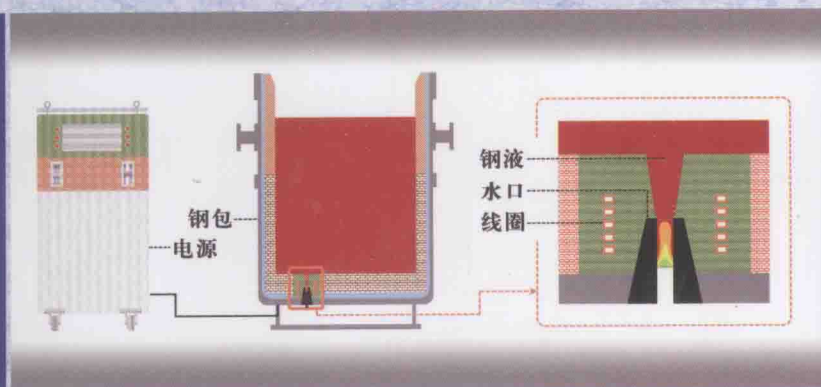


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

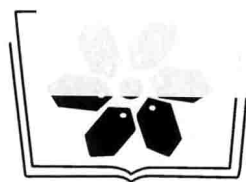
电磁冶金新技术



王 强 赫冀成 刘 铁 等◎著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

“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

电磁冶金新技术

王 强 赫冀成 刘 铁 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部关于电磁场技术在冶金和材料制备科学领域中应用的专著。全书首先归纳总结了电磁冶金技术的基础理论。然后对传统电磁冶金技术进行了简介,其中包括基本原理、发展历程和现状。在此基础上,重点对作者研究团队最近研发的电磁冶金新技术进行详细阐述,内容包括不使用引流砂的钢包电磁感应加热出钢技术、钢的电磁旋流水口连铸技术、利用两段式结晶器的软接触电磁连铸技术以及强磁场条件下的材料制备技术等。最后对一些具有发展前途的其他新型电磁冶金技术也进行了简要介绍和展望。本书主要反映了作者等在电磁冶金领域最新的有代表性的研究成果。

本书可供从事冶金工程、材料科学与工程等专业的科研、生产、设计人员以及高等院校相关专业的师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁冶金新技术/王强等著. —北京:科学出版社, 2015.3

(现代冶金与材料过程工程丛书/赫冀成主编)

ISBN 978-7-03-043669-6

I. 电… II. 王… III. 电磁流体力学-应用-冶金 IV. TF19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 046073 号

责任编辑:张淑晓 孙静惠 张 星/责任校对: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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:22 3/4

字数:458 000

定价:118.00 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,利用有限元素流分析方法,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、无氯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

序

电磁冶金技术是将电磁能和电磁力应用于诸多冶金过程而发展起来的，随着冶金技术的快速发展以及电磁流体力学理论的日益完善而形成的一个新兴的交叉学科。

电磁冶金技术具有节能、环保和可精确控制等优越性，在国际上越来越受到重视。法国于 1978 年成立了电磁冶金技术的专门实验室，开展电磁流体力学在冶金中的应用研究。日本钢铁协会从 1985 年至今，连续设立和电磁冶金相关的研究会，推动日本官、产、学、研在该领域的进展。从 20 世纪 80 年代后期开始，以日本和法国为中心，韩国、美国、欧洲和前苏联等国家和地区也都竞相加大在这一领域的投入，以期提高行业的竞争力。时至今日，电磁冶金的重大技术，如电磁搅拌、电磁铸造、电磁制动以及电磁悬浮熔炼等已在生产企业获得广泛应用。

中国东北大学是国内较早开展电磁冶金研究的高校之一。迄今不仅形成了一支实力很强的专业研究队伍，而且建成了高水平的研究基地。1999 年初，该校与上海宝山钢铁集团公司共建“宝钢-东大材料电磁过程联合研究中心”。2000 年，东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室成立。该实验室 2003 年经科技部批准成为省部共建国家重点实验室培育基地，2012 年被国家发改委批准为电磁冶金技术及装备国家地方联合工程实验室。目前，该实验室是我国从事电磁冶金技术研究实力最强、影响力最大的单位之一，是中国金属学会电磁冶金与强磁场材料科学分会的挂靠单位。近年来，该实验室在国家自然科学基金项目、“863”计划与“973”计划项目和高等学校学科创新引智计划项目的支持下，在钢铁冶金和有色冶金领域取得了许多创新性的研究成果。在此基础上，赫冀成教授、王强教授等学者经过归纳、总结撰写了本书——《电磁冶金新技术》。

本书的鲜明特点是，在较系统地阐述电磁冶金的基本理论和概要地介绍该领域最新研究进展的基础上，深入论述了著者近几年的部分最新研究成果，主要包括不使用引流砂的钢包电磁感应加热出钢技术、钢的电磁旋流水口连铸技术、利用两段式结晶器的软接触电磁连铸技术以及强磁场条件下的材料制备技术等。这些创新性的研究成果具有重要的实用价值和广阔的应用前景，将有助于推动电磁

冶金技术的进步和发展。

本书可供从事冶金、材料专业和相关研究领域的科技人员以及高等院校相关专业的师生阅读和参考，是一本有理论、有实践的参考书。

段瑞钊

东北大学名誉教授

钢铁研究总院名誉院长

中国工程院院士

2014年12月

前 言

近年来,随着冶金工业的迅猛发展,我国成为名副其实的金属生产大国。自1996年我国粗钢年产量突破1亿t以后,我国粗钢产量快速增长,2000年以后,发展势头越发迅猛。2013年,我国粗钢产量达7.7904亿t,超过世界粗钢总产量的一半。同时,我国的有色金属行业也在高速发展。2013年我国全年累计原铝产量2195.6万t,同比增长11.6%;2013年我国原镁、镁合金、镁粉产量较2012年均有新增长,其中镁合金产量增幅最为显著,达到29.78万t;2013年我国的精炼铜产量为683.9万t,增幅略高于2012年的11%。但是,我国的冶金工业面临产品结构不合理、产能过剩、能耗高、污染严重等亟须解决的问题,而且一些高性能金属产品还主要依靠进口。另外,随着科学技术的高速发展,对材料的性能要求也越来越严格,冶金工业除了要高效生产、提高产品质量外,还必须降低能耗,发展环境友好的绿色产业链。为解决制约我国冶金工业做大做强的关键问题,突破技术瓶颈,必须在冶金和材料制备过程中实施新的方法和手段。电磁场等外场技术为此提供了可能。电磁场技术在冶金和材料制备领域的应用促进了多学科交叉、融合,产生了一系列新的技术和方法,形成了许多电磁冶金技术,有的已经在冶金领域获得了广泛应用,创造了巨大的社会效益和经济效益。

电磁冶金是电磁场理论和电磁流体力学在冶金和材料科学领域应用的新兴交叉学科,它利用电磁场技术对冶金和材料制备过程的传输现象等进行有效控制,优化冶金过程,进而提高金属制品的组织结构和最终使役性能。该技术在20世纪80年代末逐步兴起,随后在欧洲和日本获得了长足发展和进步。在加强基础研究的同时,许多电磁冶金技术走向市场,在有色金属、钢铁生产中获得了广泛应用。我国从90年代开始大力开展相关研究,奋起直追,也获得了大量的研究成果,一些电磁冶金设备也开始了国产化,在电磁冶金领域占有一席之地。目前,电磁冶金领域的研究一直方兴未艾,除了传统的电磁冶金技术逐步加强外,一些新的具有广泛应用背景的电磁冶金新技术也开始诞生,形成了多个具有代表性的研究成果,并逐步开始产业化,引起本领域的极大关注。

在上述背景下,作者在总结中外电磁冶金领域研究进展的基础上,将从事多年的电磁场技术用于冶金和材料制备过程领域的研究成果理论化和系统化,著成此书。因此,本书是一部关于电磁场技术在冶金和材料制备科学领域应用的专著,主要反映了作者等在电磁冶金领域最新的有代表性的研究成果。希望借此进

一步推动电磁冶金技术的发展,为电磁场技术和电磁流体力学的实际应用提供理论和实践基础,同时也将带动电磁场用于其他相关领域研究的深入发展。

本书共8章。第1章对电磁冶金技术的分类、历史和现状以及发展前景进行了简明扼要的阐述。第2章针对本书所涉及的电磁场理论和电磁流体力学的基本理论进行总结和分析。第3章对传统电磁冶金技术的原理、效果和现状进行了归纳和介绍。第4章~第7章对作者课题组最近开发的电磁冶金新技术进行了详细阐述,内容包括不使用引流砂的钢包电磁感应加热出钢技术、钢的电磁旋流水口连铸技术、利用两段式结晶器的软接触电磁连铸技术以及强磁场条件下的材料制备技术等。第8章对一些具有发展前途的其他新型电磁冶金技术进行了简要介绍和展望。

本书由东北大学王强教授、赫冀成教授担任主笔,负责全书的统稿和整体修改工作。具体撰写分工为:第1章,王强、苑轶;第2章,苑轶、王强;第3章,刘铁、王强;第4章,刘铁;第5章,赫冀成、李德伟;第6章,李国建;第7章,刘铁、李国建;第8章,王凯。本书在撰写过程中,还得到本课题组毕业的博士高翱、李德军、刘兴安、李宏侠、金百刚、曹永泽和刘印等的大力协助,他们在攻读博士学位期间的研究工作和成果是本书的基本素材。东北大学材料与冶金学院赵越、王慧敏、杜娇娇、高杨、董蒙、张少凤等研究生在本书数据搜集、资料整理等方面做了大量工作。另外,书中还参考和引用了部分国内外同行的科研成果。钢铁研究总院殷瑞钰院士和大连理工大学李廷举教授在百忙之中审阅了全书,提出了许多宝贵的建议和修改意见,殷瑞钰院士还欣然为本书作序。在此,作者一并表示诚挚的谢意!

由于作者的水平有限,加之电磁冶金涉及范围广泛、内容覆盖面宽,有些技术和方法尚在开发之中,我们的理解还很肤浅,有些方面还涉及相关企业的技术秘密不便深入展开,故书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

赫冀成 王 强

2014年10月于沈阳

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁冶金技术的发展历史、现状与趋势	1
1.2 电磁冶金技术分类	3
1.2.1 时变磁场冶金技术	4
1.2.2 静磁场冶金技术	5
1.2.3 电场冶金技术	6
1.2.4 复合场冶金技术	7
1.3 钢的连铸过程简介与电磁冶金新技术的兴起	8
参考文献	10
第 2 章 电磁冶金技术基本理论	11
2.1 电磁场基本理论	11
2.1.1 场方法	11
2.1.2 麦克斯韦方程组	14
2.1.3 坡印亭定理	22
2.1.4 涡电流	23
2.2 稳态强磁场基本理论	24
2.2.1 洛伦兹力	24
2.2.2 磁化力	25
2.2.3 磁力矩	27
2.2.4 磁化能	27
2.2.5 磁极间相互作用	28
2.3 流体力学基本方程	28
2.3.1 连续性方程	28
2.3.2 运动方程	29
2.3.3 能量守恒方程	30
2.4 电磁流体力学基本理论	31

2.4.1 电磁流体力学基本方程	31
2.4.2 液态金属内电磁力分布	33
2.4.3 电磁流体力学的无量纲参数	37
参考文献	40
第3章 传统电磁冶金技术	41
3.1 电磁感应加热技术	41
3.1.1 概念及发展历程	41
3.1.2 电磁感应加热原理	42
3.1.3 电磁感应加热装置	42
3.1.4 电磁感应加热技术的应用	43
3.2 利用洛伦兹力的电磁冶金技术	44
3.2.1 钢的电磁搅拌技术	44
3.2.2 电磁制动技术	47
3.2.3 电磁无模铸造技术	49
3.2.4 电磁离心铸造技术	53
3.2.5 电磁分离夹杂物技术	56
3.2.6 冷坩埚熔炼技术	58
3.3 利用磁化力的磁选技术	61
3.3.1 概念及发展历程	61
3.3.2 磁选技术的原理	62
3.3.3 磁选技术的装置	62
3.3.4 磁选技术在其他领域的应用	62
3.4 脉冲磁场冶金技术	63
3.4.1 概念及发展历程	63
3.4.2 脉冲磁场冶金技术原理	64
3.4.3 脉冲磁场冶金技术装置	64
3.4.4 脉冲磁场冶金技术的应用	65
3.5 电场冶金技术	67
3.5.1 电解技术	67
3.5.2 电镀技术	70
3.5.3 电渣重熔冶金技术	72
3.5.4 电弧熔炼技术	74
参考文献	77

第 4 章 钢包电磁感应加热出钢技术	82
4.1 电磁感应加热出钢技术的产生背景及原理	82
4.1.1 洁净钢生产技术	82
4.1.2 钢包出钢技术现状	84
4.1.3 电磁感应加热出钢技术的原理及优点	87
4.2 电磁感应加热出钢技术的可行性验证	89
4.2.1 热态实验的材料及方法	89
4.2.2 电磁出钢系统中上水口内 Fe-C 合金状态分析	90
4.2.3 电磁出钢效果的影响因素	91
4.2.4 上水口内 Fe-C 合金固/液界面位置的确定	97
4.2.5 上水口内封堵层厚度的控制	103
4.3 电磁感应加热出钢技术工业试验的数值模拟预测	109
4.3.1 数值模拟方法	109
4.3.2 上水口内 Fe-C 合金随时间的温度分布	113
4.3.3 线圈结构参数对烧结 Fe-C 合金表面温度的影响	114
4.3.4 电流参数对烧结 Fe-C 合金表面温度的影响	118
4.3.5 不同钢液温度对出钢效果的影响规律	120
4.3.6 不同 Fe-C 合金熔点对出钢效果的影响规律	121
4.3.7 钢包壳的安全性分析	122
4.4 钢包改造及模铸工业试验	123
4.4.1 电磁感应加热出钢系统的结构设计	123
4.4.2 电磁感应加热出钢装置辅助设备及其安全性分析	126
4.4.3 电磁感应加热出钢技术的模铸工业应用效果	130
参考文献	133
第 5 章 钢的电磁旋流水口连铸技术	136
5.1 电磁旋流水口连铸技术产生背景与原理	136
5.1.1 水口内偏流对连铸的危害	136
5.1.2 目前改善水口内偏流的方法	137
5.1.3 机械式旋流的冶金效果及优缺点	138
5.1.4 电磁旋流水口连铸技术的提出及原理	141
5.2 电磁旋流水口连铸技术可行性分析	142
5.2.1 与机械式旋流的对比计算	142
5.2.2 低熔点合金实验	144
5.3 浸入式水口和结晶器内磁场与电磁力分布	146