

热处理技术

马鹏飞 李美兰 主编

戈晓岚 主审

金属材料与金属学基础知识 / 钢的热处理原理 / 钢的加热 / 钢的退火与正火

钢的淬火与回火 / 钢的表面淬火 / 钢的化学热处理 / 工业用钢及其热处理

铸铁及其热处理 / 非铁金属材料及其热处理 / 热处理工艺的制定 / 热处理设备及其发展 / 热处理新技术



化学工业出版社

热处理技术

马鹏飞 李美兰 主编

戈晓岚 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书编写的目的是为适应经济发展和技术进步的客观需要,加快高级技能人才的培养,拓宽技能人才的成长通道,同时进一步完善技师评聘制度,以促进更多的高级技能人才脱颖而出。编写原则是以热处理技师的专业知识为主,兼顾高级工的要求,并编入部分提高内容,以适应高级技师的知识要求。内容包括金属材料与金属学基础知识、钢的热处理原理、钢的加热、退火与正火、淬火与回火、表面淬火、化学热处理、工业用钢及其热处理、铸铁及其热处理、非铁金属材料及其热处理、热处理工艺制定、热处理设备及其发展、热处理新技术等。本书内容全面系统,阐述精练实用,针对性、通用性强。

本书是职业技术学院、技师学院、继续教育学院机械类专业,尤其是热处理专业的优选教材,是热处理技师、高级技师的职业技能培训、考评的合适教材,也是企业内部中长期培训的适用教材。同时,也可供从事机械制造工程的技术人员参考。

热处理技术

主编 李美兰 丁刚臣

审主 袁淑文

图书在版编目(CIP)数据

热处理技术/马鹏飞,李美兰主编. —北京:化学工业出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-122-03752-7

I. 热… II. ①马…②李… III. 热处理 IV. TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 147988 号

责任编辑:陈丽 程树珍
责任校对:王素芹

文字编辑:闫敏
装帧设计:关飞

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 462 千字 2009 年 1 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:48.00 元

版权所有 违者必究

前言

在机械制造工业中,热处理在其中占有十分重要的地位,它是提高机器零件质量和延长使用寿命的关键工序,也是充分发挥金属材料潜力、节约材料的有效途径。正确地选择材料,合理地进行热处理,不仅可以减少废品,而且可以显著提高机器零件和工模具寿命。为了满足热处理专业高级技能人才培养以及从事机械制造行业广大工程技术人员业务学习的需要,编写了本书。

本书在内容选择上既体现热处理技术的发展,又适应热处理生产工艺的实际需要,阐述了热处理专业高级技能人才应必备的基本理论和工艺知识。在重点阐述热处理原理的同时,适当地介绍金属材料与金属学基础知识;在重点阐述热处理工艺技术的同时,适量地介绍了热处理工艺制定、热处理设备及其发展等常用知识;在重点阐述常用钢铁材料的正确选择、合理进行热处理的同时,简明地介绍了非铁金属材料的热处理工艺。尽可能体现本书内容的科学性、先进性、适用性和系统性。

本书从基本理论和基本技术两方面展开论述,注重理论和实践的紧密结合,学以致用,加强对培训对象实际工程技术能力的培养。在内容安排上,既保留了有价值的经典理论和技术,又反映了近年来热处理技术的新理论、新工艺、新技术和新设备,全书较全面、系统,突出了“新颖”和“实用”的特点。本书共分13章,内容包括金属材料与金属学基础知识、钢的热处理原理、钢的加热、退火与正火、淬火与回火、表面淬火、化学热处理、工业用钢及其热处理、铸铁及其热处理、非铁金属材料及其热处理、热处理工艺的制定、热处理设备及其发展、热处理新技术等。

本书是职业技术学院、技师学院、继续教育学院机械类专业,尤其是热处理专业的优选教材,是热处理技师、高级技师的职业技能培训、考评的合适教材,也是企业内部中长期培训的适用教材。同时,也可供从事机械制造工程的技术人员参考。

本书第1、2、3、4章由陈忠萍编写,第5、6、7、11章由李美兰编写,第8、9、10、13章由马鹏飞编写,第12章由杨建新编写。本书由马鹏飞、李美兰任主编,并对全书进行统稿、定稿。在编写过程中,参阅了有关教材、资料和文献,在此对有关专家、学者和作者表示衷心感谢。

在本书的编写过程中,江苏大学工业中心各位领导和教师给予了精心的指导和热情的帮助,提出了许多宝贵的意见。全书由江苏大学戈晓岚教授担任主审。在此谨向他们表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者
2008年10月

目 录

第1章 金属材料与金属学基础知识 1

1.1 金属材料的性能 1

1.1.1 金属材料的力学性能 1

1.1.2 金属材料的工艺性能 6

1.2 金属的结构与结晶 6

1.2.1 金属的晶体结构 6

1.2.2 金属的实际结构与晶体缺陷 9

1.2.3 金属的结晶 11

1.2.4 金属的同素异构转变 13

1.2.5 金属铸锭 14

1.3 金属的塑性变形和再结晶 15

1.3.1 金属的塑性变形 16

1.3.2 塑性变形对金属组织和性能的影响 17

1.3.3 回复与再结晶 19

1.3.4 金属的热加工 21

1.4 合金的相结构与铁碳合金 22

1.4.1 合金的相结构 22

1.4.2 铁碳合金相图 24

1.4.3 碳素钢 28

第2章 钢的热处理原理 31

2.1 概述 31

2.1.1 热处理及其作用 31

2.1.2 钢的临界温度 31

2.2 钢在加热时的组织转变 32

2.2.1 奥氏体形成的热力学条件 32

2.2.2 奥氏体的形成过程 33

2.2.3 影响奥氏体形成速度的因素 34

2.2.4 奥氏体的晶粒大小及其影响因素 35

2.3 钢在冷却时的组织转变 36

2.3.1 过冷奥氏体等温转变图 37

2.3.2 过冷奥氏体等温转变产物的组织与性能 38

2.3.3 影响过冷奥氏体等温转变曲线的因素 44

2.3.4 过冷奥氏体的连续冷却转变 44

第3章 钢的加热 46

3.1 加热的目的和要求 46

3.2 确定加热规范的一般原则 46

3.2.1 加热温度确定 46

3.2.2 加热速度选择 47

3.2.3 加热方法选择 48

3.2.4 加热时间确定 49

3.3 加热介质 49

3.3.1 固体介质 49

3.3.2 液体介质 50

3.3.3 气体介质 51

3.4 钢加热时常见的缺陷 52

3.4.1 欠热、过热和过烧 52

3.4.2 氧化与脱碳 53

3.4.3 变形与开裂 54

第4章 钢的退火与正火 55

4.1 退火与正火的基本概念及分类 55

4.2 常用退火工艺方法 56

4.2.1 扩散退火 56

4.2.2 完全退火 56

4.2.3 不完全退火 57

4.2.4 球化退火 57

4.2.5 等温退火 59

4.2.6 再结晶退火和去应力退火 59

4.3 钢的正火 60

4.4 退火与正火的选择 61

4.4.1 退火与正火后钢的组织与性能 61

4.4.2 退火与正火的选择 62

第5章 钢的淬火与回火	63	特点	94
5.1 淬火的定义、目的及分类	63	6.3 感应加热表面淬火	95
5.2 淬火介质	64	6.3.1 感应加热基本原理	95
5.2.1 对淬火介质的要求	64	6.3.2 感应加热淬火工艺	97
5.2.2 淬火介质的冷却作用	64	6.3.3 感应加热设备的合理选择	99
5.2.3 常用的淬火介质	65	6.3.4 感应加热淬火的特点	101
5.3 钢的淬透性	66	6.3.5 感应加热表面淬火的常见缺陷及返修措施	101
5.3.1 淬硬性 & 淬透性的概念	66	6.3.6 感应加热表面淬火实例	102
5.3.2 影响淬透性的因素	67	6.4 火焰加热表面淬火	102
5.3.3 淬透性的测定方法	67	6.4.1 火焰加热表面淬火基本原理及特点	102
5.3.4 淬透性在生产中的应用与意义	68	6.4.2 火焰加热表面淬火常用气体燃料	103
5.4 淬火应力、变形及开裂	69	6.4.3 火焰加热表面淬火方法	103
5.4.1 淬火时工件的内应力	70	6.4.4 火焰加热表面淬火常用设备	104
5.4.2 淬火时工件的变形	71	6.4.5 火焰加热表面淬火注意事项	104
5.4.3 淬火裂纹	73	第7章 钢的化学热处理	105
5.5 淬火方法	77	7.1 化学热处理的定义、目的及分类	105
5.6 淬火工艺确定原则	79	7.2 化学热处理原理及过程	106
5.6.1 淬火加热方式及加热温度的确定	79	7.2.1 化学热处理的基本过程	106
5.6.2 淬火加热时间的确定	80	7.2.2 化学热处理渗剂的性能	107
5.6.3 淬火介质的选择	80	7.2.3 化学热处理过程中渗剂的化学反应机制	107
5.6.4 淬火冷却方式的确定	81	7.2.4 化学热处理过程中催化剂的作用	107
5.7 钢的回火	81	7.3 钢的渗碳	108
5.7.1 回火的定义与目的	81	7.3.1 渗碳的定义、目的、分类及应用	108
5.7.2 淬火钢回火时的组织转变	82	7.3.2 渗碳用钢	108
5.7.3 淬火钢回火时力学性能的变化	84	7.3.3 渗碳件主要技术要求	109
5.7.4 二次硬化	85	7.3.4 气体渗碳	109
5.7.5 回火脆性	85	7.3.5 固体渗碳和液体渗碳工艺	112
5.7.6 回火稳定性	86	7.3.6 零件渗碳后的热处理	113
5.7.7 时效现象	86	7.3.7 渗碳后钢的组织与性能	114
5.7.8 回火工艺的分类及应用	87	7.3.8 渗碳件质量检验及常见缺陷防止措施	114
5.7.9 回火工艺的制定	87	7.4 钢的渗氮	116
5.8 淬火回火缺陷与预防	89	7.4.1 概述	116
5.8.1 淬火缺陷与预防	89	7.4.2 钢的渗氮原理	116
5.8.2 回火缺陷与预防	91	7.4.3 渗氮用钢及渗氮前的热处理	118
第6章 钢的表面淬火	92	7.4.4 气体渗氮工艺	119
6.1 表面淬火的定义、目的及分类	92	7.4.5 渗氮层的组织和性能特点	121
6.2 表面淬火工艺原理	93		
6.2.1 快速加热时钢中的相变特点	93		
6.2.2 表面加热淬火后组织与性能	94		

7.4.6 渗氮件的质量检验及常见缺陷 防止措施	122
7.5 钢的碳氮共渗与氮碳共渗	124
7.5.1 碳氮共渗	124
7.5.2 氮碳共渗(软氮化)	126
7.6 其他化学热处理工艺	127
7.6.1 渗硼	127
7.6.2 渗金属	128
7.6.3 渗其他元素	130
7.6.4 多元共渗	130
7.7 等离子体化学热处理	131
7.7.1 离子化学热处理原理	131
7.7.2 离子渗氮及离子氮碳共渗 (离子软氮化)	132
7.7.3 离子渗碳及离子碳氮共渗	134
7.7.4 离子渗硫、离子硫氮共渗及硫 氮碳共渗	135
7.7.5 离子渗硼	136
7.7.6 离子渗金属	136
第8章 工业用钢及其热处理	137
8.1 概述	137
8.1.1 钢的分类	137
8.1.2 合金元素在钢中的作用	137
8.1.3 合金钢的分类及牌号	139
8.2 结构钢及其热处理	140
8.2.1 结构钢概述	140
8.2.2 渗碳钢及其热处理	141
8.2.3 调质钢及其热处理	143
8.2.4 弹簧钢及其热处理	146
8.2.5 滚动轴承钢及其热处理	149
8.3 工具钢及其热处理	152
8.3.1 工具钢概述	152
8.3.2 刃具钢及其热处理	152
8.3.3 模具钢及其热处理	159
8.3.4 量具钢及其热处理	166
8.4 特殊性能钢及其热处理	168
8.4.1 不锈钢及其热处理	168
8.4.2 耐热钢及其热处理	172
8.4.3 耐磨钢及其热处理	174

第9章 铸铁及其热处理

9.1 铸铁的分类及其石墨化	175
9.1.1 铸铁的分类	175

9.1.2 铸铁的石墨化过程及影响 因素	176
9.2 灰铸铁及其热处理	177
9.2.1 灰铸铁的化学成分、组织及 性能	177
9.2.2 灰铸铁的孕育处理	178
9.2.3 灰铸铁的牌号与用途	179
9.2.4 灰铸铁的热处理	179
9.3 可锻铸铁及其热处理	181
9.3.1 可锻铸铁的化学成分、组织 及性能	181
9.3.2 可锻铸铁的牌号与用途	182
9.3.3 可锻铸铁的热处理	182
9.4 球墨铸铁及其热处理	183
9.4.1 球墨铸铁的化学成分、组织 及性能	183
9.4.2 球墨铸铁的牌号与用途	184
9.4.3 球墨铸铁的热处理	185

第10章 非铁金属材料及其热处理

10.1 铝合金及其热处理	188
10.1.1 纯铝	188
10.1.2 铝合金的热处理	188
10.2 铜合金及其热处理	192
10.2.1 工业纯铜	192
10.2.2 铜合金的热处理	193
10.3 钛合金及其热处理	196
10.3.1 工业纯钛	196
10.3.2 钛合金的热处理	196
10.4 镁及镁合金	197
10.4.1 纯镁	197
10.4.2 镁合金	197
10.5 轴承合金	198
10.5.1 轴承合金的组织 and 性能	198
10.5.2 常用的轴承合金	198
10.6 硬质合金	199
10.6.1 金属陶瓷硬质合金	200
10.6.2 碳化铬硬质合金	200
10.6.3 钢结硬质合金	200
10.6.4 硬质合金的发展	200

第11章 热处理工艺的制定

11.1 热处理零件的技术要求	202
11.1.1 热处理技术条件及其标注	202

11.1.2	热处理工艺位置的安排	202
11.2	热处理工艺制定的原则、依据和步骤	203
11.2.1	热处理工艺制定的原则	203
11.2.2	热处理工艺制定的依据	205
11.2.3	热处理工艺制定的步骤	205
11.3	材料与工艺的选用	206
11.3.1	材料与工艺的选用原则和方法	206
11.3.2	典型零件的材料选用与工艺制定实例	211
第12章 热处理设备及其发展		213
12.1	概述	213
12.1.1	热处理设备的分类	213
12.1.2	热处理电炉的近代发展	214
12.2	热处理设备的测控技术及其发展	215
12.2.1	炉温测量控制技术	215
12.2.2	气氛测控技术	220
12.3	各种热处理设备及其发展	223
12.3.1	热处理电阻炉	223
12.3.2	真空热处理炉	226
12.3.3	可控气氛炉	228
12.3.4	辉光离子氮化炉	232
12.3.5	激光及电子束热处理装置	234
12.4	热处理设备的安装调试及常见故障诊治	235
12.4.1	热处理设备的验收安装调试注意事项	235
12.4.2	热处理设备的常见故障与诊治	236
12.5	热处理安全生产	248
12.5.1	防火	248
12.5.2	防爆	248
12.5.3	防中毒	248
12.5.4	防烫(烧)伤	248
12.5.5	防触电	249

12.5.6	防砸伤	249
--------	-----	-----

第13章 热处理新技术 250

13.1	真空热处理	250
13.1.1	真空加热特点	250
13.1.2	真空热处理工艺	251
13.2	钢的强韧化处理	253
13.2.1	奥氏体晶粒超细化处理	254
13.2.2	改善钢中第二相分布形态的强韧化淬火	255
13.2.3	控制马氏体、贝氏体组织形态的淬火	256
13.2.4	形变热处理	258
13.2.5	其他方法	259
13.3	高能量密度表面热处理	260
13.3.1	高频脉冲淬火	260
13.3.2	激光热处理	261
13.3.3	电子束加热表面淬火	263
13.4	气相沉积技术	263
13.4.1	化学气相沉积(CVD)	263
13.4.2	物理气相沉积(PVD)	264
13.5	离子注入技术	266
13.5.1	离子注入的原理	267
13.5.2	沟道效应和辐照损伤	268
13.5.3	离子注入的特点	268
13.5.4	离子注入表面改性机理	268
13.6	计算机在热处理中的应用	269
13.6.1	概述	269
13.6.2	计算机在常规热处理中的应用	270
13.6.3	计算机在化学热处理中的应用	271
13.6.4	计算机模拟技术在热处理中的应用研究	272
13.6.5	热处理生产线的微机控制	273

参考文献 275

第1章

金属材料与金属学基础知识

1.1 金属材料的性能

金属材料的性能对零件的使用和加工有十分重要的作用,一般可分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指材料在工作条件下所必须具备的性能,包括物理性能、化学性能和力学性能,它反映金属材料在使用过程中表现出来的特点,决定了材料的应用范围、安全可靠性及使用寿命。工艺性能是反映金属材料在制造加工过程中的各种性能,如铸造性能、焊接性能、锻压性能、切削加工性及淬透性等。

1.1.1 金属材料的力学性能

金属材料最主要的使用性能是力学性能。金属材料在加工和使用过程中都要承受不同形式外力的作用,当外力达到或超过某一限度时,材料就会发生变形,以至断裂。金属材料的力学性能是指材料在外力作用下所表现出来的特性,也就是金属抵抗外力作用的能力。根据外加载荷的性质和材料表现的特性不同,力学性能的指标有强度、塑性、硬度、韧性及疲劳强度等多种,下面介绍常用的几项力学性能指标。

(1) 强度

金属材料抵抗变形和断裂的能力称为强度。金属材料抵抗外加载荷的能力越大,则强度越高。强度的大小通常用应力来表示。根据载荷作用的方式不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。

一般情况下,多以屈服点(σ_s)和抗拉强度(σ_b)作为判断金属材料强度高低的判据,它们是通过拉伸试验测定的。拉伸试验的方法是用静拉伸力对试样进行轴向拉伸,测量力和相应的伸长,一般拉至断裂。

① 屈服点 试样在拉伸过程中,载荷不增加而应变仍能继续增大时的应力称为屈服点,用符号 σ_s 表示,单位是Pa或MPa。计算公式为:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中, σ_s 为屈服点,MPa; F_s 为试样屈服时的拉伸力,N; S_0 为试样原始横截面积, mm^2 。

对于在拉伸过程中屈服现象不明显的材料,规定以残余变形量为0.2%时的应力值作为它的条件屈服点,记为 $\sigma_{0.2}$ 。机械零部件或构件在使用过程中一般不允许发生塑性变形,所以材料的屈服点表示材料所能允许的最大工作应力,是机械设计的主要依据,也是评定材料优劣的重要指标。

② 抗拉强度 试样拉断前承受的最大应力称为抗拉强度,用符号 σ_b 表示。计算公

式为:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中, σ_b 为抗拉强度, MPa; F_b 为试样承受的最大拉伸力, N; S_0 为试样原始横截面积, mm^2 。

抗拉强度是零部件设计和评定材料时的重要强度指标。对于脆性材料, 由于拉伸时没有明显的屈服现象, 这时一般用抗拉强度指标作为设计依据。另外, 抗拉强度与密度之比称为比强度, 它也是零件选材的重要指标。

(2) 塑性

塑性是指金属材料在载荷作用下产生塑性变形而不破坏的能力。塑性指标是用金属材料在断裂时的最大相对塑性变形来表示的, 它们也是通过拉伸试验测定的。评定材料常用的塑性指标有伸长率 (δ) 和断面收缩率 (ψ), 这是工程上广泛应用的表征金属塑性好坏的两个力学性能指标。

① 伸长率 试样拉断后, 标距的伸长与原始标距的百分比称为伸长率, 用符号 δ 表示。计算公式为:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中, l_0 为试样的原始标距长度, mm; l_1 为试样拉断后的标距长度, mm; δ 为伸长率, %。

这里必须指出, 同一金属材料的试样长度不同, 测得的伸长率是不同的。因此, 在材料手册中常常还可以看到 δ_5 和 δ_{10} 两种符号, 它们分别表示用 $l_0 = 5d$ 和 $l_0 = 10d$ 两种不同长度试样测定的伸长率。

② 断面收缩率 试样拉断后, 缩颈处横截面积的最大收缩量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率, 用符号 ψ 表示。计算公式为:

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\%$$

式中, S_0 为试样原始横截面面积, mm^2 ; S_1 为试样拉断后缩颈处的横截面面积, mm^2 ; ψ 为断面收缩率, %。

金属材料的断后伸长率 (δ) 和断面收缩率 (ψ) 数值越大, 表示金属材料的塑性越好。塑性好的材料可以发生大量塑性变形而不破坏, 便于通过塑性变形加工成复杂形状的零件; 同时塑性好的材料在受力过大时, 能首先产生塑性变形而不至于发生突然断裂, 安全性好, 因此对于重要的受力零件, 还要求具有一定的塑性, 以防止超载时发生突然的断裂。

(3) 硬度

硬度是表示金属材料抵抗其他更硬物体压入其表面的能力, 是衡量金属材料软硬程度的重要指标。实际上, 硬度是金属材料力学性能的一个综合物理量, 也就是说, 在一定程度上, 硬度高低也同时反映了金属材料的强度、塑性的大小。硬度是各种零件和工具必备的性能指标, 硬度试验设备简单, 操作方便, 并不破坏被测试工件, 因此广泛用于产品质量的检验。常用的硬度表示法有布氏硬度 (HB)、洛氏硬度 (HRA、HRB、HRC) 和维氏硬度 (HV) 三种。

① 布氏硬度 布氏硬度试验是在布氏硬度计上, 用规定直径 D 的淬火钢球或硬质合金球, 以一定大小的试验力 F 压入试样表面, 保持规定的时间后, 卸除试验力, 测量试样表面的压痕直径 d , 求出压痕面积。计算出试样压痕面积上所承受的平均压力, 也就是所加试

验力与压痕面积的比值，即为试样的布氏硬度值。图 1.1 为布氏硬度试验原理图。

布氏硬度值用符号 HBS (HBW) 表示。计算公式为：

$$\text{HBS(HBW)} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中，HBS (HBW) 表示用淬火钢球或硬质合金球试验时的布氏硬度值； F 为试验力，N； D 为球体直径，mm； d 为压痕平均直径，mm。

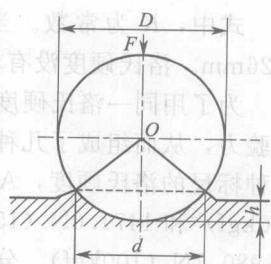


图 1.1 布氏硬度试验原理图

由上式中可见，当试验力 (F)、压头球体直径 (D) 一定时，压痕直径 (d) 越小，布氏硬度值越大，也就是硬度越高。在实际应用中，布氏硬度值不用计算，而是采用专用的刻度放大镜测出压痕直径 (d) 的大小，再从专门的硬度表中查出相应的布氏硬度值。

布氏硬度的表示方法规定为：当试验的压头为淬火钢球时，其硬度符号用 HBS 表示；当试验压头为硬质合金球时，其硬度符号用 HBW 表示。符号 HBS 或 HBW 之前的数字为硬度值，符号后面按球体直径、试验力、试验力保持时间 (10~15s 不标注) 的顺序表示试验条件。

例如：190HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 的淬火钢球，在 9807N (1000kgf) 的试验力作用下，保持 30s 时测得的布氏硬度值为 190。550HBW5/750 表示用直径 5mm 的硬质合金球，在 7355N (750kgf) 的试验力作用下，保持 10~15s 时测得的布氏硬度值为 550。

布氏硬度适用于铸铁、有色金属及其合金、各种退火及调质的钢材，特别对软金属，如铝、铅、锡等更为适宜。布氏硬度试验由于压痕较大，故测得的值比较精确，但也正是这个原因，它不适于测定成品及薄片类件的硬度值。

② 洛氏硬度 洛氏硬度试验是实际生产中应用最为广泛的硬度测定方法之一。它的原理是用 $\phi 1.588\text{mm}$ (即 1/16in) 的淬火钢球或锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体为压头，先加上初试验力 F_0 ，以消除工件表面粗糙度对所测硬度值的影响，再加上主试验力 F_1 ，垂直压入试样表面，经规定保持时间后，随后卸除主试验力 F_1 ，在保留初试验力的情况下，用所测得的主试验力产生的残余压痕深度增量来计算出洛氏硬度值。

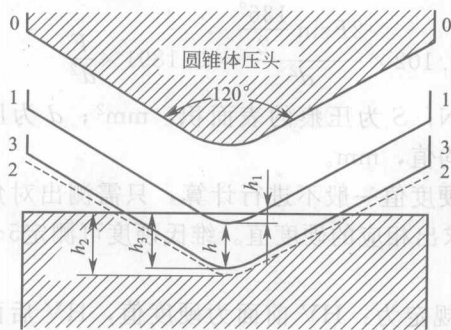


图 1.2 洛氏硬度试验原理图

图 1.2 表示金刚石圆锥压头的洛氏硬度试验原理。图中 0—0 为圆锥体压头的初始位置；1—1 为初试验力作用下的压头压入深度为 h_1 时的位置；2—2 为总试验力 (初试验力 + 主试验力) 作用下压头压入深度为 h_2 时的位置； h_3 为卸除主试验力后，由于弹性变形恢复，压头提高时的位置。这时，压头实际压入试样的深度为 h_3 。故由于主试验力所引起的塑性变形而使压头压入深度为 $h = (h_3 - h_1)$ ，并以此来衡量被测试材料的硬度。显然， h 愈大时，被测试材料的硬度愈低；反之，则愈高。为了照顾习惯上数值愈大，硬度愈高的概念，故采用一个常数 K 减去 h 来表示硬度大小，并规定每 0.002mm 的压痕深度为一个硬度单位，由此获得的硬度值称为洛氏硬度值，用符号 HR 来表示。

$$\text{HR} = \frac{K - h}{0.002}$$

式中， K 为常数。当用金刚石圆锥体压头时， $K=0.2\text{mm}$ ；用钢球作压头时， $K=0.26\text{mm}$ 。洛氏硬度没有单位，在试验时 HR 值均从硬度计的刻度盘上直接读出。

为了用同一洛氏硬度试验计测定软硬不同材料的洛氏硬度，可采用不同的压头与不同的试验力，从而组成了几种不同的洛氏硬度标尺，如表 1.1 所示。生产中常用的是 A、B、C 三种标尺的洛氏硬度，A 和 C 标尺的压头用的是 120° 金刚石圆锥体，试验力分别为 588.4N (60kgf) 和 1471.0N (150kgf)；而 B 标尺的压头则用 $1/16\text{in}$ 或 $1/8\text{in}$ 的淬火钢球，试验力为 980.7N (100kgf)。分别用 HRA、HRB、HRC 表示，其中 HRC 应用最广泛。

洛氏硬度的表示方法规定为：HR 前面的数字表示硬度值，HR 后面的字母表示所使用的标尺。例如：52HRC 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 52。

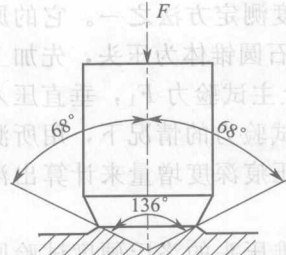
表 1.1 常用的洛氏硬度标尺试验条件和使用范围

硬度标尺	压头类型	总试验力/N	硬度值有效范围	应用举例
HRC	120° 金刚石圆锥体	1471.0	20~67HRC	一般淬火钢、高强度调质钢等
HRB	$\phi 1/16\text{in}$ 钢球	980.7	25~100HRB	软钢、退火钢、铜合金等
HRA	120° 金刚石圆锥体	588.4	60~85HRA	硬质合金、表面淬火钢等

洛氏硬度试验的优点是操作简便迅速，可直接从刻度盘上读出硬度值，由于压痕小，可测定成品及薄工件，并且测定的硬度值范围广。其缺点是由于压痕较小，当材料的内部组织不均匀时，硬度数据波动大，测量不够精确，故需在被测工件表面上的不同部位测试三点，取其算术平均值，作为所测洛氏硬度值。

③ 维氏硬度 维氏硬度试验法采用了与布氏硬度试验法相同的原理，只是所用压头锥角不同而已，因此维氏硬度值也是用棱锥形压痕单位面积上所承受的平均压力来表示的，图

1.3 为维氏硬度试验原理图。维氏硬度是采用一个相对面夹角为 136° 的正四棱锥体的金刚石压头，用一定的试验力（可选定）压入试样的表面，保持一定时间后，卸除试验力，测量压痕对角线长度，计算出压痕表面积，试验力除以压痕表面积的商再乘以 0.102 即为维氏硬度值，用符号 HV 来表示。其计算公式为：



$$\text{HV} = 0.102 \times \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0.1891 \times \frac{F}{d^2}$$

式中， F 为试验力，N； S 为压痕的表面积， mm^2 ； d 为压痕两对角线长度的算术平均值，mm。

在实际生产中，维氏硬度值一般不进行计算，只需测出对角线的长度 d ，再通过查表求出相应的硬度值。维氏硬度可测定 5~1000HV 的硬度范围。

图 1.3 维氏硬度试验原理图

维氏硬度的表示方法规定为：HV 前面为硬度值，HV 后面按“试验力/试验力保持时间（10~15s 不标注）”的顺序用数值表示试验条件。例如：600HV30/20 表示用 294.21N (30kgf) 试验力保持 20s 测定的维氏硬度值为 600。

维氏硬度试验是一种较为精确的硬度试验方法，广泛用于研究工作。在热处理工件的质量检验中，主要利用其低载荷来测定不适于用布氏硬度和洛氏硬度来测定的薄工件和工件上薄的硬化层的硬度。这是维氏硬度应用方面的主要特点。

布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度之间没有直接换算公式，但可以通过查表进行换算，也可以通过近似关系来计算：布氏硬度在 200~400 时， $1\text{HRC}=10\text{HB}$ ；维氏硬度在 200~400

时, $1\text{HB}=1\text{HV}$ 、 $1\text{HRC}=10\text{HV}$ 。

(4) 韧性

韧性是指在冲击载荷作用下, 金属材料在断裂前吸收能量和进行塑性变形的能力。金属的韧性通常随加载速度的提高、温度的降低、应力集中程度的加剧而减小。冲击韧性是衡量金属韧性的常用指标之一。目前, 工程上常用夏比冲击试验 (即一次摆锤冲击试验) 来测定金属材料的冲击韧性。

冲击韧性是指冲击试样缺口底部单位横截面积上的冲击吸收功, 用符号 a_k 表示, 计算公式为:

$$a_k = \frac{A_k}{S}$$

式中, a_k 为冲击韧性, J/cm^2 ; A_k 为冲击吸收功, J ; S 为试样缺口底部横截面积, cm^2 。

冲击韧性越大, 表示材料的韧性越好。实践表明, 冲击韧性值 a_k 对材料的内部结构、缺陷等具有较大的敏感性, 在冲击试验中很容易揭示出材料中的某些物理现象, 如晶粒粗化、冷脆、热脆和回火脆性等, 故目前常用冲击试验来检验冶炼、热处理以及各种加工工艺的质量。此外, 冲击试验过程迅速方便, 所以在生产和科研中得到广泛应用。

应当指出, 生产实际中, 机械零件很少因一次大能量冲击而损坏, 大多数是在小能量多次冲击作用下而破坏的, 如凿岩机风镐上的活塞、冲模的冲头等。对于这类零件, 应采用小能量多次冲击的抗力指标作为评定材料质量及选材的依据。

(5) 疲劳强度

许多机械零件, 如轴、齿轮、弹簧等, 在工作过程中各点所受的应力往往随时间作周期性的变化, 这种随时间作周期性变化的应力称为循环应力或交变应力。材料在这种应力作用下发生的断裂现象称为疲劳断裂。疲劳断裂可以在应力低于材料的屈服强度时发生, 断裂前无明显的塑性变形及其他任何先兆, 因此疲劳断裂的后果是十分严重的。

材料所受的交变应力与断裂循环次数之间的关系可以用图 1.4 所示的材料疲劳曲线 (也称 $\sigma-N$ 曲线) 描述。从 $\sigma-N$ 曲线可以看出, 应力幅度 σ 愈小, 循环周数 N 愈大。当应力低于某数值时, 经无数次应力循环也不会发生疲劳断裂, 此应力称为材料的疲劳极限, 通常用 σ_r 表示 (r 是应力循环对称系数), 单位为 MPa 。如果采用对称的循环应力, 材料的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。

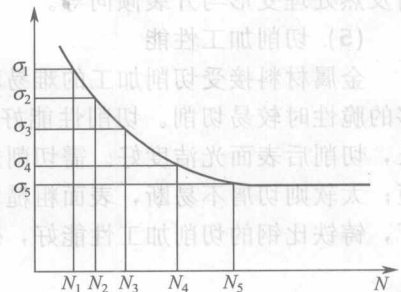


图 1.4 材料的疲劳曲线

由于疲劳试验时不可能进行无限循环周次, 而且有些材料的疲劳曲线上没有水平部分, 因此规定一个应力循环基数, 对应的应力作为该材料的疲劳极限。一般钢铁的循环基数为 10^7 , 有色金属和某些超高强度钢的循环基数为 10^8 。一般钢铁材料的 σ_{-1} 值约为其 σ_b 的一半, 而非金属材料的疲劳极限一般远低于金属材料。

在机械零件的断裂中, 80% 以上都属于疲劳断裂。影响疲劳强度的因素很多, 其中主要有应力循环特性、材料的本质、残余应力和表面质量等。在生产中常采用各种材料表面强化处理技术, 使金属的表层获得有利于提高材料疲劳强度的残余压应力分布。这些表面强化技术包括喷丸、滚压、渗碳、渗氮和表面淬火等。此外, 减小零件表面的粗糙度也可以显著提高材料的疲劳极限。

1.1.2 金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能是指金属材料在经济条件下,完成各种加工的难易程度。也就是指金属材料是否易于加工成形的性能。它包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性能等。工艺性能直接影响到零件的加工工艺和质量,是选材和制定零件加工工艺路线时必须考虑的因素之一。

(1) 铸造性能

铸造性能是金属在铸造成形过程中获得外形准确、内部健全的铸造能力。衡量金属材料铸造性能的指标有流动性、收缩率和偏析倾向等。金属材料中,灰铸铁和青铜的铸造性能较好。

(2) 锻压性能

金属材料在压力加工(锻造、轧制)下成形的难易程度称为锻压性能。它与材料的塑性及塑性变形抗力有关。金属材料的塑性越好,变形抗力越小,其锻压性能就越好。例如:低碳钢的锻压性能比中、高碳钢好,而碳钢的锻压性能又比合金钢好。而铸铁是脆性材料,不能进行锻压加工。

(3) 焊接性能

焊接性能是指金属材料在限定的施工条件下焊接成按规定设计要求的构件,并满足预定服役要求的能力。也就是在一定的条件下,获得优良焊接接头的难易程度。一般低碳钢的焊接性能好于高碳钢。

(4) 热处理性能

热处理是改变材料性能的重要手段。在热处理过程中,材料的成分、组织、结构发生变化,从而引起了材料力学性能的变化。热处理性能是指金属材料热处理的难易程度和产生热处理缺陷的倾向,其衡量的指标或参数很多,如淬透性、淬硬性、耐回火性、氧化与脱碳倾向及热处理变形与开裂倾向等。

(5) 切削加工性能

金属材料接受切削加工的难易程度称为切削加工性能。当金属材料具有适当的硬度和足够的脆性时较易切削。切削性能好的材料切削时消耗的动力小,切屑易于排除,刀具寿命长,切削后表面光洁度好。需切削加工的材料,硬度要适中,太高则难以切削,且刀具寿命短;太软则切屑不易断,表面粗糙度高。故通常要求材料的硬度为180~250HB。一般情况下,铸铁比钢的切削加工性能好,碳钢比高合金钢的切削加工性能好。

1.2 金属的结构与结晶

不同的金属材料具有不同的力学性能,即使是同一种金属材料,在不同条件下其力学性能也是不一样的。金属材料这种性能上的差异,从本质上讲,是由其内部组织结构所决定的。因此掌握金属材料内部组织结构及对力学性能的影响,对于合理选用和加工金属材料,具有重要的意义。

1.2.1 金属的晶体结构

(1) 晶体与非晶体

自然界中的固态物质,根据其内部原子排列的方式不同,可以分为晶体和非晶体两

大类。晶体是指其组成微粒（原子或分子）在三维空间中有规则地作周期性重复排列构成的物质。在自然界中，除了少数的一些物质外，包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。晶体具有固定的熔点（如铁的熔点为 1534°C ，铜的熔点为 1038°C 等），晶体的性能具有各向异性的特点。

非晶体是指其组成微粒（原子或分子）在三维空间中无规则排列而堆积在一起的物质。如松香、石蜡、玻璃、沥青等。非晶体没有固定的熔点，它的性能在各个方向上是相同的，即具有各向同性的特点。

(2) 晶体结构的基本概念

① 晶格与晶胞 为了研究原子的排列规律，假定理想晶体中的原子都是固定不动的刚球，那么晶体即由这些刚球堆垛而成。图 1.5(a) 即为这种原子堆垛模型，可以看出原子在各个方向的排列都是很规则的。晶体中原子或分子的规则排列方式称为晶体结构。这种模型的优点是立体感强，很直观；缺点是每个刚球密密麻麻地堆集在一起，很难看清内部排列的规律和特点，不便于研究。为了清楚地表明原子在空间排列的规律性，常常将构成晶体的实际质点（原子或分子）忽略，而将它们抽象为纯粹的几何点，称之为阵点或结点。这些阵点可以是原子或分子的中心，也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心，各个阵点的周围环境都相同。为了观察方便起见，可以做许多平行的直线将这些阵点连接起来，构成一个三维的空间格架，如图 1.5(b) 所示，这种用以描述晶体中原子或分子排列规律的空间格架称为空间点阵，简称为点阵或晶格。

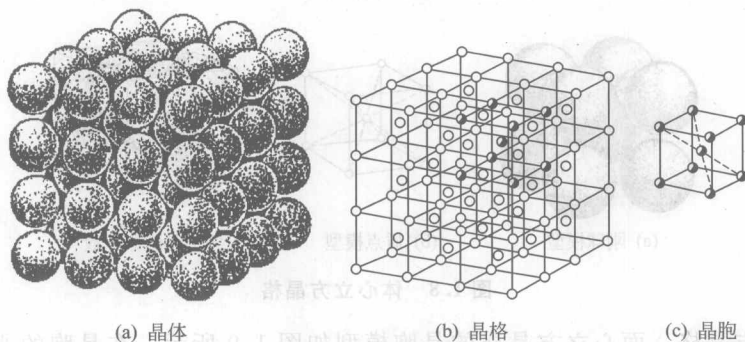


图 1.5 晶体、晶格与晶胞

由于晶格中原子排列具有周期性的特点，因此，为了简便起见，可以从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小的几何单元，来分析晶体中原子排列的规律性，这个最小的几何单元称为晶胞，如图 1.5(c) 所示。晶胞在三维空间的重复排列就可以构成整个晶体。

② 晶格常数 由于不同金属原子的原子半径是不一样的，在组成晶胞后，晶胞的大小和形状也是不一样的。晶胞的大小可用晶胞的三条棱边的边长 a 、 b 、 c 来表示，而晶胞的形状可用三条棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 来表示，它们统称为晶格常数，如图 1.6 所示。当在同一晶胞中同时具有 $a=b=c$ 和 $\alpha=\beta=\gamma$ 时，称这种晶胞为立方晶胞，具有立方晶胞的晶格叫做立方晶格。

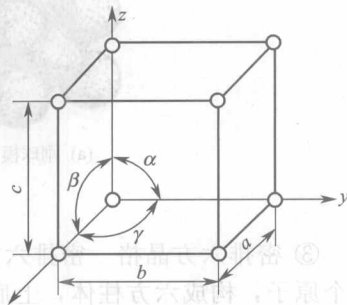


图 1.6 晶格常数示意图

③ 晶面与晶向 金属晶体中通过三个以上原子中心的

平面叫做晶面，通过两个以上原子中心的直线叫做晶向，如图 1.7 所示。由于在同一晶格的不同晶面和晶向上，原子排列的疏密程度不同，原子之间的相互作用也就不同，因此在不同的晶面和晶向上显示出不同的性能，这就是晶体具有各向异性的原因。

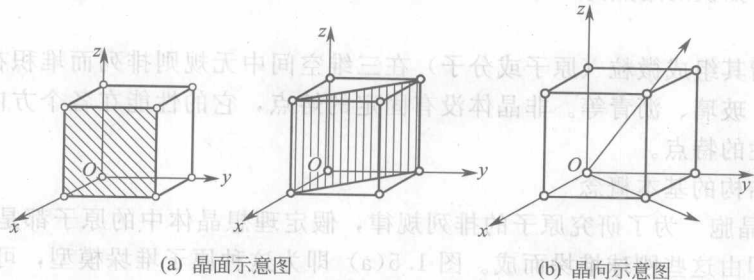


图 1.7 晶面和晶向示意图

(3) 典型的金属晶体类型

在自然界中的晶体有成千上万种，它们的晶体结构各不相同，除了少数金属具有复杂的晶体结构外，绝大多数金属都具有比较简单的晶体结构，其中最典型、最常见的金属晶体结构有 3 种类型，即体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

① 体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞模型如图 1.8 所示。晶胞的三个棱边长度相等，三个轴间夹角均为 90° ，构成立方体。除了在晶胞的八个角上各有一个原子外，在立方体的中心还有一个原子。具有体心立方结构的金属有 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W 等。

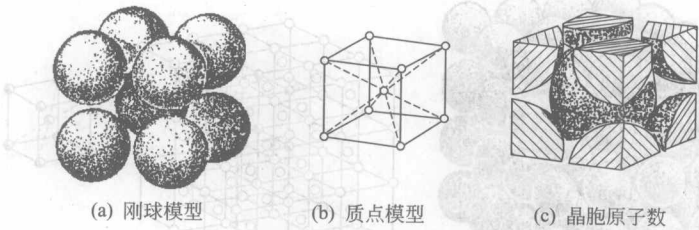


图 1.8 体心立方晶格

② 面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞模型如图 1.9 所示。在晶胞的八个角上各有一个原子，构成立方体，在立方体六个面的中心各有一个原子。具有面心立方结构的金属有 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag 等。

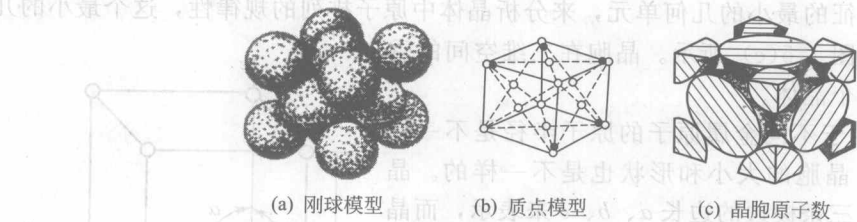


图 1.9 面心立方晶格

③ 密排六方晶格 密排六方晶格的晶胞模型如图 1.10 所示。在晶胞的 12 个角上各有一个原子，构成六方柱体，上底面和下底面的中心各有一个原子，晶胞内还有三个原子。具有密排六方结构的金属有 Zn、Mg、Be、 α -Ti、Cd 等。

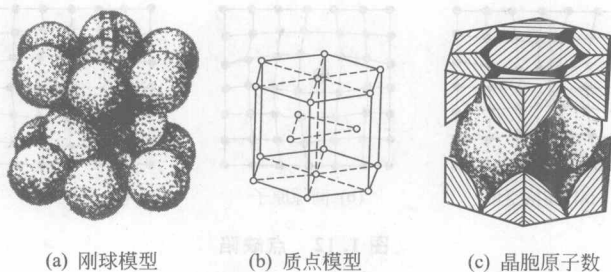


图 1.10 密排六方晶格

1.2.2 金属的实际结构与晶体缺陷

(1) 单晶体和多晶体结构

单晶体是指晶格位向（或方位）一致的晶体，如图 1.11(a) 所示。而所谓的位向（或方位）一致是指晶体中原子（离子或分子）按一定几何形状作周期性排列的规律没有破坏，因此晶体中实际的晶面与晶向的位置和方向保持与晶体作假想的周期性延伸时的晶面与晶向一致。如天然钻石就是典型的单晶体。

工业上实际应用的金属材料一般是多晶体材料。所谓多晶体材料是指一块金属材料中包含着许多小晶体，每个小晶体内的晶格位向是一致的，而各小晶体之间彼此方位不同。这种由许多小晶体组成的晶体结构称为多晶体结构，如图 1.11(b) 所示。多晶体中每个外形不规则的小晶体称为晶粒，晶粒与晶粒间的界面就是晶界。

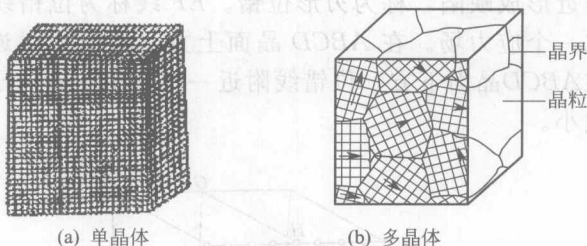


图 1.11 单晶体与多晶体示意图

由于晶界是两相邻晶粒之间不同晶格位向的过渡层，所以晶界上原子的排列总是不规则的。多晶体结构之所以测不出像单晶体那样的各向异性，就是因为大量微小的晶粒之间位向不同，因此在某一方向上的性能，只能表现出这些晶粒在各个方向上的平均性能。由于这种现象类似于非晶体的各向同性，故称为“伪各向同性”。

多晶体结构中一般晶粒尺寸很小，如钢铁材料晶粒尺寸一般为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm 左右，必须通过显微镜放大几十倍乃至几百倍以上才能观察到。

(2) 晶体缺陷

在实际应用的金属材料中，原子的排列不可能像理想晶体那样规则和完整，在晶体内部总是不可避免地存在某些局部区域原子的规则排列受到干扰而被破坏，将晶体中原子排列不规则的区域称为晶体缺陷。常见晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷 3 种类型。

① 点缺陷 点缺陷是晶体中呈点状的缺陷，即在空间三维方向上的尺寸都很小的晶体缺陷。常见的点缺陷有“晶格空位”、“间隙原子”和“置换原子”。

晶格空位是指在正常的晶格结点上出现了空位，如图 1.12(a) 所示；间隙原子是指个别晶格空隙之间存在的多余原子，如图 1.12(b) 所示；置换原子是指晶格结点上的原子被其他元素的原子所取代，如图 1.12(c) 所示。由于点缺陷的出现，原子间作用力的平衡被破坏了，促使缺陷周围的原子发生靠拢或撑开，即产生了晶格的畸变，从而引起金属强度、硬度及电阻等的增大、体积膨胀等。