

冶金研究



METALLURGY RESEARCH

(2009年)

主 编 朱鸿民
副主编 郭占成 李京社

冶金工业出版社



内 容 提 要

本书收录了冶金方面的学术论文 70 篇, 内容涉及钢铁冶炼、有色金属冶炼、冶金物理化学、冶金生态等专业, 重点对炼铁原料与工艺优化、连续铸钢工艺优化及钢的质量控制、冶金生态等课题进行了深入探讨, 所选论文内容均为近一两年的科研成果。本书同时对北京科技大学冶金与生态工程学院部分科研梯队的主要科研工作做了简要介绍。

本书可供冶金、环保、能源、管理等领域的科研、生产、教学人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

冶金研究. 2009 年/朱鸿民主编. —北京: 冶金工业出版社, 2009. 12

ISBN 978-7-5024-5124-0

I. ①冶… II. ①朱… III. ①冶金—文集 IV. ①TF-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 002639 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 于 光 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5124-0

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 12 月第 1 版, 2009 年 12 月第 1 次印刷

210mm×297mm; 24 印张; 839 千字; 373 页; 1-1500 册

80.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金与生态工程学院



北京科技大学是全国重点大学，冶金是北科大优势特色专业学科，其下设的冶金物理化学和钢铁冶金两个二级学科为国家级重点学科，并设有有色金属冶金学科。冶金工程学科具有学士、硕士和博士全部学位的授予权并设有博士后研究流动站，还与美、德、日等国的大学合作培养博士研究生。科学技术史专业于1991年、1996年先后经国务院学位委员会批准具有硕士、博士学位授予权，是目前国内唯一的科学技术史（工学）专业博士点。为适应

我国生态环境建设的需要，2002年冶金与生态工程学院成立了生态科学与工程系，增设生态学专业。2003年开始招收生态工程专业本科生和工业生态硕士研究生。学院具有高水平的师资，其中有中国科学院院士3人、国家学位委员会委员1人、博士生导师25人，青年教师中多数具有博士学位和出国留学、进修经历。

冶金与生态工程学院承担着大量国家重要科学研究任务，包括国家自然科学基金重点研究、国家重大基础研究、高技术研究、国家科技攻关研究和国内外企业合作科研等课题。学院曾两次得到过世界银行贷款资助，是国家“211工程”的重点建设单位，具有良好的教学、实验条件。随着国家21世纪振兴教育计划的实施，办学条件还将会有显著的改进。

冶金与生态工程学院非常重视学生的培养质量，强调加强基础、拓宽专业、提高素质和创新能力培养，尤其重视外语、计算机、自动化、管理科学等工科通用课程的教学，本科生教学中上述通用课程课时比例已增加到80%以上。此外，在冶金专业课程中也大量引入了数学模型、仿真、数值计算、人工智能等内容。

冶金与生态工程学院招收冶金工程和生态学两个专业本科生，招收钢铁冶金、有色金属冶金、冶金物理化学、科学技术史、工业生态共五个专业硕士研究生和钢铁冶金、有色金属冶金、冶金物理化学、科学技术史四个专业博士研究生。

冶金与生态工程学院每年毕业学生200余人，其中研究生80余人，本科生130余人。冶金与生态工程学院的毕业生校友为国家做出了重要的贡献，其中有4人被评为中国科学院、工程院院士，十几人担任省、部、市级领导，更多的校友在企业担任总经理、总工程师等职务或为技术专家和管理骨干。

北京科技大学冶金与生态工程学院实验技术中心仪器设备



高温热分析室



VIM 多功能真空感应炉

《冶金研究》编委会名单

主 编 朱鸿民

副主编 郭占成 李京社

委 员 (以姓氏笔画为序)

王新华 王福明 包燕平 邢献然

成国光 朱鸿民 苍大强 李京社

杨天钧 吴胜利 宋 波 张建良

郭占成 梅建军

前 言

金属作为重要的基础原材料，在社会发展和人民生活中发挥着举足轻重的作用。尽管面临着其他材料的竞争，金属材料由于在资源储量、生产成本、回收再利用和综合性能等方面的明显优势，仍将在可以预见的将来占据材料工业中的统治地位。

冶金工业是国民经济发展的重要基础产业，二十多年来我国冶金工业取得了令人瞩目的成就，已发展成为世界第一产钢大国和重要的有色金属生产大国。可以预计，今后 10~20 年是中国冶金工业更快发展、整体实现现代化、走在世界前列的重要时期。为实现这一目标，冶金高等学校应该在人才培养和科学研究方面做出重要的贡献。

北京科技大学冶金学科是国内历史最悠久的冶金学科，渊源于 1895 年伊始的北洋大学矿冶系。1952 年全国高校院系调整时，北洋大学、唐山交通大学、西北工学院等 5 所高校的矿冶学科组建成北京钢铁学院（1988 年改名为北京科技大学）并设立冶金系。冶金学科是北京科技大学的优势特色学科，师资雄厚，治学严谨，与冶金工业联系密切，半个世纪以来培养了大批高质量毕业生，获得了大批重要科学研究成果，为冶金工业的发展和冶金科技进步做出了重要的贡献，在国内外享有很高声誉。

2002 年 4 月值北京科技大学建校 50 周年之际，北京科技大学发起举办了第一届“冶金工程科学论坛”，并对会议中发表的部分学术论文进行收录整理，由冶金工业出版社出版了《冶金研究》（2002 年）一书，受到了国内企业、院校、广大科技人员和冶金专业师生的欢迎。此后，北京科技大学决定今后每年 3 月上旬都将定期举办“冶金工程科学论坛”，并对论坛上发表的学术论文进行整理，编辑出版《冶金研究》一书，以增强冶金学术交流，促进冶金科技发展，同时作为北京科技大学校庆的纪念。

“冶金工程科学论坛”学术报告范围包括冶金物理化学、钢铁冶金、有色金属冶金、冶金能源技术、冶金环境保护等领域的科学研究成果、新工艺、新技术、新产品等，欢迎国内冶金院校和企业的广大科技工作者踊跃投稿，共同办好“冶金工程科学论坛”。

为容纳更多的冶金前沿信息和冶金科研成果，更全面地反映冶金先进技术工艺和技术进步，并更好地保证文章的学术水平，《冶金研究》从 2006 年起设立了编委会，编委会负责文章的组织、审定等工作。为便于读者查阅，在目录中对文章进行了粗略的分类。希望《冶金研究》能为广大冶金工作者提供更多的信息，为推动冶金技术进步，为推动技术创新，提供有益的参考。此外，2009 年《冶金研究》刊出了北京科技大学冶金与生态工程学院部分科研梯队的主要科研工作简介，以便校外读者了解北京科技大学冶金与生态工程学院的科研工作和开展科研合作。

编 者
2009 年 11 月

目 录

炼铁原料与工艺研究

烧结过程中铁矿粉熔融性的研究 (戴宇明 吴胜利 裴元东 等)	1
不同因素对含钛铁矿石烧结过程中铁酸钙生成的影响研究 (张增召 赵金龙 郭兴敏)	5
杭钢烧结原料优化配矿的基础研究及应用 (林剑平 吴胜利 韩宏亮 等)	8
烧结燃料优化配置对提高厚料层烧结利用系数的作用研究 (赵成显 吴胜利 陈东峰 等)	12
减荷烧结中支撑板的数值模拟与应用分析 (刘文文 左海滨 张建良)	16
金属化球团荷重软化性能的研究 (丁银贵 薛庆国 余雪峰 等)	21
以含锌粉尘为原料的含碳球团的还原实验研究 (杨慧贤 薛庆国 余雪峰 等)	25
高风温热风炉技术 (李 搏 吴 铿 杨 森 等)	29
天钢 2000m ³ 高炉长寿实践 (苏庆杰 吴 铿 李 康 等)	33
碱度对高炉渣黏度的影响研究 (焦晋沙 丁汝才 杨学民 等)	37
南(昌)钢高炉渣熔化性能优化试验研究 (杨世山 蒋 薛 金吉男 等)	42
南(昌)钢高炉渣流动性能优化试验研究 (李志强 杨世山 顾 琰 等)	48
杭钢高炉渣流动性能试验研究 (胡泽方 陈志明 杨世山 等)	54
杭钢高炉渣脱硫性能试验研究 (陈志明 胡泽方 杨世山 等)	59
Mg-CaO 复合铁水脱硫的动力学研究 (叶小叶 李 闯 郭汉杰)	63
铁水预处理终点磷预报模型 (张慧宁 卢永明 徐安军 等)	67
高炉炉内监测与仿真新技术 (高征铨)	70

炼钢与连铸工艺研究

应用 CFX 软件实现集束氧枪的优化设计 (林致明 林 滔 王振宙 等)	76
LF 渣面加铝对超低硫管线钢深脱硫的影响 (区洪辉 王 建 李 强 等)	79
铁水脱磷工艺的发展 (陈 洁 田乃媛)	83
专用转炉脱磷预处理的实验研究 (陈 洁 田乃媛 徐安军)	87
LF 精炼管线钢深脱硫工艺优化 (陈 君 储 莹 郭汉杰)	92
RH 精炼浸渍管镁铬砖侵蚀机理的研究 (李一丁 郭汉杰 杨学民 等)	97
六流连铸中间包结构优化的数值模拟 (韩丽辉 王静松 宋 波)	101
三流中间包内控流装置结构优化水模型研究 (黄书友 张 辉 王静松 等)	106
T 形中间包注流区高挡墙导流孔对钢水流动状态的影响 (孟 娜 张家泉 刘 平 等)	111
连铸管式结晶器的优化设计、制造与使用 (王鑫荣 刘春岩 马 龙 等)	116
连铸保护渣物理性质研究 (王绍峰 张庆斌 郭汉杰)	121
GCr15 轴承钢连铸保护渣的物性研究 (庞炜光 成国光 于春梅)	126
石钢 3 号连铸机大方坯坯壳厚度研究 (李大鹏 李 宏 丁秀青 等)	129
基于 BP 神经网络的大方坯内部质量预报系统研究 (刘 乐 张家泉 何庆文 等)	133
大方坯连铸机辊列计算机辅助设计 (陈 驰 王鑫荣 刘春岩 等)	137

诱导生成晶内针状铁素体的 Ti-Al 复合脱氧夹杂物分析 (吕迺冰 杨成威 卓晓军 等)	143
稀土对特殊钢中夹杂物变质的研究 (吴鹏飞 成国光 杨晓红)	147
304 不锈钢冶炼过程中夹杂物的变化及降低其含量的研究 (侯海滨 成国光 秦 哲 等)	151
集装箱板用耐候钢生产过程中非金属夹杂物研究 (田 伟 李 晶 余 健 等)	156
12CaO · 7Al ₂ O ₃ 精炼渣吸附非金属夹杂物实验分析 (李志广 袁守谦 董 鹏 等)	161
钛在铁素体不锈钢中的影响和控制 (李道明 储 莹 侯东涛 等)	165
不锈钢还原脱磷研究现状及前景展望 (李志广 袁守谦 董 鹏 等)	169
高硫易切削钢钙处理的实验室研究 (涂 生 陈伟庆 陆巧彤 等)	173
硼在 X70 管线钢中的偏析分析及其微观组织研究 (魏丽艳 李 晶 余 健 等)	177
轧制前堆垛缓冷对钢中带状组织影响的研究 (沈世雕 黄福祥 陈书浩 等)	183

电冶金与有色金属冶金研究

电脉冲在不同冷却条件下对铜凝固组织的影响研究 (赵立华 战 莉 苍大强)	189
电脉冲孕育处理细化纯铝凝固组织的研究 (刘国梁 张 辉 王静松 等)	194
电热还原铝电解槽废旧防渗料制备粗铝硅合金的研究 (宋云霞 薛济来 朱 骏 等)	199
熔析结晶法富集分离粗铅中铜的研究 (赵玉林 王 志 郭占成 等)	203
共沉淀法制备锰锌铁氧体软磁材料的研究 (李宏亮 邹 兴 高 炆 等)	207
高视密度二氧化锰前驱体制备的研究 (刘 宇 邹 兴 张 晓 等)	212
低温水浴法制备锰锌铁氧体前驱体 (汪 梅 邹 兴 李宏亮 等)	216
硫氨法制备高纯氧化锌的研究 (刘峰峰 邹 兴 魏 巍 等)	220
电沉积铅过程中超声波对阳极气泡行为及槽电压的影响 (郑一方 薛济来 朱 骏)	224
(1-x)PbTiO ₃ -xBiMnO ₃ 的合成与热膨胀性能研究 (王小伟 于然波 邢献然)	227
亚微米空心镍球的溶剂热制备及表征 (胡晓鹏 于然波 王 丹 等)	230
NaOH 熔盐法处理富钛料制备 TiO ₂ 基础研究 (张 晓 齐 涛 王丽娜 等)	233
熔盐镀钨体系电结晶机理的研究 (马瑞新 康 勃 王目孔)	238
Studies on the Textures of Tungsten Coatings Electrodeposited from Na ₂ WO ₄ -WO ₃ -ZnO Molten Salts (Ma Ruixin Kang Bo Wang Mukong)	241
循环伏安法研究 Na ₂ WO ₄ -WO ₃ -ZnO 熔盐镀钨过程 (马瑞新 王目孔 李国勋)	245

冶金流程与生态研究

首秦冶金流程标准化作业体系的研究 (余 进 田乃媛 徐安军 等)	248
大型钢厂转炉—连铸区段产能匹配模式研究 (刘 原 王 锋 汪红兵 等)	254
宣钢炼钢、轧钢系统用能和煤气系统优化研究 (吴少华 田乃媛 徐安军 等)	258
高温熔渣双利用新型保温容器中动态降温规律与控温方法的研究 (李 辉 苍大强 白 皓 等)	262
熔渣中锌、铅挥发行为的热力学分析 (张延玲 韩丽辉 付中华 等)	267
冶金粉尘压块直接还原及锌铅和碱金属的脱除研究 (李会芳 郭占成 宋 波)	273
燃煤可吸入颗粒物的形成及其过程控制 (马 艳 白 皓 苍大强 等)	278
碳酸钠水热溶液中微硅粉的溶解动力学 (付 娜 林荣毅 郭占成 等)	282
钢铁厂烧结过程 SO ₂ 排放特性的试验研究 (鄂琳琳 苍大强 程相利 等)	287
基于 FLUENT 的撞击流反应器内气固两相流数值模拟 (严定舜 李敏二 唐惠庆 等)	291

高发射率涂料应用于高炉热风炉的数学模拟及节能分析 (王 苗 白 皓 苍大强 等)	296
数字化水网技术及其在钢铁企业中的应用探讨 (王姜维 李素芹)	300
基于 AGDP 理论的钢铁工业技术经济研究 (姚 远 潜 伟)	304

北京科技大学冶金与生态工程学院部分科研工作简介

“金属矿产资源高效及循环利用技术”研究梯队简介	309
“钢铁冶金过程合理化”研究梯队简介	314
“钢铁冶金循环经济产业技术”研究梯队简介	319
“多相反应理论及冶金、材料制备新技术”研究梯队简介	325
“特殊钢冶金”研究梯队简介	329
“洁净钢”研究梯队简介	333
“金属材料制备物理化学”研究梯队简介	337
“连铸新技术”研究梯队简介	343
“连铸技术与理论”研究梯队简介	344
“冶金节能与环保”研究梯队简介	348
“铁合金与电热冶金”研究梯队简介	351
“资源与环境物理化学”研究梯队简介	356
“电化学冶金”研究梯队简介	360
“工业生态、城市生态”研究梯队简介	362
“材料制备过程物理化学”研究梯队简介	366
“冶金与能源电化学”研究梯队简介	367
“科学技术史”国家重点学科研究梯队简介	371

烧结过程中铁矿粉熔融性的研究

戴宇明 吴胜利 裴元东 边妙莲 杨 丽

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要: 烧结过程中, 铁矿粉的熔化和流动行为对烧结矿的生产质量有重要意义。本文通过微型试验观察不同类型铁矿粉在烧结过程中的熔化流动过程, 首次发现了铁矿粉的熔融曲线, 并提出了“软化温度”、“熔化流动温度”、“剧烈流动率”和“ T_{30} 值”等熔融性指标; 通过比较不同类型铁矿粉的熔融曲线, 探讨了 CaO 含量对铁矿粉熔融性的影响。研究表明: 当 CaO 含量超过某一值 n_c 时, 铁矿粉在坍塌前经历剧烈和缓慢两次收缩; 当 CaO 含量低于某一浓度 n_c 时, 铁矿粉只经历缓慢收缩, 此 n_c 值在 8% 左右。

关键词: 铁矿粉; 烧结; 熔融性; 初始液相; 熔化流动

Study on Smelting Property of Iron Ore during Sintering

Dai Yuming Wu Shengli Pei Yuandong Bian Miaolian Yang Li

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Molten and flowing behavior of iron ore is important for the quality of sinter. Molten and flowing process for different types of ores was observed in microscale experiment. Smelting curve was found at the first time. Meanwhile, concepts of “softening temperature”, “molten-flowing temperature”, “drastic flowing rate” and “ T_{30} value” were proposed. Effect of CaO content on smelting property was discussed by comparing with smelting curves of different types of ores. The research indicates that the iron ore experiences drastic and slow shrinkage when CaO content exceeds some concentration n_c . But there is only slow shrinkage when CaO content is less than n_c . The value of n_c is about 8%.

Key words: iron ore; sintering; smelting property; initial liquid; molten and flowing

1 引言

烧结矿是高炉生产的主要原料, 其生产质量直接影响高炉的生产技术指标, 而铁矿粉又是烧结矿生产的最重要原料, 所以对铁矿粉烧结特性的研究对获得优质高产烧结矿、进而对高炉的生产有着重要的意义。

近年来, 烧结工作者对铁矿粉的自身特性进行了大量的研究, 而铁矿粉的高温特性越来越被重视。研究表明, 铁矿粉在高温下的熔化和流动行为对烧结过程中的液相扩大和烧结矿的质量有很大影响^[1~5]。但是, 这些工作大多属于对铁矿粉高温条件下静态性指标的研究, 没有反映铁矿粉从生成液相到液相完全流动这一动态过程的变化。

本文提出的铁矿粉的烧结熔融性, 表征铁矿粉在烧结过程中与熔剂发生物理化学反应而形成液相、液相流动的整个过程所呈现的行为和作用。因而, 研究铁矿粉的烧结熔融性, 有助于详细了解铁矿粉从生成烧结液相到烧结液相完全流动的

过程, 从而可以更加全面地掌握铁矿粉的烧结高温特性。

本文在近似模拟烧结温度和气氛的条件下, 通过测定铁矿粉试样沿高度的收缩率随温度的变化曲线, 考察铁矿粉在烧结过程中的熔化流动过程, 并给出了若干铁矿粉烧结熔融性的评价指标。在此基础上, 比较了 6 种典型铁矿粉在烧结熔融性方面的差异, 并分析了 CaO 含量对铁矿粉烧结熔融性的影响。

2 试验原料和方法

2.1 试验原料

试验中所使用的铁矿粉为: 澳洲褐铁矿 A、澳洲半褐铁矿 B、澳洲赤铁矿 C、南非赤铁矿 D、巴西赤铁矿 E 和 F。6 种铁矿粉的主要化学成分见表 1。

试验中使用 CaO 试剂与铁矿粉进行混合, 配制二元碱度分别为 2 和 4, 将混合物研磨至小于 0.074mm (−200 目), 使其成分均匀。

表 1 铁矿粉化学成分 (质量分数) (%)

矿石代号	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	LOI
A	58.49	4.44	1.51	10.2
B	62.70	3.38	2.14	4.43
C	63.19	3.99	2.17	2.93
D	65.50	3.86	1.43	0.90
E	66.80	1.15	1.01	1.62
F	66.02	3.64	0.69	0.90

2.2 试验方法

将铁矿粉研磨后,与 CaO 试剂充分混合,制成 3mm×3mm 的圆柱形小饼试样,然后将其送入熔点熔速测定装置,此设备简图如图 1 所示。试样在加热炉

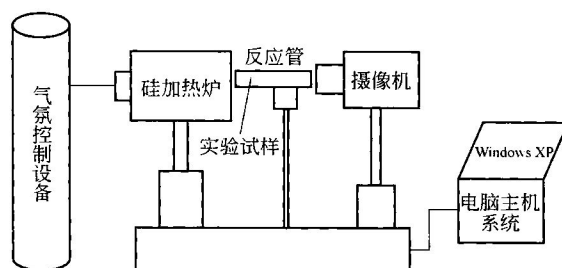


图 1 试验设备简图

中开始升温,试样沿高度方向随温度变化的收缩现象可通过摄像机以及连接的电脑得到和记录,如图 2 所示。

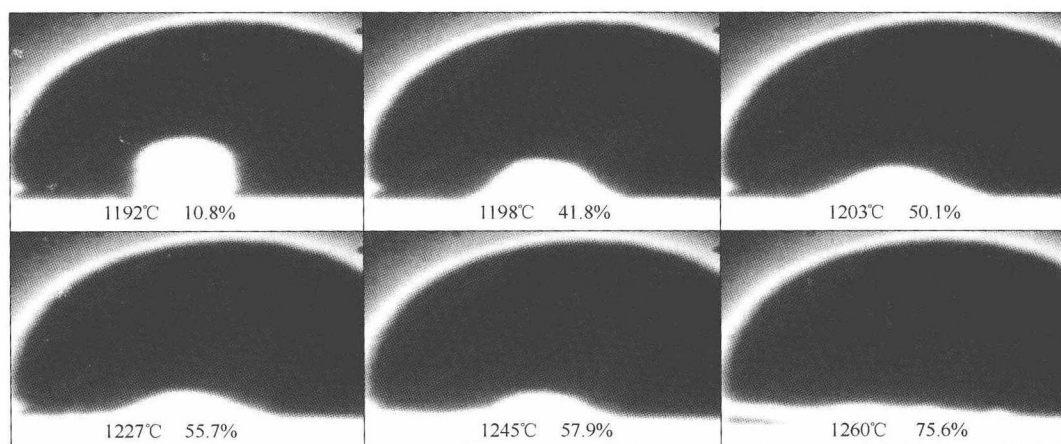


图 2 铁矿粉试样熔融过程形貌图

本试验先通入空气,1100℃后通入氮气,升温速率为 20℃/min,至 1400℃停炉。试验结束后,以温度为横坐标,试样的高度收缩率为纵坐标,可得到铁矿粉高度收缩率随温度变化的曲线图。

3 结果与分析

3.1 高度收缩率随温度变化曲线及其分析

试验过程中,在碱度 $R=2.0$ 和 $R=4.0$ 的条件下,分别记录了不同温度下铁矿粉沿高度方向的收缩率。图 3 所示为 6 种铁矿粉高度收缩率随温度变化的曲线。

从图 3 中可以看出:当碱度由 2.0 升高到 4.0 时,铁矿粉的收缩率明显增大。在 $R=2.0$ 的条件下,铁矿粉 A 明显地经历了剧烈收缩和缓慢收缩,其他五种铁矿粉一直缓慢收缩。在 $R=4.0$ 的条件下,铁矿粉 A、B、C、D 和 F 明显地先经历剧烈收缩,然后经历缓慢收缩,最后开始坍塌;而铁矿粉 E 一直缓慢收缩,并没有经历剧烈收缩。

在 1200℃之前,铁矿粉高度收缩率均无明显变化,由理论可知,在此温度之前发生的是固相反应,即 Fe_2O_3 和 CaO 反应生成铁酸钙^[6]。部分铁矿粉在温度到达 1200℃左右时,其高度收缩率开始剧烈变化,

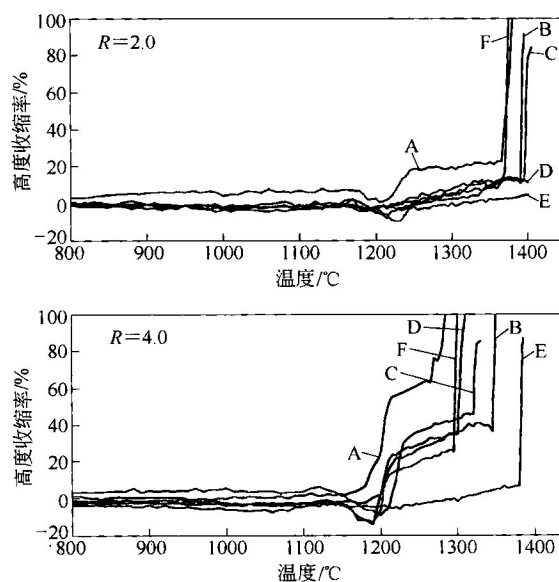


图 3 各铁矿粉高度收缩率随温度变化的曲线图

从图中能看到一个明显的剧烈收缩段,其过程很短,约几十秒钟。分析可知^[6],1205℃为 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的低熔点共晶温度点。可见,在这段时间,铁酸钙熔化生成液相,因动力学条件良好,反应

速度非常快,试样收缩很剧烈。过了剧烈收缩段,铁矿粉开始经历较为平缓的收缩。在这个缓慢收缩段中,随温度继续升高,大量剩余的铁矿粉溶入液相使液相量增多,但同时液相的黏度也有所升高,所以试样收缩不是很明显。缓慢收缩段持续几分钟后,铁矿粉试样突然坍塌,坍塌过程很快,通常只需 1~2s,这主要因为随着液相数量的增多,铁矿粉试样无法支撑,所以瞬间倒塌,同时在该温度下可能伴随一些化学反应,如赤铁矿转变为磁铁矿^[7-8]。

3.2 熔融性评价指标的提取

在升温过程中,大部分试样经历了剧烈收缩和缓慢收缩两次收缩,最后坍塌。如图 4 所示,本文定义收缩起点的温度为“软化温度”;开始坍塌的温度为“熔化流动温度”;剧烈收缩区间内单位温度上收缩率的变化为剧烈流动率,如式(1)所示;铁矿粉的高度收缩率达到 30% 时的温度为 T_{30} 值。

$$\text{剧烈流动率} = \frac{\text{剧烈收缩段高度收缩率}}{\text{剧烈收缩段温度区间}} \quad (1)$$

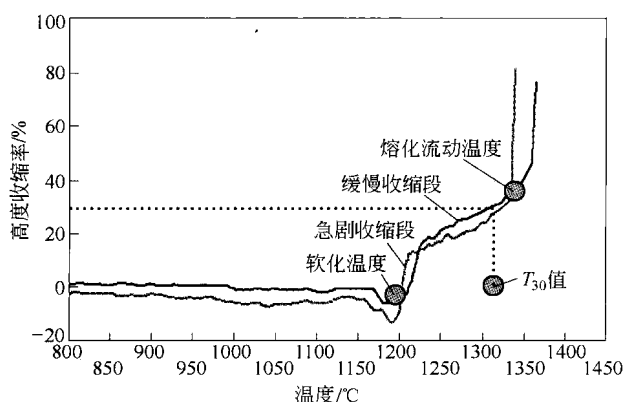


图 4 熔融性各个指标的定义

软化温度是试样开始收缩的温度,其反映了初始液相的生成温度。熔化流动温度是试样开始坍塌的温度,其反映了液相完全流动的温度,对烧结过程中的液相流动有较大影响。剧烈流动率是指在剧烈收缩段,单位温度上高度收缩率的变化,其反映了初始液相的形成速率,对烧结过程中的温度控制有较大影响。 T_{30} 值是指铁矿粉的高度收缩率达到 30% 时的温度,其反映了达到合适液相数量的温度^[9,10]。

3.3 各种铁矿粉熔融性的评价

由上述结果可知,不同类型的铁矿粉,其熔融性指标不同,6 种铁矿粉熔融性指标的评价见表 2。

表 2 各种铁矿粉熔融性指标的评价

矿石类型	熔化流动温度	剧烈流动率	T_{30} 值
A	较低	较大	较低
B	较高	居中	适宜 ^①

续表 2

矿石类型	熔化流动温度	剧烈流动率	T_{30} 值
C	适宜 ^①	居中	适宜 ^①
D	适宜 ^①	居中	适宜 ^①
E	较高	较小 ^①	较高
F	适宜	较小 ^①	较高

① 表示最有利于烧结生产。

在评价铁矿粉烧结熔融性时,应综合考虑熔融性的各个指标。就熔融性而言,澳洲赤铁矿 C、南非赤铁矿 D、巴西赤铁矿 F 较有利于烧结生产。但是,烧结生产是一个受多方面因素影响的过程,在考虑熔融性的同时,还要综合考虑铁矿粉其他特性的影响。

3.4 CaO 含量对铁矿粉熔融性的影响

从 CaO-Fe₂O₃ 二元相图(见图 5)可以看出,平衡状态下,CaO 含量(质量分数)不同时,CaO 与 Fe₂O₃ 结合所形成的共熔物不同,因而铁矿粉高度收缩率随温度变化的曲线也不一样。

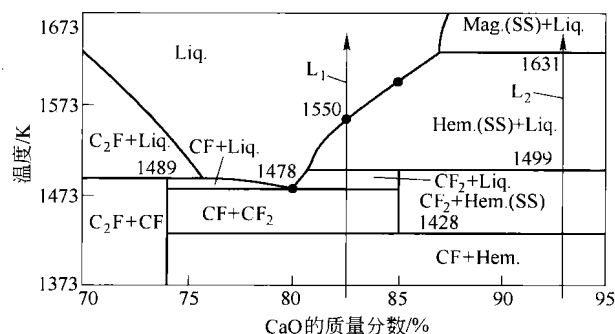


图 5 CaO-Fe₂O₃ 二元相图

图 6 所示为不同二元碱度 R 下 6 种铁矿粉的 CaO 含量比较。从图中可见:在 $R=2.0$ 时,铁矿粉 A 的 CaO 含量最高;在 $R=4.0$ 时,铁矿粉 E 的 CaO 含量最低。在 $R=4.0$ 时,假定按照平衡态考虑,铁矿粉 E 按照 L_2 (见图 5) 变化,在 1226℃ 左右,反应式(2)发生,开始缓慢收缩;而其他铁矿粉按照 L_1 变化,在 1205℃ 左右,反应式(3)发生,开始剧烈收缩,到了 1226℃ 左右,反应式(3)结束,反应式

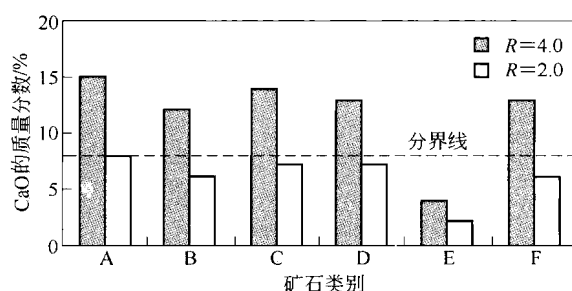


图 6 各种铁矿粉的 CaO 含量

(4) 开始, 剧烈收缩结束, 缓慢收缩开始。在 $R = 2.0$ 时, 铁矿粉 A 按照 L_1 变化, 经历了剧烈收缩段, 而其他铁矿粉按照 L_2 变化, 只经历了缓慢收缩段。

($CF_2 + \text{Hem}$) 固相 $\longrightarrow$ (Hem) 固相 + 液相 (2)

($CF_2 + CF$) 固相 $\longrightarrow$ (CF_2) 固相 + 液相 (3)

(CF_2) 固相 + 液相 $\longrightarrow$ (Hem) 固相 + 液相 (4)

从上述分析可知: CaO 含量的不同导致了铁矿粉高度收缩率随温度变化曲线的不同。图 6 中分界线以上的铁矿粉体系都经历了剧烈收缩, 而分界线以下的体系则都没有。所以, 可能存在某一值 n_e , 当 CaO 含量大于 n_e 时, 铁矿粉经历剧烈收缩; 当 CaO 含量小于 n_e 时, 铁矿粉不经历剧烈收缩。 n_e 值如图中分界线所示, 在 8% 左右。但此 n_e 值低于图 5 所示的值, 可能因为铁矿粉体系是一个多元体系, $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$ 二元相图未考虑 SiO_2 和 Al_2O_3 等含量的影响; 另外, 烧结过程是一个非平衡态的过程, 本节通过相图的分析仅作为对熔融性分析的一个参考。

4 结论

(1) 铁矿粉的烧结熔融性表征其在烧结熔融历程中的行为和作用。这一新概念及其评价指标的提出, 有助于全面地掌握铁矿粉从液相生成到液相完全流动过程中所呈现的自身特性, 从而为烧结优化配矿提供技术依据。

(2) 根据铁矿粉高度收缩率随温度变化的曲线, 可以得到“软化温度”、“熔化流动温度”、“剧烈流动率”和“ T_{30} 值”等指标。每一个指标反映了铁矿粉熔融性的不同方面。

(3) 不同类型的铁矿粉沿高度方向收缩率的变

化有明显差异, 这表明熔融性是铁矿粉烧结高温特性的重要指标。就烧结熔融性而言, 澳洲赤铁矿 C、南非赤铁矿 D、巴西赤铁矿 F 较有利于烧结生产。

(4) 配加 CaO 含量的不同会导致铁矿粉高度收缩率随温度变化的曲线发生变化。当 CaO 含量超过某一值 n_e 时, 铁矿粉在坍塌前经历剧烈和缓慢两次收缩; 当 CaO 含量低于 n_e 时, 铁矿粉只经历缓慢收缩。此 n_e 值约为 8%。这表明烧结二元碱度对铁矿粉的熔融性有重要影响, 利用相图可对其进行定性分析。

参考文献

- [1] EIKI Kasai, WU Shengli, YASUO Omori. Factors Governing the Strength of Agglomerated Granules after Sintering[J]. ISIJ International, 1991, 31(1): 17~23.
- [2] 吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿石烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 254~257.
- [3] LOO C E, LEUNG W. Factors Influencing the Bonding Phase Structure of Iron Ore Sinter[J]. ISIJ International, 2003, 43(9): 1393~1402.
- [4] 吴胜利, 杜建新. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 291~293.
- [5] MASARU Matsumura, MASAHIKO Hoshi, TAKAZO Kawaguchi. Improvement of Sinter Softening Property and Reducibility by Controlling Chemical Compositions[J]. ISIJ International, 2005, 45(4): 594~602.
- [6] 王筱留. 钢铁冶金学 (炼铁部分) (第2版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [7] 张家芸. 冶金物理化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [8] 郭兴敏, 朱利, 李强, 等. 高碱度烧结矿的矿物组成与矿相结构特征[J]. 钢铁, 2007, 42(1): 17~20.
- [9] 杨丽. 宝钢常用铁矿粉熔融性的研究[C]. 北京: 北京科技大学, 2008.
- [10] 裴元东. 铁矿粉的烧结配合性及其应用技术研究[C]. 北京: 北京科技大学, 2008.

不同因素对含钛铁矿石烧结过程中铁酸钙生成的影响研究

张增召¹ 赵金龙² 郭兴敏¹

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083;
2. 石家庄钢铁有限责任公司, 石家庄 050011)

摘 要: 针对含钛烧结矿的特点, 在实验室采用 X 射线定量分析的方法, 研究了各因素对含钛铁矿石烧结过程中铁酸钙生成量影响的研究。结果表明, Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、碱度、温度等因素对含钛烧结矿中铁酸钙生成有不同程度的影响, 从而找到了含钛烧结矿铁酸钙生成的影响因素, 为实际含钛烧结矿生产提供了理论指导。
关键词: 含钛烧结矿; X 射线定量分析; 铁酸钙; 影响因素

Effects of Different Condition on Calcium Ferrite Formation in Sintering of Ti-containing Iron Ore

Zhang Zengzhao¹ Zhao Jinlong² Guo Xingmin¹

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 2. Shijiazhuang Iron & Steel Co., Ltd., Shijiazhuang 050011)

Abstract: In allusion to the characteristic of sinter containing titanium, the test on the influence factors of calcium ferrite generation during Titanium iron ore concentrates sintering was conducted in laboratory with X-ray quantitative analysis, the results show that Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , basicity, sintering temperature and sintering atmosphere influence calcium ferrite generation in different degree, consequently we find the influence law of calcium ferrite generation during Titanium iron ore concentrates sintering. It give a theory guidance for the practical Titanium iron ore concentrates sintering.
Key words: sinter containing titanium; X-ray quantitative analysis; calcium ferrite; influence factors

1 实验方法

为使实验与实际生产更加接近, 需要将化学试剂按照一定比例配制成 4 种铁矿粉, 然后模拟铁矿石烧结^[1], 具体操作如下:

(1) 按一定比例配出 4 种矿粉, 将配完的每种矿粉放入研钵中, 各自研磨约 10min, 使化学试剂充分混匀。将混匀的矿粉每次取 5g 放入压样模具中, 在压样机 5MPa 压强下, 加压约 1min, 取出, 得到直径 15mm、高约 10mm 的圆柱形样品块。

(2) 将压好的样品块放入马弗炉中, 在 1250℃ 下焙烧 1h, 获得不同化学配比的模拟矿石^[2], 包括 1 种普通矿和 3 种含钛矿。将烧好的模拟矿石研磨至 0.074mm (200 目), 得到不同配比的矿粉, 按照矿物组成要求在矿粉中配以不同比例的 MgO 和 CaO , 以 2.0% TiO_2 、1.8% MgO 、2.0% Al_2O_3 、碱度 2.2、温度 1215℃ 和空气气氛下为基准, 考虑表 1 所示的因素变化。

表 1 实验因素

编 号	TiO_2 的 质量分数 /%	MgO 的 质量分数 /%	碱度 R	Al_2O_3 的 质量分数 /%	气氛 ($\text{N}_2 : \text{O}_2$)	温度 /℃
1	0	1.8	2.2	2	5 : 1	1215
2	1	1.8	2.2	2	5 : 1	1215
3	2	1.8	2.2	2	5 : 1	1215
4	3	1.8	2.2	2	5 : 1	1215
5	4	1.8	2.2	2	5 : 1	1215
6	2	1.0	2.2	2	5 : 1	1215
7	2	1.4	2.2	2	5 : 1	1215
8	2	1.8	2.2	2	5 : 1	1215
9	2	2.2	2.2	2	5 : 1	1215
10	2	2.6	2.2	2	5 : 1	1215
11	2	1.8	2.0	2	5 : 1	1215
12	2	1.8	2.2	2	5 : 1	1215

续表 1

编号	TiO ₂ 的质量分数 /%	MgO 的质量分数 /%	碱度 R	Al ₂ O ₃ 的质量分数 /%	气氛 (N ₂ : O ₂)	温度 /℃
13	2	1.8	2.4	2	5 : 1	1215
14	2	1.8	2.2	1	5 : 1	1215
15	2	1.8	2.2	2	5 : 1	1215
16	2	1.8	2.2	3	5 : 1	1215
17	2	1.8	2.2	2	5 : 1	1205
18	2	1.8	2.2	2	5 : 1	1215
19	2	1.8	2.2	2	5 : 1	1225

(3) 将混匀的每一样品均分成三份 (每份 4g), 每份样品放入压样模具中在 5MPa 压强机下加压 1min, 得到直径 15mm、高约 8mm 的圆柱形样品块, 将制备好的样品块放入电炉中, 在指定的温度和气氛下加热 10min 取出, 在空气中冷却, 将制得的样品研磨至 0.048mm (300 目), 在 X 射线衍射仪上进行分析, 同时用 XRD-QAMS 软件进行定量分析^[3]。

2 实验结果及讨论

在 1215℃ 空气条件下烧结 10min, TiO₂ 含量 (质量分数) 对铁酸钙生成量的影响如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 在实验所取范围内, 铁酸钙的生成量随着 TiO₂ 含量的增加而下降, 铁酸钙为黏结性能良好的黏结相, 其含量的下降必然导致烧结矿强度的降低。

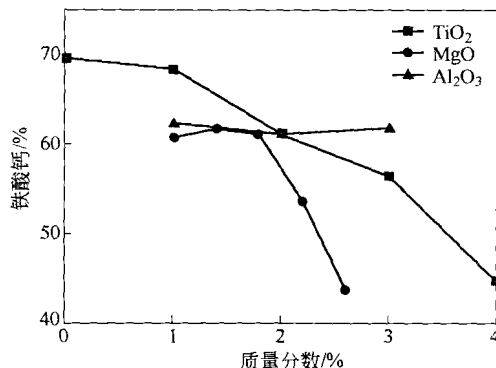


图 1 各成分含量对铁酸钙生成的影响

在配加含钛矿烧结 (2% TiO₂) 时, 1215℃ 空气条件下烧结 10min, MgO 含量 (质量分数) 对铁酸钙生成量的影响如图 1 所示。从图 1 中可以看出, MgO 含量较低时, 其含量的增加对铁酸钙生成有促进作用, 但当含量超过 2.0% 左右时, 其含量增加又会使铁酸钙含量明显下降, 这必然导致烧结矿强度下降, 粉化率增加, 因此一般将 MgO 含量控制在 2% 左右较为合理。

在配加含钛矿烧结 (2% TiO₂) 时, 1215℃ 空气条件下烧结 10min, Al₂O₃ 含量 (质量分数) 对铁酸

钙生成量的影响如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 在实验所取范围内, Al₂O₃ 含量对铁酸钙生成量影响不太明显, 在实验所取范围内, 铁酸钙的生成量保持在 63% 左右, 从这一结果可以看出, Al₂O₃ 含量在 1% ~ 3% 范围内铁酸钙的生成量均比较理想。

在配加含钛矿烧结 (2% TiO₂) 时, 1215℃ 空气条件下烧结 10min, 碱度对铁酸钙生成量的影响如图 2 所示。从图 2 中可以看到, 在实验所取范围内, 随着碱度的增加, 烧结矿中铁酸钙的生成量明显增加, 所以随着碱度的增加, 烧结矿的强度不断提高。

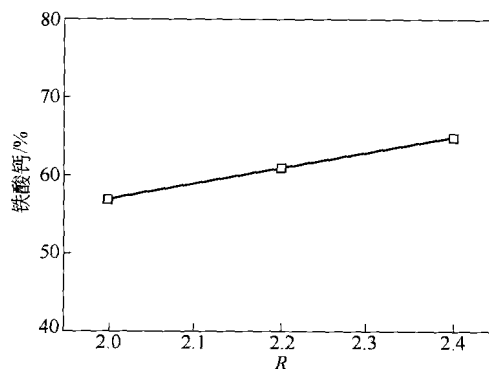


图 2 碱度含量对铁酸钙生成的影响

在配加含钛矿烧结 (2% TiO₂) 时, 不同温度空气条件下烧结 10min, 温度对铁酸钙生成量的影响如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 在实验所取温度范围内, 铁酸钙的生成量随着温度的升高而明显的增加, 1205℃ 时铁酸钙含量仅为 48%, 当温度升高到 1225℃ 时, 铁酸钙生成量达到 65%, 可见适当提高温度可明显改善铁酸钙的生成量。

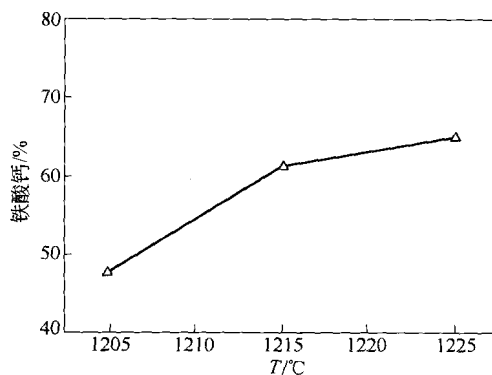


图 3 温度对铁酸钙生成的影响

3 结论

(1) 不同成分对铁酸钙生成的影响有所不同, TiO₂ 增加会降低烧结矿中铁酸钙的生成; 在配加含钛矿烧结 (2% TiO₂) 时, MgO 含量应控制在 2% 左右, 过高或过低都会影响铁酸钙的生成; 在

配加含钛矿烧结 (2% TiO_2) 时, Al_2O_3 含量在 1% ~ 3% 范围内变化时, 铁酸钙生成量均保持在较为理想的范围内。

(2) 在配加含钛矿烧结 (2% TiO_2) 时, 适当的提高烧结矿的碱度有利于铁酸钙的生成。

(3) 在配加含钛矿烧结 (2% TiO_2) 时, 烧结温度与含钛烧结矿中铁酸钙组成有密切关系, 在一定范围内提高烧结温度, 铁酸钙的生成量会明显增加。

参 考 文 献

- [1] 刘竹林, 陈子林, 汤乐云, 等. 烧结工艺优化试验研究[J]. 钢铁, 2006, 41(5): 16 ~ 19.
- [2] 甘勤, 何群, 等. 影响钒钛烧结矿铁酸钙生成因素的研究[J]. 烧结球团, 2008, 33(2): 9 ~ 14.
- [3] 薛明升. X 射线衍射法进行矿物定量的研究与软件设计[C]. 北京: 北京科技大学, 2006.

杭钢烧结原料优化配矿的基础研究及应用

林剑平^{1,2} 吴胜利¹ 韩宏亮¹ 裴元东¹

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083;

2. 杭州钢铁集团公司, 杭州 310022)

摘要: 本文对杭钢常用铁矿粉的同化性、液相流动性、黏结相自身强度、铁酸钙生成特性、连晶固结强度等高温烧结特性进行了研究, 并探讨了各种铁矿粉的合理使用原则。在此基础上, 设计了四组烧结优化配矿方案, 并进行了烧结杯试验, 均获得了良好的烧结效果, 验证了基于铁矿粉高温特性的烧结优化配矿方法的可行性, 为杭钢充分利用已有的铁矿粉资源、改善烧结矿质量提供了良好的对策。

关键词: 铁矿粉; 烧结; 高温特性; 优化配矿

Foundation Study and Application of Sinter Raw Materials Optimization in HISGC

Lin Jianping^{1,2} Wu Shengli¹ Han Hongliang¹ Pei Yuandong¹

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 2. Hangzhou Iron & Steel Group Company, Hangzhou 310022)

Abstract: In this paper, iron ores from HISGC were researched toward their high temperature characteristics, such as assimilation, liquid phase fluidity, self-strength of bonding phase, the forming ability of SFCA, and connecting strength of crystal, besides the principle of using iron ores rationally was discussed. In the meantime, four optimizing sintering ore proportioning schemes were designed and sinter pot test were carried out. Results of sinter pot confirmed the method of optimizing ore proportioning based on high temperature characteristics. This work provides good countermeasure for improving sinter quality and reducing sinter cost as soon as possible, under the condition of making full use of the existing iron ore resources in HISGC.

Key words: iron ore; sinter; high temperature characteristics; optimizing proportioning

1 引言

长期以来, 在烧结配矿时, 人们基本上都是根据铁矿粉的化学成分以及物理性能来选择铁矿粉种类, 然后通过烧结杯试验来验证, 并选出合理的烧结原料结构来组织生产^[1,2]。这种方法对烧结生产起到了一定的作用, 但不利于烧结生产的高效化管理以及烧结矿质量的正确预测。

不同的铁矿粉具有不同的烧结特性, 这一点已经从生产实践中得到了具体的体现。即使是同一铁矿粉公司的矿粉, 虽然其化学成分很接近, 但其烧结特性仍可能存在明显不同, 因而生产出的烧结矿的质量也有差异。因此, 通过研究烧结所用的铁矿粉的高温特性来指导配矿, 从而改善烧结矿的冶金性能、提高烧结矿品位, 进而提高高炉生产率、降低焦耗、节省成本, 是钢铁企业非常注重的技术新方向。

本文通过对杭钢常用的铁矿粉的烧结高温特性及其互补特性的研究, 探讨了这些铁矿粉的合理使用原则, 在此基础上设计了烧结优化配矿方案, 并通过烧结杯试验进行了验证, 为杭钢优化烧结原料结构、改善烧结矿质量提供理论基础和技术对策。

2 杭钢烧结常用铁矿粉的化学成分

杭钢烧结常用铁矿粉的化学成分见表1。铁矿粉S-E和S-I的含铁品位很高, 均在66.5%以上, 烧损含量很低, 仅为0.01%, 但S-E的 Al_2O_3 含量相对较高; S-A和S-H的含铁品位很低, 均小于60.1%, 且S-A的烧损含量很高而S-H的 Al_2O_3 含量很高; 其他铁矿粉的含铁品位均在61.5%~63.7%之间, Al_2O_3 含量也较高。在烧结配矿中, 应根据各种铁矿粉不同的铁品位、 SiO_2 含量和 Al_2O_3 含量等进行优化搭配, 以获得合适的烧结矿化学成分。

表 1 烧结用铁矿粉的化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of iron ores (%)

铁矿粉 代号	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	LOI
S-A	58.04	0.44	5.31	1.48	0.20	0.55	0.05	0.012	0.045	9.42
S-B	61.68	0.57	3.65	1.91	0.20	0.20	0.14	0.028	0.064	5.68
S-C	63.09	0.72	4.05	2.32	0.20	0.20	0.13	0.016	0.078	2.88
S-D	61.74	0.58	4.13	2.30	0.20	0.26	0.21	0.022	0.083	4.60
S-E	66.54	0.00	5.30	1.82	0.54	1.00	0.05	0.040	0.072	0.01
S-F	63.68	1.00	5.82	1.12	0.20	0.25	0.30	0.020	0.042	1.28
S-G	62.42	20.08	6.36	1.40	1.46	1.50	0.16	0.048	0.065	0.55
S-H	60.05	21.04	7.57	2.44	1.04	0.73	0.15	0.291	0.027	2.63
S-I	66.71	26.53	3.10	0.95	1.06	0.90	0.25	0.311	0.016	0.01

3 杭钢常用铁矿粉的烧结高温特性研究

铁矿粉的烧结高温特性又称“铁矿粉的烧结基础特性”，是指铁矿粉在烧结过程中呈现出的高温物理化学性质，它反映了铁矿粉的烧结行为和作用，主要包括同化性、液相流动性、黏结相自身强度、铁酸钙生成特性、连晶固结强度等^[4]。近年来国内外基于这一新概念的烧结优化配矿实践结果表明，掌握铁矿粉的烧结高温特性具有重要意义。

本文应用这一新概念，针对杭钢烧结常用铁矿粉进行烧结基础特性的实验测定，以把握它们的烧结高温特性，明确它们的互补原则，从而指导烧结优化配矿。

铁矿粉的烧结基础特性的测定方法及检测设备等可参考文献 [3~8]，由于篇幅所限，此处不再给出。

3.1 同化性

同化性是指铁矿粉在烧结过程中与熔剂反应而生成液相的能力，可以采用测定其最低同化温度的方法予以评价，铁矿粉的最低同化温度高，则其同化性低^[4,5]。一般而言，同化性高的铁矿粉，在烧结过程中容易生成液相，但过高的同化性会影响烧结料层的热态透气性，所以要求铁矿粉的同化性适宜。本文测定的各种铁矿粉的最低同化温度结果如图 1 所示。

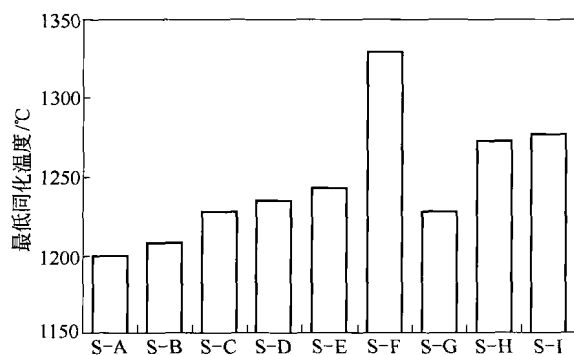


图 1 各种铁矿粉的最低同化温度比较

Fig. 1 Lowest assimilability temperature of iron ores

由图 1 可见，S-G 具有很高的最低同化温度，在 1300℃ 以上，说明其同化性很低；相反，S-A、S-B、S-C、S-D、S-E 和 S-G 的最低同化温度仅在 1200 ~ 1250℃ 之间，同化性很高；S-H 和 S-I 的最低同化温度在 1250 ~ 1300℃ 之间，同化性居中。各种铁矿粉的同化性存在明显差异，说明它们在烧结过程中形成液相的能力有别，在烧结配矿中，应该采取同化性互补原则，即同化性过高和过低的铁矿粉搭配使用，互相弥补，以使在烧结过程中获得适宜的同化性能，为烧结混合料的固结提供适宜的黏结相。

3.2 液相流动性

液相流动性是指铁矿粉在烧结过程中生成的液相的流动能力，可以采用测定其流动性指数的方法予以评价^[4,6]。一般而言，液相流动性大的铁矿粉，其黏结周围的物料的范围也较大，但液相流动性也不能过大，否则对周围物料的黏结层厚度会变薄，烧结矿易形成薄壁大孔结构，使烧结矿整体变脆，强度降低。由此可见，适宜的液相流动性才是确保烧结矿有效固结的基础。本文测定的 1280℃ 下各种铁矿粉的烧结液相流动性指数的结果如图 2 所示。

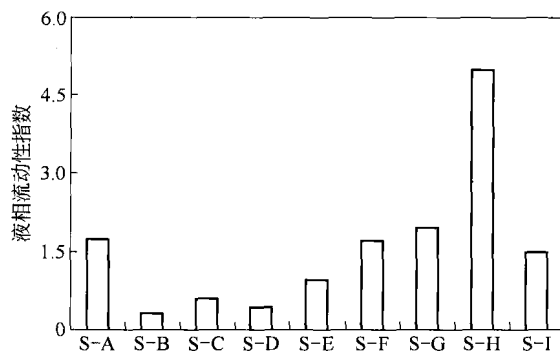


图 2 各种铁矿粉液相流动性指数比较

Fig. 2 Liquid phase fluidity characteristic of iron ores

由图 2 可见，S-H、S-G、S-A 和 S-F 的液相流动性指数较大，均在 1.5 以上，尤其是 S-H，其液相流动性指数达到了 4.976；S-B、S-C、S-D、S-E 的液相流动性指数较小，均在 1 以下；而 S-I 的液相流动性指数居中，在 1 ~ 1.5 之间。在烧结过程中，应当将液相流动性大小不同的铁矿粉搭配使用，以获得液相流动性适宜的烧结氛围。

3.3 黏结相自身强度

黏结相自身强度是指铁矿粉生成的固结未熔烧结料的液相冷凝后（形成黏结相）的自身强度。确保烧结固结强度需要足够的黏结相，而黏结相自身强度也是其非常重要的影响因素，可以通过测定试样的抗压强度予以评价^[4,7]。一般而言，使用黏结相自身强