



火电机组焊接热处理

实用技术培训教材

● 中国电机工程学会电站焊接专业委员会



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

火电机组焊接热处理

实用技术培训教材

● 中国电机工程学会电站焊接专业委员会



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书由金属学基础、钢的热处理原理及工艺、电厂管道用耐热钢、焊接基础知识、焊接热处理工艺及其作用、焊接热处理加热方法与加热设备、管道焊后热处理工艺设计、热处理的温度测量与控制技术、焊接热处理的质量控制和工程管理、焊接热处理实用示例等十章组成。详细介绍了电力行业焊接热处理从业人员应掌握的理论和实践知识。

本书内容翔实,实用性较强,适用于电力行业焊接热处理从业人员的培训和自学使用,对焊接技术人员和管理人员也有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电机组焊接热处理实用技术培训教材/《火电机组焊接热处理实用技术培训教材》编委会编. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8128-2

I. 火… II. 火… III. 焊接—热处理—技术培训—教材 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 187318 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 5 月第一版 2009 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.25 印张 435 千字

印数 0001—3000 册 定价 34.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

PREFACE

随着电力体制改革继续深化,厂网分开,全国电力建设市场进入多元化、快速发展的轨道,一大批高效率、低污染的超临界(SC)、超超临界(USC)机组相继投产,以T/P91为代表的新型高等级耐热钢不断在这些机组中的应用,对电站建设中焊接热处理技术的发展提出了挑战,也提供了良好的发展契机。新型耐热钢的焊接接头性能对热处理工艺尤为敏感,而火电厂众多焊接接头中很大一部分由于受到各种因素的限制只能在现场进行局部热处理。如果缺乏严格的规范、认真的培训,将无法保证现场焊接热处理接头的性能和服役寿命。为此,参照相关的国内外技术标准,近年来SC、USC火电机组高等级耐热钢焊接和热处理技术研究所取得的成果,新技术应用成果以及使用过程中积累的经验,编写了本教材。国内目前针对火电机组尤其是现场安装焊接热处理方面的培训教材不多,希望本教材能够满足从业人员的业务素质提高和工作需求。

本教材取材于火电机组的实际制造和现场安装,是对火电厂现场金属材料焊接热处理技术理论和实际经验的总结,强调工程知识的综合性和交叉性,同时结合具体工程实例,有助于从业人员通过科学分析,解决在生产实践中碰到的具体问题。

本教材由中国电机工程学会电站焊接专业委员会组织编写,全书分十章,分别对基础理论知识、专业实践知识、实践实例以及焊接热处理相关的检验知识进行介绍。第一、二章为金属学、热处理基本理论,由周左平编写。第三、四章为焊接和耐热钢基础知识,由乔亚霞编写。第五~九章为专业实践部分,主要从实际操作出发,阐述火电厂的承压管道在制造、安装及检修过程中对焊接接头的焊接热处理工艺、设备、温度测量与控制以及质量控制与工程管理等方面的内容;第十章列举了对生产实践有指导意义的焊接热处理典型示例。第五~十章由常建伟编写。全书由郭军统稿并修改,由杨建平主审。

本教材可作为焊接热处理从业人员包括热处理技术人员和热处理操作人员的培训和自学教材,对本行业和其他行业的焊接技术人员也有一定的参考价值。

在本教材的编写过程中,得到了中国电力科学研究院、河南第一火电建设公司的大力支持,在本教材编写时还参考了有关专业教材及其他文献资料,在此对有关作者一并表示衷心的感谢!

由于编写人员水平所限,书中难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2008.10



目 录

CONTENTS

前言

第一章 金属学基础	1
第一节 金属的一般特性	1
第二节 金属的晶体结构	3
第三节 实际金属的晶体缺陷	6
第四节 合金的相及组织	9
第五节 铁碳合金及其平衡相图	12
第六节 铁碳合金的平衡结晶过程	18
第七节 铁碳合金的组织与性能	24
第二章 钢的热处理原理及工艺	27
第一节 概述	27
第二节 钢在热处理加热过程中的转变	29
第三节 钢在热处理冷却过程中的转变	32
第四节 钢的热处理工艺	42
第三章 电厂管道用耐热钢	49
第一节 耐热钢基本知识	49
第二节 耐热钢的强化原理及合金化	55
第三节 耐热钢的性能要求及选用原则	60
第四节 电厂用耐热钢介绍	64
第四章 焊接基础知识	87
第一节 概述	87
第二节 焊接热过程	92
第三节 焊接化学冶金反应	97
第四节 熔池结晶和焊缝组织	101
第五节 焊接热影响区的组织和性能	106
第六节 焊接裂纹	110
第五章 焊接热处理工艺及其作用	115
第一节 焊接热处理及工艺	115
第二节 焊接热处理对焊接裂纹的影响	129
第三节 焊接热处理对焊接残余应力的影响	131
第四节 焊后热处理对接头组织和力学性能的影响	137
第六章 焊接热处理加热方法与加热设备	141
第一节 金属加热的基本原理	141

第二节	电阻炉加热设备	147
第三节	柔性陶瓷电加热设备	155
第四节	感应加热设备	162
第五节	火焰加热设备	171
第七章	管道焊后热处理工艺设计	180
第一节	选择焊后热处理的原则	180
第二节	焊后热处理加热功率计算	184
第三节	管道焊后热处理工艺设计	188
第四节	管道异型构件连接焊缝焊后热处理	205
第五节	管道焊接热处理用保温材料	206
附件	焊接热处理工艺卡与记录	215
思考题		218
第八章	热处理的温度测量与控制技术	219
第一节	温度的测量方法	219
第二节	常用的测温仪表和监控设备	233
第三节	焊接热处理温度测量技术	239
第四节	焊接热处理常用的温度控制系统	245
第九章	焊接热处理的质量控制和工程管理	255
第一节	常见焊接热处理质量问题	255
第二节	焊接热处理的质量控制与考核	259
第三节	焊接热处理的质量评价	265
第四节	现场焊接热处理的工程管理	267
第十章	焊接热处理实用示例	282
示例 1	采用柔性陶瓷电加热装置对主蒸汽管焊接接头进行焊接热处理	282
示例 2	采用柔性陶瓷电加热装置对管排进行焊后热处理	285
示例 3	采用火焰加热时对主蒸汽管道上的吊耳(角焊缝)进行焊后热处理	286
示例 4	马氏体型耐热钢焊接加热中断的处理方法	287
示例 5	除氧水箱除氧头与箱体的热处理	288
示例 6	300MW 火力发电机组异型结构焊件的热处理	290
示例 7	锅炉锅筒整体热处理	293
示例 8	工频感应加热在汽轮机直轴中的应用	295
示例 9	大型贮气罐的整体热处理	299
示例 10	如何使用中频感应加热同时处理多个焊口	301
附录 A	确定预热温度的一些可用方法指南	302
附录 B	ASME B31.1 焊后热处理要求和 P-No 分组	307
附录 C	几个热物理量的单位换算表	315
参考文献		316

金属学基础

第一节 金属的一般特性

金属是指具有正的电阻温度系数以及良好的导电性、导热性、延展性（塑性）和金属光泽的物质，这种物质在原子结构、原子间结合方式以及原子分布等方面都具有不同于其他物质的特点。

一、金属的原子结构特点

元素，按其原子结构特点可分为金属元素、非金属元素和过渡族金属元素三类。

1. 金属元素

金属元素也称为正电性元素，其原子结构的特点是：最外层电子（又称价电子）数很少，一般为1~2个，最多不超过4个。由于这些外层电子与原子核的结合力弱，所以很容易脱离原子核的束缚而变成自由电子，此时的原子即变为正离子。

2. 非金属元素

非金属元素又称为负电性元素，其原子结构的特点与金属元素相反，最外层电子数较多，最多7个，最少4个，易于获得电子，此时的原子即变为负离子。

3. 过渡族金属元素

过渡族金属元素的原子结构，除具有上述金属元素的原子结构特点外，还有一个特点，即在次外层尚未填满电子的情况下，最外层已先填充了电子。因此，过渡族金属元素不仅容易丢失最外层电子，而且还容易丢失次外层的1~2个电子，这就出现了过渡族金属元素化合价可变的现象。

当过渡族金属原子彼此相互结合时，不仅最外层电子参与结合，而且次外层电子也参与结合，因此，过渡族金属原子间的结合力特别强，在宏观上表现为高熔点和高强度。

可见，原子外层参与结合的电子数目，不仅决定着原子间结合键的本质，而且对其化学和力学等特性也具有重要的影响。

二、金属原子间的结合方式

金属原子间的结合方式可分为离子键结合、共价键结合和金属键结合三种。

1. 离子键结合

当正电性元素和负电性元素相接触时，由于电子一失一得，使它们各自变成了正离

子和负离子,二者依靠相互间的静电作用结合在一起,这种结合方式就是离子键结合。例如,氯化钠就是靠离子键使正电性元素钠和负电性元素氯结合在一起的。

2. 共价键结合

相邻原子共用它们的价电子,各自形成稳定的电子满壳层,从而稳定地结合在一起,这种结合方式就是共价键结合。例如,金刚石中的碳原子之间(碳的价电子数为4)就是完全以共价键方式结合在一起的。

3. 金属键结合

处于集聚状态的金属原子,全部或大部分将它们的价电子贡献出来,为其整个原子集体所公有,形成电子云或电子气。电子云中的价电子或自由电子已不再只围绕自己的原子核转动,而是与所有的价电子一起在所有原子核周围按量子力学规律运动着。贡献出价电子的原子变为正离子,沉浸在电子云中,依靠运动于其间的公有化的自由电子的静电作用结合在一起,这种结合方式就是金属键结合。金属键没有饱和性和方向性。

金属与合金主要以金属键方式结合,但有时也不同程度地混有其他键。根据金属主要以金属键方式结合的特点,可以对固态金属的五个本质特性作出如下解释:

(1) 由于在外加电场作用下金属中的自由电子能够沿着电场方向作定向运动形成电流,从而显示出良好的导电性。

(2) 金属中自由电子的运动和正离子的振动使其具有良好的导热性。

(3) 由于金属键没有饱和性和方向性,所以当金属的两部分发生相对位移时,金属的正离子始终被包围在电子云中,从而保持了金属键结合,这样,金属就能够经受变形而不断裂,使其具有延展性。

(4) 由于自由电子很容易吸收可见光的能量而被激发到较高的能级,当它跳回到原来的能级时,就把吸收的可见光能量重新辐射出来,从而使金属具有光泽。

(5) 随着温度的升高,正离子或原子本身振动的振幅加大,可阻碍电子的通过,使电阻升高,因而金属具有正的电阻温度系数。

三、金属中原子的分布特点

固态金属中众多原子依靠金属键牢固地结合在一起,其原子分布具有规则排列和紧密排列两个特点。固态金属中原子分布的这两个特点,可从结合力与结合能的角度予以解释。

当原子处于某一平衡位置、原子之间保持某一平衡距离时,原子之间由引力和斥力构成的结合力可达到平衡且此时的结合能最低,也就是说,当原子间按某一平衡距离有规则地排列时,其能量最低,状态最稳定。

同样,当某一原子周围最近邻的原子数越多时,原子间的结合能越低,其状态也就越稳定。

由此可见,固态金属为保持其最稳定的状态,原子总是自发地趋于规则和紧密排列的。而当原子间以离子键或共价键方式结合时,原子达不到紧密排列的状态,因为这两种结合方式对原子周围的原子数有一定的限制。

第二节 金属的晶体结构

一、晶体与非晶体

(一) 晶体

内部原子在三维空间按一定规律作周期性重复排列的物质称为晶体,如宝石、食盐、雪花、冰等均属晶体。固态金属通常也是晶体,所不同的是,前几种晶体具有规则几何外形,而金属则是不具规则几何外形的晶体。

(二) 非晶体

内部原子散乱分布或是只作局部短程规则排列的物质称为非晶体,如玻璃、木材、棉花等均属非晶体。玻璃是最典型的非晶体,所以通常又将非晶态的固体称为玻璃体。

(三) 晶体与非晶体的性能差异

1. 熔点

晶体具有一定的熔点,在熔点以上,晶体变为液体,处于非晶状态;在熔点以下,液体又变为晶体,处于结晶状态。从晶体到液体或从液体到晶体的转变是突变的。

非晶体没有确定的熔点,从固体到液体或从液体到固体的转变是逐渐过渡的。

2. 各向异性

晶体具有各向异性性或称异向性,即同一性能指标在不同的方向表现出大小不一的差异。

非晶体具有各向同性性或等向性,即同一性能指标不因方向而异,在各个方向都是一致的。

3. 相互转化

晶体与非晶体之间在一定条件下是可以相互转化的,例如,玻璃经长期高温加热后能形成晶态玻璃,液态金属经快速冷却也可形成非晶态金属。

二、晶体结构

晶体结构是指晶体中原子在三维空间周期性重复排列的规律性。晶体中原子的排列规律不同,晶体所表现的性能也不同,可见晶体结构对晶体的性能起着决定性的作用。通常用空间点阵(简称为晶格或点阵)来描述晶体的结构。

将构成晶体的实际质点(原子、离子或分子)抽象为纯粹的几何点并用直线将这些几何点连接起来即可构成一个可描述晶体中质点排列规律的三维空间格架,这个空间格架称其为空间点阵,简称为晶格或点阵,其中的几何点称为阵点或结点。可见,空间点阵描述的是晶体中实际质点的排列情况。

前已述及,晶体中原子的排列具有周期性和重复性,因此,在空间点阵中必定能找到可以完全反映原子排列规律的最小几何单元,这个最小几何单元称为晶胞。晶胞的特征常以棱边长度和棱边夹角表示,前者称为晶格常数或点阵常数,用 a 、 b 、 c 表示,后者称为轴间夹角,用 α 、 β 、 γ 表示。

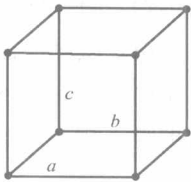
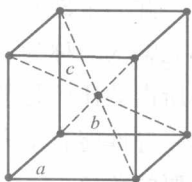
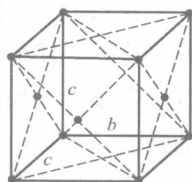
自然界中晶体的种类成千上万,其晶体结构也各不相同,但根据特征,各种晶体结

构均可归属于 7 个晶系、14 种点阵，见表 1-1。

表 1-1

晶体的 7 个晶系和 14 种点阵

晶系和实例	点 阵 类 型			
	简 单	底 心	体 心	面 心
三斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ K_2CrO_7				
单斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ $\beta-S$				
正交晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $\alpha-S, Fe_3C$				
六方晶系 $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$ Zn, Cd, Mg				
菱方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ As, Sb, Bi				
四方晶系 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $\beta-Sn, TiO_2$				

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
立方晶系 $a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ Fe, Cr, Ca, Ag				

三、典型的金属晶体结构

工业上使用的金属，绝大多数都具有比较简单的晶体结构，其中最典型的金属晶体结构有体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构三种，前两种属于立方晶系，后一种属于六方晶系，见表 1-1。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞模型见图 1-1。晶胞的三个棱边长度相等，三个棱边夹角均为 90° ，构成立方体，在立方体的中心和八个角上各有一个原子。具有体心立方结构的金属有 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W 等 30 多种。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞模型见图 1-2。与体心立方晶格一样，面心立方晶胞的三个棱边长度相等，三个棱边夹角均为 90° ，构成立方体，在立方体的六个面中心和八个角上各有一个原子。具有面心立方结构的金属有 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag 等 20 多种。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞模型见图 1-3。晶胞的上下底面为相互平行的正六边形，构成六方柱体。在晶胞上下底面的十二个角上和上下底面中心各有一个原子，晶胞内还有三个原子。具有密排六方结构的金属有 Zn、Mg、Be、 α -Ti、 α -Co、Cd 等。

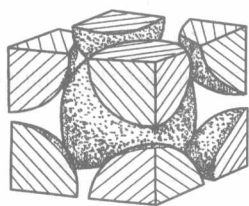


图 1-1 体心立方晶格的晶胞模型

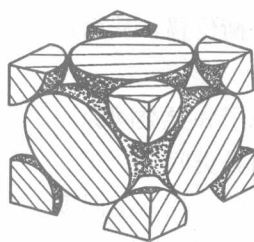


图 1-2 面心立方晶格的晶胞模型

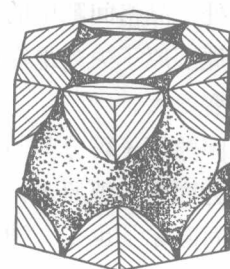


图 1-3 密排六方晶格的晶胞模型

第三节 实际金属的晶体缺陷

在实际金属中,并非全部原子都严格按应有的规则排列,将实际金属中原子偏离其原有排列规律的不完整区域称为金属的晶体缺陷。一般来说,实际金属中的这种不完整区域在整个金属中所占的比例是很小的,但就是这些小比例的不完整区域,不仅对金属的强度、塑性、电阻等性能有重大影响,而且在金属的扩散、相变、塑性变形和再结晶等行为中扮演着重要的角色。

金属的晶体缺陷按其几何形态特征可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

一、点缺陷

点缺陷的特征是三个方向上的尺寸都很小,相当于原子尺寸。常见的点缺陷有空位、间隙原子、置换原子等。

1. 空位

人们知道,金属晶体中的原子是以其平衡位置为中心不间断地进行着热振动的,当某些原子在某一瞬间获得足够高的能量时,它就可以克服周围原子对它的束缚而脱离原有的平衡位置迁移到别处,从而在原有的平衡位置处留下空位。空位的存在可使其周围原子失去平衡而偏离平衡位置,造成几个原子间距范围的弹性畸变区,称为晶格畸变。

根据原子的迁移去向,空位可分为肖脱基空位(原子迁移到晶体表面)、弗兰克空位(原子迁移到晶格的间隙中)和转换空位(原子迁移到其他空位处,相当于空位发生了位移)。在这三种空位中,形成肖脱基空位所需的能量最小,因此在固态金属中主要是形成肖脱基空位。

空位是一种热平衡缺陷,即在一定温度下空位有一定的平衡浓度。温度升高,空位浓度随之提高,反之,温度降低,空位浓度随之降低。

空位在晶体中的浓度不是固定不变的,而是处于形成、运动和消失的不断变化之中,空位迁移到晶体表面或与间隙原子相遇就会消失。

2. 间隙原子

处于晶格间隙中的原子称为间隙原子。与空位一样,存在于晶格间隙中的原子同样会使周围原子失去平衡而偏离平衡位置,从而造成晶格畸变,而且这种畸变较空位引起的畸变要大。

间隙原子可分为同类间隙原子和异类间隙原子。当间隙原子与平衡位置上的原子相同时为同类间隙原子,不同时为异类间隙原子。

间隙原子也是一种热平衡缺陷,在一定温度下有一定的平衡浓度。对异类间隙原子而言,这一平衡浓度称为溶解度或固溶度。

3. 置换原子

占据在原来基体原子平衡位置上的异类原子称为置换原子。与空位和间隙原子一样,由于置换原子的大小与基体原子有差异,因此同样会使周围原子失去平衡而偏离平

衡位置，从而造成晶格畸变。

置换原子也是一种热平衡缺陷，在一定温度下也有一定的平衡浓度，称之为溶解度或固溶度。通常，置换原子的固溶度要比间隙原子大得多。

二、线缺陷

线缺陷的特征是两维尺度很小，而第三维尺度很大。常见的线缺陷是位错。

位错是由于金属晶体中某处有一列或若干列原子发生有规律的错排而形成的。也可以认为是金属晶体发生塑性变形时局部区域发生滑移形成的已滑移区和未滑移区的边界，在边界附近原子排列的规律性遭到了破坏。

位错对金属强度有着重要的影响，金属强度与位错密度之间的关系如图 1-4 所示。当晶体中不含位错或者位错密度很低时，金属不易塑性变形，因而强度很高；随着位错密度的增加，塑性变形易于进行，因而强度降低；当位错密度升高到一定程度时，由于位错之间的制约作用加强，反而使塑性变形难于进行，此时强度又会升高。

位错有多种类型，其中最基本、最简单的类型有刃型位错和螺型位错两类。

1. 刃型位错

如图 1-5 所示，刃型位错就像是在原子呈规则排列的晶格中插入一个半原子面，由于该半原子面犹如刀子一样插入晶格，因此称其刃口处原子排列的边缘线为刃型位错线。在刃型位错线周围一个有限区域内原子离开原来的平衡位置而产生晶格畸变。

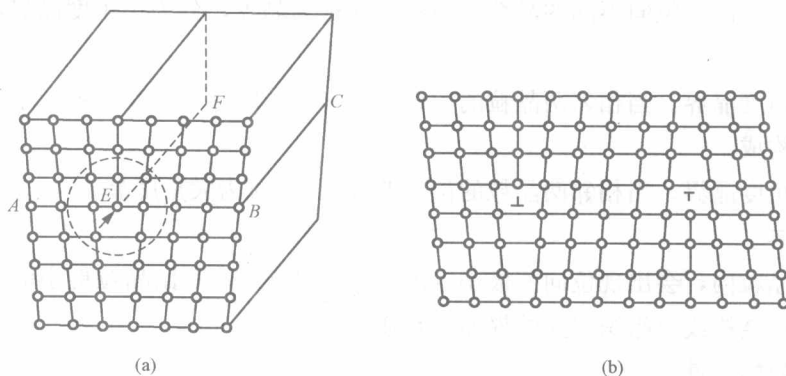


图 1-5 刃型位错示意图

(a) 立体示意图；(b) 垂直于位错线的原子平面

2. 螺型位错

如图 1-6 所示，已滑移区与未滑移区的边界 BC，由于其附近原子在滑移过程中被扭曲成了螺旋形排列，因此称为螺型位错线。与刃型位错一样，在螺型位错线附近一个有限区域内存在着晶格畸变区。

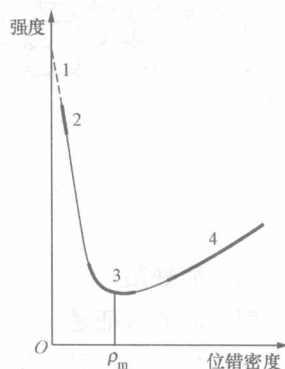


图 1-4 金属强度与位错密度的关系

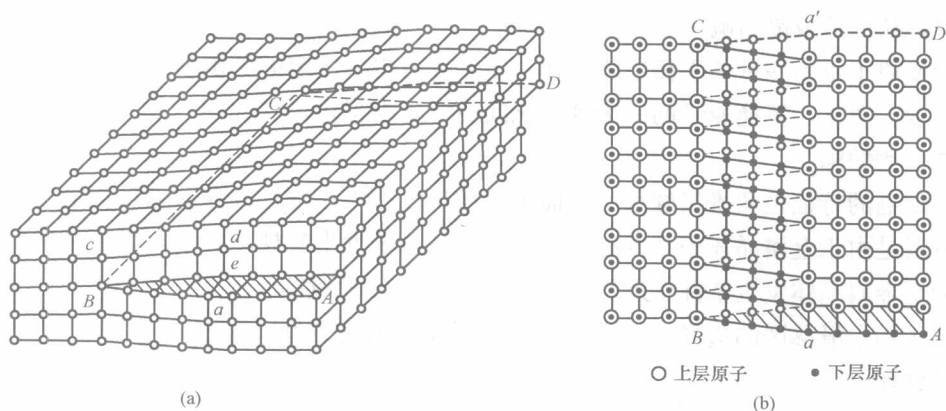


图 1-6 螺型位错示意图

(a) 立体模型; (b) 平面图

三、面缺陷

面缺陷的特征是一维尺度很小, 另外两维尺度很大。常见的面缺陷有晶体表面、晶界、亚晶界、孪晶界、相界和堆垛层错等。

1. 晶体表面

晶体表面是指金属与真空、气体或液体等外部介质相接触的界面, 界面上的原子同时受到晶体内部自身原子和外部介质原子或分子的作用力, 这两个作用力的不平衡 (内部自身原子的作用力大于外部介质原子或分子的作用力) 导致了界面原子偏离其原有的平衡位置, 从而在界面下一定范围内 (表面层) 产生晶格畸变。

2. 晶界

晶体结构相同但位向不同的晶粒之间的界面称为晶界, 分为小角度晶界和大角度晶界两类:

(1) 小角度晶界。当相邻两晶粒的位向差小于 10° 时为小角度晶界, 小角度晶界基本上由位错构成。

(2) 大角度晶界。当相邻两晶粒的位向差大于 10° 时为大角度晶界。

3. 亚晶界

在同一晶粒内, 会出现位向差极小 (通常小于 1°)、尺寸比晶粒更小的亚结构或亚组织, 这些亚结构或亚组织之间的界面就是亚晶界。

四、晶界的特性

(1) 由于晶界上的原子或多或少地偏离其原有的平衡位置, 因而就或多或少地具有晶界能或界面能, 晶粒长大和晶界的平直化都可减少晶界的总面积, 从而降低晶界的总能量, 因此晶粒长大在热力学上是一个自发的过程。

(2) 由于晶界能的存在, 使得凡是能降低晶界能的异类原子都会向晶界偏聚; 相反, 凡是能提高晶界能的原子将会在晶粒内部偏聚。

(3) 由于晶界上存在着晶格畸变, 因而在室温下对金属的塑性变形起着阻碍作

用,在宏观上表现为可使金属具有更高的强度和硬度。显然,晶粒越细,晶界比例越高,金属的强度和硬度便越高。因此,对于在常温下使用的金属,一般总是希望获得较细小的晶粒,这也是细晶强化的原理,但须指出,这种细晶强化是以常温为前提条件的。

(4) 由于晶界能的存在,使晶界的熔点低于晶粒内部,且易于腐蚀和氧化。金属发生过烧时晶界表现出熔化特征以及制作金相试样时用浸蚀液使晶界显现,利用的就是晶界的这个特性。

(5) 晶界上的空位、位错等缺陷较多,因此原子的扩散速度较快,在发生相变时,新相晶核往往首先在晶界形成。

第四节 合金的相及组织

前面三节关于金属的特性、晶体结构和晶体缺陷,都是针对单一金属而言的,而工业中使用的金属材料大都是由两种或两种以上的金属、或金属与非金属组合而成的合金材料,因此,研究合金材料具有重要意义。

一、合金的概念

合金是指两种或两种以上的金属、或金属与非金属,经熔炼、烧结或用其他方法组合而成的具有金属特性的物质。

组成合金的最基本、最独立的物质称作合金的组元,简称元,它可以是组成合金的元素,也可以是稳定的化合物。由两个组元组成的合金称为二元合金,由三个组元组成的合金称为三元合金,由三个以上组元组成的合金称为多元合金。

由两个或两个以上组元以不同比例配制而成的一系列成分不同的合金的总称,简称合金系。由两个组元组成的合金系称为二元系,由三个组元组成的合金系称为三元系,由三个以上组元组成的合金系称为多元系。

二、合金中的相

当不同组元经熔炼或烧结组成合金时,组元间通过物理或化学作用而形成的晶体结构相同、化学成分和性能均一并以界面相互分开的组成部分称为合金的相。具有不同晶体结构的两相之间的分界面称为相界。

由一种固相组成的合金称为单相合金,由几种不同固相组成的合金称为多相合金。

合金中的相,根据其晶体结构特点可分为固溶体和金属化合物两类。

1. 固溶体

当合金组元以不同比例配制而形成的固相,其晶体结构与组成合金的某一组元相同时,这种固相称为固溶体,其中与固溶体晶体结构相同的组元称为溶剂,其他组元则称为溶质。

在一定条件下,溶质在固溶体中的浓度是有一定限度的,超过这个限度,多余的溶质原子就会和溶剂原子形成不同于固溶体的其他新相,这个限度称为固溶体的溶解度或

固溶度。

固溶体有多种分类方法：

(1) 按溶质原子在溶剂晶格中的位置分。固溶体按溶质原子在溶剂晶格中的位置可分为置换固溶体和间隙固溶体两类。

1) 置换固溶体：溶质原子位于溶剂晶格的结点位置，犹如这些结点上的溶剂原子被溶质原子所置换一样。金属元素彼此之间一般都能形成置换固溶体，只是不同金属元素形成置换固溶体的固溶度不同。

置换固溶体的固溶度与组元的原子尺寸、负电性、电子浓度、晶体结构以及外界温度等因素有关。组元间的原子半径越相近，则固溶度越大；组元间的负电性相差越大，则两者的化学亲和力越大，更易形成金属化合物，即使形成固溶体，固溶度也很小，反之，组元间负电性相差越小，则越易形成固溶体，固溶度也越大；组元元素的原子价越高，则越易达到固溶体的电子浓度极限，固溶度就越小；组元间晶格类型相同时可形成高固溶度的固溶体，甚至有可能形成无限固溶体，而组元间晶格类型不同则只能形成有限固溶体；外界温度越高，固溶度越大，因此，对于高温下已达到饱和的有限固溶体，当其冷却至低温时，由于固溶度降低，多余的溶质原子将以其他相的形式析出。

2) 间隙固溶体：溶质原子不是位于溶剂晶格的正常结点位置，而是填入溶剂晶格的间隙中。形成间隙固溶体的溶质元素都是一些原子半径小于 0.1nm 的非金属元素，如碳、氮、氢、硼等，而溶剂元素都是过渡族金属元素。

间隙固溶体的固溶度不仅与溶质原子的大小有关，而且与溶剂的晶格类型有关。溶质原子越小，引起的晶格畸变越小，固溶度也越大；溶剂的晶格类型不同，其间隙的形状和大小也不同，因而对溶质原子的固溶度不同。由于溶剂晶格中的间隙位置是有一定限度的，所以间隙固溶体只能是有限固溶体。

(2) 按固溶度分。固溶体按固溶度可分为有限固溶体和无限固溶体两类。

1) 有限固溶体：溶质原子只能以有限的固溶度溶入溶剂晶格中，大部分固溶体属于这一类。

2) 无限固溶体：溶质原子能以任意比例溶入溶剂晶格，其固溶度可达 100% ，此时的溶质和溶剂是可以互换的，通常将比例大于 50% 的组元称为溶剂，小于 50% 的组元称为溶质。无限固溶体只可能是置换固溶体。

一般来说，固溶体的硬度和强度总是高于组成它的纯金属的平均值，这是溶质原子溶入溶剂后引起晶格畸变的结果。随着溶质原子固溶度的增加，它所引起的晶格畸变也增大，因而硬度和强度随之提高。溶质原子与溶剂原子的尺寸差别越大，所引起的晶格畸变也越大，强化效果就越好。由于间隙原子造成的晶格畸变比置换原子大，所以间隙固溶体的强化效果较置换固溶体好。

在塑性和韧性方面，固溶体要比组成它的纯金属的平均值低，但比一般化合物要高得多。

由此可见, 固溶体比纯金属和化合物具有较为优越的综合力学性能, 因此, 工业上使用的金属材料绝大部分是以固溶体为基体相, 有的甚至完全由固溶体组成。例如, 广泛应用的碳钢和合金钢, 均以铁素体固溶体为基体相。

2. 金属化合物

金属化合物是合金组元间发生相互作用而形成的一种晶体结构和性能均不同于任一组元的、具有金属性质的新相, 又称为中间相。金属化合物的组成一般可用化学分子式来大致表示, 如碳钢中的 Fe_3C 就是金属化合物。

金属化合物之所以具有金属的性质, 是因为在其结合键中, 除离子键与共价键外, 金属键也参与了作用。

金属化合物的形成主要受原子尺寸、负电性和电子浓度三个因素的控制, 根据这三个因素的作用大小可将金属化合物分为正常价化合物、电子化合物以及间隙相和间隙化合物三类。

(1) 正常价化合物: 正常价化合物主要受负电性因素控制, 具有严格的化合比, 成分固定不变, 其组成可用化学分子式表示。正常价化合物通常由金属元素与第Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ族元素组成, 如钢中常见的夹杂物 MnS 即属此类。

(2) 电子化合物: 电子化合物主要受电子浓度因素控制, 它不遵守原子价规律, 而是按照一定的电子浓度比值形成化合物, 其组成虽可用化学分子式表示, 但其成分不是固定不变而是在一定范围内变化的。电子化合物通常由第Ⅰ族或过渡族金属元素与第Ⅱ至第Ⅴ族金属元素组成。

(3) 间隙相和间隙化合物: 间隙相和间隙化合物主要受原子尺寸因素控制, 通常由过渡族金属元素与原子半径很小的非金属元素碳、氮、氢、硼等组成。

间隙相和间隙化合物是根据非金属元素 (X) 与金属元素 (M) 的原子半径比值 (r_X/r_M) 进行区分的: $r_X/r_M < 0.59$ 时形成具有简单晶体结构的金属化合物, 称为间隙相; $r_X/r_M > 0.59$ 时形成具有复杂晶体结构的金属化合物, 称为间隙化合物。例如, 氢和氮的原子半径较小, 因此过渡族金属元素的氢化物和氮化物都是间隙相, 而硼原子半径大, 所以过渡族金属元素的硼化物都是间隙化合物。碳原子的半径居于两者之间, 所以过渡族金属元素的一部分碳化物是间隙相, 一部分碳化物则是间隙化合物。Cr、Mn、Fe 的碳化物均属间隙化合物, 如合金钢中常见的 M_3C 、 M_7C_3 、 M_{23}C_6 、 M_6C 等, 其中 Fe_3C 是钢中的基本组成相, 称为渗碳体。 Fe_3C 中的铁原子被其他金属原子 Mn、Cr、Mo、W 等置换, 即形成以间隙化合物为基的固溶体, 称为合金渗碳体, 如 $(\text{FeMn})_3\text{C}$ 、 $(\text{FeCr})_3\text{C}$ 等。

在间隙相中, 金属原子位于晶格的正常结点位置上, 非金属原子则位于晶格的间隙位置, 其组成虽可用化学分子式表示, 但其成分不是固定不变而是在一定范围内变化的。间隙相与间隙固溶体的本质区别在于前者是一种晶体结构不同于任一组元的化合物, 而后者则是晶体结构同于溶剂组元的固溶体。

金属化合物一般均具有较高的熔点、硬度和脆性, 它的存在可使合金的强度、硬