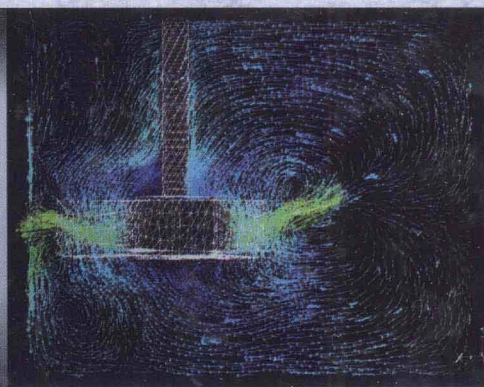
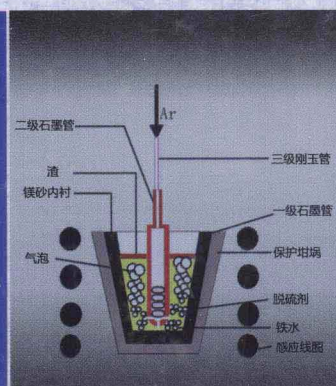


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

气泡微细化 及原位脱硫技术



刘 燕 张延安 赫冀成 等◎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

气泡微细化及原位脱硫技术

刘 燕 张延安 赫冀成 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕提出的铁水炉外原位脱硫技术展开阐述。首先,采用高速照相、图像分析、因次分析和数值模拟等技术从机械搅拌方式、气液吸收、均混时间、气泡利用率等角度系统地研究喷气精炼过程中气泡微细化的规律,在比较各种桨型和搅拌方式的基础上提出偏心搅拌这一气泡微细化方法。接下来,进行原位脱硫剂的热力学与动力学研究,比较多种原位脱硫剂的脱硫效果。最后,结合气泡微细化和原位脱硫的实验室研究结果,进行 1t 规模的高温实验,脱硫率高达 90%。

本书可供从事铁水炉外脱硫、熔体喷气精炼和气泡微细化专业的高年级本科生、研究生、教师和工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

气泡微细化及原位脱硫技术/刘燕等著. —北京:科学出版社,2012

(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 978-7-03-036371-8

I. 气… II. 刘… III. 铁水-脱硫-熔炼 IV. TF535.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 318811 号

责任编辑:张淑晓 张 星/责任校对:郭瑞芝

责任印制:钱玉芬/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

*

2012年12月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2012年12月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:307 000

定价:80.00 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。大尺寸泡沫铝板材料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 $12\,082\text{ kW}\cdot\text{h/t Al}$,吨铝平均节电 $1123\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。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

本书在综合铁水炉外颗粒镁脱硫和 KR 脱硫技术的基础上,提出原位法机械搅拌脱硫的新思路,即以 MgO 镁基脱硫剂取代颗粒镁,在铁水中原位生成金属镁蒸气,靠惰性载气喷吹带入铁水熔池并在机械搅拌的作用下细化和分散镁蒸气气泡,从而达到提高镁脱硫效率的目的。本书围绕这一思路,系统阐述气泡的微细化与均匀分散、脱硫剂原位产生镁蒸气的热力学与动力学和工业中试等方面的最新研究成果。

本书共分 11 章,第 1 章系统地分析颗粒镁脱硫法和 KR 脱硫法的利弊,提出铁水炉外原位脱硫的新方法,阐述原位脱硫过程气泡微细化的重要意义以及研究气泡微细化的方法和手段。第 2 章和第 3 章系统研究搅拌模式对气泡微细化的影响规律,研究结果表明:单向转动模式易形成漩涡,导致气泡在搅拌桨轴处并聚;双向和间歇的搅拌模式可以抑制漩涡的形成,促进气泡的微细化;与中心搅拌相比,偏心搅拌更利于气泡微细化;在双向和间歇的搅拌模式下,搅拌桨转速和长度的增加有利于气泡微细化;即使在单向搅拌模式下,打孔桨也可以削弱切向流,抑制漩涡的形成,或者至少可以延长漩涡的形成时间,形成漩涡的时间比无孔桨的延长了 2~3 倍。第 4 章在水模型实验的基础上,分析影响气泡尺寸的各种因素,应用因次分析得到气泡平均直径的准数方程: $\frac{d_B}{D} = 0.00624 (nD/v)^{-0.256} (Q/vD^2)^{-0.0615} (h/D)^{-0.380} (d_0/D)^{0.113} (H/D)^{-0.158} (We)^{-0.0826}$ 。第 5 章通过 $\text{CO}_2\text{-NaOH-H}_2\text{O}$ 体系吸收过程,研究容积传质系数和气体利用率的影响因素及其作用规律,结果表明:偏心搅拌时,容积传质系数和 CO_2 利用率随转速的增大而增大;直吹和侧吹下的机械搅拌有利于气泡在熔池内迅速扩散,能促进气液的充分接触,提高容积传质系数和 CO_2 利用率。第 6 章研究气泡微细化过程气含率与容积传质的系数关系。第 7 章针对铁水包高径比较小的特点,提出气泡有效利用率的新概念。通过理论分析及推导,得到气泡有效利用率与流量、气泡直径、传质系数的关系式。第 8 章考察搅拌模式、转速、中心与偏心搅拌、喷气流量等因素对均混时间的影响,研究结果表明:双向搅拌模式的均混时间小于间歇搅拌模式的均混时间,单向搅拌模式的均混时间最长;中心和偏心搅拌模式下转速对均混时间的影响规律相同,即无论喷气与否,均混时间均随着搅拌转速的增加而缩短,而且,在同一搅拌转速下,喷气加机械搅拌模式的均混时间比无喷气机械搅拌的均混时间短。第 9 章应用 FULLENT 和 MIXSIM 软件模拟单相流和两相流机械搅拌的流动型态,并与数码图像

进行比较。通过对单向流中心搅拌模式和偏心搅拌模式的比较发现:中心搅拌模式下,在搅拌桨轴附近形成很大的漩涡,偏心时虽然也有漩涡形成,但偏离轴心。两相流偏心搅拌模式下,漩涡较小且偏离轴心,有利于气体的分散;另外,该模式下侧吹时熔池内流场紊乱,有利于气泡分散。第 10 章和第 11 章分析脱硫剂原位产生镁蒸气的热力学与动力学原理,阐述实验室原位脱硫高温实验和 1t 电炉的扩大试验。在实验室高温实验中比较不同脱硫剂的脱硫效果,并在此基础上进行 1t 电炉的扩大试验,脱硫率达到 90%。

本书第 1 章由张延安撰写,第 2、3、5、8 章由刘燕撰写,第 4 章由刘燕、张延安和任晓冬撰写,第 6 章由刘燕、张延安、任晓冬、赵秋月和王淑婵撰写,第 7 章由刘燕和张延安撰写,第 9 章由刘燕、邵品和赵洪亮撰写,第 10 章和第 11 章由张延安、任晓冬、豆志河和吕国志撰写。全部书稿由张延安审校定稿,并得到赫冀成教授的具体指导。

感谢吕国志、赵洪亮、宋祥平、勾力争、倪培远、吴许建、郭永南、杜靖尧、郭旭桓、朱盼盼、李崇超对本书研究工作做出的贡献。

感谢佐野正道先生对本书研究工作给予的具体指导。

本书部分工作是在国家自然科学基金项目(项目编号:50974035,51074047)资助下进行的,在此深表谢意!

另外,还要感谢“985 工程”现代冶金与材料过程工程科技创新平台的资助。

由于作者水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2012 年于沈阳

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 铁水脱硫预处理技术进展	3
1.3 颗粒镁脱硫工艺技术现状	4
1.4 气液传质理论	8
1.5 气液搅拌反应器的传质特性	11
1.6 气液反应器的研究方法	16
1.7 气泡微细化及其研究方法	25
1.8 本书的研究内容	29
参考文献	31
第 2 章 中心搅拌模式下气泡微细化的实验研究	39
2.1 引言	39
2.2 设备与方法	39
2.3 搅拌模式对气泡微细化的影响	41
2.4 搅拌桨的旋转速度对气泡微细化和分散性的影响	45
2.5 搅拌桨桨叶尺寸对气泡微细化和分散性的影响	48
2.6 喷气流量对气泡微细化的影响	50
2.7 打孔桨对气泡微细化的影响	52
2.8 铁水脱硫过程中喷气精炼的机械搅拌	58
2.9 小结	59
参考文献	60
第 3 章 偏心搅拌模式下气泡微细化的实验研究	62
3.1 引言	62
3.2 设备与方法	62
3.3 搅拌模式和喷嘴结构对气泡微细化的影响	63
3.4 搅拌桨尺寸对气泡微细化的影响	64
3.5 喷嘴浸入深度对气泡微细化的影响	64
3.6 气体喷入方式对气泡微细化的影响	66

3.7	喷枪位置对气泡微细化的影响	66
3.8	搅拌桨偏心度对气泡微细化的影响	67
3.9	偏心搅拌在喷气精炼中的应用	69
3.10	小结	69
	参考文献	69
第4章	气泡微细化过程的因次分析	71
4.1	引言	71
4.2	因次分析的步骤	72
4.3	影响气泡尺寸大小的因素分析	73
4.4	气泡微细化的因次分析	77
4.5	气泡尺寸的准数方程的分析与讨论	82
4.6	小结	86
	参考文献	87
第5章	气泡细化过程吸收速率的研究	88
5.1	引言	88
5.2	原理与方法	88
5.3	中心搅拌模式下吸收速率实验结果与讨论	90
5.4	偏心搅拌模式下吸收速率实验结果与讨论	98
5.5	偏心搅拌模式与中心搅拌模式吸收速率比较	107
5.6	小结	109
	参考文献	110
第6章	气泡细化过程气含率及传质系数的研究	111
6.1	引言	111
6.2	气含率的测定原理与方法	111
6.3	气含率的实验结果与分析	112
6.4	容积传质系数的计算与分析	119
6.5	容积传质系数准数方程的分析与讨论	122
6.6	传质系数与表面更新率的计算	127
6.7	小结	130
	参考文献	132
第7章	气泡有效利用率的理论研究	133
7.1	引言	133
7.2	气泡有效利用率定义	133
7.3	气泡有效利用率公式的理论推导	134
7.4	气泡有效利用率理论与实验的比较分析	140

7.5 两种模拟的比较分析	152
7.6 小结	155
参考文献	155
第8章 气泡微细化实验中均混时间的研究	157
8.1 引言	157
8.2 单搅拌相关参数对混合时间的影响	158
8.3 单喷吹气流量对混合时间的影响	161
8.4 喷吹加搅拌相关参数对混合时间的影响	162
8.5 搅拌式反应器混合时间的数值模拟	163
8.6 数值模拟结果与讨论	165
8.7 小结	178
参考文献	179
第9章 气泡微细化过程中的数值模拟与分析	180
9.1 引言	180
9.2 水模型实验中三维流场的数值模拟	180
9.3 水模型结构及计算区域	182
9.4 搅拌桨的模拟及边界条件	183
9.5 网格划分与数值模拟环境	183
9.6 结果与讨论	184
9.7 小结	201
参考文献	202
第10章 新型脱硫剂的热力学计算	203
10.1 以硅或硅铁为还原剂	203
10.2 以铝为还原剂	206
10.3 以 CaC_2 为还原剂	209
10.4 以钙为还原剂	211
10.5 以碳为还原剂	214
10.6 不同还原剂之间的对比	216
10.7 小结	218
参考文献	218
第11章 新型脱硫剂的实验研究	219
11.1 动力学实验	219
11.2 小型铁水脱硫实验	231
11.3 铁水炉外机械搅拌原位脱硫技术 1t 炉中试	236
11.4 小结	243
参考文献	243

第 1 章 绪 论

1.1 背景及意义

炉外铁水脱硫是铁水“三脱”的重要环节之一,铁水预处理工艺是改善转炉钢水质量和提高生产效率的重要保证,也是现代化钢厂的基本标志之一。采用铁水炉外脱硫技术既可大大减轻高炉脱硫负担,真正实现高产低耗,同时又可使转炉炼钢甩掉脱硫环节,改善连铸坯质量,提高成材率。同时,随着市场对低硫钢、超低硫钢需求的迅猛增长,作为一项重要技术引入生产中的铁水脱硫得到了广泛的关注,先后有许多冶金工作者进行了广泛的研究,发明了形式多样的铁水脱硫预处理方法,这些方法在实际生产中得以推广应用。目前,我国钢铁企业大量采用的铁水脱硫预处理方法主要有搅拌法和喷吹法。不少钢厂经过多年的实践,在引进国外先进设备的基础上,结合国内特点不断改进、优化和创新,采用的铁水脱硫工艺达到国际先进水平。例如,武钢股份有限公司第二炼钢厂(以下简称武钢二炼钢)机械搅拌(KR)法脱硫工艺搅拌头寿命超过 500 次,处理温降 $\leq 28^{\circ}\text{C}$,脱硫的石灰粉剂消耗量仅为 4.69kg/t,脱硫成本仅为 20 元/t,上述指标均已超过国外同类钢厂的水平^[1]。

近几年,国内大力发展镁脱硫铁水预处理工艺,先后引进了美国和以俄罗斯为代表的欧洲国家的铁水脱硫工艺,比较了镁脱硫中混合喷吹法、复合喷吹法和纯镁喷吹法三种工艺。实践证明,纯镁脱硫法具有以下四个优势^[2]。

(1) 脱硫效率高。纯镁喷吹法脱硫效率 $>95\%$,而复合喷吹法约为 80%,混合喷吹法脱硫效率不稳定。

(2) 处理时间短。纯镁喷吹预处理时间为 5~8min,而复合喷吹法约为 10min。

(3) 处理温降小。纯镁喷吹处理过程温降平均为 8.12°C ,而复合喷吹法温降为 8~ 14°C 。

(4) 铁损低。纯镁喷吹的平均铁损为 7.1kg/t,而复合喷吹法为 10~12kg/t。

虽然纯镁铁水脱硫工艺有很多优点,但仍然存在一些问题^[3,4]。一是纯镁铁水脱硫使用的脱硫剂量较其他工艺少得多,产生的渣量也少得多,因此欲将脱硫产物的铁水渣全部扒掉很困难。二是镁气化形成大量的镁蒸气气泡,镁蒸气的大气泡停留时间短,气液接触时间短,导致镁的利用率降低。文献[5]和文献[6]研究了镁气泡大小对镁脱硫效率的影响(图 1.1 和图 1.2)气泡的大小对镁的脱硫效率影响很大。显然,在金属镁脱硫过程中,细化和分散镁蒸气气泡是提高金属镁脱硫效

率和提高镁利用率的关键。

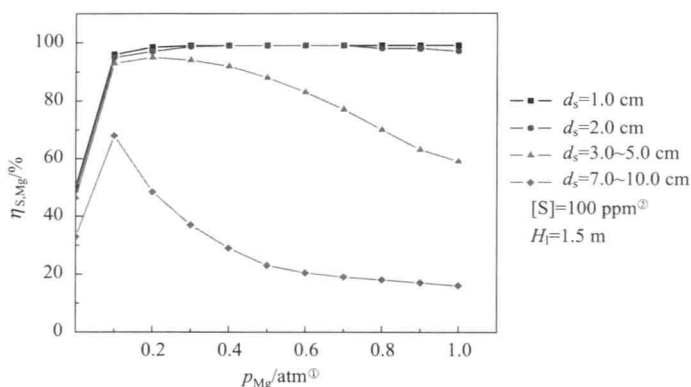


图 1.1 镁气泡对脱硫效率的影响

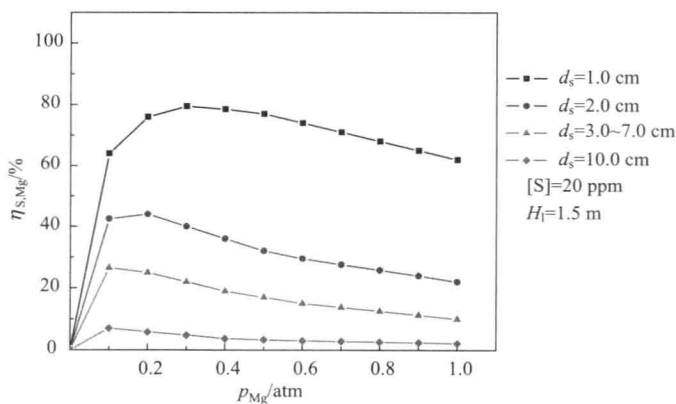


图 1.2 镁气泡对脱硫效率的影响

为此,本课题组在综合机械搅拌法和金属镁颗粒喷吹脱硫技术的基础上,提出了原位机械搅拌法铁水炉外脱硫的新思路^[7]。即以 MgO 基脱硫剂取代金属镁^[8,9],在铁水中原位生成金属镁蒸气,在惰性气体的带动下喷吹进入铁水熔池,在机械搅拌的作用下细化和分散镁蒸气气泡,从而达到提高镁脱硫效率和镁利用率的目的。因此,为了实现原位机械搅拌法铁水炉外脱硫的新思路,必须开展两方面的研究。一是原位法产生镁蒸气脱硫剂的研制;二是基于精炼过程的气泡微细化和分散的方法。

① atm 为非法定单位, $1\text{ atm}=1.013\ 25\times 10^5\text{ Pa}$ 。

② ppm 量级为 10^{-6} 。