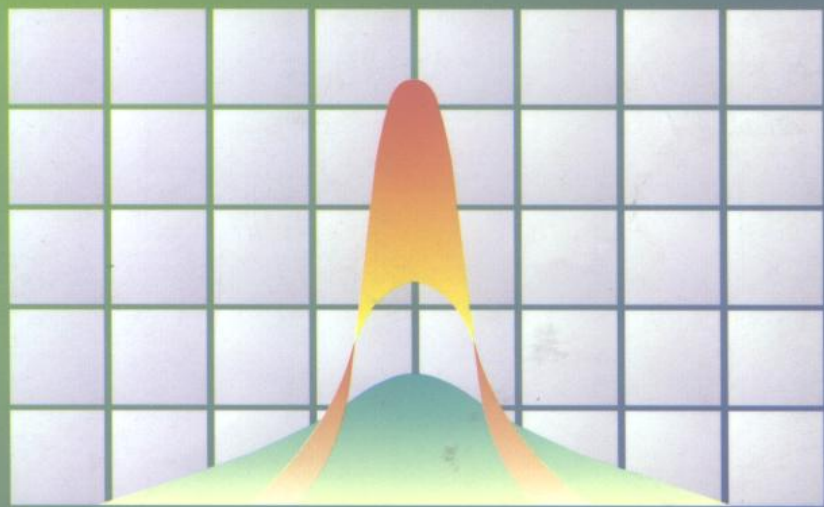


固态金属中的 扩散与相变

戚正风 主编



机械工业出版社

1025/16

本书主要是为热加工工作者提供固态金属相变方面较为深入的有关理论知识，着重阐明了有关的物理概念和物理模型，尽可能减少了数学推导。全书共分四章，包括两大部分，第一、二章为第一部分，论述了固态金属相变中的一般性问题，即金属中的扩散以及固态金属相变中的形核、长大、粗化等问题。第三、四章为第二部分，讨论了与金属材料生产实际有关的各种具体相变，其中包括非扩散型相变及扩散型相变。

本书可供热加工专业研究生作教材用，也可供教师、工厂技术人员及本科学生作参考用。

图书在版编目 (CIP) 数据

固态金属中的扩散与相变/戚正风主编. —北京: 机械工业出版社, 1998.12

ISBN 7-111-06094-6

I. 固… II. 戚… III. ①固体-金属-扩散②固体-金属-相变 IV. TG111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 01025 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 韩会民 版式设计: 冉晓华 责任校对: 肖新民

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·13.625 印张·291 千字

0 001—1 500 册

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本书由

中共大连市委、大连市人民政府资助出版

The published book is sponsored
by the Dalian Municipal Government

大连市学术专著资助出版评审委员会

名誉主任 楼南泉 林纪方
主任 司玉琢
副主任 高春武 吴厚福 何杰
委员 梁宗巨 王子臣 李寿山 王逢寿
汪榕培 夏德仁 罗均炎

工程技术专家评审组

组长：袁一（大连理工大学 博导、教授）
副组长：刘人杰（大连海事大学 博导、教授）
成员：王承遇（大连轻工学院 博导、教授）
吴迪镛（中科院大连化学物理研究所
博导、教授）
陈朝贵（铁道部大连内燃机车研究所
高级工程师）
郭东明（大连理工大学 博导、教授）
蒋志凯（大连水产学院 教授）

前 言

金属中的扩散与相变是金属材料热处理的基础。

固态金属相变涉及的问题有：决定相变能否发生的热力学问题、讨论相变速度的动力学问题以及与探讨相变机制密切有关的晶体学问题。相变热力学一般在合金热力学专著中讨论，这里不再重复，只是根据需要、针对具体问题加以应用。故本书内容主要是在全国通用教材“金属热处理原理”的基础上进一步讨论除合金热力学以外的其它有关固态金属相变的问题。

因固态金属相变中绝大多数为扩散型相变、扩散型相变的基础是原子的扩散，故在本书中对金属中的扩散进行专门讨论。

本书包括二大部分，前二章为第一部分，论述了固态金属相变中的一般性问题，即金属中的扩散以及固态金属相变中的形核、长大、粗化等问题。后二章为第二部分，讨论与金属材料生产实际有关的各种具体相变，其中包括非扩散型相变及扩散型相变。

固态相变是固体物理中的一个主要组成部分，固态金属相变则是金属物理中的一个主要组成部分。金属物理学家们对各种固态金属相变从理论上作了大量研究，提出了多种模型，并利用数学工具进行了深入讨论，有关这方面的专著已有多本。对于金属材料热处理工作者来说，固态金属中的各种相变则是各种热处理工艺的理论基础，探讨固态金属相变

的理论的目的主要在于指导生产实践。我们编写本书的目的即在于为热加工工作者提供较为深入的有关理论知识。故而在本书中我们将着重阐明有关的物理概念和物理模型，尽可能减少数学推导。读者如欲对固态金属相变理论作进一步了解，可参阅有关参考文献及原始资料。

本书由大连铁道学院戚正风教授主编，第一章由西安理工大学安运铮教授编写，第二章由戚正风教授编写，第三章由哈尔滨工业大学赵连城教授编写，第四章由合肥工业大学刘永忻教授编写。由于编著者水平所限、错误在所难免，望读者指正。

本书可供热加工专业研究生作教材用，也可供教师、工厂技术人员及本科学生参考。

本书由大连市政府及大连铁道学院共同资助出版，作者对此深表感谢。

编著者

1997.12

常用符号名称对照表

符 号	名 称	符 号	名 称
a	点阵常数、原子层间距、活度、原子一次跳跃距离	G	自由焓、克分子自由焓、线生长速
A	面积、应变因子、容纳因子、正弦波振幅	G_V	体积自由焓
A_S	奥氏体转变开始点	G_S	表面能
A_f	奥氏体转变終了点	G_E	弹性应变能
b	布氏矢量	G_D	缺陷能
B	原子迁移率	ΔG	自由焓变化
C	浓度、界隅数、碳势	ΔG_V	体积自由焓变化
C_n	核胚平衡浓度	ΔG_S	表面能变化
C_{nc}	临界核胚平衡浓度	ΔG_E	弹性应变能变化
C_p	比热容、比定压热容	ΔG_D	缺陷能变化
d	直径	ΔG_n^0	标准态时形成一个原子数为 n 的核胚的自由焓变化
D	扩散系数		
D_0	扩散常数	$\Delta G^{\gamma-M}$	γ -M 转变自由焓差
E	弹性模量、电场强度、体积膨胀引起的应变量	$\Delta G^{\gamma-\alpha}$	γ - α 转变自由焓差
f	几率、原子跳跃频率、活度系数	$\Delta G^{\alpha-M}$	α -M 转变自由焓差
$f(S\cdots)$	应力场能	ΔG^*	临界形核功
$f(M)$	磁场能	$\Delta G_{均}^*$	均匀形核临界形核功
$f(D)$	缺陷能	$\Delta G_{不}^*$	不均匀形核临界形核功
$f(\theta)$	接触角因子	ΔG_γ	梯度能
F	相关系数、扩散力、热力学因子	ΔG_D	位错交互作用能
g	单原子自由焓	ΔG_{IFE}	用于补偿界面能的自由能
Δg	单原子自由焓差	ΔG_{DDF}	扩散驱动力
		h	高度
		H	热焓

符 号	名 称	符 号	名 称
ΔH_f	空位形成功	Q	激活能
ΔH_m	空位移动功	Q^{-1}	内耗
i	形核维数	r	半径
I	形核率	r_c	临界半径
I_{π}	平衡形核率	r_{\max}	最大半径
$I_{\text{稳}}$	稳态形核率	R	气体常数、曲率半径、反 应速度
J	扩散通量、交换能	$R_{(\beta)}$	增幅因子
K	平衡常数、压缩系数、波 尔茨曼常数	S	熵、切应变、片层厚度
\bar{K}	速率常数	S_0	片间距
K_y	钉着位错去钉扎应力	S_m	组态熵
l	界棱长度	ΔS_f	形成空位引起的熵变
L	晶粒平均直径	ΔS_m	移动空位引起的熵变
L_s	潜热	t, T	温度
m	相对原子质量	T_0	临界温度
M	相对分子质量、超点阵 半周期	T_m	熔点
M_s	马氏体转变开始点	U	速度、内能
M_f	马氏体转变终了点	v	速度
M_d	应变促使马氏体相变的 上限温度	V	体积、混合能参量
M_s^*	应变诱发形核下限温度	V_m	马氏体摩尔体积
n	原子数	V_γ	奥氏体摩尔体积
n_c	临界原子数	V_m	摩尔体积
N	单位体积原子数	W	热力学分布几率
p	几率	X	以摩尔分数表示的浓度
p	压力、晶界迁移驱动力、 Peclet 参数	Z	配位数 (原子近邻位置 数)、Zeldovich 非平衡因 子
		α	弹性系数、膨胀系数

(续)

符 号	名 称	符 号	名 称
β	传递系数	ρ	晶粒半径
γ	界面能、活度系数	σ	强度、短程有序度
γ_0	形成马氏体内位错所需 的应变能	σ_i	抵抗位错运动的点阵摩 擦阻力
γ_i	形成马氏体内弯晶增加 的界面能	σ_s	屈服强度
γ_s	相间界面能	σ_0	纯铁屈服强度
δ	晶界厚度	σ_{ss}	固溶强化项
ε	错配度函数、原子键能	σ_{disp}	沉淀强化项
η	体积形状因子	τ	时间、弛豫时间、临界切 应力
θ	接触角	τ_{*}	孕育期
λ	相邻台阶间距、波长、沉 淀相间距	ϕ	切变角
μ	切变模量、化学位	ω	长程有序度
ν	原子振动频率、泊松系 数	Ω	体积单元表面积
		Γ	每个原子在单位时间内 跳跃次数

目 录

前言

常用符号名称对照表

第一章 金属中的扩散

第一节 扩散的宏观规律	2
一、Fick 第一定律与稳态扩散	2
(一) 在一维空间扩散的表达式	3
(二) 在薄壁管柱对称时的二维扩散	3
(三) 在球对称体中的三维扩散	5
二、Fick 第一定律在固态相变研究中的应用	6
(一) 测定碳在奥氏体中的扩散系数	6
(二) 分析扩散型相变中扩散组元流量	7
(三) 分析扩散型相变中新相相界移动长大速度	12
(四) 过饱和固溶体析出沉淀相时, 固溶体贫化动力学	18
三、Fick 第二定律及非稳态扩散	22
四、广义力作用下的扩散方程	23
(一) 连续合金系中 K 组元的扩散通量方程	24
(二) 质量保存定律	25
(三) 电场作用下的扩散方程	26
(四) 广义力作用下的扩散方程	27
第二节 扩散方程解	29
一、薄壁源扩散的解	29
二、半无限长对焊金属棒扩散偶的解	34

(一) 叠加法求解	34
(二) 拉氏变换 (Laplace transform) 求解	37
三、有界体系解	39
四、扩散系数与晶体结构和浓度有关时的扩散方程解	42
(一) 在各向异性介质中的扩散方程及扩散方程解	42
(二) 扩散系数与浓度有关时的方程解	46
五、扩散方程的数值解	49
第三节 扩散机制及微观理论	56
一、扩散机制	56
(一) 间隙机制	56
(二) 换位机制	57
(三) 空位机制	58
二、原子热运动与扩散系数	61
(一) 理想溶液中原子的跃迁与扩散系数	61
(二) 原子扩散的统计分析	65
(三) 相关系数	68
第四节 二元合金中的扩散及扩散热力学	70
一、稀二元合金中的扩散	70
二、浓二元合金中的扩散与 Darken 方程	72
三、合金中扩散过程的热力学	74
第五节 快速通道扩散	80
一、表面扩散	81
二、晶界扩散	89
(一) 唯象公式及数学解析	89
(二) 影响晶界扩散系数 D_b 的因素	98
(三) 晶界扩散机制	102
三、沿位错中心扩散	103
第六节 复杂条件下的扩散	106
一、三元系中的扩散	106

二、反应扩散	113
(一) 反应扩散时扩散系数的确定	114
(二) 反应扩散时新相的长大	118
三、多元系中的扩散	121
(一) 唯象公式	121
(二) 多组元扩散时扩散层形成特点	122
四、塑性变形时金属中的扩散	124
参考文献	126

第二章 固态相变的形核、长大与粗化

第一节 概述	130
一、按热力学分类	130
二、按原子迁移特征分类	132
三、按相变方式分类	132
第二节 固态相变的形核	133
一、扩散形核	133
(一) 均匀形核	134
(二) 形核率 I	138
(三) 不均匀形核	140
二、无扩散形核	151
(一) 均匀形核	151
(二) 不均匀形核	152
(三) 核胚冻结理论	153
(四) 应变形核	153
(五) 弹性波位移形核及软模	154
第三节 固态相变的长大	157
一、固态相变长大类型	157
二、成分不变协同型转变	158
三、成分不变非协同型转变	160

(一) 界面容纳因子	160
(二) 连续长大	162
(三) 台阶机制长大	164
四、成分改变的协同型转变	165
五、成分改变的非协同型转变	166
(一) 转变控制因素	166
(二) 扩散控制长大	167
(三) 界面控制长大	178
(四) 混合控制胞状长大	181
六、界面溶质原子与异相的影响	183
(一) 溶质拖曳	184
(二) 异相粒子的钉扎	186
第四节 转变动力学	188
一、Johnson-Mehl 方程	189
二、Avrami 方程	191
三、TTT 图	193
第五节 固态相变的粗化	196
一、弥散析出相的粗化	197
二、纤维状及片状组织的粗化	201
(一) 纤维状组织的粗化	201
(二) 片状组织的粗化	203
三、晶粒粗化	204
(一) 驱动力 P	204
(二) 晶界曲率半径 R	206
(三) 晶粒的正常长大	209
参考文献	211

第三章 无扩散型相变

第一节 马氏体相变热力学	215
--------------------	-----

一、Fe-C 合金马氏体相变热力学	216
二、 $\beta(\gamma) \rightarrow \epsilon'$ 马氏体相变热力学	218
三、弹性马氏体相变热力学	220
第二节 马氏体相变的形核	221
一、马氏体共格核胚的形成	222
二、位错在马氏体形核过程中的作用	224
(一) Zener 模型	224
(二) Venables 模型和极轴机制	226
三、应变形核	230
第三节 马氏体的长大	233
一、马氏体长大概况	233
二、板条马氏体的生长	234
三、片状马氏体的生长	236
四、应力和形变对马氏体形核和长大的影响	240
第四节 马氏体相变晶体学——表象理论	242
一、表象学理论的实验基础	243
二、不变平面应变的性质	246
三、马氏体相变表象理论的基本原理	256
第五节 马氏体相变的矩阵代数分析	267
一、马氏体相变的极射赤平投影分析	268
二、Bowles-Mackenzie (BM) 分析法	277
三、Wechsler-Lieberman-Read (WLR) 分析法	280
四、各向同性畸变界面的可能性	287
五、计算示例	288
(一) BM 方法	288
(二) WLR 方法	294
六、讨论	298
(一) 理论与实验的比较	298
(二) 滑移分析与孪生分析的比较	302

(三) 解的简并	303
第六节 马氏体预相变和 ω 相的形成	305
一、马氏体预相变	305
二、马氏体预相变机制	311
三、 β - ω 相变	313
参考文献	317

第四章 扩散型相变

第一节 沉淀	322
一、相变热力学	324
(一) 相变驱动力	324
(二) 长大驱动力	326
二、相变动力学	330
三、铝-铜合金系中的沉淀	330
(一) 沉淀序列	330
(二) 沉淀强化机制	331
(三) 等温沉淀动力学特点及其影响因素	333
四、常见的不连续沉淀合金系	339
五、Fe-C 合金系中的沉淀	341
(一) Ti、Nb、V 的碳化物与氮化物在奥氏体中的溶解 规律	341
(二) 相间沉淀	343
第二节 Spinodal (调幅) 分解	349
一、Spinodal 分解热力学	350
(一) Spinodal 分解的理论边界条件——化学拐点界线	350
(二) Spinodal 分解的修正边界条件——共格拐点界线	351
二、Spinodal 分解机制与动力学	352
(一) Spinodal 分解机制	352
(二) Spinodal 分解动力学	353

三、Spinodal 分解与形核-长大型沉淀的区别	355
四、组织与性能特点	356
第三节 共析分解	357
一、共析分解热力学	357
二、珠光体相变	360
(一) 相变机制	360
(二) 相变动力学	364
三、贝氏体相变	370
(一) 贝氏体的形态及晶体学	370
(二) 转变机制	375
(三) 贝氏体相变热力学——KRC 模型	378
(四) 贝氏体相变动力学	381
(五) 贝氏体相变的若干争议问题	382
第四节 有序-无序相变	385
一、有序-无序相变热力学	385
(一) 具有有序-无序相变合金系相图的特点	385
(二) 固溶体自由焓的统计理论	386
二、超结构	392
三、有序度参量	394
(一) 短程有序度	394
(二) 长程有序度	395
(三) ω 与 σ 间关系	396
四、有序化机制	397
(一) 长程有序	397
(二) 短程有序	399
(三) 有序化过程机制小结	400
五、有序化动力学	401
(一) 均匀有序化	401
(二) 有序畴的长大	402

(三) 有序畴的 Ostwald 粗化.....	403
六、有序化对合金性质的影响	403
(一) 热容	403
(二) 电阻率	405
(三) 磁学性质	406
(四) 力学性能	407
参考文献	409