

第二批国家级一流本科课程申报书

(线下课程)

课程名称：塑性成形原理

专业类代码：0804

课程负责人：王琛

联系电话：15353652786

申报学校：西安航空学院

填表日期：2021年5月15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	塑性成形原理	是否曾被推荐	●是 ○否
课程负责人	王琛		
负责人所在单位	材料工程学院		
课程编码+选课编码 (教务系统中的编码)	B1410510.02		
课程分类	○通识课 ○公共基础课 ●专业课		
	□思想政治理论课 □创新创业教育课 □教师教育课 □实验课		
课程性质	○必修 ●选修		
开课年级	大三		
面向专业	材料成型及控制工程专业		
学时	48		
学分	3		
先修(前序)课程名称	工程力学、材料科学基础		
后续课程名称	锻造工艺与模具设计、冲压工艺与模具设计		
主要教材	<p>书名、书号、作者、出版社、出版时间 (上传封面及版权页)</p> <p>《金属塑性成形原理》，ISBN: 7111402824, 李尧, 机械工业出版社, 2013年。</p> 		

最近两期开课时间	<p>2019年2月26日—2019年5月16日 课程名称 教师名称 (上传教务系统截图)</p> 
	<p>2020年2月24日—2020年5月13日 课程名称 教师名称 (上传教务系统截图)</p> 
最近两期学生人数	112

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	王琛	1984.10	材料工程学院	材料加工教研室主任	副教授	15353652786	wangchen1110@126.com	教学、课程改革、线上课程建设
2	张金龙	1976.6	材料工程学院	教师	教授	15094092813	zj124931@163.com	教学、课程建设
3	张海鸿	1983.4	材料工程学院	材料学教研室主任	副教授	15249224929	Bessic150@163.com	线上课程建设

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）

主讲教师师德师风良好，近五年来，承担了塑性成形原理、铸造设备及自动化、工程材料及成型技术等材料成型及控制工程专业主干理论课程以及材料创新实验、材料创新设计等实践课程教学工作，工作量饱满，年平均工作量 330 课时；协助申报 2015 年度省级精品资源课程《工程材料及成型技术基础》，排名第 2；主持 2018 年校级优势专业核心建设课程《铸造设备及自动化》和 2019 年校级质量工程混合式教学改革项目《铸造设备及自动化》；作为教研室主任，积极开展专业建设，获得 2019 年校级优秀教学成果特等奖，排名第 5；陕西省教学成果二等奖，排名第 5；材料成型及控制工程专业获批 2020 年陕西“双万计划”省级一流本科专业建设点。

课程教学团队成员年龄、学历、职称组成合理，分工明确。一直致力于课程改革研究，近五年来，承担陕西省高等教育学会科学研究项目一项、教育部产学研合作协同育人项目一项、校级高等教育研究项目两项、校级质量工程项目四项，发表教改论文 6 篇，出版应用型教材 3 部。“教而不研则浅，研而不教则空”，教学团队成员深知科研反哺教学的重要性，近五年来，承担国家自然科学基金青年基金项目一项、陕西省科技厅项目三项、校级科研项目两项。

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）

依据学校鲜明的航空特色和应用型人才培养定位，结合材料成型专业培养目标，按照工程教育认证要求，制定《塑性成形原理》的课程目标。通过本课程的学习，学生获得的知识、能力如下：1、能够分析金属塑性变形行为以及外部条件对塑性和流动的影响，具备确定适宜的塑性变形工艺条件、获得优异力学性能的工艺途径的能力；2、能够掌握应力分析、应变分析、本构方程及屈服准则等塑性力学理论知识，初步具备工程思维和分析能力；3、能够将塑性力学经典分析方法应用于具体塑性成形工艺中，正确地确定变形体中的应力-应变分布和所需变形力，具有合理制定塑性成形工艺及选择设备、设计模具的理论基础，培养学生理论与实践相结合的能力和求真务实的精神。

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）

材料成型及控制工程专业是（2013 年），其前身是始建于 2000 年的模具设计与制造专业。本课程在学校第二批成功申报的本科专业《2013 级材料成型及控制工程专业人才培养方案》里，就作为塑性成形方向的主干课程出现，并一直受到高度重视。在最新基于工程教育认证的《2019 级材料成型及控制工程专业人才培养方案》里，对标多个指标点，在本专业学生培养的课程体系中占有重要地位。此外，本课程作为飞行器制造专业的专业选修课，已开设四届。

课程建设中，要解决的主要问题有：1、应用型人才培养定位体现不明显，教材中贴近生产的实例较少，无法打通从理论到实践的壁垒。2、课程内容较多，涵盖塑性成形中的力学基础、金属变形和流动的相关问题及几种塑性成形问题的解法，需要记忆的基础知识、基本原理及复杂公式较多，而课时较少，需要运用线上教学资源，辅助线下教学。3、理论性强、对数学知识依赖性强，学生学习难度大，致使学习积极性不高，如何激发学生的积极性，成为一个亟待解决的问题。

根据本课程的现状和特点，进行了一些探索。1、完善教学资料。在多媒体课件制作中，用 Deform 等相关软件制作了部分模拟视频、塑性变形相关动画、图片等，帮助学生理解复杂抽象知识点。2、案例教学方式探索。在前二章纯理论教学内容中添加工程案例，训练学生解决复杂问题的能力。教学团队成员已进行多次讨论，需要进一步与相关企业进行对接，优化工程实例，更好地服务课堂教学。3、科研反哺教学。任课教师在上课过程中，引入正在研究的科研项目的相关内容，培养学生参与科研的意识；将实验样品带入课堂，给予学生更加直观形象的认识。4、项目辅助教学方法探索。将塑性成形原理中相关内容，指导大学生创新创业、互联网+等项目，让学生的理论知识在项目中实践。任课教师指导的“高性能引线框架复合强化技术研究”和“组织超细化/纳米化增强超轻镁合金技术研究”，分别是 2017 年和 2019 年国家级大创项目；指导的“神奇工艺”-让超轻合金更强”项目，获 2019 年第五届中国“互联网+”大学生创新创业大赛陕西赛区铜奖。5、智慧课堂教学模式探索。教学团队成员积极探索新的

教学模式，与时俱进，教学过程中采用了“雨课堂”教学模式，特殊章节进行轻微翻转课堂。6、完善线上课程资源。课程团队成员已依托学校教学平台，将课程主要内容解构成24个小节，录制了34个教学视频，时长约1400分钟，配备了17套课堂练习题目，设置了41个任务点。作为学生课前预习、课后复习、期末考试复习的一手资料，并成为教师检测学生学习情况、优化教学内容的有效窗口。目前，已辅助完成三轮教学，效果良好。7、注重课程思政。在教学过程中，时刻谨记三全育人理念，始终把其融入教学全过程，注重引导学生树立正确的世界观、价值观和人生观，掌握科学思维和工程思维方法，筑牢航空报国理想。

成绩评定方式包含：学生的综合评定成绩是平时成绩*25%+期末成绩*75%。平时成绩采用过程性评价方式，包括课堂互动与回答问题表现（占平时成绩的20%）、课后作业完成情况（占平时成绩的50%）和学习通平台学习情况（占平时成绩的30%）。课堂互动部分依据雨课堂数据及教师上课记录完成；课后作业完成情况分数，利用雨课堂推送的课后题目，后台数据搜集分数，线下批改的部分依据批改成绩获得，分A、B、C三个等级；学习通平台观看预习资料情况、观看复习视频及完成练习题情况、章节测试情况、以及参与平台讨论情况，依据平台反馈数据直接换算得分。期末考试命题合理性和严谨性不断提升，综合性、突出应用型和能力考核类题目占比提升，试卷批改更规范，严格依据评分标准批改。

课程评价及改革成效：本课程自开设以来，学生评教效果良好，课程虽然有一定难度，但教学效果一直良好，总成绩的不及格率一直稳定在合理范围，近两年来不及格率下降到10%以下。课程改革后，教学方式配合评价方式的全面改革，使学生的学习积极性明显提高，对学生能力的培养更加凸显，试卷中客观题的分数有所上升，特别是综合类题目的正确率升高，证明学生解决复杂工程问题的能力有所提升。

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）

本课程已为材料成型及控制工程专业开设五届，在教学过程中逐渐形成了本课程的特色及适应本课程的授课方式。

1、突出应用型。课程教学团队成员坚守学校培养应用型工程技术人才的初心，依托学校位于阎良航空城的地理优势，借学院深化校企合作的东风，与校外实习基地建立联系。团队成员多次利用暑期前往企业锻炼，如西安嘉业航空科技有限公司，收集一线的生产案例，引入课堂教学中，引发学生的学习兴趣，提升课堂教学效果。

2、优化教学方法。按照反向设计原则，即根据国家、社会、行业和用人单位的需求，确定本课程对标的指标点，明确教学目标。根据教学目标的要求，结合本课程的特点，引入智慧课堂的教学模式。如在上课过程中，通过“雨课堂”等教学平台向学生实时推送练习题、获取学生不懂的知识点，学习效果及时反馈，便于教师进行难点精讲、知识补充、重点提升等教学内容。

3、科研反哺教学。科研成果是知识点的最新应用，在授课过程中，引入科研成果，相较教材上的案例，更能激发学生的学习兴趣，缩短学生与知识点之间的距离；教师勤勉严谨的科研态度和无私奉献的精神，也为学生树立了榜样，在学生心中埋下“崇尚科学、航空报国”的种子。

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）

本课程拟通过深化校企合作，在突出应用型的建设方面更加深入；同时继续深化、完善教学方法和考核方式的革新。具体改进措施如下：

1、借助校企合作多元模式，深化课程应用型建设

1) 改进项目式教学模式，从初期的利用校企合作中的实际生产问题提炼案例，逐步过渡到，课堂教学主动为企业解决实际问题，将企业中的未解难题经课堂理论教学分析出科学问题，并在一定程度上提供解决思路。

2) 开启校企联合授课培养模式。邀请企业资深技术人员来到课堂，讲解塑性变形原理在生产中的应用情况。

3) 校企合作编写《塑性成形原理》应用型教材。

2、教学方法和考核方式进一步革新

1) 授课方式改革

利用学校的教学平台，优化课程网络资源建设，辅助线下教学。计划总课时的三分之一录制微课视频。以分解知识点的方式进行讲解，每个视频时长不超过 15 分钟，作为学生预习和复习资料。

2) 考核方式变革

拟加入项目教学报告分数，即，根据项目中的实例给学生出综合性、设计性、创新性的题目，让学生以大作业的形式完成，并批改得分。适量提高案例式教学互动中的分数权重：在案例讲解过程中，以随堂测试的形式让学生解答部分步骤，并给出分数。

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
2. 教学设计样例说明
3. 最近一学期的教学日历
4. 最近一学期的测验、考试（考核）及答案
5. 最近两学期的学生成绩分布统计
6. 最近一学期的课程教案
7. 最近一学期学生评教结果统计
8. 最近一次学校对课堂教学评价
9. 教学实录视频
10. 课程团队成员和课程内容政治审查意见
11. 课程内容学术性评价意见

线下一流本科课程附件材料目录

- ~~~~~
~~~~~
1. 教学设计样例说明（共 7 页）
  2. 2019-2020-2 学期教学日历（共 4 页）
  3. 2019-2020-2 试卷（A、B 卷）及答案（共 16 页）
  4. 2018-2019-2 学期及 2019-2020-2 学期学生成绩分布统计（共 7 页）
  5. 2019-2020-2 学期课程教案（共 99 页）
  6. 2019-2020-2 学期及 2018-2019-2 学期学生评教结果统计（共 2 页）
  7. 2019-2020-2 学期学校对课堂教学评价（共 4 页）
  8. 课程团队成员和课程内容政治审查意见（共 1 页）
  9. 课程内容学术性评价意见（共 1 页）

注：“说课”视频及教学实录视频已上传至系统

## 《4.1 主应力法求解的基本原理》教学设计

学科：工学 专业：材料类

课程：《塑性成形原理》

适用对象：高等工科院校材料成型及控制工程专业

### 一、教学设计思路

提倡“以学生为中心，以教师为主导”的教学模式，注重发挥学生的主观能动性，培养学生的自学能力及探究的科学精神。采用基于雨课堂的问题驱动式、实时互动式教学方法，旨在打破课堂沉默状态，焕发课堂生机活力，提升课堂教学效果。

根据本节课内容，提前发送预习任务，设置预习问题，结合已有的知识储备，回答：1、什么是平面应变状态？2、平面应变状态有哪些特点？3、能否写出平面应变状态的应力张量？4、什么是主应力法？通过复习和预习，对本节课知识点进行回忆和学习，带着问题听课，有的放矢的完善自己的知识体系。并在此过程中了解自己的不足，锻炼学习能力。此过程的实施，不仅是获得了知识，而是探究思考的训练，稳固了知识架构。学会知识不是目的，学会自主学习和创新思维才是目标。

教学过程中，以问题启发式为主，辅以讲授法、归纳法、讨论法等，以“提出问题-分析讨论-设计步骤-总结类比-知识提升”为主线组织教学活动，达到教学目标要求。

### 二、教学背景分析

#### 1、教学内容分析

主应力法求解的基本原理是机械工业出版社出版的《金属塑性成形原理》第四章第一节的内容。基于前三章的学习，学生已经掌握了金属塑性变形的力学基础、塑性成形中金属变形与流动的相关问题等基本理论知识，已有利用主应力法求解塑性成形问题的基本知识储备。同时，本节课解题思路的形成，为后续学习本章镦粗变形、开式模锻变形、板料弯曲等变形力的计算、应力应变分布，有着重要作用。本节内容是本章的重要内容之一。

#### 2、学情分析

本课程共 48 学时，前面已学习了 32 课时，加之前三章理解记忆、分析推导的内容比较多，学生已到本学期（大三第二学期）的疲惫期。如何在此时调动学生课上积极性，成为一个亟待解决的问题。拟采用的措施：1) 加大督促管理力度，特别是课前预习阶段，学生对课上内容熟悉，极大的增强自信心。2) 加大鼓励力度。对课上表现较好的同学，要给予鼓励和表扬。3) 抓住一部分同学注意力，活跃课堂气氛，带动整个班级。

### 3、教学方式

PPT+板书、雨课堂互动、讨论法、归纳法等。

## 三、教学目标

### 1、知识目标

- 1) 通过分析引入的示例，掌握主应力法求解的实质。
- 2) 通过对示例的受力分析等，掌握主应力法求解的过程和步骤。

### 2、方法与过程目标

- 1) 经过分析、发现、总结等环节的训练，培养学生分析问题和解决问题的能力。
- 2) 通过课堂回答问题和参与雨课堂互动环节，培养学生语言组织、表达能力和逻辑思维能力。

### 3、情感态度与价值观目标

- 1) 通过课堂的小组讨论等环节，提升学生的团队协作和集体主义精神。
- 2) 在上课过程中，渗透“航空报国，勇挑重担”的爱国思想，帮助学生形成正确的人生观、价值观、世界观。

## 四、教学重难点

### 1、教学重点：

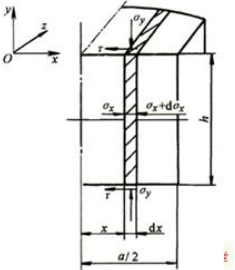
主应力法的实质、主应力法的求解步骤

### 2、教学难点：

变形体的受力分析、数学推导

## 五、教学过程

| 教学设计                  | 教师活动                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 学生活动                                                                                                | 设计意图                           |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 雨课堂点名（课前3-5min）       | 教师使用雨课堂插件开启PPT，展示二维码                                                                                                                                                                                                                                                                         | 学生扫描二维码进入课堂                                                                                         | 完成点名环节，学生进入雨课堂                 |
| 复习环节（3min）            | 提问：1、什么是平面应变状态？<br>2、平面应变状态的应力张量和应力平衡微分方程如何表达？                                                                                                                                                                                                                                               | 回答问题，并自行书写平面应力状态下的应力张量和应力平衡微分方程                                                                     | 引导学生回忆这节课所需知识点，为后面内容展开做好铺垫     |
| 新知引入金属塑性成形问题的求解（5min） | <p>前面学习了很多关于塑性变形的理论知识，从这一章开始，我们学习实际塑性问题的解法，给你已知的应力分量，你将如何确定变形力，进而进行模具设计，确定设备参数呢？（辅助动画）</p> <p>简要复习前导知识，并指出一般的解析方法需要利13个方程联立求解，计算十分复杂。引导学生简化问题，引入主应力法的概念。</p> <p>现在对本章内容进行简单的介绍。本章重点：主应力方法的原理及其应用于典型塑性成形问题分析；基本概念：主应力、基元体、变形力、单位流动应力；基本原理：平衡微分方程、屈服准则、摩擦条件、边界条件；基本方法：主应力法及其在典型塑性成形问题中的应用。</p> | <p>思考问题，并学习变形力的概念，工具对坯料施加的可引起塑性变形的作用力。</p> <p>跟着教师复习前导知识，思考主应力法求解。</p> <p>学生对本章的内容有初步了解，便于后续学习。</p> | <p>抛出实际案例，引出本章的重点内容，引导学生思考</p> |

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                        |                                                         |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <p>重点内容引出<br/>主应力法的基本原理<br/>(20min)</p> | <p>主应力法实质是将应力平衡微分方程和屈服方程联立求解；问题简化为平面问题或轴对称问题，或两者的组合问题；以便利用比较简单的塑性条件。举例：连杆模锻件成形。</p> <p>雨课堂发送思考题(10min)<br/>       题干：长<math>l</math>、宽<math>a</math>、高<math>h(l \gg a, h)</math>，无限长矩形板镦粗变形，已知应力分量和摩擦力<math>\tau</math>，变形力如何求解？</p>  <p>很多同学将解题思路发送到手机端，说明大家对本节的内容已进行了复习。结合学生回答问题的情况，引导式、讨论式归纳本题的解题思路。</p> | <p>思考：连杆模锻件可简化为什么问题？</p> <p>学生通过思考、同学之间讨论的方式，提供解题思路，回答解题所需知识点，并通过雨课堂将答案实时发送到教师手机端。</p> | <p>举例引导学生思考、归纳主应力法适用的求解模型。</p> <p>通过讨论题的形式，把课堂交给学生。</p> |
| <p>解题步骤详解<br/>(10min)</p>               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1、根据<math>(l \gg a, h)</math>，将问题简化为平面应变问题；</li> <li>2、切取如图基元体；</li> <li>3、基元体的应力分析；</li> <li>4、建立基元体的应力平衡微分方程；</li> <li>5、简化的塑性条件；</li> <li>6、联立求解接触面上正应力分布；</li> <li>7、根据边界条件确定积分常数；</li> <li>8、求变形力<math>F</math>和单位流动压力<math>p</math>。</li> </ol>                                                                                                  | <p>归纳解题步骤，集体给出答案，教师书写；思考解题的难点。</p>                                                     | <p>锻炼学生的归纳、语言组织和表达能力，以及逻辑思维能力</p>                       |

|                           |                                                                                                                                          |                         |                            |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 本章小结<br>(3min)            | 下面，我们一起把这一节的内容总结一下，主要有：1、主应力法的实质；2、主应力法的基本过程和步骤。<br>难点：应用----利用主应力法求解实际塑性变形过程（平面应变锻造粗型的变形力）                                              | 和教师一起总结                 | 进一步强调一下本节的重点内容             |
| 能力提升<br>(课后思考题)<br>(2min) | 这一节，我们学习了用主应力法求解平面应变锻造粗型的变形力求解，留一个课后思考题：<br>如何用主应力法求解圆柱体锻造粗时的变形力？<br>思考：1、和求解平面应变锻造粗型变形力有怎样的区别和联系？2、求解过程中难点在哪？<br>下节课，我们组织一次翻转课堂，请同学们讲解。 | 思考如何用主应力法求解圆柱体锻造粗时的变形力。 | 锻炼学生的归纳、类比能力，加深对主应力法求解的认识。 |
| 学情反馈<br>(雨课堂)             | 说一下本节课表现较好的同学，希望大家向他们学习。                                                                                                                 |                         | 鼓励表现好的同学，勉励其他同学。           |

## 六、板书设计

### ☆ 复习：平面应变状态（应力张量和应力平衡微分方程）

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

### ☆ 本节内容： 4.1 主应力法求解的基本原理

#### 一、主应力法的实质

应力平衡微分方程

屈服方程：  $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s$

#### 二、解题步骤（平面应变）



- 1、根据( $l \gg a, h$ ), 将问题简化为平面应变问题;
- 2、切取如图基元体 (PPT); 如何切取??
- 3、基元体的应力分析;
- 4、建立基元体的应力平衡微分方程; (X 方向)
- 5、简化的塑性条件;  $(-\sigma_x) - (-\sigma_y) = \frac{2}{\sqrt{3}} S;$
- 6、联立求解接触面上正应力分布;
- 7、根据边界条件确定积分常数; (自由表面,  $x=2/a$ )
- 8、求变形力  $F$  和单位流动压力  $p$ 。

☆ 本节小结:

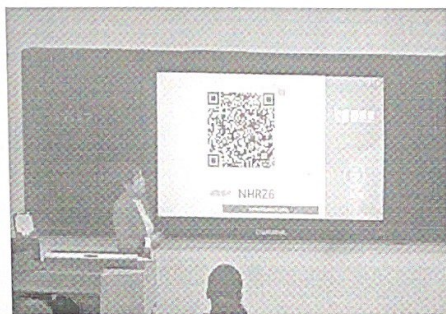
- 1、主应力法的实质; 2、主应力法的基本过程和步骤

## 七、教学总结

1、学习了平面应变状态下主应力法求解变形力, 为后续学习第四章其他章节打好基础。

2、通过整个教学环节的进行, 使学生提升了自主学习的能力。引导学生通过自主学习-找到问题-带着问题听课这样的方式获取知识。学生从自我学习中, 体会到获取知识的乐趣; 从参与课堂教学中找到问题的答案, 锻炼了能力。

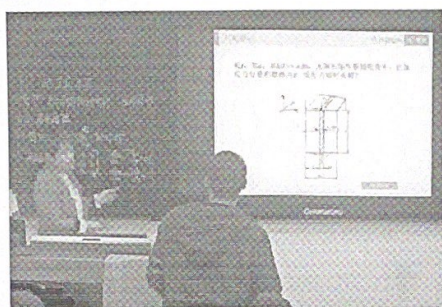
附：教学活动照片



扫码进课堂



学生认真听课




回答问题



课堂互动



课堂讨论

课程负责人： 

2021年5月15日

国家级一流本科课程申报课程教学日历

申报学校(盖章):



课程名称: 塑性成形原理

课程负责人: 王琛

| 序号 | 日期        | 周次 | 讲次 | 学时(分钟)   | 教学内容(要点)                                 | 授课地点 | 学生人数 | 教学形式          |
|----|-----------|----|----|----------|------------------------------------------|------|------|---------------|
| 1  | 2020.2.24 | 1  | 1  | 2(100分钟) | 熟悉金属塑性成形的特点及分类;了解金属塑性成形理论的发展概况;了解本课程的任务。 | 线上   | 35   | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 2  | 2020.2.26 | 1  | 2  | 2(100分钟) | 了解金属塑性成形的物理基础;熟悉金属塑性成形过程的受力分析。           | 线上   | 35   | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 3  | 2020.3.2  | 2  | 3  | 2(100分钟) | 了解应力分析的截面法;熟悉三维坐标系的应力分量和应力张量。            | 线上   | 35   | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 4  | 2020.3.4  | 2  | 4  | 2(100分钟) | 熟悉任意斜面上的应力;掌握主应力和应力不变量。                  | 线上   | 35   | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 5  | 2020.3.9  | 3  | 5  | 2(100分钟) | 掌握主切应力和最大切应力;熟悉应力球张量和应力偏张量。              | 线上   | 35   | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |

|    |           |   |    |           |                                                     |    |    |               |
|----|-----------|---|----|-----------|-----------------------------------------------------|----|----|---------------|
| 6  | 2020.3.11 | 3 | 6  | 2 (100分钟) | 掌握应力平衡微分方程；熟悉平面应力状态和轴对称应力状态。                        | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 7  | 2020.3.16 | 4 | 7  | 2 (100分钟) | 掌握应力莫尔圆（三种）。                                        | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 8  | 2020.3.18 | 4 | 8  | 2 (100分钟) | 熟悉质点的应变状态；掌握小变形几何方程及应变连续方程。                         | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 9  | 2020.3.23 | 5 | 9  | 2 (120分钟) | 了解应变增量和应变速率张量；掌握塑性变形程度的表达式；熟悉塑性变形体积不变条件、平面变形和轴对称变形。 | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 10 | 2020.3.25 | 5 | 10 | 2 (120分钟) | 掌握屈雷斯加(H•Tresca)屈服准则、密席斯(Von•Mises)屈服准则。            | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 11 | 2020.3.30 | 6 | 11 | 2 (120分钟) | 掌握屈服准则的几何表达及简化表达式；了解硬化材料的屈服准则。                      | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 12 | 2020.4.1  | 6 | 12 | 2 (100分钟) | 了解弹性、塑性应力应变关系；掌握塑性变形的增量理论和全量理论。                     | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 13 | 2020.4.8  | 7 | 13 | 2 (100分钟) | 掌握拉伸、压缩试验曲线；熟悉实际应力—应变曲线的简化形式。                       | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |

|    |           |   |    |          |                                                                                                      |    |    |               |
|----|-----------|---|----|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|---------------|
| 14 | 2020.4.13 | 7 | 14 | 2（100分钟） | 掌握最小阻力定律；掌握影响金属塑性、塑性变形和流动的因素；掌握变形条件对金属塑性的影响及提高金属塑性的途径；了解摩擦、工具形状、不均匀对金属塑性变形和流动的影响。                    | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 15 | 2020.4.18 | 8 | 15 | 2（100分钟） | 了解超塑性的分类、结构超塑性的力学特性及影响超塑性的主要因素，熟悉其变形机制；掌握加工硬化现象和机理及工硬化的后果及应用；了解不均匀变形、附加应力和残余应力；了解断裂的物理本质及塑性加工中金属的断裂。 | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 16 | 2020.4.20 | 8 | 16 | 2（100分钟） | 掌握塑性成形时摩擦的分类、机理、特点和其影响，熟悉影响摩擦系数的因素，掌握塑性加工中摩擦系数的测定方法；了解塑性成形时的润滑，不同塑性加工条件下的摩擦系数。                       | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 17 | 2020.4.22 | 9 | 17 | 2（100分钟） | 掌握主应力法的基本原理及实质。                                                                                      | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 18 | 2020.4.26 | 9 | 18 | 2（100分钟） | 掌握镦粗变形的特点；熟悉圆柱体镦粗变形力、变形功计算。                                                                          | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |

|    |           |    |    |          |                                                                                         |    |    |               |
|----|-----------|----|----|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|----|---------------|
| 19 | 2020.4.27 | 10 | 19 | 2（100分钟） | 熟悉开式模锻变形特点及变形力计算。                                                                       | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 20 | 2020.4.29 | 10 | 20 | 2（100分钟） | 了解滑移线的形成，熟悉 $\alpha$ 、 $\beta$ 滑移线和 $\omega$ 角的规定及滑移线的微分方程；掌握滑移线场的应力方程；掌握滑移线的沿线特性、跨线性质。 | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 21 | 2020.5.6  | 11 | 21 | 2（100分钟） | 掌握常见的滑移线场、数值积分法、近似图解法；掌握应力边界条件                                                          | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 22 | 2020.5.8  | 11 | 22 | 2（100分钟） | 熟悉冲头压入半无限体；了解平砧压缩高坯料、粗糙平板间压缩长坯料。                                                        | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 23 | 2020.5.11 | 12 | 23 | 2（100分钟） | 了解变形功法的基本原理，熟悉计算举例；了解上限法的基本概念，熟悉平面变形问题的上限原理；塑性材料力学法求解原理及计算，了解刚塑性有限元法刚塑性有限元法在塑性成形中的应用。   | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |
| 24 | 2020.5.13 | 12 | 24 | 2（100分钟） | 复习                                                                                      | 线上 | 35 | 学习通+腾讯会议嵌套雨课堂 |

# 西安航空学院课程考试试卷

2019~2020 学年第 2 学期期末考试

塑性成形原理 试卷 A



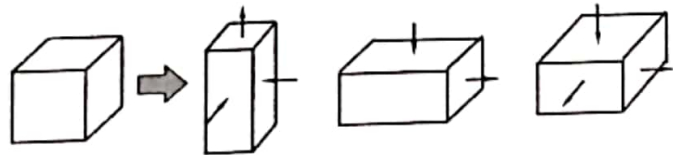
|     |   |   |   |   |    |     |
|-----|---|---|---|---|----|-----|
| 题号  | 一 | 二 | 三 | 四 | 总分 | 总分人 |
| 得分  |   |   |   |   |    |     |
| 阅卷人 |   |   |   |   |    |     |

适用班级：材料成型 2114

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

## 一、填空题（每空 1 分，共 25 分）

- 在塑性加工中，主要靠拉力作用成形的有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_，主要靠剪切力作用成形的有\_\_\_\_\_。
- 主切应力平面共有\_\_\_\_\_个，它们分别与一个主平面\_\_\_\_\_，与另外两个主平面交成\_\_\_\_\_角。
- 下面三个主应力状态图所代表的变形类型分别为\_\_\_\_\_变形、\_\_\_\_\_变形和\_\_\_\_\_变形。



4. 有三种应力状态  $\sigma_a = \begin{pmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & -30 & 0 \\ 0 & 0 & 40 \end{pmatrix}$ ;  $\sigma_b = \begin{pmatrix} 40 & 0 & 0 \\ 0 & -50 & 0 \\ 0 & 0 & -60 \end{pmatrix}$ ;  $\sigma_c = \begin{pmatrix} -60 & 0 & 0 \\ 0 & -80 & 0 \\ 0 & 0 & -50 \end{pmatrix}$ ,

- 则三种情况下金属的塑性高低为：点\_\_\_\_\_塑性高于点\_\_\_\_\_塑性，高于点\_\_\_\_\_塑性。
- 屈服准则函数在主应力坐标平面上的几何图形是封闭的曲线，称为\_\_\_\_\_。
  - 与相对应变相比，对数应变具有的特点是：\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
  - 就大部分金属而言，其总的趋势是：随着温度的\_\_\_\_\_，塑性增加。
  - 开式模锻过程可分为\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和多余金属挤入飞边槽三个阶段。
  - 滑移线的两个基本特性是\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。
  - 求解金属塑性成形问题的方法，除了较常使用的主应力法和滑移线法外，还有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

## 二、判断题（每题 2 分，共 18 分）

- 主应力图共有九种，其中三向应力状态有四种，两向应力状态有三种，单向应力状态有两种。（ ）
- 在作应力莫尔圆时，正应力以压缩为负，切应力以顺时针作用于单元体上为负（ ）。
- 若主应力空间中一点的应力状态矢量的端点 P 位于屈服表面外部，则该端点处于塑性状态。（ ）

# 西安航空学院课程考试试卷

4. 对于应变硬化材料，卸载后再重新加载，其屈服应力就是卸载时的屈服应力，比初始屈服应力要高。（      ）
5. 细晶组织比粗晶组织具有更好的塑性。（      ）
6. 适合正压力不太大、变形量较小的冷成形工序的摩擦条件是最大摩擦条件。（      ）
7. 用主应力法求解金属塑性成形问题时，应根据金属流动方向，沿变形体截面（纵截面）切取包含接触面在内的基元体。（      ）
8. 根据主应力法，常摩擦条件下，无限长矩形板镦粗变形接触面上的正应力分布各处均相等。（      ）
9. 滑移线两侧的最大切应力组成顺时针方向的为 $\beta$ 族线。（      ）

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

## 三、名词解释（每题 3 分，共 12 分）

1. 点的应变状态：
2. 最小周边法则：

3. 流体摩擦：

4. 均匀应力场：

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

## 四、简答题（4 小题，共 25 分）

1. 试分别写出平面应力状态、平面应变状态时的应力状态的应力张量（任意坐标系和主轴坐标系）、应力平衡微分方程及平均应力表达式。（本题 7 分）



# 西安航空学院课程考试试卷

2. 简述塑性的概念，并说明影响金属塑性变形和流动的因素。（本题 5 分）

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

3. 简述主应力法的实质，并说明用主应力法求解塑性变形问题时进行了哪些简化。

（本题 6 分）

4. 简述滑移线场的概念，并说明判断 $\alpha$ 和 $\beta$ 族线的方法。（本题 7 分）

## 五、计算题（2 小题，共 20 分）

1. 已知一点的应力状态表示成张量形式为  $\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 7 & 0 & -7 \\ 0 & -7 & 0 \\ -7 & 0 & 7 \end{pmatrix}$  (MPa)

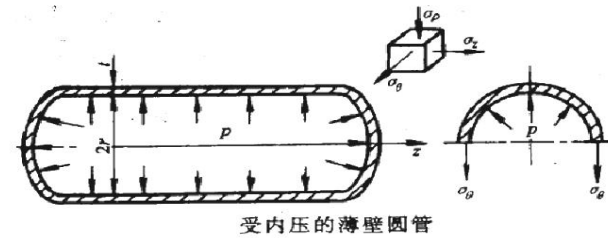
试求：1) 画出该点的应力单元体。

2) 用应力状态特征方程求出该点的主应力和主方向。

3) 画出该点的应力莫尔圆，并写出圆心坐标和半径长度。（本题 12 分）

## 西安航空学院课程考试试卷

2. 一个两端封闭的薄壁圆管如下图所示，管内承受的内应力为  $p=35\text{MPa}$ ，薄壁管的平均半径为  $r=300\text{mm}$ ，若采用剪切屈服强度  $K=400\text{MPa}$  的材料作管壁，为了保证薄壁管处于弹性变形状态，分别用 Tresca 和 Mises 屈服准则求出管壁最小厚度  $t$  应为多少？（本题 8 分）



受内压的薄壁圆管

## 西安航空学院课程考试-参考答案及评分标准

2019~2020 学年第 2 学期期末考试

塑性成形原理 试卷 A



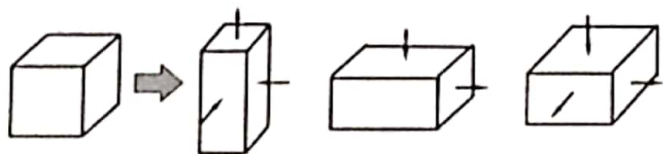
|     |   |   |   |   |   |    |     |
|-----|---|---|---|---|---|----|-----|
| 题号  | 一 | 二 | 三 | 四 | 五 | 总分 | 总分人 |
| 得分  |   |   |   |   |   |    |     |
| 阅卷人 |   |   |   |   |   |    |     |

适用班级：材料成型 2114

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

一、填空题（每空 1 分，共 25 分）（注：答对一空得一分，答错或不答不得分）

1. 在塑性加工中，主要靠拉力作用成形的有拉拔、冲压和拉形，主要靠剪切力作用成形的有剪切。
2. 主切应力平面共有12个，它们分别与一个主平面垂直，与另外两个主平面交成45°角。
3. 下面三个主应力状态图所代表的变形类型分别为伸长类变形、平面应变变形和压缩类变形。



4. 有三种应力状态  $\sigma_a = \begin{pmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & -30 & 0 \\ 0 & 0 & 40 \end{pmatrix}$ ;  $\sigma_b = \begin{pmatrix} 40 & 0 & 0 \\ 0 & -50 & 0 \\ 0 & 0 & -60 \end{pmatrix}$ ;  $\sigma_c = \begin{pmatrix} -60 & 0 & 0 \\ 0 & -80 & 0 \\ 0 & 0 & -50 \end{pmatrix}$ ,

则三种情况下金属的塑性高低为：点 c 塑性高于点 b 塑性，高于点 a 塑性。

5. 屈服准则函数在主应力坐标平面上的几何图形是封闭的曲线，称为屈服轨迹。
6. 与相对应应变相比，对数应变具有的特点是：叠加性和可比性。
7. 就大部分金属而言，其总的趋势是：随着温度的升高，塑性增加。
8. 开式模锻过程可分为镦粗、充满模腔和多余金属挤入飞边槽三个阶段。
9. 滑移线的两个基本特性是沿线特性和跨线特性。
10. 求解金属塑性成形问题的方法，除了较常使用的主应力法和滑移线法外，还有变形功法、上限法、塑性材料力学法和有限元法。

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

二、判断题（每题 2 分，共 18 分）（注：判断正确一题得两分，判断错误或不答不得分）

1. 主应力图共有九种，其中三向应力状态有四种，两向应力状态有三种，单向应力状态有两种。（）
2. 在作应力莫尔圆时，正应力以压缩为负，切应力以顺时针作用于单元体上为负（）。

## 西安航空学院课程考试-参考答案及评分标准

3. 若主应力空间中一点的应力状态矢量的端点 P 位于屈服表面外部，则该端点处于塑性状态。( × )
4. 对于应变硬化材料，卸载后再重新加载，其屈服应力就是卸载时的屈服应力，比初始屈服应力要高。( √ )
5. 细晶组织比粗晶组织具有更好的塑性。( √ )
6. 适合正压力不太大、变形量较小的冷成形工序的摩擦条件是最大摩擦条件。( × )
7. 用主应力法求解金属塑性成形问题时，应根据金属流动方向，沿变形体截面（纵截面）切取包含接触面在内的基元体。( √ )
8. 根据主应力法，常摩擦条件下，无限长矩形板镦粗变形接触面上的正应力分布各处均相等。( × )
9. 滑移线两侧的最大切应力组成顺时针方向的为β族线。( × )

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

### 三、名词解释（每题 3 分，共 12 分）（注：答对一题得 3 分，答题不完整酌情给分，答错或不答不得分）

1. 点的应变状态：变形体内某一点任意截面上应变的大小及方向。
2. 最小周边法则：存在接触面摩擦时，物体各质点向周边流动的阻力与质点离周边的距离成正比，因而必然向周边最短法线流动，周边形状表现为最小的圆形。
3. 流体摩擦：当变形金属与工具表面之间的润滑剂层较厚，两表面完全被润滑剂

隔开时的润滑状态下的摩擦称为流体摩擦。

4. 均匀应力场：如果在滑移线场的某一区域内，两族滑移线皆为直线，则此区域内各点的应力状态相同，称为均匀应力场。

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

### 四、简答题（4 小题，共 25 分）（注：答对要点给相应分数，答题不完整酌情给分，答错或不答不得分）

1. 试分别写出平面应力状态、平面应变状态时的应力状态的应力张量（任意坐标系和主轴坐标系）、应力平衡微分方程及平均应力表达式。（本题 7 分）

答：1) 平面应力状态：（3 分）

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

2) 平面应变状态时的应力状态：（3 分）

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$3) \quad \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1 \text{ 分})$$

## 西安航空学院课程考试-参考答案及评分标准

2. 简述塑性的概念，并说明影响金属塑性变形和流动的因素。（本题 5 分）

答：概念：金属在外力作用下能稳定地改变自己的形状和尺寸，而各质点间的联系不被破坏的性能称为塑性。（1分）

影响因素：摩擦（1分）；工具形状（1分）；金属各部分之间的关系（1分）；金属本身性质不均匀（1分）。

3. 简述主应力法的实质，并说明用主应力法求解塑性变形问题时进行了哪些简化。（本题 6 分）

答：实质：将应力平衡微分方程和屈服方程（或塑性条件）联立求解。（2分）

简化：1) 问题简化为平面问题或轴对称问题，或两者的组合问题；（1分）

2) 建立简化的应力平衡常微分方程；（1分）

3) 屈服准则简化基元体的塑性条件；（1分）

4) 变形区几何形状简化。（1分）

4. 简述滑移线场的概念，并说明判断 $\alpha$ 和 $\beta$ 族线的方法。（本题 7 分）

答：概念：由两族相互正交的滑移线组成的网络，称为滑移线场。（3分）

判断方法：1) 当 $\alpha$ 、 $\beta$ 族线构成右手坐标系时，代数值最大的主应力 $\sigma_1$ 的作用方向位于第一与第三象限。此时滑移线两侧的最大切应力组成顺时针方向的为 $\alpha$ 族线，组成逆时针方向的为 $\beta$ 族线；（2分）

2) 已知主应力 $\sigma_1$ 方向时，将它沿顺时针方向旋转得到 $\alpha$ 族线，沿逆时针方向旋转得到 $\beta$ 族线。（2分）

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

五、计算题（2 小题，共 20 分）（注：根据得分点分数给出相应分数，答错或不答不得分）

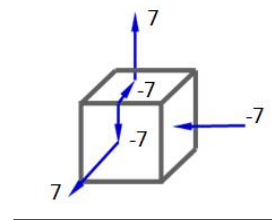
1. 已知一点的应力状态表示成张量形式为  $\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 7 & 0 & -7 \\ 0 & -7 & 0 \\ -7 & 0 & 7 \end{pmatrix}$  (MPa)

试求：1) 画出该点的应力单元体。

2) 用应力状态特征方程求出该点的主应力和主方向。

3) 画出该点的应力莫尔圆，并写出圆心坐标和半径长度。（本题 12 分）

解：1) (3分)



2) (6分)

将各应力分量代入应力张量不变量公式，可得

$$J_1=7 \quad J_2=98 \quad J_3=0 \quad (2 \text{分})$$

代入应力状态特征方程得：

$$\sigma^3 - 7\sigma^2 - 98\sigma = 0$$

$$\sigma(\sigma - 14)(\sigma + 7) = 0$$

## 西安航空学院课程考试-参考答案及评分标准

$\sigma_1=14$        $\sigma_2=0$        $\sigma_3=-7$       (2分)

将应力分量代入式 (2-11), 并与 (2-12) 联合写出方程组:

$$\begin{cases} (7-\sigma)l-n=0 \\ (-7-\sigma)m=0 \\ -7l+(7-\sigma)n=0 \\ l^2+m^2+n^2=1 \end{cases}$$

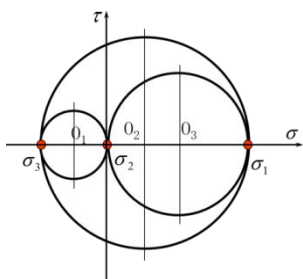
为求主方向, 可将解得的三个主应力值分别代入上述方程组的前三式中的任意两式, 并与第四式联立求解, 可得三个主方向的方向余弦为:

对于  $\sigma_1=14$ :  $l_1=1/\sqrt{2}, m_1=0, n_1=-1/\sqrt{2}$

对于  $\sigma_2=0$ :  $l_2=1/\sqrt{2}, m_2=0, n_2=1/\sqrt{2}$

对于  $\sigma_3=-7$ :  $l_3=0, m_3=1, n_3=0$       (2分)

3) (3分)



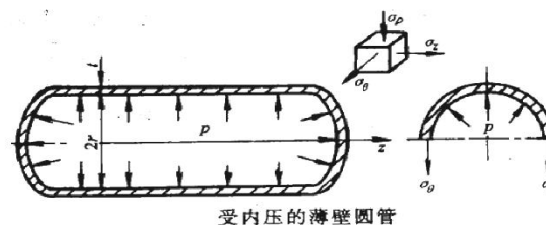
(2分)

三个圆的圆心分别为 (7, 0)、(3.5, 0)、(-3.5, 0), 半径分别为 7、10.5、3.5。

(1分)

2. 一个两端封闭的薄壁圆管如下图所示, 管内承受的内应力为  $p=35\text{MPa}$ , 薄壁管的平均半径为  $r=300\text{mm}$ , 若采用剪切屈服强度  $K=400\text{MPa}$  的材料作管壁, 为了保证薄壁管处于弹性变形状态, 分别用 Tresca 和 Mises 屈服准则求出管壁最小厚度

$t$  应为多少? (本题 8 分)



解:  $\sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{pr}{t}$        $\sigma_2 = \sigma_z = \frac{pr}{2t} = \frac{\sigma_1}{2}$        $\sigma_3 = \sigma_\rho \approx 0$

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{pr}{t} = \frac{35\text{MPa} \times 300\text{mm}}{t}$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = \frac{pr}{2t} = \frac{35\text{MPa} \times 300\text{mm}}{2t}$$

$$\sigma_3 = \sigma_\rho \approx 0$$
      (2分)

1) 根据 Tresca 屈服准则:  $\sigma_1 - \sigma_3 = 2K = \sigma_s$  (1分)

$$\sigma_1 = \frac{35\text{MPa} \times 300\text{mm}}{t} = 800\text{MPa}$$

$$t = 13.1\text{mm} \quad (2分)$$

所以根据 Tresca 屈服准则, 管壁最小厚度为 13.1mm。

2) 根据 Mises 屈服准则  $\left(\sigma_1 - \frac{\sigma_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_1}{2}\right)^2 + (-\sigma_1)^2 = 6K^2 = 2\sigma_s^2$  (1分)

$$\sigma_1 = \frac{35\text{MPa} \times 300\text{mm}}{t} = 800\text{MPa}$$

$$t = 13.1\text{mm} \quad (2分)$$

所以根据 Mises 屈服准则, 管壁最小厚度为 13.1mm。

# 西安航空学院课程考试试卷

2019~2020 学年第 2 学期期末考试

塑性成形原理 试卷 B

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

适用班级：材料成型 2114

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

## 一、填空题（每空 1 分，共 25 分）

1. 在塑性加工中，主要靠压力作用成形的的方式有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_，主要靠弯矩作用成形的的方式是\_\_\_\_\_。

2. 在主应力状态下，任意两个主平面的角平分面必为\_\_\_\_\_；主切应力值等于相邻两个主平面上主应力值的\_\_\_\_\_的一半；正应力值为相邻两个主平面上主应力值的\_\_\_\_\_的一半。

3. 有三种应力状态  $\sigma_a = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$ ； $\sigma_b = \begin{pmatrix} -10 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$ ； $\sigma_c = \begin{pmatrix} -10 & 0 & 0 \\ 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & -10 \end{pmatrix}$ ，

则三种情况下金属的塑性高低为：点\_\_\_\_\_塑性高于点\_\_\_\_\_塑性，高于点\_\_\_\_\_塑性。

4. 应力球张量只使物体产生\_\_\_\_\_变化，而不能产生\_\_\_\_\_变化。材料的塑性变形是由\_\_\_\_\_引起的。

5. 屈服准则函数在主应力空间的几何图形是个封闭的空间曲面，称为\_\_\_\_\_。

6. 相对应变适用于\_\_\_\_\_，对数应变适用于\_\_\_\_\_。

7. 变形体的尺寸（体积）会影响金属的塑性，尺寸越大，塑性越\_\_\_\_\_。

8. 模锻是在外力作用下，利用模具使金属坯料产生塑性变形并充满型腔的锻造方法，可分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_两种类型。

9. 滑移线两侧的最大切应力组成顺时针方向的为\_\_\_\_\_族线，组成逆时针方向的为\_\_\_\_\_族线。

10. 求解金属塑性成形问题的方法，除了较常使用的主应力法和滑移线法外，还有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

## 二、判断题（每题 2 分，共 18 分）

1. 任意斜面上正应力 $\sigma$ 和切应力 $\tau$ ，随方向余弦的变化而变化。（     ）

2. 切应变夹角增大时为负。（     ）

3. 若主应力空间中一点的应力状态矢量的端点 P 位于屈服表面上，则该端点处于弹性状态。（     ）

4. 弹性变形时，泊松比等于 0.5。（     ）

5. 单相组织（纯金属或固溶体）比多相组织塑性好。（     ）

6. 适合正压力不太大、变形量较小的冷成形工序的摩擦条件是摩擦力不变条件。

# 西安航空学院课程考试试卷

( )

7. 主应力法只能用来求解轴对称问题或平面问题。( )

8. 锻造变形的三个变形区是难变形区、大变形区和小变形区。( )

9.  $\alpha$ 线的切线方向与  $Ox$  轴的夹角以  $\omega$  表示，并规定  $Ox$  轴的正向为  $\omega$  角的量度起始线，逆时针旋转形成的  $\omega$  角为正。( )

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

### 三、名词解释（每题 3 分，共 12 分）

1. 应力张量：

2. 加工硬化：

3. 摩擦：

4. 简单应力场：

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

### 四、简答题（4 小题，共 25 分）

1. 简述应变张量的概念和基本性质。（本题 7 分）

2. 简述残余应力产生的原因及消除制品内残余应力的措施。（本题 5 分）



# 西安航空学院课程考试试卷

3. 简述开式模锻过程分为哪几个阶段及飞边槽有哪些作用。(本题 6 分)

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

4. 简述滑移线的概念，试将应力分量用  $\sigma_m$  和  $K$  表示，并写出汉基应力方程。

(本题 7 分)

## 五、计算题 (2 小题, 共 20 分)

1. 已知一点的应力状态表示成张量形式为  $\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & -2 \\ 0 & -2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 \end{pmatrix}$  (MPa)

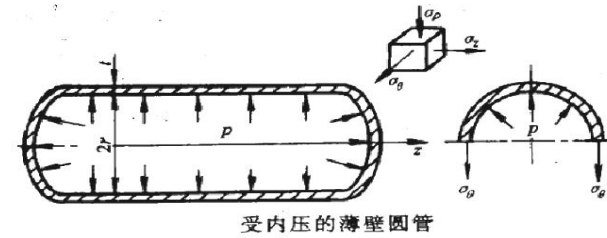
试求：1) 画出该点的应力单元体。

2) 用应力状态特征方程求出该点的主应力和主方向。

3) 画出该点的应力莫尔圆，并写出圆心坐标和半径长度。(本题 12 分)

## 西安航空学院课程考试试卷

2. 一个两端封闭的薄壁圆管如下图所示，管内承受的内应力为  $p$ ，薄壁管的平均半径为  $r=400\text{mm}$ ，壁厚  $t$  为  $40\text{mm}$ ，若采用剪切屈服强度  $K=400\text{MPa}$  的材料作管壁，为了保证薄壁管处于弹性变形状态，分别用 Tresca 和 Mises 屈服准则求出管壁所能承受的最大内应力  $p$  为多少？（本题 8 分）



# 西安航空学院课程考试-参考答案及评分标准

## 2019~2020 学年第 2 学期期末考试

### 塑性成形原理 试卷 B

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

适用班级：材料成型 2114

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

一、填空题（每空 1 分，共 25 分）（注：答对一空得一分，答错或不答不得分）

1. 在塑性加工中，主要靠压力作用成形的方式有轧制、锻造和挤压，主要靠弯矩作用成形的方式是弯曲。

2. 在主应力状态下，任意两个主平面的角平分面必为主切应力平面；主切应力值等于相邻两个主平面上主应力值的差的一半；正应力值为相邻两个主平面上主应力值的和的一半。

3. 有三种应力状态  $\sigma_a = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$ ； $\sigma_b = \begin{pmatrix} -10 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$ ； $\sigma_c = \begin{pmatrix} -10 & 0 & 0 \\ 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & -10 \end{pmatrix}$ ，

则三种情况下金属的塑性高低为：点c 塑性高于点b 塑性，高于点a 塑性。

4. 应力球张量只使物体产生体积变化，而不能产生形状变化。材料的塑性变形是由应力偏张量引起的。

5. 屈服准则函数在主应力空间的几何图形是个封闭的空间曲面，称为屈服表面。

6. 相对应变适用于小变形，对数应变适用于大变形。

7. 变形体的尺寸（体积）会影响金属的塑性，尺寸越大，塑性越低/差。

8. 模锻是在外力作用下，利用模具使金属坯料产生塑性变形并充满型腔的锻造方法，可分为开式和闭式两种类型。

9. 滑移线两侧的最大切应力组成顺时针方向的为 $\alpha$ 族线，组成逆时针方向的为 $\beta$ 族线。

10. 求解金属塑性成形问题的方法，除了较常使用的主应力法和滑移线法外，还有变形功法、上限法、塑性材料力学法和有限元法。

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

二、判断题（每题 2 分，共 18 分）（注：判断正确一题得两分，判断错误或不答不得分）

1. 任意斜面上正应力 $\sigma$ 和切应力 $\tau$ ，随方向余弦的变化而变化。（ $\checkmark$ ）

2. 切应变夹角增大时为负。（ $\checkmark$ ）

3. 若主应力空间中一点的应力状态矢量的端点 P 位于屈服表面上，则该端点处于弹性状态。（ $\times$ ）

4. 弹性变形时，泊松比等于 0.5。（ $\times$ ）

## 西安航空学院课程考试-参考答案及评分标准

5. 单相组织（纯金属或固溶体）比多相组织塑性好。（√）
6. 适合正压力不太大、变形量较小的冷成形工序的摩擦条件是摩擦力不变条件。（×）
7. 主应力法只能用来求解轴对称问题或平面问题。（×）
8. 镦粗变形的三个变形区是难变形区、大变形区和小变形区。（√）
9.  $\alpha$ 线的切线方向与Ox轴的夹角以 $\omega$ 表示，并规定Ox轴的正向为 $\omega$ 角的量度起始线，逆时针旋转形成的 $\omega$ 角为正。（√）

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

### 三、名词解释（每题3分，共12分）（注：答对一题得3分，答题不完整酌情给分，答错或不答不得分）

1. 应力张量：表示一点的应力状态的张量。
2. 加工硬化：金属材料在再结晶温度以下变形时，随着变形程度的增加，金属的强度和硬度增加，塑性和韧性降低，这种现象称为加工硬化。
3. 摩擦：两相互接触的物体，发生相对或有相对运动的趋势时所产生的阻碍相对运动的阻力，称为摩擦力，这种现象称为摩擦。
4. 简单应力场：如果滑移线场的一族滑移线由直线组成，另一族则为与直线正交的曲线，这种场称为简单应力场。

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

### 四、简答题（4小题，共25分）（注：答对要点给相应分数，答题不完整酌情给分，答错或不答不得分）

1. 简述应变张量的概念和基本性质。（本题7分）

答：概念：应变张量是表示一点的应变状态的九个应变分量组成的张量。（3分）

基本性质：1) 存在三个互相垂直的主方向，在该方向上线元只有线应变（主应变）而无切应变。（1分）

- 2) 存在三个应变张量不变量  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。（1分）

- 3) 可以叠加和分解或可以分解为应变球张量和应变偏张量。（1分）

- 4) 是对称张量。（1分）

2. 简述残余应力产生的原因及消除制品内残余应力的措施。（本题5分）

答：原因：变形不均匀（1分）；温度不均匀（1分）；相变不均匀（1分）。

消除措施：热处理法（1分）；机械处理法（1分）。

3. 简述开式模锻过程分为哪几个阶段及飞边槽有哪些作用。（本题6分）

答：1) 镦粗阶段（1分）；充满型腔阶段（1分）；上下模闭合阶段（1分）。

2) 锻造时阻止金属外流，以保证充满模膛（1分）；容纳多余金属（1分）；飞边槽具有缓冲器作用，可减弱上模的打击（1分）。

## 西安航空学院课程考试-参考答案及评分标准

4. 简述滑移线的概念，试将应力分量用  $\sigma_m$  和  $K$  表示，并写出汉基应力方程。

(本题 7 分)

答：1) 处于塑性平面应变状态下的变形体内各质点最大切应力的迹线，称为滑移线。(2 分)

2)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_m - K \sin 2\omega \\ \sigma_y &= \sigma_m + K \sin 2\omega \\ \tau_{xy} &= \pm K \cos 2\omega \end{aligned} \right\} \quad (3 \text{ 分})$$

3) 汉基应力方程：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m - 2K\omega &= \xi(\beta) \quad (\text{沿 } \alpha \text{ 线}) \\ \sigma_m + 2K\omega &= \eta(\alpha) \quad (\text{沿 } \beta \text{ 线}) \end{aligned} \right\} \quad (2 \text{ 分})$$

|    |  |
|----|--|
| 得分 |  |
|----|--|

五、计算题 (2 小题，共 20 分) (注：根据得分点分数给出相应分数，答错或不答不得分)

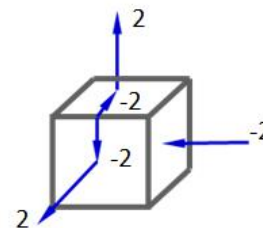
1. 已知一点的应力状态表示成张量形式为  $\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & -2 \\ 0 & -2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 \end{pmatrix}$  (MPa)

试求：1) 画出该点的应力单元体。

2) 用应力状态特征方程求出该点的主应力和主方向。

3) 画出该点的应力莫尔圆，并写出圆心坐标和半径长度。(本题 12 分)

解：1) (3 分)



2) (6 分)

将各应力分量代入应力张量不变量公式，可得

$$J_1=2 \quad J_2=8 \quad J_3=0 \quad (2 \text{ 分})$$

代入应力状态特征方程得：

$$\sigma^3 - 2\sigma^2 - 8\sigma = 0$$

$$\sigma(\sigma - 4)(\sigma + 2) = 0$$

$$\sigma_1=4 \quad \sigma_2=0 \quad \sigma_3=-2 \quad (2 \text{ 分})$$

将应力分量代入式 (2-11)，并与 (2-12) 联合写出方程组：

$$\begin{cases} (2-\sigma)l - 2n = 0 \\ (-2-\sigma)m = 0 \\ -2l + (2-\sigma)n = 0 \\ l^2 + m^2 + n^2 = 1 \end{cases}$$

为求主方向，将解得的三个主应力值分别代入上述方程组的前三式中的任意两式，并与第四式联立求解，可得三个主方向的方向余弦为：

对于  $\sigma_1=4$ :  $l_1=1/\sqrt{2}, m_1=0, n_1=-1/\sqrt{2}$

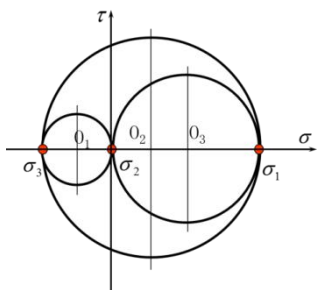
对于  $\sigma_2=0$ :  $l_2=1/\sqrt{2}, m_2=0, n_2=1/\sqrt{2}$

## 西安航空学院课程考试-参考答案及评分标准

对于  $\sigma_3 = -2$ :  $l_3 = 0, m_3 = 1, n_3 = 0$

(2分)

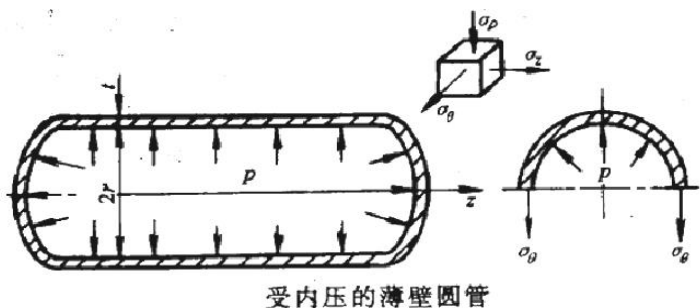
3) (3分)



(2分)

三个圆的圆心分别为  $(2,0)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(-1,0)$ ，半径分别为 2、3、1。(1分)

2. 一个两端封闭的薄壁圆管如下图所示，管内承受的内应力为  $p$ ，薄壁管的平均半径为  $r=400\text{mm}$ ，壁厚  $t$  为  $40\text{mm}$ ，若采用剪切屈服强度  $K=400\text{MPa}$  的材料作管壁，为了保证薄壁管处于弹性变形状态，分别用 Tresca 和 Mises 屈服准则求出管壁所能承受的最大内应力  $p$  为多少？（本题 8 分）



$$\text{解: } \sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{pr}{t} \quad \sigma_2 = \sigma_z = \frac{pr}{2t} = \frac{\sigma_1}{2} \quad \sigma_3 = \sigma_r \approx 0$$

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{pr}{t} = \frac{p \times 400\text{mm}}{40\text{mm}} = 10p$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = \frac{pr}{2t} = \frac{p \times 400\text{mm}}{2 \times 40\text{mm}} = 5p$$

$$\sigma_3 = \sigma_r \approx 0 \quad (2分)$$

1) 根据 Tresca 屈服准则:  $\sigma_1 - \sigma_3 = 2K = \sigma_s$  (1分)

$$\sigma_1 = 10p = 2 \times 400\text{MPa} = 800\text{MPa}$$

$$p = \frac{800\text{MPa}}{10} = 80\text{MPa} \quad (2分)$$

所以根据 Tresca 屈服准则，管壁所能承受的最大内应力  $p$  为  $80\text{MPa}$ 。

2) 根据 Mises 屈服准则:  $\left(\sigma_1 - \frac{\sigma_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_1}{2}\right)^2 + (-\sigma_1)^2 = 6K^2 = 2\sigma_s^2$  (1分)

$$\sigma_1 = 2K \rightarrow \sigma_1 = 10p = 800\text{MPa}$$

$$p = \frac{800\text{MPa}}{10} = 80\text{MPa} \quad (2分)$$

所以根据 Mises 屈服准则，管壁所能承受的最大内应力  $p$  为  $80\text{MPa}$ 。

# 西安航空学院成绩分析表

20\_18\_-20\_19\_ 学年第\_2\_ 学期

开课单位：材料工程学院

|                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                      |        |                                                                      |        |                                                                                                      |         |         |         |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|--------|
| 课程性质： <input type="checkbox"/> 必修， <input checked="" type="checkbox"/> 选修                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 课程名称：塑性成形原理                                                                                          |        |                                                                      |        |                                                                                                      |         |         |         |        |
| 任课教师：王琛                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 班级：材料成型 2012                                                                                         |        |                                                                      |        |                                                                                                      |         |         |         |        |
| 考试时间：18 周周二                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 试卷来源： <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它 |        | 卷别： <input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B |        | 考核方式： <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它 |         |         |         |        |
| 卷面<br>质量<br>分析                                                                                                                                 | 考题要求                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 基本知识                                                                                                 | 理解分析   | 综合运用                                                                 | 合计     |                                                                                                      |         |         |         |        |
|                                                                                                                                                | 分值                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 41                                                                                                   | 22     | 37                                                                   | 100    |                                                                                                      |         |         |         |        |
| 1、试卷出错： <input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> 有：原理性错误（图表、数据等）_____处，一般性错误_____处。                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                      |        |                                                                      |        |                                                                                                      |         |         |         |        |
| 命题<br>质量<br>分析                                                                                                                                 | <p>(1) 试题与课程教学大纲的契合度较好。试题所考核知识点的分布符合覆盖教学大纲要求、占比符合课程教学大纲课时分配比例要求。主客观题比例为 55:45，比例适当，能体现学生知识掌握情况和解决实际问题的能力；</p> <p>(2) 命题设计的合理性分析。试题的主、客观题比例符合要求，各种题型的分数分配为：填空题 25 分、判断题 20 分、名词解释 12 分、简答题 23 分、计算题 20 分，分配合适；试卷基本知识 41 分、理解分析 22 分、综合应用 37 分，试题比重比较得当；</p> <p>(3) 难易程度分析。试题本身的难度、深度与教学大纲、教学要求、人才培养要求相符，既考查了学生对知识的掌握程度，又考核了学生实际应用、解决问题的能力；</p> <p>(4) 试题重复率分析。A、B 两套试卷重复率及与以往使用过的试卷重复率符合学校规定要求。</p> |                                                                                                      |        |                                                                      |        |                                                                                                      |         |         |         |        |
| 教学<br>效果<br>分析                                                                                                                                 | 成绩<br>分数段                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0~59                                                                                                 | 60~69  | 70~79                                                                | 80~89  | 90~100                                                                                               | 最高<br>分 | 最低<br>分 | 平均<br>分 | 及格率    |
|                                                                                                                                                | 人数                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1                                                                                                    | 17     | 12                                                                   | 8      | 0                                                                                                    | 88      | 52      | 71.3    | 97.37% |
|                                                                                                                                                | 百分比                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2.63%                                                                                                | 44.74% | 31.58%                                                               | 21.05% | 0%                                                                                                   |         |         |         |        |
| <p style="text-align: center;">(1) 成绩分析。本班学生课程成绩分布接近正态分布，平均分 71.3 分，其中 80 分以上 8 人，占比 21.05%，70-79 分 12 人，占比 31.58%，60-69 分 17 人，占比 44.74%，</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                      |        |                                                                      |        |                                                                                                      |         |         |         |        |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | <p>不及格人数 1 人，占比 2.63%，60-79 分数段人数较多，说明学生对本课程内容掌握存在不够扎实现象，部分内容理解不够准确。</p> <p>(2) 知识点得分及学生掌握情况分析。从试卷得分情况看，学生对部分知识点没有掌握。第一题填空题总分 25 分，平均分 14.6 分，得分率 58.4%，其中分数超过 19 分的人数有 5 人。得分较低的知识点是第六章滑移线法的基本知识，滑移线法的知识比较难理解，学生掌握程度不好。根据学生答题情况来看，很多答案沾边但是不够准确，说明学生对知识点有印象有记忆，但是理解还是不够；第二大题判断题总分 20 分，平均分 14.3，得分率 72%，说明学生对于主要知识点有一定程度的掌握；第三大题名词解释总分 12 分，平均分 6.6 分，得分率 55%，大部分同学对于四个小题是能得分的，极少得满分，说明学生对知识点有印象，但是表达不够准确。尤其对于第四小题塑性流动平面概念的解释得分率很低，此题是能力提升题范围，对于基础知识掌握程度要求较高，需要较高的理解能力；第四大题简答题总分 23 分，平均分 14.2 分，得分率 61.4%，得分超过 19 分的有 7 名同学，说明对知识点掌握较好；第五大题计算题总分 20 分，平均分 13.5 分，得分率 67.5%，得分超过 17 分的有 12 名同学。第一个小题关于运用应力状态特征方程求解主应力、主方向和应力莫尔圆的题目，完成度较好，本题用到很多复杂公式，依然很多同学得满分，说明学生对于这一部分知识掌握较好；第二小题应用应力平衡微分方程的题目得分率相对差一些，问题出在学生计算能力较差，出现了很多小错误，导致不能得分。</p> <p>总体来看，客观题得分率高于主观题，第二章部分内容及第六章内容掌握程度较差。</p> |
| 学风分析 | <p>本课程平时成绩占比 25%，平均得分为 23.8 分，得分较高。本班全部同学全勤，作业完成度也较好，且极少发现抄袭现象，反映出学生对于本门课程态度很端正，但是鉴于本门课程内容较抽象，运用数学知识较多，而很多同学数学知识基础较差，导致作业效果不是很好。</p> <p>本课程全程采用“雨课堂”方式，从该软件反馈的学生上课表现来看，整体表现较好，课堂纪律较好，和教师互动良好，课后找教师答疑人数较多，说明本班同学学习主动性较高。从课堂测试的结果看，学生对第二章内容，特别是应力平衡微分方程部分掌握不是很好。分析发现，本课程平时考查方式还是比较单一，可以尝试引入更加多样化、更加吸引学生的方法来提高学生的参与度，提升课堂教学效果。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |



通过以上分析，发现本课程存在的问题有：1、本课程内容较抽象，张量的概念是学生以前没有接触过的，而且需要运用的高等数学、线性代数知识较多；2、本课程内容较多，涵盖塑性成形中的力学基础、金属变形和流动的相关问题及几种塑性成形问题的解法，需要记忆的基础知识、基本原理及复杂公式较多；3、本课程全部是理论知识，没有配套的实验，学生理解起来较困难；4、部分学习方法欠恰当。

拟采取的改进措施：1、加强对预习环节的监控，特别是与课程相关的数学知识的前导内容的渗透；2、对课程的重点难点问题进一步的优化，加强对于较难基础知识、基本原理的讲解；3、增加2-4个课时的实验内容，可演示可通过视频方式播放，帮助学生更好地理解内容；4、教学过程中注意学习方法的引导，帮助学生养成良好的学习习惯和高效的学习方法。

存在的  
问题及  
改进  
措施

任课教师（签字）： 宋书军

教研室主任（签字）： 宋书军 2019 年 7 月 10 日



注：表中使用的字符 ，选中的用 ，未选中的用 。红色的说明文字请删除

# 西安航空学院试卷及成绩分析表 (试卷类)

20\_19 -20\_20 学年第 2 学期

开课单位：材料工程学院

| 课程性质： <input type="checkbox"/> 必修, <input checked="" type="checkbox"/> 选修                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 课程名称：塑性成形原理                                                          |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|-------|----|------|---|-------|---|-------|---|-------|----|--------|---|
| 任课教师：王琛                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 班级：材料成型 2114                                                         |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 考试时间：120 分钟                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 试卷来源： <input checked="" type="checkbox"/> 命题 <input type="checkbox"/> 题库 <input type="checkbox"/> 其它                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 卷别： <input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B |        | 考核方式： <input checked="" type="checkbox"/> 闭卷 <input type="checkbox"/> 开卷 <input type="checkbox"/> 其它 |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 卷面<br>质量<br>分析                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 考题要求                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 基本知识                                                                 | 理解分析   | 综合运用                                                                                                 |        |        | 合计      |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 分值                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 43                                                                   | 12     | 45                                                                                                   |        |        | 100     |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 1、试卷出错： <input checked="" type="checkbox"/> 无 <input type="checkbox"/> 有：原理性错误（图表、数据等）_____处，一般性错误_____处。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 命题<br>质量<br>分析                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <p>(1) 试题与教学大纲的契合度分析。该试题严格按照课程大纲要求命题，与课程教学大纲的契合度较好。本试题所考核知识点能够覆盖教学大纲要求、占比符合课程教学大纲课时分配比例要求。主客观题比例适当，能体现学生知识掌握情况和解决实际问题的能力；</p> <p>(2) 命题设计的合理性分析。试题的主、客观题比例为 57:43，比例适当。各种题型的分数分配为：填空题 25 分、判断题 18 分，主要考查基本知识掌握情况；名词解释 12 分、简答题 25 分，主要考查理解分析能力；计算题 20 分，主要考查综合分析和公式运用的能力，各题型的分数分配合适。试题基本知识 43 分、理解分析 12 分、综合应用 45 分，试题比重比较得当；</p> <p>(3) 难易程度分析。试题本身的难度、深度与教学大纲、教学要求、人才培养要求相符，既考查了学生对知识的掌握程度，又考核了学生实际应用、解决问题的能力；</p> <p>(4) 试题重复率分析。A、B 两套试卷重复率 7%以下，与以往使用过的试卷重复率 7%以下，符合学校规定要求。</p> |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 教学<br>效果<br>分析                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 成绩<br>分数段                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0~59                                                                 | 60~69  | 70~79                                                                                                | 80~89  | 90~100 | 最高<br>分 | 最低<br>分 | 平均<br>分 | 及格率    |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 人数                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 3                                                                    | 6      | 9                                                                                                    | 10     | 7      | 94      | 22      | 76.91   | 91.43% |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 百分比                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 8.57%                                                                | 17.14% | 25.72%                                                                                               | 28.57% | 20%    |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>成绩分布柱状图数据</caption> <thead> <tr> <th>成绩分数段</th> <th>人数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0~59</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>60~69</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>70~79</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>80~89</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>90~100</td> <td>7</td> </tr> </tbody> </table> <p>(1) 成绩分析。本班试卷成绩 90 分以上 7 人，占比 20%，80 分到 89 分人数 10 人，占比 28.57%，70 分到 79 分人数 9 人，占比 25.72%，60 分到 69 分人数 6 人，占比</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        | 成绩分数段 | 人数 | 0~59 | 3 | 60~69 | 6 | 70~79 | 9 | 80~89 | 10 | 90~100 | 7 |
| 成绩分数段                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 人数                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 0~59                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 60~69                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 70~79                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 80~89                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |
| 90~100                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                      |        |                                                                                                      |        |        |         |         |         |        |       |    |      |   |       |   |       |   |       |    |        |   |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | <p>17.14%，不及格人数 3 人，占比 8.57%，整体成绩不错。</p> <p>(2) 知识点得分及学生掌握情况分析。第一大题填空题总分 25 分，平均分 19.46，得分率 77.8%，22 名同学得分 <math>\geq 20</math> 分。得分较低的知识点是第三小题，涉及第二章内容的三种应力张量表示应力状态的塑性大小比较问题，此小题有一定难度，需要分清应力张量中压应力的正负号，还需掌握影响金属塑性的因素。第二大题判断题总分 18 分，平均分 15.49，得分率 86.1%，其中 13 人得满分，说明学生对本门课主要知识点的掌握程度较好，能够根据相关知识点做出正确判断。第三大题名词解释总分 12 分，平均分 8.6 分，得分率 71.7%，其中 4 人得满分，得分较低的题目是第四小题简单应力场，部分同学将此概念与均匀应力场混淆，说明对第六章第四节内容掌握不是很熟练。第四大题简答题总分 25 分，平均分 18.74 分，得分率 75.0%，最高分 25 分，最低分 3 分，差距较大。得分率较低的知识点是第一小题应变张量的性质，大部分同学对应力张量的性质掌握较好，没有理清应力张量和应变张量的异同，不能举一反三。另外，对于第四小题汉基应力方程的掌握程度也不够好，部分同学不够细心，加减号写颠倒。第五大题计算题总分 20 分，平均分 14.63 分，得分率 73.2%，7 人得满分。其中第一个小题关于运用应力状态特征方程求解主应力、主方向和应力莫尔圆的题目，完成度相对较好，本题失分点在于主方向的求解，很多同学公式写对，计算结果不准确。第二小题关于屈服准则应用的题目，完成度也较好，从做题效果看，学生对于两种屈服准则掌握较好。</p> <p>总体来看，各种题型平均分数均中等及以上，特别是判断题得分率较高，说明本班学生基础知识掌握程度、推导计算能力都较好。</p> |
| 学风分析 | <p>本课程平时成绩占比 25%，由考勤（24 次）、笔记（6 次）、作业（15 次）、课程视频（23 个）和课堂测验（16 次）五部分组成，平均得分为 22.6 分，得分率 90.4%。该班纪律性较好，24 次课只有 6 人次因事请假；笔记提交 6 次，无人未交，且大部分同学笔记详细、有标记痕迹，质量较好；作业提交 15 次，准确度较高，大部分同学字迹工整，且极少出现抄袭现象；课堂视频和课堂测验分数通过学习通平台导出。</p> <p>本课程全程采用“学习通+腾讯会议”的方式，线上教学过程中，该班同学课堂表现活跃，与教师互动较多。从该平台反馈的学生情况来看，出勤率、课程视频的反刍比、课堂练习的准确度较高。总体看来，该班同学学习态度端正、自主学习能力较高。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

通过以上分析，发现存在的问题主要有：1、本课程理论性强，对数学知识依赖性强，学生学习难度较大。2、学生对于基础知识的掌握较好，但是遇到需要综合分析的题目不能很好的处理。3、课程内容较多，需要记忆的概念和公式较多，会出现混淆现象。

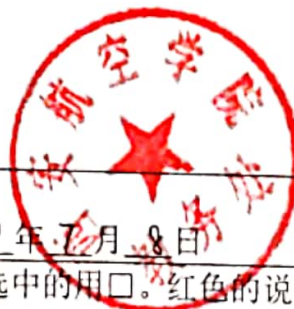
拟采取的改进措施：1、加强教学管理。加强对预习环节的管控，特别是与课程相关的数学知识的前导知识的渗透。采用混合式教学的方法，通过“学习通”等教学平台的功能，向学生推送预习视频、练习题等。2、优化教学过程。对课程的重点难点问题进一步优化，加强对较难基础知识、基本原理的讲解；多举例，有意识培养学生综合分析问题的能力。教学过程中注意学习方法的引导，帮助学生养成良好的学习习惯和高效的学习方法3、强化课后辅导。本课程课时较少，加大课后辅导答疑力度，让学生对重要知识点多看多练多思考。

存在的  
问题及  
改进  
措施

任课教师（签字）：\_\_\_\_\_

教研室主任（签字）：\_\_\_\_\_

2020年7月8日



注：表中使用的字符■□，选中的用■，未选中的用□。红色的说明文字请删除

2019-2020-2

# 《塑性成形原理》教案

课程负责人：王峰

# 西安航空学院

## 第一讲 讲稿 ~~10202020~~ ~~2020~~

同学们好，欢迎来到塑性成形原理课堂。我是王琛，本学期将由我来为大家进行本课程的讲授。<sup>学时</sup>先来了解一下本课程的基本情况。本课程共48个学时，3个学分。全部是理论学时。每周4学时，1-12周完成。考核采用闭卷考试的形式。平时的课堂表现、作业完成情况、学习平台的反馈占到25%。综合评价同学们对本课程的效果。最后提几点要求。每次课程前的预习内容，包括PPT、<sup>视频</sup>视频等，请同学们认真预习。保证课堂知识掌握的人。本课程难度较高，需要用到高等数学、<sup>工程</sup>材料力学等相关知识。

无障碍点。课后及时复习，做好反馈，以期更好掌握本课程的内容。我会通过各种方式对同学们的<sup>学习</sup>学习进行督促和辅助，帮助大家掌握知识。本课程是材料成型及控制工程专业塑性成形方向的一门重要的专业限选课。是原理、工艺、设备三大课程之一，安排在第六学期讲授。前导课程主要有材料力学、材料科学基础等。也是后续锻造工艺模具设计、塑性成形过程计算机模拟，以及进行~~锻造~~塑性成形类<sup>毕业</sup>毕业设计的前置基础课程。~~还~~来看一下本课程的<sup>学时</sup>学时，本课程是研究塑性变形过程中基本规律的一门学科。通过本课程学习，为后续合理制订塑性成形工艺、选择设备、设计参数、设计模具提供理论基础。本课程~~应用~~应用主要有六章的内容。每章的重点内容和学时数已由同学们列出。我们简略来看一下。梳理一下知识脉络。~~在~~梳理之前，请同学们跟着我的思路进行思考，如进行锻造变形时，如何进行变形外力的选择？你需要掌握<sup>哪些</sup>哪些知识呢？<sup>例子</sup>在以前的<sup>课程</sup>课程中，我对于单向拉伸压缩，知道轴向外力与材料屈服应力，想一下拉伸曲线，是不是就能进行外力的选择。

地址：西安市西二环259号

电话：(029) 84258166

传真：(029) 84261737

邮编：710077

1 <1>

1

# 西安航空学院

但是，在实际的塑性变形过程中，工件受到的力是复杂的。这时，我们首先要对工件进行应力状态的分析。划重点应力状态可以描述它。我们要引入应力张量这一

工具，知道了应力状态，<sup>应力状态</sup>借助屈服准则就可以知道工件的实际变形情况。这

我们第二章要学的主要内容。这样就可以了吗？当然不是，我们还要了解影响塑性变形的因素。怎样选择变形条件对变形件的塑性进行改善。以期用较低的力达到变形效果。

这是我们第三章要学的内容。第四章→第六章，我们将对理论知识进行综合运用。通

在变形件进行应力、应变分析的基础上，<sup>选择合理的求解方法</sup>建立求解方程。选择求解力能参数、变形参数。

指导特，解决实际生产过程中的问题。这是本课程的特色。课程基础、现代、及各种解法。落脚点在应用上。所以，这门课程是材或专业的基础理论课程。同时，也是研究的

选择课程。希望同学们认真学习。

好，引入一个问题。请同学们结合之前所学知识，把金属材料加工成具有特定形状的零件有哪些工艺呢？<sup>给大家</sup>想想现在你脑海中的加工方式有哪些？能分一下类吗？都有怎样的特点呢？

如何进行选择呢？与我们这门课程相关的成形方式你能想到哪些呢？同学们可以试着写一下，以图片形式发给我。铸造、锻造、3D打印??等等。是的，要想成形一

定形状和尺寸的零件的方法多种多样。那塑性成形方法有怎样的特点？又有哪些分类方法？各种塑性成形方法适合哪些零件的生产呢？这是我们第一章的课程内容。现

在，我们带着这些问题进行学习思考。

# 西安航空学院

首先，先来回忆几个概念。什么是弹性，什么是塑性？一把新弹性，是足能整的橡皮筋。弹簧。稍稍拉一下橡皮筋，或很小的力拉一下弹簧，去除力后，它们还会恢复到原来的形状。这是弹性。那如果用很大的力拉弹簧，弹簧不会变为原来的形状，发生了塑性变形。再看一个例子。我徒手掰一个锯条，一开始变形了，然后我接着用力，弯折掉了。这是塑性变形吗？

由此，我们总结一下塑性变形的概念。在外力作用下，使金属材料发生塑性变形而不破坏其完整性的能力称为塑性。那利用材料中的塑性使其在一定外力作用下成形并获得一定力学性能的加工方法，就叫做塑性成形。也可叫塑性加工。压力加工。划重点：塑性成形的概念。

那在铸造和零部件之间，为什么要加入塑性加工这一工序呢？<sup>锯条切削加工，铸造成型等加工法相比</sup>塑性成形有以下特点：  
组织性能得到改善，利用率高，生产效率，产品尺寸精度高。来看一下如何使组织和性能

得到改善。液态金属在凝固过程中，由于气体杂质的存在，会在液态金属中形成气泡，铸锭中会出现气孔缺陷，又由于液态金属中存在一些杂质元素，会形成化合物，铸锭中会存在夹杂物，由于不平衡凝固等，还会造成各部分元素含量不均匀。由于液态金属收缩的特性，会造成缩孔，疏松等缺陷。和铸锭时热影响区的组织性能也很差。通过铸锭内部存在疏松气孔，晶粒

粗大不均匀等缺陷。经过塑性加工，可以使晶粒细化，结构致密。而且，在塑性变形的过程中，晶粒与晶间的杂质沿变形量最大的方向伸长，再结晶后，晶粒变成等轴晶，而杂质仍然保持线状分布，形成了纤维组织。以切削成形和锻压成形为例，我们可以看制，锻压成形后纤维组织沿着曲轴表面轮廓分布，这样会怎样呢？

粗大不均匀等缺陷。经过塑性加工，可以使晶粒细化，结构致密。而且，在塑性变形的过程中，晶粒与晶间的杂质沿变形量最大的方向伸长，再结晶后，晶粒变成等轴晶，而杂质仍然保持线状分布，形成了纤维组织。以切削成形和锻压成形为例，我们可以看制，锻压成形后纤维组织沿着曲轴表面轮廓分布，这样会怎样呢？



# 西安航空学院

纤维组织的出现，使材料的力学性能有了方向性。跟着我的思路进行思考，如果沿着纤维的方向，材料的塑性、强度、韧性会... 升高。那垂直纤维方向呢？材料的塑性、强度会... ↓。但是，材料的抗剪切能力提高。那当我们把材料加工成零件时，可以在方向上作文章，如零件的受力，最大正应力方向应垂直于纤维方向。最大切应力方向应垂直于纤维方向垂直。如零件以切削成形和锻压成形制造曲轴为例，可以分别锻压成形没有破坏流线，且沿着曲轴表面轮廓分布，会提高性能。给大家一个进阶思考题，制造齿轮时，各部分流线应怎样分布呢？有兴趣的同学可以思考下。例：劈柴顺纹，劈柴不顺纹，劈柴不顺纹，劈柴不顺纹。

第二、与切削相比，材料的利用率会提高。因为塑性加工是体积转移，不产生切屑。后面我们会看到一个体积不变条件。用这样一个示意图来说明一下体积转移。

第三、生产效率高。适用于大批量生产。如冲压过程中，高速冲床行程次数已达 1000-1800/min。锻造汽车用的六带曲轴仅需 40s。生产效率提高，对一个企业的重要性质不言而喻的。降低成本。零件加工过程在于实现生产过程连续化、自动化。

第四、产品尺寸精度高。精密锻造、精密挤压、精密冲裁零件，可以不需机械加工就能直接使用。塑性加工产品的尺寸精度和表面质量高。

当然，塑性成形也有缺点：① 投资大，模具费用高，设备大，能耗高。且成形的零件的形状和尺寸也受限制，形状不能太复杂，坯料塑性要求高。

下一小结，我们重点来了解一下塑性成形的分类。留一个作业。

# 西安航空学院

同学们好。我们来学习一下零件成形的分类。常见的分类方法有三种。

第一：按成形特点分类。可分为轧制、锻造、挤压、拉拔、冲压、拉形、弯曲、剪切。我用三种颜色进行了标记。大家思考一下。每种颜色的变形方式各是通过什么力的作用进行变形的呢？黑色是压力。红色是拉力。蓝色是靠弯矩和剪切力。后面我们会进行详细的讨论。

第二种分类就是根据工件的温度。分为热变形、如热轧、热锻、冷变形、如冷锻、冷轧、<sup>温变形还有。</sup>

那这个冷热的界限是什么呢？是金属的再结晶温度。通常是熔点的0.4倍。

材料的熔点不同。自然再结晶温度也不同。思考一下。我们常见的金属。如钢、铝、铜、镁的再结晶温度是多少呢？钢的一般在 $400^{\circ}\text{C}$ - $600^{\circ}\text{C}$ 。铝为 $200^{\circ}\text{C}$ - $300^{\circ}\text{C}$ 。铜为 $200^{\circ}\text{C}$ 的变形。铝在 $1100^{\circ}\text{C}$ 时的变形。各有什么变形呢？铝的再结晶温度 $-14^{\circ}\text{C}$ 。所以 $20^{\circ}\text{C}$ 时热变形。而熔点最高的金属

铁的再结晶温度为 $1200^{\circ}\text{C}$ 。所以 $1100^{\circ}\text{C}$ 铁为冷变形。所以。单纯按多少摄氏度是热变形是不科学的。

我们再来探究一下。各种三种变形方式下的组织会是什么样的？冷变形时。会产生加工硬化。晶格扭曲。<sup>替</sup>有碎晶。强度升高。塑性降低。热变形随着温度升高。硬化开始开启。此时的组织是再结晶组织。<sup>此时强度降低。不再硬化和再结晶。</sup>

组织。塑性提高。所以用较小的力就可以变形。那此时过程中存在加工硬化吗？当然也是存在的。硬化软化共存。那温变形呢。是介于热变形和冷变形之间的方式。它是产生回复。但是不存在再结晶。~~关于~~

第三种分类法。分为基本加工变形。就是刚才我们提到的锻造、冲压、轧制等。如果将它们有机结合。会变为组合加工变形。如辊轧、辊弯等。后面会简单介绍。

我们来看详细学习一下基本加工变形方式。请带着以下问题进行学习。每种成形式的特点。

首先看一下靠压力作用产生变形的形式

是什么？工件受到几个方向的力？

什么样的零件适用这种成形方式？

(1) 轧制：将金属坯料通过旋转的轧辊（间隙可为各种形状）因受压缩变形，使横截面积减小，长度增加的压力加工方法。又可分为纵轧、横轧、斜轧。看一下轧制的动图。此种成形式可用来生产金属材料、板带、管材。还可成形一些单件制品和玻璃制品。此图中为何种轧制式呢。

我们发现，此图两个工作轧辊旋转方向相反，工件的纵轴线与轧辊轴线垂直，为纵轧。即前进方向与轧辊轴线垂直。

为横轧呢。工作轧辊旋转方向相同，工件的纵轴线（行进方向）与轧辊轴线平行。如若工作轧辊旋转方向相同，但工件的纵轴线与轧辊轴线成一定的角度，则为斜轧。

思考问题：轧制要想形成各种形状和尺寸的横截面如何实现呢？如若在轧辊上开有一定形状和尺寸的轧槽。

即改变间隙的圆形状，是不是就可以实现呢？这里提到的楔横轧是一种组合变形式。

是横轧和锻造相结合，可生产各种锥形轴、阶梯轴等。 Mark一下。

(2) 锻造 这种成形方式，同学们应该比较熟悉。又可分为自由锻和模锻。自由锻可在锻锤和水压机上操作。工具简单，可完成锻粗、拔长、切断等工序。下面两个动图，左边为

锻粗，右边为拔长。模锻主要是在模锻锤和热模锻压力机上操作，需要模具成形。

一般工序：锻坯加热 → 锻粗各坯 → 模锻成形 → 切边 → 冲孔 → 矫正 → 检验 → 热处理 → 清理 → 矫正 → 检查。锻造件质量比铸件能承受更大的冲击力，塑性、韧性也较高。

大型轧钢机的轧辊，人字齿轮，叶轮，机车轴，曲轴，连杆可用该成形方式。

# 西安航空学院

(3) 挤压: 从模具的孔口<sup>引</sup>和缝隙处将金属材料挤出的成形工艺。思考一下, 此过程受到几个方向的力, 三向压应力。又分为正挤压和反挤压。

正挤压: 挤压杆的运动方向和从模孔中挤出的金属方向一致。(左图)

反挤压: 挤压杆的运动方向和从模孔中挤出的金属方向相反(右图)

思考一下动图, <sup>引</sup>是正挤压还是反挤压 → 正挤压

思考2. 此成形特点是什么呢?  
引式

受三向压应力, 避免拉应力出现, 可以生产复杂的管材、型材, 尺寸精确, 可铸较难成型件。  
但是设备复杂, 废料多, 组织和性能沿长度方向各截面上不够均匀。

(4)  
和挤压对比一下, 学习拉拔。这是一种靠拉力作用的成形工艺, 用拉拔机的夹钳把金属从一定形状和尺寸的模孔中拉出。这种成形工艺, 工设备简单, 可实现高速生产截面尺寸的产品, 主要用来生产线材、管材, 如电线、金属网等, 但是每道逐次加工率较小, 可以保证整个长度上横截面一致, 拉拔逐次较多, 能量消耗较大。

(5) 冲压, 在曲柄压力机或油压机上用凸模把板料压进凹模中成形的工艺。全世界钢材中60~70%是板材, 大部分通过冲压制成成品, 飞机蒙皮, 子弹壳, 汽车车身都可采用此工艺。  
过去基本是冷变形, 现在也有温变形, 热变形。

(6) 拉形, 板料两端在拉力作用下沿一定形状的凸模与凹模成形的加工工艺, 主要用来生产飞机蒙皮

# 西安航空学院

再来看一下弯曲。利用弯矩作用成形。给大字两个动图帮助理解。

冷钢。情形件。U形件可采用此方式。

剪切：坯料在剪力作用下进行的变形。如板料在模具中的冲孔、落料等。

随着科技发展，上述基本加工方式有机结合，产生很多新的成形方式。除了前面提到的楔横轧，还有辊锻（锻造和轧制相结合）、辗弯（纵轧和弯曲结合）

旋压（~~滚~~冲压和轧制相结合）新的塑性成形方式的开发，进一步扩大了塑性成形的应用范围。

剩下的时间，我们简要了解一下塑性成形理论发展。塑性加工历史悠久，早在2000多年前的青铜器时代，我国古人就掌握了锤击加热金属制造兵器和技术。但是，塑性成形的理论基础形成较晚，是在20世纪30年代查普概念提出的基础上发展而来。如果给它一个定义，可以认为是基于金属塑性变形的物理学、物理化学、金属学和力学基础上的应用技术理论。塑性理论发展史给同志们列了一下，屈纳雷斯加院则、切块法等理论。后续的授课过程中会陆续给大字介绍。

本章主要介绍了金属塑性成形特点、分类、各成形方式特点和适用范围。希望同志们认真理解，切勿混淆。下一节我们将学习第三章第一节，金属塑性成形过程的应力分析。

课后作业请查看通知。

金属塑性成形有哪些物理基础，怎样进行应力分析呢？希望同志们做好预习。

(打集)

# 西安航空学院

## 第二讲 讲稿

同学们好，这节课我们开始学习第二章金属塑性变形的物理基础。首先，通过几个题目，对上一节课的内容做一下复习。上节课主要讲了塑性变形的特点和分类。第一个题目，靠压力作用使金属产生变形的方式有轧制 锻造 挤压。用到的知识点是分类 成形特点。第二个题目，以下不能使金属塑性变形的材料是( )。正确答案是C. 灰铸铁。灰铸铁含碳高，以自由石墨存在，硬度大，质脆，故不能塑性成形。但其铸造性能，切削性能都很好的。第三个题目，冷拔可以提高产品的强度。正确。冷成形引起加工硬化使其强度、硬度升高。上节课重点让同学们理解一下塑性变形的概念。我们从宏观上看到，通过一定的塑性加工，得到了想要的形状、尺寸。我们也可以用显微镜观察到<sup>显微</sup>组织，用仪器测得力学性能。那引起组织和性能变化肯定有一定的机理。所以这节课我们先来学习一下金属塑性变形的物理基础。重点关注一下塑性变形是如何产生的？ 微观机理是什么？

首先我们来看一下金属的组织，想一下你通过显微镜观测的金属组织形貌。金属组织一般是多晶体，有很多的晶粒存在。晶粒和晶粒之间存在晶界。亚晶粒和亚晶粒之间存在亚晶界，是一种面缺陷。左边的示意图描述晶界产生的过程。同一个金属不同取向的两个晶粒各自生长，在交界处，出现原子错排的现象，就是晶界。这是几张实际拍摄的晶界组织的照片。晶界的存在，会使金属产生怎样的变化呢？给大家列出几条，比如：晶界处的强度和硬度高于晶内，后期会进一步解释。晶界容易被腐蚀，如我们对铝合金的研究，源于晶界腐蚀。

# 西安航空学院

(2). 合金. 我们研究的金属大部分是合金. 就是由两种或两种以上的金属构成的. 像上, 我们研究的金属是由许多大小, 形状, 位向不同的晶粒组成. 会引起变形不均匀.

认识了金属的组织, 我们再来研究一下金属的变形机理, 我们先从单晶体开始研究. 我们假设变形体只有一个晶粒, 那它是如何变形的呢? <sup>在晶体</sup>提到了滑移和孪生. 它们都是如何变化的呢? 首先来看一下滑移的概念. 在切应力作用下, 晶体的一部分相对另一部分沿着一定的晶面和晶向发生相对滑动. 来看一下, 要产生滑移必须要有切应力, 而且并不是所有的晶面都能发生滑移, 应该是原子密度最大的面. (派纳力公式. 比时间距最大, 给力最弱). 相对滑移阻力最小). 发生了相对滑动.

用下面这个示意图. 帮大家回忆. 这是单晶体也叫完整晶体的刚性移动示意图.

(a) 为未变形阶段, 此时原子在空间内有序排列. 而且每个原子都在平衡位置做很小的振动.

(b) 阶段是弹性变形阶段. 当我们对其施加一定的切应力 $\tau$ , 晶体会产生畸变, 整体倾斜. 但倾斜程度很小, 没有超过原子间间距. 此时. 如果将外力去除. 因为原子和原子之间有在

结合力的作用. 所以原子会回复到初始的平衡位置. 当我们继续施加力 $\tau$ . 就到(c)这个阶段. 弹塑性变形. 此时变形程度逐渐增加. 超过了材料的屈服强度. 移动的距离大于原子间距. 原子也离开了平衡位置. 如果此时. 去除外力. 倾斜会回复. 但是原子错位无法回复.

就到达(d)塑性变形阶段. 刚才提到这个刚性移动假设. 但理论计算的力

总是比实际的力大很多. 是因为我们无法一边变形,

↑ 滑移面上所有原子一起向前移动.

一边变形研究原子运动. 只能有很多假设.

# 西安航空学院

这是一个实际晶内滑移的照片，看到一些象台阶一样的~~台阶~~台阶，滑移带

滑移的结果使大量的原子逐步产生迁移，继而引起宏观变形。如果是晶体，滑移

还会受到晶界阻碍，还有周围难滑移晶粒阻碍。  
自身

刚才提到难滑移，易滑移。我们能不能定量描述一下呢？即滑移是有方向的。看一下

单向拉伸滑移面上切应力的分析。变形体受到  $P$  的外力，看到了滑移面，面积是  $A_1$

如何求这个面上的切应力呢？有几个角度帮我们进行转换，

如果知道  $P$ ，我们可以求出  $A_0$  而的正应力  $\sigma_0 = \frac{P}{A_0} = \frac{P}{A} \cos\phi$

$$\tau = \sigma_0 \cos\lambda = \frac{P}{A} \cos\phi \cos\lambda = \sigma_0 \cos\lambda \cos\phi \quad \mu \text{ 称为取向因子, Schmid 因子}$$

求极值发现，当  $\lambda$  和  $\phi = 45^\circ$  时，最择优向。

BCC, FCC 12

$\tau_c$  临界切应力，取决于结合键特征，晶格类型，位错，温度等因素

HCP 3

对于一定的晶体， $\tau_c$  为定值，取向因子越大， $\sigma_0$  越小，晶体容易滑移。  $90^\circ, 0^\circ$

晶体  $\tau_c$  Al, FCC 6.79 (MN/m<sup>2</sup>) Cu, 0.49 Fe(BCC) 27.44 Mg(HCP) 0.81  $\checkmark$

的临界切应力，不随取向因子变化而变化。

问题

那接下来思考一个问题，滑移是如何发生的？是不是由某些特殊的情况存在引起了滑移呢？

下面引入位错的概念 dislocation. 位错是一种线缺陷，用它来解释晶体的变形。这个

概念是1934. 泰勒提出的。看一下这个图，晶格内都存在一个空位多余原子，使晶体处于高能量

状态。什么是高能量，比如我用手去摸暖宝，暖宝能量高，有向我传递热量的趋势。  
原子排列不规则



# 西安航空学院

此时, 多余的原子也要传递出去, 就以位错的形式, 每个原子向前移动了一个原子间距。~~所以~~ 所以, 由于晶体内部存在位错, 晶体的滑移并不是一部分相对于各部分移动, 是像毛毛虫一样蠕动的。这是透射电镜下观察到的位错线: 我们用位错密度来描述这些位错线的总长度。→ 讨论题? 滑移是由位错运动引起的

★ 那问题来了, 如果我不能, 不易发生滑移的时候怎么办? 那就不变形了吗? 此时, 需要孪生, 孪生的临界切应力比滑移的临界切应力大很多, 所以只有滑移发生困难时, 才发生孪生, 所以塑性变形以滑移为主。孪生指的是在切应力作用下, 晶体的部分相对于各部分发生一定角度的相对转动。一般情况下, HCP晶格的 Mg, Zn 等金属, 易发生孪生, FCC 的铜等在某些特定的变形条件下, 也会产生孪生。那孪生会怎样呢? 它可以改变晶体的位向, 使一些不易产生滑移的位向变得容易产生滑移, 从而引起滑移的进一步产生。比如说刚才如果切应力与滑移面垂直, 是不可能产生滑移的, 那通过发生孪生, 把角度改变, 就可以发生滑移了。△

接下来, 我们来看一下多晶体, 除了说的晶内的晶内变形(滑移, 孪生), 晶粒和晶粒之间是怎样产生变形的呢? 就是晶间变形的实质是什么呢? 晶粒和晶粒之间存在晶界, 而且各个晶粒的取向也是任意的, 所以有点复杂, 此时, 滑移还是在位向最有利的晶粒内部发生, 所以变形不均匀。当位错移动到晶界处时, 要自想延伸伸到相邻晶粒, 需要更大的能量, 因为位错在晶界堆积, 此时, 晶界处的应力增加了, 晶界强化。细晶强化 变形不均匀。为了保持完整性, 晶粒与晶粒要互相协调, 不然此时就可能

# 西安航空学院

产生空洞、裂纹等缺陷。(冲间动, 两周不动), 经商讨, 一部分晶粒相对滑动, 各部分相互转动, 变形协调。PPT.

讨论多晶体变形的实质是什么? 晶内变形(滑移孪生) + 晶间变形(相对滑动, 相对转动)

接下来, 我们看一下金属塑性变形的力学基础。首先提出几种假设。① ~~连续性~~ <sup>连续性</sup> 假设。  
构件体积内毫无间隙的充满物质。这样可保证应力、应变等连续。  
② 各向同性假设: 可保证做元体的物理性质不变。还有变形瞬间力平衡, 体积不变等。认识几个名词, PPT

第二章共有六节的内容, 其中, 2, 3, 4 比较重要。

接下来, 我们学习一下第一节内容。要对变形体进行应力分析的目的在于, 求各点的应力状态及其随坐标位置的变化。是正确分析工件零件加工有关问题的重要基础。如, 研究齿轮钢管的轴向应力分布, 就知道, <sup>何时</sup> 最大应力超过许用值, 引起表面破坏; 再如, 研究发动机曲轴做功冲程时受力云图, 可以对结构进行调整。

学习几个概念。

外力: 外界施加的作用力对工件

内力 (二维概念): 作用在表面上的力。

体积力 (三维): 作用在变形体的每个质点上。忽略不计。

作用力, 工件对工件作用。  
反作用力,  $F'$  (垂直于接触面, 沿相反方向)  
摩擦力, 约束力 (克服作用力产生的)  
阻力, 与运动方向相反, 切线方向。

举例: 拉拔时受力分析。

本章小结。

下节课, 我们将学习第三章的内容, 与将要引入应力的概念, 如何进行应力分析呢?

# 西安航空学院

## 第三讲 讲稿

同学们好。这节课我们继续学习第二章 金属塑性变形的力学基础的内容。首先，复习一下上节课的知识内容。(提问) 1. 多晶体塑性变形的实质是什么? 答: 晶内变形(滑移、孪生)和晶间变形(相对滑动、相对转动)。上节课还提到一句重要的话: 塑性变形是由位错运动引起的。1934. 泰勒提出的。看第二个题目, 上节课我们还讲了一些力, 对几个变形方式进行受力分析, 大家一起回忆一下。<sup>另外一点是 晶体的受力分析</sup>外力: 外界施加给变形体的力(载荷)。三维、体积力。作用在表面上的力 面力。二维的。有作用力(拉力、压力、剪切力)。反作用力 摩擦力(抵抗、克服作用力产生的)。那问题来了, 受到外力的变形体有何表示呢? 怎么回答呢? 我们要引入内力、应力的概念。<sup>引入</sup>内力顾名思义, 与外力平衡, 抵抗变形的力。(问题引入)

这节课, 我们开始讲第二节 变形体内一点的应力分析中的第一、第二部分, 先把第二节的知识脉络给大家梳理一下。<sup>讲一个我和应力张量的故事</sup>首先, 当一个变形体放在我的面前, 我势必要对其进行应力分析。<sup>应力状态</sup>方法是截面法(划重点)。分析了以后, 我要寻求一种描述应力状态的工具, 即第二个重点内容应力分量和应力张量。<sup>划了一点应力状态</sup>穿过这一点有很多个平面, 我拿出任意一个斜面, 来分解求解一下上面的力。<sup>对 微分斜</sup>第三部分的内容。分析完了以后发现, 不简单哦, 太复杂了, 有没有可能寻求一种简单的状态进行简化呢? 于是, 我把目光放在了主应力状态。<sup>划重点</sup>对它又比比划划半天, 我尝到了甜头, 心想, 会不会还有其它特殊情况呢? 于是, 我发现了主切应力。<sup>找到了主应力和转向</sup>应力张量是个矢量。<sup>还研究一下</sup>数学老师告诉我们, 它可以分解。<sup>提</sup>我试着把它分解成了应力球张量和应力偏张量, 发现了另外一个秘密, 我在应力状态分析的世界里无师自通, 还发现了应力椭圆面和八面体, 每道几何的方法让我能更直观的分析问题。我开始审视我走过的路, 发现我其实只研究

# 西安航空学院

了-点的应力状态。我想拓宽我的视野。发现了可以借助应力平衡微分方程。对整个变形体的应力状态进行分析。同时。我没忘记我的几何朋友。想着这个时候。它是否可以

我发现有几种特殊情况 ~~把变形看成平面应力或轴对称状态~~。这样会变得简单

助我一臂之力。于是。我通过应力莫尔圆把以前得到的知识用平面上的几个圆形象

绘制了出来。<sup>应力状态蕴藏的秘密跃然纸上。</sup> ~~清楚~~这样。我就可以去见我的新朋友应变了。这部分内容很多。~~我们~~

用五节课来学习。希望同学们做好预习。重点内容我会提前告知同学们。

看一下本讲重要内容。首先要知~~道~~掌握九个概念。以及分清内力。正应力。切应力。  
第二个重点内容。我们来认识一下应力张量。包括它的<sup>符号</sup>描述方法和性质。

一应力分析的截面法。内力在外力作用下。变形体内各质点就会产生相互作用力。

首先再讲一个关于金桔的故事。金属做的桔子。它不是普通的桔子。它要进行粗糙变形了

上面受到  $P$  的压力。下面有  $P'$  的反作用力。这些都是外力。如果我有沿着某一个截面切开。

如何在截面上的内力呢？分析一下受力。下半部分受到  $P'$  会层层传递上去。直到在外力作用。

上层原子面试图压下一层原子面。原子间距发生变化引起抵抗变形的力。这就是变形体的内力。

内力的变化量是外力引起的附加内力。这种附加内力随外力的个而个。当达到某一限度时。就会引起构件的破坏。

我们去掉一部分。那去掉的部分对保留部分的力。就是内力。<sup>变为外力</sup> 对保留部分建立平衡条件。就能确定内力。<sup>这就是截面法</sup>

来如何来描述内力的强度呢？强弱程度。上节课我留了一个题目。如果

钢筋的截面是越越渐变小。变成钢丝。继而变得截面是头发丝的  $\frac{1}{100}$ 。那将更容易

折断。我们引入应力的概念。

# 西安航空学院

内力：在外力作用下，变形体内各质点就会产生相互作用的力。称为内力，单位面积上的内力就是应力。我们后面会通过截面法进行分析。

一点的应力状态，如果物体内一点所应力。微小面积上所受的应力情况。大小、方向。要想了解整个变形体的应力状态，首先要研究做一点的应力。

提一个问题：应力和截面一定垂直呢？如果垂直，会怎样？

下面我们利用截面法来研究任何一点的受力情况。几个名词：合力、正应力、切应力。

当然，相同外力作用下，所取截面不同，获得的应力大小也不同（应力在各坐标系中是方向余弦的函数）。

所以，要衡量应力大小，需要在相同截面位置上比较。

看图 2-3。内力与应力。在变形体上取了一截面 B，截面上有一点 Q 取一无限小的面积  $\Delta A$ 。和我们还知道  $\Delta A$  上内力的合力是  $\Delta F$ 。那么  $S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}$   $S$  为 B 截面上 Q 点的合力。

的合力。合力和 B 面不垂直，可分解为垂直于截面上的应力 即正应力用  $\sigma$  表示，以及平行于截面上的应力。即切应力，或剪应力。用  $\tau$  表示。即截面法代作用力方向不一定平行。

根据数学上的定理，我们已知  $S^2 = \sigma^2 + \tau^2$ 。

其实， $S$  还有另外一种分解方法。如果在直角坐标系中，可分解为  $S_x, S_y, S_z$ 。且有。

$$S^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2$$

希望同学们理解截面法，区分合力、正应力、切应力。只知一个截面上的应力就可以了吗？当然不是，应该怎么呢？

举例：在不同方向上的切面上，Q 点的应力不同。举单向均匀拉伸应力进行说明。左图，取了与拉力  $F$  垂直的面，面积为  $A_0$ 。那合力  $S = \sigma = \frac{F}{A_0}$ 。右图中我们截取了与外力呈  $\theta$  角的截面，此截面上的应力如何呢？

$$\left\{ \begin{aligned} S &= \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 \cos \theta} = \sigma_0 \cos \theta \\ \sigma &= S \cdot \cos \theta = \sigma_0 \cdot \cos^2 \theta \\ \tau &= S \cdot \sin \theta = \sigma_0 \cos \theta \sin \theta = \frac{1}{2} \sigma_0 \sin 2\theta \end{aligned} \right.$$

∴ 仅用某一个切面上的应力不足以全面表示该点的应力情况。

# 西安航空学院

知道受到所有力的大小  
确定应力状态

但是我们发现， $O$ 点任意切面上的应力随其法线的方向角 $\theta$ 变化而变化，是 $\theta$ 的函数。

就刚才的例子而言，只要我们知道 $\sigma$ ，那用 $\sigma$ 就可以表示单向拉伸时点的应力状态。

前面提到点的应力状态是物体内一点任意方向，微小面积上所受力的情况，大小、方向、做。

为了完整描述质点受力情况，引入应力张量这一物理量。

张量是数学上的一个分支学科，它最初用来表示弹性介质中各点应力状态的，后来张量理论发展成为力学和物理学的一个有力的数学工具。之所以重要，在于它有一个特性，它可以满足一切物理定律必须与坐标系的选取无关的特性。这里这个定义是数学上的定义，比如我们学

的线性代数中的线性变换，它不依赖于线性空间的基的选取， $A' = TAT^{-1}$

其实，我们认识它，如标量，其它是0阶张量（ $r=0$ ）向量、矢量（ $r=1$ ）1阶张量，  
数学上的矩阵（ $r=2$ ），应力张量，应变张量，<sup>张量分量个数用</sup> 二阶表示，那二阶张量的分量个数是

$3^2 = 9$ 个。那我们给应力张量一个初定义：表示点应力状态的九个应力分量构成的二阶张量。

应力分量怎么表示呢，~~两个~~角标符号，成组的符号和数组可以用带下角标的符号表示。

给一个数组  $(x_1, x_2, x_3)$  可以用  $x_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 来表示，那应力张量的角标符号是什么呢？

$\sigma_{ij}$

我们来进一步认识应力张量，取半坐标系， $xyz$ （直角半坐标系），取微元体 <sup>元</sup> 六个面，可以看到互相垂直的共三个面，每个面上有三个应力分量。这是应力张量的第一种描述方法。应力状态周围

$x, y, z$

$o, z$

①

我们仔细看一下这个图，一边说一边在笔记本上画一下。x面为什么叫x面，我们发现，这面

外法线与x轴平行。同理，外法线与y轴平行是y面，yz轴平面是z面。

# 西安航空学院

$\sigma_{xx}$  两个角标一样. 写成  $\sigma_x$

再来看一下应力分量. X面上有三个. 一个正应力  $\sigma_x$ , 两个切应力  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ . 这个面上所有应力分量第一个角标都是X. 看第二个角标. 例如  $\tau_{xy}$ . 为指力的方向指向Y轴. 或平行于Y轴. 这个切应力就写成  $\tau_{xy}$ . 再看一个.  $\tau_{zx}$ . 指的是在Z面上作用力指向X轴方向的切应力. 大家把这个图画一下. 总共有三个正应力+六个切应力. 九个应力分量完整描述它的应力状态.

我们来看应力张量状态的第三种表示方法. 应力状态张量法. 我们把九个应力分量写成

矩阵形式. 写一下.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow \text{作用在X面上的应力} \\ \rightarrow \dots \\ \rightarrow \dots \end{matrix}$$

$\downarrow$        $\downarrow$        $\downarrow$   
 作用面    Y      Z  
 X

练习题  $\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 4 & 8 & 2 & 3 \\ 2 & 6 & 1 \\ 3 & 1 & 5 \end{bmatrix}$

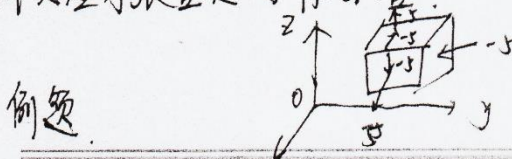
那问题来了. 正负怎么规定呢?

正面 (外法线指向坐标轴正向)      负面 (—— 负向).  
 正号. 正正为正. 正负为负. 拉为正. 压为负

9个应力分量. 只有6个独立的. 因为切应力互等定理. 谁和谁互等呢.  
 由于单元体处于静力平衡状态. 不发生旋转. 所以单元体各坐标轴的合力矩为零.  
 $\downarrow$   
 力 $\times$ 距离.

$$\tau_{xy} \cdot dy \cdot dz \cdot dx = \tau_{yx} \cdot dx \cdot dz \cdot dy \rightarrow \tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

所以应力张量是对称张量.



$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -7 & 4 & 0 \\ 4 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -4 \end{bmatrix}$$

# 西安航空学院

简单了解一下张量的性质. 重点是二阶张量, 刚才我们说了, 是对称的. 因为切应力互等定理.

还有三个. ① 存在三个独立的不变量.  $J_1, J_2, J_3$  下面会用到. 例.

② 可叠加 可分解

③ 对称

④ 存在三个主轴  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  三个主值.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

我们再来总结一下应力张量. 用  $\sigma_{ij}$  来表示.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \cdot & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \cdot & \cdot & \sigma_z \end{bmatrix}$$

任意坐标系

圆柱坐标系. 在研究圆柱类变形体的变形时可以使用.

$\rho$  径向.  $\theta$  周向.  $z$ -轴向.  
 $x$   $y$   $z$ .

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_\rho & \tau_{\rho\theta} & \tau_{\rho z} \\ \tau_{\theta\rho} & \sigma_\theta & \tau_{\theta z} \\ \tau_{z\rho} & \tau_{z\theta} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

本讲小结: 应力状态  $\rightarrow$  应力分量.  
 应力张量法 (3个坐标系).  
 应力张量性质.

预习内容: ① 任意斜面上的应力. 方向余弦.

② 主力和应力不变量.  $\checkmark$



# 西安航空学院

外力  $F$   
内力  
应力  $\downarrow$   
单位面积上的内力

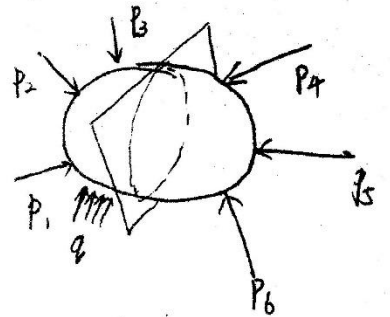
面积  $F$  内力  $P$   $S = \frac{P}{F}$

应力是某点  $A$  的坐标的函数。即受力体内不同点的应力不同。

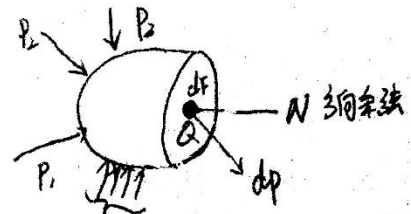
应力是某点  $A$  在坐标系中的方向坐标的函数。即同一点不同方位的截面上的应力是不同的。

相同外力  $P$  作用下，所取截面不同，获得的应力大小也不同。  
显然要正确衡量应力大小，需要在相同截面位置下比较。

大小 方向



切取一桶，如何求内力。



合力  $S = \lim_{dF \rightarrow 0} \frac{dP}{dF} = \frac{dP}{dF}$

引出 正应力：垂直于截面上的应力  $\sigma$   
切应力：平行于截面上的应力  $\tau$   
应力：单位面积上的应力，用符号  $S$  表示。  
即截面法线  $n$  作用力  $F$  的方向不垂直

① 正面上  $\sigma_0 = \frac{P \cos \theta}{F} = \frac{P \cos \theta}{\frac{F_0}{\cos \theta}} = \sigma_0 \cos^2 \theta = S \cos \theta$

②  $\tau_0 = \frac{P \sin \theta}{F} = \frac{P \sin \theta}{\frac{F_0}{\cos \theta}} = \frac{1}{2} \sigma_0 \sin 2\theta = S \sin \theta \checkmark$

概念  $S$   $\sigma$   $\tau$

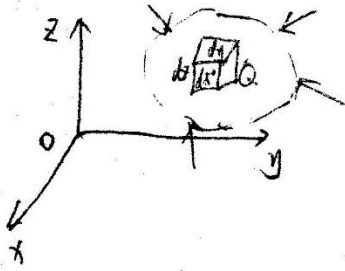
$S^2 = \sigma^2 + \tau^2$

坐标

$\vec{S} = \vec{\sigma} + \vec{\tau}$   
 $\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_x + \vec{\sigma}_y + \vec{\sigma}_z$   
 $\vec{\tau} = \vec{\tau}_x + \vec{\tau}_y + \vec{\tau}_z$

# 西安航空学院

一点的应力状态：是指通过变形体内某点的单元体所有截面上的应力的有无、大小、方向等情况。  
 实际表达，在单元体的三个正交面上标出。



$dx = dy = dz = 1$

X面：外法线与X轴平行。

垂直  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$

Y面：- - - Y - - -

斜对称，X面上，沿Y轴平行于Y

Z面：- - - Z - - -

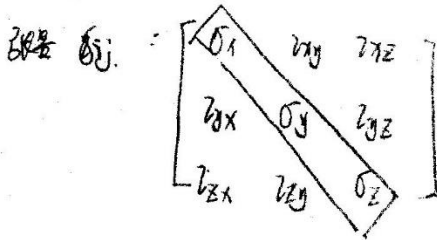
轴，Z轴。

$n \rightarrow$  normal 法向量，垂直于该平面的三维向量。  
 line.

命名：X面，Y轴。

3正应力，6个剪力，切应力。

6个独立分量



$(\sigma_{ij}) = x, y, z$

剪应力互等。

正负：

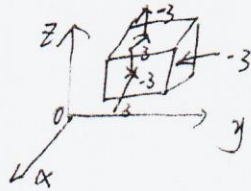
举例：

# 西安航空学院

## 第四讲 讲稿

同学们好，这节课我们继续学习第二章金属塑性变形的力学基础。首先通过两个练习题复习一下上节课的重点内容，请同学们先在笔记本上画一下应力张量状态图<sup>和</sup>任意坐标系下的应力张量<sup>图</sup>，然后我们看一下第几个题目，已知一点的应力状态，可否写出 $\sigma_{ij}$ 。

该点的应力张量  $\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  偏应力状态，第题。逆运算。已知一点的应力张量，可否画出应力单元体图。



这节课我们学习第二节的三、四部分。任意斜面上的应力，然而我们对点的应力状态进行了描述。如果九个应力分量已知，那过该点任意斜面上的应力（正应力、切应力）理论上是可以求的。因为应力分量确定，过该点的任意面上的应力都可确定。那具体值，具体表达式是什么呢？  
二、主应力和应力不变量，需要大家掌握主应力、主平面、应力主方向的概念。已知应力分量，能求出主应力状态的主应力和主方向。还有了解主应力图有几种？这节课要讲的内容。

首先，来研究下第一个问题。已知一点的九个应力分量，由静力平衡条件（各个方向上的合力为零）求过该点的任意斜面上的应力。首先来看一下这个图。已知O点三个互相垂直坐标轴上的应力分量 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 。

过O点任一斜面ABC，斜面面积是dA。一切斜面的法。如果斜面交点值相等，等倾面， $l=m=n$ 。若 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  求出， $\sigma, \tau$  可求出。求解一下方向余弦？而积  $\cos \theta$ 。前面单向拉伸。  $A = A_0 / \cos \theta$ 。

$$l = \cos(N, x), m = \cos(N, y), n = \cos(N, z)$$

地址：西安市西二环259号

电话：(029) 84258166

传真：(029) 84261737

邮编：710077

# 西安航空学院

~~$S \rightarrow \sigma, z$~~   $S \rightarrow S_x, S_y, S_z$  合力 × 面积

面积. 斜面在三个坐标面的投影面积为  $dA_x = l dA$   $dA_y = m dA$   $dA_z = n dA$

$S \rightarrow S_x, S_y, S_z$  (沿坐标轴)  $S^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2$  体对角线的平方等于三个坐标轴分量.

$S \rightarrow \sigma, z$   $S^2 = \sigma^2 + z^2$

沿 x 方向的合力  $\Sigma F_x = S_x dA - \sigma_x dA_x - z_{yx} dA_y - z_{zx} dA_z = 0$

$$S_x dA - \sigma_x l dA - z_{yx} m dA - z_{zx} n dA = 0$$

整理得.

$$S_x = \sigma_x l + z_{yx} m + z_{zx} n$$

$$S_y = z_{xy} l + \sigma_y m + z_{zy} n$$

$$S_z = z_{xz} l + z_{yz} m + \sigma_z n$$

(2-6) 竖着写张量  $l, m, n$  ✓

角标符号  $S_j = \sigma_{ij} l_i$  ( $i, j = x, y, z$ )

$S^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2$  可求得.

问题来了. 如果 Q 点处于变形体的边界上. 斜面 ABC 为物体的外表面. 把  $S \rightarrow F$  则合力边界条件就为下式 ✓

已知  $S$ .  $\rightarrow$  那  $\sigma$  和  $z$  呢?

斜面上的正应力  $\sigma$  可分解. 数学老师告诉我们某一矢量向某方向投影. 等于该分矢量向某方向的

投影的代数和.  $\sigma = S_x l + S_y m + S_z n$  刚才求得公式 2-6. 代入上式得.

$$\sigma = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2(z_{xy} l m + z_{yz} m n + z_{zx} n l) \quad (2-8)$$

斜面上面切应力  $\tau^2 = S^2 - \sigma^2$  但没有给出具体表达式. 太复杂了.

$\therefore$  任意斜面上的  $\sigma, z$ . 随  $l, m, n$  而变化 ✓

# 西安航空学院

太难了。我们发现很多张量都可以描述一点的应力状态。那有没有比较简单的形式呢。我们把目光投向了主应力状态。那应力状态不变。很多应力张量又可以描述，那这众多的应力状态张量中肯定存在一个不变的东西。同样的DNA。这就是应力不变量。所以。接下来我们讨论一下主应力和应力不变量。

应力状态是一种怎样的状态呢？过一点可以作无数斜面。总会找到一组斜面。上面只有正应力。没有切应力。即  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 0$ 。那切应力为零的平面就是主平面。主平面上的正应力<sup>0</sup>就是主应力。那方向呢。主平面的法线方向，也就是主应力的方向，也称为应力主轴。

那个面 ABC (主平面) 它与三个坐标轴的方向余弦是多少呢？ $l, m, n$  (2-6) 有思路吗？我们只作过斜面啊。那如何建立斜面和主平面的联系呢？ $S_x, S_y, S_z$ 。

通过分析这个图， $S$  在  $x, y, z$  轴上的分力。

$$S_x = \sigma l \quad S_y = \sigma m \quad S_z = \sigma n$$

公式 (2-6)

$$\begin{cases} S_x = \sigma_x l + \tau_{yx} m + \tau_{zx} n \\ S_y = \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{zy} n \\ S_z = \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n \end{cases}$$

代入

得

$$\begin{cases} (\sigma_x - \sigma) l + \tau_{yx} m + \tau_{zx} n = 0 \\ \tau_{xy} l + (\sigma_y - \sigma) m + \tau_{zy} n = 0 \\ \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + (\sigma_z - \sigma) n = 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

未知数  $l, m, n$ ，这是一个关于  $l, m, n$  的三元线性齐次方程组。

要么  $l, m, n = 0$  或者系数行列式 = 0。

$\because l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (2-12) \quad \therefore l, m, n$  不能同时为 0

$\therefore$  必须方程组系数行列式 = 0。

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0$$

# 西安航空学院

展开  $\sigma^3 - J_1 \sigma^2 - J_2 \sigma - J_3 = 0$  应力状态特征方程。(2-14)

该方程有唯一一组实根。三个主应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$   $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$   $\neq 0, \sigma_2, \sigma_3$

将  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  求解得的应力分别代入(2-11)并和(2-12)联立, 便可求出三组方向。  
中任意两式

$$l_1, m_1, n_1 \quad l_2, m_2, n_2 \quad l_3, m_3, n_3 \quad \checkmark$$

总结一下: 由应力状态特征方程可求得主应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  且与坐标轴选择无关, 即坐标轴如何选择, 主应力只有一组值。  
~~且与坐标轴选择无关, 且与坐标轴选择无关, 且与坐标轴选择无关。~~ 而且, 对于一个确定的应力状态, 主应力只有一组值。

$J_1, J_2, J_3$  不变, 又叫做应力张量第一、第二、第三不变量。回忆一下应力张量性质存在三个不

变量。(牢记一下)  $\Rightarrow$  表示了一个确定的应力状态其应力分量之间的确定关系

$\rightarrow$  那把  $x, y, z$  坐标变成  $l, m, n$  应力主轴坐标系。为了和前面的区分

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

例: 那在主轴坐标系中斜面上应力分量表达式简化为

$$s_1 = \sigma_1 l \quad s_2 = \sigma_2 m \quad s_3 = \sigma_3 n$$

$$\text{斜力 } S = \sigma_1^2 l^2 + \sigma_2^2 m^2 + \sigma_3^2 n^2$$

$$\text{正应力 } \sigma = \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2$$

$$v^2 = J_2 \sigma^2 = \sigma_1^2 l^2 + \sigma_2^2 m^2 + \sigma_3^2 n^2 - (\sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2)^2$$

不变量

$$J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = -(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)$$

$$J_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$$

$\therefore$  用主应力表示应力状态, 可大大简化计算。后面的应力分析中, 一般都近似为主应力状态。

# 西安航空学院

总结一下, 给定一点应力张量. 如何求  $J_1, J_2, J_3$ . 如何求  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . 如何求  $l, m, n$ ?

→ 应力状态特征方程  $\sigma^3 - J_1\sigma^2 - J_2\sigma - J_3 = 0$  求解  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . ② 分别代入 2-11 与 2-12 验证.

求  $l, m, n$ .

例题: 利用应力张量不变量, 可以判断应力状态异同

$$J_1 = a+b, \quad J_2 = -ab, \quad J_3 = 0.$$

例 2-1.

(2-11)

3. 应力椭球面. 指: 主轴坐标系中点应力状态的几何表达.

$$s_1 = \sigma_1 l, \quad s_2 = \sigma_2 m, \quad s_3 = \sigma_3 n$$

$$l = \frac{s_1}{\sigma_1}, \quad m = \frac{s_2}{\sigma_2}, \quad n = \frac{s_3}{\sigma_3} \quad \text{由 } l^2 + m^2 + n^2 = 1$$

$$\frac{s_1^2}{\sigma_1^2} + \frac{s_2^2}{\sigma_2^2} + \frac{s_3^2}{\sigma_3^2} = 1$$

椭球面半轴长分别为  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . 椭球面上的点有什么特别呢? 该面是任意斜切面上

上各应力  $S$  的集合.

(1) 如果  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ . 则 该点应力状态  $\tau = 0$  所有方向都是主方向. 且所有方向应力相等. 不能先验性假设.

(2) 如果两两相等 圆柱体应力状态.

(3) 如果  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 = 0$  单向应力状态.  $\sigma_1$  垂直的所有方向都是主方向. 且这些方向上的应力

相等.

# 西安航空学院

最后看一下应力图。一点的应力状态。有多少种应力图。

一维(单向) 一拉一压。 二维(面应力) 三维(体应力)

例。单向拉伸。单向压缩。剪切。拉拔。

② 主应力状态。 三种 一拉一压。 两拉一压。 两压一拉。

本讲主要学习了 <sup>一点的</sup> 已知应力状态。如何求出过这一点任意斜面上的应力。

应力。应力方向。应力张量不变量。应力图。请同学们课后复习。有不清楚的地方可以

问我，或者看课程上的录屏视频。作业已通过飞书发布。

下节课我们学习主切应力。最大切应力。和应力张量的分解。请同学们预习。

这节课就上到这，同学们再见。

带着两个问题去预习

关系 分解。

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

主应力图

↓



# 西安航空学院

## 第5讲讲稿

同学们，这节课我们继续学习第二章 金属塑性变形的力学基础。首先来复习一下上节课的主要内容。上节课主要研究了主应力状态，那首先回忆一下，什么是主应力。主平面。主方向（主应力轴）。  
主平面：只有正应力，没有切应力。即切应力为零的平面。主平面上的正应力，也是主应力为主应力。  
主方向：就是主方向，也叫应力主轴。我们还引出了主应力坐标系。第三个题目，已知一些的主应力状态，如何求解主应力、主方向。我们知道二阶对称张量，而应力张量有第四阶张量性质，存在三个主值，三个主轴。那怎么求得呢？先求应力张量不变量  $J_1, J_2, J_3$ ，列应力特征方程  $\sigma^3 - J_1\sigma^2 - J_2\sigma - J_3 = 0$ 。求解主应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  按  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ，然后分别地  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  代入 (2-11) 和 (2-12) 与  $m^2+n^2=1$  联立的方程组求解，得出三个主方向。本讲得最后，后面我们会通过题目复习一下。第三个题目，主应力图有多少种？主偏差应力状态图有多少种？主应力图有9种，其中三个符合体积不变原则。前四节让你记忆尤深的知识点是？大家想一想。通过课堂练习反馈给我。

好，这节课我们学习第二章 第五、第六部分。一、主切应力和最大切应力。和主平面看一下什么是主切应力，主切应力平面。主切应力值和最大切应力值是什么？有的教材中也写成主剪应力。主剪应力平面。第二个重点内容 研究应力张量分解。若第一个内容，与分析斜微分面上的正应力一样，切应力也随着斜面上方位角而改变。主平面和主切应力平面都是单元体内的特殊面。两者有什么关系呢？我们先对照主平面主应力，来看一下主切应力和主切应力平面的概念。主切应力。主切应力作用的平面，对不对？不对。是切应力为最大时，该切应力为主切应力。主切应力作用的平面。

# 西安航空学院

称为主切应力平面。那思考一个问题，~~当切应力为0时~~主平面上切应力为零。那主切应力平面上，正应力为零吗？答案是不为零。因为我们前面学过一个公式  $\tau = \sigma \cos \lambda \cos \varphi$  那  $\sigma$  为0,  $\tau = 0$  了。所以此时正应力不为零。等于多少呢？我们后面会学习。那此时角度是多少呢？

首先，我们推导一下，<sup>3解</sup>看能不能通过前面学过的知识得出。为的方便起见，我们取主坐标系。则任意斜面上的切应力可用公式 (2-9a) 求得。  $\tau^2 = \sigma^2 = \sigma_1^2 l^2 + \sigma_2^2 m^2 + \sigma_3^2 n^2 - (\sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2)^2$ 。把  $n^2 = 1 - l^2 - m^2$  代入上式中消去  $n$ 。得  $\tau^2 = (\sigma_1^2 - \sigma_3^2) l^2 + (\sigma_2^2 - \sigma_3^2) m^2 + \sigma_3^2 - [(\sigma_1 - \sigma_3) l^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) m^2 + \sigma_3]^2$  为求切应力的极值。将式 (a) 分别对  $l, m$  求偏导并令其为0。设  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  经化简得。

$$l \{ (\sigma_1 - \sigma_3) - 2[(\sigma_1 - \sigma_3) l^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) m^2] \} = 0 \quad (b) \quad \begin{matrix} \text{极大值, 极小值} \\ \text{主切应力} \end{matrix}$$

$$m \{ (\sigma_2 - \sigma_3) - 2[(\sigma_1 - \sigma_3) l^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) m^2] \} = 0$$

我们来分析一下这组式子。如果  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 。  $\tau = 0$ 。 纯应力状态。 不发生塑性变形。 大多数情况是  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  不等。 我们关注  $l$  和  $m$  的值。 ① 若  $l = m = 0$ 。  $n = \pm 1$ 。 主平面。 纯应力状态 (3组)。

② 若  $l \neq 0, m \neq 0$ 。 则  $\sigma_1 = \sigma_2$  无解。 ③ 若  $l \neq 0, m = 0$ 。 则  $m$  中有一个为零。 将  $l = 0$ 。 化解式子

$(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - 2m^2) = 0$   $m = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ 。 由  $n^2 = 1 - m^2$  得  $n = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ 。  $m = 0$  时  $l = n = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ 。 那同理消去  $l$  或  $m$ 。 得  $n = 0$ 。  $l = m = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ 。 主切应力平面。 我们将这组解代入前面的公式，可得正应力、切应力值。 我们列表总结一下。 前三组切应力取小

值。 主平面。 可以说纯应力是一种特殊的主切应力状态。 后三组主切应力取极大值时，主切应力平面。 共有12个面。 5个主平面垂直。 5个另外两平面相交成45°角。 看一个图理解一下。 这  $l = 0$  时，主平面。

① 垂直。 ②,  $m$  不为0时，

在前面表中各主切应力中绝对值最大切应力  $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 。 那再总结一下主切应力平面上的

正应力值和主切应力值

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} & \tau_{12} &= \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \\ \sigma_{22} &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} & \tau_{23} &= \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \end{aligned} \right\}$$

地址：西安市西二环259号

电话：029-84258166

84261737

邮编：710077

# 西安航空学院

用几句话总结一下：① 在应力状态下，任意两个主平面的角平分面，必为主切应力平面。

② 主切应力大小等于相邻两个主应力面上主应力值差的一半。③ 主应力大小为相邻两个主平面上主应力值和的一半。

主切应力性质：① 变形时主应力状态，主切应力为0。② 若三个主应力同时增加或减少一个相同的值时，主切应力值将保持不变。

第二个重要内容：应力张量分解。我们知道变形分为塑性变形和弹性变形，那点的应力状态与两个变形都包括的，我们主要研究的是塑性变形阶段，所以要分离出来，再举个例子，比如三向压缩的变形，如果  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ，那是不可能的，对吧，变形体会越来越小，所以  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ，有效部分应该是不等的，那我们把应力张量分解为与体积变化有关的量和与形状变化有关的量，用图再来说明一下，即分解为应力球张量和应力偏张量，球张量的值为三个正应力分量的平均值，也叫静水压力，用  $\sigma_m$  表示。

$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{J_1}{3}$

$\sigma_m$  当应力状态确定， $\sigma_m$  是不变的单值。∴ 应力分量可写成：略。那应力张量可写成：

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} \quad \text{简称为 } \sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m \quad \boxed{\text{PPT}}$$

应力张量分解也可用图示表示。那应力偏张量存在不存在不变量呢？也是一个二阶矩阵。

那我们来看一下，主应力不变量比较， $J_1'$   $J_2'$   $J_3'$

# 西安航空学院

$J_1' = \sigma_x' + \sigma_y' + \sigma_z' = 0$  去除静水压力成分, 不产生体积变形

$$J_2' = -[\sigma_x' \sigma_y' + \sigma_y' \sigma_z' + \sigma_z' \sigma_x' - (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]$$

$$= \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)$$

主轴线坐标 =  $\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$  屈服极限准则有关.

$$J_3' = \begin{vmatrix} \sigma_x' & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \cdot & \sigma_y' & \tau_{yz} \\ \cdot & \cdot & \sigma_z' \end{vmatrix}$$

决定变形  $J_3' > 0$  伸长.

$J_3' = 0$  平面

$J_3' < 0$  压缩

能导出应力偏张量特征方程吗?

$$= \sigma_1' \sigma_2' \sigma_3'$$

主偏应力状态图. 两压一拉 (伸长)      一拉一压 (平面应力)      两拉一压 (压缩).

思考问题: 仅靠一点的应力张量是否可以判断变形类型? (X) 应力偏张量.

做一个练习题, 来加深印象. 例题

经过比较看出, 三种加工方式的应力状态虽然不同, 但其应力偏张量相同, 所产生的变形为伸长类应变.  $\therefore$  根据应力偏张量可以判断变形类型.

我们总结一下 1-6 节部分内容. 1-4 节. <sup>①</sup> 会画单元体. 会求主应力方向. 回忆下 PPT

- ② 给定两点应力张量 会判断是否同一应力状态.
- ③ 主切应力值差值形式
- ④ 给定一点应力张量 会分解为张量和偏张量.

做一个题目, 练一下.

预习内容. 下节学习应力平衡微分方程 (大家了解一下推导过程) 还可三种简化变形

形状. 了解一下三种状态的应力张量. 应力平衡微分方程. 这节课就上到这. 同学们再见.

# 西安航空学院

## 第六讲 讲稿

同学们好，这节课继续讲第二章金属塑性变形的力学基础。首先来复习一下上节课的主要内容。上节课研究了主切应力平面。主切应力。看第一个题目，什么叫主切应力平面？主切应力作用的平面称为主切应力平面。共有12个。最大切应力  $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_3$  ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )。还要记住三角句话。让大家做了练习题。在主应力状态下，任意两个主平面的角平分面必为主切应力平面。主切应力值与两相主应力值差的<sup>一半</sup>。主应力值与任意相主平面上主应力值和的一半。第二个题目，应力偏张量只发生体积变形，不产生形状变形。用  $\sigma_{ij}$  表示，应力偏张量相反，用  $\sigma'_{ij}$  来表示。

这节课主要讲第二节第七~九部分的内容。包括八面体应力、等效应力。重点是应力平衡微分方程。还要介绍一下三种应力状态，这是后面分析问题重点。希望同学们区分记忆。

首先来看一下八面体应力和等效应力。第四讲的时候，讲任意斜面上的应力的时候，我提到如果三个轴截距相等，即一个斜面与三个轴方向余弦值相等，即为等倾面。与三个轴倾斜角度相等。由  $l^2 + m^2 + n^2 = 1$ 。得此时  $l = m = n = \pm \frac{1}{\sqrt{3}}$   $54^\circ 44'$ 。过任意一点无限靠近该点能想象下。做多少个这样的等倾面呢？答案是八个。为了研究方便，我们取了应力主轴为坐标轴，在三个轴等倾面空间八个象限中的等倾面组成一个八面体，八面体的每个平面就叫八面体平面。如下图所示。

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

每个面上的应力记为

$$\sigma_8 = \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_m = \frac{J_1}{3} = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

——基础 [平均应力]

$$\tau_8 = \pm \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

与应力偏张量第二不变量有关。符合等效。

$$= \pm \sqrt{\frac{2}{3} J_2}$$

$$P_8 = \sqrt{\sigma_8^2 + \tau_8^2}$$

# 西安航空学院

简单说一下等效应力。为了使简单的和复杂的应力状态具有可比性。复杂应力状态的应力值折合成

单向应力状态的应力值。定义为等效应力。或称为应力。

茹芦七兄弟 → 茹芦全刚

$$\bar{\sigma} = \frac{3}{\sqrt{2}} \sigma_0 = \sqrt{3} \sigma_0'$$

等效应力等于单向应力状态的应力。还记得前面说的单向应力状态吗？

① 等效应力是一个不变量。② 数值上等于单向均匀拉伸。③ 不代表某实际平面上的应力。④ 综合效果。

八 ~~前面~~前面介绍的是变形体内一点的应力状态。要知道整个变形体的应力状态怎么办呢？  
需要一个桥梁。点与点之间的应力状态的关系。我是点Q。旁边有个Q'点。我们之间建立了联系。Q'点的Q''点也可以求得。这样整个变形体的应力状态就知道了。下面。我们研究一下这架友谊的桥梁。

在外力作用下变形体处于平衡状态。其内部点与点之间的应力大小是连续变化的。应力是坐标的连续函数。比如Q点的  $\sigma_{ij} = F_{ij}(x, y, z)$ 。现取其无限邻近的Q' ( $x+dx, y+dy, z+dz$ )。  
 $\sigma_{ij}^{Q'} = \sigma_{ij}^Q + d\sigma_{ij}$  怎么推导。

→ Q'点的x面上坐标变化了dx。正应力分量  $\sigma_{x+dx} = f(x+dx, y, z)$  用泰勒公式展开。并忽略高  
阶项  $\sigma_{x+dx} = \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx$ 。同样。可得Q'点的应力状态  $\sigma_{ij} + d\sigma_{ij}$ 。

用于六面体处于静力平衡状态。因此作用在大面体上的所有力沿坐标轴投影之和为0。如沿x轴。  
求得六个力的合力为零。化简。又  $dx dy dz = dV \neq 0$ 。得。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} (2-25)$$

$$\text{简记. } \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0$$

应力在变形体内分布规律。

# 西安航空学院

当变形体为旋转体时 用圆柱坐标更简单 同样的方法得到.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} (2-26)$$

做一个练习题

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} -6x^2 + 36x^2 - 36y^2 - 6x^2 &= 0 \\ -26xy - 36xy &= 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} C_1 = 1 \\ C_2 = -2 \\ C_3 = 3 \end{cases}$$

当我们求解一般的三维问题有困难. 有一个办法

把三维问题简化为平面问题或轴对称问题. (三种) 论. 把三维问题简化为平面问题或轴对称问题

平面问题有两类 ① 平面应力状态 ② 平面应变状态下的应力状态

1. 平面应力状态 熟悉的陌生人. 其实应力状态图我们见过. 张量我们学过. 平衡微分方程我们

也接触过. 来一起再认识一下它. 在变形体为板料或薄壁件时. 常常认为每个平面上没有应力的作用

即没有应力. 没有没有应力

这就简化为平面应力问题. 如下图所示.  $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$  只有.

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  三个独立的应力分量. 且沿  $z$  轴方向均匀分布. 即应力分量与  $z$  轴无关. 对  $z$  轴偏导为 0

自己学一下应力张量并平衡微分方程. 如下页 PPT.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

# 西安航空学院

我们来研究一下此状态下斜面上的力 (了解) 正应力 切应力 主应力。

★ 平面应力状态下 $x$ 向有没有应变? 有 只有在纯剪切时才没有。压缩。纯剪切是指两个主应力值符号相反时。后面会用应力莫尔圆说明。

第二种状态。平面应变状态下的应力状态。和平面<sup>自由变形</sup>应力状态对比理解。如果物体内所有质点只

在同一坐标平面内发生变形。而该平面法线方向没有变形。就属于平面变形或平面应变问题。该平面有了名字, 叫塑性流动平面。如图 2-17 所示。(讲图)。这种状态的特点。①  $\epsilon_{zx} = \epsilon_{zy} = 0$ 。② 存在 $\sigma_x$ 且 $\sigma_x$ 为压应力。③ 所有分量对 $z$ 轴求偏导为零。

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) = \sigma_m$$

球应力状态无变形。只有球张量。数值上等于 $\sigma_m$ 。

增大一下难点。既然看见了 $\sigma_m$ 。能不能把 $\sigma$ 的应力张量分解一下呢? 应力平衡微分方程可以写吗? (PPT) 和你们写得一样否? 有没有发现。  $\sigma_{11}' = -\sigma_{22}'$

刚才提过这叫什么状态? 纯剪切对不对? 大小相等。符号相反。所以若以 $x$ 为 $z$ 轴为坐标轴。平面应变时的应力状态与纯剪切+应力球张量。下节课会用到这句话。应力平衡微分方程一样(平衡力)

$$\tau_{12} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad \tau_{23} = \tau_{31} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4}$$

播一句话: 平面应变状态下最大切应力所在的平面与 $x$ 轴平面上两个平面交成 $45^\circ$ 角。这是建立带壳线理论的重要依据。第五章会用到。

最后一种状态。轴对称应力状态。当旋转体承受的外力对称于旋转轴分布时。则旋转体内质点所处的应力状态称轴对称。特点: 变形体 $z$ 平面(即 $\theta$ 向)没有扭曲变形。无切应力。  $\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0$ 。

$\sigma_{\theta\theta}$  为压应力。对 $\theta$ 求偏导=0。能写出此状态的应力张量吗?

$$\begin{bmatrix} \sigma_r & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ \tau_{rz} & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

应力平衡微分方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

如果圆柱体均匀材料均匀挤压和拉伸时。径向和周向正应力分量相等。 $\sigma_r = \sigma_\theta$  则仅三个独立分量。还可以简化



# 西安航空学院

7-9 小结.

1. 应力平衡微分程. 我们把点选在坐标系中. 通过位移增量  $\rightarrow$  应力增量.  
表示变形体内无限相邻两质点的点的应力状态关系.

2. 平面应力状态: 特殊. 简化状态.

$\sigma_x$   $\sigma_y$   $\tau_{xy}$  三个独立分量

3. 平面应变状态.  $\sigma_x$   $\sigma_y$   $\sigma_z$   $\tau_{xy}$  四个

⚡  
下节课我们将应力圆各图. 会给大家介绍五种莫尔圆. 希望大家预习. 作业通过了可通  
发布. 这节课就上到这. 同学们再见.

# 西安航空学院

## 第七讲 讲稿

同学们好。这节课我们继续来学习第二章 金属塑性变形的力学基础。首先来复习一下上节课的主要内容。上节课我们认识了正八面体  $l=m=n=\pm\frac{1}{3}\sigma_0$ 。  $\sigma_0 = \sigma_m$   $\epsilon_0$  与应力偏张量第二不变量有关。重点推导了应力平衡微分方程。表示的是变形体内无限相邻的两质点的点的应力状态的关系。还学习了三种简化的特殊状态。复习题来了。请写出平面应力状态、平面应变状态时的应力状态和轴对称状态的应力张量、应力平衡微分方程。这是上节课留的作业。同时与这节课的内容息息相关。请同学们写一下

平面应力  $\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

② 平面应变  $\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\}$

③ 轴对称  $\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_r & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ \tau_{rz} & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{应力偏张量不变量} \times \\ \text{同样一下} \end{array}$

这节课我们学习一下第二章第二节第十部分内容。1-9都很重要是基础。当然第十部分也很重要。讲五种应力莫尔圆。前两个是重点。上完这节课你至少知道这三个内容。什么是

应力莫尔圆。如何用应力莫尔圆描述一点的应力状态？应力莫尔圆有哪些性质？

来我们先来看一下平面应力状态。在z轴垂直的面上不受应力。只受双向的正应力、切应力（相邻两截面之间的拉伸或压缩作用的力和相互错动的力）。上节课我们还研究了这种状态下任意斜面上的力，公式复杂且难记。有的同学就要问，老师，有没有更加直观形象地表示复杂变形情况下点的应力状态的方法呢？答案是肯定的。这就是我们这节课的内容

# 西安航空学院

来我们带着刚才提出的三个问题，来学习一下应力莫尔圆。什么是应力莫尔圆？1866年德国的库尔曼首先证明，物体中一点的二向应力状态可用平面上的一圆表示，这就是应力圆。1882年德国工程师莫尔对应力圆作了进一步的研究，提出借助应力圆确定一点的应力状态的几何方法，后人称为应力莫尔圆。它是表示复杂应力状态下物体中一点各截面上应力分量之间关系的平面图形。在做应力莫尔圆时，正应力以拉伸为正，切应力以顺时针作用于单元体上为正。  
放在坐标系中

来看一下下面的图，表示的是平面应力状态。来看一下互相垂直的两个面A和C。A面上受压缩的正应力和使单元体逆时针旋转的切应力。所以在A面上受到的应力都是负的。

接着，以平面应力状态为例，来学习一下如何绘制应力莫尔圆。请注意实际物理平面和莫尔圆上点的对应关系。还是先看左边的图，它代表了一点的应力状态，有相互垂直的两个截面A和B。A面受到  $\sigma_x$  为正， $\tau_{xy}$  为负。B面受到  $\sigma_y$  为正， $\tau_{yx}$  为正。(1) 建立  $\sigma-\tau$  坐标系。(2) 在坐标系中找点A( $\sigma_x, \tau_{xy}$ ) 和点B( $\sigma_y, \tau_{yx}$ )。(3) 连接A、B两点，以AB线与  $\sigma$  轴的交点C为圆心。(4) AC为半径作圆，即得应力莫尔圆。思考几个问题：1. B点存不在圆周上？我们试着画一下，B在圆周上。AAS全等三角形，发现  $AC=BC$ 。2. 是不是左图所代表的应力状态的所有面上的微分面的应力都在应力莫尔圆上。刚才推导B存不在圆周上时已经回答了这个问题，答案是肯定的。3. 图中所画应力莫尔圆内部和外部的点代表了什么？不是点的应力状态，如果是，说明单元体被破坏了。由此可见，用应力莫尔圆可以代表一点任意微分面上的应力。当一个圆摆在我们面前的时候，好奇

驱使我们要把表达式推导出来。这是几何问题了，我们简单说一下，莫尔圆圆心  $C(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, 0)$ 。直角坐标系下

半径  $R = \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2}$ 。应力莫尔圆表达式  $(\sigma - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2})^2 + \tau^2 = (\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2$ 。

# 西安航空学院

## 第九讲 讲稿

同学们好。这节课我们开始学习第二章第三节变形体内质点的应变状态，名称和第二章四节像。那学习这章时，要用联想记忆法，与第二节内容对比记忆。先把这一节的知识脉络给同学们梳理一下。第一部分质点的应变状态，要引出应变张量的概念，以及应变张量的概念。应变是由位移引起的，所以在这之前还要简单认识一下位移及其分量。接着第二、三部分引出两个非常重要的方程，描述位移分量与应变分量之间关系的小变形几何方程，以及描述应变分量之间关系的应变连续方程。讲两个非常重要的例题。前三部分是重点。小变形前面介绍的都是微量应变，适用于小变形。但实际的塑性变形一般是大变形，所以需要把大变形看成是由很多瞬间应变增量累加而成，由此引出应变增量和应变速率概念，以及二者张量表达式。这部分了解一下。塑性变形常用相对应变和对数应变表示，简单了解一下二者的异同。第六部分了解一下塑性变形体积不变条件，会写表达式。最后，和应力状态一样，应变状态也简化为平面变形和对称变形。简单看一下两种状态的几何方程。

通过第二节的复习。

这节课，来一起学习第一部分质点的应变状态，包括以下三个内容。相信同学们能够很快掌握这部分的内容。前面给大家介绍过，应变是由位移引起的，所以需要先复习一下位移及其分量。同学们都做过拉伸试验，当时得到的是位移和载荷的变化曲线。通过公式转化为应力-应变曲线。线应变 =  $\frac{\Delta l}{l}$  相对位移变化。当然，这是单向应力情况下。复杂应力情况下，还会引起形状的变化。那问题来了，是不是所有的位移都能引起变形呢？举几个例子来看一下。讲PPT。以上例子说明，变形大小与质点的相对位移变化有关，如果相对位移没变，发生的是刚性

# 西安航空学院

位移。如图C、Q点，不产生变形。来认识几个概念。物体受到力的作用，单元内部质点产生相对位移位置的改变和形状的改变。也就是产生了变形。变形程度的大小用应变来描述。

那相对位置改变，即单元体线尺寸的伸长、缩短即线应变，又称作正应变；单元体角度的变化，称作角应变或切应变。这本课本中一般是线应变和切应变。那告诉大家 总结 PPT 19。

现在学习一下质点的应变状态，和点的应力状态对应一下。指的是变形体内一点任意截面上应变的方向、大小和个数。首先看一下位移及其分量。学习小变形几何方程时也会用到。需要大家理解一下。

位移指变形体内任意一点变形前后的直线距离。如果a. M点微元变形，由M点移到M'点。位移是向量  $MM'$ 。如果把它放在xyz坐标系中。它在三个坐标轴方向的投影分别为向量  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 。称为位移分量。简记为  $u_i$ 。由于变形体始终是连续的。∴位移分量也是坐标的连续函数。

想想前面讲应力平衡微分方程。应力张量是坐标的函数，
$$\begin{cases} u = u(x, y, z) & v = v(x, y, z) \\ w = w(x, y, z) \end{cases}$$

物体内部点的位移随时间-空间的分布状况。

就是位移场。即物体三维空间内位移矢量的空间分布状况。再来简单了解一下相对位移分量。

$u, v, w$ 。  
这里需要厘清位移分量与相对位移分量之间的关系。相对位移分量指变形体内无限接近两点的位移分量

之间的关系。  $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ 。这部分简单看一下推导过程。与M点  $(x, y, z)$  无限接近的  $M'(x+dx, y+dy, z+dz)$ 。变形中产生位移 M 移动到  $M_1$ ，  $M'$  移动到  $M'_1$ ，  $M_1 M'_1 = u'_1 = u_1 + \Delta u_1$ 。位移是坐标的连续函数

按泰勒级数展开。忽略高阶小量，得到  $\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz$ ，  $\Delta v = \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy + \frac{\partial v}{\partial z} dz$ 。

$\Delta w = \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial y} dy + \frac{\partial w}{\partial z} dz$ 。看一下公式。位移分量的全微分。用一句话描述。某一方向上的相对位移增量等于该方向上两点的位移分量在三个坐标轴上变化量之和。记住这句话就可以了。

如果  $MM'$  平行于坐标轴。可以进行简化。

# 西安航空学院

第二个问题  $\epsilon$ ,  $\gamma$  线应变, 切应变. 前面向大家介绍过了. 在这里我们推导一下表达式.

先来看一下线应变. 看图. 变形体在  $xy$  坐标面投影. 用  $\square$  <sup>四边形</sup>  $PABC$  变形为  $PA_1B_1C_1$ . 线元  $PB$  发生了微小的线变形. 变为  $PB_1$ . 由  $\gamma$  长度  $\gamma$  变为  $\gamma_1$ . 线元  $PB$  的线应变应为  $\epsilon = \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma} = \frac{\Delta \gamma}{\gamma}$ .  
线元长度的相对变形.

同理  $PA$ .  $\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x}$   $\epsilon_y = \frac{\Delta y}{y}$  (沿坐标轴的分量). 伸长为正, 缩短为负.

再来看一下切应变. 指线元偏转时角度的变化. <sup>切应变稍微复杂</sup> 区分几个概念 工程切应变.  <sup>$\phi_{xy}$ ,  $2\alpha_{xy}$ ,  $\gamma_{xy}$</sup>  纯切应变. 看图.

两个互相垂直的线元  $PA$ ,  $PC$ . 变形后直角缩小了  $\phi_{yx}$ . 变为  $\angle APC_1$ . 相即  $C$  点稍在垂直于  $PC$  方向偏转了  $\Delta v_2$ .  $\tan \phi_{yx} = \frac{\Delta v_2}{\gamma} \approx \phi_{yx}$ . 即表示了线元单位长度上的偏移量或两棱边所夹角的变化. 这是工程切应变.  $\phi_{yx}$  可看成是线元  $PA$ ,  $PC$  同时绕偏转相同的角度  $\gamma_{yx}$ ,  $\gamma_{xy}$  (切应变). 实际变形效果一样.

$\therefore \gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{1}{2} \phi_{xy}$  切应变第一个下角标表示线元的方向. 第二个下角标表示线元偏转的方向

学了两种切应变. 工程切应变. 纯切应变. 两者的区别是. 前者包含了刚性转动.

再来认识一种 <sup>实际</sup> 切应变  $2\alpha_{xy}$ ,  $2\alpha_{yx}$ . 它是什么含义呢. 在实际变形中. 线元  $PA$ ,  $PC$  偏转角度不一定一样.

$2\alpha_{xy}$ ,  $2\alpha_{yx}$ . 很容易得到  $2\alpha_{xy} + 2\alpha_{yx} = \omega_{xy}$ . 看图. 假设实际变形中. 线元  $PA$ ,  $PC$  先同时绕转了  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yx}$ . 然后整体绕  $z$  轴旋转了角度  $\omega_z$ . 角变形 = 切应变 + 刚性转动. 一个减少  $\omega_z$ . 一个增加  $\omega_z$ . 最后传

果还是  $\phi_{xy}$ . 来做一个题目. 选 B. 纯切应变 去掉刚性转动之后的.

Note: 工程切应变  $\phi_{xy}$   
实际切应变  $2\alpha_{xy}$ ,  $2\alpha_{yx}$   
纯切应变:  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yx}$

现在 请同学们试着算一下应变张量.

(B)

# 西安航空学院

第一个问题 本讲重点. 问一下应变分量和应变张量. 研究变形时. 为了便于建立几何关系. 需要进行均匀的假设. 直线和平面变形后仍为直线和平面. 互相平行的直线和平面变形后仍平行. 看图. 微元体 PABCDEF 放在直角坐标系中, 变形后变为 P<sub>1</sub>A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>...G<sub>1</sub>. 在此过程中. 发生了哪些变形呢? 同时发生线应变. 切应变. 刚性平移和转动. 我们试着把它分解开分析.

线应变比较简单.  $\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x}$   $\epsilon_y = \frac{\Delta y}{y}$   $\epsilon_z = \frac{\Delta z}{z}$  图 2-28.

去掉刚性转动后的纯切应变为  $\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{1}{2}\phi_{xy}$   $\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{1}{2}\phi_{yz}$   $\gamma_{zx} = \gamma_{xz} = \frac{1}{2}\phi_{zx}$

九个应变分量都知道了. 同时试着写一下应变张量. 
$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \epsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \epsilon_z \end{bmatrix}$$
 一线元  
偏转角.

那如果应变张量确定. 该点的应变状态完全确定.

第四个问题. 类比应力状态. 进一步认识一下应变状态. 点的应变张量与应力张量不仅在形式上相似. 其性质和特征也相似.

(1). 已知  $\epsilon_{ij}$  可以求该点任意方向上的线应变. 切应变.

$$\epsilon_r = \epsilon_x l^2 + \epsilon_y m^2 + \epsilon_z n^2 + 2(\gamma_{xy} lm + \gamma_{yz} mn + \gamma_{zx} nl) \quad (2-56)$$

(应变与应变分量之间的关系)

$$\sigma = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2(\tau_{xy} lm + \tau_{yz} mn + \tau_{zx} nl) \quad (2-8)$$

推导过程略.

应变张量性质 (1). 存在三个主应变.

(2). 存在三个应变张量不变量  $I_1, I_2, I_3$ . 表达式与应力张量不变量  $J_1, J_2, J_3$  类似. 与第五节对应.  $I_1 = \sigma$

试着写一下应变状态特征方程.

(3). 有三个主应变. 并且与主应变方向如方向上存在主切应变. 大小为应变差的一半.

(4). 应变张量可以分解为应变球张量和应变偏张量.

体积

形状

# 西安航空学院

(5). 存在应变张量的等效应变  $\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{3}}{3}$

(6). 应变莫尔圆. 横坐标为应变. 纵坐标为切应变. 为了区分. 纵坐标向下为正.

圆心. 半径相信你们可以写出.

几何相似. 或正比. ABD  
圆心位置不同

做一个练习题:

本讲小结:

下节课: 复习课.



# 西安航空学院

## 第十讲 讲稿

同学们好。这节课我们继续学习第二章金属塑性变形的力学基础。首先复习一下上节课的内容。

上节课主要讲了应变张量。应变分量  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 。切应变  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 。分清工程切应变、理论切应变。  
实际切应变。简述应变张量的性质。三个主应变。三个应变张量不变量。主切应变。可分解 (应变张量、应变偏张量)。  
应力张量性质。三个主应力。三个应力不变量。对称张量。可叠加和分解。

存在应变张量的等效应变。可以用应变莫尔圆描述一点应变状态。

那这节课学习两个非常重要的方程。上节课讲到应变是由位移引起的。那位移分量与应变分量有怎样的关系呢？我们用小变形几何方程描述。那已知  $\epsilon$ ，能不能推导出  $\gamma$ 。已知  $\gamma$ ，能不能推导出  $\epsilon$ 。这就是应变连续 (协调) 方程。

先来复习一下描述位移分量与应变分量之间关系的小变形几何方程。前面有个定理小变形。说明此方程适用于小变形。即微量应变情况。可以用位移场来表示应变场。位移分量与应变分量之间的关系。回忆一下位移分量  $u, v, w$ ，应变分量。如右图。找位移分量  $u$ 。a 和  $a_1$  在 x 轴上的。

分量。在 y 轴上的分量是  $v$ 。还看到了实际切应变  $\alpha_{xy}, \alpha_{yx}$ 。工程切应变  $\gamma_{xy}$ 。下面通过分析这个图。求出小变形几何方程。变形体在 xoy 上的投影为  $abcd$ 。变形后投影移至  $a_1b_1d_1c_1$ 。格边长为  $dx, dy, dz$ 。

刚才提到 a 点在 xoy 变形后移动到  $a_1$ 。产生的位移分量为  $u, v$ 。a 点和 b 点的位移增量。可以用公式  $c, b, d$  点与 a 点无限相邻的点。  
2-49 求得  $\Delta u = \delta u_c, \delta v_c = 0$ 。则不发生变形。肯定存在位移增量。  $\Delta u_c = \frac{\partial u}{\partial x} dx$  变形  $\frac{\Delta u_c}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}$

$$\Delta v_c = \frac{\partial v}{\partial x} dx \quad / \quad \Delta u_b = \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad \Delta v_b = \frac{\partial v}{\partial y} dy$$

根据图中几何关系，可以求出格边  $a_1c_1$  在 x 方向的线应变  $\epsilon_x = \frac{u + \Delta u_c - u}{dx} = \frac{\Delta u_c}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}$

$$\text{同理 } \epsilon_y = \frac{\Delta v_b}{dy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

# 西安航空学院

来着一下切变  $\tan 2\gamma_x = \frac{b_1 b_2}{a_1 a_2} = \frac{u + \Delta u - u}{v + \Delta v - v} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y}}{1 + \frac{\partial v}{\partial y}} \approx 2\gamma_x \quad \because \frac{\partial u}{\partial y} \ll 1 \quad \frac{\partial v}{\partial y} \ll 1$

$\therefore \tan 2\gamma_x \approx 2\gamma_x = \frac{\partial u}{\partial y} \quad \tan 2\gamma_y \approx 2\gamma_y = \frac{\partial v}{\partial x}$

$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$

剩下的三个分量也可以求出。由此我们得到直角坐标系下的小变形几何方程。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \gamma_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \gamma_{yz} &= \gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} & \gamma_{zx} &= \gamma_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} (2-66)$$

如果物体中的位移场已知，  
即可由小变形几何方程求得  
应变场 ( $u \rightarrow \epsilon$ )

简单了解一下圆柱坐标系下的几何方程。

做一个练习题。理解一下小变形几何方程的应用。 例 2-3. PPT. A

思考一下。如果已知应变分量。可不可以用小变形方程求得位移分量呢？答案是否定的。需要验证一下变形体的连续性。怎么验证呢？就要用到应变连续方程。它表示应变分量之间的关系。

由小变形几何方程可知。六个应变分量取决于三个位移分量。则六个应变分量必定存在一定的关系。

有两组。已知三个线应变。可求三个切应变。 或三个切应变。可求三个线应变。

先看第一组。由同一个坐标平面之间的应变分量。比如  $xOy$  平面。  $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 。

由小变形几何方程。我们知道  $\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$ 。对  $y$  取二阶偏导。  $\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)$

$\frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)$

两式相加。  $\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = 2\gamma_{xy} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$

# 西安航空学院

同理可得  $\frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial x \partial z}$ .

2). 另一组为不同坐标平面内应变分量之间满足的关系.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y \partial z}$$

①  $\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \rightarrow \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial z \partial x} = \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y \partial z}$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \rightarrow \frac{\partial^2 \epsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y \partial z}$$

②  $\gamma_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \rightarrow \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (1)$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \rightarrow \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial y} \right) \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \rightarrow \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial z} \right) \quad (3)$$

(1) + (2) - (3).  $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$  对 z 求偏导.  $\frac{\partial^2 \epsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y \partial z}$ .

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \epsilon_z}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial z \partial x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} (2-68b).$$

物理意义. 只有满足该关系. 变形才是连续的. 否则. 变形后会出现“撕裂”“重叠”

被破坏.

# 西安航空学院

---

做一个练习题. PPT.

ABD.

本讲小结 PPT.

预习内容:

# 西安航空学院

## 第十一讲 讲稿

同学们好。这节课我们继续学习第二章金属塑性变形的力学基础。首先来复习一下上节课的主要内容。

内容：PPT (2个练习题)。P-下小变形几何方程和应变连续方程。

这节课我们<sup>来复习</sup>把第三章剩下的几个知识点。你需要了解应变增量和应变速率的概念。<sup>符号</sup>分别记为  $\Delta \epsilon_{ij}$  和  $\dot{\epsilon}_{ij}$ 。会写数量。描述塑性变形有几种表达式，<sup>描述几何方程</sup>具体怎样选择。以及塑性变形体积不变条件。上节课我们<sup>知道</sup>它和应变张量第一不变量有关，了解两种特殊状态的几何方程。<sup>应力状态</sup>与应力状态联系起来学习。

首先看一下为什么引入应变增量和应变速率~~概念~~，因为前面讨论的都是物体在某变形过程或变形过程某个阶段结束时的变形大小。但是实际变形都是大变形。显然我们前面学习的公式不能直接应用。也就不能直接建立  $\epsilon_{ij}$  与  $\sigma_{ij}$  的关系，怎么办？我们用微积分的思想。

先把变形分解成  $dt$  (瞬时) 的应变增量，再用积分把很多瞬间应变增量累积起来。

所以引入  $\Delta \epsilon_{ij}$ 。我们知道应变是由位移引起的。那应变增量  $\Delta \epsilon_{ij}$  由位移增量  $\Delta u_i$  引起。

我们知道时间是  $dt$ 。只要知道<sup>位移</sup>速度分量。那位移增量也就知道了。所以，首先来看一下

速度场和速度分量。我们讨论前节<sup>我们讨论前节</sup>的位移场和位移分量<sup>来理解</sup>。什么是速度场，在塑性变形过程中，物体内质点以一定速度运动，形成了速度

场。速度分量 =  $\frac{\text{位移分量}}{\text{时间}}$        $\dot{u} = \frac{u}{t}$        $\dot{v} = \frac{v}{t}$        $\dot{w} = \frac{w}{t}$

那  $\Delta u_i = \dot{u}_i dt$        $\Delta v = \dot{v} dt$        $\Delta w = \dot{w} dt$

那~~我们~~可以导出  $\Delta \epsilon_{ij}$  与  $\Delta u_i$  的小变形几何方程。 (2-71)

那<sup>我们</sup>比瞬时<sup>的</sup>变形可视为小变形。

# 西安航空学院

$\Delta \varepsilon_{ij}$  肯定也是二阶对称张量。试总结一下应变增量张量。我们一起来看看下面这段话。再来体会一下应变增量。弹性变形是一个大变形过程。在变形的整个过程中，质点在某一时点的应变状态一般<sup>对应</sup>该时点的应变增量。可将弹性过程看作是一系列瞬时应变增量的积累。

如果  $\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{\Delta \varepsilon_{ij}}{\Delta t}$  单位时间的应变，也就是我们常说的变形参数中的变形速度， $s^{-1}$ 。二者都是描述的瞬时变形状态。也可以导出与位移速度分量与应变率之间的有关的小变形几何方程。(2-74)。那应变速率张量也可以写出来。

那两者有怎样的区别和联系呢？我们一起讨论一下。PPT 例题。弹性(3)对应。  
适用情况了解一下。研究理想弹性材料时，用应变增量和应变速率计算一致。如弹性材料。应用应变速率来计算。值于题 ABD。

接着，讨论一下第五部分。弹性变形程表达式。相对应变。对数应变。相对应变对于咱们来说不陌生。做拉伸实验时两个弹性指标。断后伸长率和断面收缩率都是相对应变。那对数应变呢？它反映了物体变形的实际情况。故又称真实应变。假设试样在某瞬间长度为  $l_0$ 。下个瞬间。

位移增量是  $dl$ 。则应变增量  $d\varepsilon = \frac{dl}{l}$ 。总应变。求积分  $\varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$

总结一下。E. 用应变增量的积分来表示全量应变。是真实应变。

来看看三种应变的关系。通过观察这个式子发现。在变形程度很小时。相对应变与对数应变是一致的。当变形程度超过 10% 时。一般用 E 来表示。对数应变有两个特性。可叠加。可加性。

相对应变不具备。  
总结 PPT

# 西安航空学院

然后，我们一起讨论一下体积不变条件。其实我们知道  $I_1 = 0$  即  $\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$ 。那么

推导呢。单元体变形前尺寸为  $dx, dy, dz$   $V_0 = dx \cdot dy \cdot dz$

小变形后，忽略高阶项，根据线性应变求解变形后的体积

$$V_1 = r_x \cdot r_y \cdot r_z = (1 + \epsilon_x) dx \cdot (1 + \epsilon_y) dy \cdot (1 + \epsilon_z) dz \approx (1 + \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) dx dy dz$$

$$\epsilon_x = \frac{r_x - dx}{dx} \quad r_x = (1 + \epsilon_x) dx$$

$$0 = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad \text{线性变形，体积不发生变化}$$

$$\therefore 0 = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0 \quad (\text{体积不变条件}) \quad \text{回忆 } I_1 \quad \epsilon_{ij}$$

注：线性变形体积不变，应变偏张量就是应变张量。说到体积不变想起应力圆。

我们再来研究一下。应力圆有九种。符合体积不变的纯偏应力圆有三种。纯应变圆有三种。纯一个主应力，一个主应变。那问题来了。变形力圆（主应力圆+主应变圆相结合）有多少种呢？是27吗？答案是23。

单拉、单压应力状态，只能对应一种变形圆。所以是23种。

前面讨论过可以利用  $J_3$  判断变形类型。关于体积不变条件，我们试着证明一下。加深一下理解

$$J_3 = \sigma_1' \sigma_2' \sigma_3' > 0 \rightarrow \sigma_1' > 0 \quad \sigma_2' > 0 \quad \sigma_3' > 0, \text{ 或 } \sigma_1' > 0 \quad \sigma_2' < 0 \quad \sigma_3' < 0. \quad \text{应力圆.}$$

$$\epsilon_1 > 0 \quad \epsilon_2 > 0 \quad \epsilon_3 > 0 \quad \text{或 } \epsilon_1 > 0 \quad \epsilon_2 < 0 \quad \epsilon_3 < 0. \quad \text{应变圆.}$$

$$\because \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad \therefore \epsilon_1 > 0 \quad \epsilon_2 < 0 \quad \epsilon_3 < 0. \quad |\epsilon| \text{ 伸张变形.}$$

通过主应力对应变和、对数应变，我们发现用  $\epsilon$  更方便。那体积不变条件可表示为  $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$

例题

# 西安航空学院

学一下最后部分. 平面变形. 轴对称变形. 5 第二节第九部分对比记忆. 还记得平面应变状态吗?

$z$  轴  
如有应力, 但不发生变形. 即  $u_i$  在  $z$  轴分量  $w=0$ .  $\epsilon_z = \gamma_{zy} = \gamma_{zx} = 0$ . 可否导出此状态小

变形几何方程? 只有 ~~两个~~  $\epsilon_x$   $\epsilon_y$   $\gamma_{xy}$  三个独立的应变分量.

体积不变条件也变为  $\epsilon_x = -\epsilon_y$ . 问个简单的问题.  $\sigma_z = 0$ ? 不等于零  $\sigma_z = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \sigma_m$

只是. 如果是平面应力问题  $\epsilon_z$  不一定等于零. 只有一种情况  $= 0$  纯剪切状态.

轴对称问题. 子午面上无变形.  $v=0$ .  $\gamma_{\theta z} = \gamma_{\theta r} = 0$ .  $\theta$  为应变方向

小变形几何方程?  $\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{u}{r}$ .  $\epsilon_r = \epsilon_\theta$ .

本讲小结. ① ② ③ ④

预习内容. 原准则 (1).

位移分量 应变分量



# 西安航空学院

## 第十二讲 讲稿

同学们好。这节课我们开始学习第二章第四节内容。共五部分，用两节课的时间学习。重点是前三部分。学习了第二章，物体受到外力，单位面积内内力，会产生弹性变形。描述变形程度的应变能。物体什么受力达到什么值时会屈服呢？就是这节课要学的屈服准则。<sup>这节课</sup>  
掌握两种屈服准则的原理、表达式及引用。

首先，利用以前做过的低碳钢单向均匀拉伸试验。总结并思考一下在什么条件下发生塑性变形。我们知道当应力达到屈服点 $\sigma_s$ 时发生屈服。可以这么说 $\sigma_1 = \sigma_s$ 就是单向拉伸时屈服准则。  
研究弹性变形用材料力学强度理论。材料处于单向应力状态满足条件  
 $\sigma \leq [\sigma] = [\sigma] \frac{\sigma_n}{(\sigma_s \sim \sigma)}$   
来回忆一下拉伸试验。 $\sigma_s$ 屈服点 $S$  (弹性变形和弹性变形分界点)  $\sigma_b$  抗拉强度 均匀塑性变形和局部变形分界点。  
 $\sigma_k$  破坏点 $K$ 。单向拉伸弹性变形终止点。这节课，重点研究 $S$ 点。

单向应力状态，我们用六个独立的应力分量描述。所以此时屈服准则必定与应力分量有关。  
屈服函数  $f(\sigma_{ij}) = f(\sigma_1, \dots) = C$   
自此，给屈服准则一-定义：不同应力状态下，各应力分量与材料性能之间必须符合一定关系时，变形体各点进入塑性状态并使变形继续进行，这种关系称为屈服准则。  
需要说明一点：应力分量 $\sigma_{ij}$ 的应力状态。屈服点 $S$  → 部分区域屈服 → 整体屈服。

研究一下屈服函数  $f(\sigma_{ij}) < C$  弹性  $f(\sigma_{ij}) = C$  塑性  $f(\sigma_{ij}) > C$  不存在。

目前公认的屈服准则有两种。屈服准则。密塞斯。我们一起看一下两者异同。选用的都是主应力(主轴坐标)。简单

① 屈服准则认为：材料屈服与最大切应力有关。 $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = k$  (剪切屈服强度)。  
怎么理解呢？还记得纯剪切状态吗。 $\sigma_1 = -\sigma_3 = 2k = \sigma_s$  (剪切屈服强度)。  
张量理论。最大主应力理论

# 西安航空学院

弹性理论研究进入弹性变形范围的多力变量关系。

另一种简单的变形状态. 单向均匀拉伸.  $\sigma_1 = \sigma_3$   $\sigma_2 = 0$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sigma_s \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

我们把两个式子写在一起. 得到屈服准则表达式.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \sigma_s \quad k = \frac{\sigma_s}{2}$$

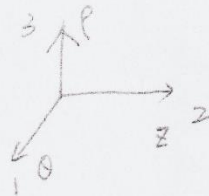
若不知道切应力的大小.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= \pm 2k = \pm \sigma_s \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \pm 2k = \pm \sigma_s \\ \sigma_3 - \sigma_1 &= \pm 2k = \pm \sigma_s \end{aligned} \right\} \text{主应力差不变条件.}$$

各向异性材料

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{单轴}) \quad (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2 = \sigma_s^2$$

例题 2-6. 这个题难点在哪? 坐标系转换.



$$\sigma_2 = \sigma_z = \frac{pr}{2t}$$

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{pr}{t}$$

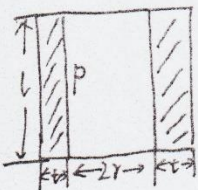
$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \sigma_s$$

↓

$$\sigma_\theta - \sigma_p = 2k = \sigma_s$$

$$\frac{pr}{t} = 2k = \sigma_s$$

2-7



$\sigma_p \approx 0$  (∵ 是薄壁管 可以认为垂直于壁面方向的应力趋近于零)

$$\sigma_\theta \cdot 2t \cdot l = p \cdot 2r \cdot l$$

$$\downarrow$$

$$\sigma_\theta = \frac{pr}{t}$$

$$\sigma_z \cdot 2\pi r t = p \cdot \pi r^2$$

$$\downarrow$$

$$\sigma_z = \frac{pr}{2t}$$

缺点: 没有考虑  $\sigma_z$  的影响.

# 西安航空学院

① 接着看一下 密席斯屈服准则 (1913年). 变形能密度理论.

所有主应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  与状态相对应

德国科学家密席斯认为. 当  $\bar{\sigma}$  达到定值时. 材料发生屈服.

(与状态有关的极限值)

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$J_2' = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = C$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{单向拉伸 } \sigma_1 = \sigma_3 \quad C = \frac{1}{3} \sigma_s^2 \\ \text{纯剪应力 } \sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{xy} = k \quad C = k^2 \\ \quad \quad \quad \text{屈服应力} \end{array} \right.$$

$$k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} = 0.577 \sigma_s \quad \text{理论上的值}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 = 6k^2$$

Mises 更接近实验数据. Mises 考虑了中间

应力的影响.

再看下一练习题. 题 12(2).

本讲小结.

# 西安航空学院

## 第十三讲 讲稿

同学们好。这节课我们继续学习第二章 金属塑性变形的力学基础。首先复习一下上节课的主要内容。上节课主要讲了两种屈服准则。一个是最大切应力理论 屈雷斯加屈服准则。另一个是与应力偏张量第二偏张量有关的密席斯屈服准则。同学们复习一下两种屈服准则在主轴坐标系下(拉力)表达式

$$T: \sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \sigma_s \quad \text{屈服强度} \quad M[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = 2\sigma_s^2 = 6k^2$$

$\uparrow$   
最大切应力

满脑子里回忆下轴对称平面应变。轴对称两种状态下的密席斯屈服准则。学习了应力平衡微分方程屈服准则。可求解。

$$k \sim (0.5 - 0.577)\sigma_s$$

我们学习了应力莫尔圆与点的应力状态的几何表示方法。还学习了应变莫尔圆。那屈服准则有没有几何表达方法呢？这是我们这节课要解决的第一个问题。我们知道两种屈服准则的一个很大的区别是是否考虑了中间应力 $\sigma_2$ 的影响。那有没有方法把两个式子统一表达呢？前面学习的都是理想刚塑性材料的屈服轨迹。那实际的刚塑性硬化材料又是何种景象呢？我们带着这些问题展开本节课知识的学习。重点是屈服表面和屈服轨迹。

① 第一个问题。屈服函数即屈服准则的数学表达式是什么样的形状呢？我们选择主轴坐标系进行研究。屈服函数在三维空间的几何图形是个封闭的空间曲面。什么样的空间曲面呢？如果我们把屈服函数投影到主应力坐标平面上(1,2)变成了一条封闭的曲线。称为屈服轨迹。一个三维图形。一个二维图形？思考一个问题。两种准则的屈服表面。

# 西安航空学院

有没有轴交呢

和屈服轨迹是否一样呢？表达式不一样，几何图形肯定不一样，那有怎样的位置关系呢？

我们来一一寻找答案。先来看一下屈服表面。已经给同学们提过。它与等倾线有关，那什么是等倾线？

ON 就是。它与三个坐标轴的方向余弦值相等。  $l=m=n=\frac{1}{\sqrt{3}}$  选了一点  $P(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$   $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\sigma_m$  静应力状态。

用矢量  $OP$  来代表。如果过  $P$  点向  $ON$  作垂线交于  $M$ 。由几何关系， $\vec{OP} = \vec{OM} + \vec{MP}$   
应力张量 应力张量 应力偏张量

$$|MP| = \sqrt{|OP|^2 - |OM|^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_s \quad 3R^2$$

根据 Mises 屈服准则， $\bar{\sigma} = \sigma_s$  材料屈服  $|MP| = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_s$

屈服表面：以  $ON$  为轴线。以  $\sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_s$  为半径作一圆柱面。圆柱面上的点都满足密席斯屈服准则

那 Tresca.  $\left. \begin{matrix} \sigma_1 - \sigma_2 = \pm \sigma_s \\ \sigma_2 - \sigma_3 = \pm \sigma_s \\ \sigma_3 - \sigma_1 = \pm \sigma_s \end{matrix} \right\}$  内接于 Mises 圆的正六棱柱面。

几何意义：表面  $\rightarrow$  弹性状态。内部 - 弹性。外部 - 不存在。

② 再来看一下屈服轨迹。两向应力  $\sigma_1, \sigma_2$   $\sigma_3=0$  代入 Mises 屈服准则

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_s^2$$

椭圆。倾斜  $45^\circ$ 。建立新坐标。

$$\frac{\sigma_1'^2}{(\sqrt{2}\sigma_s)^2} + \frac{\sigma_2'^2}{(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s)^2} = 1$$

长轴 短轴

代入 T 式 内接于 Mises 椭圆内的六边形。

几何意义：轨迹上 - 弹性。轨迹内 - 弹性。轨迹外 - 不存在。

研究一下 12 个点。6 个重合。6 个差别最大。PPT 讲点。回忆前向知识点。

作业。

# 西安航空学院

③  $\pi$  平面.

如垂直于 ON 将圆柱剖开. 截面是个圆.  $\pi$  平面.  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$ .

$\pi$  平面与两个屈服表面上. Misses. 半径为  $\sqrt{3}\sigma_s$  圆. T. 内接六边形.

$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . 六分之一有意义.

Note: PPT

(AD)

4. 统一表达式. 为评价  $\sigma_2$  对屈服的影响. 引入 Lode 应力参数

$$u_s = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}$$

用莫尔圆来理解一下.

$\sigma_2$  在  $\sigma_1 \sim \sigma_3$  之间变化时.  $u_s$  在  $1 \sim -1$  之间变化.  $u_s$  实际表示了  $\sigma_2$  在莫尔圆中相对位置变化.

化. 我们讨论  $u_s$  的影响. 变形  $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + u_s \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$  代入 M 式

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\frac{2}{\sqrt{3+u_s^2}} \beta \sigma_s}{\beta} \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s \quad \beta \text{ 中间应力影响系数.}$$

对于 T:  $\beta = 1$ . 对于 M:  $\beta = 1 \sim 1.155$ .  $\beta = 1 \sim \frac{2}{\sqrt{3}}$ . 怎么得到的呢.

$u_s = \pm 1$  时  $\beta = 1$ .  $u_s = 0$  时  $\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.155$ . 平面应变

$$k = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\beta}{2} \sigma_s \quad \sigma_1 - \sigma_3 = 2k \quad \text{统一式.}$$

T:  $k = 0.5\sigma_s$

M:  $k = (0.5 \sim 0.577)\sigma_s$  问题 D  
 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{\sqrt{3}}$

# 西安航空学院

---

最后一个问题。以上屈服只适用于理想塑性材料。但实际材料，会产生加工硬化。C值不是常数，变化的常数。所以硬化后，在变形过程每个瞬间，都有后续的瞬时屈服表面和屈服轨迹。· 一系列同心圆 正六边形。

小结 PPT.

预习 PPT.

# 西安航空学院

## 第十四讲 讲稿

同学们好。这节课我们继续学习第二章金属塑性变形的力学基础。首先复习一下上节课的主要内容。讲了屈服表面、屈服轨迹。先来看一下几何意义。如果一点应力状态矢量端点位于屈服轨迹或屈服表面上，则为塑性变形。内部为弹性变形。第一个内容讲了屈服准则的统一表达式  $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s$

$\beta \sim 1 \sim 1.15 / 1 - \frac{\nu}{\mu}$  之间改变。  $k$  与  $G$  的比值。  $M. (0.5 - 0.577) \sigma_s$ 。  $\beta$ : 中间应力影响系数。

这节课我们开始学习第五节弹性变形的应力应变关系。再加上我们学习了弹性阶段应力应变之间的关系。那应力分量与应变分量满足怎样的关系呢？重点是学习弹性应力应变关系的特点。前面学习过表示瞬时应变的应变增量和应变速率。那增量理论是建立谁与谁之间的关系呢？增量应变理论又是怎么回事？我们带着<sup>这些</sup>问题展开第五节的学习。

首先，先来了解几个概念。应力应变之间的关系叫本构关系。描述这种关系的数学表达式称为本构方程或物理方程。弹性应力应变关系和屈服准则都是求解塑性变形问题的基本方程。所以还是比较重要的。

我们先从研究弹性应力应变关系入手。从单向拉伸开始。我们知道单向应力状态下弹性阶段应力应变关系是线性关系。满足虎克定律  $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$   $\nu = \frac{1}{2G}$ 。那复杂应力状态下的本构方程表达式，也就是<sup>三个应力分量</sup>应变分量与应力分量之间的关系是怎样的呢？举一个圆柱体在应力  $P$  的作用下。  $P$  沿  $x$  方向。那  $x$  方向伸长。  $y, z$  方向缩短。应变满足:  $\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$   $\epsilon_y = \epsilon_z = -\nu \frac{1}{E} \sigma_x$   $\nu$  泊松比。已学数量 变形量。那如果三向应力作用下。  $x$  受力。同理。  $y, z$  受力应力应变方程也可得到。把三个方向上的  $\epsilon_x$  相加。得到式 2-99 中的第一个式子。同样其他几式也可得到。这就定义了虎克定律。  $E, G, \nu$ 。



# 西安航空学院

$$\epsilon_{ij} = \epsilon'_{ij} + \delta_{ij} \epsilon_m \quad \sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m$$

我们进一步分析一下 2-99 式。能不能得到  $\epsilon_{ij}$  与  $\sigma'_{ij}$  和  $\sigma_m$  之间的关系？

$$q = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \rightarrow \epsilon_m = \frac{1-2\nu}{E} \sigma_m \quad (\sigma \text{ 与 } \sigma_m \text{ 成正比, 应力球张量引起弹性体积改变). \\ \text{PPT} \quad \epsilon'_{ij} = \frac{1}{2q} \sigma'_{ij} \quad (\epsilon'_{ij} \text{ 与 } \sigma'_{ij} \text{ 成正比, 应力偏张量引起体形状的改变). \end{array} \right.$$

$$\rightarrow \boxed{\epsilon_{ij} = \epsilon'_{ij} + \delta_{ij} \epsilon_m = \frac{1}{2q} \sigma'_{ij} + \frac{1-2\nu}{E} \delta_{ij} \sigma_m}$$

比例  
系数  $\Rightarrow$  应变类型同应力莫尔圆几何相似。

还可以推出  $\bar{\sigma} = E \bar{\epsilon}$

由此, 可以总结出弹性应力应变关系的特点: ① 线性 ② 可逆 ③  $\nu < 0.5$ .

对比看一下塑性应力应变关系的特点: ① 非线性关系. 增量应变主轴与应力主轴不一定重合. ② 不可恢复不可逆. ③  $\nu = 0.5$ . ④ 比初始屈服应力高.  $\infty$  (上节讲过的同心圆).

复杂应力状态下的加载、卸载 **PPT** 几平而下屈服轨迹.  $d\sigma > 0$  加载  $d\sigma < 0$  卸载.  $d\sigma = 0$  中性变载

再来体会一下加载路径与加载历史.  $A \rightarrow C$   $B \rightarrow D$  简单加载. 成比例.

$A \rightarrow C \rightarrow$  卸载到  $E$ . 再到  $F$ .

①  $B \rightarrow D \rightarrow F$ .  
卸载. 卸载

③  $F' \rightarrow F$ .  
应力主轴与应变主轴重合.

$C \rightarrow F$  等效应力相等.

应变主轴与应力主轴变了.  
棱 (不重合).

$A \rightarrow C$  比例加载. 主轴重合.

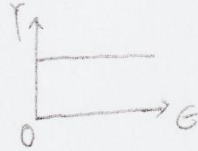
PPT

# 西安航空学院

那么建立应力与应变增量之间的关系呢？看一下第三部分 两个增量理论。

针对加载过程的每一个瞬间的应力状态，所确定的该瞬间的应变增量，如撇开加载历史的影响

(1) L-M. 理想刚塑性材料 两个假设  
曲线. PPT.



- ① 忽略弹性变形.
- ②  $\bar{\sigma} = \sigma_s$  满足M屈服.
- ③ 比例加载
- ④ 体积不变.  $\Delta \epsilon_{ij} = \Delta \epsilon'_{ij} \quad \sigma_{ij}$

用此结论  $\Delta \epsilon_{ij} = \sigma'_{ij} d\lambda$  瞬时作负比例系数. 卸载时  $d\lambda = 0$ .

同样可以写成比例. 善比形式.  $\frac{1}{2g} \rightarrow d\lambda$  (与时间有关的正比例系数).

思考: 可以写轴对称状态下的比例形式吗?  $\frac{\Delta \epsilon_{\theta\theta}}{\sigma'_{\theta\theta}} = \frac{\Delta \epsilon_{zz}}{\sigma'_{zz}} = \frac{\Delta \gamma_{z\theta}}{\tau'_{z\theta}} = d\lambda$

有兴趣的话, 可以试着写一下平面变形状态.

$$d\lambda = \frac{3}{2} \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \quad \Delta \bar{\epsilon} \text{ 等效应变增量强度} \quad \bar{\sigma} \text{ 等效应力. (3解).}$$

$\Rightarrow$  代入讲义 A' 2-109. PPT

(2) p-R 理论 = L-M + 弹性变形. PPT 当变形较小时.

4. 增量理论. PPT.

小结.

预习.

# 西安航空学院

## 第三章 塑性成形中金属变形与流动 的相关问题。

3.1 最小阻力定律: 变形过程中, 物体各质点将向着阻力最小的方向移动。即做最少的功, 走最短的路。

举例:

图28 开式模锻: 增加金属流向飞边的阻力, 以保证金属充满模型腔; 或者修磨圆角, 减小金属流向A腔的阻力, 使A腔充模饱满。

飞边桥作用: ①阻流作用即封闭住模腔, 锻造时阻止金属外流, 以保证充满模腔。

②容纳多余金属。 ③具有缓冲器作用, 可减弱上模的打击, 以防止模具的压塌和崩边。

分为桥部和合部两部分。

① ②

图29 长条冲模成形序

图29 最小周边法则: 存在接触面摩擦时, 物体各质点向周边流动的阻力与质点离周边的

距离成正比, 因而必沿向周边最短法线流动, 周边形状表现最小的图形。

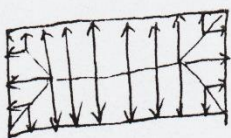


图29 最小周边法则图示。

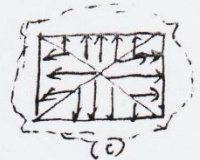
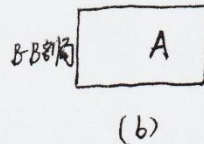
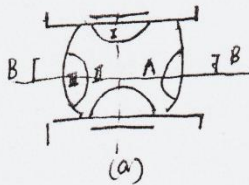
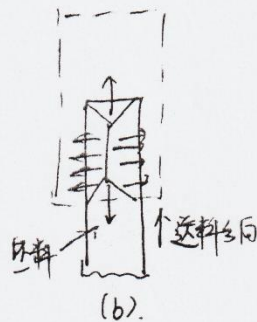
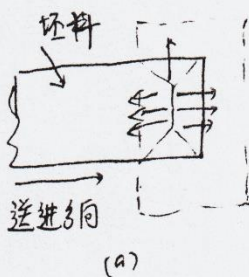


图32 正方形断面变形模式。

例题



图中两种拔长方式哪种效率高。(a)

(a) 高, 最小周边法则, 轴向延伸 > 横向展宽

(b) 效率低, 主要用于修正尺寸。

图33 拔长时坯料的变形模式。

# 西安航空学院

## 第十六讲 讲稿

一、金属材料 → 塑性加工方法 → 形状 → 举例 <sup>不锈钢 铝锭</sup> 轧制 火车面板 空部件 航空航天各种空部件  
→ 应用塑性加工方法 → 塑性指标: 超过塑性极限 (断裂) 不是固定指标 而是 不同变形条件下不同  
不是固定数值。

→ 混淆概念: 柔软性 (变形抗力) 柔软性反映金属的软硬程度, 它用变形抗力大小来衡量。

研究目的: 选择合适变形方法, 确定最佳的变形温度, 速度条件以及许用的最大变形量, 使金属顺利实现成形过程。

塑性指标: 延伸率  $\delta = A = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$   
断面收缩率  $\psi = Z = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$   
扭转转数 (n) 凡几个 塑性越好。  
冲击韧性  $a_k$

目前还没有某种实验方法能测出表示所有塑性加工方式下金属的塑性指标, 每种实验方法测得的指标, 只能表明金属在该变形过程中所具有的塑性。

金属塑性测定方法: 机械性能试验法 模拟试验法  
↓ ↓  
拉伸试验 扭转实验 顶锻 (墩粗) 试验

二、影响金属塑性主要因素: 提高塑性的途径。

内在因素: 化学成分 组织结构

外部因素: 变形温度。

# 西安航空学院

## 1. 化学成分

### 1. 碳及杂质

碳：使碳钢塑性降低，强度↑。碳含量越高，碳钢熔化温度越低。奥氏体晶粒长大的倾向

越大，再结晶速度越慢，对热成形不利。  
 韧性相：塑性差。  
 韧性相：塑性差。  
 韧性相：塑性差。

P. 钢的强度、硬度显著升高，塑性、韧性下降。P > 0.3% 钢完全变脆， $\alpha_k$  接近 0。

S. 不溶于Fe中，以FeS及Ni的硫化物夹杂形式存在。<sup>820-1200°C</sup> 导致锻件开裂。

N. 室温或稍高温下，以Fe<sub>4</sub>N形式析出，使钢强度、硬度↑，塑性、韧性↓。

### 2. 合金元素

注：钢中氧较多时，会引起氮脆现象，使钢的塑性大大降低，氮在钢中的溶解度随T的↓而↓。

1. 形成固溶体，使铁原子晶格点阵畸变，钢的变形抗力↑，塑性↓。

2. 形成化合物，硬而脆C化物，强度↑，塑性↓。

高度分散极小颗粒C化物，弥散强化，强度↑，塑性影响不大。

在晶界含有大量共晶C化物，塑性↓。

## 2. 组织结构

晶格 fcc 塑性最好，bcc 较差，hcp 最差。（滑移系）

晶粒：越细，塑性越好

多相组织时各相性能不同，变形难易程度不同，变形和应力

分布不均，塑性差

变形均匀。

锻造组织时具有较大的柱状晶粒中

### 外部因素

① 变形T：随着温度↑，塑性↑，但某些温度区间，某些合金塑性↓。

注：

偏析、夹杂、气孔、流

纹等缺陷。

塑性降低

回火脆性区：超低温脆性区或I。-100°C，塑性几乎丧失

原因：原子热运动能力极低及晶粒边界的某些组织组成物随T↓而脆化。

# 西安航空学院

## 3.2. 影响金属塑性、塑性变形和流动的因素

### 3.2.1

(1) 塑性: 金属在外力作用下产生永久变形而不破坏其完整性的能力。

影响因素: 晶格类型, 化学成分, 显微组织

变形T, 变形速率, 应力状况

- (2) 塑性指标:
- a. 拉伸:  $\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$
  - b. 压缩:  $\epsilon = \frac{H_0 - H_n}{H_0} \times 100\%$
  - c. 扭转:  $\gamma = k \cdot \frac{\pi n}{30 L_0}$  (n: 总转数)
  - d. 杯突: IE.
  - e. 冲击:  $A_k$

(3) 塑性图: 表示金属塑性指标与变形温度关系曲线图形, 简称塑性图。

应用: 合理选择加工方法, 制定冷热变形工艺

例: W18Cr4V 高速钢: 900-1200°C 温度范围内具有较好的塑性. ∴ 1180°C 始锻, 920°C 终锻。

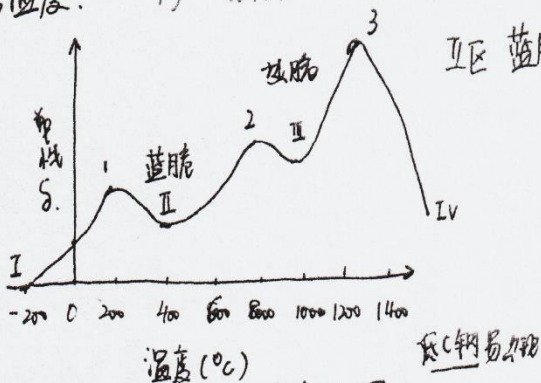
### 3.2.2 变形条件对金属塑性的影响

(1) 变形温度

T ↑ 塑性 ↑

随着温度的升高, 塑性增加, 但并非简单的线性上升。

举例



II区 蓝脆: 在 200-350°C 塑性变差, 易于脆断, 断口呈蓝色。

→ 氧化物、氧化物以沉淀形式在晶界, 滞留在晶界析出 ΔΔ

C, N 原子扩散速率加快易在位错附近偏聚形成柯氏合金, 阻碍

III区 红脆: 800-950°C 相变, 由 A → A' 体积收缩, 阻碍

# 西安航空学院

区域 II. 200-400°C 蓝脆区. 原因: 动态形变时效的结果.

III. 800-900°C 红脆. 原因: 相变和蠕变的影响. 铁素体和奥氏体共存产生变形  
 $F \rightarrow A$   
 bcc fcc  
 不均匀. 出现附加应力.

A. Fcc

脆性区域 IV. 接近金属熔化温度.

原因: 晶粒迅速长大. 晶间裂纹逐渐消弱.

② 变形速度.

$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t}$  变形速度与设备工作速度不同. \*但可决定变形速度大小.



超塑性.

超塑性变形变形特点

- ① 晶粒未被拉长. 保持等轴状态. 晶粒直径长大. 但不是简单简单粗大化. 伴随晶粒回转的同时. 发生同相晶粒的接近. 合并和再分割过程的反复进行
- ② 晶界滑移. 转动及晶粒回转. 但并不产生脆性的晶界断裂
- ③ 无位错组织出现.
- ④ 结晶子结构不发达. 若原始取向无序. 超塑性变形后仍无序.

3. 应力状态影响.

应力圆中. 应力个数越多. 数值越大. 塑性↑. 反之. 塑性↓.

举例 卡尔曼试验 大理石. 砂石试验. 他将同样形大理石和砂石试样置于试验装置中压缩. 同时压入

甘油对试样施加侧向压力. 试验结果表明: (1) 没有侧向压力时. 完全脆性. (2) 在侧向加

# 西安航空学院

★原因(塑性降低): 简答题

①发生了回复和再结晶, 消除加工硬化.

②原子动能增加, 位错活动加剧, 出现新的带移系.

③金属的组织、结构变化: 多相 $\rightarrow$ 单相.  $hcp \rightarrow bcc$

④晶间带移作用增强, 晶界切变抗力降低. 晶界带移引起的微裂纹被消除.

<2>变形速率 <sup>$\dot{\epsilon}$</sup> 对塑性影响. 变形速率 $\uparrow$ , 塑性 $\downarrow$

影响: ①变形速率大, 由于没有足够的时间完成塑性变形, 使金属实际应力提高, 塑性降低.

②如果是在热变形条件下, 变形速率大时, 还可能由于没有足够时间进行回复和再结晶.

使金属实际应力提高, 塑性降低.

③变形速率大, 有时由于温升效应显著而提高塑性, 降低实际应力.

举例, 铝合金在挤压时因热效应所增加的温度. ★

④提高变形速率可以降低摩擦系数, 从而降低滑动阻力, 改善塑性.

<3>变形程度对塑性影响. (应力状态)  $\sigma$   $\tau$

①冷变形. 变形程度越大, 加工硬化越显著, 塑性降低. ✓

②热变形. - - -  $\uparrow$  晶粒细化而且分散均匀, 会使金属塑性很高. ✓

3.2.3. 其他因素影响

①化学成分: ①合金元素. 形成固溶体 $\rightarrow$ 塑性较好.  $\rightarrow Fe$   $\frac{F.A}{Fe_3C}$  硬脆 塑性降低. 举例. 铁碳合金

②组织结构: 单相好于多相. 细晶好. 铸造组织: 由于具有粗大的枝状晶粒和偏析, 夹杂, 气孔, 疏松等缺陷, 使塑性降低.



# 西安航空学院

③. 应力状态的影响.

☆ 主应力图中, 压应力个数越多, 数值越大, 则塑性越高; 反之, 拉应力个数越多, 数值越大, 则塑性越低.

傅柯尔曼实验 ☆ 大理石, 砂石, 两向应力无时.

④ 周围介质的影响.

⑤ 尺寸因素影响

## 3.2.4. 提高金属塑性的途径. ☆☆☆

- ① 提高材料成分和组织的均匀性;
- ② 采用合适的变形温度-速度制度;
- ③ 选用三向压应力较强的变形方式;
- ④ 减小变形的不均匀性;
- ⑤ 避免加热和加工时周围介质的不良影响.

## 3.2.5 摩擦对金属塑性变形和流动的影响.

摩擦影响的实质: 由于摩擦力的作用, 在一定程度上改变了金属的流动特性并使应力分布受到影响.

举例 P91 图3-14

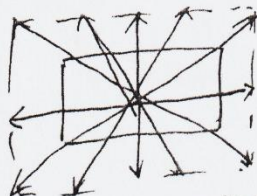


图3-14. 无摩擦  
锻造时的流动性模型.

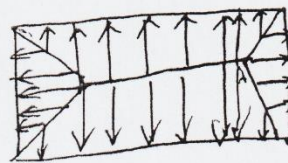


图3-2. 矩形断面锻件  
锻造时的流动模型

# 西安航空学院

## 3.2.6 工具形状对金属整体变形和流动的影响。

工具(或坯料)形状是影响金属塑性流动方向的主要因素。工具与金属形状的差异,造成金属沿各个方向流动的阻力有差异,因而金属向各个方向的流动(即变形量)也有相应差别。

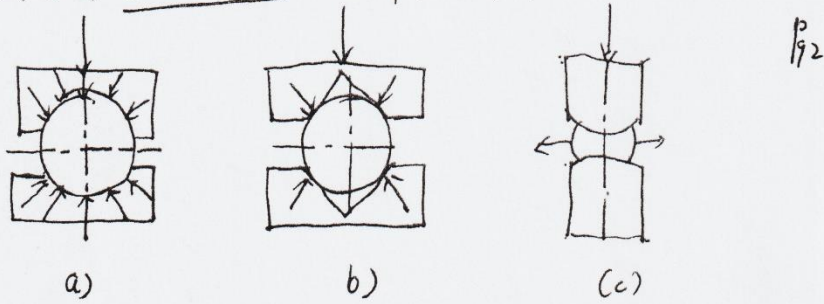


图3-16 型砧中拔长

a) 圆形砧    b) V形砧    c) 凹形砧

- a). b). 被压下的金属大量地沿轴向流动, 闭式滚挤和闭式拔长模膛。
- c). 易于横向流动。又形件模锻时金属被劈料台分开。

## 3.2.7 金属各部分之间关系对整体变形和流动的影响。

外端(未变形的金属)对变形区金属的影响主要是阻碍变形区金属流动, 进而产生和积累附加的应力和应变。

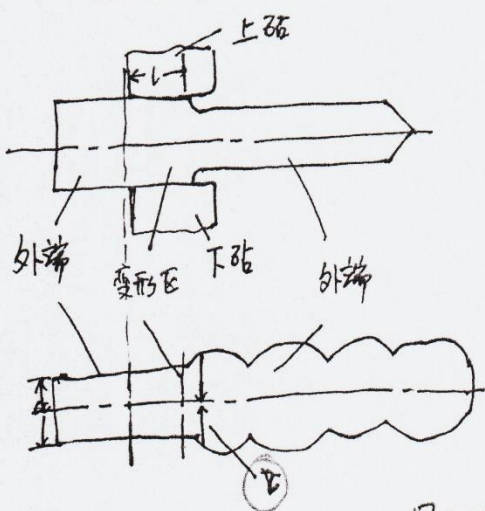
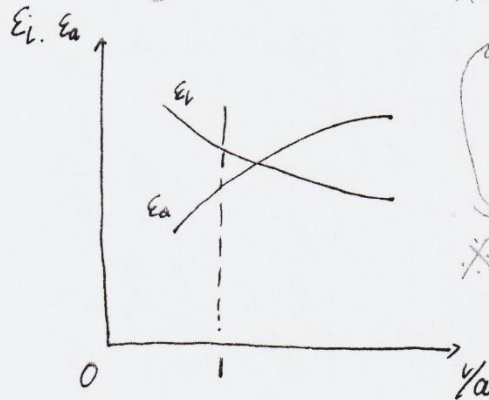


图3-17 拔长时外端的影响



② 外端对变形区  
 如果没有阻力, 沿纵向和轴向流动的金属量应该相等。原因是  $\sigma_1 = \sigma_2$ 。  
 \* 变形区对外端附加应力, 可能使外端金属产生变形, 甚至引起工件开裂。

图3-17. 拔长时外端的影响。

# 西安航空学院

第十讲

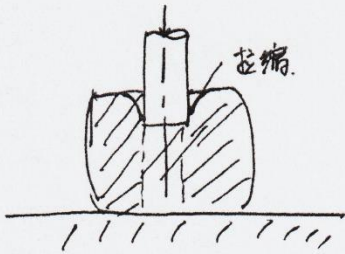


图3-18. 开式冲孔时的“拉缩”。

拉缩  $\leftrightarrow$  冲头下金属的变形流动

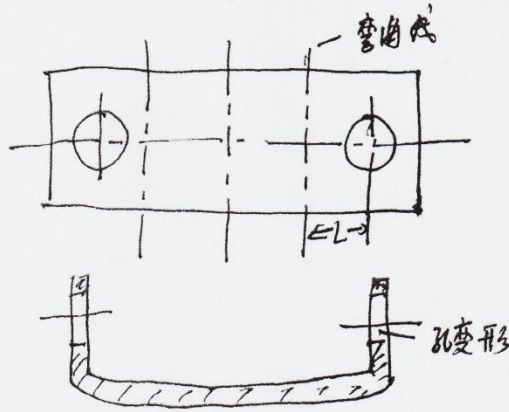


图3-19 弯曲变形对外端的影响。

孔的形状发生畸变  $\leftarrow$  已冲孔较高曲线太近。

## 3.2.8 金属本身性质不均匀对塑性变形和流动的影响

变形金属中化学成分、组织结构、夹杂物、相的形态等分布不均会造成金属各部分变形

和流动的差异。 举例：层、空位不均、温度较高部分变形较大、晶粒较粗、差温区、层。

## 3.3 金属的超塑性 SPF (superplastic forming)

### 3.3.1 概念、种类

① 超塑性是指金属在一定的内部条件(金属的组织状态)和外部条件(变形温度、变形速率等)下所显示的极高塑性。 100% - 2000% 以上。

举例：① 纳米金属铜的室温压延延伸率高达5100%。

② Bi-44Sn 挤压材料在慢速拉伸的情况下获得异常大的延伸率 ( $\delta = 1950\%$ ) 现象。

③ 利用气压胀形/扩散连接复合工艺 (SPF/DB) 制造的发动机整流叶片形。 在加工过程中同时完成成形和扩散连接两个工序。 成形的材料是钛合金和铝合金。 此工艺用于航空工业中。

### ② 种类

结构超塑性 (细晶超塑性)

Zn-Al-Cu 具有超塑性。

条件：高的变形温度和低的速率

动态超塑性 (相变超塑性)

吹糖人

等轴晶粒

地址：西安市西二环259号

电话：(029) 84258166

传真：(029) 84261737

邮编：710077

3 (A)

节省能源和设备 一次成型省掉机加工序

70

# 西安航空学院

## 3.3.2 结构超塑性变形力学特征.

$$S = K \dot{\epsilon}^m$$

S 达不到

善.  $m \cdot (0.02 - 0.2)$  超塑性  $(0.3 - 1.0)$

S - 真实应力

$\dot{\epsilon}$  - 应变速率.

K 决定于试验条件的材料常数

m - 应变速率敏感性指数.

\*

$$m = \frac{d \lg S}{d \lg \dot{\epsilon}} \quad \dot{\epsilon} = 10^{-4} \sim 10^{-1} / \text{min}$$

## 3.3.3 影响超塑性的主要因素.

① 应变速率.  $\rightarrow \dot{\epsilon} = 10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ min}^{-1}$

② 变形温度.  $\rightarrow 0.5 T_{\text{熔}}$

③ 组织的影响.  $\rightarrow$  具有超细. 等轴. 双相及稳定的晶粒.

## 3.3.4 超塑性变形机理.

机理: 晶界滑移. 扩散蠕变机理. 动态回复和动态再结晶  
晶粒的转动      位错运动

A-V 超塑变形机理: 晶界滑动 + 扩散蠕变.

## 3.4 加工硬化.

# 西安航空学院

## 3.4 加工硬化

可提高工件的耐磨性和疲劳强度。但零件随大量的微裂纹出现，降低冲击能力，使切削加工困难，使刀具磨损严重。

**加工原理：**金属材料在再结晶温度以下塑性变形时强度和硬度升高，而塑性和韧性降低的现象，又称作硬化。产生的原因是，金属在塑性变形时，晶粒发生滑移，出现位错的缠结，使晶粒拉长、破碎和纤维化，金属内部产生了残余应力等。

加工硬化程度通常用加工后和加工前表面层显微硬度的比值和硬化层深度来表示。

金属之所以能变形是由于位错能滑移（主要）和攀移（较少）以及晶体的孪生，因而决定金属变形能力的是（晶体结构中位错能滑移决定）。一旦位错塞积/纤维就变成了不可动位错，需要增加应力以开动其它可动位错。如果金属本身可动的位错

① 很少，那么很容易加工硬化 a fcc. 滑移面  $\{111\} \times 4 \times 3$  (滑移方向) = 12

b. ~~bcc~~ hcp 滑移面  $(0001)$ , 滑移方向  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$   $6 \times 2 = 12$  3个方向

c. bcc. 滑移方向少于面心立方。

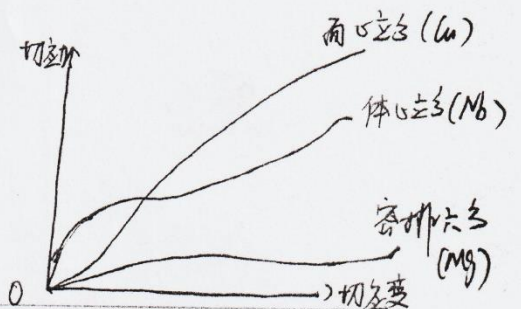
② 加工方式：轧制时金属会加工硬化，道次越多，每道次的变形量越大，加工硬化越明显

↳ 热处理改善金属的组织和力学性能，不是所有金属都需要热处理。比如铜铝

应用 ① 经过冷拉、冷压、喷丸等工艺，能提高表面强度。

② 零件受力后，某些部位局部应力常超过屈服极限，引起塑性变形。由于加工硬化限制了塑性变形的继续发展，可提高零件和构件的安全度。

③ 可以改进低碳钢的切削能力，使切屑易于分离。



# 西安航空学院

## 一. 加工硬化的现象和机理

### 硬化过程三阶段

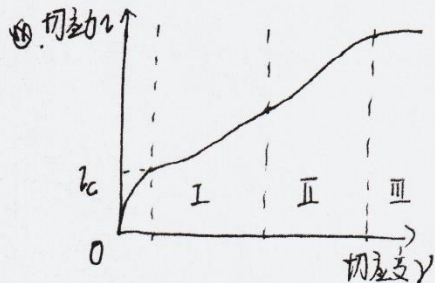


图3-29 单晶体的切应力-切应变曲线

① 加工硬化

### III 抛物线或动态回复阶段

应力足够大时，螺位错大量交滑移或累积群前的障碍在高应力集中下被摧毁，从而使累积群的高应力场得以松弛，结果硬化率下降

交互滑移：多系滑移易被位错交割

增大位错运动阻力 晶格畸变和碎晶

## 二. 加工硬化的后果及应用

后果：强度提高，塑性降低 → 重要强化方法，不稳定状态

应用：1. 有利方面 -- 强化金属，提高工件承载能力，耐磨性等。

2. 有害方面 -- 金属屈服强度的提高使其继续塑性变形困难，提高了成型设备的吨位。

解决方法：增加中间退火工艺。

加工硬化：金属在冷变形后（低于再结晶温度）加工时，随着变形量增大，强度↑，塑性、韧性下降，不稳定状态。T↓ 线因在再结晶，滑移系在取向最有利位错系上进行，单滑移 部分消失，全部消失。

I. 只有一组滑移系产生滑移，在平面上移动的位错很少受到

易滑移阶段 其他位错干扰，应力水平低，硬化率很低。

II 原滑移系中位错累积产生的长程应力场导致另一

线性硬化阶段 滑移系开动，于是产生大量林位错，位错滑动和林位错

晶面转动切割，增加位错滑移的阻力，形成位错累积群，增大

以上滑移系的交割，增加位错滑移的阻力，形成位错累积群，增大切应力达到变形抗力。

临界切应力

应力足够大时，螺位错大量交滑移或累积群前的障碍在

回复：

回复：将冷变形后的金属加热到一定温度后，使原子回复到平衡位置，晶内残余应力大大减小的现象。原子回复  $T_{0.25-0.3} T_0$  倍。晶粒大小、形状未改变。

再结晶 (T↑) 塑性变形后金属被拉长的晶粒出现重新形核，结晶，变为等轴晶粒的现象。称为再结晶。  $T_{0.4} T_0$  倍。

完全消除

冷变形：回复以下加工硬化  
热变形：再结晶性  
再结晶过程中回复和再结晶。

# 西安航空学院

## 第五章. 不均匀变形. 附加应力和残余应力

### 3.5.1 均匀变形与不均匀变形

① 金属本身性质的不均匀, 摩擦和工具形状的影响. 不同变形区之间的相互制约  $\rightarrow$  塑性成形时实际是不均匀变形.  $\rightarrow$  实质是金属质点的不均匀流动引起的.

② 均匀变形建立在假设基础上. ①各向同性 均质 ②任何瞬间承受相同的变形量. ③无摩擦

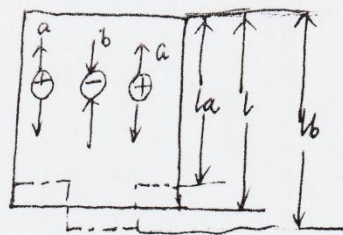
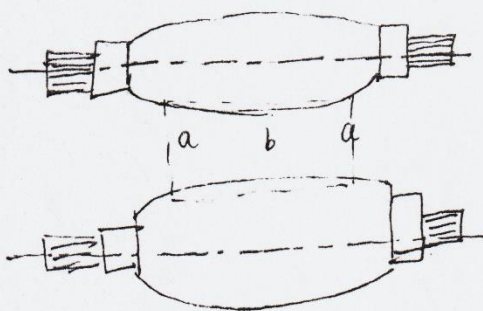
③ 金属塑性加工中, 研究变形物体内变形分布 (即金属流动) 的常用方法: 网格法. 硬透法. 液晶层法 举例.

### 3.5.2 基本应力和附加应力. (内力). 滚压

由于变形体各部分之间的不均匀变形受到整体性的限制, 在各部分之间必将产生相互平衡

的应力. 该应力叫附加应力. 对出现

举例: 在凸形轧辊上轧制矩形坯产生的附加应力. ☆



a 变形程度小, b 变形程度大  
如果 a, b 部分不是同一整体  
时, 中间部分沿该边缘部分产生  
巨大的纵向伸长, 但是整体  
a, b 不能自由伸长, 为平衡

图 3-23 在凸形轧辊上轧制矩形坯产生的附加应力. a 为 a 的应力, a 为 b 的应力.

轧辊在轧制时会出现微量变形, 为了控制轧材冷轧时轧辊中部产生弹性弯曲 (附加应力) 的截面厚度分布. 压下量大, 保持板型.

# 西安航空学院

附加应力: 变形体保持自身的完整和连续, 约束不均匀变形而产生的内力。

特点: (1) 附加应力由不均匀变形引起, 同时又限制不均匀变形自由发展。

(2) 相互平衡成对出现。

分类: ① 各区域 (第一类附加应力) ② 晶粒之间 (第二类附加应力) ③ 晶粒内部 (第三类附加应力)

不良后果: ① 更不均匀 ② 变形力 ③ 降低塑性, 甚至破裂, ④ 歪扭 ⑤ 形成残余应力。

## 3.5.3 残余应力 (弹性的)

① 来源: 引起应力的外因去除后在物体内部仍残余的应力。

不超过屈服极限 (弹性应力)。

② 分类: 各大区域之间, 晶粒之间, 晶粒内部。

(宏观) (显微) (超显微)

③ 来源: 变形不均匀 (附加应力), 温度不均匀 (热应力)

相变不均匀 (组织应力)

④ 后果: a 更不均匀 b 降低寿命 c 组织尺寸变化 d 增加变形抗力。

e 降低金属耐蚀性。

举例:

⑤ 减小措施: a 热处理法 b 机械处理法。

3

3-36 表面喷压法。



# 西安航空学院

3.8.1 摩擦与润滑理论

第十讲

干摩擦：① 金属加工时的摩擦接触表面之间不存在任何外介物质，即金属与金属直接接触时产生的摩擦。

- ② 绝对的干摩擦是不存在的，塑性或形的过程中金属加工之间会存在氧化膜、气体或灰尘。
- ③ 通常的干摩擦是指不加润滑剂的摩擦状态。

流体摩擦 ① 当金属与工具表面之间加入润滑层较厚，摩擦副在相对运动中不直接接触，完全由希望状态。润滑油膜隔开，摩擦发生在流体内部分子之间。

- ② 摩擦力大小与接触面的表面状态无关，与流体的粘度、速度梯度等因素有关。
- ③ 流体摩擦的摩擦系数很小。 举例：冬天涂护手霜

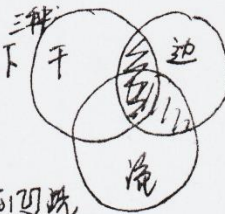
边界摩擦：① 随着接触压力增加，坯料表面凸起部分被压平，润滑油被挤入凹坑中，被挤在表面。

这时在压平部分和模具之间产生一层极薄的润滑膜。这种润滑膜一般是一种流体的单分子膜，接触表面就处在被这种单分子膜隔开的状态，称为边界润滑。

② 坯料加工之间的接触表面厚度小于 1μm 的润滑膜润滑摩擦状态。

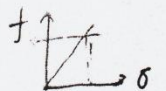
实际过程中，三种共有，称为混合摩擦。  
 干摩擦：边界摩擦与干摩擦混合状态。  
 半流体摩擦：流体摩擦与边界摩擦混合状态。

塑性或形过程中摩擦的性质是复杂的，目前关于摩擦产生的原因有以下  
 \* 表面凹凸学说：因摩擦是由接触面上的凹凸形状引起的。



动摩擦  $f = \mu_0 N_n$

静摩擦  $f_{max} = \mu_0 N_n$



当凹凸不平的两个表面相互接触，并在压力作用下，凸峰和凹坑机械咬合。表面越粗糙，摩擦力越大。（关节头，关节窝）

\* 分子吸附学说：是接触表面非常光滑，就没有摩擦力呢，认为摩擦产生的原因接触表面上分子之间相互吸引的结果。越光滑，接触面积越大，接触面间锐角越小，分子吸附越强，摩擦力越大。

地址：西安市西二环259号

电话：(029) 84258166

传真：(029) 84261727

邮编：710077

\* 粘着理论：当两个表面接触时，接触面上某些接触点处的压力很大，以致发生粘着和焊合，当两表面相对运动

# 西安航空学院

## 3.8 摩擦与润滑

3.8.2

**摩擦概念:** 两相互接触的物体, 发生相对或有相对运动趋势时所产生的阻碍相对运动的阻力称为摩擦力。此现象称为摩擦。

**举例:** 飞机起飞

**影响:** 经济意义: 30~50% 能源消耗在摩擦过程中。英国通过摩擦学实践, 一年节约 5.15 亿美元。  
美国能源部: 摩擦学导致能源损失 160 亿美元/年, 占总能源消耗 1%。

摩擦学是一门研究摩擦磨损和润滑的科学, 被誉为人类文明之冠。在轮用滚动摩擦代替滑动摩擦, 解放了人类的臂力。到后来, 摩擦学密切相关的轴承的发明催生出现工业文明。

**摩擦学:**  
与机械传动中的摩擦相比。  
① **摩擦特点:**

1. 接触面压力大。机器轴承: 20~30 MPa。如今摩擦学正越来越广泛运用到各个领域。  
⇒ 高的压力使润滑油难以渗入或易从变形区挤出, 润滑困难及润滑剂特殊。  
从航空航天到交通运输, 桥梁工程, 再到海洋深潜, 地探深部探测, 世界几乎所有超级工程背后都有摩擦学的贡献。
2. 高温条件摩擦。切削 800~1200°C。冷加工 (变形热/摩擦热) 200~300°C。  
⇒ 内部组织和性能变化, 金属表面氧化, 润滑油变质。  
地探深部探测, 世界几乎所有超级工程背后都有摩擦学的贡献。
3. 接触面更新和分区。(伴随塑性变形产生)。  
\* 增加新的表面, 使接触面接触条件改变。  
\* 接触面上各处 塑性流动 不同, 有滑动, 粘着, 有快, 慢, 接触面上各点摩擦不同。

**轧制:** 摩擦学。

4. 摩擦副 (只指磨) 性质差别大。  
工具无塑性变形, 但也不发生硬化。  
工件产生较大塑性变形。  
⇒ 两者性质作用差别大, 变形摩擦特殊。机械传动中摩擦不同。

### ② 外摩擦作用。

# 西安航空学院

有害: 1. 改变物体应力状态. 增加变形力能耗.

举例: 平锤锻造中. 无摩擦 单向应力. 有摩擦: 三向应力. (图)

二) 静水压力增加. 变形力增加. 变形功增加.  
一般情况下. 摩擦<sup>加大</sup>存在使<sup>负</sup>荷少 30%.

2. 引起工件变形应力分布不均匀.

根据最小阻力定律. 摩擦使工件属流动受阻. —— 轧制厚板时 (中棒类)

接触面形响大. 远角接触面形响小.

⇒ 圆筒形状. —— 微粗鼓形

圆筒性能 —— 厚板轧制 (心部品粒尺寸粗大)

3. 恶化工件表面质量. 加速模具磨损. 降低工具寿命.

相对滑动. 加速工具磨损.

摩擦功. 加速工具磨损.

变形及不均匀变形. 加速工具磨损.

金属粘着工具. 缩短工具寿命.

降低成品表面质量和尺寸精度 (轧辊定期磨削)

有利: 1. 轧制过程. 摩擦使工件属响中) 咬入轧辊 (改善咬入条件). —— 低速咬入. 高速轧制.

2. 冲床过程. 增大冲头与板片间摩擦. 减少或起皱和撕裂.

举例: 连续挤压. 利用<sup>圆形内</sup>摩擦<sup>上</sup>的摩擦力不断地将杆状坯料送入而实现连续挤压.

(工序少. 成品率高.

降低成本).

# 西安航空学院

## 384. 摩擦力的计算.

工具与坯料接触面的摩擦力常用三种假设.

- (1) 库伦摩擦条件.      (2) 最大摩擦条件.      (3) 摩擦力不变条件.

### 库伦摩擦条件.

- ① 摩擦力的大小与接触表面间的法向载荷成正比. 摩擦力方向总是与接触面积相对运动方向相反.
- ② 摩擦力的大小与接触面间的相对滑动速度无关. 静摩擦系数大于动摩擦系数.
- ③ 摩擦力的大小与名义接触面积无关.

表达式:  $F = \mu N$  或  $\tau = \mu \sigma_n$

适合正压力不太大. 变形量较小的金属材料.

### 最大摩擦条件.

① 当接触面没有相对滑动. 完全处于黏合状态时. 单位摩擦力等于金属变形流动时的临界切力.

力.  $\tau = k$  表达式.  $\left\{ \begin{array}{l} \text{轴对称: } k = 0.5 \sigma_T \quad \mu = 1 \\ \text{平面变形: } k = 0.577 \sigma_T \quad \mu = 0 \end{array} \right.$   $\sigma_T$  真实应力.  $\rho = \frac{2}{\sqrt{3} \mu \sigma_T} \pm 1$

S 屈服力

### 摩擦力不变条件. (也称常数摩擦力条件).

接触面间的摩擦力不随正应力大小而变. 其单位摩擦力为常数.

$\tau = \mu S$

$\tau = mk$   $m$  摩擦因子  $m(0, 1)$

当  $m=1$  时. 与最大摩擦条件一致.

# 西安航空学院

## 3.8.4. 影响摩擦的主要因素.

### 1. 影响因素

- ①. 金属的种类和化学成分.
- ②. 工具材料及其表面状态
- ③. 接触面上的单位压力.
- ④. 变形温度
- ⑤. 变形速度
- ⑥. 润滑剂.

### ⇒ 1. 金属的种类和化学成分.

★ 同种材料, 化学成分变化时, 摩擦系数不同.

★ 钢中的碳含量少, 摩擦系数会减小.

★ 随着合金元素的增加, 摩擦系数下降.

★ 粘附性 较强的金属具有较大的摩擦系数.

★ 硬度、强度高, 摩擦系数就减小.

↑ 较大 减小

↑ 钢铁, 钢 从

实验: 用光滑的钢压头在常温下对材料进行摩擦. (2) 摩擦系数.

碳钢 0.17 铝 0.18 黄铜 0.10 钛钢 0.17

### 2. 工具材料及其表面状态.

工具材料: ★ 铸铁 摩擦系数比 钢 摩擦系数低 10%~20%. ★ 淬火钢与铸铁相近.

★ 硬质合金 摩擦系数比 合金钢 摩擦系数低 10%~20%.

# 西安航空学院

工具表面状态：①工具表面精度及机加工方法不同，摩擦系数在0.05-0.5范围内变化。

②工具表面光洁度较高，摩擦系数 $\downarrow$ 。但如两个接触面光洁度都很高，由于分子吸附作用增强，反使摩擦系数 $\uparrow$

## (3). 接触面上的单位压力

~~正压力~~ 正压力 $\downarrow$ ，摩擦系数 $\uparrow$ ，常摩擦。

一定值 润滑油被挤掉或表面膜被破坏，摩擦系数 $\uparrow$   
正压力 $\uparrow$ ， $\sim$ 成正比。摩擦系数随压力 $\uparrow$ 而 $\uparrow$

表面吸附现象不明显，摩擦系数与正压力无关

增加到一定程度趋于稳定。

## (4). 变形温度。(复杂)

开始时摩擦系数随温度升高而增加，达到最大值后又随温度升高而降低

$\checkmark$  T较低时，金属硬度大，氧化膜薄，摩擦系数小。

$\checkmark$  随着T升高，金属硬度降低，氧化膜增厚，表面吸附力 $\uparrow$ ，原子扩散能力 $\uparrow$ ，同时，高温使润滑剂性能变坏，所以，摩擦系数 $\uparrow$ 。

$\checkmark$  当温度继续升高，由于氧化质软化和脱落，氧化质在接触表面间起润滑剂作用，摩擦系数反而 $\downarrow$ 。

T $\uparrow$  产生氧化膜，摩擦系数 $\uparrow$

T $\uparrow$  ~~氧化膜~~ 氧化膜 $\downarrow$  摩擦系数 $\downarrow$



## (5) 变形速度。(复杂)

$\checkmark$  在干摩擦时，变形速度 $\uparrow$ ，表面凹凸不平部分来不及相互咬合，表现出摩擦系数的下降。

$\checkmark$  在边界润滑条件下，由于变形速度 $\uparrow$ ，油膜厚度 $\downarrow$ ，导致摩擦系数下降。 变形速度 $\uparrow$

由 $\downarrow$  < <

## (6) 润滑剂。

作用：降低摩擦，减少工模具磨损。(正确选用润滑剂，可减少摩擦系数)

# 西安航空学院

## 3.8.5. 摩擦系数测定方法.

目前的摩擦系数测定方法, 大都利用库伦摩擦定律进行, 即求出相应正应力下的摩擦力, 然后求出摩擦系数. (平均值) 常见方法: 夹钳孔的压, 楔形件压缩法, 圆环摩擦法.

圆环摩擦法. (比较简单方法, 不需测定压力, 也不需要制备许多压头和试件).

基本原理: 把一定尺寸的圆环试件放在平砧上摩擦. 由于接触摩擦系数不同, 内外径在压缩中将有不同变化.

① 无论摩擦如何, 外径总是增加, 内径随摩擦系数变化, 或↑或↓.

② 摩擦系数较小时, 内外径都↑. 摩擦系数超过某一临界值时, 圆环中会出现一个以  $R_n$  为半径的分流面. (分流面以外, 金属向外流动; 分流面以内, 金属向内流动).

故: 外径↑, 内径↓.

用上限法或者应力分析法, 求出内径, 高度, 摩擦系数的理论关系式. 可绘制 标定曲线 查摩擦系数.

(图)

一般用于测定各种温度, 速度条件下的摩擦系数. 是目前应用较多的方法. 但由于圆环试件在摩擦时常出现鼓形, 环孔出现椭圆形等, 引起测量上的误差, 影响结果准确性.

# 西安航空学院

内摩擦: 变形金属内晶界而上式品内滑移而上产生的摩擦。

外 - - - - - 与工具之间。(教科)

不同 | 干摩擦 (没有任何介质)  
| 边界摩擦 (存在很薄的润滑剂膜)  
| 流体摩擦 (润滑剂层较厚) 0.1mm

a. 塑料成形时摩擦分类和机理

b. 金属塑性加工中的摩擦特点与影响

特点: 压力大, 温度高, 接触面更新和分区, 摩擦副性质差别大。

影响: ①增大变形抗力和能耗 ②分布不均匀 ③恶化工件表面质量 ④加速模具磨损

如: ① ② ③ 飞边 workform 切削 (摩擦)  
20世纪70年代 1971. 英国

workform: 连续挤压利用摩擦所产生的热量升温, 无需加热, 从而节省能源。

减少 (管材加工, 少5道) 成品率高, 降低成本 (缩短周期)

挤压 { 正向挤压 (挤压杆运动方向与挤压产品材料方向一致) 坯料与挤压筒之间存在很大摩擦力 → 使金属流动不均匀 → 组织不均匀。

反向挤压  
摩擦挤压。  
生产不连续, 制品长度受到限制。 20世纪70年代

连续挤压利用模壁上的摩擦力不断地将杆状坯料送入而实现连续挤压

workform 连续挤压机: 4部分 ① 轮缘车削有凹形沟槽的挤压轮, 由驱动轴带动旋转。

② 挤压靴, 它是固定的, 与挤压轮相接触的部分是一个弓形的模衬块, 该模衬块和挤压轮的包角一般为90°, 起到封闭挤压轮凹形沟槽的作用, 构成一个形的挤压型腔, 相当于常规的挤压筒。

找一个动画。

三面刃轮缘挤压轮的模壁切削面与挤压靴。

③ 固定在挤压腔出口的堵头, 其作用是封挤压腔口封住, 迫使金属从挤压模流出。

④ 挤压模, { 安装在堵头上 → 切向挤压。  
- 靴块上 → 径向挤压。

1000 MPa



# 西安航空学院

40. 2022.10

- c. 计算. I 库仑摩擦条件 (纯滑动)  $F = \mu N$   $\tau = \mu \sigma_N$   $\mu = 0.5 - 0.577$   $\tau = 0.5 - 0.577 \sigma_s$  适合正应力不太小, 变形量不大的情况
- II 最大摩擦条件 (粘滞)  $\tau = k$   $\tau = 0.5 \sigma_s$  (钢)  $\tau = 0.577 \sigma_s$  (铝合金) 适用于热变形
- III 摩擦力不变条件.  $\tau = m \cdot k$  三向应力显著变形, 如挤压, 模锻

d. 影响因素.

e 摩擦系数测定方法. 夹钳轧制法. 楔形摩擦筒法. 圆环滚轴法

举例 内径随摩擦系数与压筒直径成正比

f 润滑. 零件加工常用摩擦系数.

a 对润滑剂的要求.

b 常用的润滑剂.  $\left\{ \begin{array}{l} \text{液体} \\ \text{固体} \end{array} \right.$

# 西安航空学院

## 第十九讲

### 拉力法基本原理

$$F, \sigma_x, z, h$$

若知主应力分量，如何将已知的主应力分量  
进而进行模具设计，确定设备参数呢？

建立以主应力表示的简化平衡微分方程和塑性条件(屈服准则)。

1. 平板压缩，宽板轧制，圆柱体镦粗，棒材挤压和拉拔等看作是平面应变问题，轴对称问题。
2. 假设变形体内应力分布，仅为某条件的函数，以获得近似的应力平衡微分方程。或将变形体内截取单元体切面上的正应力假定为均匀分布，由此把该单元体的应力平衡微分方程

改变为应力平衡微分方程。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0$$

正应力沿x和y方向分布  $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{d\sigma_x}{dx}$   
 剪应力沿x和y方向呈线性分布  $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{2\tau}{h}$   
 平面/板宽常用应力平衡

Mises  $\Rightarrow \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2\tau}{h} = 0$

3. 采用近似的屈服准则；拉力法把接触面上的正应力假定为均匀分布，于是对于平面应变问题

$$\sigma_x - \sigma_y = 2k \quad \text{轴对称} \quad d\sigma_r - d\sigma_z = 0$$

4. 简化接触面上的摩擦

库仑摩擦  $\tau_k = f\sigma_n$

(滑动摩擦)

最大摩擦  $\tau_k = k$

(粘着摩擦)

摩擦力不变条件  $\tau = \mu\sigma$  (混合摩擦)

平面应变:  $\sigma_x - \sigma_y = 2k$   
 $\sigma_x - \sigma_z = 0$   
 $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_p - \sigma_z = \beta \sigma_s$   
 $\beta = \frac{2}{\sqrt{3+4f^2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s$   
 $\sigma_x - \sigma_z = \sigma_s \Rightarrow d\sigma_r - d\sigma_z = 0 \Rightarrow \mu = 0$  平面应变状态

5. 如果不考虑工模具弹性变形的影响，材料变形为均质和各向同性体。

6. 边界条件(自由表面)

$$\sigma_x = 0, \quad \sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$$

$$\sigma_y = \sigma_x$$

自由表面应力  $\sigma_x = 0, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$

$$\sigma_r = 0, \quad \tau_{rz} = 0$$

边界点处满足屈服准则。

7. 几何近似。

8. 数值近似。  $\sin \alpha \approx \alpha, \quad \cos \alpha \approx 1, \quad \tan \alpha \approx \alpha$

转习题 B

# 西安航空学院

举例. 水平模具间锻造无限长矩形板问题.

如条  $l$  比  $h$  大很多, 则板坯在长度方向几乎没有延伸, 仅在  $x$  方向和  $y$  方向上有塑性流动. <sup>塑性流动方向</sup> 即为应变问题.

适用于直角坐标分析.  $v$  轴板形 (不考虑).

(1). 简化为平面应变问题 (忽略长度方向变形).

(2). 切取单元体. 长  $l$ , 宽  $dx$ , 高  $h$ . 沿  $x, y$  轴对称. 只分析一个象限. (包含接触面的单元体).

仅为  $x$  的函数

(3). 单元体应力分析: 在上下接触面上作用有外力引起的  $\sigma_y$ .

在  $x$  方向垂直的左右两切面上作用力  $\sigma_x$   $d\sigma_x + d\sigma_x$  (函数, 有增量).  $z$

受到压缩, 向两边流动. 层应力  $\times$  轴函数. 宽  $dx$ .  $\sigma_x + d\sigma_x$ .

接触面上摩擦引起的剪应力  $\tau$  右压,  $\tau$  向左.

故  $x$  方向作用有沿高度方向均匀分布的剪力  $\tau$ .  $\sigma_1 + d\sigma_1$   $d\sigma_1 = d\sigma_2$

(4). 建立单元体的应力平衡微分方程.

$d\sigma_x$

$$x \text{ 方向平衡 } \sigma_x \cdot h l - (\sigma_x + d\sigma_x) h l - 2\tau dx = 0 \Rightarrow d\sigma_x = -\frac{2\tau}{h} dx. \quad d\sigma_1 = -\frac{d\tau}{h} dx$$

$\downarrow$

(5). 补充简化的塑性条件.

$d\sigma_x \rightarrow d\sigma_y$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \frac{2}{\sqrt{3}} S \quad d\sigma_x = d\sigma_y$$

(6). 联立求解接触面上应力分布.

$$d\sigma_y = -\frac{2\tau}{h} dx \quad v = \mu s.$$

$$\sigma_y = -\frac{2\mu s}{h} x + [C] \leftarrow \text{边界条件.}$$

# 西安航空学院

(7). 根据边界条件确定  $C$ .

$$\delta x|_{x=\frac{a}{2}} = 0 \quad \delta y|_{x=\frac{a}{2}} = \frac{2}{\sqrt{3}}S = -2K$$

$$C = \frac{2}{\sqrt{3}}S + \mu S \frac{a}{h}$$

$$\delta y = \frac{2}{\sqrt{3}}S + \frac{2\mu S}{h} \left( \frac{a}{2} - x \right).$$

(8). 求变形力  $F$  和流动压力  $P$ .

$$F = 2\mu \int_0^{\frac{a}{2}} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}}S + \frac{2\mu S}{h} \left( \frac{a}{2} - x \right) \right] dx.$$

$$P = \frac{F}{ta} = \frac{2}{\sqrt{3}}S + \mu S \cdot \frac{a}{2h}.$$

# 西安航空学院

## 第二十讲

同学们好。这节课我们继续学习第四章金属塑性成形基本工第<sup>10</sup>力分析及其力法。首先复习一下上节课的主要内容。要讲了，力法求解塑性变形问题。实质是应力平衡微分方程和屈服条件联立求解。梳理一下PPT。

这节课讲一下开坯锻粗变形。要有以下内容：锻粗变形变形特点，求解步骤，接触表面切应力分布规律。简单了解一下开坯锻粗变形求解问题。

首先看锻粗变形的特点。主要分三方面：(1) 接触面上存在摩擦<sup>(2)</sup>，致使变形不均匀。存在三个变形区。由图所示。I区难变形区 <sup>(三向压应力)</sup> II区大变形区 <sup>摩擦应力</sup> III区小变形区 <sup>近似于单向压应力</sup>。(3) 侧表面产生附加拉应力。(II区变形大，金属向外流动对II区有径向压应力 $\sigma_r$ ) <sup>侧切向拉应力 $\sigma_\theta$</sup> 。根据高径比 $H/D$ 不同，可能存在双居形( $>2$ )。  $\leq 0.5$  鼓形鼓小。

这节课讲锻粗变形。圆柱体锻粗时，如果锻件性能和接触表面状态没有各向性，则内部的应力状态对称于圆柱体轴线( $Z$ 轴)。即在任一水平截面上，各点的应力状态与 $\theta$ 坐标无关。反与 $r$ 坐标有关。因此为典型的圆柱体坐标轴对称问题。  
 讲1轴对称

(1) 取微单元体  $dr$   $do$

例：圆柱体锻粗变形力计算

① 设圆柱体毛坯的直径和高为 $d$ 和 $h$ 。取坐标系原点在圆柱中心。而 $Z$ 轴与圆柱轴线重合的圆柱坐标系 $(r, \theta, z)$  忽略鼓形和不均匀变形。简化为轴对称问题。

② 沿整个坯料高度方向在半径 $r$ 处截取厚度为 $dr$ ，圆面积为 $do$ 的单元体。在单元体的高度 $z$ 向上作用着均匀分布的径向压应力 $\sigma_r$   $\sigma_r + d\sigma_r$  切应力 $\sigma_\theta$ 。  $z_{10} = z_{20} = 0$   
 $\sigma_\theta$  是 $r$ 坐标函数

$\sigma_\theta$  和  $\sigma_r$  是主应力

$\sigma_\theta$  沿 $r$ 方向分解

# 西安航空学院

(3) 圆柱体径向力平衡方程

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)h d\theta - \sigma_r h r d\theta - 2\sigma_\theta \sin \frac{d\theta}{2} h dr + 2r d\theta dr = 0$$

因  $d\theta$  是一极微小量,  $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{d\theta}{2}$  高形面积差

$$r h d\sigma_r + \sigma_r h dr + 2r dr - \sigma_\theta h dr = 0$$

$\therefore$  圆柱体均匀时,  $\sigma_r = \sigma_\theta$

$$d\sigma_r = -\frac{2r}{h} dr$$

(4) 积分条件.  $\sigma_z - \sigma_r = S \quad d\sigma_z = d\sigma_r \Rightarrow d\sigma_z = -\frac{2r}{h} dr$

$$\sigma_r - \sigma_z = 2k$$

(5) 设定边界条件

a. 边界条件  $v = uS \Rightarrow d\sigma_z = -\frac{2uS}{h} dr$

积分求解  $\sigma_z = -\frac{2r}{h} r + C = -\frac{2uS}{h} r + C$

(b) 边界条件.  $r = \frac{d}{2}$  时  $\sigma_r = 0, \sigma_z = S \quad C = \frac{uSd}{h} + S$

b. 积分条件

$$v = u\sigma_z \rightarrow d\sigma_r = -\frac{2u\sigma_z}{h} dr$$

积分得  $\sigma_r = C e^{-\frac{2u}{h} r}$

代入边界条件.  $C = S e^{\frac{u d}{h}} \quad \sigma_r = S e^{\frac{2u}{h} (\frac{d}{2} - r)}$

$$F = 2 \int_{\frac{d}{2}}^0 \sigma_r \cdot 2\pi r dr = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \sigma_1 \left(1 + \frac{u}{3} \cdot \frac{d}{h}\right)$$

# 西安航空学院

二. 接触表面正切应力分布规律  $\sigma_z$ .

1. 带动力区 (ab)  $z = \mu \sigma_z$   
(厚台厚缘).

$$\sigma_z = S e^{\frac{2\mu}{h} (\frac{d}{2} - r)} \quad \mu \text{ 摩擦系数}$$

( $r_0 \leq r < \frac{d}{2}$ ).

$$z = \mu S e^{\frac{2\mu}{h} (\frac{d}{2} - r)}$$

2. 带动力区 (bc)  $z = \frac{S}{2}$   
(带盖区).

$$\sigma_z = \frac{S}{2\mu} \left[ 1 + \frac{2\mu(r_0 - r)}{h} \right]$$

S 真实应力.

$$z = \frac{BS}{2}$$

( $r_0 \geq r \geq r_c$ )

3. 无带动力区 (cd)  $z = \frac{S}{2} \cdot \frac{r}{h}$   $z = z_c \frac{r}{h}$

h 圆柱体试件高度.  $r_c$  带动力区外缘点处切应力.

$0 \leq r \leq r_c$

$$\sigma_z = \frac{S}{2\mu} \left[ 1 + \frac{2\mu(r_0 - r)}{h} \right] + \frac{S}{2h} (r^2 - r_c^2).$$

I: 指数. II: ~~线性~~ 线性. III: 抛物线.

3. 接触面上各个区域的应力条件. PPT.

第三章 开式模锻变形特点及变形力计算 (3解). (圆盘类, 柱状轴类).

→ 飞边斩部金属对飞边台部金属的挤压作用犹如扩张一个厚壁圆筒. 按厚壁圆筒的应力分布 (即: 轴对称).

① 模锻变形力计算 { 飞边 (圆柱体轴对称).

+ 锻件本体. (分型面附近凸透镜状区域). 其它区域处于静水压力状态. 不详细讲解.

D.  $h_0$ .

本讲小结.

## 第五章 塑性成形问题的滑移线解法 (静可容的滑移线场)

本章重点: 滑移线方法的基本原理及其应用于典型塑性成形问题分析

基本概念: 最大切应力, 滑移线(场), 单位流动应力;

物点力场: 各点应力状态相同  
简单力场: 一线

基本原理: 汉基应力方程, 沿线特性, 跨线特性, 屈服准则, 边界条件.

基本方法: 滑移线场的建立方法, 运用滑移线场的相关性质求解塑性变形区的应力分布, 以及滑移线方法在典型成形问题的应用.

★ 滑移线是处于塑性平面应变状态下的变形体内各质点最大切应力的迹线.  $\tau_{max} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$   
★ 滑移线场: 由于最大切应力都是成对出现, 且相互正交, 因此整个塑性变形区可看做是由两组相互正交的滑移线组成的网络, 即滑移线场. 相等且垂直  $\alpha, \beta$  滑移线.

★ 该方法在数学上比较严谨, 理论上比较完整, 计算精度较高.

M.列维. 汉基创立.

$$\delta \epsilon_{ij} = \sigma_{ij} d\alpha$$

★ 滑移线场理论包括应力场理论和速度场理论, 针对理想刚塑性材料在平面变形条件下建立, 可推广到非互异号平面应力问题. 简单的轴对称问题及硬化材料

### 第一节 滑移线的基本概念

一. 平面应力状态的特点.

沿每一坐标轴的应变为0.  $\epsilon_z = \gamma_{zx} = \gamma_{yz} = 0$

$$\sigma_z = \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) = \sigma_m$$

变形只发生在垂直的坐标平面上, 称为塑性流动平面

最大切应力.

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = k$$

塑性流动平面  $xoy$

一. 屈服条件. 屈服准则和应力边界条件所建立的滑移线场为静可容的滑移线场, 不一定满足运动学条件. 为判断滑移线场是否完全解, 还应按速度边界条件和保积不变条件建立速度场进行校核.  $\alpha, \beta$  滑移线

切应力正负: 使变形体顺时针旋转为正



# 西安航空学院

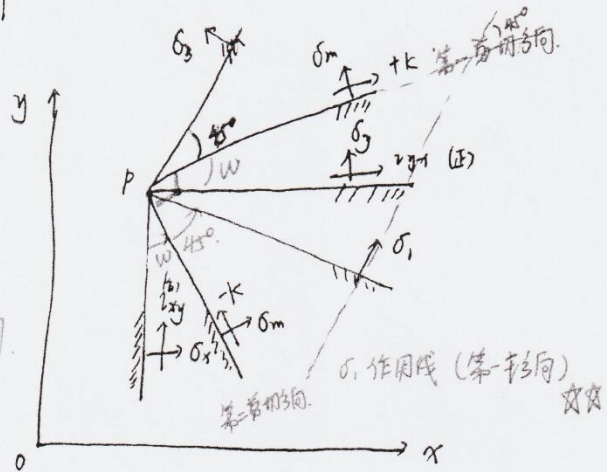
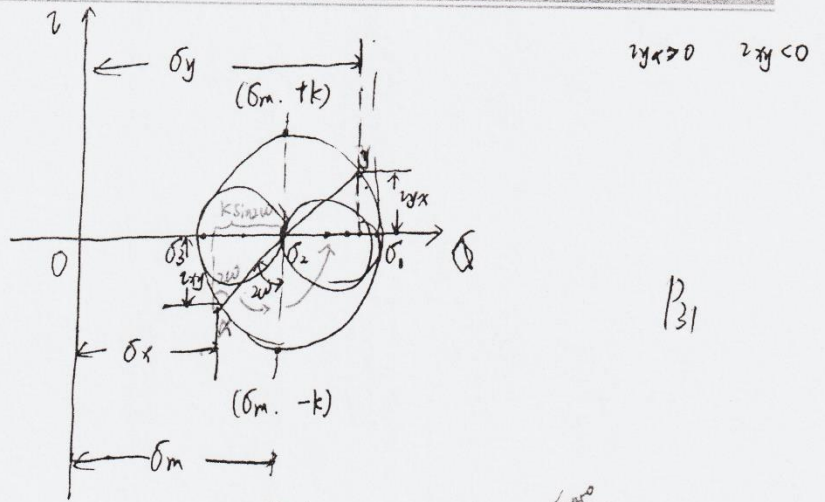
由应力莫尔圆的几何关系可知

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_m - k \sin 2\omega \\ \sigma_y &= \sigma_m + k \sin 2\omega \\ \tau_{xy} &= \pm k \cos 2\omega \end{aligned} \right\}$$

$\omega$  是最大切应力平面与  $x$  轴的夹角

$$\left. \begin{aligned} \text{主应力轴} \quad \sigma_1 &= \sigma_m + k \\ \omega &= \pm \frac{\pi}{4} \quad \sigma_2 &= \sigma_m \\ \sigma_3 &= \sigma_m - k \end{aligned} \right\}$$

理想刚性材料,  $k$  为常数, 应力状态的差别只在  $\sigma_m \rightarrow$  应力莫尔圆大小形状相同, 只在  $\sigma$  轴上的位置不同

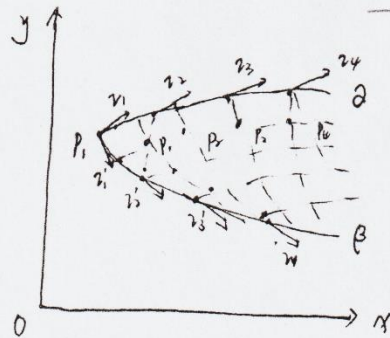


由坐标轴以正角旋向第一切方向的角点  $\omega$  为第一切方向之角

## 二. 最大切应力轨迹 - 滑移线形成

整体变形区内质点最大切应力卡, 两轴互  $\perp$  方向

$$\left. \begin{aligned} \text{折线 } P_1 B_1 B_2 \dots P_n & \\ P_1' B_1' B_2' \dots P_n' & \end{aligned} \right\} \alpha \text{ 或 } \beta \text{ 线节点}$$



滑移线场: 整个变形区存在的两组互相正交的滑移线组成的网络

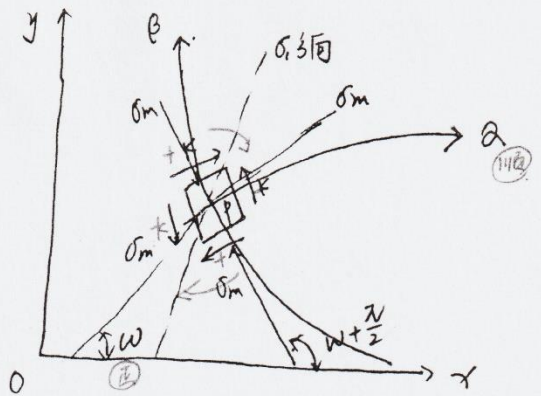
滑移线场与应力迹线场相交成  $45^\circ$  角, 已知滑移线场便可作出应力迹线场, 反之亦然

# 西安航空学院

## 三. 2. $\beta$ 滑移线和 $\omega$ 角的规定.

(1) 当  $\alpha, \beta$  族线构成右手坐标系时, 代数值最大的称为  $\sigma_1$  的作用方向位于第一-第三象限  $\beta_3$

(2) 滑移线两侧的最大切应力组成 顺时针方向 的  $\alpha$  族线, 组成 逆时针方向 的  $\beta$  族线.



(3) 当已知  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  方向时, 将它们沿顺时针旋转  $45^\circ$  即为  $\alpha, \beta$  族线. 最简单  $\sigma_1$ , 顺时针  $\frac{\pi}{4}$   $\alpha$

(4)  $\alpha$  线的切线方向 与  $Ox$  轴的夹角以  $\omega$  表示, 并规定  $Ox$  轴的正方向为  $\omega$  角的量度起始线, 逆时针 旋转的  $\omega$  角为正, 顺时针 旋转为负.  $\beta$  滑移线的切线  $\omega' = \omega + \frac{\pi}{2}$ .

## 四. 滑移线的微分方程.

对  $\alpha$  族线  $\frac{dy}{dx} = \tan \omega$       对  $\beta$  族线  $\frac{dy}{dx} = \tan \omega' = \tan(\omega + \frac{\pi}{2}) = -\cot \omega$ .

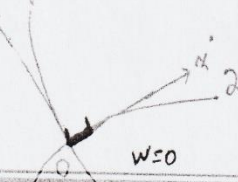
## 第二节. 滑移线场的应力方程 (汉基应力方程)

滑移线法求解平面问题的实质: 平面应变状态的应力分量可由  $\sigma_m$  和  $k$  (常数) 来表示, 只要能找到沿滑移线上的  $\sigma_m$  的变化规律, 即可求得整个变形体的应力分布.

★ 汉基公式推导: (利用平衡微分方程)

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad \text{将} \quad \begin{cases} \sigma_x = \sigma_m - k \sin 2\omega \\ \sigma_y = \sigma_m + k \sin 2\omega \\ \tau_{xy} = \pm k \cos 2\omega \end{cases} \quad \text{代入上式} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial \sigma_m}{\partial x} - 2k \left( \cos 2\omega \frac{\partial \omega}{\partial x} + \sin 2\omega \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = 0 \\ \frac{\partial \sigma_m}{\partial y} + 2k \left( \sin 2\omega \frac{\partial \omega}{\partial x} - \cos 2\omega \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = 0 \end{cases}$$

4. 50 12.5



$$\begin{aligned} dx &= ds_\alpha & dy &= ds_\beta & \omega &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_m}{\partial s_\alpha} - 2k \frac{\partial \omega}{\partial s_\alpha} &= 0 & \text{对} \alpha \text{积分} \\ \frac{\partial \sigma_m}{\partial s_\beta} + 2k \frac{\partial \omega}{\partial s_\beta} &= 0 & \text{对} \beta \text{积分} \end{aligned}$$

# 西安航空学院

## 第四章. 应力边界条件 (分析推理法)

① 特殊方向: 切应力为0  
切应力. 初应力达到极大值.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_m - k \sin 2\omega \\ \sigma_y &= \sigma_m + k \sin 2\omega \\ \tau_{xy} &= \pm k \cos 2\omega \end{aligned} \right\}$$

应力边界条件:  $\sigma_n, z \Rightarrow \sigma_m, \omega$

②.  $z, \beta$  右手

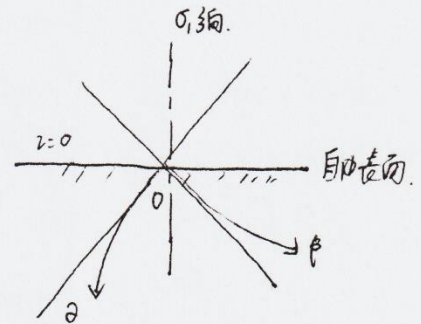
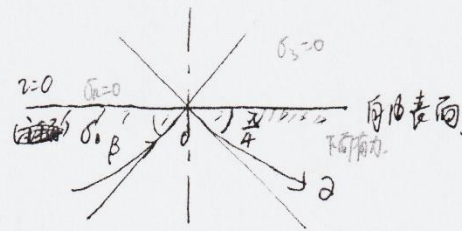
$$\tau_{xy} = z, \quad \omega = \pm \frac{1}{2} \arccos \left( \frac{z}{k} \right)$$

### 1. 自由表面.

$$\begin{aligned} \rightarrow \sigma_1 = 2k, \quad \sigma_3 = 0 \\ \rightarrow \sigma_1 = 0, \quad \sigma_3 = 2k \end{aligned}$$

代数值大

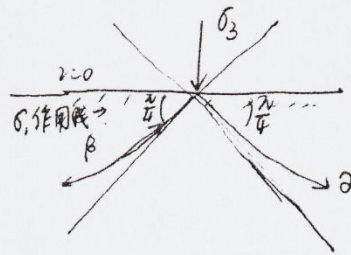
$$z=0, \quad \omega = \pm \frac{\pi}{4}$$



### 2. 无摩擦接触表面.

$$z=0, \quad \omega = \pm \frac{\pi}{4}$$

$$\sigma_n = \sigma_3 < 0$$

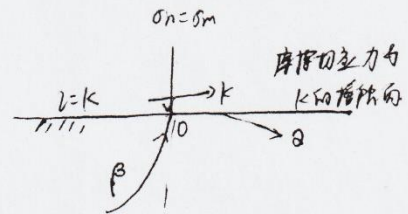
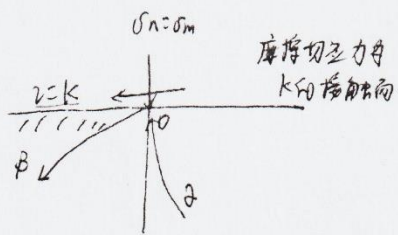


无摩擦的接触表面. (光滑. 无摩擦)

### 3. 摩擦力为k的接触表面.

$$z=k, \quad \omega = 0 \text{ 或 } \frac{\pi}{2}$$

一族相切, 一族垂直.

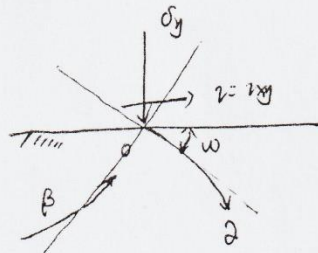


### 4. 摩擦力为一中间值的接触表面.

$$0 < |\tau_{xy}| < k, \quad \sigma_n \neq 0$$

$$z = \tau_{xy}$$

$$\omega = \pm \frac{1}{2} \cos^{-1} (\tau_{xy}/k)$$



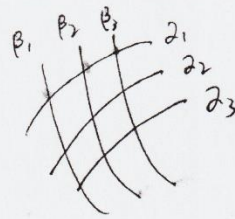
$$0 < z < k, \quad \sigma_n \neq 0$$

$\omega$  逆为正, 顺为负

莫尔圆  $\rightarrow$   $\omega$  角.

# 西安航空学院

积分  $\sigma_m - 2k\omega = \epsilon(\beta)$  (沿 $\alpha$ 线) }  
 $\sigma_m + 2k\omega = \eta(\alpha)$  (沿 $\beta$ 线) }



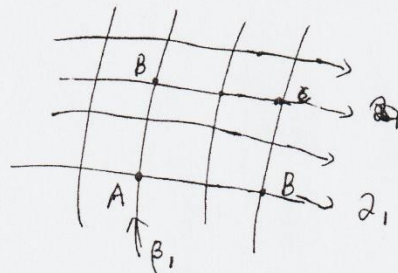
又因 $\beta$ 值不同而不同.

## 第三节. 滑移线的基本特性.

一. 沿线特性.

沿 $\alpha$ 线:  $\sigma_{ma} - \sigma_{mb} = 2k(\omega_a - \omega_b)$

沿 $\beta$ 线:  $\sigma_{ma} - \sigma_{mb} = -2k(\omega_a - \omega_b)$



沿 $\alpha$ 线  $\Delta\sigma_m = 2k\Delta\omega$  }  
 沿 $\beta$ 线  $\Delta\sigma_m = -2k\Delta\omega$  }

$\sigma_{ma} - 2k\omega_a = \sigma_{mb} - 2k\omega_b$

同一滑移线平均应力  $\sigma_m$  变化与 $\omega$ 角变化成正比.

静水压力差.  $\omega$ 成正比.

几点推论: ①若滑移线场已经确定, 且已知一条滑移线上任一点的平均应力, 则可确定该滑移场中各点的应力状态.

②若滑移线为直线, 则此直线上各点的应力状态相同.

③如果在滑移线场的某一区域内, 两组滑移线皆为直线, 则此区域内各点的应力状态相同. 称为均布应力场.

二. 跨线特性 (汉基第一定理).

汉基定理是根据应力平衡微分方程和塑性条件得到的. 所以不仅体现了微分方程, 同时满足屈服

条件.

$\alpha_1$  跨到  $\alpha_2$ .

$\alpha_2$  跨到  $\beta$ .

# 西安航空学院

A. B. C. D 四点.

$$A \rightarrow B: \sigma_{mA} - 2k\omega_A = \sigma_{mB} - 2k\omega_B$$

$$B \rightarrow C: \sigma_{mB} + 2k\omega_B = \sigma_{mC} + 2k\omega_C$$

$$\sigma_{mC} - \sigma_{mA} = 2k(2\omega_B - \omega_A - \omega_C)$$

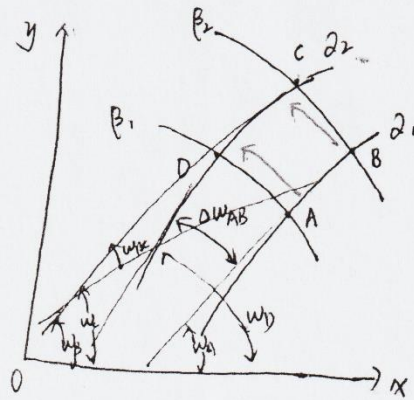
$$A \rightarrow D: \sigma_{mA} + 2k\omega_A = \sigma_{mD} + 2k\omega_D$$

$$D \rightarrow C: \sigma_{mD} - 2k\omega_D = \sigma_{mC} - 2k\omega_C$$

$$\sigma_{mC} - \sigma_{mA} = 2k(\omega_A + \omega_C - 2\omega_D)$$

$$\Rightarrow \text{变形} \quad \omega_D - \omega_A = \omega_C - \omega_B$$

$$\sigma_{mD} - \sigma_{mA} = \sigma_{mC} - \sigma_{mB}$$



$$\left. \begin{aligned} \Delta \omega_{AD} = \Delta \omega_{BC} &= \dots = C_1 \\ \Delta \sigma_{m(AD)} = \Delta \sigma_{m(BC)} &= \dots = C_2 \end{aligned} \right\}$$

滑移线特性：同一族上的两条滑移线与另一族的任一条滑移线相交，在两交点处切线间的夹角  $\Delta \omega$  与平均应力的变化  $\Delta \sigma_m$  均为常数。

推论：

1. 同一族滑移线必须具有相同方向的曲率。
2. 如果一族滑移线中有一条线段为直线，则该族其余滑移线中的相应线段也都是直线；而与其正交的另族滑移线（共2族）或是直线，或是直滑移线包络的渐开线，或是同心圆。

简单应力场，对应的滑移线场为直线和渐开线或同心圆组成；沿直线应力状态不变，沿渐开线或同心圆变化。

# 西安航空学院

5. 变形体的对称轴.  $v=0, w=\pm \frac{z}{4}$  参考 2

## 第五节. 滑移线场的建立方法.

### 一. 常见滑移线场.

1. 均匀场 (对应于均匀应力场) 角无变化  $\sigma_m$  相切.  $Ox, Oy, 2xy$ .  
 由两组正交直线构成. 各点  $x, y$  上的正应力和剪应力都相等.

$\sigma_m = C_1, \omega = C_2$  自由表面, 光滑 (无摩擦) 接触面常常出现均匀场.

2. 简单场 (对应于简单应力场).  $\rightarrow$  由一族汇交于点的辐射直线, 和与之正交的另一组同心圆弧构成.

用直线与直线正交的曲线组成. 每条直线  $\omega$  角发生变化.  $\sigma_m$  改变. 无限多平均应力对应着. 应力奇异点.

a. 有心扇形场

b. 无心扇形场 (包络线) 相切

应力奇异点通常出现在模具的拐角处或工具截面的突变处, 及应力中应力急剧变化的部位.

3. 均匀场和简单场的组合场. (与均匀场相邻的必定是简单场).

### 4. 正交光滑曲线.

由两组相互正交的光滑曲线组成

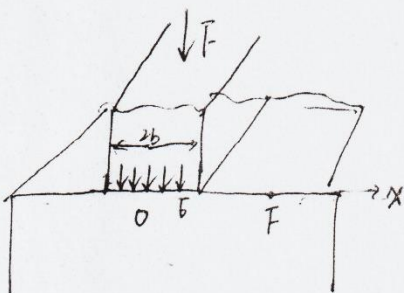
a. 对数螺旋线场.

b. 圆摆线场.

c. 扩展的有心扇形场.  $P_{172}$ .

例: 滑移线法应用.

平冲头压入半无限体, 设冲头宽度为  $2b$ . 冲头表面光滑, 与坯料接触面无摩擦作用.



解题思路:

自由表面处  $\sigma_m$   $\xrightarrow{\text{沿线特性}}$  接触面处平均应力  $\sigma_m$ .

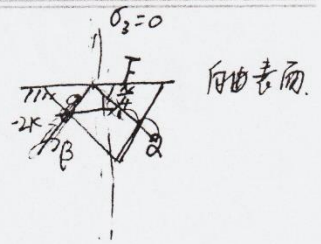
$$\sigma_3 - \sigma_1 = 2k$$

在冲头两侧的自由表面上.

$$\sigma_3 = -2k \quad \sigma_1 = 0$$

$$\sigma_m = k$$

$$W = \frac{\pi}{4}$$



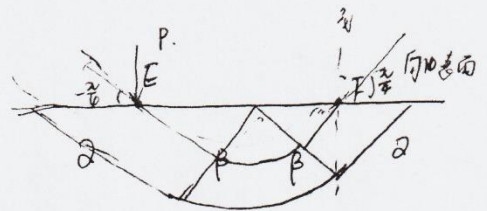
$$\sigma_3 = 0 \quad \sigma_1 = -2k \quad \sigma_m = -k$$

对于自由表面F点  $W_F = \frac{\pi}{4}$

$$\sigma_{yF} = 0 \quad \sigma_{mF} = -k$$

对接触点E点  $W_E = -\frac{\pi}{4}$

$$\sigma_{yE} = -P \quad \sigma_{mE} = -P + k$$



$$\sigma_x - \sigma_y = \sigma_x = 2k$$

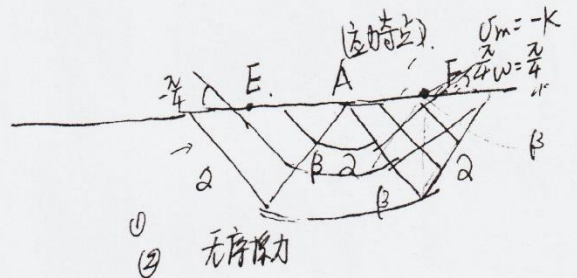
$$\sigma_x + P = \sigma_x = 2k$$

$$\sigma_x = -P + 2k$$

$$\sigma_{mF} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = -P + k$$

$$\sigma_3 = -P \quad \sigma_1 = -P + 2k$$

$$\sigma_m = -P + k$$



(2) 利用沿底特性.

$$\sigma_{mF} - 2k W_F = \sigma_{mE} - 2k W_E$$

$$-k - 2k \cdot \frac{\pi}{4} = -P + k + 2k \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$P = 2k \left(1 + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\Rightarrow \boxed{P = 26p = 26k(2 + \pi)}$$

$$\sigma_x + P = 2k$$

$$\sigma_x = 2k - P$$

$$\sigma_x - \sigma_y = 2k$$

$$\sigma_x + P = 2k$$

$$\sigma_x = 2k - P$$

$$2k - P =$$

$$\sigma_y = -P$$

$$\sigma_x = -P + 2k$$

“塑性成形原理”学生评教记录

| 序号    | 学期          | 开课单位   | 课程名称   | 教师工号      | 教师姓名 | 班级名称     | 评价时间                  | 学生评教分数 |
|-------|-------------|--------|--------|-----------|------|----------|-----------------------|--------|
| 1     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-28 03:41:43.0 | 100    |
| 2     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-26 10:46:48.0 | 100    |
| 3     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-26 09:14:33.0 | 100    |
| 4     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-26 23:31:38.0 | 100    |
| 5     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-25 20:48:02.0 | 100    |
| 6     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-26 05:59:44.0 | 100    |
| 7     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-29 01:22:08.0 | 100    |
| 8     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-27 07:01:01.0 | 100    |
| 9     | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-07-10 22:35:18.0 | 100    |
| 10    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-07-10 22:20:09.0 | 100    |
| 11    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-29 01:08:32.0 | 100    |
| 12    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-07-10 21:44:56.0 | 100    |
| 13    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-07-10 21:57:14.0 | 100    |
| 14    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-25 18:49:45.0 | 100    |
| 15    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-30 01:38:54.0 | 99.2   |
| 16    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-25 20:46:48.0 | 98.9   |
| 17    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-27 04:51:23.0 | 98.4   |
| 18    | 2019-2020-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2114 | 2020-06-29 04:15:32.0 | 97.7   |
| 学期平均分 |             |        |        |           |      |          |                       | 99.68  |

| 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  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-10 13:51:48.0 | 100    |
| 2  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 22:26:38.0 | 100    |
| 3  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-25 14:24:45.0 | 100    |
| 4  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 19:16:03.0 | 100    |
| 5  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-20 19:05:46.0 | 100    |
| 6  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 14:34:05.0 | 100    |
| 7  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-10 21:43:18.0 | 100    |
| 8  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-10 11:04:13.0 | 100    |
| 9  | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-11 16:39:03.0 | 100    |
| 10 | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-10 21:32:52.0 | 100    |
| 11 | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 20:04:33.0 | 100    |
| 12 | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-25 14:20:02.0 | 100    |
| 13 | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-12 18:18:06.0 | 100    |
| 14 | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 21:26:43.0 | 100    |



| 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 |
|-------|-------------|--------|--------|-----------|------|----------|-----------------------|--------|
| 15    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-10 21:38:53.0 | 100    |
| 16    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-10 14:08:42.0 | 100    |
| 17    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 19:14:21.0 | 100    |
| 18    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-10 21:25:15.0 | 100    |
| 19    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-10 14:02:42.0 | 100    |
| 20    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-10 21:34:59.0 | 100    |
| 21    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 19:14:47.0 | 99.7   |
| 22    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 21:54:14.0 | 99.6   |
| 23    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-11 18:43:39.0 | 99.2   |
| 24    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-13 13:37:29.0 | 99     |
| 25    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 19:10:19.0 | 98.5   |
| 26    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 22:45:45.0 | 98.1   |
| 27    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 20:45:33.0 | 97.5   |
| 28    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2012 | 2019-06-11 16:21:59.0 | 96.8   |
| 29    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 20:36:28.0 | 96     |
| 30    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-23 18:59:18.0 | 95.4   |
| 31    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-25 22:23:12.0 | 92.6   |
| 32    | 2018-2019-2 | 材料工程学院 | 塑性成形原理 | 201307006 | 王琛   | 材料成型2011 | 2019-06-13 12:37:34.0 | 91.9   |
| 学期平均分 |             |        |        |           |      |          |                       | 98.88  |

教学质量监控与评价处  
2021年5月8日



# 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

2019 -2020 学年第二学期

|               |                                                              |                                                                                                    |                          |      |      |        |
|---------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------|------|--------|
| 任课教师          | 王琛                                                           | 类别： <input checked="" type="checkbox"/> 专<br><input type="checkbox"/> 兼 <input type="checkbox"/> 聘 | 职称                       | 副教授  | 开课单位 | 材料工程学院 |
| 课程名称          | 塑性成形原理                                                       |                                                                                                    |                          |      |      |        |
| 授课题目          | 2.2 应力莫尔圆                                                    |                                                                                                    |                          |      |      |        |
| 授课时间          | 2020年3月16日 星期二 第三小节                                          |                                                                                                    |                          | 授课地点 | 线上   |        |
| 授课班级          | 材料成型 2114                                                    |                                                                                                    | 应到学生：35 实到学生：35 到课率：100% |      |      |        |
| 一级指标          | 二级指标                                                         |                                                                                                    |                          | 分值   | 得分   |        |
| 教学态度<br>(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    | 3    |        |
|               | 5.遵守教学规章制度，按时上下课。                                            |                                                                                                    |                          | 3    | 3    |        |
| 教学内容<br>(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<br>(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<br>(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  | 99   |        |

## 听课记录

(一) 预习反馈(雨课堂): 回答: 1、什么是平面应力状态? 2、平面应力状态有哪些特点? 3、能否写出平面应力状态的应力张量? 4、什么是应力莫尔圆?

### 本节内容

重点: 平面应力状态下的应力莫尔圆(掌握) 三向应力状态下的应力莫尔圆(掌握)

补充: 平面应变状态下的应力莫尔圆(了解) 纯切应力莫尔圆与应力偏张量莫尔圆(了解)

### 2.2.10 应力莫尔圆

#### (一) 概念

应力莫尔圆是点应力状态的几何表示法, 表示复杂应力状态下物体中一点各截面上应力分量之间关系的平面图形。

思考: 1、应力莫尔圆怎么应用? 2、应力莫尔圆上的点和实际物理平面有怎样的关系?

#### (二) 绘制应力莫尔圆(平面应力状态下应力莫尔圆为例)

雨课堂随机抽学生, 与学生配合, 绘制莫尔圆

应力莫尔圆性质: 1、应力莫尔圆圆周上每一点代表了一个物理平面上的正应力、切应力。  
2、若莫尔圆上的两个点组成的圆心角为  $2\alpha$ , 则单元体上相应的两个截面外法线的夹角为  $\alpha$ , 且角度的转向相同。

#### (三) 三向应力状态下的应力莫尔圆

1、与平面应力莫尔圆有什么联系? 2、如何叠加? 3、有何注意事项?

教师与学生一起总结

思考题: 本讲另外三种莫尔圆又有什么特点呢?

## 总体评价

该教师采用科学合理的教学方法, 课程教学内容深入浅出, 信息量大, 通过引导学生提炼信息提出问题并解决问题。讲课过程中引入案例, 有利于应用型和创新性人才的培养。教学课件制作新颖, 教案书写认真, 体现出该教师教学态度端正。课堂中以学生为中心, 启发学生进行思考, 开展讨论, 善于调动学生的主观能动性, 教学效果良好。

## 问题与建议

对于一些高阶性、有难度的问题, 建议给学生留足思考时间。

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

二级学院督导

听课人单位: 材料工程学院 教研室: 材料加工 听课人(签字):

马学

# 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

2019 -2020 学年第二学期

|               |                                                              |                                                                            |    |      |      |        |
|---------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----|------|------|--------|
| 任课教师          | 王琛                                                           | 类别：<br><input checked="" type="checkbox"/> 专<br><input type="checkbox"/> 兼 | 职称 | 副教授  | 开课单位 | 材料工程学院 |
| 课程名称          | 塑性成形原理                                                       |                                                                            |    |      |      |        |
| 授课题目          | 4.2 镦粗变形                                                     |                                                                            |    |      |      |        |
| 授课时间          | 2020年4月26日 星期二 第三小节                                          |                                                                            |    | 授课地点 | 线上   |        |
| 授课班级          | 材料成型2114                                                     | 应到学生：35 实到学生：35 到课率：100%                                                   |    |      |      |        |
| 一级指标          | 二级指标                                                         |                                                                            |    |      | 分值   | 得分     |
| 教学态度<br>(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    | 3      |
|               | 5.遵守教学规章制度，按时上下课。                                            |                                                                            |    |      | 3    | 3      |
| 教学内容<br>(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   | 9      |
|               | 3.内容娴熟，能脱稿讲解。                                                |                                                                            |    |      | 10   | 10     |
| 教学方法<br>(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<br>(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   | 10     |
| 总分            |                                                              |                                                                            |    |      | 100  | 99     |

## 听课记录

复习（雨课堂）：简述用主应力法求解塑性变形问题的过程。（学生通过雨课堂发送答案，教师点评）

本讲重难点简介：变形特点、接触表面切应力分布规律（能力提升）、解题步骤（重点）

### 4.2 镦粗变形

#### 一、变形特点

1、播放镦粗变形视频和图片，学生思考：金属材料在镦粗的过程中为什么会出现鼓形？利用雨课堂随机点名，让学生回答问题，并引导学生总结镦粗变形的特点。

总结：1) 接触面上存在摩擦；2) 变形不均匀，出现鼓形，存在三个变形区（难变形区、大变形区、小变形区）；3) 侧表面产生附加拉应力。

2、学生思考：实际生产中，如何消除鼓形呢？除了出现鼓形，还会出现哪些缺陷呢？如何预防呢？

3、雨课堂发送题目，学生思考：结合4.1节的知识点，回答镦粗变形中，在整个接触面上应力的大小是否相等？与哪些因素有关呢？

引入本节课第二个重点内容。

#### 二、接触表面切应力分布规律

教师与学生配合，结合图片分析

总结：1) 滑动区：指数分布；2) 制动区：线性分布；3) 停滞区：抛物线状分布。

影响因素：摩擦力、高径比。

#### 三、圆柱体镦粗变形问题求解

思考：1、与4.1节求解平面应变镦粗型变形力有怎样的区别和联系？

2、求解过程中难点在哪？

总结具体的解题步骤及注意事项，有意识锻炼学生逻辑思维能力及严谨科学的学习态度。

#### 四、本章小结及作业布置

### 总体评价

该教师教学态度端正，备课认真充分，教学资料齐全，能够遵守教学规章制度，按时上下课；教学课件制作用心，图片清晰，有设计性；授课内容娴熟，思路清晰，能突出重点难点，信息量较大，能够结合课程特点，发挥课程育人价值；教学方法比较新颖，注重与学生互动，课堂气氛活跃，调动了学生的学习兴趣；通过雨课堂加入思考题和练习题，有意识地训练学生问题解决能力和审辩式思维能力。

### 问题与建议

由于疫情所致，教师板书书写受限，建议学生自行总结，并拍照给教师审阅；疫情期间，加强对学生的作业和笔记检查和管理。

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：材料工程学院 教研室：                     听课人（签字）：于加丽

## 学校政治审查意见

“塑性成形原理”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，价值取向正确，拥护国家政治制度及党的理论、路线，思想导向正确。

该课程负责人及团队成员遵纪守法、无违法违纪记录，不存在师德师风、学术不端等问题，五年内未出现过重大教学事故。

中国共产党西安航空学院党委

2021年5月15日



## 学校教学工作委员会对课程的评价意见

“塑性成形原理”课程遵循学校办学定位和人才培养理念，在基于工程教育认证的材料成型及控制工程专业人才培养方案中对学生培养目标的定位准确，对标多个指标点，在本专业学生培养的课程体系中占有重要地位。对本专业学生创新思维与工程实践能力的培养起主要支撑作用，契合学生解决复杂问题等综合能力养成的要求。

“塑性成形原理”课程是体现材料成型及控制工程专业应用型人才培养的一门重要课程。课程团队教师秉持学生中心、产出导向、持续改进的理念，围绕目标达成、教学内容、组织实施等需求，开展课程建设和教学等工作，在专业课程教学方面达到协同育人成效。课程整体上符合线下一流课程的建设标准。同意推荐“塑性成形原理”课程参评线下一流课程。

西安航空学院教学工作委员会

2021年5月15日

委员签字：

The image shows two handwritten signatures in black ink. The first signature is a stylized cursive script, and the second is a more legible cursive script. The text '委员签字:' is printed to the left of the signatures.