

“十三五”国家重点图书出版规划项目
物理学名家名作译丛

吉巴米卡·甘古利 著
程伟基 译

地球与行星科学中的 热力学

Thermodynamics in Earth and Planetary Sciences

中国科学技术大学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目
物理学名家名作译丛



吉巴米卡·甘古利 著
程伟基 译

地球与行星科学中的 热力学

Thermodynamics in Earth and Planetary Sciences

中国科学技术大学出版社

安徽省版权局著作权合同登记号:第 12151481 号

Thermodynamics in Earth and Planetary Science, First Edition was originally published in Germany by Springer in 2008. This translation is published by arrangement with Springer.

All rights reserved.

© Springer & University of Science and Technology of China Press 2016.

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Springer and University of Science and Technology of China Press.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

图书在版编目(CIP)数据

地球与行星中的热力学/(美)甘古利(Ganguly, J.)著;程伟基译. —合肥:中国科学技术大学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-312-03703-0

I. 地… II. ①甘… ②程… III. 地球物理学—热力学—教材 IV. P3-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 257911 号

出版发行 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026

<http://press.ustc.edu.cn>

印 刷 安徽国文彩印有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 710 mm × 1000 mm 1/16

印 张 28

字 数 580 千

版 次 2016 年 6 月第 1 版

印 次 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 78.00 元

编 委 会

主 编 叶铭汉 陆 埏 张焕乔 张肇西 赵政国

编 委 (按姓氏笔画排序)

马余刚(上海应用物理研究所)	叶沿林(北京大学)
叶铭汉(高能物理研究所)	任中洲(南京大学)
庄鹏飞(清华大学)	陆 埏(紫金山天文台)
李卫国(高能物理研究所)	邹冰松(理论物理研究所)
张焕乔(中国原子能科学研究院)	张新民(高能物理研究所)
张肇西(理论物理研究所)	郑志鹏(高能物理研究所)
赵政国(中国科学技术大学)	徐瑚珊(近代物理研究所)
黄 涛(高能物理研究所)	谢去病(山东大学)

译者序

半个世纪以来,热力学理论和相关的实验方法在地球和行星科学的研究中得到了广泛的应用。可以说,正是从热力学的应用介入传统地质学研究领域开始,对地球和行星的从微观到宏观的不同规模空间中物质的物理化学状态、各种作用及其演化的研究才发展为一个较完整的科学研究体系。地球和行星科学中的热力学就是将所研究的对象抽象为用热力学原理分析的体系,确定描述该体系所需的各种强度变量、广度性质及参数,透过传统的定性和定量分析、各种现代的物理化学仪器分析,特别是与模拟自然作用的实验室结果相结合,并按照所有可能获得的相关信息架构的分析模型计算来获得结果,从而得以不仅定性而且定量地“讲古论今”,推断地球和行星中自然过程的发生和演化规律(当然也与其他方法例如同位素测年法相结合)。虽然,热力学在非平衡态体系和不可逆过程的处理中的限制是肯定的,但同样,热力学在处理许多平衡或接近平衡的体系的作用过程和演化上的有效性也是很显然的。可以说,热力学还处在方兴未艾的阶段,并且正在与嗣后发展的动力学、统计力学在地球和行星科学中的应用更加有机地结合。

译者有幸见证并经历了半个世纪以来热力学在地球和行星科学中的介入。例如,从开始在教室和野外观察各种自然体系的结构和化学组成,到今天能根据离子探针对于晶体表面元素在纳米级距离上扩散变化的测定,从而按照热力学模型推断喜马拉雅造山运动的抬升速率。这不仅是实验室技术和计算机技术的发展,更是对实际自然对象合理抽象而理论分析建立理论模型的结果。虽然也许只窥探大千世界的一小点,但其中经历的愉悦实在莫可名状。原来热力学原理不仅是大学理工科书本上的基础知识,而且是开启认识地球和行星乃至宇宙的一把金钥匙。

译者还有幸与本书作者共事近二十年。译者以旁观角度看,Ganguly 教授是五十年来用热力学方法深入窥探地球和行星中物理化学作用及演化的佼佼者,鉴于他在数理化方面特别是热力学上的扎实根基和多年在地球和行星的各种物理化学体系的基础研究,他得以涉猎同时代诸多研究者在相关各个领域的成果,并游刃有余地汇总在本书所呈现的有机联系的各章节中,同时也指出了存在的问题,可供进一步研究参考。Ganguly 教授著作等身,有兴趣的读者可到他的个人网页查看。

由于本人能力有限,翻译过程中遇到不少新的领域的知识。计算式虽都经推导检查,并与作者沟通,其中若干也得到了修正,但仍可能挂一漏万。又由于疏于与国内学者的交流,在一些专业用词翻译的统一性上把握不一定准确,再加上文中涉及许多复杂的公式和符号,甚至原英文版的校对还在继续更新中,所以中文版中错误难免,希望读者见谅并指正。文中涉及的人名众多,除熟知人名用通用音译外,多直接用英文。所涉专业术语主要借鉴《英汉地质词典》(地质出版社,1983)。翻译工作初期在与支霞臣教授的交流中得益匪浅,在此特别致谢;并感谢中国科学技术大学出版社对此书出版的辛勤付出。

“长江前浪推后浪,世上新人赶旧人。”译者愿以本书翻译过程中所付出的心力和劳力献给亲爱的母校中国科学技术大学,以及有志在地球和行星科学奋力前行的莘莘学子和研究工作者。

程伟基

2015年9月于美国洛杉矶

序 言

“当知识甚少而情况复杂时,热力学方程是最管用的”。

——Richard Feynman

在人类认识自然的过程中热力学一直扮演着重要的角色,并且将来也会如此。尽管热力学作为一门课程早已在物理学、化学、材料科学和生物学等科系中教授,但事实上,今天在许多大学中热力学也成为地球科学系的一门课程。热力学之所以在越来越多的学科中被教授,就是因为其原理有广泛的应用。鉴于此,热力学的教学也特别需要关注于各领域的特定问题。

迄今出版的大量热力学教科书都是针对物理学、化学以及工程学问题而写的。近年来也出版了若干着重在地质问题研究方面的书。因此,读者可能会问,为什么还要写一本热力学书?我始终是以地球科学的读者为对象来写作的,因而重点就是化学热力学或地球化学热力学。随着热力学基本原理的展开,书中将涉及地球化学、岩石学、矿物学、地球物理和行星科学的大量问题。虽然还谈不上囊括所有问题,但还是企图尽力开发核心内容,让地球和行星科学的不同专业的读者得益。

热力学在地球和行星科学研究中所涉及的体系具有相当大范围的压力-温度空间。例如,地球表面的各种过程均处在 1 bar 和 25 °C 的压力-温度条件下,但地球内部的各种过程则要达到 10^6 bar 和 10^3 °C 数量级的高压-高温条件。而太阳星云中的作用过程又处在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ bar 的极低压力下。但目前出版的标准热力学教科书中,尚未有处理这种大范围变化条件的自然过程所需的步骤和近似方法。事实上,地球科学家在这方面已做过大量努力和贡献,然而遗憾的是,由于标准教科书的读者往往很少涉及地球科学家所面对的极端条件问题,因而在标准教科书中被忽略了。我试图突出了地球科学家在应用热力学来处理自然作用过程研究上所做出的贡献。

将热力学原理和热力学性质置于微观下来窥察它们的物理图景,有助于大大提高对它们的鉴赏水平。而且,在研究中常常发现,需要将实验条件下所能测定的热力学性质进行外推,并且要在缺少适当资料的情况下估算相关热力学数据。为此,需要对热力学性质的物理或微观原理有基本认识。因此,虽然热力学本身的正统内容不需要从微观图景去开发,但在本书中,我还是偶尔会从微观角度去讨论热力学。另一方面,我不打算用过多的篇幅去推导热力学定律,因为已有太多优秀的教科书阐述它们了。我想把重点放在探讨热力学基本原理背后的含义。当然,为了使读者体会如何从热力学基本方程导出一些有用的关系式,书中对若干方程的

推导也作了详尽的介绍。

本书可以说是我教授热力学课程的副产品,我在亚利桑那大学(University of Arizona)教授地球和行星科学专业研究生的该课程已有十余年。在教学过程中,我一直将基本原理和应用——当然主要是自然研究的课题,紧密结合一起。这样的做法有可能并不是呈现热力学在地球和行星科学中应用主题的最符合逻辑的途径,但我发现这也是能保持学生兴趣的有效方法,就是回答“我为什么这样做”的问题。此外,我在书中也列出了一些习题,并且,还在文中多处将一些公式的推导本身作为问题,其中,有感于学生在完成解题过程中所遭遇的困难,我也给出了必要的提示。

在本书写作中我一直试图尽量使用自己的方式。“绪论”这一章包含了经典力学和量子化学的有关概念,其中导出了有关的热力学概念,以及认识这些概念的微观理论基础。附录 B 概括了一些通常在经典热力学中使用的数学概念和工具。

本书的不少章节曾得到多个同事的评阅,他们是:Sumit Chakraborty, Weiji Cheng, Jamie Connolly, Mike Drake, Charles Geiger, Mats Hillert, Ralph Kretz, Luigi Marini, Denis Norton, Giulio Ottonello, Kevin Righter, Surendra Saxena, Rishi Narayan Singh, Max Tirone 和 Krishna Vemulapalli。在此向他们表示感谢,但本人将完全承担本书中可能还存在的任何错误。此外,上过我热力学课程的研究生的反馈,也使得本书更清晰明了,并在找出包括打印问题在内的各种错误方面也起到了重要作用。读者若发现新的错误,无论是打印问题还是其他,我将非常感谢。所有错误请一并贴在我的个人网页([http://www. geo. arizona. edu/web/Ganguly/JG_page. html](http://www.geo.arizona.edu/web/Ganguly/JG_page.html))上。

当我正式动笔写此书的时候,正值我有 2002~2003 年度的学术休假,并有幸得到 Alexander von Humboldt 基金会的研究奖金的资助,先后在德国的 Bayerisches 大学 Bayerisches Geoinstitut 研究所和 Bochum 大学访问。在此,特别要感谢 AvH 基金会和两所大学的接待。特别感谢 Dave Rubie 教授和 Sumit Chakraborty 教授。来自 NASA 宇宙化学计划对研究行星体系的热力学和动力学所提供的研究经费起到了极大的激励作用,并使我在写此书期间还能继续从容地投入到热力学研究,特此表示感谢。

我希望本书至少能在定量认识各种地球和行星自然过程中发挥热力学的强有力的作用方面取得部分成功。

最后,引用著名的热力学学者 Kenneth Denbigh (1955)的一句话与大家分享:

热力学不是只学一次就够,而是要多次更进一步地学习的一门学科。

Jibamitra Ganguly
2007 年 10 月 25 日
Tucson, Arizona, USA

目 次

第 1 章 绪论	(1)
1.1 热力学的性质和范围	(1)
1.2 不可逆过程和可逆过程	(2)
1.3 热力学体系、边界和变量	(3)
1.4 功	(4)
1.5 稳定和亚稳定平衡	(7)
1.6 晶格点阵振动	(8)
1.7 电子构型和晶体场效应	(11)
1.7.1 电子壳层、亚壳层和轨道	(11)
1.7.2 晶体或配位场效应	(13)
1.8 常用物理量和单位	(14)
第 2 章 热力学第一和第二定律	(16)
2.1 热力学第一定律	(17)
2.2 热力学第二定律:经典表述	(18)
2.3 卡诺循环:熵和热力学温标	(19)
2.4 熵:自然过程的方向和平衡	(22)
2.5 熵的微观解释:玻尔兹曼方程	(24)
2.6 熵和有序度:矿物学应用	(27)
2.6.1 构型熵	(27)
2.6.2 振动熵	(31)
2.6.3 构型熵与振动熵的比较	(32)
2.7 第一和第二定律的合并陈述	(35)
2.8 热平衡条件:第二定律的说明性示例	(36)
2.9 热发动机和热泵的有效率	(37)
2.9.1 热发动机	(37)
2.9.2 热泵	(38)

2.9.3 自然界中的热发动机	(39)
第3章 热力学势及其衍生性质	(42)
3.1 热力学势	(42)
3.2 封闭体系的平衡条件:用热力学势的公式化表示	(44)
3.3 什么是自由能中的自由?	(46)
3.4 麦克斯韦关系式	(46)
3.5 热力学方块:介绍一种记忆工具	(47)
3.6 蒸气压和逸度	(48)
3.7 衍生性质	(50)
3.7.1 热膨胀和压缩性	(51)
3.7.2 热容	(52)
3.8 Grüneisen 参数	(54)
3.9 热膨胀和压缩系数与 P - T 的关系	(56)
3.10 热力学导数综览	(57)
第4章 热力学第三定律和热化学	(58)
4.1 第三定律和熵	(58)
4.1.1 观察基础和表述	(58)
4.1.2 第三定律熵和剩余熵	(59)
4.2 热容函数的性质	(60)
4.3 对端元相固体的热容和熵的非晶格影响	(64)
4.3.1 电子跃迁	(64)
4.3.2 磁转变	(65)
4.4 热力学零度的不可达到性	(67)
4.5 热化学:形式和约定	(68)
4.5.1 生成焓	(68)
4.5.2 Hess 定律	(69)
4.5.3 生成吉布斯自由能	(70)
4.5.4 热化学数据库	(70)
第5章 临界现象和状态方程	(73)
5.1 临界点	(74)
5.2 近临界和超临界性质	(76)
5.2.1 热和热物理性质的偏离	(76)
5.2.2 临界波动	(77)

5.2.3 超临界流体和近临界流体	(79)
5.3 水的近临界性质和岩浆-热液体系	(79)
5.4 状态方程	(82)
5.4.1 气体	(82)
5.4.2 固体和熔体	(89)
第 6 章 相变、熔融和化学计量相反应	(93)
6.1 吉布斯相律:初步讨论	(93)
6.2 相变和同质多象	(94)
6.3 相变的朗道(Landau)理论	(97)
6.3.1 概述	(97)
6.3.2 关于二次系数的限定的推导	(99)
6.3.3 奇数次系数对相变的影响	(100)
6.3.4 序参数与温度:二级和三临界相变	(100)
6.3.5 朗道势与序参数:动力学含义	(101)
6.3.6 矿物学研究上的应用举例	(103)
6.4 P - T 空间中的反应	(104)
6.4.1 稳定和平衡条件	(104)
6.4.2 P - T 斜率:克拉珀龙-克劳修斯方程	(105)
6.5 脱水作用的温度极大值和熔融曲线	(106)
6.6 高压下熔融温度的推断	(110)
6.6.1 Kraut-Kennedy 方程	(110)
6.6.2 Lindemann-Gilvarry 方程	(111)
6.7 反应平衡 P - T 条件的计算	(112)
6.7.1 固定温度下的平衡压力	(112)
6.7.2 同质多象相变效应	(116)
6.8 高压下应用状态方程估算吉布斯自由能和逸度	(118)
6.8.1 Birch-Murnaghan 状态方程	(118)
6.8.2 Vinet 状态方程	(119)
6.8.3 Redlich-Kwong 状态方程和有关的用于液体的状态方程	(119)
6.9 Schreinemakers 原理	(121)
6.9.1 平衡反应的标记方法	(121)
6.9.2 自相符稳定判据	(122)
6.9.3 过量相的影响	(123)
6.9.4 综述	(124)

第7章 热压和地球内部的绝热过程	(125)
7.1 热压	(125)
7.1.1 热力学关系式	(125)
7.1.2 地核	(126)
7.1.3 岩浆-热液体系	(128)
7.2 绝热温度梯度	(130)
7.3 地幔和外圈地核的温度梯度	(132)
7.3.1 上地幔	(132)
7.3.2 下地幔和地核	(133)
7.4 地球内部的等熵熔融	(135)
7.5 地幔和地核中的热力学和地震波速的相关性	(139)
7.5.1 弹性性质和声速的关系	(139)
7.5.2 径向密度变量	(140)
7.5.3 地幔中的过渡带	(143)
7.6 绝热流动的焦耳-汤姆孙实验	(145)
7.7 伴随有动力能和势能变化的绝热流动	(148)
7.7.1 伴随动力能变化的水平流动:伯努利方程	(148)
7.7.2 垂流流动	(149)
7.8 地球内部物质的上升	(151)
7.8.1 不可逆减压作用和地幔岩石的熔融	(151)
7.8.2 挥发物上升的热效应:结合流体动力学和热力学	(153)
第8章 溶液热力学	(155)
8.1 化学势和化学平衡	(155)
8.2 偏摩尔性质	(158)
8.3 偏摩尔性质的测定	(160)
8.3.1 二元溶液	(160)
8.3.2 多元组分溶液	(161)
8.4 溶液中组分的逸度和活度	(163)
8.5 用吉布斯-杜亥姆方程确定组分活度	(166)
8.6 溶液的摩尔性质	(167)
8.6.1 常用公式	(167)
8.6.2 混合熵和活度表述的选择	(169)
8.7 理想溶液和过热力学性质	(169)
8.7.1 热力学方程式	(169)

8.7.2 理想混合:关于组分的选择和性质	(171)
8.8 稀释溶液中溶解物和溶剂的特性	(172)
8.8.1 亨利定律	(172)
8.8.2 拉乌尔定律	(174)
8.9 水在硅酸盐熔融中的作用	(176)
8.10 标准状态:摘要与述评	(179)
8.11 溶液的稳定性	(180)
8.11.1 溶液的内在稳定性和不稳定性	(180)
8.11.2 外在的不稳定性:固溶体的分解作用	(183)
8.12 旋节线,临界点和双结线(或溶离线)的条件	(185)
8.12.1 热力学方程式	(185)
8.12.2 上限和下限临界温度	(189)
8.13 出溶作用中的相干应变效应	(191)
8.14 旋节线的分解	(193)
8.15 固溶线测温法	(195)
8.16 场势中的化学势	(196)
8.16.1 公式表示	(196)
8.16.2 应用	(197)
8.17 渗透平衡	(200)
8.17.1 渗透压和逆向渗透	(200)
8.17.2 渗透系数	(201)
8.17.3 溶质摩尔质量的测定	(202)
第9章 非电解质溶液的热力学和混合模型	(203)
9.1 离子溶液	(203)
9.1.1 单晶位,子点阵和交互溶液模型	(204)
9.1.2 无序溶液	(207)
9.1.3 成对置换作用	(208)
9.1.4 离子熔融:特姆金模型和其他模型	(208)
9.2 二元体系的混合模型	(209)
9.2.1 Guggenheim 或 Redlich-Kister 模型,简单混合和规则溶液模型	(209)
9.2.2 亚规则模型	(211)
9.2.3 Darken 二次方程式	(213)
9.2.4 准化学及相关模型	(214)

9.2.5 无热溶液, Flory-Huggins 模型和 NRTL(非随机双位置)模型	(217)
9.2.6 Van Laar 模型	(219)
9.2.7 伴生溶液	(221)
9.3 多元组分溶体	(224)
9.3.1 幂级数多元模型	(224)
9.3.2 投射多元模型	(225)
9.3.3 幂级数模型和投射模型比较	(226)
9.3.4 更高次相互作用项的估算	(227)
9.3.5 具有多位置混合的固溶体	(227)
9.3.6 结论	(228)
第 10 章 含有溶体和气体混合物的平衡	(229)
10.1 反应程度和平衡条件	(229)
10.2 化学反应的吉布斯自由能变化和亲和性	(231)
10.3 吉布斯相律和杜亥姆定理	(232)
10.3.1 相律	(232)
10.3.2 杜亥姆定律	(234)
10.4 化学反应的平衡常数	(235)
10.4.1 与活度积相关的定义和方程	(235)
10.4.2 平衡常数与压力和温度的关系	(237)
10.5 固体-气体反应	(238)
10.5.1 太阳星云的凝聚	(238)
10.5.2 金星的表面-大气圈相互作用	(241)
10.5.3 陨石中干燥气相为介质的金属-硅酸盐反应	(242)
10.5.4 蒸气组成对平衡温度的影响: 温度 T 与 X^V 的关系图	(243)
10.5.5 变质和岩浆体系的挥发性组成	(246)
10.6 固体和熔体之间的平衡温度	(248)
10.6.1 低共熔体和包晶体系	(248)
10.6.2 固溶体体系	(250)
10.7 共沸混合体系	(252)
10.8 固-液相图的解读	(254)
10.8.1 共熔体系和包晶体系	(254)
10.8.2 二元固溶体的结晶作用和熔融	(255)
10.8.3 熔融线和固溶体分解线的交叉现象	(257)

10.8.4 三元体系	(258)
10.9 自然体系:花岗岩和月球玄武岩	(260)
10.9.1 花岗岩	(260)
10.9.2 月球玄武岩	(261)
10.10 低共熔点温度及组成与压力的关系	(262)
10.11 非纯体系中的反应	(265)
10.11.1 含固溶体的反应	(265)
10.11.2 计算实例	(268)
10.11.3 含固溶体和气体混合物的反应	(270)
10.12 从相平衡实验获取活度系数	(273)
10.13 相的平衡丰度和组成	(276)
10.13.1 在恒定 $P-T$ 条件下的封闭体系	(276)
10.13.2 采用压力-温度以外的其他变量条件	(279)
第 11 章 地质体系中的元素分馏作用	(283)
11.1 主要元素的分馏作用	(283)
11.1.1 交换平衡和分配系数	(283)
11.1.2 作为温度和压力的函数的 K_D	(284)
11.1.3 K_D 随组成的变化	(286)
11.1.4 热力学地质温度计	(288)
11.2 矿物和熔体之间的微量元素分馏作用	(290)
11.2.1 热力学公式	(290)
11.2.2 应用	(293)
11.2.3 配分系数的估算	(295)
11.3 金属-硅酸盐分馏作用:岩浆洋和地核的形成	(297)
11.3.1 金属-硅酸盐配分系数随压力的变化	(301)
11.3.2 金属-硅酸盐分配系数随压力的变化	(302)
11.3.3 Ni-Co 的配分和分配系数随压力的变化	(303)
11.4 温度和氧逸度 $f(\text{O}_2)$ 对金属-硅酸盐配分系数的影响	(304)
第 12 章 电解液和电化学	(306)
12.1 化学势	(306)
12.2 活度和活度系数:平均离子架构	(307)
12.3 质量平衡关系	(308)
12.4 标准状态的约定和性质	(309)
12.4.1 溶质标准态	(309)

12.4.2 离子的标准态性质	(310)
12.5 平衡常数,溶度积和离子活度积	(311)
12.6 离子活度系数和离子强度	(312)
12.6.1 Debye-Hückel 定律及其相应方法	(312)
12.6.2 平均盐方法	(314)
12.7 多组分高离子强度和高压高温体系	(315)
12.8 矿物稳定场活度图	(319)
12.8.1 计算方法	(319)
12.8.2 应用	(321)
12.9 电化学电池和能斯特方程	(325)
12.9.1 电化学电池和半电池	(325)
12.9.2 电池的电动势和能斯特方程	(326)
12.9.3 半电池标准电动势和全电池反应	(326)
12.10 水溶液中氢离子活度:pH 和酸度	(327)
12.11 Eh-pH 稳定场图	(327)
12.12 海水的化学模型	(331)
第 13 章 表面效应	(335)
13.1 表面张力和能量	(336)
13.2 表面热力学函数和吸附作用	(337)
13.3 温度、压力和组成对表面张力的影响	(339)
13.4 裂纹扩展	(340)
13.5 晶体的平衡形状	(341)
13.6 接触角和双面角	(343)
13.7 双面角与互连的熔体或流体通道的关系	(347)
13.7.1 岩石中熔融相和熔体薄膜的连通性	(348)
13.7.2 地球和火星中内核的形成	(350)
13.8 表面张力和晶粒粗化	(353)
13.9 颗粒大小对溶解度的影响	(355)
13.10 出溶片晶的粗化作用	(357)
13.11 成核作用	(359)
13.11.1 理论	(359)
13.11.2 陨石中金属的微观结构	(360)
13.12 晶粒大小对矿物稳定场的影响	(363)

附录 A 熵产生率和动力学问题	(367)
A.1 熵产生率:不可逆过程中共轭的流和力	(367)
A.2 流和力的关系式	(370)
A.3 热扩散和化学扩散过程:与经典方程的比较	(370)
A.4 昂萨格倒易关系及其热力学应用	(372)
附录 B 若干数学关系式的讨论	(374)
B.1 全微分和偏微分	(374)
B.2 状态方程,恰当和不恰当微分以及曲线积分	(375)
B.3 倒数关系	(376)
B.4 隐函数	(377)
B.5 积分因子	(378)
B.6 泰勒级数	(379)
附录 C 固体的热力学性质的估算	(381)
C.1 氧化物构成的端元矿物的 C_P 和 S 值的估算	(381)
C.1.1 组分的线性组合	(381)
C.1.2 熵值的体积效应	(382)
C.1.3 熵值的电子排布效应	(382)
C.2 焓,熵和体积的多面体近似方法	(383)
C.3 混合焓的估算	(385)
C.3.1 弹性效应	(385)
C.3.2 晶体场效应	(387)
参考文献	(389)
主题索引	(420)