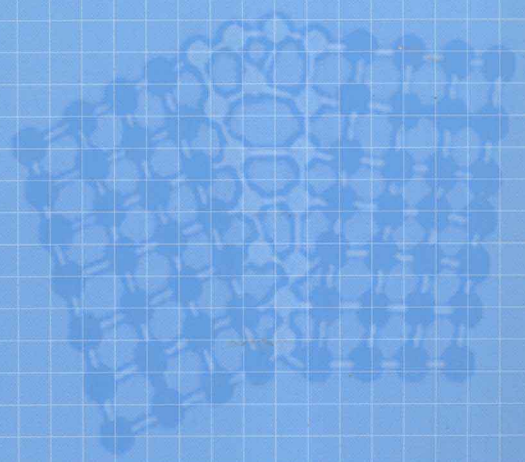
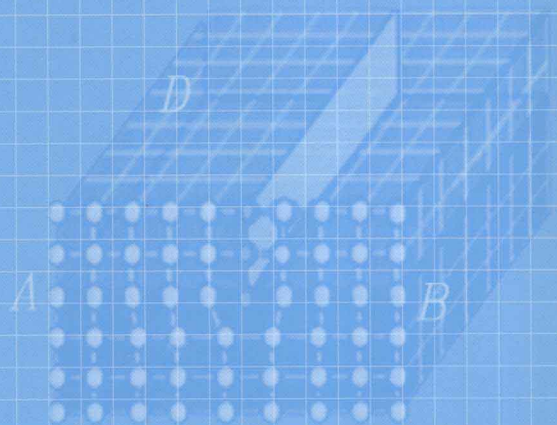


DIANCHANG JINSHU CAILIAO

火电厂金属材料

田跃生 主编 徐军 李萍 副主编



化学工业出版社

H UODIANCHANG JINSHU CAILIAO

火电厂金属材料

田跃生 主编 徐军 李萍 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了金属学基础、金属材料热处理、常用金属材料、火电厂金属材料、金属失效分析、火电厂金属技术监督等内容。通过本书的学习可获得火电厂常见金属材料的相关基础知识和应用知识,初步掌握火电厂金属材料的失效原理和防止金属失效的有关基本方法。

本书可作为高职能源类专业的教材,也可以作为从事火电厂安装、运行和检修工作中金属监督工作技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂金属材料/田跃生主编. —北京: 化学工业出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-122-12191-2

I. 火… II. 田… III. 火电厂-金属材料 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 178448 号

责任编辑: 高 钰
责任校对: 周梦华

文字编辑: 张绪瑞
装帧设计: 刘丽华

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 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 9½ 字数 232 千字 2011 年 11 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: 25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

在火力发电厂中，超过60%以上的事故都是直接或间接由于金属材料的原因而引起，所以金属监督在火力发电厂安全运行中起着重要的保障作用。火力发电（煤电）目前仍是我国电力的主要来源，也关系到国家的安全，火电厂金属监督技术是一种技术性很强的工作，本书主要从火电厂常用金属材料的特性入手，以介绍金属监督的技术特点及事故预防为目的，确保设备的安全运行。

本书作为国家示范建设专业热动力设备与应用专业的专业基础课程，按照国家有关高职教育课程改革的要求，根据本课程的特点，基于工作过程的课程改革思路，将课程定为模块化设计，把全部内容依据知识的认知规律并结合金属材料本身的理论特点，分成六个模块介绍了火电厂金属材料的基础知识、热处理工艺过程、常用基本金属材料和火电厂常用金属材料类型、火电厂常见金属材料失效形式及失效分析和金属监督的概念和方法。通过本书的学习可获得火电厂常见金属材料的相关基础知识和应用知识，初步掌握火电厂金属材料的失效原理和防止金属失效的有关基本方法。

本书编写者有超过20年讲授金属材料课程的经历，同时还有多年的火电厂金属监督技术工作经历，在编写过程中，还得到火电厂和电科院等单位的技术人员的大力协助。本书可作为高职能源和机电类学生的教材，也可以作为从事火电厂安装、运行和检修工作中金属监督工作技术人员的参考资料。

本书由田跃生主编，徐军、李萍副主编，易艳红、李璐、牛刚参加编写工作。田跃生、易艳红编写模块一、模块三、模块四，李萍、李璐编写模块二，徐军、牛刚编写模块五、模块六。

由于编写人员的专业水平、经验所限，疏漏和不妥之处热忱期望读者和同行批评指正。

编 者
2011年9月

目 录

模块一 金属学基础	1
任务一 认识金属材料的性能	1
课题一 金属材料常温力学性能	1
课题二 金属材料高温力学性能	5
课题三 金属材料物理、化学及工艺性能	7
任务二 认识纯金属的结构与结晶	8
课题一 纯金属的晶体结构	8
课题二 纯金属的结晶	12
任务三 认识铁碳合金状态图	14
课题一 合金的相结构	14
课题二 铁碳合金状态图	17
模块二 金属材料热处理	25
任务一 认识钢在加热、冷却时的组织转变	25
课题一 金属材料热处理简介	25
课题二 钢在加热、冷却过程中的组织转变	27
任务二 认识普通热处理工艺	35
课题一 预备热处理	35
课题二 最终热处理	38
任务三 认识钢的表面热处理工艺	46
模块三 常用金属材料	50
任务一 认识碳钢	50
任务二 认识合金钢	54
任务三 认识有色金属及其合金	75
模块四 火电厂金属材料	81
任务一 认识锅炉和压力容器用钢	81
任务二 认识汽轮机主要零部件用钢	85
任务三 紧固件用钢	90
模块五 金属失效分析	94
任务一 金相分析方法	94
任务二 金相组织观察	97
任务三 主要设备失效形式和预防措施	100

课题一 锅炉管、汽包及主蒸汽管系的失效形式和防止措施·····	100
课题二 汽轮机转子、叶片的失效形式和防止措施·····	109
课题三 高温紧固件和发电机护环的失效形式和防止措施·····	113
模块六 火电厂金属技术监督·····	116
任务一 金属技术监督的任务、范围和方法·····	116
课题一 金属技术监督的任务、范围和方法·····	116
课题二 金属技术监督方法·····	116
任务二 焊接质量监督及技术档案·····	129
附录一 洛氏硬度（HRC）与其他硬度换算表 ·····	131
附录二 国内外常用钢钢号对照·····	132
附录三 国内金相检验标准目录·····	136
附录四 教学金相图谱·····	141
参考文献·····	145

模块一 金属学基础

任务一 认识金属材料的性能

金属材料的性能包含工艺性能和使用性能。工艺性能是指制造工艺过程中材料适应加工的性能，如铸造性、锻造性、焊接性、切削加工性、热处理工艺性。使用性能是指金属材料在使用条件下所表现出来的性能，如力学性能、物理性能、化学性能。

课题一 金属材料常温力学性能

金属材料常温力学性能是指金属材料在外力作用时表现出来的性能。外力形式有拉伸、压缩、弯曲、剪切、扭转。载荷形式有静载荷、冲击载荷、交变载荷等。指标包括强度、刚度、硬度、塑性、韧性和疲劳强度等。

一、强度

强度是指金属材料在外力作用下抵抗塑性变形或断裂的能力。按外力性质不同可分为抗拉强度 σ_b 、抗压强度 σ_{bc} 、抗弯强度 σ_{bb} 、抗剪强度 τ_b 、抗扭强度 τ_t 。

1. 拉伸试验

圆形拉伸试样简图见图 1-1。变形过程如图 1-2 所示：

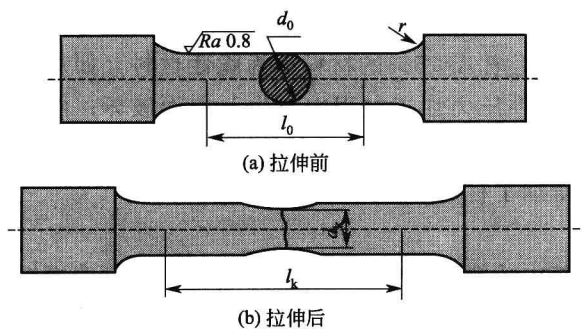


图 1-1 圆形拉伸试样简图

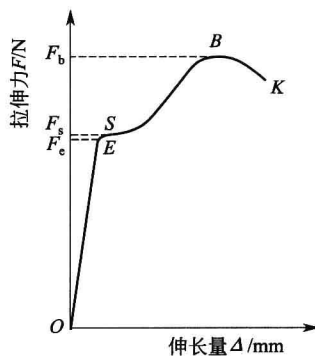


图 1-2 低碳钢的力-伸长曲线

- ① 弹性变形阶段；
- ② 弹塑性变性阶段；
- ③ 断裂。

2. 强度指标

试样受到外力作用时，在其内部产生大小与外力相等而方向相反的相互作用力，称为内力。单位面积上的内力称为应力，拉伸时的应力用符号 σ 表示，即

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ (MPa)}$$

① 弹性强度

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ (MPa)}$$

② 屈服强度

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \text{ (MPa)}$$

③ 抗拉强度

$$\sigma_b = F_b / S_0 \text{ (MPa)}$$

④ 屈强比 σ_s 与 σ_b 的比值。屈强比愈小，工程构件的可靠性愈高，屈强比太小，则材料强度的有效利用率太低。

⑤ 条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 产生 0.2% 残余塑性变形的抗力的极限应力值。用于无屈服点的中高碳钢及脆性材料。

二、塑性

塑性是指金属材料在外力作用下，能产生塑性变形而不致断裂的能力。常用塑性指标有伸长率 A 和断面收缩率 Z 。

(1) 伸长率 A 断后伸长率是指试样拉伸断裂时的绝对伸长量与原始长度的百分比，用符号 A 表示。即

$$A = (L_k - L_0) / L_0 \times 100\%$$

伸长率大小与试样尺寸有关。长试样的断后伸长率用 A_{10} 或 A 表示，短试样的断后伸长率用 A_5 表示，同一材料的 $A_{10} < A_5$ ，但二者不能直接比较大小。

(2) 断面收缩率 断面收缩率是指试样拉断后，缩颈处（断口处）横断面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比，用符号 Z 表示。即

$$Z = (S_0 - S_k) / S_0 \times 100\%$$

A 和 Z 是材料的重要性能指标。 A 和 Z 的数值越大，表示金属材料的塑性越好。一般把 $A > 5\%$ 的材料称为塑性材料（如低碳钢）；而把 $A < 5\%$ 的材料称为脆性材料（如灰口铸铁）。如果材料具有良好的塑性，则可避免材料在压力加工过程中发生开裂而破坏；而普通铸铁的塑性差，因而不能进行压力加工，只能进行铸造。同时，由于材料具有一定的塑性，故能保证材料不致因稍有超载而突然断裂，增加了材料使用的安全可靠性能。

三、硬度

硬度是指金属材料抵抗另一硬物体压入其内的能力。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。

由于测试方法不同，因而有不同的硬度指标，机械工业普遍采用压入法来测定硬度，分为布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

(1) 布氏硬度 是用单位压痕面积的力作为布氏硬度值的计量，即试验力除以压痕表面积，符号用 HBS（用淬火钢球压头）或 HBW（用硬质合金压头）表示，即

$$\text{HBS(HBW)} = \frac{F}{A_{\text{压}}} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ kgf/mm}^2 \text{ (试验力 } F \text{ 单位用 kgf)}$$

$$\text{HBS(HBW)} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ kgf/mm}^2 \text{ (试验力 } F \text{ 单位用 N)}$$

硬度值一般不标单位。符号 HBS 或 HBW 之前写出硬度值，符号后面用数字依次表示

压头直径、试验力及试验力保持时间（10～15s 不标）等试验条件。例如，150HBS10/1000/30。

一般在零件图或工艺文件上标注材料要求的布氏硬度时，不规定试验条件，只需标出要求的硬度值范围和硬度符号，如 210～230HBS。

布氏硬度试验的优点是测定的数据准确、稳定、数据重复性强，常用于测定退火、正火、调质钢、铸铁及有色金属的硬度。缺点是对不同材料需要更换压头和改变载荷，且压痕较大，压痕直径的测量也较麻烦，易损坏成品的表面，故不宜在成品上进行试验。

（2）洛氏硬度 是用压痕深度作为洛氏硬度值的计量（图 1-3），符号用 HR 表示，其计算公式为

$$HR=C-\frac{h}{0.002}$$

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 1-1。

表 1-1 常用洛氏硬度符号及试验条件和应用举例

标尺符号	所用压头	总载荷/N	测量范围(HR)	应用举例
HRA	120°金刚石圆锥	588.4	60～88	碳化物、硬质合金、淬火工具钢、浅层表面硬化钢等
HRB	φ1.588mm 钢球	980.7	25～100	软钢、铜合金、铝合金、可锻铸铁
HRC	120°金刚石圆锥	1471.1	20～70	淬火钢、调质钢、深层表面硬化钢

淬火钢球压头多用于测定退火件、有色金属等较软材料的硬度，压入深度较深；金刚石压头多用于测定淬火钢等较硬材料的硬度，压入深度较浅。采用不同的压头与总试验力，组合成几种不同的洛氏硬度标尺。我国常用的是 HRA、HRB、HRC 三种，其中 HRC 应用最广。其试验规范见表 1-1。洛氏硬度无单位，须标明硬度标尺符号，在符号前面写出硬度值，如 58HRC、76HRA。

洛氏硬度试验的优点是操作迅速、简便，硬度值可从表盘上直接读出；压痕较小，可在工件表面试验；可测量较薄工件的硬度，因而广泛用于热处理质量的检验。缺点是精确性较低，硬度值重复性差、分散度大，通常需要在材料的不同部位测试数次，取其平均值来代表材料的硬度。此外，用不同标尺测得的硬度值彼此之间没有联系，也不能直接进行比较。

（3）维氏硬度 也是以单位压痕面积的力作为硬度值计量。试验力较小，压头是锥面夹角为 136°的金刚石正四棱锥体，如图 1-4 所示。维氏硬度用符号 HV 表示。

在符号 HV 前面标出硬度值，在 HV 后面按试验力大小和试验力保持时间（10～15s 不标出）的顺序用数字表示试验条件。例如：640HV300。

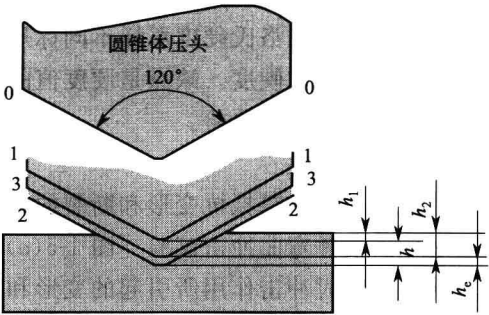


图 1-3 洛氏硬度测试原理

- 1—1—加上初载荷后压头的位置；
- 2—2—加上初载荷+主载荷后压头的位置；
- 3—3—卸去主载荷后压头的位置；
- he—卸去主载的弹性恢复

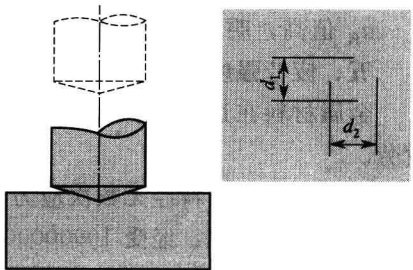


图 1-4 维氏硬度测试原理

维氏硬度试验的优点是可测软、硬金属，特别是极薄零件和渗碳层、渗氮层的硬度，其测得的数值较准确，并且不存在布氏硬度试验那种载荷与压头直径比例关系的约束。此外，维氏硬度也不存在洛氏硬度那样不同标尺的硬度无法统一的问题，而且比洛氏硬度能更好地测定薄件或薄层的硬度。缺点是硬度值的测定较为麻烦，工作效率不如洛氏硬度，因此不太适合成批生产的常规检验。

四、冲击韧性

冲击载荷下材料抵抗变形和断裂的能力称为冲击韧性。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 [图 1-5(a)]。

外力的瞬时冲击作用所引起的变形和应力比静载荷大得多，因此在设计承受冲击载荷的零件和工具时，不仅要满足强度、塑性、硬度等性能要求，还必须有足够的韧性。韧性是指金属材料在断裂前吸收变形能量的能力。

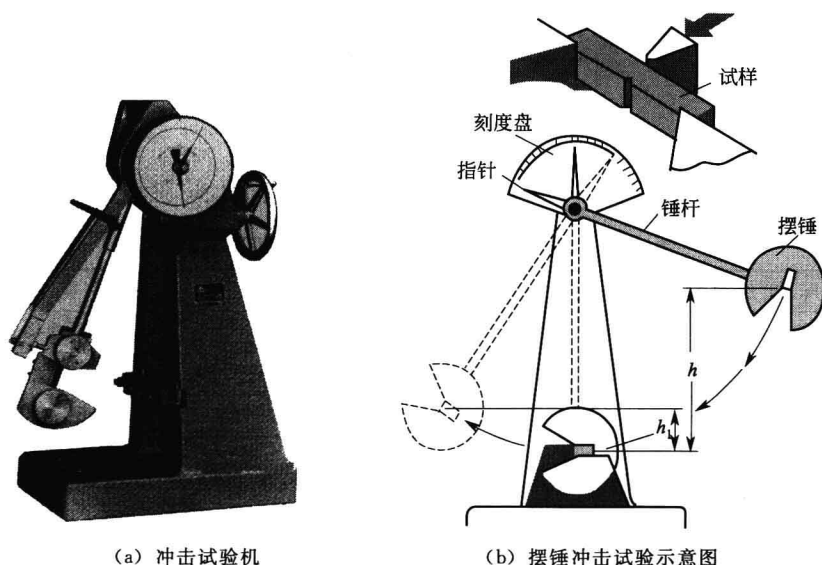


图 1-5 冲击韧性

根据功能原理可知：摆锤冲断试样所消耗的功 $A_K = mgh - mgh_1$ 。 A_K 称为冲击吸收功，单位焦耳 (J)，用 A_K 除以试样缺口处的横截面积 S 所得的商即为该材料的冲击韧度，用符号 a_K 表示 [图 1-5(b)]，即

$$a_K = \frac{A_K}{S} \quad (\text{J}/\text{cm}^2)$$

a_K 值高，明显塑变，断口呈灰色纤维状，无光泽，韧性材料。

五、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。

疲劳极限：材料经无数次应力循环而不发生疲劳断裂的最高应力值。

条件疲劳极限：经受 10000000 次应力循环而不致断裂的最大应力值。

陶瓷、高分子材料的疲劳抗力很低，金属材料疲劳强度较高，纤维增强复合材料也有较好的抗疲劳性能。

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应力值;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、裂纹扩展区和最后断裂区三个组成部分。

疲劳强度的影响因素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,改善零件表面加工质量,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。

课题二 金属材料高温力学性能

火力发电厂热力设备中许多零部件长期处在高温高压和水汽介质条件下工作。在高温和应力的长期作用下,金属材料会发生组织和性能的变化,甚至可能引起零部件的失效而造成事故影响火电厂的安全运行。例如,高温高压蒸汽管道和过热器管长期在高温和应力作用下运行,会发生蠕变变形和组织性能的变化,严重时会引起爆管事故的发生;高温螺栓在运行中,会发生预紧力随时间而减小的过程。这些高温部件在长期运行中发生的现象,正是研究火电厂热力设备中的金属材料长期在温度和应力工况下与常温机械的区别所在。因此,掌握热力设备零部件在运行中组织和性能的变化规律,对于保证火电厂的安全运行具有十分重要的意义。

金属在高温下的力学性能和常温力学性能是不同的,其主要差别在于高温力学性能受到温度、时间和组织变化等因素的影响。

一、温度对金属强度的影响

室温下的金属强度一般不受载荷作用时间的影响。但在高温下,对于每一种金属来讲,当温度超过某一温度时,其强度就会降低,温度越高,强度越低;载荷作用的时间越长,其强度也会越低。

二、蠕变

蠕变现象:火电厂中,锅炉、汽轮机在运行中,过热器管、蒸汽管道和高温紧固件等,在高温的作用下,会使管壁越来越薄,最终导致爆管事故。

把金属在一定的温度和应力条件下,即使应力低于屈服极限,也会随着时间的延长产生缓慢而连续的塑性变形的现象称为蠕变。

蠕变在低温下也会发生,但只有当温度高于 $0.3T_m$ (以绝对温度表示的熔点) 时才变化显著。碳钢超过 300°C 、低合金钢超过 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$,在一定应力长期作用下都会产生蠕变。而且温度越高,应力越大,蠕变速度越快。

三、持久强度和持久塑性

1. 持久强度

金属的持久强度,是评定受力元件在高温下长期使用的强度指标,它是在给定温度下经过一定的时间材料破坏时的应力值。热力设备零部件用钢的设计寿命一般为 10^5h ,则其持久强度表示为 σ'_{10^5} ,表示在温度 t 下持续时间为 10^5h 材料的持久强度,单位为 MPa。例如 $\sigma'_{10^5}{}^{700}$ 表示在 700°C 下持续 10^5h 材料破坏时的应力即持久强度。

持久强度表示钢在高温和应力作用下抵抗断裂的能力。持久强度的数值愈大,说明使金属材料在高温下发生断裂所需的外力愈大,即金属材料在高温时承受外力的能力愈大。持久强度是耐热钢高温强度计算的依据,锅炉钢管就常以持久强度作为其主要设计依据。

2. 持久塑性

当做持久强度试验时，材料断裂后的伸长率和断面收缩率表征了材料在高温和应力长期作用下的塑性性能，称为持久塑性。

热力设备的高温零部件在长期运行过程中，只要具有良好的持久塑性，即便强度稍差一点，也能在很大程度上排除脆性断裂的可能性。因为定期的蠕变测量可以保证运行的安全性。所以，对高温下长期工作而又允许较大变形量的零部件，如主蒸汽管、过热器管选材时除考虑蠕变和持久强度外，还必须考虑钢材的持久塑性。

一般认为，在高温下长期工作的锅炉用钢，持久塑性（ δ 值）不得低于 3%~5%。

四、应力松弛

金属在高温和应力长期作用下，如果总的变形量不变，随着时间的延长，工作应力逐渐降低的现象称为应力松弛。

应力松弛产生的后果：在锅炉、汽轮机的许多零部件如紧固件、弹簧、汽封、弹簧片等会产生应力松弛现象，其后果将会引起汽缸和阀门漏气，影响机组正常运行。

五、热疲劳

金属材料由于温度的循环变化而引起热应力的循环变化，由此而产生的疲劳破坏称为热疲劳。热力设备的零部件如叶片、汽缸、转子及锅炉热交换器管等会因温度的波动及启动、停炉等，在其内部产生交变热应力而造成热疲劳破坏。热应力的产生是由于温度变化引起材料的变形（膨胀和收缩），如果这种变形受到约束，则在材料内部就会产生应力，这种应力称为热应力。

热疲劳引起的金属材料损伤要比一般机械疲劳更复杂些。首先，温度的循环除引起热应力外，还会导致材料组织发生变化，使持久强度和持久塑性降低；其次，热疲劳时温度分布不均匀，塑性变形集中在温度梯度大的区域，应力集中程度大，加速了热疲劳裂纹的产生和发展。

热疲劳裂纹一般在金属表面形成，因为表面存在着最大的热应力、应力集中及介质腐蚀。通常，裂纹源有若干个，它们有可能连接起来形成主裂纹。裂纹的扩展与钢种有关，合金钢的热疲劳裂纹往往垂直于表面向内发展，造成横向断裂；碳钢则往往沿表面扩展成网状裂纹，呈龟裂状。断口分析表明，热疲劳裂纹可沿晶内或晶界发生；随着温度的升高，由穿晶裂纹向晶间裂纹过渡，其断裂自然也由穿晶断裂向晶间断裂过渡。

如果金属材料受到急剧的加热或冷却，在材料内部会产生很大的冲击热应力，这种现象称为热冲击。它比热疲劳承受的热应力大得多，有时甚至一次温度循环所形成的热应力就会超过材料的强度极限，导致一次热冲击就会使零件损坏。汽轮机在启停和工况变化时，应当防止汽缸、转子等部件受到热冲击。

六、热脆性

热脆性是指钢在某一温度区间（如 400~550℃）长期加热后，发生室温冲击韧性明显下降的现象。

几乎所有的钢都有产生热脆性的趋势。在脆性发展的温度范围内，温度越高，时间越长，钢的热脆性越显著。呈现热脆性的钢在高温下冲击韧性并不低，只有在室温下才呈现脆性，此时 a_K 很低，比正常 a_K 下降 50%~60% 甚至更低。我国一些电厂使用的 25Cr2Mo1V 钢高压螺栓，在长期运行中产生了热脆性现象， a_K 值由大约 120J/cm² 下降到 20~30J/cm²，并往往因此发生脆断。脆断的螺栓经金相检验，可以在金相组织上看到黑色的网状晶

界,证明 25Cr2Mo1V 钢在高温长期运行所发生的热脆性过程中,沿着奥氏体晶界有新相析出。

影响热脆性的主要因素是化学成分。含有 Cr、Mn、Ni 等元素的钢热脆性倾向较大; P 的存在使钢的热脆性倾向加大; 钢中加入适量的 Mo、W、V 等元素,可降低钢的热脆性倾向; 在低合金耐热钢中加入微量元素如 B、Ti 和 B、Ni 和 B 等,也可以减少热脆性。

课题三 金属材料物理、化学及工艺性能

一、金属材料的物理性能

(1) 密度 单位体积某物质的质量,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 。

根据密度的大小,可以把金属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。

(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 ($^{\circ}\text{C}$) 表示。每种金属都有固定的熔点,如纯铁的熔点为 1538°C 、纯铝的熔点为 660°C 、纯铜的熔点为 1083°C 。

(3) 导电性 金属传导电流的性能称为导电性。每种金属的导电性各不相同,其中以银的导电性最好,其次为铜、铝等,电力上主要以纯铜或纯铝作为导体。

(4) 导热性 金属传导热量的性能称为导热性。不同金属的导热性不同,银的导热性最好,其次是铜和铝。若某些零件在使用中需大量吸热或者散热时,则要导热性好的材料。如凝汽器中的冷却水管常用导热性好的铜合金来制造,以提高冷却效果。

(5) 热膨胀性 金属受热时体积发生膨胀的现象称为金属的热膨胀性。实际生产中必须考虑金属的热膨胀性所产生的影响。例如,汽轮机转子和静子之间要留有足够的间隙,以防机组启动加热时,因其膨胀的差异而产生转子、静子的碰磨造成设备损坏事故。

(6) 磁性 能吸引铁、镍、钴等金属的性能称为磁性。铁或铁的合金具有很好的磁性,它们被叫做铁磁性金属。

(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,为了延长这些零件的使用寿命,应选用耐磨性好的材料制造。

二、金属材料的化学性能

金属材料的化学性能指金属材料与周围介质接触时抵抗发生化学或电化学反应的性能。

(1) 耐腐蚀性 指金属材料抵抗各种介质侵蚀的能力。耐腐蚀性材料有不锈钢、塑料、陶瓷、钛及其合金等。

(2) 抗氧化性 指金属材料在高温下,抵抗产生氧化皮的能力。如耐热钢、铬镍合金、铁铬合金等。

三、金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能指材料承受各种加工、处理的能力的那些性能。

(1) 铸造性能 指金属或合金是否适合铸造的一些工艺性能。包括流动性能、收缩性、偏析等。含碳量高的铸铁铸造性好。

(2) 焊接性能 指材料焊接时其工艺方法的难易程度及接口处是否能满足使用目的的特性。含碳量越高,焊接性越差。碳当量小于 0.25% 的钢,焊接性好。

(3) 锻造性能 金属材料在锻压加工中能承受塑性变形而不破裂的能力。含碳量越高,锻造性越差。低碳钢锻造性好,合金钢锻造性较差。

(4) 切削加工性 指材料被切削加工成合格零件的难易程度。切削加工性较好的指标为刀具耐用度较高;切削力较小,切削温度较低;容易获得良好的表面加工质量;容易控制切屑的形状或容易断屑。含碳量太高,切削性差。含碳量太低,切削性也差。

(5) 冲压性能 金属材料承受冲压变形加工而不破裂的能力。含碳量越高,冲压性越差。

(6) 热处理工艺性 指材料被热处理时达到性能要求的难易程度。

(7) 淬硬性 钢淬火时获得高硬度的能力。含碳量越高,钢的淬硬性越好。

(8) 淬透性 钢接受淬火的能力,即钢获得淬硬层深度的能力。与合金元素有关。

任务二 认识纯金属的结构与结晶

金属材料的种类很多,不同的材料具有不同的性能,即使是同一种材料,在不同生产、加工和使用条件下的性能也不同。金属材料性能上的这种差异,从本质上来说,是由其内部组织和结构所决定的。因此,了解金属组织结构与性能之间的关系,掌握提高金属材料性能的方法和手段,是为了更好地控制其性能,正确选用材料,并且对于加工金属材料和指导人们开发新型材料都具有非常重要的意义。

课题一 纯金属的晶体结构

一、晶体结构的基本概念

1. 晶体与非晶体

所有固态物质可分为晶体和非晶体两大类。

晶体(图 1-6)是指原子在空间按一定几何形状作规则排列的物体;而非晶体(图 1-7)是指原子在空间作杂乱无序排列的物体。所有固态金属都是晶体。

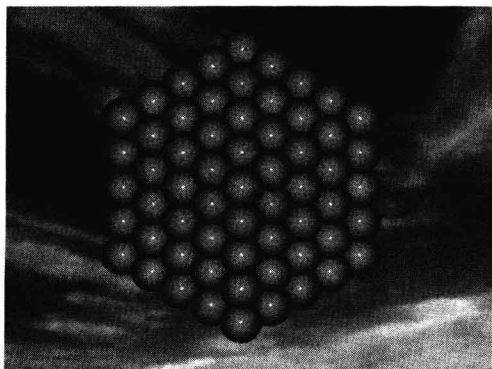


图 1-6 晶体原子排列示意

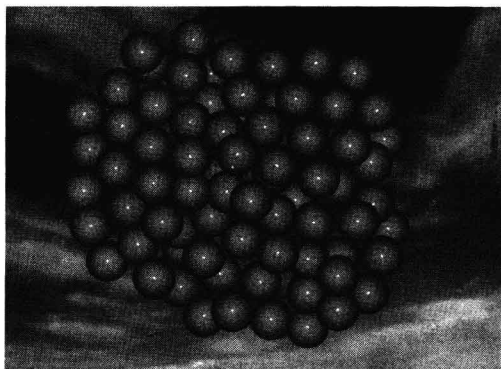


图 1-7 非晶体原子排列示意

2. 晶体结构

晶体结构指在晶体内部,原子、离子或原子集团规则排列的方式。晶体结构不同,其性能往往相差很大。

(1) 晶格 为了便于分析研究,通常把将晶体中实际存在的原子、离子或原子集团等物质质点,抽象为空间中纯粹的几何点,而完全忽略它的物质性,这些抽象的几何点称为阵点。用假想的直线把这些阵点连接起来,得到周期性规则排列的三维空间格子称为晶格,如图 1-8(a) 所示。

(2) 晶胞 组成晶格的能反映其特征和规律的最基本几何单元,称为晶胞 [图 1-8(b)]。晶格可以看作是由许多大小和形状完全相同的晶胞紧密地堆垛在一起而成的。

(3) 晶格常数 晶胞各棱边的长度用 a 、 b 、 c 表示,称为晶格常数或点阵常数,其大小通常以埃为计量单位。晶胞各边之间的相互夹角分别以 α 、 β 、 γ 表示。 a 、 b 、 c 、 α 、 β 、 γ 称为晶胞的六个参数。图 1-9(c) 为简单立方晶胞,其晶格常数 $a=b=c$,而 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

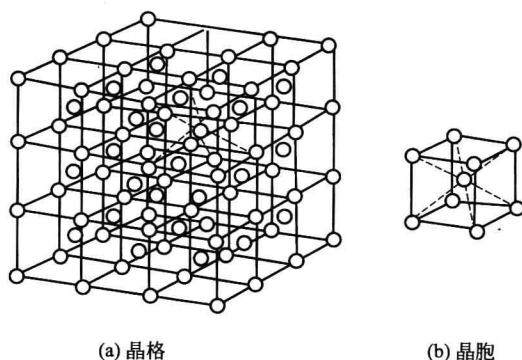


图 1-8 晶格和晶胞示意

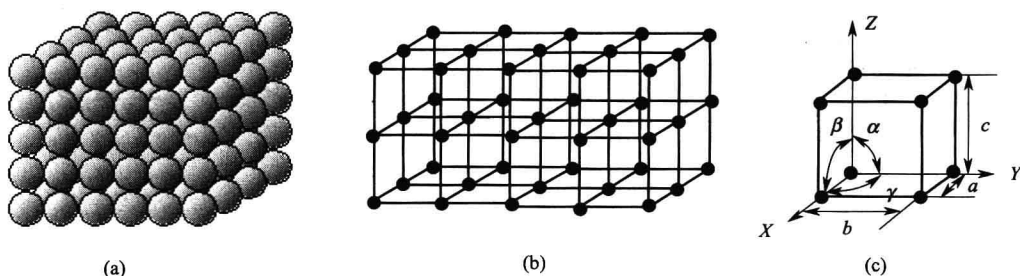


图 1-9 简单立方晶格

在研究晶体结构时,通常以晶胞作为代表来考查。

(4) 配位数 指晶格中与任一原子处于相距最近并距离相等的原子数目。

(5) 致密度 (K) 指晶胞中原子排列的致密程度,即晶胞中原子所占的体积与晶胞体积 (V) 的比值,比值 K 越大,致密度越大。

二、常见金属的晶格类型

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞 [见图 1-10(a)] 是由八个原子构成的立方体,并在其立方体的中心还有一个原子 [图 1-11(a)]。在体心立方晶胞中,因每个顶点上的原子是同时属于周围八个晶胞所共有,实际上每个体心立方晶胞中仅包含有: $1/8 \times 8 + 1 = 2$ 个原子。属于这种晶格的金属有铁 ($<912^\circ\text{C}$, $\alpha\text{-Fe}$)、铬 (Cr)、钼 (Mo)、钨 (W)、钒 (V) 等。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞 [见图 1-10(b)] 也是由八个原子构成的立方体,但在立方体的每一面的中心还各有一个原子 [图 1-11(b)]。因每一面心位置上的原子是同时属于两个晶胞所共有,故每个面心立方晶胞中包含有: $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ 个原子。属于这种晶格的金属有铝 (Al)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、铅 (Pb)、 $\gamma\text{-Fe}$ 等。

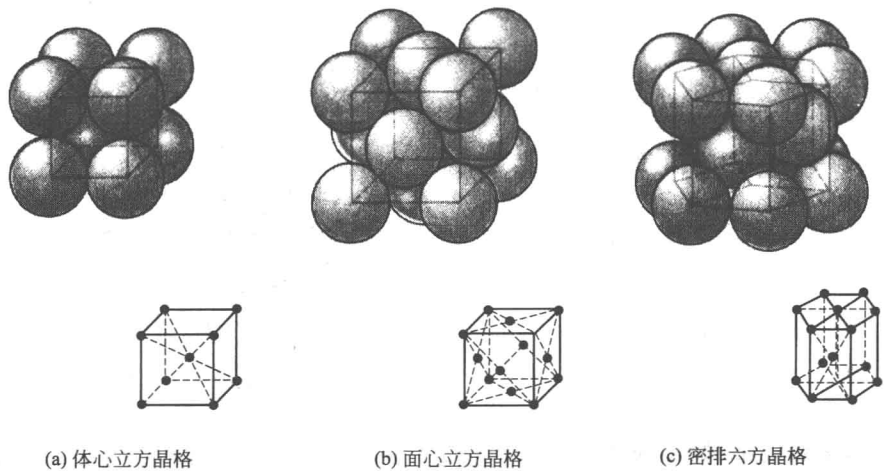


图 1-10 常见金属的晶格类型

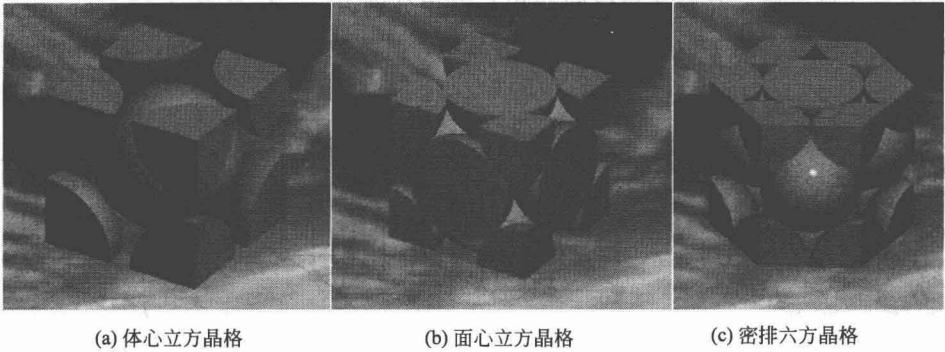


图 1-11 晶胞原子数

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞 [见图 1-10(c)] 与简单六方晶胞不同，它是由 12 个原子构成的六方体，其上下两个六方面的中心还各有一个原子，而且在两个六方面之间还有三个原子 [图 1-11(c)]。六方体每个角上的原子属相邻六个晶胞所共有，上、下底面中心的原子同时为两个晶胞所共有，再加上晶胞内的三个原子，所以晶胞中的原子数为： $1/6 \times 6 \times 2 + 1/2 \times 2 + 3 = 6$ 个原子。属于这种晶格的金属有铍 (Be)、镁 (Mg)、锌 (Zn)、镉 (Cd) 等。

表 1-2 三种典型晶体结构特征

特征 晶格	晶胞内 原子数	r 与 a 的 关系	配位数	致密度	最密排 原子面	最密排原 子方向	典型金属
体心立方	2	$r = \sqrt{3}a/4$	8	0.68	{110}	$\langle 111 \rangle$	α -Fe, W, Cr, Mo, V
面心立方	4	$r = \sqrt{2}a/4$	12	0.74	{111}	$\langle 110 \rangle$	Al, Cu, Ag, Au, Ni, Pb, γ -Fe
密排六方	6	$r = a/2$	12	0.74	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	Ti, Zr, Mg, Zn

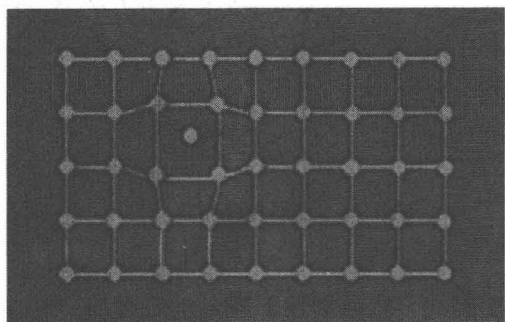
晶体结构与材料性能：(一般规律) 面心立方的金属塑性最好，体心立方次之，密排六方的金属较差。三种典型晶体结构特征见表 1-2。

三、实际金属中的晶体缺陷

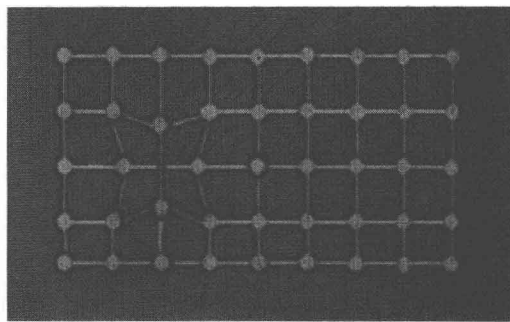
1. 常见晶体缺陷及分类

实际晶体中排列不规则的区域称为晶体缺陷。按空间尺寸分为三种。

(1) 点缺陷 不规则区域在空间三个方向上的尺寸都很小，主要是空位、置换原子、间隙原子。见图 1-12。



(a) 间隙原子示意



(b) 空位原子示意

图 1-12 点缺陷

在空位和间隙原子的附近，由于原子间作用力的平衡被破坏，使其周围的原子都离开了原来的位置，这种现象称为晶格畸变。点缺陷的存在对金属的性能有影响，如使金属的屈服点升高、塑性下降等。

(2) 线缺陷 不规则区域在一个方向的尺寸很大，在另外两个方向的尺寸都很小，主要包括刃型位错和螺型位错。见图 1-13。

实际金属晶体中存在着大量位错。晶体中位错数量的多少，可用单位体积内位错线的总长度来表示，称为位错密度。位错在晶体内运动及位错密度的变化对金属的性能、塑性变形及相变有着极为重要的影响。

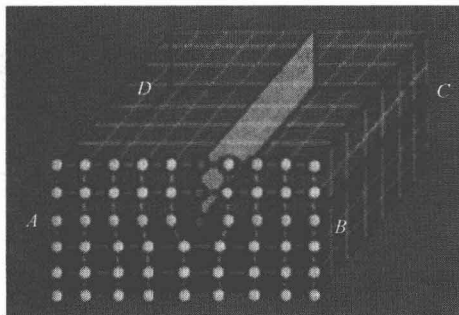


图 1-13 线缺陷刃型位错示意

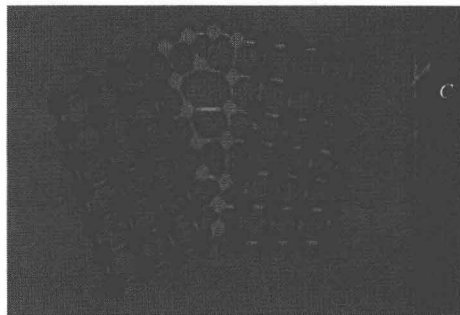


图 1-14 面缺陷晶界示意

(3) 面缺陷 不规则区域在两个方向的尺寸很大，在另外一个方向的尺寸很小，主要是晶界和亚晶界。见图 1-14。

图 1-15 是金属的单晶体结构，而实际金属大多是多晶体（图 1-16），多晶体中两个相邻晶粒的晶格位相不同，故晶界处原子排列的规律性就不可能一致，必然是从一种晶格位相逐步过渡到另一种晶格位相，因此，晶界实际上是不同位相晶粒间原子排列无规则的过渡层。晶界处原子排列的不规则，使晶格处于畸变状态，因而晶界与晶粒内部有着一系列不同的特