



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电厂金属材料

王进汝 主编



中国电力出版社

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



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电厂金属材料

主 编 王进汝
编 写 承玉玲
主 审 宋琳生



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书共分为三个模块七个单元，主要内容包括金属学基础知识，常用金属材料及热处理，锅炉、汽轮机用钢及金属监督。

本书可作为职业技术学院电力技术类专业教学用书，也可作为电力行业技能鉴定培训和工人培训用书，还可作为工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂金属材料/王进汝主编. —北京: 中国电力出版社, 2007. 1

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 4896 - 4

I. 电... II. 王... III. 发电厂—金属材料—职业教育—教材 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 130456 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 1 月第一版 2007 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 5.375 印张 124 千字
印数 0001—3000 册 定价 9.80 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)

前言

本教材以《中华人民共和国职业技能鉴定·电力行业》和《国家职业标准》为依据,按照中华人民共和国劳动和社会保障部中国就业培训技术指导中心关于国家职业资格培训教程编写的要求进行编写。

全书共分三个模块七个单元。模块Ⅰ讲述金属学基础知识,模块Ⅱ介绍常用金属材料及热处理,模块Ⅲ讲述发电厂锅炉、汽轮机用钢和金属监督知识。

本书具有以下几个鲜明特点:

(1) 全书内容简炼,图文并茂,通俗易懂。叙述内容与电力职业技能鉴定题库紧密结合,十分适合电力工人阅读。

(2) 本书采用模块式编排,改变了过去传统的编写模式。使教学内容呈阶梯式递增,以模块的不同组合来实现不同工种、不同等级对培训知识的需求,教学更具灵活性。

(3) 本书后附有自测题,所有自测题都和电力职业技能鉴定题库紧密联系。以帮助学员巩固知识,提高应试能力。

(4) 本书重点在应用上,除了介绍较多的实用知识外,书中还增加了较多案例分析,所有案例都来自电力生产实际,以培养学员运用知识分析和解决问题的能力,提升电力工人应用知识的能力。

(5) 随着大容量机组和进口机组不断投入运行,火电厂使用的金属材料种类也在不断增加,本书对新材料也作了一定的介绍。

本书由苏州电力工业学校王进汝主编,其中模块Ⅱ的单元一由承玉玲编写,本书由宋琳生主审。本书在编写过程中得到了许多单位的教师和工程技术人员的支持和帮助,在此一并表示感谢。

限于编者的水平,书中的缺点和错误在所难免,恳切希望读者批评指正。

编者

2006年8月

目 录

前言

模块 I 金属学基础知识

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 金属材料的常温力学性能	3
单元二 金属学基础知识	7
课题一 金属的晶体结构与结晶	7
课题二 铁碳合金状态图	10

模块 II 常用金属材料及热处理

单元一 钢的热处理	21
课题一 钢在加热、冷却时的组织转变	21
课题二 钢的普通热处理	25
课题三 钢的表面热处理	29
单元二 碳钢和合金钢	32
课题一 碳素钢	32
课题二 合金钢	36
单元三 有色金属及其合金	45
课题一 铝及铝合金	45
课题二 铜及铜合金	46
课题三 轴承合金	49

模块 III 锅炉、汽轮机用钢及金属监督

单元一 锅炉和汽轮机用钢及事故分析	51
课题一 锅炉主要零部件用钢	51
课题二 汽轮机主要零部件用钢	55
课题三 电厂常见事故分析	59
单元二 金属监督	65
课题一 金属监督简介	65
课题二 常用金属检验方法	68

附录一	《电厂金属材料》知识要求试卷一	72
附录二	《电厂金属材料》知识要求试卷二	74
附录三	黑色金属硬度及强度换算表	76
附录四	锅炉主要零部件用钢一览表	77
附录五	汽轮机主要零部件用钢一览表	78
参考文献		79

模块 I 金属学基础知识

单元一 金属材料的性能

课题一 金属材料的物理性能和化学性能

一、物理性能

金属材料的物理性能主要有密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀性和磁性等。

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 $2.7 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ 。应用密度的概念可以帮助我们解决一些检修工作中的实际问题,例如,计算钢件的重量,鉴别金属材料的质量。

【例 1-1】 有一个用灰口铸铁浇注而成的零件,称得其重量为 3.5kg ,其体积为 0.0005m^3 ,试问该零件的材料质量是否有问题?(灰口铸铁的密度为 $7200 \text{kg}/\text{m}^3$)

解 $\rho = G/V = 3.5/0.0005 = 7000 (\text{kg}/\text{m}^3)$

计算表明,零件的密度小于灰口铸铁的密度,说明该零件材料质量有问题。零件内部有夹杂、气孔等。

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。各种金属材料的导电性各不相同,其中以银的导电性最好,其次为铜、铝等,由于银的价格比较昂贵,所以电力工程上广泛采用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。金属不同,导热性亦不同,银的导热性最好,其次是铜和铝。一般来说,导电性好的材料,其导热性也好。若某些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。例如,凝汽器中的冷却水管常用导热性好的铜合金来制造,以提高其冷却效果。

5. 热膨胀性

金属受热时体积发生胀大的现象称为金属的热膨胀性。生产实际中,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,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,例如,铜和铝。纯铁在 769°C 以上时就会失去磁性。

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等缺陷。

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、化学性能

金属材料在一定温度下与其他物质发生化学反应时表现出来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指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。火电厂锅炉高温汽管道,特别是省煤器和空气预热器空气管道等,就必须选择抗氧化性好的金属材料制造。

2. 耐腐蚀性

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

液态金属在铸造成型时所具有的性能称为铸造性能。金属材料的流动性好、收缩性小和偏析(金属材料凝固后化学成分的不均匀性)小,其铸造性能就好。

二、可锻性能

金属材料在压力加工时能承受一定程度的塑性变形而不产生裂纹的能力称为可锻性能。可锻性能的好坏主要决定于金属材料的化学成分和加热温度,低碳钢的可锻性能好,能承受锻造、轧制、拉拔、挤压等加工。灰口铸铁的塑性及韧性均很低,不能进行锻压加工。

三、焊接性能

通过局部加热熔融或加压(或两者并用),使两个金属件造成原子间的相互结合力,从

而得到永久连接的工艺过程称为焊接。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力学性能来衡量。通常低碳钢的焊接性能较好,高碳钢和铸铁的焊接性能较差。

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 金属材料的常温力学性能

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

一、强度和塑性

1. 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。按外力作用的性质不同,可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗扭强度等。通过拉伸试验可测定金属材料的屈服强度 R_{el} 和抗拉强度 R_m 。屈服强度又分为上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 。

2. 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破坏的能力。常用的塑性指标有延伸率 A 和断面收缩率 Z 。

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)。塑性好的材料可顺利地进行某些成型工艺,如锻压、冷冲和冷拔等。此外,良好的塑性还可使零件在使用中一旦发生超载时,也能由于塑性变形使金属材料的强度升高而避免突然断裂事故发生。

二、硬度

硬度通常是指金属材料抵抗硬的物体压入其表面的能力。由于测试方法不同,因而有不同的硬度指标,其中常用的有布氏硬度和洛氏硬度两种。

1. 布氏硬度

布氏硬度的测试原理是:用一直径为 D 的淬硬钢球(或硬质合金球),在规定载荷 F 的作用下压入被测金属材料的表面,载荷 F 去除后,在金属材料表面便留下了一个直径为 d 的压痕,如图 1-1 所示。此压痕单位面积上所承受的压力即为布氏硬度值,计算公式为

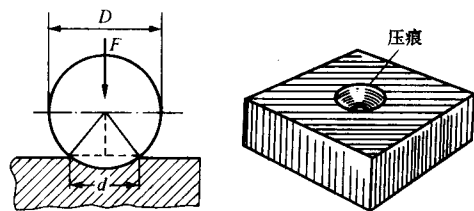


图 1-1 布氏硬度试验示意图

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

式中 HB ——布氏硬度, MPa ;

P ——加在钢球上的载荷, N ;

A ——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到外, 还可直接根据压痕直径查表得出。

用布氏硬度法测量金属材料的硬度具有很高的测量精度、试验数据稳定, 但操作缓慢、压痕大, 因而不可用作成品零件和硬度较高的 ($HB>450\text{MPa}$) 金属材料的测量。

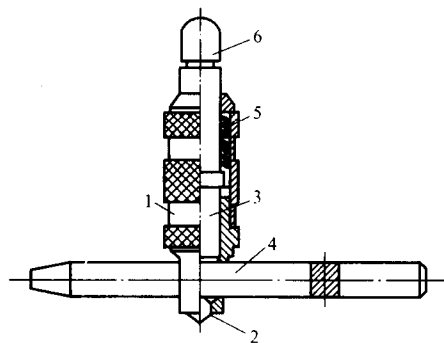


图 1-2 锤击式布氏硬度计

1—冲杆；2—钢球；3—撞销；4—标准试棒；
5—螺旋弹簧；6—冲头

电厂中锤击式简易布氏硬度计用得比较广泛, 它能直接在大型工件上测定硬度, 且携带轻便。锤击式简易布氏硬度计结构如图 1-2 所示。试验时, 先初估被测工件的大致硬度, 然后选择一个与它相近的标准试棒 4 插入硬度计内, 将硬度计置于被测工件上, 用手锤敲击冲头 6, 这样钢球 2 就在被测试件及标准试棒的表面同时各打上一个压痕, 测量这两个压痕的直径, 根据标准试棒的已知布氏硬度值和两压痕的直径, 从预先制好的对照表中即可查得被测工件的布氏硬度值。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验用以测定 $HB>450\text{MPa}$ 的金属材料。洛氏硬度试验和布氏硬度试验一样, 也属于压痕试验法, 但洛氏硬度试验不是测量压痕的直径大小, 而是以压痕的塑性变形深度来衡量材料硬度的。

图 1-3 为洛氏硬度 HRC 试验过程示意图。试验时, 为了使压头与试样表面接触良好, 先加初载 100N , 此时的压入深度为 h_0 , 压头位于 1-1 位置; 调整试验机上刻盘的指针对准零点; 然后再加主载 1400N (与初载共计为 1500N), 此时的压入深度为 h_1 , 压头位于 2-2 位置; 停留数秒钟后卸除主载荷, 由于金属的弹性变形, 压头回跳 h_2 高度, 压头位于 3-3 位置。这样, 在主载荷作用下经弹性恢复后的实际压入深度为 h ($h=h_1-h_2-h_0$)。

此压痕深度 h 即反映其洛氏硬度 HRC, 硬度值可以直接从表盘上读出。洛氏硬度无单位, 只用符号加数字表示, 如 HRC55。

洛氏硬度试验由于压痕面积小, 因而可用于测量成品硬度。这种方法操作迅速、简单, 测量范围广, 可以测量从较软到较硬的、厚薄不同的各种金属材料的硬度。其主要缺点是压痕小, 因而测量精度不如布氏硬度高。

三、冲击韧性

金属材料抵抗冲击负荷的能力叫做冲击韧性。冲击韧性是通过冲击试验, 以冲断一定尺寸的标准试件所耗用的功与试件断口最小截面的商值来度量的。目前应用较普遍的是一次摆锤弯曲冲击试验法。

1. 一次摆锤弯曲冲击试验

一次摆锤弯曲冲击试验的标准试样及放置如图 1-4 所示。试样中部有一宽度为 2mm 、深为 2mm 的缺口, 其作用是为了使塑性变形局限于缺口附近不大的体积范围内, 以保证在

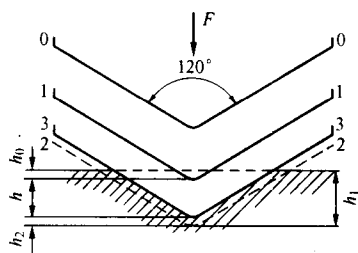


图 1-3 洛氏硬度试验过程示意图

缺口处发生破裂，正确地测定材料承受冲击负荷的能力。

图 1-5 为摆锤式冲击试验机工作简图。试验时将试样放在试验机的支座上，再将具有一定重量 G 的摆锤 1 抬高到高度为 H 的位置 I，然后使摆锤冲向试样（位置 III）。试样冲断后，摆锤继续冲向位置 II 升起高度为 h ，试验时消耗在试样上的功（ A_R 值）直接由指针 2 指示在标尺 4 上。该冲击功除以缺口处的横截面便得到冲击韧性值，即

$$\alpha_k = A_k / F$$

式中 α_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 。

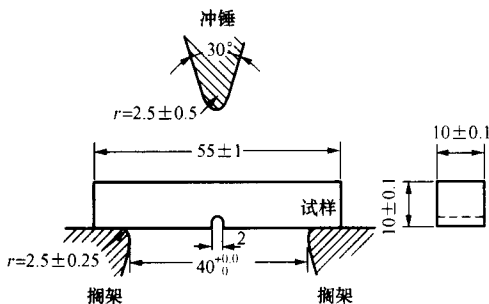


图 1-4 一次摆锤冲击试验的试样及放置

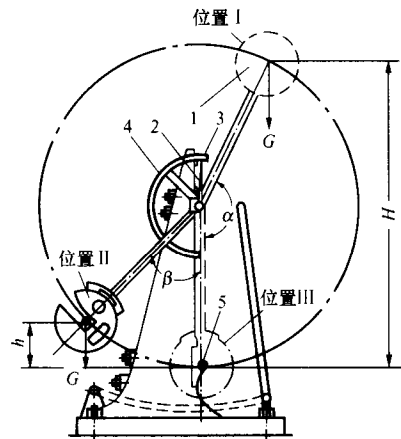


图 1-5 摆锤式冲击试验机工作简图

1—摆锤；2—指针；3—支座；

4—标尺；5—试样位置

在电厂中，M65 以下的螺栓要求 $\alpha_k \geq 100 J/cm^2$ ，M65~M100 要求 $\alpha_k \geq 80 J/cm^2$ ，M100 以上要求 $\alpha_k \geq 30 J/cm^2$ ，对于调速器汽门螺栓在 $\alpha_k \leq 60 J/cm^2$ 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 $150^\circ C$ ）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。

2. 小能量多冲试验

实际上，在动载荷下工作的零部件，很少是因受一次大能量冲击载荷而损坏的，通常是

承受小能量的多次重复冲击负荷。在这种情况下,零件的破断原因是由于多次冲击损伤的积累,在材料内部产生裂缝所致。这与大能量一次冲击破断的过程是不同的,若仍用一次冲击试验得出的冲击韧性值 α_k 来衡量小能量多冲时材料的抗力就不合适了。因此,应该以小能量多冲失效抗力来加以衡量。

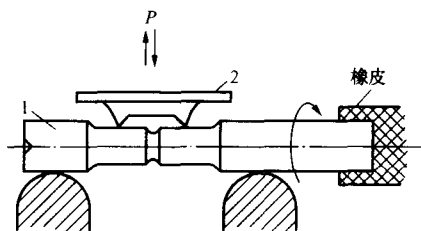


图 1-6 多冲试验示意图

作小能量多冲试验时,材料制成专门的缺口试样如图 1-6 所示。将试样放在多冲试验机上,使之受到试验机锤头 2 的小能量(其冲击能量一般小于 $1500\text{kg} \cdot \text{cm}$)多次冲击。测定材料在此冲击能量下发生破断的冲击次数(或开始出现裂纹的冲击次数)作为多冲抗力指标。

研究金属材料的多冲抗力,不仅有助于对金属材料的冲击韧性作出比较正确的衡量,而且有助于正确选择金属材料 and 热处理工艺,从而充分发挥金属材料的潜力,扩大其应用范围,延长使用寿命。

四、疲劳和疲劳强度

1. 疲劳

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。疲劳最容易发生在作旋转或往复运动的受载部件上,如汽轮机的主轴、叶片等。疲劳破坏的特点是突然性的。

产生疲劳的原因很多,一般认为在交变应力的作用下,虽然应力值远小于材料的抗拉强度,但由于金属材料表面或内部有毛刺、划痕及夹杂等缺陷,造成应力集中而导致微裂纹。这种微裂纹就成为疲劳源,在交变应力的作用下而逐渐扩展,未裂面积不断减小,当剩余的断面不能承受所加载荷时,即发生突然断裂现象。

疲劳断裂的断口如图 1-7 所示。疲劳断口由疲劳裂纹扩展部分和突然断裂部分组成。疲劳裂纹扩展部分的断口因摩擦而比较光滑,呈瓷状,有时还可看到若干条弧形曲线;突然断裂部分的断口比较粗糙,呈光亮的结晶状。

2. 疲劳强度

金属材料在交变应力的作用下,经无限次循环而不破坏的最大应力值称为疲劳强度。金属的疲劳强度可以通过疲劳试验测定。当交变应力循环对称时,疲劳强度用符号 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、组织结构和性能外,还同零件的工作环境、几何形状、尺寸、表面粗糙度等因素有关。因此,合理地进行零件结构设计、减少应力集中、对零件表面进行强化处理(如喷丸、滚压、表面热处理等)都能提高零件的疲劳强度。

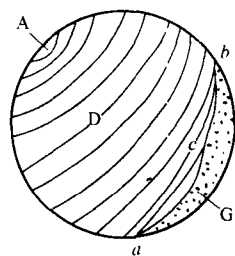


图 1-7 疲劳断口示意图

A—疲劳源; D—疲劳裂纹扩展部分; G—突然断裂部分;
acb—疲劳前沿线

金属学基础知识

课题一 金属的晶体结构与结晶

一、晶体结构的基本知识

所有固态物质可分为晶体和非晶体两大类。

晶体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。

晶体内部的原子是按一定的几何形状作规则的排列，如图 1-8 (a) 所示。此形状复杂，为了容易看清晶体中原子排列的规律性，通常把晶体内部的原子视为一质点，并用假想的几何线条将各质点连接起来构成一个空间格子，这种空间格子叫做晶格，如图 1-8 (b) 所示。用晶格来描述晶体结构是很不

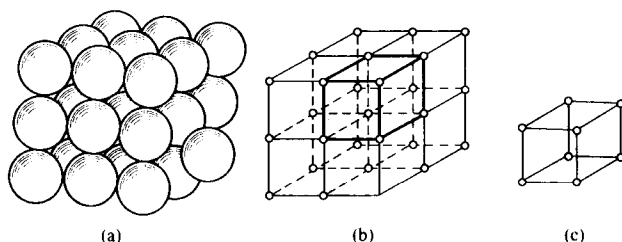


图 1-8 简单立方晶格

(a) 晶体中金属原子的排列；(b) 金属的晶格；(c) 金属的晶胞

方便的。根据晶体中原子的排列具有周期性的特点，可从晶格中选取一个能够反映晶格特征的最小的几何单元来描述晶体中原子排列的规律，这个最小的几何单元称为晶胞（或叫单位晶格），如图 1-8 (c) 所示。晶体内部原子的排列情况，要用 X 射线分析方能得知。

金属的晶格类型很多，最常见的有三种，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是一个正立方体，在正立方体的中心和八个顶角上各有一个原子，如图 1-9 所示。属于体心立方晶格的金属有铬、钒、钨、钼以及 910℃ 以下的工业纯铁等。

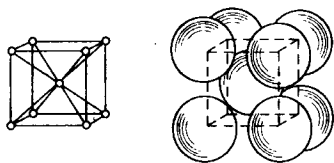


图 1-9 体心立方晶格

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是一个正立方体，在正立方体的八个顶角以及正立方体六个面的中心各有一个原子，如图 1-10 所示。属于面心立方晶格的金属有镍、铜、金、银以及 910~1390℃ 范围内的工业纯铁等。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个六方柱体，它由六个呈长方形的侧面和两个呈正六边形的顶面和底面组成。密排六方晶胞的每个角上和上下两个正六边形的中心各有一个原子，此外还有三个原子成三角形排列在晶胞中间，如图 1-11 所示。属于密排六方晶格的金属有锌、铍等。

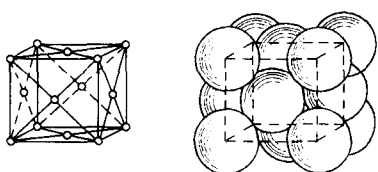


图 1-10 面心立方晶格

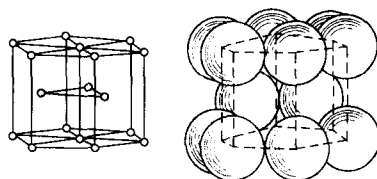


图 1-11 密排六方晶格

二、金属的结晶

(一) 纯金属的结晶

液态金属冷却转变为固态晶体的过程称为结晶。金属的结晶过程可以用热分析法来进行研究。

用热分析法研究纯金属结晶过程的步骤如下：先将纯金属熔化，然后缓慢冷却，在冷却过程中每隔一定时间测量一次温度，最后将实验数据绘制成如图 1-12 (a) 所示的冷却曲线。

由图看出，当纯金属冷却至 b 点时，纯金属的冷却曲线出现一段水平线 bc ，这是因为液态金属在结晶过程中要释放出热量——结晶潜热，补偿了液态金属向周围散逸的热量，使结晶过程中温度基本保持不变，水平线 bc 所对应的温度称为纯金属的理论结晶温度，纯金属在 b 点开始结晶，至 c 点结晶结束。此后，金属在固态下冷却，温度随时间不断下降。

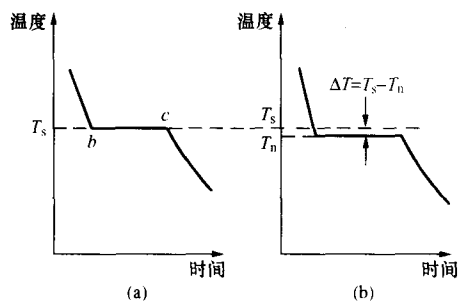


图 1-12 纯金属的冷却曲线

(a) 缓慢冷却时的纯金属冷却曲线；

(b) 实际冷却时的纯金属冷却曲线

在实际冷却条件下，液态金属冷却至 T_s 时并没有结晶，只有温度降到 T_n 时纯金属才开始结晶，如图 1-12 (b) 所示。也就是说，在实际冷却条件下，纯金属在理论结晶温度以下仍保持液态，这种现象叫做过冷现象。 T_n 称为实际结晶温度。理论结晶温度 T_s 与实际结晶温度 T_n 之差称为过冷度，用 ΔT 表示。冷却速度越大，实际结晶温度越低，过冷度就越大；当极为缓慢冷却时，实际结晶温度趋近于理论结晶温度，过冷度便趋近于零。

根据冷却曲线，可以测定金属的结晶温度、过冷度的大小以及结晶所需的时间，但不能说明金属是怎样从液态过渡到固态的。为了寻找改善金属性能的途径，必须对金属结晶的一般过程进行研究。

由纯金属的冷却曲线可知，结晶过程必须经历一定的时间。在这段时间里，首先在液态金属中产生一些极小的晶体，它们是结晶的核心，称之为晶核。随着时间的推移，这些晶核朝着不同的方向像树枝生长那样不断长大，成为外形不规则的小晶体，称为晶粒。与此同时，剩余液体中新的晶核又不断产生和长大。如此继续下去，直至液态金属全部消失，晶粒彼此互相接触形成晶界为止。因此，结晶过程就是不断形成晶核和晶核不断长大的过程，如图 1-13 所示。

金属晶粒大小对力学性能影响较大，通常在常温下，金属的晶粒越细，其强度、硬度，尤其是冲击韧性就越高，工艺性能也越好。

金属结晶后晶粒大小主要与下列两个因素有关：

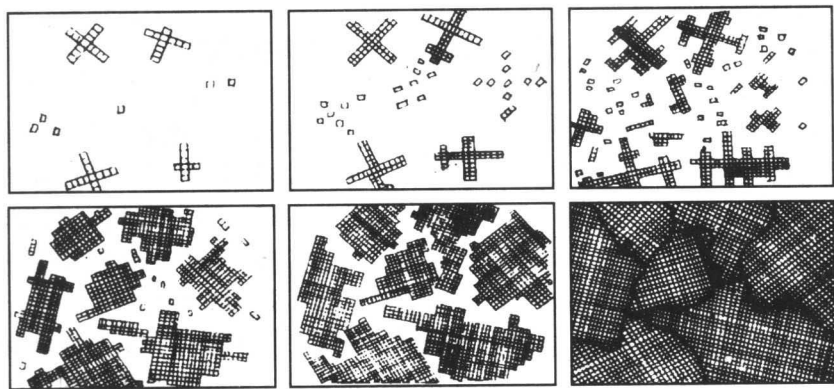


图 1-13 纯金属结晶过程示意图

(1) 成核速率。单位时间在单位体积中所产生的晶核数目，称为成核速率，以符号 N 表示，单位是晶核数/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}$)。成核速率越大，晶粒越细。

(2) 生长速率。晶核在单位时间内生长的线速度称为生长速率，以符号 G 表示，单位是 cm/s 。生长速率越小，晶粒越细。

成核速率 N 与生长速率 G 和过冷度有关，其关系如图 1-14 所示。由图可看出，在过冷度不太大的情况下，成核速率 N 和生长速率 G 都是随过冷度的增加而增加，但是成核速率 N 的增长要快些。因此，增加过冷度能使金属的晶粒变细。图中虚线部分说明当过冷度很大时，成核速率 N 和生长速率 G 随着过冷度的增加而减小。其原因是，在过冷度很大的情况下，实际结晶温度已很低，液体中的原子扩散能力大大降低，因而增加了结晶的困难，使成核速率和生长速率反而降低。

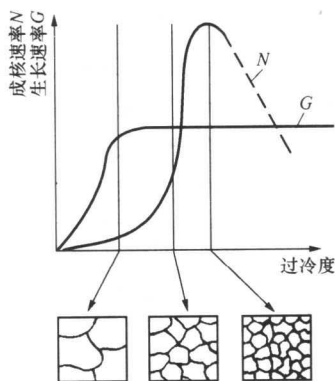


图 1-14 过冷度对生长速率和成核速率的影响

在生产中，增加过冷度能使金属的晶粒变细。因此，通过加快冷却速度可获得比较细小的晶粒组织。但是对于大铸锭或大铸件，要获得大的过冷度和均匀冷却是不易办到的，并且过大的冷却速度往往会导致铸件的开裂而造成废品。因此，在生产中还采用其他方法（如采用向钢液中加入少量的 Al、V、B、Ti 等元素变质处理法，或者采用振动、搅拌等）来达到细化晶粒的目的。

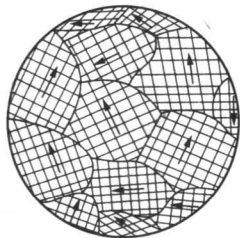


图 1-15 多晶体金属示意图

工业上实际使用的金属材料多数是由许多外形不规则且位向各不相同的小晶体组成，称它为多晶体，如图 1-15 所示。由于多晶体金属材料内部各晶粒的位向不同，致使晶界处原子排列不规则，晶格畸变较大，且杂质容易集中于此，所以，晶界处强度较高、熔点较低、抗蚀性较差。

金属晶粒的大小和形态可通过一定方法制成金属试样后在金相显微镜下观察到。按国家规定，晶粒大小共分为 8 级，1~4 级为粗晶粒钢，5~8 级为细晶粒钢。

(二) 金属的同素异构转变

固态金属随着温度的变化由一种晶格转变为另一种晶格的现象叫做同素异构转变。

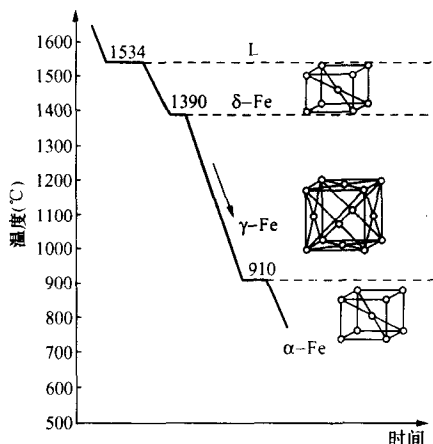


图 1-16 纯铁的同素异构转变

纯铁具有同素异构转变的特性,其转变过程如图 1-16 所示。由图知,纯铁在 1534~1390℃ 之间呈体心立方晶格,称为 δ-Fe;在 1390~910℃ 之间呈面心立方晶格,称为 γ-Fe;在 910℃ 以下呈体心立方晶格,称为 α-Fe。

固态金属的同素异构转变与液体金属的结晶过程相似,也是一个原子重新排列的过程,因此同样遵循生核和核长大的基本规律,并有结晶潜热放出;所不同之处是新品核最容易在原来晶粒的晶界处形成,转变所需的时间较大,转变时会产生较大的内应力。

由于金属的同素异构转变是固态下发生的,转变温度较低,所以它与液态金属的结晶相比,具有一些明显的不同之处,其主要差别在于:

一些明显的不同之处,其主要差别在于:

- (1) 同素异构体的晶核是在原来晶粒的晶界或某些特定部位形成的。
- (2) 同素异构转变具有较大的过冷度。这是由于在固态下原子扩散要比在液态下困难得多,因而结晶进行得较为缓慢。
- (3) 同素异构转变时,晶格的变化会引起金属体积的变化,这往往会产生较大的内应力,而内应力是造成工件变形甚至开裂的重要原因之一。

课题二 铁碳合金状态图

一、合金的基本组织结构

纯金属虽然具有良好的导电性和导热性,在工业生产中获得了一定的应用,但其强度、硬度一般都较低,而且价格较高,所以在应用上受到较大的限制。除了有高导电、高导热等特殊要求外,工程上实际使用的都是合金,而很少使用纯金属。

合金是指由两种或两种以上的金属元素,或金属元素与非金属元素相互熔合在一起所得到的具有金属特性的物质。例如在工业生产中广泛应用的碳钢和铸铁,就是由铁和碳这两种元素组成的合金。组成合金的最基本的独立物质称为组元。例如,普通黄铜就是由铜和锌这两个组元组成的合金。组元一般是指组成合金的元素,有时也可以是稳定的化合物。合金按组元的数目可分为二元合金、三元合金及多元合金,也可根据其组元的名称命名,如铁碳合金、铜镍合金、铝合金等。

合金中具有相同化学成分、相同结晶结构和相同性能的均匀组成部分称为相。相与相之间具有明显的分界面。合金的性能是由组成合金的各相本身的结构性能和各相的组合情况决定的。

合金的强度和硬度一般比组成该合金的金属组元更高,而且各组元的数量和比例能在较

大范围内变动，组合成多种不同成分的合金，以此来调节合金的性能，满足人们提出的各种要求。

大多数合金在液态下，各组元能够互相溶解，形成均匀的溶液。经过冷却结晶成为固态后，由于组成合金的各组元之间相互作用的不同，合金的基本组织结构也就不同。合金的组织结构可分为固溶体、金属化合物和机械混合物等三种类型。

1. 固溶体

固溶体是指组成合金的各组元在固态下仍能相互溶解而形成均匀相。它以某一组元为基体，基体组元保持原有的晶格类型，而其他组元则均匀地溶解分布在基体组元的晶格中，从而形成均匀的固体。基体组元称为溶剂，分布在基体组元晶格中的其他组元称为溶质，其晶格类型消失。固溶体是单相物质，固溶体的晶格与溶剂金属的晶格相同。

根据溶质原子在溶剂晶格中所占据位置的不同，固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体。

(1) 置换固溶体。置换固溶体的特点是溶剂原子和溶质原子大小相近，在形成固溶体时，溶剂晶格上的部分原子被溶质原子所转换，如图 1-17 (a) 所示。大多数合金元素（如镍、铬等）溶入铁中所形成的固溶体都属于这种类型。置换固溶体根据原子转换程度的不同，又分为无限固溶体和有限固溶体，即溶剂原子与溶质能以任何比例相互转换的称为无限固溶体，只能以一定数量相互转换的称为有限固溶体。

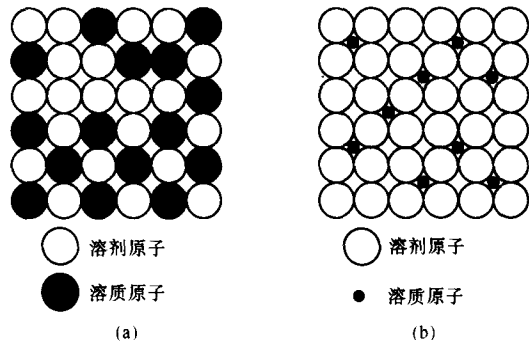


图 1-17 固溶体结构示意图

(a) 置换固溶体；(b) 间隙固溶体

(2) 间隙固溶体。间隙固溶体的特点是溶质原子比溶剂原子小得多，在形成固溶体时，溶质原子分布在溶剂晶格的间隙处，如图 1-17 (b) 所示。由于溶剂晶格的间隙尺寸是非常有限的，所以只有在溶质原子尺寸很小，而溶剂晶格间隙较大的条件下，才能形成间隙固溶体。例如，碳、氮、硼等非金属元素的原子直径较小，它们溶入铁中所形成的固溶体都属于这种类型。间隙固溶体所溶解的溶质数量是有一定限度的。

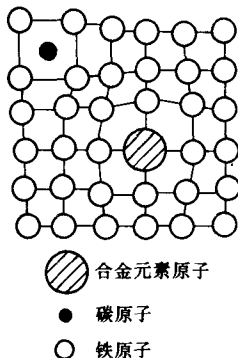


图 1-18 固溶强化示意图

无论是置换固溶体还是间隙固溶体，都因其溶剂中加入了溶质原子而使原有规则性排列遭到破坏，发生晶格畸变。随着溶质原子数目的增加，晶格的畸变程度也就加大。晶格的畸变使晶体平面间的相互滑移变得困难，从而提高了合金抵抗塑性变形的能力。这种由于溶质原子的溶入使固溶体晶格发生畸变从而使固溶体强度和硬度升高的现象称固溶强化。如图 1-18 所示。固溶强化是提高金属材料强度的重要途径之一。我国普通低合金钢就是利用锰、硅等元素为溶质元素，对铁素体进行固溶强化而使其强度提高的。工业生产中广泛使用的高电阻的材料、高电阻的电工材料以及高导磁率的软磁材料等，也都是采用固溶体合金。