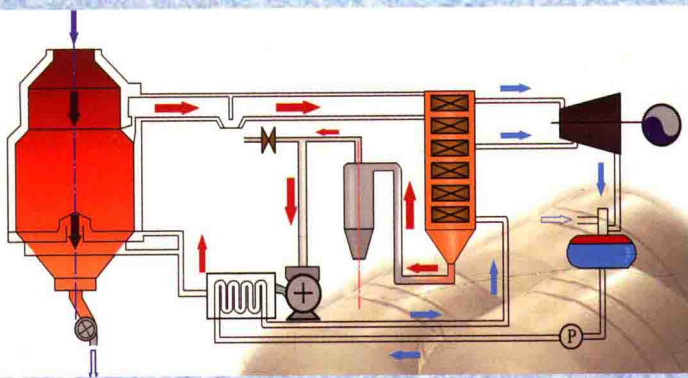


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

烧结余热高效回收关键理论 及应用



董 辉 冯军胜 张 晟◎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

烧结余热高效回收关键 理论及应用

董 辉 冯军胜 张 晟 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书凝练了著者及其团队 10 余年的研究成果，是一本系统阐述烧结过程余热资源回收与利用的专著。全书围绕竖罐/环冷机-余热锅炉等环节，重点阐述了烧结矿内气体流动与气固传热的关键科学问题，进而剖析了基于竖罐和环冷机模式烧结余热回收与利用的关键技术问题。

本书可供动力工程及工程热物理、冶金工程、环境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

烧结余热高效回收关键理论及应用 / 董辉, 冯军胜, 张晟著. —北京: 科学出版社, 2018.5

(现代冶金与材料过程工程丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-056825-0

I. 烧… II. ①董… ②冯… ③张… III. ①冶金-废热回收 ②冶金-余热利用 IV. ①X756 ②TK115

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 048351 号

责任编辑: 张淑晓 孙静惠 / 责任校对: 樊雅琼 杜子昂

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 5 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 23 1/4

字数: 440 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



董辉 1969年6月出生，工学博士，东北大学冶金学院热能工程系、国家环境保护生态工业重点实验室教授，博士生导师。主要从事冶金余热资源回收利用、竖式炉窑热工、液化天然气冷能利用、工业废盐资源化等研究。主持国家高技术研究发展计划（863计划）、国家科技支撑计划、国家自然科学基金、环境保护部科技计划、省级科技计划等项目10余项。在研究团队的支持下，借鉴干熄焦工艺技术，提出了烧结矿余热竖罐式回收工艺，获得国内首个相关专利，借助国家自然科学基金项目（烧结

余热罐式回收系统的基础研究，51274065）和辽宁省科学技术计划项目开展基础理论研究、关键技术与设备研发；提出并开展了烧结余热分级回收与梯级利用关键技术研发，借助863计划项目（烧结过程余热资源分级回收与梯级利用示范工程，2009AA05Z215）构建分级回收与梯级利用可行性实施方案，并将其部分应用；将钢铁领域球团竖炉引入钒钛磁铁矿和石煤氧化焙烧过程中，借助国家科技支撑计划项目（辽西地区新型钒钛磁铁矿资源高效综合利用技术及示范，2015BAB18B00），研制钒钛磁铁矿和石煤氧化焙烧竖炉；开展了球团竖炉高效化生产技术攻关，澄清了喷火口面积与料层内气流分布的模糊认识，提出球团竖炉高效化生产可行性实施方案，并借助技术改造之机将其实施。

《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；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化与控制技术研究过程中，提出适度细晶化（3~5 μm ）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×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

烧结过程余热资源高效回收与利用是降低我国钢铁企业烧结工序能耗的重要方向与途径之一。本人及所在团队，在蔡九菊教授带领下，自 2005 年以来，一直致力于烧结余热回收的研究。其中，2005 年，提出了烧结余热分级回收与梯级利用技术，开展了相关的理论和技术攻关，并借助企业技术改造之机将其逐步实施。2007 年，提出了烧结矿余热竖罐式回收技术，并于 2010 年获得国内首个相关专利；借助国家自然科学基金项目和辽宁省科学技术计划项目，提出了一整套确定余热回收竖罐以及余热锅炉的结构和操作参数基础理论，探索了强化竖罐内气固换热与锅炉内气汽、气水换热及降低竖罐内料层阻力的关键技术。

本人将 10 余年来的研究成果有机结合，以图书的形式呈现给大家，供学术界和工程界人士参考，真诚希望得到相关领域专家的共鸣和支持，因为一项技术从理论到形成技术再到工程化推广，必须依赖大批理论研究人员、技术研发人员几年、十几年的共同努力；也真诚希望本书起到抛砖引玉的作用，以促进我国烧结余热回收与利用的大力发展。

本书中的绝大部分工作，历经整十届硕士或博士研究生共同努力，最后才形成了一套系统内容。本书主要由本人及研究团队成员共同撰写。其中，第 1 章由本人执笔，第 2 章由储满生和柳政根执笔，第 3 章由高建业和冯军胜执笔，第 4 章、第 5 章由冯军胜和高建业执笔，第 6 章由张晟和常弘执笔，第 7 章由贾冯睿和李含竹执笔，第 8 章由桂智勇和李慧梅执笔，第 9 章由高建业执笔。

在此真诚感谢我的导师蔡九菊教授，是恩师把我带上了这条丰富多彩而又充满挑战的探索之路。同时真诚感谢张琦、王爱华、韩宗伟、李国军等同事，是他们给予了我莫大支持。

十年磨一剑，本书得以出版，离不开研究团队内一届又一届学生孜孜不倦的付出与努力。非常感谢我的研究生们，科研道路上的每一步都是新的挑战与磨炼，是他们给了我莫大的支持，给予我充满活力的科研环境、真诚的帮助及富有创造力的启示，有他们的陪伴，我就有了无穷前行探索的动力。

由于本人水平有限，疏漏之处在所难免，望同行和读者批评、指正。

董 辉

2018 年 3 月

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 烧结矿余热资源的组成及特点	1
1.1.1 测试对象、体系内容与方法	1
1.1.2 热工测试结果与分析	3
1.2 烧结过程余热资源回收利用技术进步与展望	8
1.2.1 国外烧结余热回收利用技术发展状况	9
1.2.2 国内烧结余热回收利用技术发展状况	12
1.2.3 烧结余热回收与利用技术发展途径	17
1.3 烧结余热回收关键科学问题与技术问题的凝练	21
第 2 章 烧结基本原理	23
2.1 铁矿烧结发展状况	23
2.2 烧结过程	24
2.3 烧结过程主要反应及固结机理	28
2.3.1 燃烧反应	28
2.3.2 水分的蒸发和凝结	30
2.3.3 碳酸盐分解	30
2.3.4 铁氧化物的分解还原和氧化	31
2.3.5 有害杂质的去除	32
2.3.6 固相反应	33
2.3.7 液相黏结及基本液相体系	34
2.3.8 烧结矿冷凝固结	38
2.3.9 烧结矿的矿物组成及结构	39
2.4 烧结矿质量指标	40
2.4.1 烧结矿强度和粒度	40
2.4.2 烧结矿冶金性能	41
2.4.3 碱度	42
2.5 成熟应用的烧结工艺技术	43

2.5.1	低硅高还原性烧结矿技术	43
2.5.2	低碳厚料层烧结技术	45
2.5.3	小球团烧结法	46
2.5.4	烧结机偏析布料技术	48
2.6	烧结新技术进展及应用	49
2.6.1	镶嵌式烧结法	49
2.6.2	复合造块法	50
2.6.3	涂层制粒技术	52
2.6.4	烧结喷吹氢系气体燃料技术	53
2.7	铁矿烧结的发展趋势	56
第3章	烧结矿床层内填充特性及气体流动的实验研究	58
3.1	烧结矿层填充特性的研究	58
3.1.1	烧结矿形状因子的研究	58
3.1.2	烧结矿床层内空隙率分布的研究	61
3.2	烧结矿床层内流动过程分析	66
3.3	烧结矿床层内气体流动状态的判定	67
3.3.1	颗粒床层内的雷诺数	67
3.3.2	实验原理	68
3.3.3	实验装置	69
3.3.4	实验过程	70
3.3.5	实验结果与讨论	71
3.4	烧结矿床层内气流压降实验关联式的确定	76
3.4.1	修正 Ergun 方程	76
3.4.2	颗粒摩擦因子	79
3.4.3	无量纲化床层阻力关联式的建立	82
第4章	烧结矿床层内气固传热实验研究	91
4.1	烧结矿床层内气固传热过程分析	91
4.1.1	烧结矿床层内的导热过程	91
4.1.2	烧结矿床层内的对流传热过程	92
4.1.3	烧结矿床层内的辐射传热过程	92
4.2	烧结矿床层内气固传热过程实验研究	92
4.2.1	床层内气固传热系数公式推导	93
4.2.2	床层内气固焓传递系数公式推导	95
4.2.3	实验装置与过程	101

4.2.4	实验结果与分析	104
4.3	烧结矿床层内气固传热过程试验研究	112
4.3.1	实验内容与目的	112
4.3.2	实验装置与过程	113
4.3.3	实验结果与分析	117
第 5 章	烧结余热回收竖罐内流动与传热数值计算及应用	120
5.1	物理模型及其基本假设	120
5.2	竖罐内气固传热数学模型	122
5.2.1	多孔介质模型	122
5.2.2	竖罐内流动与传热基本方程	124
5.2.3	竖罐内气体流动模型	130
5.3	网格划分及边界条件	131
5.3.1	网格划分	131
5.3.2	边界条件的设置	132
5.4	模型计算方法	133
5.4.1	模型计算软件的选择	133
5.4.2	数值离散方法的选择	134
5.4.3	SIMPLE 算法	136
5.5	模型参数 UDF	137
5.5.1	UDF 的编写基础	137
5.5.2	UDF 宏的选取与定义	138
5.6	模型可靠性验证及分析	139
5.6.1	模型网格的无关性验证	139
5.6.2	模型的可靠性验证	140
5.7	烧结矿竖罐内气固传热过程数值计算	142
5.7.1	某一工况下模拟计算结果分析	142
5.7.2	主要影响因素及其影响规律	148
5.8	竖罐适宜热工参数的确定	157
5.8.1	竖罐适宜热工参数的判据	157
5.8.2	试验设计方法的确定	160
5.8.3	试验方案的确定	162
5.8.4	单罐条件下竖罐适宜结构参数和操作参数的确定	168
5.8.5	双罐条件下竖罐适宜结构参数和操作参数的确定	170

第 6 章 环冷模式下烧结矿床层内流动和传热数值计算及其应用	174
6.1 环冷机内气固传热过程数值计算模型的建立	174
6.1.1 模型建立基本流程	174
6.1.2 环冷机内传热过程研究方法的确定	174
6.1.3 物理模型的建立	175
6.1.4 数学模型的建立	177
6.1.5 数值计算区域与条件的设定	181
6.2 环冷机内气固传热基本规律与影响因素分析	185
6.2.1 环冷机内气体流动基本规律分析	186
6.2.2 环冷机内温度分布基本规律分析	187
6.3 余热发电模式下环冷机热工参数的确定	190
6.3.1 环冷机出口热载体可用性判断依据及计算	190
6.3.2 环冷机气固传热过程影响规律分析	192
6.3.3 适宜操作参数的确定	198
6.4 环冷机余热分级回收梯级利用工艺	201
6.4.1 工艺流程与参数确定的原则与方法	201
6.4.2 较为完善的可行性实施方案	202
6.4.3 较为实际的可行性实施方案	206
第 7 章 烧结余热直接热回收系统研究	209
7.1 烧结混合料干燥规律的实验研究	209
7.1.1 实验原理	209
7.1.2 实验内容	211
7.1.3 实验结果分析	212
7.2 烧结余热用于烧结混合料干燥	214
7.2.1 基本假设	214
7.2.2 解析模型建立	215
7.2.3 解析模型验证	218
7.2.4 烧结混合料干燥工艺参数的确定	221
7.3 烧结余热用于烧节点火	228
7.3.1 烧节点火的作用与意义	228
7.3.2 烧节点火工艺及特点分析	229
7.3.3 影响点火的因素分析	233
7.3.4 点火助燃工艺参数的确定	235
7.4 烧结余热用于热风烧结	240

7.4.1	热风烧结的作用与意义	240
7.4.2	热风烧结工艺及特点	242
7.4.3	热风烧结工艺参数的确定	242
第 8 章	烧结合热锅炉热工参数优化及应用	251
8.1	余热锅炉结构设计	251
8.1.1	余热锅炉整体结构	251
8.1.2	余热锅炉结构确定	254
8.1.3	余热锅炉通风阻力的确定	261
8.1.4	余热锅炉水循环检验	267
8.2	余热锅炉计算机辅助计算软件	273
8.2.1	计算机辅助计算概念	273
8.2.2	计算机辅助热力计算	274
8.2.3	计算机辅助阻力计算	275
8.2.4	计算机辅助水循环计算	276
8.2.5	程序编制原则	276
8.2.6	程序设计基本流程	277
8.3	余热锅炉的热经济学分析与优化	278
8.3.1	余热锅炉热经济学基础概念	278
8.3.2	受热面几何参数优化模型的建立	282
8.3.3	蒸汽参数优化模型的建立	287
8.3.4	优化模型的求解方法	292
8.4	基于某竖罐余热锅炉的案例分析	294
8.4.1	计算程序的编制	294
8.4.2	热工参数优化	303
第 9 章	烧结合热回收系统热力学分析	305
9.1	余热回收的热力学分析方法	305
9.1.1	能量分析理论	305
9.1.2	焓分析	305
9.1.3	焓分析	306
9.1.4	能级分析	310
9.2	热力学分析模型和余热回收利用原则的建立	313
9.2.1	热力学分析模型建立的方法与步骤	313
9.2.2	余热回收与利用原则的确定	321
9.3	烧结合热回收系统热力学分析与评价	322

9.3.1 烧结生产条件	323
9.3.2 烧结环冷余热回收系统热力学分析与评价	324
9.3.3 现有余热利用不足及技术的改进方案及分析	331
9.3.4 烧结矿余热竖罐式回收系统热力学分析	334
参考文献	339