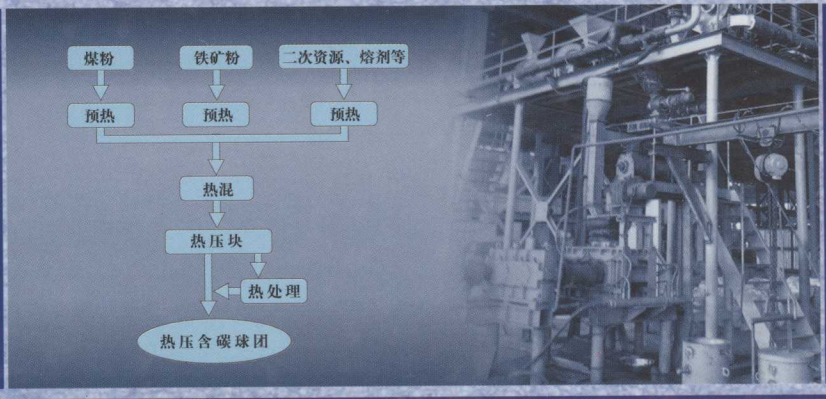
“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

铁矿热压含碳球团制备及其应用技术



储满生 柳政根◎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

铁矿热压含碳球团制备及其应用技术

储满生　柳政根　著

科学出版社

北京

内 容 简 介

铁矿热压含碳球团是一种新型优质炼铁原料，具有高温强度高、还原速率大、原料适应性强、无需外加黏结剂等优点，是实现低碳高效炼铁的技术途径之一，是国内外炼铁前沿技术研究的热点和焦点。本书共分5篇16章，全面介绍铁矿热压含碳球团的制备及其应用技术，主要内容包括研究背景、热压含碳球团的制备及其冶金性能、热压含碳球团应用于高炉炼铁、热压含碳球团应用于熔融还原和热压含碳球团应用于高铁三水铝土矿的综合利用五个部分，系统研究热压含碳球团的冶金性能和还原特性，深入探讨其还原机理和反应动力学，综合分析热压含碳球团用于高炉炼铁、非高炉炼铁以及特色冶金资源综合利用的可行性和发展趋势。

本书为目前国内外关于铁矿热压含碳球团较新、综合、全面的著作，可供冶金工程和资源综合利用等相关专业的研究人员、工程技术人员以及高校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁矿热压含碳球团制备及其应用技术/储满生，柳政根著. —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 978-7-03-035962-9

Ⅰ. 铁… Ⅱ. ①储…②柳… Ⅲ. 炼铁-铁矿物-含碳球团-制备 Ⅳ. TF521

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第261960号

责任编辑：张淑晓 张 星/责任校对：宋玲玲

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

双 青 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：22

字数：101 000

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　杨红英　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

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

《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，提出了计算冶金学、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辑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（3～5μm）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3～5μm、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（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400～500MPa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作出了贡献，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隙

衔接。特别是在层流冷却控制方面，利用有限元紊流分析方法，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沉本消纳赤泥技术。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1123 kW·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，通过学科方向凝练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。欢迎读者对本丛书提出宝贵的意见和建议。

赫冀成　张廷安

2011 年 5 月

前　言

当前，炼铁发展的方向是高产、低污染、低能耗。为了实现该目标，一些革新的炼铁技术已被提出或实际应用，其中包括热压含碳球团的开发及其应用。热压含碳球团是一种利用煤的热塑性提高强度的新型优质炼铁原料，具有高温强度高、还原速率大、原料适应性强、无需外加黏结剂等优点，是实现低碳高效炼铁的技术途径之一，是国内外炼铁前沿技术研究的热点。

国内外对于冷固结含碳球团进行了大量的基础研究和工艺开发工作，取得了许多研究成果，但高温强度差、需外加黏结剂等固有弊端限制了其扩大化应用。在此背景下，热压含碳球团新技术被提出，主要是由于铁矿热压块产品具有更优良的冶金性能和更好的应用前景。本书基于作者多年的研究成果，全面介绍热压含碳球团的制备及其应用技术，内容包括研究背景，热压含碳球团的制备及其冶金性能，热压含碳球团应用于高炉炼铁、熔融还原、高铁三水铝土矿的综合利用等，着重研究热压含碳球团的冶金性能和还原特性，探讨其还原机理和反应动力学，分析热压含碳球团用于高炉炼铁、非高炉炼铁和冶金资源综合利用的可行性和发展趋势。希望本书的出版能够进一步加强读者对热压含碳球团技术的认知，加速热压含碳球团技术在我国的发展，促进其在炼铁和冶金资源综合利用方面的应用，从而推动我国炼铁技术的进步。

本书共 5 篇 16 章。第一篇研究背景，主要介绍炼铁炉料的发展现状；第二篇铁矿热压含碳球团制备及其冶金性能，主要介绍铁矿热压含碳球团的制备工艺、还原性能和还原动力学、软熔滴落性能和高温冶金性能等；第三篇铁矿热压含碳球团应用于高炉炼铁，主要介绍热压含碳球团对高炉综合炉料软熔滴落性能的影响、高炉使用热压含碳球团的数学模拟、高炉使用热压含碳球团低温冶炼的数学模拟和低温冶炼条件下炉顶煤气循环利用的数学模拟；第四篇铁矿热压含碳球团应用于熔融还原，主要介绍国内外熔融还原炼铁技术发展现状、铁矿热压含碳球团-竖炉熔融还原炼铁新工艺的开发及工艺计算；第五篇铁矿热压含碳球团应用于高铁三水铝土矿的综合利用，主要介绍高铁三水铝土矿利用现状和新工艺的提出、高铁三水铝土矿热压含碳球团的制备、高铁三水铝土矿热压块还原选分实验研究、高铁三水铝土矿碳热还原相变历程及热力学分析。

本书由东北大学储满生教授和柳政根博士负责撰写、统稿和整体修改工作。其中，储满生教授负责第 2、3、4、7、8、9、11 章的撰写，柳政根博士负责第 5、6、10、13 章的撰写，第 1、12、14、15、16 章由两人共同撰写。另外，东

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

北大学钢铁冶金研究所博士生付小佼参与了第 1 章、郭同来参与了第 7～9 章、唐珏参与了第 7～9 章及第 14～16 章的撰写。

本书的出版得到了东北大学材料与冶金学院、东北大学钢铁冶金研究所等有关部门领导和同事的鼎力支持；本书所涉及的研究成果得到了国家自然科学基金项目（项目编号：50804008）、国家高技术研究发展计划项目（项目编号：2008AA03Z102）和教育部新世纪优秀人才支持计划项目（项目编号：NCET-08-0099）的资助；本书的编辑和审定还得到了科学出版社同志的全力支持和热心帮助。在此一并表示最诚挚的谢意！另外，书中引用了国内外同行的部分科研成果，作者在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请各位读者批评指正。

作　者

2012 年 8 月于东北大学

目　录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序
前言

第一篇　研究背景

第 1 章　炼铁炉料的发展现状 …… 3
1.1　钢铁产业发展现状 …… 3
1.2　铁矿资源及其供应现状 …… 7
1.2.1　世界铁矿资源 …… 7
1.2.2　我国铁矿资源特点及现状 …… 9
1.3　钢铁产业与煤炭资源 …… 12
1.3.1　世界煤炭资源概况 …… 12
1.3.2　我国煤炭资源概况 …… 13
1.3.3　煤炭的分类及作用 …… 14
1.3.4　钢铁产业与焦炭资源状况 …… 14
1.4　高炉炼铁炉料生产现状及主要问题 …… 17
1.4.1　烧结矿的主要弊端 …… 17
1.4.2　氧化球团的主要问题 …… 18
1.5　含碳球团 …… 20
1.5.1　含碳球团分类 …… 20
1.5.2　含碳球团还原特性 …… 21
1.5.3　冷固结含碳球团及其应用 …… 24
1.5.4　含碳球团在冶金资源综合利用的应用现状 …… 25
1.5.5　热压含碳球团 …… 26
参考文献 …… 29

第二篇　铁矿热压含碳球团制备及其冶金性能

第 2 章　铁矿热压含碳球团的制备 …… 33
2.1　铁矿含碳球团 …… 33
2.1.1　热压含碳球团 …… 33

2.1.2 热压含碳球团性能及应用分析 …… 34
2.1.3 煤的工艺特性对热压含碳球团性能的影响 …… 35
2.2 热压含碳球团制备 …… 37
2.2.1 热压实验原料 …… 37
2.2.2 热压实验设备 …… 38
2.3 热压工艺基准参数的确定 …… 40
2.4 热压实验结果及分析 …… 41
2.4.1 煤种对热压含碳球团强度的影响 …… 41
2.4.2 煤的粒度对热压含碳球团强度的影响 …… 43
2.4.3 配煤量对热压含碳球团强度的影响 …… 44
2.4.4 热压温度对热压含碳球团强度的影响 …… 45
2.4.5 热压对热压含碳球团强度的影响 …… 45
2.4.6 配加熔剂对热压含碳球团强度的影响 …… 46
2.5 热压参数综合分析 …… 47
2.6 热压含碳球团强度机理探讨 …… 48
2.7 与冷固结含碳球团的对比 …… 49
2.8 本章小结 …… 50
参考文献 …… 51
第 3 章 热压含碳球团还原性能及还原动力学 …… 52
3.1 还原性概述 …… 52
3.1.1 还原性定义 …… 52
3.1.2 间接还原与直接还原 …… 52
3.1.3 还原过程及其限制环节 …… 53
3.1.4 还原速率影响因素 …… 54
3.2 热压含碳球团的还原性 …… 56
3.2.1 热压含碳球团还原速率的影响因素 …… 56
3.2.2 含碳球团还原动力学研究现状 …… 57
3.2.3 热压含碳球团还原动力学研究方案 …… 61
3.3 热压含碳球团自还原过程还原率计算式的推导和验证 …… 62
3.3.1 实验方案 …… 63
3.3.2 实验原料和设备 …… 63
3.3.3 还原率计算式的推导和验证 …… 63
3.3.4 小结 …… 67
3.4 气氛和温度对热压含碳球团还原反应的影响 …… 67
3.4.1 温度对热压含碳球团还原的影响 …… 68

3.4.2 气氛对热压含碳球团还原的影响 …… 69
3.4.3 小结 …… 70
3.5 热压含碳球团自还原动力学 …… 70
3.5.1 热压含碳球团自还原实验 …… 70
3.5.2 热压含碳球团自还原限制环节分析 …… 71
3.5.3 小结 …… 76
3.6 物性因素对热压含碳球团还原性的影响 …… 77
3.6.1 孔隙率的影响 …… 77
3.6.2 配煤粒度的影响 …… 78
3.6.3 配碳量的影响 …… 80
3.6.4 热压含碳球团与氧化球团还原性能的比较 …… 82
3.6.5 小结 …… 84
3.7 本章小结 …… 84
参考文献 …… 84
第 4 章 热压含碳球团的软熔滴落性能 …… 86
4.1 软熔滴落性能研究目的及原理 …… 86
4.2 软熔滴落性能研究方案 …… 87
4.3 软熔滴落实验原料和设备 …… 87
4.3.1 热压用料 …… 87
4.3.2 软熔滴落实验设备 …… 87
4.3.3 软熔滴落实验步骤 …… 89
4.4 碱度对热压含碳球团软熔滴落性能的影响 …… 90
4.4.1 试样准备 …… 90
4.4.2 研究结果及分析 …… 91
4.4.3 理论分析 …… 96
4.4.4 小结 …… 99
4.5 配碳量对热压含碳球团软熔滴落性能的影响 …… 100
4.5.1 实验条件 …… 100
4.5.2 研究结果及分析 …… 100
4.5.3 理论分析 …… 104
4.5.4 与常见炼铁炉料的比较 …… 105
4.5.5 配碳量影响软熔滴落性能的小结 …… 107
4.6 本章小结 …… 107
参考文献 …… 108

第 5 章 热压含碳球团的高温冶金性能 …… 109
5.1 低温还原粉化性能 …… 109
5.1.1 实验设备 …… 109
5.1.2 实验步骤 …… 110
5.1.3 实验结果及分析 …… 112
5.2 热压含碳球团高温还原行为 …… 113
5.2.1 还原行为实验方案 …… 113
5.2.2 还原行为实验方法 …… 114
5.2.3 还原行为实验结果及分析 …… 114
5.3 热压含碳球团还原膨胀性能 …… 118
5.3.1 还原膨胀实验 …… 118
5.3.2 还原膨胀实验结果及分析 …… 121
5.4 热压含碳球团还原冷却后强度 …… 123
5.4.1 还原率的测定 …… 123
5.4.2 还原实验步骤 …… 123
5.4.3 还原冷却后强度实验结果及分析 …… 124
5.5 热压含碳球团高温强度 …… 127
5.5.1 高温强度研究方案 …… 127
5.5.2 高温强度实验结果 …… 127
5.5.3 热压含碳球团高温强度的机理分析 …… 130
5.6 本章小结 …… 131
参考文献 …… 132

第三篇 铁矿热压含碳球团应用于高炉炼铁

第 6 章 热压含碳球团对高炉综合炉料熔滴性能的影响 …… 135
6.1 引言 …… 135
6.2 实验目的及原理 …… 135
6.3 实验过程 …… 136
6.3.1 实验设备 …… 136
6.3.2 实验步骤 …… 136
6.3.3 实验原料 …… 136
6.3.4 综合炉料化学组成的变化 …… 137
6.4 实验结果及分析 …… 138
6.4.1 综合炉料软化性能的变化 …… 138
6.4.2 综合炉料熔化性能的变化 …… 140

6.4.3 综合炉料滴落性能变化 …… 140
6.4.4 综合炉料最高压差变化 …… 142
6.4.5 综合炉料软熔带温度区间变化 …… 142
6.5 机理分析 …… 143
6.5.1 加入热压含碳球团对炉料软化收缩的影响 …… 143
6.5.2 加入热压含碳球团对炉料熔化、滴落性能的影响 …… 144
6.5.3 加入热压含碳球团对料柱最大压差的影响 …… 147
6.6 本章小结 …… 147
参考文献 …… 147
第 7 章 高炉使用热压含碳球团的数学模拟 …… 149
7.1 多流体高炉数学模型 …… 149
7.1.1 基本框架 …… 149
7.1.2 模型的求解 …… 153
7.2 模拟条件 …… 154
7.3 模拟结果及分析 …… 155
7.3.1 炉内温度场分布变化及分析 …… 155
7.3.2 烧结矿和热压含碳球团的还原 …… 155
7.3.3 高炉操作指标的变化 …… 157
7.3.4 高炉热平衡分析 …… 159
7.4 本章小结 …… 160
参考文献 …… 160
第 8 章 高炉使用热压含碳球团低温炼铁的数学模拟 …… 162
8.1 低温炼铁的可行性 …… 162
8.2 模拟方案 …… 165
8.3 结果与讨论 …… 166
8.4 本章小结 …… 169
参考文献 …… 169
第 9 章 低温冶炼条件下炉顶煤气循环利用的数学模拟 …… 171
9.1 前言 …… 171
9.2 数学模拟方案 …… 173
9.2.1 模拟方法 …… 173
9.2.2 模拟条件 …… 173
9.3 模拟结果与分析 …… 176
9.3.1 物料平衡 …… 176
9.3.2 炉内状态的变化 …… 177

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com