：图 5.24

三个阶段：

①弹性变形阶段

冲头接触板料后，继续向下运动的初始阶段，使板料产生弹性压缩、拉伸与弯曲等变形，这时冲头略挤入材料，板料另一侧也略挤入凹模口。随着冲头的继续压入，板料中的应力迅速增大，达到弹性极限。此时，凸模（冲头）处的材料略有弯曲，凹模上的材料则向上翘。凸、凹模之间的间隙越大，弯曲和上翘越明显。

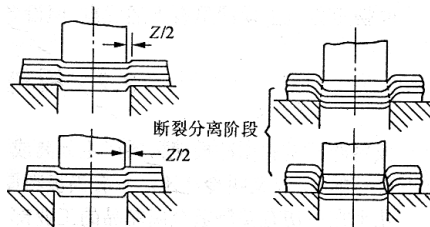


图 5.24 冲裁变形过程

②塑性变形阶段

冲头继续压入，压力增加，板料中的应力值达到屈服极限时，则产生塑性变形，即进入塑性变形阶段。随着冲头挤入材料的深度逐渐增大，塑性变形程度逐渐增大，材料内部的拉应力和弯矩都增大，位于凸凹模刃口处的材料硬化加剧，出现微裂纹，塑性变形阶段结束。此阶段除剪切变形外，还存在弯曲和拉伸变形。间隙越大，弯曲和拉伸也越大。

③断裂分离阶段

冲头继续压入，已形成的上、下微裂纹逐渐扩大并向材料内延伸，像楔形那样发展，当上、下裂纹相遇重合时，材料被剪断分离。

冲裁件断裂面有明显的区域特征

光亮带：冲头挤压切入所形成的光滑表面，断面质量最佳

剪裂带：剪裂带，是材料在剪断分离时所形成的断裂带，表面粗糙

（2）凸凹模间隙

间隙过大：断面质量差，光亮带小一些，剪裂带和毛刺均较大

间隙过小：断面质量好，光亮带增大，但毛刺也增大，模具磨损严重，寿命受影响。

合理选择模具间隙，主要考虑冲裁件断面质量和模具寿命这两个主要的因素。一般说来，当对冲裁件断面质量要求较高时，应选取较小的间隙值，而当冲裁件的质量要求不高时，则应可能地加大间隙值，以利于提高冲模的寿命。

(3) 凸、凹模刃口尺寸确定：

冲孔件：尺寸取决于凸模刃口尺寸。设计时，取凸模作设计基准件，然后根据凸凹模间隙 Z 值确定凹模尺寸（即用扩大凹模刃口尺寸来保证间隙值）。

落料件：尺寸取决于凹模刃口的尺寸。设计落料模时，取凹模作设计基准件，然后根据凸凹模间隙 Z 值确定凸模尺寸（即用缩小凸模刃口尺寸来保证间隙值）。

(4) 冲裁力：

平刃冲裁：

$$P = kLS\tau \text{ 或 } P = LS\sigma_b$$

式中 P —冲裁力，N；
 L —冲裁周边长度，mm；
 S —坯料厚度，mm
 τ —材料抗剪强度，MPa；
 k —系数，一般可取 $k=1.3$
 σ_b —材料强度 $\tau=0.8\sigma_b$

2. 修整：

利用修整模沿冲裁件外缘或内孔刮削一薄层金属，切掉冲裁件断面上存留的剪裂带和毛刺，提高精度。

(1) 外缘修整：修整冲裁件外形，图 5.25a

(2) 内孔修整：修整冲裁件内孔，图 5.25b

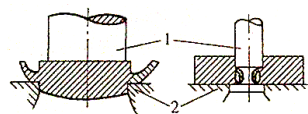


图 2.25 修整工序简图

3. 剪切（切断）：

利用剪刀或模具使坯料沿不封闭轮廓线分离的工序。

二 变形工序

利用模具使板料的一部分相对于另一部分产生位移而又不破裂的工序。

1. 拉深成形

(1) 原理（圆筒形件的拉深）：（图 5.26）利用模具使平板坯料变成开口空心零件的成形工序。

过程：在凸模作用下，板料产生塑性变形，被拉入凸模和凹模的间隙中，形成空心零件。

特点：i 法兰部分向内收缩（毛坯变化图）

ii 板厚基本不变。

iii 压边力以法兰不起皱为准

iv 模具间隙 $Z = (1.1 \sim 1.2)s$

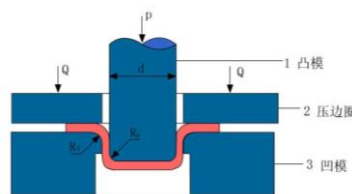


图 5.25 拉深工序

(2) 拉深系数： $m=d/D$

其中： d —拉深件直径（中性层）

D —拉深前毛坯直径

m 意义： i 拉深系数是衡量变形程度的指标 $m \downarrow$ ，变形程度 \uparrow

ii 确定拉深成形成功与否的判据

一般： $m \geq 0.5 \sim 0.8$ （极限拉深系数）

多次拉深：

当实际拉深系数 $m < [m]$ (极限拉深系数) 常采用多次拉深工艺, (图 5.27 和 5.28)

多次拉深过程中加工硬化现象严重。为保证坯料具有足够的塑性, 生产中坯料经过一两次拉深后, 应安排工序间的退火处理。

其次, 在多次拉深中, 拉深系数应一次比一次略大些, 确保拉深件质量, 使生产顺利进行。总拉深系数等于每次拉深系数的乘积。

(3) 拉深件的成形质量问题

I 破裂: 多发生在直壁与底部的过渡圆角处。(图 5.29)

主要原因: i 凸、凹模圆角半径设计不合理。凸、凹模圆角半径 (尤其是 R_d) 过小, 容易拉裂。普通低碳钢板, $R_d = (6 \sim 15) S$, $R_p = (0.6 \sim 1) R_d$

ii 凸凹模间隙不合理, 间隙过小, 模具与工件摩擦增大, 易拉裂工件, 擦伤工件表面, 降低模具寿命, 一般拉深模间隙 $Z = (1.1 \sim 1.2) S$

iii 拉深系数过小, m 值过小时, 板料变形程度加大, 拉深件直壁部分承受的拉力也加大, 当超出其承载能力时, 即会被拉断。

iv 模具表面精度和润滑条件差, 增大摩擦阻力

II 起皱: 多发生在拉深件的法兰部分。凹模入口区

压边力过小, 相对厚度 S/D , 拉深系数 m 过小。

2. 弯曲成形

坯料的一部分相对于另一部分弯曲成一定角度的变形工序

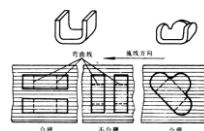


图 5.32 弯曲时的纤维方向

(1) 分类: V 形弯曲、U 形弯曲

(2) 最小弯曲半径: $r_{\min} = (0.25 \sim 1) S$

(3) 坯料纤维方向: 与弯曲线垂直 (图 5.32)

(4) 回弹: 回弹角 $0^\circ \sim 10^\circ$

3. 胀形成形

胀形是利用坯料局部厚度变薄形成零件的成形工序。是冲压成形的一种基本形式, 也常和其他方式结合出现于复杂形状零件的冲压过程之中。

胀形主要有平板坯料胀形、管坯胀形、球体胀形、拉形等几种方式。

(1) 平板坯料胀形:

I 原理: 图 5.33

平板坯料放在凹模上, 加压力圈并在压力圈上施加足够大的压力, 当凸模向凹模内压入时, 坯料被压力圈压住不能向凹模内收缩, 只能靠凸模底部坯料的不断变薄, 来实现变形过程。

II 特点: i 坯料直径不变

ii 压力足够

iii 变形只靠凸模底部坯料厚度变薄来实现

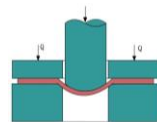
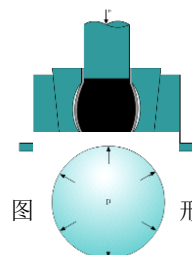


图 5.33 平板坯料胀形

III 应用: 压制突起、凹坑、加强筋、花纹图及印记等, 和拉深成形结合, 用于增大汽车覆盖件刚度。

(2) 管坯胀形: (图 5.34)

I 原理: 在凸模压力的作用下, 管坯内的橡胶变形, 直径增大, 将管坯直径胀大, 靠向凹模。胀形结束后, 凸模抽回, 橡胶恢复原状, 从胀形件中取出。凹模采用分瓣式, 从外套中取出后即可分开, 将胀形件从中取出。有时也可以用液体或气体代替橡胶。



II 应用: 复杂的空心零件, 例如波纹管、高压气瓶等。

(3) 球体胀形 (图 5.35)

图 5.35 球体胀形

I 原理：用焊接方法将板料焊成多面体，然后向其内部用液体或气体打压。在强大压力作用下，板料发生塑性变形，多面体变成球体。

II 应用：大型容器制造，石油化工，冶金，造纸等。

(4) 拉形：(图 5.36)

I 原理：在强大的拉力作用下，使坯料紧靠在模型上并产生塑性变形。

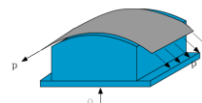


图 5.36 拉形

II 应用：薄板，曲率半径很大的曲面形状零件，如飞机的蒙皮等。

4. 翻边成形

在坯料的平面或曲面部分上，使坯料沿一定的曲线翻成竖直边缘的冲压方法。翻边的种类较多，常用的是圆孔翻边。

I 原理（圆孔翻边）：图 5.37

翻边前坯料孔的直径是 d_0 ，变形区是内径为 d_0 、外径为 d 的环形部分。翻边过程中变形区在凸模作用下内径不断扩大，翻边结束时达到凸模直径，最终形成了竖直的边缘。

II 特点：i 坯料直径不变

ii 压边力足够大

iii 局部变形

III 翻边系数： $K_0 = d_0/d$

d_0 —翻边前孔径

d —翻边后孔径

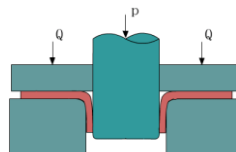


图 5.37 翻边工序

IV 翻边工艺措施：

当零件所需凸缘的高度较大，一次翻边计算出的翻边系数 K_0 值小于极限翻边系数时，常采用以下措施：

i K_0 较小时：拉深→切底

ii K_0 很小时：拉深→冲孔→翻边 图 5.38

其中拉深过程中可采用多次拉深或中间退火的办法

翻边在汽车、拖拉机、车辆等工业部门的应用更为普遍。

三. 冲模的结构与分类

1. 简单模：压力机的一次行程中只完成一道工序的冲模（图 5.39）

2. 连续模：压力机的一次行程中，在模具的不同部位完成多道工序（图 5.40）

3. 复合模：压力机的一次行程中，在模具的同一部位完成多道工序（图 5.41）

§ 11.3 挤压成形

一、挤压：使金属坯料在挤压模中受强大压力作用而变形的加工方法。

二、挤压特点：

1. 挤压时金属坯料在三向压应力作用下变形，可以提高金属坯料的塑性。

2. 可以挤压出各种形状复杂、深孔、薄壁、异型断面的零件

3. 零件的力学性能好

4. 零件精度高，节省材料，材料利用率 70%

三、挤压分类

根据金属流动方向与挤压时凸模运动方向的关系，挤压成形可以分为四种：

(1) 正挤压 挤压模出口处金属流动方向与凸模运动方向相同（图 5.42）

(2) 反挤压 挤压模出口处金属流动方向与凸模运动方向相反（图 5.43）

(3) 复合挤压 挤压模出口处一部分金属的流动方向与凸模运动方向相同，而另一部分金属流动方向与凸模运动方向相反（图 5.44）

(4) 径向挤压 挤压模出口处金属流动方向与凸模运动方向垂直（图 5.45）

(5) 静液挤压 利用液体传递压力，使金属通过凹模而成形，（图 5.46）

坯料侧面没有通常挤压时存在的摩擦，所以变形较均匀，可提高一次挤压的变形量，挤压力也较其它方法小 10%~50%。静液挤压可用于低塑性材料，如铍、钽、铬、钼、钨等金属及其合金的成形。对常用材料可采用大变形量（不经中间退火）一次挤成线材和型材。静液挤压法已用于挤制螺旋齿轮（圆柱斜齿轮）及麻花钻等形状复杂的零件。

§ 11.4 轧制成形

一、纵轧：轧辊轴线与坯料轴线互相垂直的轧制方法。包括各种型材轧制、辊锻轧制、辗环轧制等。

1. 辊锻轧制：使坯料通过装有圆弧形弧形模块的一对相对旋转的轧辊时受压而变形的生产方法。

(1) 原理：图 5.47

(2) 产品：

①扁断面的长杆件，如扳手、活动扳手、链环等。

②带有不变形头部而沿长度方向横截面面积递减的锻件，如叶片等。

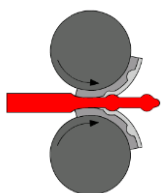


图 5.47 辊锻示意图

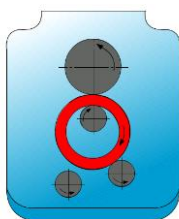


图 5.48 辗环轧制示意图

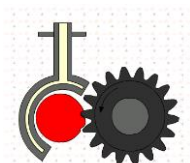


图 5.49 横轧示意图

③连杆成形。

2. 辗环轧制：扩大环形坯料的外径和内径，从而获得各种环状零件的轧制方法。

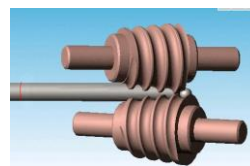
(1) 原理：图 5.48

(2) 产品：火车轮箍、轴承座圈、齿轮及法兰等

二、横轧：轧辊轴线与坯料轴线互相平行的轧制方法。

(1) 原理：图 5.49

(2) 产品：齿轮轧制等



三、斜轧：亦称螺旋斜轧。轧辊轴线与坯料轴线相交一定角度的轧制方法。

(1) 原理：图 5.50

(2) 产品：高速钢滚刀、冷轧丝杠、钢球轧制等。

§ 11.5 拉拔成形

一、拉拔：将金属坯料拉过拉拔模的模孔，使其变形的塑性加工方法。

二、拉拔形式：

1 线材拉拔：生产各种金属导线（图 5.51）

2. 棒料拉拔：截面形状，如圆形、方形、矩形、六角形等

3. 型材拉拔：生产特殊截面或复杂截面形状的异形型材生产

4. 管材拉拔：以圆管为主，也可拉制椭圆形管、矩形管和其他截面形状的管材。

管材拉拔后管壁将增厚，如果希望管壁厚度变化时，拉拔过程中要加芯棒。

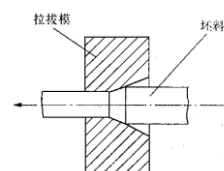


图 5.51 拉拔示意图

§ 11.6 塑性加工零件结构设计

一、锻件结构设计

1. 自由锻件结构设计：

（1）避免锥体和斜面结构

（2）相贯线避免复杂空间曲线

（3）避免加强筋、凸台、复杂截面或空间曲面

（4）锻件横截面有急剧变化或形状较复杂时，设计成由几个简单件构成的组合体，锻—焊结合或锻—机械连接结合工艺

2. 模锻件结构设计

（1）合理的分模面

（2）模锻件上与锤击方向平行的非加工表面，应设计有模锻斜度。非加工表面所形成的交角都应按模锻圆角设计

（3）模锻件外形力求简单、平直和对称，尤其应避免模锻件截面相差过大，或有薄壁、高筋、凸起等结构

（4）结构允许时，避免窄沟、深槽和深孔、多孔结构

（5）采用锻—焊结构，以减少敷料、简化模锻工艺

二、冲压件结构设计

1. 形状、尺寸：

（1）对冲裁件的要求：

①落料件的外形和冲孔件的孔形应力求简单、对称，尽可能采用规则几何形状。同时应尽量避免长槽与细长悬臂结构。

②孔及其相关尺寸

③直线与直线、曲线与直线的交接处，均应用圆弧连接。

④冲裁件排样。尽量提高材料利用率

（2）弯曲件：

①形状应尽量对称， $r > r_{\min}$ ，并考虑材料纤维方向

②弯曲边的平直部分 $h > 2S$ ，弯曲边过短，需先留出适当的余量，以增大 h ，弯好后在切去多余材料。

③弯曲带孔件时，为避免孔的变形， $L > (1.5 \sim 2) S$ 。

(3) 对拉深件的要求：

①外形应简单、轴对称，且高度不宜太大，以便减小使拉深次数。

②拉深件应有合理圆角半径。

2. 改进结构和简化工艺

(1) 采用冲焊结构

(2) 采用冲口工艺，以减少组合件数量

(3) 简化结构，减少工序、节省材料、降低成本

3. 冲压件的厚度

在强度、刚度允许的条件下，应尽可能采用较薄的材料来制作零件，以减少金属的消耗。对局部刚度不够的地方，可采用加强筋措施，以实现薄代厚

教 案

工程材料与机械制造基础 课 22 讲

主讲人 李逸仙

课 题 焊接（第 12 章）

教学目的： 了解焊接的理论基础和焊接的工艺设计

教学要求： 1、掌握焊接的特点及分类，电弧焊的冶金过程，焊接接头的金属组织和性能
2、了解熔化焊、压力焊和钎焊工艺，掌握焊接工艺设计流程

教学重点： 1、焊接的分类
2、焊接的工艺设计

教学难点： 了解焊接的方法及工艺性

教学方法 课堂讲授，启发式提问

使用教具 变形焊件

提问作业

备课时间 年 月 日 **上课时间** 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

李逸仙
年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

<p>具体授课过程计划：</p> <p>引入：前期我们已经学习了锻造和铸造两种金属成形工艺，但二者大多针单个零件成形，若组合件则需要通过金属连接技术进行整合，如焊接。金属连接的历史可以追溯到数千年前，早期的焊接技术见于青铜时代和铁器时代的欧洲和中东。数千年前的古巴比伦两河文明已开始使用软钎焊技术。公元前 340 年，在制造重达 5.4 吨的古印度德里铁柱时，人们就采用了焊接技术。</p> <p>焊接理论基础</p> <p>1.1 焊接工艺的概述（5min）</p> <p>焊接的定义、特点及常见焊件举例</p> <p>突出航空航天领域焊接结束的应用，如飞机蒙皮与翼肋以及飞机地板等结构件的装配中搅拌摩擦焊发挥了重要作用。</p> <p>1.2 电弧焊的冶金过程（17min）</p> <p>讲授焊接电弧的基本组成</p> <p>讲授焊接接头的金属组织</p> <p>讲授焊接工艺的分类</p> <p>1.3 焊接应力与变形的产生原因（8min）</p> <p>现场实物讲解焊接应力与变形的产生原因及类型</p> <p>讲授防止和减小焊接变形的措施</p> <p>2. 焊接工艺方法</p> <p>2.1 熔化焊</p> <p>结合学生金工实习过程，讲授手工电弧焊的原理、特点及应用（5min）</p> <p>讲授埋弧焊的原理、特点及应用并观看视频（6min）</p> <p>讲授气体保护焊的原理、特点及应用（5min）</p> <p>2.2 压力焊</p> <p>讲授电阻焊的原理、特点、分类方法及应用（8min）</p> <p>讲授摩擦焊的原理、特点及应用并观看视频（8min）</p> <p>（课程思政：呼应前期摩擦焊在航空航天中的应用，激发科学创新的意识以及航空报国的热情）（2min）</p> <p>2.3 钎焊</p> <p>讲授电阻焊的原理、特点、分类方法及应用（8min）</p> <p>2.4 课堂练习</p> <p>小游戏：学生上讲台进行焊接工艺连线</p> <p>教师点评讲解（5min）</p>	课后分析
---	------

3. 焊接的结构工艺性

讲解焊缝布置的基本原则（3min）

讲解焊接接头的基本形式（3min）

雨课堂练习（2min）

4. 课程小结（5min）

具体授课内容：

1. 焊接理论基础

1.1 概述

焊接：是通过加热或加压，或者两者并用，并且用或不用填充材料，使焊接件达到原子结合的一种方法。

特点：

（1）适用性广（型材，型材与铸件、锻件拼焊承符合结构件；异种金属；简单、大型、复杂结构均可）

（2）可生成有密封要求的构件（锅炉、高压容器、船体等质量轻、密封性好、工作时不渗漏的空心构件）

（3）可节约金属，成本低（与铆接相比，焊接件不需要垫板、角铁等辅助件）

1.2 分类

（1）熔化焊：焊接过程中，将焊件接头加热至熔化状态，不加压力完成焊接的方法。

（2）压力焊：焊接过程中，必须对焊件施加压力（加热或不加热）以完成焊接的方法。

（3）钎焊：采用比母材熔点低的金属材料做钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点、低于母材熔点的温度，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙并与母材相互扩散实现焊接的方法。

1.3 电弧焊的冶金过程

1.3.1 焊接电弧

焊接热过程：加热→熔化→冶金反应→结晶→固态相变→形成接头

热源要求：

（1）能量密度高，并能产生足够高的温度。

（2）热源性能稳定，易于调节和控制。

（3）高的热效率，降低能源消耗。

焊接电弧：在电极与工件之间的气体介质中产生的强烈、持久的气体放电现象，即在电

极与工件之间局部气体介质中有大量电子流通过的导电现象。

产生电弧的条件：电极与焊件之间有一定的电压，而且局部气体介质处于电离状态。引燃电弧时，常将阴、阳两极接通电源，短暂接触并迅速分离。两级相互接触发生短路，并产生很大的短路电流，两级分离时产生电子发射，阴极电子射向阳极，同时气体介质电离形成电弧。

引燃电弧后，弧柱中就充满了高温电离气体，并放出大量的热能和强烈的光，电弧的热量与焊接电流和电弧电压的乘积成正比。电流越大，电弧产生的总热量就越多，一般情况下，电弧热量在阳极区产生的较多，约占总热量的 43%；阴极去因放出大量的电子消耗了一部分能量，所以产生的热量相对较少，约占 36%；其余 21%左右的热量是在弧柱区产生的。焊条电弧焊只有 65~85%的热量用于加热和熔化金属，其余的热量则散失在电弧周围和飞溅的金属滴中。

电弧中阳极区和阴极区的温度因电极材料不同而有所不同。用钢焊条焊接时，阳极区约为 2600K，阴极区约为 2400K，电弧中心区温度最高，可达 6000~8000K。

使用直流电源焊接时，有正接法和反接法

正接法——工件接到电源正极，焊条接到负极；工件温度相对较高，适合厚度大，要求迅速融化的工件

反接法——工件接到电源负极，焊条（或电极）接到正极；适合薄钢板，有色金属。

1.3.2 焊接冶金过程的特点

焊接冶金过程是指焊接时在电弧高温下焊接区内各种金属、熔渣、气体之间将发生复杂的冶金反应，如金属的氧化还原，气体的溶解析出，杂质的去除等。焊接时，其熔池可以看成一座微型的冶金炉。

与普通冶金过程相比：（1）电弧和熔池温度高，造成金属元素强烈的烧损和蒸发，同时熔池周围又被冷的金属包围，常使焊件产生应力和变形；（2）冶金过程短，焊接熔池从形成到凝固的时间很短（10s），反应不充分，难以达到平衡状态；（3）冶金条件差，熔池一般暴露于空气中，周围的气体、铁锈、油污等在电弧高温作用下，分解出 H、O、N 等，极易同金属元素发生化学反应。反应生成氧化物、氮化物混入焊缝中，使焊缝的力学性能下降；液态金属氧化的结果，生成的 FeO 溶解于钢液中，冷凝时因溶解度减小而析出，杂质则滞留在焊缝里；FeO 与钢种的 C 反应生成 CO，易在焊缝中产生气孔；液态金属氮化生成 Fe₄N，冷凝时呈针状夹杂物分布在晶粒内，显著降低焊缝塑性和韧性；空气中水分分解成氢原子，在焊缝中产生气孔、裂纹等缺陷，会出现“氢脆”现象。

要获得优质焊缝，焊前必须对焊件进行清理，在焊接过程中必须用熔渣或保护气体将熔池与空气隔开，防止空气对焊接区域的有害影响；同时向熔池中补充易烧损的合金元素，以

改善焊缝金属的化学成分和组织。

1.3.3 焊接冶金过程的特点

熔化焊在短时间内，工件的局部进行了冶炼、凝固，且焊接区各位置金属的最高温度不同，经历的焊接热循环是不同的。焊缝附近的金属受到短时间不同规范的热处理，因此会发生组织和性能上的改变，并影响接头质量。

焊接接头的横断面可分为三种性质不同的部分。

(1) 焊缝区：由熔池凝固后在焊件之间形成的结合部分。温度处于液相线以上，母材金属和填充金属融化后形成液态熔池，以母材金属晶粒为结晶核心，沿着垂直于散热面的反方向生长成柱状晶的铸态组织。焊缝中心区容易产生 S、P 杂质和氧化铁等易在焊缝中心偏析，降低焊缝塑性，产生热裂纹。由于焊条的渗合金作用，以及等强度原则选取焊条，焊缝区的强度不低于母材。

(2) 熔合区：从焊缝到热影响区的过渡区（0.1~1mm）。温度处于固相线与液相线之间。焊接时处于半熔化状态，组织成分极不均匀，力学性能不好，往往成为裂纹的发源地。焊接接头中的薄弱环节。

(3) 热影响区：焊接过程中，焊件受热影响而发生组织性能改变的区域。

1) 过热区：焊件被加热到固相线到 Ac_3 以上 $100\sim 200^\circ\text{C}$ 左右，因加热温度过高，奥氏体晶粒急剧长大，冷却后组织粗大，塑性、韧性明显下降，焊接接头的薄弱环节。

2) 正火区：过热温度和 Ac_3 之间，空冷后重结晶而晶粒细化，相当于正火组织，力学性能优于母材。

3) 部分相变区：焊件被加热到 $Ac_1\sim Ac_3$ 之间，珠光体和部分铁素体发生重结晶，经历细化，尚未融入奥氏体的铁素体保留，长大成粗大的铁素体。该去组织不均匀，力学性能稍差。

4) 再结晶区：焊件被加热到 Ac_1 以下的部分，对于热塑性成形的钢材，组织不改变；冷塑性钢材在 $450^\circ\text{C}\sim Ac_1$ 的部分还将再结晶，钢材软化

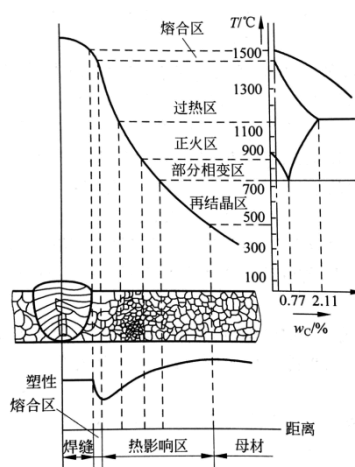


图 12-4 低碳钢焊接接头组织与性能的变化示意图

1.4 焊接应力与变形

1.4.1 产生原因

在焊接过程中，对焊件进行局部的不均匀加热和冷却是产生焊接应力和变形的根本原因。

1.4.2 基本形式

收缩变形——焊缝金属沿纵向和横向的焊后收缩而引起

角变形——焊缝截面上、下不对称，焊后沿横向上、下收缩不均匀，使板绕焊缝旋转一角度，多见中、厚板焊件

弯曲变形——焊缝布置不对称，焊缝纵向收缩沿焊件高度方向分布不均匀

扭曲变形——焊接顺序不合理或焊缝在横截面上的分布不对称而引起，多见于长焊缝、多焊缝

波浪变形——焊接薄板结构焊件时，产生较大收缩应力，使薄板失去稳定性而引起

1.4.3 防止和减小焊接应力与变形的措施

（1）在设计结构方面（焊前预防措施）

- ✓ 合理选择焊缝的尺寸和形式，保证结构承载能力，尽量采用较小的焊缝尺寸。
- ✓ 尽可能减少不必要的焊缝，合理地选择筋板的形状，安排筋板位置，以减少焊缝；也可采用压型来提高平板的刚性和稳定性。
- ✓ 合理安排焊缝的位置，设计时安排焊缝尽可能对称于截面中性轴，或接近中轴，以减少挠曲。

（2）在焊接工艺方面（焊中控制措施）

- ✓ 反变形法：预先估计结构焊接变形的大小和方向，将工件预先反向变形
- ✓ 刚性固定法：用夹具固定工件相对位置，强制约束焊接变形（焊接应力增大，仅适用于塑性好的低碳钢，不能用于铸铁和淬硬倾向大的钢材，以免焊后断裂。）
- ✓ 合理安排焊接次序：先焊错开的短焊缝，再焊直通长焊缝，即先将小块钢板拼焊成较大的钢板条，再将后者拼焊成形，使焊接时钢板能自由收缩，以防止焊缝交接处产生裂纹
- ✓ 焊前预热和焊后缓冷（降低焊缝区和其他部分的温差，减少应力和变形。工艺复杂，仅对塑性差、易产生裂纹的材料，如高、中碳钢、铸铁、合金钢等使用）
- ✓ 焊后去应力退火

（3）焊后矫形处理（焊后调节措施）

- ✓ 机械矫形法（通过压力机、矫直机、碾压或锤击等方法矫正焊接变形，仅适用于刚性小、塑性好、厚度不大的焊件）
- ✓ 火焰矫形法（利用火焰加热所产生的局部压缩塑性变形，抵消构建在该部分已产生的伸长变形，适用于塑性差、刚度大的复杂焊件）

2. 焊接方法

2.1 熔化焊

熔化焊：母材接头被加热到熔化温度以上，它们在液态下相互融合，冷却时便凝固在一

起。

2.1.1 手工电弧焊/焊条电弧焊

定义：利用焊条与工件间产生的电弧来熔化金属并进行焊接的一种手工操作电弧焊接方法。

优势：设备相对简单、轻便、成本低廉，可焊各种焊接位置。

不足：气体保护效果有限、焊缝质量不太稳定、熔敷速率较低、生产效率不高（不断地更换焊条）。

应用范围：目前最为广泛的焊接方法。不适宜焊接钛等活泼金属、难熔金属以及低熔点金属

2.1.2 埋弧焊

定义：是一种利用连续送进的焊丝，在焊剂层下引燃电弧进行焊接的方法。引燃电弧、送丝和电弧的移动等过程全部由机械设备自动完成，因此也称为埋弧自动焊。

优点：（与焊条电弧焊相比）生产率高、焊接质量高而且稳定、节省金属材料、劳动条件好。

不足：灵活性差（受轨道限制，不如手工电弧焊灵活，不适用于短小、弯曲的焊缝及空间焊缝）

应用：适用于较厚的板料(6~60mm)的长、直焊缝和大型(直径大于 250mm)环形焊缝的焊接。如压力容器的环缝焊和直缝焊，锅炉冷却壁的长直焊缝焊接，船舶和潜艇壳体的焊接等

2.1.3 气体保护焊

定义：用外加气体作为电弧介质并保护电弧和焊接区的电弧焊。保护气体通常为惰性气体（氩气、氦气）和二氧化碳。如氩弧焊、二氧化碳气体保护焊等

氩弧焊：可焊材料范围广；焊接变形小；便于操作，易于实现机械化，焊缝质量好。但成本相对较高。目前主要用于易氧化的有色金属，如铝、镁、钛及其合金等，不锈钢、耐热钢以及部分稀有金属的焊接。

二氧化碳保护焊：以二氧化碳气体作为保护气体，以焊丝作为电极和填充金属，在电极和工件之间产生电弧熔化金属的电弧方法。

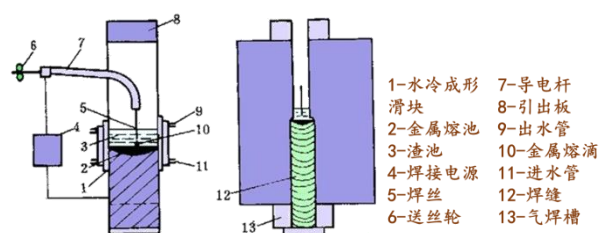
优势：成本低；生产效率高；焊接性能好。

不足：电弧稳定性差、焊缝表面成形不够美观、供气系统比氩弧焊复杂。

应用范围：二氧化碳气体保护焊适用于焊接 30mm 以下的低碳钢和强度级别不高的低合金结构钢。

2.1.4 电渣焊

利用电流通过液态熔渣时所产生的电阻热作为热源的一种熔化焊接方法。按电极种类分：丝极电渣焊、板极电渣焊、熔嘴电渣焊等。



电渣焊总是在垂直立焊位置进行焊接，丝极电渣焊的焊接过程如图所示。主要用于厚板拼接，大型铸件、锻件的焊接。

优势：焊接生产效率高；成本低，节省焊接材料和电能；焊缝质量好。

不足：与其他方法相比较，电渣焊的焊缝和热影响区晶粒均较粗大，易产生过热组织，因此，焊缝力学性能下降。

应用范围：电渣焊主要用于厚壁压力容器和铸-焊、锻-焊和厚板拼焊等大型构件的制造，焊接厚度应大于 40mm，焊接材料常用碳钢、合金钢和不锈钢。

2.2 压力焊

2.2.1 电阻焊

又称接触焊，利用电流通过焊接接头的接触面时产生的电阻热将焊件局部加热到熔化或塑性状态，在压力下，形成焊接接头。按接头形式不同可分为：

电焊、缝焊和对焊

电焊：焊件装配成搭接接头，并压紧在两个柱状电极之间，形成焊点。主要用于薄板冲压件及钢筋的焊接，如汽车驾驶室、车厢，飞机蒙皮等。

缝焊：缝焊是连续的点焊过程，它是用连续转动的盘状电极代替了柱状电极，焊后获得相互重叠的连续焊缝。缝焊分流严重，焊接电流比点焊 1.5~2 倍。焊缝表面光滑美观、气密性好。广泛应用于油桶、罐头罐、暖气片、飞机和汽车油箱等密封容器的薄板焊接。

对焊：利用电阻热将两个工件在整个断面上焊接起来的方法，根据焊接过程的不同，分为电阻对焊和闪光对焊两种形式。

- ✓ **电阻对焊：**焊件装配成对接接头，使其端面紧密接触，利用电阻热加热至塑性状态，然后迅速施加顶锻力完成焊接。适用于截面尺寸小且截面形状简单的棒料和管料的焊接。
- ✓ **闪光对焊：**焊件装配成对接接头，接通电源，并使其端面逐渐移近达到局部接触，利用电阻热加热这些焊接点（产生闪光），使端面金属融化，直至端部在一定深度范围内达到预定温度时，迅速施加顶锻力完成焊接。适用于质量要求高、形状复杂的重要工件及异种金属间的焊接。

2.2.2 摩擦焊

利用两工件焊接端面之间相互摩擦而产生的热量，使工件接合端面达到塑性状态后，然后在压力作用下使它们连接起来的一种压焊方法。适用于轴、轴套、杆件、管子与法兰、石油钻杆和钻芯的连接和变截面杆件的连接，以及异种金属之间的焊接。

<div>2.3 钎焊</div> <div>利用熔点比母材低的材料作为钎料，将焊件和钎料加热至高于钎料熔点、但低于母材熔点的温度，填充接头间隙并与固态的母材相互扩散实现连接的方法。</div> <div>2.3.1 硬钎焊</div> <div>钎料熔点在 450℃ 以上的钎焊为硬钎焊。硬钎焊的接头强度较高，工作温度也较高，可用于受力部件的连接，如天线、雷达、自行车架等。硬钎焊常用的钎料是银基钎料、铜基钎料、铝基钎料和镍基钎料。常用的钎剂（防止焊接表面加热时氧化）是硼酸、氯化物、氟化物等。</div> <div>2.3.2 软钎焊</div> <div>钎料的熔点低于 450℃ 的钎焊为软钎焊。软钎焊的接头强度低，只适用于受力很小且工作温度低的工件，如印刷电路板、电子元器件、仪器仪表等。软钎焊常用的钎料是锡铅钎料。常用的钎剂是松香或氯化锌溶液。</div> <div>3. 焊接的结构工艺设计</div> <div>3.1 焊接结构材料的选择</div> <div><div>(1) 在满足使用性能要求的前提下，应尽量选用焊接性较好的材料（低碳钢、含碳量小于 0.4% 的低合金钢优选）</div><div>(2) 注重材料的冶金质量（镇静钢优于沸腾钢）</div><div>(3) 异种材料焊接，必须注意它们的焊接性及其差异（接头强度不低于被焊材料中强度较低者）</div><div>(4) 焊接结构应尽量选用轧制的型材</div><div>(5) 最好采用相等厚度的金属材料</div></div> <div>3.2 焊缝的布置</div> <div><div>(1) 焊缝位置应方便焊接操作和检验</div><div>(2) 焊缝应避开应力最大或应力集中部位</div><div>(3) 焊缝的位置应尽可能分散，避免密集和交叉</div><div>(4) 焊缝位置尽可能对称</div><div>(5) 焊缝应尽量远离机械加工面</div></div>	
---	--

教 案

工程材料与机械制造基础 课 23-25 讲

主讲人 李逸仙

课 题 切削加工（第 13 章）

教学目的：了解机械加工的基础知识及常用方法

教学要求：

1. 理解切削运动及切削要素
2. 掌握切削刀具的结构和几何角度
3. 掌握常用切削加工的工艺特点及其应用

教学重点：

1. 刀具几何角度
2. 常用切削加工方法

教学难点：刀具几何角度

教学方法：课堂讲授，启发式提问

使用教具：多媒体，板书

提问作业

备课时间 年 月 日 **上课时间** 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

李逸仙

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

教学内容与过程	课后分析
<p>具体授课过程安排：</p> <p>第一讲：切削加工基础理论知识</p> <p>引入：由切削加工在整个机械制造行业的广泛应用引入，结合学生在金工实习中的具体实习内容初步讨论大家所了解的切削加工方法。激发学生兴趣，产生师生共鸣。（5min）</p> <p>1. 机械加工基础知识</p> <p>1.1 切削加工技术概述</p> <p>讲授切削加工的定义、特点、分类和内容（5min）</p> <p>讲授常见零件及零件表面的构成（3min）</p> <p>讲授切削三种基本零件表面的形成原理及成形方法（7min）</p> <p>1.2 刀具结构及车刀的主要角度</p> <p>1.2.1 刀具材料</p> <p> 讲解刀具材料应具备的性质及常用刀具材料（5min）</p> <p>1.2.2 刀具结构</p> <p> 课堂采用车刀实物，讲解刀具“三面二刃一刀尖”的结构（5min）</p> <p>1.2.3 刀具的几何角度</p> <p> 讲授刀具几何角度测量的基本平面（5min）</p> <p> 讲授刀具基本几何角度的测量方法及其对加工的影响（30min）</p> <p> 雨课堂练习（3min）</p> <p>1.3 切削用量</p> <p> 以石蜡代替金属，现场演示车削基本过程，讲解切削运动及切削用量。（10min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p> <p>2. 课程小结（5min）</p> <p>第二讲：常用切削加工工艺（上）</p> <p>1. 复习（5min）</p> <p>2. 切屑形成过程及切屑种类</p> <p> 讲解切屑形成的基本过程（5min）</p> <p> 利用石蜡切屑实物介绍切屑的基本类型（5min）</p> <p> 讲解积屑瘤的概念及其控制方法（8min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p> <p>3. 常用切削加工工艺</p> <p>3.1 讲授车削工艺特点及应用（20min）</p> <p> 雨课堂练习（2min）</p>	

3.2 讲授铣削工艺特点及应用（20min）

雨课堂练习（3min）

3.3 讲授刨削工艺特点及应用（15min）

4. 课程小结（5min）

第二讲：常用切削加工工艺（下）

1. 复习（5min）

2. 磨削的工艺特点及应用（18min）

雨课堂练习（2min）

3 钻削的工艺特点及应用（15min）

4. 表面加工方案

4.1 平面加工方案（10min）

4.2 外圆和内圆表面加工方案（10min）

4.3 孔的加工方案（10min）

5. 切削加工零件的结构工艺性（15min）

6. 小结（5min）

第 13 章 切削加工

13.1 概述

13.1.1 定义

切削加工——使用切削工具（包括刀具、磨具和磨料），在工具和工件的相对运动中，把工件上多余的材料层切除，使工件获得规定的几何参数（形状、尺寸、位置）和表面质量的加工方法。

可分为机工和钳工

13.1.2 特点

加工的精度和粗糙度范围广泛；

加工零件材料、形状、尺寸和重量范围较大；

加工生产率较高

13.1.3 分类

（1）按工艺特征区分

车削、铣削、刨削、磨削、钻削、镗削、铰削、插削、拉削、锯切、研磨、珩磨、超精加工、抛光、齿轮加工、蜗轮加工、螺纹加工、超精密加工、钳工和刮削等。

（2）按加工精度区分

粗加工、半精加工、精加工、精整加工、修饰加工、超精密加工

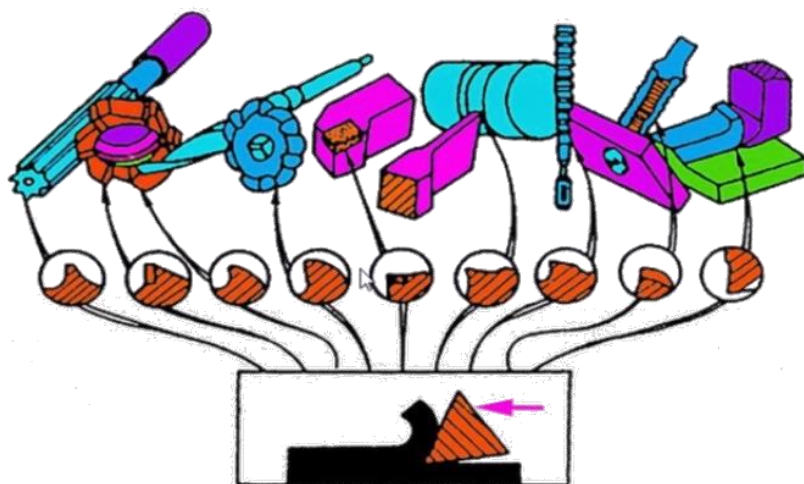
(3) 按表面形成方法区分

刀尖轨迹法、成形刀具法（成形法）、展成法（滚切法）

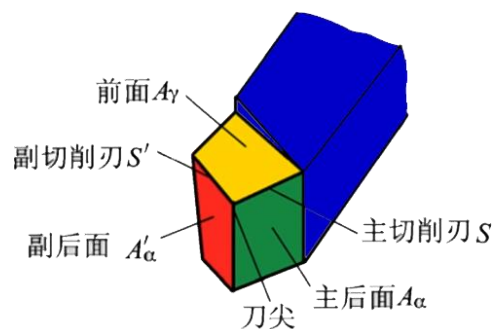
13.2 金属切削刀具

13.2.1 车刀切削部分的组成及结构

各种切削刀具其切削部分的基础形态都很近似于外圆车刀的切削部分。因此，将外圆车刀作为研究刀具与刀具角度的基础。



车刀 { 刀柄（夹持部分）
刀头（切削部分）



13.2.2 车刀切削部分的主要角度

(1) 刀具静止参考系

用来确定刀具几何角度的参考系有两类：

一类称为刀具静止参考系，又称标注参考系，是指在刀具设计、制造、刃磨和测量几何参数时用的参考系。另一类称为刀具工作参考系，用于规定刀具进行切削加工时几何参数的参考系。

工作参考系与静止参考系的区别在于它在确定参考系平面时考虑了进给运动及实际安装情况的影响。

刀具静止坐标系包括：基面、切削平面、正交平面、假定工作平面

基面：过切削刃选定点，垂直于该点假定主运动方向的平面

切削平面：过切削刃选定点，与切削刃相切，并垂直于基面的平面

正交平面：过切削刃选定点，并同时垂直于基面和切削平面的平面

假定工作平面：过切削刃选定点，垂直于基面并平行于假定进给运动方向的平面。

(2) 车刀的主要角度

刀具的标注角度是刀具在其静止参考系中的一组角度。和刃磨刀具所必须的，在刀具设计图上予以标注的角度。

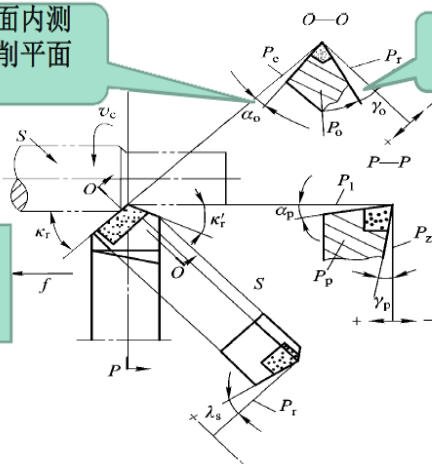
1) 在正交平面内测量的角度：前角和后角

主后角：在正交平面内测量的主后刀面与切削平面的夹角。

前角：在正交平面内测量的前刀面与基面的夹角。

主后角用来降低刀具与工件之间的摩擦与磨损

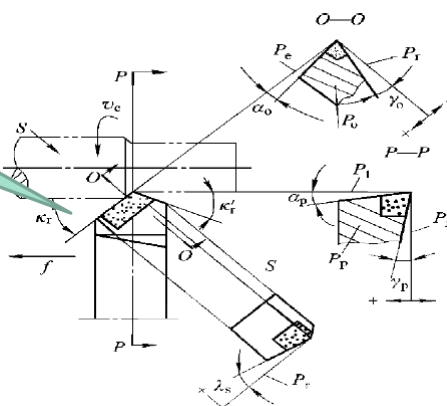
前角使刃口锋利，并影响切削刃强度



2) 在基面内测量的角度：主偏角和副偏角

主偏角：基面内测量的切削平面与假定工作平面之间的夹角

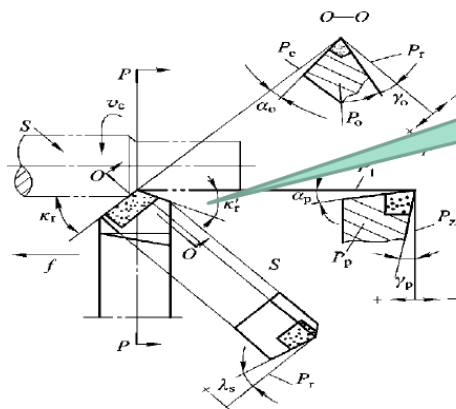
若刀刃为直线，主偏角为基面内测量的主切削刃在基面上的投影与进给运动方向的夹角。



主偏角影响切削分力的分配，同副偏角一起影响已加工表面的粗糙度。

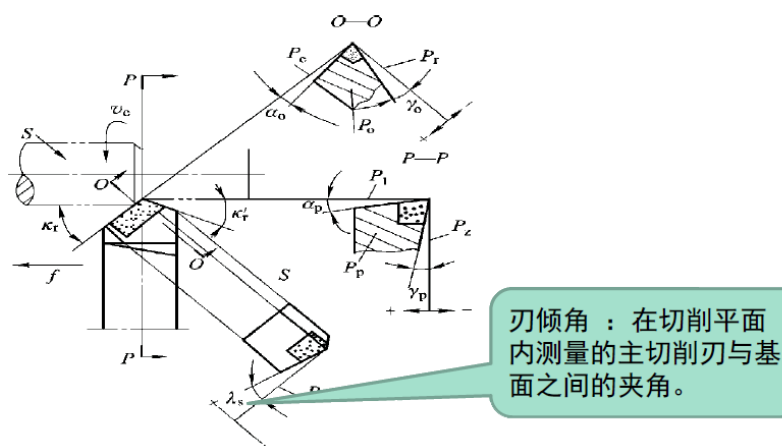
副偏角：基面内测量的副切削平面与假定工作平面之间的夹角

若刀刃为直线，副偏角为基面内测量的副切削刃在基面上的投影与进给运动方向的夹角。



副偏角作用是减少副刀刃与工件已加工表面的摩擦，减少切削振动。同主偏角一起影响已加工表面的粗糙度。

3) 在切削平面内测量的角度：刃倾角



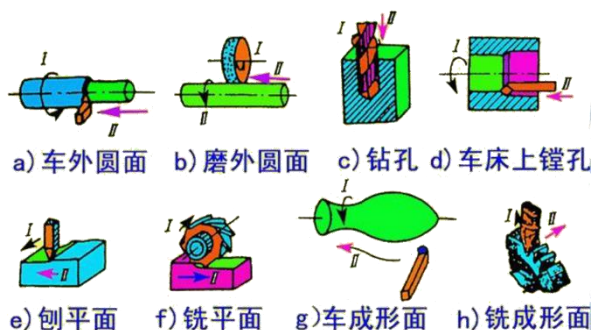
刃倾角大小不仅影响刀尖强度，还影响切屑的流向。

13.2.3 切削用量

为了形成各种零件表面的形状，切削加工过程中刀具和工件之间必须具有一定的相对运动，即切削运动，由机床提供。

主运动——一切下切屑所需的最基本的运动，速度最高，消耗功率最大。(只有一个)

进给运动——多余材料不断被投入切削，从而加工出完整表面所需的运动。(一个或几个)



切削用量用来表示切削加工中主运动和进给运动参数的量值。包括切削速度、进给量和被吃刀量三个量值。

(1) 切削速度 V_c

切削刃选定点相对于工件的主运动的瞬时速度，单位 m/s 或 m/min 。表示单位时间内工件和刀具沿主运动方向相对移动的距离。

主运动为旋转运动(如车削、铣削、钻削、镗削、磨削)，切削速度一般为其最大线速度。

主运动为往复直线运动(如刨削和插削等)，则常以其平均速度为切削速度。

(2) 进给量 f

在主运动的一个循环内，刀具在进给运动方向上相对工件的位移量。

1) 车削时, 进给量是工件每转一圈, 刀具沿进给运动方向移动的距离, 单位为 mm/r。

2) 在牛头刨床上刨平面时, 进给量是刨刀往复一次, 工件在进给运动方向上相对于刨刀的位移量, 单位 mm/str。

3) 用多齿刀具(如铣刀、钻头等)加工时, 进给运动的瞬时速度称进给速度, 以 v_f 表示, 单位 mm/s 或 mm/min。刀具每转或每行程中每齿相对工件进给运动方向上的位移量, 称每齿进给量, 以 f_z 表示, 单位为 mm/z。

(3) 背吃刀量 a_p

在垂直于进给运动方向上测量的主切削刃切入工件的深度, 又称切削深度(简称切深)。

对于外圆车削, 背吃刀量 a_p 等于工件已加工表面和待加工表面之间的垂直距离, 单位为 mm。

13.2.4 切屑形成过程及切屑种类

金属的切削过程也是切屑的形成过程, 其实质是一种挤压过程。切削塑性金属工件时, 材料受到刀具的作用以后, 开始产生弹性变形。随着刀具继续切入, 金属内部的应力、应变继续加大。当应力达到材料的屈服点时, 产生塑性变形。刀具再继续前进, 应力进而达到材料的断裂强度, 金属材料被挤裂, 并沿着刀具的前面流出而成为切屑。

切屑的种类: 带状切屑、节状切屑、崩碎切屑。

积屑瘤: 中等切削速度下切削塑性金属形成带状切屑时, 在刀具前刀面靠近切削刃的部位长出的一小块很硬的金属楔块即为积屑瘤。工件材质和切削速度是有利于产生积屑瘤的主要原因

13.3 常用切削加工的工艺特点及其应用

13.3.1 车削加工

车削加工是指在车床上利用车刀进行切削加工的一种方法。工件旋转是主运动, 刀具做直线进给运动。

车床有卧式车床、立氏车床、转塔车床、自动车床、数控车床。

工艺特点:

- (1) 易于保证工件各加工面的位置精度
- (2) 切削过程比较平稳
- (3) 适用于有色金属零件的精加工
- (4) 刀具简单

应用:

车锥面、车成型面、车螺纹。如内外圆柱面、圆锥面、回转曲面、螺纹、沟槽、断面和成型面

公差等级可达 IT9~IT8, 表面粗糙度 $Ra1.6\sim0.8\mu m$

13.3.2 铣削加工

<p>铣削机工是利用铣刀对工件进行切削加工的方法。主运动是铣刀的回转运动，进给运动是工作台带动工件的直线运动或曲线运动。</p> <p>铣削方式：</p> <p>（1）端铣和周铣</p> <p>端铣——用铣刀端面上的齿进行铣削</p> <p>周铣——用铣刀圆周上的齿进行铣削</p> <p>对比：</p> <p>1）端铣生产率高于周铣</p> <p>2）端铣的加工质量比周铣好</p> <p>3）周铣的适应性比端铣好。</p> <p>（2）顺铣和逆铣</p> <p>周铣铣平面又分为顺铣和逆铣</p> <p>逆铣——铣刀和工件接触部分的旋转方向与工件的进给方向相反</p> <p>顺铣——铣刀和工件接触部分的旋转方向与工件的进给方向相同</p> <p>对比：</p> <p>逆铣时，刀具磨损大，表面质量下降，垂直分力上抬工件，不利于压紧，易振动，但水平分力与进给运动方向相反，工作台丝杠与螺母紧密接触，切削平稳。</p> <p>顺铣时，刀具磨损小，工件冷作硬化程度轻，垂直分力有助于压紧工件，铣削过程平稳，但水平分力易使工作台窜动，造成切削过程不平稳，严重时打刀甚至损坏机床。</p> <p>工艺特点：</p> <p>（1）生产率较高</p> <p>（2）铣削时容易产生振动</p> <p>（3）刀齿散热条件较好</p> <p>应用：</p> <p>可用来加工平面、成形面、齿轮、沟槽（包括键槽、V形槽、燕尾槽、T形槽、圆弧槽、螺旋槽等）。还可用来加工孔。常用铣床有卧式铣床、立式铣床、万能铣床等。</p> <p>公差等级可达 IT8~IT7,表面粗糙度 Ra3.2~1.6μm</p> <p>13.3.3 刨削加工</p> <p>刨削是在刨床上利用刨刀进行切削的工艺方法。</p> <p>常用刨床有：牛头刨床、龙门刨床和插床等。</p> <p>工艺特点：</p> <p>（1）通用性好</p> <p>（2）生产率较低</p> <p>应用：</p>	
---	--

主要用于水平面、垂直面、斜面、直槽、V形槽及成形面等的加工。

公差等级可达 IT8~IT7,表面粗糙度 Ra6.3~1.6μm

13.3.4 磨削加工

磨削加工是利用砂轮作为切削工具的一种精密加工方法。砂轮的高速旋转运动为主运动，工件的旋转运动为圆周进给，工作台带动工件一起做往复直线运动为纵向进给，当工件一次性往复行程终了时，砂轮做周期性的横向进给。

磨床种类：外圆磨床、内圆磨床、平面磨床和工具磨床等。

磨削方法：纵磨法和横磨法

纵磨法磨削力小、产生热量少、散热较好。但生产效率较低，适合单件小批量生产，尤其加工细长轴

横磨法（切入磨法）：磨削力大，发热量多，磨削温度高，工件易发生变形和烧伤，适合表面不太宽且刚性较好的零件。

工艺特点：

- （1）加工精度高，表面粗糙度值小
- （2）径向分力大
- （3）磨削温度高
- （4）砂轮具有自锐性

应用：

用于加工零件的外圆面、内孔、平面及各种刀具的刃磨。

公差等级可达 IT7~IT6,表面粗糙度 Ra0.8~0.2μm.

13.3.5 钻削加工

钻削是孔加工的一种基本方法。钻孔一般在钻床上进行，也可以在车床、镗床或铣床上进行。常用的钻床有台式钻床、立式钻床和摇臂钻床。在钻床上钻孔时，主运动是刀具（钻头）旋转运动，进给运动是钻头沿工件孔的轴心线方向移动。在钻床上可实现钻孔、扩孔、铰孔、攻螺纹、铰孔、铰平面等。

工艺特点：

- （1）钻头容易引偏
- （2）排屑困难
- （3）切削热不易传散

应用：

钻孔

公差等级在 IT10 以下，表面粗糙度大于 Ra12.5μm.

13.4 切削机工零件的结构工艺性

- （1）便于安装

<ul style="list-style-type: none">1) 增加工艺凸台2) 增设装夹凸缘或装夹孔3) 改变结构或增设辅助安装面 <p>(2) 便于加工和测量</p> <ul style="list-style-type: none">1) 刀具的引进和推出要方便2) 尽量避免箱体内的加工面3) 凸缘上的孔要留出足够的加工空间4) 尽可能避免弯曲的孔5) 必要时, 留出足够的退刀槽、空刀槽和越程槽等。 <p>(3) 利于保证加工质量和提高生产效率</p> <ul style="list-style-type: none">1) 有相互位置精度要求的表面, 最好能在一次安装中加工2) 尽量减少安装次数3) 要有足够的刚度, 减少工件在夹紧力或切削力作用下的变形4) 孔的轴线应与其端面垂直5) 同类结构要素应尽量统一6) 尽量减少加工量 <p>(4) 提高标准化程度</p> <ul style="list-style-type: none">1) 尽量采用标准件2) 应能使用标准刀具加工 <p>(5) 合理规定表面的精度等级和粗糙度的数值</p> <p>(6) 合理采用零件的组合</p> <p>(7) 因地制宜</p>	
--	--

附录 6: 最近一学期学生评教结果统计

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	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 22:47:05.0	100
2	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 09:29:24.0	100
3	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 15:54:20.0	100
4	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 01:22:39.0	100
5	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 22:19:32.0	100
6	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 10:29:20.0	100
7	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 10:15:59.0	100
8	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 21:08:41.0	100
9	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 23:50:26.0	100
10	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 10:58:58.0	100
11	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 06:17:40.0	100
12	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 09:01:30.0	100
13	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-10 21:11:14.0	100
14	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 01:18:17.0	100
15	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 22:20:57.0	100
16	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 23:20:54.0	100
17	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 21:58:53.0	100
18	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 00:22:29.0	100
19	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 22:20:37.0	100
20	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 10:15:18.0	100
21	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 09:05:15.0	100
22	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 10:54:55.0	100
23	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 10:44:52.0	100
24	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 15:53:01.0	100
25	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 23:55:02.0	100
26	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 09:36:31.0	100
27	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 21:21:18.0	99.9
28	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 21:46:30.0	99.7
29	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 21:36:10.0	99.7
30	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 01:17:21.0	99.7
31	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 11:02:53.0	99.5
32	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 14:40:56.0	99.5
33	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 21:42:23.0	99.4
34	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 01:01:10.0	99.2
35	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 00:57:08.0	99.1
36	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 21:28:06.0	99.1
37	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 01:15:23.0	99.1
38	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 21:37:56.0	99

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
39	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 23:50:36.0	98.6
40	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 23:54:45.0	98.2
41	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-08 01:24:24.0	97.3
42	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 22:45:27.0	96.8
43	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-08 05:42:56.0	96.3
44	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-08 01:37:52.0	95.5
45	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-09 16:56:30.0	94.8
46	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 22:14:40.0	94.5
47	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-08 08:28:31.0	94.3
48	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-07 23:02:15.0	94.1
49	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-08 01:18:29.0	93.7
50	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-07 19:02:40.0	93.1
51	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-07 23:45:50.0	92.1
52	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计206A	2020-12-07 22:48:03.0	92
53	2020-2021-1	机械工程学院	工程材料与机械制造基础A	201804006	李逸仙	机械设计205A	2020-12-07 23:21:29.0	90.3
学期平均分								98.39

教学质量监控与评价处
2021年5月7日

附录 7: 最近一次学校对课堂教学评价

西安航空学院课堂教学质量评价表 (普通课)

督导、领导、同行听课用表

2020-2021 学年第 2 学期

任课教师	李逸仙	类别: <input checked="" type="checkbox"/> 专 <input type="checkbox"/> 兼 <input type="checkbox"/> 聘	职称	讲师	开课单位	机械工程学院
课程名称	工程材料与机械制造基础 C					
授课题目	表面热处理					
授课时间	2021 年 5 月 11 日 星期二 第 3 小节				授课地点	函教 1404
授课班级	机设 193		应到学生:	29	实到学生:	29 到课率: 100%
一级指标	二级指标				分值	得分
教学态度 (20 分)	1. 爱岗敬业, 为人师表, 师德师风良好。				10	10
	2. 仪态端庄大方, 言行文明。				2	2
	3. 教案书写认真规范, 教学资料齐全。				2	2
	4. 严格要求, 善于管理。				3	2
	5. 遵守教学规章制度, 按时上下课。				3	3
教学内容 (30 分)	1. 概念准确, 重点突出, 条理清晰。				10	10
	2. 教学组织合理, 内容充实, 深度、广度适宜。				10	10
	3. 内容娴熟, 能脱稿讲解。				10	10
教学方法 (20 分)	1. 结合课程特点, 发挥课程育人价值, 引导学生树立正确的世界观、人生观和价值观。				4	4
	2. 普通话教学, 语言生动流畅, 富有激情。				4	4
	3. 板书工整、规范, 合理应用多媒体课件。				4	4
	4. 因材施教, 教学方法灵活多样, 善于利用信息化教学手段。				4	4
	5. 注重师生互动, 善于理论联系实际。				4	4
教学效果 (30 分)	1. 教学体现 OBE 理念 (基于学习产出的教育模式)。重点关注学生学习效果, 根据反馈调整教学方法, 促进学生达成毕业目标。				10	10
	2. 能够调动学生学习的主动性、积极性。				10	10
	3. 课堂纪律好, 气氛活跃, 学生能够认真听讲, 积极思考, 大胆发言。				10	9
总分					100	98

听课记录

钢的表面热处理

通过快速加热,使钢件表面很快达到淬火温度,使其表面获得M组织,心部仍保持原始组织。

目的: 表硬里韧

分类: 感应加热, 火焰加热, 激光加热...

适用材料: 中碳钢或中碳合金钢, eg. 40, 45, 40Cr...

表面淬火后的回火及组织:

低温回火, 组织: 表: M回, 心: S回

总体评价

思路清晰, 内容娴熟, PPT与板书运用合理。

问题与建议

无

是否与授课教师沟通交流: ☒是 ☐否

是否与学生沟通交流: ☒是 ☐否

听课人类别: ☐校领导 ☐职能部门领导 ☒院(部)领导 ☐教研室主任 ☐教师

听课人单位: 机械工程学院教研室: 阮力 听课人(签字): 李莹

附录 8：课程团队成员和课程内容政治审查意见

学校政治审查意见

“工程材料与机械制造基础 A”申报本次省级线下一流课程，课程内容及上传的申报材料无危害国家安全、涉密及其他不适宜公开传播的内容，思想导向正确，不存在思想性问题。

该课程团队负责人及成员政治立场坚定，遵纪守法，无违法违纪行为，不存在师德师风、学术道德等方面问题，五年内未出现过重大教学事故。

中国共产党西安航空学院委员会

2021 年 5 月 15 日



附录 9：课程内容学术性评价意见

学校教学工作委员会对课程的评价意见

“工程材料与机械制造基础 A”课程遵循学校办学定位和人才培养理念，在专业人才培养方案中对学生培养目标的定位准确，着重培养机械零件的选材、热处理及机械制造工艺路线制定的能力，同时培养学生较强的科学探索精神、工程素质和责任意识、培育社会主义核心价值观。

“工程材料与机械制造基础 A”课程是机械设计制造及其自动化专业的一门重要专业核心课，体现工程材料与机械制造方面的基础知识，是课程团队教师通过深入地方航空制造企业，结合企业现实需求与先进技术，进行项目化的教学设计，借助校企合作平台，实现校企协同育人成效。课程整体上符合线下混合式一流课程的建设标准。同意推荐“工程材料与机械制造基础 A”课程参评线下混合式一流课程。

西安航空学院教学工作委员会

2021 年 5 月 15 日

委员签字：

