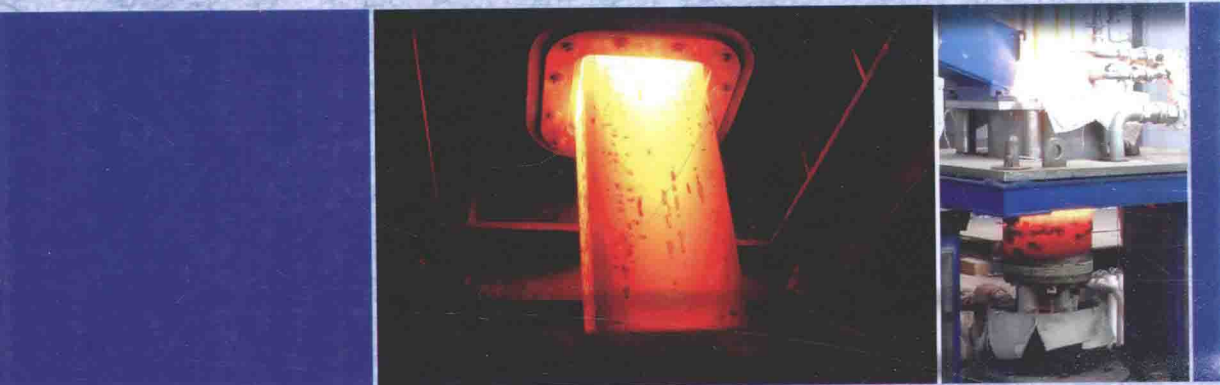


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

电渣冶金学



姜周华 董艳伍 耿鑫 刘福斌◎编著



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

电渣冶金学

姜周华 董艳伍 耿 鑫 刘福斌 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在介绍电渣冶金基本理论的基础上,介绍了电渣冶金领域的新技术及近些年来数值模拟技术的应用,主要包括:电渣炉渣的物理性质、化学性质及与电渣过程有关的反应,渣的选择与应用,电渣重熔参数的选择与制定,电渣冶金新技术,电渣冶金过程的传输现象,电渣重熔数学模型的新进展以及电渣锭常见质量问题等。

本书可作为高校冶金、材料学科相关专业本科生、研究生的学习教材,也可供相关企业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电渣冶金学/姜周华等编著. —北京:科学出版社, 2015

(现代冶金与材料过程工程丛书/赫冀成主编)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-046799-7

I. 电… II. 姜… III. 电渣熔炼 IV. TF14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 303751 号

责任编辑:张淑晓 罗 娟/责任校对:何艳萍 张小霞

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

*

2015 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 12 月第一次印刷 印张: 33

字数: 635 000

定价: 160.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“985 工程”

现代冶金与材料过程工程科技创新平台资助

《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 杨红英 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，王国栋院士率领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（ $3\sim 5\mu\text{m}$ ）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(例如,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、产品屈服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 转炉长寿命技术、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。大尺寸泡沫铝板材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。

依据热力学第一定律和第二定律，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

2000年年初,东北大学出版社出版了我的专著《电渣冶金物理化学及传输现象》一书,距今已经接近16年了。在该书的前言中,我预计:“在新的世纪里,电渣冶金技术仍将具有强大的生命力。”事实上,在21世纪开始的最近10多年中,电渣冶金技术在国内外得到超乎想象的快速发展。主要表现在:(1)世界各地新建了大量的电渣炉设备,产能迅速扩张,几乎是翻了两番;(2)电渣冶金新技术的开发和推广掀起了一个大的高潮,以熔速控制和气氛保护为主要特征的新一代电渣炉已成为新建电渣炉设备的主流,以导电结晶器为核心技术的各种新的电渣冶金技术不断涌现;(3)电渣炉和电渣产品的大型化已成为最近电渣冶金技术发展的重要特征之一,世界各地陆续新建了100t以上的特大型电渣炉10多台,而10~100t之间的大型电渣炉则更多;(4)电渣产品在国民经济的各个领域得到了大量的推广应用,这主要得益于现代装备制造业,如核电、火电、水电、油气开采、海洋工程、铁路、航空航天等领域对高端材料的需求的不断增加。电渣冶金领域今后的发展将从产量向质量转变,从粗放向精细化转变。可以预计,到21世纪中叶,电渣产品在能源、环保、交通、海洋以及航空航天等高端装备制造中的应用将更加广泛,前景十分广阔。电渣冶金技术的研发动力仍然十分强劲。

最近10多年中,东北大学电冶金实验室在电渣冶金领域也投入了大量的人力物力,进行了新理论、新工艺和新装备的研发和推广。实验室的多名老师和30多名硕士生和博士生参加了电渣冶金领域的科研工作,取得了一系列理论和实际应用成果。为此,在《电渣冶金的物理化学及传输现象》一书的基础上,总结我们实验室这些年最新研究成果和国内外电渣冶金技术的新发展,我组织了我们的实验室的几位年轻老师编撰了这本书。书中从电渣冶金基本原理、工艺技术(尤其是电渣冶金新技术)、渣系及其性能、数值模拟技术及常见电渣钢质量问题等多个方面对电渣冶金学进行了比较全面的阐述。作者试图将这些内容融会贯通,使读者不仅可以了解电渣冶金学的相关物理化学及传输现象、电渣冶金的工艺技术及生产过程,而且对电渣冶金新技术有进一步的认识。

《电渣冶金学》共分为9章,系统介绍了电渣熔渣的物理性质;熔渣的化学性质及与电渣过程有关的反应;渣系的选择与应用;电渣重熔参数的选择与制定;电渣冶金新技术;电渣冶金过程的传输现象;电渣重熔过程数学模型的新进展;电渣锭常见质量问题等内容。

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

本书是东北大学电冶金实验室师生多年科研成果的总结，既重视电渣冶金学的基本原理，又反映电渣重熔技术的最新进展，具有很强的针对性和实用性。本书可作为钢铁冶金、有色冶金、冶金物理化学和材料等相关专业本科生、研究生的学习教材，也可供电渣重熔技术应用、电渣重熔设备制造及使用单位的工程技术人员参考。

本书第1章、第4章~第6章及第9章由姜周华撰写，第2章和第3章由董艳伍撰写，第7章由耿鑫撰写，第8章由刘福斌撰写。全书由董艳伍统稿，姜周华主审。

本书的出版得到了东北大学“985工程”现代冶金与材料过程工程科技创新平台的资助。在撰写本书过程中参阅了大量书籍及论文，作者在此谨向文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者理论水平及实践经验所限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

姜周华

2015年9月于东北大学

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 电渣冶金在特种冶金中的地位	1
1.2 电渣重熔的基本原理	2
1.3 电渣重熔的基本特点	3
1.4 电渣冶金的分类	4
1.5 电渣冶金技术的发展过程及趋势	8
1.5.1 国外电渣冶金技术的发展	8
1.5.2 国内电渣冶金技术的发展	13
1.5.3 展望	15
参考文献	18
第 2 章 电渣冶金炉渣的物理性质	21
2.1 熔渣的基本概念	21
2.2 电渣冶金用渣系组成、来源及组元的作用	21
2.3 炉渣在电渣冶金中的作用	22
2.4 相图	24
2.4.1 氟化物单元系	25
2.4.2 二元系	26
2.4.3 三元系	33
2.4.4 四元系	43
2.5 电导率	46
2.5.1 基本概念	46
2.5.2 电导率的测量方法	48
2.5.3 常见 ESR 炉渣的电导率	54
2.6 密度	68
2.6.1 CaF_2 基渣系的密度	70
2.6.2 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 三元系的密度	75
2.7 黏度	77
2.8 表面张力和界面张力	85

2.8.1	基本概念	85
2.8.2	表面张力测试方法	89
2.8.3	界面张力测试方法	94
2.8.4	熔渣界面性质对电渣重熔工艺的影响	96
2.8.5	常见 ESR 渣系的表面张力和界面张力	97
2.9	热物理性质	109
2.9.1	热容	109
2.9.2	导热系数	111
2.9.3	熔渣的黑度	119
2.10	渣系物理性质计算模型	121
2.10.1	含氟渣系电导率模型	121
2.10.2	含氟渣系黏度模型	123
2.10.3	表面张力计算模型	128
	参考文献	129
第3章	熔渣的化学性质及电渣过程与熔渣有关的反应	134
3.1	熔渣组元的活度	134
3.1.1	二元渣系组元的活度	134
3.1.2	三元渣系组元的活度	135
3.1.3	四元渣系组元的活度	140
3.1.4	多元渣系组元的活度计算方法	140
3.2	熔渣的硫化物容量	144
3.2.1	炉渣硫容量的定义	145
3.2.2	熔渣的硫容量模型	146
3.2.3	二元渣系的硫容量	150
3.2.4	三元渣系的硫容量	151
3.2.5	电渣过程硫的反应	152
3.2.6	影响重熔过程脱硫反应的因素	153
3.3	熔渣中氢的行为	157
3.3.1	熔渣中氢(H_2)和水(H_2O)溶解过程的物理化学分析	157
3.3.2	气相中水向熔渣——钢液的渗透机理	166
3.3.3	气氛中水在熔渣中渗透率测定方法及结果	167
3.4	熔渣中氮的溶解度	171
3.5	熔渣的成分变化及其挥发性	175
3.6	电渣过程碳的反应	180
3.7	电渣重熔过程磷的行为	180

3.8 电渣重熔过程元素的成分变化	182
3.8.1 合金元素氧化和还原的机理	182
3.8.2 电渣过程氧的行为、来源及渣的传氧能力	183
3.8.3 渣中氧化物的稳定性与钢中氧含量的关系	185
3.8.4 镍基合金中 Al、Ti 成分的控制	189
3.8.5 电渣重熔中微量 Mg 元素的控制	191
3.9 直流电渣重熔及其电化学反应	193
3.9.1 直流电渣重熔的意义	193
3.9.2 直流电渣重熔的熔化速度和比电耗	194
3.9.3 直流电渣过程中的电化学反应	195
3.9.4 直流电渣重熔钢锭的质量	198
参考文献	200
第 4 章 渣系的选择与应用	205
4.1 渣系对 ESR 产品质量及技术指标的影响	205
4.1.1 渣系对电渣过程技术指标的影响	205
4.1.2 渣系对电渣锭表面质量的影响	207
4.1.3 渣系对冶金质量的影响	208
4.2 渣系选择原则和常见的电渣重熔渣系	210
4.2.1 渣系选择原则	210
4.2.2 渣系命名方法	211
4.2.3 常见的电渣重熔渣系和应用	212
4.3 无氟渣的开发与应用	219
4.3.1 无氟渣的组成	219
4.3.2 无氟渣的主要性能特点	220
4.3.3 无氟渣的操作工艺特点	223
4.3.4 无氟渣的实际使用效果	223
4.4 酸性渣电渣重熔	226
参考文献	230
第 5 章 电渣重熔工艺参数的选择与制定	232
5.1 电渣炉的电气原理	232
5.2 电渣重熔工艺参数制定的基本原则	235
5.3 电渣重熔工艺参数的分类	236
5.3.1 几何参数	236
5.3.2 基本控制参数	236
5.3.3 目标参数	237

5.4 钢锭结晶质量的衡量方法	238
5.4.1 树枝晶间距	238
5.4.2 枝晶间距与凝固条件的关系	238
5.4.3 熔化速度与局部凝固时间的关系	241
5.4.4 ESR 钢锭的金属熔池形状与钢锭质量的关系	243
5.4.5 热量传递对 ESR 金属熔池形状的影响	244
5.5 工艺参数对主要目标参数的影响	246
5.5.1 电极直径(充填比)的影响	246
5.5.2 渣系及渣池深度的影响	247
5.5.3 电制度对冶金质量和效率的影响	249
5.6 电渣重熔参数的优化匹配	251
5.7 ESR 过程工艺参数的变化及工艺控制模型	256
5.7.1 恒功率重熔时各参数的变化	256
5.7.2 递减功率重熔的工艺要求	258
5.7.3 递减功率重熔的控制方法	259
5.7.4 工艺控制数模	260
参考文献	260
第 6 章 电渣冶金新技术	261
6.1 可控气氛电渣重熔技术	261
6.1.1 可控气氛电渣炉的产生背景	261
6.1.2 惰性气体(Ar、N ₂)或者干燥空气保护电渣炉	262
6.1.3 加压电渣重熔技术	264
6.1.4 真空电渣重熔技术	266
6.2 电渣连铸技术(快速电渣重熔技术)	267
6.3 电渣液态浇注技术	279
6.3.1 导电结晶器技术	279
6.3.2 电渣液态浇注技术的特点	282
6.3.3 电渣液态浇注双金属复合轧辊	282
6.3.4 电渣液态浇注实心钢锭	285
6.4 特厚板坯电渣重熔技术	290
6.5 空心钢锭电渣重熔技术	296
6.5.1 空心钢锭生产方法	296
6.5.2 电渣重熔生产空心钢锭方法	299
6.6 电弧渣重熔技术	306
6.6.1 电弧渣重熔设备及特点	306

6.6.2 电弧渣重熔效果	307
6.7 洁净金属形核铸造技术	309
6.7.1 设备及特点	309
6.7.2 应用 CMNC 技术生产燃气轮机涡轮盘	310
6.7.3 CMNC 关键技术	311
6.8 电渣法制备钛锭	311
参考文献	312
第 7 章 电渣冶金过程的传输现象	315
7.1 电渣重熔过程热平衡	315
7.2 电渣重熔过程传热特性的实验研究	318
7.2.1 实验设备及主要测试方法	318
7.2.2 实验结果及讨论	320
7.3 用传热学分析电渣锭的表面质量	324
7.3.1 电渣锭表面光滑成型的本质和条件	324
7.3.2 影响电渣锭表面质量的主要因素	324
7.3.3 重熔过程钢锭从下往上表面质量的差异	328
7.4 渣池传输现象的微分方程	328
7.4.1 描述渣池传输现象的基本微分方程	329
7.4.2 轴对称柱坐标下渣池电磁场、流场和温度场的微分方程	331
7.5 渣池中电位、电流及发热分布的数学模拟	332
7.5.1 模型的数学描述	333
7.5.2 实验条件及数据	335
7.5.3 计算结果及讨论	335
7.5.4 小结	340
7.6 渣池流体流动和温度分布的模拟计算	341
7.6.1 主导方程	341
7.6.2 壁函数	341
7.6.3 边界条件	342
7.6.4 实验型电渣炉的模拟计算结果	345
7.6.5 工业电渣炉的模拟计算结果	350
7.7 渣面以上辐射传热的理论计算	353
7.7.1 模拟的数学描述	354
7.7.2 计算结果及分析	356
7.7.3 小结	359
7.8 ESR 钢锭凝固模型的数学描述	359