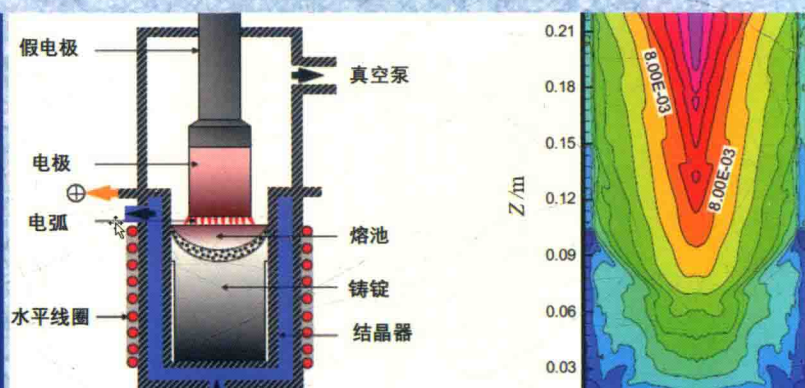


现代冶金与材料过程工程丛书

真空在钢冶金中的应用



龚伟 梁连科◎著

现代冶金与材料过程工程丛书

真空在钢冶金中的应用

龚 伟 梁连科 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书共分为 6 章, 主要内容包括钢的真空冶金过程的物理化学和典型的真空熔炼及精炼装置、工艺及质量问题等。真空冶金过程的物理化学包括真空下碳还原固体金属氧化物能力的影响; 真空下金属熔体的脱氧、脱气; 真空挥发(蒸馏)过程的物理化学及真空下的坩埚反应。典型的真空熔炼过程为真空感应熔炼和真空电弧熔炼。本书介绍了真空感应熔炼的形成、发展, 工作原理, 以及设备设计和工艺质量问题。真空电弧熔炼主要是真空电弧熔炼的理论基础和电气、自动控制及机械设备特点, 并分析了真空电弧熔炼的质量问题、工艺装置发展和安全问题。真空精炼过程主要介绍了 VD、VAD、VOD 及 RH 精炼设备和工艺特点, 分析了各真空精炼工艺的效果。

本书可作为工程师继续教育的学习教材和技术工人的培训教材、高等学校冶金工程专业的教材, 也可供大专院校金属材料及热处理、压力加工、铸造等专业的师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

真空在钢冶金中的应用 / 龚伟, 梁连科著. —北京: 科学出版社, 2018.6
(现代冶金与材料过程工程丛书)

ISBN 978-7-03-057501-2

I. ①真… II. ①龚… ②梁… III. ①真空冶金—应用—炼钢 IV. ①TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 107908 号

责任编辑: 张淑晓 李丽娇 / 责任校对: 樊雅琼

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 东方人华

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

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 240 000

定价: 108.00 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 张廷安

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 张廷安 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；获得国家发明专利 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 年国家科学技术进步奖一等奖。

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 年国家科学技术进步奖一等奖。

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 年国家科学技术进步奖二等奖。

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 年国家科学技术进步奖二等奖。

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、无氟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 年国家科学技术进步奖二等奖。

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 年的国家科学技术进步奖一等奖。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 12082kW·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——葛洲坝水电站一年的发电量。

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 年国家科学技术进步奖二等奖。

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

随着我国经济建设和科学技术的飞速发展,对钢铁材料的质量和性能提出了越来越高的要求。真空技术发展起来之后,近几十年来在钢铁冶金领域中得到了广泛的应用,时间虽短,但解决了大量常压冶金难以解决的问题,尤其在特种合金和特种钢材的熔炼方面发挥了越来越重要的作用。钢铁冶金中应用的真空技术包括真空冶炼、真空脱气和真空浇注等,而真空技术的应用也改变了冶金物理化学条件,因而出现了大量的真空冶金物化问题等待人们去研究和解决。

为了适应钢铁冶金领域中真空技术的快速发展,满足专业技术人员和企业管理人员学习新技术、新工艺的需要,作者在东北大学特殊钢冶金研究所多年授课的特种冶金和炉外精炼课程资料和研究成果的基础上,结合生产实践,大量参考国内外发表的文献资料,编著了这本书。

本书在编写过程中,力求理论性和实用性相结合,既论述了真空冶金过程的物理化学基础问题,又介绍了特种冶金和炉外精炼技术中典型的真空冶金熔炼方法、熔炼工艺和工艺参数。具体内容包括真空感应熔炼、真空电弧熔炼、VD/VOD精炼和 RH 真空精炼等冶炼技术。这种特种熔炼和常规的熔炼手段在一本书中结合是一种新的尝试,希望能为我国的冶金工作者提供更好的参考价值。

本书共分 6 章,第 1、2 章由梁连科撰写,第 3、4 章由龚伟和梁连科撰写,第 5、6 章由龚伟撰写,全书由龚伟统稿。

本书的出版得到了东北大学“985 工程”现代冶金与材料过程科技创新平台的资助。作者在撰写本书的过程中参阅了大量的相关书籍和科技论文,在此谨向文献的作者表示衷心的感谢!在成书过程中,得到了姜周华、战东平和董艳伍老师的大力帮助。文献的整理和图片修正、编辑过程中得到了庞昇、万万、郎凯旋和李涵等研究生的大力支持,在此一并感谢。

由于作者的知识水平和实践经验有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2018 年 5 月

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 真空冶金的意义和应用	1
1.2 真空下化学反应的特点	3
第 2 章 真空冶金过程的物理化学	7
2.1 真空冶金对碳还原固体金属氧化物能力的影响	7
2.1.1 碳作为还原剂的优点和缺点	7
2.1.2 以碳还原 V_2O_5 为例	7
2.2 真空下金属熔体的脱氧	9
2.2.1 铁中氧的活度	10
2.2.2 用氢脱氧	10
2.2.3 当脱氧产物具有挥发性	11
2.2.4 真空下碳脱氧反应	12
2.2.5 真空下金属元素的脱氧能力	13
2.3 真空下钢液的脱气	14
2.3.1 气体在金属中的溶解和溶解度	14
2.3.2 气体在金属和合金中的溶解形式和规律	14
2.3.3 钢液与水蒸气的平衡——钢的氧化与渗氢	16
2.3.4 钢液的真空脱气	20
2.4 真空挥发(蒸馏)过程的物理化学	22
2.4.1 概述	22
2.4.2 真空下金属挥发热力学	22
2.4.3 二元合金熔体的挥发	27
2.4.4 Fe 基合金的挥发系数	31
2.4.5 冶金中真空挥发的实践	33
2.5 真空下金属熔体与耐火材料间的相互作用——坩埚反应	36
2.5.1 高纯耐火(材料)氧化物的热力学性能	36
2.5.2 氧化物的稳定性——氧化物分解自由能	36

2.5.3	MgO 坩埚	37
2.5.4	Al ₂ O ₃ 坩埚	40
2.5.5	ZrO 坩埚	41
第3章	真空感应熔炼	43
3.1	感应炉熔炼的形成和发展现状	43
3.2	感应炉熔炼工作原理	43
3.3	真空感应炉的设计	45
3.3.1	坩埚设计	45
3.3.2	感应器设计	47
3.3.3	真空感应炉的功率计算	49
3.3.4	感应器电气计算	51
3.3.5	计算举例	55
3.4	真空感应炉熔炼工艺	57
3.4.1	感应炉坩埚耐材制作及烘烤	57
3.4.2	装料	60
3.4.3	熔化	61
3.4.4	精炼期	61
3.4.5	出钢和浇注	62
3.5	感应炉真空碳脱氧	62
3.5.1	真空碳脱氧的基本原理	62
3.5.2	真空碳脱氧的特点	64
3.5.3	影响真空碳脱氧的因素	64
3.6	真空感应炉炼钢时钢中[H]的变化	66
3.6.1	真空下的脱氢作用	66
3.6.2	真空脱氢的动力学条件	67
3.7	真空感应炉炼钢时钢中[N]的变化	67
3.7.1	真空感应熔炼的脱氮效果	67
3.7.2	影响真空感应炉中氮质量分数的因素	69
第4章	真空电弧熔炼	71
4.1	概述	71
4.1.1	真空电弧炉的概述及其本质	71
4.1.2	真空电弧熔炼的优点及其适用范围	73
4.2	电弧熔炼理论基础	75
4.2.1	电弧的理论基础	75

4.2.2 电弧的构造及其原因	77
4.2.3 直流电弧的静特征	86
4.2.4 直流电弧的动态特征	87
4.2.5 电弧的能量平衡与温度分布	87
4.2.6 电弧的磁偏吹	91
4.2.7 关于熔池的电磁搅拌与反搅拌问题	98
4.2.8 电弧熔炼的热平衡	100
4.2.9 电弧熔炼中的提纯	101
4.3 真空电弧炉的机械设备	109
4.3.1 真空电弧炉的组成及分类	109
4.3.2 真空电弧炉的合理结构	109
4.3.3 真空电弧炉的机械结构	110
4.4 真空电弧炉的电源与其自动控制	115
4.4.1 真空电弧炉的电源	115
4.4.2 真空电弧炉的自动控制	117
4.5 真空电弧炉熔炼工艺	117
4.5.1 真空电弧炉熔炼的工艺操作概述	117
4.5.2 真空电弧熔炼的分期和各期的任务	119
4.5.3 真空电弧熔炼参数及其确定	121
4.6 VAR 铸锭的质量问题	124
4.6.1 VAR 铸锭成分变化及其成分的均匀性问题	124
4.6.2 VAR 铸锭有害有色金属杂质的去除	125
4.6.3 VAR 脱气的效果	125
4.6.4 VAR 熔炼锭的表面质量问题	128
4.6.5 VAR 铸锭的宏观组织	128
4.7 VAR 熔炼工艺、装置的发展方向	129
4.8 VAR 熔炼的安全问题	129
第 5 章 VD/VAD/VOD 炉的设备和精炼工艺	131
5.1 VD 法——真空吹氩脱气法	131
5.1.1 VD 法的特点	131
5.1.2 VD 法的工艺过程	132
5.1.3 工艺参数	133
5.1.4 VD 炉冶炼工艺	133
5.1.5 VD 开盖钢水温度预报	134

5.1.6	VD 真空处理的精炼效果	136
5.2	VAD 法精炼设备和工艺	139
5.2.1	VAD 法简介	139
5.2.2	VAD 法的主要设备与精炼功能	140
5.3	VOD 法精炼装置和工艺	142
5.3.1	VOD 法精炼装置和工艺概述	142
5.3.2	VOD 法的主要设备	143
5.3.3	VOD 法的基本功能	149
5.3.4	VOD 法精炼工艺	151
5.3.5	转炉式脱碳炉-VOD 冶炼不锈钢工艺	155
5.3.6	VOD 的精炼效果	156
第 6 章	RH 精炼装置及工艺	157
6.1	RH 法概述	157
6.1.1	概述	157
6.1.2	RH 的发展历史	159
6.1.3	RH 适合的钢种	160
6.1.4	RH 装备情况	161
6.2	RH 设备的主要装置	162
6.2.1	真空室及附属设备	162
6.2.2	气体冷却器	163
6.2.3	真空系统	163
6.3	RH 精炼的主要工艺参数	171
6.3.1	处理容量	171
6.3.2	处理时间	172
6.3.3	循环因数	173
6.3.4	循环流量	174
6.3.5	真空度	175
6.4	RH 处理模式	177
6.4.1	轻处理模式	177
6.4.2	本处理模式	178
6.5	RH 精炼工艺	179
6.5.1	RH 法真空脱氢	179
6.5.2	RH 法真空脱氮	179
6.5.3	RH 法真空脱碳	180

6.6 RH 法的效果	183
6.7 RH 法的发展	184
6.7.1 真空吹氧脱碳法	185
6.7.2 RH-KTB 真空吹氧脱碳法	185
6.7.3 RH 喷粉功能	186
参考文献	189

第1章 绪 论

1.1 真空冶金的意义和应用

1. 真空冶金的意义

第二次世界大战后,随着原子能工业、高速和宇宙飞行工业及电子技术的飞速发展,对材料提出了下列要求:①耐高温和超低温(超导);②耐高压;③耐强磁场(加速器);④耐强辐射等。即需要具有高纯度和高完整性的材料。

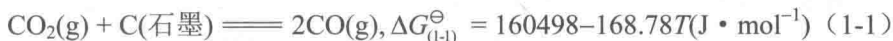
真空下进行冶金可以达到上述要求,是由于:①金属熔池可不与空气、燃烧废气及炉渣接触,避免了沾污;②在不同坩埚中冶炼,可以避免坩埚的沾污;③真空下可更有效地排出有害杂质及气体。

2. 真空冶金的应用

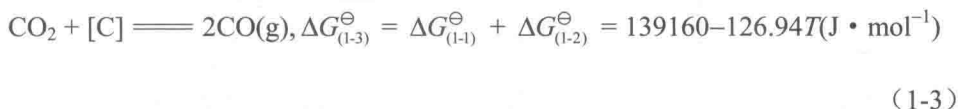
真空技术重点应用在下列冶金过程中:①真空脱气和炉外精炼(RH、VOD等);②钢液的真空浇注;③真空感应熔炼;④真空电弧炉(自耗炉)冶炼;⑤真空电子轰击炉;⑥等离子炉等。

3. 真空对 Fe-C 合金与 CO-CO₂ 气体混合物之间相互作用的影响

碳和 CO-CO₂ 气体混合物的反应可以表示为:



式(1-1) + 式(1-2) 得



(1) 当 $T = 1600^\circ\text{C}$ (1873 K) 时,

$$\Delta G_{(1-3)}^\ominus = 139160 - 126.94 \times 1873 = -98598.62(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$$