

高 职 高 专 规 划 教 材

JINSHUXUE JI RECHULI

# 金属学及热处理

---

孟延军 关昕 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高职高专规划教材

# 金属学及热处理

主 编 孟延军 关 昕  
副主编 任素波 韩雅芹 王巧梭  
主 审 张晓力 徐雪霞

北 京

冶金工业出版社

2008

## 内 容 提 要

本书共分 10 章,分别讲述了金属材料的性能、金属的晶体结构、金属的结晶、合金的相结构和相图、三元合金相图、铁碳合金、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、合金钢、铸铁等内容。为便于读者自学,加深理解和学用结合,各章均配有思考题。

本书可作为高职高专相关专业教学用书,也可作为工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属学及热处理/孟延军,关昕主编. —北京:冶金工业出版社,2008.3  
高职高专规划教材  
ISBN 978-7-5024-4464-8

I. 金… II. ①孟… ②关… III. ①金属学—高等学校:技术学校—教材 ②热处理—高等学校:技术学校—教材  
IV. TG1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 024215 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李枝梅 宋 良 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 刘 倩 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4464-8

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

2008 年 3 月第 1 版;2008 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;12 印张;318 千字;179 页;1-5000 册

25.00 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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

本书为高职高专教材,是按照教育部高职高专教育专业人才的培养目标和规格、应具有的知识与能力结构和素质要求,依据冶金行业高等院校“十一五”教材建设规划和“金属学及热处理”课程教学大纲,同时,依据《中华人民共和国职业技能鉴定标准》,借鉴加拿大CBE理论和DACUM方法,根据钢铁生产现场情况和各岗位群技能要求进行编写的。金属学及热处理是冶金技术、材料工程技术、材料成形与控制技术等专业的一门专业基础课,作为该课程的教材,本书主要阐述金属材料的成分、组织结构与性能之间的关系和变化规律,以及提高金属材料性能、充分发挥材料潜力的途径。本教材供冶金类专业学生使用,是培养冶金企业实用性人才的必备学习用书。

由于冶金技术、材料工程技术等专业对本课程要求和学时数不同,在使用本教材时可根据教学大纲的要求适当调整。

全书共10章,参考教学时数60~80课时。

第1章 主要介绍金属材料的力学性能指标的定义、测量方法及表示方法。

第2章 介绍三种常见晶体结构,实际金属的晶体结构:点、线、面缺陷的分类及对性能的影响。

第3章 介绍金属结晶的现象、结晶的条件,结晶过程中形核、长大及晶粒大小控制,金属铸锭组织形成、性能特点及产生的缺陷。

第4章 介绍合金和相的基本概念:合金、相、组元、固溶体、金属化合物等,二元合金相图建立,典型二元合金相图:匀晶相图、共晶相图、包晶相图等,相图与性能的关系。

第5章 介绍三元相图的表示方法、三元合金的定量计算、三元匀晶和共晶相图及应用。

第6章 介绍铁碳合金基本相、相图的分析及典型合金的结晶过程分析,碳及常存杂质元素对钢性能的影响,碳素钢的分类、牌号、性能及用途。

第7章 介绍金属塑性变形,冷、热变形对钢组织和性能的影响及回复、再

结晶过程组织和性能的变化。

第8章 介绍钢的热处理原理:加热和冷却时钢的组织 and 性能变化,钢的常见热处理的定义、目的、工艺特点及形成的组织、性能和用途。

第9章 介绍合金钢的分类、编号,合金元素在钢中的作用,合金结构钢和工具钢中各类钢的成分、性能特点、热处理、组织、性能和用途。

第10章 介绍铸铁的组织与性能,铸铁的分类,各类铸铁的牌号、成分、性能和用途。

本书由河北工业职业技术学院孟延军、关昕任主编,任素波、韩雅芹及河北建材职业技术学院王巧梭任副主编。参加编写工作的还有:河北工业职业技术学院黄伟青、刘艳霞、李永刚、高云飞、陈敏,邯鄲钢铁集团张瑞倩、石少冲,新兴铸管股份有限公司翟义炜,石家庄钢铁股份有限公司李雷、谢文发、杨立科、宋子波。

本书由邯鄲钢铁集团公司教授级工程师张晓力和清华大学徐雪霞博士主审,提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

由于学识水平所限,书中若有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2007年11月

# 目 录

<b>1 金属材料的性能</b> .....	1
1.1 金属材料的力学性能 .....	1
1.1.1 强度 .....	1
1.1.2 塑性 .....	3
1.1.3 硬度 .....	3
1.1.4 韧性 .....	5
1.1.5 刚度 .....	6
1.2 金属材料的物理性能和化学性能 .....	7
1.2.1 金属材料的物理性能 .....	7
1.2.2 金属材料的化学性能 .....	8
1.3 金属材料的工艺性能 .....	8
思考题 .....	9
<b>2 金属的晶体结构</b> .....	11
2.1 金属的晶体结构 .....	11
2.1.1 晶体结构的基本知识 .....	11
2.1.2 常见金属的晶体结构 .....	11
2.1.3 晶面指数和晶向指数 .....	14
2.2 实际金属的晶体结构 .....	16
2.2.1 纯金属的显微组织 .....	16
2.2.2 单晶体和多晶体 .....	16
2.3 实际金属的晶体缺陷 .....	17
2.3.1 点缺陷 .....	17
2.3.2 线缺陷 .....	19
2.3.3 面缺陷 .....	21
思考题 .....	24
<b>3 金属的结晶</b> .....	25
3.1 金属结晶的现象 .....	25
3.1.1 结晶过程的宏观现象 .....	25
3.1.2 金属结晶的微观过程 .....	26
3.2 金属结晶的条件 .....	27
3.2.1 金属结晶的热力学条件 .....	27
3.2.2 金属结晶的结构条件 .....	27

3.3 金属结晶的过程 .....	29
3.3.1 结晶过程 .....	29
3.3.2 结晶过程的实质 .....	29
3.3.3 晶核的形成与长大方式 .....	30
3.3.4 金属铸态晶粒大小及其控制 .....	31
3.4 金属铸锭的组织与缺陷 .....	32
3.4.1 铸锭三晶区的形成 .....	32
3.4.2 铸锭组织的控制 .....	34
3.4.3 铸锭缺陷 .....	36
思考题 .....	38
<b>4 合金的相结构和相图 .....</b>	<b>39</b>
4.1 合金的相结构 .....	39
4.1.1 合金和相的基本概念 .....	39
4.1.2 合金的相结构 .....	39
4.1.3 合金的组织 .....	40
4.2 二元合金相图的建立 .....	41
4.2.1 二元合金状态图的建立 .....	41
4.2.2 合金的结晶 .....	42
4.3 几种典型二元合金相图 .....	43
4.3.1 匀晶相图 .....	43
4.3.2 共晶相图 .....	45
4.3.3 包晶相图 .....	48
4.3.4 具有稳定化合物的二元相图 .....	49
4.4 相图与合金性能的关系 .....	49
4.4.1 力学性能与相图的关系 .....	49
4.4.2 合金铸造性能与相图的关系 .....	50
思考题 .....	51
<b>5 三元合金相图 .....</b>	<b>53</b>
5.1 三元合金相图的表示方法 .....	53
5.1.1 成分三角形 .....	53
5.1.2 在成分三角形中具有特定意义的直线 .....	54
5.2 三元系平衡相的定量法则 .....	54
5.2.1 直线法则和杠杆定律 .....	55
5.2.2 重心法则 .....	56
5.3 三元匀晶相图 .....	57
5.3.1 相图分析 .....	57
5.3.2 三元固溶体合金的结晶过程 .....	57
5.3.3 等温截面 .....	58

5.3.4 变温截面 .....	59
5.3.5 投影图 .....	60
5.4 三元共晶相图 .....	61
5.4.1 相图分析 .....	61
5.4.2 等温截面 .....	62
5.4.3 变温截面 .....	63
5.4.4 投影图 .....	65
5.5 三元合金相图应用举例 .....	67
5.5.1 Fe-C-Si 三元系变温截面 .....	67
5.5.2 Fe-C-Mn 三元系等温截面 .....	68
思考题 .....	69
<b>6 铁碳合金</b> .....	<b>70</b>
6.1 金属的同素异构转变 .....	70
6.2 铁碳合金状态图 .....	71
6.2.1 铁碳合金的基本相 .....	71
6.2.2 铁碳合金状态图的分析 .....	72
6.2.3 铁碳合金的分类 .....	74
6.3 典型铁碳合金的结晶过程 .....	74
6.3.1 共析钢 .....	74
6.3.2 亚共析钢 .....	75
6.3.3 过共析钢 .....	76
6.3.4 共晶白口铸铁 .....	77
6.3.5 亚共晶白口铸铁 .....	78
6.3.6 过共晶白口铸铁 .....	79
6.4 碳对铁碳合金组织和性能的影响 .....	80
6.4.1 碳对铁碳合金组织的影响 .....	80
6.4.2 碳对铁碳合金性能的影响 .....	80
6.4.3 铁碳合金状态图的应用 .....	81
6.5 碳素钢 .....	82
6.5.1 常见杂质对钢性能的影响 .....	82
6.5.2 碳素钢的分类 .....	83
6.5.3 碳素钢的牌号、性能及用途 .....	84
思考题 .....	89
<b>7 金属的塑性变形与再结晶</b> .....	<b>90</b>
7.1 金属的塑性变形 .....	90
7.1.1 金属的变形与断裂 .....	90
7.1.2 单晶体的塑性变形 .....	90
7.1.3 多晶体的塑性变形 .....	91



7.1.4 合金的塑性变形 .....	92
7.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	93
7.2.1 金属组织的变化 .....	93
7.2.2 金属性能的变化 .....	94
7.2.3 冷塑性变形产生残余应力 .....	96
7.3 冷塑性变形金属在加热时组织和性能的变化 .....	97
7.3.1 冷变形金属在加热时组织和性能的变化 .....	97
7.3.2 再结晶温度 .....	98
7.3.3 再结晶晶粒的大小 .....	99
7.4 热加工变形对组织与性能的影响 .....	101
7.4.1 热加工的变形特点 .....	101
7.4.2 金属组织性能的变化 .....	102
思考题 .....	103
<b>8 钢的热处理 .....</b>	<b>105</b>
8.1 钢的热处理原理 .....	105
8.1.1 钢在加热时的组织转变 .....	105
8.1.2 钢在冷却时的组织转变 .....	108
8.2 钢的退火与正火 .....	116
8.2.1 钢的退火目的 .....	116
8.2.2 退火工艺 .....	117
8.2.3 钢的正火 .....	121
8.3 钢的淬火与回火 .....	121
8.3.1 淬火的目的是 .....	122
8.3.2 钢的淬透性和淬硬性 .....	122
8.3.3 淬火工艺 .....	123
8.3.4 淬火缺陷及防止措施 .....	127
8.4 钢的回火 .....	131
8.4.1 回火的目的 .....	131
8.4.2 淬火在回火时的组织转变 .....	131
8.4.3 回火时力学性能的变化 .....	132
8.4.4 回火种类及应用 .....	133
8.5 钢的表面热处理 .....	134
8.5.1 表面淬火 .....	134
8.5.2 钢的化学热处理 .....	135
8.6 控制轧制、控制冷却技术 .....	137
8.6.1 概述 .....	137
8.6.2 控制轧制的种类 .....	138
8.6.3 轧制工艺参数的控制 .....	139
思考题 .....	143

<b>9 合金钢</b> .....	145
9.1 合金钢的分类及编号 .....	145
9.1.1 合金钢的分类 .....	145
9.1.2 合金钢的编号 .....	145
9.2 合金元素在钢中的作用 .....	146
9.2.1 合金元素对钢中基本相的影响 .....	146
9.2.2 合金元素对 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的影响 .....	147
9.2.3 合金元素对钢热处理的影响 .....	148
9.3 合金结构钢 .....	150
9.3.1 低合金高强度结构钢 .....	150
9.3.2 合金渗碳钢 .....	151
9.3.3 合金调质钢 .....	152
9.3.4 合金弹簧钢 .....	154
9.3.5 滚动轴承钢 .....	155
9.4 合金工具钢 .....	157
9.4.1 刀具钢 .....	157
9.4.2 量具钢 .....	160
9.4.3 模具钢 .....	161
9.5 特殊性能钢 .....	162
9.5.1 不锈钢 .....	162
9.5.2 耐热钢 .....	162
9.5.3 耐磨钢 .....	163
9.5.4 电工硅钢 .....	163
思考题 .....	163
<b>10 铸铁</b> .....	165
10.1 概述 .....	165
10.1.1 铸铁的石墨化及影响因素 .....	165
10.1.2 铸铁的组织与性能 .....	166
10.2 铸铁的分类 .....	166
10.2.1 按碳存在的形式分类 .....	166
10.2.2 按石墨的形态分类 .....	166
10.2.3 按化学成分分类 .....	166
10.3 普通灰铸铁 .....	167
10.3.1 灰铸铁的化学成分、组织、性能及用途 .....	167
10.3.2 灰铸铁的孕育处理及孕育铸铁 .....	169
10.3.3 灰铸铁的热处理 .....	169
10.4 球墨铸铁 .....	171
10.4.1 球墨铸铁的化学成分 .....	171

---

10.4.2 球墨铸铁的组织和性能 .....	171
10.4.3 球墨铸铁的牌号和用途 .....	171
10.4.4 球墨铸铁的热处理 .....	172
10.5 可锻铸铁及蠕墨铸铁 .....	173
10.5.1 可锻铸铁 .....	173
10.5.2 蠕墨铸铁 .....	174
10.6 合金铸铁 .....	176
10.6.1 耐热铸铁 .....	177
10.6.2 耐磨铸铁 .....	177
10.6.3 耐蚀铸铁 .....	177
思考题 .....	178
参考文献 .....	179

# 1 金属材料的性能

金属材料的种类很多,为了正确合理地加工和使用材料,充分发挥其性能潜力,以达到提高产品质量的目的,必须掌握金属材料的性能。金属材料的性能包括使用性能和工艺性能两个方面:

(1) 使用性能,指金属材料适应各种使用条件的能力,它包括物理性能、化学性能、力学性能等。金属材料的使用性能决定了其应用范围、安全可靠性和使用寿命等。

(2) 工艺性能,指金属材料适应各种冷、热加工工艺的能力,它包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、切削加工性能以及热处理性能等。

## 1.1 金属材料的力学性能

金属材料抵抗外力的能力,称为金属材料的力学性能。材料的力学性能,不仅是设计零件、选择材料的重要依据,而且也是验收、鉴定材料性能的重要依据之一。对冶金产品的生产来说,金属材料的力学性能还是改进工艺、控制产品质量的重要参数之一。

作用在材料上的外力也叫做载荷。根据载荷的性质可分为静载荷、冲击载荷和交变载荷等。

无论何种固体材料,其内部原子之间都存在相互平衡的原子结合力的相互作用。当工件受外力作用时,材料原来的平衡状态受到破坏,材料中任何一个小单元与其邻近的各小单元之间就诱发了新的力,称为内力。在单位横截面上的内力,称为应力,以 $\sigma$ 表示。材料在外力作用下引起形状和尺寸改变,称为变形,包括弹性变形和塑性变形。

在这些不同载荷作用下,材料所表现的力学性能又可分为强度、塑性、硬度、韧性、刚度等。

### 1.1.1 强度

所谓强度是指材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。由于载荷有拉伸、压缩、弯曲、剪切等形式,所以强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。

#### 1.1.1.1 拉伸

进行拉伸试验时,采用如图 1-1a 所示的拉伸试样。拉伸试验是在常温下给试样缓慢施加轴向载荷,引起试样变形和断裂的试验过程。断裂后的试样,如图 1-1b 所示。

根据拉伸试验时试样的变形量与其所受载荷之间关系,可绘出载荷-伸长量曲线图,即拉伸图。图 1-2 所示是低碳钢的拉伸图。

由图 1-2 可知,试样在载荷作用下发生变形的过程可分为如下三个阶段。

(1)  $OP_e$ ——弹性变形阶段:当作用在试样上的载荷不大于  $P_p$  时,载荷与伸长量成正比例,外力去除后试样恢复原来的形状,符合胡克定律的弹性变形阶段;当载荷大于  $P_p$  而不大于  $P_e$  时,试样的伸长量不再与外力成正比关系,但还属于弹性变形阶段,即当外力去除后变形立即消失。

(2)  $es_b$ ——弹性-塑性变形阶段:荷载超过  $P_e$  而小于  $P_s$  时,试样除产生弹性变形外还发生部分塑性变形;当荷载达到  $P_s$  时,出现的水平线段表示在荷载不变的情况下试样继续变形,这种

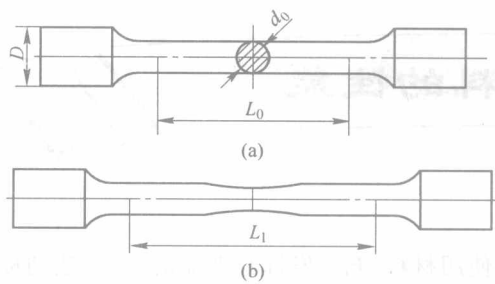


图 1-1 拉伸试样  
a—拉伸前；b—拉伸后

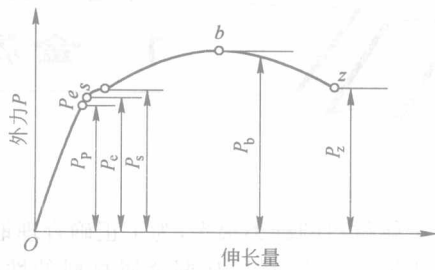


图 1-2 低碳钢的拉伸图

现象叫做屈服，屈服变形达到一定程度后，要使试样继续变形，需再增加载荷，即载荷大于  $P_s$  而小于  $P_b$  时，随载荷增加变形也相应地增加。

(3)  $bz$ ——断裂阶段：载荷达到  $P_b$  时，试样的某一部分截面开始急剧缩小，出现了“颈缩”。以后的变形主要集中在颈部，由于颈部附近试样的截面积急剧减小，致使载荷下降，当达到  $P_z$  时试样发生断裂。

### 1.1.1.2 强度指标

静拉伸试验时可测定的金属材料的强度指标主要有如下几种。

(1) 抗拉强度，是指材料在拉断前所承受的最大应力值，以符号  $\sigma_b$  表示，则

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}$$

式中  $P_b$ ——试样能承受的最大载荷；

$F_0$ ——试样的原始截面积。

(2) 屈服极限，是指材料受拉产生屈服时的应力值，以符号  $\sigma_s$  表示，则

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$$

式中  $P_s$ ——试样屈服时的载荷。

(3) 弹性极限，是指材料产生弹性变形时所受到的最大应力值，以符号  $\sigma_e$  表示，则

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0}$$

式中  $P_e$ ——试样产生弹性变形所受到的最大载荷。

(4) 比例极限，是指载荷与伸长量保持正比关系的最大应力值，以符号  $\sigma_p$  表示，则

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$$

式中  $P_p$ ——载荷与伸长量保持正比关系的最大载荷。

(5) 疲劳强度，是指金属材料在交变载荷作用下，在工作应力小于  $\sigma_s$  时，仍然会发生破坏的现象。

金属材料的疲劳破坏过程，首先是在其薄弱部位，如在有应力集中或缺陷处产生微细裂纹。这种裂纹是疲劳源，而且一般出现在零件表面上，形成疲劳扩展区。当此区达到某一临界尺寸时，零件就在甚至低于弹性极限的应力下突然脆断。

材料抵抗疲劳破坏的能力以疲劳强度衡量,它是材料在无限循环的交变载荷下不致断裂的最大应力值,以符号  $\sigma_{-1}$  表示。

材料的  $\sigma_{-1}$  与  $\sigma_b$  是紧密相关的。对钢来说,其关系为  $\sigma_{-1} = 0.45 \sim 0.55\sigma_b$ 。可见材料的疲劳强度随其抗拉强度增高而增高。

零件的疲劳强度除了决定于材料的成分及其内部组织外,与零件的表面状态及其形状也有很大的影响。表面应力集中会使疲劳寿命大大减小。提高零件疲劳寿命的方法有:(1)设计上减小应力集中,转接处避免锐角连接,使零件具有较小的表面粗糙度;(2)强化表面,如渗碳、喷丸、表面滚压等,在零件表面形成残余压应力,抵消一部分拉应力,降低零件表面实际拉应力峰值,从而提高零件的疲劳强度。

### 1.1.2 塑性

所谓塑性,是指金属材料在静载荷作用下产生永久性变形而不破坏的能力。材料的塑性好坏是根据材料断裂前所产生的塑性变形的多少来确定。通过拉伸试验测定的塑性指标有伸长率和断面收缩率。

伸长率是指试样被拉断后总伸长量与原始长度之比的百分数,以符号  $\delta$  表示,则

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中  $L_0$ ——试样的原始长度;

$L_1$ ——试样拉断后的长度。

断面收缩率是指试样断口面积的收缩量与原始面积之比的百分数,以符号  $\psi$  表示,则

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中  $F_0$ ——试样的原始截面积;

$F_1$ ——试样拉断后的断面面积。

断面收缩率不受试样标距长度的影响,因此能更可靠地反映材料的塑性。

一般来说,金属的伸长率与断面收缩率越大,其塑性越好。

### 1.1.3 硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的一个指标,它是指金属材料抵抗硬物体压入其表面的能力。

测定硬度值的基本方法是用一定载荷把一个较硬的标准物体(称压头)压入被测工件表面,然后根据压痕的深度或表面面积确定硬度值。

根据所采用压头和压力的不同,常用硬度测定法可分为布氏硬度法、洛氏硬度法、维氏硬度法和肖氏硬度法等。

#### 1.1.3.1 布氏硬度

布氏硬度法是以一定负荷  $P$  把直径为  $D$  的淬火小钢球压入试样表面并保持一定时间,然后卸除负荷,测量试样表面上所形成的压痕直径  $d$ ,如图 1-3 所示。用负荷  $P$  除以压痕表面积  $F$  所得的压痕单位面积上所受平均压力即为布氏硬度值,以符号 HB 表示。如压痕深度为  $h$ ,则压痕表面积为:

$$F = \pi Dh = \pi D \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

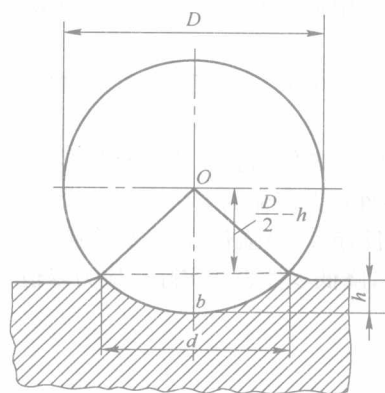


图 1-3 计算布氏硬度压痕面积示意图

试样硬度值为：

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

在上式中, 负荷  $P$  和钢球直径  $D$  是一定的, 所以测出压痕直径  $d$  即可求出 HB 值。在实际应用中根据  $P$ 、 $D$  与  $d$  的关系, 可直接由硬度表中查得 HB 值。

考虑到各种材料硬度范围相差很大, 尺寸不一, 所以对于钢铁材料的布氏硬度试验除常采用直径为 10 mm 的压头和 3000 kg 负荷的标准外, 还有采用直径为 5 mm 的压头、750 kg 负荷和采用直径为 2.5 mm 的压头、187.5 kg 负荷等标准。对于铜、铝等有色金属材料则另有标准。

布氏硬度法的特点是操作方便, 准确度高, 因此得到广泛应用。但因采用的压头强度低, 测定较硬 ( $HB=450$ ) 的材料时会变形, 影响试验结果, 故只能测量硬度不太高的材料。另外, 由于压痕面积较大, 故不宜测量薄件和对表面质量要求较高的成品件。布氏硬度法适用于测量没经淬火的碳钢、灰口铸铁、有色金属等硬度不太高的金属材料的硬度。

因为硬度可以反映材料局部的强度, 所以拉伸强度与硬度之间有一定的关系, 其近似关系为:

$$\sigma_b \approx KHB$$

式中,  $K$  为常数, 低碳钢  $K \approx 0.36$ ; 高碳钢  $K \approx 0.34$ ; 调质合金钢  $K \approx 0.325$ ; 灰口铸铁  $K \approx 0.1$ 。

### 1. 1. 3. 2 洛氏硬度

洛氏硬度法采用的压头是直径为 1.588 mm (1/16 in) 的钢球或顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥, 根据压痕深度确定洛氏硬度值。根据压头和载荷的不同, 洛氏硬度标度可分许多种, 其中常用三种标度见表 1-1。

表 1-1 洛氏硬度的压头、载荷和适用范围

洛氏硬度符号	压头		载荷/kg		适用范围
	类型	大小	预载荷	主载荷	
HRC	金刚石圆锥体	夹角为 $120^\circ$ , 锥顶半径为 0.2 mm	10	140	HRC20~70 的硬金属, 如淬火回火处理的钢
HRB	钢球	直径为 1.59 mm (1/16 in)	10	90	HRB25~100 的软金属, 如铜合金、低碳钢、中碳钢
HRA	金刚石圆锥体	夹角为 $120^\circ$ , 锥顶半径为 0.2 mm	10	50	HRA 大于 70 的很硬及硬而薄的金属

洛氏硬度法的特点是压痕面积小, 对工件表面质量影响很小, 对软硬材料均可测定等。但因压痕较小, 一次测量数据代表性差, 需多次测量取平均值; 又因负荷较大, 故不宜用来测定极薄的材料或具有表面硬化层的材料的硬度。

### 1. 1. 3. 3 维氏硬度

维氏硬度法采用压头是一顶角为  $136^\circ$  的金刚石四棱锥, 与布氏硬度法一样, 以压痕单位表面积上的平均压力作为维氏硬度值, 以符号 HV 表示。

维氏硬度法有各种载荷可供选择, 所得压痕较浅而大, 故准确度较高, 可测定具有表面硬化层的材料的表面层硬度。在采用很小载荷时可测定显微硬度, 缺点是测验步骤较繁。

### 1.1.3.4 肖氏硬度

肖氏硬度法是利用弹性回跳测定金属的硬度。基本方法是利用金刚石球或钢球从一定高度上自由降落到试件表面,根据回跳的高度测定硬度值,以符号 HS 表示。

这一方法简便,而且试件表面上不留下痕迹。工厂中多用于测量一些精密量具和大型金属件,如大型曲轴、轧辊等的硬度。肖氏硬度法的缺点是所测得的硬度值不够准确。

## 1.1.4 韧性

### 1.1.4.1 冲击韧度

机械零部件在服役过程中不仅受到静载荷或变动载荷作用,而且受到不同程度的冲击载荷作用,如锻锤、冲床、铆钉枪等。在设计和制造受冲击载荷的零件和工具时,必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧度。

目前最常用的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验,其试验原理如图 1-4 所示。

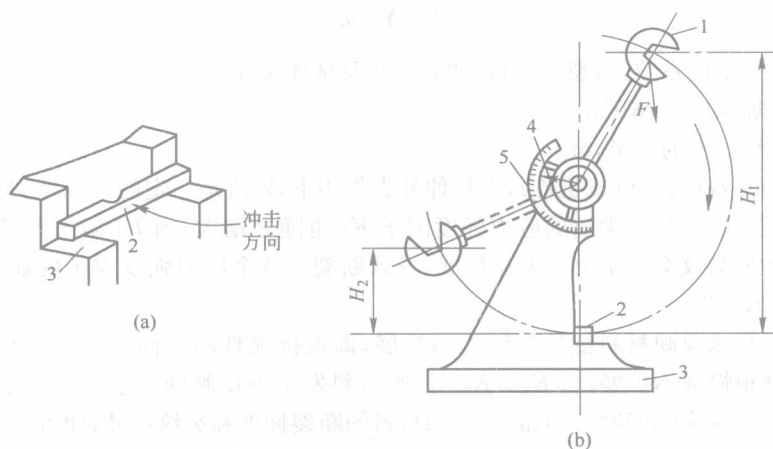


图 1-4 冲击试验原理图

1—摆锤;2—试样;3—机架;4—指针;5—刻度盘

将欲测定的材料先加工成标准试样,然后放在试验机的机架上,试样缺口背向摆锤冲击方向,将具有一定重力  $F$  的摆锤举至一定高度  $H_1$ ,使其具有势能  $FH_1$ ,然后摆锤落下冲击试样;试样断裂后摆锤上摆到  $H_2$  高度,在忽略摩擦和阻尼等条件下,摆锤冲断试样所做的功,称为冲击吸收功,以  $A_K$  表示,则有  $A_K = FH_1 - FH_2 = F(H_1 - H_2)$ 。在 GB/T 229—94 中,仅规定了冲击吸收功的概念。若用试样的断口处截面积  $S_N$  除  $A_K$  即得到冲击韧度,用  $a_K$  表示,单位为  $J/cm^2$ 。

$$a_K = A_K / S_N$$

对一般常用钢材来说,所测冲击吸收功  $A_K$  越大,材料的韧性越好。但由于测出的冲击吸收功  $A_K$  的组成比较复杂,所以有时测得的  $A_K$  值及计算出来的  $a_K$  值不能真正反映材料的韧脆性质。

长期生产实践证明,  $A_K$ 、 $a_K$  值对材料的组织缺陷十分敏感,能灵敏地反映材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化,因而冲击试验是生产上用来检验冶炼和热加工质量的有效办法之一。由于温度对一些材料的韧脆程度影响较大,为了确定出材料由韧性状态向脆性状态转化



趋势,可分别在一系列不同温度下进行冲击试验,测定出  $A_K$  值随试验温度的变化。试验表明,  $A_K$  随温度的降低而减小;在某一温度范围,材料的  $A_K$  值急剧下降,表明材料由韧性状态向脆性状态转变,此时的温度称为韧脆转变温度。根据不同的钢材及使用条件,其韧脆转变温度的确定有冲击吸收功、脆性断面率、侧膨胀值等不同的评定方法。

#### 1.1.4.2 断裂韧度

前面几节讨论的力学性能,都是假定材料是均匀、连续、各向同性的。以这些假设为依据的设计方法称为常规设计方法。根据常规方法分析认为是安全的设计,有时会发生意外断裂事故。在研究高强度金属材料中发生的低应力脆性断裂的过程中,发现前述假设是不成立的。实际上,材料的组织远非是均匀、各向同性的,组织中有微裂纹,还会有夹杂、气孔等宏观缺陷,这些缺陷可看成是材料中的裂纹。当材料受外力作用时,这些裂纹的尖端附近便出现应力集中,形成一个裂纹尖端的应力场。根据断裂力学对裂纹尖端应力场的分析,裂纹前端附近应力场的强弱主要取决于一个力学参数,即应力强度因子  $K_I$ ,单位为  $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 。

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

式中  $Y$ ——无量纲的系数,与裂纹形状、加载方式及试样尺寸有关;

$\sigma$ ——外加拉应力,MPa;

$a$ ——裂纹长度的一半,m。

对某一个有裂纹的试样(或机件),在拉伸外力作用下, $Y$  值是一定的。当外加拉应力逐渐增大,或裂纹逐渐扩展时,裂纹尖端的应力强度因子  $K_I$  也随之增大;当  $K_I$  增大到某一临界值时,试样(或机件)中的裂纹会产生突然失稳扩展,导致断裂。这个应力强度因子的临界值称为材料的断裂韧度,用  $K_{Ic}$  表示。

断裂韧度是用来反映材料抵抗裂纹失稳扩展,即抵抗脆性断裂能力的性能指标。当  $K_I < K_{Ic}$  时,裂纹扩展很慢或不扩展;当  $K_I > K_{Ic}$  时,则材料发生失稳脆断。这是一项重要的判据,可用来分析和计算一些实际问题。例如,若已知材料的断裂韧度和裂纹尺寸,便可以计算裂纹扩展以致断裂的临界应力,即机件的承载能力;或者已知材料的断裂韧度和工作应力,就能确定材料中允许存在的最大裂纹尺寸。

断裂韧度测定是把试验材料制成一定形状和尺寸的试样,在试样上预制出能反映材料实际情况的疲劳裂纹,然后施加载荷。试验中用仪器自动记录并绘出外力与裂纹扩展的关系曲线,经过计算和分析,确定断裂韧度。

断裂韧度是材料固有的力学性能指标,是强度和韧性的综合体现。它与裂纹的大小、形状、外加应力等无关,主要取决于材料的成分、内部组织和结构。

#### 1.1.5 刚度

材料在受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度,它表示材料弹性变形的难易程度。材料刚度的大小,通常用弹性模量  $E$  来评价。

材料在弹性范围内,应力与应变的关系服从胡克定律: $\sigma = E\epsilon$  或  $\tau = G\gamma$ 。式中  $\sigma$  和  $\tau$  分别为正应力和切应力, $\epsilon$  和  $\gamma$  分别为正应变和切应变。应变为单位长度的变形量,即  $\epsilon = \Delta L/L$ 。

因之  $E = \sigma/\epsilon$  或  $G = \tau/\gamma$ ,相应为弹性模量和切变模量。由图 1-2 可以看出,弹性模量  $E$  是拉伸曲线上的斜率,即  $\tan\alpha = E$ 。斜率  $\tan\alpha$  越大,弹性模量  $E$  也越大,即是说弹性变形越不容易进行。因此  $E$ 、 $G$  是表示材料抵抗弹性变形能力和衡量材料“刚度”的指标。弹性模量越大,材料的刚度越大,即具有特定外形尺寸的零件或构件保持其原有形状与尺寸的能力也越大。