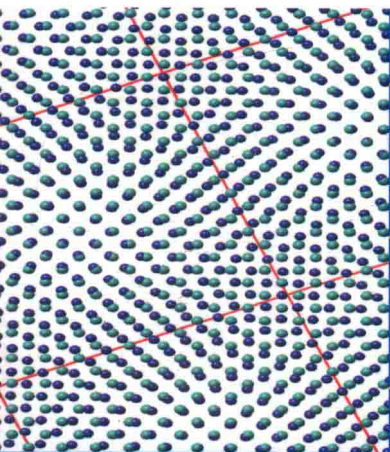


材料科学经典著作选译

# 晶体材料中的界面

## Interfaces in Crystalline Materials



A. P. Sutton R. W. Balluffi 著

叶飞 顾新福 邱冬 张敏 译

高等教育出版社

材料科学经典著作选译

JINGTI CAILIAO ZHONG DE JIEMIAN

# 晶体材料中的界面

Interfaces in Crystalline Materials

A. P. Sutton R. W. Balluffi 著

叶飞 顾新福 邱冬 张敏 译

高等教育出版社·北京

图字：01-2014-0388 号

Copyright © A. P. Sutton and R. W. Balluffi 1995

“Interfaces in Crystalline Materials, First Edition” was originally published in English in 1995. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

本书 Interfaces in Crystalline Materials, First Edition 英文原版于 1995 年出版。本书翻译版由牛津大学出版社授权出版。

### 图书在版编目(CIP)数据

晶体材料中的界面 / (英)萨顿(Sutton, A. P.),  
(美)巴鲁菲(Balluffi, R. W.)著; 叶飞等译. -- 北京:  
高等教育出版社, 2016.1

(材料科学经典著作选译)

书名原文: Interfaces in Crystalline Materials

ISBN 978-7-04-043153-7

I. ①晶… II. ①萨… ②巴… ③叶… III. ①晶体-  
界面结构 IV. ①O781

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 136977 号

策划编辑	刘剑波	责任编辑	刘占伟	特约编辑	陈 静	封面设计	杨立新
版式设计	范晓红	插图绘制	杜晓丹	责任校对	陈旭颖	责任印制	韩 刚

---

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	北京汇林印务有限公司	网上订购	<a href="http://www.landracom.com">http://www.landracom.com</a>
开 本	787mm × 1092mm 1/16		<a href="http://www.landracom.com.cn">http://www.landracom.com.cn</a>
印 张	57.5	版 次	2016 年 1 月第 1 版
字 数	1080 千字	印 次	2016 年 1 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	149.00 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 43153-00

# 译者序

界面的结构和性质对材料的性能具有决定性的影响，因此界面研究在物理、化学、材料、机械和电子等领域占有重要地位。Sutton 和 Balluffi 编著的《晶体材料中的界面》一书全面论述了晶体材料中的界面结构、界面热力学、界面动力学和界面性质等内容，是全世界科研人员公认的界面科学经典著作。该书在 1995 年出版了第一版，2009 年再次印刷。该书出版后，不仅成为多所大学高年级学生和研究生的教材，也被许多研究人员用作参考书。

自原著第一版出版后，至今已近 20 年，界面科学取得了显著进展，原著中的一些知识现在看起来略显不足。尽管如此，本书论述的知识体系和基础理论对界面科学的发展和应用仍发挥着巨大的作用。译者希望本书的翻译出版能够对国内的界面研究有所助益。

全书由叶飞、顾新福、邱冬和张敏翻译。其中，第一部分“界面结构”由叶飞翻译，第二部分“界面热力学”由顾新福翻译，第三部分“界面动力学”由邱冬翻译，第四部分“界面性质”由张敏翻译。4 位译者均师从清华大学材料科学与工程学院的张文征教授。张文征教授多年来一直活跃在固态相变与界面的研究领域，并取得了丰硕的成果，特别是在界面晶体学领域，提出了多个独创性的理论和分析方法。作为其弟子，译者也一直从事该领域相关的研究工作。本书的翻译出版是几位弟子献给张文征老师的礼物，感谢张老师的言传身教，并带领我们进入界面科学这个广阔的研究领域。

在遵照原文的同时，译著中直接改正了一些原著中的明显错误，还尝试翻译了一些没有标准译法的英文术语。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。

叶飞

2014 年 10 月，于大连

# 序

绝大多数晶体材料，包括常见的金属和陶瓷材料，都是由多晶体组成。相邻晶体间的界面往往直接影响整体材料的物理、化学、力学等性能。调控界面已经成为优化材料组织和性能的先进手段，并成长为“界面工程”的前沿学科。随着纳米技术的发展，界面的重要性越发显著，因为在纳米材料中界面占的分量比一般材料中大得多。必须认识到，界面的知识还是深入理解和科学控制材料组织的关键基础内容，因为材料组织形成的过程往往是由界面的形成、推移、消失等微观过程构成。基于知识精确调控组织的材料创新正成为国内外先进材料发展的趋势，在这个进程中界面知识之重要再怎么强调也不过分。这里借用 Carter 和 Norton 在其著名的专著《陶瓷材料》(2013, 第二版)中的一句话说说明界面的重要性：“Unless we fully understand grain boundaries in ceramics, we can never have a full understanding of what happens during ceramic processing or why ceramics have certain mechanical properties, conductivity (thermal or electrical), etc.”。我们可以将该要点延伸到广义的晶体材料。也就是说，除非完全认识界面，否则人们不能彻底明白材料工艺过程中究竟发生了什么，也不能从根本上理解材料为何具有特定性能。

对于上面这句话我本人深有体会。多年来我们相变和组织设计课题组正是通过界面分析入手，解释了许多合金体系中的沉淀相组织形貌。早年在国际上没有一本全面介绍界面的专著，我在 20 世纪 80 年代留学期间，只能通过阅读内容局限的专著、其他主题所著的相关章节、会议文集或期刊论文来学习界面的相关知识。Sutton 和 Balluffi 所著的《晶体材料中的界面》填补了这个空白。这本专著涵盖的内容很宽且有深度，既提供了不同尺度和不同应用范围的界面结构模型，也介绍了界面研究的基本理论方法，并且论述了界面的各种性质。该书的出版被公认为界面领域里程碑式的贡献。尽管其第一版面世至今已近 20 年，它仍然是关于界面最权威的经典专著，是深入学习界面理论和研究方法的首选参考书。国内缺少如此全面和深入介绍界面知识体系和基础理论的中文书籍，这极不方便国内研究者学习界面基础知识和提升相关的分析能力。

本书译者叶飞、邱冬、张敏和顾新福博士在清华大学攻读博士学位的过程中通过阅读大量英文资料深入掌握了很多界面的知识，并且用其解决了相变组织研究的问题。我相信他们都体会过应用界面的知识解决材料科学问题之优

美，也察觉到中文相关书籍之贫乏以及由此造成的入门学习之艰辛，这个反差无疑激发了他们向国内读者传播界面知识的责任感。当叶飞教授提出共同翻译这本权威专著时，立即受到师弟师妹的积极响应。他们不为名利（甚至可能倒贴经费），不辞辛苦（主要利用业余时间），完成如此巨大工作量的翻译。这种为国家材料科学进步而奉献的精神，特别在物欲横流的当下实是难能可贵。作为译者曾经的导师，我为他们的贡献感到欣慰和自豪。他们曾经邀我为全书校稿，我未敢接受，恐难以在预定的时间内完成此重任，真是惭愧。他们将此书的翻译出版作为给我的礼物，受此弥足珍贵的礼物，让我由衷感动之余也体会到为师之幸福。我受邀写序，甚感荣幸。谨以此序对他们为推动界面知识传播的贡献表示诚挚的谢意。

我特别提倡研究生要沉下心来阅读经典专著，我相信这本经典专著译文的出版将方便国内读者深入学习界面的知识，帮助他们建立进一步学习前沿界面知识的扎实基础。我还相信，本书的影响不限于界面研究领域，其内容将有助于人们对材料组织形成的深入理解，促进他们开展基于知识的材料组织设计和性能调控，并将有利于中国学者的知识发展和材料创新活跃于国际前沿。

张文征

2014年秋，于清华园

# 前言

献给 Pat 和 Ruth

满怀着爱，钦佩你们比我更清楚地认识到写作本书的困难。

# 前 言

众所周知，多晶材料的性质在很大程度上取决于其内部界面的性质。人们已经普遍注意到研究多晶材料的性质实质上经常是在研究其中界面的性质。因为晶体之间的界面性质必然依赖于具体的界面结构，所以在材料科学与工程这个广阔的研究领域中，界面的结构和性质已经成为了一个核心部分。

在过去的几十年中，关于晶体材料中界面的研究经历了爆炸式的增长，这是因为：① 研究界面原子结构和性质的新高分辨技术的发展；② 更完善的理论和更有力的计算机模拟方法提高了界面建模能力。展现了界面领域研究进展的主要出版物包括频繁举办的会议和研讨会的会议文集，以及由多位作者撰写的关于界面各个方面的论文集。然而，至今没有一部能够涵盖整个界面领域，并按照教材方式编写的著作。

本书填补了这个空白。在本书中，我们尝试建立系统的知识体系，并且注重基本思想和原理。由于篇幅限制，本书没有包含实验技术的内容，相关的一些技术已经在其他书籍中详细论述。本书尽可能在合理的篇幅内介绍主要类型材料(金属、陶瓷和半导体)中所有主要的界面类型(例如同相和异相界面，扩散和锐界面)。书中第一部分是关于界面结构，从界面的基本几何和晶体学开始(第1章)，然后介绍位错模型(第2章)，以及原子间作用力(第3章)，在此基础上讨论界面的实际原子结构(第4章)。第二部分是关于界面热力学，首先介绍平衡热力学的数学描述(第5章)，在此基础上介绍界面相和相变(第6章)，最后介绍溶质原子在界面的平衡偏聚(第7章)。第三部分是关于基本的界面动力学现象，包括界面处原子扩散(第8章)，以及界面的守恒运动和非守恒运动(第9章和第10章)。非守恒运动包含了界面作为原子扩散通量的源或汇等重要概念。第四部分是关于界面性质，着重论述界面的电学和力学性质(第11章和第12章)。

本书发展了一套系统地描述界面和界面相关物理量的术语，并将这些术语总结在名词术语表中。我们尽量使用与表面科学相关领域一致的术语。同时，还尽量使用与实际应用中一致的标准符号(见符号表)。

尽管本书论述的知识范围很广，但是仍不可能涵盖所有的知识。界面科学领域非常广阔，并且仍然处于迅速发展中，同时很多方面的研究仍处于初始阶段。因此，我们增加了大量新的甚至未发表的资料。对于一些特别艰深的知



识,我们尽量用简单而可靠的模型论述。遗憾的是,由于篇幅和精力有限,我们忽略了一些重要的知识点,包括腐蚀与界面非均匀沉淀、再结晶、晶粒长大与织构演变、界面疲劳等。由于同样的原因,我们还忽略了非晶固体中的界面。尽管如此,我们仍希望本书能够涵盖大多数的基础知识,并且能够为学习这些被忽略的知识点以及进一步研究晶体材料中的界面提供一个跳板。

对于物理量的单位,我们尽量统一采用国际标准单位制。然而,在原子尺度上采用能量和长度的自然单位电子伏(eV)和埃(Å)更加方便。为了方便读者,这里给出  $1 \text{ eV} \equiv 96.4866 \text{ kJ/mol}$ ,  $1 \text{ kJ/mol} \equiv 0.0104 \text{ eV/atom}$ 。

感谢许多朋友和同事给予的有益建议和批评,他们包括 S. M. Allen、A. Argon、A. Atkinson、H. K. Birnbaum、P. D. Bristowe、J. W. Cahn、Y. -M. Chiang、J. W. Christian、M. Cohen、L. C. DeJonghe、M. W. Finnis、J. P. Hirth、S. Hofmann、R. Kirchheim、C. J. McMahon, Jr.、G. B. Olson、D. G. Pettifor、R. C. Pond、D. N. Seidman、L. S. Shvindlerman、J. Tersoff 和 R. Thomson 等。

感谢我们所在的系同意写作本书的时间要求。

A. P. S. 于牛津

R. W. B. 于剑桥, 马萨诸塞

1994年7月

# 致 谢

我们感谢下列作者允许从他们的论文和书中复制图和表：R. C. Pond 教授（图 1.10、图 1.12、图 1.13、图 1.14、图 1.16、图 1.18、图 1.21、图 1.23 和图 9.24b）、J. W. Christian 教授（图 2.13）、J. P. Hirth 教授（图 2.19）、S. L. Sass 教授（图 2.20）、D. Wolf 博士（图 2.25、图 4.9、图 4.22、图 5.21a、图 5.21b 和图 5.22）、P. D. Bristowe 教授（图 2.31 和图 9.13）、A. H. King 教授（图 2.36 和图 10.8）、J. Hafner 教授（图 3.4）、D. G. Pettifor 教授（图 3.6）、M. J. Puska 博士（图 3.7）、D. J. Srolovitz 博士（图 3.25 和图 3.26）、M. W. Finnis 博士（图 3.38、图 3.40、图 3.41、图 4.40 和图 4.41）、S. M. Allen 教授（图 4.4a）、M. Cohen 教授（图 4.4b 和图 12.48b）、G. R. Barsch 博士（图 4.5 和图 4.6）、W. Krakow 博士（图 4.28）、D. A. Smith 教授（图 4.43、图 6.5b 和图 9.25）、P. W. Tasker 博士（图 4.46 和图 4.50）、K. L. Merkle 博士（图 4.47、图 4.48、图 4.51、图 5.8 和图 11.25）、D. Chatain 博士（图 4.54）、AEA 技术有限公司（图 4.55）、W. Mader 教授（图 4.56）、J. C. H. Spence 教授（图 4.57 和图 4.58）、D. R. Hamann 博士（图 4.59）、C. Herring 博士（图 5.6a）、A. Otsuki 博士（图 5.20a 和图 5.23a）、T. Mori 博士（图 5.20b）、A. Revcolevschi 博士、G. Dhalenne 博士和 M. Dechamps 博士（图 5.23b）、C. Rottman 教授（图 6.2）、W. Gust 博士（图 6.9、图 8.5、图 8.7、图 8.28 和图 8.29）、M. P. Seah 博士（图 7.1、图 7.2 和图 7.3）、D. N. Seidman 教授（图 7.4、图 7.5、图 7.6、图 7.10、图 7.18 和图 7.19）、C. J. McMahon, Jr. 教授（图 7.7）、D. E. Luzzi 教授（图 7.8）、S. Hofmann 博士（图 7.9 和图 7.11）、C. L. Briant 博士（图 7.12）、M. Doyama 教授（图 7.13）、R. Najafabadi 博士（图 7.16、图 7.17 和图 12.47）、K. L. Kliewer 博士（图 7.20 和图 7.21）、W. Gust 教授和 I. Kaur 博士（图 8.5 和图 8.7）、M. P. Seah 博士（图 8.7）、A. Atkinson 博士（图 8.9 和图 8.23a）、J. Sommer 博士（图 8.11）、M. Biscondi 教授（图 8.12）、V. S. Stubicon 教授（图 8.13 和图 8.23b）、D. R. Kirchheim 教授（图 8.24）、L. C. De Jonghe 教授（图 8.26）、J. Washburn 教授（图 9.2）、A. W. Sleswyk 教授（图 9.5）、H. Fukutomi 博士（图 9.6）、U. Dahmen 博士（图 9.7 和图 9.9）、I-Wei Chen 教授（图 9.8 和图 12.56）、Y. Ishida 博士（图 9.14）、J. W. Cahn 博士（图 9.21a、图 9.21b 和图 9.31）、K. T. Aust 教授（图 9.21c、图 9.21d、图

9.28a、图 9.28b 和图 9.28c)、L. S. Shvindlerman 教授(图 9.22 和图 9.29)、H. Gleiter 博士(图 9.24a)、C. L. Bauer 教授(图 9.26a~f)、C. Gastaldi 博士(图 9.26g)、K. Lücke 教授(图 9.27 和图 9.28d)、E. Nes 博士(图 9.34)、W. W. Mullins 教授(图 9.37)、R. D. Doherty 教授(图 10.10a 和图 10.21)、G. C. Weatherly 教授(图 10.10b)、J. M. Howe 教授(图 10.11)、G. W. Greenwood 教授(图 10.14)、C. Elbaum 教授(图 10.17)、R. Raj 教授(图 10.18a、图 10.18b、图 10.18c 和图 10.18d)、R. F. Sekerka 博士(图 10.19 和图 10.20)、S. G. Louie 教授(图 11.3、图 11.4、图 11.5 和图 11.6)、W. Monch 教授(图 11.7)、P. N. First 教授(图 11.8)、R. H. Williams 教授(图 11.9)、J. Werner 博士(图 11.10)、J. Tersoff 博士(图 11.13)、I. Nakamichi 博士(图 11.14、图 11.15 和图 11.16)、J. Y. W. Seto 博士(图 11.19)、D. G. Ast 教授(图 11.20)、P. Chaudhari 博士(图 11.22)、J. M. Phillips 博士(图 11.24)、F. W. Young Jr. 博士(图 12.5)、J. Thibault 博士(图 12.9)、W. Bollmann 博士(图 12.10)、H. Gleiter 教授(图 12.12)、C. A. P. Horton 博士(图 12.15)、H. K. Birnbaum 博士(图 12.17、图 12.21 和图 12.46)、M. J. Whelan 教授(图 12.18)、E. Smith 博士(图 12.19)、L. E. Murr 教授(图 12.20)、M. A. Myers 教授(图 12.24)、J. H. Schneiber 博士(图 12.25a)、N. J. Grant 教授(图 12.25b)、M. F. Ashby 教授(图 12.27、图 12.34、图 12.38、图 12.39、图 12.53、图 12.54 和图 12.55)、W. Beere 博士(图 12.29、图 12.33、图 12.35 和图 12.36)、T. Mori 博士(图 12.30)、R. Valiev 教授(图 12.31)、T. Watanabe 教授(图 12.32 和图 12.37)、R. Thomson 博士(图 12.40、图 12.41、图 12.42 和图 12.43)、J. F. Knott 教授(图 12.45)、J. J. Gilman 博士(图 12.48a)、W. D. Nix 教授(图 12.57)、A. G. Evans 教授(图 12.59 和图 12.60)。

图 1.10、图 1.12 和图 1.13 承蒙英国皇家学会许可,复制于 Pond, R. C. and Bollman, W. (1979) *Phil. Trans. R. Soc.* **A292**, 449-72, The symmetry and interfacial structure of bicrystals, 图 1 和图 2。图 1.14 承蒙英国皇家学会许可,复制于 Pond, R. C. and Vlachavas, D. S. (1983), *Proc. R. Soc.* **A386**, 95-143, Bicrystallography, 图 1。图 1.16 承蒙 Elsevier 科学出版社 BV, 北荷兰许可,复制于 Pond R. C. *et al.* (1984) *Mats. Res. Soc. Symp. Proc.* **25**, 273。图 1.18 承蒙英国材料学会(前身是英国金属学会)许可,复制于 Pond, R. C. (1985) in *Dislocations and properties of real materials* (ed. M. Lorretto), p. 71。图 1.21 承蒙 Elsevier 科学出版社 BV, 北荷兰许可,复制于 Pond R. C. (1989) *Dislocations in Solids* **8** (ed. F. R. N. Nabarro)。图 1.23 承蒙英国材料学会许可,复制于 Pond, R. C. (1985) in *Dislocations and properties of real materials* (ed. M. Lorretto), p. 71。图 2.1、图 2.3 和图 2.4 承蒙 McGraw Hill 有限公司, 纽约许可,复制于

Read W. T. (1953) *Dislocations in Crystal*。图 2. 10a~e 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Balluffi R. W., Brokman, A., and King, A. H. (1982) *Acta Metall.* **30**, 1453, CSL/DSC lattice model for general crystal-crystal boundaries and their line defects, © (1982)。图 2. 19 承蒙 John Wiley & Sons 有限公司许可, 复制于 Hirth, J. P. and Lothe, J. (1982) *Theory of Dislocations*, © J. P. Hirth (1982)。图 2. 20 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Shieu F. -S. and Sass S. L. (1990) *Acta Metall. Mater.* **38**, 1653, Experimental and theoretical studies of the dislocation structure of NiO-Pt interfaces, © (1990)。图 2. 25 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Wolf, D., (1989) *Scripta Metall.* **23**, 1713, A Read-Shockley model for high-angle grain boundaries, © (1989)。图 2. 31 承蒙日本金属学会许可, 复制于 Bristowe P. D. (1986) in *Grain Boundary Structure and Related Phenomena*, p. 89, Japan Institute of Metals, Sendai (Suppl. to *Trans. Jap. Inst. of Metals* **27**)。图 2. 32 承蒙 Tolyor and Francis 许可, 复制于 Schober, T. and Balluffi, R. W., (1970) *Phil. Mag.* **21**, 109。图 2. 33 承蒙 Tolyor and Francis 许可, 复制于 Babcock, S. E. and Balluffi, R. W. (1987) *Phil. Mag. A* **55**, 643。图 2. 34 和图 2. 35 承蒙 Tolyor and Francis 许可, 复制于 Kvam E. P. and Balluffi R. W. (1987) *Phil. Mag. A* **56**, 137。图 2. 36 承蒙 Tolyor and Francis 许可, 复制于 Shin K. and King A. H. (1991) *Phil. Mag. A* **63**, 1023。图 2. 37 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Hsieh, T. E. and Balluffi R. W. (1989) *Acta Metall.* **37**, 1637, Experimental study of grain boundary melting in aluminum, © (1989)。图 3. 4 承蒙 Elsevier 科学出版社 BV, 北荷兰许可, 复制于 Hafner, J. (1989) in *The Structures of Binary Compounds* (ed. F. R. de Boer and D. G. Pettifor), p. 147。图 3. 6 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Pettifor, D. G. and Ward, M. S. (1984) *Solid State Commun.* **49**, 291, An analytic pair potential for simple metals, © (1984)。图 3. 7 承蒙 Springer-Verlag GmbH & Co. 许可, 复制于 Puska M. J. (1990) in *Many-Atom Interactions in Solids* (ed. R. M. Nieminen, M. J. Puska and M. J. Manninen) **48**, 134, Atoms embedded in electron gas, (Fig. 4)。图 3. 25 和图 3. 26 承蒙美国物理学会许可, 复制于 Lesar, R., Najafabadi, R. and Srolovitz, D. J. (1989) *Phys. Rev. Letters* **63**, 624, Finite-temperature defect properties from free-energy minimization, © (1989)。图 3. 38 和图 3. 40 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Finnis M. W. (1992) *Acta Metall. Mater.* **40**,

S25, Metal-ceramic cohesion and the image interaction, © (1992)。图 3.41 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Finnis, M. W. (1991) *Surf. Sci.* **241**, 61, The interaction of a point charge with an aluminium (111) surface, © (1991)。图 4.4a 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Allen, J. M. and Cahn, J. W. (1979) *Acta Metall.* **27**, 1085, A microscopic theory for antiphase boundary motion and its application to anaphase domain coarsening, © (1979)。图 4.4b 承蒙 Les Editions de Physique 许可, 复制于 Olson, G. B. and Cohen M. (1982) *J. Physique* **43**, C4-75。图 4.5 承蒙美国物理学会许可, 复制于 Barsch, G. R. and Krumhansl, J. A. (1984) *Phys. Rev. Letters* **53**, 1069, Twin boundaries in ferroelastic media without interface dislocations, © (1984)。图 4.6 承蒙美国物理学会许可, 复制于 Cao, W. and Barsch, G. R. (1990) *Phys. Rev. B* **41**, 4334, Landau-Ginzburg model of interphase boundaries in improper ferroelastic perovskites of  $D_{4h}^{18}$  symmetry, © (1990)。图 4.9 承蒙材料研究学会许可, 复制于 Merkle, K. L. and Wolf, D. (1990) *MRS Bulletin* **15** No. 9, 42。图 4.22 承蒙 Chapman and Hall, 伦敦许可, 复制于 Wolf, D. and Merkle, K. L. (1992) in *Materials Interfaces* (ed. D. Wolf and S. Yip), Chapman and Hall, London, p. 87。图 4.27 承蒙美国金属学会许可, 复制于 Vitek, V., Sutton, A. P., Smith, D. A., and Pond, R. C. (1980) in *Grain Boundary Structure and Kinetics* (ed. R. W. Balluffi), p. 115。图 4.28 承蒙 Taylor and Francis 许可, 复制于 Krakow W. (1991) *Phil. Mag. A* **63**, 233。图 4.29、图 4.30、图 4.31、图 4.32、图 4.33、图 4.34、图 4.35 承蒙英国皇家学会许可, 复制于 Sutton A. P. and Vitek, V., *Phil. Trans. R. Soc.* **A309**, 1 - 35, On the structure of tilt grain boundaries in cubic metals I. Symmetrical tilt boundaries。图 4.39 承蒙 Taylor and Francis 许可, 复制于 Schwartz, D., Vitek, V. and Sutton, A. P. (1985) *Phil. Mag. A* **51**, 399。图 4.40b 承蒙 IOP 出版有限公司许可, 复制于 Finnis M. W. (1993) *Physics World* **6**, No. 7, 37。图 4.41 承蒙 Taylor and Francis 许可, 复制于 Wolf, U., Ernst, F., Muschik, T., Finnis, M. W. and Fischmeister, H. F. (1992) *Phil. Mag. A* **66**, 991。图 4.43 承蒙日本金属学会许可, 复制于 Krakow, W. and Smith, D. A. (1986) in *Proc. JIMIS-4*, (Suppl. to *Japan. Inst. Mets.* **27**) p. 277。图 4.46 承蒙 Taylor and Francis 许可, 复制于 Duffy, D. M. and Tasker, P. W. (1983) *Phil. Mag. A* **47**, 817。图 4.47 和图 4.48 承蒙美国物理学会许可, 复制于 Merkle, K. L. and Smith, D. J. (1987) *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2887, Atomic structure of symmetric tilt rain boundaries in NiO, © (1987)。图 4.50 承蒙美国物理联合会许可, 复制于 Duffy, D. M. and Tasker, P. W. (1984) *J. Appl. Phys.* **56**,

971。图 4.51 承蒙材料研究学会许可复制于 Cao, Y. and Merkle, K. L. (1990) *J. Mater. Res.* **5**, 1995。图 4.54 承蒙美国陶瓷学会许可, 复制于 Chatain, D., Chabert, F., Ghetta, V. and Fouletier, J. (1993) *J. Amer. Ceram. Soc.* **76**, 1568, New experimental setup for wettability characterization under monitored oxygen activity. I. Role of oxygen-state and defect characterization on oxide wettability by gold, © (1993)。图 4.55 承蒙 Kluwer 学术出版社许可, 复制于 Nicholas, M. G. (1989) in *Surfaces and Interfaces of Ceramic Materials* (ed. L. C. Dufour et al.) NATO ASI SerE: *Applied Sciences* 173, 393, © AEA Technology。图 4.56 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Mader, W. and Knauss, D. (1992) *Acta Metall. Mater.* **40**, S207, Equilibrium position of misfit dislocations at planar interfaces, © (1992)。图 4.57 和图 4.58 承蒙 Taylor and Francis 许可, 复制于 Cherns, D., Anstis, G. R., Hutchison, J. L. and Spence, J. C. H. (1982) *Phil. Mag. A* **46**, 849。图 4.59 承蒙美国物理学会许可, 复制于 Hamann, D. R. (1988) *Phys. Rev. Lett.* **60**, 313, New silicide interface model from structural energy considerations, © (1988)。图 5.6a 承蒙美国物理学会许可, 复制于 Herring, C. (1951) *Phys. Rev.* **82**, 87, Some theorems on the free energies of crystal surfaces, © (1951)。图 5.6b 承蒙材料研究学会许可, 复制于 Omar, R. and Mykura, H. (1988) *Mats. Res. Soc. Symp. Proc.* **122**, 61。图 5.8 承蒙材料研究学会许可, 复制于 Merkle, K. L. and Shao, B. (1988) *Mats. Res. Soc. Symp. Proc.* **122**, 69。图 5.11b 和图 5.11c 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Hsieh, T. E. and Balluffi, R. W. (1989) *Acta Metall.* **37**, 2133, Observations of roughening/de-faceting phase transitions in grain boundaries, © (1989)。图 5.11d 和图 5.11e 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Ference, T. G. and Balluffi, R. W. (1988) *Scripta Metall.* **22**, 1929, Observation of a reversible grain boundary faceting transition induced by changes in composition, © (1988)。图 5.20a 和图 5.23a 承蒙日本金属学会许可, 复制于 Otsuki, A. and Mizuno, M. (1986) *Proc. JIMS* **4**, 789。图 5.20b 承蒙 Taylor and Francis 许可, 复制于 Mori, T., Miura, H., Tokita, T., Haji, J. and Kato, M. (1988) *Phil. Mag. Lett.* **58**, 11。图 5.21a 和图 5.21b 承蒙材料研究学会许可, 复制于 Wolf, D. (1990) *J. Mater. Res.* **5**, 1708。图 5.22 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Wolf, D. (1990) *Acta Metall. Mater.* **38**, 791, Structure-energy correlation for grain boundaries in f. c. c. metals IV. Asymmetrical twist (general) boundaries, © (1990)。图 5.23b

承蒙美国陶瓷学会许可, 复制于 Dhalenne, G., Dechamps, M. and Revcolevschi, A., Energy of tilt boundaries and mass transport mechanisms in nickel oxide, *Advances in Ceramics* 6 (ed. M. Yan and A. Heuer), © (1983) p. 139, fig. 3。图 6.2 承蒙 Elsevier 科学出版社 BV, 北荷兰许可, 复制于 Rottman, C. and Wortis, M. (1984) *Phys. Reports* **103**, 59。图 6.5a 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Goodhew, P. J., Tan, T. Y. and Balluffi, R. W. (1978) *Acta Metall.* **26**, 557, Low energy planes for tilt grain boundaries in gold, © (1978)。图 6.5b 承蒙日本金属学会许可, 复制于 Krakow, W. and Smith, D. A. (1986) *Grain boundary structure and related phenomena*, in *Proc. JIMIS-4*, (Suppl. to *Japan. Inst. Mets.* **27**) p. 277。图 6.9 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Straumal, B., Muschik, T., Gust, W. and Predel, B. (1992) *Acta Metall. Mater.* **40**, 939, The wetting transition in high and low energy grain boundaries in the Cu(In) system, © (1992)。图 7.1、图 7.2 和图 7.3 承蒙 Elsevier 科学出版社 BV, 北荷兰许可, 复制于 Hondros, E. D. and Seah, M. P. (1983) in *Physical Metallurgy* (ed. R. W. Cahn and P. Hassen) p. 855。图 7.4 和图 7.5 承蒙 Les Editions de Physique 许可, 复制于 Seidman, D. N. *et al.* (1990) *J. de Phys. Colloque C1* **51**, C1-147。图 7.6、图 7.18 和图 7.19 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Seki, A., Seidman, D. N., Oh, Y. and Foiles, S. M. (1991) *Acta Metall. Mater.* **39**, 3167, Monte Carlo simulations of segregation at (001) twist boundaries in a Pt (Au) alloy - I. Results, © (1991)。图 7.7 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Ogura, T., McMahon, C. J., Feng, H. C. and Vitek, V. (1978) *Acta Metall.* **26**, 1317, Structure-dependent intergranular segregation of phosphorus in austenite in a Ni-Cr steel, © (1978)。图 7.8 承蒙美国物理学会许可, 复制于 Yan, M., Sob, M., Luzzi, D. E., Vitek, V., Ackland, G. J., Methfessel, M. and Rodriguez, C. O. (1993) *Phys. Rev. B* **47**, 5571, © (1993)。图 7.9 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Hofmann, S. and Lejcek, P. (1991) *Scripta Metall. Mater.* **25**, 2259, Correlation between segregation enthalpy, solid solubility and interplanar spacing of  $\Sigma =$  tilt grain boundaries in  $\alpha$ -iron, © (1991)。图 7.10 承蒙 Elsevier 科学出版社 BV, 学术出版部许可, 复制于 Seidman, D. N. (1991) *Mat. Sci. Eng. A* **137**, 57。图 7.11 承蒙 La Societe Francaise de Chimie 许可, 复制于 Hoffman, S. (1987) *J. de Chimie Physique* **84**, 141。图 7.12 承蒙材料研究学会许可, 复制于 Briant, C. L. (1990)

*Mats. Res. Soc. Bulletin* **15**, No. 10, 26。图 7.13 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Hashimoto, M., Ishida, Y., Yamamoto, R. and Doyama, M. (1984) *Acta Metall.* **32**, 1, Atomistic studies of grain boundary segregation in Fe-P and Fe-B alloys-I. Atomic structure and stress distribution, © (1984)。图 7.16 和图 7.17 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Najafabadi, R., Wang, H. Y., Srolovitz, D. J. and Lesar R. (1991) *Acta Metall. Mater.* **39**, 3071, A new method for the simulation of alloys application to interfacial segregation, © (1991)。图 7.20 和图 7.21 承蒙美国物理学会许可, 复制于 Klierer, K. L. and Koehler, J. S. (1993), *Phys. Rev. A* **140**, 1226, © (1993)。图 8.2 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Cahn J. W. and Balluffi, R. W. (1979) *Scripta Metall.* **13**, 499, On diffusional mass transport in polycrystals containing stationary or migrating grain boundaries, © (1979)。图 8.6 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Ma, Q. and Balluffi, R. W. (1993) *Acta Metall. Mater.* **41**, 133, Diffusion along [001] tilt boundaries in the Au/Ag system-I. Experimental results, © (1993)。图 8.7 承蒙英国皇家学会许可, 复制于 Bernardini *et al.* (1982) *Proc. R. Soc.* **A379**, 159 (figs 9 and 10)。图 8.9 承蒙 Kluwer 学术出版社许可, 复制于 Atkinson, A. (1989) in *Surfaces and Interfaces of Ceramic Mats.* (ed. L. -C. Dufour, C. Monty and G. Petot-Ervas) p. 273。图 8.10 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Balluffi, R. W. and Brokman, A. (1983) *Scripta Metall.* **17**, 1027, Simple structural unit model for core-dependent properties of symmetrical tilt boundaries, © (1983)。图 8.11 承蒙 Scietec 出版有限公司许可, 复制于 Sommer, J., Herzig, C., Mayer, S. and Gust W. (1989), *Defect and Diff. Forum* **66-69**, 843。图 8.12 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Herbeuval, I. and Biscondi, M. (1974) *Canadian Metall. Quarterly* **13**, 171, Diffusion du zinc dans les joints de flexion syms triques de l'aluminium, © (1974)。图 8.13 和图 8.23b 承蒙 Plenum 出版公司 Plenum Press 版权许可, 复制于 Stubicon, V. S. (1985) in *Transport in non-stoichiometric compounds* (ed. G. Simkovich and V. S. Stubicon) p. 345。图 8.14 和图 8.15 承蒙美国物理联合会许可, 复制于 Brokman, A., Bristowe, P. D. and Balluffi, R. W. (1981) *J. Appl. Phys.* **52**, 6116。图 8.16 和图 8.17 承蒙学术出版有限公司许可, 复制于 Balluffi, R. W. (1984) in *Diffusion in Crystalline Solids* (ed. G. E. Murch and A. S. Nowick) p. 320。图 8.23a 承蒙 Les Editions de



Physique 许可, 复制于 Atkinson, A. (1985) *J. Physique* **46**, Colloque C4-379。图 8.24 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Mütschele, T. and Kirchheim, R. (1987) *Scripta Metall.* **21**, 135, Segregation and diffusion of hydrogen in grain boundaries of palladium, © (1987)。图 8.26 承蒙 Chapman and Hall 有限公司许可, 复制于 De Jonghe, L. C. (1979), *J. Mats. Sci.* **14**, 33 (Fig. 14)。图 8.27 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Balluffi, R. W. and Cahn, J. W. (1981) *Acta Metall.* **29**, 493, Mechanism for diffusion induced grain boundary motion, © (1981)。图 8.28 和图 8.29 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Schmelzle, R., Giakupian, B., Muschik, T., Gust, W. and Fournelle, R. A. (1992) *Acta Metall. Mater.* **40**, 997, Diffusion induced grain boundary migration of symmetric and asymmetric  $\langle 011 \rangle \{ 011 \}$  tilt boundaries during the diffusion of Zn into Cu, © (1992)。图 9.2 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Li, C. H., Edwards, E. H., Washburn, J. and Parker, E. R. (1953) *Acta Metall.* **1**, 223, Stress-induced movement of crystal boundaries, © (1953)。图 9.5 承蒙 Taylor and Francis 许可, 复制于 Sleeswyk, A. W. (1974) *Phil. Mag.* **29**, 407。图 9.6 承蒙 Y. Ishida 博士许可, 复制于 Horiuchi, R., Fukutomi, H. and Takahashi, T. (1987) in *Fundamentals of Diffusion Bonding* (ed. Y. Ishida), p. 347。图 9.7 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Dahmen, U. (1987) *Scripta Metall.* **21**, 1029, Surface relief and the mechanism of a phase transformation, © (1987)。图 9.8 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Chiao, Y.-H. and Chen, I.-W. (1990) *Acta Metall. Mater.* **38**, 1163, Martensitic growth in  $ZrO_2$ -an *in situ*, small particle, TEM study of a single interface transformation, © (1990)。图 9.9 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Dahmen, U. (1987) *Scripta Metall.* **21**, 1029, Surface relief and the mechanism of a phase transformation, © (1987)。图 9.13 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB 许可, 复制于 Jhan, R.-J. and Bristowe, P. D. (1990) *Scripta Metall. Mater.* **24**, 1313, A molecular dynamics study of grain boundary migration without the participation of secondary grain boundary dislocations, © (1990)。图 9.14 承蒙 Les Editions de Physique 许可, 复制于 Ichinose, H. and Ishida, Y. (1990) *J. de Phys.* **51**, Colloque, C1-185。图 9.15 承蒙 Elsevier 科学有限公司, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington Ox5 1GB