



国家教育部“九五”规划系列教材

金属塑性加工原理

JINSHUSUXINGJIAGONGYUANLI

彭大暑 主编

 中南大学出版社

国家教育部“九五”规划系列教材

金属塑性加工原理

彭大暑 主编

中南大学出版社

金属塑性加工原理

彭大暑 主 编

责任编辑 谢贵良 邓立荣

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482

电子邮件:csucbs @ public. cs. hn. cn

经 销 湖南省新华书店

印 装 中南大学印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 17.5 字数 316 千字

版 次 2004年2月第1版 2004年2月第1次印刷

书 号 ISBN 7-81061-754-0/TB·024

定 价 28.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

序 言

根据国家教育部 1998 年专业调整以及我校材料工程学科新的教育计划要求,《金属塑性加工原理》被定为材料工程学科重点专业基础课程之一。

根据新教学大纲要求,我们组织长期从事该课程教学的部分教师重新编写了《金属塑性加工原理》教材。本教材系统地阐述了金属塑性加工的基本理论,较好地反映了塑性加工理论的新发展,主要包括:塑性力学基础(应力应变分析和本构方程)、金属塑性变形宏观规律(流动和不均匀变形)、接触摩擦与工艺润滑、金属塑性变形微观机制、塑性加工的温度-速度条件与组织性能变化规律、塑性加工变形力的计算方法(工程法、滑移线理论、功平衡法和上限法)等几部分内容。为便于教学和自学,每章后均附有思考题和习题。

本教材编者参考了近期国内外出版的金属塑性加工原理等方面的有关文献,并根据长期从事塑性加工原理教学和科研工作的体会与经验,在体系上作了新的调整,对一点应力状态的主应力计算、应力应变分析的相似性与差异性、塑性加工中摩擦力的有效利用、滑移线理论中汉盖应力方程的导出等问题的阐述反映了编者自己的教学成果与见解。

本教材可供大专院校材料工程及相近学科的大学生作为教学用书或参考书,教学课时数约 80 学时;本教材也可供从事材料加工领域研究开发或生产的工程技术人员参考。

本教材由彭大暑教授主编。全书分 9 章:第 1、2 章由周亮副教授编写,第 3、4 章由张胜华教授编写,第 5、6 章由刘楚明教授编写,第 7 章由王孟君副教授编写,第 8 章由林高用副教授编写,绪言和第 9 章由彭大暑教授撰写。全书由张新明教授、傅祖铸教授和娄燕雄教授进行审定。

本教材根据国家教育部“21 世纪高等教育教学改革工程”本科教育教改立项项目“材料科学与工程类人才培养方案的综合改革与实践”(编号:1282B10042)的改革新形势进行了认真的审定,并在此项目的推动和资助下出版。此外,在编写和出版过程中,得到了中南大学材料科学与工程学院和中南大学出版社的大力支持。在此深表感谢!

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免有错误和疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

彭大暑

2004 年 1 月

目 录

绪论	(1)
----------	-----

第一篇 塑性变形力学基础

第1章 应力分析与应变分析	(11)
§1.1 应力与点的应力状态	(11)
§1.2 点的应力状态分析	(14)
§1.3 应力张量的分解与几何表示	(16)
§1.4 应力平衡微分方程	(19)
§1.5 应变与位移关系方程	(21)
§1.6 点的应变状态	(24)
§1.7 应变增量	(26)
§1.8 应变速度张量	(27)
§1.9 主应变图与变形程度表示	(28)
思考题	(29)
习题	(30)
附录 求和约定与张量初步	(32)
第2章 金属塑性变形的物性方程	(34)
§2.1 金属塑性变形过程和力学特点	(34)
§2.2 塑性条件方程	(35)
§2.3 塑性变形的应力应变关系	(40)
§2.4 变形抗力曲线与加工硬化	(45)
§2.5 影响变形抗力的因素	(49)
思考题	(52)
习题	(52)

第二篇 金属塑性加工的流动与变形规律

第3章 金属塑性加工的宏观规律	(57)
§3.1 塑性流动规律(最小阻力定律)	(57)
§3.2 影响金属塑性流动与变形的因素	(59)
§3.3 不均匀变形、附加应力和残余应力	(66)
§3.4 金属塑性加工诸方法的应力与变形特点	(79)
§3.5 塑性加工过程的断裂与可加工性	(91)
思考题	(107)
第4章 金属塑性加工的摩擦与润滑	(108)
§4.1 概述	(108)
§4.2 金属塑性加工时摩擦的特点及作用	(108)
§4.3 塑性加工中摩擦的分类及机理	(110)
§4.4 摩擦系数及其影响因素	(113)
§4.5 测定摩擦系数的方法	(117)
§4.6 塑性加工的工艺润滑	(122)
思考题	(131)

第三篇 塑性变形材料学基础

第5章 金属的塑性	(135)
§5.1 金属的塑性	(135)
§5.2 金属多晶体塑性变形的的主要机制	(138)
§5.3 影响金属塑性的因素	(146)
§5.4 金属的超塑性	(160)
思考题	(170)
第6章 塑性加工过程的组织性能变化与温度-速度条件	(172)
§6.1 塑性加工过程中的组织与性能变化	(172)
§6.2 金属塑性变形的温度-速度效应	(193)
§6.3 形变热处理	(197)
思考题	(202)

第四篇 金属塑性加工变形力的计算方法

第7章 金属塑性加工变形力的工程法解析	(205)
§ 7.1 概述	(205)
§ 7.2 工程法及其要点	(206)
§ 7.3 直角坐标平面应变问题解析	(207)
§ 7.4 极坐标平面应变问题解析	(208)
§ 7.5 圆柱坐标轴对称问题	(209)
§ 7.6 球坐标轴对称问题的解析	(212)
思考题与习题	(216)
第8章 滑移线理论及应用	(217)
§ 8.1 平面应变问题和滑移线场	(217)
§ 8.2 汉盖(Hencky)应力方程——滑移线的沿线力学方程	(219)
§ 8.3 滑移线的几何性质	(221)
§ 8.4 应力边界条件和滑移线场的绘制	(224)
§ 8.5 三角形均匀场和简单扇形场组合问题及实例	(229)
§ 8.6 双心扇形场问题及实例	(233)
思考题和习题	(237)
第9章 功平衡法和上限法及其应用	(239)
§ 9.1 功平衡法	(239)
§ 9.2 极值原理及上限法	(241)
§ 9.3 速度间断面及其速度特性	(244)
§ 9.4 Johnson 上限模式及应用	(246)
§ 9.5 Avitzur 上限模式及应用	(250)
思考题和习题	(264)
索引	(266)
参考书目	(270)

绪 论

一、金属塑性加工及其分类

金属塑性加工是使金属在外力(通常是压力)作用下,产生塑性变形,获得所需形状、尺寸和组织、性能的制品的一种基本的金属加工技术,以往常称压力加工。

金属塑性加工的种类很多,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、拉深、弯曲、剪切等几类(见表0-1)。其中锻造、轧制和挤压是依靠压力作用使金属发生塑性变形;拉拔和拉深是依靠拉力作用使金属发生塑性变形;弯曲是依靠弯矩作用使金属发生弯曲变形;剪切是依靠剪切力作用使金属产生剪切变形或剪断。锻造、挤压和一部分轧制多半在热态下进行加工;拉拔、冲压和一部分轧制,以及弯曲和剪切通常是在室温下进行的。

1. 锻造

靠锻压机的锻锤锤击工件产生压缩变形的一种加工方法,有自由锻和模锻两种方式。自由锻不需专用模具,靠平锤和平砧间工件的压缩变形,使工件墩粗或拔长,其加工精度低,生产率也不高,主要用于轴类、曲柄和连杆等单件的小批生产。模锻通过上、下锻模模腔限制工件的变形,可加工形状复杂和尺寸精度较高的零件,适于大批量的生产,生产率也较高,是机械零件制造业实现少切削或无切削加工的重要途径。

2. 轧制

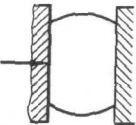
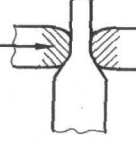

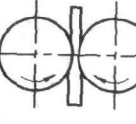
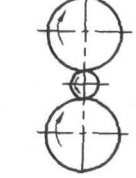
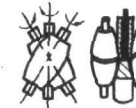
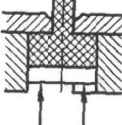
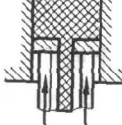
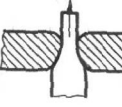
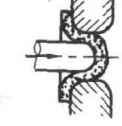

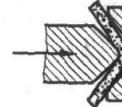
轧件通过两个或两个以上旋转轧辊时产生压缩变形,其横断面面积减小与形状改变,而纵向长度增加的一种加工方法。根据轧辊与轧件的运动关系,轧制有纵轧、横轧和斜轧三种方式。

(1)纵轧 两轧辊旋转方向相反,轧件的纵轴线与轧辊轴线垂直。金属不论在热态或冷态都可以进行纵轧,是生产矩形断面的板、带、箔材,以及断面复杂的型材常用的金属材料加工方法,具有很高的生产率,能加工长度很大和质量较高的产品。纵轧是钢铁和有色金属板、带、箔材以及型钢的主要加工方法。

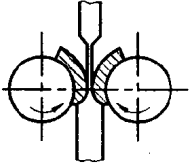
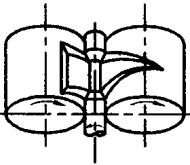
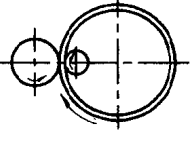
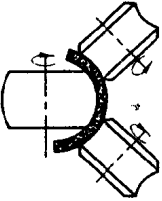
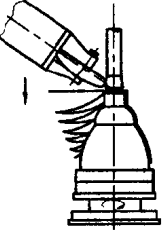
(2)横轧 两轧辊旋转方向相同,轧件的纵轴线与轧辊轴线平衡,轧件获得绕纵轴的旋转运动。该法可加工旋转体工件,如变断面轴、丝杆、周期断面型材以及钢球等。

(3)斜轧 两轧辊旋转方向相同,轧件轴线与轧辊轴线成一定倾斜角度,轧件在轧制过程中,除有绕其轴线旋转运动外,还有前进运动,是生产无缝钢管的基本方法。

表 0-1 金属塑性加工工件的受力和变形方式分类

基本加工方式		压 力					
基本受力方式		锻 造 轧 制					
分类与名称	自由锻造		模 锻	纵 轧	横 轧	斜 轧	
	墩粗	拔长					
图 例							
基本受力方式	压 力		拉 力				
	搞 压		拉 拔	冲压(拉深)	拉 形	弯 矩	剪 力
分类与名称	正挤压	反挤压					
	图 例						

续表 0-2

组 合 加 工 变 形 方 式					
组合方式	锻造-纵轧	锻造-横轧	锻造(扩孔)-横轧	轧制-弯曲	冲压(拉深)-轧制
名称	辊 锻	楔横轧	辗 压	辊 弯	旋 压
图 例					

3. 挤压

使装入挤压筒内的坯料,在挤压筒后端挤压轴的推力作用下,从挤压筒一端的模孔流出,从而获得断面与挤压模孔形状、尺寸相同的产品的一种加工方法。挤压有正挤压和反挤压两种基本方式。正挤压时挤压轴的运动方向与从模孔中挤出的金属流动方向一致;反挤压时,挤压轴的运动方向与从模孔中挤出的金属流动方向相反。挤压法可加工各种复杂断面实心型材、棒材、空心型材和管材,是有色金属型材、管材的主要生产方法。

4. 拉拔

靠拉拔机的钳口夹住穿过拉拔模孔的金属坯料,从模孔中拉出,从而获得断面与模孔形状、尺寸相同的产品的一种加工方法。拉拔一般在冷态下进行,可拉拔断面尺寸很小的线材和管材,如直径为0.015mm的金属线、直径为0.25mm管材。拉拔制品的尺寸精度高,表面光洁度极高,金属的强度高(因冷加工硬化强烈)。可生产各种断面的线材、管材和型材,广泛用于电线、电缆、金属网线和各种管材生产上。

5. 冲压(又叫拉深)

依靠冲头将金属板料顶入凹模中产生拉延变形,从而获得各种杯形件、桶形件和壳体的一种加工方法。冲压一般在室温下进行,其产品主要用于各种壳体零件,如飞机蒙皮、汽车覆盖件、子弹壳、仪表零件及日用器皿等。

6. 弯曲

在弯矩作用下,使坯料发生弯曲变形或使板料或管、棒材得到矫直的一种加工方法。

7. 剪切

坯料在剪切力的作用下产生剪切,使板材受到冲裁,以及将板料和型材切断的一种常用加工方法。

为了扩大加工产品品种,提高生产率,随着科学技术的进步,相继研究开发了多种由基本加工方式组合而成的新型塑性加工方法,如轧制与铸造相结合的连铸连轧法、锻造与轧制相结合的辗锻法、轧制与弯曲相结合的辗弯成形法、轧制与剪切相结合的搓轧法(异步轧制法)、拉深与轧制相结合的旋压法等等。

二、塑性加工的特点及在国民经济中的地位

金属塑性加工与金属铸造、切削、焊接等加工方法相比,有以下特点:

(1)金属塑性加工是在金属整体性得到保持的前提下,依靠塑性变形使物质发生转移来实现工件形状和尺寸变化的,不会产生切屑,因而材料的利用率高得多。

(2)在塑性加工过程中,除尺寸和形状发生改变外,金属的组织、性能也能得到改善和提高,尤其对于铸造坯料,经过塑性加工将使其结构致密、粗晶破碎细化和均匀,从而使其性能提高。此外,塑性流动所产生的流线也能使其性能得到改善。

(3)塑性加工过程便于实现生产过程的连续化、自动化,适于大批量生产,如轧制、拉拔加工等,因而劳动生产率高。

(4)塑性加工产品的尺寸精度和表面质量较高。

(5)设备较庞大,能耗较高。

金属塑性加工由于具有上述特点,不仅原材料消耗少、生产效率高、产品质量稳定,而且还能有效地改善金属的组织性能。这些技术上和经济上的独到之处和优势,使它成为金属加工中极其重要的手段之一,因而在国民经济中占有十分重要的地位。如在钢铁材料生产中,除了少部分采用铸造方法直接制成零件外,钢总产量的90%以上和有色金属总产量的70%以上,均需经过塑性加工成材,以满足机械制造、交通运输、电力电讯、化工、建材、仪器仪表、航空航天、国防军工、民用五金和家用电器等部门的需要;而且塑性加工本身也是上述许多部门直接制造零件而经常采用的重要加工方法,如汽车制造、船舶制造、航空航天、民用五金等部门的许多零件都须经塑性加工制造。因此,金属塑性加工在国民经济中占有十分重要的地位。

三、塑性加工理论的发展概况

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能力,并掌握了锤击金属以制造兵器和工具的技术。近代科学技术已经赋予塑性加工技术以崭新的内容和涵义。但是,作为这一技术的理论基础——金属塑性加工理论,直到20世纪40年代才逐渐发展成一门独立的应用学科。

金属塑性加工理论由金属塑性加工力学、塑性变形材料学、塑性加工摩擦学三大部分组成。

塑性加工力学(也称力学冶金)是随着塑性力学(也称塑性理论)在金属塑性加工中的应用而发展起来的一个分支。塑性力学的形成可追溯到1864年法国工程师屈雷斯卡(H. Tresca)首次提出最大剪力屈服准则。最早将塑性力学应用于金属塑性加工的是德国学者卡尔曼(Von. Karman),他在1925年用初等解析法建立了求解轧制压力分布的应力微分平衡方程;此后不久,萨克斯(G. Sachs)和齐别尔(E. Siebel)在研究拉拔时提出了类似的求解方法——平截面法(Slab法),即通常所谓的工程法或主应力法。此后,人们对塑性加工过程的应力、应变和变形力的求解逐步建立了许多理论求解方法,如20世纪中期建立的滑移线法是研究平面变形问题的一种重要解析方法,50年代发展起来的变形功平衡法,特别是极值法(含上

限法和下限法)在70年代后得到了广泛应用。随着电子计算机及计算技术的发展,数值计算方法(如塑性有限元法)得到了飞跃发展,近年来得到了广泛应用。同时建立了理论解析与实验相结合的方法,如视塑性法、云纹法和光塑性法等。

金属塑性加工材料学是运用物理冶金原理对塑性变形过程中金属组织性能变化规律进行研究而形成的一个分支。自20世纪30年代位错(位错是金属晶体中的一种线缺陷)理论的提出,用位错理论科学地解释了金属塑性变形过程的许多现象,如滑移、孪晶、加工硬化、回复、再结晶和金属的断裂等,使人们对金属塑性变形的微观机理有了科学的认识。同时,研究表明,金属塑性和断裂过程的物理本质和金属塑性的状态属性,不仅取决于金属材料的本身,而且决定于材料所处的状态(如温度、速度条件和力学状态条件等)。从而加深了对塑性变形过程材料塑性及变形抗力变化规律的认识,了解了不同金属材料的组织结构和性能变化与塑性变形条件的关系;为合理选择塑性加工工艺条件,保证塑性加工的顺利进行,并通过变形手段来改善组织结构,为获得所需使用性能的金属材料提供了理论依据;同时为改进和开发新的塑性加工工艺,提高产品质量指明了方向,开辟了新的途径。

塑性加工中接触表面间的相对运动必然引起摩擦。在摩擦过程中运动表面间将发生一系列物理、化学和力学变化,这些变化对金属塑性变形过程和产品质量将产生重要的影响。研究塑性加工过程的摩擦、润滑和磨损现象、特点及其规律是金属塑性加工摩擦学的重要任务。关于摩擦的研究可追溯到1508年意大利的达·芬奇摩擦第一定律(摩擦力与法向载荷成正比)和第二定律(摩擦系数与接触面积无关)的提出。1699年法国的阿蒙顿首先提出了摩擦系数的概念,1780年库仑提出第三摩擦定律(摩擦系数与速度无关),并建立了阿蒙顿-库仑摩擦定律(常摩擦系数定律)。这一定律认为摩擦力来源于表面凹凸不平的机械啮合作用。它为一般机械副间的摩擦奠定了理论基础,故也称机械摩擦定律。但塑性加工过程的摩擦比一般机械副间的摩擦要复杂得多,除了上述常摩擦系数定律外,还需考虑接触表面间的粘着摩擦情况,即所谓“常摩擦力定律”。关于润滑理论的研究则比摩擦理论要晚得多,只是随着近代加工技术的发展才进行了多方面的研究。

四、本课程的任务

金属塑性加工原理是材料科学与工程专业的基础理论课,目的在于科学地、系统地阐明各种塑性加工方法的共同基础和规律,为合理制定塑性加工工艺、加工合格产品奠定理论基础。因此,本课程的基本任务是:

(1)学习塑性力学的基础知识,掌握应力应变分析、塑性变形物性方程(塑性条件方程和应力应变关系方程)等变形力学知识,为塑性加工过程中变形体的应力、应变分析,以及变形力的计算奠定力学基础。

(2)学习金属塑性变形的物理冶金知识,掌握塑性变形时金属流动和变形不均匀分布的宏观规律,分析影响金属塑性流动和变形不均匀的影响因素,以便合理

确定坯料尺寸和变形参数;掌握金属材料塑性变形的微观机理,以及塑性变形过程中金属组织性能(主要是塑性和变形抗力)变化的规律,为合理确定塑性加工的温度、速度等热力学条件,以及为获得最佳塑性状态和塑性加工制品组织性能奠定材料学基础。

(3)学习塑性加工过程摩擦与工艺润滑基本知识,掌握塑性加工过程摩擦基本特点与规律,以及摩擦对塑性加工过程的影响与作用;掌握塑性加工工艺润滑的基本理论,为合理选择润滑剂以及确定润滑工艺奠定物理化学基础。

(4)学习塑性加工变形力学问题的基本解析方法,以便确定变形体中的应力应变分布规律和所需变形力与变形功,为合理选择加工设备和设计与校核工、模具提供力学依据。

金属塑性加工原理是一门专业基础课论课,在学习过程中要建立起准确的物理概念,掌握塑性变形的基本规律和变形力学分析方法,密切注意理论联系实际,以提高分析和解决塑性加工实际问题的能力,为后续专业课程的学习打下牢固的基础。



第一篇

塑性变形力学基础

