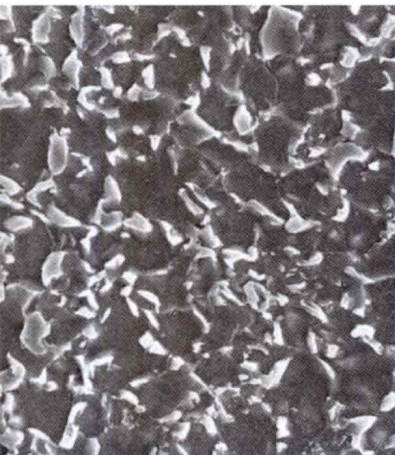


材料科学经典著作选译

第三版

金属和合金中的相变

Phase Transformations in Metals and Alloys



David A. Porter
Kenneth E. Easterling 著
Mohamed Y. Sherif

陈 冷 余永宁 译



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

材料科学经典著作选译

第三版

Jinshu he Hejin Zhong de Xiangbian

金属和合金中的相变

Phase Transformations in Metals and Alloys

David A. Porter

Kenneth E. Easterling 著

Mohamed Y. Sherif

陈 冷 余永宁 译



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图字：01 - 2009 - 4366 号

Phase Transformations in Metals and Alloys, 3rd edition/by David A. Porter, Kenneth E. Easterling, and Mohamed Y. Sherif/ISBN: 978 - 1 - 4200 - 6210 - 6(0)

© 2009 by Taylor & Francis Group, LLC

All Rights Reserved

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售

图书在版编目(CIP)数据

金属和合金中的相变：第3版/(芬)波特(Porter, D. A.), (英)伊斯特林(Easterling, K. E.), (荷)谢里夫(Sherif, M. Y.)著; 陈冷, 余永宁译. —北京: 高等教育出版社, 2011. 1

(材料科学经典著作选译)

书名原文: Phase Transformations in Metals and Alloys, 3rd Edition

ISBN 978 - 7 - 04 - 030567 - 8

I. ①金… II. ①波…②伊…③谢…④陈…⑤余…
III. ①金属 - 相变②合金 - 相变 IV. ①TG111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 190535 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 28.75
字 数 530 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2011 年 1 月第 1 版
印 次 2011 年 1 月第 1 次印刷
定 价 58.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30567 - 00

译者序

相变在材料科学与工程领域占有重要的地位,《金属和合金中的相变》一书全面论述了金属和合金中的相变基本理论并列举了若干研究实例,是关于相变教学与研究的权威性著作。该书在1981年出版第一版(我国曾在1988年出版该书第一版的中译本),在1992年出版第二版。20多年来,材料科学与工程领域的研究取得了很大的进展,为适应相变理论和应用研究需要,该书进行了全面修订并增加了一些新内容,在2009年出版第三版。

该书出版后,在世界上一些国家被广泛用作高年级大学生和研究生的专业教科书,也被许多材料科学与工程领域研究人员用作参考书。该书第三版在保持原书风格的同时,增加了一些相变研究的最新结果和应用实例。书中各章均列出了参考文献和进一步阅读的书目,供读者进行相关研究时查阅。另外,书中还附有近百道练习题及其全部解答,帮助读者通过练习来学习相变知识。

全书由陈冷和余永宁翻译,翻译过程中部分内容参考了第一版的中译本,对原书中个别明显错误在中译本中进行了相应修改。由于译者水平有限,错误或不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

译者

2010年3月于北京科技大学

第三版前言

金属和合金中的相变基本理论没有发生很大变化，因此第三版基本上是第二版的扩充，增加的内容包括过去 17 年来一些重要的应用进展。在第 1 章中增加了相图计算部分；在第 4 章中讨论了近来发展的金属玻璃；第 5 章中的新内容包括：用 Scheil 法由 TTT 图计算 CCT 图，多边形铁素体和贝氏体的形核和长大的新理论，而新的实例研究增加了超低碳贝氏体钢的铜脱溶硬化和超细无碳化物贝氏体内容；在第 6 章中，详细讨论了应力辅助和应变诱发马氏体，为相变诱发塑性 (TRIP) 钢提供理论基础。

D. A. 波特, M. Y. 谢里夫

2008 年 8 月

第二版前言

自从本书第一版出版 10 年来，冶金领域有很多新的进展。快速凝固金属和玻璃进入了新时代，新 Al-Li 合金现已用于现代飞机，微合金(结构)和高纯(管线)钢更为成熟，出现了新的氧化物弥散钢，开发了一些新的记忆合金，还可以列出很多。尽管如此，所有这些进展的主要原理多年来并没有发生明显变化。这正是本书的重点。从一开始，我们的目标就是以有组织的和综合性的方法描述这些原理，使学生能够理解这些原理并在他们自己的研究中应用。因此，本书有意对原书几乎未作改变。但是，我们修正了一些错误，增加了进一步阅读的书目，也许更重要的是包括了练习题的全部解答。我们希望修订版继续为全世界使用本书的学校(冶金、材料科学和工程材料)喜爱和欣赏。

在完成这个修订版时，我们要感谢过去十年来致信给我们的所有学生和教授。我们特别感谢 Wen-Bin Li 博士(瑞典吕勒奥大学, University of Luleå, Sweden)仔细地找出原书中明显和不太明显的错误。正如我们的一些通信者提出的，对于某些现象的描述不可避免地存在一些“争论点”，但是这对理解问题有益。最后，我们要感谢 John Ion 博士(芬兰拉彭兰塔大学, University of Lappeenranta, Finland)帮助我们编写“练习题解答”部分。

D. A. 波特, K. E. 伊斯特林

1991 年 9 月

第一版前言

本书是写给冶金、材料科学和工程材料专业高年级学生的相变教程，研究生也可以用来更新他们在这一领域的知识。本书是根据作者在吕勒奥大学 (University of Luleå) 为工程材料专业学生授课的讲义写成。我们发现在这个重要领域竟然没有新的著作适合用作教科书，较近期的大概是 P. G. Shewmon 的“金属中的相变” (McGraw-Hill, 1969)。但是，近 10 年来在这个领域，特别是在相间界面、界面迁移、脱溶长大动力学和脱溶物稳定性等方面已经取得了明显的进展。还有一些基于相变的重要的实际进展，包括 TRIP (相变诱发塑性) 钢、定向排列共晶复合材料和具有优良可焊性和成型性的新结构钢，这里提及的只是少数例子。另外，近年来连续铸造和高速、高能熔化焊作为凝固的重要生产应用也取得较大进展。本课程的目标是按照热力学和原子机制的基本原理解释这些新进展，并以此来讨论相变。

本书实际上分为两个部分。第 1 章至第 3 章包括理解相变需要的基础知识：热力学、动力学、扩散理论和界面的结构和性质。第 4 章至第 6 章涉及特殊相变：凝固、固体中的扩散相变和无扩散相变。在凝固、扩散控制相变和马氏体这些章节的末尾，我们选择了一些工程合金的研究实例，说明前面讨论的一些原则。我们希望本书能以这种方式把理论和实际联系起来。应当指出，我们认为有必要把本教程和一些实验室工作和实例结合起来。在每章的后面还包括一些练习题。

在讲授这门课程和撰写本书过程中，我们得到了工程材料系同事和学生不断的支持和鼓励。特别感谢 Agneta Engfors 耐心和熟练地打印手稿并帮助编辑。

D. A. 波特, K. E. 伊斯特林

1980 年 2 月

作者简介

D. A. 波特 在英国剑桥大学获得材料科学学士学位和博士学位。在瑞典吕勒奥大学(University of Luleå in Sweden)、挪威 Årdal 和 Sunndal Verk 铝厂研究中心、瑞典 Fundia Special Bar 钢厂一直从事材料研究和开发。目前是芬兰 Rautaruukki Oyj 产品开发经理，负责热轧钢开发。

K. E. 伊斯特林 在赫尔辛基理工大学(Institute of Technology, Helsinki)获得物理冶金博士学位。在哥德堡查尔摩斯理工大学(Chalmers University of Technology, Gothenburg)任讲师，在瑞典吕勒奥大学(University of Luleå in Sweden)工程材料系任教授和系主任，后在英国埃克塞特大学(University of Exeter)任材料科学教授。

M. Y. 谢里夫 在埃及开罗艾资哈尔大学(al-Azhar University in Cairo, Egypt)获得机械工程学士学位，在英国剑桥大学材料科学和冶金系获得硕士学位和博士学位。当他还是剑桥大学材料科学和冶金系相变和综合性能研究小组的研究助理时就开始参加本书第三版工作。现在是荷兰 Nieuwegein 工程和研究中心 SKF 研究小组的研究工程师。

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

传 真：(010)82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

策划编辑	刘剑波
责任编辑	刘佳
封面设计	张楠
责任绘图	尹莉
版式设计	张岚
责任校对	殷然
责任印制	尤静

目录

1 热力学和相图	1
1.1 平衡	1
1.2 单元系	4
1.2.1 作为温度函数的吉布斯自由能	4
1.2.2 压力作用	6
1.2.3 凝固的驱动力	8
1.3 二元溶液	9
1.3.1 二元溶液的吉布斯自由能	9
1.3.2 理想溶液	11
1.3.3 化学势	13
1.3.4 规则溶液	14
1.3.5 活度	17
1.3.6 真实溶液	19
1.3.7 有序相	20
1.3.8 中间相	21
1.4 非均匀系统中的平衡	23
1.5 二元相图	26
1.5.1 简单相图	26
1.5.2 具有互溶间隙的系统	27
1.5.3 有序合金	28
1.5.4 简单共晶系	28
1.5.5 包含中间相的相图	28
1.5.6 吉布斯相律	32
1.5.7 温度对固溶度的影响	33
1.5.8 平衡空位浓度	34
1.6 界面对平衡的影响	36
1.7 三元平衡	38
1.8 二元溶液的其他热力学关系	43
1.9 相图计算	44

1.9.1 纯化学计量物质	45
1.9.2 溶液相	47
1.9.2.1 置换溶液	47
1.10 相图动力学	48
练习题	49
参考文献	51
进一步阅读的书目	51
2 扩散	53
2.1 扩散的原子机制	55
2.2 间隙扩散	56
2.2.1 作为随机跳动过程的间隙扩散	56
2.2.2 温度的作用——热激活	59
2.2.3 稳态扩散	61
2.2.4 非稳态扩散	61
2.2.5 扩散方程的解	62
2.2.5.1 均匀化	63
2.2.5.2 钢的渗碳	64
2.3 置换扩散	65
2.3.1 自扩散	66
2.3.2 空位扩散	70
2.3.3 置换合金中的扩散	71
2.3.4 稀置换合金中的扩散	78
2.4 原子迁移率	78
2.5 二元合金中的示踪原子扩散	80
2.6 三元合金中的扩散	82
2.7 高扩散率通道	84
2.7.1 沿晶界和自由表面的扩散	84
2.7.2 沿位错扩散	86
2.8 多相二元系中的扩散	87
练习题	89
参考文献	91
进一步阅读的书目	92
3 晶体的界面和显微组织	93

3.1	界面自由能	94
3.2	固/气界面	95
3.3	单相固体中的晶界	98
3.3.1	小角度和大角度晶界	99
3.3.2	特殊大角度晶界	102
3.3.3	多晶体材料中的平衡	104
3.3.4	晶界的热激活迁移	108
3.3.5	晶粒长大动力学	116
3.4	固体中的相界面	118
3.4.1	共格界面	118
3.4.1.1	完全共格界面	118
3.4.1.2	半共格界面	120
3.4.1.3	非共格界面	122
3.4.1.4	复杂的半共格界面	122
3.4.2	第二相的形状: 界面能的影响	123
3.4.2.1	完全共格脱溶物	123
3.4.2.2	部分共格脱溶物	124
3.4.2.3	非共格脱溶物	126
3.4.2.4	晶界上脱溶物	127
3.4.3	第二相形状: 错配应变的影响	128
3.4.3.1	完全共格脱溶物	128
3.4.3.2	非共格包含物	130
3.4.3.3	片状脱溶物	132
3.4.4	共格的丧失	132
3.4.5	可滑动界面	134
3.4.6	固/液界面	139
3.5	界面迁移	141
3.5.1	扩散控制和界面控制长大	143
	练习题	148
	参考文献	150
	进一步阅读的书目	151
4	凝固	153
4.1	纯金属中的形核	153
4.1.1	均匀形核	154

4.1.2	均匀形核速率	158
4.1.3	非均匀形核	159
4.1.4	熔化形核	163
4.2	纯固相的长大	164
4.2.1	连续长大	164
4.2.2	侧向长大	164
4.2.3	热流和界面稳定性	167
4.3	合金凝固	170
4.3.1	单相合金的凝固	170
4.3.2	共晶凝固	178
4.3.3	非共晶成分合金	186
4.3.4	包晶凝固	187
4.4	铸锭和铸件的凝固	188
4.4.1	铸锭组织	188
4.4.2	铸锭和铸件内的偏析	191
4.4.3	连续铸造	192
4.5	熔焊的凝固	195
4.6	从熔体淬火的凝固	199
4.7	金属玻璃	200
	热力学和动力学	201
4.8	一些铸件和焊件的研究实例	203
4.8.1	碳钢和低合金钢铸件	203
4.8.2	高速钢铸件	204
4.8.3	不锈钢焊接金属	206
	练习题	210
	参考文献	211
	进一步阅读的书目	212
5	固态中的扩散型相变	213
5.1	固相中的均匀形核	215
5.2	非均匀形核	220
5.2.1	非均匀形核速率	223
5.3	脱溶物长大	226
5.3.1	平面非共格界面为前沿的长大	226
5.3.2	片状和针状物的扩散控制增加长度	229

5.3.3	片状脱溶物的增厚	231
5.4	综合转变动力学: TTT 图	233
5.5	时效硬化合金中的脱溶	236
5.5.1	铝-铜合金中的脱溶	236
5.5.2	铝-银合金中的脱溶	243
5.5.3	淬火引入的空位	243
5.5.4	时效硬化	246
5.5.5	调幅分解	248
5.5.6	颗粒粗化	252
5.6	铁素体在奥氏体中的脱溶	254
5.6.1	实例研究: 铁素体形核和长大	260
5.7	胞状脱溶	266
5.8	共析转变	269
5.8.1	Fe-C 合金中的珠光体反应	269
5.8.2	贝氏体转变	273
5.8.3	合金元素对淬透性的影响	281
5.8.4	连续冷却图	285
5.8.5	合金钢中的纤维和相间脱溶	288
5.8.6	Scheil 法则	289
5.9	块型转变	291
5.10	有序化转变	295
5.11	研究实例	301
5.11.1	锻造钛合金	301
5.11.2	低碳微合金轧制钢的可焊性	304
5.11.3	高强度和韧性超低碳贝氏体钢	307
5.11.4	超细贝氏体	308
	练习题	311
	参考文献	312
	进一步阅读的书目	315
6	无扩散型转变	317
6.1	无扩散型转变的特点	318
6.1.1	碳在铁中的固溶体	321
6.2	马氏体晶体学	323
6.2.1	fcc→bcc 转变的贝茵模型	326

6.2.2 晶体学理论和实验结果比较	328
6.3 马氏体形核理论	329
6.3.1 马氏体共格核心的形成	330
6.3.2 位错在马氏体形核中的作用	332
6.3.3 促进转变的位错应变能	336
6.4 马氏体长大	338
6.4.1 板条马氏体的长大	339
6.4.2 片状马氏体	340
6.4.3 稳定化	342
6.4.4 外加应力的影响	343
6.4.5 晶粒尺寸的作用	343
6.5 预马氏体现象	344
6.6 铁基马氏体的回火	344
6.7 研究实例	353
6.7.1 淬火和回火的碳钢和低合金钢	353
6.7.2 控制转变钢	354
6.7.3 TRIP 钢	356
6.7.4 “形状记忆”金属: Nitinol	359
练习题	361
参考文献	362
进一步阅读的书目	363
练习题解答	365
索引	417

1

热力学和相图

本章涉及一些基本的热力学概念，有助于更加深入地理解相图和相变。假设读者已经熟悉初等热力学，本书只给出有关相变方面最重要结果的总结。读者可在本章后面列出的参考文献中找到有关热力学的更完整的论述。

热力学在物理冶金学中的主要用途就是判断合金是否处于平衡状态。就相变而言，我们总是关心向平衡方向的变化。因此，热力学是一个很有力的工具。但是，应该注意，仅靠热力学还无法确定达到平衡的速率，在后面的几章中就会明白这个道理。

1.1 平衡

在热力学这一章的开始，有必要定义几个以后会经常用到的名词。在研究相变时，将会涉及给定系统内发生的变化，例如，能以一个或多个相的混合形式存在的合金。相可以定义为系统中性质和成分均匀的部分，并且在物理上和系统的其他部分截然不同。一个给定系统中的组元是构成系统的各种不同的化学元素或化合物，一

个相或一个系统的成分可由各组元的相对量来描述。

顾名思义，研究相变就是研究合金(系统)中的一个或多个相如何转变成一个新相或混合相。发生相变的原因完全是由于相对于终态来说合金的始态是不稳定的。但是，如何测量相稳定性呢？热力学回答了这个问题。对于发生在恒温恒压条件下的相变，系统的相对稳定性由它的吉布斯(Gibbs)自由能(G)决定。

系统的吉布斯自由能由下式定义：

$$G = H - TS \quad (1.1)$$

式中， H 是焓， T 是热力学温度， S 是系统的熵。

焓是系统热容的量度，由下式给出：

$$H = E + pV \quad (1.2)$$

式中， E 是系统的内能， p 是压力， V 是体积。

内能来自系统内原子的总动能和总势能。动能来自固体或液体中原子的振动以及液体或气体中原子和分子的位移能和转动能，而势能则来自于系统内原子之间的交互作用或键合。如果发生相变或反应，吸收或放出的热量取决于系统内能的变化。但是，吸收或放出的热量还取决于系统的体积变化，体积变化引起的热量变化表示在 pV 项中。因此，在恒压下，吸收或放出的热量由 H 的变化决定。当涉及凝聚相(固体或液体)时，和 E 相比， pV 项一般很小，即 $H \approx E$ 。本书在处理问题时常采用这个近似。在 G 的表达式中，另一个函数是熵(S)，它是系统随机性的量度。

当系统处于最稳定的状态，即永远不再有变化时，我们就说该系统处于平衡状态。经典热力学定律的一个重要结论是：在恒温恒压下，如果系统的吉布斯自由能有最低的可能值，一个封闭系统(即质量和成分不变的系统)就处于稳定平衡，在数学上，

$$dG = 0 \quad (1.3)$$

从 G 的定义式(1.1)可以看出，具有最高稳定性的状态是低焓和高熵之间最佳配合的状态。在低温下，固相最稳定，因为固相的原子键合最强，从而具有最低的内能(焓)。但是，在高温下， $-TS$ 项起主要作用，这样，原子运动更自由的相——液相和气相变得最稳定。如果考虑到压力的变化，则从式(1.2)可以看出，体积小相在高压下更稳定。

式(1.3)定义的平衡可以用图说明如下。假如能估算一个给定系统的所有可能组态的自由能，就会发现稳定平衡的组态具有最低的自由能。这可用图1.1来说明，图中假定各种原子组态可用横坐标上的点表示。组态A是稳定平衡状态。在这一点，原子排列的小小变化(一级近似)并不引起 G 的变化，即式(1.3)成立。但是，常常会有另一种组态，例如B，这种组态位于自由能的