



# • 金属塑性 加工力学

彭大暑 编著

中南工业大学出版社

T3301

11

2

# 金属塑性加工力学

彭大暑 编著



中南工业大学出版社



**B** 611196

## 内 容 简 介

本文概述了塑性力学的基本理论, 通过列举各种实例, 详细地阐述了金属塑性加工力学的主要解析方法, 包括工程法、滑移线理论法、上限定及上限定元技术等的基本原理、解析步骤和适用范围。每章附有习题和答案。

本书可供大专院校金属塑性加工与成形、冶金机械等专业的大学生和相近专业的研究生作为教材或教学参考书, 也可供从事这方面研究和生产的工程技术人员参考。

### 金属塑性加工力学

彭大伟 编著

责任编辑: 王树勋

插图责任编辑: 刘晋英

\*

中南工业大学出版社 出版发行

中南工业大学出版社印刷厂印装

湖南省新华书店经销

\*

开本: 787×1092 1/32 印张: 13.5 字数: 315 千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数: 0001-1500

\*

ISBN 7-81020-246-4/0·039

定价: 2.65元

## 前 言

金属塑性加工力学是塑性力学的一个重要分支。它是在塑性力学的基础上,随着金属塑性加工与成形技术的发展而设置的一门新的专业基础理论课程。本书在概述塑性力学基本概念、基本原理的基础上,密切结合金属塑性加工与成形的实际,通过运用锻造、轧制、挤压、拉拔和冲压加工上的典型实例,系统地、深入地介绍了金属塑性加工力学的主要解析方法,包括工程法、滑移线理论法、上限法及上限单元技术等的基本原理、基本方法,解析步骤以及应用情况。在论述上尽力做到概念清楚、条理分明、重点突出、难点分散、循序渐进、讲究实效。在表达上力求文图结合、直观形象、深入浅出、通俗易懂、便于教学和自学。

本书参考了近几年来国内外出版的塑性力学、金属塑性加工原理等方面的专著和有关文献,编著者还根据多年担任金属塑性加工力学教学工作的体会和经验,在体系上作了某些调整、并且在某些问题的阐述上,也反映了编著者本人的看法和见解。

本文可供大专院校金属塑性加工与成形、冶金机械等专业的大学生和相近专业的研究生作为教材或教学参考书,教学课时为80~100学时。也可供从事这方面研究和生产的工程技术人员参考。

本书在编著和出版过程中得到了中南工业大学有关领导的鼓励与支持。本书的审稿人曹乃光教授仔细地审阅了全稿,提出了许多宝贵的意见。胡其平讲师等对本书的编著给予

了多方面的支持，做了许多工作，在此谨向他们表示衷心感谢。

由于编著者的水平有限，经验不足，书中难免有不少错误和疏漏之处，诚恳希望读者批评指正。

编著者

1987年9月于长沙岳麓山

# 目 录

第一章 绪论	( 1 )
§ 1.1 金属塑性加工及其在国民经济中的作用	( 1 )
§ 1.2 金属塑性加工力学的研究内容	( 4 )
§ 1.3 金属塑性加工力学的发展简史	( 5 )
第二章 应力分析	( 7 )
§ 2.1 金属塑性加工时工作所受的外力	( 7 )
§ 2.2 内力与应力	( 9 )
§ 2.3 一点的应力状态	( 14 )
§ 2.4 应力的坐标变换	( 18 )
§ 2.5 主应力和应力不变量	( 20 )
§ 2.6 主切应力和最大切应力	( 26 )
§ 2.7 八面体应力和等效应力	( 29 )
§ 2.8 应力张量的分解	( 32 )
§ 2.9 应力状态的几何表示	( 35 )
一、主应力空间和 $\pi$ 平面	( 35 )
二、 $\theta_0$ 角的确定和主应力计算公式	( 38 )
§ 2.10 应力平衡微分方程	( 43 )
习题	( 49 )
第三章 应变分析	( 51 )
§ 3.1 应变与位移关系方程 (几何方程)	( 51 )

§ 3.2	位移的刚体转动分量	( 59 )
§ 3.3	一点的应变状态	( 62 )
§ 3.4	应变协调方程	( 67 )
§ 3.5	塑性变形的体积不变条件和变形力学图	( 69 )
§ 3.6	应变速度张量	( 73 )
§ 3.7	应变增量张量	( 74 )
§ 3.8	金属塑性加工中变形程度的计算方法	( 78 )
	习题	( 86 )
<b>第四章</b>	<b>金属塑性变形的物性方程</b>	( 88 )
§ 4.1	金属塑性变形的变形力学特点	( 88 )
§ 4.2	弹性变形的应力应变关系	( 96 )
§ 4.3	金属的屈服准则 (塑性条件方程)	( 100 )
	一、Tresca 屈服准则 (最大切应力定值理论)	( 101 )
	二、Mises 屈服准则 (形状改变能定值理论)	( 105 )
	三、中间主应力对金属屈服的影响	( 107 )
	四、屈服准则的实验验证	( 108 )
	五、应变硬化材料的屈服准则	( 110 )
§ 4.4	塑性变形的应力应变关系 (本构方程)	( 112 )
	一、加载准则和加载条件	( 112 )
	二、塑性变形的增量理论 (流动理论)	( 117 )
	三、塑性变形应力应变关系的实验验证	( 123 )

§ 4.5 等效应力——等效应变关系曲线 (变形抗力曲线) .....	(125)
§ 4.6 “塑性势” .....	(131)
§ 4.7 最大塑性功耗原理 .....	(133)
§ 4.8 平面应变问题和轴对称问题 .....	(136)
习题 .....	(144)
<b>第五章 金属塑性加工变形力的工程法解</b> .....	(147)
§ 5.1 概述 .....	(147)
§ 5.2 接触面上应力分布的实验研究 .....	(150)
§ 5.3 理论法——平衡微分方程和塑性条件联立解析法 .....	(154)
§ 5.4 工程法及基本要点 .....	(162)
§ 5.5 直角坐标平面应变问题 (一) ——混合摩擦下薄件 ( $\frac{W}{h} > 2$ ) 的平锤压缩 .....	(166)
§ 5.6 直角坐标平面应变问题 (二) ——全滑动斜锤间楔形件的均匀压缩 .....	(177)
§ 5.7 极坐标平面应变问题 .....	(182)
一、板材的弯曲成形 .....	(182)
二、杯形件的不变薄拉深 .....	(185)
§ 5.8 圆柱坐标轴对称问题 ——混合摩擦条件下圆盘的均匀墩粗 .....	(188)
§ 5.9 球坐标轴对称问题 (一) ——锥模的圆棒拉拔 .....	(196)
§ 5.10 球坐标轴对称问题 (二)	



——单孔模正挤压圆棒	(201)
习题	(207)
<b>第六章 滑移线理论及其应用</b>	(210)
§ 6.1 概述	(210)
§ 6.2 汉盖应力方程	(216)
§ 6.3 滑移线的几何性质	(219)
一、汉盖第一定理	(220)
二、汉盖第二定理	(222)
§ 6.4 应力边界条件和滑移线场的绘制方法	(226)
一、应力边界条件	(226)
二、滑移线场绘制的数值计算方法	(230)
§ 6.5 格林格尔速度方程和速端图	(240)
一、格林格尔速度方程	(248)
二、速端图	(250)
三、速度不连续线及速度特性	(250)
四、滑移线理论求解的一般步骤	(255)
§ 6.6 三角形均匀场和简单扇形场组合问题	(256)
一、平冲头压入半无限体	(257)
二、光滑模面的平模板条挤压	(263)
§ 6.7 对称双心扇形场问题	(266)
一、厚板( $\frac{w}{h} < 1$ )的平锤压缩	(266)
二、平面应变开式模锻	(276)
三、粘着摩擦的板条挤压	(280)
§ 6.8 不对称双心扇形场问题	(284)
一、板条的平面应变拉拔	(285)

二、厚板坯的平辊轧制.....	(290)
§ 6.9 双心扇形场的扩场问题	
——薄板( $\frac{\omega}{h} > 1$ )的平锤压缩.....	(294)
§ 6.10 极坐标平面应变问题	
——对数螺旋线滑移线场的应用(杯形件的不变薄拉深).....	(302)
习题.....	(305)
第七章 上限定理及其应用.....	(308)
§ 7.1 概述.....	(308)
§ 7.2 虚功原理.....	(311)
§ 7.3 变形体内存在应力间断面和速度间断面的虚功原理.....	(314)
§ 7.4 极值原理——上、下限定理.....	(316)
§ 7.5 Johnson 上限模式.....	(321)
一、平冲头压入半无限体.....	(322)
二、板条的平面应变挤压.....	(324)
三、粗糙辊面间的宽板轧制.....	(330)
§ 7.6 Avitzur 上限模式.....	(333)
一、直角坐标平面应变问题	
——考虑侧鼓的板坯的平锤压缩.....	(335)
二、极坐标平面应变问题	
——宽板的平辊轧制.....	(339)
三、圆柱坐标轴对称问题	
——圆盘的墩粗.....	(345)
四、球坐标轴对称问题	

	——圆棒的拉拔或挤压·····	( 347 )
五、	维变形问题	
	——非轴对称的型材挤压或拉拔·····	( 353 )
§ 7.7	上 元技术 (一)	
	——藤矩形单元技术·····	( 359 )
一、	形单元边界状态的类型与标记·····	( 360 )
二、	形单元的几何类型·····	( 361 )
三、	例·····	( 371 )
伊	平冲头压入半无限体·····	( 371 )
例	薄板的平锤压缩·····	( 373 )
§ 7.8	上 元技术 (二)	
	——工藤-小林次郎圆环单元技术·····	( 374 )
一、	圆环单元的流动模型·····	( 374 )
二、	圆环单元的几何类型·····	( 376 )
三、	实例·····	( 391 )
例	粗糙锤头间圆柱体的锻造·····	( 391 )
例	轴对称平模的挤压·····	( 392 )
§ 7.9	接触表面正压力分布规律的上限法确定·····	( 396 )
§ 7.10	下限法应用实例——光滑楔模板条的平面应变拉拔·····	( 398 )
	习题·····	( 402 )
附录1.	角标记号、求和约定和直角坐标张量初步·····	( 406 )
附录2.	一点的应力状态的主应力及其方向余弦计算程序·····	( 412 )
附录3.	双心扇形滑移线场网点坐标计算程序·····	( 415 )
	习题参考答案·····	( 417 )
	主要参考文献·····	( 420 )

# 第一章 绪 论

## § 1.1 金属塑性加工及其在国民经济中的作用

金属塑性加工是利用金属的塑性，使金属在外力作用下进行塑性成形的一种金属加工技术，常叫金属压力加工。

根据加工时工件的受力和变形方式，基本的塑性加工方法有锻造、轧制、挤压、拉拔、冲压、弯曲和剪切等几种，见表1.1。其中锻造、轧制和挤压依靠压力的作用使金属产生塑性变形；拉拔和冲压依靠拉力的作用使金属产生塑性变形；弯曲依靠弯矩的作用使金属产生弯曲变形；剪切依靠剪力作用产生剪切变形。锻造、轧制和挤压大部分在热态下进行；拉拔、冲压、弯曲和剪切一般在室温下进行。

锻造通常有自由锻和模锻两类。自由锻靠简单的工具使工件锻粗或拔长，加工精度较低，生产率也不高，主要用于单件、小批量的生产如轴类、曲柄和连杆等。模锻利用锻模控制工件的变形，可加工形状与尺寸精度较高的零件，适于大批量生产，生产率也较高。

轧制是使轧件通过两个或两个以上旋转的轧辊间的压缩变形，使其横断面积减小、形状改变、长度增加。有纵轧、横轧和斜轧之分。纵轧时，工作轧辊的旋转方向相反，轧件的纵轴线与轧辊轴线垂直，可生产板材、型材和管材。横轧时，工

表1-1 金属塑性加工按工件的受力和变形方式分类

基本加工形式				
基本受力方式	压力			轧制
分类与名称	锻造		模锻	纵轧
	自由锻造			
图例				
基本加工变形方式				
基本受力方式	压力		挤	压
分类与名称	轧制		正挤压	反挤压
	横轧	斜轧		
图例				
基本加工形式				
基本受力方式	拉力		弯矩	剪力
分类与名称	拉拔	冲压(拉深)	弯	剪
			弯	剪
图例				
组合加工变形方式				
组合方式	锻造—轧制	轧制—弯曲	拉拔—轧制	轧制—剪切
名称	辗 锻	辗 弯	拔 轧	捻 轧
图例				

作轧辊的旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线平行，可生产回转体工件，如变断面轴、丝杆等；斜轧时，工作轧辊的旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线成一定的倾斜角，主要用于管坯生产上。

挤压依靠挤压轴的压力作用，使装入挤压筒中的锭坯，从挤压模孔中流出，获得符合模孔形状与尺寸的制品。有正挤压、反挤压之分。正挤压时，金属的流出方向与挤压轴的运动方向一致；反挤压时，二者的方向是相反的。用挤压法可生产各种断面的型材和管材等。

拉拔是将大截面积的杆坯从一定形状、尺寸较小的模孔中拉出，使其断面积减小、长度增加，可生产各种断面的线材、管材和型材。

冲压靠压力机上的冲头将板料顶入凹模中进行拉延变形，用于生产各种杯形件和壳体。

弯曲成形依靠弯矩的作用，使板料发生弯曲变形或者使板材或杆件得到矫直等。

剪切靠剪力作用使板料冲裁和剪断等。

为了扩大产品的品种规格，提高生产率，随着科学技术的进步，相继研究出或正在研究由基本加工方法相组合的各种新的塑性加工方法。如轧制和弯曲组合而成的辊弯成形。它使带材通过一系列轧辊孔型达到弯曲成形，可生产各种断面的冷弯型材。又如锻造和轧制组合而成的辊锻方法，可生产变断面的零件。

由于金属塑性加工是依靠金属的塑性来实现成形的，因而是在金属整体性保持的前提下，发生物质转移与组织性能变化的过程，而且金属塑性变形前后密度的变化一般不超过1%，

通常可忽略不计。因此，若不考虑变形过程中金属少量的几何损失及氧化烧损等损失，可以认为金属变形过程中的质量及体积保持恒定。金属塑性加工与其他金属加工技术，如金属切削加工等相比，具有以下优点：

1. 加工废屑损失少，材料的利用率较高；
2. 不仅工件的形状尺寸发生改变，而且金属的组织性能也得到改善与提高；
3. 易于实现生产过程的连续化和自动化，劳动生产率高；
4. 制品的尺寸精度和光洁度较高。

由于金属塑性加工具有以上的优点，因而钢总产量的90%以上，有色金属总产量的约70%需经过塑性加工成材，其产品品种规格繁多，广泛应用于交通运输、机械制造、电力电讯、化工、建材、仪器仪表、国防工业、航天技术、以及民用五金和家用电器等各个部门。而且塑性加工技术本身也是上述许多工业部门经常使用的重要加工技术之一。

## § 1.2 金属塑性加工力学的研究内容

金属塑性加工方法虽然种类繁多，有着各自的技术特点，但是它们却有着许多共同的理论基础，如金属都具有塑性；均需有外力的作用；加工过程中均不可避免地受到外摩擦的影响；工件的变形与外力存在一定的关系；工件的组织性能与加工工艺参数（如变形量、变形温度、变形速度）有着一定的联系等。其中外力、工件变形与外力的关系以及外摩擦等属于力学的范畴；金属的塑性、组织性能与工艺参数的关系等属于材

料科学的范畴。

金属塑性加工力学是研究金属塑性加工过程中金属变形力学规律的一门课程。它把金属材料看作均匀连续介质，运用塑性力学的基本理论分析、研究塑性加工时工件内的应力、应变分布规律，建立工件变形与外力的定量关系、以便计算塑性加工所需的变形力、变形功率等；为正确选择加工设备、合理制订加工工艺规程、设计工模具，确定毛坯形状尺寸和改善提高制品质量等提供科学依据。塑性加工力学的主要内容有：

1. 塑性力学基础理论：应力理论、应变理论和金属塑性变形的物性方程——屈服准则和应力应变关系方程等。

2. 计算变形力的解析方法：工程法、滑移线理论法、上限法及上限单元技术等。

对于塑性加工过程除了变形力学的研究之外，还从材料科学的角度也进行了大量的深入研究，形成了金属塑性加工材料学。它是从金属的微观结构——晶体结构出发，运用金属学和金属物理等基本理论和现代测试技术，研究金属塑性变形的物理本质，塑性变形过程中金属组织性能的变化规律，为有效地控制制品的组织性能提供科学依据。但是，这两方面的研究工作并不是孤立的，而是相互渗透、相互影响、相互促进的，目前正沿着阐明塑性变形材料的宏观力学性能与微观组织结构间的定量关系向纵深发展。

### § 1.3 金属塑性加工力学的发展简史

金属塑性加工力学是塑性力学的一个重要分支。它是在塑性力学的基础上，随着金属塑性加工技术的发展而逐渐形成的



一门新的专业基础理论课程。

最先将塑性力学用于金属塑性加工研究上的是德国的卡尔曼 (Von Karman)，他在1925年用初等解析方法分析了轧制时的应力分布。不久，萨克斯 (G. Sachs) 和齐别尔 (E. Siebel) 在研究拉拔过程提出了类似的求解方法，当时称为截块法 (Slab法)。五十年代中，苏联学者翁克索夫 (Унксов) 提出了一个实质上与 Slab 法相似的方法，并对镦粗时接触表面上的摩擦应力分布提出了一些新的见解。现在人们一般称以上解析方法为工程近似法，简称工程法。至今这种方法仍受到人们的欢迎。

滑移线理论法是二十世纪二十年代提出的，但是到四十年代才应用到塑性加工技术上。近三十多年来，滑移线理论法已成为塑性加工上求解平面变形问题的一种很重要的解析方法。目前，滑移线理论法在用于求解平面应力问题和轴对称问题方面也取得了某些进展。

五十年代初，英国学者约翰逊 (W. Johnson) 和日本学者工藤 (Kudo) 等人，根据塑性力学的极值原理，提出了一个比滑移线理论法较为简单的确定塑性加工极限载荷的上限法。现在这种方法已发展到有多种不同的求解方式，不仅可用于求解平面应变问题和轴对称问题，而且也可用来求解某些三维变形问题。因此，上限法在塑性加工上获得了广泛应用。

除了以上几种常用解析方法外，随着电子计算技术的发展，特别是高速电子计算机的广泛应用，各种数值计算方法在塑性加工力学上受到了普遍的重视，特别是七十年代以来，塑性有限单元法的研究取得了很大的进展，应用已十分广泛。