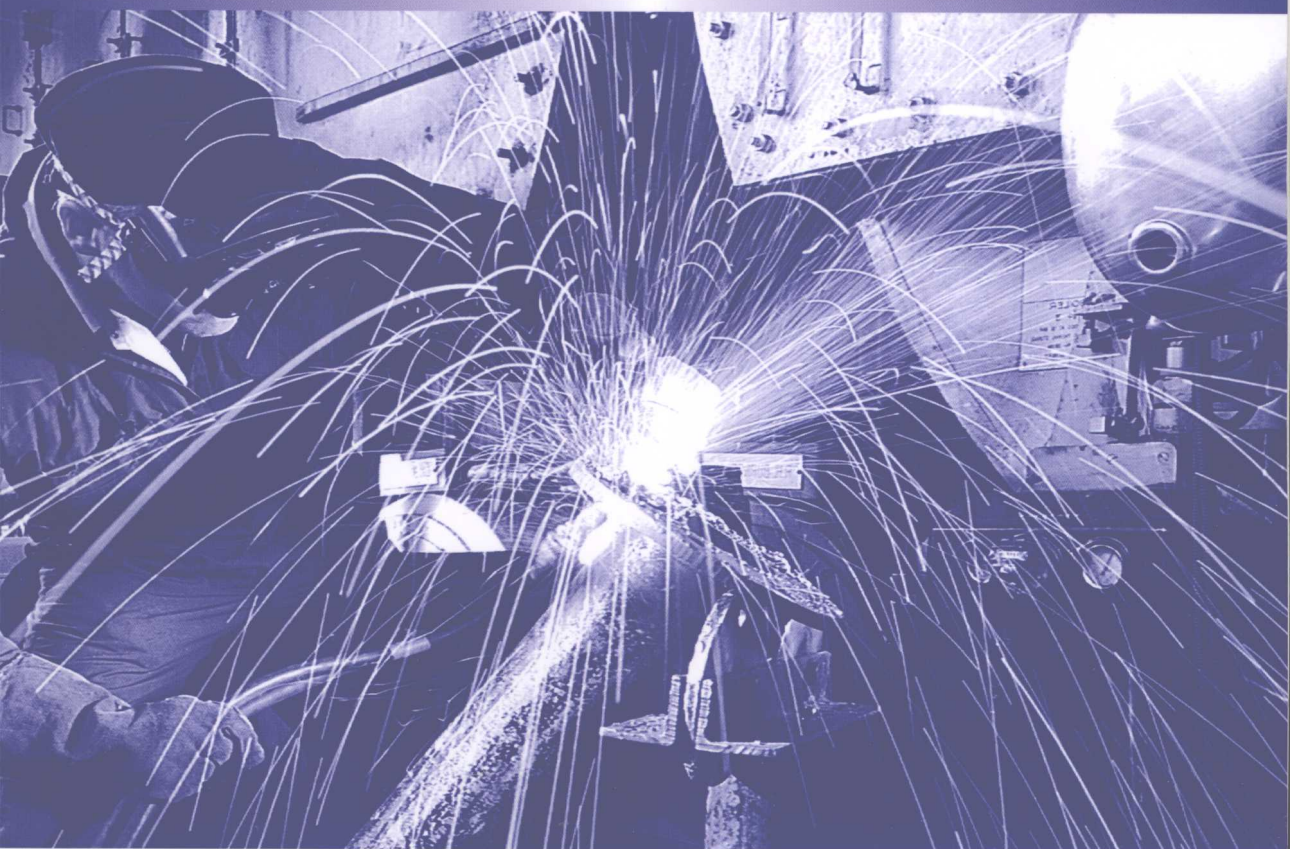


大型电站锅炉 耐热材料与焊接

张磊 夏洪亮 编著



化学工业出版社

大型电站锅炉耐热材料与焊接

张 磊 夏洪亮 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要介绍了大型锅炉的基本知识、金属结构和钢材的基础知识、焊接材料、焊接设备、常用焊接方法、焊缝与接头形式及其表示方法、焊接接头组织和性能及其影响因素、焊接变形与焊接应力、常用金属材料的焊接、焊接缺陷、焊接安全技术等内容。内容涵盖了近年来一些焊接专家对超（超）临界火电机组耐热材料的焊接最新研究成果以及电力建设部门超（超）临界机组焊接施工经验。

本书可作为特种设备焊工，特别是超（超）临界电站锅炉焊接人员的培训教材，也可供相关行业的管理人员和技术人员阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

大型电站锅炉耐热材料与焊接/张磊，夏洪亮编著. —北京：
化学工业出版社，2007.11
ISBN 978-7-122-01339-2

I. 大… II. ①张…②夏… III. ①火电厂-锅炉-耐火材料
②火电厂-锅炉-焊接 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 160810 号

责任编辑：郑宇印 戴燕红
责任校对：宋 玮

文字编辑：项 激
装帧设计：潘 峰

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 刷：北京永鑫印刷有限责任公司
装 订：三河市延风装订厂
720mm×1000mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 349 千字 2008 年 1 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：49.00 元

版权所有 违者必究

前 言

大型电站耐热材料具有良好的力学性能、耐高温性能、耐蚀性能以及抗蠕变性能,在工作环境比较恶劣的环境下能够保证设备的稳定运行,但该材料的焊接性能差,工艺要求难度大。人们针对其特点提出了合理的焊接工艺措施,并已将其应用于锅炉受热部件的制造中,产品运行可靠。本书概述了我国用于超(超)临界锅炉的新材料的成分及性能,简述了对新材料焊接接头的基本要求和焊接工艺要点。

超(超)临界锅炉由于温度及压力的提高,对主要部件的抗蠕变、疲劳、高温氧化与腐蚀性能等都提出了更苛刻的要求。目前,在超(超)临界锅炉主要部件的制造中,除选用亚临界锅炉常规选用的 SA335P91(SA-213T91)、SA213TP304H、SA213TP347H 等材料外,还选用了一些高温蠕变性能、高温抗氧化性能更好的新型材料,如 SA335P92(SA213T92)(9Cr-2W)、SA335P122(SA213T122)(12Cr-2W) 等新型马氏体钢和 SUPER304H(18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N)、SA213TP347HFG(18Cr-10Ni-Nb)、SA213TP310HCbN(25Cr-20Ni-Nb-N)、XA704(18Cr-9Ni-2.5W-NbVWN)、TEMPALLOY A-1(18Cr-8Ni-Nb-Ti)、TEMPALLOY AA-1(18Cr-9Ni-3Cu-Nb-Ti)、TEMPALLOY A-3(22Cr-15Ni-Nb-N) 等。

本书由山东省电力学校张磊和夏洪亮编写,第一章~第三章由夏洪亮编写;第四章~第七章由张磊编写。

在本书编写过程中,山东省电建一公司邹县电厂四期项目经理付深清等提供了大量资料,对此表示由衷的感谢。由于编者水平有限且时间仓促,不妥之处在所难免,望广大读者批评指正。

编者

2007 年 7 月

目 录

第一章 金属材料	1
第一节 金属材料的基础知识	1
第二节 铁碳合金	11
第三节 钢的热处理	22
第四节 合金钢	27
第五节 耐热钢	34
第二章 电站锅炉压力容器焊接知识	44
第一节 焊接的基本知识	44
第二节 焊接接头的组织和性能	49
第三节 焊接应力与变形	58
第四节 焊接缺陷及检验	63
第五节 电站锅炉压力容器焊接材料及其选用	74
第六节 焊接安全技术	84
第七节 电焊弧光防护安全技术	89
第八节 金属烟尘和有害气体防护安全技术	91
第九节 电站锅炉常用钢材的焊接	95
第三章 电站锅炉主要部件的失效	108
第一节 锅炉运行基本工况	108
第二节 失效分析的意义和作用	109
第三节 电站锅炉主要部件的失效形式	113
第四节 失效分析的主要方法和主要设备	123
第五节 失效分析的步骤	132
第六节 锅炉主要部件的失效	135
第四章 电站锅炉主要部件材料的监督及评估	144
第一节 火力发电厂的金属监督	144
第二节 汽包评估实例	151
第五章 超（超）临界锅炉承压部件材料	158
第一节 超（超）临界锅炉承压部件材料概述	158
第二节 超（超）临界锅炉承压部件材料发展	160
第三节 超（超）临界锅炉承压部件材料性能及应用	163

第四节	超（超）临界火电机组四大管道	179
第六章	超（超）临界机组锅炉新型耐热钢的焊接	185
第一节	概述	185
第二节	超（超）临界机组锅炉用新型马氏体耐热钢的焊接	189
第三节	超（超）临界机组锅炉用新型奥氏体耐热钢的焊接	194
第四节	超（超）临界机组锅炉用新型铁素体耐热钢的焊接	210
第五节	我国电站焊接技术发展中需要研究的若干问题	231
第七章	T92 钢的焊接	237
第一节	概述	237
第二节	P92 钢焊接性分析及试验	240
第三节	SA335P92 钢的焊接工艺试验	245
第四节	P92 钢焊接工艺评定	251
第五节	有关思考	260
参考文献		262

第一章 金属材料

第一节 金属材料的基础知识

一、金属材料的性能

(一) 金属材料的工艺性能

金属材料适应冷热加工的能力称为加工工艺性能,简称工艺性能。工艺性能好的材料易于加工,生产成本低;工艺性能差的材料在加工时工艺复杂、困难,不易达到预期的效果,生产成本也高。

1. 铸造性能

各种机械设备的底座、汽轮机、发电机的机壳、阀门、磨煤机的耐磨件等基本上都是通过冶炼、铸造而得到的。液体金属浇注成形的能力称为金属的铸造性能,它包括流动性、收缩率和偏析倾向等。

2. 锻造性能

重要零件的毛坯往往要经过锻造工序,如汽轮机、发电机的主轴、轮毂、叶片,大型水泵和磨煤机的主轴、齿轮等。材料锻压成形的能力称为材料的锻造性能,也称为可锻性。

金属的锻造性能可用金属的塑性和变形抗力(强度)来衡量。金属承受锻压时变形程度大而不产生裂纹,其锻造性能就好。

金属的锻造性能取决于材料的成分、组织及加工条件。

金属的冷热弯曲性能也取决于材料的塑性和强度。材料弯曲而不出现裂纹的能力称为弯曲性能。一般用弯曲角度或弯心直径与材料厚度的比值来衡量弯曲性能。

电厂锅炉管道弯头和输粉管道弯头是经过冷热弯曲成形的。

3. 焊接性能

金属材料采用一定的焊接工艺、焊接材料及结构形式获得优质焊接接头的能力,称为金属的焊接性。

在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、管道、风管、汽包、联箱等。

金属的焊接性能主要取决于材料的化学成分,也取决于所采用的焊接方法、焊接材料(焊条、焊丝、焊药)、工艺参数和结构形式等。

衡量一种材料的焊接性,需要做焊接性试验。

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。一般将合金元素对焊接性的影响折算成碳的影响,即为碳当量。其计算公式为:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1-1)$$

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

当 $C_{eq} < 0.4\%$ 时,焊接性优良,可不预热; $C_{eq} = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时,焊接性较差,焊接时需采用适当预热等工艺措施; $C_{eq} > 0.6\%$ 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。

4. 切削性能

金属材料承受切削加工的难易程度称为切削性能。

金属的切削性能与材料及切削条件有关,如纯铁很容易切削,但难以获得较高的光洁程度;不锈钢可在普通车床上加工,但在自动车床上却难以断屑,属于难加工材料。通常,材料硬度低时切削性能较好,但是对于碳钢来说,硬度如果太低容易出现“粘刀”现象,光洁程度也较差。一般情况下,金属切削加工时的硬度在 $170 \sim 230HB$ 为宜。

(二) 金属材料的力学性能

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以及接受变形的能力。

1. 强度和塑性

强度是衡量材料在外力作用下抵抗塑性变形或断裂的能力。塑性是衡量材料在外力作用下的变形能力。

拉伸试验是测定强度和塑性的最普遍方法,该试验依据国家标准(目前通用的标准为 GB/T 228—2002)进行,将材料制作成标准试样或比例试样,在万能试验机上沿试样轴向缓慢施加拉力,试样随拉力增加而变形,直至断裂,可测得材料的弹性极限、屈服点、强度极限及塑性等主要力学性能指标。

(1) 拉伸试样 如图 1-1 所示。

(2) 拉伸曲线 拉伸曲线表示试样拉伸过程中力和变形的关系,可用应力-断后伸长率曲线表示,纵坐标为应力 R , $R = F/S_0$, 横坐标为断后伸长率 ϵ , $\epsilon = \Delta L/L_0$ 。

拉伸曲线的形状与材料有关,由图 1-2 可见,在载荷小的 Oa 阶段,试样在载荷 F 的作用下均匀伸长,伸长量与载荷的增加成正比。如果此时卸除载荷,试样立即回复原状,即试样产生的变形为弹性变形。当载荷超过 b 点以后,试样会进一步产生变形,此时若卸除载荷,试样的弹性变形消失,而另一部分变形则保留下来,这种不能恢复的变形称为塑性变形。

(3) 强度 强度是材料抵抗塑性变形或断裂的能力。通过拉伸试验所测得的常用的强度指标有屈服点和抗拉强度。

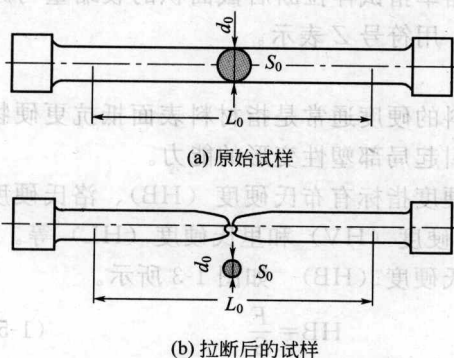


图 1-1 拉伸试样

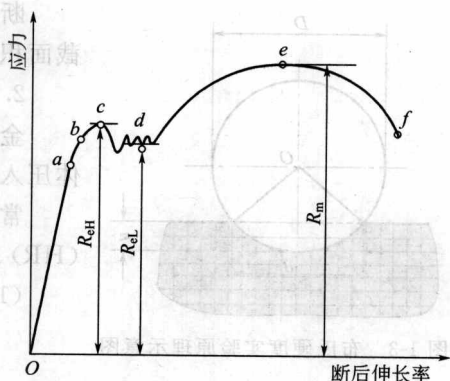


图 1-2 拉伸曲线

屈服点是材料产生屈服时对应的应力值，用符号 R_e 表示，单位是 N/mm^2 或 MPa ，大小为载荷与试样原始横截面积的比值，即：

$$R_e = \frac{F_s}{S_0} \quad (1-2)$$

式中 F_s ——材料屈服时的载荷， N ；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

屈服点可分为上屈服点和下屈服点，上屈服点是指试样发生屈服而外力首次下降前的最高应力，用符号 R_{eH} 表示；下屈服点是指试样屈服期间，不计初始瞬时的最低应力值，用符号 R_{eL} 表示。

抗拉强度是材料在拉断前所承受的最大应力值，用符号 R_m 表示，单位是 N/mm^2 或 MPa ，其大小为材料最大载荷与试样原始横截面积的比值，即：

$$R_m = \frac{F_b}{S_0} \quad (1-3)$$

式中 F_b ——在拉断前承受的最大载荷， N ；

S_0 ——试样原始横截面积， mm^2 。

(4) 塑性 金属材料的塑性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。

断后伸长率又称延伸率，标准试样的断后伸长率用 A 表示，指试样被拉断后，其标距部分所增加的长度与原始标距的比值，即：

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 L_u ——试样被拉断后标距的长度；

L_0 ——试样原始标距。

对于比例试样， A 应附下脚注说明所使用的比例系数，例如 $A_{11.3}$ 表示原始标距的断后伸长率。对于非比例试样，符号 A 应附以下脚标注说明所使用的原始标距，以 mm 表示，例如， $A_{80\text{mm}}$ 表示原始标距 L_0 为 80mm 的断后伸长率。

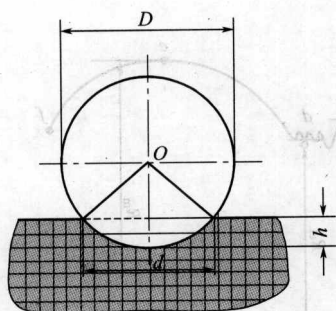


图 1-3 布氏硬度实验原理示意图

断面收缩率指试样拉断后截面积的收缩量与原截面积之比，用符号 Z 表示。

2. 硬度

金属材料的硬度通常是指材料表面抵抗更硬物体压入时所引起局部塑性变形的能力。

常见的硬度指标有布氏硬度 (HB)、洛氏硬度 (HR)、维氏硬度 (HV) 和里氏硬度 (HL) 等。

(1) 布氏硬度 (HB) 如图 1-3 所示。

$$HB = \frac{F}{S} \quad (1-5)$$

压头的材质有淬火钢球或硬质合金两种，当压头材质为淬火钢球时，布氏硬度用 HBS 表示，适用于测量布氏硬度不超过 450 的材料；当压头材质为硬质合金时，布氏硬度用 HBW 表示，适用于测量布氏硬度在 450~650 范围内的材料。

布氏硬度值的表示方法为：

(S-1) 硬度值 硬度符号 球体直径/载荷/载荷保持时间 (10~15s 不标注)

例如，180HBS10/1000/30，表示直径为 10mm 的钢球在 1000kgf^① 作用下，保持 30s 测得的布氏硬度值为 120。

(2) 洛氏硬度 (HR) 用一定载荷将压头压入材料表面，根据压痕深度表示硬度值。根据压头和载荷的不同，洛氏硬度分 HRA、HRB 和 HRC，试验规范见表 1-1。

表 1-1 试验规范

符 号	压 头 类 型	总载荷/kgf	适 用 范 围
HRC	120°金刚石圆锥	150	一般淬火钢等硬度较大材料
HRB	φ1.588mm	100	退火钢和有色金属等软材料
HRA	120°金刚石圆锥	60	硬而薄的硬质合金或表面淬火钢

(3) 维氏硬度 (HV) 维氏硬度是用一定的载荷将锥面夹角为 136°的正四棱锥金刚石压头压入试样表面，保持一定时间后卸除载荷，试样表面就留下压痕，测量压痕对角线的长度，计算压痕表面积，载荷 F 除以压痕面积 S 所得值即为维氏硬度，如图 1-4 所示。维氏硬度用符号 HV 表示，计算公式如下：

$$HV = \frac{F}{S} = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (1-6)$$

维氏硬度也可按对角线的 d 值从表中查出， d 值为两对角线的算术平均值。维氏硬度的结果表示方法为：

硬度值 硬度符号 (HV) 试验载荷/载荷保持时间 (10~15s 不标注)

① 1kgf=9.80665N。

例如, 640HV30/20 表示在试验力 30kgf 作用下保持载荷 20s 测得的维氏硬度值为 640。

(4) 里氏硬度 (HL) 里氏硬度用规定质量的冲击体在弹力作用下以一定的速度冲击试样表面, 用冲头在距试样表面 1mm 处的回弹速度与冲击速度的比值计算硬度值。计算公式如下:

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A} \quad (1-7)$$

式中 v_R —— 冲击体回弹速度;

v_A —— 冲击体冲击速度。

根据冲击体质量和冲击能量的不同, 里氏硬度分 HLD、HLDC、HLG 和 HLC。表示方法为:

硬度值 冲击装置类型

例如, 700HLD 表示用 D 型冲击装置测定的里氏硬度值为 700。

硬度是材料的重要性能之一, 一般情况下, 材料的硬度高, 其耐磨性能也较好。材料的硬度与强度之间也有一定的关系, 例如, 对于未淬硬钢, 布氏硬度与抗拉强度间存在如下的近似换算关系:

$$R_m \approx 0.362 HBS \quad (\text{当布氏硬度小于 } 175 HBS \text{ 时})$$

$$R_m \approx 0.345 HBS \quad (\text{当布氏硬度大于 } 175 HBS \text{ 时})$$

3. 冲击韧性 (a_k)

冲击韧性是衡量材料抵抗冲击载荷能力大小的指标, 常用冲击试验测定。冲击韧性是试样缺口处截面上单位面积所消耗的冲击功。冲击韧性用 a_k 表示, 计算公式如下:

$$a_k = \frac{A_k}{S} \quad (1-8)$$

式中 A_k —— 试样冲断时所消耗的冲击功, J;

S —— 试样缺口处截面积, cm^2 。

影响冲击韧性值大小的因素有材料的化学成分、冶金质量、组织状态、表面质量和内部缺陷等。另外, 金属材料的冲击韧性随温度的降低而下降。

4. 疲劳强度

金属材料在远低于其屈服点的交变应力的长期作用下发生的断裂现象, 称为金属的疲劳。汽轮机的轴和叶片等零部件, 多以金属疲劳损坏的方式失效。

(1) 疲劳失效的特点 疲劳失效的断口有明显的特征, 一般由两个明显的部分

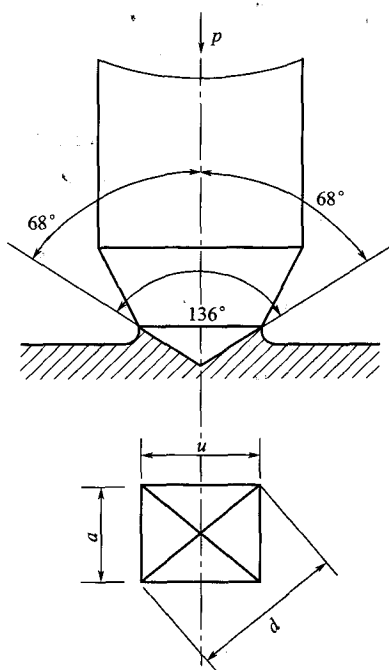


图 1-4 维氏硬度实验原理示意图

组成：疲劳裂纹发展区；瞬时脆性破断区。疲劳裂纹发展区的特征表面较光滑，另外，裂纹向前扩展时，表面形成类似年轮的贝壳纹。瞬时脆性破断区的特征是断口较粗糙。

(2) 影响金属材料疲劳强度的因素 材料本身的强度、塑性、组织和材质等影响材料的疲劳强度，另外，疲劳强度还与零部件的几何形状、表面粗糙度和工作环境等有关。

由于疲劳失效的微裂纹绝大多数是先从表面产生和发展的，因而采用表面强化处理，可以提高疲劳强度。

5. 断裂韧性

(1) 关于断裂力学 在工程上选择金属材料的传统方法，是根据零部件的工作条件对塑性和韧性提出一定的要求，并根据该材料的屈服点 R_e 或抗拉强度 R_m 来计算许用应力值：

$$[R] = \frac{R_e^T}{n} \quad (1-9)$$

式中 $[R]$ ——许用应力，即该材料的最大工作应力；

R_e^T ——工作温度 T 时材料的屈服点；

n ——安全系数。

裂纹在外力作用下扩展的形式可分为三类，这三种类型的脆性破坏，以张开型又称为 I 型的扩展断裂较为常见，且在外力作用下也较为危险，故近期大量研究的是 I 型裂纹的扩展及破坏。

(2) 断裂韧性的评定 金属材料的断裂韧性是材料固有的性能，也是通过一定的实验方法测定出来的。由于实验的方法不同，裂纹在外力作用下失稳扩展、脆性断裂的形式也不同，目前常用的断裂韧性计算公式为：

$$K_{1C} = \sigma_c \sqrt{Y a} \quad (1-10)$$

$$\sigma_c \propto \frac{1}{\sqrt{a}}$$

构件中的裂纹越长 (a 越大)，则裂纹前端应力集中越大，使裂纹扩展的外加应力即脆断应力越小，也就是说，脆断应力也和裂纹形状及加力方式有关，即：

$$\sigma_c \propto \frac{1}{\sqrt{a Y}}$$

断裂韧性在电厂金属材料中有相当重要的作用。由于电厂中有许多大型、重要构件，如锅炉汽包，汽轮机转子、主轴、叶片等，是在高温及复杂的应力状态下运行的，对于这些在特殊状态下工作的金属材料断裂韧性的研究，就显得更加必要。

当 a 和 Y 已知时，可根据一定的实验方法测出脆断应力，代入上式，即可计算出 K_{1C} 值。显然，材料的 K_{1C} 值越高，则材料阻止裂纹扩展的能力越强。因此， K_{1C} 是材料抵抗裂纹失稳扩展能力的指标，是材料抵抗低应力脆断的韧性参数。

二、金属的晶体结构与结晶

(一) 晶体

由于具有周期性的空间点阵结构,晶体具有下列共同性质:均一性,即晶体不同部位的宏观性质相同;各向异性,即晶体在不同方向上具有不同的物理性质;自限性,即晶体能自发地形成规则的几何外形;对称性,即晶体在某些特定方向上的物理化学性质完全相同;具有固定熔点;内能最小。

除了对晶体的结构、生长和一般性质的研究,人们还探索了有关晶体的其他问题,从而形成了晶体学这门学科。其主要研究内容包括 5 个部分:晶体生长、晶体的几何结构、晶体结构分析、晶体化学及晶体物理。其中,晶体生长是研究人工培育晶体的方法和规律,是晶体学研究的重要基础;晶体的几何结构是研究晶体外形的几何理论及内部质点的排列规律,属于晶体学研究的经典理论部分,但是,近年来 5 次等旋转对称性的发现,对这一经典理论提出了挑战;晶体结构分析是收集大量与晶体结构有关的衍射数据、探明具体晶体结构及 X 射线结构分析方法的;晶体化学主要研究化学成分与晶体结构及性质之间的关系;晶体物理则是研究晶体的物理性质,如光学性质、电学性质、磁学性质、力学性质、声学性质和热学性质等。

(二) 金属键与晶体结构

金属原子的结构特点是:价电子数目较少(1~3 个),电子层数较多,原子核对价电子的引力较弱,价电子极易脱离原子核形成自由电子,金属原子成为正离子,自由电子在正离子之间做高速运动,形成带负电的电子气。金属原子间这种正离子与自由电子的电性引力结合,称为金属键。

金属键与非金属原子间的结合键(离子键和共价键)不同。金属离子间的键合力很大,且由大量原子结合成整体金属,故金属的强度高。

自由电子在电场力作用下做定向运动,使金属具有导电性。

金属离子周围的键是等价的、对称的,因而金属原子在空间必须有规则排列才能保证势能最低,即呈晶体结构。

金属离子在平衡位置上做高速振动,温度越高,振幅越大。金属的这种结构决定了其具有优良的导热性。

金属材料通常都是晶体,为了便于分析晶体中原子的排列规律,通常用假想的线条将各原子中心连接起来,使之构成一个空间格架,这种三维的空间格架称为“晶格”,如图 1-5 所示。

取晶格中一个最基本的几何单元来表明原子排列的规律性,这个最小的几何单元称为“晶胞”。显然,金属的结构是由大量晶胞在空间堆垛而成的。晶胞各边的长度 a 、 b 、 c 称为“晶格常数”,其大小是以 0.1nm 为单位来度量的。常见的晶体结构有三种,即体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

(三) 晶面、晶向与晶格致密度

为了研究方便,可以把金属原子看成球形,并且人为规定与邻近的原子是相切

的,并将球的半径规定为原子半径。图 1-5 是体心立方晶格中的原子半径与晶格常数的关系图。

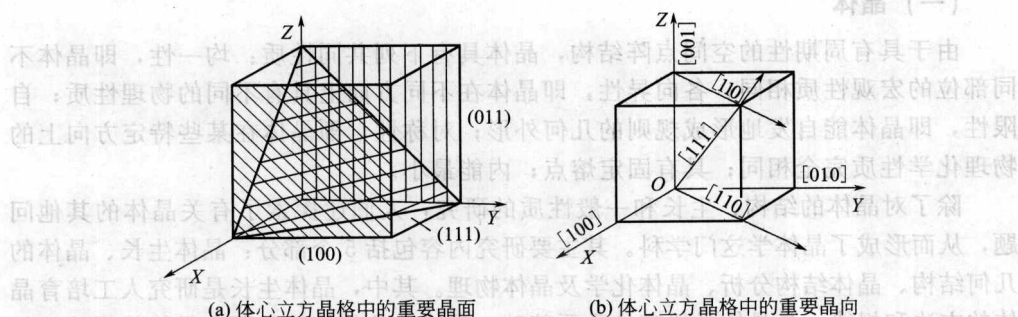


图 1-5 体心立方晶格中的晶面和晶向

(四) 单晶体与多晶体

如果依晶格中晶胞的长、宽、高取坐标系 X 、 Y 、 Z , 将坐标原点选在一个顶角原子上, 晶格就有了方位和方向, 称为位向。

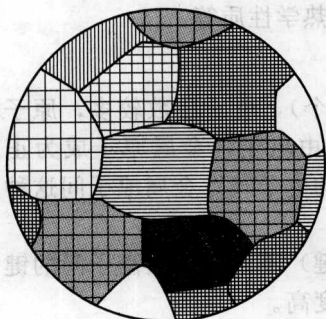


图 1-6 多晶体示意图

在单晶体中晶格的位向是一致的。金属的单晶体很小, 约在 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ cm}$ 数量级。金属总是以多晶体的形式存在, 所以往往看不到金属的单晶体, 金属单晶体的各向异性也被抵消了。图 1-6 为多晶体示意图。在自然界中, 常常可以看到食盐、方解石的单晶体。

(五) 晶体的缺陷

金属晶体的缺陷依照其几何形状, 分为点缺陷、线缺陷和面缺陷。

1. 点缺陷

点缺陷是指晶格中三维尺寸都较小的点状缺陷, 主要包括晶格空位、间隙原子和异质原子。

晶格空位指晶格中某些结点处没有原子, 而间隙原子指晶格间隙中出现多余原子。产生晶格空位和间隙原子的主要原因是由于原子热运动使其逃离晶体结点位置或转移到晶格间隙中。

异质原子一般是其他金属或非金属原子置换原晶格中原子或存在原晶格间隙中。

晶格空位、间隙原子和异质原子缺陷均会引起晶格局部变形, 即晶格畸变。晶格畸变引起能量升高, 使金属的强度、硬度和电阻升高。

2. 线缺陷

线缺陷又称位错, 是指晶体中一列或若干列原子发生有规律的错排现象。位错有两种类型, 最简单的是刃型位错, 如图 1-7 所示。

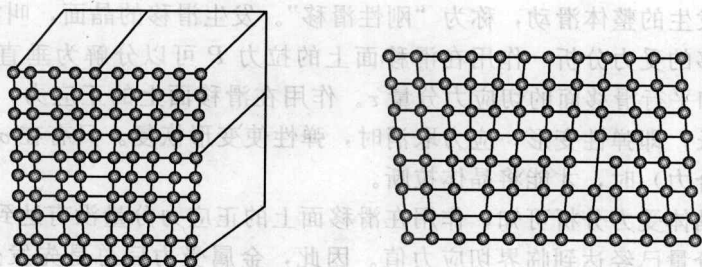


图 1-7 刃型位错

位错的存在对金属的性能有很大影响,随着位错数目的增加,金属强度先降低后增加,所以金属晶体中不含位错或含有大量位错均能使强度增加。

3. 面缺陷

面缺陷是晶体中二维尺寸较大、一维尺寸较小的呈面状分布的缺陷,如晶界、亚晶界等。在多晶体中相临晶粒的位向不同,在交界的地方原子排列不可能很规则,于是产生一层“过渡层”。相邻晶粒的位向差如果小于 15° ,称为小角度晶界,可以看成由许多纵向排列的刃型位错组成;当位向差大于 15° 时,称为大角度晶界。随着位向差的增加,晶界的厚度也增加。在实际金属中多数晶界是大角度晶界,如图 1-8 所示。

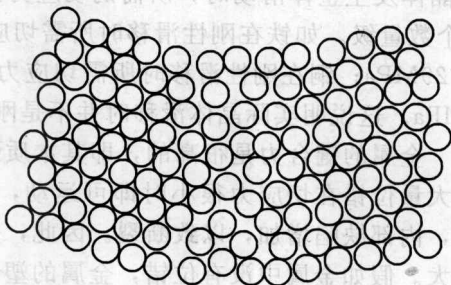


图 1-8 晶界结构示意图

在晶界上原子的无规则排列,使得晶界的性能与晶内差别很大:晶界原子比晶内原子易于发生化学反应,因而容易被腐蚀;晶界原子近于液态结构,致使晶界熔点低于晶内;异类原子和杂质在晶界上存在时能量低,所以晶界是杂质原子易于聚集的地方;由于晶界处原子排列无规则,金属的塑性变形(滑移)受到阻碍,致使晶界的强度比晶内高。

三、金属的塑性变形与再结晶

(一) 单晶体的塑性变形

单晶体塑性变形的形式是滑移和孪生。

1. 滑移

如果对单晶体锌做拉伸试验,但单晶锌被拉长后,发现锌的表面出现倾斜的近乎平行的细线,称为滑移线。在锌晶体的内部,发生了一部分晶体相对于另一部分晶体的相对滑动,即滑移。

对滑移后的晶体进行 X 射线分析表明,晶体发生相对滑动后仍然是完整的晶体,且晶格位向不变,滑动的距离是晶格常数的整数倍。这种由整个晶体沿着一个

滑移的平面发生的整体滑动,称为“刚性滑移”。发生滑移的晶面,叫滑移面。

(1) 滑移的受力分析 作用在滑移面上的拉力 P 可以分解为垂直滑移面的正应力分量 σ 和平行滑移面的切应力分量 τ 。作用在滑移面上的正应力,只能引起晶格的弹性伸长,即弹性变形,应力取消时,弹性使变形恢复。只有在 σ 很大(超过原子间的结合力)时,才能将晶体拉断。

由金属晶体受力分析可知,作用在滑移面上的正应力分量没有达到晶体结合力时,切应力分量已经达到临界切应力值。因此,金属受力后总是先发生塑性变形,在大量塑性变形后才发生断裂。

面心立方晶格与体心立方晶格金属的滑移系比密排六方晶格金属的滑移系多,因此具有密排六方晶格结构的金属镁、锌等塑性较差。具有面心立方晶格结构的铜、铝、镍等比具有体心立方晶格结构的铬、钼、钨、钒等塑性好。

(2) 滑移的机理 金属晶体如果按照上述刚性滑移的机理发生滑移变形,即部分晶体发生整体滑动时,所需的切应力比实际晶体滑移时所需的临界切应力大 2~3 个数量级。如铁在刚性滑移时所需切应力为 2300MPa,而实际测得的临界切应力为 29MPa;铜在刚性滑移时所需切应力为 1540MPa,而实际测得的临界切应力为 1MPa。这说明实际晶体滑移时并不是刚性滑移。

金属的键合力是很高的,即其本质强度很高,但在外力作用下,金属中所存在的大量位错在切应力很小时即可运动,导致滑移变形。金属经一定量的塑性变形后,内部缺陷增加,以致断裂。因此,金属中位错的数量、分布对金属的性能影响很大。假如金属中没有位错,金属的塑性变形只有依刚性滑移来进行,金属的强度就很高。随着位错数量的增加,金属的强度下降,但当位错数量增至很大时,位错线之间发生的交互作用反而阻碍位错的移动,金属强度又有上升的趋势。金属强度与位错密度的关系如图 1-9 所示。

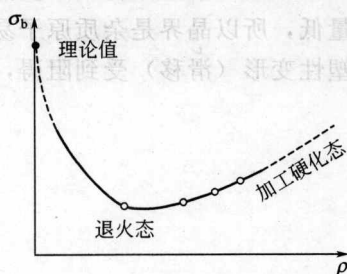


图 1-9 金属强度与位错密度的关系

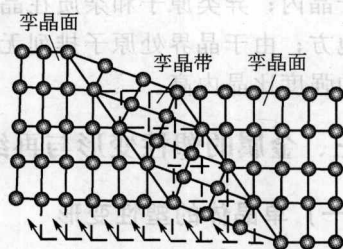


图 1-10 孪生变形示意图

2. 孪生

孪生是晶体的另一种塑性变形方式。在切应力作用下,晶体的一部分沿一定的晶面(孪晶面)和晶向(孪晶方向)相对于另一部分所发生的切变称为孪生。与滑移变形相比,孪生变形很少发生。因为孪生所需要的切应力很大,孪生变形一般在低温的体心六方晶格金属中,或滑移系很少的密排六方晶格金属中,或受到冲击变

形的金属中发生,如图 1-10 所示。

(二) 多晶体的塑性变形

多晶体塑性变形时,每个晶粒的塑性变形与单晶体塑性变形基本相同,但由于晶界的作用及相邻晶粒之间位向不同,多晶体的塑性变形与单晶体相比又有所不同。

实际使用的金属材料几乎都是多晶体。

1. 晶界的影响

晶界是相邻两个晶粒的边界,晶界上的原子排列是无规则的,金属中的杂质原子往往存在其间,这对于位错的运动形成很大阻力。

用只有两个晶粒的试样进行拉伸试验,变形后试样出现了“竹节现象”,如图 1-11 所示。这说明晶界附近晶体的塑变抗力很大。由此可以推断,多晶体金属的晶粒越细小(单位体积内晶粒数越多)时,该晶体的塑变抗力越大,即强度越高。



图 1-11 “竹节现象”示意图

2. 位向差的作用

外力的切应力分量在外力呈 45° 时最大。因此,晶体中与外力方向接近 45° 的滑移系最容易发生滑移,而接近 0° 与 90° 时,切应力分量最小,晶体不易发生滑移。由于多晶体金属中相邻晶粒位向不同,当一个晶粒的位向接近 45° 发生滑移时,必然受到相邻晶粒的牵制作用,相邻晶粒间的位向差越大时,牵制作用越大,从而增加了塑变抗力,使强度提高。

在实际生产中,希望金属零件的晶粒越细越好。在电力设备中,有些重要零件的晶粒度被限定在一定级别之内,尤其是承受冲击的构件,如碎煤机的锤头和锤杆,细晶粒金属的强度高、塑性好,则冲击韧度也高,能够承受反复的冲击而不易产生疲劳损坏。

第二节 铁碳合金

一、铁碳合金的相结构

1. 铁素体

碳原子溶入 α -Fe 中形成的间隙固溶体,称为铁素体。由于体心立方格的 α -Fe 的晶格间隙半径只有 0.036nm ,而碳原子半径为 0.077nm ,所以铁素体对碳的溶解度很小,在 727°C 时最大固溶度为 0.02% ,而在室温时固溶度几乎降为零。铁素体的力学性能与纯铁相近,其数值如下:

抗拉强度 R_m	250MPa
屈服点 R_e	140MPa