

DUAN GONG

SU CHENG YU TI GAO



机械工人速成与提高丛书

# 锻工 速成与提高



程里 程方 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

机械工人速成与提高丛书

参考文献

# 锻工速成与提高

程里 程方 编著



机械工业出版社

本书是为锻造工人编写的一本速成与提高技术图书。内容包括：锻造基础知识，锻造材料和计算，锻造下料方法，锻造加热规范，自由锻，模锻，锤上模锻，压力机模锻和胎模锻，锻后工序，大型锻件、高合金钢及有色金属锻造，锻件质量检验与缺陷分析，锻造设备，以及锻造安全生产规程。本书内容通俗、详实、切中要点，在编排上注意循序渐进，每个工序环节的解释从为什么、做什么、如何做方面入手，具有较好的可操作性和实用性。

本书的主要读者对象是锻造工人，也可供锻造技术人员和锻造专业学生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

锻工速成与提高/程里，程方编著. —北京：机械工业出版社，2008.9

(机械工人速成与提高丛书)

ISBN 978-7-111-24978-8

I. 锻… II. ①程…②程… III. 锻工 - 基本知识 IV. TG31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 128929 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：陈保华 责任编辑：陈保华 刘本明 版式设计：霍永明

责任校对：李秋荣 封面设计：陈 沛 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (北京樱花印刷厂装订)

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 21.5 印张 · 418 千字

0 001—4 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-24978-8

定价：35.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

金属锻造加工是具有悠久历史的金属成形方法。早在两千多年前的春秋时期,我国古代劳动人民就已经发现铜具有塑性变形的性能,并掌握了锤击金属以制造兵器和工具的技术。到了战国时期,随着炼铁技术的出现,锻造技术更广泛地应用在兵器、农具、工具和生活用品的制作上。随着近代工业的发展和科学技术的进步,锻造技术在制造业中发挥重要作用的同时,又被赋予了崭新的内容和含义,其本身也得到了长足的发展。目前,锻造生产已进入了现代化和专业化生产的时代,生产效率越来越高,锻件质量越来越大,形状越来越复杂,精密程度越来越高。锻造生产广泛应用于机械、冶金、造船、航空、航天、兵器以及其他许多工业部门,在国民经济中占有极为重要的地位。一个国家锻造的生产能力及其工艺水平,从某种程度上代表着一个国家的工业、农业、国防和科学技术的水平。

锻造加工是一个技术密集型的行业,职工队伍的一半以上是技术工人。作为极其重要的技术力量,锻工不仅仅是简单的工艺执行者,也不仅仅是熟练工种,他们长期在生产第一线,有许多非常实用的经验,对于工艺的改进、技术的革新、生产率的提高起着非常重要的作用,尤其是对锻造生产特有的敏感性,以及对锻造生产节奏和韵律的掌握,是技术人员所不能替代的。今天,随着锻造理论体系不断更新、计算机模拟技术和模具制造技术飞速发展以及新工艺、新设备的出现,也对锻工的操作技能和理论水平提出了更高的要求。

对于一名合格的锻工而言,最重要的是能够灵活、正确地运用所学的锻造知识,而不能只满足于了解一些锻造的操作方法。对于刚刚从事锻造加工生产的工人,第一要建立自己的实用理论体系,尽管锻造零件形状、尺寸、成形方法千差万别,但只要把握住锻造原理、变形规律及其锻造方法,就能举一反三。第二要实践,将所学的知识应用到生产实际中去,用心去体会、消化和吸收。把书本知识和实践经验真正结合起来,变成自己的东西,才能做到得心应手。

本书主要是为工作在锻造生产第一线的工人学习而编写。在内容上以初级工为基础,目的是使初级工在入门的基础上能更快地得到提高,在技术级别上并无明显界线。

本书第1章介绍了锻造成形的基础知识。第2章至第4章介绍了锻造准备方面的内容,包括锻造材料和计算、锻造下料方法及锻造加热规范。第5章至第10章介绍了各种锻造工艺方法,内容包括自由锻,模锻,锤上锻模,压力机模

#### IV

锻和胎模锻, 锻后工序, 大型锻件、高合金钢及有色金属锻造。第 11 章介绍了锻件质量检验与缺陷分析。第 12 章介绍了常见锻造设备的结构、工作原理、操作方法。第 13 章介绍了锻造安全生产规程。

本书第 1、5、6、7、8、9、11 和 13 章由重庆工学院程里研究员级高工编写, 第 2、3、4、10 和 12 章由重庆邮电大学程方副教授编写。

本书作者曾长期扎根基层, 在锻造理论研究和实际应用技术的结合上做了大量工作, 希望通过自己对锻造的认识和理解, 给广大读者有益的帮助。

由于受个人视野和专业范围所限, 本书难免存在不足与错漏之处, 敬请批评指正。

作者

# 目 录

## 前言

## 第1章 锻造基础知识 ..... 1

### 1.1 锻造概述 ..... 1

### 1.2 金属变形基础 ..... 2

#### 1.2.1 金属的原子结构 ..... 2

#### 1.2.2 金属的两种变形 ..... 3

### 1.3 加工硬化与回复再结晶 ..... 6

### 1.4 锻造力学基础 ..... 8

### 1.5 金属塑性变形基本定律 ..... 10

### 1.6 金属的可锻性 ..... 12

#### 1.6.1 金属的塑性 ..... 12

#### 1.6.2 金属的变形抗力 ..... 16

#### 1.6.3 金属的流动性 ..... 17

### 1.7 金属的变形程度及锻造透性 ..... 18

### 1.8 锻造加工对金属组织与性能的改善 ..... 20

## 第2章 锻造材料和计算 ..... 23

### 2.1 锻造材料 ..... 23

#### 2.1.1 钢 ..... 23

#### 2.1.2 有色金属及合金 ..... 27

### 2.2 锻造材料及其缺陷 ..... 27

#### 2.2.1 钢锭 ..... 27

#### 2.2.2 型材 ..... 31

### 2.3 锻造材料规格及其算料方法 ..... 31

#### 2.3.1 原材料规格 ..... 32

#### 2.3.2 坯料和锻件的计算 ..... 35

## 第3章 锻造下料方法 ..... 45

### 3.1 常见锻造下料方法 ..... 45

### 3.2 剪切下料 ..... 46

#### 3.2.1 剪断机吨位的选择 ..... 46

#### 3.2.2 剪切原理及剪切参数选择 ..... 47

#### 3.2.3 剪切预热 ..... 50

#### 3.2.4 剪切质量要求 ..... 51

#### 3.2.5 压力机剪切 ..... 53

#### 3.2.6 锤上剪切 ..... 54

#### 3.2.7 剪切缺陷及预防 ..... 54

### 3.3 锯切、冷折和气割下料 ..... 55

#### 3.3.1 锯切下料 ..... 55

#### 3.3.2 冷折和气割下料 ..... 57

## 第4章 锻造加热规范 ..... 59

### 4.1 加热时钢的组织转变 ..... 59

#### 4.1.1 同素异构转变 ..... 59

#### 4.1.2 铁碳合金相图 ..... 59

### 4.2 锻造加热方式 ..... 61

#### 4.2.1 火焰加热 ..... 62

#### 4.2.2 电加热 ..... 64

#### 4.2.3 常用锻造加热炉 ..... 65

### 4.3 加热缺陷及其防止方法 ..... 66

#### 4.3.1 氧化 ..... 66

#### 4.3.2 脱碳 ..... 68

#### 4.3.3 过热 ..... 68

#### 4.3.4 过烧 ..... 69

#### 4.3.5 内部裂纹 ..... 69

### 4.4 锻造温度范围和加热保温时间 ..... 70

#### 4.4.1 锻造加热温度的确定 ..... 70

#### 4.4.2 装炉方式 ..... 72

#### 4.4.3 装炉温度与加热速度 ..... 73

#### 4.4.4 加热及保温时间 ..... 74

## 第5章 自由锻 ..... 77

### 5.1 手工锻造 ..... 77

#### 5.1.1 手工锻造常用工具 ..... 77

#### 5.1.2 手工锻造操作要领 ..... 79

#### 5.1.3 手工锻造基本工序 ..... 82

## VI

|                           |     |                               |     |
|---------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 5.2 自由锻工具 .....           | 84  | 6.3.1 闭式模锻成形过程 .....          | 145 |
| 5.2.1 型砧 .....            | 84  | 6.3.2 闭式模锻的模膛填充形式 .....       | 146 |
| 5.2.2 夹持工具 .....          | 86  | 6.3.3 锻压设备闭式模锻比较 .....        | 148 |
| 5.2.3 成形工具 .....          | 89  | 6.4 模锻件 .....                 | 148 |
| 5.3 自由锻基本工序 .....         | 91  | 6.4.1 模锻件分类 .....             | 148 |
| 5.3.1 镦粗 .....            | 91  | 6.4.2 模锻件生产工艺流程 .....         | 150 |
| 5.3.2 拔长 .....            | 95  | 6.4.3 模锻件图 .....              | 151 |
| 5.3.3 冲孔 .....            | 99  | 6.4.4 模锻件分模位置选择 .....         | 151 |
| 5.3.4 扩孔 .....            | 102 | 6.4.5 拔模斜度 .....              | 152 |
| 5.3.5 芯轴拔长 .....          | 106 | 6.4.6 圆角半径 .....              | 154 |
| 5.3.6 弯曲 .....            | 107 | 6.4.7 冲孔连皮 .....              | 154 |
| 5.3.7 错移 .....            | 109 | 6.5 模锻件机械加工余量与公差 .....        | 156 |
| 5.3.8 扭转 .....            | 110 | 6.6 模锻件的结构特点和技术条件 .....       | 157 |
| 5.3.9 切割 .....            | 110 | <b>第7章 锤上模锻</b> .....         | 159 |
| 5.4 自由锻辅助及修整工序 .....      | 113 | 7.1 锤上模锻成形方法 .....            | 159 |
| 5.4.1 压痕与压肩 .....         | 113 | 7.1.1 模锻变形工步 .....            | 159 |
| 5.4.2 其他辅助或修整工序 .....     | 114 | 7.1.2 短轴类(饼类)锻件锤上模锻成形步骤 ..... | 162 |
| 5.5 自由锻工艺过程 .....         | 115 | 7.1.3 杆(长轴)类锻件锤上模锻成形步骤 .....  | 164 |
| 5.5.1 锻件图的名词术语 .....      | 116 | 7.1.4 模锻方法选择 .....            | 167 |
| 5.5.2 锻件图的绘制 .....        | 117 | 7.2 坯料的计算 .....               | 170 |
| 5.5.3 毛坯质量和尺寸的确定 .....    | 117 | 7.2.1 锻件质量计算 .....            | 170 |
| 5.5.4 变形工步选择 .....        | 120 | 7.2.2 坯料规格的确定 .....           | 173 |
| 5.5.5 锻造设备吨位的选择 .....     | 121 | 7.3 锻锤吨位的确定 .....             | 174 |
| 5.6 常见零件自由锻方法 .....       | 123 | 7.4 终锻模膛和终锻操作 .....           | 177 |
| 5.6.1 饼类锻件 .....          | 123 | 7.5 预锻模膛和预锻操作 .....           | 180 |
| 5.6.2 轴类锻件 .....          | 128 | 7.6 制坯模膛和制坯操作 .....           | 185 |
| 5.6.3 空心锻件 .....          | 130 | 7.6.1 镦粗台与压扁台 .....           | 186 |
| 5.6.4 弯曲类锻件 .....         | 133 | 7.6.2 弯曲模膛与成形模膛 .....         | 188 |
| 5.6.5 曲轴类锻件 .....         | 135 | 7.6.3 拔长类模膛和拔长类操作 .....       | 192 |
| <b>第6章 模锻</b> .....       | 137 | 7.6.4 切断模膛 .....              | 198 |
| 6.1 模锻成形概述 .....          | 137 | 7.7 锤上锻模紧固方式与型模布置 .....       | 199 |
| 6.2 开式模锻 .....            | 138 | 7.7.1 锤锻模的紧固方式 .....          | 199 |
| 6.2.1 轴对称变形与平面变形 .....    | 139 |                               |     |
| 6.2.2 开式模锻的变形过程 .....     | 140 |                               |     |
| 6.2.3 填充模膛的三种形式 .....     | 141 |                               |     |
| 6.2.4 开式模锻填充模膛的难易程度 ..... | 142 |                               |     |
| 6.3 闭式模锻 .....            | 144 |                               |     |

|            |                  |            |
|------------|------------------|------------|
| 7.7.2      | 锤锻模的安装和调整        | 202        |
| 7.7.3      | 锤锻模型模布置          | 203        |
| 7.7.4      | 错移力的平衡           | 207        |
| 7.7.5      | 锻模尺寸             | 211        |
| 7.7.6      | 镶块锻模             | 216        |
| <b>第8章</b> | <b>压力机模锻和胎模锻</b> | <b>220</b> |
| 8.1        | 螺旋压力机模锻          | 220        |
| 8.1.1      | 螺旋压力机模锻的工艺特点     | 220        |
| 8.1.2      | 螺旋压力机模锻的成形步骤     | 222        |
| 8.1.3      | 摩擦压力机锻模结构及紧固方式   | 224        |
| 8.2        | 热模锻压力机上模锻        | 226        |
| 8.2.1      | 热模锻压力机模锻的工艺特点    | 226        |
| 8.2.2      | 热模锻压力机锻件与模膛参数    | 227        |
| 8.2.3      | 热模锻压力机成形步骤       | 229        |
| 8.2.4      | 热模锻压力机的锻模结构和紧固方式 | 231        |
| 8.3        | 平锻机上模锻           | 236        |
| 8.3.1      | 平锻机成形特点          | 236        |
| 8.3.2      | 平锻机成形条件          | 238        |
| 8.3.3      | 平锻机成形举例          | 241        |
| 8.4        | 胎模锻              | 242        |
| 8.4.1      | 胎模锻成形特点          | 242        |
| 8.4.2      | 胎模工具及锻模          | 243        |
| <b>第9章</b> | <b>锻后工序</b>      | <b>254</b> |
| 9.1        | 切边和冲孔            | 254        |
| 9.1.1      | 模锻件的切边和冲孔方法      | 254        |
| 9.1.2      | 切边模及紧固方式         | 255        |
| 9.1.3      | 冲孔模              | 260        |
| 9.2        | 锻件校正、热处理及清理      | 261        |
| 9.3        | 锻模的使用和维护         | 264        |
| 9.3.1      | 锻模材料             | 264        |
| 9.3.2      | 锻模的损坏形式及原因       | 265        |

|             |                         |            |
|-------------|-------------------------|------------|
| 9.3.3       | 锻模的使用维护                 | 266        |
| <b>第10章</b> | <b>大型锻件、高合金钢及有色金属锻造</b> | <b>269</b> |
| 10.1        | 大型锻件的锻造                 | 269        |
| 10.1.1      | 大型锻件的锻造工艺特点             | 269        |
| 10.1.2      | 大型锻件的锻造方法               | 270        |
| 10.1.3      | 大型锻件锻造工艺实例              | 273        |
| 10.2        | 高合金钢的锻造                 | 275        |
| 10.2.1      | 高速钢                     | 275        |
| 10.2.2      | Cr12型冷作模具用钢             | 280        |
| 10.2.3      | 不锈钢                     | 281        |
| 10.3        | 有色金属的锻造                 | 284        |
| 10.3.1      | 铝合金                     | 284        |
| 10.3.2      | 铜合金                     | 286        |
| 10.3.3      | 钛合金                     | 288        |
| <b>第11章</b> | <b>锻件质量检验与缺陷分析</b>      | <b>290</b> |
| 11.1        | 锻件几何形状与尺寸的检验            | 290        |
| 11.1.1      | 测量工具和检验方法               | 290        |
| 11.1.2      | 划线检查                    | 294        |
| 11.2        | 锻件表面和内部质量检验             | 295        |
| 11.2.1      | 锻件表面质量检验                | 295        |
| 11.2.2      | 锻件内部质量检验                | 295        |
| 11.3        | 锻件缺陷的主要特征及其产生原因         | 296        |
| <b>第12章</b> | <b>锻造设备</b>             | <b>303</b> |
| 12.1        | 锻锤类设备                   | 303        |
| 12.1.1      | 锻锤类设备的锻造工艺特点            | 303        |
| 12.1.2      | 空气锤                     | 304        |
| 12.1.3      | 蒸汽-空气自由锻锤               | 305        |
| 12.1.4      | 蒸汽-空气模锻锤                | 307        |
| 12.1.5      | 蒸汽-空气对击锤                | 310        |
| 12.1.6      | 液压模锻锤                   | 310        |
| 12.1.7      | 摩擦压力机                   | 313        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 12.1.8 液压螺旋压力机 .....       | 316 |
| 12.2 机械压力机类设备 .....        | 316 |
| 12.2.1 热模锻压力机 .....        | 316 |
| 12.2.2 平锻机 .....           | 319 |
| 12.3 液压机类设备 .....          | 321 |
| 12.3.1 液压机的工作原理及工作特点 ..... | 321 |
| 12.3.2 自由锻液压机 .....        | 323 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 12.3.3 模锻液压机 ..... | 326 |
|--------------------|-----|

## 第13章 锻造安全生产规程 .....

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 13.1 锻造车间安全生产一般准则 ..... | 327 |
| 13.2 自由锻造安全生产技术 .....   | 330 |
| 13.3 模锻安全生产技术 .....     | 333 |

## 参考文献 .....

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 1. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 2. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 3. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 4. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 5. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 6. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 7. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 8. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 9. 锻工安全技术规程 .....   | 335 |
| 10. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 11. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 12. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 13. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 14. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 15. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 16. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 17. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 18. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 19. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 20. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 21. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 22. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 23. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 24. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 25. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 26. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 27. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 28. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 29. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 30. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 31. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 32. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 33. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 34. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 35. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 36. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 37. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 38. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 39. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 40. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 41. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 42. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 43. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 44. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 45. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 46. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 47. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 48. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 49. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 50. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 51. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 52. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 53. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 54. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 55. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 56. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 57. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 58. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 59. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 60. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 61. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 62. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 63. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 64. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 65. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 66. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 67. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 68. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 69. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 70. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 71. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 72. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 73. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 74. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 75. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 76. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 77. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 78. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 79. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 80. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 81. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 82. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 83. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 84. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 85. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 86. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 87. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 88. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 89. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 90. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 91. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 92. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 93. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 94. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 95. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 96. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 97. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 98. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 99. 锻工安全技术规程 .....  | 335 |
| 100. 锻工安全技术规程 ..... | 335 |

# 第1章 锻造基础知识

## 1.1 锻造概述

### 1. 锻造加工的应用

通常生产机械零件毛坯的方法有三种：用铸造方法生产、直接用一定规格的轧制（挤压）棒材或型材、用锻造方法生产。

锻造（亦称锻压）是机械领域内生产零件或坯料的金属压力成形方法。锻造是用锤或压力机在热态或冷态下对金属锻打或加压使金属发生塑性变形，从而获得所需形状毛坯的过程。锻造不仅可以得到一定形状和尺寸的锻件，同时可以提高金属的内在性能。经过塑性变形而成的车轴、车轮和曲轴等锻件，内部变得密实、均匀，不仅强度高，而且有韧性，不易断裂。

### 2. 锻造加工的特点

（1）零件的高质量 金属在塑性成形过程中，其内部组织得到改善，金属连续性好，具有优良的力学性能。这是其他加工方法难以实现的。

（2）较高的生产率 生产效率高，适于大量生产。例如，在双动拉深压力机上，成形一个汽车覆盖件仅需几秒钟；在  $12000 \times 10\text{kN}$  热模锻压力机上锻造一根汽车发动机的六拐曲轴仅需 40s；在弧形板行星搓螺纹机上加工 M5 螺钉，生产率高达 12000 件/min，可相当于 18 台自动车床的总生产率。

（3）减少金属材料的加工损耗 锻造加工的塑性成形是通过材料的形状改变和体积转移来实现的。使用精密锻造压力加工，可使锻压件的尺寸精度和光洁程度接近成品，可以不产生切屑，材料利用率高，节约大量的金属材料。例如，精密模锻的伞齿轮，其齿形部分可不经切削加工而直接使用；精锻叶片的复杂曲面可达到只需磨削的精度。

（4）适用范围广 能加工各种形状及大小的零件，从形状简单的螺钉到形状复杂的曲轴，从质量不到 1g 的表针到重达数百吨的大轴都可锻造。

由于锻造加工具有上述特点，因此在冶金、有色金属加工、汽车、拖拉机、宇航、船舶、军工、仪器仪表、电器和日用五金等工业部门中得到了越来越广泛的应用。例如，发电设备中主轴、转子、叶轮、护环等重要零件均是由锻件制成的。飞机上锻件的质量占 85%，坦克上锻件的质量占 70%，汽车上锻件质量占 80%，机车上锻件质量占 60%，兵器上大部分零件都是经锻造制成的。

但是，与铸造、焊接等加工方法相比较，锻造产品的形状比较简单，生产

外形复杂和有内腔的零件比较困难。

### 3. 锻造加工的分类

锻造通常分为自由锻和模锻。自由锻一般是在锻锤或水压机上，利用简单的工具将金属锭或块料锻成所需形状和尺寸的加工方法。自由锻时不使用专用模具，因而锻件的尺寸精度低，生产率也不高，主要用于单件、小批量、大锻件生产或冶金厂的开坯。模锻是在模锻锤或热模锻压力机上利用模具来成形。由于金属的成形受模具控制，因此模锻件具有相当精确的外形和尺寸，也有相当高的生产率，适合于大批量生产。

按照锻造设备的成形特点，又可以将自由锻分为手工锻造、锤上自由锻造和水压机自由锻造，而模锻分为锤上模锻、压力机模锻、液压机模锻、平锻机模锻等。

锻造加工还可以按成形时工件的温度分为热锻、冷锻和温锻三类。

## 1.2 金属变形基础

金属最重要的特性之一就是具有优良的塑性，可对金属材料进行各种压力加工（如轧制型材、锻造或挤压零件、拉拔线材、冲压板材等工序）使其塑性成形。金属为什么能够塑性变形呢？这得从金属的原子结构以及原子受力行为说起。

### 1.2.1 金属的原子结构

金属在固态时都是晶体，晶体的原子在空间按规律排列。为便于分析和描述晶体中原子的排列情况，可示意地将原子缩小看成一个小球（图 1-1a），并用假想的线条将各原子中心连接起来，这样就得到一个按一定的规律堆积成的空间格架，这个空间格架叫做晶格（图 1-1b）。由于晶体中的原子排列具有周期性，为了简化分析，用能够完整反映晶格特征的最小几何单元——晶胞（图 1-1c），来描述晶体结构的类型和原子在空间的排列规律。

金属的晶体结构一般有三种排列方式：面心立方晶格、密排六方晶格和体心立方晶格。

（1）面心立方晶格 它的晶胞是一个立方体，在立方体八个顶角和六个面的中心各排列一个原子，如图 1-2a 所示。属于这种晶格类型的金属有铝、铜、铅、金、银、镍及  $\gamma$ -铁等。

（2）密排六方晶格 它的晶胞是一个六方柱体，在柱体的每个角上和上、下底面中心都排列一个原子，在晶胞中间排列有三个原子，如图 1-2b 所示。属于这种晶格类型的金属有镁、铍、镉及锌等。

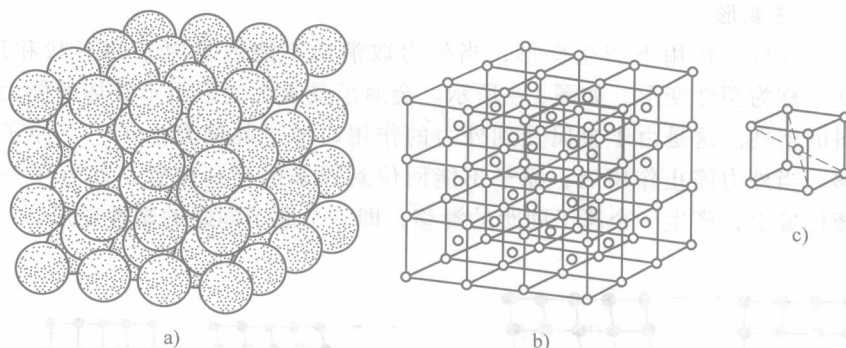


图 1-1 金属的原子排列

a) 晶体中原子的排列图 b) 晶格 c) 晶胞

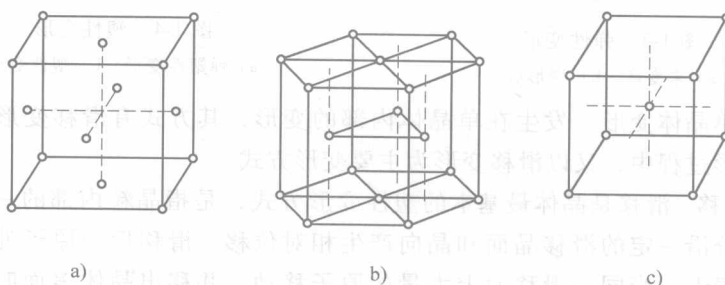


图 1-2 金属原子排列的三种方式

a) 面心立方晶格 b) 密排六方晶格 c) 体心立方晶格

(3) 体心立方晶格 它的晶胞是一个立方体，在立方体的八个顶角和立方体的中心各排列一个原子，如图 1-2c 所示。属于这类晶格类型的金属有铬、钒、铌、钼及  $\alpha$ -铁等。

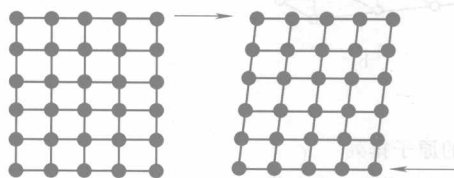
## 1.2.2 金属的两种变形

### 1. 弹性变形

金属在外力作用下产生变形，当外力取消后能恢复原来的形状和尺寸，这种变形称为弹性变形。这是由于金属受到外力的作用后，内部的晶格会产生内应力，迫使原子离开平衡位置，改变了原子间原来的相互距离，使原子晶格发生不到一个原子间距的微量扭曲。当外力停止作用后，内应力消失，原子恢复到原来的平衡位置，变形也随之消失（图 1-3）。在弹性范围内，金属的变形量和所受的力成正比，即遵守胡克定律。

## 2. 塑性变形

金属在外力作用下产生变形，当外力取消后不能恢复原来的形状和尺寸，这种变形称为塑性变形，如图 1-4 所示。金属承受永久变形而不破坏的能力，称为材料的塑性。这是由于金属受到外力的作用时原子晶格发生了一个原子间距的位移。当外力停止作用后，原子不能回位到原来的平衡位置，而处于一个新的平衡位置上，产生一个原子间距的滑移，即一个原子间距的塑性变形。

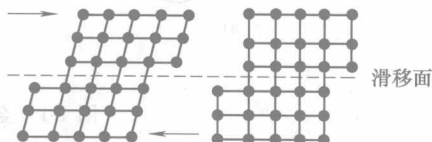


a)

b)

图 1-3 弹性变形

a) 未变形 b) 变形后



a)

b)

图 1-4 塑性变形

a) 弹性变形 b) 塑性变形

(1) 单晶体变形 发生在单晶体内部的变形，其方式有滑移变形和孪晶变形。而变形过程中，又以滑移变形为主要变形方式。

1) 滑移。滑移是晶体最基本的塑性变形方式，是指晶粒内部的一部分相对于另一部分沿一定的滑移晶面和晶向产生相对位移。滑移后的原子处于一个新的平衡位置上。当同一滑移面上大量的原子移动，并移出晶体表面时，便形成一条滑移线，造成晶体的塑性变形。

滑移是沿着一定的晶面进行的，这种晶面称为滑移面。晶体在滑移面上滑动的方向称为滑移方向。滑移面与该面上的滑移方向称为滑移系。一般而言，金属晶体的滑移系越多，金属的塑性就越好。体心立方晶格和面心立方晶格的金属都有 12 个滑移系，而密排六方晶格的金属只有 3 个滑移系，所以面心立方和体心立方金属的塑性较密排六方金属为优。但滑移面及滑移方向的原子密度大小也是两个很重要的因素，滑移面总是原子排列最密的晶面，滑移方向总是原子排列最密的方向。面心立方晶格金属的一些晶面的面密度及晶向的线密度比体心立方晶格金属的大，在室温下进行塑性变形时，沿着晶格中原子排列最密的八面体面对角线方向优先产生滑移，故面心立方晶格的金属塑性要比体心立方晶格的金属塑性好。密排六方晶格的金属的塑性最差。金属材料的塑性好坏与变形条件等因素也有关系。

刃型位错是晶体结构中常见排列错误的一种缺陷，滑移实际上是位错在切应力作用下运动的结果，图 1-5 表示了这一过程。

当晶体通过位错移动产生滑移时，实际上并不需要整个滑移面上的全部原

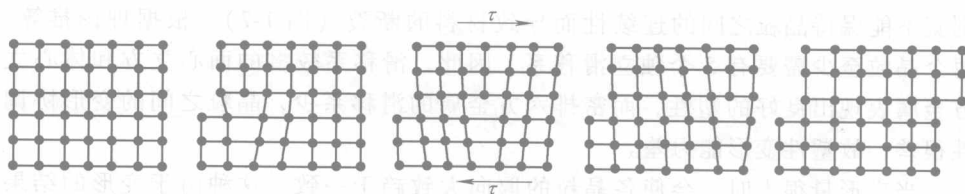


图 1-5 晶体通过刃型位错造成滑移的示意

子一起移动，而只是在位错中心附近的少数原子发生移动，而且它们移动的间距又远小于一个原子间距，这样逐次移动便形成滑移。当一个位错移动到晶体表面时，便形成一个原子间距的位移量，同一滑移面上若有大量的位错移出，则在晶体表面形成一个滑移线。如果有大量位错重复按此方式滑过晶体，就会在晶体表面形成显微镜下能观察到的滑移痕迹，宏观上即产生塑性变形。

2) 孪晶。孪晶是塑性变形另一种方式。孪晶变形是晶体的一部分晶体相对于另一部分晶体作整体迁移，孪晶带是以平行四边形变形方式产生的变形（图 1-6），移动量只有原子间距的若干分之一。密排六方金属常以孪晶方式变形；体心立方金属的滑移系较多，只在低温或受到冲击时才发生孪晶变形；面心立方金属一般不发生孪晶变形。

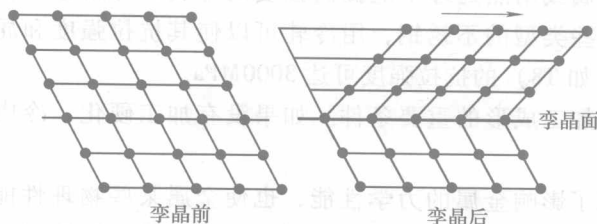


图 1-6 孪晶变形

(2) 多晶体变形 实际使用的金属材料几乎都是多晶体。多晶体是由许多形状、大小、取向各不相同的单晶体——晶粒所组成，并且常常有第二相存在。多晶体塑性变形的的基本方式与单晶体一样，也是滑移和孪晶，由于多晶体各晶粒之间的位向不同和晶界的存在，使得各个晶粒的塑性变形互相受到阻碍与制约，所以晶粒的塑性变形必须要与其邻近晶粒的变形相互协调，这就要求相邻晶粒中取向不利的滑移系也参与变形，因而各晶粒在变形过程中要发生转动（例如，在拉伸时各晶粒中滑移面转向平行于外力方向），否

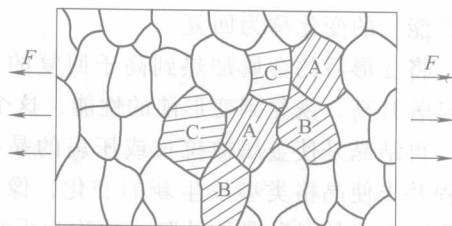


图 1-7 多晶体塑性变形

则就不能保持晶粒之间的连续性而导致材料的断裂（图 1-7）。根据理论推算，每个晶粒至少需要有 5 个独立滑移系。因此，滑移系较多的面心立方和体心立方金属表现出良好的塑性，而密排六方金属的滑移系少，晶粒之间的变形协调性很差，故塑性变形能力差。

当变形量很大时，会使各晶粒的取向大致趋于一致。这种由于变形的结果使晶粒具有择优取向的组织叫做“变形织构”。

### 1.3 加工硬化与回复再结晶

#### 1. 加工硬化及解决方法

塑性变形对金属性能的主要影响是造成加工硬化。在金属塑性变形的过程中，金属的晶粒被拉长或压扁，滑移面附近的晶格产生强烈的歪扭，滑移阻力增加，金属继续滑移就发生困难，要想再次产生滑移变形，就要进一步增加外力，这种现象叫加工硬化。加工硬化后的金属，其强度、硬度提高，而塑性、韧性降低，给其后的切削加工和冷压力加工工序带来困难，如冷轧时动力消耗增大、加工量受到限制等。

对某些纯金属或用热处理不能提高强度的金属，可用加工硬化的方法来提高强度。例如某些类型的不锈钢，用冷轧可以使其抗拉强度和屈服点提高近一倍。冷拉钢丝（如 T8）的抗拉强度可达 3000MPa。

加工硬化是加工成形的重要条件。如果没有加工硬化，冷成形过程也就无法实现。

塑性变形除了影响金属的力学性能，也使金属某些物理性能、化学性能发生变化。例如，塑性变形使电阻增加，使抗蚀性降低。塑性变形之所以使性能发生变化，其原因是塑性变形使金属内部组织结构发生了改变。

为便于进一步加工，工业上广泛应用再结晶退火，以使经过变形的金属通过再结晶过程，消除加工硬化，提高塑性。

变形后的金属及合金在较低温度加热时，其晶粒大小和形状等看不出明显变化，但电阻率和内应力显著降低，而强度、硬度和塑性变化等变化不大，这个性能上的变化称为回复。

将变形后的金属加热到高于回复的一定温度时，强度、硬度剧烈降低，塑性显著升高，恢复到变形前的性能，这个变化称为再结晶。

再结晶是使金属被拉长或压扁的晶粒变为均匀细小的等轴晶粒，由于这一过程并未使晶格类型发生新的变化，像再进行一次结晶一样，只是消除了因冷变形而造成的各种晶体缺陷，故称为再结晶。再结晶是晶核形成和长大的过程，要在一定的温度以上才会发生，因此，通常将经过严重冷变形（变形度在 70%

以上)的金属,经过1h退火能完全再结晶的最低温度定义为再结晶温度。再结晶完成后继续升高温度或延长加热时间,晶粒会继续长大(图1-8)。晶粒长大也是个自发过程,它使晶界减少,能量降低,使组织更为稳定。

再结晶温度主要与金属变形程度有关。变形程度越大,再结晶温度越低。为了加速再结晶过程,金属再结晶退火温度的选择,一般要比再结晶温度高100~200℃。如果加热温度超过再结晶退火温度或加热时间过长,会使再结晶后的晶粒继续长大,造成强度下降,塑性、韧性也降低。钢的再结晶温度低于450℃,再结晶退火温度为600~700℃。

## 2. 再结晶后的晶粒大小

晶粒大小对金属的强度、塑性和韧性影响极大。实际生产中,通过再结晶退火来控制晶粒大小是很重要的问题。实践证明,影响再结晶后晶粒大小的因素主要是变形程度和退火温度。

(1) 变形程度 变形程度对再结晶后晶粒大小的影响特别显著。以钢铁材料为例,由图1-9可见,当变形程度很小时,由于结构畸变很小,不足以引起再结晶,因此,晶粒保持原状。

当增大变形程度到约1%~10%范围内时,会使再结晶

后的晶粒特别粗大,这个变形度称为“临界变形度”。在实际生产中,一般应尽量避免采用临界变形度范围的加工变形量,以免形成粗大晶粒而恶化性能。各种金属的临界变形度不同,如铁约为2%~10%、钢约为5%~10%、铝约为2%、铜及黄铜约为5%。

当变形度超过临界变形度后,随着变形程度的增大,再结晶后的晶粒反而变细,这是由于变形程度的增加,使再结晶时的晶核数目增多的结果。当变形程度很大(95%左右)时,在某些金属中,又会出现再结晶后晶粒长大的现象。

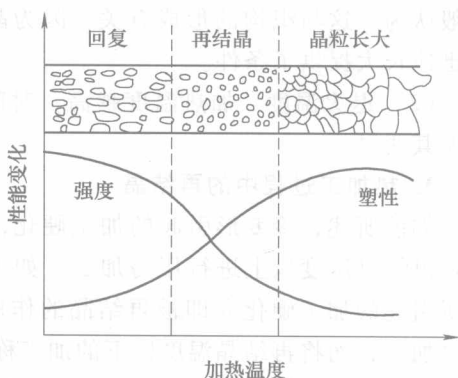


图1-8 加工硬化金属在加热时组织和性能的变化

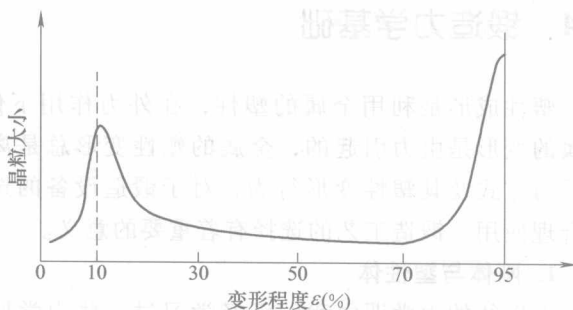


图1-9 晶粒大小和变形程度

一般认为,这与组织的形成有关,因为晶粒取向大致相同时,给晶粒沿一定方向迅速长大提供了条件。

(2) 退火温度 加热温度越高,时间越长,晶粒便越大,其中加热温度影响尤其明显。

### 3. 热加工过程中的再结晶

如前所述,冷变形引起的加工硬化,可通过再结晶加热来消除。但是如果钢在再结晶温度以上进行压力加工,如  $1100 \sim 1200^{\circ}\text{C}$  锻造或轧制,钢坯塑性变形所引起的加工硬化立即被再结晶的作用所消除。将再结晶温度以上的加工称为热加工,而将再结晶温度以下的加工称为冷加工。例如,铁在  $400^{\circ}\text{C}$  时的加工仍属冷加工,而铜和铅在室温下加工已是热加工。

冷加上后退火时发生的金属再结晶称为静态再结晶,热加工过程中边加工边发生的金属再结晶称为动态再结晶。动态再结晶能消除在加工中由于塑性变形而产生的加工硬化现象。动态再结晶后的晶粒大小决定于变形温度、变形程度等因素。锻造加工时,不同锻造工艺所得锻件的晶粒度是不同的。为了获得细晶粒组织,锻造时的终了温度不宜过高;尤其是最后一火的变形程度,应尽量避免在临界变形程度的范围内变形,特别是最后几下锻击的压下量。如该火次的变形量小,就应采用较低的始锻温度 ( $1050^{\circ}\text{C}$ )。因此,选择合理的锻造加热温度和锻造压下量对于控制锻造组织有重要意义。

## 1.4 锻造力学基础

塑性成形是利用金属的塑性,在外力作用下使金属成形的一种加工方法。金属的变形是由力引起的,金属的塑性变形总是离不开力作用。了解金属锻造的受力方式及其塑性变形行为,对于锻造设备的选择、锻造工具或模具的选择及合理使用、锻造工艺的选择有着重要的意义。

### 1. 刚体与塑性体

在以往的力学课中我们已经学习过一些力学原理和计算方法,都是将物体看成刚体或者是微小变形的弹性体,力的作用仅与力的大小和方向有关而与力的作用点无关,这在我们进行受力分析时,已经成了一种的思维习惯。这种观点对“刚体”来说是正确的,而锻件是能产生较大塑性变形的塑性体,它受力时会产生塑性流动,其力的作用点与传力方式对塑性变形的影响很大,例如,与金属表面的接触力是集中力还是分布力,其作用效果是完全不同的。因此,在进行锻造力学分析时,一定要把力的作用点与传力方式作为重点,建立锻件是“塑性体”的概念。

### 2. 作用力