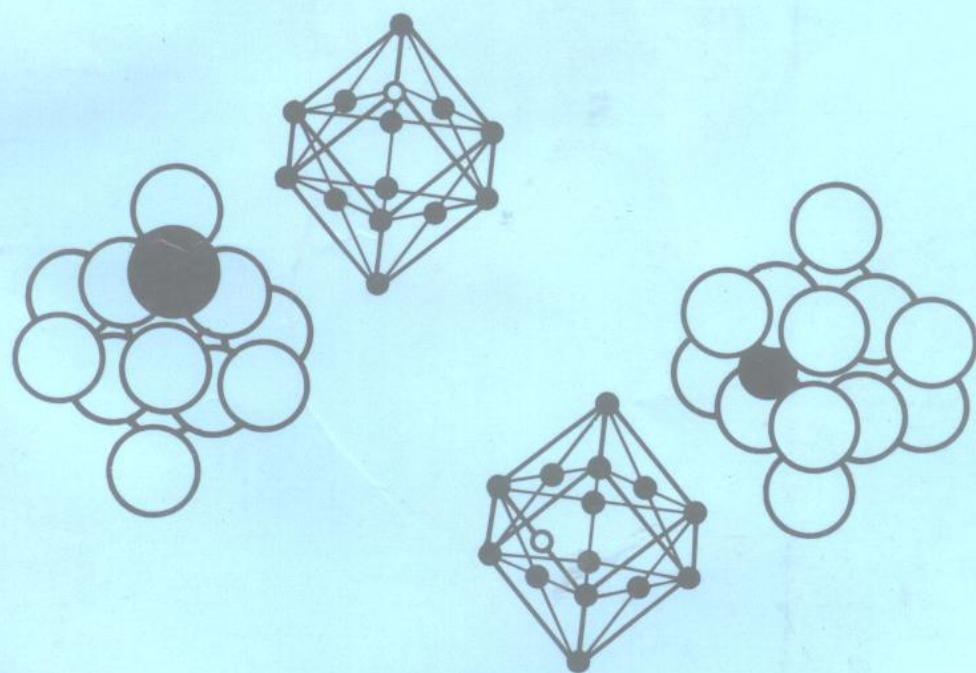


现代热处理技术

现代热处理技术

夏国华 杨树蓉 主编



兵器工业

515
28

兵器工业出版社

现代热处理技术

夏国华 杨树蓉 主编

兵器工业出版社

内容简介

本书叙述了热处理基础理论与基本知识,阐述了现代热处理理论及技术,具有较强的适用性和先进性。

本书可作为兵器工程师进修大学继续教育教材,亦可供从事热处理的工程技术人员,机械制造行业的技术人员,热处理生产工人以及大专院校相应专业师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代热处理技术/夏国华,杨树蓉编著. -北京:兵器
工业出版社,1996.11
ISBN 7-80132-091-3

I. 现… II. ①夏… ②杨… III. 热处理-工艺 IV. TG1
56

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第19776号

兵器工业出版社出版发行
(北京市海淀区车道沟10号)
各地新华书店经销
河南济源国营五三一印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 19.5 字数: 472.68千字
1996年12月第1版 1997年7月第2次印刷
印数: 2001—5000册 定价: 29.00元

《现代热处理技术》编审委员会

主任委员	王兆泉	高级工程师
副主任委员	丁福泉	高级工程师
	李昆秀	高级政工师
	罗万达	高级工程师
委 员	袁世增	教 授
	潘守勤	副 教 授
主 编	夏国华	高级工程师
	杨树蓉	高级工程师
主 审	刘文郁	副 教 授

前 言

继续教育是适应新技术挑战和经济竞争的主要战略措施。在商品生产中，企业要采用新工艺、新技术、新材料、新设备以及现代管理方法改造老企业，首先要求广大专业技术人员必须具有较高的业务素质，并不断拓宽、加深和提高新科学新知识的水平。

本书为满足工程技术人员对新理论、新技术学习和应用的需要，也为继续教育提供一本简明实用的教材，根据兵器工程师进修大学课程设置规划和教材开发的要求，在兵器工程师进修大学及其西南分校的共同组织下而编写的。编写中坚持了理论联系实际的原则，突出了成人教育的特点，强调了当代热处理技术的成果在我国生产实践中的具体应用，具有较强的适用性。

成书过程中，得到了长安汽车有限责任公司、四川省兵工学会科普教育工作委员会、北京联合大学、重庆兵工职工大学等单位的支持和帮助，在此表示感谢。

在编写过程中参阅了大量的国内外文献，对原资料作者在此也一并表示感谢。

本书由夏国华、杨树蓉主编。刘文郁主审。

由于编写水平所限，本书难免有不当之处，敬请读者指正。

绪 论

热处理这门古老而年轻的学科，古往今来在人们的生产实践中产生，在人们的生产实践中发展，也对人们的生存起着重要的影响。早在我国春秋战国时期，人们通过热处理（淬火）使得宝剑更锋利，通过化学热处理，保持兵器不锈。在 2000 年前的汉代就有对热处理（淬火）方法的记载，在 300 多年前的明代，人们就能将淬火、退火、渗碳等工艺方法熟练地应用于生产实践。

进入现代，热处理对近代工业的贡献就更为突出。热处理并不改变零件的外形，却能使零件性能发生巨大的变化，从而使其寿命成倍增加。据统计，机床工业中有 60%~70% 的零件（部）件要经过热处理，汽车、拖拉机等车辆制造行业有 70%~80% 的零件要经过热处理，而工具制造中几乎 100% 的零件要进行热处理。随着科学技术的进步，人类在宇航事业、原子能以及现代兵器领域，对金属材料制造的零件提出更高的要求，如高强度、抗腐蚀、耐高温、抗疲劳、耐磨损等。要满足这些特殊性能的要求，通过热处理这一特种工艺方法，改变金属内部的组织结构，从而得到预期的强化目的，是非常有效的。

进入 20 世纪以来，热处理这门学科得到了突飞猛进的发展。随着检测手段的进步，人们应用定量金相技术、电子显微技术、X 射线与俄歇谱仪等揭示出金属及合金更微观的结构，对金属学及热处理的一些基础理论的研究，发挥了巨大的作用。为适应现代技术的要求，热处理的应用研究，也同样方兴未艾，生气勃勃。尤其值得一提的是热处理工艺方法的新进展，已完全改变了古老的热处理的面貌。如可控气氛热处理，真空热处理，离子轰击与特殊表面硬化技术，复合热处理，感应加热技术，新型化学热处理技术，新型冷却技术等，均已进入实用化阶段。计算机及电子技术的发展，也带动了热处理设备及检测仪器的智能化，使得热处理工艺参数的控制更精确，更合理。

热处理工艺的进步，也带动了热处理设备和监控设备的进步，连续式与周期式密封淬火炉、网带式淬火炉、大功率可控硅感应加热电源、离子轰击热处理设备、气相沉积设备、真空热处理设备、激光热处理设备等先进设备日臻完善，并向新型节能、省资源的方向发展。

用于热处理的辅助材料如淬火介质也有了新的发展，不再局限于水、油等物质，发展了无机盐淬火剂，有机物质淬火剂等，从而更适应钢材淬火时的冷却特性。

本书为了使读者能循序渐进地掌握系统的热处理知识，第一篇介绍了热处理方面的一些基础知识；第二篇重点介绍现代热处理技术，其中包括基础理论、应用研究和工艺进展三部分，设计人员、工艺人员和操作工人均可以借鉴。

目 录

绪论

第一篇 热处理基础

第一章 热处理基础	(1)
第一节 钢的内部结构.....	(1)
第二节 铁—碳相平衡图.....	(6)
第三节 钢的相变	(14)
第四节 钢在冷却时的转变	(15)
第五节 钢在加热时的转变	(20)
第六节 奥氏体晶粒度	(24)
第二章 热处理方法	(27)
第一节 退火及正火	(27)
第二节 淬火	(31)
第三节 回火	(43)
第四节 无多晶转变淬火和奥氏体钢的时效	(46)
第五节 化学热处理概述	(46)
第六节 形变热处理概述	(48)

第二篇 现代热处理理论及技术

第一章 钢的热处理基础理论研究的最新进展	(50)
第一节 奥氏体转变与向奥氏体转变	(50)
第二节 淬火钢的回火	(54)
第三节 相变与应力	(55)
第四节 晶粒细化	(56)
第五节 减少晶界脆性夹杂物	(56)
第六节 发展结晶学结构	(57)
第二章 钢的热处理应用研究的新进展	(58)
第一节 加热过程的应用研究	(58)
第二节 冷却过程中的应用研究	(64)
第三节 形变热处理的应用研究	(67)
第三章 热处理工艺的新进展	(70)
第一节 概述	(70)

第二节	在空气中加热工艺的进展	(72)
第三节	在可控气氛中加热	(74)
第四节	在盐浴中加热	(77)
第五节	特殊表面处理技术	(78)
第四章	可控气氛热处理	(81)
第一节	概述	(81)
第二节	炉内气氛	(81)
第三节	吸热式气氛的制备	(86)
第四节	放热式气氛的制备	(92)
第五节	氮基气氛	(94)
第六节	氨分解气和氨燃烧分解气	(97)
第七节	有机液体制备的保护气氛	(97)
第八节	可控气氛的分析	(98)
第九节	可控气氛热处理炉	(103)
第五章	真空热处理	(105)
第一节	概述	(105)
第二节	真空热处理工艺	(120)
第三节	真空热处理设备	(132)
第六章	离子冲击热处理	(137)
第一节	概述	(137)
第二节	离子冲击热处理基本原理	(137)
第三节	离子冲击热处理中的放电特点	(138)
第四节	离子冲击热处理的特点	(140)
第五节	离子冲击热处理设备	(142)
第六节	离子冲击设备的密封与绝缘技术	(149)
第七节	离子冲击热处理的测温技术	(151)
第八节	真空度的测定与系统的检漏	(152)
第九节	离子冲击热处理的电源	(152)
第十节	离子冲击热处理工艺	(160)
第十一节	离子碳氮共渗	(170)
第十二节	离子渗碳	(170)
第十三节	离子退火	(173)
第十四节	离子渗硫及硫氮共渗	(173)
第十五节	离子渗硼	(175)
第十六节	离子渗金属	(175)
第十七节	操作技术	(176)
第十八节	离子冲击热处理今后的研究课题	(177)
第七章	感应热处理	(180)
第一节	感应加热原理	(180)

第二节	钢在快速加热时的组织转变·····	(186)
第三节	感应加热后的淬火冷却·····	(192)
第四节	高中频感应表面热处理工艺·····	(195)
第五节	感应器的结构设计制造·····	(210)
第六节	工频感应热处理·····	(215)
第八章	特种表面热处理技术·····	(222)
第一节	激光热处理·····	(222)
第二节	气相沉积热处理·····	(232)
第三节	电解热处理·····	(238)
第九章	计算机及电子技术在热处理中的应用·····	(240)
第一节	概述·····	(240)
第二节	电子技术在温度控制方面的应用·····	(240)
第三节	电子计算机在热处理中的应用·····	(248)
第十章	钢的化学热处理·····	(255)
第一节	钢的渗碳·····	(255)
第二节	钢的渗氮·····	(265)
第三节	钢的碳氮共渗·····	(275)
第四节	钢的软氮化·····	(283)
第五节	渗硫与硫氮、硫氰共渗·····	(288)
第六节	钢的渗硼·····	(289)
第七节	钢的渗金属·····	(293)
附·录	非法定计量单位与法定计量单位对照表·····	(298)

第一篇 热处理基础

第一章 热处理基础

第一节 钢的内部结构

一、晶格

固态金属是一些结晶体，其特点是原子有规律地排列。这些原子每一个都可以看成是一个弹性球，在空间形成一个个紧密排列、层层叠加的面，见图 1-1-1。

在空间，通过一系列原子正确地排列成距离相等、相互平行的一个接一个的想象的平面，从而构成了空间晶格，在这些晶格的结点上排列着原子^①。

元素晶格的基本结构是单位晶胞。图 1-1-2 中表示的空间晶格是由大量的单位晶胞组成的。每个单位晶胞的体积是非常小的， 1mm^3 的金属晶体，有大约 10^{20} 个单位晶胞。

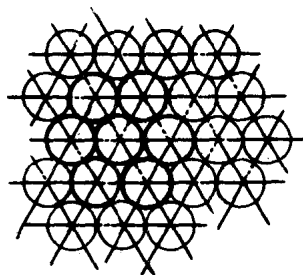


图 1-1-1 晶体中原子的紧密排列

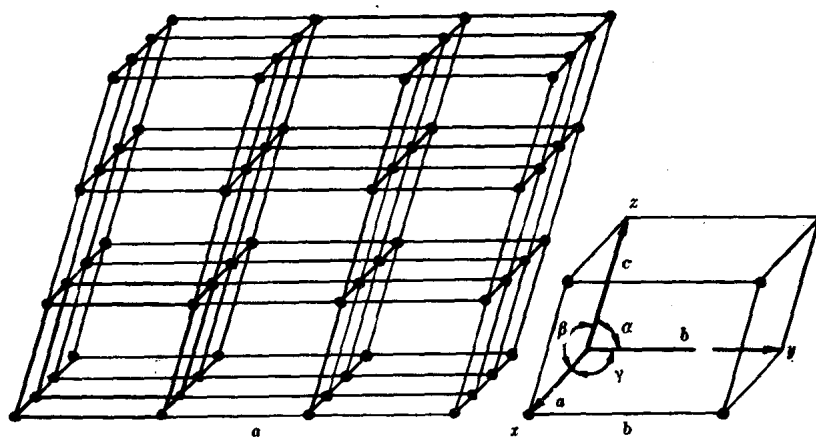


图 1-1-2 构成单位晶胞的空间晶格的一部分

a—空间晶格； b—单位晶胞

^① 严格讲晶格的结点上排列的是带电的离子，自由电子围绕它运动。

空间晶格共有 14 种，钢中所存在的相，可以用其中的 6 种来表示（图 1-1-3）。晶格可以用晶格常数与配位数来描述其大小，致密程度等特征。

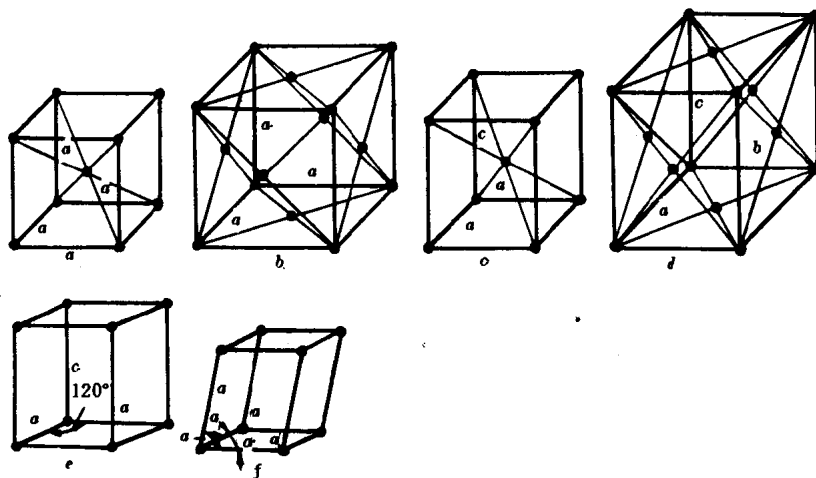


图 1-1-3 各种空间晶格中原子的位置示意图

a—体心立方；b—面心立方；c—体心四方；d—面心正交；
e—密排六方；f—菱面体 ($a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$)

晶格常数由单位晶胞棱线的尺寸来决定。在立方晶格中，所有的棱线都有相等的长度，因此，立方晶格仅用一个常数表征，六方晶格用两个常数表征等。配位数指的是点阵中围绕任一原子相邻的最近的原子的个数。在体心立方点阵中，每一个原子围绕着 8 个最近等距的原子，这种晶格的配位数等于 8。面心立方的配位数等于 12，密排六方亦为 12。

为了表明晶格的空间方位，人们沿用了晶向和晶面的概念。而为了进一步确定晶向和晶面，在金属学中引入了晶向指数和晶面指数来加以具体描述，在国外也有把这两种指数统称为米勒指数。这种标记的方法是平行于基本晶胞的平面，作 (x, y, z) 三个坐标轴，空间平面（晶面）的位置用沿坐标轴截取切片的办法来确定。这一晶面的晶面指数用在 x, y, z 轴上截取切片的数的倒数来计算，从这些倒数中求出公分母，其分子则为晶面指数的具体数值，然后将三个数字用圆括弧括起来，即为相应的晶面指数（图 1-1-4）。

由此可见，用圆括弧括起的三个数字，就表示一个确定的晶面，而平行于该平面的面有许多个，它们均具有同一个晶面指数，称为该晶体的等值晶面族，可以用花括弧括起来。例如，立方晶体的晶面 (100) , (010) , (001) , $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$ 和 $(00\bar{1})$ 可以用 $\{100\}$ 标出。数字上标一横线者，表示截面为负数的。

为了描述给定的晶体学方向（晶向），通过坐标系的原点划一条与该方向平行的直线，然后直接在此平行线上确定任意点的坐标（图 1-1-5）。坐标点按比例缩小到最小整数，并记入方括弧中。晶体学方向（晶向），总是垂直于具有同样指数的晶面。在立方晶格中， x 轴垂直于晶面 (100) ，因此它具有 $[100]$ 晶向，这样就要用括弧的标记来辨别，初学者要加以注意。其它类型的晶格不具有这样的性质，也不易混淆。

二、金属的不完整结晶组织

实际晶体不象前面所描述的那样，原子在晶格中有理想的、有规律的排列，在其中会遇到很多不完整的——结晶组织缺陷。结晶组织的完整性被破坏的特点和程度，在很大程

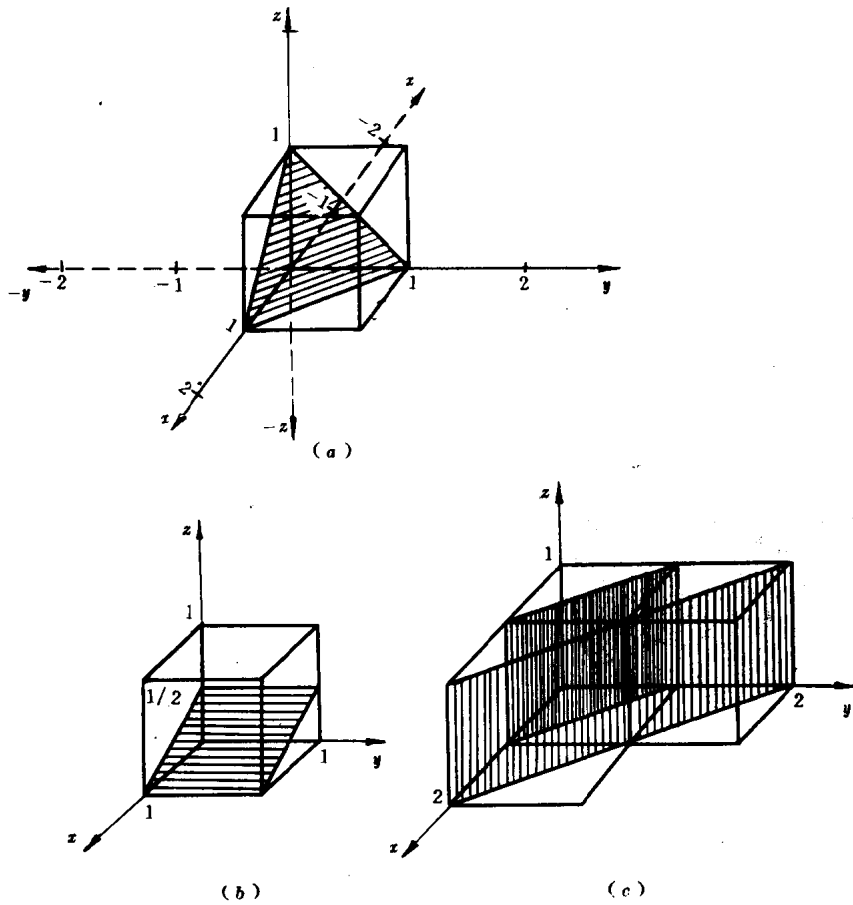


图 1-1-4 某些重要的晶面指数的确定

度上决定着金属的性能。

最接近完整晶体的实际单个晶体是单晶体，单晶体又是由许多亚晶粒（又称镶嵌块）组成。单晶体中的亚晶粒由亚晶界分割，其向位之间的夹角从几分到几度（称小角度晶界），如图 1-1-6 所示。

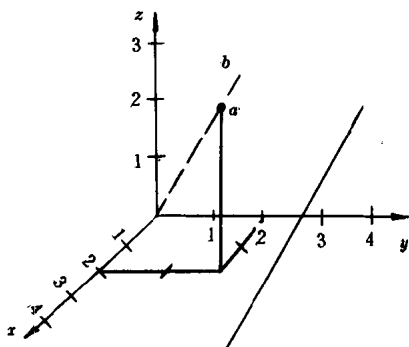


图 1-1-5 晶向指数的确定

a—应该确定晶向指数的结晶学方向；
b—平行于该方向并通过坐标原点的直线

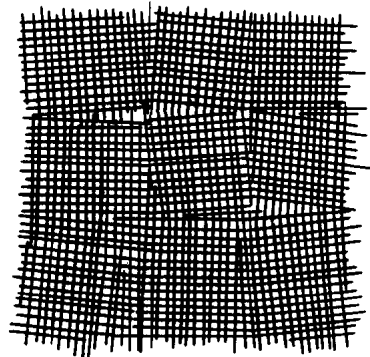


图 1-1-6 金属的亚晶粒示意图

金属是由大量的不完整的结晶形体组成的，即由晶粒（雏晶）所组成。这种组织称为多晶体。晶粒本身也有各种晶格的空间取向。各种晶格形状和不同的数量（图 1-1-7）。

晶格本身是不完整的，存在许多缺陷。按照其形状和在空间分布的不同，可以将这些缺陷分为点状缺陷、线状缺陷和面缺陷。

空穴，间隙原子（注入的或置换的杂质原子）属于点缺陷。空穴为未占满的晶格结点，即晶格的结点上缺了原子。间隙原子指位于晶格结点之间的原子（图 1-1-8）。

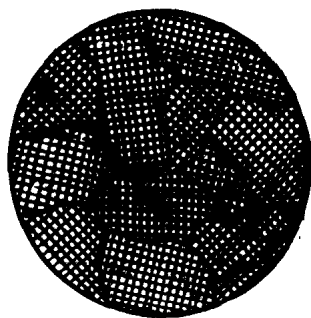


图 1-1-7 多晶体晶格的不同取向

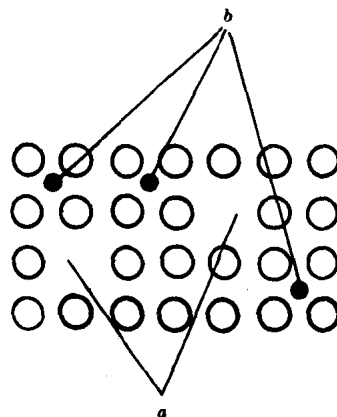


图 1-1-8 晶格中的点缺陷

a—空穴；b—间隙原子

线缺陷一位错——排原子的位移，这排原子离开了正确的晶格位置（图 1-1-9）。

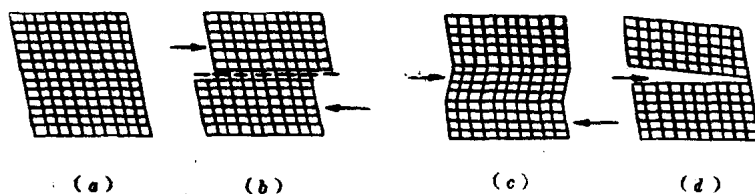


图 1-1-9 理想晶格原子的弹性位移示意图

a、b—滑移中；c—双晶；d—晶格破坏

众所周知，在塑性变形中，会发生一部分晶体相对于另一部分晶体的位移，这种位移就产生了滑移或双晶（图 1-1-10）。

用理想晶体计算的结晶滑移阻力的理论数值（根据推测，位移在整个滑移面上同时产生），比实际晶体滑移的实测值高出几个数量级。从图 1-1-9 和图 1-1-10 所表示的状态分析，位移并不是同时在整个滑移面上进行的，而是发生在位移面上，一排原子在应力作用下连续运动。这种原子排在平面上的位移，称作边区位错（也称刃型位错）。在位错的运动中，原子只移动一个晶格中的最小原子间距，而位错本身却移动了很大一个距离。位错可以把晶体中发生位移的区域和尚未发生位移的区域分开。除了上述的边区位错以外，还有螺旋位错和混

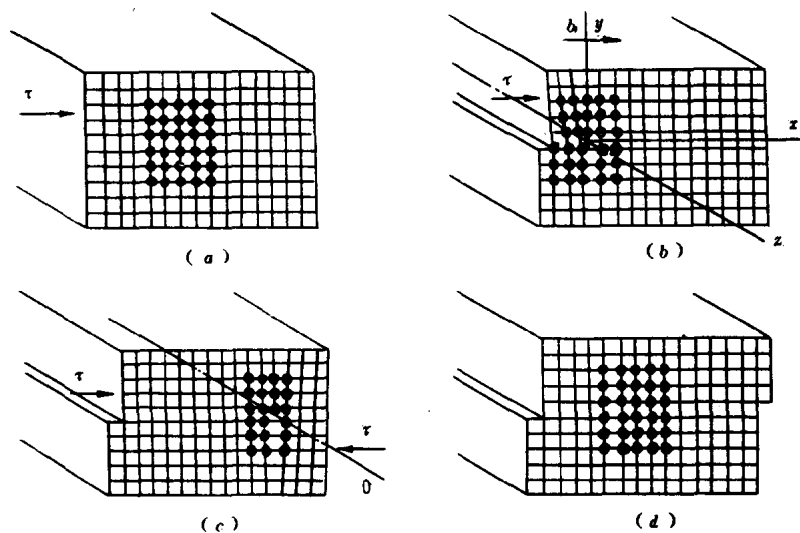


图 1-1-10 塑性滑移的位错示意图
a→d 滑移顺序

合位错 (图 1-1-11)。

亚晶界, 晶界和排列缺陷都属于面缺陷。

亚晶界是亚晶粒的边界, 它们与亚晶内的正常组织区不同, 这些组织彼此之间相交成的角度, 称小角度晶界和中角度晶界 (图 1-1-6)。

晶界是多晶体之间的边界, 也有把晶界称作大角度晶界的。相邻晶粒相应的晶体学方向相交成几十度的角 (图 1-1-7)。

原子层排列连续性遭到破坏, 即所谓排列缺陷 (图 1-1-12)。

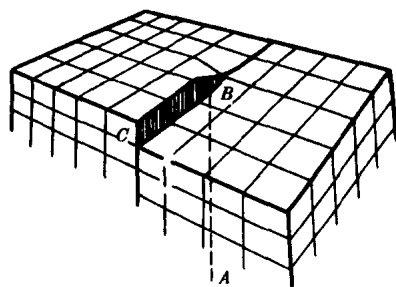


图 1-1-11 晶格中螺旋位错示意图

三、钢的相组织

在理想状态下, 具有一定的化学成份和物理性能以及有限的分界面的合金的同类部分称作相。相可以由一种或几种包含在合金成份中的化学元素所组成。如果该合金是由一种相组成的, 就称作单相。如果是由两种或多种相组成, 则称作多相。固相可以是纯元素, 固溶体, 也可以是中间相。

钢的基本组元是铁和碳; 固态下的基本相是碳在 α -Fe 和 γ -Fe 中的固溶体及渗碳体。

固态下的纯铁包含两种同素异晶体— α 相和 γ 相。

α 相具有体心立方晶格 (bcc) 如图 1-1-13 所示。它在两种温度范围之内存在。在 912°C 以下, 一般称 α 相, 在 $1394^\circ\text{C} \sim 1539^\circ\text{C}$ 之间称 δ 相。

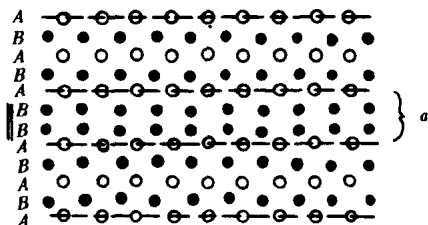


图 1-1-12 六方晶格中的排列缺陷 a 示意图
(A、B 为原子平面的正常位置)

γ 相具有面心立方 (fcc) 晶格 (图 1-1-14) 在 912~1394℃ 的范围之内是稳定的。

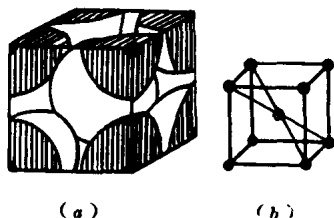


图 1-1-13 体心立方晶格 α -Fe 的单位晶胞

(a) — 模型; (b) — 示意图

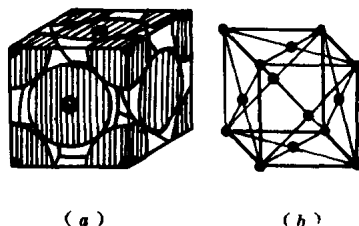


图 1-1-14 面心立方 γ -Fe 的单位晶胞

(a) — 模型; (b) — 示意图

铁中可以溶解许多元素, 其中的一些 (例如镍) 可以以任意的量溶入, 而另一些 (例如碳) 有限的溶入。溶解的结果, 形成固溶体。根据溶质元素的原子在铁的晶格中分布的不同, 固溶体可分为置换式固溶体与间隙式固溶体。置换式固溶体 (图 1-1-15), 是在基本金属原子和溶质元素的原子大小相近时形成的。金属元素的原子与铁形成置换式固溶体。

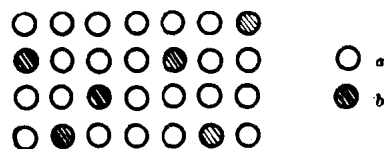


图 1-1-15 置换式固溶体原子排列示意图

a—基本金属的原子; b—溶质原子

如果元素的原子半径相当小^①, 那么它将溶解在溶剂 (铁) 的晶格中, 位于正常分布的铁

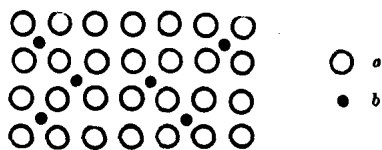


图 1-1-16 间隙式固溶体原子分布示意图

a—基本金属原子; b—溶质元素的原子

原子的间隙里 (图 1-1-16)。这种固溶体叫间隙式固溶体。碳、氮、氧、氢、硼与铁均形成间隙式固溶体。

间隙相是钢中基本的中间相, 即铁与合金元素的化合物: 铁与碳——碳化物; 铁与氮——氮化物。在高合金钢中, 还可能遇到另外一些中间相, 称作金属间化合物, 例如拉维斯相 ($ZrFe_2$, $NbFe_2$)、 σ 相等。

第二节 铁—碳相平衡图

碳作为钢中的一种基本成分, 对钢的性能有着相当大的影响。碳的影响首先表现在钢的转变温度点——临界点的位置上。

钢在加热和冷却时体积的变化, 不仅因为有热膨胀, 还因为有相变。体积的变化不仅取决于单位晶胞 α -Fe 和 γ -Fe 的原子数量, 同时也取决于这些变体 (也称同素异晶体或同素异构体) 的晶格常数。虽然 γ -Fe 的晶格常数 (0.364nm)^② 比 α -Fe 的晶格常数 (0.286nm) 大, 但是, γ -Fe 的晶格原子排列得更紧密, 所以这种变体有最小的比体积。相变时体积的变化, 可用来确定钢在加热和冷却中具体的转变点。

图 1-1-17 是各种不同碳含量的钢的膨胀曲线。转变点 A_1 , A_3 表征体积变化开始和终了温度。加热时的转变点以字母 c 表示 (Ac_1 , Ac_3), 冷却时的转变点以字母 r 表示 (Ar_1 , Ar_3)。

加热时的转变温度点比冷却时的高。这种差异即所谓滞后现象。而且, 加热和冷却速度

① 溶质元素的原子半径和溶剂元素的原子半径之比 ≤ 0.59 。

② 在 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变的温度下 (912℃), α 和 γ 的晶格常数分别为 0.2894nm 和 0.3638nm。

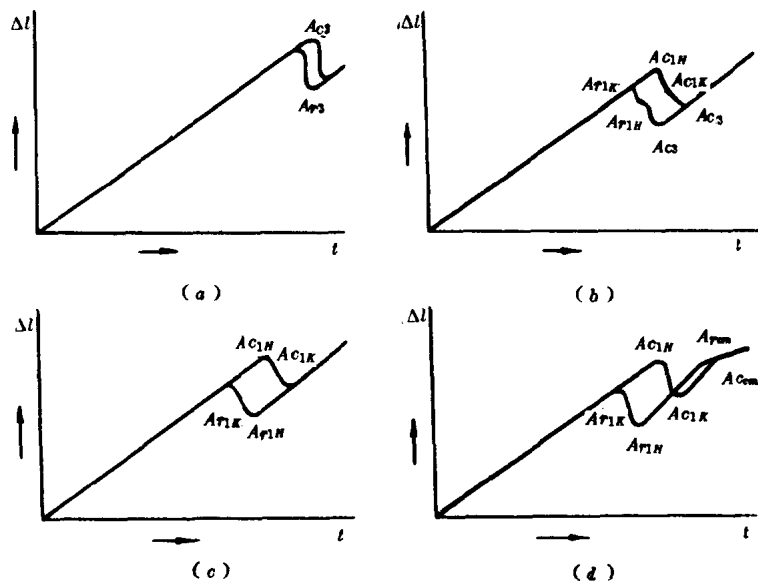


图 1-1-17 纯铁 (a)、0.45% C 的碳钢 (b)、0.68% C (c)、
1%~2% C (d) 的碳钢的膨胀曲线

越大，这样差别就越大。在非常缓慢的冷却速度下，这种差别就几乎消失了。 A_c 和 A_r 将合并为一个平衡点。用字母 e 表示 (A_{e1} , A_{e3})。为了更确切，又附加一个脚注，标明转变的开始和终了 A_1 (A_{c1s} , A_{c1z} , A_{r1s} , A_{r1z})，即 A_{c1s} 用 A_{c1} 表示， A_{c1z} 用 A_{c3} 表示，点 A_{r1s} 用 A_{r3} ，点 A_{r1z} 用 A_{r1} 表示。每种成分的钢都有其特定的加热和冷却时的临界点，这一工作前人已完成，读者只在工作中应用就行了。

图 1-1-18 表示碳钢的转变点。点 A_1 的位置不随含碳量的变化而变化，点 A_3 的位置随含碳量的提高而下降。从纯铁的 912°C，下降到含 0.77% 碳的 727°C。到此，点 A_1 和点 A_3 就合二而一了。体积的变化仅产生于 A_1 温度。膨胀曲线的第二转折处，参看图 1-1-17 (d)，标有 A_{cm} ，分为加热时分解结束温度 (A_{cm}) 和冷却时从奥氏体中析出渗碳体的开始温度 ($A_{r_{cm}}$)。

计算 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变时的体积变化，要以一个体心立方晶格 (α -Fe) 只有 2 个原子，而不是 9 个原子来计算 (因为立方体顶点上的每个原子属于 8 个晶胞，8 个顶点上，每个顶点只占有 1/8 个原子，加上晶胞内部属于它本身的一个原子)，而面心立方晶格 (γ -Fe) 中不是 14 个原子，而是 4 个原子 (8 个顶点上，每个占 1/8 个原子，六个面上，每个面占 1/2 个原子，因为面上

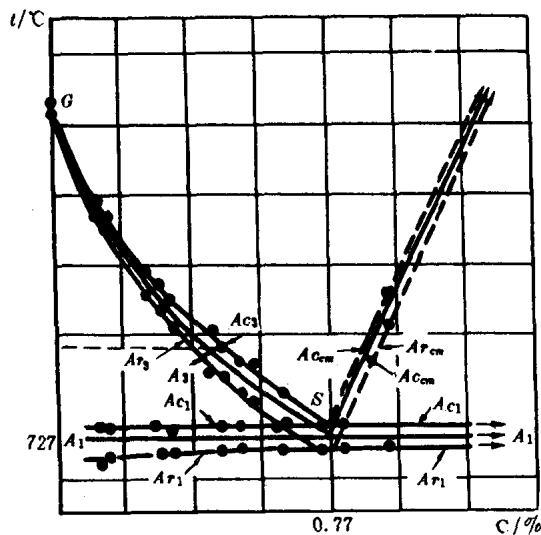


图 1-1-18 根据加热和冷却速度的不同而确定的铁碳合金的转变点 (7.5°C/h)

的原子属于两个晶胞共有)。在转变温度下， α -Fe 的晶格常数为 0.2894nm， γ -Fe 的晶格常数为 0.3638nm，这样就可以标出 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变中线收缩率为 0.22%。^①

在 1394℃ 的温度以上，面心立方晶格的 γ -Fe 变体重新转变成体心立方晶格的 δ -Fe，其热膨胀的结果，晶面的边长比 α -Fe 在 912℃ 的温度以下的边长更大。为 0.293nm。该转变点标为 A_4 。

Fe-C 相平衡图是同一体系合金的相组织图。它与含碳量，温度以及在极其缓慢的冷却条件下的冷却速度等情况有关。

结构组分可分为稳定，不稳定和亚稳定的状态。稳定的结构组分处于平衡状态，即直到外部条件不变为止，一直处于不变情况下，外部条件如温度，当温度处于不变的情况下，组分的结构一直不变，即为稳定的。不稳定的组分处于不平衡状态，而且在一固定的时间内自发地达到平衡。在一定时间内，既不处于平衡状态也不自发地改变平衡状态的结构组分称作亚稳定组分。

在铁碳合金中，碳可以以石墨的形式存在，也可以以渗碳体的形式存在。渗碳体即为一不稳定的 Fe-C 化合物，分子式为 Fe_3C 。它在一定的条件下，可分解出碳，变成石墨形式的碳。因此，存在两种 Fe-C 状态图。亚稳定的 Fe-C 状态图，是 Fe- Fe_3C 的状态图，而稳定的 Fe-C 状态图是 Fe-C（石墨碳）的状态图。

在足够缓慢的冷却条件下，钢的组织 and 特性的研究，具有实际意义的仅是亚稳定系统 Fe- Fe_3C 状态图。即当碳在钢中的含量为 6.69% 以内的部分。6.69% 的碳含量恰好符合化学成分一定的渗碳体—— Fe_3C 。铁碳合金又分成两组：碳含量小于 2.11% 的为钢，碳含量大小于 2.11% 的为铸铁。在研究铸铁的相组成及其他有关特性时，研究者有时也采用 Fe-C（石墨）状态图。因为碳在灰口铸铁中是以石墨碳（C）的形式存在的。图 1-1-19 为 Fe-C 相平衡图。

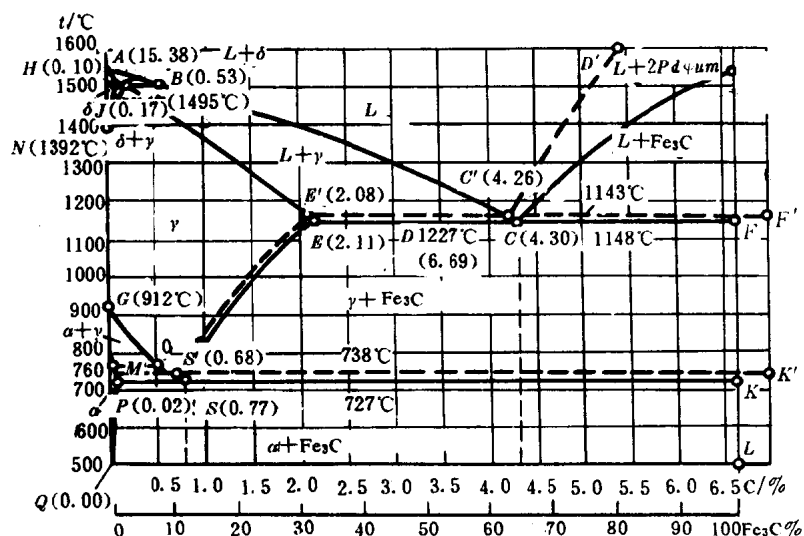


图 1-1-19 Fe-C 相平衡图

实线——亚稳定平衡；虚线——稳定平衡

① 压缩体积效应，根据俄国学者 Б·Г·李夫舍茨 (Б·Г·Лифшиц) 的近似计算为 1%；根据 Н·Г·阿克 (Н·Г·Акин) 研究者的更精确的测定为 0.75%。