

普通高等教育材料类专业“十三五”规划教材
国家级精品课程配套教材

金属塑性加工原理

杨扬 主编

JINSHU SUXING
JIAGONG YUANLI



化学工业出版社

普通高等教育材料类专业“十三五”规划教材
国家级精品课程配套教材

金属塑性加工原理

JINSHU SUXING JIAGONG YUANLI

杨扬 主编



化学工业出版社

·北京·

本书是国家级精品教学资源共享课程“金属塑性加工原理”的配套教材。本书详细介绍了金属塑性加工的特点及其分类、金属塑性变形基础理论、塑性加工对金属组织结构与性能的影响规律、金属塑性加工过程中的组织与各向异性、金属在塑性加工过程中的塑性行为、金属塑性加工过程中的摩擦与润滑、金属塑性加工过程中的不均匀变形与残余应力、金属塑性加工过程中的断裂,以及金属塑性加工过程中的强韧性控制等知识。

本书既可作为材料加工工程以及材料成形及控制工程专业的本科生教材,也可供相关专业的研究生、教师及现场工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性加工原理/杨扬主编. —北京: 化学工业出版社, 2016.5

普通高等教育材料类专业“十三五”规划教材 国家级精品课程配套教材

ISBN 978-7-122-26849-5

I. ①金… II. ①杨… III. ①金属压力加工-高等学校-教材 IV. ①TG301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 082347 号

责任编辑: 王听讲
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 北京国马印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 433 千字 2016 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

在国内高等院校教学中，大都将金属加工成形理论分为“金属塑性加工原理”和“金属塑性加工力学”两门课程讲授。

本书是在国家级精品教学资源共享课程“金属塑性加工原理”（教高司函〔2013〕132号）建设项目的资助下，由编者根据材料加工工程专业多年的教学实践经验编写的。本书主要内容包括：金属塑性加工的特点及其分类、金属塑性变形基础理论、塑性加工对金属组织结构与性能的影响规律、金属塑性加工过程中的组织与各向异性、金属在塑性加工过程中的塑性行为、金属塑性加工过程中的摩擦与润滑、金属塑性加工过程中的不均匀变形与残余应力、金属塑性加工过程中的断裂，以及金属塑性加工过程中的强韧性控制等知识。

本教材与同类图书比较，突出了以下特点。

（1）宏观规律与微观机理的耦合和多学科知识的融合：基于位错理论、塑性力学、结构理论、断裂理论以及摩擦学等基础知识，阐明塑性加工过程中的一些基本概念、基本规律。

（2）现代和传统的结合：在讲授本课程的传统内容的基础上，将剧烈塑性变形、组织、现代摩擦学、强韧化等新成果引入教材，力图反映当代科学技术的新进展。

（3）注重理论在工程实践中的运用：在教材中大量列举相关理论在金属塑性加工的科研与生产中的应用案例，从而为优化塑性加工工艺和提高金属制品质量，研发新的加工技术和新型金属材料提供理论指导。

（4）本书是国家精品课程“金属塑性加工原理”配套教材，相关的共享教学资源网址为：<http://www.icourses.cn/coursestatic/course6716.html>。

全书由中南大学杨扬教授主编。全书共分8章，绪论以及第1、2、4、6章由杨扬教授编写，第5、7、8章由中南大学赵明纯教授编写，第3章由中南大学唐建国副教授编写。全书由杨扬教授统稿。

本教材是为60学时的“金属塑性加工原理”课程编写的，为了开拓学生的知识层面，在编写的深度和广度上有一定拓展，部分内容可供学生自主学习，讲授时可按学时等具体要求取舍。本书也可供金属材料其他专业的教学、科研、生产和设计工作者参考。

鉴于学识水平有限，难免存在疏漏或不妥之处，恳请读者指正。

编者

2016年5月

目 录

绪论

1

- 0.1 金属塑性加工的特点及其在国民经济中的地位 1
- 0.2 金属塑性加工的分类 1
- 0.3 金属塑性加工的系统观 4
- 0.4 金属塑性加工相关理论发展概况 6
- 0.5 金属塑性加工技术的发展方向 7
- 0.6 本课程的主要内容和教学任务 8

第1章 金属塑性变形基础理论

10

- 1.1 金属的塑性变形机制 10
 - 1.1.1 滑移 10
 - 1.1.2 孪生 20
 - 1.1.3 扭折带和形变带 26
 - 1.1.4 扩散塑性变形机理 28
 - 1.1.5 晶界滑动 35
 - 1.1.6 变形机制图 37
- 1.2 金属单晶体的塑性变形 39
 - 1.2.1 面心立方金属单晶体的塑性变形 39
 - 1.2.2 体心立方金属的塑性变形 41
 - 1.2.3 六方结构金属的塑性变形 41
- 1.3 金属多晶体的塑性变形 41
 - 1.3.1 晶界的影响 41
 - 1.3.2 晶粒取向的影响 41
 - 1.3.3 织构强化 44
 - 1.3.4 晶粒大小对金属多晶体流变应力的影响 44
 - 1.3.5 多晶体的软化机制 46
- 1.4 合金的塑性变形 47
 - 1.4.1 固溶体合金的塑性变形 48

1.4.2 多相合金的塑性变形	54
-----------------------	----

第2章 塑性加工对金属组织结构与性能的影响规律

57

2.1 塑性加工的主要工艺参数及其影响	57
2.1.1 主要工艺参数	57
2.1.2 热效应对塑性加工的影响	59
2.1.3 变形温度、变形速度以及变形程度对流变应力的影响	60
2.2 冷加工对金属组织结构与性能的影响规律	63
2.2.1 冷加工金属的组织结构特征	63
2.2.2 冷加工后金属性能的变化	68
2.2.3 冷加工特点	72
2.2.4 加热对冷变形金属的组织结构与性能的影响	73
2.3 热加工对金属的组织结构与性能的影响	84
2.3.1 热加工中的软化过程	84
2.3.2 热加工对金属的组织与性能的影响	88
2.3.3 热加工的特点	91
2.4 温加工对金属的组织结构与性能的影响	92
2.5 剧烈塑性变形对金属组织结构与性能的影响	95
2.5.1 细化晶粒的剧烈塑性变形方法	95
2.5.2 剧烈塑性变形金属的组织特征与演变机理	99
2.5.3 剧烈塑性变形对金属性能的影响	101
2.6 变形热处理	103
2.6.1 时效型合金的形变热处理	104
2.6.2 马氏体转变型合金的形变热处理	107

第3章 金属塑性加工过程中的组织与各向异性

113

3.1 晶体取向与织构	113
3.1.1 晶体取向	113
3.1.2 织构与取向分布函数	118
3.2 塑性变形织构	119
3.2.1 位错滑移与晶体取向的演变	119
3.2.2 实际金属塑性加工过程中织构	122
3.2.3 影响应变织构的因素	125
3.3 织构与各向异性	126

第4章 金属在塑性加工过程中的塑性行为

129

4.1 金属的塑性和塑性指标	129
4.1.1 塑性的概念	129
4.1.2 塑性指标及测量方法	131

4.2	影响金属塑性的因素	132
4.2.1	影响金属塑性的内部因素	132
4.2.2	影响金属塑性的外部因素	136
4.3	金属材料的可成形性	142
4.3.1	块料的可成形性	142
4.3.2	板料的可成形性	143
4.4	超塑性	144
4.4.1	超塑性变形的宏观特征	144
4.4.2	超塑性分类	145
4.4.3	超塑性的力学特征	147
4.4.4	超塑性变形机理	148
4.4.5	实现超塑性的条件	149
4.4.6	超塑变形的应用	151

第5章 金属塑性加工过程中的摩擦与润滑

154

5.1	塑性加工中摩擦的特点及作用	154
5.1.1	塑性加工中摩擦的特点	154
5.1.2	塑性加工中摩擦的作用	155
5.2	塑性加工中摩擦的分类及机理	156
5.2.1	摩擦的常见分类	156
5.2.2	按润滑状态分类的摩擦	156
5.2.3	摩擦的机理	157
5.2.4	塑性加工时接触表面摩擦力的计算	157
5.3	摩擦系数的影响因素和测定方法	158
5.3.1	摩擦系数	158
5.3.2	摩擦系数的影响因素	159
5.3.3	摩擦系数的测定方法	161
5.4	塑性加工中摩擦导致的磨损	164
5.4.1	磨损的分类	164
5.4.2	表征材料磨损性能的参量	164
5.4.3	磨损失效过程	164
5.4.4	影响磨损的因素	165
5.5	塑性加工中的润滑目的和分类	166
5.5.1	润滑的目的	166
5.5.2	润滑的分类	166
5.6	塑性加工中的润滑机理	168
5.6.1	流体力学原理	168
5.6.2	吸附机制	169
5.7	塑性加工中的润滑剂	169
5.7.1	润滑剂的分类和作用	169
5.7.2	金属塑性成形中对润滑剂的基本要求	170

5.7.3	金属塑性成形中常用的润滑剂	171
5.7.4	润滑剂中的添加剂	173
5.7.5	先进润滑剂	174
5.8	金属塑性加工中常用的摩擦系数和润滑方法的改进	175
5.8.1	金属塑性加工中常用的摩擦系数	175
5.8.2	润滑方法的改进	176
5.9	金属塑性加工中摩擦与润滑的实践应用	176
5.9.1	锻造工艺中的摩擦与润滑	176
5.9.2	轧制工艺中的摩擦与润滑	177
5.9.3	挤压工艺中的摩擦与润滑	180
5.9.4	拉拔工艺中的摩擦与润滑	184

第6章 金属塑性加工过程中的不均匀变形与残余应力

188

6.1	金属质点流动的基本规律	188
6.2	均匀变形与不均匀变形	189
6.3	不均匀变形的影响因素和典型现象	190
6.4	不均匀变形的后果与对策	194
6.5	残余应力	199
6.5.1	基本应力、附加应力和工作应力	199
6.5.2	残余应力	200

第7章 金属塑性加工过程中的断裂

213

7.1	断裂的物理本质	213
7.1.1	理论断裂强度	213
7.1.2	断裂强度的裂纹理论	214
7.1.3	裂纹的萌生和扩展	215
7.2	断裂的基本类型	218
7.2.1	按断裂应变分类	218
7.2.2	按断口形貌分类	218
7.2.3	按断裂路径分类	218
7.2.4	按断裂面的取向分类	218
7.2.5	按服役条件分类	219
7.3	断口特征分析	219
7.3.1	断口宏观特征分析	219
7.3.2	断口微观特征分析	220
7.4	韧性断裂	220
7.4.1	韧性断裂的表现形式	220
7.4.2	杯锥韧性断裂的断裂过程	221
7.4.3	韧窝断口及其形成模型	221
7.4.4	韧性断裂的特点	222

7.5 脆性断裂	223
7.5.1 解理断裂的特点	223
7.5.2 准解理断裂的特点	224
7.5.3 沿晶断裂的特点	224
7.6 韧性-脆性转变	225

第8章 金属塑性加工过程中的强韧性控制

230

8.1 金属强度	230
8.1.1 强度的概念	230
8.1.2 强度的分类	230
8.1.3 工程意义上的强度及其意义	231
8.1.4 理论上提高强度的方式	231
8.2 金属的塑性变形与屈服现象	231
8.2.1 塑性变形	231
8.2.2 屈服现象	233
8.2.3 影响屈服强度的因素	234
8.3 金属的强化机制与途径	237
8.3.1 变形强化	237
8.3.2 细晶强化	240
8.3.3 固溶强化	241
8.3.4 第二相强化	242
8.3.5 其他强化方式	245
8.3.6 强化方式控制的应用	245
8.4 金属的韧性和对韧性的评价	246
8.4.1 金属的韧性	246
8.4.2 韧性的评价	246
8.5 韧化原理及工艺	247
8.5.1 影响韧性的因素	247
8.5.2 改善金属材料韧性的途径	250
8.5.3 韧化工艺	250
8.6 金属材料的强韧化实践	252
8.6.1 钢铁材料的强韧化	252
8.6.2 铝合金材料的强韧化	253
8.6.3 镁合金材料的强韧化	253
8.6.4 铜合金材料的强韧化	255
参考文献	257

绪论

金属塑性加工是材料制备过程中的一个必要环节，是金属加工的主要方法之一，90%以上的金属制品是塑性加工成形的。金属制品的主要制备方法有铸造，粉末冶金，塑性加工如锻造、冲压、轧制、拉拔、挤压，特种加工如爆炸加工、电磁加工、激光加工等，焊接，切削加工如车、铣、刨、磨、钻、铰、插等。金属塑性加工或者塑性成形是指金属坯坯在外力作用下产生塑性变形，变形不仅能使其断面的形状和尺寸改变，而且也能改变其组织与性能。金属经铸造或粉末冶金成锭以后，通常要进行各种塑性加工，以获得具有一定形状、尺寸和力学性能的板材、管材、棒材或线材、型材。

0.1 金属塑性加工的特点及其在国民经济中的地位

金属塑性加工与其他加工方法相比，主要具有如下优点。

① 变形/性。即在改变金属材料的形状/尺寸的同时，能改善组织性能，如减轻偏析、致密结构、细化晶粒等，从而提高材料的综合力学性能。

② 材料利用率高。由于塑性成形主要靠金属塑性状态下的体积转移，故不需切除大量的多余金属，所以金属废屑少、利用率高。

③ 生产效率高。这体现在塑性成形可采用高的加工速度，以及可采用连续化的生产方式，因此特别适用于大批量生产。

正由于金属塑性加工具有上述特点，在工业领域塑性加工被用于：一是改变金属材料的几何形状，即简单坯料（方、圆、扁坯）通过工具的作用，产生塑性变形而成为一个几何学上复杂的产品（如板/带/条/箔，管/棒/线/型，异型如杯/罐等深冲制品，各种工/槽/扁/角/轨/钢管等型钢），其复杂性体现在有时需要很高的尺寸精度、很低的表面粗糙度、良好的板形、高精度的厚度偏差等；二是改善金属材料的性能，在塑性变形过程中控制变形条件如变形量、变形温度、变形速度、变形区几何学等，控制产品的组织结构（细化晶粒等）、应力分布、外观形状和尺寸等，提高制品的力学性能（强度/韧性）以及其他物理性能和化学性能。在传统的金属材料生产中，钢制品总产量的90%以上以及有色金属制品总产量的70%以上，都是由塑性加工方法加工成材。因此，金属塑性加工在国民经济与国防建设中占有举足轻重的地位。

0.2 金属塑性加工的分类

(1) 按加工时工件的受力和变形方式分类

金属塑性加工方法主要有轧制、挤压、锻压、拉拔和冲压等。

① 轧制。将金属坯料通过一对旋转轧辊的间隙（各种形状），因受轧辊的压缩使材料截

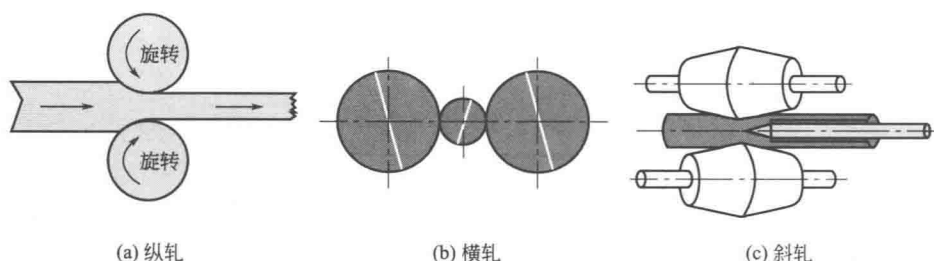


图 0-1 轧制示意图

面减小，长度增加的塑性变形过程。主要用来生产板材、型材、管材。轧制按轧件运动方式又可分为纵轧、横轧、斜轧（图 0-1）。

a. 纵轧：金属在两个旋转方向相反的轧辊之间通过，并在其间产生塑性变形的过程 [图 0-1 (a)]。主要生产板带材、型材。

b. 横轧：轧件变形后运动方向与轧辊轴线方向一致 [图 0-1 (b)]。主要生产圆形断面的各种轴类回转体。横轧包括以下基本类型。

(a) 齿轮横轧：带齿形的轧辊与圆形坯料在对滚中，实现局部连续成形，轧制成齿轮。这种横轧的变形主要在径向进行，轴向变形很小。

(b) 螺旋横轧：螺旋横轧又称螺纹滚压，两个带螺纹的轧辊（滚轮），以相同的方向旋转，带动圆形坯料旋转，其中一个轧辊径向进给，将坯料轧制成螺纹。这种横轧的变形主要在径向进行。

(c) 楔横轧：两个带楔形模的轧辊，以相同的方向旋转，带动圆形坯料旋转，坯料在楔形模的作用下，轧制成各种形状的台阶轴。这种横轧的变形主要为径向压缩和轴向延伸。

c. 斜轧：轧件在旋转方向相同、纵轴线相互交叉（或倾斜）的两个或三个轧辊之间沿自身轴线边旋转、边变形、边前进的轧制 [图 0-1 (c)]。斜轧是介于纵轧和横轧之间的一种轧制方式。斜轧成形主要分三类。

(a) 无缝钢管生产中应用的斜轧，包括斜轧穿孔、斜轧延伸、均整和斜轧定径。

(b) 孔型斜轧，其特点是轧辊表面上带有变高度、变螺距的轧槽，能轧制出长度上变断面的回转体产品，如钢球轧制、丝杠轧制等。

(c) 仿形斜轧，它借助于液压或机械的仿形板控制三个旋转的锥形轧辊，作相对于轧件中心的径向运动以完成变断面轴的轧制。仿形斜轧主要用来生产比较长的变断面轴产品，如纺织锭杆、刀剪、手术器械等毛坯料。

② 挤压。金属在挤压缸中在推力的作用下，从模孔中挤出的塑性变形过程。挤压分为正挤压和反挤压（图 0-2）。挤压的方法可生产管、棒、型材。

③ 锻压。金属坯料在锻压机械的压力作用下，产生压缩塑性变形的过程（图 0-3）。锻压可用于生产棒、饼、环、条材等制品。锻压可分为模锻、自由锻、特种锻造等。

a. 模锻：模锻又分为开式模锻和闭式模锻。金属坯料在具有一定形状的锻模膛内受压变形而获得锻件 [图 0-3 (a)]，模锻一般用于生产重量不大、批量较大的零件。

b. 自由锻：指在上、下砧之间直接对坯料施加外力，使坯料产生变形而获得所需的几何形状及内部质量的锻件的加工方法 [图 0-3 (b)]。自由锻的基本工序包括镦粗、拔长、冲孔、切割、弯曲、扭转、错移及锻接等。

c. 特种锻造：特种锻造包括辊锻、楔横轧、径向锻造、液态模锻等锻造方式，这些方式都比较适用于生产某些特殊形状的零件。

④ 拉拔。金属坯料在拉力作用下，从小于坯料断面的模孔中拉出的塑性变形过程（图

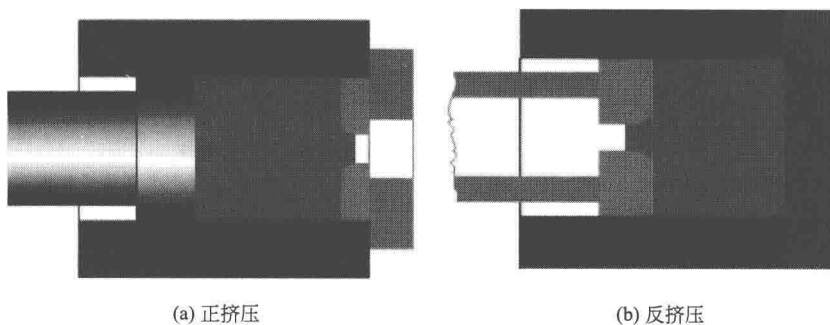


图 0-2 挤压示意图

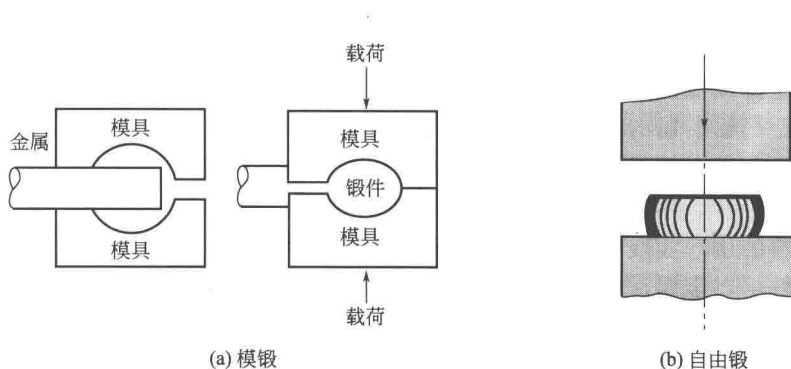


图 0-3 锻压示意图

0-4)。拉拔可用于生产线材、丝材、管材和型材等断面小的长制品。

⑤ 冲压（拉深）。金属板料在外力作用下冲入凹模的塑性变形过程（图 0-5）。可用于生产各种环形件和壳体。

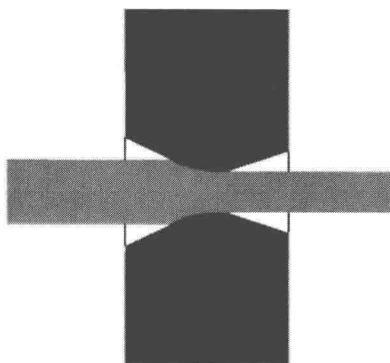


图 0-4 拉拔示意图

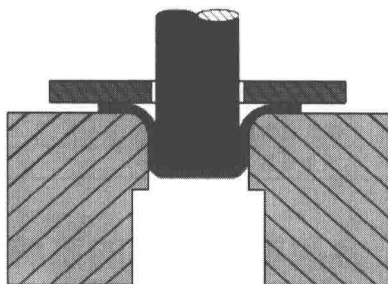


图 0-5 冲压示意图

(2) 按金属坯料形状分类

按金属坯料形状，分为块状金属的加工过程（如轧制、拉拔、挤压、锻造等），以及板状金属的加工过程（如冲压、深冲、辊弯、旋压等）。这两类加工过程的特点如表 0-1 所示。

(3) 按加工时工件的温度特征分类

按加工时工件的温度特征，可分为冷加工、温加工、热加工。



表 0-1 两类加工过程的特点

序号	块状金属成形过程	片(板)状金属成形过程
1	坯料呈块状,方坯、扁、圆	坯料呈片状:板、片
2	通过显著地减少坯料的横截面积,使之获得复杂的几何形状、性能	坯料的厚度基本不变,通过弯曲、拉伸方式,使之获得复杂的几何形状、性能
3	应力状态和应变状态通常是三维的	应力状态和应变状态类型是平面的
4	塑性变形区内,接触边界占主要的,自由边界较小	至少有一个表面为自由表面,有时有两个自由表面
5	主变形为压缩应力,限制最大变形程度的是出现裂纹(丝材的拉拔除外)	主变形是拉伸应力,限制最大变形程度的是塑性失稳
6	弹性变形量很小,与塑性变形量相比常可忽略,视为刚塑性材料	弹性变形量与塑性变形量在数量上相当而不可忽略,弹性恢复、弹性后效等问题不可忽略

理论上把再结晶温度以上的加工(变形)称为“热加工(变形)”,把低于再结晶温度的加工称为“冷加工”。因此冷、热加工不能以温度高、低来区分,在高温加工的不一定是热加工。在室温或低温加工的也不一定是冷加工,而需看变形温度与金属再结晶温度的关系。低熔点金属铅、锡的再结晶温度低于室温(表 0-2),因此铅和锡在室温下的加工属于热加工。钨的起始再结晶温度约 1200℃,因此在 1000℃拉制钨丝属于冷加工。由此可见,再结晶温度是区分冷、热加工的分界线。

在金属材料的生产实践中,通常将其塑性加工分为三类,即冷加工、温加工、热加工。由于除了少数低熔点金属材料外,绝大多数工程应用的金属材料的再结晶温度高于室温,因此在工程实践中,所谓冷加工即是指在室温时的加工,即金属材料在发生塑性变形时不对其加热;温加工是指在金属材料的再结晶温度以下、室温以上的加工;热加工即是金属材料的再结晶温度以上的加工。在工程上,也有学者根据变形温度和熔点的比,将 $T/T_m < 0.2$ 的变形温度称为冷变形, $T/T_m \approx 0.3 \sim 0.4$ 的变形温度称为温变形, $T/T_m \approx 0.6 \sim 0.8$ 的变形温度为热变形,温变形温度范围对于黑色金属约为 200~850℃;对于奥氏体不锈钢为 200~400℃;对于铝为室温至 250℃;铜及其合金是室温至 350℃。

金属材料的冷加工、温加工、热加工各有其特点,在后续予以详细介绍。

表 0-2 某些金属的熔点和再结晶温度

金属	熔点/℃	再结晶温度/℃	金属	熔点/℃	再结晶温度/℃
Sn	232	-4	黄铜(60Cu-40Zn)	900	475
Pb	327	-4	Fe	1538	450
Zn	420	10	Ni(99.999%,质量分数)	1455	370
Al(99.999%,质量分数)	660	80	Mo	2610	900
Cu(99.999%,质量分数)	1085	120	W	3410	1200

0.3 金属塑性加工的系统观

系统是指具有特定功能的,相互间具有有机联系的许多要素所构成的一个整体。系统的特点在于整体性、相关性、目的性。系统工程的主要任务是根据总体协调的需要,运用科学技术方法,对系统的构成要素等进行分析研究,借以达到最优化设计、最优控制和最优管理的目标。金属塑性加工系统工程,是把组成塑性加工过程的各个相对独立部分视为一个系统,来进行过程综合以实现系统最优化。

当然也可以把金属材料生产制备的加工-结构-性能-效能各要素,视为一个大系统来进行分析研究和过程综合,借以达到最优化设计、最优化控制的目的。金属材料的加工-结构-性能-效能各要素相互影响的关系,如图 0-6 所示。

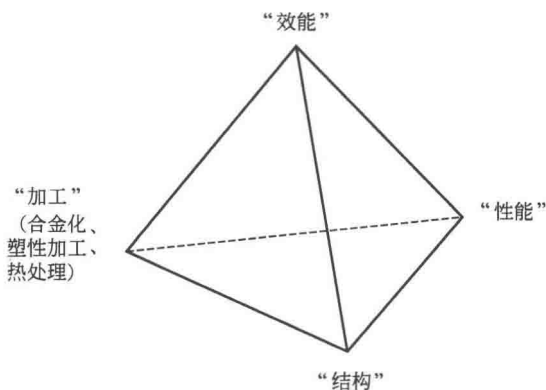


图 0-6 金属材料的加工-结构-性能-效能之间的关系

对于金属材料而言，“加工”的主要方法有以下几种。

① 合金化（又称化学冶金）。即通过改变材料的化学成分（即添加或者减少某些化学元素），来改善材料性能。

② 热处理（物理冶金）。是指在不改变材料的化学成分的情况下，主要通过控制材料的加热、冷却、相变等物理手段改变材料的组织结构，从而改变材料的性能。

③ 塑性加工（力学冶金）。即通过力的作用使材料产生塑性变形而改变几何形状和改善性能，这正是塑性加工（力学冶金）的基本特征。

“结构”是指材料系统内各组成单元之间的相互联系和相互作用方式。从尺度上结构分为宏观结构、显微结构、亚微观结构、微观结构等不同的层次。在金属材料的塑性加工过程中，通常关注的是晶粒尺寸、形状、取向，晶体缺陷以及多相组织中的各相分布（如第二相粒子的尺寸、形状、分布、体积含量等）。

“性能”对于金属结构材料主要指力学性能，如弹性、塑性、韧性、强度/硬度等，当然也关注其物理性能、化学性能等。影响金属性能主要有以下因素。

① 结构。如原子结构、晶体结构、微观组织结构、滑移（滑移系、各向异性等）。

② 缺陷。如点缺陷（空位、间隙、杂质原子）、线缺陷（位错）、面缺陷（晶界）、体缺陷 [孔洞、夹杂物（如氧化物、碳化物、硫化物）]。

③ 晶界。性能取决于晶粒尺寸，如：大晶粒金属的强度和塑性较低，拉伸后表面粗糙等。

“效能”是指金属材料在服役过程中表现出来的行为，所谓服役过程涉及载荷与应力、机械接触、温度变化、腐蚀环境等，行为则包括承载能力、可靠性、持久性、安全性、使用寿命等。效能是材料变为实用的桥梁，是材料科学与工程成为跨学科的纽带。

本教材主要讨论的是金属材料的塑性加工各工艺参数对结构-性能（效能）的影响规律与机制。金属在承受塑性加工时，不仅要产生塑性变形使金属获得所需的最终形状，而且还会使其组织结构和性能发生改变；如果对已发生了塑性变形的金属进行加热，金属的组织结构和性能又会发生变化。材料的化学成分一定时，组织结构是由加工工艺（如冷加工、热加工、热处理、形变热处理等）决定的，组织结构的改变必然导致性能（效能）的改变。为了更充分发挥工艺改变组织结构的作用，可以适当调整化学成分（合金化）以获得更好的效果。因此，塑性变形是调整优化组织结构和性能（效能）的一个重要手段，分析这些过程的实质，了解各种影响因素及规律，对设计和优化金属材料的塑性加工工艺，控制材料的组织和性能，具有重要意义。

既可将加工(合金化、塑性变形、热处理)-结构-性能-效能视为金属材料制备加工的大系统,也可将金属塑性加工过程视作一个系统。金属塑性加工系统可认为由塑性形变区——载荷作用下的工具与收敛孔腔、模腔中的塑性形变区;摩擦边界/边界条件——塑性变形与刚性工具间的界面材料中的塑性-弹性转变区;坯料——未进入变形区的金属,反映加工条件下变形物体的性能特征;成品的性能和特征,即离开变形区的成品组织性能和特性等要素构成。金属材料塑性加工过程中影响金属制品质量的因素,包括变形过程的诸多方面,例如坯料的几何学和性能影响变形过程、产品的性能;变形过程也影响产品的几何学和性能;边界条件受坯料几何学和性能以及摩擦条件等的影响,也影响变形区的金属流动和产品的几何学和性能。各个要素是互相影响和互相制约的。

建立金属材料的加工-结构-性能-效能的大系统观以及塑性加工自身的系统观,有利于在金属塑性加工的理论学习与科研生产实践中,将各种影响因素/各部分视作既是各自独立的子系统,又是互相渗透和制约的为一个达到一个统一目标的综合体,对其进行过程综合、整体设计或者分析工艺参数,实现金属加工工艺和金属制品质量最优化。

0.4 金属塑性加工相关理论发展概况

金属塑性加工理论是一门基于金属塑性变形的物理学、物理-化学、金属学与力学基础上的应用技术理论。

发现金属材料的塑性并利用其加工金属制品可追溯至2000多年前的青铜器时代,但是对金属材料的塑性变形的微观机理的认识,则是与20世纪30年代位错概念的提出分不开的。金属学的研究始于19世纪中叶,塑性变形物理的研究则始于20世纪20年代物理学家探明晶体结构的奥秘之后,当时的科学家们掌握了金属单晶体技术,开展了单晶体塑性变形规律性的研究,通过实验研究阐明了塑性变形的晶体学特征。金属为什么能够塑性变形?为什么不改变化学成分,仅依靠塑性变形就能大幅度地改变性能?为什么完整晶体屈服强度的理论值比实测值高出千倍以上?这些导致20世纪30年代中期位错理论应运而生,位错理论的提出与发展历程如下:1907年沃尔特拉(Volterra)提出了位错的概念;1926年弗兰克尔发现理论晶体模型刚性切变强度与实测临界切应力的巨大差异,理论计算值为 $G/30$,而实际屈服强度比理论值低3~4个数量级;1934年波朗依(M. Polanyi, 1891—1976)、泰纳(G. Taylor, 1886—1975)、奥罗万(E. Orowan, 1902—1989)几乎同时提出了位错的模型;1939年柏格斯(J. M. Burgers)提出用柏氏矢量表征位错;1947年,柯垂耳(Cottrell)提出溶质原子与位错的交互作用并解释了低碳钢的屈服现象;1947年,肖克莱(Shockley)描绘了面心立方形成扩展位错的过程;1950年,弗兰克(Frank)和瑞德(Read)同时提出位错增殖机制;1956年,门特(Menter)直接在电镜观察了铂钛青花晶体中位错的存在,赫希(Hirsch)等应用相衬法在TEM中直接观察到了晶体中的位错。位错理论被实验所证实及其发展完善,奠定了晶体塑性变形微观理论的基础。

作为塑性成形理论的重要基础的塑性理论的形成与发展也经历了一百多年的历史。在此其间提出的一些经典理论与方法,如法国工程师屈雷斯加(H. Tresca)1864年提出最大剪应力屈服准则,米塞斯(Von Mises)于1913年提出的Mises屈服准则, M. Levy 1871年提出了Levy-Mises应力应变增量关系, B. Saint-Venant在1870年提出的应力应变速率方程, A. Reuss在1930年提出的弹塑性应力应变关系, H. Hencky、H. Geringer、Cauchy、Rieman等于1940年提出的滑移线法, A. A. Mapkob、R. Hill、W. Pragar等于1950年提出的极值分析方法,小林史郎、C. H. Lee等1970年提出的刚-塑性有限元解析法等,这些奠定了塑性力学的理论基础。



与塑性成形过程紧密相关的摩擦和润滑，也既是一个古老的话题，又富有新的内涵。人类在长期生活、生产实践中很早就觉察摩擦和润滑的重要性。达·芬奇早在1508年提出了摩擦力与载荷成正比的定律。但对摩擦和润滑的本质和规律的深入研究和系统认识，则始于20世纪中叶。摩擦学(Tribology)作为一门新兴边缘学科的提出和形成是在1966年。塑性成形过程的摩擦和润滑既重要又复杂，且具有一系列特点，往往直接影响加工过程的能耗和产品质量。因此摩擦和润滑已成为塑性加工理论的重要组成部分。

随着科学技术的迅猛发展，金属材料织构及各向异性的研究开发、剧烈塑性变形理论等正在成为塑性成形加工理论的重要组成部分。

金属材料加工制备的各个环节，都会产生不同类型的织构。例如，金属凝固过程中的选择生长，会形成铸造织构；金属塑性加工时，由于各晶粒发生定向转动，因而形成变形织构；变形后的金属在加热过程中会生成再结晶织构。金属材料织构的普遍性及其对材料性能的重要影响，以及利用金属材料的各向异性是改善传统金属材料的一个重要手段，因此金属材料各向异性的开发研究已成为当前材料领域一个极为重要的发展方向。取向分布函数自20世纪60年代问世以来，其发展和应用使传统的织构概念在一定程度上得到了更新，并使材料织构的定量分析成为可能。

纳米结构材料所具有的独特性能及应用前景引起了学界和制造业的广泛关注和浓厚兴趣，纳米结构材料的制备技术、性能与应用已成为当代材料领域的研究热点。由于塑性变形的办法能够制备无残余空隙、界面清洁的块体超细晶/纳米晶材料，可适用于大部分可进行塑性变形的金属材料，从而被认为是最有希望实现大批量工业化生产的有效途径之一。20世纪80年代初以来开发出的剧烈塑性变形方法，如Segal等于1977年提出的等径角挤压法(ECAP)，Valiev 提出的高压扭转(HPT)，Salishchev于1992年提出的多向锻造法(MF)，Saito于1998年提出的累积叠轧焊法(ARB)，21世纪以来卢柯等提出的动态塑性变形法等，使得块体纳米结构材料的结构、性能及应用正在不断得到拓展和提高。

综上所述，金属塑性加工理论是一门综合性的应用技术学科，它必然随生产实践和其他相关学科的发展而不断发展完善。

0.5 金属塑性加工技术的发展方向

材料加工技术主要有以下发展方向。

① 传统技术的高效化、高精度化，即将计算机技术、信息技术、先进控制技术应用于传统加工技术，以实现高速、全自动、提高生产效率，扩大产品范围，实现形状、尺寸的精确控制。

② 发展先进成形加工技术，以实现高附加值材料、难加工材料的加工，实现组织性能的精确控制。目前，有发展前景的先进成形加工技术，有连续定向凝固技术、超塑性成形技术、等温成形技术、低温强加工技术、分散成形技术等。

③ 材料设计、制备与成形加工一体化，以提高成分、性能、加工工艺的可设计性，实现材料与零部件的高效、近终形、短流程成形（过程的一体化，是材料设计时代的特征之一）。目前的典型技术有激光快速成形/3D打印技术——分层加工、迭加成形，喷射沉积技术，半固态加工，连续铸挤、连续铸轧等。

④ 开发新型成形加工技术，发展新材料，目前的典型技术有：高能率加工技术、双带快冷带材制备技术、双结晶器连铸技术、双流铸造技术、多坯料挤压技术、电磁成形技术等。

⑤ 计算机模拟与过程仿真技术，以缩短研发周期，优化成形方法和工艺，实现全过程



的精确设计与控制。目前的典型技术有各层次的数值模拟,各种工艺过程仿真。

⑥ 智能制备与加工技术,即材料组织性能设计、零部件设计、制备与成形加工过程的实时在线监测和反馈控制融为一体的制备加工技术。以实现全过程的精确设计与控制,保证产品质量的均匀性与一致性,提高制备与加工的稳定性与可靠性,减少原材料、能源的消耗与废弃物的排放。

金属材料传统塑性加工,除了上述的共性方向外,还主要有以下发展方向。

① 节约资源。用尽量少的原材料生产出要求的形状、尺寸、强度、塑性以及其他物理、化学性能的产品。为此,合理利用资源选择最佳材质或通过变形与热处理相配合以改善材质、研究轻型薄壁断面和周期断面以及复合材料等高效制品的成形成为今后节约资源的重要课题。

② 节约能源。缩短工艺流程、降低加工温度、变热加工为冷加工、减少或省去中间退火、降低材料的流变应力、提高塑性等方面的技术开发成为今后节约能源的重要课题。

③ 实现最佳的加工条件。研究创造最佳的工艺条件和使工艺内容定量化以及计算机控制,并进行最优控制。

总之,随着科学技术的进步,金属材料塑性加工这一传统产业正向着资源节约型、环境友好型工业领域发展。

0.6 本课程的主要内容和教学任务

金属塑性加工原理是一门专业基础课程,本课程的主要内容包括金属塑性变形理论基础概要,塑性变形和组织结构(织构)与性能的相互关系,塑性加工过程中的塑性行为、摩擦与润滑、不均匀变形与残余应力、断裂,以及强韧性能控制等。

本教材系统地整理上述传统内容,注重相关理论在金属塑性加工工程实践中的运用,并力图反映当代科学技术的新进展。各章主要内容介绍如下。

绪论部分注重介绍了金属塑性加工的分类方法,金属塑性加工的系统观,加工-结构-性能-效能的相互关系,金属塑性加工理论与技术的发展方向等内容。

第1章金属塑性变形基础理论,本章的主要内容包括金属塑性变形机制,金属单晶体、金属多晶体、固溶体合金、多相合金的塑性变形特点等。注重介绍了扩散性塑性变形机理,晶粒取向(织构)、晶粒尺寸对多晶体塑性变形的影响,静态应变时效、动态应变时效等内容。

第2章塑性加工对金属组织结构与性能的影响规律,主要内容包括:塑性加工的主要工艺参数及其对流变应力的影响,冷加工、热加工、温加工以及剧烈塑性变形对组织结构与性能的影响,形变热处理等。着重介绍了变形程度、温度、速度等主要工艺参数对流变应力的影响, Z 参数、动态再结晶、剧烈塑性变形等内容。

第3章金属塑性加工过程中的织构与各向异性,主要介绍了晶体取向与织构、塑性变形织构、织构与各向异性等内容,并着重介绍织构的基本概念及织构形成的基本理论。

第4章金属在塑性加工过程中的塑性行为,主要内容包括:金属的塑性和塑性指标,影响塑性的因素,金属材料的可成形性,超塑性。着重介绍了可成形性、超塑性等内容。

第5章金属塑性加工过程中的摩擦与润滑,主要内容有:塑性加工中摩擦的特点及作用,摩擦的分类及机理,摩擦系数,摩擦导致的磨损,润滑目的和分类,润滑机理,润滑剂,塑性加工中常用的摩擦系数和润滑方法的改进以及摩擦与润滑的实践应用。着重阐述了在金属塑性加工过程中所涉及的摩擦与润滑的基本概念、规律。

第6章金属塑性加工过程中的不均匀变形与残余应力,主要内容包括:金属质点流动的