

电厂金属材料

《电厂金属材料》编写组

水利电力出版社

电 厂 金 属 材 料

《电厂金属材料》编写组

水 利 电 力 出 版 社

内 容 提 要

本书阐述火力发电厂锅炉和汽轮机机组常用金属材料的化学成分、组织结构和机械性能三者的关系，以及这些金属材料在高温、高压和腐蚀介质作用下长期运行后组织和性能变化的规律。全书共分十章和三个附录。第一至六章着重介绍了常用金属材料的基本知识、金属学和热处理理论；第七至九章着重介绍了高温、高压、大容量的锅炉和汽轮机机组主要零部件用钢及事故分析；第十章介绍了电厂用钢的焊接知识和焊接工艺；附录列举了国内外电厂用钢的钢号对照及电厂常用的金属检验方法。

本书可供锅炉和汽轮机的设计、制造、安装、运行、检修及焊接、热处理、金属监督等人员参考；也可作为高等院校、中等专业学校及七·二一大学锅炉和汽轮机专业的教学参考书。

电 厂 金 属 材 料

《电厂金属材料》编写组

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本, 20¹/₂ 印张 461,760字

1979年5月第一版 1979年5月北京第一次印刷

印数 00001—24560册 每册 2.10元

书号 15143·2417

前 言

电力工业是国民经济的先行工业。

随着电力工业的飞跃发展，火力发电厂中大容量、高参数的锅炉和汽轮机机组逐渐增多，对电厂金属材料的要求也愈来愈高。

由于电厂金属材料多数是在高温、高压和腐蚀介质作用下长期运行，会发生组织和性能的变化，甚至可能引起某些零部件的失效。零部件失效后往往会造成严重事故，直接影响火力发电厂的安全发送电。因此，了解和掌握电厂金属材料在运行过程中组织和性能的变化，正确选用电厂金属材料，以及正确处理零部件失效问题，具有十分重要的意义。

为了普及和提高电厂金属材料的知识，一九七六年五月在华东电业管理局的领导下成立了《电厂金属材料》编写组。编写组广泛征求了各方面的意见，由上海电力专科学校沈立铭、宋琳生、武汉水利电力学院钱昌黔、南京工学院陈天雄、上海机械学院肖文楚、华东电业管理局电力试验研究所励德成、刘琦、吴泾热电厂孙金荣、闸北发电厂李正明等同志分工执笔编写了初稿。初稿付印后，办了一期短训班，试用了这本书稿，并进一步征求了意见，由原执笔人作了修改。最后由宋琳生、钱昌黔、励德成进一步修改后定稿。本书在编写过程中曾得到了许多兄弟单位有关同志的支持和帮助，有些内容和数据直接引自有关书籍和资料，对此，我们表示衷心的感谢。

本书是阐述火力发电厂锅炉和汽轮机机组常用金属材料的化学成份、组织结构和机械性能三者之间的关系；以及这些金属材料在长期运行后，由于外界因素的影响而引起组织和性能变化的规律。

本书共分十章及一个附录。第一章至第六章是金属材料的基础知识，编写过程中我们注意了密切联系火力发电厂的实际来阐述金属学和热处理的基本理论。第七章至第九章是锅炉和汽轮机机组主要零部件用钢介绍及事故分析，重点是介绍用钢的情况，编写时，力求理论联系实际，基础理论和应用技术兼而有之。焊接技术在电厂中的应用十分广泛，第十章介绍了电厂用钢的焊接，以及锅炉和汽轮机机组零部件产生缺陷后的焊接修复工作。附录内容为国内外电厂用钢对照表及电厂常用的金属检验方法，目的是为了便于查对钢号，使火力发电厂的有关人员也能了解电厂常用金属检验方法的一般原理和操作方法。

本书可供锅炉和汽轮机设计、制造、安装、运行和维修人员以及焊接、热处理、金属监督人员参考，也可作为高等院校、中等专业学校及七·二一大学有关专业的教学参考书。

由于执笔者水平不高，错误和不妥当的地方一定不少，请读者批评指正。

《电厂金属材料》编写组

一九七八年十月

目 录

前 言

第一章 金属材料的基础知识	1							
第一节 金属的晶体结构及结晶过程	1							
一、金属的晶体结构	二、纯金属的结晶过程及实际金属晶体中的缺陷							
第二节 金属的机械性能及其试验方法	8							
一、拉伸试验	二、硬度试验	三、冲击试验	四、疲劳试验	五、断裂韧性的概念				
第三节 金属的塑性变形、再结晶及热加工组织	20							
一、金属的变形	二、塑性变形后的金属加热时组织和性能的变化	三、金属的热加工组织及缺陷						
第二章 二元合金相图及铁碳合金	28							
第一节 合金的相结构	28							
一、固溶体	二、金属化合物	三、机械混合物						
第二节 二元合金相图	30							
一、相图的建立	二、相图的分析	三、杠杆定律在相图上的应用						
第三节 铁碳合金中的相	34							
一、纯铁及其固溶体	二、渗碳体(Fe_3C)							
第四节 铁碳合金相图	36							
一、铁碳合金相图中的特性点和特性线	二、典型铁碳合金结晶过程的分析							
第五节 碳素钢	43							
一、碳和常存杂质对钢的组织 and 性能的影响	二、碳钢的分类、编号及用途							
第六节 铸钢及其缺陷	46							
一、偏析	二、缩孔	三、疏松	四、内部气泡	五、皮下气泡	六、翻皮	七、轴心晶间裂纹	八、外来金属	九、夹渣
第七节 铸铁	48							
一、白口铁	二、灰口铁	三、可锻铸铁	四、球墨铸铁	五、其它铸铁				
第三章 钢的热处理	52							
第一节 钢在加热时的变化	53							
一、铁碳合金相图在热处理中的应用	二、奥氏体的形成及其性质							
第二节 奥氏体在冷却时的转变	56							
一、奥氏体的等温转变	二、奥氏体的连续冷却转变							
第三节 钢的退火和正火	67							
一、退火	二、正火							
第四节 钢的淬火和回火	70							
一、马氏体的形态及性能	二、钢的淬透性	三、钢的淬火工艺	四、钢的回火					
第五节 钢的表面热处理	84							
一、表面淬火	二、化学热处理							
第六节 热处理的缺陷及其防止	89							
一、热处理的变形	二、热处理的开裂							

第四章 合金钢	92
第一节 合金元素对钢的影响	92
一、合金元素与铁和碳的作用	
二、合金元素对钢热处理的影响	
第二节 合金钢的分类及编号方法	96
一、合金钢的分类	
二、合金钢的编号方法	
第三节 合金结构钢	99
一、合金结构钢的机械性能	
二、结构钢的热处理	
三、渗碳钢	
四、调质钢	
五、高强度钢	
六、普通低合金钢	
七、弹簧钢	
八、滚珠轴承钢	
第四节 合金工具钢	111
一、切削工具钢(刀具钢)	
二、测量工具钢	
三、模具钢	
第五章 耐热钢	114
第一节 耐热钢的概念	114
一、热力设备的工作特点	
二、对耐热钢的要求	
第二节 耐热钢的高温性能	115
一、高温时钢材强度的特点	
二、蠕变和持久强度	
三、应力松弛	
四、热疲劳	
五、热脆性	
第三节 耐热钢的化学稳定性	126
一、腐蚀的原理	
二、电厂常见的腐蚀类型	
三、提高钢的耐腐蚀性能的方法	
第四节 耐热钢的组织稳定性	132
一、碳化物的球化	
二、石墨化	
三、碳化物的析出和聚集长大	
四、固溶体中合金元素的贫化	
第五节 耐热钢中的合金元素及其作用	139
一、耐热钢的强化原理	
二、耐热钢中合金元素的作用	
第六节 耐热钢的分类	145
一、珠光体耐热钢	
二、马氏体耐热钢和铁素体耐热钢	
三、奥氏体耐热钢	
第六章 有色金属及其合金	147
第一节 铝及其合金	147
一、纯铝	
二、铝合金	
第二节 铜及其合金	150
一、纯铜	
二、黄铜	
三、青铜	
第三节 轴承合金	156
一、对轴承材料的要求	
二、常用的轴承合金	
第七章 锅炉主要设备用钢及事故分析	159
第一节 锅炉受热面管子及管道用钢	159
一、锅炉钢管的工作条件及对材料的要求	
二、锅炉管道材料及其处理	
三、锅炉受热面管子常见事故分析	
第二节 汽包及其它部件用钢	185
一、锅炉汽包的工作条件及对材料的要求	
二、汽包用钢介绍	
三、吹灰器工作特点及用钢	
四、固定零件用钢	
第八章 汽轮机主要部件用钢及事故分析	189
第一节 汽轮机叶片用钢及叶片事故的防止	189
一、汽轮机叶片的工作条件及对材料性能的要求	
二、制造汽轮机叶片的材料	
第二节 汽轮机叶片损坏事故分析及防止措施	203
一、机械疲劳损坏	
二、应力腐蚀和腐蚀疲劳损坏	

第三节 转子用钢	210
一、转子的工作条件及对材料的要求	
二、转子用钢及其热处理	
三、汽轮机转子的事故分析	
第四节 静子部分主要零部件所用的材料及汽缸开裂问题	221
一、静子零部件的工作条件及对材料性能的要求	
二、静子零部件所用的材料	
三、汽轮机转子的缺陷及其修补	
四、汽轮机汽缸的开裂问题	
第五节 高温下工作的紧固件材料	227
一、紧固件的工作条件及对材料的要求	
二、常用的紧固件材料	
三、螺栓的脆断及其防止	
第九章 电厂辅机的磨损	239
第一节 磨损特点及磨损概念	239
一、火力发电厂辅机易损零件磨损的特点	
二、磨损的概念	
第二节 磨损的分类及其基本规律	240
一、咬合磨损	
二、腐蚀磨损	
三、疲劳磨损	
四、热磨损	
五、磨料磨损	
第三节 耐磨合金	245
一、易磨件用钢	
二、耐磨铸铁	
三、堆焊用耐磨材料	
第四节 电厂辅机的磨损及防磨措施	247
一、吸风机和排粉机	
二、磨煤机	
第五节 水泵的磨损	252
一、水泵的汽蚀磨损	
二、水泵的冲蚀磨损	
三、水泵的磨蚀	
第十章 电厂用钢的焊接	255
第一节 焊缝的形成及其显微组织	255
一、电弧焊过程	
二、电焊条	
三、电弧焊的特点	
四、焊接熔池的形成与结晶	
五、低碳钢焊接接头的显微组织	
六、易淬火(合金钢)钢热影响区的显微组织	
七、焊接规范对焊缝质量的影响	
第二节 电厂常用钢材的焊接	262
一、碳素钢的焊接	
二、珠光体耐热钢的焊接	
三、奥氏体不锈钢的焊接	
四、马氏体-铁素体钢的焊接	
五、异种钢的焊接	
六、铸铁的焊接	
第三节 电厂中的检修焊接工作	277
一、汽轮机汽缸裂纹的补焊	
二、汽轮机叶片的补焊	
三、汽轮机叶片表面钎焊硬质合金片	
四、阀门堆焊	
五、等离子喷涂和喷焊工艺简介	
第四节 手工电弧焊的缺陷及其防止	285
一、外观缺陷	
二、未焊透	
三、夹渣	
四、气孔	
五、裂缝	
附录一 化学元素符号表	293
附录二 国内外钢号对照表	294
附录三 电厂常用的金属检验方法	301
第一节 光谱分析	301
一、光谱分析概述	
二、光谱的定性分析	
三、光谱的定量分析	
第二节 无损探伤	304
一、磁粉探伤法	
二、着色探伤法	
三、超声波探伤法	
四、X射线与 γ 射线探伤法	
第三节 金相分析	312
一、宏观检验	
二、显微检验	
第四节 电子显微镜技术	315
一、电子显微镜的原理与构造	
二、电子显微镜复型技术及应用	
主要参考书目	319

第一章 金属材料的基础知识

第一节 金属的晶体结构及结晶过程

一、金属的晶体结构

(一) 金属的特性

金属具有一定的特性，富有金属光泽、可锻、良好的导电性和导热性。它的导电性不仅比非金属大 $10^{20} \sim 10^{25}$ 倍，而且是随着温度的降低而增加，这一点和所有非金属（以及半导体）恰恰相反。金属具有相当高的强度和塑性，还具有某些工艺性能，例如可铸性、可焊性、切削性等。金属为什么具有上述的这些特性呢？首先，应该归根于金属原子构造的特点。此外，也将取决于原子之间的结合以及原子在空间排列的情况。

金属原子结构的特点，是它最外层电子（价电子）的数目少，一般仅有1~3个，价电子与原子核的结合力较弱，容易脱离原子。在固体金属内，正离子按照一定的几何形式规则地排列起来，并在各固定的位置（结点）上作轻微的振动；而脱离了原子的那些价电子则都是以自由电子的形式在各离子间运动，为整个金属所公有，而不是各自固定在各自的原子上，如图1-1所示。金属固体就借这些离子与自由电子间的引力被结合在一起。这种金属原子的结合方式，叫金属键。这种结合模型解释了金属的一些特性。例如金属具有塑性，这是因为金属内部原子作一定程度的相对位移时，正离子和自由电子仍能保持结合。又如金属的导电性，是因为金属中有自由电子，在一定的电位差下可作定向运动。在金属通过电流时，自由电子撞击了正离子，加剧了正离子的振动，使金属温度升高。反过来，温度上升时，加剧振动的正离子又阻碍了自由电子的流通，这就说明了温度升高金属电阻也增加的道理。

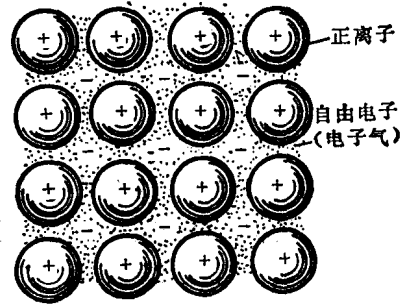


图 1-1 金属键示意图

(二) 纯金属晶体结构的基本类型

用X射线的分析方法可以知道金属是一种晶体，就是说在固体时金属内部的原子总是作周期性的规则排列，如图1-2(1)所示。为了便于分析各种晶体中原子排列的规律性，可以用假想的线条将各原子的中心连接起来，使之构成一个空间格子，叫做晶格，如图1-2(2)所示。此时各原子都是位于该假想空间格子的结点上。为了简便起见，通常取晶格中一个最基本的，能代表其结构特征的单元即“晶胞”来描述晶体结构，如图1-2(3)所示。晶胞的各边尺寸—— a 、 b 、 c ，称为“晶格常数”，其大小是以埃（ \AA ）为单位来度量（1埃= 10^{-8} 厘米）。晶体是由晶胞堆砌而成的。

绝大多数的金属具有下列三种之一的晶体结构，即面心立方结构、体心立方结构、密

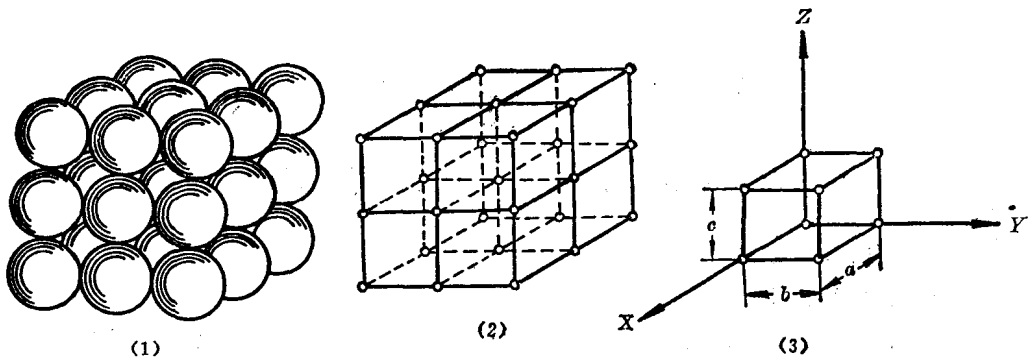


图 1-2 简单立方晶格

(1)晶体中金属原子的排列；(2)金属的晶格；(3)晶胞及晶格常数的表示方法

排六方结构。最常见的是面心立方和体心立方两种结构。

1. 面心立方结构

如图 1-3 所示，晶胞中每一个角上和面上都有一个原子，角上的原子为 8 个晶胞所共有，面上的原子为 2 个晶胞所共有。因此，属于每个晶胞的原子数应为 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ 个。

结构中最近的原子中心之间的距离就是原子直径 (d)。面心立方的边长 a 为晶格常数，则 $d = \frac{\sqrt{2}}{2} a$ 。

属于面心立方结构的金属有铜、铝 γ 铁、镍、金、银等。大多数金属在形成固体后只有一种晶体结构，但少数金属在不同温度时，它的晶体结构会不同。纯铁在 $910 \sim 1390^\circ\text{C}$ 间为 γ 铁，属于面心立方结构。

2. 体心立方结构

如图 1-4 所示，在晶胞的角上和中心处各有一个原子，角上的原子为 8 个晶胞所共有，中心处的原子为晶胞所独占。所以每个晶胞的原子数为 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 个。在体心立方晶格中，立方体对角线上的原子是互相接触的，因此原子直径 $d = \frac{\sqrt{3}}{2} a$ (a 为体心立方晶格常数)。

属于体心立方结构的金属有钨、钨、钨、 α 铁等。纯铁在 910°C 以下为体心立方结构的 α 铁。

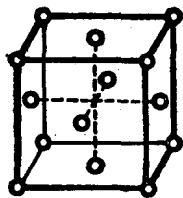


图 1-3 面心立方结构

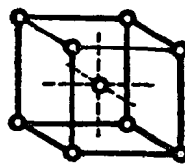


图 1-4 体心立方结构

3. 密排六方结构

如图1-5所示，晶胞是六方柱体形状。六方柱体的12个角上各有一个原子，顶面、底面的中心各有一个原子，晶胞体内对称的位置有三个原子。属于每个晶胞的原子数应为

$$\frac{1}{6} \times 12 + 3 + \frac{1}{2} \times 2 = 6 \text{ 个。}$$

属于密排六方结构的金属有镉、锌、镁等。

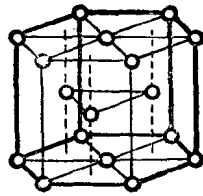


图 1-5 密排六方结构

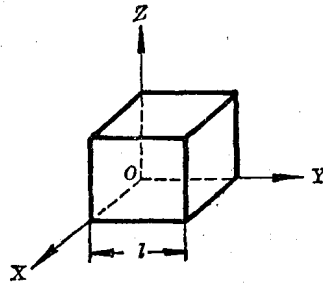


图 1-6 立方晶胞的坐标

(三) 晶面及其表示法

晶面就是晶胞中原子所组成的平面。晶体中有各种位向的晶面。为了研究方便，引入晶面指数或称晶面符号。

立方晶胞的晶面指数可按下列步骤确定：

- (1) 选立方晶胞的某一顶点作为原点 O ，以互相垂直的三个棱边为三个坐标轴 X 、 Y 、 Z ，如图1-6所示，并把晶胞的棱边长度 l 视为1；
- (2) 求出特定晶面在三个坐标轴上的截距并取其倒数；
- (3) 将三个倒数化为最小的简单整数，并加上圆括号。它代表一族平行的平面。

图1-7为体心立方晶胞中的几个晶面。它按照上述三个步骤所求得的晶面指数分别为：
(010)、(110)、(111)、
(211)。

在研究金属晶体中，会用到所谓晶面族的概念。在同一个“晶面族”中，它包括晶体内那些指数相同并互相平行的晶面，以及那些虽不互相平行，但其原子排列情况相同，在空间位向性质也完全相同的所有晶面。晶面族以带大括号的指数表示，如 $\{111\}$ 。

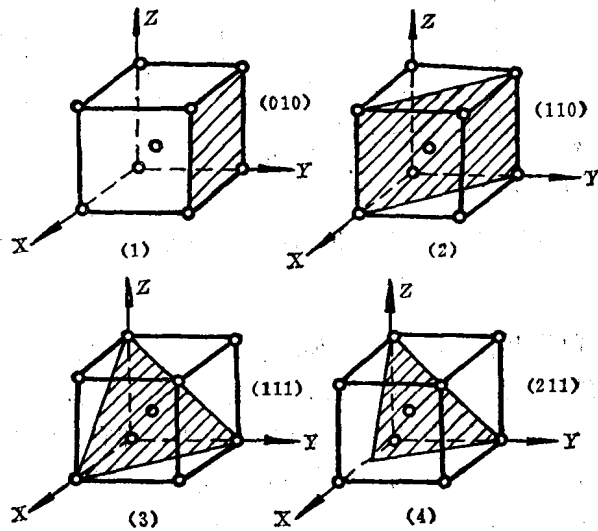


图 1-7 体心立方晶胞中的几个晶面和晶面指数

(四) 晶向指数

为了分析晶体在不同方向上性能的差异,就要用到晶向这个概念。晶向是指晶体中任意两个原子之间的连线所指的方向,以晶向指数表示,立方晶胞的晶向指数求法如下:

- (1) 先将晶胞平行地移至坐标原点;
- (2) 求出该晶向上距原点最近原子中心的坐标,即在 X 、 Y 、 Z 轴的投影截距;
- (3) 把三个截距化为简单整数,并加上方括号。

例如,按照上述的三个步骤分析图1-8中 OA 、 OB 、 OC 、 OD 的晶向指数,可以算出分别为: $[111]$ 、 $[110]$ 、 $[100]$ 、 $[102]$ 。

与晶面相似,凡具有相同性质,但在空间不平行的同一类型的晶向,以符号 $\langle \rangle$ 表示之,例如 $\langle 111 \rangle$ 。

密排六方晶胞的晶面指数和晶向指数是以四个坐标表示的,限于篇幅,本书不再介绍。

二、纯金属的结晶过程及实际金属晶体中的缺陷

(一) 纯金属的结晶过程

液态金属冷却至熔点以下,转变为固态晶体的过程称为结晶。纯金属的结晶是在一个恒定温度——凝固点下进行的。金属的熔点(或凝固点)可用热分析等实验方法来测定。热分析法是将金属熔化后保温适当时间然后在极缓慢条件下冷却,测量温度随时间的变化,画出冷却曲线,如图1-9(1)所示。

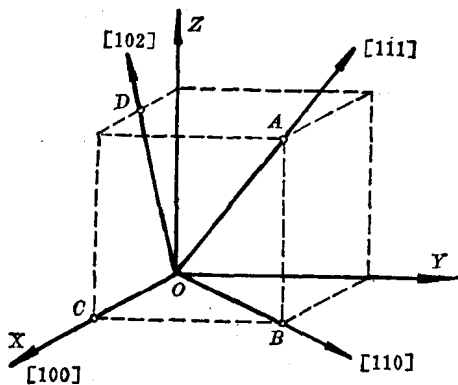


图 1-8 立方晶胞中的晶向和晶向指数

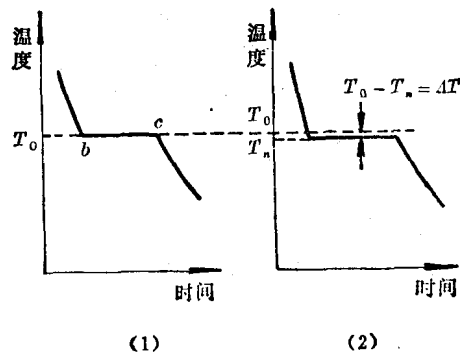


图 1-9 纯金属的冷却曲线示意图

(1) 极缓慢冷却; (2) 较快冷却

曲线上有一段水平线 bc ,它的温度 T_0 就是金属的熔点。金属从液态凝固成固态时放出潜热,因此温度不降落。在 b 点金属开始凝固,到 c 点金属凝固完毕。

实际金属的结晶过程要在熔点以下,即有一定的过冷度条件下才能进行,如图1-9(2)所示。图中 T_0 为平衡结晶温度, T_n 为实际结晶温度, $T_0 - T_n = \Delta T$ 为过冷度。冷却速度越大,过冷度也越大。

结晶是一个成核和长大的质变过程。在这个过程中,不断从原有液相(母相)中萌芽

出固相（新相）的核心，其它原子即在晶核上排列、长大，同时又在剩余液相中继续出现核心和长大……。成核和长大交迭地充满着整个过程，直至液相消耗完毕。从一个晶核上继续长大直到与相邻的晶核相遇时终止，它们的边界就是晶界。这样就形成多晶体。结晶过程如图1-10所示，从图1-10（1）液相结晶至图1-10（7）固相，图中黑色表示液相，白色表示结晶的固相。从一个核心上长出的叫一颗晶粒。金属经特殊方法可做成单晶体。单晶体在不同方向上的性质是不一样的。但通常得到的是多晶体，因为晶粒数目很多，各晶粒的方向又不相同，所以它在各方向上的性质基本上是相同的。

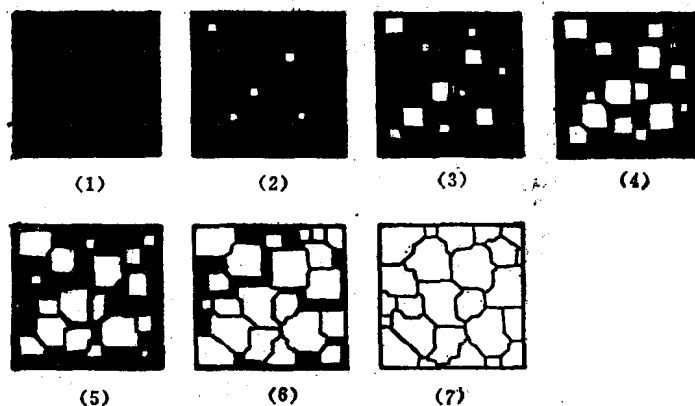


图 1-10 结晶时的成核及长大过程示意图

结晶就是原子从不规则排列状态（液态）过渡到规则排列状态（结晶状态）的过程。实际上，液态原子的排列并非完全没有规则，而是存在着所谓近程有序，即在许多微观小体积内可以存在着规则排列。

根据X射线衍射实验证明，液态金属中存在着许多类似晶体的小集团。集团内的原子排列较规则。在熔点以上，这些小集团是不稳定的，时而形成，时而消失，此起彼伏。在温度低于熔点时，这些胚芽的一部分便成为稳定的核心，成长为晶粒。晶粒大小与成核速率 N 及生长速率 G 有关。成核速率越大，生长速率越小，则晶粒越细。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，如图1-11所示。随着过冷度的增加，晶粒变细。因此，通过快速冷却有利于获得细晶粒的铸态组织。

在很大的过冷度下，成核速率 N 和生长速率 G 反而会下降，这是由于温度太低时原子扩散能力降低，而限制了结晶的速度。对于金属及合金从液态凝固时，不可能达到这样大的过冷度。

在常温下，细晶粒金属的强度、塑性、韧性都

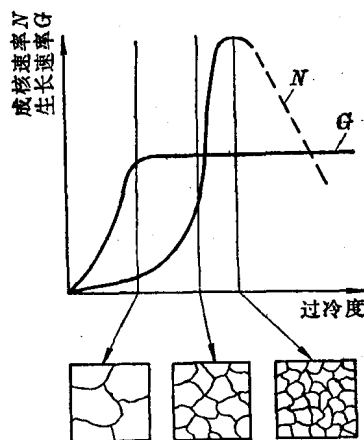


图 1-11 金属结晶时的成核速率和生长速率与过冷度的关系

较好。高温时，细晶粒的热强性较差。

以上是在液相的某一微小体积中直接产生晶核，称为自发性成核。另一种晶核是在液相中的外来固体粒子的表面（如模壁、液相中的杂质颗粒、氧化膜等）上形成，称为非自发性成核。实际生产中往往有意地加入成核剂（又称变质剂），促使非自发性成核，以细化晶粒。

（二）实际金属晶体中的缺陷

前面讲的金属晶体内部的原子作有规则的排列，是理想晶体的情况。实际金属晶体中，存在着缺陷。这些缺陷的存在，影响着金属的性能。根据晶体缺陷存在形式的几何特点，通常将它们分为：点缺陷、线缺陷及面缺陷三类。

1. 点缺陷

点缺陷是指长、宽、高尺寸都很小的一种缺陷。它包括两种主要形式：晶格空位、间隙原子和外来原子（或称异类原子）的溶入。

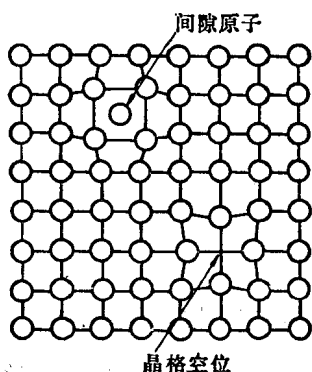


图 1-12 点缺陷示意图

金属原子的热振动是造成点缺陷的原因。在晶体中，金属原子是以其平衡位置为中心而进行着不停的热振动。温度越高，振动的频率与振幅也越大。但各个原子的振动能量不是均等的。因此，在某一瞬间，当某一原子具有足够大的能量时，它就可能克服周围原子对它的作用，脱离其原来占据的平衡位置而形成空位，如图 1-12 所示。脱离的原子可能到晶体表面，也可能到其它的空位；还可能到点阵中的某些间隙位置上，形成“间隙原子”。形成空位后，其周围的其它原子发生靠拢现象；而处在间隙原子周围的原子晶格则会发生撑开现象，使晶格产生畸变。

异类原子或外来原子是指杂质原子或合金元素的原子。当异类原子占据金属晶体的结点时，常称为置换原子；但如果异类原子的直径甚小时，它将存在于晶格的间隙中，称为间隙原子。

2. 线缺陷

线缺陷是在晶体的某一平面上，沿着某一方向，伸展开来呈线状的缺陷。这类缺陷的主要形式是各种类型的位错。位错最简单的一种类型称为“刃型位错”。

在一个完整晶体的某一个晶面 [如图 1-13 (1) ABC 面] 以上，于某处 (E 处) 沿 EF 线被垂直的插入了一个“多余的”原子面，由于这多余的原子面象刀刃一样的切入，便使晶体中位于 ABC 面上下的两部分晶体间产生了错排现象。因此而得名“刃型位错”。 EF 线叫“位错线”。图 1-13 (2) 中，“ \perp ”表示位错线，表示上部多一排原子；同样，假如下面多一排原子，位错线用“ T ”表示。晶体中的位错，可通过薄膜透射电镜进行观察。

由于位错线的存在，使得金属晶体在受力而产生移动时，不必使整个原子面同时移动，而是位错线发生移动。使一根位错线发生运动的力，要比使整个原子面同时滑动所需

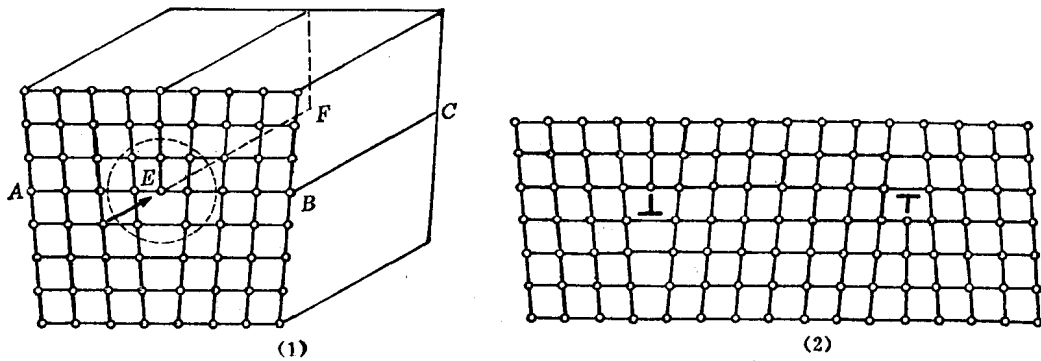


图 1-13 刃型位错示意图

的力小得多。如果我们能设法使晶体中没有位错，我们就可使金属的实际强度提高数十倍到数百倍。但这仅仅是一种设想，实际上是很难办到的。一般在金属晶体中，总是有大量的位错存在。

晶体中的位错不是越多就越不好。当晶体中有大量的方向不同的位错存在时，由于其互相交错，使位错彼此牵制不易受力而发生移动，金属的强度反而会因位错的增多而增大。金属的实际强度与其位错密度的关系如图1-14所示。位错密度将随着许多外界条件(如受力、加工、热处理等)的变化而经常会发生变化。

3. 面缺陷

一般金属材料都为多晶体，由许多不同位向的晶粒所组成。由于各晶粒位向不同，故在它们相互交接处形成晶粒间界，简称晶界。晶界处原子排列与晶粒内不同，它们因同时受到相邻两侧晶粒不同位向的综合影响，不能作有规则排列。晶界是晶体中一种重要的面缺陷。晶界与晶内有不同的特性。晶界比晶内容易被腐蚀，熔点也比晶粒内低，原子扩散速度较快。在常温下，晶界不易产生塑性变形，晶界的强度和硬度较晶内为高。但是，在高温下晶界强度较晶内为低。

以上讨论的晶界，在相邻晶粒间的位向差一般大于 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，就称为大角度晶界。生产实践与科学实验证明，在实际金属晶体的一个晶粒内部，其晶格位向也并不是象理想晶体一样完整无缺，而是由许多位向相差很小(通常由几十分到 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 之间)的小晶块所组成。这些小晶块称为亚结构(或称亚晶，也有称嵌镶块)。在亚结构内部，原子排列位向一致。两相邻亚结构的边界称为亚晶界，它附近的原子排列不规则。亚结构尺寸大小与金属加工条件有关。在铸态中较大，经加工变形或热处理后则细化。亚结构在光学显微镜下很难显示，在电子显微镜下可清晰观察到。晶粒大小一定时，亚结构越细，屈服强度也就越高。

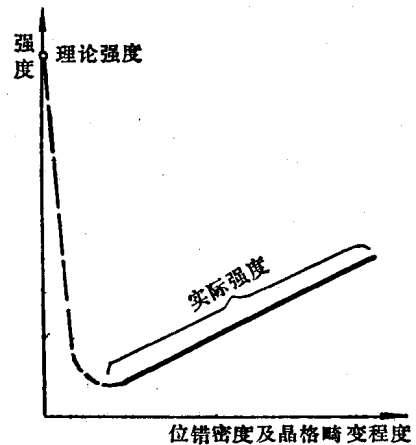


图 1-14 金属的强度与位错密度及晶格畸变程度的关系

第二节 金属的机械性能及其试验方法

金属的机械性能是指金属材料所制成的零部件，在机械载荷作用下所表现出来的抵抗失效损坏的能力。机械载荷就是指外力，所以机械性能又称为“力学性能”。机械载荷视外力作用的形式不同，可分为：静载荷、冲击载荷和交变载荷等。锅炉设备中的零部件，有些基本上处于变动不大的载荷下工作的，可视为静载荷；有些可能要受到一定的冲击载荷。汽轮机设备中的轴、叶轮和叶片等零部件则是受到一个按周期性改变方向的交变载荷。由于外力的性质不同，因此金属材料所表现出来的抗失效能力的特点也不相同。一般所说的机械性能包括：强度、塑性、韧性、硬度和疲劳强度等。

强度是指金属材料抵抗变形和破坏的能力。

塑性是指金属材料在外力作用下产生永久变形的能力。

韧性（通常又叫冲击韧性）是指金属材料抵抗冲击载荷的能力。

硬度是指金属材料抵抗压入物压陷能力的大小，是金属材料表面的局部区域内抵抗塑性变形和破坏的能力。

疲劳强度是指金属材料抵抗交变载荷所引起的变形和破坏的能力。

金属材料的机械性能是通过试验方法测定出来的。最常用的试验方法有：拉伸试验、硬度试验、冲击试验和疲劳试验等。必须指出，金属材料在高温状态下受到载荷作用后所表现出来的抗失效能力与在常温条件下的抗失效能力是不一样的，这个问题在讲耐热钢时再讨论。这里介绍的是金属材料常温的机械性能及其试验方法。

一、拉伸试验

将金属材料做成一定形状和尺寸的试样，在单向静拉力作用下，使其从变形到最后破坏，了解并测定金属材料的弹性、强度和塑性等性能，这种试验方法叫做拉伸试验。

（一）拉伸试验方法及拉伸图

拉伸试验是在专门的拉伸试验机上进行的。试样在受力拉伸的过程中，可以根据刻度盘的指针读出试样所受的载荷。通常使用的拉伸试验机都有自动记录装置，自动记录在试验过程中试样所受载荷及相应的变形量。

常用的标准试样截面是圆的，有长试样和短试样两种， $l_0 = 10d_0$ 的试样叫长试样， $l_0 = 5d_0$ 的试样叫短试样。 d_0 是试样的直径， l_0 是试样的标长，即计算用的标距长度。

为了使实验的结果便于比较，试验设备的技术要求、测试的方法、试样的尺寸在国家标准中均有详细的规定。

试验时将试样装到试验机上后，对试样施加一个缓慢增加的单向拉伸载荷 P ，观察由于载荷 P 的作用而引起试样的变形和断裂的过程，如图1-15所示。

在加载荷的过程中，试样在等剖面的一段长度内产生均匀的伸长，不同的拉伸载荷 P 值就有不同的伸长量（即变形量 Δl ），而截面逐渐收缩。当拉伸载荷 P 达到一定值时，试样产生缩颈现象，最后在缩颈处断裂。

将试验的结果绘成以绝对伸长 Δl 为横坐标，拉伸载荷 P 为纵坐标的拉伸图，如图1-16

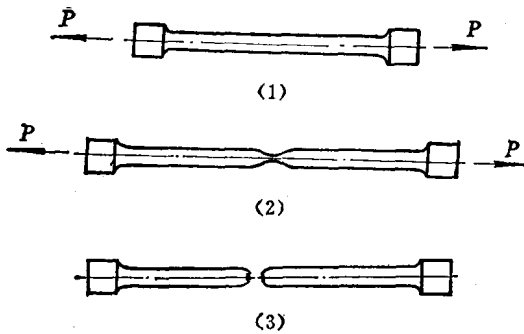


图 1-15 试样拉伸过程示意图

(1) 加载荷, (2) 加载后逐渐变形并产生了缩颈, (3) 断裂

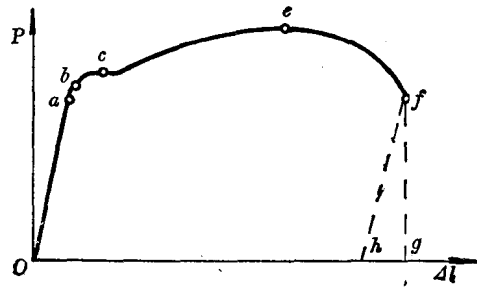


图 1-16 低碳钢的拉伸图

所示。

载荷 P 与变形量 Δl 的拉伸图与试样尺寸有关。因为在同样大小的载荷作用下, 试样越长, 横断面面积越小, 则所得的绝对伸长也就越大。为了使图线不受试样尺寸的影响, 以便作比较, 可改为横座标以应变 $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ 来表示, 纵座标以应力 $\sigma = \frac{P}{F_0}$ 公斤/毫米² 来表示, l_0 是试样的标长, F_0 是试样的横断面面积, $F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$ 。这样就将原来的拉力伸长拉伸图变换成应力应变拉伸图, 如图 1-17 所示。

(二) 拉伸图上的强度特性点

从低碳钢应力应变拉伸图中可以看出有一些特性点, 这些特性点可以说明低碳钢的一些特性。

1. 比例极限

图中 a 点称比例极限点。 oa 段是直线, 说明在这个范围内, 应力、应变成正比例。与 a 点相对应的应力值称为比例极限, 用 σ_p 表示。

$$\sigma_p = E\varepsilon_p$$

式中 σ_p ——比例极限 (公斤/毫米²);

E ——弹性模量 (公斤/毫米²);

ε_p —— a 点的应变值。

弹性模量也可称为弹性模数, 从上式可以看出它是一个常数, 是 oa 线段上任何一点所对应的应力与应变的商值, 即 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$; 也是 oa 线段的斜率 (倾角的正切) $E = \operatorname{tg} \alpha$ 。

金属材料的 E 值越大, 说明在一定的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和晶格常数。合金化、热处理、冷热加工等均可改变机械性能, 但对晶格常数变化的影响较小, 所以弹性模量 E 是金属材料最稳定的性质之一。钢在室温下的弹性模量 E 大都在 19000~22000 公斤/毫米² 范围内, 但随着温度升高, E 逐渐降低。机器零

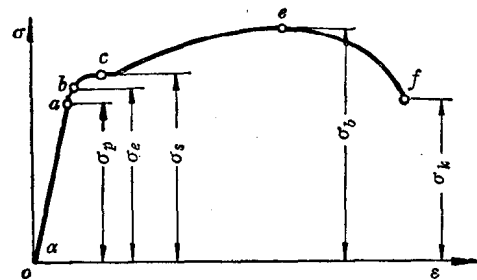


图 1-17 低碳钢的应力应变拉伸图

件在使用过程中大都处于弹性状态。对于要求弹性变形较小的零件，如汽轮机的主轴和叶片等，应选用大的弹性模量。

2. 弹性极限

与 a 点非常接近的另一特性点 b ，称为弹性极限点。与 b 点相应的应力值称为弹性极限，用 σ_e 表示。如外加应力比 σ_e 低时，试样只产生弹性变形。 σ_e 可理解为塑性变形刚要出现而尚未出现时的应力值。在 b 点之前的 ob 线段上任何一点均表示将载荷卸除后，试样就能恢复到原来的长度。实际上， σ_e 很难测定，通常认为塑性变形达某预定数值（例如 $0.001 \sim 0.005\%$ ）时的应力称为弹性极限。

因 a 点与 b 点距离很近，在一般情况下，可以认为 a 点与 b 点重合。

3. 屈服极限

过了 b 点后，曲线弯曲到 c 点，这一段曲线几乎水平，这表示应力未增加（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，叫做“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。

金属材料是从弹性变形逐渐过渡到塑性变形的，所以不少金属材料的 c 点不明显。为了确定各种材料的屈服极限，工程上规定产生了一定值的塑性变形（ $0.1 \sim 0.5\%$ ，通常为 0.2% ）时的应力称为“条件屈服极限”，常用 $\sigma_{0.2}$ 表示。求 $\sigma_{0.2}$ 的方法是在横座标上找出试样的应变量为 0.2% （即 $\frac{\Delta l}{l_0} = 0.002$ ）的点 k ，通过 k 作与 oa 平行的一条平行线 ck ，

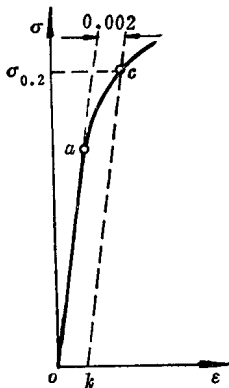


图 1-18 求材料条件屈服极限的方法

此平行线与应力应变曲线的交点 c 所对应的应力 $\sigma_{0.2}$ ，即为该材料的条件屈服极限，如图 1-18 所示。

屈服极限是最重要的机械性能指标之一，是设计和选用锅炉汽包、汽轮机紧固件等零部件的主要依据。

4. 强度极限

过了 c 点，由于产生塑性变形后金属材料硬化，增加了抵抗变形的能力，因而曲线又开始上升，到达 e 点，应力达最大值。与 e 点所对应的应力值 σ_b ，称为强度极限或称抗拉强度。

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条件下工作，因为这样会很快导致破坏。

过了 e 点后，曲线又开始下降，此时变形基本上集中于试样某一最弱的地方，在那里出现收缩，称为缩颈。出现缩颈后继续拉伸，收缩现象越来越严重，到 f 点就断裂。由于试样局部断面面积急剧地减少，使试样继续伸长变形所需的拉力也就越来越小，所以在图中自 e 点至 f 点的曲线段是逐渐下降的。但是实际上，若按缩颈的断面面积来计算，应力还是一直在增加的。