



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

HUODIANCHANG JINSHU CAILIAO

火电厂金属材料

(第二版)

崔朝英 金长虹 主 编
李立明 黄江洪 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power

中国电力出版社“十二五”重点图书出版规划项目

中国电力出版社“十二五”重点图书出版规划项目

火电厂金属材料

（第二版）

张维忠、王世强、孙一康

李俊刚、陈永强、陈永强

中国电力出版社
CHINA ELECTRICITY PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

HUODIANCHANG JINSHU CAILIAO

火电厂金属材料

(第二版)

主 编 崔朝英 金长虹
副主编 李立明 黄江洪
编 写 郭国庆



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。全书共分为三篇九章。第一篇为金属材料及热处理的基础知识，主要内容包括金属学基本知识、钢的热处理等；第二篇为火电厂常用金属材料，主要内容包括钢、铸铁、有色金属及其合金等；第三篇为金属材料的高温运行与监督，主要内容包括金属材料的高温性能与组织、锅炉和汽轮机主要零部件的选材及事故分析、火电厂金属技术监督等。每章后附有复习思考题。本书中包含了近几年大容量、高参数机组所使用的金属材料，并且材料的牌号采用了最新的国家标准。

本书可作为高职高专电力技术类热动力装置、火电厂集控运行专业教材，也可作为高级工培训和成人教育教材，还可供电厂运行、安装、检修、焊接及金属监督人员阅读。

图书在版编目（CIP）数据

火电厂金属材料/崔朝英，金长虹主编. —2版. —北京：中国电力出版社，2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5083-8642-3

I. 火… II. ①崔…②金… III. 火电厂-金属材料-高等学校：技术学校-教材 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 044588 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 7 月第一版

2009 年 6 月第二版 2009 年 6 月北京第四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 244 千字

定价 16.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育)。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

全书共分为三篇九章,第一篇为金属材料及热处理的基础知识,主要内容包括金属学基本知识、钢的热处理;第二篇为火电厂常用金属材料,主要内容包括钢、铸铁、有色金属及其合金等;第三篇为金属材料的高温运行与监督,主要内容包括金属材料的高温性能与组织、锅炉和汽轮机主要零部件的选材及事故分析、火电厂金属技术监督等。

本书第一章由郑州电力高等专科学校李立明编写,第二章和第三章(第七、八节除外)由郑州电力高等专科学校金长虹编写,第四(第一节除外)、五、六、九章由河南省电力公司培训中心崔朝英编写,第七、八章由大唐洛阳首阳山发电厂黄江洪编写,第三章中第七、八节和第四章中第一节由郑州电力高等专科学校郭国庆编写。全书由崔朝英统稿。

本书由重庆电力高等专科学校的康纪仪教授和郑州电力试验研究所的高级工程师陈贻守主审,他们提出了许多宝贵的意见和建议,使编者受益匪浅,特此表示诚挚的谢意。

本书在讨论编写大纲过程中,得到华北电力大学安江英教授的帮助和支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2009年5月

目 录

前言

第一篇 金属材料及热处理的基础知识

第一章 金属学基本知识	1
第一节 金属材料的性能	1
第二节 金属的晶体结构	8
第三节 金属的结晶	12
第四节 金属的塑性变形	14
第五节 铁碳合金相图	17
复习思考题	29
第二章 钢的热处理	31
第一节 钢在加热时的转变	31
第二节 奥氏体在冷却时的转变	32
第三节 钢的普通热处理	36
第四节 表面热处理	40
第五节 焊接热处理	42
复习思考题	45

第二篇 火电厂常用金属材料

第三章 钢	47
第一节 碳素钢	47
第二节 合金元素对钢的影响	52
第三节 合金钢的分类和牌号表示方法	54
第四节 合金结构钢	55
第五节 合金工具钢	61
第六节 不锈钢	64
第七节 耐磨钢	66
第八节 耐热钢	67
复习思考题	72
第四章 铸铁	74
第一节 概述	74
第二节 常用铸铁	75

复习思考题	82
第五章 有色金属及其合金	83
第一节 铝及铝合金	83
第二节 铜及铜合金	88
第三节 钛及钛合金	92
第四节 轴承合金	93
复习思考题	95

第三篇 金属材料的高温运行与监督

第六章 金属材料的高温性能与组织	97
第一节 金属的高温力学性能	97
第二节 钢在高温下的组织变化	104
复习思考题	107
第七章 锅炉主要零部件的选材及事故分析	108
第一节 锅炉受热面管与蒸汽管道用钢	108
第二节 锅炉汽包用钢	119
第三节 锅炉受热面吊挂和吹灰器用钢	122
复习思考题	124
第八章 汽轮机主要零部件的选材及事故分析	125
第一节 汽轮机叶片用钢及事故分析	125
第二节 汽轮机转子用钢及事故分析	130
第三节 汽轮机静子用钢及事故分析	135
第四节 螺栓用钢与事故分析	137
第五节 电厂凝汽器管的选材	142
复习思考题	144
第九章 火电厂金属技术监督	146
复习思考题	150
附录	151
附录一 压痕直径与布氏硬度对照表	151
附录二 国内外常用钢号对照表	153
参考文献	156

第一篇 金属材料及热处理的基础知识

第一章 金属学基本知识

第一节 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。使用性能是指金属材料在正常使用条件下应具备的性能,包括力学性能和物理、化学性能;金属材料对各种冷、热加工过程的适应能力称为工艺性能,包括铸造、锻造、焊接、热处理和切削加工等性能。优良的使用性能和良好的工艺性能是选材的基本出发点。

一、金属材料的常温力学性能

力学性能是指金属材料在外力作用下所表现出来的抵抗变形和破坏的能力。金属在常温时的力学性能指标有强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度和断裂韧性等。这些性能指标均是通过一定的试验方法测定出来的。

(一) 强度和塑性

强度和塑性是通过拉伸试验测定的。拉伸试验是在拉伸试验机上进行的。它是把一定尺寸和形状的金属试样装夹在拉伸试验机上,对试样进行轴向静拉伸,使它不断产生变形,直到拉断为止。

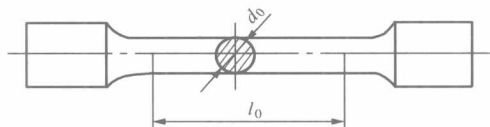


图 1-1 拉伸试样

d_0 —圆形试样平行长度部分的原始直径, mm;

l_0 —试样原始标距长度, mm

拉伸试验常用的试样截面为圆形,如图 1-1 所示。依照国家标准,拉伸试样可成长试样或短试样。对圆截面试样而言,长试样 $l_0 = 10d_0$,短试样 $l_0 = 5d_0$ 。

从试样变形到拉断,可通过自动记录装置把载荷和伸长量的关系用曲线表示出来,该曲线即为力—伸长曲线,如图 1-2 所示。

由力—伸长曲线可以看出,金属材料在外力作用下所引起的变形和破坏的过程大致可分为弹性变形阶段、弹—塑性变形阶段和破坏阶段三个阶段。下面就根据力—伸长曲线介绍几种重要的力学性能指标。

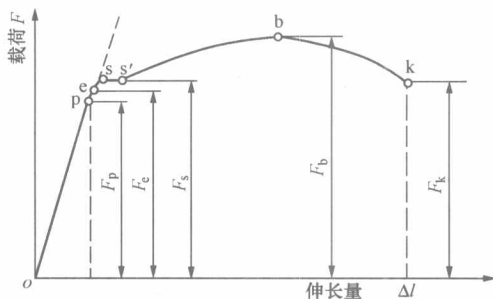


图 1-2 低碳钢的力—伸长曲线

1. 强度

材料的强度,就是材料在静载荷作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。用单位面积上所受力的大小来表示。强度指标主要有屈服强度 R_e 和抗拉强度 R_m 。

(1) 材料承受外力时,当外力不再增加而仍继续发生塑性变形的现象,叫“屈服”。开始产生屈服现象时的应力,叫屈服强度,又称屈服

点, 用 R_e 表示, 以前用 σ_s 表示, 即

$$R_e = \frac{F_s}{S_0} \quad \text{MPa}$$

式中 F_s ——试样开始产生屈服时的载荷, N;

S_0 ——试样原始横截面积, mm^2 。

屈服强度反映了材料抵抗塑性变形的能力。试验中很难准确确定开始发生塑性变形的点。为了确定各种材料的屈服强度, 工程上常用残留变形量为 $(0.2\%) l_0$ 时的应力作为规定非比例延伸强度, 用 $R_{p0.2}$ 表示, 过去称为条件屈服强度, 用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

屈服强度是工程上最重要的力学性能指标之一, 也是设计零件时选用材料的依据。例如设计锅炉主要承压部件时, 选用许用应力时就是以屈服强度 (或条件屈服强度) 作为依据的; 设计汽轮机汽缸盖螺栓时, 也是以屈服极限为依据的, 为了保证汽缸的密封性, 螺栓所承受的应力不允许大于材料的屈服强度。

(2) 抗拉强度指试样在拉断前所承受的最大应力, 用 R_m 表示, 过去用 σ_b 表示。它表示零件在外力作用下抵抗断裂的能力, 即

$$R_m = \frac{F_b}{S_0} \quad \text{MPa}$$

式中 F_b ——试样断裂前承受的最大载荷, N。

R_m 越大, 材料抵抗断裂的能力越大, 即强度越高。金属材料绝不能在承受超过其抗拉强度的载荷下工作, 因为这样会很快导致破坏。 R_m 也是设计零件的重要依据, 其大小是设备运转时零件安全的保证。

由于大多数机械零件设计时都以不发生塑性变形为原则, 因此 R_e 显得更重要。

在工程上使用的金属材料, 不仅要求高的屈服强度 R_e , 同时还要求具有一定的屈强比, 即 R_e/R_m 。屈强比越小, 零件的可靠性越高, 在万一超载的情况下, 也能由于塑性变形使材料的强度提高而不致立刻断裂; 但屈强比太小, 则材料的强度利用率太低, 造成浪费。对于弹簧钢来说, 则要求高的屈强比。

2. 塑性

塑性是指金属材料产生塑性变形而不破坏的能力。拉伸试验所测得的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。

(1) 试样被拉断后, 伸长的长度同原始长度之比的百分率, 称为断后伸长率, 用 A 表示, 过去用 δ 表示。即

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 l ——试样拉断后的长度, mm;

l_0 ——试样原始长度, mm。

A 值的大小与试样尺寸有关, 随着其计算长度的增大而减小, 即对于同一材料, 短试样所测得的断后伸长率要比长试样所测得的断后伸长率大。

(2) 试样被拉断后, 断面缩小的面积与原截面面积之比的百分率, 称为断面收缩率, 用 Z 表示, 过去用 ψ 表示。即

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_0 ——试样的原始截面积, mm^2 ;

S ——试样断口处的截面积, mm^2 。

断面收缩率与试样尺寸无关, 能更可靠、更灵敏地反映材料塑性的变化。

通常以断后伸长率 A 的大小来区别塑性的好坏, $A > 2\% \sim 5\%$ 的材料称为塑性材料, 如铜、钢等; $A < 2\% \sim 5\%$ 的材料称为脆性材料, 如铸铁、混凝土等。纯铁的 A 值几乎可达 50%, 而普通生铁的 A 值还不到 1%, 低碳钢的 A 约为 20%~30%, Z 约为 60%。

(二) 硬度

硬度是指金属表面抵抗其他更硬物体压入的能力。金属材料的硬度越高, 其表面抵抗塑性变形的能力越强, 塑性变形越困难。

硬度试验一般以一个极硬的球体或锥体压入金属的表面, 以压痕的面积或深度来衡量金属材料硬度的大小。硬度试验简单易行, 也不损坏零件, 所以在生产和科研中应用很广。这里介绍布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法和里氏硬度试验法。

1. 布氏硬度

布氏硬度值是由布氏硬度试验法测定的。其原理见图 1-3。该方法是在直径为 D 的钢球或硬质合金球上施加一定载荷 F , 使钢球压入被测金属表层, 经规定持续时间后卸除载荷, 测定压痕直径 d , 以球冠形压痕单位面积所承受的平均负荷作为布氏硬度 HB 值, 即

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

式中 F ——所加载荷, N;

D ——压头直径, mm;

d ——压痕直径, mm。

由于试验材料的种类、硬度和试样厚度等不同, 试验时使用载荷的大小、钢球直径及载荷停留时间也就不一样, 如表 1-1 所示。

表 1-1 测定布氏硬度应遵守的条件

金属种类	布氏硬度值范围	试样厚度 (mm)	载荷 F (kgf) 与钢球直径 D 的相互关系	钢球直径 D (mm)	载荷 F (N)	负荷保持时间 (s)
钢铁	140~450	6~3	$F = 30D^2$	10.0	29420	10
		4~2		5.0	7355	
		<2		2.5	1839	
	<140	>6	$F = 10D^2$	10.0	9807	10
		6~3		5.0	2452	
		<3		2.5	613	

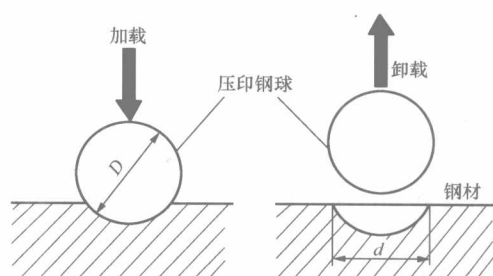


图 1-3 布氏硬度测试原理

续表

金属种类	布氏硬度值范围	试样厚度 (mm)	载荷 F (kgf) 与 钢球直径 D 的相互关系	钢球直径 D (mm)	载荷 F (N)	负荷保持时间 (s)
非铁 金属	>130	6~3	$F=30D^2$	10.0	29420	30
		4~2		5.0	7355	
		<2		2.5	1839	
	36~130	9~3	$F=10D^2$	10.0	9807	30
		3~6		5.0	2452	
		<3		2.5	613	
	8~35	>6	$F=2.5D^2$	10.0	2452	60
		6~3		5.0	613	
		<3		2.5	153	

注 1kgf=9.8N。

测定布氏硬度时,可根据载荷 F 、钢球直径 D 以及测得的压痕直径 d ,直接从布氏硬度表中查得 HB 值(见附录一),且习惯上不标注单位。布氏硬度值的书写表示方法应包含下列几个部分:①硬度数据;②布氏硬度符号;③球体直径;④载荷;⑤载荷保持时间(10~15s 不标注)。当压头为钢球时(用于 $HB \leq 450$ 的材料),布氏硬度符号为 HBS;当压头为硬质合金球时(用于 $HB=450 \sim 650$ 的材料),布氏硬度符号为 HBW。

例如,120HBS10/1000/30,表示直径 10mm 的钢球在 9.807kN(1000kg)载荷的作用下,保持了 30s 测得的布氏硬度值为 120。

对于碳钢与一般合金钢,HB 值与 R_m 值间可用近似公式进行换算:

当 $HB < 175$ 时, $R_m = 3.6HB$ (MPa);

当 $HB \geq 175$ 时, $R_m = 3.5HB$ (MPa)。

由于布氏硬度试验的压痕面积较大,因此布氏硬度能反映较大范围内的平均硬度,有很高的测量精度和测量数据稳定性。但试验操作比较费时,不宜用于大批逐件检验以及某些不允许表面有较大伤痕的零件。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度值由洛氏硬度试验测定。其原理是用一个锥角 120° 的金刚石圆锥体或一定直径的钢球为压头,在规定载荷的作用下,压入被测金属表层,一定时间后卸除载荷,由留下的压痕深度来确定其硬度值,并定义为洛氏硬度,记为 HR。试验时,由于试验机巧妙地运用了杠杆原理和进行了数据处理,操作者可直接在试验机表盘上读出其硬度值。材料越硬,洛氏硬度值也越大。

根据压头和主载荷的不同,构成了 A、B、C 三种硬度标尺,见表 1-2。

表 1-2 常用洛氏硬度值符号及试验条件和应用举例

标尺	硬度符号	压头型号	初载荷+主载荷=总载荷 (N)	常用范围	应用举例
A	HRA	金刚石圆锥	$98.07+490.3=588.4$	70~85	碳化物、硬质合金、表面淬火钢等
B	HRB	钢球 $\phi 1.588$	$98.07+882.6=980.7$	25~100	软钢、退火钢、铜合金等
C	HRC	金刚石圆锥	$98.07+1373=1471$	20~67	淬火钢、调质钢等

洛氏硬度值为一无名数，它置于符号 HR 的前面表示，HR 后面为使用的标尺。例如，50HRC 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 50。

洛氏硬度的优点是操作简便，可以直接读出硬度值；压痕小，几乎不伤工件表面。洛氏硬度法是目前生产中应用最广的硬度测试方法。这种方法的缺点是压痕小，所测硬度值离散性较大，因此，最好多测几个点，取其平均值。洛氏硬度试验法适合测量较硬材料的硬度。

3. 里氏硬度

里氏硬度值是用里氏硬度计来测定的，里氏硬度计主机结构如图 1-4 所示。其原理是在一定载荷的作用下，使装有碳化钨球的冲击测头冲击被测金属表面，测量冲击测头距试样表面 1mm 处的冲击速度与回跳速度。里氏硬度值是以冲击测头回跳速度与冲击速度之比来表示的，即

$$HL = 1000 \frac{V_b}{V_a}$$

式中 HL——里氏硬度值；

V_a ——冲击测头冲击速度；

V_b ——冲击测头回跳速度。

试验方法如下：

(1) 打开电源开关。

(2) 设置程序。

(3) 进行测试。先将加载套向冲击端方向压缩至底部。冲击体被抓住，再恢复加载套管至原位。用拇指和食指捏在外壳上，然后将支撑环平稳压紧在试样被测部位表面。当主机试样和操作人员都稳定后，轻轻向下按启动按钮，使冲击体释放，冲击体在冲击弹簧推动下，冲击试样表面并回弹，液晶屏显示测试值，并将此测试值存储，至此测试完成。

里氏硬度计测试精度高，体积小、易于携带和现场操作，可以从任何方向测试工件，可测试复杂的大型工件；但对于那些小、轻、薄或形状特殊复杂的工件，测试有一定的困难或测试误差较大。

(三) 冲击韧性

冲击韧性是金属材料在冲击载荷作用下表现出来的抵抗破坏的能力。所谓冲击载荷，就是在极短的时间内有很大幅度变化的载荷。

目前普遍使用的冲击韧性的测定方法是一次摆锤弯曲冲击试验。试验用的标准试样为梅氏试样，如图 1-5 所示。试验时，将试样放在试验机的两个支撑上，使其缺口背向摆锤的冲击方向，然后将重量为 G 的摆锤抬到 h_1 的高度（如图 1-6 所示），摆锤由此高度下落，将试样冲断，并升起 h_2 的高度，因此，冲断试样所消耗的功为

$$A_k = G(h_1 - h_2) \quad \text{J}$$

可以从试验机的刻度盘上直接读出冲击功 A_k 值。

金属的冲击韧性就是冲断试样时，在缺口处单位面积上所消耗的冲击功，即

$$\alpha_k = \frac{A_k}{S_0} \quad \text{J/cm}^2$$

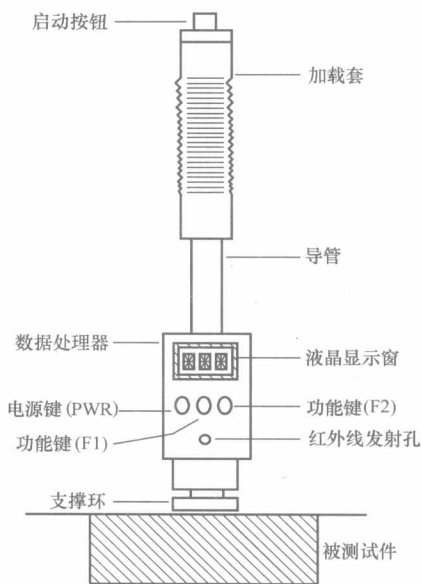


图 1-4 里氏硬度计主机结构

式中 S_0 ——试样缺口处横断面面积, cm^2 。

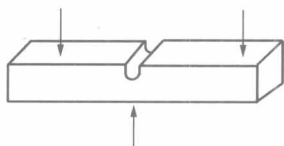


图 1-5 梅氏冲击试样

试样尺寸 (mm):

10×10×50; 槽深 2; 槽宽 2

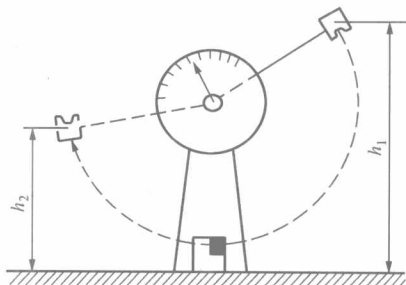


图 1-6 冲击试验原理

对于承受冲击载荷的零件, 要求具有一定的 α_k 值, 以保证零件使用时的安全, 但 α_k 值不能直接用于零件的设计, α_k 值取值范围以 $29 \sim 49 \text{ J/cm}^2$ 为宜。在火电厂设备中, 有些零件的 α_k 取值范围要求较高, 如调速汽门螺栓, 当 $\alpha_k < 58.8 \text{ J/cm}^2$ 时, 就规定必须更换。温度

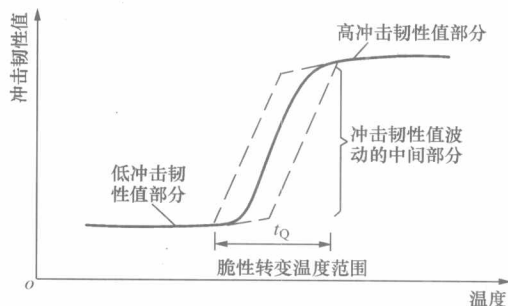


图 1-7 温度对钢的冲击值的影响

对材料冲击韧性的影响很大, 实践证明, 某些结构钢在一定的温度范围内, 会发生 α_k 值急剧下降的所谓冷脆现象, 如图 1-7 所示。图中, t_Q 称为脆性转变温度范围。它表明材料在这一温度范围从韧性状态向脆性状态转变。显然, t_Q 越低, 该材料在低温工作条件下的冲击韧性越好, 这对于寒冷地区和低温下工作的零件是必须的。即使某些零件的工作温度较高, 如汽轮机低压转子, 因安装、试验、冷态启动等工作的需要, 也要求材料具有较低的 t_Q 。因

此, 在火电厂设备中, 发电机转子、汽轮机转子和叶轮, 除了要求材料具有良好的综合性能外, 还要求材料具有较低的脆性转变温度范围。从 20 世纪 70 年代后期起, 还专门把断口上韧、脆性断面各占 50% 的温度定义为 $FATT_{50}$, 并作为转子的验收项目。研究发现, 它受多种因素的影响。低碳钢的 $FATT_{50}$ 较低, 随着含碳量的增加, $FATT_{50}$ 依次增高; 磷的影响很坏, 0.025% 的磷可使 $FATT_{50}$ 提高 60°C ; 而铬、镍、钼、锰均能适当地降低 $FATT_{50}$; 钢的晶粒越细, $FATT_{50}$ 越低。

(四) 疲劳强度

金属材料在远低于其屈服强度的交变应力长期作用下发生的断裂现象, 称为金属的疲劳。绝大多数机械零件的破坏主要是疲劳破坏, 如齿轮、汽轮机叶片、轴以及某些焊接件的破坏等。其特点是: ①引起疲劳断裂的应力低于静载荷下的 R_e ; ②疲劳断裂时无明显的宏观塑性变形, 而是突然破坏, 具有很大的危险性; ③疲劳断面上显示出裂纹源 (疲劳源)、裂纹扩展区 (光亮区) 和最后断裂区 (粗糙区) 三个组成部分, 如图 1-8 所示。图中的光亮区就是指裂纹不断扩

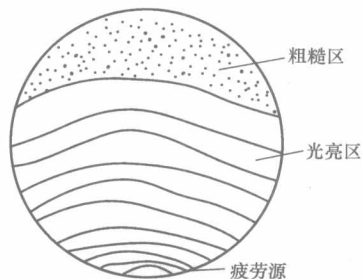


图 1-8 疲劳断口特征

展时, 裂纹经过多次张开、闭合, 并由于裂纹表面的相互摩擦, 形成了一条条光亮的弧线; 粗糙区则是最后断裂区。

一般认为疲劳断裂的原因是由于零件应力集中严重或材料本身强度较低的部位(裂纹、夹杂、刀痕等缺陷处)在交变应力的作用下产生了疲劳裂纹, 随着应力循环次数的增加, 裂纹缓慢扩展, 有效承载面积不断减小, 当剩余面积不能承受所加载荷时, 发生突然断裂现象。

显然, 金属材料所承受的交变载荷越大, 材料的寿命越短; 反之, 则越长。当应力值降至某一值时, 材料可经受无数次的应力循环而不断裂。金属材料在长期(无数次)经受交变载荷作用下, 不至引起断裂的最大应力, 称为疲劳强度。

实际上, 不可能让材料经受无数次的应力循环, 所以生产上把能经受 $10^6 \sim 10^8$ 次循环而不断裂的最大应力作为疲劳强度。当交变应力对称循环时, 用符号 σ_{-1} 表示。

影响材料疲劳强度的因素很多, 除了材料本身的成分、组织结构和材质等内因外, 还与零件的几何形状、表面质量和工作环境等外因有关。因此, 优化零件设计, 改善表面加工质量, 采取喷丸、滚压、表面热处理等工艺, 均能有效地提高零件的疲劳强度。

(五) 断裂韧性

有些高强度钢制造的零件和中、低强度钢制造的大型件, 往往在工作应力远低于屈服强度 R_e 时就发生脆性断裂。这种在 R_e 以下的脆性断裂称为低应力脆断。大量工程事故和试验表明, 低应力脆断是由材料中宏观裂纹的扩展引起的。在金属材料及其结构中, 这种宏观裂纹的出现是难免的, 它可能是金属材料在冶炼和加工过程中产生的, 也可能是在零件使用过程中产生的。

材料中存在裂纹时, 裂纹尖端就是一个应力集中点, 而形成裂纹尖端应力场。按断裂力学分析, 其大小可用应力强度因子 K_I 来描述。 K_I 越大, 则应力场的应力值越大。 K_I 值与外加应力(σ)和裂纹尺寸($2a$)的关系为

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad (\text{N/mm}^{3/2})$$

式中 Y ——与裂纹形状、试样几何尺寸及加载方式有关的一个无量纲的系数(一般为 1~2);

σ ——外加应力, N/mm^2 ;

a ——裂纹的半长, mm 。

由上式可见, K_I 随 σ 的增大而增大, 当 K_I 增加到某一定值时, 可使裂纹前沿的内应力大到足以使材料分离, 从而导致裂纹失稳扩展使材料脆断。这个应力强度因子的临界值, 称为材料的断裂韧性, 用 K_{IC} 表示。

根据应力强度因子 K_I 和断裂韧性 K_{IC} 的相对大小, 可判断存在裂纹的材料在受力时, 裂纹是否会扩展而导致断裂。当 $K_I > K_{IC}$ 时, 裂纹失稳扩展, 发生脆断; 当 $K_I < K_{IC}$ 时, 裂纹不扩展或扩展很慢, 不发生快速脆断; 当 $K_I = K_{IC}$ 时, 裂纹处于临界状态。

K_{IC} 表明了材料抵抗裂纹扩展的能力, 即有裂纹存在时, 材料抵抗脆性断裂的能力。

二、金属材料的工艺性能

金属制品和机械零件在制造过程中都要经过熔炼、铸造、锻造、焊接以及切削加工和热处理等一系列的工艺过程。工艺性能好的金属材料易于承受加工, 生产成本低; 工艺性能差的金属材料在承受加工时工艺复杂, 加工成本高。

（一）铸造性能

将液态金属浇铸到铸型型腔中，待其冷却凝固后，获得一定形状的毛坯或零件的方法，称为铸造。铸造是现代机器制造业的基础之一，各种机械设备的底座，汽轮机、发电机的机壳，阀门，磨煤机的耐磨件等都是通过熔炼、铸造而得到的。液体金属浇铸成型的能力，称为金属的铸造性能。流动性好、收缩率小和偏析（金属材料凝固后化学成分不均匀的现象）小的金属材料铸造性能好。

（二）可锻性能

金属材料在压力加工时，能承受一定程度的变形而不产生裂纹的能力，称为可锻性能。钢能承受锻造、轧制、拉拔、挤压等加工，可锻性能好。塑性及韧性很低的金属和合金不能锻压加工。

（三）焊接性能

在火电厂中有大量金属结构件是用焊接方法连接的，如锅炉管道、支架、蒸汽导管、风管、汽包、联箱等。金属材料获得优质焊接接头的能力，称为金属的焊接性，也称可焊性。焊接性能的好坏，主要以焊接有无裂纹、气孔等缺陷以及焊接接头的力学性能来衡量。

影响钢的焊接性能的主要因素是钢的含碳量。随着含碳量的增加，焊后产生裂纹的倾向增大。钢中其他合金元素的影响相应小些。将合金元素对焊接性的影响都折合成碳的影响，即为碳当量。碳当量 C_e 的计算公式为

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%)$$

式中 C 、 Mn 、 Cr 、 Mo 、 V 、 Ni 、 Cu ——钢中该元素的百分含量。

当 $C_e < 0.4\%$ 时，焊接性优良，焊接时可不预热；当 $C_e = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时，焊接性较差，焊接时需采用适当预热等工艺措施；当 $C_e > 0.6\%$ 时，焊接性很差，焊接时需采用较高预热温度和较严格的工艺措施。

金属材料的热加工性能还包括热处理性能，如淬透性等，将在本书第二章中叙述。

（四）切削性能

金属零件往往要经过机械加工成型，如车、铣、刨、磨、钻、镗等。金属材料承受切削加工的难易程度，称为切削性能。切削性能不但包括能否得到高的切削速度、是否容易断屑，还包括能否获得较高的表面质量等。

第二节 金属的晶体结构

一、纯金属晶体结构的基本类型

固态物质可分为晶体和非晶体两大类。晶体是指其原子（离子或分子）具有规则排列的物质。通常，固态金属都是晶体。

为了便于研究各种晶体中原子排列的规律，通常把原子看成一个个处于静止状态的刚性小球，然后用假想的线条把各原子的中心连接起来，便构成如图 1-9 所示的空间格架，称为结晶格子，简称晶格。晶格中取出一个能代表晶格特征的最基本的单元，称为晶胞，如图

1-10 所示。晶格的特征可以用晶格常数来描述, 晶格常数包括晶胞的各边尺寸—— a, b, c , 及三个邻边的夹角—— α, β, γ 。晶体是由晶胞周期性地重复堆砌而成的。

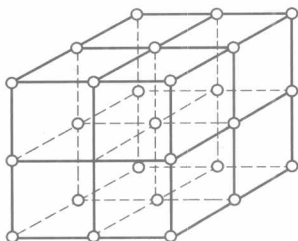


图 1-9 金属的晶格

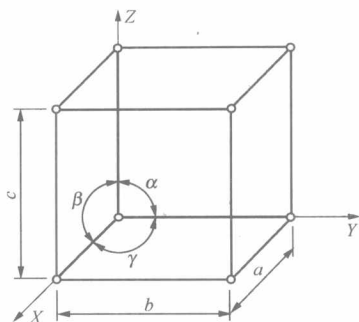


图 1-10 晶胞的表示法

金属的晶格类型很多, 其中最常见的是体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格, 如图 1-11 所示。

1. 体心立方晶格

如图 1-11 (a) 所示, 体心立方晶格的晶胞是棱长为 a 的立方体, 它的八个顶角和中心位置各占据着一个原子。由于每个顶点的原子为相邻的八个晶胞所共有, 所以每个晶胞内实际上只含有 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 个原子。

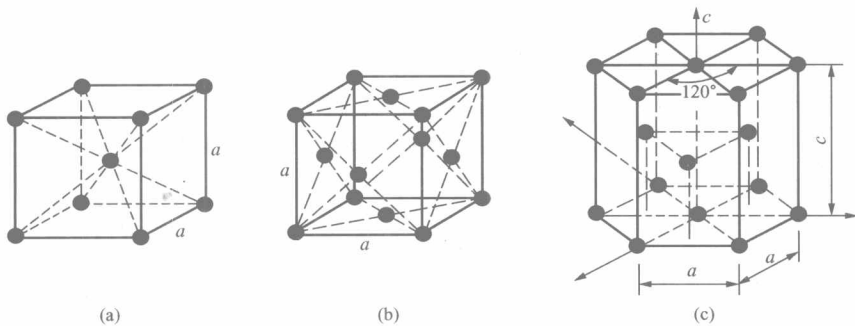


图 1-11 金属中常见的三种晶格

(a) 体心立方晶格; (b) 面心立方晶格; (c) 密排六方晶格

具有体心立方晶格的金属有 α -Fe、Cr、Mo、W、V、Nb 及 δ -Fe 等。

2. 面心立方晶格

如图 1-11 (b) 所示, 面心立方晶格的晶胞仍为棱长为 a 的立方体, 但在 8 个顶角和 6 个面的中心各有 1 个原子, 它们分别为八个和两个晶胞所共有, 这类晶格每个晶胞实际上只含有 $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个原子。

具有面心立方晶格的金属有 γ -Fe、Au、Ag、Cu、Al 等。

3. 密排六方晶格

如图 1-11 (c) 所示, 密排六方晶格的晶胞是一个棱长为 a 、高为 c , 且 $c/a=1.633$ 的正六棱柱体, 除在其 12 个顶角及上下两个面的中心各占据一个原子外, 晶胞内对称位置上还有三个原子, 它们分别为 6 个、两个及一个晶胞所共有。所以, 每个密排六方晶胞实际只包含 $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 个原子。具有这种晶体结构的金属有 Mg、Zn、Be 等。

二、晶格的致密度

由于可以把晶格中的原子看成是刚性小球, 所以即使是一个紧挨一个地排列着, 原子之间仍会有空隙存在。为了对晶体中原子排列的紧密程度进行定量比较, 通常采用晶格致密度这样一个参数。晶格致密度是指晶胞中原子本身所占有的体积与该晶胞体积之比。

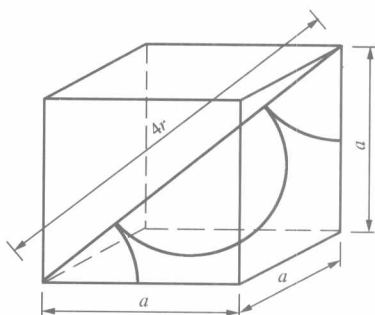


图 1-12 体心立方晶胞
原子半径计算示意

如图 1-12 所示, 体心立方晶胞中, 原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$, 一个原子的体积为 $\frac{4}{3}\pi r^3$ 。体心立方晶胞含有 2 个原子; 晶胞体积为 a^3 。故对于体心立方晶格有

$$\text{致密度} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3}{a^3} = 0.68$$

表明体心立方晶格中有 68% 的体积被原子所占有, 其余则是空隙。用同样的方法可以计算出面心立方晶格和密排六方晶格的致密度均为 0.74。晶格的致密度越大, 则晶格中原子排列得越紧密。

三、实际金属中的缺陷

若晶体内所有的晶格以同一位向排列, 这种理想状态的晶体称为单晶体。实际使用的金属材料几乎都是多晶体。所谓多晶体就是指晶体由许多小颗粒构成, 在每一个小颗粒内原子排列的位向基本相同, 而各个颗粒间原子排列的位向却不相同, 如图 1-13 所示。这些小颗粒称为晶粒, 晶粒之间的交界面称为晶界。进一步研究发现, 就是在每个晶粒内部, 在某些区域里, 原子排列也不像理想晶体那样规则和完整。通常, 把这些区域称为晶体的缺陷, 并根据几何特征分为三类缺陷。

1. 点缺陷

点缺陷主要是指晶格中三维尺寸都很小的点状缺陷。最常见的点缺陷是空位和间隙原子, 如图 1-14 所示。晶格中某些结点没有原子称为空位; 晶格的个别间隙处多出的原子称为间隙原子。产生空位和间隙原子的主要原因是原子的热运动使其能逃离晶格结点位置或转移到晶格间隙中去。

空位和间隙原子破坏了附近原子间作用力的平衡, 使周围的原子离开其平衡位置, 因而使正常的晶格发生了歪扭, 即产生晶格畸变。晶格畸变导致能量升高, 使金属的强度、硬度和电阻增加。

空位和间隙原子都处在不断的运动变化之中。空位周围的原子有可能跳入这个空位从而形成一个新的空位; 间隙原子也有可能跳到另一个间隙处。当晶格空位或间隙原子移至晶体表面和晶界或二者相遇时, 又会随之消失。

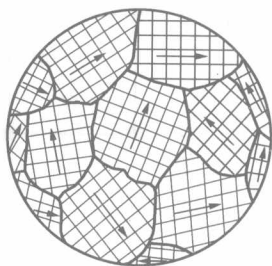


图 1-13 多晶体示意