

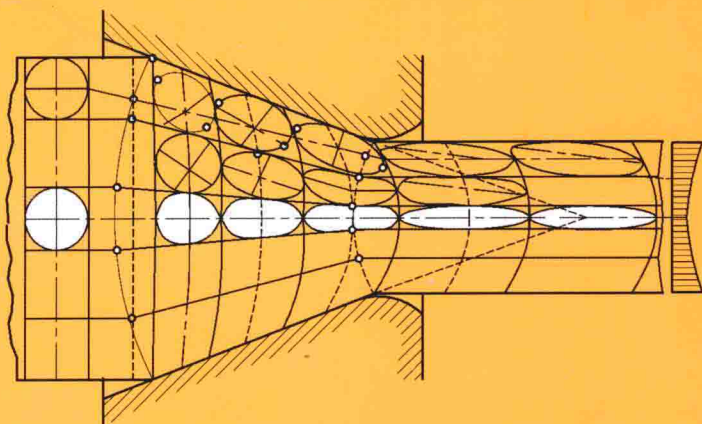


普通高等学校国家级规划教材

Principles of
Metal Forming Processes

金属 塑性加工原理

—— 第二版 ——



主编 彭大暑
主审 张新明



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

普通高等学校国家级规划教材

金属塑性加工原理

(第二版)

彭大暑 主编

张新明 主审



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性加工原理/彭大暑主编. —2版.

—长沙:中南大学出版社,2014.4

ISBN 978-7-5487-1057-8

I.金... II.彭... III.金属压力加工-高等学校-教材
IV.TG301

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第056075号

金属塑性加工原理

(第二版)

彭大暑 主 编

-
- 责任编辑 周兴武
责任印制 易建国
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:0731-88876770 传真:0731-88710482
印 装 长沙印通印刷有限公司
-

- 开 本 720 × 1000 B5 印张 19.5 字数 399 千字
版 次 2014年4月第2版 2014年4月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5487-1057-8
定 价 42.00 元
-

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

本书根据教育部颁布的材料科学与工程学科教学大纲要求,系统地阐述了金属塑性加工的基本理论及其新发展。全书内容分为上、下两篇,上篇为金属塑性加工力学原理,内容包括:应力分析与应变分析、金属塑性变形的物性方程、金属塑性加工变形力的工程法、滑移线理论及应用、功平衡法和上限法及应用、金属塑性有限元简介;下篇为金属塑性加工物理冶金原理,内容包括:金属塑性加工的宏观规律、金属塑性加工的摩擦与润滑、金属的塑性和变形抗力、塑性变形过程的组织性能变化与温度-速度条件。

本书可供高等学校材料科学与工程学科及相近学科的大学生作为教材或参考书,也可供从事材料加工研究或生产的工程技术人员参考。

前 言

根据国家教育部 1998 年专业调整以及高等学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。

本教材可供高等学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;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)的改革精神进行了认真的审定,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

第二版前言

根据国家教育部规划教材要求,自2004年第一版出版以来,整整10年过去了,中南大学材料科学与工程一级学科本科教学一直选定本书为国家级精品课程“金属塑性加工原理”的必修课教材,同时本书也受到中南、华东、西南和西北地区十多所兄弟高校的欢迎,选为材料科学与工程、材料加工与工程、材料成型及控制等专业本科生及相近学科硕士研究生用教材。

遵照国家“十二五”普通高等教育本科专业教材规划精神,与“材料科学与工程”国家一级重点学科和“材料加工工程”国家二级重点学科的建设要求,为了满足国家级精品课程建设和教学的需求,本次修订对本书进行了系统修改:对第一版中出现的错误进行了修正,更换了一些图表,删除了一些过繁的叙述;对几处理论导出过程进行了一定的充实;编排上作了一些调整;增补了一些新的内容,如金属动态回复和动态再结晶的基础知识与最新成果,粉体材料与各向异性材料的屈服准则等;还添加了金属塑性变形有限元法一章,介绍了有限元法求解金属塑性加工问题的基本思路和常用有限元模拟软件的特点等;书末增加了习题参考答案等。

本书的第二版仍由彭大暑教授主编。全书的内容和结构基本与第一版相同,增添了塑性有限元简介一章。全书分上、下两篇,计划约120学时(标*号的内容为选学内容)。上篇为金属塑性加工力学原理,其中第1、2章由周亮副教授编写,第3章由王孟君教授编写,第4章由林高用教授编写,第5、6章由彭大暑教授编写。下篇为金属塑性加工物理冶金原理,其中第7、8章由张胜华教授编写,第9、10章由刘楚明教授编写。绪言、思考题、习题及参考答案、索引及参考文献等由彭大暑教授编写。修订后由中南大学材料科学与工程学科首席教授张新明博士审定。

本书修订意见的采集由彭大暑教授完成,内容修改、统稿、校对等工作主要由彭大暑、林高用和许秀芝完成,周亮、王孟君、张胜华、刘楚明等老师对各自编写章节的修改提出了许多意见和建议,陈志永老师、唐建国老师和魏建胜博士也提供了宝贵的建议,在此表示衷心感谢!

本书的修订与再版,得到了教育部“高等学校本科教学质量与教学改革工程”项目“专业综合改革试点——材料科学与工程专业”(教高函【2012】2号)的资助,以及中南大学材料科学与工程学院与中南大学出版社的大力支持,对此深表感谢!

鉴于作者学术水平所限,修订后的书中难免仍有错误和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2014年元旦于岳麓山

目 录

绪 论	(1)
-----------	-----

上篇 金属塑性加工力学原理

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 点应力状态的分析	(15)
1.3 应力张量的分解与几何表示	(22)
1.4 应力平衡微分方程	(24)
1.5 应变与位移关系方程	(26)
1.6 点的应变状态	(29)
1.7 应变增量	(31)
1.8 应变速度张量	(32)
1.9 主应变图与变形程度表示	(33)
思考题	(36)
习 题	(36)
附录 求和约定与张量初步	(38)
第 2 章 金属塑性变形的物性方程	(40)
2.1 金属塑性变形过程和力学特点	(40)
2.2 弹性变形的应力 - 应变关系	(41)
2.3 屈服准则	(44)
2.4 塑性变形的应力 - 应变关系	(51)
2.5 塑性变形的应力 - 应变关系曲线	(56)
思考题	(61)
习 题	(61)
第 3 章 金属塑性加工变形力的工程法	(63)
3.1 概述	(63)
3.2 工程法及其要点	(64)
3.3 直角坐标平面应变问题	(65)

3.4	极坐标平面应变问题	(66)
3.5	圆柱坐标轴对称问题	(67)
3.6	球坐标轴对称问题	(70)
	思考题与习题	(76)
第4章	滑移线理论及应用	(78)
4.1	平面应变问题和滑移线场	(78)
4.2	汉盖(Hencky)应力方程——滑移线的沿线力学方程	(80)
4.3	滑移线的几何性质	(82)
4.4	应力边界条件和滑移线场的绘制	(85)
4.5	三角形均匀场和简单扇形场组合问题及实例	(90)
4.6	双心扇形场问题及实例	(94)
	思考题和习题	(98)
第5章	功平衡法和上限法及应用	(100)
5.1	功平衡法	(100)
5.2	极值原理及上限法	(102)
5.3	速度间断面及其速度特性	(105)
5.4	Johnson 上限模式及应用	(107)
5.5	Avitzur 上限模式及应用	(111)
	思考题和习题	(125)
第6章	金属塑性有限元简介	(127)
6.1	金属塑性有限元法发展简史	(127)
6.2	有限元法的基本思路和金属塑性有限元法分析步骤	(128)
6.3	金属塑性成形的弹塑性有限元简介	(130)
6.4	金属塑性成形的刚塑性有限元简介	(130)
6.5	金属体积成形有限元模拟系统	(131)

下篇 金属塑性加工物理冶金原理

第7章	金属塑性加工的宏观规律	(139)
7.1	塑性流动规律(最小阻力定律)	(139)
7.2	影响金属塑性流动与变形的因素	(141)
7.3	不均匀变形、附加应力和残余应力	(148)
7.4	金属塑性加工诸方法的应力与变形特点	(161)
7.5	塑性加工过程的断裂与可加工性	(172)
	思考题	(186)

第 8 章 金属塑性加工的摩擦与润滑	(187)
8.1 金属塑性加工时摩擦的特点及作用	(187)
8.2 塑性加工中摩擦的分类及机理	(189)
8.3 摩擦系数及其影响因素	(192)
8.4 测定摩擦系数的方法	(196)
8.5 塑性加工的工艺润滑	(201)
思考题	(210)
第 9 章 金属的塑性和变形抗力	(212)
9.1 金属的塑性	(212)
9.2 金属多晶体塑性变形的机制	(215)
9.3 影响金属塑性的因素	(221)
9.4 金属的超塑性	(236)
9.5 变形抗力及其影响因素	(246)
思考题	(249)
第 10 章 塑性变形过程的组织性能变化与温度 - 速度条件	(250)
10.1 金属的冷变形及其组织与性能变化规律	(250)
10.2 金属的热变形及其组织与性能变化规律	(263)
10.3 金属的温变形及其组织与性能变化规律	(277)
10.4 金属塑性变形的温度 - 速度效应	(279)
10.5 形变热处理	(286)
思考题	(291)
习题参考答案	(292)
索 引	(295)
参考书目	(299)

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产生塑性变形;拉拔和拉深是依靠拉力作用使金属产生塑性变形;弯曲是依靠弯矩作用使金属产生弯曲变形;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

依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、下锻模模腔约束工件的变形,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

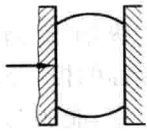
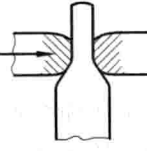
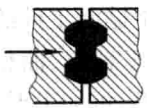
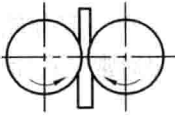
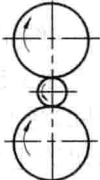
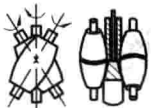
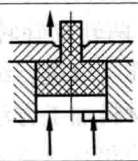
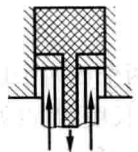
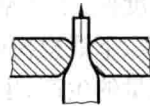
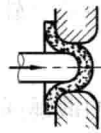

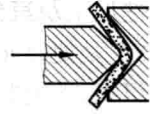
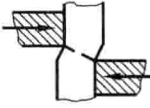
轧件通过两个或两个以上旋转轧辊时产生压缩变形,其横断面面积减小与形状改变,而纵向长度增加的一种加工方法。根据轧辊与轧件的运动关系,轧制有纵轧、横轧和斜轧三种方式。

(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。

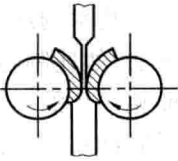
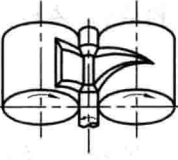
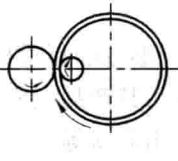
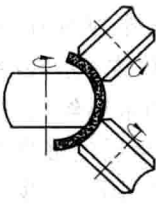
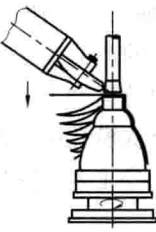
(2)横轧 两轧辊旋转方向相同,轧件的纵轴线与轧辊轴线平衡,轧件获得绕纵轴的旋转运动。该法可加工旋转体工件,如变断面轴、丝杆、周期断面型材以及钢球等。

(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 金属塑性加工按工件的受力和变形方式分类

基本加工方式		压力				力		
基本受力方式	分类与名称	自由锻造		锻造轧制		弯矩	剪力	
		镦粗	拔长	模锻	纵轧			横轧
图	例							
基本受力方式		压力		拉力		弯矩	剪力	
分类与名称	图	挤压		拉拔	冲压(拉深)	拉形	弯曲	
		正挤压	反挤压					
图	例							

续表 0-1

组合方式		组合加工变形方式			
组合方式	锻造-纵轧	锻造-横轧	锻造(扩径)-横轧	轧制-弯曲	冲压(拉深)-轧制
名称	辊锻	楔横轧	辗轧	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,从挤压筒前端模孔流出,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 的金属丝、直径为 0.25mm 的毛细管。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,广泛应用于电线、电缆、金属网线和各种管材生产上。

5. 冲压

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接轧法、锻造与轧制相结合的辊锻法、轧制与弯曲相结合的辊弯成形法、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的变化,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 and 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流线方向的力学性能得到增强。

(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,因而生产效率高。

(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 and 性能。这些技术上 and 经济上的独到之处 and 优势,使其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。如在金属材料生产中,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 and 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 and 家用电器等领域的需要;而且塑性加工本身也是上述许多领域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、民用五金等行业的许多零件都须经塑性加工制造。因此,金属塑性加工原理与技术 in 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

金属塑性加工的历史悠久,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 and 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 and 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、金属塑性加工物理冶金学、塑性加工摩擦学三大部分组成。

金属塑性加工力学(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平衡微分方程;此后不久,萨克斯(G. Sachs) and 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 or 主应力法。此后,人们对塑性加工过程的应力、应变 and 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,近年来得到了普遍应用。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。

金属塑性加工物理冶金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,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程,目的在于科学、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,以及变形力的解析计算奠定力学基础。

(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内在和外部因素,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和性能(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和性能奠定材料物理基础。

(3)学习塑性加工过程摩擦与工艺润滑基本知识,掌握塑性加工过程中摩擦的基本特点与规律,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程,在学习过程中要建立起科学的物理概念,掌握塑性变形的基本规律和变形力学分析方法,注意理论紧密联系实际,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和技术应用与研发打下牢固的基础。

