

金属物理

上册

馮端 王业宁 丘第荣 編著

科学出版社

金 属 物 理

上 册

馮 端 王业宁 丘第荣 編著

科 学 出 版 社

1 9 6 4

內 容 簡 介

本书为“金属物理”上册，书中介绍了金属物理学的基础理論部分。內容共分三篇：第一篇为合金理論。这一篇对于平衡态合金理論的各个方面，如合金的热力学、結構研究的成果以及各种类型的微觀理論，作出了比較全面的总结。第二篇为晶体的缺陷，其中除了扼要地介绍晶体中的点缺陷和輻照效应以及晶界与相界理論外，还以較大的篇幅叙述了晶体的位錯理論。第三篇为原子的迁移，重点討論金属中的扩散；此外，对氧化、燒結等方面近代研究的成果也作了概括的介绍。

本书可作为高等院校“金属物理学”一課的教学参考用书，也可供从事金属物理及其他有关专业的科学技术工作者参考。

金 属 物 理（上册）

馮 端 王业宁 丘第荣 編著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝陽門大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1964 年 7 月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1964 年 7 月第一次印刷 印张：13 7/16

精：1—4,700 插頁：3

平：1—3,900 字数：336,000

統一书号：13031·1384

本社书号：2909·13—2

定价：[科六] 精裝本 2.50 元
平裝本 2.00 元

序 言

本书是根据作者历年在南京大学物理系讲授金属物理課的讲义改写而成的。在改写过程中，我们对内容作了較大的修改、調整和补充，企图使本书除了可用作高等学校金属物理課程的教学参考用书外，也可以供这方面的研究工作者参考。

金属物理学是一門正在迅速发展中的学科，它的体系和內容都还没有定型。在編写本书时，不論在体系的安排、內容的取舍和处理的深度上，都曾經頗費斟酌。在現有的一些参考书中，也找不出合适的规范可以依据。为了突出主要問題，我們將本书的重点放在論述金属及合金本身的規律性上。至于研究金属的實驗方法，这里就不細加討論了。当然，掌握一定的實驗技术（特别是金相及X射綫晶体学技术）是理解許多金属物理問題所必备的条件，但是要掌握这方面的技能和知識，我們认为，最好是通过實驗室的專門訓練和閱讀这方面的專門著作。金属电子論虽是金属物理学中的一个重要組成部分，但在一般固体物理学的教科书中已有較詳尽的闡述，这里就没有必要再重复，本书中只保留其中和合金理論有关的部分。我們根据本学科发展的現况，将內容分为合金理論、晶体的缺陷、原子的迁移、相变及力学性質等五篇。上册包括前三篇，側重于基本規律的闡述；下册包括后两篇，更多地接触到具体的問題。

我們假定讀者在閱讀本书之前，已經掌握了金属学及X射綫晶体学的基础知識，并在理論物理学方面具有一定的基础（大学物理专业水平）。但为了照顾一般讀者，对于理解本书內容所必需的某些基本知識（例如弹性力学的基础、經典碰撞理論及量子力学的散射理論），也扼要地編为附录，以資参考。在金属物理的基本理論的闡述中，我們突出了問題的物理模型，尽可能将各个环节交代

清楚,而将部分比較繁瑣的数学推导列为附录,力求能使讀者基本上不需要查閱很多其他文献,就可以掌握本书中的主要内容。由于学科本身的特点在于和各种具体材料的性質有密切的联系,重点也就放在晶体的缺陷和化学成分所决定的一些效应上。书中以較大的篇幅叙述一些比較成熟的理論,而对于一些猜測性成分比較大、还不够成熟的理論,一般只作簡略的介紹。但是,由于我們的学識疏陋,水平不高,在內容的取舍和問題的处理上,一定存在不少毛病,希望讀者指正。

本书的第一篇是由馮端編写的;第二篇是由馮端与王业宁合編,而由馮端执笔的;第三篇是由丘第荣編写的。另外,程开甲同志曾参与本书筹划阶段的工作;南京大学物理系金属物理教研組的教师、研究生和同学,曾对本书所依据的讲义提出很多宝贵的意見,对我們的編写工作帮助很大,謹此致謝。

馮 端 丘第荣 王业宁

1962年12月于南京

緒 論

人类在生产实践中应用金属及合金材料已经有几千年的历史。当今几乎没有一种工业技术不牵涉到有关金属材料的问题。人类通过生产实践,已经制成了各种各样的合金材料,累积了大量的经验资料。金属物理学这门学科的基本任务即在于将这些经验资料加以系统化,找出其中内在的规律,探明金属及合金的微观组织结构 and 化学成分与性能的关系,为进一步发展合金材料的工作奠定科学的基础。

金属物理学是介乎物理学与冶金学间的一门边缘科学,它牵涉到许多不同的学科,如金相学、结晶学、材料力学、物理化学以及物理学中的许多分支(象热力学、弹性及范性力学、统计物理、量子力学等)。但它并不等于这些学科的杂烩,而是利用了这些学科的成果,形成了以金属及合金为对象的一门独立的综合性的物理学科。金相学及结晶学的研究揭示了金属及合金的微观的组织结构(包括晶体结构、晶体缺陷及显微组织);量子力学、统计物理及弹性力学的方法帮助我们理解金属中的电子、原子以及各种晶体缺陷的运动规律和它们之间的交互作用;而热力学、物理化学及材料力学则可以用来阐明一些宏观的规律性。综合起来,就形成了金属物理学。它的主要内容在于研究金属及合金的微观组织结构和化学成分与性能的关系,从电子、原子及各种晶体缺陷的运动和相互作用来说明金属及合金中的各种宏观规律和转变过程。

显然,金属物理学是和生产实践息息相关的。它所研究的一些主要课题往往是从生产实践中提出来的:由于金属的主要用途是作为结构材料,因而在金属性能的研究中,强度和范性就成为最突出的问题;由于冶金技术的需要,才促使人们注意研究液态金属的结晶和粉末的烧结;合金中固态相变的研究又是和金属热处理

工艺密切相关的。近年来尖端技术的发展，又对金属物理学的研究起了很大的促进作用：为了发展耐高温的材料，推动了对于金属的高温强度、氧化及扩散的研究。反应堆技术的需要，又将高能粒子的辐照效应提到研究的日程上。反过来，将金属物理的基本研究成果用到生产实践中去，也会发挥很大的作用：例如对于金属强度的基础研究找出了强化金属的新途径，并提高了传统强化金属方法的效能；又如对于再结晶组织的研究显著地改进了硅钢片的质量。这里也体现了辩证唯物主义的真理：通过实践—理论—实践的循环，日益加深对自然界规律的認識，掌握改造世界的手段。

另一方面，金属物理学作为物理学的一个分支，其发展又是和物理学的实验技术与基本理论的进展密切相关的。物理学的新技术和新理论，往往会在金属物理学领域内带来巨大的进展。五十年前X射线衍射方法的应用为金属研究开辟了一个新天地；而近几年来，电子显微镜薄膜透射技术的发展，也产生了类似的情景。在理论方面，量子力学在金属理论中所起的促进作用，也是大家所熟知的。另一方面，还应该注意，在金属物理学中的一些重大成就，也往往会对物理学的其他领域产生很大的影响。为了解决金属强度问题而发展起来的位错理论就是一个突出的例子。目前它在半导体和离子晶体中已获得了重要的应用，其应用的面还在日益扩展。

回顾起来，金属物理学的发展大致可以分为三个阶段：在1920年以前，相当于准备时期。在这个阶段中，主要是应用了金相方法累积了不少资料，对于固态中的相变、结晶过程、再结晶等重要现象都进行了初步的研究。从1920—1950年这个阶段，为金属物理学科的形成时期。应用X射线衍射方法确定了相变与范性形变中的结晶学特征，并且有系统地研究了合金的相结构与相图；合金中的扩散开始被人们注意和研究。在这个阶段的后期，发展了精细的X射线技术来探索不完整晶体的结构，同时内耗方法也被用来研究原子跃迁和晶界滑移等微观过程。在这个阶段内，金属物理的

一些主要理論,如金属电子論、微观的合金理論、相变动力学理論、扩散理論以及晶体的位錯理論等,也次第地被建立起来,获得不同程度的发展。金属物理开始形成一門独立的学科。从1950年起,又进入了一个新的发展时期,尖端技术引入了大量新型金属材料(如鈦、鋳、鉬、鎢、鈮、鉍、鈾、鐳等),扩大了研究的領域;强有力的新实验方法,如电子显微鏡、放射性同位素、高能粒子的辐照等方法占領了大片新的陣地;晶体缺陷理論的研究,获得了直接观察的配合,发展非常迅速,构成了当今金属物理学中最活跃的領域;在此基础上,范性形变与断裂的原子机制正逐渐被探明;同时各种不同的理論显示出相互渗透的現象:晶体缺陷理論滲入了相变理論,为相变的原子过程提供更鮮明的图象;而金属电子論也开始向晶体缺陷理論滲入,加强了金属強度理論和实际材料間的联系。这一切都标志着金属物理学正在朝向更高的阶段飞跃。

自解放以来,我国金属物理学的发展也和其他科学一样,受到了党和人民政府的重視。建立了許多有关金属物理的研究机构,并在高等学校內創办了金属物理专业和專門組,培养了大批的專門人材。我国科学工作者在金属的范性形变、內耗、相变等方面已經作出了一定的貢獻。我們相信,在党的正确领导下,在三面紅旗的照耀下,金属物理学的研究工作将会不断地取得更多、更出色的成果,为社会主义建設服务。

主要参考書目

I. 教科书及专著

- [1] Уманский Я. С., Физические основы металловедения, Металлургиздат, 1955. 中譯本: 金属学物理基础, 中国科学院金属研究所譯, 科学出版社, 1958.
- [2] Cottrell A. H., Theoretical Structural Metallurgy*, Arnold, 1955.
- [3] Masing G., Lehrbuch der Allgemeinen Metallkunde, Springer, 1955.
- [4] Френкель Я. И., Введение в теорию металлов, Металлургиздат, 1950. 中譯本: 金属理論概要, 何寿安譯, 科学出版社, 1957.
- [5] Dehlinger U., Theoretische Metallkunde*, Springer, 1955.
- [6] Chalmers B., Physical Metallurgy*, Wiley, 1959.
- [7] Seitz F., The Physics of Metals, McGraw-Hill, 1943.
- [8] Штейнберг С. С., Металловедение, Металлургиздат, 1952. 中譯本: 金属学, 第一卷, 东北工学院金相热处理教研組譯, 高教出版社, 1955.
- [9] Пинес Б. Я., Очерки по металлофизике, Изд. харьковского уни., 1961.
- [10] Barrett C. S., Structure of Metals*, McGraw-Hill, 1953.
- [11] Mott N. F., Jones H., The Theory of the Properties of Metals and Alloys, Oxford, 1936. 中譯本: 金属与合金性质的理論, 傅正元, 馬元德譯, 科学出版社, 1958.
- [12] 程开甲, 固体物理学, 高教出版社, 1959.
- [13] 謝希德, 方俊鑫, 固体物理学, 上海科技出版社, 1961.
- [14] Жданов Г. С., Физика твердого тела, Изд. московского уни., 1961.
- [15] Кузнецов В. Д., Физика твердого тела, I, II, Изд. "Красное знамя" 1937—1941.
- [16] Flügge S., Handbuch der Physik, Bd. VII, I—II. Springer, 1955—1958.
- [17] Wagner C., Thermodynamics of Alloys*, Addison-Wesley, 1952.
- [18] Lumsden J., Thermodynamics of Alloys*, Inst. of Metals, 1952.
- [19] Darken L. S., Gurry R. W., Physical Chemistry of Metals*, McGraw-Hill, 1953.
- [20] Hume-Rothery W., Raynor G. V., The Structure of Metals and Alloys*, Inst. of Metals, 1956.
- [21] Guggenheim E. A., Mixtures, Oxford, 1952.
- [22] Hume-Rothery W., Atomic Theory for Students of Metallurgy*, Inst. of Metals, 1960.

* 书名后有此符号者表示有俄文譯本。

- [23] Лившиц Б. Г., Физические свойства металлов и сплавов, Матгиз, 1959. 中譯本: 王潤等譯, 金屬与合金的物理性能, 冶金工业出版社, 1956.
- [24] Vogt W., *Physikalische Eigenschaften der Metalle* Bd. I, Akad. Verlag, 1958.
- [25] van Bueren H. G., *Imperfections in Crystals**, North-Holland, 1960.
- [26] Dienes G. J., Vineyard G. H., *Radiation Effects in Solids**, Interscience, 1957.
- [27] Billington D. S., Crawford J. H., *Radiation Damage in Solids*, Princeton Uni. Press, 1961.
- [28] Cottrell A. H., *Dislocations and Plastic Flow in Crystals**, Oxford, 1952. 中譯本: 晶体中的位錯与范性流变, 葛庭燧譯, 科学出版社, 1960.
- [29] Read W. T., *Dislocations in Crystals**, McGraw-Hill, 1953.
- [30] Friedel J., *Les dislocations*, Gauthier-Villars, 1956.
- [31] Verma A. R., *Crystal Growth and Dislocations**, Butterworth, 1953.
- [32] Dekeyser W., Amelinckx S., *Les dislocations et la Croissance de Cristaux*, Masson et Cie, 1955.
- [33] Kröner E., *Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen*, Springer, 1958.
- [34] McLean D., *Grain Boundaries in Metals**, Oxford, 1957.
- [35] Герцикен С. Д., Дехтяр И. Я., *Диффузия в металлах и сплавах*, Физматгиз, 1960.
- [36] Jost W., *Diffusion in Solids, Liquids and Gases*, Academic Press, 1960.
- [37] Seith W., *Diffusion in Metallen**, Springer, 1955.
- [38] Barrer R. M., *Diffusion in and through Solids*, Cambridge, Uni. Press, 1951.
- [39] Hauffe K., *Reactionen in und an Festen Stoffen**, Springer, 1955.
- [40] Садовский В. Л., 尹道乐等譯, 鋼的相变, 江苏人民出版社, 1960.
- [41] Schmid E., Boas W., *Kristallplastizität*, Springer, 1935. 中譯本: 晶体范性学, 錢临照譯, 科学出版社, 1958.
- [42] 张兴铃等, 金屬与合金的力学性质, 中国工业出版社, 1961.
- [43] Zener C., *Elasticity and Anelasticity of Metals**, Uni. of Chicago Press, 1948.
- [44] Классен-Неклюдова, *Механическое Двойникование кристаллов*, Изд. А. Н. СССР, 1960.
- [45] Hall E. O., *Twinning and Diffusionless Transformations in Metals*, Butterworth, 1954.
- [46] Одинг И. А., *Теория ползучести и длительной прочности металлов*, Металлургиздат, 1959.
- [47] Evans V. R., *Corrosion and Oxidation of Metals* Arnold, 1960.

II. 論文集

- [48] Chalmers B., King R., Progress in Metal Physics*, Vol. 1—8, Pergamon Press, 1949—1959.
- [49] Seitz F., Turnbull D., Solid State Physics, Advances in Research and Applications, Vol. 1—12, Academic Press, 1955—1961.
- [50] Theory of Alloy Phases*, ASM Seminar, 1956.
- [51] The Physical Chemistry of Metallic Solutions and Intermetallic Compounds, Nat. Phys. Lab. Symposium, Her Majesty's Stationary Office, 1959.
- [52] Thermodynamics in Physical Metallurgy, ASM Seminar, 1950.
- [53] 晶体缺陷与金属强度 (上册), 固体物理理論学习报告汇编, 科学出版社, 1962.
- [54] Impurities and Imperfections*, ASM Seminar, 1956.
- [55] Vacancies and Other Point Defects in Metals and Alloys*, Harnwell Symposium, Inst. of Metals, 1958.
- [56] Dislocations in Metals, AIME Symposium, 1954.
- [57] Metal Interfaces, ASM Seminar, 1952.
- [58] Report of a Conference on the Strength of Solids, Bristol, The Phys. Soc., 1948.
- [59] Plastic Deformation of Crystalline Solids, Pittsburgh Symposium, 1950.
- [60] Imperfections in Nearly Perfect Crystals, Pocono Conference Symposium, Wiley, 1952.
- [61] Report of a Conference on Defects in Crystalline Solid, Bristol, The Phys. Soc., 1954.
- [62] Verformung und Fließen des Festkörpers, Madrid Colloquium, Springer, 1956.
- [63] Dislocations and Mechanical Properties of Crystals*, Lake Placid Conference Report, Wiley, 1957.
- [64] Growth and Perfection of Crystals, Coopertown Conference Report, Wiley, 1958.
- [65] Internal Stresses and Fatigue in Metals, General Motors Research Lab. Symposium, Elsevier, 1959.
- [66] Fracture*, Swampscott Symposium, Wiley, 1959.
- [67] Creep and Recovery*, ASM Seminar, 1957.
- [68] Классен-Неклюдова М. В., Некоторые вопросы физики пластичности кристаллов, Изд. А. Н. СССР, 1961.
- [69] Creep and Fracture of Metals at High Temperatures, Nat. Phys. Lab. Symposium, 1955.
- [70] Structure and Properties of Thin Films, Bolton Landing Conference Report, Wiley, 1959.

-
- [71] Cold Working of Metals, ASM Seminar, 1948.
 - [72] Fracturing of Metals, ASM Seminar, 1947.
 - [73] Relation of Properties to Microstructure, ASM Seminar, 1954.
 - [74] Atom Movements, ASM Seminar, 1951.
 - [75] Phase Transformations in Solids, Cornell Conference Report, Wiley, 1951.
 - [76] The Mechanism of Phase Transformations in Metals, Inst. of Metals, 1956.
 - [77] Age Hardening in Metals, ASM Seminar, 1940.
 - [78] Precipitation from Solid Solutions, ASM Seminar, 1959.
 - [79] L'état Solide, 9th Solvay Conference Report, Stoops, 1952.
 - [80] Исследования жаропрочным сплавам, Том I—IX, Изд. А. Н. СССР, 1956—1961.
 - [81] Проблемы металловедения и физики металлов, Том 1—7, 1950—1962.
 - [82] Вопросы физики металлов и металловедения, 1—12 Изд. А. Н. Украинской ССР.
 - [83] Труды института физики металлов, вы. 1—19, Изд. А. Н. СССР.

目 录

序言.....	iii
緒論.....	xi
主要参考书目	xiv

第 一 篇 合 金 理 論

引言.....	1
第一章 合金的热力学.....	3
I. 定性理論.....	3
§ 1.1. 相平衡的热力学判据.....	3
§ 1.2. 合金的平衡相.....	4
§ 1.3. 从自由能曲綫推导相图.....	7
§ 1.4. 相图的几何規律.....	10
II. 定量理論.....	13
§ 1.5. 均匀相的热力学函数.....	13
§ 1.6. 理想溶体与非理想溶体.....	16
§ 1.7. 合金热力学数据的討論.....	17
§ 1.8. 相图的計算.....	22
第二章 金属与合金的結構.....	29
I. 金属元素的結構.....	29
§ 2.1. 刚球密堆积与几种典型的金属結構.....	29
§ 2.2. 元素的晶体結構.....	33
§ 2.3. 金属的原子半径.....	36
§ 2.4. 元素的原子結構.....	39
§ 2.5. 金属鍵与結合能.....	43
§ 2.6. 金属的电子結構.....	46
II. 固溶体.....	56
§ 2.7. 固溶体的基本类型.....	56
§ 2.8. 形成替代式固溶体的一些經驗規律.....	59

§ 2.9. 固溶体的物理性能	64
§ 2.10. 填隙式固溶体的晶体结构	69
§ 2.11. 固溶体的微观不均匀性	70
§ 2.12. 有序固溶体	73
III. 金属化合物	78
§ 2.13. 电子化合物	78
§ 2.14. 几何因素决定的金属化合物	83
§ 2.15. 间隙相	88
§ 2.16. 金属化合物的物理性能	90
第三章 微观的合金理论	93
I. 统计理论	93
§ 3.1. 固溶体的统计理论模型	93
§ 3.2. 准化学近似与固溶体中的原子分布	95
§ 3.3. 二元合金的溶解限曲线的理论	97
§ 3.4. 有序无序转变的理论	101
II. 弹性理论	110
§ 3.5. 错配球模型	110
§ 3.6. 错配球模型的应用	113
§ 3.7. 弹性偶极子模型	115
III. 电子理论	119
§ 3.8. 刚能带模型	119
§ 3.9. 电子屏蔽模型	123
§ 3.10. 稀固溶体剩余电阻的理论	130
附录 3 I. 处理散射问题的部分波法	132
第一篇参考文献	135

第二篇 晶体的缺陷

引言	139
第四章 点缺陷	144
I. 点缺陷的基本性质	144
§ 4.1. 几何组态	144
§ 4.2. 点缺陷的形成能	146

§ 4.3. 热平衡态的点缺陷	149
§ 4.4. 点缺陷对物理性能的影响	152
§ 4.5. 点缺陷的移动	153
II. 辐照效应	154
§ 4.6. 辐照效应的一般介绍	155
§ 4.7. 辐照对金属性能的影响	156
§ 4.8. 高能粒子与点阵原子的碰撞	158
§ 4.9. 原子碰撞的串级过程	161
§ 4.10. 实验结果与理论计算值的比较	167
§ 4.11. 辐照后缺陷的回复	170
附录 4-1. 经典的碰撞理论	173
第五章 位错	178
I. 位错的几何性质	178
§ 5.1. 刃型位错与螺型位错	178
§ 5.2. 位错的滑移与攀移	182
§ 5.3. 位错的普遍定义与柏格斯矢量	188
§ 5.4. 位错的一般运动学特征	191
§ 5.5. 位错与晶体的范性形变	193
II. 位错的应力场与原子错排	195
§ 5.6. 位错的连续介质模型	196
§ 5.7. 直刃型位错的应力场	197
§ 5.8. 直螺型位错的应力场	200
§ 5.9. 位错的能量与线张力	201
§ 5.10. 位错的点阵模型	204
III. 位错与晶体缺陷的交互作用	209
§ 5.11. 应力场对位错的作用力	209
§ 5.12. 平行位错间的弹性交互作用力	211
§ 5.13. 位错的塞积群	213
§ 5.14. 位错的交割	216
§ 5.15. 位错与溶质原子的交互作用	218
§ 5.16. 位错与点缺陷的交互作用	220
IV. 位错的动力学性质	222
§ 5.17. 位错滑移的动力学	223

§ 5.18. 位错运动的极限速度	225
§ 5.19. 滑移动力学的实验观测	227
§ 5.20. 位错的增殖机制	229
§ 5.21. 位错攀移的动力学	232
§ 5.22. 攀移动力学的实验观测	237
V. 典型晶体结构中的位错组态	239
§ 5.23. 典型晶体结构中的全位错	239
§ 5.24. 堆垛层错	241
§ 5.25. 面心立方晶体中的不全位错	244
§ 5.26. 扩展位错	246
§ 5.27. 面心立方晶体中的一些位错反应	248
§ 5.28. 面心立方晶体中空位凝聚成位错的过程	253
§ 5.29. 合金中的位错组态	256
附录 5-I. 电子显微衍衬法晶体缺陷法成象的原理	258
附录 5-II. 弹性力学的基础知识	266
附录 5-III. 刃型位错应力场的计算	272
附录 5-IV. 位错间弹性交互作用力的计算	278
第六章 界面	282
I. 晶界	282
§ 6.1. 晶界的位错模型	282
§ 6.2. 晶界位错模型的实验证明	288
§ 6.3. 大角度晶界的结构	292
§ 6.4. 孪生晶界	294
§ 6.5. 晶界能	296
§ 6.6. 晶界的内吸附	298
§ 6.7. 小角度晶界的移动	300
§ 6.8. 大角度晶界的滑动与移动	301
II. 晶体的嵌镶组织	306
§ 6.9. 退火状态的晶体中的嵌镶组织	307
§ 6.10. 熔态生长的晶体的嵌镶组织	308
§ 6.11. 形变后未完全退火的晶体中的嵌镶组织	310
III. 相界	312
§ 6.12. 相界的位错模型	312

§ 6.13. 相界能	315
附录 6-I. 晶体缺陷理論中的一些求和問題	316
第二篇参考文献	322

第三篇 原子的迁移

引言	329
第七章 金属中的扩散	330
I. 扩散的唯象理論	330
§ 7.1. 菲克方程及其解	330
§ 7.2. 扩散的热力学理論	337
II. 扩散机制及微觀理論	340
§ 7.3. 扩散机制	341
§ 7.4. 扩散的微觀理論	345
III. 影响扩散的因素	357
§ 7.5. 杂质对扩散的影响	357
§ 7.6. 扩散的各向异性	358
§ 7.7. 晶界扩散和表面扩散	359
IV. 二元合金中的扩散	364
§ 7.8. 均匀合金中的自扩散	364
§ 7.9. 克根达耳效应	369
V. 有关扩散的一些半經驗規律	372
§ 7.10. 实验方法	372
§ 7.11. 一些半經驗規律	373
附录 7-I. 扩散方程的解	376
附录 7-II. 达肯公式的推导	377
第八章 几个和扩散有关的实际問題	380
I. 金属的氧化	380
§ 8.1. 瓦格納氧化理論	381
§ 8.2. 薄氧化层的成长	385
II. 气体在金属中的扩散	387
§ 8.3. 气体在金属中扩散概况	387
§ 8.4. 渗透过程和渗透速率	390