

金属热处理丛书

晶体缺陷与金属热处理

中国机械工程学会热处理学会 主编



机械工业出版社

金属热处理丛书

晶体缺陷与金属热处理

中国机械工程学会热处理学会 主编

侯增寿 卢光熙 编著

宋余九 审校



机械工业出版社

本书共四章。第一二两章讲述晶体缺陷基础，第三章讲述晶体缺陷在金属固态相变过程中的行为，第四章用晶体缺陷理论解释金属热处理组织与性能间的关系，并简要介绍几种与晶体缺陷联系较密切的新工艺和新材料。

全书叙述简炼，概念清楚，可供从事金属热处理工作的技术人员及其他有关专业的工程技术人员自学，也可作为高校相应专业的教学参考书。

晶体缺陷与金属热处理

中国机械工程学会热处理学会 主编

侯增寿 卢光昭 著

责任编辑：丁文华

封面设计：郭景云

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $7^{5/8}$ · 字数 162 千字
1988年4月北京第一版·1988年4月北京第一次印刷
印数 00,001—4,000 · 定价：2.15元

ISBN 7-111-00492-2/TG · 130

中国机械工程学会热处理学会
《金属热处理丛书》编委会

成 员

主任委员：朱沅浦

副主任委员：戚正风 丁文华 侯增寿

委员：（按姓氏笔划排列）

丁文华 邓 洋 朱沅浦 宋余九 陈 洵
陈仁梧 陈善述 杨 让 侯增寿 俞德刚
陆载厚 戚正风 崔 昆 袁 汲 雷廷权
樊东黎

序

热处理是机械制造中关键工艺之一，它是保证机器零件内在质量，延长服役寿命的有效方法。无论对于民用产品还是军用产品的制造，热处理都是必不可少的。因而在四化建设中起着极其重要的作用。

热处理的进步又与物理冶金和一些新技术的发展息息相关。很多热处理工艺的改进就是以物理冶金理论的新发展和一些新技术的应用为根据的。例如：根据组织性能研究的新成果，发展了一些强韧化的新工艺；由于激光、电子束的应用，发展了一些高能密度快速加热的表面改性工艺。这些知识已是许多热处理工作者感到不足的方面，需要自学加以迅速补充。

中国机械工程学会热处理学会从目前热处理行业中技术人员的普遍需要出发，由编辑出版工作委员会组织国内大专院校和科研单位及工厂具有专长的专家、学者编写了这套《金属热处理丛书》，以提高金属热处理科技人员的理论水平与技术水平，补充一些新的理论和其它领域中的新技术知识，扩大眼界，开阔思路，推动行业发展，为四化建设做出应有的贡献。

作者在编写时力求理论联系实际，取材上深度广度适宜，文字上深入浅出，便于自学，以期读者阅读后有所收获，有所提高。

由于我们的知识面不广，在选题方面和编写内容方面可

能还有不恰当之处。希望广大读者提出宝贵意见，以便在第二批丛书的选题方面和编写方面有所改进。

中国机械工程学会热处理学会
《金属热处理丛书》编委会

前 言

时至今日，晶体缺陷理论已成为金属热处理科技人员不可缺少的知识。然而，对于这一领域，年资较长的同志过去接触较少，年轻同志虽然在学校里接受过入门教育，对晶体缺陷与金属热处理过程中的相变以及性能变化之间的关系却缺乏较系统的概念。有鉴于此，中国机械工程学会热处理学会。《金属热处理丛书》编委会委托我们编写了本书，供金属热处理科技人员自学。目前这类书籍为数不多，本书也可供高校相应专业师生参考。

考虑到读者一般都具备金属学方面的基础知识，故有关晶体学基础部分从略。

本书第一、四两章由太原工业大学侯增寿编写，第二、三两章由吉林工学院卢光照编写。全书经西安交通大学宋余九同志审阅。

限于我们的水平，取材可能不尽适宜，错误则一定难免，殷切希望得到专家、学者和读者指正。

侯增寿 卢光照

目 录

第一章 点缺陷及位错	1
一、点缺陷	1
(一) 空位的热力学分析	3
(二) 过量空位	6
(三) 空位对金属物理性能和力学性能的影响	7
(四) 空位迁移能	10
二、位错	12
(一) 位错的电子显微图像	12
(二) 刃型位错模型	13
(三) 螺型位错模型	14
(四) 柏氏矢量	15
(五) 金属中位错的分布	20
三、位错的运动	22
(一) 位错的滑动	22
(二) 位错的攀移与棱柱位错	25
四、位错的弹性行为	27
(一) 应力分量	27
(二) 螺型位错的应力场	29
(三) 刃型位错的应力场	30
(四) 位错的应变能与线张力	32
(五) 外力作用下滑动位错所受的力及位错间的作用力	34
五、实际晶体中的位错	37
(一) 实际晶体中位错的柏氏矢量	37
(二) 位错的分解与合并	38
(三) 面心立方晶体中的堆垛层错与不全位错	40
(四) 面心立方晶体中全位错的分解与扩展位错	46

六、位错的增殖	49
(一) F-R 机制	49
(二) 开动 F-R 位错源所需的切应力	52
七、不动位错与割阶	55
(一) 不动位错	55
(二) 位错交截及割阶	57
第一章 参考文献	60
第二章 面缺陷	61
一、界面的分类与结构	61
(一) 界面的五个自由度	61
(二) 晶界、亚晶界与相界	63
(三) 小角晶界与大角晶界	64
(四) 共格界面、半共格界面与非共格界面	73
(五) 复杂半共格界面	76
(六) 表面	78
二、界面能	80
(一) 界面能的大小	82
(二) 界面能与晶粒形状	85
(三) 界面能的测量	94
第二章 参考文献	100
第三章 晶体缺陷与金属固态相变	102
一、晶体缺陷对相平衡的影响	102
二、形核	104
(一) 均匀形核	104
(二) 非均匀形核	105
三、界面迁移、晶粒长大与新相长大	119
(一) 界面迁移的机制	119
(二) 纯金属与单相固溶体的晶粒长大	123
(三) 析出相的长大	130

X

四、马氏体	143
(一) 马氏体转变的形核	144
(二) 马氏体的长大	153
(三) 用位错运动阐明的其它几种马氏体 转变晶体学模型	156
(四) 马氏体的亚结构	166
(五) 马氏体的回火	173
五、晶界偏析	182
(一) 晶界偏析的一般规律	182
(二) 晶界偏析与回火脆性	184
(三) 晶界偏析与碳钢的淬透性	191
第三章 参考文献	193
第四章 热处理改性与金属中的晶体缺陷	19
一、回复与再结晶	195
(一) 形变强化的位错理论	195
(二) 冷塑性金属的回复与再结晶	199
二、钢的马氏体淬火强化	203
(一) 马氏体的固溶强化	204
(二) 时效强化	203
(三) 结构强化	209
三、固溶时效强化	210
(一) 应力场强化	211
(二) 化学强化	211
(三) 弥散强化	212
四、细晶强化和钢的贝氏体强化	213
(一) 细晶强化	213
(二) 钢的贝氏体强化	213
五、钢的形变热处理强化	214
(一) 高温形变热处理	214

(二) 中温形变热处理	217
(三) 锻后余热淬火	219
六、微合金化钢	219
(一) $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变与 α/γ 相间沉淀	220
(二) 微合金化轧态钢	222
七、相变诱发塑性与变塑钢 (TRIP 钢)	226
(一) 形变诱发马氏体相变	226
(二) 相变诱发塑性	228
(三) 变塑钢	229
第四章 参考文献	231

第一章 点缺陷及位错

尽管非晶态金属已经开始问世，但目前实际使用的金属材料却仍属晶体。大家都知道，金属晶体与非晶体的本质区别，在于原子是否规则排列。随着生产的不断发展和科学研究工作的不断深入，人们逐渐认识到金属晶体中的原子排列未必完全规则，在某些局部区域，原子排列甚至很不规则。这些原子排列的规律性受到严重破坏的区域，统称为晶体缺陷。根据晶体缺陷的几何特点，可以把它们区分为三大类，即点缺陷、线缺陷和面缺陷。

点缺陷属于晶体中的三维缺陷，但在三个方向上尺寸都不大，而且基本相等。其中包括空位、间隙原子，以填隙方式或置换方式溶入固溶体的溶质原子。线缺陷属于一维缺陷，它便是晶体中的位错。面缺陷包括晶粒边界、孪晶界、相界、层错、金属表面等。它们都属于二维缺陷，有一定厚度，但厚度很小。

晶体缺陷不但会对金属材料的各种性能产生巨大影响，而且对金属的相变过程也有重大作用。晶体缺陷已成为金属研究工作的一项重要内容。在研究金属热处理问题时，常常要考虑晶体缺陷的影响。

一、点缺陷

图 1-1 示意地表明了金属晶体中的空位及间隙原子。图 1-2 是异类原子以置换方式存在于金属晶体中的示意图。图中圆圈和黑点代表两类不同原子。如果把金属中的原子设想为

刚性圆球，它们应该互相挨紧相切。这里把它们拉开一个距离，只是为了看起来比较清晰。从图中可以看出，不管存在哪种点缺陷，其周围的原子都在一定程度上偏离平衡位置，形成点阵畸变。

固态下金属中的原子并非静止不动，它们不停地围绕其平衡位置以不同的振幅振动。当振幅足够大时，便可能脱离平衡位置，遗留下一个空位。如果这个原子进入点阵间隙，即可同时形成间隙原子。

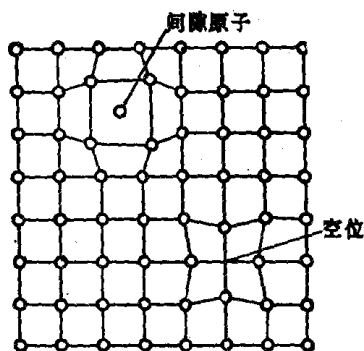


图1-1 空位及间隙原子示意图

脱离平衡位置的原子也可能进入相邻空位，或辗转迁移至晶体表面或晶界，这样就只能形成空位，不出现间隙原子。这是一种更为普遍的情况。

异类原子的溶入是在金属中存在杂质或合金元素的情况

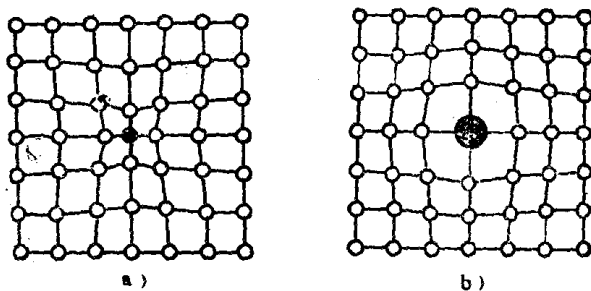


图1-2 异类原子以置换方式存在的示意图

a) 异类原子较小 b) 异类原子较大

下发生的。

空位是最受重视的点缺陷，下面主要讨论有关空位的问题。

(一) 空位的热力学分析

实践和理论完全肯定，空位是金属中必然存在的一种缺陷，而且是一种热力学稳定的缺陷。金属晶体中空位的数量常用空位浓度来衡量。所谓空位浓度，是指金属晶体中空位总数与原子总数的比值。实验证明，给定金属中空位的浓度随温度的升高而增长。这种现象单纯用原子振动的振幅随温度的升高而增大的规律来解释是不够的，通过热力学分析可以建立一个更加明确的概念。

在热力学中，一个系统（在这里是指所讨论的金属晶体）的状态（这里只考虑空位浓度）是否稳定，可用自由能或自由焓来衡量。系统在一定状态下自由能（或自由焓）越低，这个状态越稳定。自由能可用定义式表达为：

$$F = E - TS \quad (1-1)$$

式中 F ——系统的自由能； E ——系统的内能； T ——温度； S ——系统的熵。

粗略地讲，金属晶体的内能主要包括原子运动的动能和由原子间作用力所产生的位能。当原子完全规则排列时位能最低。空位周周点阵发生畸变时，这些原子的位能升高，从而使金属晶体内能增大。与此同时，金属晶体的熵也因空位的形成而增高。根据统计力学，金属熵值的高低反映了原子运动及排列的混乱度。空位的出现首先使其周围原子振动的振幅和频率发生变化，从而使熵值增加。熵的这种增值称为振动熵。空位的出现还使空位与原子相互配置的方式有了多种可能性，即增大了空位与原子在相对排列上的混乱度。由此

导致的熵的增值叫做组态熵或排列熵。对空位浓度进行热力学分析时，一般只着重考虑组态熵。

假设一块金属晶体中原子总数为 N ，空位总数为 n 。令 E_f 为空位形成能，即形成一个空位后晶体内能的增值。形成 n 个空位后晶体内能总增值应为

$$\Delta E = nE_f \quad (1-2)$$

根据统计力学，原子总数为 N 的晶体中形成 n 个空位后晶体的组态熵为

$$\Delta S = K \ln \Omega \quad (1-3)$$

$$\Omega = (N + n)! / N! n! \quad (1-4)$$

式中 K ——波茨曼常数； Ω ——组合几率，即 n 个空位在 N 个结点中可能分布方式的总数。和一般几率的概念不同，这里的 $\Omega \gg 1$ ①。

由式 (1-2)、(1-3) 和 (1-4)，可以写出形成 n 个空位后晶体自由能的总增值计算式

$$\Delta F = \Delta E - T\Delta S = nE_f - KT[\ln(N + n)! - \ln N! - \ln n!] \quad (1-5)$$

运用斯特令近似计算公式 $\ln N! = N \ln N$ ，可以写出：

$$\Delta F = nE_f - KT[(n + N) \ln(N + n) - N \ln N - n \ln n] \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明，金属晶体中空位导致的自由能增值，是空位数的函数。而且

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta F}{dn} &= E_f - KT[\ln(N + n) + 1 - \ln n - 1] \\ &= E_f - KT \ln[(N + n)/n] \end{aligned}$$

① 从这段叙述中不难明白，混乱度实际是反映了原子运动及排列的多样性。换句话说，混乱度也就是多样化的程度。

$$\frac{d^2 \Delta F}{dn^2} = -KT \left(\frac{1}{N+n} - \frac{1}{n} \right) > 0$$

可见 ΔF - n 曲线是下凹的。令 $\frac{d\Delta F}{dn} = 0$, 可求出与 ΔF 的最小值所对应的空位数 n_e 。此时

$$\begin{aligned} E_f - KT \ln[(N+n_e)/n_e] &= 0 \\ KT \ln[(N+n_e)/n_e] &= E_f \\ KT \ln[n_e/(N+n_e)] &= -E_f \\ n_e/(N+n_e) &= \exp(-E_f/KT) \end{aligned} \quad (1-7)$$

将这个关系代入式 (1-6), 不难证明此时 ΔF 为负值, 这就是说, 在结点总数为 N 的晶体中存在 n_e 个空位, 可以最大限度地降低金属晶体的自由能, 因而空位是热力学稳定的晶体缺陷。

由于 $N \gg n_e$,

$$\frac{n_e}{N+n_e} \simeq \frac{n_e}{N} = C_e \simeq \exp(-E_f/KT) \quad (1-8)$$

式中 C_e 便是空位的平衡浓度。若其他条件不变, 浓度为 C_e 的金属具有最低的自由能。式 (1-8) 表明, 空位的平衡浓度是温度 T 和空位形成能 E_f 的函数。温度升高, 空位浓度将急剧增长。空位形成能越大, 空位越难于形成, 给定温度下的空位浓度将随之下降。表 1-1 列出几种金属的空位形成能。

由表中数据可以计算出给定金属在给定温度下的平衡空位浓度。

[例] 纯铝空位形成能为 $0.76\text{eV} = 0.76 \times 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$, $K = 1.38032 \times 10^{-23}\text{J/}^\circ\text{C}$, 温度为 300K (27°C) 时, 空位平衡浓度为

表1-1 几种金属的空位形成能

金 属	Cu	Ag	Au	Al	Ni	Pl	Mg	Fe	W
$E_f(\text{eV})$ ①	1.0~1.1	1.1	0.98	0.76	1.4	1.4	0.9	2.13	3.3

① $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

$$\begin{aligned}
 C_e^{900} &= \exp[-0.76 \times 1.602 \times 10^{-19} / 1.38032 \times 10^{-23} \\
 &\quad \times 300] \\
 &= 1.70 \times 10^{-13}
 \end{aligned}$$

900K (627°C) 时纯铝的平衡空位浓度为

$$\begin{aligned}
 C_e^{900} &= \exp[-0.76 \times 1.602 \times 10^{-19} / 1.38032 \times 10^{-23} \\
 &\quad \times 900] \\
 &= 5.54 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

后者是前者的三亿倍。

(二) 过量空位

正常情况下，金属晶体中的空位浓度应接近其平衡值。在下述条件下空位浓度可超过平衡值，即产生过量空位。

1. 将金属加热至高温，使其中的空位增多，达到高温下应有的平衡值，然后使之快速冷却（淬火），可使高温形成的空位在常温“冻结”下来。

2. 用高能粒子轰击金属。

3. 对金属进行冷态压力加工，使之产生塑性形变。

4. 使某些金属（Zn、Cd、Mg、Cu、Ni等）氧化。

采用第一种措施时，过量空位的数量决定于金属的空位形成能、加热温度和冷却速度。空位形成能越低、加热温度越高，高温下形成的空位数量越多。升温时空位的形成和降温时空位的消失都要通过原子的扩散来实现，冷却速度越