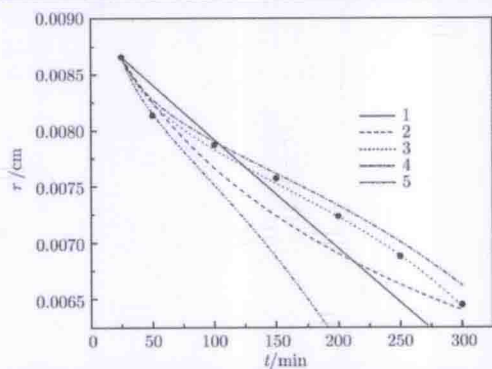


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

非平衡态冶金热力学



翟玉春◎著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

非平衡态冶金热力学

翟玉春 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是第一本非平衡态冶金热力学的专著,构建了非平衡态冶金热力学的理论体系。系统地阐述了非平衡态冶金热力学的基础理论和基本知识,内容包括非平衡态热力学基础、单元和多元体系的均相反应、气体与无孔隙固体的反应、气体与多孔固体的反应、气-液相反应、液-液相反应、液-固相反应、固-固相反应和一些应用实例,给出了单元、多元、均相、多相远离平衡的冶金体系发生不可逆的传输过程和化学反应的吉布斯自由能变的公式,以及传输速度和化学反应速率的公式,讨论了过程的各种控制步骤,描述了单一过程的情况和多个过程的耦合。

本书可供冶金、材料、化学、化工、地质等专业的本科生、研究生、教师、科技人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

非平衡态冶金热力学/翟玉春著. —北京: 科学出版社, 2017.6

(现代冶金与材料过程工程丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-052698-4

I. 非… II. 翟… III. ①冶金—不可逆过程热力学—研究 IV. TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 099650 号

责任编辑: 张淑晓 高 微 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 27 1/4

字数: 550 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《现代冶金与材料过程工程丛书》编委会

顾 问 陆钟武 王国栋

主 编 赫冀成

副 主 编 (按姓氏笔画排序)

左 良 何鸣鸿 姜茂发

执行副主编 张延安

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 强 王 磊 王恩刚 左 良 史文芳

朱苗勇 朱旺喜 刘承军 刘春明 刘相华

刘常升 杨洪英 吴 迪 吴文远 何鸣鸿

邹宗树 张延安 张殿华 茹红强 姜茂发

姜周华 姚广春 高瑞平 崔建忠 赫冀成

蔡九菊 翟玉春 翟秀静

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

21 世纪世界冶金与材料工业主要面临两大任务：一是开发新一代钢铁材料、高性能有色金属材料及高效低成本的生产工艺技术，以满足新时期相关产业对金属材料性能的要求；二是要最大限度地降低冶金生产过程的资源和能源消耗，减少环境负荷，实现冶金工业的可持续发展。冶金与材料工业是我国发展最迅速的基础工业，钢铁和有色金属冶金工业承载着我国节能减排的重要任务。当前，世界冶金工业正向着高效、低耗、优质和生态化的方向发展。超级钢和超级铝等更高性能的金属材料产品不断涌现，传统的工艺技术不断被完善和更新，铁水炉外处理、连铸技术已经普及，直接还原、近终形连铸、电磁冶金、高温高压溶出、新型阴极结构电解槽等已经开始在工业生产上获得不同程度的应用。工业生态化的客观要求，特别是信息和控制理论与技术的发展及其与过程工业的不断融合，促使冶金与材料过程工程的理论、技术与装备迅速发展。

《现代冶金与材料过程工程丛书》是东北大学在国家“985 工程”科技创新平台的支持下，在冶金与材料领域科学前沿探索和工程技术研发成果的积累和结晶。丛书围绕冶金过程工程，以节能减排为导向，内容涉及钢铁冶金、有色金属冶金、材料加工、冶金工业生态和冶金材料等学科和领域，提出了计算冶金、自蔓延冶金、特殊冶金、电磁冶金等新概念、新方法和新技术。丛书的大部分研究得到了科学技术部“973”、“863”项目，国家自然科学基金重点和面上项目的资助（仅国家自然科学基金项目就达近百项）。特别是在“985 工程”二期建设过程中，得到 1.3 亿元人民币的重点支持，科研经费逾 5 亿元人民币。获得省部级科技成果奖 70 多项，其中国家级奖励 9 项；取得国家发明专利 100 多项。这些科研成果成为丛书编撰和出版的学术思想之源和基本素材之库。

以研发新一代钢铁材料及高效低成本的生产工艺技术为中心任务，王国栋院士率队的创新团队在普碳超级钢、高等级汽车板材以及大型轧机控轧控冷技术等方面取得突破，成果令世人瞩目，为宝钢、首钢和攀钢的技术进步做出了积极的贡献。例如，在低碳铁素体/珠光体钢的超细晶强韧化与控制技术研究过程中，提出适度细晶化（3~5 μm ）与相变强化相结合的强化方式，开辟了新一代钢铁材料生产的新途径。首次在现有工业条件下用 200MPa 级普碳钢生产出 400MPa 级超级钢，在保证韧性前提下实现了屈服强度翻番。在研究奥氏体再结晶行为时，引入时间轴概念，明确提出低碳钢在变形后短时间内存在奥氏体未在结晶区的现象，为低碳钢的控制

轧制提供了理论依据；建立了有关低碳钢应变诱导相变研究的系统而严密的实验方法，解决了低碳钢高温变形后的组织固定问题。适当控制终轧温度和压下量分配，通过控制轧后冷却和卷取温度，利用普通低碳钢生产出铁素体晶粒为 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、屈服强度大于 400MPa ，具有良好综合性能的超级钢，并成功地应用于汽车工业，该成果获得 2004 年国家科技进步奖一等奖。

宝钢高等级汽车板品种、生产及使用技术的研究形成了系列关键技术（如超低碳、氮和氧的冶炼控制等），取得专利 43 项（含发明专利 13 项）。自主开发了 183 个牌号的新产品，在国内首次实现高强度 IF 钢、各向同性钢、热镀锌双相钢和冷轧相变诱发塑性钢的生产。编制了我国汽车板标准体系框架和一批相关的技术标准，引领了我国汽车板业的发展。通过对用户使用技术的研究，与下游汽车厂形成了紧密合作和快速响应的技术链。项目运行期间，替代了至少 50% 的进口材料，年均创利润近 15 亿元人民币，年创外汇 600 余万美元。该技术改善了我国冶金行业的产品结构并结束了国外汽车板对国内市场的垄断，获得 2005 年国家科技进步奖一等奖。

提高 C-Mn 钢综合性能的微观组织控制与制造技术的研究以普碳钢和碳锰钢为对象，基于晶粒适度细化和复合强化的技术思路，开发出综合性能优良的 $400\sim 500\text{MPa}$ 级节约型钢材。解决了过去采用低温轧制路线生产细晶粒钢时，生产节奏慢、事故率高、产品屈强比高以及厚规格产品组织不均匀等技术难题，获得 10 项发明专利授权，形成工艺、设备、产品一体化的成套技术。该成果在钢铁生产企业得到大规模推广应用，采用该技术生产的节约型钢材产量到 2005 年年底超过 400 万 t，到 2006 年年底，国内采用该技术生产低成本高性能钢材累计产量超过 500 万 t。开发的产品用于制造卡车车轮、大梁、横臂及建筑和桥梁等结构件。由于节省了合金元素、降低了成本、减少了能源资源消耗，其社会效益巨大。该成果获 2007 年国家技术发明奖二等奖。

首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制，以首钢 3500mm 中厚板轧机工程为对象，开发和集成了中厚板生产急需的高精度厚度控制技术、TMCP 技术、控制冷却技术、平面形状控制技术、板凸度和板形控制技术、组织性能预测与控制技术、人工智能应用技术、中厚板厂全厂自动化与计算机控制技术等一系列具有自主知识产权的关键技术，建立了以 3500mm 强力中厚板轧机和加速冷却设备为核心的整条国产化的中厚板生产线，实现了中厚板轧制技术和重大装备的集成和集成基础上的创新，从而实现了我国轧制技术各个品种之间的全面、协调、可持续发展以及我国中厚板轧机的全面现代化。该成果已经推广到国内 20 余家中厚板企业，为我国中厚板轧机的改造和现代化做出了贡献，创造了巨大的经济效益和社会效益。该成果获 2005 年国家科技进步奖二等奖。

在国产 1450mm 热连轧关键技术及设备的研究与应用过程中，独立自主开发的

热连轧自动化控制系统集成技术,实现了热连轧各子系统多种控制器的无缝衔接。特别是在层流冷却控制方面,利用有限元紊流分析方法,研发出带钢宽度方向温度均匀的层冷装置。利用自主开发的冷却过程仿真软件包,确定了多种冷却工艺制度。在终轧和卷取温度控制的基础之上,增加了冷却路径控制方法,提高了控冷能力,生产出了 $\times 75$ 管线钢和具有世界先进水平的厚规格超细晶粒钢。经过多年的潜心研究和持续不断的工程实践,将攀钢国产第一代 1450mm 热连轧机组改造成具有当代国际先进水平的热连轧生产线,经济效益极其显著,提高了国内热连轧技术与装备研发水平和能力,是传统产业技术改造的成功典范。该成果获 2006 年国家科技进步奖二等奖。

以铁水为主原料生产不锈钢的新技术的研发也是值得一提的技术闪光点。该成果建立了 K-OBM-S 冶炼不锈钢的数学模型,提出了铁素体不锈钢脱碳、脱氮的机理和方法,开发了等轴晶控制技术。同时,开发了 K-OBM-S 转炉长寿技术、高质量超纯铁素体不锈钢的生产技术、无氩冶炼工艺技术和连铸机快速转换技术等关键技术。实现了原料结构、生产效率、品种质量和生产成本的重大突破。主要技术经济指标国际领先,整体技术达到国际先进水平。K-OBM-S 平均冶炼周期为 53min,炉龄最高达到 703 次,铬钢比例达到 58.9%,不锈钢的生产成本降低 10%~15%。该生产线成功地解决了我国不锈钢快速发展的关键问题——不锈钢废钢和镍资源短缺,开发了以碳氮含量小于 120ppm 的 409L 为代表的一系列超纯铁素体不锈钢品种,产品进入我国车辆、家电、造币领域,并打入欧美市场。该成果获得 2006 年国家科技进步奖二等奖。

以生产高性能有色金属材料和研发高效低成本生产工艺技术为中心任务,先后研发了高合金化铝合金预拉伸板技术、大尺寸泡沫铝生产技术等,并取得显著进展。高合金化铝合金预拉伸板是我国大飞机等重大发展计划的关键材料,由于合金含量高,液固相线温度宽,铸锭尺寸大,铸造内应力高,所以极易开裂,这是制约该类合金发展的瓶颈,也是世界铝合金发展的前沿问题。与发达国家采用的技术方案不同,该高合金化铝合金预拉伸板技术利用低频电磁场的强贯穿能力,改变了结晶器内熔体的流场,显著地改变了温度场,使液穴深度明显变浅,铸造内应力大幅度降低,同时凝固组织显著细化,合金元素宏观偏析得到改善,铸锭抵抗裂纹的能力显著增强。为我国高合金化大尺寸铸锭的制备提供了高效、经济的新技术,已投入工业生产,为国防某工程提供了高质量的铸锭。该成果作为“铝资源高效利用与高性能铝材制备的理论与技术”的一部分获得了 2007 年的国家科技进步奖一等奖。大尺寸泡沫铝板制备工艺技术是以共晶铝硅合金(含硅 12.5%)为原料制造大尺寸泡沫铝材料,以 A356 铝合金(含硅 7%)为原料制造泡沫铝材料,以工业纯铝为原料制造高韧性泡沫铝材料的工艺和技术。研究了泡沫铝材料制造过程中泡沫体的凝固机制以及生产气孔均匀、孔壁完整光滑、无裂纹泡沫铝产品的工艺条件;研究

了控制泡沫铝材料密度和孔径的方法；研究了无泡层形成原因和抑制措施；研究了泡沫铝大块体中裂纹与大空腔产生原因和控制方法；研究了泡沫铝材料的性能及其影响因素等。泡沫铝材料在国防军工、轨道车辆、航空航天和城市基础设施建设方面具有十分重要的作用，预计国内市场年需求量在 20 万 t 以上，产值 100 亿元人民币，该成果获 2008 年辽宁省技术发明奖一等奖。

围绕最大限度地降低冶金生产过程中资源和能源的消耗，减少环境负荷，实现冶金工业的可持续发展的任务，先后研发了新型阴极结构电解槽技术、惰性阳极和低温铝电解技术和大规模低成本消纳赤泥技术。例如，冯乃祥教授的新型阴极结构电解槽的技术发明于 2008 年 9 月在重庆天泰铝业公司试验成功，并通过中国有色金属工业协会鉴定，节能效果显著，达到国际领先水平，被业内誉为“革命性的技术进步”。该技术已广泛应用于国内 80% 以上的电解铝厂，并获得“国家自然科学基金重点项目”和“国家高技术研究发展计划（‘863’计划）重点项目”支持，该技术作为国家发展和改革委员会“高技术产业化重大专项示范工程”已在华东铝业实施 3 年，实现了系列化生产，槽平均电压为 3.72V，直流电耗 12 082kW·h/t Al，吨铝平均节电 1123kW·h。目前，新型阴极结构电解槽的国际推广工作正在进行中。初步估计，在 4~5 年内，全国所有电解铝厂都能将现有电解槽改为新型电解槽，届时全国电解铝厂一年的节电量将超过我国大型水电站——葛洲坝一年的发电量。

在工业生态学研究方面，陆钟武院士是我国最早开始研究的著名学者之一，因其在工业生态学领域的突出贡献获得国家光华工程大奖。他的著作《穿越“环境高山”——工业生态学研究》和《工业生态学概论》，集中反映了这些年来陆钟武院士及其科研团队在工业生态学方面的研究成果。在煤与废塑料共焦化、工业物质循环理论等方面取得长足发展；在废塑料焦化处理、新型球团竖炉与煤高温气化、高温贫氧燃烧一体化系统等方面获多项国家发明专利。

依据热力学第一、第二定律，提出钢铁企业燃料（气）系统结构优化，以及“按质用气、热值对口、梯级利用”的科学用能策略，最大限度地提高了煤气资源的能源效率、环境效率及其对企业节能减排的贡献率；确定了宝钢焦炉、高炉、转炉三种煤气资源的最佳回收利用方式和优先使用顺序，对煤气、氧气、蒸气、水等能源介质实施无人化操作、集中管控和经济运行；研究并计算了转炉煤气回收的极限值，转炉煤气的热值、回收量和转炉工序能耗均达到国际先进水平；在国内首先利用低热值纯高炉煤气进行燃气-蒸气联合循环发电。高炉煤气、焦炉煤气实现近“零”排放，为宝钢创建国家环境友好企业做出重要贡献。作为主要参与单位开发的钢铁企业副产煤气利用与减排综合技术获得了 2008 年国家科技进步奖二等奖。

另外，围绕冶金材料和新技术的研发及节能减排两大中心任务，在电渣冶金、电磁冶金、自蔓延冶金、新型炉外原位脱硫等方面都取得了不同程度的突破和进展。基于钙化-碳化的大规模消纳拜耳赤泥的技术，有望攻克拜耳赤泥这一世界性难题；

钢焖渣水除疤循环及吸收二氧化碳技术及装备，使用钢渣循环水吸收多余二氧化碳，大大降低了钢铁工业二氧化碳的排放量。这些研究工作所取得的新方法、新工艺和新技术都会不同程度地体现在丛书中。

总体来讲，《现代冶金与材料过程工程丛书》集中展现了东北大学冶金与材料学科群体多年的学术研究成果，反映了冶金与材料工程最新的研究成果和学术思想。尤其是在“985工程”二期建设过程中，东北大学材料与冶金学院承担了国家Ⅰ类“现代冶金与材料过程工程科技创新平台”的建设任务，平台依托冶金工程和材料科学与工程两个国家一级重点学科、连轧过程与控制国家重点实验室、材料电磁过程教育部重点实验室、材料微结构控制教育部重点实验室、多金属共生矿生态化利用教育部重点实验室、材料先进制备技术教育部工程研究中心、特殊钢工艺与设备教育部工程研究中心、有色金属冶金过程教育部工程研究中心、国家环境与生态工业重点实验室等国家和省部级基地，通过学科方向汇聚了学科与基地的优秀人才，同时也为丛书的编撰提供了人力资源。丛书聘请中国工程院陆钟武院士和王国栋院士担任编委会学术顾问，国内知名学者担任编委，汇聚了优秀的作者队伍，其中有中国工程院院士、国务院学科评议组成员、国家杰出青年科学基金获得者、学科学术带头人等。在此，衷心感谢丛书的编委会成员、各位作者以及所有关心、支持和帮助编辑出版的同志们。

希望丛书的出版能起到积极的交流作用，能为广大冶金和材料科技工作者提供帮助。欢迎读者对丛书提出宝贵的意见和建议。

赫冀成 张延安

2011年5月

前 言

非平衡体系发生不可逆过程，力学量之间的关系，以及非平衡体系的性质是非平衡态热力学研究的主要内容。在近平衡态，已经建立起完备的线性热力学理论，得到了近平衡体系的性质，以及近平衡体系发生不可逆过程，力学量间成线性关系的唯象方程，给出了处理近平衡体系发生不可逆过程的方法。对于远离平衡体系的性质也已经进行了深入的研究。但是，远离平衡的体系发生不可逆过程，力学量间成怎样的关系即唯象方程是什么样的形式，以及怎样用唯象方程处理问题，还很欠缺。传热、传质、传动等传输过程在许多情况下可以采用线性唯象方程处理。然而，化学反应大多是在远离平衡的体系中发生的不可逆过程，线性非平衡态热力学仅适用于接近平衡的化学反应。在化学反应的全过程，化学反应速率与亲和力之间不服从线性关系，不能用线性非平衡态热力学理论处理。在有些情况下，传输过程也是非线性的。因此，需要建立远离平衡态的不可逆过程的力学量间关系的非线性非平衡态热力学理论。

作者将线性非平衡态热力学推广到远离平衡体系和非线性不可逆过程，建立了远离平衡体系的非平衡态热力学，给出了远离平衡体系发生不可逆过程力学量间的关系（非线性唯象方程）和非线性反应（扩散方程），描述了远离平衡体系的性质。

传统的传输理论没有考虑不同传输过程的耦合。传统的化学热力学和化学动力学也没有考虑各化学反应间的耦合。而这些耦合在很多情况下是不能忽略的，耦合会产生很多意想不到的结果。宏观化学动力学采用化学反应速率与浓度幂次的乘积成正比的质量作用定律来描述，而质量作用定律只适用于基元反应。对于非基元反应，化学反应速率方程中浓度幂次的物理意义并不明确，化学反应机理并不清楚。化学反应方程式表示的是反应物和产物之间量的关系。反应物是始态，产物是末态，所以非基元的化学反应方程式可以看作热力学方程式，应用非平衡态热力学描述其反应速率正合适。传统的化学动力学对每个具体化学反应需要具体处理，不能给出普适方程，而非平衡态热力学可以给出统一的描述，将化学反应动力学理论建立在非平衡态热力学的基础上。非平衡态热力学沟通了化学动力学和化学热力学两个学科，使之得到统一。

经典热力学对于一个过程只能指出其能否发生及其方向和限度，而不能给出其变化的速度。这是由于经典热力学没有引入时间变量。而非平衡态热力学引入

了时间变量，给出熵对时间的变化率即熵增率。熵的变化必然有相应的宏观力学量的变化，因此可以通过熵随时间的变化得到宏观力学量随时间的变化，即得到动力学方程。

例如，在恒温恒压条件下，一个化学反应引起的熵的变化必定有吉布斯自由能的变化，以及参加反应的物质质量的变化。非平衡态热力学给出了物质质量的变化率和吉布斯自由能的变化与熵随时间变化的关系，所以就给出了物质质量的变化率与吉布斯自由能变的关系，即化学反应的动力学方程。

冶金过程都是不可逆过程，如鼓风机还原、转炉吹炼、溶液和熔盐的电解、溶剂萃取、离子交换、金属凝固等。而将非平衡态热力学理论应用于冶金过程和冶金体系的研究很少。线性热力学理论在冶金中有些应用，但未形成体系；非线性热力学在冶金中几乎没有研究。冶金体系中普遍存在传输过程，冶金过程的化学反应大多是非线性的。非平衡态热力学理论在自然科学的许多领域都得到了应用，在冶金领域也应该有其用武之地。经典热力学在冶金中的应用为冶金的发展作出了巨大贡献，建立了冶金理论体系，使冶金由技艺发展成科学技术。非平衡态热力学在冶金中的应用必将深化人们对冶金过程和冶金体系的认识，推动冶金理论和技术的发展。

自 1981 年，作者在东北大学和中南大学为研究生讲授“非平衡态热力学（不可逆过程热力学）”，同时开始了非平衡态热力学的研究工作，尤其是在国家自然科学基金委员会的资助下，承担了“均相、非均相冶金体系的非平衡态热力学”的研究课题，系统地开展了非平衡态冶金热力学的研究工作，将非平衡态热力学理论应用于冶金体系和冶金过程，建立了非平衡态冶金热力学的理论体系。本书就是在这些研究工作的基础上写成的，是这些研究工作的一些成果。

在本书完成之际，首先感谢我国著名的冶金学家赵天从教授、傅崇说教授和冀春霖教授，他们都是作者的老师，在他们的关心、鼓励、帮助和支持下，作者开展了非平衡态冶金热力学的研究工作，并完成本书的写作。还要感谢东北大学出版社原社长李玉兴教授和国家自然科学基金委员会工程一处原处长张玉清教授，本书的完成与他们的关心、支持、帮助和鼓励分不开。

感谢国家自然科学基金委员会的支持，使作者得以系统地开展非平衡态热力学及其应用方面的研究工作。感谢东北大学“985 工程”为出版本书提供的部分资助。

此外，感谢科学出版社，感谢本书的责任编辑张淑晓女士、高微女士！为完成本书，她们倾注了大量的心血和精力，做了准确的文字修改和精益求精的润色。感谢所有支持和帮助完成本书的人，其中有作者的博士和硕士研究生王佳东、刘佳囡、谢宏伟、王锦霞、申晓毅、王乐、黄红波、刘彩玲、王志猛、任玲玲、王帅、

黄海涛、于成龙等，他们录入了本书的书稿。

最后，还要感谢作者的妻子李桂兰女士，她的支持、鼓励、帮助和关心，使作者能够完成本书的写作。

限于作者的水平，书中难免存在疏漏和不妥之处，望读者不吝赐教。

作 者

2016年12月12日于秦皇岛

目 录

第 1 章 非平衡态热力学基础	1
1.1 熵增率和唯象方程	1
1.1.1 熵增率	1
1.1.2 线性唯象方程	1
1.1.3 非线性唯象方程	2
1.2 多相体系的熵增率和唯象方程	3
1.2.1 不连续体系	3
1.2.2 不连续体系的熵增率	3
1.2.3 线性唯象方程	3
1.2.4 非线性唯象方程	4
1.3 热传导与扩散	5
1.3.1 热传导	5
1.3.2 扩散	6
1.4 多元均相体系的化学反应	9
1.4.1 多元均相只有一个化学反应的体系	9
1.4.2 多元均相有多个化学反应的体系	12
1.5 多元非均相体系的化学反应	14
1.5.1 只有一个化学反应的多元非均相体系	14
1.5.2 只有一个化学反应又有扩散的多元非均相体系	15
1.5.3 同时有多个化学反应的多元多相体系	16
1.6 稳态过程	18
1.6.1 只有一个化学反应的多相体系	18
1.6.2 同时有多个化学反应的多元多相体系	19
第 2 章 均相反应	22
2.1 气-气相反应	22
2.1.1 单一气-气相反应	22
2.1.2 多个气-气相反应	23
2.1.3 有一个化学反应, 同时有多个扩散	23
2.1.4 同时有多个化学反应, 又有多个扩散	24

2.1.5	实际反应	25
2.2	均一液相的化学反应	27
2.2.1	只有一个化学反应	27
2.2.2	同时有多个化学反应	27
2.2.3	有一个化学反应, 又有扩散	28
2.2.4	同时有多个化学反应, 又有扩散	28
2.2.5	实际反应	29
第3章	气体与无孔隙固体的反应	34
3.1	气体与无孔隙固体的反应类型和反应步骤	34
3.1.1	气体与无孔隙固体的反应类型	34
3.1.2	气体与无孔隙固体反应不生成致密产物层的反应步骤	34
3.2	气体与无孔固体不生成致密产物层的反应	35
3.2.1	气体反应物 A 在气膜中的扩散为控制步骤	35
3.2.2	界面化学反应为过程的控制步骤	37
3.2.3	气体反应物 A 在气膜中的扩散和化学反应共同为控制步骤	37
3.3	反应前后固体颗粒尺寸不变的气-固反应	39
3.3.1	气体反应物 A 在气膜中的扩散为过程的控制步骤	40
3.3.2	气体反应物 A 在固体产物层中的扩散为控制步骤	41
3.3.3	界面化学反应为过程的控制步骤	42
3.3.4	气体反应物在气膜中的扩散和在固体产物层中的扩散共同为控制步骤	43
3.3.5	反应物 A 在气膜中的扩散和界面化学反应共同为控制步骤	46
3.3.6	反应物 A 在固体产物层的扩散和界面化学反应共同为控制步骤	47
3.3.7	反应物 A 在气膜中的扩散、在产物层中的扩散和界面化学反应共同为控制步骤	49
3.4	多个反应同时进行的气体与无孔固体的反应——只生成气体	51
3.4.1	气体反应物 A_j 在气膜中的扩散为控制步骤	52
3.4.2	界面化学反应为过程的控制步骤	53
3.4.3	气体反应物在气膜中的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	54
3.5	多个反应同时进行的气体与无孔固体的反应——反应前后固体颗粒尺寸不变	56
3.5.1	气体反应物在气膜中的扩散为过程的控制步骤	56
3.5.2	气体反应物 A_j 在固体产物层中的扩散为过程的控制步骤	58
3.5.3	界面化学反应为过程的控制步骤	59
3.5.4	反应物在气膜中的扩散及其在固体产物层中的扩散共同为控制步骤	60
3.5.5	反应物 A_j 在气膜中的扩散和化学反应共同为控制步骤	62

3.5.6	反应物 A_j 在固体产物层中的扩散和化学反应共同为控制步骤	64
3.5.7	反应物 A_j 在气膜中的扩散、在产物层中的扩散和化学反应共同为控制步骤	66
3.6	气体与反应前后体积变化的固体颗粒的反应	68
3.6.1	气体与无孔固体只有一个反应	68
3.6.2	同时进行多个气体与无孔固体的反应	70
第 4 章	气体与多孔固体的反应	73
4.1	多孔固体的完全气化反应	73
4.1.1	多孔固体气化反应的三种控制步骤	73
4.1.2	化学反应为过程的控制步骤	73
4.1.3	通过孔隙的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	75
4.1.4	通过气膜的扩散为过程的控制步骤	77
4.2	有固体产物的多孔固体与气体的反应	78
4.2.1	化学反应为过程的控制步骤	79
4.2.2	通过固体产物层的扩散为控制步骤	80
4.2.3	化学反应和通过固体产物层的孔隙扩散共同为控制步骤	81
4.3	多孔固体同时进行多个气化反应	83
4.3.1	多个化学反应为过程的控制步骤	83
4.3.2	多个组元同时通过孔隙扩散和同时进行的多个化学反应共同为过程的控制步骤	84
4.3.3	多个组元通过气膜的扩散为过程的控制步骤	85
4.4	有固体产物的多孔固体与气体同时进行多个反应	87
4.4.1	化学反应为过程的控制步骤	87
4.4.2	在固体产物层中的扩散为控制步骤	88
4.4.3	在固体产物层的孔隙扩散和化学反应共同为控制步骤	89
第 5 章	气-液相反应	92
5.1	一种气体在溶液中溶解	92
5.1.1	一种气体在溶液中溶解的热力学	92
5.1.2	一种气体溶解的控制步骤	93
5.2	多种气体在溶液中溶解	101
5.2.1	多种气体在溶液中溶解的热力学	101
5.2.2	多种气体溶解的控制步骤	103
5.3	从溶液中析出一种气体	112
5.3.1	从溶液中析出一种气体的热力学	112
5.3.2	从溶液中析出一种气体的控制步骤	112
5.4	从溶液中析出多种气体	121

5.4.1	从溶液中析出多种气体的热力学	121
5.4.2	多种气体析出的控制步骤	121
5.5	气体和液体的化学反应	129
5.5.1	气体和液体的反应步骤	129
5.5.2	反应物 A 在液膜中的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	129
5.5.3	反应物 A 在气膜中的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	131
5.5.4	反应物 A 在气膜中的扩散、在液膜中的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	132
5.5.5	反应物 B 在液相中的扩散和化学反应为过程的控制步骤	134
5.6	多种气体和液体中多个组元同时进行化学反应	135
5.6.1	反应物 A_j 在液膜中的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	135
5.6.2	反应物 A_j 在气膜中的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	136
5.6.3	反应物 A_j 在气膜中的扩散、在液膜中的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	137
5.6.4	反应物 B_j 在液相中的扩散和化学反应共同为过程的控制步骤	138
5.7	气体在钢液中的溶解	140
5.7.1	在液膜中的扩散为控制步骤	140
5.7.2	界面化学反应和在液膜中的扩散共同为过程的控制步骤	141
5.8	从钢液中析出气体	142
5.8.1	氮从钢液中析出	142
5.8.2	氢从钢液中析出	143
5.9	冰铜吹炼	144
5.9.1	冰铜吹炼的化学反应	144
5.9.2	造渣期的反应步骤	144
5.9.3	造渣期的控制步骤	145
5.10	碳氧反应	149
5.10.1	碳氧反应的步骤	149
5.10.2	钢液中碳、氧扩散为控制步骤	150
第 6 章	液-液相反应	154
6.1	界面现象及其机理	154
6.1.1	界面现象	154
6.1.2	界面现象产生的机理	155
6.2	两个连续液相间的传质与化学反应	158
6.2.1	化学反应进行的位置	158
6.2.2	过程的控制步骤	159

6.2.3	只发生一个化学反应的体系	159
6.2.4	发生多个化学反应的体系	167
6.3	分散相与连续相间的传质和化学反应	177
6.3.1	过程的控制步骤	177
6.3.2	只发生一个化学反应	178
6.3.3	同时发生多个化学反应	186
第7章	液-固相反应	197
7.1	溶解	197
7.2	一种物质溶解——不形成致密剩余层	197
7.2.1	被溶解物质在液膜中的扩散为控制步骤	198
7.2.2	被溶解物质与溶剂的相互作用为控制步骤	198
7.2.3	被溶解物质与溶剂的相互作用及其在液膜中的扩散共同为控制步骤	199
7.3	一种物质溶解——溶解前后固体颗粒尺寸不变	201
7.3.1	被溶解物质与溶剂的相互作用为控制步骤	201
7.3.2	被溶解物质在液膜中的扩散为控制步骤	202
7.3.3	被溶解物质在剩余层中的扩散为控制步骤	203
7.3.4	被溶解物质与溶剂的相互作用及其在液膜中的扩散共同为控制步骤	204
7.3.5	被溶解物质在剩余层中的扩散及其与溶剂的相互作用共同为控制步骤	205
7.3.6	被溶解物质在剩余层中的扩散和在液膜中的扩散共同为控制步骤	207
7.3.7	被溶解物质在剩余层中的扩散、在液膜中的扩散及其与溶剂的相互作用 共同为控制步骤	208
7.4	多种物质同时溶解——溶解过程固体颗粒尺寸变化	210
7.4.1	被溶解物质在液膜中的扩散为控制步骤	210
7.4.2	被溶解物质与溶剂的相互作用为控制步骤	211
7.4.3	被溶解物质与溶剂的相互作用及其在液膜中的扩散共同为控制步骤	212
7.5	多种物质同时溶解——溶解前后固体颗粒尺寸不变	214
7.5.1	被溶解物质与溶剂的相互作用为控制步骤	214
7.5.2	被溶解物质在液膜中的扩散为控制步骤	215
7.5.3	被溶解物质在剩余层中的扩散为控制步骤	216
7.5.4	被溶解物质在液膜中的扩散及其与溶剂的相互作用共同为控制步骤	216
7.5.5	被溶解物质在剩余层中的扩散及其与溶剂的相互作用共同为控制步骤	218
7.5.6	被溶解物质在剩余层中的扩散和在液膜中的扩散共同为控制步骤	220
7.5.7	被溶解物质在剩余层中的扩散、在液膜中的扩散及其与溶剂的相互作用 共同为控制步骤	221
7.6	浸出	223