

普通高等教育“十二五”规划教材

金属塑性 成形原理

第2版

李尧 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

金属塑性成形原理

第2版

主 编 李 尧

副主编 张利君

参 编 章争荣 廖秋慧 杨俊杰

主 审 胡礼木



机械工业出版社

本书对金属塑性成形的基本原理和共性问题作了系统论述。全书共分六章, 主要内容包括金属塑性变形的力学基础、塑性成形时金属的流动和成形规律; 介绍了塑性成型的主要求解方法, 即主应力法和滑移线法; 对变形功法、上限法、塑性材料力学法、有限元法和塑性成形过程的物理模拟也作了简要介绍。为了便于学生复习、自学和加深对本书内容的理解, 书中列举了大量例题。同时, 每章末附有思考题并在书后附有部分思考题答案。

本书可作为材料成形及控制工程专业的本科及专科教材, 也可作为相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属塑性成形原理/李尧主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2013. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-40282-4

I. ①金… II. ①李… III. ①金属压力加工—塑性变形—高等学校—教材
IV. ①TG301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 261125 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 冯春生 责任编辑: 冯春生 韩 冰

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈 越

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2013 年 2 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.5 印张 · 329 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-40282-4

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社 服 务 中 心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

普通高等教育“十二五”规划教材 编审委员会

主任委员 李荣德 沈阳工业大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

方洪渊 哈尔滨工业大学

朱世根 东华大学

邢建东 西安交通大学

李永堂 太原科技大学

聂绍珉 燕山大学

王智平 兰州理工大学

许并社 太原理工大学

李大勇 哈尔滨理工大学

周 荣 昆明理工大学

葛继平 大连交通大学

委员 (按姓氏笔画排序)

丁雨田 兰州理工大学

王卫卫 哈尔滨工业大学 (威海)

邓子玉 沈阳理工大学

刘金合 西北工业大学

毕大森 天津理工大学

闫久春 哈尔滨工业大学

张建勋 西安交通大学

李 桓 天津大学

李亚江 山东大学

周文龙 大连理工大学

侯英玮 大连交通大学

赵 军 燕山大学

黄 放 贵州大学

薛克敏 合肥工业大学

文九巴 河南科技大学

计伟志 上海工程技术大学

刘永长 天津大学

华 林 武汉理工大学

许映秋 东南大学

何国球 同济大学

李 尧 江汉大学

李 强 福州大学

邹家生 江苏科技大学

武晓雷 中国科学院

姜启川 吉林大学

梁 伟 太原理工大学

蒋百灵 西安理工大学

戴 虹 西南交通大学

秘书长 袁晓光 沈阳工业大学

秘书 冯春生 机械工业出版社

应用型本科材料成形及控制工程专业 教材编委会

主任委员 葛继平 大连交通大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王卫卫 哈尔滨工业大学 (威海)

王高潮 南昌航空大学

邓子玉 沈阳理工大学

毕大森 天津理工大学

李 尧 江汉大学

委 员 (按姓氏笔画排序)

马 超 天津大学仁爱学院

王章忠 南京工程学院

邓 明 重庆理工大学

付建军 北华航天工业学院

冯小明 陕西理工学院

史立新 南京农业大学

刘厚才 湖南科技大学

毕凤阳 黑龙江工程学院

张 旭 湖南工程学院

张厚安 厦门理工学院

张德勤 九江学院

李慕勤 佳木斯大学

范有发 福建工程学院

胡成武 湖南工业大学

徐纪平 上海工程技术大学

曾大新 湖北汽车工业学院

秘 书 长 侯英玮 大连交通大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

前 言

本书是高等学校材料成形及控制工程专业使用的《金属塑性成形原理》的修订本。原书经过几年的使用,许多读者提出了一些修改意见。2011年10月在福州工程学院召开的中国机械工业教育协会应用型本科材料成形及控制学科教学分委员会暨教材编委会上,有专家对本书提出了修订意见,因此,编写组又对本书大纲进行了讨论并做了进一步修改。编写者仍然力求体现本书的以下特点:①以金属塑性行为和塑性成形力学为基础,强调基本概念和基本理论;②遵照循序渐进、突出重点的原则,着重阐述基础理论,尽可能联系实际问题,因此例题较多;③兼顾理论知识的系统性和学科间的内在联系,删去了与先修课程的重复部分,如注意与先修课程“金属学”、“金属热处理”的合理衔接,避免不必要的重复,删去了晶体结构、位错理论的基本概念及回复和再结晶等内容;④本课程考虑到数学模型较多,需要建立的概念也多,初学者往往感到难度较大,因此,为了加深对基本概念的理解,在原有的基础上又增加了例题和思考题;⑤增加了关于三向应力莫尔圆中三向切应力方向确定的最新研究成果。本书可作为材料成形及控制工程、机械工程及自动化专业的本科及专科教材,也可供有关科技人员参考。

“金属塑性成形原理”是材料成形及控制工程专业的技术基础课。全书共分六章,第一章为绪论,简要介绍金属塑性成形原理的特点及分类、金属塑性成形理论的发展概况及学习本课程的目的和任务;第二章主要论述金属塑性变形时的力学基础理论,包括应力状态、应变状态、屈服准则、平衡微分方程、本构关系等,并将应力、应变及屈服准则之间的内在关系联系在一起作了系统的、深入浅出的介绍;第三章论述金属的塑性及超塑性、加工硬化、影响金属塑性变形的因素及塑性变形对金属组织和性能的影响,讨论塑性成形时金属变形与流动的有关问题,包括最小阻力定律、变形不均匀性及影响因素、附加应力、残余应力、金属的断裂、塑性成形件中的折皱及塑性成形中的摩擦与润滑;第四章对塑性成形基本工序进行力学分析,并利用主应力法进行求解;第五章介绍滑移线场理论的理论基础和实际解法;第六章简要介绍塑性成形问题的其他解法,如变形功法、上限法、材料力学法和有限元法。当学时较少时,可考虑删去第六章内容。

本书由江汉大学李尧任主编,湖南工程学院张利君任副主编,陕西理工学院胡礼木任主审。编写工作分配如下:江汉大学李尧编写绪论、第二章的第一节至第三节,湖南工程学院张利君编写第二章的第四节至第六节以及第六章,江汉大学杨俊杰编写



第三章，上海工程技术大学廖秋慧编写第四章，广东工业大学章争荣编写第五章。

本书在编写过程中得到了兄弟院校的支持和帮助，对教材的修订提出了许多宝贵意见，在此谨表示深深的谢意。

由于编写水平所限，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 绪论 1

一、金属塑性成形的特点及分类 1

二、金属塑性成形理论的发展概况 5

三、本课程的任务 6

思考题 6

第二章 金属塑性变形的力学基础 7

第一节 金属塑性成形过程的受力
分析 7

第二节 变形体内一点的应力状态
分析 9

一、应力分析的截面法 9

二、三维坐标系的应力分量和应力
张量 10

三、任意斜面上的应力 11

四、主应力和应力不变量 13

五、主切应力和最大切应力 16

六、应力球张量和应力偏张量 18

七、八面体应力和等效应力 21

八、应力平衡微分方程 22

九、平面应力状态和轴对称应力状态 24

十、应力莫尔圆 27

第三节 变形体内质点的应变状态
分析 32

一、质点的应变状态 32

二、位移分量和应变分量的关系——
小变形几何方程 39

三、应变连续方程 42

四、应变增量和应变速率张量 43

五、塑性变形程度的表达式 46

六、塑性变形体积不变条件 47

七、平面变形和轴对称变形 49

第四节 屈服准则 50

一、屈雷斯加 (H. Tresca) 屈服
准则 50

二、密席斯 (Von Mises) 屈服
准则 52

三、屈服准则的几何表达——屈服表面
和屈服轨迹 54

四、中间主应力的影响——屈服准则的
简化表达式 58

五、硬化材料的屈服准则简介 59

第五节 塑性变形的应力应变关系 61

一、弹性应力应变关系 61

二、塑性应力应变关系的特点 63

三、塑性变形的增量理论 65

四、塑性变形的全量理论 69

第六节 金属材料的实际应力-应变
曲线 72

一、拉伸试验曲线 73

二、压缩试验曲线 75

三、实际应力-应变曲线的简化形式 76

四、包申格效应 78

思考题 78

第三章 塑性成形中金属变形与流动的相关问题 81

第一节 最小阻力定律 81

第二节 影响金属塑性、塑性变形和
流动的因素 82

一、塑性、塑性指标和塑性图 82

二、变形条件对金属塑性的影响 84

三、其他因素对塑性的影响 87

四、提高金属塑性的途径 90

五、摩擦对金属塑性变形和流动的



影响.....	91	第一节 主应力法的基本原理	122
六、工具形状对金属塑性变形和流动的		第二节 镦粗变形	125
影响.....	92	一、镦粗变形的特点	125
七、金属各部分之间的关系对塑性变形		二、圆柱体镦粗变形力计算	126
和流动的影响.....	92	三、镦粗时的变形功	132
八、金属本身性质不均匀对塑性变形和		第三节 开式模锻变形特点及变形力	
流动的影响.....	93	计算	135
第三节 金属的超塑性.....	94	一、开式模锻的变形特点	135
一、超塑性的分类.....	94	二、开式模锻变形力的计算	135
二、结构超塑性的力学特性.....	94	第四节 板料弯曲工序分析及变形	
三、影响超塑性的主要因素.....	95	区的应力应变分布	140
四、超塑性的变形机制.....	96	一、线性弹塑性弯曲	140
五、超塑性的应用.....	96	二、三维塑性弯曲时的应力应变	
第四节 加工硬化.....	98	状态	141
一、加工硬化现象和机理.....	98	三、宽板弯曲时的应力分布	142
二、加工硬化的后果及应用.....	99	四、板料塑性弯曲时中性层的内移	145
第五节 不均匀变形、附加应力和残余		第五节 圆筒件拉深分析和变形区	
应力.....	99	的应力应变分布	146
一、均匀变形与不均匀变形.....	99	一、拉深变形过程和变形特点	147
二、附加应力	100	二、拉深过程的应力应变状态	147
三、残余应力	102	三、凸缘变形区的应力应变分析	148
第六节 金属的断裂	104	四、拉深力的计算	152
一、断裂的物理本质	104	五、拉深变形过程中的起皱与拉裂	153
二、塑性加工中金属的断裂	106	第六节 挤压变形分析及单位挤压力的	
第七节 塑性成形件中的折叠	108	计算	153
一、折叠的特征	109	一、挤压时金属的变形特点	154
二、折叠的类型及其形成原因	109	二、挤压变形力的计算	155
第八节 金属塑性成形中的摩擦和		思考题	160
润滑	111	第五章 塑性成形问题的滑移线	
一、塑性成形时摩擦的分类和机理	111	解法	162
二、塑性成形时摩擦的特点及其影响	112	第一节 滑移线的基本概念	162
三、塑性成形时接触表面摩擦力的		一、平面变形应力状态的特点	162
计算	113	二、最大切应力轨迹线——滑移线的	
四、影响摩擦系数的因素	114	形成	163
五、塑性加工中摩擦系数的测定方法	115	三、 α 、 β 滑移线和 ω 角的规定.....	164
六、塑性成形时的润滑	117	四、滑移线的微分方程	165
七、不同塑性加工条件下的摩擦系数	120	第二节 滑移线场的应力方程(汉基应力	
思考题	121	方程).....	165
第四章 金属塑性成形基本工序的力学		第三节 滑移线的基本特性	166
分析及主应力法	122	一、沿线特性	166



二、跨线性质（汉基第一定理）	167	第二节 上限法	201
第四节 应力边界条件	168	一、上限法的基本概念	201
第五节 滑移线场的建立方法	170	二、平面变形问题的上限原理	201
一、常见的滑移线场	170	三、上限法在平面变形问题中的 应用	202
二、数值积分法	172	第三节 塑性材料力学法	205
三、近似图解法	176	一、求解原理	205
第六节 用滑移线法求解塑性成形 问题	177	二、计算举例	206
一、冲头压入半无限体	178	第四节 刚塑性有限元法	208
二、平砧压缩高坯料	183	一、概述	208
三、粗糙平板间压缩长坯料	187	二、刚塑性有限元法在塑性成形 中的应用	210
四、平面变形挤压	189	第五节 塑性成形过程的物理模拟 简介	213
五、圆筒件拉深	194	思考题	214
六、盒形件合理坯料的确定	195	部分思考题答案	216
思考题	196	参考文献	221
第六章 塑性成形问题的其他解法	199		
第一节 变形功法	199		
一、变形功法的基本原理	199		
二、计算举例	200		

第一章 绪 论

金属塑性成形是金属加工的方法之一，它是在外力作用下使金属产生塑性变形，从而将工件加工成所需形状和尺寸的加工方法。所以，也把塑性成形称为塑性加工或压力加工。

一、金属塑性成形的特点及分类

1. 特点

与金属切削加工、铸造、焊接等加工方法相比，金属塑性加工主要有以下特点：

(1) 组织、性能得到改善和提高 金属材料经过相应的塑性加工后，其内部组织发生显著变化。例如，由炼钢铸出的钢锭，其内部组织疏松多孔，晶粒粗大且不均匀，偏析也比较严重，必须经过锻造、轧制或挤压等塑性加工，才能使其结构致密、组织改善、性能提高。因此，90%以上的铸钢锭都要经过塑性加工制成钢坯或钢材。此外，经过塑性成形后，金属的流线分布合理，从而也改善了制件的性能。

(2) 材料利用率高 金属塑性成形主要是靠金属在塑性状态下的体积转移来实现的，不产生切屑，因而材料利用率高，可以节约大量的金属材料。

(3) 生产效率高，适于大批量生产 这一点在金属的轧制、拉丝和挤压等工艺中尤为明显。在冲压工艺中，随着生产机械化与自动化程度的提高，生产率也相应得到提高。例如，高速压力机的行程次数已达 1500 ~ 1800 次/min；在双动拉深压力机上成形一个汽车覆盖件仅需几秒钟；在 12000 × 10kN 热模锻压力机上锻造一根汽车发动机的六拐曲轴仅需 40s；在弧形板行星搓丝机上加工一个 M5 螺钉，生产率高达 12000 件/min。

(4) 尺寸精度高 不少成形方法已达到少、无切削的要求。例如，精密模锻的锥齿轮，其齿形部分可不经切削加工而直接使用；精锻叶片的复杂曲面可达到只需磨削的精度；旋压液压缸的表面粗糙度 Ra 值达 0.40 ~ 0.20 μm ，可以直接使用。

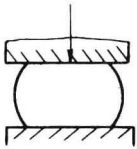
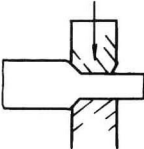
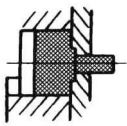
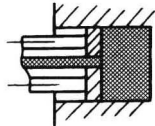
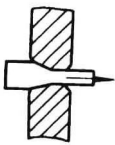
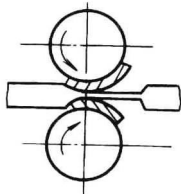
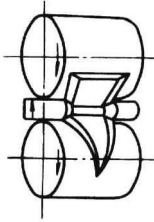
由于金属塑性加工具有上述特点，因而在冶金、有色金属加工、汽车、拖拉机、宇航、船舶、军工、仪器仪表、电器和日用五金等工业部门中得到了广泛应用，在国民经济中也占有重要的地位。

2. 分类

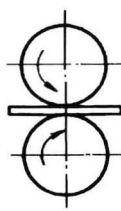
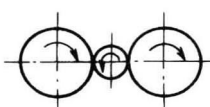
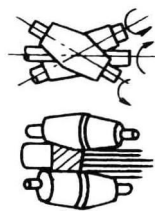
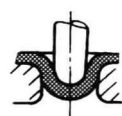
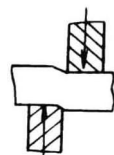
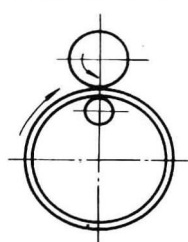
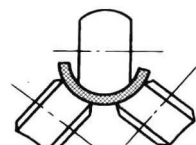
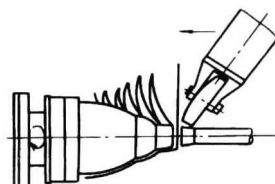
金属塑性成形方法的种类有很多，其分类方法目前还不统一。按照成形的特点不同，一般把塑性加工分为轧制、拉拔、挤压、锻造和冲压五大类。每类又包括多种加工方法，形成各自的工艺领域。在轧制、拉拔和挤压的成形过程中，变形区是不变的，属于稳定的塑性流动过程，适于连续的大批量生产，可提供型材、板材、管材和线材等金属原材料，



表 1-1 金属塑性加工按工件的

基本加工			
基本受力方式	压		
分类与名称	锻 造		
	自 由 锻 造		模 锻
	镦 粗	拔 长	
图 例			
基本加工			
基本受力方式	压 力		拉
分类与名称	挤 压		拉 拔
	正 挤 压	反 挤 压	
图 例			
组 合 加 工			
组合方式	锻造-纵轧		锻造-横轧
名 称	辊 锻		楔 横 轧
图 例			

受力和变形方式分类

变 形 方 式			
力			
轧 制			
纵 轧	横 轧	斜 轧	
			
变 形 方 式			
力		弯 矩	剪 切 力
冲压（拉深）	拉 形	弯 曲	剪 切
			
变 形 方 式			
锻造（扩孔）-横轧		轧制-弯曲	冲压（拉深）-轧制
辗 压		辊 弯	旋 压
			



属于冶金工业领域；而锻造和冲压成形的变形区随变形过程而变化，属于非稳定的塑性流动过程，适于间歇生产，用于提供机器零件或坯料，属于机械制造工业领域。锻造属于体积成形，而冲压属于板料成形，故也称为板料冲压。

按照成形时工件的受力和变形方式进行分类，分类方法见表1-1。这种分类方法把金属塑性成形分为基本加工变形方式和组合加工变形方式。

靠压力作用使金属产生变形的方式有轧制、锻造和挤压。

(1) 轧制 轧制是坯料通过旋转的轧辊受到压缩，使其横截面减小、形状改变、长度增加。轧制可分为纵轧、横轧和斜轧。纵轧时，两工作轧辊旋转方向相反，轧件的纵轴线与轧辊轴线垂直；横轧时，两工作轧辊旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线平行；斜轧时，两工作轧辊旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线成一定的倾斜角。用轧制方法可生产板材、带材、型材、管材以及周期断面型材、变断面轴及钢球等。

(2) 锻造 锻造通常分为自由锻和模锻。自由锻一般是在锻锤或水压机上，利用简单的工具将金属锭或块料锻成所需形状和尺寸的加工方法。自由锻时不使用专用模具，因而锻件的尺寸精度低，生产率也不高，主要用于单件小批量生产、大锻件生产或冶金厂的开坯。模锻是在模锻锤或热模锻压力机上利用模具来成形。由于金属的成形受模具控制，因此模锻件具有相当精确的外形和尺寸，也有相当高的生产率，适合于大批量生产。

(3) 挤压 挤压是将坯料放入挤压机的挤压筒中，在挤压杆的压力作用下，使金属从一定形状和尺寸的模孔中流出。挤压包括正挤压和反挤压。正挤压时挤压杆的运动方向与从模孔挤出的金属的流动方向一致；反挤压时挤压杆的运动方向与从模孔中挤出的金属的流动方向相反。用挤压法可生产各种断面的型材、管材以及机器零件。

主要靠拉力作用使金属产生变形的方式有拉拔、冲压（拉深等成形工序）和拉形。

(1) 拉拔 拉拔是用拉拔机的夹钳把金属坯料从一定形状和尺寸的模孔中拉出，从而获得各种断面的型材、线材和管材。

(2) 冲压（拉深等） 拉深等成形工序是在曲柄压力机或油压机上用凸模把板料拉进凹模中成形，用以生产各种薄壁空心零件，如各种空间曲面零件及覆盖件等。

(3) 拉形 拉形是板料两端在拉力作用下沿一定形状的凸模贴模成形，如飞机蒙皮等大型曲面零件。带材的拉力校直也属于这种方式。

主要靠弯矩和剪切力作用使金属产生变形的方式有弯曲和剪切。

(1) 弯曲 弯曲是坯料在弯矩的作用下成形，如板料在模具中的弯曲成形、板带材的折弯成形、钢材的校直等。

(2) 剪切 坯料在剪切力作用下进行剪切变形，如板料在模具中的冲孔、落料、切边、板材和钢材的剪切等。

随着生产技术的发展，上述基本加工变形方式互相渗透，进而产生新的组合加工变形方式。例如，锻造和纵轧组合的辊锻工艺，可生产各种变断面零件（如连杆等）；锻造和横轧组合的楔横轧工艺，可生产各种阶梯轴和锥形轴；锻造扩孔和横轧组合的辗环工艺，可生产各种环形件（如轴承环、火车轮箍、齿轮坯等）；冲压和轧制组合的旋压工艺，可生产各种薄壁空心回转体零件；弯曲和轧制组合的辊弯工艺，可生产各种断面的冷弯型材



及焊管等。

综上所述,各种加工变形方式的互相渗透和适当组合,可开发出高效率的新的塑性成形工艺方法。此外,随着技术的发展,也不断形成新的塑性加工方法,如连铸连轧、液态模锻、等温锻造和超塑性成形等。所有这些都进一步扩大了塑性成形的应用范围。

塑性加工按成形时工件的温度不同还可以分为热成形、冷成形和温成形三类。热成形是在充分进行再结晶的温度以上所完成的加工,如热轧、热锻、热挤压等;冷成形是在不产生回复和再结晶的温度以下进行的加工,如冷轧、冷冲压、冷挤压、冷锻等;温成形是在介于冷热成形之间的温度下进行的加工,如温锻、温挤压等。

二、金属塑性成形理论的发展概况

金属塑性加工是具有悠久历史的加工方法,早在两千多年前的青铜器时期,我国劳动人民就已经发现铜具有塑性变形的性能,并掌握了锤击金属以制造兵器和技术。随着近代科学技术的发展,已经赋予塑性加工技术以崭新的内容和含义。但是,作为这门技术的理论基础——金属塑性成形原理则发展得较晚,直到20世纪40年代才逐步形成独立的学科。

金属塑性成形理论是在塑性变形的物理、物理化学和力学基础上发展起来的一门工程应用技术理论。金属塑性变形的物理和物理化学基础属于金属学范畴。自从20世纪30年代位错概念提出以来,人们对塑性变形的微观机理有了科学的解释;对于金属的塑性——金属产生塑性变形而不破坏其完整性的能力,人们也有了更深刻的认识。塑性作为金属的状态属性,不仅取决于金属材料本身(如晶格类型、化学成分和组织结构等),还取决于变形的条件,金属在合适的温度、速度条件和力学状态下,可以获得很高的塑性。

金属塑性成形原理的另一重要方面是塑性成形力学,它是在塑性理论(或称为塑性力学)的发展和应用中逐渐形成的。塑性理论的发展历史可追溯到1864年,由法国工程师屈雷斯加(H. Tresca)首次提出最大切应力屈服准则,距今已有一百多年的历史。最早将塑性理论用于金属塑性加工的是德国学者卡尔曼(Von Karman),他在1925年用初等方法建立了轧制时的应力分布规律。此后不久,萨克斯(G. Sachs)和齐别尔(E. Siebel)在研究拉拔时提出了相似的求解方法——切块法,即后来所称的主应力法。此后,人们对塑性成形过程的应力、应变和变形力的求解逐步建立了许多理论求解方法,如滑移线法、工程算法、变分法和变形功法、上限法、有限元法等。同时,还建立了理论解析与实验相结合的方法,如塑性变形材料力学法和直观塑性法(又称为视塑性法)。

在国内,许多学者在塑性成形理论及力学方面也做了不少的研究工作。王仲仁教授从便于工程应用的角度出发,吸取了增量理论的共同点,于1979年提出了“应力应变顺序对应规律”理论,这一理论将应力状态、应变状态、屈服准则三者之间的内在关系联系在一起,它根据应力、应变的变化可定性地判断出工件各部分尺寸的变化趋向,同时还给出了在平面应力状态及三向应力状态下屈服图形上的应力分区。王仲仁还应用塑性成形理论发明了“无膜胀球工艺”,这是一种变形效率较高的成形方式。在塑性成形问题的力学分析方法(如滑移线法、上限法、有限元法等)的理论研究及应用方面,王仲仁及顾震



隆提出了一种用莫尔圆求证 Hencky 方程的方法；朱吉君将滑移线理论用于计算三辊仿形斜轧变形力问题；李双义利用基元矩形技术对平面应变正挤、反挤的优化上限解进行了简便有效的分析；王祖唐等利用有限元法分析了静液挤压的应力应变场。这些研究成果进一步推动了金属塑性成形理论的发展。

金属塑性成形理论是一门年轻的学科，在生产中存在的大量问题还有待于进一步认识、研究、总结，新的成形方法也有待于进一步开发。作为塑性成形理论本身也需要进一步发展和完善。例如，微观塑性理论和宏观塑性理论至今还没有很好地结合和统一起来；塑性变形的基本方程——本构方程（即塑性应力应变方程）也需要进一步完善。

三、本课程的任务

金属塑性成形方法多种多样，具有各自的特点，但它们有着共同的基础和规律。金属塑性成形原理课程的目的就在于科学地、系统地阐明这些基础和规律，为合理制订塑性成形工艺奠定理论基础。因此，学习本课程的任务是：

1) 掌握金属塑性变形的物理学基础，了解金属的塑性变形行为以及变形条件对其塑性和变形抗力的影响，以便使工件在成形时获得最佳的塑性状态、最高的变形效率和优质的性能。阐述塑性成形时的金属流动规律和变形特点，分析影响金属塑性流动的各种因素，以便合理地确定坯料尺寸和成形工序，使工件顺利成形。

2) 掌握金属塑性变形的力学基础，即掌握应力、应变、应力应变关系和屈服准则等塑性理论基础知识，以便对变形过程进行应力应变分析，并寻找塑性变形物体的应力应变分布规律。

3) 掌握金属塑性成形力学问题的各种解法及其在具体工艺中的应用，以便确定变形体中的应力应变分布规律及所需的变形力和变形功，为选择成形设备和设计模具提供依据。

金属塑性成形原理是一门专业理论课，在学习本课程时，要建立起准确的物理概念，掌握塑性变形的基本规律，注意理论联系实际，提高分析和解决塑性成形实际问题的能力。

思考题

- 1-1 什么是金属的塑性？什么是塑性成形？与金属切削相比，塑性成形有何特点？
- 1-2 塑性成形如何分类？
- 1-3 本课程的任务是什么？

第二章 金属塑性变形的力学基础

金属在外力作用下由弹性状态进入塑性状态。研究金属在塑性状态下的力学行为称为塑性理论或塑性力学，它是连续介质力学的一个分支。为了简化研究过程，塑性理论通常采用以下假设：

- 1) 变形体是连续的，即整个变形体内不存在任何空隙。这样，应力、应变、位移等物理量也都是连续的，并可用坐标的连续函数来表示。
- 2) 变形体是均质的和各向同性的。这样，从变形体上切取的任一微元体都能保持原变形体所具有的物理性质，且不随坐标的改变而变化。
- 3) 在变形的任意瞬间，力的作用是平衡的。
- 4) 在一般情况下，忽略体积力的影响。
- 5) 在变形的任意瞬间，体积不变。

在塑性理论中，分析问题需要从静力学、几何学和物理学等角度来考虑。静力学角度是从变形体中质点的应力分析出发，根据静力学平衡条件导出该点附近各应力分量之间的关系式，即平衡微分方程。几何学角度是根据变形体的连续性和均匀性，用几何的方法导出应变分量与位移分量之间的关系式，即几何方程。物理学角度是根据实验与假设导出应变分量与应力分量之间的关系式，即物理方程或本构方程。此外，还要建立变形体从弹性状态进入塑性状态并使塑性变形继续进行时，其应力分量与材料性能之间的关系，即屈服准则或塑性条件。

以上是塑性变形的力学基础，也是本章的主要内容，它为研究塑性成形力学问题提供基础理论。

第一节 金属塑性成形过程的受力分析

塑性成形是利用金属的塑性，在外力作用下使金属成形的一种加工方法。作用于金属的外力可以分为两类：一类是作用在金属表面上的力，称为面力或接触力，它可以是集中力，但更一般的是分布力；第二类是作用在金属每个质点上的力，称为体积力。

1. 面力

面力可分为作用力、反作用力和摩擦力。

作用力是由塑性加工设备提供的，用于使金属坯料产生塑性变形。在不同的塑性加工工序中，作用力可以是压力、拉力或剪切力，但在多数情况下是用压力来成形的，因此塑性加工又称为压力加工。