

1
工程训练·工程实践

金属热处理 及检验

张 洁 主编



化学工业出版社
教材出版中心

工程训练·工程实践

金属热处理及检验

张 洁 主编

王建中 戈晓岚 副主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

金属热处理及检验/张洁主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 2

(工程训练·工程实践)

ISBN 7-5025-6528-0

I. 金… II. 张… III. ①热处理②金属材料-质量检验 IV. ①TG15②TG115

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 007290 号

工程训练·工程实践

金属热处理及检验

张 洁 主编

王建中 戈晓岚 副主编

责任编辑: 刘俊之 陈 丽

文字编辑: 项 激 张燕文

责任校对: 边 涛

封面设计: 于剑凝

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 292 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6528-0/TB·110

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

人类进入 21 世纪前后，以信息技术为重要标志的高新技术的飞速发展，正在改变着人类的社会、经济和生活方式。“天翻地覆慨而慷”，世界范围内的激烈竞争，已越来越明显地表现为人才的竞争，特别是创新人才的竞争。1998 年 10 月，联合国教科文组织在巴黎召开了首届世界高等教育大会，会议达成了共识：高等教育的根本使命是促进社会的可持续发展与进步。目前，教育开始求新求变，要求坚持以人为本，更具有前瞻性。对学生的人文素质、科学素质、实践能力和创新能力的培养更显重要。

“问渠哪得清如许，为有源头活水来。”技术是工程的基础，科学是技术的源泉，科学技术相互支持，但直接作用于生产实际的是技术。因此，面向经济建设要高度重视工程人才的培养，高度重视工程教育，要努力加速建立科学、技术、经济和管理相结合的工程教育体系，强化工程意识，重组工程训练，提高工程素质，培养创新精神、创新人格和实践能力，以实现知识创新、技术创新、管理创新和市场开拓型的工程人才培养。

近年来，尽管各国的国情不同，面临的问题也不同，在工程教育的体制和运作上互有差异，但对工程教育的认识、做法和发展方向上都强调“综合、创造、实践”，强调“工程教育工程化”、“工程教育为工程实际服务”、强调人文关怀、创新精神、实践能力和工程师素质的培养。

另一方面，我国加入世界贸易组织后，对外开放更将进一步扩大，中国将更加深入地参与国际分工，越来越多的产品将打上“中国制造”，制造业是工业的主体，装配制造业是制造业的核心。没有装配制造业就没有制造，没有制造就没有获得物质财富的基本手段。制造首先要依靠直接从事制造的技能人才。从而，培养“中国制造”的技能人才就成为关键。我国已经成为了一个高级蓝领即银领制造业人才稀缺的国家。

我国“十五”计划提出，要在 5 年内将职工中的高级技能人才的比例提高到 20%。一个合格的银领人才应当具备比较深厚的理论基础与相当丰富的实际经验，并能够针对生产第一线的实际需要，具备很强的技术革新、开发攻关、项目改进的能力。这种人才应具有高度的责任感，不但关心产品，更加懂得团结人、关怀人；不仅是某些关键生产环节中的操作者，还是整个生产环节的组织者；同时还能高度关怀、有效带动和组织协调其他技术人员一起动手进行应有的技术攻关，把优秀的设计变成一个高质量的产品。

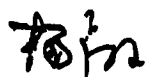
针对工程人才的需求，江苏大学工业中心组织编写了工程训练·工程实践系列图书，希望成为联接科学、教育与工程技术、生产实际的桥梁之一。在本系列图书规划过程中，作者针对“各种技能对工作的重要性”，对相关企业和历届毕业生进行了调查，证实在工业生产中，对技术交流、设计制造、工程经济、项目管理、质量控制、计算机等技能均有较高的要求。

本系列图书以工程类本科生（尤其是高职学生）和制造业银领的培训为对象，包括机、电、管三个领域。在内容上注重实践性、启发性、科学性，强调诸如制造、环境影响、质量、商务和经济等工程实践的多重功能。从当前工程人才的素质需求和实际出发，努力做到理论与实践并重，理论与实际相结合，基本概念清晰，重点突出，简明扼要，深入浅出，通俗易懂，以现代工程训练为特色，重视能力的培养，面向生产实际，并考虑与国际教育交流，反映新技术、新工艺、新材料的应用和发展。

本套丛书的编写是适应我国制造业发展形势，在教育上的一个创新，值得鼓励。由于是一个创新，其中就不会没有问题，没有不足之处。我与编者的心情一样，希望读者能及时指出其中的问题与不足之处，有助于本系列图书不断改进，编者的水平不断提高。

谨以为序。

中国科学院院士
华中科技大学教授



2004 年 4 月

前 言

随着科学技术的进步与发展,材料及其强化工艺越来越受到人们的重视,现代机械制造对材料性能的要求也越来越高。为适应相关教学和人才培养的需求,我们编写了《金属热处理及检验》一书。本书力求紧跟现代材料及其强化技术的发展,以介绍实用技术为主,系统阐述金属热处理的工艺、金属材料检验的方法及其发展。

本书以理论联系实际为指导、以技术应用为目标,把熟悉原理和掌握应用作为学习的基本要求。在内容上力求做到系统性、实用性和综合性,通俗易懂并具有实际指导意义。全书以热处理强化方法及工艺为主线,从理论上简明扼要地论述了材料成分、结构、组织与性能的关系,并着重叙述了金属热处理的原理、方法及常用机械零件的热处理工艺及其选用。全书共八章,分别介绍金属学基本知识、热处理工艺的基本原理、常用热处理质量的检验方法、典型零件的热处理与检验、钢的化学热处理与检验、有色金属的热处理与检验、热处理新工艺新设备、热处理工艺的制定。并精选了大量经过实践验证的典型实例。

本书具有很强的可读性和可操作性,能适合不同的读者,既可作为理论和实践的指导书籍,又可作为技术人员和技术工人的培训教材。本书的读者对象为从事机械制造及其相关技术的研究开发人员,企业主管生产和技术的各级领导,企业相关技术人员和技术工人等,也可作为高校的高年级大学生、硕士研究生等学习参考。

全书由张洁(江苏大学)、王建中(南京工程学院)、戈晓岚(江苏大学)、刘新佳(江南大学)合编,张洁副教授负责全书的统稿,戈晓岚教授进行最终审订修改。本书在编写过程中参阅了国内外相关的资料、文献和教材,并得到了专家和同行的指导,在此一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促,编者的水平有限,加以材料及其强化技术的迅速发展,书中一定有不少不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2004年10月

目 录

第一章 金属学基本知识	1
第一节 合金的相结构.....	1
第二节 金属的晶体缺陷.....	6
第三节 金属的塑性变形与再结晶	10
第二章 热处理工艺的基本原理	26
第一节 钢在加热时的转变	26
第二节 钢在等温冷却时的转变	31
第三节 钢在连续冷却时的转变	39
第四节 钢的马氏体转变	41
第三章 常用热处理质量的检验方法	46
第一节 化学成分检验	46
第二节 金属材料宏观组织检验与断口分析	50
第三节 硬度检验	55
第四节 金相检验	59
第五节 无损检测	62
第六节 裂纹的分析	67
第四章 典型零件的热处理与检验	69
第一节 齿轮的热处理与检验	69
第二节 大型锻件的热处理	82
第三节 弹簧的热处理与检验	89
第四节 模具的热处理	92
第五节 量具与刀具的热处理.....	103
第六节 硬质合金类零件的热处理.....	104
第五章 钢的化学热处理与检验	107
第一节 化学热处理的基本过程.....	108
第二节 钢的渗碳.....	114

第三节	钢的碳氮共渗.....	127
第四节	钢的渗氮及氮碳共渗.....	132
第五节	化学热处理的检验.....	148
第六章	有色金属的热处理与检验.....	155
第一节	铝及铝合金热处理与检验.....	155
第二节	铜及铜合金热处理与检验.....	170
第七章	热处理新工艺新设备.....	176
第一节	真空热处理.....	176
第二节	激光热处理.....	181
第三节	电子束热处理.....	190
第四节	形变热处理.....	191
第五节	强韧化处理.....	194
第六节	循环热处理.....	195
第八章	热处理工艺的制定.....	196
第一节	热处理工艺制定.....	196
第二节	材料与工艺的选用.....	199
附录一	钢的化学成分.....	208
附录二	常用钢材热处理工艺参数.....	220
参考文献		238

第一章 金属学基本知识

第一节 合金的相结构

合金是指由两种或两种以上的金属元素或金属与非金属元素所组成的具有金属特性的物质。组成合金的最基本的独立物质称为组元，组元可以是元素或稳定化合物，工业上广泛使用的碳钢和铸铁，就是由铁和碳两种组元组成的二元合金。合金的性能是由合金各组成相的结构及其形态所决定的。

合金中的相是指合金中具有相同的物理、化学性能并与该系统的其余部分以界面分开的物质部分。物质可以是单相的，也可以是由多相组成的。由数量、形态、大小和分布方式不同的各种相构成合金的组织。组织是指用金相观察法，在金属及合金内部看到的涉及晶体或晶粒的大小、方向、形状、排列状况等组成关系的构造情况。由不同组织构成的材料具有不同的性能。碳钢的室温平衡组织都是由铁素体和渗碳体两相所组成，但由于碳含量和加工、处理状态的不同，这两相的数量、形态、大小和分布也不会相同，组织不一样，其性能相差很大。

根据合金元素之间相互作用的不同，合金的相结构可分成固溶体和金属化合物两大类。

一、固溶体

合金在固态下，组元间相互溶解形成的在某一组元晶格中包含有其他组元的固相称为固溶体。在固溶体中，基础金属为溶剂，合金元素为溶质，固溶体的晶格结构仍保持溶剂金属的结构，只是晶格参数有所改变并产生了晶格畸变。工业上所使用的金属材料，绝大部分是以固溶体为基体的，有的甚至完全由固溶体所组成。例如，碳钢和合金钢，其基体相均为固溶体，且含量占组织中的绝大部分。

1. 固溶体类型

分类标准不同，固溶体的类型也不一样。

根据溶质原子在金属溶剂晶格中的位置不同，固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体两种，如图 1-1 所示。若溶质原子代替一部分溶剂原子占据溶剂晶格中某些结点位置，称为置换固溶体，如图 1-1 (a) 所示。当溶质原子与溶剂原子的直径、电学性质等相近时，一般形成置换固溶体，Mn、Cr、Si、Ni、Mo 等元素都能与铁形成置换固溶体。例如，在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢中，Cr 原子和 Ni 原子代替部分 Fe 原子，占据了 γ -Fe 晶格的某些结点位置从而形成置换固溶体。若

溶质原子在溶剂晶格中并不占据晶格的结点位置，而是嵌入各结点间的间隙中，称为间隙固溶体，如图 1-1 (b) 所示。一般过渡族元素（溶剂）与原子较小的 C、N、H、B、O 等元素易形成间隙固溶体。在金属材料的相结构中，形成间隙固溶体的例子很多，例如，碳钢中碳原子溶入 α -Fe 晶格空隙中能形成间隙固溶体，称为铁素体；碳原子溶入 γ -Fe 晶格空隙中也能形成间隙固溶体，称为奥氏体。

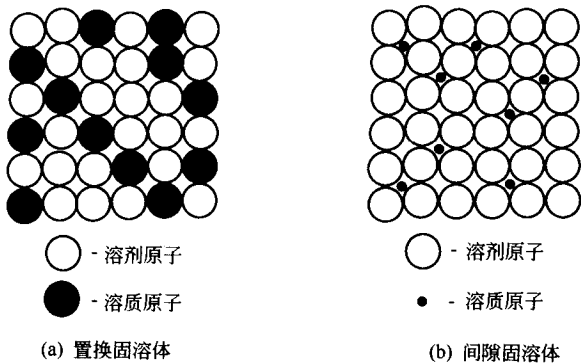


图 1-1 固溶体结构示意图

根据溶质原子在金属溶剂中的溶解度不同，固溶体可分为有限固溶体和无限固溶体两种。当两组元在固态无限溶解时，所形成的固溶体称为无限固溶体。例如，铜和镍都是面心立方晶格，原子直径相近，处于同一周期并相邻，可以形成无限固溶体。当两组元在固态部分溶解时，所形成的固溶体称为有限固溶体，大部分固溶体属于这一类，如 Cu-Sn、Pb-Zn 等合金系都是形成有限固溶体。由于溶剂晶格的间隙有限，且随着溶入的溶质原子越多，引起的晶格畸变越大，溶质原子的溶入受到的阻碍越大，所以间隙固溶体只能形成有限固溶体。

根据溶质原子在金属溶剂中的分布是否有规律，固溶体可分为无序固溶体和有序固溶体两种。溶质原子在溶剂晶格中的分布是任意而无规律的置换固溶体，称为无序固溶体，如图 1-2 (a) 所示。但是某些合金在一定条件下，固溶体中的

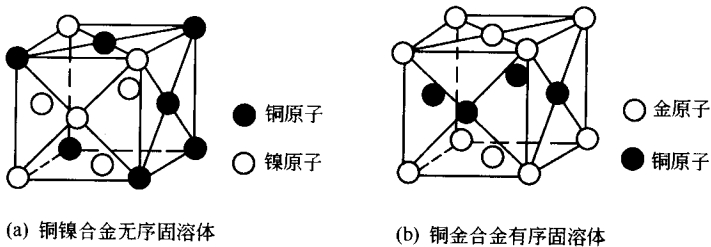


图 1-2 无序固溶体和有序固溶体

溶质原子将从无序分布过渡到有序分布,即溶质原子占据溶剂晶格中的一定位置,这个过程称为固溶体的有序化,这种固溶体称为有序固溶体。如铜和金的原子数比为1:1时,由高温缓冷到380℃以下时,由无序固溶体过渡到有序固溶体,如图1-2(b)所示。当固溶体从无序转变为有序时,虽然显微组织不发生变化,但合金的硬度、脆性显著增加,塑性、电阻则下降。

影响固溶体类型和溶解度的主要因素有原子半径、电化学特性和晶格类型等。当两组元的原子半径、电化学特性接近且晶格类型相同时,容易形成置换固溶体,并有可能形成无限固溶体。当两组元原子半径相差较大,通常溶质元素与溶剂元素的原子半径比 $r_{\text{质}}/r_{\text{剂}} < 0.59$ 时,容易形成间隙固溶体。

2. 固溶体性能

虽然固溶体保持着金属溶剂的晶格类型,但与纯组元相比较,结构已经发生了变化,甚至变化很大。由于溶质和溶剂的原子大小不同,固体中溶质原子附近的局部范围内必然形成晶格畸变,如图1-3所示。晶格畸变随溶质原子浓度的增高而增大,溶质原子与溶剂原子的尺寸相差越大,所引起的晶格畸变也越严重。晶格畸变增大位错运动的阻力,使金属的滑移变形更加困难,提高了金属的强度和硬度。这种由于溶质原子溶入基体中形成固溶体而使其强度、硬度升高的现象称为固溶强化。这是金属强化的重要形式。实践证明,固溶体中溶质含量适当时,可以显著提高材料的强度和硬度,而塑性、韧性并不明显降低。南京长江大桥大量使用含锰的低合金结构钢,原因之一就是由于锰的固溶强化作用提高了该材料的强度,从而大大节约了钢材,减轻了大桥结构的自重。镍固溶于铜中所形成的铜镍合金,通过增加镍的溶解度使其硬度从38HBS提高到60~80HBS时,伸长率 δ 仍可保持在50%左右。因而,适当控制固溶体中溶质的含量,可以在显著提高金属材料强度、硬度的同时,保持其较好的塑性和韧性。当然,间隙固溶的强化效果比置换固溶更为显著。例如,马氏体是含碳过饱和的间隙固溶体,晶格畸变严重,固溶强化效果显著,碳钢就是如此;而合金钢中尽管不少元素代替部分铁原子形成置换固溶体,但其马氏体硬度还主要是过饱和碳的间隙作用。工业上使用的精密电阻和电热材料等也广泛应用固溶体合金,因为随溶质原子浓

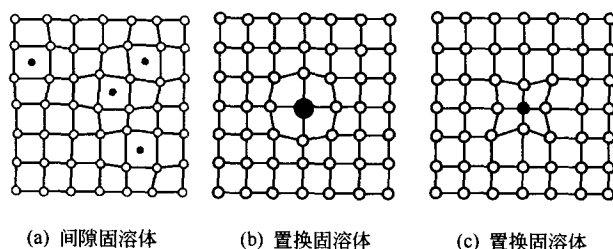


图 1-3 固溶体中的晶格畸变

度的增加，固溶体的电阻率升高、电阻温度系数下降。

不过，通过单纯的固溶强化所达到的最高强度指标毕竟有限，仍难以满足人们对结构材料的要求，因此必须在固溶强化的基础上再进行其他强化处理。

二、金属化合物

金属化合物是合金组元之间发生相互作用而形成的一种新相，其晶格类型和特性不同于其中任一组元。如碳钢中的渗碳体 (Fe_3C)、黄铜中的 β 相 (CuZn)、铝合金中的 CuAl_2 ，都是金属化合物。这种化合物可以用分子式来表示，除了离子键和共价键外，金属键也在不同程度上参与作用，致使其具有一定程度的金属性质（如导电性），因此称之为金属化合物。

由于结合键和晶格类型的多样性，金属化合物具有许多特殊的物理化学性能，其中已有不少开发应用为新的功能材料和耐热材料，对现代科学技术的进步起着重要的推动作用。例如，具有半导体性能的二化镓 (GaAs)，其性能远远超过了目前广泛使用的硅半导体材料，如今正应用在发光二极管的制造上，以用作超高速电子计算机的元件。此外还有能记住原始形状的记忆合金（超弹性合金） NiTi 和 CuZn ，具有俘获低热中子截面的核反应堆材料 Zr_3Al ，能作为新一代能源的储氢材料 LaNi_5 等。由于金属化合物一般均具有较高的熔点和硬度，当合金中出现金属化合物相时，合金的强度、硬度、耐磨性及耐热性提高（但塑性有所降低），因此目前在工业上广泛应用的结构材料和工具材料（如各类合金钢、硬质合金及许多有色金属等）中，金属化合物是其不可缺少的重要组成相。

根据形成条件及结构特点，金属化合物主要有以下几类。

1. 正常价化合物

严格服从原子价规律的化合物称为正常价化合物，通常是由金属元素与ⅣA族、ⅤA族、ⅥA族元素所组成。例如， Mg_2Si 、 Cu_2Se 、 MnS 及 $\beta\text{-SiC}$ 等，其中 Mg_2Si 是铝合金中常见的强化相， MnS 则是钢中最常见的夹杂物。这类化合物具有严格的化学比，成分固定不变，可用确定的化学式表示，通常具有较高的硬度和脆性。

2. 电子化合物

不遵守化合价规律，但按照一定电子浓度（化合物中价电子数与原子数之比）形成的化合物称为电子化合物，由ⅠB族或过渡族金属元素与ⅡB族、ⅢA族、ⅣA族、ⅤA族元素所组成。电子化合物的晶体结构与电子浓度值有一定的对应关系。

电子化合物主要以金属键结合，具有明显的金属特性，可以导电。其熔点和硬度很高，但塑性较差，在许多有色金属中用作强化相。

3. 间隙相和间隙化合物

由过渡族金属元素与氢、硼、碳、氮等原子半径小的非金属元素结合将形成间隙相或间隙化合物。它们具有金属特性、高的熔点和高的硬度。根据非金属元素（以 X 表示）与过渡族金属元素（以 M 表示）原子半径的比值大小，可以分为两类：当 $r_{\text{非}}/r_{\text{金}} < 0.59$ 时，这种化合物具有简单的晶体结构，称为间隙相；当 $r_{\text{非}}/r_{\text{金}} > 0.59$ 时，这种化合物的晶体结构很复杂，称为间隙化合物。由于氢和氮的原子半径较小，所以过渡族金属的氢化物和氮化物都是间隙相。硼的原子半径最大，因此过渡族金属的硼化物都是间隙化合物。碳的原子半径比氢、氮大，但比硼小，因此一部分碳化物是间隙相，如 VC、TiC、TaC、ZrC，其中间隙相 VC 的晶体结构如图 1-4 所示；另一部分碳化物是间隙化合物，如 Fe_3C ，其晶体结构如图 1-5 所示。

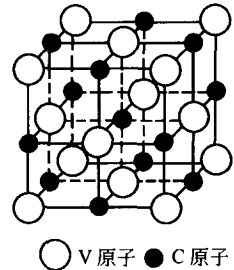


图 1-4 间隙相 VC 的晶体结构

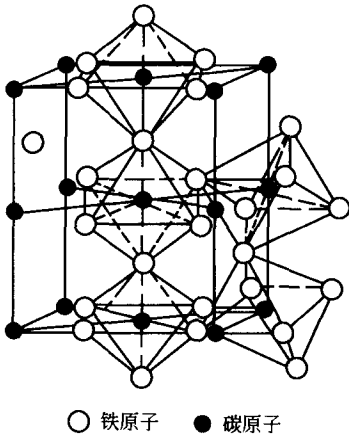


图 1-5 间隙化合物 Fe_3C 的晶体结构

碳化物是碳钢、合金钢及铁基合金中的重要组成相，它的结构、形态、大小及分布对其性能影响很大。

间隙相有极高的熔点与硬度（见表 1-1）。间隙相的合理存在，可以有效地提高合金工具钢及硬质合金的强度、热强性和耐磨性。另外，通过对钢件表层渗入或涂层的方法使之形成含有间隙相的薄层，可显著增加钢的表面硬度和耐磨性，延长零件的使用寿命。

间隙化合物的类型很多，合金钢中常见的有 M_3C 型（如 Fe_3C ）、 M_7C_3 型（如 Cr_7C_3 ）、 M_{23}C_6 型（如 Cr_{23}C_6 ）、 M_6C 型（如 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ ）等。 Fe_3C 是钢铁材料中的一个基本相，称为渗碳体，其晶体结构如图 1-5 所示，其中铁原子可被锰、铬、钼、钨等原子所置换，形成以间隙化合物为基的固溶体，如 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 等，称为合金渗碳体。

表 1-1 碳化物的硬度与熔点

碳化物类型	间 隙 相							间隙化合物	
成分	TiC	ZrC	VC	NbC	TaC	WC	MOC	Cr_{23}C_6	Fe_3C
硬度(HV)	2850	2840	2010	2050	1550	1730	1480	1650	约 860
熔点/℃	3410	3805	3023	3770 ± 125	4150 ± 140	2867	2960 ± 50	1520	约 1600

值得注意的是,大多数工业上使用的合金既不可能是由单纯的化合物单相组成,也不可能是由一种固溶体组成。这是因为化合物硬度固然高,但脆性大;单纯的固溶体强度也不够高。实际上多数工业用合金是以固溶体作基体加入少量化合物所构成的混合物,化合物的细小弥散分布可提高这种混合组织的强度和硬度,而塑性、韧性则受到一定的损害,这就是弥散强化现象。通过调整固溶体的溶解度和分布于其中的化合物的形态、数量、大小及分布,可使合金的力学性能发生很大的变化,以满足不同的性能需要。例如,碳钢中的渗碳体,其形态直接影响碳钢的性能。渗碳体的形态可以是片状、粒状或网状,片有粗细之分,粒有大小之异,其性能当然不一样。

合金钢中碳化物的类型不同,其稳定性不同,熔点与硬度也不同。碳化物的硬度与熔点见表 1-1。例如,在工具钢中加入少量钒形成 VC,可提高其耐磨性;在结构钢中加入少量钛形成 TiC,可防止其过热;高速钢中由于 W_2C 、VC 在高温下比较稳定并形成弥散分布,其在高温下能保持高硬度和切削性能;硬质合金中正是由于所含的碳化物(WC、TiC 等)的高硬度保证了其优越的切削性能。

第二节 金属的晶体缺陷

在实际使用的金属材料中,原子的排列不可能像理想晶体那样规则和完整,总是不可避免地、或多或少地存在一些原子偏离规则排列的区域,这种偏离理想晶体规则排列的区域称为晶体缺陷。一般说来,金属中这些偏离其规定位置的原子数目很少,从整体上看其结构还是接近完整的。尽管如此,晶体缺陷对金属的许多性能有着极重要的影响,与晶体的凝固、固态相变、扩散等过程都有重大关系,特别是在塑性变形和断裂等方面起决定性的作用。况且晶体缺陷并不是静止地、稳定不变地存在着,而是随着各种条件的改变而不断地变动,可以产生、发展、运动和交互作用,也可以合并或消失。由此可见,研究晶体缺陷具有重要的实际意义。

晶体缺陷按几何特征可分为点缺陷、线缺陷(位错)和面缺陷(如晶界、亚晶界)三类。

一、点缺陷

点缺陷的特征是原子在三个方向上的偏离尺寸都很小,相当于原子尺寸,常见的有空位、间隙原子、置换原子等。晶体中的点缺陷如图 1-6 所示。

1. 空位

晶体中,原子在其平衡位置上做高频率的热振动,振动能量经常变化,此起彼落,称为能量起伏。一定温度下,在任何瞬间,晶体中总有某些原子具有很高的振动能量而不能保持在其平衡位置上,根据统计规律,在某一温度下的某一瞬

间,总有一些原子的能量足够高,振幅足够大,可以克服周围原子对它的约束,从而脱离原来的平衡位置迁移到别处,在原位置上出现了空结点,即形成空位,如图 1-6 (a) 所示。

空位是一种热平衡缺陷,在一定温度下,具有一定的平衡浓度。温度升高,原子的动能增大,空位的浓度也增大。空位的平衡浓度是极小的,例如,当铜的温度接近其熔点时,其空位的平衡浓度约为 10^{-5} 数量级。即便如此,空位依然会造成晶格畸变。通过某些处理,如高能粒子辐照、高温淬火及冷塑性变形等,可使晶体中的空位浓度高于平衡浓度。

尽管空位的浓度很小,但空位的存在为固态金属的扩散过程创造了方便的条件。

2. 间隙原子

间隙原子就是位于晶格间隙之中的原子,有自间隙原子和杂质间隙原子两种。在多数金属的密排晶格中,形成自间隙原子是非常困难的。金属中存在的间隙原子主要是杂质间隙原子,大多是原子半径很小的原子,如钢中的氢、氮、碳等。当间隙原子硬挤入很小的晶格间隙中后,会造成严重的晶格畸变,如图 1-6 (b) 所示。

间隙原子也是一种热平衡缺陷,在一定温度下有一平衡浓度。对于杂质间隙原子而言,常将这一平衡浓度称为固溶度或溶解度。

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,如图 1-6 (c)、(d) 所示。由于置换原子的大小与基体原子不可能完全相同,所以也会造成晶格畸变。置换原子在一定温度下也有一个平衡浓度值,也称为固溶度或溶解度。

不管是哪类点缺陷,都会造成晶格畸变,将对金属的性能产生影响,如使屈服点升高、电阻增大、体积膨胀等,这对指导生产实践很有意义。

二、线缺陷

线缺陷的特征是原子在两个方向的偏离尺寸很小、在另一个方向的偏离尺寸

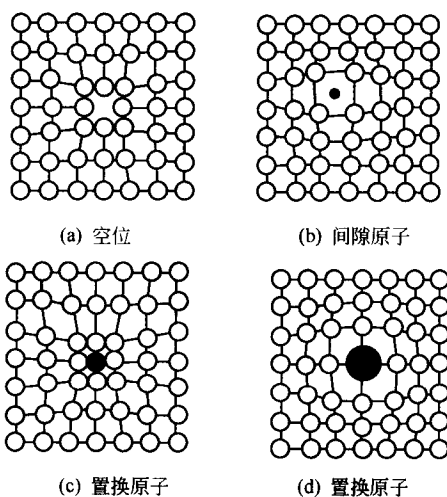


图 1-6 晶体中的点缺陷

相对很大。晶体中的线缺陷主要指各类位错，位错是指在晶体中有一列或若干列原子，发生了有规律的错排现象。错排区是线性的点阵畸变区，长度可达几百至几万个原子间距，宽度仅几个原子间距。晶体中的位错主要有刃型位错和螺型位错，如图 1-7 所示。这里主要介绍刃型位错。

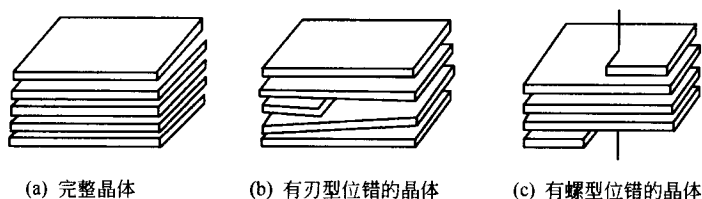


图 1-7 晶体中的位错示意

在金属晶体中，由于某种原因（如一个外加力），晶体的一部分沿一定晶面相对于晶体的未动部分，逐步地发生了一原子间距的错动（见图 1-8）。图中右上角部分晶体逐步向左移一原子间距后，在发生了错动的晶体部分同未动部分的边缘上产生了一个多余的半原子面。多余的半原子面像是一个硬插入晶体的刀刃，但并不延伸入原子未错动的下半部晶体中，而是中止在内部。沿着半原子面的刃边，晶格发生了很大畸变，即形成了刃型位错。

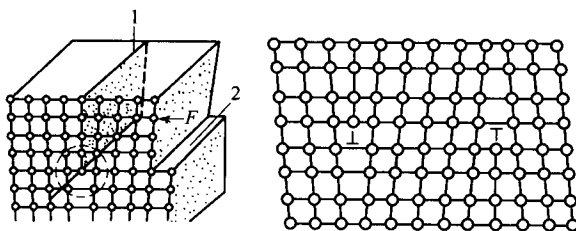


图 1-8 刃型位错示意

1—多余半原子面；2—滑移面

刃型位错周围存在着弹性畸变。在多余的半原子面上侧，原子受压；而在另一侧，原子受拉。离位错线越远，畸变越小。

通常把单位体积中包含的位错线总长度称为位错密度 ρ ，即 $\rho = L/V$ （式中 L 为位错线的总长度，cm； V 为体积， cm^3 ）。晶体中位错密度可用 X 射线或透射电子显微镜测定。在经充分退火的多晶体金属中位错密度为 $10^6 \sim 10^7 \text{ cm/cm}^3$ 。经很好生长出来的超纯单晶体金属，其位错密度很低（小于 10^3 cm/cm^3 ）。而经剧烈冷变形的金属，位错密度可增至 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm/cm}^3$ 。

位错的存在，对金属材料的力学性能、扩散及相变等过程均有重要的影响。如果金属中不含位错，那么这种理想金属晶体将具有极高的强度；正是

因为实际金属晶体中存在位错等晶体缺陷，金属的强度值降低了 2~3 个数量级。

三、面缺陷

面缺陷的特征是原子在一个方向上的偏离尺寸很小，在另外两个方向上的偏离尺寸相对很大，呈面状分布。金属晶体中的面缺陷主要是指晶体材料中的各种界面，如晶界、亚晶界和相界等。

1. 晶界

实际金属为多晶体，由大量外形不规则的小晶体即晶粒组成。由于各晶粒的取向各不相同，在其相互交界处原子排列很不规整，存在过渡层，其原子受相邻晶粒的影响处于折中位置，晶格畸变程度较大。不同取向晶粒之间的接触面称为晶界，如图 1-9 所示。金属多晶体中，各晶粒之间的位向差大都在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间，晶界层厚度一般在几个原子间距到几百个原子间距内变动。

晶界是晶体中一种重要的缺陷。由于晶界上的原子排列偏离理想的晶体结构，脱离平衡位置，所以其能量比晶粒内部的高，从而也就具有一系列不同于晶粒内部的特性。例如，晶界比晶粒本身容易被腐蚀和氧化，熔点较低，原子沿晶界扩散快，在常温下晶界对金属的塑性变形起阻碍作用。由此可以看出，金属材料的晶粒越细，则晶界越多，其常温强度越高。因此对于在较低温度下使用的金属材料，一般总是希望获得较细小的晶粒。

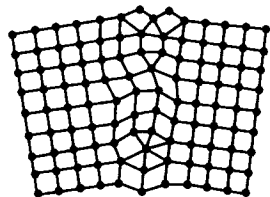


图 1-9 晶界示意

另外，晶界处晶格畸变较大，存在着晶界能，而较高的晶界能表明它有自发地向低能状态转化的趋势。因此当原子具有一定的动能时，这个趋势就成为可能，即晶粒长大和晶界的平直化，以减少晶界。例如，钢在热处理时，奥氏体晶粒随加热温度的升高而长大，因此要严格控制加热温度。钢中第二相在加热时也会产生球化，如高速钢锻造后进行球化退火，以使第二相即碳化物球化；但若加热温度过高、保温时间过长，则球状碳化物会自发长大、聚集，对性能不利。

2. 亚晶界

晶粒也不是完全理想的晶体，而是由许多位向相差很小的亚晶粒组成的，如图 1-10 所示。晶粒内的亚晶粒又称为晶块，其尺寸比晶粒小 2~3 个数量级，一般为 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ cm}$ 。亚晶粒之间位向差很小，一般小于 $1^\circ \sim 2^\circ$ 。亚晶粒之间的界面称为亚晶界，亚晶界实际上是由一系列刃型位错所构成，如图 1-11 所示。亚晶界上原子排列也不规则，亦产生晶格畸变。与晶粒相似，细化亚晶粒也能显著提高金属的强度。