

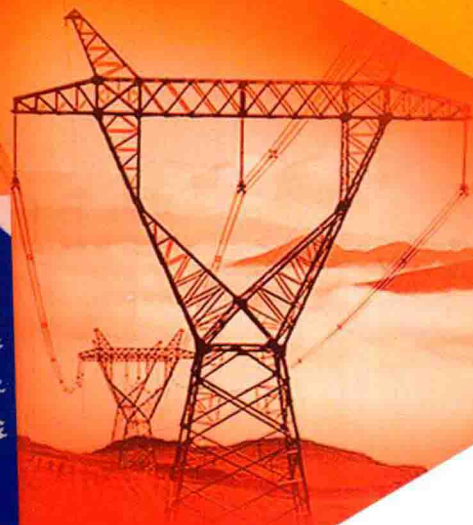
SHUBIANDIAN SHEBEI JINSHU CAILIAO

JI JIANCE SHIYAN JISHU

输变电设备金属材料 及检测试验技术

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
国家电网公司 GIS 设备运维检修技术实验室

组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

SHUBIANDIAN SHEBEI JINSHU CAILIAO

JI JIANCE SHIYAN JISHU

输变电设备金属材料 及检测试验技术

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
国家电网公司 GIS 设备运维检修技术实验室

组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共十章,系统阐述了金属材料基础知识、金属材料性能及分类、电网设备常用金属材料、金属材料成型工艺、金属材料检测试验方法、无损检测技术、腐蚀与防护技术等内容;为了方便指导现场检测试验工作的开展,本书汇集了相关工作的要点和技术要求,编写了金属材料检测试验的作业规范。此外,本书还对电网设备金属材料失效案例进行了分析,供读者学习借鉴。

本书可供从事金属材料 and 无损检测专业的工作人员学习阅读。

图书在版编目(CIP)数据

输变电设备金属材料及检测试验技术 / 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 国家电网公司 GIS 设备运维检修技术实验室组编. —北京: 中国电力出版社, 2018.4
ISBN 978-7-5198-1671-1

I. ①输… II. ①国… ②国… III. ①输电—电气设备—金属材料—材料试验 ②变电所—电气设备—金属材料—材料试验 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 001415 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘丽平 (liping_liu@sgcc.com.cn)

责任校对: 王开云

装帧设计: 张俊霞 左 铭

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2018 年 4 月第一版

印 次: 2018 年 4 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 17.5

字 数: 390 千字

印 数: 0001—3000 册

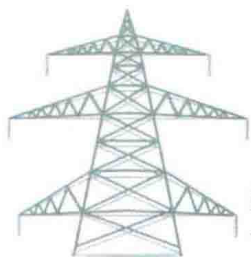
定 价: 88.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编 委 会

编委会主任	陈 庆				
编委会副主任	黄 清	陈 晟	许海清	刘华伟	
编委会成员	张 军	黄 强	李 群	李 杰	王 海
	戴 锋	张国江	范炜豪	邓洁清	姜海波
	袁 栋	许建刚	付 慧	薄 斌	刘 洋
	张 量	周志成	高 山	杨景刚	陶风波
	张建国				
编写组组长	黄 强	张 军			
编写组副组长	张建国	张国江			
编写组成员	刘建军	杨 超	李成钢	孙 雄	杨立恒
	袁光宇	陈大兵	胡 鹏	徐 强	张迺龙
	张晓琴	吴益明	陈少波	朱洪斌	余 翔
	贾勇勇	朱孟周	马 勇	陈 杰	蔚 超
	胡成博	卞 超	陈志勇	刘贞瑶	史如新
	周 鹏	何光华	徐 欣	邵 劭	马君鹏
	刘叙笔	颜 彪	吴 昊	廖才波	周 立
	高 嵩	曾 强	姚廷利	李 阳	缪 金
	徐祥波	梁永新	岳贤强		



输变电设备

金属材料及检测试验技术

前言

近年来,随着电力工业的快速发展,电网的承载能力和输送容量显著增加,输变电设备的可靠性显得愈加重要。金属材料是输变电设备的基础,金属材料性能是输变电设备电气性能的重要保障。金属技术监督作为一种保障设备运行安全的手段在电网生产过程中发挥了重要作用,它从输变电设备的选型、制造、安装、运行到检修维护的全过程对金属材料的性能进行分析和评价,通过检测试验手段实现排查设备隐患、评价设备状况、降低运行风险、提升电网设备安全水平的目的。

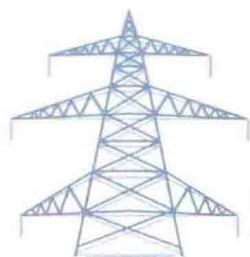
输变电设备种类繁多,功能各异,涉及的金属材料也多达数千种,涵盖了碳钢、合金钢、不锈钢、铜及铜合金、铝及铝合金等多个种类。输变电设备用金属材料检测试验涉及的专业方向也较为宽泛,包括金属材料性能分析、焊接及成型工艺、无损检测、腐蚀防护、结构力学等等。此外,输变电设备金属材料的检测试验还需要将金属材料理论与设备功能和使用条件相结合,以分析和评价的手段从设备全寿命周期管理环节提升和保障电网设备的质量和运行。

本书结合输变电设备金属材料检测试验工作的要求,紧贴电网设备实际,从金属材料基础知识、金属材料性能及特点、金属材料成型工艺、金属材料性能检测分析技术、无损检测技术、腐蚀与防护技术等方面对检测试验方法及其特点进行了系统阐述。为了利于指导现场检测试验工作的开展,本书汇集了相关工作的要点和技术要求,编写了金属材料检测试验的作业规范。此外,本书还列举了输变电设备失效典型案例,对读者开展输变电设备材料失效原因分析和缺陷隐患排查具有一定的指导和借鉴意义。

由于编者的经验和水平有限,以及金属材料专业和无损检测技术的不断发展,本书在内容上存在的不足和错误,敬请读者批评指正。

编者

2017年12月



输变电设备

金属材料及检测试验技术

目 录

前言

1	金属材料基础知识	1
1.1	金属材料概述	1
1.2	金属基本晶体结构	4
1.3	晶体缺陷	8
1.4	相及相图	10
2	金属材料性能及分类	18
2.1	金属材料的性能	18
2.2	金属材料的分类	25
3	电网设备常用金属材料	27
3.1	钢铁材料	27
3.2	铜及铜合金材料	38
3.3	铝及铝合金材料	43
3.4	银、锌、锡	53
4	金属材料成型工艺	54
4.1	铸造	54
4.2	焊接	58
4.3	塑性加工	81
4.4	冷加工技术	83
4.5	表面处理	84

5 金属材料检测试验方法 87

5.1 成分检测	87
5.2 力学性能试验	94
5.3 金相分析	116
5.4 断口分析	125

6 金属材料无损检测 129

6.1 概述	129
6.2 磁粉检测技术	130
6.3 超声波检测技术	138
6.4 射线检测技术	155
6.5 渗透检测技术	163
6.6 涂镀层厚度检测技术	169

7 金属材料腐蚀与防护 175

7.1 金属腐蚀基础知识	175
7.2 金属材料典型腐蚀形态与机理	182
7.3 金属腐蚀防护方法	191
7.4 铝合金阳极氧化及封闭处理	195
7.5 金属部件材料耐腐蚀性能检测方法	198

8 输变电设备金属材料现场检测工作要点 200

8.1 开关类设备触头镀银层厚度检测	200
8.2 户外密封机构箱箱体厚度检测	203
8.3 变电站不锈钢部件材质分析	204
8.4 GIS 壳体对接焊缝超声波检测	206
8.5 输变电金具外观质量检查	207
8.6 输变电构支架铁塔镀锌层厚度检测	208
8.7 输变电钢管结构焊缝质量检测	209
8.8 输变电工程紧固件质量检测	213
8.9 输电线路电力金属闭口销检测	214
8.10 输电线路耐张线夹压接质量 X 射线检测	215

9 / 输变电设备金属材料检测作业规范 216

9.1 开关类设备触头镀银层厚度检测作业规范 216

9.2 输变电构支架铁塔及紧固件镀锌层厚度检测作业规范 217

9.3 不锈钢材质分析作业规范 219

9.4 户外密封机构箱箱体厚度检测作业规范 220

9.5 焊缝超声波检测作业规范 221

10 / 输变电设备金属材料失效案例分析 225

10.1 不锈钢部件失效案例 225

10.2 焊接接头失效案例 233

10.3 材料原因导致失效案例 244

10.4 结构受力失效案例 256

参考文献 268



金属材料基础知识

1.1 金属材料概述

金属材料是指金属元素或以金属元素为主构成的具有金属特性的材料的统称,包括纯金属和合金。纯金属是指单一的、基本不含任何杂质的具有金属特性的材料。合金常指由两种或两种以上的金属或金属与非金属结合而成、具有金属特性的材料,如铁碳合金(钢)、铜锌合金(黄铜)等。

金属特性一般是指具有金属光泽(即对可见光强烈反射)、富有延展性、具有一定导电性、导热性、加工性和固定熔点,但并非所有的金属材料都具有良好的延展性和导电性。

比较严格的定义是:金属是具有正的电阻温度系数的物质。即:所有金属材料的电阻都随着温度的升高而增大,而所有非金属材料的电阻都随着温度的升高而减小,非金属材料的电阻温度系数为负值。

目前已知的 112 种元素中,有 92 种是金属元素,常温下除汞 Hg(水银)外,其余金属元素均以固体形式存在。在自然界中,绝大多数金属是以化合物形态存在的,少数金属如 Au、Pt、Ag、Bi 是以游离态存在的。游离态是元素存在的一种状态,与化合态相对。假如某物质只由一种元素组成,那么其状态即被称为游离态。金属矿物多数是氧化物及硫化物,其他存在形式有氯化物、硫酸盐、碳酸盐、硅酸盐等。

金属的特性是由于其原子的结构和原子间的结合方式决定的。也就是说,金属的特性归根于金属的原子结构,也取决于原子间的结合方式以及原子在空间的排列情况。为了理解金属的特性,首先要了解金属原子的结构特点。

1.1.1 金属原子结构

原子结构理论认为,孤立的自由原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子所组成。原子的尺寸很小,为 10^{-9}mm 数量级,原子核的尺寸更小,为 10^{-13}mm 数量级。原子核中包括质子和中子,质子与中子的质量近似相等。质子具有正电荷,每个质子所带电荷与一个电子所带电荷相等,但符号相反。每个原子中的质子数与核外电子数相等。核外电子按能级由低至高分层排列。内层电子的能量低,最为稳定。外层电子的能量高,与原子

核结合得弱,这样的电子通常称为价电子。原子中的所有电子都按照量子力学的规律运动。

金属原子的结构特点是,最外层的电子数很少,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较弱,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。因此,常将这些元素称为正电性元素。非金属元素的原子结构与此相反,即外层电子数较多,最多7个,最少4个,它易于获得电子,此时的原子即变为负离子。因此,非金属元素又称为负电性元素。过渡族金属元素,如钛、钒、铬、锰、铁、钴、镍等,它们的原子结构除具有上述金属原子的特点外,还有一个特点,即在次外层尚未填满电子的情况下,最外层就先填充了电子。因此,过渡族金属的原子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,这就出现过渡族金属化合价可变的现象。当过渡族金属的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,过渡族金属的原子间结合力特别强,宏观表现为熔点高、强度高。由此可见,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,而且对其化学性能和强度等特性也具有重要影响。

1.1.2 金属键

由于金属与非金属的原子结构不同,使原子间的相互结合产生了很大差别。下面以食盐(氯化钠)、金刚石(碳)和铜为例进行分析。当正电性元素钠和负电性元素氯相接触时,由于电子一失一得,使它们各自变成正离子和负离子,两者靠静电作用结合起来,氯化钠的这种结合方式称为离子键。碳的价电子数是4个,得失电子的机会近似,既可形成正离子,也可形成负离子。事实上,虽然碳偶尔也能与别的元素形成离子键,但它本身原子之间多以共价键方式结合。所谓共价键,即相邻原子共用它们外部的价电子,形成稳定的电子满壳层。金刚石中的碳原子之间完全以共价键结合。铜原子之间的结合既不同于离子键,也不同于共价键,属于金属键。近代物理和化学的观点认为: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,为整个原子集体所公有,称之为电子云或电子气。这些价电子或自由电子,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的规律运动着。贡献出价电子的原子,则变为正离子,沉浸在电子云中,它们依靠运动于其间的公有化的自由电子的静电作用而结合起来,这种结合方式叫做金属键。金属键没有饱和性和方向性。图1-1-1示意地绘出了金属键模型。这种模型认为,在固态金属中,并非所有原子都变为正离子,而是绝大部分处于正离子状态,但仍有少部分原子处于中性原子状态。

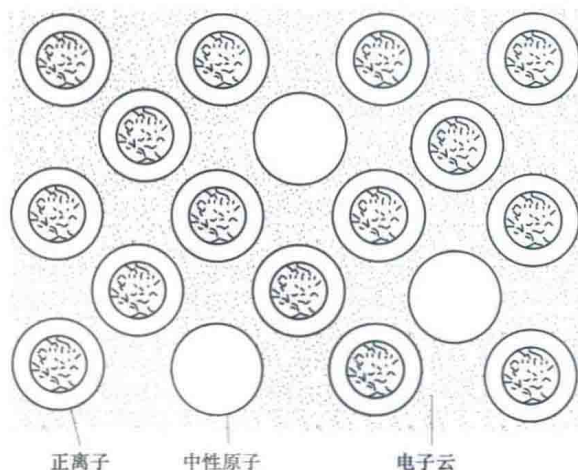


图 1-1-1 金属键模型

在金属及合金中,主要是金属键,但有时也不同程度地混有其他键。



根据金属键的本质,可以解释固态金属的一些特性。例如,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。自由电子的运动和正离子的振动使金属具有良好的导热性。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。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,从而使金属不透明,具有金属光泽。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,从而保持金属键结合。这样,金属就能经受变形而不断裂,使其具有延展性。

1.1.3 金属原子的结合力与结合能

在固态金属中,众多的原子依靠金属键牢固地结合在一起。下面从原子间的结合力与结合能来说明,沉浸于电子云中的金属原子(或正离子)为什么像图 1-1-1 所示的那样规则排列着,并往往趋于紧密地排列。为简便起见,首先分析两个原子之间的相互作用情况(即双原子作用模型)。当两个原子相距很远时,它们之间实际上不发生相互作用,但当它们相互逐渐靠近时,其间的作用力就会随之显示出来。分析表明,固态金属中两原子之间的相互作用力包括:正离子与周围自由电子间的吸引力、正离子与正离子以及电子与电子之间的排斥力。吸引力力图使两原子靠近,而排斥力力图使两原子分开,它们的大小都随原子间距离的变化而变化,如图 1-1-2 所示。

图 1-1-2 的上半部分为 A、B 两原子间的吸引力和排斥力曲线,两原子的结合力为吸引力与排斥力的代数和。吸引力是一种长程力,排斥力是一种短程力,当两原子间距较大时,吸引力大于排斥力,两原子自动靠近。当两原子靠近致使其电子层发生重叠时,排斥力便急剧增长,一直到两原子距离为 d_0 时,吸引力与排斥力相等,即原子间结合力为零,好像位于原子间距 d_0 处的原子既不受吸引力,也不受排斥力一样。 d_0 即相当于原子的平衡位置,原子既不会自动靠近,也不会自动离开。任何对平衡位置的偏离,都立刻会受到一个力的作用,促使其回到平衡位置。例如,当距离小于 d_0 时,排斥力大于吸引力,原子间要相互排斥;当距离大于 d_0 时,吸引力大于排斥力,两原子要相互吸引。如果把 B 原子拉开,远离其平衡位置,则必须施加外力,以克服原子间的吸引力。当把 B 原子拉至 d_c 位置时,外力达到原子结合力曲线上的最大值,超过 d_c 之后,所需外力就越来越小。可见,原子间的最大结合力不是出现在平衡位置,而是在 d_c

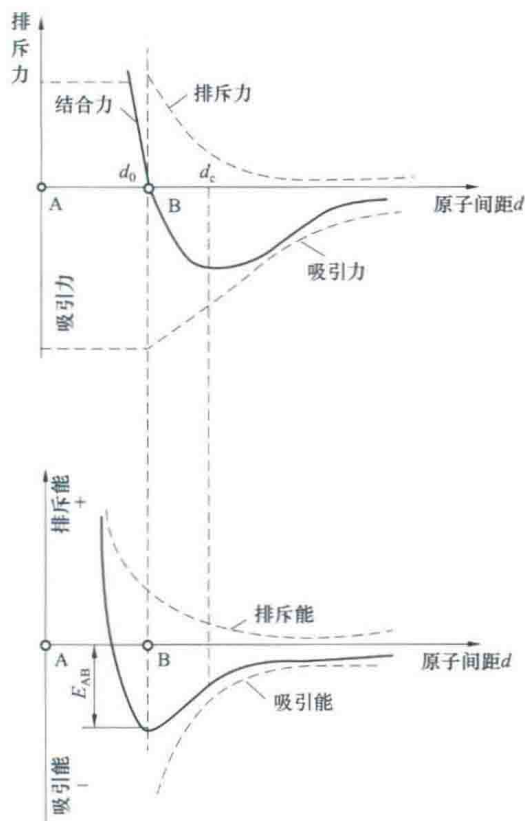


图 1-1-2 双原子作用模型



位置上。这个最大结合力就对应着金属的理论抗拉强度。金属元素不同,则原子的最大结合力值也不同。此外,从图上可以看出,在 d_0 点附近,结合力与距离的关系接近线性关系。

图 1-1-2 的下半部分是吸引能和排斥能与原子间距离的关系曲线,结合能是吸引能与排斥能的代数和。当形成原子集团比分散孤立的原子更稳定,即势能更低时,那么,在吸引力的作用下把远处的原子移近所做的功是使原子的势能降低,所以吸引能是负值。相反,排斥能是正值。当原子移至平衡距离 d_0 时,其结合能达到最低值,即此时原子的势能最低、最稳定。任何对 d_0 的偏离,都会使原子的势能增加,从而使原子处于不稳定状态,原子就有回到低能状态,即恢复到平衡位置的倾向。这里的 E_{AB} 称为原子间的结合能或键能。同样,金属元素不同,则其结合能的大小也不同。

将上述双原子作用模型加以推广,不难理解,当大量金属原子结合成固体时,为使固态金属具有最低能量,以保持其稳定状态,大量原子之间也必须保持一定的平衡距离,这就是固态金属中的原子趋于规则排列的重要原因。

如果试图从固态金属中把某个原子从平衡位置拿走,就必须对它做功,以克服周围原子对它的作用力。显然,这个要被拿走的原子周围近邻的原子数越多,所需要做的功也越大。由此可见,原子周围最近邻的原子数越多,原子间的结合能(势能)越低。能量最低的状态是最稳定的状态,而任何系统都有自发从高能状态向低能状态转化的趋势。因此,常见金属中的原子总是自发地趋于紧密地排列,以保持最稳定的状态。

当原子间以离子键或共价键结合时,原子达不到紧密排列状态,这是由于这种结合方式对原子周围的原子数有一定的限制之故。

最后,应当指出,所有的离子和原子在各自的平衡位置上并不是固定不动的,而是各自以其平衡位置为中心作微弱的热振动。温度越高,热振动的振幅越大。

1.2 金属基本晶体结构

金属中的原子是有序排列的,我们将这种原子在三维空间作有规则的周期性重复排列的物质称为晶体,金属一般均为晶体。在晶体中,原子排列的规律不同,其性能也不同。

1.2.1 晶体的特性

晶体与非晶体的区别不在外形,主要在于内部的原子排列情况。在晶体中,原子按一定的规律周期性地重复排列着,而所有的非晶体,如玻璃、木材、棉花等,其内部的原子则是散乱分布着,至多有些局部的短程规则排列。

由于晶体中的原子呈一定规则重复排列着,这就造成了晶体在性能上具有区别于非晶体的一些重要特点。

首先,晶体具有一定的熔点(熔点就是晶体向非晶体状态的液体转变的临界温度),



在熔点以上,晶体变为液体,处于非晶体状态;在熔点以下,液体又变为晶体,处于结晶状态。金属从晶体至液体或从液体至晶体的转变都是突变的。而非金属则不然,它从固体至液体,或从液体至固体的转变都是逐渐过渡的,没有确定的熔点或凝固点,所以可以把固态非晶体看作是过冷状态的液体,它只是在物理性质方面不同于通常的液体而已,玻璃就是一个典型的例子。故往往将非晶体态的固体称作玻璃体。

其次,晶体的另一个特点是在不同的方向上测量其性能(如导电性、导热性、热膨胀性、弹性和强度等)时,表现出或大或小的差异,称之为各向异性或异向性。而非晶体在不同方向上的性能则是一样的,不因方向而异,称之为各向同性或等向性。

由此可见,晶体与非晶体之间存在着本质的差别,但这并不意味着两者之间存在着不可逾越的鸿沟。在一定条件下,可以将原子呈不规则排列的非晶体转变为原子呈规则排列的晶体,反之亦然。例如,玻璃经长时间高温加热后能形成晶态玻璃;用特殊的设备使液体金属以极快的速度冷却下来,可以制出非晶态金属。当然,这些转变的结果必然使其性能发生极大的变化。

1.2.2 晶格与晶胞

原子的空间排列规律可以用刚球堆垛来表示,也可以将原子抽象成几何点(称为阵点或结点),用平行线将各个阵点连接起来,构成一个三维的空间格架。这种用以描述晶体中原子(离子或分子)排列规律的空间格架称为空间点阵,简称点阵或者晶格,如图 1-2-1 所示。

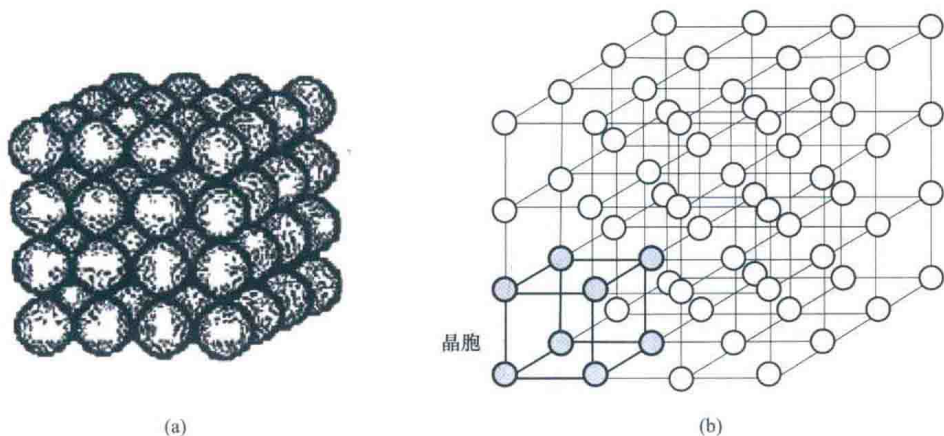


图 1-2-1 原子排列方式示意图

(a) 原子堆垛模型; (b) 晶格

由于晶格中的原子排列具有周期性的特点,因此可以认为晶格是由许多大小、形状和位向相同的基本几何体在空间重复堆积而成的。这种可以完整反映晶格特征的最小几何单元称为晶胞。

1.2.3 典型的晶体结构

自然界中的晶体有数万种,它们的晶体结构也各不相同。但根据晶胞的三个晶格常数

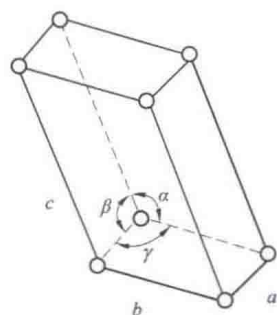


图 1-2-2 晶胞的晶格常数示意图

(图 1-2-2 中晶胞三个棱边长度 a 、 b 、 c) 和三个轴间夹角 (图 1-2-2 中晶胞三个棱边夹角 α 、 β 、 γ) 的相互关系, 则可以将晶体的空间点阵分为 14 种类型。根据空间点阵的基本特点, 又可以将 14 种空间点阵归结为 7 个晶系。

由于金属原子趋于紧密排列, 所以工业上使用的金属元素中, 绝大多数都具有比较简单的晶体结构 ($a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$), 其中最常见有体心立方、面心立方和密排六方结构三种。

表 1-2-1

常见晶体结构的特点

晶体结构	刚球模型	晶胞	特点及对应原子
体心立方 (BCC)			晶胞的 3 个棱边长度相同, 三个轴间夹角均为 90° 。在晶胞 8 个角上各有 1 个原子, 立方体中心还有一个原子。 具有体心立方晶格的金属有 α -Fe (室温下的铁)、Cr、V、Nb、W 等
面心立方 (FCC)			在晶胞 8 个角上各有 1 个原子, 立方体 6 个面的中心还有一个原子。 具有面心立方晶格的金属有 γ -Fe (高温下的铁)、Cu、Al、Ni、Ag、Pb 等
密排六方 (CPH)			在晶胞的 12 个角上各有 1 个原子, 构成六方柱体, 上底面和下底面的中心各有 1 个原子, 晶胞内还有 3 个原子。 具有密排六方晶格的金属有 Zn、Mg、Be、Cd 等

表 1-2-2

晶格类型特征及对应的常见金属

晶格类型	晶胞中的原子数	原子半径	致密度	常见金属
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	0.68	Cr、W、Mo、V、 α -Fe
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	0.74	Cu、Al、Au、Ag、 γ -Fe
密排六方	6	$\frac{1}{2}a$	0.74	Mg、Zn、Be、Cd



从表 1-2-2 中可以看出, 三种常见的晶格结构中, 原子排列最致密的是面心立方晶格和密排六方晶格, 而体心立方晶格的致密度要小一点。因此, 当金属从一种晶格转变为另一种晶格时, 如: 铁从高温冷却时, 由面心立方的 $\gamma\text{-Fe}$ 转变为体心立方的 $\alpha\text{-Fe}$ 时, 将会引起体积和致密度的变化; 若体积变化受到约束, 则会在金属内部产生出内应力, 当内应力较大时会导致金属部件发生变形或开裂。

1.2.4 晶向指数和晶面指数

在晶体中, 由一系列穿过原子中心的线所组成的平面称为晶面, 任意两原子之间连线所指的方向称为晶向。为了研究和表述不同晶面和晶向的原子排列情况及其在空间的位向, 需要有一个统一的表示方法, 这就是晶面指数和晶向指数。晶向指数与晶面指数的标定如图 1-2-3、图 1-2-4 所示。

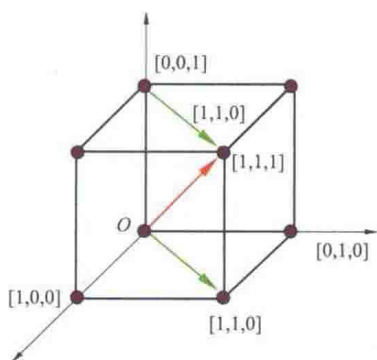


图 1-2-3 晶向指数的标定

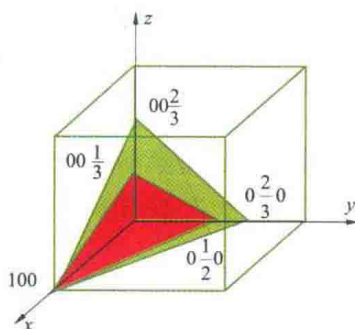


图 1-2-4 晶面指数的标定

1.2.5 晶体的各向异性

各向异性是晶体的一个重要特性, 是区别于非晶体的重要标志。晶体具有各向异性的原因, 是由于在不同晶向上的原子紧密程度不同所致。原子的紧密程度不同, 意味着原子之间的距离不同, 则导致原子间结合力不同, 从而使晶体在不同晶向上的物理、化学和机械性能不同, 即无论是弹性模量、断裂抗力、屈服强度, 还是电阻率、磁导率、线膨胀系数以及在酸中的溶解速度等方面都表现出明显的差异。

1.2.6 多晶型性

大多数金属在固态下只有一种晶体结构, 如铜、铝、银等金属在固态时无论温度高低, 均为面心立方晶格, 钨、钼、钒等金属则为体心立方晶格。但有些金属在固态下存在两种或两种以上的晶格形式, 即具有多晶型。如铁、锡、锰、钛等金属在加热或冷却过程中, 其晶格类型会发生变化。

金属在固态下随温度的改变由一种晶格类型转变为另一种晶格类型的现象, 称为同素异构转变或多晶型转变。同一金属的同素异构体按其稳定存在的温度, 由低温到高温依次用希腊字母 α 、 β 、 γ 、 δ 等表示。如: 铁在 912°C 以下为体心立方晶格, 称为 $\alpha\text{-Fe}$; 在 $912\sim 1394^\circ\text{C}$, 具有面心立方晶格, 称为 $\gamma\text{-Fe}$; 而从 1394°C 至熔点, 又转变为体心立方晶格,

称为 δ -Fe。由于不同的晶体结构具有不同的致密度，因而当发生多晶型转变时，将伴有比容或体积的突变。

同素异构转变是各种金属材料能够通过热处理方法改变其内部组织结构，从而改变其性能的理论依据。

1.3 晶体缺陷

在实际应用的金属材料中，总是不可避免地存在一些原子偏离规则排列的不完整性区域，这就是晶体缺陷。这些晶体缺陷不但对金属及合金的性能（特别是那些对结构敏感的性能，如强度、塑性、电阻等）产生重大影响，而且还在扩散、相变、塑性变形和再结晶过程中扮演着重要角色。

根据晶体缺陷的几何形态特征，可以将其分为点缺陷、线缺陷及面缺陷。

1.3.1 点缺陷

点缺陷的特征是三个方向的尺寸都很小，相当于原子的尺寸，常见的点缺陷有空位、间隙原子、置换原子，如图 1-3-1 所示。

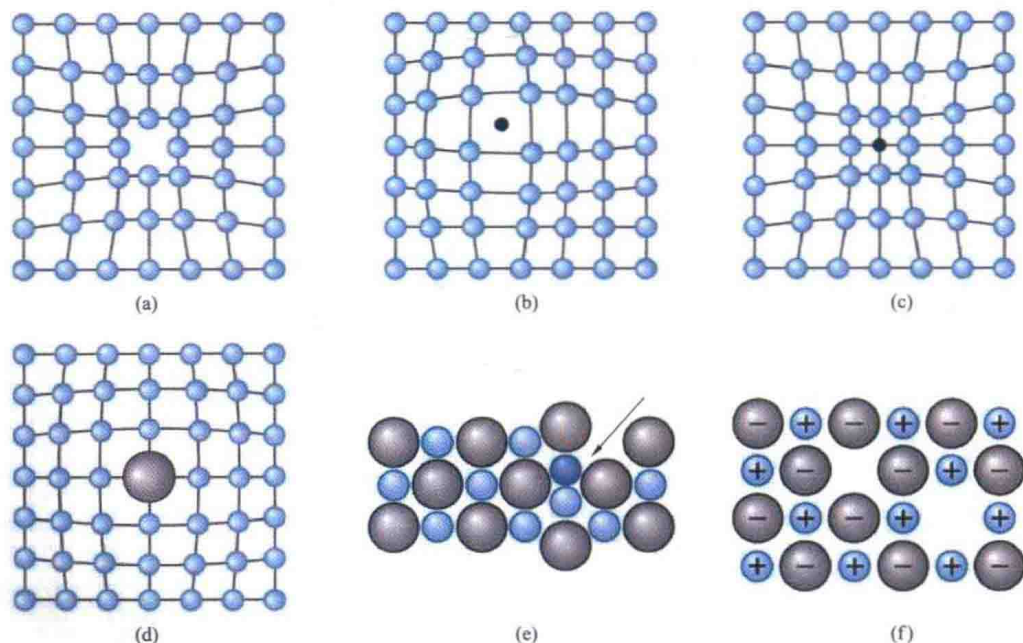


图 1-3-1 点缺陷示意图

(a) 空位；(b) 间隙原子；(c) 置换原子；(d) 置换原子；(e) 间隙原子；(f) 空位

空位是原子迁移的结果，是一种热平衡缺陷，温度升高，原子振动能量提高，迁移增多，空位浓度提高。处于晶格间隙中的原子即为间隙原子，它也是一种热平衡缺陷，在一定温度下有一个平衡浓度，这个浓度也称为固溶度。占据在原来基体平衡位置上的异类原子称为置换原子，由于置换原子的大小与基体原子不可能完全相同，也会造成晶



格畸变。

无论是哪种点缺陷,都会造成晶格畸变,对金属性能产生影响,例如屈服强度升高、电阻增大、体积膨胀等。此外,点缺陷的存在将加速金属中的扩散过程,因此凡与扩散有关的相变、化学热处理、高温下的塑性变形和断裂,都与空位和间隙原子的存在和运动有密切关系。

1.3.2 线缺陷

晶体中的线缺陷就是各种类型的位错,它是在晶体中某处有一列或若干列原子发生了有规律的错排现象,使长度达几百至几万、宽约几个原子间距范围内的原子离开其平衡位置,发生了有规律的错动。位错中最简单、最基本的类型有刃型位错和螺型位错。位错是一种极为重要的晶体缺陷,它对于金属的强度、断裂和塑性变形等起着决定性的作用。

刃型位错模型如图 1-3-2 所示,犹如一把锋利的钢刀将晶体上半部分切开,亦可理解为右上部晶体中的原子自右向左滑移了一个原子间距。

螺型位错可以设想为立方晶体右端上下部分沿滑移面发生了一个原子间距的相对切边,已滑移区和未滑移区的边界就是螺型位错线。由于位错线附近的原子是按螺旋形排列,所以称为螺(旋)型位错,如图 1-3-3 所示。

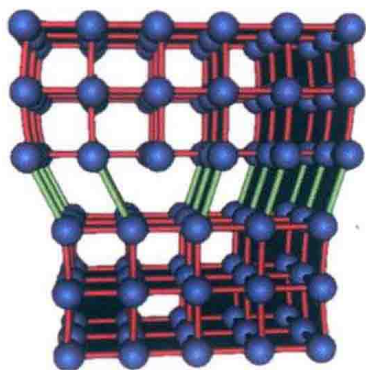


图 1-3-2 刃型位错示意图

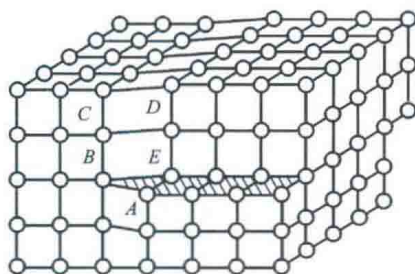


图 1-3-3 螺(旋)型位错示意图

实际晶体中经常含有大量的位错,位错密度非常高,特别是经剧烈冷塑性变形的金属。如果金属中不含位错,那么它将有极高的强度,位错有利于金属的变形,但由于变形后位错密度的增加,位错之间相互作用和制约,晶体的强度便又上升。

1.3.3 面缺陷

晶体的面缺陷包括晶体的外表面(表面或自由界面)和内界面两类,其中内界面又有晶界、亚晶界、孪晶界、堆垛层错和相界等。如果将位错认为是一种线性的晶体缺陷,那么面缺陷可认为是二维的晶体缺陷。

晶界分为大角度晶界和小角度晶界。晶粒位向差大于 10° 的晶界为大角度晶界(见图 1-3-4),多晶体金属中的晶界大都属于大角度晶界,其晶界结构十分复杂;晶粒位向