

电力工业学校教材

电厂金属材料

重庆电力工业学校 陈显坪 主编

China Electric Power Press

中国电力出版社

内 容 提 要

本书根据全国电力职业技术教育委员会、电力部职业技术教育研究中心动力类专业教学研究会审定颁发的《电厂金属材料教学大纲》编写而成。全书共分3个模块。模块Ⅰ为基础模块,内容包括金属材料的性能、金属学基础知识、电厂常用金属材料等;模块Ⅱ为适用性模块,内容包括金属材料的高温机械性能、锅炉和汽轮机主要零部件用钢及事故分析、金属监督等;模块Ⅲ为适用性模块,内容包括热处理基础、焊接部位组织和性能、典型部件的焊接等。各单元后附有小结、复习思考题。

本书模块Ⅰ和模块Ⅱ适用于电力工业学校电厂热力设备运行专业,模块Ⅰ和模块Ⅲ适用于电厂热力设备检修专业。本书也适用于其他专业中等职业技术教育、青工培训、现场生产技术人员培训,还可作为有关高级技工岗位培训和成人教育的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电厂金属材料/陈显坪主编.-北京:中国电力出版社,1999
电力工业学校教材
ISBN 7-5083-0099-8

I. 电… II. 陈… III. 金属材料-专业学校-教材 IV. TG14

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第38670号

中国电力出版社出版

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

冶金联合印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1999年10月第一版 2006年6月北京第六次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 8.25印张 184千字
印数16001—19000册 定价11.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序

近年来,电力职业技术教育在结构改革过程中,创建了中专和技校融为一体的新型办学模式,形成统一的电力工业学校。与此同时,进行了专业设置、教学计划、课程体系等一系列教学改革。教材作为教与学双边活动过程中不可缺少的信息载体,其改革和建设必然是教学改革的重要组成部分。为了巩固教育、教学改革已经取得的成果,推动改革持续深入发展,满足电力工业学校教学工作的急需,并促进教学质量不断提高,从1996年底开始,着手组织力量进行教材改革的研究探索和教材建设的安排部署。中国电力企业联合会教育培训部先后成立了电力工业学校教材建设研究课题组,组建了电力工业学校教材编审委员会,颁布了《关于电力工业学校教材建设的若干意见》和《电力工业学校教材出版、推荐、评优暂行办法》等。

我会遵照上级有关教材建设的文件精神,积极组织全国电力工业学校(含中专、技工学校)的广大教师,按部颁电厂热力设备运行与检修专业教学计划(试行)设置的课程,申报并被确定了8门课为重点教材,由部统一组织出版发行。其余20余门一般教材,由教研会组织出版发行。这批教材力求根据职业技术教育的特点和培养应用型人才的教育目标,突出教材的定向性或针对性,以电力行业工作岗位需要的综合职业能力和素质要求,作为界定教材内容的依据,不片面追求学科体系的完整性,而强调贴近生产实际和工作实际,使理论同实践紧密结合,传授知识同培训技能紧密结合,精选教材内容,删繁就简,返璞归真,充实技术性、工艺性、使用性的内容,而且体现先进性和科学性的原则;注重定性分析,阐明物理意义和应用方法,简化某些论证,减少不必要的数学推导;在内容的编排、组合上,一是最大限度地做到模块化,增强教材使用的灵活性,便于不同教学阶段、不同专业采用;二是使理论阐述同实践指导有机结合,便于在教学过程中贯穿能力培养这一主线,采用以实际训练为轴心的把讲授、实验、实习融于一体的教学方式;适应各校功能延伸的新要求,兼顾各种职业培训对教材的需要。

这批教材的出版只是整个教材改革和建设的阶段性成果,仍需再接再厉,继续深化教材改革,推进教材建设。预期经过几年的努力,将会形成一套具有电力职业技术教育特色、以职业能力培养为主线、门类比较齐全、形式比较多样,并能与其它教育相衔接、兼顾职工培训需要的教材体系。

全国电力职业技术教育委员会
动力类专业教学研究会

1998年10月

前 言

电厂金属材料是电力工业学校电厂热力设备运行与检修专业（3、4 年制）的教材，是按照中国电力企业联合会教育培训部 1996 年 11 月颁发的教学计划（试行）和动力类专业教研会组织审定过的教学大纲进行编写的。

遵照电力职业技术教育课程改革的原则和基本思路，力求贯彻以能力为本位的教育思想，本书理论联系实际，努力反映新技术、新设备、新工艺、新材料和新经验，以适应本学科的发展和培养人才的需要。全书分 3 个模块，9 个单元，共计 26 个课题。以电厂常用金属材料（模块Ⅰ）为基础模块，金属材料的高温运行与监督（模块Ⅱ）、电厂常用金属材料的焊接（模块Ⅲ）为适用性模块，构成其框架结构，分别突出了岗位职业能力所需的必备知识和必备技能。教材的编写突破了本学科的传统模式，从生产实际需要和工人实际水平出发，注意按照培养岗位能力的特点和规律，安排教学内容，并且以模块的组合来实现不同工种的培养目标。与不同工种对应的必备知识在内容上是阶梯式递进的，互不重复，具有易学、易读、易懂等优点，是中等职业技术教育、现场生产技术人员培训的理想教材。

本书由重庆电力工业学校陈显坪主编，并编写模块Ⅰ的第二、第三单元，模块Ⅱ的第一、第二、第三单元，模块Ⅲ的第二、三单元；大连电力工业学校张军编写模块Ⅰ的第一单元，模块Ⅲ的第一单元；徐州电力技校杨沐淮编写模块Ⅲ的第三单元。全书由牡丹江电力工业学校毕树斌主审。

在编写过程中，得到重庆电力工业学校陈兴华教授和武汉电力学校高克诚老师的支持和帮助，谨表谢意。

对于书中存在的缺点和不足之处，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1999 年 7 月

目 录

序
前言

模块 I 电厂常用金属材料

单元一 金属材料的性能..... 1
 课题一 金属材料的物理性能和化学性能 1
 课题二 金属材料的工艺性能 2
 课题三 金属材料的常温机械性能 3
 小结 9
 复习思考题 9
单元二 金属学基础知识 10
 课题一 金属的晶体结构与结晶 10
 课题二 铁碳合金状态图 15
 小结 28
 复习思考题 29
单元三 电厂常用金属材料 30
 课题一 碳素钢 30
 课题二 合金钢 34
 课题三 铸铁 43
 课题四 有色金属及合金 47
 小结 54
 复习思考题 55

模块 II 金属材料的高温运行与监督

单元一 金属材料的高温性能与组织 56
 课题一 金属的高温机械性能 56
 课题二 金属的高温组织变化 59
 小结 62
 复习思考题 63
单元二 锅炉和汽轮机主要零部件用钢及事故分析 64
 课题一 锅炉主要零部件用钢 64
 课题二 汽轮机主要零部件用钢 68
 课题三 电厂常见事故分析 74
 小结 80

复习思考题	80
单元三 金属监督	81
课题一 金属监督简介	81
课题二 常用金属检验方法	84
小结	88
复习思考题	89

模块Ⅲ 电厂常用金属材料的焊接

单元一 热处理基础	90
课题一 钢在加热、冷却时的组织转变	90
课题二 钢的普通热处理	95
课题三 钢的表面热处理	99
小结	102
复习思考题	102
单元二 焊接部位组织变化	103
课题一 焊接过程	103
课题二 焊接应力与变形	105
课题三 焊接热处理	111
小结	113
复习思考题	114
单元三 典型零部件的焊接	115
课题一 汽轮机汽缸的焊接	115
课题二 汽轮机叶片的焊接	116
课题三 阀门的堆焊	118
课题四 焊接新工艺简介	122
小结	123
复习思考题	124
参考文献	125

模块 I 电厂常用金属材料

单元一 金属材料的性能

【内容提要】 在电力工业中，金属材料应用广泛。为了合理地使用和加工金属材料，应充分了解和掌握材料的性能。金属材料的性能可分为物理性能、化学性能、工艺性能和机械性能等几方面。

由于在实际使用和选择金属材料时，大多以机械性能作为主要依据，所以本单元重点介绍金属材料的机械性能，对其他性能作一般概述。

课题一 金属材料的物理性能和化学性能

一、物理性能

金属材料不需要发生化学反应所能表现出的性质，称为金属材料的物理性能。金属材料的物理性能主要有密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀和磁性等。

1. 密度

单位体积某种物质的质量，叫做该物质的密度，即

$$\rho = m/V$$

式中 ρ ——密度， kg/m^3 ；

m ——质量， kg ；

V ——体积， m^3 。

根据金属密度的大小，可以分为轻金属和重金属，一般认为， $\rho < 5 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 的金属称为轻金属，而 $\rho > 5 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 的金属称为重金属。常用金属材料密度如下：铸铁为 $7.8 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ，灰口铸铁为 $7.2 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ，纯铜为 $8.9 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ，黄铜为 $8.63 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ，铝为 $2.7 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

2. 熔点

金属由固态转变为液态时的温度称为熔点，一般用摄氏温度（℃）表示。每种金属都有各自的熔点。掌握金属的熔点，对于铸造、焊接、冶炼各种合金及金属的选择使用都很重要，例如：低熔点的金属或合金用来制造铅字、熔丝等，高熔点的合金用来制造耐高温的过热器管、汽轮机叶片等耐热部件。

3. 导电性

金属传导电流的性能称为导电性。一般金属材料均有良好的导电性，其中以银的导电性最好，其次为铜、铝、铁等，铅的导电性在常用金属中最低。

金属的导电性越好，则电流通过时所产生的热量就越少，从而在输电过程中的电能损失就较小。反之，金属的导电性能越差，则电阻越大，电流通过的电能损失就越大。

4. 导热性

金属传导热量的性能称为导热性。多数金属都是热的良导体，其中银的导热性最好，铜、铝次之。通常是导电性好的材料，其导热性也好。若零件在使用中需要大量吸热或散热时，则要用导热性好的材料。在火电设备中，凝汽器的冷却管就是用导热性好的铜合金制造的。

5. 热膨胀性

金属材料受热体积增大，遇冷体积缩小的性能称为热膨胀性。零件在工作中，必须考虑金属的热膨胀性能所产生的影响。例如，汽轮机转子与静子之间要留有足够的间隙，以防机组启动升温时，因其膨胀的差异而产生转子与静子碰撞造成设备损坏事故。

6. 磁性

金属具有被磁化的性质，称为磁性。铁或铁合金具有良好的磁性，钴、镍也有磁性，它们被叫做铁磁性金属。其他一些常用的纯金属或合金大多没有铁磁性，如纯铁在 760°C 以上时就失去了磁性。

磁性材料是制造电机、电器中不可缺少的材料，如硅钢片或铁镍合金等。另外还可利用磁性进行磁力探伤，以检查金属材料表面有无裂纹。

7. 耐磨性

金属抵抗磨损的性能称为耐磨性。火力发电厂中，风机叶片、磨煤机等在工作过程中都会受到磨损，为了延长这些设备零件的使用寿命，应选用耐磨性好的材料制造。

二、化学性能

金属材料在发生化学反应时表现出的性质称为金属材料的化学性能。金属材料的化学性能主要有抗氧化性和耐腐蚀性等。

1. 抗氧化性

金属材料在加热时，抵抗氧化性气体腐蚀的能力称为抗氧化性。火电厂锅炉高温汽水管道，特别是省煤器和空气预热器气管道等，就必须选择抗氧化性好的金属材料制造。

2. 耐磨腐蚀性

金属材料抵抗介质（空气中的氧，各种酸、碱、盐类的水溶液，水蒸气等）腐蚀的能力称为耐腐蚀性。电厂热力设备中过热器管、水冷壁管和汽轮机叶片等部件是在腐蚀介质的条件下长期工作的，如果这些零部件被腐蚀过多，就会影响设备的安全运行。所以在选用热力设备零部件时，必须考虑钢材的耐腐蚀性。

课题二 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加工过程中所表现出来的接受加工难易程度的性能。金属材料的工艺性能有铸造性能、可锻性能、焊接性能和切削加工性能等。

一、铸造性能

液态金属在铸造成形时所具有的性能称为铸造性能。流动性好、收缩性小和偏析（金

属材料凝固后化学成分的不均匀性) 小的材料, 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。灰口铸铁的塑性及韧性均很低, 不能锻压加工。

三、焊接性能

通过局部加热熔溶或加压(或两者并用), 使两个金属件造成原子间的相互结合力, 从而得到永久连接的过程称为焊接。金属材料在焊接过程中所表现出的性能称为焊接性能。焊接性能的好坏, 主要以焊接有无裂缝、气孔等缺陷以及焊接接头的机械性能来衡量。

四、切削性能

金属材料在常温下, 接受切削刀具加工的能力称为切削加工性能。切削加工性能好坏, 主要以切削速度、刀具磨损, 被加工表面的粗糙度等衡量。

课题三 金属材料的常温机械性能

材料的机械性能就是材料的力学性能, 即材料抵抗外力作用的能力。常用的机械性能指标有: 强度, 塑性, 硬度, 冲击韧性, 疲劳强度等。金属材料的机械性能是以实验为依据的。常用的机械性能试验是拉力试验、硬度试验和冲击试验等。

一、强度

强度是指金属材料在外力的作用下, 抵抗塑性变形和断裂的能力, 抵抗能力越大, 则强度越高。根据载荷作用方式不同, 强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗剪强度、抗扭强度和抗弯强度等五种。其中以抗拉强度最易测得, 通过拉力试验可测定金属材料的弹性极限 σ_e 、屈服极限 σ_s 和强度极限 σ_b 。拉力试验是把制成规定形状和尺寸的试样装在拉力试验机上, 对试样施加缓慢递增的拉力, 使它不断产生变形, 直到拉断为止, 根据拉力试验过程中的载荷及与载荷相对应的变形量, 可以画出材料的拉伸试验曲线。图 1-1-1 就是低碳钢的应力应变拉伸图。从低碳钢的应力应变拉伸图上可以看出有以下特点。

1. 比例极限 σ_p

图中 a 点称比例极限点, oa 段是直线, 这说明在这个范围内, 应力与应变成正比例。a

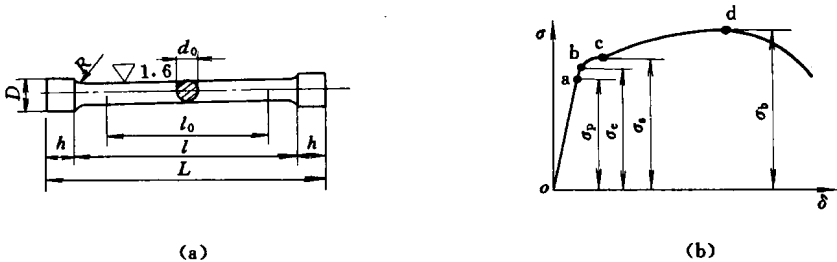


图 1-1-1 拉伸试样与拉伸曲线
(a) 拉伸试样; (b) 低碳钢的拉伸曲线

点相对应的应力值称为比例极限，用 σ_p 表示。

$$\sigma_p = E \cdot \epsilon_p$$

式中 σ_p ——比例极限，MPa；

E ——弹性模量，MPa；

ϵ_p ——a 点的应变值。

金属材料的 E 值越大，说明在一定应力作用下产生的弹性变形量越小。 E 主要决定于金属的晶格类型与晶格常数。但随着温度的升高， E 值逐渐降低。对于要求弹性变形较小的零件，如汽轮机的主轴和叶片等，应选用弹性模量 E 大的材料。

2. 弹性极限 σ_e

与 a 点非常接近的另一特性点 b，称为弹性极限点，与 b 点相对应的应力值 σ_e 称为弹性极限。 σ_e 的单位为 MPa（兆帕）。如外应力比 σ_e 低时，试样只产生弹性变形。

3. 屈服极限 σ_s

过了 b 点以后，曲线弯曲到 c 点，这一段曲线几乎水平，锯齿状表示应力未增加（或增加很少），而应变却在继续增加，试样产生了较为明显的塑性变形。这种现象称为“屈服”，c 点称为屈服点。开始发生屈服现象时的应力称为屈服极限。用 σ_s 表示，它是代表金属材料抵抗塑性变形的指标。

有些材料屈服点的测定比较容易，如退火状态下的低碳钢有明显的屈服现象。但是，有些材料要测定屈服点很困难，如高碳钢则没有明显的屈服现象。所以工程上规定：以试样产生 0.2% L_0 塑性变形量时的应力值作为条件屈服极限，用 $\sigma_{0.2}$ 表示，用它代替 σ_s ，其单位为 MPa。

4. 强度极限 σ_b

过了 c 点，由于产生塑性变形后材料硬化，增加了抵抗变形的能力，因而曲线又开始上升，到达 d 点，应力达最大值。与 d 点所对应的应力值 σ_b 称为强度极限，单位为 MPa。它是材料在受拉过程中，发生断裂以前所能承受的最大应力值，了解强度极限有很重要的意义。金属材料决不能在承受超过其强度极限的载荷下工作，因为这样会很快导致破坏。

二、塑性

塑性是指金属材料在外力作用下，产生塑性变形而不被破坏的能力。常用的塑性指标有延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 。

1. 延伸率

延伸率是指试样拉断后的总伸长与原始长度比值的百分率，用 δ 表示，即：

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

式中 δ ——延伸率，%；

L_1 ——试样拉断后的长度，mm；

L_0 ——试样原始长度，mm。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后断面面积与原断面面积比值的百分率，用 ψ 表示，即：

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

式中 ϕ ——断面收缩率，%；

F_0 ——试样原来的断面面积， mm^2 ；

F_1 ——试样拉断后的断面面积， mm^2 。

材料的 δ 和 ϕ 愈大，则表示其塑性愈好，即材料能承受较大的塑性变形而不被破坏。一般把 $\delta \geq 5\%$ 的材料称为塑性材料（如低碳钢）而把 $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料（如灰口铸铁）。塑性好的材料可以顺利地进行某些成型工艺，如锻压，冷冲和冷拔，冷变等。另外，良好的塑性使零件在使用时万一过载，也能由于塑性变形使材料强度提高，因而可避免突然断裂。

三、其他强度指标

1. 抗弯强度

对于铸铁、铸铁合金、工具钢及硬质合金等脆性材料来说，因为由它们制成的机件和刀具多在弯曲载荷下工作，应该用抗弯强度来评定其性能。抗弯强度是指试样在位于两支承点中间的集中载荷作用下，使其折断时，试样断裂弯矩与试样截面系数的比值，即：

$$\sigma_{bb} = M_b / W$$

式中 σ_{bb} ——抗弯强度，MPa；

M_b ——试样断裂弯矩，若为三点弯曲加载时，其值为 $P \cdot L/4$ ， L 为两支承点间的距离，单位为 m， P 为试样所承受的集中载荷，单位为 N；

W ——试样截面系数，圆柱试样 $W = \pi d_0^3/32$ ，矩形试样 $W = bh^2/6$ 。

2. 抗压强度

试样受压缩时，在破坏前所承受的最大压缩载荷对应的应力称为抗压强度，通常以 σ_{bc} 表示，单位是 MPa。计算公式为：

$$\sigma_{bc} = \frac{P_{bc}}{F}$$

式中 P_{bc} ——试样破坏前所承受的最大压缩载荷，N；

F ——试样横截面面积， m^2 。

四、硬度

硬度是指金属材料抵抗硬物体压入表面的能力。从本质上说，它是反映材料抵抗局部塑性变形的能力，与强度属于同一范畴，所以材料的硬度与强度之间有一定关系。根据硬度可以大致估计材料的抗拉强度。例如：低碳钢 $\sigma_b = 3.6\text{HB}$ （布氏硬度），高碳钢 $\sigma_b = 3.4\text{HB}$ ，调质合金钢 $\sigma_b = 3.25\text{HB}$ 。

测定硬度的常用方法有：

1. 布氏硬度

布氏硬度的测定方法是：以规定载荷 P

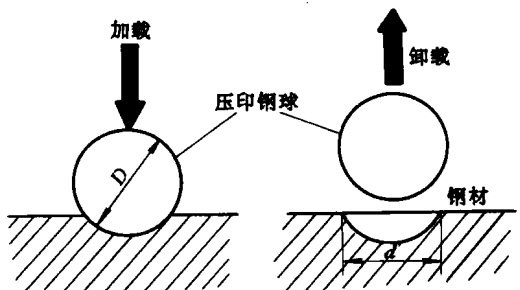


图 1-1-2 布氏硬度试验示意图

把直径为 D 的钢球压入试样表面并保持一定时间，然后卸除载荷，这样便在金属材料的表面留下了一个直径为 d 的压痕，如图 1-1-2 所示。此压痕单位面积上所承受的压力即为布氏硬度值，以符号 HB 表示，计算公式为

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

式中 HB——布氏硬度，MPa；
 P ——加在钢球上的载荷，N；
 F ——压痕表面积， mm^2 ；
 D ——钢球直径，mm。

布氏硬度的单位为 MPa，但习惯上不标其单位，例如 $HB=230\text{MPa}$ ，可写为 HB230。布氏硬度值除可用上式计算而得外，还可直接根据压痕直径表得出。

布氏硬度法测量金属材料硬度，其测量精度较高，试验数据稳定，但操作缓慢，压痕大，不宜作大量成品零件和硬度较高 ($HB>450$) 金属材料的测试。

电厂中还常用锤击式简易布氏硬度计，它能直接在大型工件上测定硬度，且携带轻便。

2. 洛氏硬度

当金属材料的硬度超过 HB450 或者试样较小时，采用洛氏硬度试验来测定其硬度。

洛氏硬度试验是用一个顶角为 120° 的金刚石圆锥或直径为 1.588mm 的淬火钢球，在一定压力下压入被试材料表面，然后根据压痕深度定出硬度数值。在实际测量时，可以从

洛氏硬度试验机的刻度盘中直接读出硬度值，不用查表，也不用计算。压痕愈深，刻度盘指示的硬度数值愈小，即材料愈软。压痕愈浅，刻度盘指示的硬度值愈大，即材料愈硬。

洛氏硬度试验由于压痕面积小，因而可以用来测量成品的硬度，并且这种方法操作迅速简便，测量范围较广，因而得到广泛地应用。

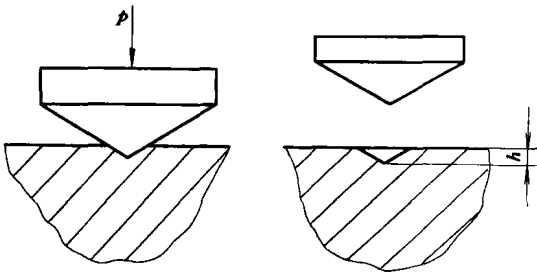


图 1-1-3 洛氏硬度试验示意图

用。如图 1-1-3 所示。

3. 维氏硬度

维氏硬度值是由维氏硬度试验测定的。其原理基本上同于布氏硬度试验，也是以压痕面积上的平均应力值为硬度值，并记为 HV。所不同的是维氏硬度试验用的压头是锥面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥。显然，压痕面积与压痕投影的两对角线平均长度 d 有关。试验时，在测定 d 值后，亦可查表得出 HV 值。

维氏硬度试验法所加载荷小、压痕小，能测定从极软到极硬的各种金属材料的硬度，故在比较材料的硬度值时，多换算为 HV 值进行比较。在 HB100~HB500，HB 值近似等于 HV 值。如 $HV377=HB370$ 、 $HV211=HB211$ 。

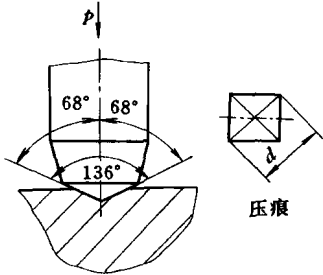


图 1-1-4 维氏硬度试验示意图

由于硬度测定较为简便，还可在成品上直接测定，加之硬度值之间可用经验公式进行转换。因此，零件图上多以硬度值作为技术要求标注。如图 1-1-4 所示。

五、韧性

在发电厂中，有些热力设备除受到拉伸、弯曲、扭转、剪切等作用外，还受到冲击作用，如汽轮机转子。金属材料的韧性就是指抵抗冲击负荷的能力。为了确定材料的冲击韧性，需要进行冲击试验。锅炉和汽轮机等设备的重要部件，在选择材料和设计时，都要考虑材料的韧性。

金属材料的冲击韧性的大小是在冲击试验机上通过冲击试验测定的。进行试验时，把规定尺寸和形状的标准试样放在机架上，把机器的摆锤升到规定的高度，然后松开摆锤，让它冲击试样，试样冲断后，摆锤继续升起，这样冲断试样所消耗的功（ A_k 值）直接由试验机上的标尺上读出，如图 1-1-5。该冲击功除以试样缺口处的横截面积便得到冲击韧性值，即

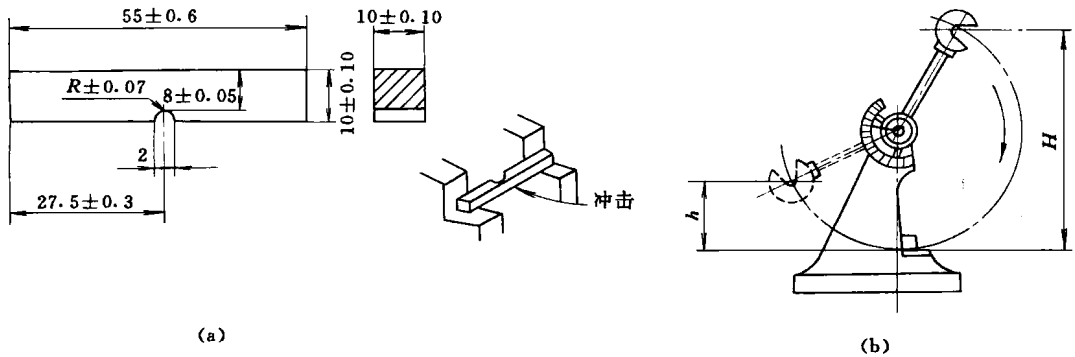


图 1-1-5 摆锤冲击试验示意图
(a) U 型缺口冲击试样；(b) 试样安放及冲击试验机

$$a_k = A_k / F$$

式中 a_k ——冲击韧性， J/cm^2 ；

A_k ——冲击功，J；

F ——试样缺口处横截面积， cm^2 。

在电厂中，M65 以下的螺栓要求 $a_k \geq 100 J/cm^2$ ，M65-100 要求 $a_k \geq 80 J/cm^2$ ，M100 以上要求 $a_k \geq 60 J/cm^2$ 。对于汽缸主闸门螺栓在 $a_k \leq 30 J/cm^2$ ，对于调速器汽门螺栓在 $a_k \leq 60 J/cm^2$ 时，则需要更换或作恢复性热处理。

一般来说，钢材在某些温度下冲击韧性较高，但是随着温度的下降，冲击韧性明显降低，工程上把冲击韧性显著下降时的温度称为脆性转变温度。金属材料的工作温度低于这个温度时，发生脆性破坏的可能性增大了。脆性转变温度与材料中的合金元素种类有关，特别是与材料的组织有关。低中强度钢的脆性转变温度较高，而高强度钢的脆性转变温度往往很低。在汽轮机启动过程中，要通过暖机等措施尽快把转子温度提高到脆性转变温度以上，以增加转子承受较大的离心力和热应力的能力。近年来，采用盘车的办法预热，待转

子温度达到脆性转变温度以上（如 150℃）时再冲击转子，这样不但使转子温度均匀，热应力下降，而且转子中心孔温度也达到脆性转变温度以上。

钢中的非金属夹杂物越多，其韧性就越差，特别是氢对韧性有很大影响。氢可造成所谓氢脆，使钢的塑性及韧性大大下降。它可以在钢内部形成许多微裂纹，这些裂纹在断口上表现为光亮的白色斑点，称为氢致“白点”，这种现象在高强度 Ni-Cr 钢中（如汽轮机转子）最为明显。因此，必须严格控制钢中非金属夹杂物的含量，特别是氢的含量。

六、疲劳和疲劳极限

有很多零件（如各种轴、齿轮、弹簧等，汽轮机的主轴、叶片等）经常受到大小及方向变化的交变载荷。这种交变载荷常常会使金属材料在小于其强度极限的长期作用下断裂，这种现象叫做疲劳。它的破坏特点是突然的。汽轮机的轴及叶片等零件的破坏，以疲劳失效为最多。

显然，材料所承受的交变载荷愈大，材料的寿命愈短；反之，则愈长。金属材料在长期（无限次）经受交变载荷作用下，不致引起断裂的最大应力，称为疲劳极限，用它来衡量金属材料的耐疲劳性能。

疲劳断裂零件在静载荷或冲击载荷下的断裂与韧性断裂不同。疲劳断裂的应力往往在远低于静载荷所测得的屈服极限时就发生，断裂前也无明显的塑性变形。这显然与韧性断裂不同。

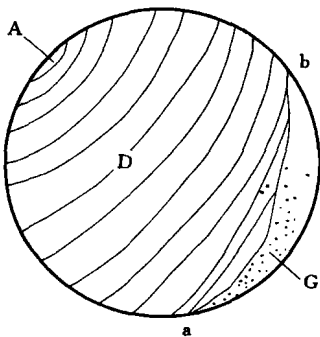


图 1-1-6 疲劳断口

疲劳断裂与脆性断裂也不同，脆断是突然的、爆发性的，脆断裂纹一经产生，就以接近声速的速度扩展开，而造成灾难性损坏。而疲劳断裂则通常在零件表面产生微观裂纹，随着应力循环次数的增加，裂纹逐渐扩展。在正常情况下（没有很大的过载或严重的应力集中），疲劳裂纹的扩展总是缓慢的，如果外力很小，裂纹甚至不扩展。材料的成分和组织对脆断的影响很大，而疲劳强度几乎仅取决于材料的抗拉强度。

疲劳断裂可根据断口的特征来识别，如图 1-1-6 所示。

图中 A 为疲劳源，D 区为疲劳裂纹发展区，G 区为瞬时断裂区。产生疲劳断裂的原因，一般认为是在零件应力集中严重或材料本身强度较低的部位（例如有裂纹、夹杂、刀痕等缺陷处），在交变应力作用下产生了疲劳裂纹；随着应力循环次数的增加，裂纹缓慢发展。由于裂纹沿表面和心部扩展的速度不同，因而形成许多类似年轮或海滩状花纹（或称贝壳纹），并经裂纹的多次开合而被磨得很光滑。断口的另一部分则很粗糙，这是由于裂纹在此处的扩展速度很快，最后终因承载面积减小到不能承受原有载荷而突然断裂所致。

试验证明，金属材料所承受的交变应力与其断裂前的应力循环次数 N 有关，交变应力 σ 越小，断裂前的应力循环次数 N 就愈大。当应力降至某一定值时， σ - N 疲劳曲线与横坐标平行，表示材料可经无限次应力循环而不破坏；与此对应最大应力值称为该材料的疲劳极限，用符号 σ_{-1} 表示。

影响材料及零件疲劳强度的因素很多。除了材料本身的成分、组织结构和性能外，还

同零件的几何形状、表面质量和工作环境等因素有关。因此，合理进行零件结构设计、减少应力集中和材料缺陷、改善零件表面粗糙度、采用热处理表面强化、表面喷丸或滚压等，使表面产生残余压应力，则可有效地提高零件的疲劳强度。

小 结

本单元主要从金属材料的物理性能、化学性能、工艺性能和机械性能四方面进行阐述，重点介绍了金属材料的常温机械性能。

1. 金属材料的物理性能是指金属材料不需发生化学反应所表现出的性质。主要有密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀性和磁性。

2. 金属材料的化学性能是指金属材料在发生化学反应时表现出的性质。主要有抗氧化性和耐腐蚀性等。

3. 金属材料的工艺性能是指金属材料在加工过程中所表现出来的、接受加工难易程度的性能。主要有铸造性、可锻性、焊接性和切削加工性等。

4. 金属材料的机械性能是指材料抵抗外力作用的能力。主要有强度、硬度、塑性、冲击韧性和疲劳强度等。

强度是指金属材料在外力的作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力，抵抗能力越大，则强度越高；塑性是指金属材料在外力作用下，产生塑性变形而不破坏的能力。材料的 δ 和 ψ 愈大，则表示其塑性愈好，即材料可承受较大的塑性变形而不破坏。一般把 $\delta \geq 5\%$ 的材料称为塑性材料（如低碳钢），而把 $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料（如灰铸铁）；硬度是指金属材料抵抗硬物体压入表面的能力；韧性是指金属材料抵抗冲击负荷的能力；金属材料在交变应力（随时间作周期性改变的应力）的长期作用下发生断裂的现象称为金属的疲劳，材料抵抗疲劳破坏的能力叫疲劳极限。零件的疲劳抗力不完全取决于材质，还与零件的形状（如有无键槽）及表面状态（如有无刀痕）有关。

复 习 思 考 题

1. 低碳钢试样在受到静拉力作用直至拉断时经过怎样的变形过程？
2. 符号 σ_b 、 σ_s 、HB、HRC、 a_k 、 δ 、 ψ 各表示什么性能？
3. 设计零件时为什么常用 σ_s 而不用 σ_b ？
4. 疲劳破坏是怎样形成的？提高零件疲劳寿命的方法有哪些？
5. 影响疲劳极限的因素有哪些？怎样提高金属材料的疲劳极限？

单元二 金属学基础知识

【内容提要】 不同的金属具有不同的性能,即便是同一种金属材料,在不同的条件下所表现的性能也是不同的。金属材料性能上的这种差异,从本质上说,是由金属材料内部结构所决定的。因此,要掌握金属材料的性能特点,就必须了解它们的内部结构及其对金属性能的影响,这对合理地选用金属材料有非常重要的意义。

课题一 金属的晶体结构与结晶

一、金属的晶体结构

1. 晶体的特性

固体物质按其内部原子的分布情况可分为晶体和非晶体两大类。晶体是指其内部原子按一定几何形式规则排列的物质;非晶体是内部原子无规则杂乱排列的物质。金属是呈规则排列的原子的聚合体。金属的性能不仅决定于其组成原子的性质和原子间结合键的类型,同时也决定于原子规则排列的方式。金属原子的这种排列,决定了金属具有密度大、强度高、塑性好、韧性好以及一系列工艺性能较好的特点,成为最重要的工程材料。晶体规则排列的方式称为晶体结构,如图 1-2-1 (a) 所示。为了便于研究晶体的结构,假设通过原子的中心用直线连接,这些直线则形成空间格架。这种假想格架在晶体学上就叫做晶格,如图 1-2-1 (b) 所示,晶格的结点为原子平衡中心的位置。晶格的最小几何组成单元称为晶胞,如图 1-2-1 (c) 所示。晶胞在三维空间的重复排列构成晶格。由晶胞可以描述晶格,所以研究晶体结构就在于研究晶胞的基本特性。

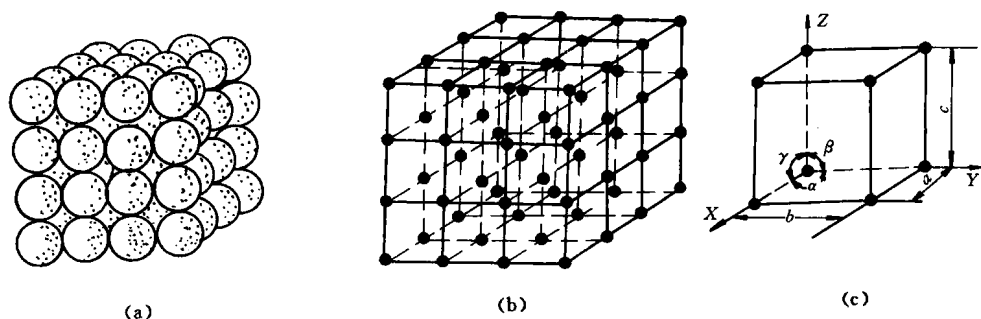


图 1-2-1 晶体、晶格、晶胞示意图

(a) 晶体; (b) 晶格; (c) 晶胞

在三维空间中,晶胞的几何特征可以用晶胞的各棱长 a 、 b 、 c (称为晶格常数) 和各棱边之间夹角 α 、 β 、 γ 等六个参数描写。根据晶胞各棱边长度和夹角不同,可将晶格分为几种不同类型。如图 1-2-1 (c) 所示晶胞, $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 这种晶胞称为简单立方晶

胞，具有这种晶胞的晶格称为单立方晶格。

2. 三种常见的晶格类型

(1) 体心立方晶格

这种晶格的晶胞是一个立方体，它的特征除了 $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 以外，其立方体的中心和八个顶角各排列一个原子，如图 1-2-2 (a) 所示。具有这种晶格的金属有：铬、钼、钒、钨、铌及 α 铁（在温度 910°C 以下及 $1390\sim 1534^\circ\text{C}$ 的铁）等。

(2) 面心立方晶格

这种晶格的晶胞也是一个立方体，在立方体六个面的中心和八个顶角各排列一个原子，如图 1-2-2 (b) 所示。具有这种晶格的金属有金、银、铜、铝、镍及 γ 铁（温度为 $910\sim 1390^\circ\text{C}$ 的铁）等。

(3) 密排六方晶格

这种晶格的晶胞是一个正六方柱体，在正六方柱体的上、下底面中心和每个角上都排列着一个原子，在柱体中间截面处还排列有三个原子，如图 1-2-2 (c) 所示。具有这种晶格的金属有镁、锌、铍、镉等。

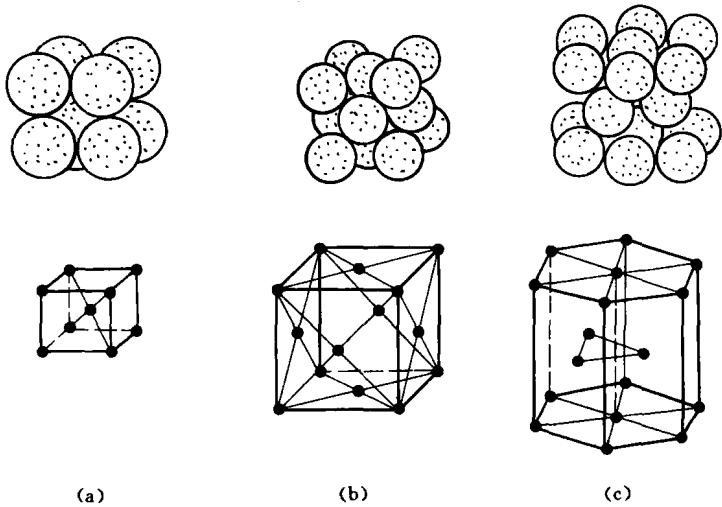


图 1-2-2 金属晶格的常见类型

(a) 体心立方；(b) 面心立方；(c) 密排六方

二、金属的结晶

金属由液态转变为固态的过程称为结晶。在这一过程中，金属内部原子由不规则排列逐步过渡到有规则排列，从而形成晶体结构。

1. 金属的结晶过程

在液态金属中，原子作不规则的运动，其动能很大。随着温度的下降，液态金属中原子的活动能力逐渐减弱，原子间的相互吸引作用逐渐增强。当达到凝固温度时，金属中就会有一些原子按一定规则排列起来，形成一些微小的晶体，这些小晶体称为结晶核心，简称晶核。晶核形成后，就吸附周围金属液体中的原子而不断长大。同时，金属液体中仍在继续产生新的晶核，这些晶核也不断长大，直至金属液体全部变为固体，结晶过程结束。因