

牟在根 编著

钢结构设计与原理

Steel Structures
Design and Principles



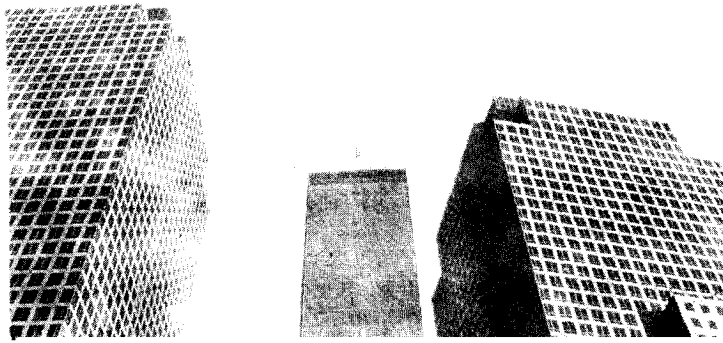
人民交通出版社

China Communications Press

钢结构设计与原理

Steel Structures
Design and Principles

车在根 编著



内 容 简 介

本书从金属的晶体结构出发,比较系统地介绍了金属的塑性变形与钢的热处理、钢结构的稳定与连接、钢结构的断裂与疲劳破损、钢结构防火设计以及钢与混凝土组合结构设计等内容。

本书可供结构工程专业的研究生作为教材使用,亦可供科研和工程技术人员参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计与原理 / 牟在根编著. —北京:人民交通出版社, 2004.5
ISBN 7-114-05028-3

I. 钢… II. 牟… III. 钢结构—结构设计
IV. TU391.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第027534号

钢结构设计与原理

牟在根 编著

正文设计:彭小秋 责任校对:王静红 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京明十三陵印刷厂印刷

开本:787×980 1/16 印张:13.5 字数:230千

2004年4月 第1版

2004年4月 第1版 第1次印刷

印数:0001-3000册 定价:18.00元

ISBN 7-114-05028-3

序

改革开放以来,我国的钢产量有了迅猛的提高。在短短的几年内,中国已成为世界上产钢大国之一,同时钢材的品种和质量也有了较大的提高。这样就为在建筑工程中应用钢材提供了有利的条件。国家的建筑技术政策也由以往的限制使用钢材转变为积极推广应用钢材,促使我国的钢结构呈现了焕然一新的局面。现在不论是大跨度的体育场馆、会展中心、候机大厅、会堂剧场,或是高层的办公楼、旅馆、住宅,乃至大面积的工业厂房、仓库,无不见到钢结构的踪影。

钢结构的大量发展一方面代表了我国建筑技术水平的提高,另一方面也暴露出钢结构人才的匮乏,不论是设计或施工方面都急需有经验的技术人员。目前,高等学校土建专业中的课程安排尚不能使学生掌握足够的钢结构知识,而工作多年的工程师也缺少钢结构的实践经验,因此在钢结构方面的教育与再教育就成为当务之急,而提供好的学习、参考用书的必要性也就不言而喻了。

车在根教授过去在中国科学院结构所工作多年,后来去韩国深造,师从庆北大学姜文明教授,在结构工程方面进行了深入的研究,获得了博士学位。学有所成后回到祖国,继续在教育战线和科研战线上发挥作用。他结合实践、教学工作编写了这本《钢结构设计与原理》,综合了他多年来的心得,是一本很有特色的教材,也是一本有价值的参考用书。书中不拘泥于一般钢结构图书的写法,而是从论述金属材料的微观出发,然后详细讨论了当前钢结构设计中的一些关键问题——稳定、疲劳和防火。相信这本书的出版将对我国钢结构的应用和研究起很好的推动作用。

车在根

2004年3月于中国建筑科学研究院

1000/04

前 言

随着我国国民经济的迅速发展,钢结构在建筑结构中开始发挥越来越重要的作用,尤其是在高层与超高层建筑、大跨空间结构、桥梁结构等建、构筑物中大量采用钢结构或钢与混凝土组合结构,为钢结构的进一步发展提供了广阔的发展空间。同时我国的钢产量目前位居世界第一,国家产业政策也大力提倡采用钢结构。在这个背景下,工程师对钢结构的性能应有一个全面的了解。对钢结构性能的了解应该包括钢材这种金属材料的微观和宏观性能,既应从金属的内部结构和组织状态出发,把握钢材宏观的物理力学性能,还要了解钢结构加工制造和安装等各种工序对钢结构构件产生的影响、环境对钢结构的影响以及结构形式与构造细节可能对结构产生的影响。

作者在为结构工程专业研究生讲授高等钢结构课程中发现,多数学生对钢材这种金属材料的内部组织结构欠缺了解,从而影响他们在更深层次上理解和掌握钢结构的性能,因此有必要编写一本从微观到宏观,比较全面系统地介绍钢结构各种性能的研究生教材。基于上述原因,特编写本书。在内容上,前二章主要介绍金属的晶体结构、铁碳合金和碳钢、金属的塑性变形和钢的热处理;第三、四章主要介绍钢结构在承载能力极限状态设计中,结构构件或连接件因材料强度被超过而破坏和结构或构件丧失稳定(屈曲等)而破坏的两种很重要的破坏形态,其中包括轴压、受弯、压弯构件以及网壳结构的稳定性分析和钢结构的焊缝连接计算、螺栓连接计算以及构件的构造设计;第五章从断裂力学的观点分析钢结构脆断问题和疲劳破损问题,并介绍了抵抗脆性断裂和疲劳破损的构造措施;第六章主要介绍了钢结构抗火设计的一般原则和实用的抗火计算与设计方法;第七章介绍了钢与混凝土组合结构,其中主要介绍了型钢混凝土梁正、斜截面承载能力的计算和偏压柱的计算以及型钢混凝土结构的构造要求;最后一章则介绍了结构设计的模糊决策方法。

本书相关课题的研究得到了国家自然科学基金委员会和全国高等教育科学“十五”规划重点研究课题的大力支持,同时在本书编写过程中,硕士研究生李黎明和郇亮同学协助完成了大量编辑工作,在此一并表示感谢。

在本书的编写过程中,参考和引用了公开发表的一些文献和资料,谨向这些作者表示真挚的感谢。

由于水平有限和时间紧迫,书中错误与不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

牟 在 根

2004年3月于北京科技大学

目 录

第一章 金属的晶体结构与结晶	1
1.1 金属的晶体结构	2
1.2 金属的同素异构转变	6
1.3 实际金属的晶体结构	7
1.4 铁碳合金	9
1.5 碳钢	15
第二章 金属的塑性变形和钢的热处理	21
2.1 金属的塑性变形	21
2.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	25
2.3 金属的热变形	28
2.4 超塑性	31
2.5 钢的热处理	32
第三章 钢结构的稳定	47
3.1 钢结构的稳定问题	47
3.2 钢结构稳定问题的类型	48
3.3 钢结构稳定需注意的问题	50
3.4 轴心受压构件的弯曲屈曲	53
3.5 压弯与受弯构件的稳定理论	64
3.6 网壳结构的稳定性	77
第四章 钢结构连接与构造设计	79
4.1 角焊缝的性能和计算	79
4.2 螺栓连接的计算	86
4.3 构造设计	91
第五章 钢结构的断裂与疲劳破坏	106
5.1 钢结构断裂	106
5.2 钢结构的疲劳破坏	116
第六章 钢结构防火设计	127
6.1 钢结构防火、耐火及抗火	127
6.2 钢结构抗火设计的一般原则与方法	132

6.3	钢结构构件实用抗火计算与设计方法	137
6.4	钢结构防火措施	149
第七章	钢与混凝土组合结构	159
7.1	概述	159
7.2	型钢混凝土结构的截面形式	165
7.3	配实腹钢的型钢混凝土梁正截面承载能力计算	167
7.4	配实腹钢的型钢混凝土梁斜截面承载能力计算	176
7.5	配实腹型钢混凝土偏压柱的计算	180
7.6	型钢混凝土结构的构造要求	183
第八章	结构设计的模糊决策方法	187
8.1	结构的安全准则	188
8.2	结构设计的可用性分析	189
8.3	结构设计的决策方法	198
参考文献	204

第一章 金属的晶体结构与结晶

物质是由原子构成的。原子结构理论指出,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组成的。原子的尺寸很小,在 10^{-8} 数量级,原子核的尺寸更小,在 10^{-12} 数量级。原子核中又包括质子和中子。自由电子的静止质量为 9.1×10^{-28} g,有效半径为 4.6×10^{-13} cm。质子是电子质量的 1836 倍,其静止质量为 1.67×10^{-24} g,有效半径为 1.4×10^{-13} cm,它带有与电子等量的电荷,但符号相反。中子是电子质量的 1838 倍,比质子稍重,由于中子不带电荷,原子有时可视为由一个质子与一个电子所组成。

金属原子结构的特点是原子最外层电子数很少,这些最外层电子很容易脱离原子核的引力,成为自由电子,同时使原子成为正离子。大量金属原子聚集在一起构成固态金属时,绝大多数原子会失去其最外层电子而成为正离子;脱离原子核束缚的自由电子在各正离子之间自由运动,并为整个金属原子所共有,形成“电子云”,图 1-1 示意地绘出了金属键模型。

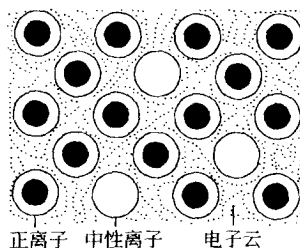


图 1-1 金属键模型

金属晶体就是依靠各正离子和电子云之间的静电引力牢固地结合在一起的。这种共有化的电子和正离子以静电引力结合起来就形成所谓的金属键。

金属键理论能较好地解释固态金属的下述特性:由于金属中存在大量自由电子,在外加电场作用下自由电子作定向流动,形成电流,故具有良好导电性;各种固体是靠其原子(分子或离子)的振动而传递热能的,而金属固体除正离子振动传热之外,其自由电子运动也能传热,所以金属导热性一般比非金属好;金属在外力作用下,各部分原子发生相对移动而改变形状时,正离子与自由电子间仍保持金属键结合而不被破坏,故显示出良好的可锻性。

金属材料的化学成分不同,其性能也不同。金属除化学成分外,金属的内部结构和组织状态也是决定金属材料性能的重要因素。这就促使人们致力于金属及合金内部组织结构的研究,以寻求改善和发展金属材料的途径。金属在固态下通常都是晶体。要了解金属及合金的内部结构,首先应了解

晶体的结构,其中包括:原子的排列方式和分布规律;各种晶体的特点及差异等。

1.1 金属的晶体结构

1.1.1 晶体结构的基本概念

由于原子在物质内部的排列方式不同,可以把固态物质分为晶体和非晶体两大类。凡内部原子呈规则排列的物质称为晶体,如所有固态金属都是晶体;凡内部原子无规则排列的物质称为非晶体,如松香、玻璃等都是非晶体。晶体结构是指晶体内部原子排列的方式及特征。只有研究金属的晶体结构,才能从本质上说明金属性能的差异及变化的实质。

为了便于说明晶体中原子排列的规律,用假想直线将各原子的振动中心连接起来,构成空间格架。这种用以描述原子在晶体中排列形式的空间格架称为晶格(图 1-2b))。晶格中原子组成的平面称为晶面,故晶格或晶体可以看成是由层层晶面堆砌而成的结构。晶格中通过两个以上原子振动中心的直线称为晶向,它能表示晶格或晶体的空间方位。晶相中最简单、最基本、最典型的空间几何体称为晶胞(图 1-2c)),它代表着晶格的结构形式。整个晶格就是由许多个大小、形状和位向相同的晶胞重复堆集而成的。晶胞的棱边长度称为晶格常数,其单位为 \AA 或 $\text{nm}(1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm} = 0.1\text{nm})$ 。

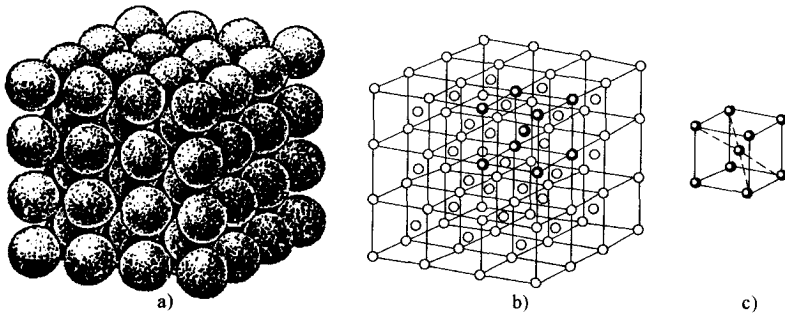


图 1-2 原子排列示意图

a)原子堆垛模型;b)晶格;c)晶胞

1.1.2 三种典型的金属晶体结构

自然界中的晶体有成千上万种,它们的晶体结构各不相同。但若根据晶胞的三个晶格常数和三个轴间夹角的相互关系对所有的晶体进行分析,

则发现空间点阵只有 14 种类型,进一步根据晶体的对称程度高低和对称特点,又可将 14 种空间点阵归属 7 个晶系,如表 1-1 所示。由于金属原子倾向于紧密排列,所以在工业上使用的金属元素中,除了少数具有复杂的晶体结构外,绝大多数都具有比较简单的晶体结构。其中最典型、最常见的晶体结构有三种类型,即体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构,前两种属于立方晶系,后一种属于六方晶系。

7 个晶系和 14 种点阵

表 1-1

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 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma \neq 90^\circ \neq \beta$ $\beta-S$				
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				

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
四方晶系 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ β -Sn, TiO ₂				
立方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Fe, Cr, Ca, Ag				

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞模型见图 1-3。晶胞的三个棱边长度相等,三个轴间夹角均为 90° ,构成立方体。除了在晶胞的八个角上各有一个原子外,在立方体的中心还有一个原子。具有体心立方结构的金属有 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W 等 30 多种。

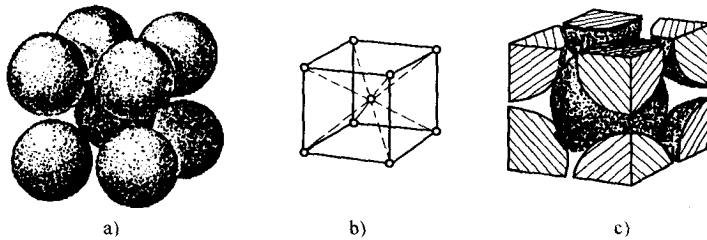


图 1-3 体心立方晶胞
a) 刚球模型; b) 质点模型; c) 晶胞原子数

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 1-4 所示。在晶胞的 8 个角上各有 1 个原子,构成立方体,在立方体 6 个面的中心各有 1 个原子。 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag 等几种金属具有这种晶体结构。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞如图 1-5 所示。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、 α -Ti、 α -Co、Cd 等。

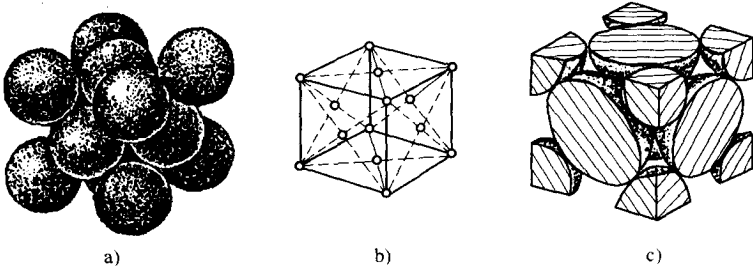


图 1-4 面心立方晶胞
a)刚球模型;b)质点模型;c)晶胞原子数

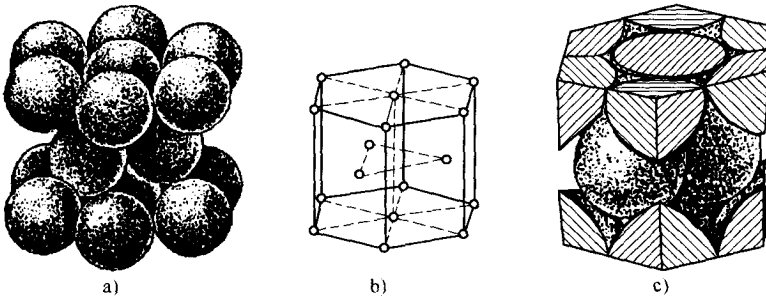


图 1-5 密排六方晶胞
a)刚球模型;b)质点模型;c)晶胞原子数

1.1.3 配位数和致密度

晶格原子排列的密度,可根据配位数来判断。所谓配位数,就是晶格中任一原子周围所紧邻的等距离的原子数。如在体心立方晶格中,任一原子周围所邻近的等距离的原子数是 8,面心立方和密排六方晶体的配位数为 12。体心立方晶胞的对角线方向上原子是彼此紧密相接触排列的;此对角线的长度应为 $\sqrt{3}a$,所分布的原子数共有两个,可计算出其原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。在这种晶胞中,因为每个顶上的原子是同时属于周围八个晶胞所共有,故实际上每个体心立方晶胞仅包含有 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 个原子。因此可以求出体心立方晶格的致密度为:

$$\text{致密度} = \frac{\text{原子占有体积}}{\text{晶胞体积}} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = 2 \times \frac{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3}{a^3} = 0.68$$

即,晶格中有 68%的体积被原子所占据,其余为空隙。致密度越大,晶格中的原子排列越紧密。

用同样方式可求出面心立方晶格和密排六方晶格的致密度均为 0.74。

1.1.4 晶面指数和晶向指数

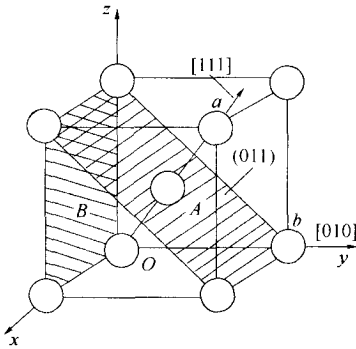


图 1-6 晶面和晶向

晶体中各原子组成的原子平面叫晶面。任意两个原子连成的直线,它所指的方向叫晶向。不同晶面和晶向上原子排列的密度是不同的,如图 1-6 所示。图中的 B 和 A 均为晶面; Oa 和 Ob (Ob 和坐标轴 y 重合)均为晶向。可以看出, A 面比 B 面的原子排列紧密,而晶向 Oa 的原子排列比晶向 Ob 的原子排列密集。

晶面指数是根据晶面与三个坐标的截距的倒数并取最小整数来确定的,用圆括号表示,例如图中 A 晶面表示为 (011) 。晶向指数是用通过坐标原点直线上某一点的坐标(如图中 a 的坐标 $x=1, y=1, z=1$)来确定的,用方括号表示,例如图中 a 的晶向指数为 $[111]$ 。 $\{100\}$ 表示原子排列完全相同的一族面。 $\langle 100 \rangle$ 表示一族等效结晶方向。

金属的晶格类型和大小不同,晶格中原子排列的密度不同,都必将造成金属性能的很大差异。同一种金属在不同方向上的性能也会有所不同,即表现出金属的性能具有方向性。因此在选用金属材料 and 制定工艺规程中,要考虑这个特性,以保证能充分发挥材料的作用,保证金属构件的质量。

1.2 金属的同素异构转变

多数固态纯金属的晶格类型不会改变。但有些金属(如铁、锰、锡、钛、钴等)的晶格会因温度的改变而发生变化。固态金属在不同温度区间具有不同晶格类型的性质,称为同素异构性。发生晶格改变的过程称为同素异构转变,而这种转变的实质是原子进行重新排列。

图 1-7 所示为纯铁的冷却曲线。液态纯铁冷却到 1538°C 转变成为固态纯铁,它具有体心立方晶格,称为 $\delta\text{-Fe}$ 。继续冷却到 1394°C 时发生同素异构转

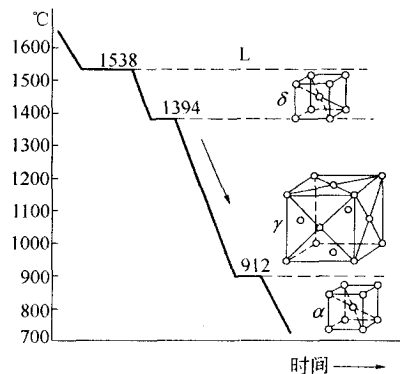


图 1-7 纯铁的冷却曲线

变,晶格类型转变成为面心立方晶格,称为 γ -Fe。温度降至 912°C 时再次发生同素异构转变,获得体心立方晶格的 α -Fe。直至室温,纯铁的晶格类型不再发生变化。

冷却曲线上的水平段,说明同素异构转变是恒温转变。即同素异构转变中,金属内部有能量变化,放出潜热平衡所散失的热量,使整个系统的温度不发生改变。

同素异构转变前后,因晶格类型不同,将引起金属体积的变化。如 γ -Fe转变为 α -Fe时,纯铁的体积增大。这种体积变化的现象会对热加工产品的质量产生一定的影响,应加以注意。纯金属具有同素异构性,在掺入其他元素后,其结构会有多种类型。这样,就可以采用热处理工艺来改变金属的性能,自然也就扩大了该种金属的使用范围。

1.3 实际金属的晶体结构

金属内所有原子排列的形式和方位都完全一致的结构,称为单晶体。具有单晶体结构的金属,其性能表现出明显的方向性,但其获得非常困难。而实际固体金属是由许多小晶体所组成的,称为多晶体。图 1-8 为纯铁的显微组织,是由许多类似多边形的颗粒组成,这些小颗粒称为晶粒。晶粒之间的界面称为晶界,每一晶粒相当于一个单晶体。晶体金属中各个晶粒的原子排列虽然相同,但每个晶粒原子排列的位向是不相同的,如图 1-9 所示。

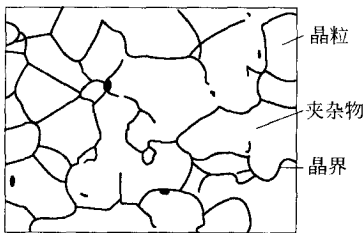


图 1-8 工业纯铁的显微组织

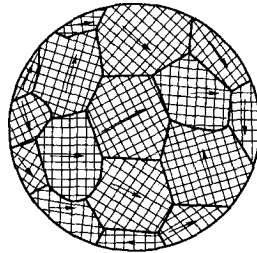


图 1-9 各晶粒位向示意图

多晶体金属的性能在各个方向上基本上是一致的,例如 α -Fe多晶体在各方向的弹性模量 E 都是 $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$,这种现象称之为“伪各向同性”。这是由于在多晶体中,虽然每个晶体都是各向异性的,但它们是任意分布的,晶体的性能在各个方向相互补充和抵消,再加上晶界的作用,就掩盖了每个晶粒的各向异性。

实际上使用的金属,其内部结构的原子排列并非完全完整无缺的,而是

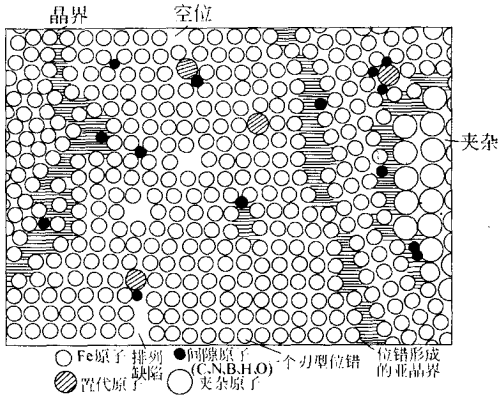


图 1-10 实际金属晶体的结构

在每个晶体的某些部位,由于铸造、变形等一系列原因使原子排列受到破坏,从而存在着各种各样缺陷。实际金属晶体的结构如图 1-10 所示,存在有空位、间隙原子、位错、晶界等缺陷。

1. 点缺陷

实际金属的晶格中并非所有原子都处在正常位置上。在外界条件的干扰下,某些原子会脱离其平衡位置,使该处成为空位状态。同时,在晶格的间隙中也可以滞留多余原子(图 1-11)。这些情况都使晶格的规则性受到破坏,形成晶格的缺陷。

晶格中有空位和间隙原子时,使其周围原子间的作用力不再平衡,这些原子也将被迫偏离原平衡位置,致使该局部晶格的形状和晶格常数都发生改变,即产生了晶格畸变,其结果使金属屈服点增高,影响金属的许多物理、化学性能。

2. 线缺陷

线缺陷是指晶格中某一系列或若干列原子出现有规律的错排(称为位错),破坏了晶格的规则性而形成的缺陷(图 1-12)。位错是金属的一种更重

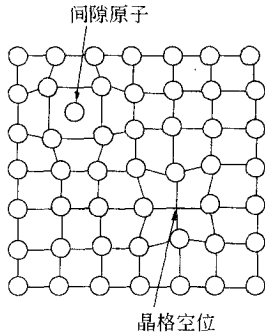


图 1-11 晶格点缺陷

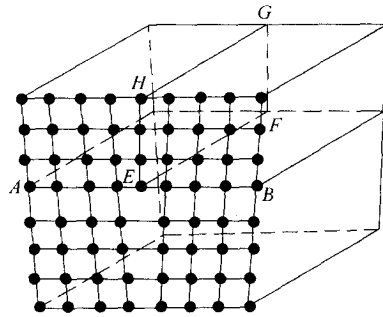


图 1-12 刃型位错示意图

要的缺陷。位错类型有许多种,图 1-12 所示刃型位错是最简单的一种。图中的 EF 线称为位错线。通常以单位体积内位错线的总长度来表示位错密度,其单位为 cm/cm^3 (或 cm^{-2})。实际金属中位错密度在 $10^4 \sim 10^{12} \text{cm}/\text{cm}^3$ 范围内。对金属进行不同的工艺处理,位错密度将明显改变,金属的力学性能

也随之有较大的变化。

位错的特点是原子易动,对金属的塑性变形、强度、扩散、相变、疲劳腐蚀等物理、化学性能都起重要作用。

3. 面缺陷

由于实际金属是多晶体结构,故有晶界存在。晶界有一定的厚度,它是不同位向晶粒间原子不规则排列的过渡层。晶界的存在就是晶体面缺陷的一种形式。晶界厚度的不同,晶界处的状态不同,都直接改变着金属的性能。

当晶粒内部存在一系列刃型位错时,就会形成所谓的亚晶界(图 1-13),此亦属晶体的面缺陷。

在实际金属的晶体结构中,还会存在非金属氧化物等颗粒状物质,也可能有微细裂纹或空洞类缺陷,这些可视为晶体的体缺陷。

实际金属的强度比理想金属晶体强度约低 1000 倍,其原因就是实际金属中存在着缺陷,特别是位错。位错原子的易动性使晶体易于变形,以致局部断裂。不过,当大量缺陷存在时,由于缺陷本身彼此之间的相互作用,发生相互干扰,阻碍原子往某一方向运动,反而使金属强度提高。研究金属晶体结构缺陷的实际意义之一,在于认识增加缺陷数量是强化金属,控制金属构件的品质的的重要途径,从而制造出满足各种条件对结构构件性能要求的钢材。

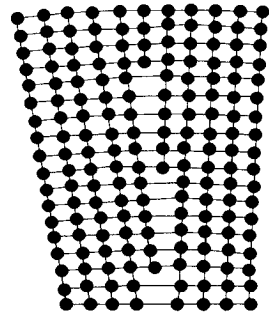


图 1-13 亚晶界图

1.4 铁碳合金

钢铁是现代工业中应用最广泛的金属材料,其基本组元是铁和碳两种元素,故统称为铁碳合金。普通碳钢和铸铁均属铁碳合金范畴。为了熟悉钢铁材料的组织与性能,以便在生产中合理使用,首先必须研究铁碳合金相图。铁与碳可以形成 Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC 等一系列化合物,而稳定的化合物可以作为一个独立的组元,因此整个 Fe-C 相图可视为由 Fe- Fe_3C 、 Fe_3C - Fe_2C 、 Fe_2C - FeC 等一系列二元相图组成。但实际上只有含碳量 $w_c < 5\%$ 的铁碳合金才有实际意义;而 $w_c > 5\%$ 的铁碳合金很脆,无实用价值,因此,铁碳合金相图中只需研究 Fe- Fe_3C 部分,即含碳量 $w_c < 6.69\%$ 的部分。

1.4.1 纯铁、铁碳合金的相结构及其性能

大多数金属在结晶终了之后以及继续冷却过程中,其晶体结构不再发