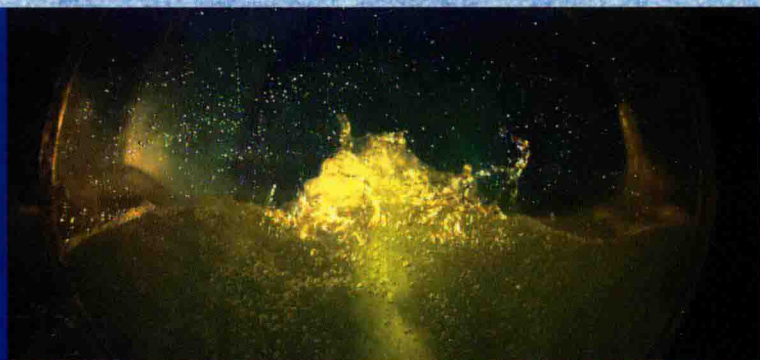


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

铜的氧气底吹熔炼



崔志祥 申殿邦 张延安 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

铜的氧气底吹熔炼

崔志祥 申殿邦 张延安 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

铜的氧气底吹熔炼是具有我国知识产权的炼铜技术,由于其具有原料适应性强、熔炼速度快、无燃料消耗和设备产能大等特点,备受国内外业界人士的关注。本书以山东方圆有色金属集团的氧气底吹熔炼过程为例,首次系统地阐述了铜的氧气底吹熔炼原理、工艺、装备,过程模拟仿真和控制,运行与操作等。

本书可供高等院校铜冶炼专业的大学生、研究生、教师及相关领域的工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

铜的氧气底吹熔炼/崔志祥等著. —北京:科学出版社, 2017

(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 978-7-03-056225-8

I. 铜… II. 崔… III. 氧气底吹转炉—炼铜 IV. ①TF748.21 ②TF811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 323912 号

责任编辑:张淑晓 孙静惠/责任校对:王 瑞

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

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:278 000

定价:98.00 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；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 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

现在世界上广泛应用的火法炼铜工艺都是造锍熔炼产出含铜 45%~73%的铜锍，然后在吹炼炉中进行铜锍吹炼，产出粗铜。各种不同的炼铜工艺，都是指不同的造锍熔炼过程，其分为闪速熔炼和熔池熔炼两大类。

铜的造锍熔炼过程从化学反应的角度看，实质上是氧化除硫、除铁和分离脉石及少量其他杂质的过程，都是以氧气（纯氧或富氧）作氧化剂，氧化矿物原料中易被氧化的元素，形成氧化物和熔剂造渣，或呈气态被除去。为了给反应物（氧气和矿料）创造有利的反应条件，就形成了各式各样的冶金炉，包括闪速熔炼炉和各种熔池熔炼炉。熔池熔炼炉又有立式的艾萨炉、奥斯麦特炉、氧气顶吹炉、瓦纽科夫炉，卧式的诺兰达炉、特尼恩特炉和三菱炉等。在各种各样的炉子中，流体的运动形式虽各有不同，但实质上可以分为两大类，即鼓泡式熔池熔炼和射流式熔池熔炼。从风口送入的富氧空气其出口线速度较低，修正的弗劳德数较小，这时气流实际上是以脉冲式喷入熔体中，属于气泡产生体系，为鼓泡式熔池熔炼。当喷嘴出口气体线速度较高，达到或者超过音速，修正的弗劳德数较高时，气体以连续稳定的流股状态喷入，称为射流，这样的熔池熔炼为射流式熔池熔炼。氧气底吹熔炼接近射流式熔池熔炼，属于射流式熔池熔炼范畴。

铜氧气底吹熔炼技术是一项具有中国自有知识产权的世界先进的粗铜熔炼工艺。该工艺于 2008 年首次在我国山东方圆有色金属集团建设的“氧气底吹熔炼多金属捕集技术”项目中得到产业化应用，2009 年被列入“十一五”国家科技支撑计划项目。建成以来的产业化试验表明：与其他熔池熔炼技术相比，该工艺可以很容易地处理其他工艺难以处理的铜杂矿，能源消耗低，可实现完全不配燃料的无碳自热熔炼，没有泡沫渣喷炉的风险，环保条件、劳动条件都比较优越。本书是对这一先进的粗铜熔炼工艺的理论与实践的总结。

本书共 9 章，第 1 章绪论，简单综述铜的底吹熔炼技术发展过程，分析底吹熔炼技术的优势与问题以及未来发展的方向；第 2 章论述氧气底吹造锍熔炼的基本原理；第 3 章和第 4 章分别介绍氧气底吹熔铜工艺和底吹炉的结构与生产操作；第 5 章计算氧气底吹熔炼过程的物料平衡与热平衡；第 6 章介绍底吹熔炼过程的数字化控制；第 7 章采用物理数值模拟手段模拟分析底吹熔炼过程；第 8 章比较分析底吹熔炼过程的技术经济指标；第 9 章是对铜的氧气底吹熔炼技术的改进与未来发展方向的展望。

本书是第一本系统介绍铜底吹熔炼技术的专著，也是我国铜底吹熔炼技术生产实践和理论分析的系统总结，可供高等院校铜冶炼专业的大学生、研究生、教师及相关领域的工程技术人员阅读和参考。

本书由昆士兰大学和东北大学冶金学院崔志祥教授（兼职），原沈阳冶炼厂总工程师、东北大学申殿邦教授（兼职），东北大学张延安教授联合撰写。参加撰写的人员还有山东方圆有色金属集团边瑞民、王智、郑军涛、杜武钊、卢德珍，东北大学刘燕、王艳秀、王东兴、张子木，中南大学闫宏杰。具体分工如下：第1章由申殿邦、张延安撰写，第2章由申殿邦、刘燕撰写，第3章由刘燕、郑军涛、王艳秀撰写，第4章由崔志祥、郑军涛、杜武钊、王东兴撰写，第5章由杜武钊、王艳秀撰写，第6章由卢德珍、张子木撰写，第7章由闫宏杰、张子木、王东兴撰写，第8章由边瑞民撰写，第9章由王智、申殿邦、崔志祥撰写。山东方圆有色金属集团的边瑞民对书稿进行了认真修改，书稿最终由张延安审定。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

感谢国家自然科学基金委员会给予的支持（项目编号：51074047）。

作 者

2017年11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 世界铜冶炼发展简史	1
1.2 铜的熔池熔炼	1
1.2.1 铜熔池熔炼的发展与应用	1
1.2.2 炼铜熔炼过程的技术对比	5
1.2.3 炼铜吹炼过程的技术对比	8
1.3 氧气底吹炼铜工艺的半工业试验	8
1.4 氧气底吹炼铜工艺的产业化	10
参考文献	11
第 2 章 氧气底吹造钼熔炼的基本原理	12
2.1 氧气底吹熔池熔炼过程的喷流	12
2.2 卷流速度、平均循环速度、熔体搅动能量	14
2.2.1 卷流速度	14
2.2.2 平均循环速度	14
2.2.3 熔体搅动能量	15
2.3 气泡的上浮速度和在熔体中的停留时间	17
2.4 熔体呈强势的紊流状态	17
2.5 氧气底吹铜熔池熔炼过程的传热	18
2.5.1 氧气底吹熔炼过程的放热特征	18
2.5.2 送风特征	18
2.5.3 传热特征	18
2.5.4 底吹与侧吹的雷诺数的比较	19
2.5.5 熔体动态时传热计算结果	19
2.6 底吹熔炼过程的传质	20
2.7 炉内存在不同的氧势区域	22
参考文献	22

第3章 氧气底吹炼铜工艺	23
3.1 工艺流程	23
3.2 工艺过程	24
3.2.1 备料工序	24
3.2.2 底吹熔炼工序	26
3.2.3 制氧工序	28
3.3 原料	29
3.3.1 精矿	29
3.3.2 返料	30
3.3.3 熔剂	31
3.3.4 燃料	31
3.3.5 混合物料	31
3.3.6 空气和氧气	32
3.4 产物	32
3.4.1 铜铋	34
3.4.2 炉渣	38
3.4.3 烟气	49
3.4.4 烟尘	50
3.4.5 熔炼控制原则	50
3.5 余热回收	51
3.5.1 冷却方式分类	52
3.5.2 余热回收工段	52
3.5.3 生产实例	53
3.6 烟气收尘	55
3.6.1 重金属冶金工厂的烟气含尘成分	55
3.6.2 重金属冶金工厂的烟气收尘重要性	55
3.6.3 铜冶金过程的烟气含尘量	56
3.6.4 底吹熔炼过程烟气收尘流程	56
3.7 底吹炼铜工艺特点	57
3.7.1 氧浓高	57
3.7.2 氧压高	59
3.7.3 氧枪寿命长	60
3.7.4 作业条件	64
3.7.5 生产规模能大能小	64
3.7.6 处理杂料能力强	64

3.7.7 不易造成喷炉	65
3.7.8 氧气、空气分别送入炉内	68
3.7.9 渣含铜低	68
3.7.10 生产操作简单	69
3.7.11 耗氧量低	69
3.7.12 烟气量小, 环保条件好	69
3.7.13 炉内存在不同的氧势区域	70
3.7.14 铜铈中的硫化亚铜和硫化铁浓度场	70
3.7.15 过程的温度场	71
参考文献	71
第4章 底吹炉的结构与生产操作	73
4.1 底吹炉的结构	73
4.1.1 炉体	73
4.1.2 驱动装置	75
4.1.3 加料及排放装置	76
4.1.4 氧枪结构及其布局	77
4.2 底吹炉生产操作	79
4.2.1 底吹炉开炉	80
4.2.2 正常熔炼作业	81
4.2.3 停炉	82
4.2.4 各主要岗位操作	82
4.2.5 余热锅炉的主要作业	86
参考文献	93
第5章 氧气底吹熔炼过程的物料平衡与热平衡	94
5.1 冶金计算	94
5.1.1 物料衡算	94
5.1.2 热平衡测试、计算与分析	102
5.2 底吹熔炼炉冶金计算系统	109
参考文献	111
第6章 底吹熔炼过程的数字化控制	112
6.1 数字化控制系统	112
6.1.1 测控点和控制回路	112
6.1.2 数字化控制系统的配置	113
6.1.3 数字化控制系统的功能	114
6.2 氧气底吹熔炼优化控制	114

6.2.1 氧气底吹熔炼优化控制结构	115
6.2.2 优化控制模块的功能	115
6.3 过程参数的检测与控制	116
6.3.1 氧料比的给定与控制	116
6.3.2 熔体液面的测控	118
6.3.3 熔体温度的测控	120
6.3.4 炉子负压的测控	121
6.4 产物的化验分析与控制	121
6.4.1 铜铈品位的测控	121
6.4.2 渣成分的测控	121
6.4.3 烟气成分分析	122
6.5 “蘑菇头”的生长控制	122
6.5.1 “蘑菇头”的形成	123
6.5.2 “蘑菇头”的形貌和成分分析	123
6.5.3 “蘑菇头”的控制	126
参考文献	127
第7章 底吹熔炼过程的物理数值模拟	128
7.1 底吹熔炼过程多相流动二维数值模拟与分析	128
7.1.1 单气泡上浮模拟分析	128
7.1.2 二维氧气底吹熔池熔炼过程的数值模拟结果及分析	129
7.2 底吹熔炼过程气-液两相流动三维数值模拟与分析	135
7.2.1 壁面及炉内飞溅的情况分析	135
7.2.2 各纵截面流场分布	137
7.2.3 铜铈流速分布情况	140
7.2.4 熔池中气相运动及其分布的模拟与分析	145
7.2.5 氧枪入口压力变化情况分析	150
7.2.6 自由表面速度分布及波动衰减情况	151
7.3 底吹过程气-固-液三相流动三维数值模拟与分析	154
7.3.1 物料/渣层对气相停留时间的影响分析	155
7.3.2 气团对物料-铜铈界面速度的影响分析	156
7.3.3 物料层卷吸过程及其分布情况分析	159
7.4 氧枪参数对流场影响的数值模拟试验与分析	164
7.4.1 氧枪单因素对优化指标的影响	164
7.4.2 多目标优化	167
参考文献	172

第 8 章 底吹熔炼过程的技术经济指标	173
8.1 床能力	174
8.2 渣含铜	174
8.2.1 Fe/SiO ₂ 及渣中的其他成分	177
8.2.2 造渣时间	177
8.2.3 温度控制	178
8.2.4 渣面控制	178
8.3 铜、金的直收率和回收率	178
8.4 粗铜的综合能耗	178
8.5 烟气量与烟气成分	181
8.6 余热发电	182
参考文献	184
第 9 章 展望	185
9.1 氧气底吹炉的大型化、数字化和智能化	185
9.1.1 炉料的制备及其加料方式的改进	185
9.1.2 炉内分离与炉外分离及渣贫化	186
9.1.3 氧枪枪距的优化	186
9.1.4 生产规模的大型化	187
9.1.5 过程控制的数字化与可视化	187
9.1.6 过程机理的深入研究	188
9.2 两步炼铜工艺	188
9.2.1 两步炼铜工艺流程简介	188
9.2.2 主要工艺配置及技术指标	190
9.2.3 两步炼铜工艺的技术优势	193
9.2.4 两步炼铜工艺改进方向	194
9.3 自主开发, 完善两步炼铜配套技术体系	194
9.3.1 有色危险废物综合处理技术	194
9.3.2 5N 高纯铜生产技术	195
9.3.3 大素流高效电解技术	195
9.3.4 电解液自净化技术	196
9.3.5 重金属冶炼烟气净化中污酸处理技术	196
9.3.6 废杂铜一步冶炼技术	196
9.3.7 降低炼铜弃渣含铜技术	197
参考文献	197