



普通高等教育材料成型及控制工程  
系列规划教材

# 材料成形工艺与控制

李云涛 王志华 李海鹏 等编



化学工业出版社



普通高等教育材料成型及控制工程  
系列规划教材

# 材料成形工艺与控制

李云涛 王志华 李海鹏 等编



化学工业出版社

· 北京 ·

本教材共分为7章, 主要内容包括: 材料成形原理概述、自动控制基础、铸造过程的自动控制、焊接过程的自动控制、锻压过程的自动控制、模具成形过程的自动控制、轧制成形过程的自动控制。在编写过程中, 注重理论分析与实际应用相结合: 既有一定的理论深度, 又注重深浅适度。在阐述材料成形原理、过程的基础上, 分别对其成形过程控制有选择性地重点论述, 并解析一定的成形过程控制应用实例, 有机地补充一些国内外材料成形控制的发展前沿, 从而将会给新版的教材带来一定的创新性, 适合作为材料成型与控制工程专业应用型本科、专科学生学习教材, 也可作为相关专业学生和工程师、技术人员的参考用书。通过对该教材的学习, 可对材料成形过程自动控制有较深入和系统的理解, 为以后的学习和工作奠定一定的理论和实践基础。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

材料成形工艺与控制/李云涛, 王志华, 李海鹏等编.  
北京: 化学工业出版社, 2010.8  
(普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材)  
ISBN 978-7-122-09038-6

I. 材… II. ①李…②王…③李… III. ①工程材料-  
成型-工艺-高等学校-教材②工程材料-成型-自动控制-高  
等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 129379 号

---

责任编辑: 彭喜英  
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 颜克俭  
装帧设计: 周 遥

---

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 装: 三河市延风印装厂  
787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 422 千字 2010 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: 32.00 元

版权所有 违者必究

## 序

材料成型及控制工程专业是1998年国家教育部进行专业调整时,在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业,其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”,以拓宽专业面,加强学科基础,培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同,也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如,一些研究型大学担负着精英教育的责任,以培养科学研究型和科学研究与工程技术复合型人才为主,学生毕业以后大部分攻读研究生,继续深造,因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任,以培养工程技术型、应用复合型人才为主,学生毕业以后大部分走向工作岗位,因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来;从人才市场来看,许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业课学得过少,而毕业后又不能接受继续教育,就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况,教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于2008年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》,共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划,按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成形及控制工程领域的基础理论和专业基础知识,具备解决材料成形及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力,具有创新精神,能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作,综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向,强化专业基础,具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”,针对第三类培养方案,按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与时俱进,在传统知识的基础上,注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容、学时、教学大纲的要求,突出重点、难点,力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨,提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业扎实、工程实践能力和创新能力、综合素质高的材料成形及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任

李春峰

2010年4月

李春峰

2010年4月

## 前言

材料成形技术一般包括铸造成形、锻压成形、焊接成形和非金属材料成形等工艺技术。材料成形加工是制造业的重要组成部分,据不完全统计,全世界75%的钢材经塑性加工,45%的金属结构用焊接成形。我国在金属铸造、焊接、塑模、塑料加工等行业就业的人员已经超过100万人。

随着现代工业的发展,对产品性能的要求越来越高,某种材料的应用不仅取决于材料本身的各种性能,还取决于它的可加工成形性能,因此材料成形学科的任务不只是一要研究如何使工件获得必要的几何尺寸,而更重要的是要研究如何通过过程控制获得质量优良的工件。通过材料成形过程的自动控制可以提高设备使用效率;提高工序质量,利用有限的资源,制造质量好、性能稳定、价格合理的产品;在人力不能胜任的复杂工作环境中或者人不能靠近的场合中实现自动操作。

在实际生产中,材料成形与工程控制已经成为从材料到部件的重要过程之一,它涉及国民生产的各个领域。尽管材料成形行业一直伴随着高新技术的发展不断前进,我国材料成形与控制技术目前仍有待进一步提高,体现在过程控制自动化的三大基本要素上,即工艺数学模型与控制数学模型的完善、与此相适应的控制系统以及可靠性高的检测器和计算机控制系统的发展。

掌握材料成形过程与自动控制理论及技术已经成为从事材料加工的工程师、工程技术人员所必须具备的一项基本技能。目前,迫切需要一本教材系统地介绍各种材料成形过程及自动控制的基本理论与应用技术。

本教材为适应专业教学改革的新方向,有机地将材料成形与控制工程专业课程整合起来,形成一门逻辑性强、内容广泛而新颖、重点突出的课程。根据近年来材料成形与控制工程领域技术和理论的发展动态并结合教学改革的需求形势,在充分进行市场调研基础上计划编撰的新版教材,其可作为高等院校材料成型与控制工程专业(铸造、焊接、锻压、模具等方向)的教师用书、学生教材或相关工程师、工程技术人员参考书使用。

本教材涵盖了材料成形原理概述、自动控制基础、铸造过程的自动控制、焊接过程的自动控制、锻压过程自动控制、模具成形过程自动控制、轧制成形过程自动控制基本内容。在自动控制理论的基础上,将铸造、焊接、锻压、模具、轧制材料成形过程共性部分进行有机地整合,分别对其成形过程控制有选择性地重点论述,并解析一定的成形过程控制应用实例,有机地补充一些国内外材料成形控制的发展前沿。

本教材由天津理工大学李云涛主编。编写人员分工:第4、7章由天津理工大学李云涛编写,并负责全书统稿;第1、3、5章由天津理工大学王志华编写;第6章由河北工业大学李海鹏编写;第2章由天津大学杨立军编写。

在编写的过程中,得到了许多同志的帮助和支持,在此表示衷心的感谢,并向本书中所引用文献的作者深表谢意。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2010年6月

# 目 录

## 第 1 章 材料成形原理概述 ..... 1

### 1.1 液态成形 ..... 1

#### 1.1.1 概述 ..... 1

#### 1.1.2 铸造金属熔炼 ..... 2

#### 1.1.3 液态成形方法 ..... 3

### 1.2 固态塑性成形 ..... 7

#### 1.2.1 概述 ..... 7

#### 1.2.2 固态金属塑性成形的方法 ..... 8

### 1.3 固态材料的连接成形 ..... 13

#### 1.3.1 概述 ..... 13

#### 1.3.2 金属材料焊接 ..... 13

#### 1.3.3 粘接 ..... 17

### 1.4 粉末压制和常用复合材料成形 ..... 18

#### 1.4.1 概述 ..... 18

#### 1.4.2 粉末冶金工艺的基本工序 ..... 19

#### 1.4.3 常用粉末冶金材料简介 ..... 21

### 1.5 非金属材料成形 ..... 21

#### 1.5.1 概述 ..... 21

#### 1.5.2 高分子材料成形 ..... 22

#### 1.5.3 陶瓷材料成形 ..... 26

#### 1.5.4 常用复合材料成形 ..... 28

### 1.6 材料模拟成形发展概况 ..... 30

#### 1.6.1 金属液态成形计算机模拟技术 ..... 30

#### 1.6.2 塑性成形计算机模拟 ..... 31

#### 1.6.3 焊接成形计算机模拟 ..... 31

#### 1.6.4 模具加工计算机模拟 ..... 33

### 习题与思考题 ..... 36

## 第 2 章 自动控制基础 ..... 37

### 2.1 自动控制基本概念 ..... 37

### 2.2 自动控制系统的类型 ..... 39

#### 2.2.1 自动控制系统的分类方法 ..... 39

#### 2.2.2 开环控制和闭环控制 ..... 41

### 2.3 材料成形过程自动控制系统的特性 ..... 44

#### 2.3.1 自动控制系统的特性 ..... 44

#### 2.3.2 材料成形过程自动控制系统的

#### 特点 ..... 45

### 2.4 材料成形过程自动控制的常用控制

#### 策略简介 ..... 46

### 习题与思考题 ..... 47

## 第 3 章 铸造过程的自动控制 ..... 48

### 3.1 冲天炉熔炼过程自动控制 ..... 48

#### 3.1.1 冲天炉配料的定量控制 ..... 48

#### 3.1.2 送风控制部分 ..... 50

#### 3.1.3 加料控制部分 ..... 50

#### 3.1.4 冲天炉其他参数控制 ..... 52

### 3.2 连铸机自动控制 ..... 54

#### 3.2.1 连铸机工艺原理 ..... 54

#### 3.2.2 连铸机自动控制系统 ..... 54

### 3.3 真空差压铸造自动控制 ..... 61

#### 3.3.1 真空差压铸造工作原理 ..... 61

#### 3.3.2 真空差压铸造控制系统 ..... 61

### 3.4 低压铸造自动控制 ..... 64

#### 3.4.1 低压铸造工作原理 ..... 64

#### 3.4.2 低压铸造控制系统 ..... 65

### 3.5 热室压铸自动控制 ..... 66

#### 3.5.1 热室压铸工作原理 ..... 66

#### 3.5.2 热室压铸控制系统 ..... 68

### 3.6 铅锭浇注自动控制 ..... 68

#### 3.6.1 系统性能指标 ..... 69

#### 3.6.2 系统组成 ..... 69

### 习题与思考题 ..... 72

## 第 4 章 焊接过程的自动控制 ..... 73

### 4.1 焊接过程自动控制概述 ..... 73

#### 4.1.1 焊接概念简述 ..... 73

#### 4.1.2 焊接生产的自动控制 ..... 73

### 4.2 电弧焊自动控制基础 ..... 74

#### 4.2.1 电弧焊的程序自动控制 ..... 74

#### 4.2.2 电弧焊的自动调节系统 ..... 75

### 4.3 埋弧焊设备及控制 ..... 75

#### 4.3.1 埋弧焊设备分类 ..... 75

#### 4.3.2 埋弧焊设备概述 ..... 76

### 4.4 钨极氩弧焊 (TIG) 设备及控制 ..... 85

#### 4.4.1 TIG 焊设备的组成 ..... 85

#### 4.4.2 程序控制系统 ..... 87

#### 4.4.3 WSJ-500 型手工交流 TIG 焊机 ..... 89

#### 4.4.4 脉冲 GTAW 过程的自动控制 ..... 90

### 4.5 熔化极氩弧焊 (MIG) 的设备及控制 ..... 93

#### 4.5.1 电弧自身调节系统 ..... 94

#### 4.5.2 MIG 焊设备 ..... 95

#### 4.5.3 控制系统 ..... 97

#### 4.5.4 NB-400 型半自动熔化极氩弧

#### 焊机 ..... 97

|        |                                         |     |        |                               |     |
|--------|-----------------------------------------|-----|--------|-------------------------------|-----|
| 4.6    | CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊设备及控制            | 99  | 6.3.1  | 曲柄压力机的自动控制                    | 150 |
| 4.6.1  | CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊设备的组成            | 99  | 6.3.2  | 液压折弯机的自动控制                    | 154 |
| 4.6.2  | NBC7-250 (IGBT) 型逆变式 CO <sub>2</sub> 焊机 | 105 | 6.4    | 塑压成形过程自动控制                    | 157 |
| 4.7    | 真空钎焊炉的自动控制                              | 105 | 6.4.1  | 塑压成形设备的结构和工作原理                | 158 |
| 4.7.1  | 真空钎焊炉                                   | 105 | 6.4.2  | 塑压成形设备的控制技术                   | 159 |
| 4.7.2  | 双室真空钎焊炉控制系统                             | 107 | 6.4.3  | 塑压成形设备自动控制实例分析                | 165 |
| 4.8    | 弧焊机器人                                   | 108 | 6.5    | 挤压成形过程的自动控制                   | 170 |
| 4.8.1  | 焊接机器人概述                                 | 108 | 6.5.1  | 挤压成形设备的结构和工作原理                | 170 |
| 4.8.2  | 弧焊机器人概述                                 | 108 | 6.5.2  | 挤压成形设备的控制技术                   | 173 |
| 4.8.3  | 示教再现型弧焊机器人                              | 111 | 6.5.3  | 液压挤压机的自动控制                    | 179 |
| 4.8.4  | 智能型弧焊机器人                                | 112 | 6.6    | 模具加工过程的自动控制                   | 181 |
| 4.8.5  | 基于知识库的焊接工艺系统设计                          | 113 | 6.6.1  | 数控加工机床的自动控制                   | 181 |
| 4.9    | 管道全位置焊接计算机控制系统设计                        | 114 | 6.6.2  | 快速成形加工过程的自动控制                 | 184 |
| 4.9.1  | 控制系统方案的制定                               | 114 | 6.6.3  | 电火花线切割加工的自动控制                 | 188 |
| 4.9.2  | 全位置脉冲 TIG 焊弧压传感器弧长调节                    | 117 | 习题与思考题 |                               | 190 |
| 4.9.3  | 焊缝横向跟踪控制系统组成                            | 118 | 第 7 章  | 轧制成形过程自动控制                    | 191 |
| 4.9.4  | 多微处理器在管道焊接自动控制系统中的应用                    | 118 | 7.1    | 轧制成形过程自动化概述                   | 191 |
| 习题与思考题 |                                         | 121 | 7.1.1  | 轧制成形过程自动化的基本概念                | 191 |
| 第 5 章  | 锻压过程自动控制                                | 122 | 7.1.2  | 轧制自动控制技术的发展现状                 | 191 |
| 5.1    | 自由锻造自动控制                                | 122 | 7.2    | 轧制过程自动化控制的基本形式                | 191 |
| 5.1.1  | 自由锻造加热工艺的控制                             | 122 | 7.2.1  | 自动控制系统的基本要求                   | 191 |
| 5.1.2  | 自由锻造过程的控制                               | 124 | 7.2.2  | 自动控制系统的基本形式                   | 192 |
| 5.2    | 热模锻自动控制                                 | 127 | 7.3    | 轧制成形的计算机控制系统                  | 194 |
| 5.2.1  | 热模锻压力机的控制原理                             | 127 | 7.3.1  | 数据采集系统 (DAS)                  | 194 |
| 5.2.2  | 热模锻压力机的自动控制                             | 128 | 7.3.2  | 操作指导系统                        | 195 |
| 5.3    | 快速锻造压力机自动控制                             | 130 | 7.3.3  | 直接数字控制系统                      | 195 |
| 5.4    | 锻压过程自动控制实例分析                            | 131 | 7.3.4  | 监督控制系统                        | 195 |
| 5.4.1  | 生产工艺过程                                  | 132 | 7.4    | 位置自动控制                        | 196 |
| 5.4.2  | 控制方案                                    | 132 | 7.4.1  | 位置自动控制概念                      | 196 |
| 5.4.3  | 设备选择                                    | 134 | 7.4.2  | 位置自动控制系统的基本组成                 | 196 |
| 习题与思考题 |                                         | 134 | 7.4.3  | 位置控制的基本要求和控制方式                | 197 |
| 第 6 章  | 模具成形过程自动控制                              | 135 | 7.4.4  | 位置控制系统程序的组成                   | 198 |
| 6.1    | 冲压成形设备的结构和工作原理                          | 135 | 7.4.5  | 存储程序控制的位置自动控制 (SPC-APC)       | 199 |
| 6.1.1  | 机械压力机的结构组成和工作原理                         | 135 | 7.4.6  | 具有可编程序控制器的位置自动控制 (PLC-APC) 简介 | 201 |
| 6.1.2  | 液压压力机的结构组成和工作原理                         | 138 | 7.5    | 厚度自动控制                        | 202 |
| 6.2    | 冲压成形设备的控制技术                             | 142 | 7.5.1  | 厚度自动控制概述                      | 202 |
| 6.2.1  | 冲压成形设备的电力拖动控制                           | 142 | 7.5.2  | 板带钢厚度波动的原因及其变化规律              | 202 |
| 6.2.2  | 冲压成形设备的微机控制                             | 146 | 7.5.3  | 厚度自动控制原理                      | 204 |
| 6.3    | 冲压成形设备自动控制实例分析                          | 150 |        |                               |     |

|                            |     |                           |     |
|----------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 7.5.4 轧制力 AGC (P-AGC) 控制系统 |     | 系统实例分析 .....              | 222 |
| 基本原理 .....                 | 212 | 7.7 连轧时张力的自动控制 .....      | 228 |
| 7.6 带钢板形自动控制 .....         | 216 | 7.7.1 张力概述 .....          | 228 |
| 7.6.1 板形自动控制概述 .....       | 216 | 7.7.2 轧制过程中张力的作用及计算 ..... | 228 |
| 7.6.2 带钢板形的影响因素 .....      | 217 | 7.7.3 连轧过程中机架之间的张力 .....  | 230 |
| 7.6.3 带钢板形的检测 .....        | 217 | 7.7.4 控制张力的基本原理 .....     | 233 |
| 7.6.4 带钢板形控制系统 .....       | 219 | 7.7.5 热连轧无张力自动控制 .....    | 235 |
| 7.6.5 人工智能法 .....          | 220 | 习题与思考题 .....              | 243 |
| 7.6.6 板形自动控制的实现 .....      | 221 | <b>参考文献</b> .....         | 244 |
| 7.6.7 2030mm 带钢冷连轧机板形控制    |     |                           |     |

# 第 1 章 材料成形原理概述

材料成形技术是一门研究如何用热或常温成形的方法将材料加工成机器部件和结构,并研究如何保证、评估、提高这些部件和结构的安全可靠度和寿命的技术科学。材料成形过程与金属切削过程不同,在大部分成形过程中,材料不仅发生几何尺寸的变化,而且会发生成分、组织结构及性能的变化。因此材料成形学科的任务不仅是要研究如何使机器部件获得必要的几何尺寸,更重要的是要研究如何通过过程控制获得一定的化学成分、组织结构和性能,从而保证机器部件的安全可靠度和寿命。

材料成形技术一般包括铸造成形、锻压成形、焊接成形和非金属材料成形等工艺技术。我国材料成形与控制技术目前还有待进一步发展,特别是计算机控制的成形技术在我国目前仍处于起步阶段,在该行业中我国的技术水平在国际上仍处于落后状态,而我国对这个领域的产品需求正在大幅度地上升,因此材料成形领域必定在未来几十年内获得长足的发展。21 世纪信息产业、材料产业、能源产业将成为国民生产的三大支柱产业,而材料成形与控制技术正是材料产业中的一个重要部分,它将涉及国民生产的各个领域。

## 1.1 液态成形

### 1.1.1 概述

金属的液态成形常称为铸造,铸造成形技术的历史悠久。早在 5000 多年前,我们的祖先就能铸造红铜和青铜制品。铸造是应用最广泛的金属液态成型工艺。它是将液态金属浇注到铸型型腔中,待其冷却凝固后获得一定形状毛坯或零件的方法。在机器设备中液态成形件所占比例很大,在机床、内燃机、矿山机械、重型机械中液态成形件占总重量的 70%~90%;在汽车、拖拉机中占 50%~70%;在农业机械中占 40%~70%。液态成形工艺能得到如此广泛的应用,是因为它具有如下的优点。

(1) 可制造出内腔、外形很复杂的毛坯 如各种箱体、机床床身、汽缸体、缸盖等。

(2) 工艺灵活性大,适应性广 液态成形件的大小几乎不受限制,其重量可由几克到几百吨,其壁厚可由 0.5mm 到 1m。工业上凡能熔化成液态的金属材料均可用于液态成形。对于塑性很差的铸铁,液态成形是生产其毛坯或零件的唯一的方法。

(3) 液态成形件成本较低 液态成形可直接利用废机件和切屑,设备费用较低。同时,液态成形件加工余量小,节约金属。

但是,金属液态成形的工序多,且难以精确控制,使得铸件质量不够稳定。与同种材料的锻件相比,因液态成形组织疏松、晶粒粗大,内部易产生缩孔、缩松、气孔等缺陷。其力学性能较低。另外,劳动强度大,条件差。

近年来,随着液态成形新技术、新工艺、新设备、新材料的不断采用,使液态成形件的质量、尺寸精度、力学性能有了很大提高,劳动条件得到改善,使液态成形工艺的应用范围更加广阔。今后,铸造成形技术的主要发展方向为以下几点。

① 提高尺寸精度和表面质量。

② 先进的造型技术及自动化生产线。

- ③ 高效、节能，减少污染。
- ④ 降低成本，改善劳动条件。

### 1.1.2 铸造金属熔炼

熔炼是液态金属铸造成形技术过程中的一个重要环节，与铸件的品质、生产成本、产量、能源消耗以及环境保护等密切相关。

在熔炼中，多种固态金属的炉料（废钢、生铁、回炉料、铁合金、有色金属等）按比例搭配装入相应的熔炉中加热熔化，通过冶金反应，转变成具有一定化学成分和温度的符合铸造成形要求的液态金属。主要熔炼方法如下所述。

(1) 冲天炉熔炼 冲天炉应用极为广泛，具有结构简单、设备费用少、电能消耗低、生产率高、成本低、操作和维修方便，并能连续进行生产等特点。常用的为用焦（焦炭）冲天炉，也有非焦冲天炉（油、天然气等）。用焦冲天炉是由底焦燃烧→热量交换→冶金反应 3 个基本过程组成。金属与炉气、焦炭、炉渣相互接触，发生一系列物理化学变化——冶金反应，引起金属液化学成分的变化。冲天炉主要结构如图 1-1 所示。

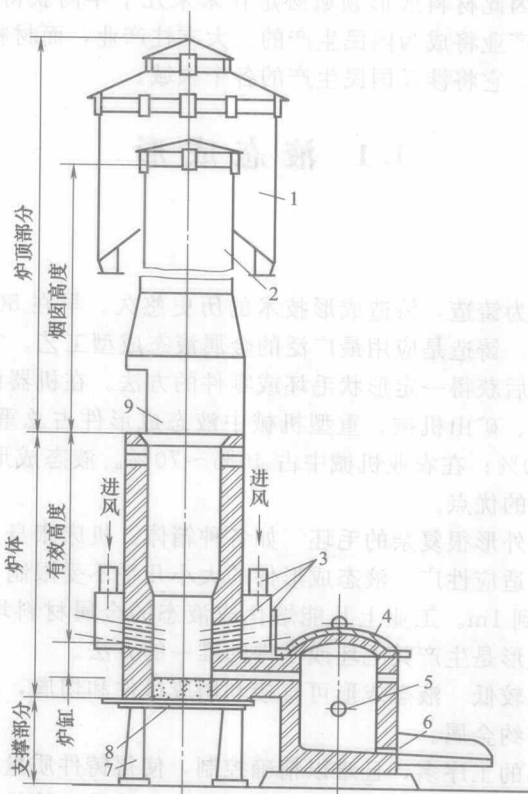


图 1-1 冲天炉主要结构

- 1—除尘器；2—烟囱；3—送风系统；4—前炉；5—出渣口；6—出铁口；  
7—支柱；8—炉底板；9—加料口

(2) 电弧炉熔炼 电弧炉是利用电极与金属炉料之间电弧产生的热能，通过辐射、传导和对流传递给炉料，加热、熔化固体炉料，并使金属液过热，从而实现熔炼目标的一种设备，主

要用于钢、铸铁的熔炼。电弧炉主要结构如图 1-2 所示。

(3) 感应电炉熔炼 常用为无芯感应电炉，其电流频率为：工频（50Hz）、中频（750~10000Hz）、高频（>10000Hz）。无芯感应电炉工作时，炉衬外的感应器线圈相当于变压器的原绕组，炉衬内的金属炉料相当于副绕组，当感应线圈通以交变电流时，则因交变磁场的作用，使短路连接的金属炉料产生强大的感应电流，电流流动时，为克服金属炉料表层的电阻面产生热量，致使金属炉料加热熔化。感应电炉熔炼原理如图 1-3 所示。

(4) 坩埚炉 坩埚炉分为：燃油、燃气、焦炭和电阻坩埚炉。主要用于有色金属的熔炼，如铜合金、铝合金、镁合金、低熔点轴承合金等。坩埚炉熔炼原理如图 1-4 所示。

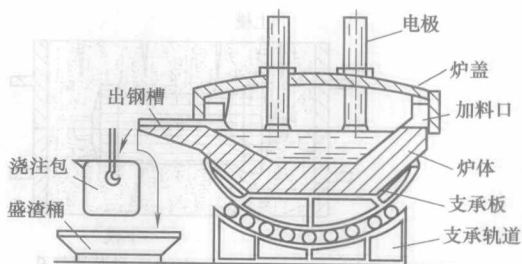


图 1-2 电弧炉主要结构



图 1-3 感应电炉熔炼原理

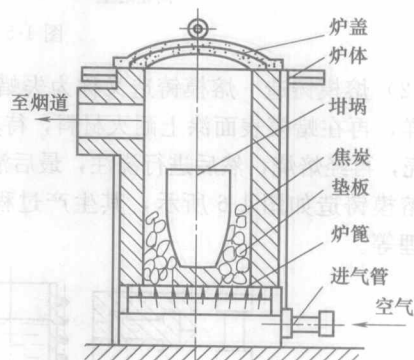


图 1-4 坩埚炉熔炼原理

### 1.1.3 液态成形方法

铸造又可按铸型的材料分为砂型铸造和金属型铸造。

铸造还可按金属液的浇注工艺分为重力铸造和压力铸造。重力铸造是指金属液在地球重力作用下注入铸型的工艺，也称浇铸。广义的重力铸造包括砂型浇铸、金属型浇铸、熔模铸造、消失模铸造、泥模铸造等；狭义的重力铸造专指金属型浇铸。压力铸造是指金属液在其他外力（不含重力）作用下注入铸型的工艺，按照压力的大小，又分为高压铸造（压铸）和低压铸造。

(1) 砂型铸造 砂型铸造是一种以型（芯）砂为主要造型材料制备铸型的方法。砂型铸造是传统铸造工艺。砂型铸造一般采用重力铸造，有特殊要求时也可采用低压铸造、离心铸造等工艺。砂型铸造的适应性很广，小件、大件，简单件、复杂件，单件、大批量都可采用。砂型铸造用的模具，一般以木材制作，通称木模。此外，砂型比金属型耐火度更高，因而如铜合金和黑色金属等熔点较高的材料也多采用这种工艺。但是，砂型铸造也有一些不足之处：因为每个砂质铸型只能浇注一次，获得铸件后铸型即损坏，必须重新造型，所以砂型铸造的生产效率较低；又因为砂的整体性质软而多孔，所以砂型铸造的铸件尺寸精度较低，表面也较粗糙。

常见的砂型铸造过程如图 1-5 所示，造型方法有：整模造型、两箱造型、三箱造型、活块造型、刮板造型、挖砂造型等。

常见的典型铸件有：床身铸件、三通铸件、支架类铸件等。

常见的砂型结构有：砂芯、砂垛、外型芯等。

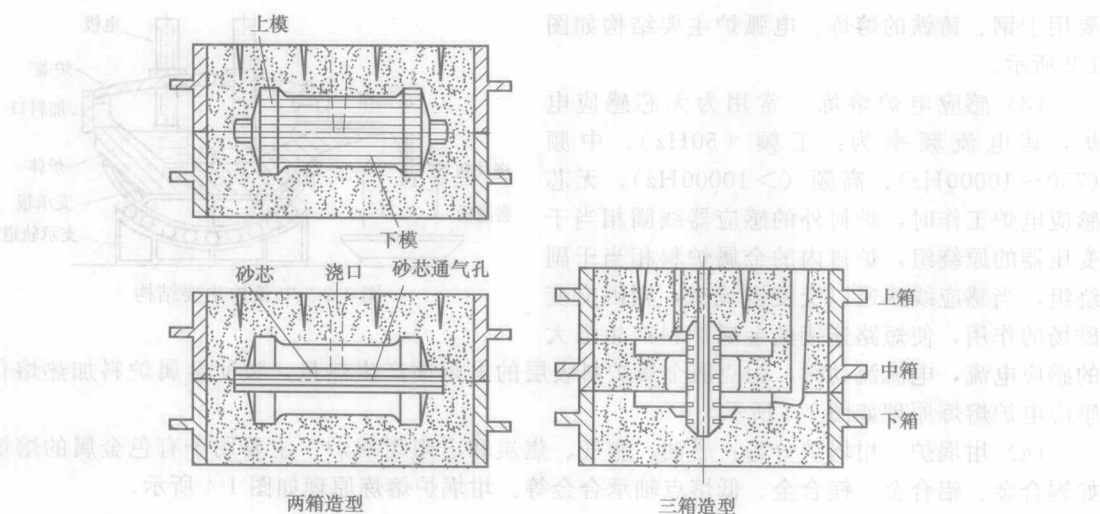


图 1-5 常见的砂型铸造过程

(2) 熔模铸造 熔模铸造又称为失蜡铸造、熔模精密铸造。方法是先将低熔点易熔材料蜡制成模样，再在蜡模表面涂上耐火材料，待其硬化干燥后将其中的蜡模样熔失，而制成无分型面的铸型型壳，再经焙烧，然后进行浇注，最后清理获得铸件。特点是铸件尺寸精度高、表面质量好。

熔模铸造如图 1-6 所示，其生产过程为：组装蜡模、上涂料、失蜡、熔模焙烧、熔模浇注及清理等。

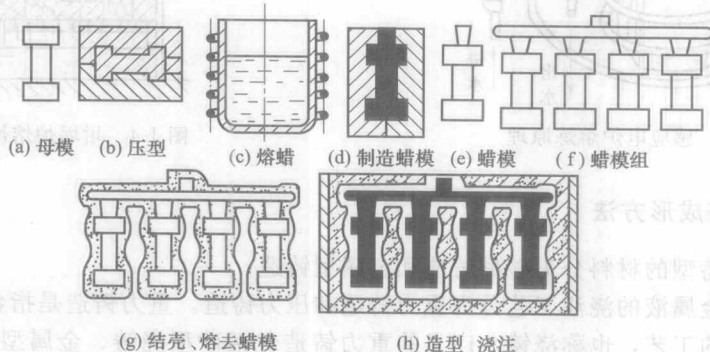


图 1-6 熔模铸造

(3) 金属型铸造 金属型铸造又称硬模铸造、永久型铸造。其铸型是由金属材料制成，一般用耐热合金钢制作铸造用中空铸型模具的现代工艺，如图 1-7 所示。金属型既可采用重力铸造，也可采用压力铸造。金属型的铸型模具能反复多次使用，每浇注一次金属液，就获得一次铸件，寿命很长，生产效率很高。金属型的铸件不但尺寸精度高、表面光洁，而且在浇注相同金属液的情况下，其铸件强度要比砂型的更高，更不容易损坏。因此，在大批量生产有色金属的中、小铸件时，只要铸件材料的熔点不过高，一般都优先选用金属型铸造。但是，金属型铸造也有一些不足之处：因为耐热合金钢和在它上面做出中空型腔的加工都比较昂贵，所以金属型的模具费用不菲，不过总体和压铸模具费用比起来则便宜多了。对小批量生产而言，分摊到每件产品上的模具费用明显过高，一般不易接受。又因为金属型的模具受模具材料尺寸和型腔加工设备、铸造设备能力的限制，所以金属型不适合于特别大的铸件生产。在小批量及大件生产中，一般不采用金属型铸造。此外，金属型模具虽然采用了耐热合金钢，但耐热能力仍有

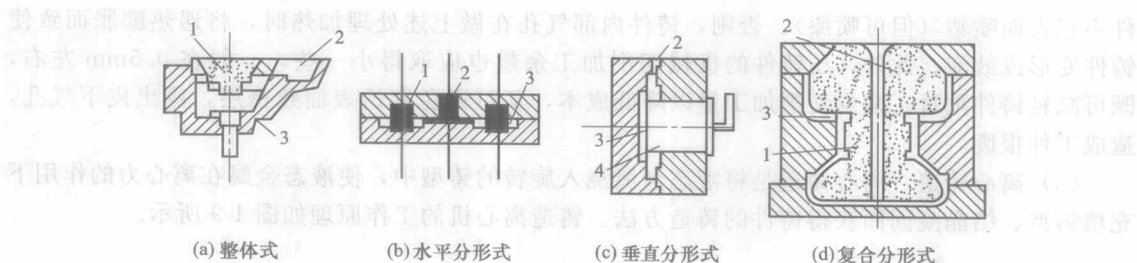


图 1-7 金属型铸造形式

1—砂芯；2—浇口；3—型腔；4—金属芯

限，一般多用于铝合金、锌合金、镁合金的铸造，在铜合金铸造中已较少应用，而用于黑色金属铸造就更少了。

(4) 压力铸造 压力铸造简称压铸，是将液态金属在高压作用下以较高的速度充填压铸型腔，并在压力作用下结晶凝固而获得铸件的方法。

压力铸造的生产原理如图 1-8 所示，常用的生产设备有热压铸机、卧式压铸机等。压铸是目前生产效率最高的铸造工艺。压铸机分为热室压铸机和冷室压铸机两类。热室压铸机自动化程度高，材料损耗少，生产效率比冷室压铸机更高，但受机件耐热能力的制约，目前还只能用于锌合金、镁合金等低熔点材料的铸件生产。当今广泛使用的铝合金压铸件，由于熔点较高，只能在冷室压铸机上生产。压铸的主要特点是金属液在高压、高速下填充型腔，并在高压下成形、凝固。压铸件的不足之处是：因为金属液在高压、高速下填充型腔的过程中，不可避免地把型腔中的空气夹裹在铸件内部，形成皮下气孔，所以铝合金压铸件不宜热处理，锌合金压铸

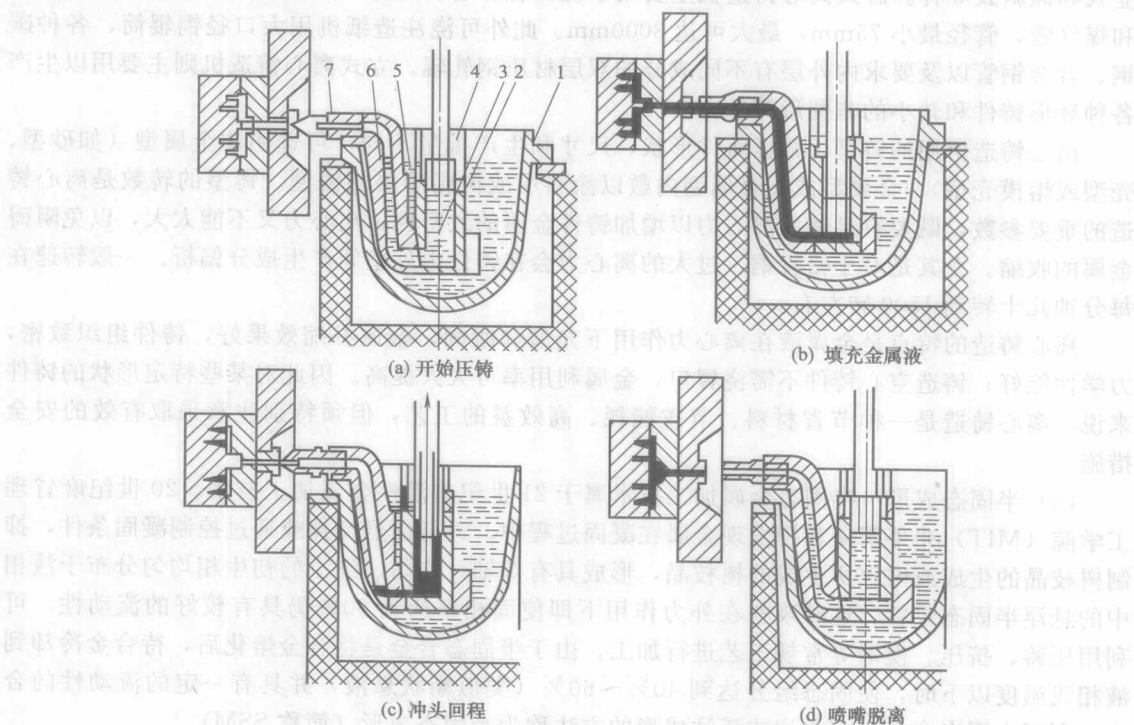


图 1-8 压力铸造的生产原理

1—坩埚；2—进口；3—压室；4—压射冲头；5—金属液；6—通道；7—喷嘴

件不宜表面喷塑（但可喷漆）。否则，铸件内部气孔在做上述处理加热时，将遇热膨胀而致使铸件变形或鼓泡。此外，压铸件的机械切削加工余量也应取得小一些，一般在 0.5mm 左右，既可减轻铸件重量、减少切削加工量以降低成本，又可避免穿透表面致密层，露出皮下气孔，造成工件报废。

(5) 离心铸造 离心铸造是将液态金属浇入旋转的铸型中，使液态金属在离心力的作用下充填铸型、结晶凝固而获得铸件的铸造方法。铸造离心机的工作原理如图 1-9 所示。

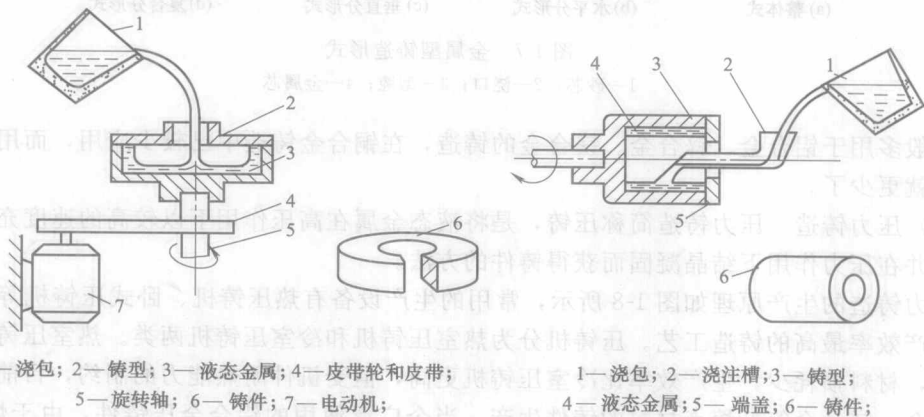


图 1-9 离心铸造机工作原理

离心铸造用的机器称为离心铸造机。按照铸型的旋转轴方向不同，离心铸造机分为卧式、立式和倾斜式 3 种。卧式离心铸造机主要用于浇注各种管状铸件，如灰铸铁、球墨铸铁的水管和煤气管，管径最小 75mm，最大可达 3000mm。此外可浇注造纸机用大口径铜辊筒，各种碳钢、合金钢管以及要求内外层有不同成分的双层材质钢轧辊。立式离心铸造机则主要用以生产各种环形铸件和较小的非圆形铸件。

离心铸造所用的铸型，根据铸件形状、尺寸和生产批量不同，可选用非金属型（如砂型、壳型或熔模壳型）、金属型或在金属型内敷以涂料层或树脂砂层的铸型。铸型的转数是离心铸造的重要参数，既要有足够的离心力以增加铸件金属的致密性，离心力又不能太大，以免阻碍金属的收缩。尤其是对于铅青铜，过大的离心力会在铸件内外壁间产生成分偏析。一般转速在每分钟几十转到 1500 转左右。

离心铸造的特点是金属液在离心力作用下充型和凝固，金属补缩效果好，铸件组织致密，力学性能好；铸造空心铸件不需浇冒口，金属利用率可大大提高。因此对某些特定形状的铸件来说，离心铸造是一种节省材料、节省能耗、高效益的工艺，但须特别注意采取有效的安全措施。

(6) 半固态成形 半固态金属加工技术属于 21 世纪前沿性金属加工技术。20 世纪麻省理工学院（MIT）弗莱明斯教授发现金属在凝固过程中，进行强烈搅拌或通过控制凝固条件，抑制树枝晶的生成或破碎所生成的树枝晶，形成具有等轴、均匀、细小的初生相均匀分布于液相中的悬浮半固态浆料。这种浆料在外力作用下即使固相率达到 60% 仍具有较好的流动性。可利用压铸、挤压、模锻等常规工艺进行加工。由于半固态合金是将合金熔化后，待合金冷却到液相线温度以下时，使固态组分达到 40%~60%（类似糊状悬液）并具有一定的流动性的合金。利用半固态合金实现浇注或压注成型的方法称为半固态成形（简称 SSM）。

半固态成形的特点：应用范围广；铸件质量高，力学性能好，尺寸精度高；成型时减少了对成型装置的热冲击，节省能源；便于实现自动化，提高了劳动生产率，降低了生产

成本。

半固态成型的方法如下。

① 流变成形 利用半固态金属制备器，批量制备或连续制备糊状浆料，然后直接进行铸造、挤压、轧制、模锻等成型的方法，半固态流变成形原理如图 1-10 所示。

② 触变成形 利用半固态金属制备器制成半固态浆料，冷却后得到铸锭。再分割铸锭并加热到半固态温度进行成型的方法，半固态触变成形原理如图 1-11 所示。

除上述成形外，液态金属还可以铸锻成形、液态挤压、连续铸挤、液态轧制等成形方法。不同的方法可以制作不同的产品和批量。

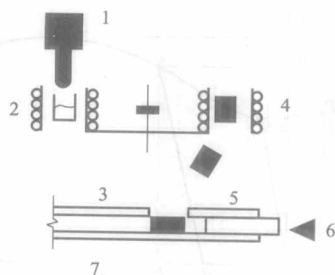


图 1-10 半固态流变成形原理

1—浆料制备器；2—充型；3—转送台；4—运出；5—运送台；6—柱塞；7—成形系统

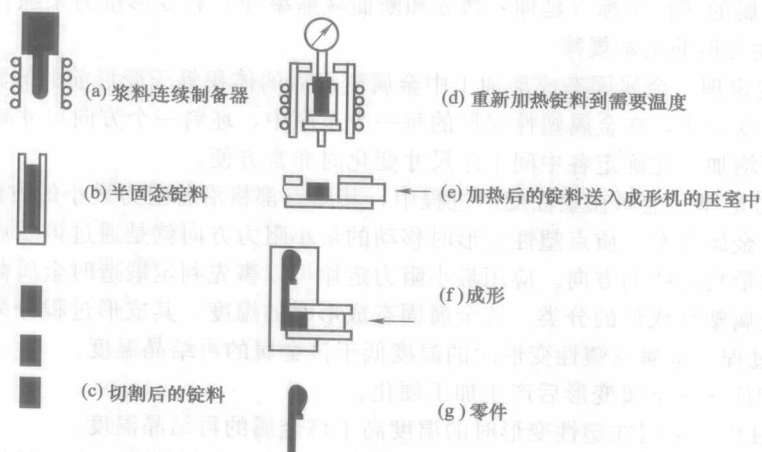


图 1-11 半固态触变成形原理

## 1.2 固态塑性成形

### 1.2.1 概述

(1) 固态金属的塑性、塑性成形及其特点 将圆柱形试样进行拉伸实验时，拉力  $P$  与试样伸长  $\Delta l$  之间的关系如图 1-12 所示。可看出，当作用力  $P < P_e$ （弹性极限载荷）时进行卸载，伸长沿  $eo$  方向减小，最后伸长消失，试样恢复原来长度，这种性质称为材料弹性。当作用力  $P > P_e$ （屈服极限载荷），例如加载到  $c$  点，然后进行卸载，则伸长随载荷的减小而沿  $cd$  方向变化（ $cd \parallel eo$ ）。卸载后，试样中保留残留变形  $od$ ，这种残余变形称为塑性变形，即当作用在物体上的外力取消后，物体的变形不能完全恢复而产生的残余变形。在外力作用下使金属材料发生塑性变形而不破坏其完整性的能力称为塑性。

金属材料的塑性成形又称金属压力加工，它是指在外力作用下，使金属材料产生预期的塑性变形，以获得所需形状、尺寸和力学性能的毛坯或零件的加工方法。

金属材料固态成型的基本条件：一是成形的金属必须具备可塑性；二是外力的作用。

金属塑性成形有如下的特点：材料利用率高；生产效率高；产品质量高，性能好，缺陷少；加工精度和成形极限有限；模具、设备费用高。

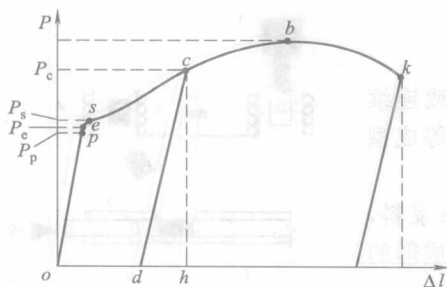


图 1-12 塑性材料试样拉伸时  
拉力与伸长之间的关系

利用金属固态塑性成形过程可获得强度高、性能好的产品，生产率高、材料消耗少。但该方法投资大、能耗大、成形件的形状和大小受到一定限制。

## (2) 金属塑性成形过程的理论基础

① 金属塑性变形的能力 金属塑性变形的实质——金属塑性变形是金属晶体每个晶粒内部的变形（晶内变形）和晶粒间的相对移动、晶粒的转动（晶界变形）的综合结果。

金属塑性变形的能力又称为金属的可锻性，它指金属材料在塑性成形加工时获得毛坯或零件的难易程度。

可锻性用金属的塑性指标（延伸系数  $\delta$  和断面减缩率  $\Psi$ ）和变形抗力来综合衡量。

### ② 金属塑性变形的基本规律

a. 体积不变定理 金属固态成形加工中金属变形后的体积等于变形前的体积。

根据体积不变定律，在金属塑性变形的每一个工序中，坯料一个方向尺寸减少，必然在其他方向尺寸有所增加，在确定各中间工序尺寸变化时非常方便。

b. 最小阻力定律 金属在塑性变形过程中，其质点都将沿着阻力最小的方向移动。

一般来说，金属内某一质点塑性变形时移动的最小阻力方向就是通过该质点向金属变形部分的周边所作的最短法线的方向。应用最小阻力定律可以事先判定锻造时金属截面的变化。

(3) 固态金属塑性成形的分类 按金属固态成形时的温度，其成形过程分为两大类。

① 冷变形过程 金属在塑性变形时的温度低于该金属的再结晶温度。

冷变形的特征——金属变形后产生加工硬化。

② 热变形过程 金属在塑性变形时的温度高于该金属的再结晶温度。

热变形的特征——金属变形后会再结晶，塑性好，消除内部缺陷，产生纤维组织。

### (4) 提高金属塑性的基本途径

① 提高材料成分和组织的均匀性。

② 合理选择变形温度和应变速率。

③ 选择三向压缩性较强的变形方式。

④ 减小变形的不均匀性：不均匀变形会引起附加应力，促使裂纹的产生。

## 1.2.2 固态金属塑性成形的方法

(1) 轧制 轧制是将金属坯料通过两个旋转轧辊间的特定空间使其产生塑性变形，以获得一定截面形状材料的塑性成形方法。一般可分为压机开坯、轧板、轧圆钢等。具体轧制方法如下。

① 按轧制温度：热轧和冷轧。

② 按轧件与轧辊的相对运动关系。

a. 纵轧 轧辊的纵轴线相互平行，轧件运动方向与延伸方向与轧辊纵轴线垂直。

b. 斜轧 轧辊的纵轴线倾斜互成一定角度，轧件边旋转边沿自身纵轴线方向前进，且前进方向与轧辊纵轴线方向成一定角度。

c. 横轧 轧辊的纵轴线相互平行，轧件沿自己的横轴线方向运动前进，与轧辊纵轴线垂直。图 1-13 为 3 种轧制示意。

③ 按轧制生产过程 半成品轧制——开坯；成品轧制——粗轧、精轧。

(2) 挤压 挤压是将金属置于一个封闭的挤压模内，用强大的挤压力将金属从模孔中挤出

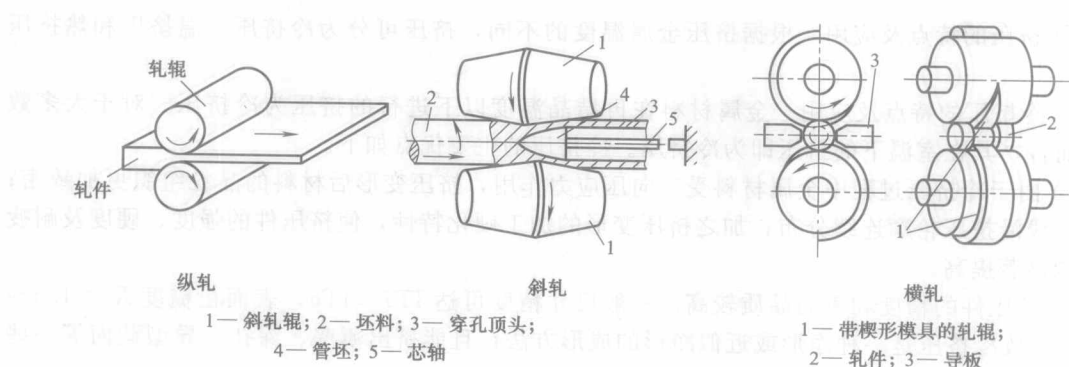


图 1-13 轧制示意

成形的方法。挤压是利用锻压设备的简单往复运动，使金属通过模具内具有一定形状和一定尺寸的孔，发生塑性变形而得到所需要的工件。

① 零件的挤压方式 根据挤压时金属流动方向与凸模运动方向的关系，挤压具有 4 种基本方式。

a. 正挤压 挤压时金属的流动方向与凸模的运动方向一致。正挤压法适用于制造横截面是圆形、椭圆形、扇形、矩形等的零件，也可是等截面的不对称零件。如图 1-14 所示。

b. 反挤压 挤压时金属的流动方向与凸模的运动方向相反。反挤压法适用于制造横截面为原形、方形、长方形、多层圆形、多格盒形的空心件。如图 1-15 所示。

c. 复合挤压 挤压时坯料的一部分金属流动方向与凸模运动方向一致，而另一部分金属流动方向则与凸模运动方向相反。复合挤压法适用于制造截面为圆形、方形、六角形、齿形、花瓣形的双杯类、杯-杆类零件。如图 1-16 所示。

d. 径向挤压 挤压时金属的流动方向与凸模的运动方向相垂直。此类成型过程可制造十字轴类零件，也可制造花键轴的齿形部分、齿轮的齿形部分等。如图 1-17 所示。

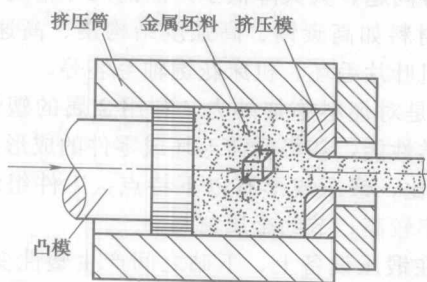


图 1-14 正挤压

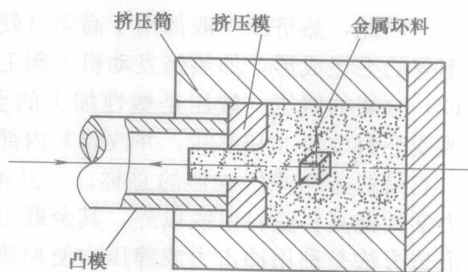


图 1-15 反挤压

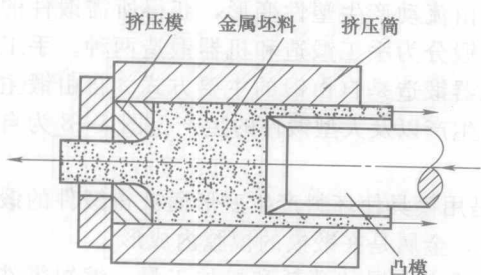


图 1-16 复合挤压

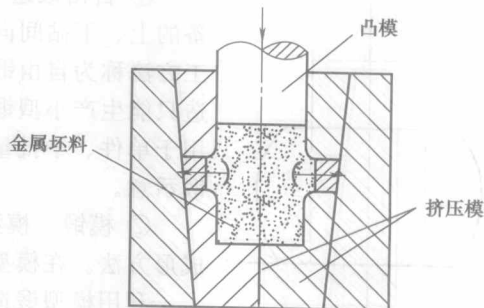


图 1-17 径向挤压