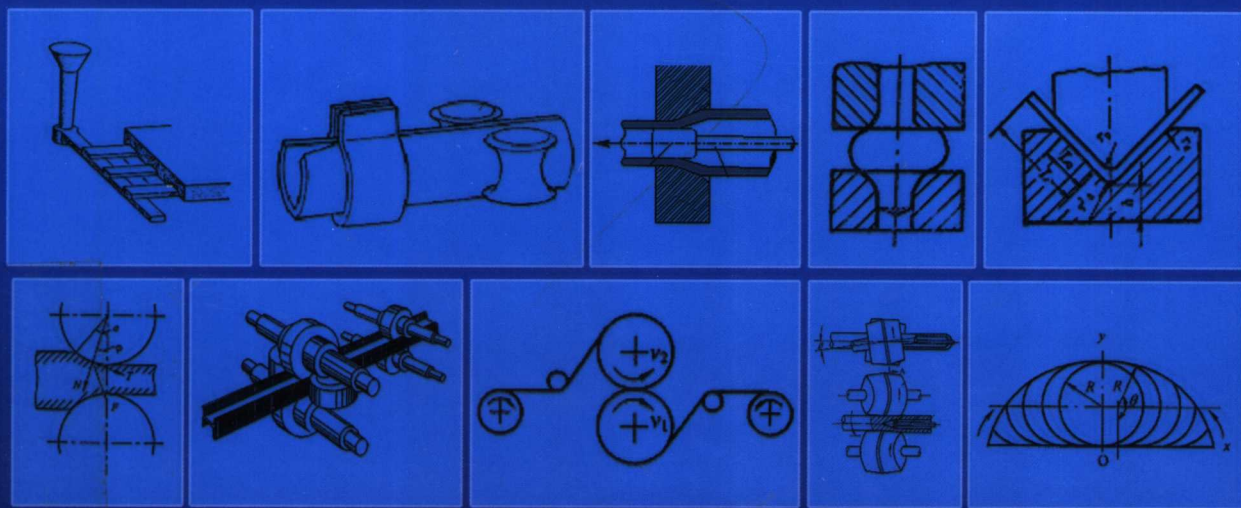




普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 材料成形工艺学

齐克敏 丁 桦 主编



冶金工业出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 材料成形工艺学

· 齐克敏 丁 桦 主编

冶金工业出版社

2006

## 内 容 简 介

本书系统阐述了材料成形过程的基本原理与生产工艺。全书共分三篇,内容包括:液态成形及焊接成形,挤压、拉拔成形以及锻造、冲压成形,轧制成形的原理、金属流动规律、力能参数计算、各种成形的工艺研究和设计方法以及各种成形制品的形状精度控制和质量控制等,同时还介绍了各种成形的新技术及发展趋势。各篇后分别附有思考题和练习题以备读者检验自己对所学内容掌握情况。

本书是普通高等学校机械类、材料工程类专业本科教学用书,也可供研究生和相关工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

材料成形工艺学/齐克敏,丁桦主编. —北京:冶金工业出版社, 2006. 1

普通高等教育“十五”国家级规划教材  
ISBN 7-5024-3865-3

I. 材… II. ①齐… ②丁… III. 金属加工—成型—  
工艺学—高等学校—教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 136104 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 程志宏 美术编辑 李 心

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2006 年 1 月第 1 版, 2006 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 37.5 印张; 1002 千字; 581 页; 1-3000 册

69.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

本书是根据2002年教育部“教高函[2002]17号”文件所批复的“十五”国家级规划教材组织编写的普通高等学校教学用书。

当今我们已跨入了技术经济时代,这个时代的核心是科技,其关键在于人才,因此教育是基础。为了适应技术经济时代要求,培养具有竞争能力的人才,学校承担着提高受教育者的科技创新能力、创造能力以及就业创业能力的重任,为此教育必须改革,要加强基础科学,拓宽专业面,以增强学生的竞争能力。国家教育部于1998年颁布了“普通高等学校本科专业目录”。在该目录中将原金属压力加工、铸造、锻造、焊接、热加工、塑性成形专业合并成“材料成形与控制工程”专业。新的专业课程设置打破了过去专业面过窄,分工过细的计划经济模式,适应了市场经济、技术经济模式的要求。基于旧的专业课教材已不再适应新专业课教学要求,我们组织了有较丰富教学经验的教师,在总结其多年教学实践的基础上编写了《材料成形工艺学》一书。

本书在编写过程中本着“推陈出新、薄古厚今,加强理论,突出重点,力避重叠繁琐,强调理论联系实际,有利培养学生创新意识”的指导思想,理论与工艺并重,充分吸收各专业领域原教材的精华,认真研究了专业教学的要求,并尽可能使书的内容接近学科的前沿和体现创新发展的思路,力求真实地反映学科的发展水平。

全书共分三篇。第一篇为金属液态与半固态及焊接成形原理与工艺,主要介绍液态成形工艺原理,金属液态砂型成形工艺,连铸及其他特种液态成形工艺;焊接成形原理,各种焊接方法及工艺;第二篇为金属挤压、拉拔与锻压原理及工艺,主要介绍金属挤压、拉拔时金属流动规律,制品的组织性能控制,力能参数计算方法及各种挤压、拉拔工艺及相关新技术,锻造、冲压成形原理、自由锻造、模锻工艺,冲压、冲裁、弯曲、拉深与特种冲压工艺及产品质量控制;第三篇为轧制理论与工艺,主要介绍轧制时金属的流动规律,变形原理,力能参数计算方法。型材、板材和管材的轧制工艺,形状及质量控制方法,工艺规程设计方法及各种轧制新工艺、新技术和发展趋势。全书内容简洁而充实,系统性强,理论联系实际,既有深度,亦有广度。各篇后分别附有思考题和习题以备读者学习之用。本书可作为普通高等学校“材料成形与控制工程”专业及相关专业教学用书,亦可供工程技术人员参考。

全书由东北大学齐克敏、丁桦主编,参加本书编写的有贾光霖(第一篇第1、2、5章及第4章的一部分);辛啟斌(第一篇第3章及第4章的一部

分); 吕朝阳 (第一篇第 6 章); 丁桦 (第二篇第 1、2、3、5、6、7、8、10 章); 曹富荣 (第二篇第 4、9 章); 赵宪明 (第二篇第 11、12、13、14、15、16、17、18、19 章); 邱春林 (第三篇第 1、2、3、4、5、6 章及第 7 章的一部分); 高秀华 (第三篇第 8、9、10、16、17、18、19、20 章); 齐克敏 (第三篇第 11、12、13、14、15 章及第 7 章的一部分)。全书由王廷溥教授、胡林教授担任主审, 并邀请张国志教授审阅了第一篇, 李宝绵副教授审阅了第三篇的挤压和拉拔部分, 上述教授对本书提出了许多宝贵意见, 编者对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于编者水平有限, 书中还可能存在一些不足, 敬请读者批评、指正。

编 者

2005 年 9 月于东北大学

# 目 录

## 第一篇 金属液态与半固态及焊接成形原理与工艺

|                                   |    |                                         |    |
|-----------------------------------|----|-----------------------------------------|----|
| 1 金属液态成形概述.....                   | 1  | 3.2.1 液态金属与砂型之间的<br>传热和传质现象 .....       | 12 |
| 1.1 金属液态成形工艺特点.....               | 1  | 3.2.2 液态金属对砂型的冲击<br>和冲刷 .....           | 17 |
| 1.2 金属液态成形主要工艺方法.....             | 2  | 3.2.3 砂型中的气体 .....                      | 18 |
| 2 金属液态成形工艺原理.....                 | 3  | 3.3 液态金属与砂型的化学和<br>物理化学作用 .....         | 20 |
| 2.1 液态金属的充型过程.....                | 3  | 3.3.1 液态金属与砂型之间的<br>气体 化学反应 .....       | 20 |
| 2.2 液态金属充型过程的<br>水力学特点.....       | 3  | 3.3.2 液态金属向砂型的渗入过程<br>及与砂型的物理化学反应 ..... | 21 |
| 2.3 液态金属充型过程的<br>水力学计算.....       | 4  | 3.3.3 砂型表面合金元素的作用 .....                 | 24 |
| 2.3.1 计算目标.....                   | 4  | 3.4 湿砂型成形工艺 .....                       | 27 |
| 2.3.2 计算过程及结果.....                | 5  | 3.4.1 湿砂型工艺特点 .....                     | 27 |
| 2.4 液态金属充型能力及停止<br>流动机理.....      | 6  | 3.4.2 湿砂型用型砂的基本性能 .....                 | 27 |
| 2.4.1 充型能力 .....                  | 6  | 3.4.3 湿砂型用原材料 .....                     | 31 |
| 2.4.2 停止流动机理 .....                | 7  | 3.4.4 湿砂型用型砂的成分<br>及制备 .....            | 41 |
| 2.4.3 液态金属充型过程的主要<br>缺陷及防止措施..... | 8  | 3.4.5 高密度湿砂型的特性 .....                   | 44 |
| 2.5 液态金属成形凝固动态曲线.....             | 8  | 3.5 树脂砂型成形工艺 .....                      | 46 |
| 2.5.1 液态金属凝固动态曲线.....             | 8  | 3.5.1 热法覆膜树脂砂 .....                     | 46 |
| 2.5.2 液态金属凝固方式.....               | 9  | 3.5.2 热芯盒树脂砂 .....                      | 47 |
| 2.5.3 影响金属成形凝固方式的<br>因素 .....     | 10 | 3.5.3 冷芯盒树脂砂 .....                      | 48 |
| 3 金属液态砂型成形工艺 .....                | 11 | 3.5.4 酸催化树脂自硬砂 .....                    | 50 |
| 3.1 金属液态砂型成形方法和<br>工作条件 .....     | 11 | 4 金属液态成形特种工艺 .....                      | 53 |
| 3.1.1 砂型成形方法 .....                | 11 | 4.1 连铸工艺 .....                          | 53 |
| 3.1.2 砂型结构 .....                  | 11 | 4.1.1 连铸工艺的发展概况 .....                   | 53 |
| 3.1.3 砂型工作条件 .....                | 12 | 4.1.2 连铸机及主要产品 .....                    | 53 |
| 3.2 液态金属与砂型的物理作用 .....            | 12 | 4.1.3 连铸工艺与铸坯质量 .....                   | 54 |
|                                   |    | 4.2 电磁铸造 .....                          | 61 |
|                                   |    | 4.2.1 基本原理 .....                        | 61 |

|                                |    |                        |     |
|--------------------------------|----|------------------------|-----|
| 4.2.2 电磁铸造技术的应用 .....          | 62 | 6 焊接成形工艺 .....         | 94  |
| 4.2.3 软接触电磁连铸 .....            | 62 | 6.1 概述 .....           | 94  |
| 4.3 金属型成形工艺 .....              | 63 | 6.1.1 焊接的定义 .....      | 94  |
| 4.3.1 金属型成形的特性 .....           | 64 | 6.1.2 焊接过程的物理本质 .....  | 94  |
| 4.3.2 金属型成形工艺 .....            | 66 | 6.1.3 焊接方法的分类 .....    | 95  |
| 4.3.3 金属型成形工艺研究<br>发展趋势 .....  | 68 | 6.1.4 焊接的特点 .....      | 95  |
| 4.4 负压实型铸造工艺 .....             | 69 | 6.1.5 焊接方法的应用 .....    | 95  |
| 4.4.1 负压实型铸造工艺过程<br>及特点 .....  | 69 | 6.2 焊接成形原理 .....       | 96  |
| 4.4.2 负压实型铸造工艺装置<br>及生产线 ..... | 71 | 6.2.1 焊接电弧 .....       | 96  |
| 4.4.3 模样材料及制模技术 .....          | 74 | 6.2.2 焊接热循环 .....      | 97  |
| 4.4.4 负压实型铸造用涂料 .....          | 75 | 6.2.3 焊接化学冶金过程 .....   | 97  |
| 4.4.5 负压实型铸造工艺要点 .....         | 77 | 6.2.4 焊缝金属的凝固和组织 ..... | 99  |
| 4.5 快速成形工艺 .....               | 79 | 6.2.5 焊接接头的组织和性能 ..... | 99  |
| 4.5.1 成形方式的分类 .....            | 79 | 6.2.6 焊接变形和焊接应力 .....  | 102 |
| 4.5.2 快速成形技术原理 .....           | 80 | 6.2.7 焊接缺陷 .....       | 106 |
| 4.5.3 快速成形方法 .....             | 81 | 6.2.8 焊接检验 .....       | 108 |
| 4.5.4 快速成形在铸造中的应用 .....        | 83 | 6.3 焊接方法简介 .....       | 109 |
| 5 半固态金属成形工艺 .....              | 88 | 6.3.1 焊条电弧焊 .....      | 109 |
| 5.1 半固态金属成形工艺概况 .....          | 88 | 6.3.2 埋弧自动焊 .....      | 109 |
| 5.2 半固态金属浆料制备方法 .....          | 89 | 6.3.3 气体保护焊 .....      | 110 |
| 5.2.1 机械搅拌法 .....              | 89 | 6.3.4 电渣焊 .....        | 111 |
| 5.2.2 电磁搅拌法 .....              | 90 | 6.3.5 等离子弧焊 .....      | 112 |
| 5.2.3 其他方法 .....               | 90 | 6.3.6 电子束焊接 .....      | 113 |
| 5.3 半固态金属成形原理与<br>工艺方法 .....   | 91 | 6.3.7 激光焊接 .....       | 114 |
| 5.3.1 流变铸造 .....               | 91 | 6.3.8 电阻焊 .....        | 114 |
| 5.3.2 触变铸造 .....               | 91 | 6.3.9 摩擦焊 .....        | 116 |
| 5.3.3 半固态金属轧制 .....            | 91 | 6.3.10 扩散焊 .....       | 117 |
| 5.4 半固态金属成形工艺特点 .....          | 92 | 6.3.11 高频焊 .....       | 118 |
|                                |    | 6.3.12 超声波焊 .....      | 119 |
|                                |    | 6.3.13 钎焊 .....        | 119 |
|                                |    | 复习思考题 .....            | 122 |
|                                |    | 参考文献 .....             | 124 |

## 第二篇 金属挤压、拉拔与锻压原理及工艺

|                |     |                      |     |
|----------------|-----|----------------------|-----|
| 1 金属挤压概述 ..... | 126 | 1.2 挤压法的优缺点 .....    | 127 |
| 1.1 基本方法 ..... | 126 | 1.3 挤压制品的种类及用途 ..... | 128 |
|                |     | 1.4 挤压技术的发展与现状 ..... | 128 |

|                                   |     |                                   |     |
|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 2 挤压时金属的流动 .....                  | 130 | 4.1.2 坯料长度的影响 .....               | 145 |
| 2.1 正向挤压圆棒材时金属的<br>流动 .....       | 130 | 4.1.3 变形程度的影响 .....               | 145 |
| 2.1.1 填充挤压阶段金属的<br>流动行为 .....     | 130 | 4.1.4 挤压速度的影响 .....               | 146 |
| 2.1.2 基本挤压阶段金属的<br>流动行为 .....     | 131 | 4.1.5 模角的影响 .....                 | 146 |
| 2.1.3 紊流挤压阶段 .....                | 133 | 4.1.6 摩擦的影响 .....                 | 146 |
| 2.2 实心型材正向挤压时金属<br>流动的特点 .....    | 133 | 4.2 挤压力计算 .....                   | 147 |
| 2.3 管材和空心型材挤压 .....               | 134 | 4.2.1 棒材单孔挤压力 .....               | 147 |
| 2.4 反向挤压时金属的流动 .....              | 134 | 4.2.2 型材挤压力计算 .....               | 148 |
| 2.5 影响挤压时金属流动的因素 .....            | 135 | 4.2.3 管材挤压力计算 .....               | 148 |
| 2.5.1 挤压方法 .....                  | 135 | 4.2.4 反向挤压力计算 .....               | 149 |
| 2.5.2 金属与合金种类的影响 .....            | 135 | 4.2.5 穿孔力计算 .....                 | 149 |
| 2.5.3 工模具结构和形状的影响 .....           | 136 | 4.2.6 分流组合模挤压力计算 .....            | 151 |
| 2.5.4 挤压温度的影响 .....               | 136 | 4.2.7 连续挤压 (Conform)<br>力计算 ..... | 152 |
| 2.5.5 变形程度的影响 .....               | 136 | 4.2.8 挤压力计算简式与<br>参数的确定 .....     | 154 |
| 2.5.6 挤压速度的影响 .....               | 137 | 4.3 挤压力公式计算例题 .....               | 157 |
| 2.6 挤压时的典型流动类型 .....              | 137 | 5 挤压工艺 .....                      | 159 |
| 3 挤压制品的组织性能及<br>质量控制 .....        | 138 | 5.1 挤压工艺参数的确定 .....               | 159 |
| 3.1 挤压制品的组织 .....                 | 138 | 5.1.1 挤压温度的选择 .....               | 159 |
| 3.1.1 挤压制品组织的不均匀性 .....           | 138 | 5.1.2 挤压速度的选择 .....               | 160 |
| 3.1.2 粗晶环 .....                   | 138 | 5.1.3 挤压过程优化 .....                | 160 |
| 3.1.3 层状组织 .....                  | 140 | 5.2 挤压时的润滑 .....                  | 161 |
| 3.2 挤压制品的力学性能 .....               | 140 | 5.2.1 铝及铝合金 .....                 | 161 |
| 3.2.1 力学性能的不均匀性 .....             | 140 | 5.2.2 铜及铜合金 .....                 | 161 |
| 3.2.2 挤压效应 .....                  | 141 | 5.2.3 高温高强合金 .....                | 162 |
| 3.3 挤压制品的缺陷及防止措施 .....            | 142 | 5.3 锭坯尺寸的选择 .....                 | 162 |
| 3.3.1 挤压裂纹 .....                  | 142 | 5.3.1 锭坯尺寸选择的原则 .....             | 162 |
| 3.3.2 挤压缩尾 .....                  | 143 | 5.3.2 挤压比的选择 .....                | 162 |
| 3.3.3 气泡与起皮 .....                 | 144 | 5.3.3 锭坯长度的确定 .....               | 162 |
| 3.3.4 扭拧、弯曲和波浪 .....              | 144 | 5.4 轻金属挤压 .....                   | 163 |
| 4 挤压力 .....                       | 145 | 5.4.1 铝合金挤压 .....                 | 163 |
| 4.1 影响挤压力的因素 .....                | 145 | 5.4.2 镁合金挤压 .....                 | 164 |
| 4.1.1 挤压温度的影响 .....               | 145 | 5.5 重金属挤压 .....                   | 165 |
| 4.1.2 坯料长度的影响 .....               | 145 | 5.6 稀有金属挤压 .....                  | 166 |
| 4.1.3 变形程度的影响 .....               | 145 | 5.7 钢挤压 .....                     | 166 |
| 4.1.4 挤压速度的影响 .....               | 146 | 6 挤压新方法 .....                     | 168 |
| 4.1.5 模角的影响 .....                 | 146 | 6.1 静液挤压 .....                    | 168 |
| 4.1.6 摩擦的影响 .....                 | 146 | 6.2 连续挤压 .....                    | 168 |
| 4.2 挤压力计算 .....                   | 147 |                                   |     |
| 4.2.1 棒材单孔挤压力 .....               | 147 |                                   |     |
| 4.2.2 型材挤压力计算 .....               | 148 |                                   |     |
| 4.2.3 管材挤压力计算 .....               | 148 |                                   |     |
| 4.2.4 反向挤压力计算 .....               | 149 |                                   |     |
| 4.2.5 穿孔力计算 .....                 | 149 |                                   |     |
| 4.2.6 分流组合模挤压力计算 .....            | 151 |                                   |     |
| 4.2.7 连续挤压 (Conform)<br>力计算 ..... | 152 |                                   |     |
| 4.2.8 挤压力计算简式与<br>参数的确定 .....     | 154 |                                   |     |
| 4.3 挤压力公式计算例题 .....               | 157 |                                   |     |
| 5 挤压工艺 .....                      | 159 |                                   |     |
| 5.1 挤压工艺参数的确定 .....               | 159 |                                   |     |
| 5.1.1 挤压温度的选择 .....               | 159 |                                   |     |
| 5.1.2 挤压速度的选择 .....               | 160 |                                   |     |
| 5.1.3 挤压过程优化 .....                | 160 |                                   |     |
| 5.2 挤压时的润滑 .....                  | 161 |                                   |     |
| 5.2.1 铝及铝合金 .....                 | 161 |                                   |     |
| 5.2.2 铜及铜合金 .....                 | 161 |                                   |     |
| 5.2.3 高温高强合金 .....                | 162 |                                   |     |
| 5.3 锭坯尺寸的选择 .....                 | 162 |                                   |     |
| 5.3.1 锭坯尺寸选择的原则 .....             | 162 |                                   |     |
| 5.3.2 挤压比的选择 .....                | 162 |                                   |     |
| 5.3.3 锭坯长度的确定 .....               | 162 |                                   |     |
| 5.4 轻金属挤压 .....                   | 163 |                                   |     |
| 5.4.1 铝合金挤压 .....                 | 163 |                                   |     |
| 5.4.2 镁合金挤压 .....                 | 164 |                                   |     |
| 5.5 重金属挤压 .....                   | 165 |                                   |     |
| 5.6 稀有金属挤压 .....                  | 166 |                                   |     |
| 5.7 钢挤压 .....                     | 166 |                                   |     |
| 6 挤压新方法 .....                     | 168 |                                   |     |
| 6.1 静液挤压 .....                    | 168 |                                   |     |
| 6.2 连续挤压 .....                    | 168 |                                   |     |



|                             |     |                                 |     |
|-----------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 6.2.1 Conform 连续挤压 .....    | 168 | 9.1.2 变形程度对拉拔力的影响 .....         | 188 |
| 6.2.2 Castex 连续铸挤 .....     | 169 | 9.1.3 模角对拉拔力的影响 .....           | 188 |
| 6.3 有效摩擦挤压 .....            | 170 | 9.1.4 拉拔速度对拉拔力的影响 .....         | 189 |
| 6.4 无压余挤压 .....             | 170 | 9.1.5 摩擦与润滑对拉拔力的影响 .....        | 189 |
| 6.5 复合材料挤压 .....            | 171 | 9.1.6 反拉力对拉拔力的影响 .....          | 189 |
| 6.6 等通道角挤压 .....            | 172 | 9.1.7 振动对拉拔力的影响 .....           | 190 |
| 7 拉拔概述 .....                | 173 | 9.2 拉拔力的理论计算 .....              | 190 |
| 7.1 拉拔的一般概念 .....           | 173 | 9.2.1 棒线材拉拔力计算 .....            | 191 |
| 7.2 拉拔的分类 .....             | 173 | 9.2.2 管材拉拔力计算 .....             | 192 |
| 7.3 拉拔的特点 .....             | 174 | 9.2.3 拉拔机电机功率计算 .....           | 196 |
| 7.4 拉拔历史与发展趋势 .....         | 174 | 9.3 拉拔力计算例题 .....               | 196 |
| 7.5 拉拔技术的发展方向 .....         | 175 |                                 |     |
| 8 拉拔理论基础 .....              | 176 | 10 拉拔工艺 .....                   | 198 |
| 8.1 拉拔时的变形指数 .....          | 176 | 10.1 拉拔配模 .....                 | 198 |
| 8.2 实现拉拔过程的基本条件 .....       | 176 | 10.1.1 拉拔配模的分类 .....            | 198 |
| 8.3 拉拔后金属的组织性能 .....        | 177 | 10.1.2 拉拔配模的原则 .....            | 198 |
| 8.3.1 金属拉拔后的组织变化 .....      | 177 | 10.1.3 道次数和中间退火次数的确定 .....      | 198 |
| 8.3.2 金属拉拔后的性能变化 .....      | 178 | 10.1.4 拉拔配模设计 .....             | 199 |
| 8.4 圆棒拉拔时的应力与变形 .....       | 178 | 10.1.5 拉拔配模计算例题 .....           | 208 |
| 8.4.1 应力与变形状态 .....         | 178 | 10.2 拉拔润滑 .....                 | 213 |
| 8.4.2 金属在变形区内的流动特点 .....    | 178 | 10.2.1 钢材拉拔的润滑 .....            | 214 |
| 8.4.3 变形区的形状 .....          | 179 | 10.2.2 有色金属拉拔的润滑 .....          | 214 |
| 8.5 管材拉拔时的应力与变形 .....       | 180 | 10.3 其他拉拔方法 .....               | 214 |
| 8.5.1 空拉 .....              | 180 | 10.3.1 无模拉拔 .....               | 214 |
| 8.5.2 衬拉 .....              | 182 | 10.3.2 辊式模拉拔 .....              | 215 |
| 8.5.3 扩径拉拔 .....            | 184 | 10.3.3 静液挤压拉线 .....             | 216 |
| 8.6 拉拔制品中的残余应力 .....        | 184 | 10.3.4 集束拉拔 .....               | 216 |
| 8.6.1 拉拔棒材中的残余应力分布 .....    | 185 | 10.3.5 玻璃膜金属液抽丝 .....           | 217 |
| 8.6.2 拉拔管材中的残余应力 .....      | 185 |                                 |     |
| 8.6.3 残余应力的危害及消除 .....      | 186 | 11 锻造概论 .....                   | 218 |
| 8.7 拉拔制品主要缺陷 .....          | 186 | 11.1 锻造生产的特点及在国民经济中的作用 .....    | 218 |
| 8.7.1 实心材的缺陷 .....          | 186 | 11.2 锻造方法的分类及工艺流程 .....         | 218 |
| 8.7.2 管材制品的主要缺陷 .....       | 187 | 11.3 我国锻造发展的历史、现状和发展趋势 .....    | 219 |
| 9 拉拔力 .....                 | 188 | 11.4 计算机辅助设计与制造 (CAD/CAM) ..... | 220 |
| 9.1 各种因素对拉拔力的影响 .....       | 188 |                                 |     |
| 9.1.1 被加工金属的性质对拉拔力的影响 ..... | 188 |                                 |     |

|                                  |     |                                         |     |
|----------------------------------|-----|-----------------------------------------|-----|
| <b>12 锻造辅助工序</b> .....           | 222 | 13.3.1 制定锻件图 .....                      | 242 |
| 12.1 下料 .....                    | 222 | 13.3.2 确定变形工艺和锻比 .....                  | 243 |
| 12.1.1 剪切法 .....                 | 222 | 13.4 胎模锻工艺 .....                        | 243 |
| 12.1.2 锯切法 .....                 | 222 | <b>14 模锻工艺</b> .....                    | 245 |
| 12.1.3 折断法 .....                 | 223 | 14.1 概述 .....                           | 245 |
| 12.1.4 气割法 .....                 | 223 | 14.2 锤上模锻 .....                         | 246 |
| 12.1.5 其他下料方法 .....              | 223 | 14.2.1 锻件图的制定 .....                     | 246 |
| 12.2 加热 .....                    | 223 | 14.2.2 模膛类型及其功用 .....                   | 248 |
| 12.2.1 锻前加热 .....                | 223 | 14.2.3 模锻件工艺性分析 .....                   | 250 |
| 12.2.2 锻造温度范围的确定 .....           | 224 | 14.3 在其他锻压设备上的模锻 .....                  | 250 |
| 12.3 切边与冲孔 .....                 | 224 | 14.3.1 曲柄压力机上模锻 .....                   | 251 |
| 12.3.1 切边和冲孔的基本方式<br>及模具类型 ..... | 224 | 14.3.2 螺旋压力机上模锻 .....                   | 252 |
| 12.3.2 切边模和冲孔模 .....             | 225 | 14.3.3 平锻机上模锻 .....                     | 252 |
| 12.3.3 切边力和冲孔力计算 .....           | 226 | <b>15 冲压概论</b> .....                    | 255 |
| 12.4 校正与精压 .....                 | 227 | 15.1 概述 .....                           | 255 |
| 12.4.1 校正 .....                  | 227 | 15.2 冲压的分类及发展方向 .....                   | 255 |
| 12.4.2 精压 .....                  | 228 | 15.2.1 冲压加工的分类 .....                    | 255 |
| 12.5 冷却与热处理 .....                | 229 | 15.2.2 冲压加工的发展方向 .....                  | 255 |
| 12.5.1 锻后冷却 .....                | 229 | 15.3 各种冲压成形方法的<br>力学特点 .....            | 256 |
| 12.5.2 锻件热处理 .....               | 230 | 15.4 冲压变形的趋向性与控制 .....                  | 257 |
| 12.6 表面清理 .....                  | 230 | 15.5 冲压工艺性的试验方法 .....                   | 258 |
| <b>13 自由锻造</b> .....             | 232 | 15.5.1 弯曲试验 .....                       | 258 |
| 13.1 自由锻基本工序与分类 .....            | 232 | 15.5.2 胀形试验(杯突试验,<br>Erichsen 试验) ..... | 259 |
| 13.1.1 锻粗 .....                  | 233 | 15.5.3 拉深成形试验 .....                     | 259 |
| 13.1.2 拔长 .....                  | 233 | 15.5.4 拉深-胀形成形性能<br>试验(福井试验) .....      | 260 |
| 13.1.3 冲孔 .....                  | 234 | 15.5.5 扩孔成形性能试验 .....                   | 261 |
| 13.1.4 扩孔 .....                  | 235 | <b>16 冲裁</b> .....                      | 262 |
| 13.1.5 芯轴拔长 .....                | 236 | 16.1 冲裁变形机理 .....                       | 262 |
| 13.1.6 弯曲 .....                  | 236 | 16.2 凸模、凹模刃口尺寸的确定 .....                 | 263 |
| 13.1.7 错移 .....                  | 236 | 16.2.1 合理间隙的确定 .....                    | 263 |
| 13.1.8 扭转 .....                  | 237 | 16.2.2 凸、凹模刃口尺寸的<br>计算原则 .....          | 266 |
| 13.2 自由锻时的坯料变形规律<br>与力能参数 .....  | 237 | 16.2.3 凸、凹模刃口尺寸的<br>计算方法 .....          | 266 |
| 13.2.1 锻粗过程变形特点<br>和力能参数 .....   | 237 | 16.3 冲裁力及降低冲裁力的<br>方法 .....             | 268 |
| 13.2.2 拔长的变形特点和<br>力能参数 .....    | 240 |                                         |     |
| 13.3 自由锻工艺规程的制定 .....            | 242 |                                         |     |

|                                             |     |                                   |     |
|---------------------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 16.3.1 冲裁力的计算 .....                         | 268 | 18 拉深 .....                       | 282 |
| 16.3.2 降低冲裁力的方法 .....                       | 268 | 18.1 拉深过程的变形特点 .....              | 282 |
| 16.4 冲裁件的整修 .....                           | 269 | 18.1.1 拉深过程中坯料内的<br>应力与应变状态 ..... | 282 |
| 16.4.1 外缘的整修 .....                          | 269 | 18.1.2 拉深过程的力学分析 .....            | 283 |
| 16.4.2 内孔的整修 .....                          | 269 | 18.2 拉深件的起皱与防止措施 .....            | 286 |
| 17 弯曲 .....                                 | 272 | 18.3 圆筒形工件拉深工艺计算 .....            | 287 |
| 17.1 弯曲变形过程分析 .....                         | 272 | 18.3.1 板料尺寸的计算 .....              | 287 |
| 17.1.1 弯曲件的弹复 .....                         | 272 | 18.3.2 拉深系数与拉深<br>次数的确定 .....     | 288 |
| 17.1.2 中性层位置的内移 .....                       | 273 | 18.4 拉深模工作部分<br>尺寸的确定 .....       | 289 |
| 17.1.3 弯曲变形区板料<br>厚度变化 .....                | 273 | 18.4.1 凸模、凹模圆角半径 .....            | 289 |
| 17.1.4 板料长度的变化 .....                        | 273 | 18.4.2 凸模、凹模结构 .....              | 290 |
| 17.1.5 板料横断面的变形 .....                       | 273 | 18.4.3 拉深模间隙 .....                | 291 |
| 17.2 弯曲时的应力和应变状态 .....                      | 273 | 18.5 变薄拉深 .....                   | 292 |
| 17.2.1 应变状态 .....                           | 273 | 18.5.1 变薄拉深的变形特点 .....            | 292 |
| 17.2.2 应力状态 .....                           | 274 | 18.5.2 工艺计算 .....                 | 293 |
| 17.3 应变中性层位置与最小弯曲<br>半径的确定 .....            | 274 | 18.5.3 变薄拉深力计算 .....              | 293 |
| 17.3.1 应变中性层位置 .....                        | 274 | 19 特种冲压工艺 .....                   | 294 |
| 17.3.2 最小弯曲半径 .....                         | 275 | 19.1 软模成形 .....                   | 294 |
| 17.4 弯曲力的计算 .....                           | 276 | 19.1.1 软凸模拉深和胀形 .....             | 294 |
| 17.5 弯曲件弹复的计算与减少<br>弹复的措施 .....             | 277 | 19.1.2 软凹模拉深 .....                | 295 |
| 17.5.1 弹复的计算 .....                          | 277 | 19.2 差温拉深法 .....                  | 295 |
| 17.5.2 影响弹复的因素 .....                        | 278 | 19.3 加径向压力的拉深法 .....              | 296 |
| 17.5.3 减少弹复的措施 .....                        | 278 | 19.4 爆炸成形 .....                   | 296 |
| 17.6 弯曲毛坯长度的确定 .....                        | 279 | 19.5 电水成形 .....                   | 297 |
| 17.6.1 $r > 0.5t$ 有圆角半径的<br>弯曲 .....        | 279 | 19.6 电磁成形 .....                   | 297 |
| 17.6.2 $r < 0.5t$ 无圆角半径或<br>圆角半径很小的弯曲 ..... | 280 | 19.7 旋压成形 .....                   | 298 |
| 17.7 弯曲模工作部分尺寸的确定 .....                     | 280 | 复习思考题及习题 .....                    | 299 |
| 17.7.1 凸、凹模圆角半径 .....                       | 280 | 参考文献 .....                        | 301 |
| 17.7.2 凹模深度 .....                           | 281 |                                   |     |
| 17.7.3 凸、凹模间隙 .....                         | 281 |                                   |     |

### 第三篇 轧制理论与工艺

|          |     |                  |     |
|----------|-----|------------------|-----|
| 绪论 ..... | 303 | 1 轧制过程基本概念 ..... | 306 |
|----------|-----|------------------|-----|

|                                     |     |                                 |     |
|-------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 1.1 变形区主要参数·····                    | 306 | 4 轧制过程中的纵变形——前滑<br>和后滑·····     | 334 |
| 1.1.1 轧制变形区及其主要参数·····              | 306 | 4.1 轧制过程中的前滑和<br>后滑现象·····      | 334 |
| 1.1.2 轧制变形的表示方法·····                | 308 | 4.2 轧件在变形区内各不同断面上<br>的运动速度····· | 335 |
| 1.2 金属在变形区内的<br>流动规律·····           | 309 | 4.3 中性角 $\gamma$ 的确定·····       | 337 |
| 1.2.1 沿轧件断面高向上<br>变形的分布·····        | 309 | 4.4 前滑的计算公式·····                | 338 |
| 1.2.2 沿轧件宽度方向上的<br>流动规律·····        | 311 | 4.5 影响前滑的因素·····                | 339 |
| 2 实现轧制过程的条件·····                    | 313 | 4.5.1 压下率对前滑的影响·····            | 339 |
| 2.1 咬入条件·····                       | 313 | 4.5.2 轧件厚度对前滑的影响·····           | 339 |
| 2.2 稳定轧制条件·····                     | 314 | 4.5.3 轧件宽度对前滑的影响·····           | 340 |
| 2.3 咬入阶段与稳定轧制阶段<br>咬入条件的比较·····     | 315 | 4.5.4 轧辊直径对前滑的影响·····           | 340 |
| 2.3.1 合力作用点位置或<br>系数 $K_s$ 的影响····· | 315 | 4.5.5 摩擦系数对前滑的影响·····           | 341 |
| 2.3.2 摩擦系数变化的影响·····                | 316 | 4.5.6 张力对前滑的影响·····             | 341 |
| 2.4 改善咬入条件的途径·····                  | 316 | 4.6 连续轧制中的前滑及有关<br>工艺参数的确定····· | 342 |
| 2.4.1 降低 $\alpha$ 角·····            | 317 | 4.6.1 连轧关系和连轧常数·····            | 342 |
| 2.4.2 提高 $\beta$ 的方法·····           | 317 | 4.6.2 前滑系数和前滑值·····             | 343 |
| 3 轧制过程中的横变形——宽展·····                | 318 | 4.6.3 堆拉系数和堆拉率·····             | 344 |
| 3.1 宽展及其分类·····                     | 318 | 5 轧制压力及力矩的计算·····               | 346 |
| 3.1.1 宽展及其实际意义·····                 | 318 | 5.1 轧制压力的工程计算·····              | 346 |
| 3.1.2 宽展分类·····                     | 318 | 5.1.1 总轧制压力计算公式的<br>一般表达式·····  | 346 |
| 3.1.3 宽展的组成·····                    | 320 | 5.1.2 平均单位压力公式简介·····           | 346 |
| 3.2 影响宽展的因素·····                    | 321 | 5.2 主电动机传动轧辊所需<br>力矩及功率·····    | 351 |
| 3.2.1 影响轧件变形的基本<br>因素分析·····        | 321 | 5.2.1 传动力矩的组成·····              | 351 |
| 3.2.2 其他因素对轧件<br>宽展的影响·····         | 324 | 5.2.2 轧制力矩的确定·····              | 352 |
| 3.3 宽展计算公式·····                     | 328 | 5.2.3 附加摩擦力矩的确定·····            | 354 |
| 3.3.1 A. И. 采里柯夫公式·····             | 328 | 5.2.4 空转力矩的确定·····              | 355 |
| 3.3.2 B. П. 巴赫契诺夫公式·····            | 329 | 5.2.5 静负荷图·····                 | 355 |
| 3.3.3 S. 爱克伦得公式·····                | 330 | 5.2.6 可逆式轧机的负荷图·····            | 356 |
| 3.3.4 C. И. 古布金公式·····              | 330 | 5.2.7 主电动机的功率计算·····            | 357 |
| 3.4 在孔型中轧制时宽展特点<br>及其简化计算方法·····    | 330 | 6 轧材种类及其生产工艺流程·····             | 359 |
| 3.4.1 在孔型中轧制时宽展特点·····              | 330 | 6.1 轧材的种类·····                  | 359 |
| 3.4.2 在孔型中轧制时计算<br>宽展的简化方法·····     | 332 | 6.2 轧材生产系统及生产<br>工艺流程·····      | 360 |
|                                     |     | 6.2.1 钢材生产系统·····               | 360 |

|                                                |     |                                              |     |
|------------------------------------------------|-----|----------------------------------------------|-----|
| 6.2.2 碳素钢的生产工艺流程·····                          | 361 | 8.3.2 孔型轧制时的延伸和宽展·····                       | 382 |
| 6.2.3 合金钢的生产工艺流程·····                          | 362 | 8.3.3 孔型轧制时的前滑和后滑·····                       | 383 |
| 6.2.4 钢材的冷加工生产<br>工艺流程·····                    | 363 | 8.4 型材轧制工艺·····                              | 383 |
| 6.2.5 有色金属(铜、铝等)及其<br>合金轧材生产系统及生产<br>工艺流程····· | 363 | 8.4.1 加热、轧制·····                             | 383 |
| 7 轧制生产工艺过程及其制定·····                            | 365 | 8.4.2 精整·····                                | 384 |
| 7.1 轧材产品标准和技术要求·····                           | 365 | 8.5 型材轧机及其布置形式·····                          | 384 |
| 7.2 金属与合金的加工特性·····                            | 366 | 8.5.1 型材轧机分类·····                            | 384 |
| 7.2.1 塑性·····                                  | 366 | 8.5.2 型材轧机的典型布置形式·····                       | 385 |
| 7.2.2 变形抗力·····                                | 366 | 8.6 型材轧制的孔型系统举例·····                         | 386 |
| 7.2.3 导热系数·····                                | 367 | 9 大、中型型材及复杂断面型材生产·····                       | 389 |
| 7.2.4 摩擦系数·····                                | 367 | 9.1 初轧开坯·····                                | 389 |
| 7.2.5 相图形态·····                                | 367 | 9.1.1 初轧开坯生产的历史·····                         | 389 |
| 7.2.6 淬硬性·····                                 | 368 | 9.1.2 我国初轧及开坯轧机的<br>发展方向·····                | 389 |
| 7.2.7 对某些缺陷的敏感性·····                           | 368 | 9.2 典型产品生产·····                              | 390 |
| 7.3 轧材生产各基本工序及其<br>对产品质量的影响·····               | 368 | 9.2.1 H型钢和工字钢·····                           | 390 |
| 7.3.1 原料的选择及准备·····                            | 368 | 9.2.2 钢轨·····                                | 394 |
| 7.3.2 连铸坯与轧制的<br>衔接模式·····                     | 369 | 9.2.3 经济断面型材和<br>深加工型材·····                  | 397 |
| 7.3.3 原料的加热·····                               | 370 | 9.3 大型型材轧机的典型<br>布置形式·····                   | 398 |
| 7.3.4 钢的轧制·····                                | 372 | 9.3.1 串列式·····                               | 398 |
| 7.3.5 钢材的轧后冷却与精整·····                          | 375 | 9.3.2 横列式·····                               | 398 |
| 7.3.6 钢材质量的检查·····                             | 375 | 9.3.3 半连续式·····                              | 399 |
| 7.4 拟订轧制产品生产工艺<br>过程举例·····                    | 376 | 9.4 二辊孔型与四辊万能孔型轧制<br>凸缘型钢的区别·····            | 399 |
| 7.4.1 拟订轧钢产品生产工艺<br>过程举例·····                  | 376 | 9.4.1 凸缘型钢的轧制特点及<br>使用万能孔型轧制凸缘型<br>钢的优点····· | 399 |
| 7.4.2 拟订有色金属轧材生产<br>工艺过程举例·····                | 377 | 9.4.2 轧件在万能孔型和轧边<br>端孔型中的变形特点·····           | 400 |
| 8 型材轧制工艺基础·····                                | 379 | 9.5 大、中型型钢生产新技术·····                         | 401 |
| 8.1 型材分类及生产特点·····                             | 379 | 9.5.1 连铸异型坯及连铸坯<br>直接热装轧制·····               | 401 |
| 8.1.1 型材分类及用途·····                             | 379 | 9.5.2 在线控轧控冷和余热淬火·····                       | 402 |
| 8.1.2 型材的生产特点·····                             | 381 | 9.5.3 长尺冷却和长尺矫直·····                         | 402 |
| 8.2 型材轧制的咬入条件·····                             | 381 | 9.5.4 热弯型钢·····                              | 402 |
| 8.3 型材轧制时的金属变形·····                            | 382 | 10 棒线材生产·····                                | 404 |
| 8.3.1 轧制变形参数·····                              | 382 | 10.1 棒线材的种类和用途·····                          | 404 |

|                                              |     |                                             |     |
|----------------------------------------------|-----|---------------------------------------------|-----|
| 10.1.1 棒材的品种 .....                           | 404 | 12.2.2 粗轧 .....                             | 436 |
| 10.1.2 线材的品种 .....                           | 404 | 12.2.3 精轧 .....                             | 439 |
| 10.1.3 棒线材的用途 .....                          | 404 | 12.2.4 调宽轧制(AWC)及自由<br>程序轧制(SFR) .....      | 442 |
| 10.1.4 对棒线材的质量要求 .....                       | 405 | 12.2.5 轧后冷却及卷取 .....                        | 443 |
| 10.2 棒材生产 .....                              | 405 | 12.2.6 热带连轧机工艺流程与<br>车间布置 .....             | 444 |
| 10.2.1 棒材的生产工艺 .....                         | 405 | 12.3 中小型企业薄板带钢生产 .....                      | 445 |
| 10.2.2 小型棒材轧机的布置 .....                       | 406 | 12.3.1 叠轧薄板生产 .....                         | 445 |
| 10.2.3 棒材轧制新技术 .....                         | 408 | 12.3.2 炉卷轧机热轧带钢生产 .....                     | 445 |
| 10.2.4 棒材轧后余热淬火 .....                        | 411 | 12.3.3 行星轧机热轧带钢生产 .....                     | 446 |
| 10.3 线材生产 .....                              | 412 | 12.4 薄板带坯连铸-连轧及<br>连续铸轧技术 .....             | 447 |
| 10.3.1 线材的生产特点 .....                         | 412 | 12.4.1 SMS 公司薄板坯连铸-<br>连轧技术 .....           | 447 |
| 10.3.2 线材的生产工艺 .....                         | 412 | 12.4.2 MDH 公司薄板坯连续<br>铸轧工艺 .....            | 448 |
| 10.3.3 线材轧制的孔型 .....                         | 413 | 12.4.3 轧材的组织性能特点 .....                      | 449 |
| 10.3.4 线材轧机的类型及布置 .....                      | 414 | 12.4.4 薄板坯连铸连轧技术<br>新发展 .....               | 450 |
| 10.3.5 线材生产主要技术 .....                        | 418 | 12.4.5 薄带连续铸轧技术 .....                       | 450 |
| 10.3.6 线材控制冷却 .....                          | 419 | 13 冷轧板、带材生产 .....                           | 453 |
| 11 板、带材生产概述 .....                            | 422 | 13.1 冷轧板、带材生产工艺特点 .....                     | 453 |
| 11.1 板、带产品特点、分类及<br>技术要求 .....               | 422 | 13.1.1 加工温度低,在轧制中<br>将产生不同程度的<br>加工硬化 ..... | 453 |
| 11.1.1 板、带产品的外形、<br>使用与生产特点 .....            | 422 | 13.1.2 冷轧中要采用工艺冷却<br>和润滑 .....              | 453 |
| 11.1.2 板、带材的分类及<br>技术要求 .....                | 422 | 13.1.3 冷轧中的张力轧制 .....                       | 455 |
| 11.2 板、带轧制技术的发展 .....                        | 423 | 13.2 冷轧板、带材生产工艺流程 .....                     | 456 |
| 11.2.1 围绕降低金属变形抗力<br>(内阻)的演变与发展 .....        | 423 | 13.2.1 冷轧板、带材的主要品种、<br>工艺流程及车间布置 .....      | 456 |
| 11.2.2 围绕降低应力状态影响<br>系数(外阻)的演变与<br>发展 .....  | 425 | 13.2.2 原料板卷的酸洗与除鳞 .....                     | 458 |
| 11.2.3 围绕减少和控制轧机<br>变形提高产品质量的<br>演变与发展 ..... | 427 | 13.2.3 冷轧 .....                             | 458 |
| 12 热轧板、带材生产 .....                            | 430 | 13.2.4 冷轧板、带钢的精整 .....                      | 460 |
| 12.1 中、厚板生产 .....                            | 430 | 14 板、带材高精度轧制和板形控制 .....                     | 462 |
| 12.1.1 中、厚板轧机的型式<br>及其布置 .....               | 430 | 14.1 板、带材轧制中的厚度控制 .....                     | 462 |
| 12.1.2 中、厚板生产工艺 .....                        | 431 | 14.1.1 板、带材厚度变化的原因<br>和特点 .....             | 462 |
| 12.2 热连轧带钢生产 .....                           | 434 |                                             |     |
| 12.2.1 原料选择与加热 .....                         | 435 |                                             |     |

|                                           |            |                                    |            |
|-------------------------------------------|------------|------------------------------------|------------|
| 14.1.2 板、带材厚度控制方法 .....                   | 462        | 17.3.1 第一次咬入条件 .....               | 523        |
| 14.2 横向厚差与板形控制技术 .....                    | 465        | 17.3.2 第二次咬入条件 .....               | 524        |
| 14.2.1 板形与横向厚差的关系 .....                   | 465        | 17.4 斜轧穿孔压力和力矩的计算 .....            | 525        |
| 14.2.2 影响辊缝形状的因素 .....                    | 469        | 17.4.1 斜轧穿孔压力的计算 .....             | 525        |
| 14.2.3 轧辊辊型设计 .....                       | 471        | 17.4.2 斜轧穿孔力矩的计算 .....             | 526        |
| 14.2.4 辊型及板形控制技术 .....                    | 473        | 17.5 斜轧穿孔机的工具设计 .....              | 527        |
| <b>15 板、带材轧制制度的确定 .....</b>               | <b>481</b> | 17.5.1 穿孔机轧辊设计 .....               | 527        |
| 15.1 制定轧制制度的原则和要求 .....                   | 481        | 17.5.2 斜轧穿孔的顶头设计 .....             | 528        |
| 15.1.1 在设备能力允许的条件<br>下尽量提高产量 .....        | 481        | 17.5.3 斜轧穿孔的导向装置设计 .....           | 530        |
| 15.1.2 在保证操作稳便的条件<br>下提高质量 .....          | 482        | <b>18 管材纵轧原理和工具设计 .....</b>        | <b>532</b> |
| 15.2 压下规程或轧制规程<br>设计(设定) .....            | 484        | 18.1 管材纵轧变形区的特点 .....              | 532        |
| 15.2.1 概述 .....                           | 484        | 18.2 管材纵轧变形区的速度分析 .....            | 534        |
| 15.2.2 中、厚板轧机压下<br>规程设计 .....             | 485        | 18.3 管材纵轧的咬入条件 .....               | 536        |
| 15.2.3 热连轧板、带钢轧制<br>规程设定 .....            | 489        | 18.4 管材纵轧的轧制力和<br>轧制力矩 .....       | 537        |
| 15.2.4 冷轧板、带钢轧制<br>规程制定 .....             | 498        | 18.4.1 接触表面水平投影<br>面积计算 .....      | 537        |
| <b>16 热轧无缝管材的主要加工形式和<br/>基本工艺过程 .....</b> | <b>502</b> | 18.4.2 平均单位压力、芯棒<br>轴向力计算 .....    | 538        |
| 16.1 管材生产概述 .....                         | 502        | 18.4.3 管材纵轧的力矩计算 .....             | 541        |
| 16.1.1 钢管的特性及分类 .....                     | 502        | 18.5 纵轧管机的工具设计和<br>轧机调整 .....      | 542        |
| 16.1.2 钢管生产的发展趋势 .....                    | 504        | 18.5.1 连续轧管机 .....                 | 542        |
| 16.2 热轧无缝管的主要加工形式 .....                   | 504        | 18.5.2 减径机 .....                   | 548        |
| 16.2.1 穿孔方法 .....                         | 504        | 18.6 轧制表计算 .....                   | 555        |
| 16.2.2 轧管方法 .....                         | 506        | <b>19 管材冷加工 .....</b>              | <b>558</b> |
| 16.2.3 毛管精轧 .....                         | 510        | 19.1 管材冷加工概述 .....                 | 558        |
| 16.3 热轧无缝钢管生产的一般<br>工艺过程 .....            | 511        | 19.1.1 管材冷拔的主要方法 .....             | 559        |
| <b>17 斜轧原理与工具设计 .....</b>                 | <b>514</b> | 19.1.2 管材冷轧的主要方法 .....             | 559        |
| 17.1 斜轧过程的运动学 .....                       | 514        | 19.2 周期式冷轧管机轧制的变形<br>原理和工具设计 ..... | 562        |
| 17.2 斜轧过程中轧件的变形 .....                     | 517        | 19.2.1 周期式冷轧管机的<br>轧制过程 .....      | 562        |
| 17.2.1 变形计算 .....                         | 518        | 19.2.2 变形区内金属的应力<br>状态分布 .....     | 563        |
| 17.2.2 变形特点分析 .....                       | 519        | 19.2.3 周期轧制中各主要变形<br>参数的计算 .....   | 566        |
| 17.3 斜轧的咬入条件 .....                        | 523        | <b>20 焊管生产工艺 .....</b>             | <b>569</b> |
|                                           |            | 20.1 电焊管生产方法概述 .....               | 569        |

|                               |     |                           |     |
|-------------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 20.1.1 辊式连续成型机生产电焊管 .....     | 569 | 20.2.4 薄壁管成型 .....        | 574 |
| 20.1.2 履带式成型机生产电焊管 .....      | 570 | 20.2.5 厚壁钢管生产 .....       | 575 |
| 20.1.3 几种大口径钢管的生产方法 .....     | 570 | 20.3 辊式连续成型机的轧辊孔型设计 ..... | 576 |
| 20.2 辊式连续成型机生产电焊钢管的基本问题 ..... | 571 | 20.3.1 带钢边缘弯曲法 .....      | 576 |
| 20.2.1 机架的排列与布置 .....         | 572 | 20.3.2 带钢圆周弯曲法 .....      | 577 |
| 20.2.2 管坯成型的变形过程 .....        | 572 | 20.3.3 带钢综合弯曲法 .....      | 577 |
| 20.2.3 成型底线 .....             | 573 | 20.3.4 双面弯曲侧弯成型法 .....    | 578 |
|                               |     | 复习思考题及习题 .....            | 579 |
|                               |     | 参考文献 .....                | 581 |



# 第一篇 金属液态与半固态及焊接成形原理与工艺

## 1 金属液态成形概述

### 1.1 金属液态成形工艺特点

金属液态成形工艺通常称为铸造。铸造是将液态金属浇注到具有和机械零件形状相适应的铸型型腔中，经过凝固、冷却之后，获得毛坯或零件的金属材料的加工成形方法。金属液态成形工艺的制品称为铸件、铸锭、铸坯、铸带等等。到目前为止，尽管大部分的金属液态制品首先制作成毛坯，经机械加工才能成为各种机器零件，但是，随着少余量和无余量液态金属成形工艺方法的快速发展，有许多液态金属成形制品无需再经机械或其他的加工工序即可满足使用精度和粗糙度的要求而直接使用。因此，金属液态成形工艺越来越受到人们的重视，概括起来金属液态成形工艺有以下特点：

(1) 适应性强。就生产的铸件而言，小至几克，大至数百吨。壁厚从 0.5mm 到 1m 左右。长度从几毫米到十几米。可以说，铸造方法不受零件大小、形状和结构复杂程度的限制。铸造方法又可以适用于各种合金的成形，如常用的铁碳合金（铸铁、铸钢）、铝合金、铜合金、镁合金、锌合金等。特别是对于一些零件结构异常复杂、合金熔点很高、难变形、价格昂贵的合金成形，只能选择铸造方法。近年来，金属液态快速成形、特种成形工艺的不断发 展，使得金属液态成形工艺更加具有广泛的适应性。

(2) 尺寸精度高。一般情况下，铸件比锻件、焊接件的尺寸精度高，更接近于零件的尺寸，可节约大量的金属材料和机械加工工时。近年来，快速发展的精确成形技术可节约金属材料 50% ~ 90%，减少机械加工工时 30% ~ 70%，而且成形件的内部质量大大提高。目前，各种铸造方法所能达到的尺寸精度和表面粗糙度如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 各种铸造方法的尺寸精度和表面粗糙度

| 铸 造 方 法    | 尺寸精度等级<br>/CT | 表面粗糙度<br>$R_a/\mu\text{m}$ | 铸 造 方 法 | 尺寸精度等级<br>/CT   | 表面粗糙度<br>$R_a/\mu\text{m}$ |
|------------|---------------|----------------------------|---------|-----------------|----------------------------|
| 普通砂型       | 11 ~ 15       | 50 ~ 400                   | 低压铸造    | 5 ~ 9           |                            |
| 高压造型       | 8 ~ 10        | 12.5 ~ 50                  | 壳型铸造    |                 | 1.6 ~ 25                   |
| 压力铸造（有色金属） | 5 ~ 7         | 0.4 ~ 50                   | 金属型铸造   | 5 ~ 8（黑色 7 ~ 9） | 0.8 ~ 100                  |
| 熔模铸造（钢）    | 5 ~ 7         | 0.8 ~ 12.5                 |         |                 |                            |

(3) 成本低。铸件重量在一般机械装备总重量中占 40% ~ 80%，在金属切削机床中占 70% ~ 80%，在汽车及农业机械中占 40% ~ 70%，但它的成本仅占总成本的 25% ~ 30%。成本低廉的主要原因是由于：1) 容易实现大量机械化生产；2) 与锻造相比消耗动力少；3) 可