

冶金研究



METALLURGY RESEARCH

(2008年)

主 编 朱鸿民

副主编 宋 波

冶金工业出版社

内容提要

冶金研究

(2008 年)

主 编 朱鸿民
副主编 宋 波

图书在版编目(CIP)数据

冶金研究. 2008 年. 宋鸿民主编. —北京: 冶金工业出版社, 2008.3

ISBN 978-7-302-44492-5

I. 冶… II. 宋… III. 冶金—文集 IV. TF-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第033698号

出版人 曹胜利

地址 北京北三环东路62号 邮编 100029

电话 (010) 64057250 电子邮箱 postmaster@cmpi.com.cn

责任编辑 刘小峰 张 青 文字编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 刘 雷 责任印制 牛晓霞

ISBN 978-7-302-44492-5

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

2008年3月第1版 2008年3月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16 印张: 626 千字 1-1200册

北 京

冶金工业出版社

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64057250 传真: (010) 64057250

冶金工业出版社 地址: 北京东直门北大街46号 邮编: 100027 电话: (010) 64057250

(本书印刷质量有问题, 本社发行部负责退换)

内 容 提 要

本书收录了冶金方面的学术论文 75 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。

(平 8002)

冶金工业出版社
主 编 宋 永 刚
副 主 编 宋 永 刚

图书在版编目(CIP)数据

冶金研究. 2008 年/朱鸿民主编. —北京: 冶金工业出版社, 2008. 3

ISBN 978-7-5024-4495-2

I. 冶… II. 朱… III. 冶金—文集 IV. TF-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 033698 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 心 版式设计 张 青

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4495-2

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

2008 年 3 月第 1 版, 2008 年 3 月第 1 次印刷

210mm × 297mm; 19 印张; 656 千字; 290 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)

《冶金研究》编委会名单

主 编 朱鸿民

副主编 宋 波

委 员 (按姓氏笔画排序)

王新华 王福明 邢献然 成国光

朱鸿民 苍大强 杨天钧 吴胜利

宋 波 张建良 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，由于金属材料在资源储量、生产成本、回收再使用率和良好的综合性能等方面所具有的明显优势，在可以预见的将来，金属材料在材料工业中占据的统治地位不会改变。

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”，对在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工艺技术和技术进步，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。

编 者
2008 年 3 月

目 录

炼铁原燃料与工艺研究

影响铁矿粉黏结相自身强度的微观分析及配矿方法探讨 (裴元东 吴胜利 陈 辉)	1
铁矿粉的同化特性及其互补配矿方法的研究 (张海涛 吴胜利 陈 辉 等)	6
高炉合理使用澳洲新块矿的研究 (薛 方 吴胜利 韩宏亮 等)	10
烧结过程布料均一性状态在线识别方法的研究 (李庆洋 张宗旺 周 卫 等)	14
富氧烧结对烧结矿矿相组成的影响 (褚世亮 贾彦忠 梁德兰)	18
基于稳定烧结终点配水操作指导的研究 (周 凡 张宗旺 周 卫 等)	22
马钢 300m ² 烧结机烧结添加剂的工业试验 (刘山平 张建良)	26
马钢烧结机垂烧速度的分段优化 (赵小红 刘山平 张建良)	30
升温速率对改质沥青配煤共焦化的影响 (梁 强 张丙生 郭汉杰 等)	35
干熄焦技术在鞍钢焦化厂的应用与实践 (刘双义 吴 铿 吴玮璐 等)	38
粒度对阳泉与潞安煤粉喷吹性能影响研究 (竺维春 高 斌 王玉会)	42
高炉喷吹用煤粉流动性研究 (王玉会 高 斌 程旺生)	45
高炉喷吹煤粉燃烧特性的研究 (黄福财 吴 铿 张建民 等)	49
新型燃烧促进剂对烟煤和无烟煤燃烧性能的影响研究 (王敏燕 苍大强 王颖茹)	52
无料钟高炉布料数学模型的开发 (张汝望 赵小红 张雪松 等)	56
科氏力对炉料运动及落点影响的理论解析 (余晓波 吴胜利 陈 辉 等)	59
中天钢铁炼铁厂 450m ³ 高炉增产降耗实践 (郭利平 吴 铿 费三林 等)	63
酒钢 1 号高炉在高煤比条件下强化冶炼技术的探索 (赵贵清 吴 铿 尹晓莹 等)	67
碱金属及锌对高炉操作的影响分析 (程旺生 高 斌 王玉会)	70
高炉风口取样技术在梅钢 2 号高炉的应用 (陆 宾 贾彦忠 宋建成)	74
高(Al ₂ O ₃)高炉渣脱硫性能研究 (刘胜涛 刘志敏 杨世山 等)	78
武钢高(Al ₂ O ₃)高炉渣流动性能实验研究 (郭 琼 刘志敏 李志强 等)	82

炼钢与连铸工艺研究

影响南钢 120t 顶底复吹转炉脱磷的因素分析 (李 晶 姚国伟 阿不力克木 等)	87
氧气转炉终点熔池氧预报模型的研究 (李士琦 陈 泽 刘 冰 等)	90
稀土铝铁合金的制备及其脱氧研究 (张金元 杨晓红 成国光)	93
鞍钢冶炼非调质 N80 增氮工艺研究 (李士琦 高金涛 王玉刚 等)	97
MgAl ₂ O ₄ -MgAlON 复合耐火材料作为精炼钢包炉衬应用的热力学分析 (叶 超 张 梅 王习东)	101
100t 钢包吹氩水模型实验研究 (蒋 静 才仁拉吉甫 李京社 等)	105
AOD 冶炼不锈钢的脱碳保铬模型分析 (李士琦 路俊萍 吴华峰 等)	109
0Cr13 不锈钢冶炼过程 VOD 脱碳脱硫研究 (侯东涛 郭汉杰)	113
60t 椭圆形钢包水力学模拟研究 (李士琦 冯美兰 王玉刚 等)	118

中间包结构优化研究 (茅晓慧 李京社 韩丽敏)	122
四流连铸中间包结构优化研究 (马 振 张体广 陈 敏 等)	125
兴澄新型中间包水力学模型研究 (安 邦 李红星 杜建峰 等)	128
控流装置对六流 T 型中间包钢水流动状态的影响 (金 杰 李向奎 钱宏智 等)	133
高拉速板坯连铸结晶器平均热流研究 (颜 滔 赵紫锋 张炯明 等)	137
GCr15 轴承钢小方坯连铸凝固传热数值模拟 (熊细伟 成国光 于春梅)	140
莱钢异型坯结晶器冷却状况研究 (贾 楠 包燕平 韩丽辉 等)	143
圆坯连铸结晶器用保护渣流动性能研究 (刘 亮 李京社 姚家华)	147
在线预报结晶器内保护渣卷入系统的开发 (于会香 王万军 王新华)	150
包钢小方坯结晶器电磁搅拌技术研究与实践 (薛 民 刘 青 王 宝)	153
包钢大方坯神经网络质量预报模型的开发 (李向奎 韩占光 钱宏智 等)	157
连铸板坯表面纵裂纹的形成原因与防止措施 (谢碧祥 才仁拉吉甫 李京社 等)	162
薄板坯低碳钢裂纹漏钢原因和解决措施 (杨 峰 张克强 段承轶 等)	166

钢渣与夹杂物研究

五元渣系 $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的硫容量模型 (才仁拉吉甫 谢碧祥 李京社 等)	171
炼钢初期铁溶液中硅、磷氧化的热力学研究 (柴国明 郭汉杰 陈 君)	175
转炉钢包渣改进的成分设计和工艺应用 (叶高旗 杨景军 成国光)	178
高碱度特殊钢精炼渣流动特性的研究 (吴 洋 成国光)	182
钢渣含钙相浸出的热力学分析及试验研究 (刘英金 宋 波 毛璟红 等)	186
镁对钢中非金属夹杂物变性作用的实验研究 (孙志坤 王静松 孙 伟 等)	190
邢钢 BOF—LF—CC 工艺生产冷镦钢洁净度的研究 (王 洋 包燕平 刘建华 等)	193
30CrMo 钢中非金属夹杂物行为研究 (高锦国 谢碧祥 李京社 等)	198
应用 DLA 模型对钢中夹杂物集团凝聚过程的三维模拟 (潘永红 李 宏 佐佐木康 等)	202

冶金流程研究

SPC 在炼钢厂运行控制中的应用研究 (杨永林 刘 青 王宏斌)	205
宣钢原料汽运与铁水铁路运输优化研究 (吴少华 田乃媛 徐安军 等)	209
EAF + K-OBM-S + VOD 冶炼不锈钢成本优化研究 (王彦明 李京社 李健民)	214
新型钢厂中 CAS/CAS-OB 适应性探讨 (王燕红 徐安军 田乃媛)	217
唐钢第二钢轧厂棒材生产线流程温度的解析和优化 (史兆辉 田乃媛 徐安军 等)	220

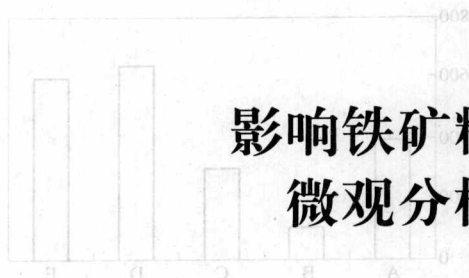
有色金属冶金研究

粉煤灰苏打烧结法制备氧化铝溶出熟料过程的研究 (闫 丽 薛济来 朱 骏)	224
铝电解用 TiB_2/C 功能梯度阴极材料的制备 (李百松 薛济来 朱 骏 等)	229
铝电解用 $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{Co}_3\text{O}_4$ 活性阳极材料的制备 (曾 涛 薛济来 朱 骏)	233
通空气直接氧化游离态的 Fe^{2+} 制备高纯氧化铁 (姚 芳 邹 兴 马德龙)	237
氯化锰废液中钙分离的研究 (马德龙 邹 兴 姚 芳)	241
电脉冲处理工业纯锌的研究 (张 辉 王静松 曹立军 等)	245

方波伏安法对氯化物体系中钛沉积的研究 (屈中锋 朱鸿民)	249
高比容钽粉的研究 (段世钰 刘莲云 朱鸿民)	253
一氧化碳选择性氧化催化剂 $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的制备 (李 想 朱鸿民)	256

冶金生态研究

复合掺杂对氧化锆基固体电解质电性能影响的研究进展 (单 科 郭兴敏)	260
钢铁厂能耗指标的分解模型研究 (王 刚 白 皓 张延玲 等)	265
气溶胶粒子在颗粒层中的收集效率试验研究 (钱文涛 白 皓 宗燕兵 等)	269
絮凝技术及其生态化分析与探讨 (马龙丽 李素芹)	273
污泥活性炭及其在焦化废水处理中的应用试验研究 (邬文鹏 李素芹 熊国宏 等)	276
吸附法处理含重金属废水的初步探讨 (孙 莹 李素芹)	280
利用工业生态系统固定利用 CO_2 等废物资源 (张志宏 李 宏)	284
高磷铁矿湿法脱磷研究 (孟嘉乐 曹 晶 沈少波 等)	287



影响铁矿粉黏结相自身强度的 微观分析及配矿方法探讨

裴元东 吴胜利 陈 辉

(北京科技大学冶金与生态工程学院)

摘 要: 黏结相自身强度是影响烧结矿固结强度的主要因素。本文利用微型烧结试验装置,对来自巴西、澳大利亚和中国的 5 种铁矿粉,进行了其黏结相自身强度的实验研究,并从微观角度探讨影响黏结相强度的因素。研究表明,因不同种类铁矿粉的黏结相微观特征不同,造成它们的黏结相自身强度存在明显差异。本文还提出了基于黏结相自身强度的配矿原则,依据此原则设计了配矿方案,烧结杯试验结果进一步验证了基于黏结相自身强度配矿的有效性。

关键词: 烧结 铁矿粉 微观特性 黏结相自身强度 配矿方法

Microscopic Analysis on Factors Affecting Self-strength of Bonding Phase of Ore and Discussion of Ore Matching Principle

Pei Yuandong Wu Shengli Chen Hui

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

Abstract: The consolidation strength of sinter ore is affected mainly by the self-strength of bonding phase (SBP for short). The micro sintering test device is used for studying the SBPs of five ores from Brazil, Australia and China in this paper. In addition, the influencing factors of SBP are discussed from a microscopic point of view. The results show that: the SBP of ore varies apparently due to the difference in microscopic characteristics. Ore matching principle based on SBP is also advanced, on which the ore matching schemes are designed. Furthermore, the effectiveness of ore matching based on SBP is validated by the results of sinter pot test.

Key words: sintering iron ores microscopic characteristics the self-strength of bonding phase ore matching method

1 引言

液相是铁矿粉烧结造块的基础,在一定的烧结温度条件下,低熔点物质熔化成液态,并在一定范围内流动,将未熔铁矿粉颗粒黏结成烧结矿。在烧结矿成矿过程中,液态物质凝结形成黏结相。相关研究表明^[1,2],黏结相将未熔铁矿粉颗粒包裹或联结起来,且强度低于未熔铁矿粉的强度,烧结矿多半是从强度较低的黏结相处裂开而破碎。高炉炼铁要求烧结矿有足够高的强度,以确保高炉冶炼进程顺利进行。因而,有必要对烧结矿的黏结相强度及其因素做深入研究。

在相同的烧结工艺条件下,铁矿粉自身特性影响铁矿粉在烧结过程中黏结相的形成及其强度^[3~6],其中文献[3]的研究表明,黏附粉的化

学成分和核矿石的气孔率、烧损等是影响烧结矿强度的重要因素。上述研究的出发点是从黏附粉与核矿石之间同化反应这个角度来考虑影响因素的,然而,从微观特性方面研究黏结相的形成和强度,以及基于铁矿粉黏结相强度进行烧结配矿的研究未见有文献详细报道。因而,有必要对黏结相的微观特性以及基于铁矿粉黏结相自身强度的烧结配矿进行详细的探讨。

本文利用微型烧结试验装置对铁矿粉的黏结相自身强度进行测定,从微观角度讨论影响铁矿粉黏结相自身强度的因素,对导致铁矿粉黏结相自身强度差异的因素进行相关分析,提出基于黏结相自身强度的配矿原则,按此原则设计出配矿方案,并进行烧结杯试验,以期更有效地指导烧结配矿和完善烧结配矿理论。

2 实验原料、方法及设备

2.1 实验原料

本研究共选取 5 种铁矿粉, A、B 分别为产自巴西西北部、南部的烧结用铁矿粉, C 为一种澳洲混合粉, D、E 分别为我国的东北精粉、辽宁精粉。实验用各种铁矿粉的化学成分、微观特征如表 1 所示。本研究使用的烧结熔剂为生石灰。

表 1 铁矿粉化学成分及其微观特征

铁矿粉	铁矿粉化学成分 (质量分数) /%				
	TFe	FeO	SiO ₂	CaO	LOI
A	66.53	0.10	1.32	0.04	1.63
B	64.05	1.07	4.35	0.05	1.75
C	60.82	0.31	3.50	0.06	6.83
D	65.14	27.20	5.60	0.24	0.67
E	66.00	27.65	6.94	0.44	0.61

铁矿粉	铁矿粉微观特性			
	气孔率/%	矿物晶粒尺寸/ μm	晶粒形貌	微观结构
A	17.95	8	块状	较致密
B	11.69	12	块状	较致密
C	33.85	4	块状或豆状	疏松
D	9.30	24	块状	很致密
E	6.32	15	块状	很致密

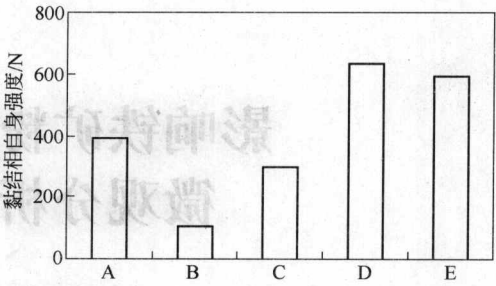


图 1 各种铁矿粉黏结相自身强度的比较

由图 1 可知, 各种铁矿粉的黏结相自身强度存在差异, A 矿黏结相强度接近于 400N, 但同属巴西矿的 B 则很低, 仅为 106N; 澳洲 C 矿黏结相自身强度一般, 为 297N; 国内矿 D 和 E 的强度相对较高, 分别为 630N 和 588N。5 种矿黏结相强度自大至小排列顺序为: D>E>A>C>B。

3.2 黏结相的微观特征

图 2~图 6 显示的是使用矿相显微镜拍摄的 5 种铁矿粉试样小饼焙烧后的局部矿物形貌 (放大倍数为 320 倍, 白线标刻度为 50 μm ; M 为磁铁矿、H 为赤铁矿、CF 为铁酸钙、L 为硅酸二钙、G 为玻璃相、P 为气孔)。5 种铁矿粉试样小饼的矿物组成、气孔特征、铁酸钙分布等微观特征测定结果 (数点法, 约 90 个视阈的平均值) 归纳见表 2。

2.2 实验方法

实验研究的具体方法、步骤如下:

- (1) 基于微型烧结法, 在微型烧结装置上测定铁矿粉小饼的黏结相自身强度^[2], 实验温度取为 1280 $^{\circ}\text{C}$, 二元碱度为 2.0;
- (2) 用矿相显微镜观察在 2.0 碱度下焙烧小饼的矿相结构, 分析其中铁酸钙、赤铁矿和磁铁矿等矿物的数量、形貌及分布, 以及烧结小饼的气孔率 (孔洞体积分数) 等;
- (3) 对所使用铁矿粉进行若干杯烧结杯实验, 进行相关验证。

2.3 实验设备

实验采用微型烧结法进行, 所用的主要设备包括自行开发研制的微型烧结装置和压样装置^[2]、矿相显微镜实验装置、烧结杯实验装置等。

3 实验结果

3.1 铁矿粉的黏结相强度

经实验测定, 碱度 $R_2 = 2.0$ 时, 5 种铁矿粉黏结相自身强度的比较如图 1 所示。

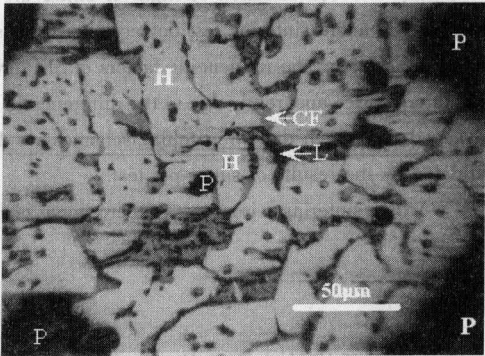


图 2 A 矿试样小饼焙烧后的矿物形貌图

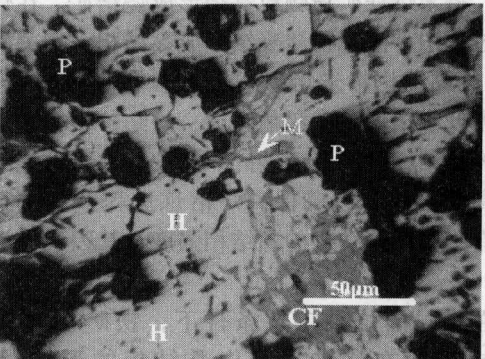


图 3 B 矿试样小饼焙烧后的矿物形貌图

续表2

铁矿粉 代号	气孔特征		黏 结 相	
	孔 径	分布状态	CF 分布状态	黏结相结构
A	大、小	较分散	较分散	较致密
B	大、中、小	分 散	较集中	较致密
C	大小悬殊	较分散	分 散	疏松、有裂纹
D	中	集 中	集 中	很致密
E	大、中	集 中	集 中	很致密

由图2~图6以及表2所给出的测定结果可知,不同种类的铁矿粉与熔剂反应后,其微观特征存在明显的差异。两种国内的磁铁矿类型的铁矿粉D和E烧结后最为致密,以大片赤铁矿或磁铁矿连晶为主,但含少量硅酸二钙,铁酸钙数量在10%~20%之间,且呈现板状和柱状,铁酸钙和气孔的分布都比较集中,气孔孔径较大;巴西矿烧结后相对较致密,且含大量未同化的赤铁矿晶粒,属赤铁矿连晶,铁酸钙的数量则很少,气孔分布较分散;澳洲混合矿烧结后仍较疏松,烧结中产生气孔孔径大小悬殊,矿物组成中铁酸钙较多,且与赤铁矿呈共晶结构。

值得关注的是铁矿粉烧结前后气孔特征的变化,烧结小饼的气孔率与铁矿粉的气孔率没有明显关系。例如5种铁矿粉的原始气孔率各不相同,C的气孔率很大,达到33.85%,巴西矿A和B次之,分别为17.95%和11.69%,国内矿D和E的气孔率很低、且低于10%;然而,5种铁矿粉烧结小饼的气孔率从大到小排序为:B>D>A≈C>E。分析原因如下:受铁矿粉烧损和气孔率不同、铁矿粉中微孔和大孔作用不同的影响,黏结相形成的动力学条件、黏结相液相填充或延展的程度存在差异;本研究中矿粉的粒度组成不同于实际烧结中的核/粉结构。因此,关于微孔、大孔作用及核/粉结构条件下气孔的变化情况的机理需进一步研究。

4 各种铁矿粉黏结相自身强度的评价

结合铁矿粉烧结后的微观特征,对本研究中5种铁矿粉的黏结相自身强度做如下评价。

4.1 A 矿

A矿的黏结相自身强度处于较高水平,主要是因为其铁矿物晶粒较细,仅8μm,结构较为致密,故反应活性高,有利于提高黏结相的强度。但其SiO₂含量低,在烧结过程产生的液相量少,且黏结相主要由赤铁矿连晶构成,孔洞分布较分散,一定程度上影响了黏结相自身强度。

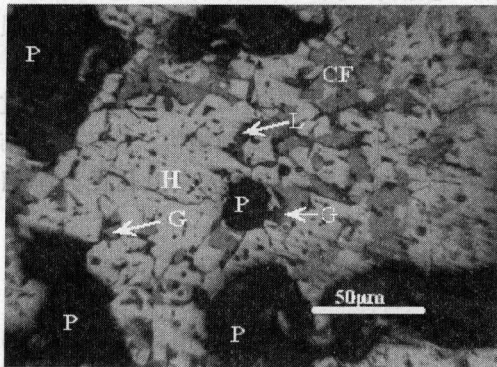


图4 C矿试样小饼焙烧后的矿物形貌图

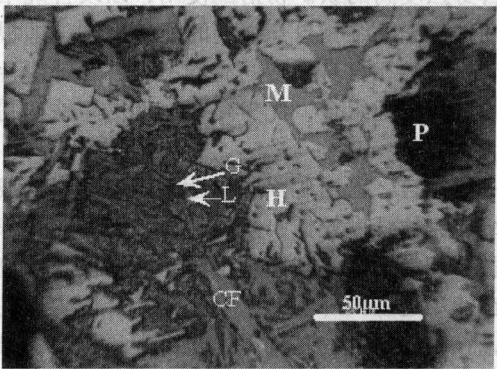


图5 D矿试样小饼焙烧后的矿物形貌图

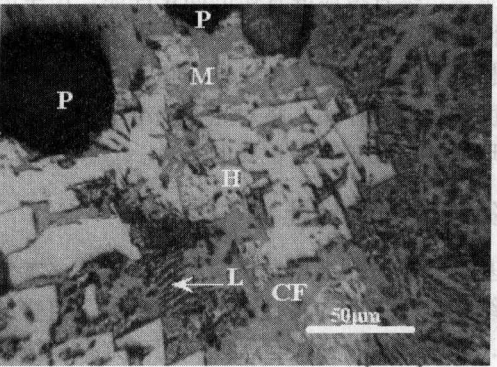


图6 E矿试样小饼焙烧后的矿物形貌图

表2 各种铁矿粉烧结试样的微观特征测定结果

铁矿粉 代号	矿物组成/%					
	M	H	CF	L	G	P
A	2	87	6	3.3	1.7	40
B	1	80	11	5.4	2.6	55
C	1	48	46	2.0	3.0	40
D	8	60	17	7.5	7.5	47
E	30	47	13	10.0	0.0	33

4.2 B 矿

B 矿的黏结相自身强度处于较低水平, 虽然其 SiO_2 含量较高, 烧结过程中液相产生量有增加的趋势, 但是其主要由赤铁矿连晶构成, 少量铁酸钙、硅酸二钙填充在赤铁矿晶粒之间, 且孔径差别较大, 很多孔连成片, 致使黏结相强度不高。另外, 该矿原始气孔率低于 A 矿, 不利于烧结过程中液相渗透, 使得黏结相液相大量集中部分区域, 冷却收缩后形成大孔结构, 导致其强度进一步降低。

4.3 C 矿

C 矿的黏结相自身强度处于中等偏下水平, 形成的黏结相矿物具有典型的赤铁矿和铁酸钙构成的共晶结构, 尽管其中铁酸钙呈针柱状交织, 但黏结相强度较低, 其主要原因是: 该矿为赤铁矿和褐铁矿的混合矿, 烧损高达 6.83%, 铁矿粉原始气孔率也很高 (33.85%), 且晶粒很小 ($3 \sim 4 \mu\text{m}$), 这使得烧结过程中铁矿粉与熔剂间的同化作用很强, 大量液相产生并浸入孔隙中继续同化, 造成黏结相较薄、强度较弱; 另外, 经焙烧后形成的孔洞多为不规则形状, 大孔连接成片, 裂纹也较多, 且孔洞与黏结相交织, 使得黏结相的固结不牢固。

4.4 D 矿

D 矿的黏结相自身强度高。虽然原始铁矿物晶粒粗大, 结构致密, 且气孔率低, 对铁矿物与熔剂间的反应不利, 但是它的 SiO_2 含量较高, 烧结过程中低熔点液相产生量有增加的趋势, 将有利于黏结相强度提高, 这可从烧结小饼的矿物形貌得到验证——D 矿的烧结小饼的矿物组成为赤铁矿和铁酸钙构成的共晶结构, 铁酸钙呈片柱状、树枝状, 黏结相集中且致密, 不规则形孔洞少。

4.5 E 矿

E 矿的黏结相自身强度也高, 其 SiO_2 含量更高, 达到 6.94%, 烧结过程中液相产生量有进一步增加的趋势, 原始铁矿物晶粒较 D 矿细, 这些均有利于提高黏结相自身强度。但是, E 矿的原始气孔率更低, 结构更加致密, 动力学反应条件相对差, 表现为大量磁铁矿未被同化, 这在一定程度上不利于提高黏结相的强度。另外, E 矿黏结相矿物中硅酸二钙的含量高, 硅酸二钙的过量形成也说明了过高 SiO_2 含量烧结的缺点, 即硅酸二钙冷却时发生相变会破坏烧结矿强度^[7]。因此, E 矿的黏结相强度较 D 矿稍低。

综上所述, SiO_2 在一定程度上有利于黏结相强度的提高, 但过高则起到相反的作用; 晶粒越细、结构

越疏松, 越有利于铁矿粉和熔剂的反应, 黏结相越容易形成, 但黏结相强度不一定高; 铁矿粉的烧损和气孔率的增大在一定程度上有利于黏结相的形成, 有助于其强度的提高, 但其值过高, 易使同化反应过于容易发生, 黏结相易成大孔薄壁结构; 铁矿粉黏结相孔洞数量对黏结相强度影响不大, 但孔径大小相差越大, 强度越低。

5 基于黏结相自身强度的配矿原则

在烧结过程中, 配加黏结相自身强度高的铁矿粉, 烧结矿的强度呈提高的趋势; 而黏结相自身强度低的铁矿粉应适当控制其配加量, 且应注意与其他黏结相自身强度高的铁矿粉搭配使用, 以改善烧结矿固结强度。基于黏结相自身强度的配矿原则, 即根据各种铁矿粉黏结相自身强度的高低不同, 有针对性地对铁矿粉进行搭配组合, 优劣互补, 以提高铁矿粉使用效果。

一般而言, 巴西矿因同化性低而不利于形成充足的黏结相, 故强度较低; 澳洲褐铁矿则因同化作用过大, 黏结相易形成大孔薄壁结构, 故强度也不高。所以, 在使用这些国外矿时, 有必要结合国内矿的自身特点, 在实验研究的基础上优化搭配, 提高黏结相的自身强度。

另外, 更应重视按不同比例配合形成混合矿的黏结相质量, 综合考虑混合矿的同化性能、产生的液相流动性能以及黏结相强度等。但是, 研究单一铁矿粉黏结相自身强度以及单种矿黏结相强度对混合矿黏结相强度的影响和作用, 将对完善烧结配矿理论和指导生产现场科学配矿有着重要的意义。

6 烧结杯试验验证

基于铁矿粉黏结相自身强度配矿原则, 参考铁矿粉黏结相自身强度的实验结果, 设计了 3 组烧结配矿方案, 并进行烧结杯实验研究。配矿方案和烧结指标见表 3。

表 3 烧结杯实验方案及烧结矿指标比较 (%)

方 案	A	B	C	D	E	F	成品率	转鼓指数
SC-1	30		40	22		8	81.99	64.00
SC-2	30		40		22	8	80.67	63.33
SC-3		30	40		22	8	80.86	62.67

注: 表中 F 为其他矿。

由表 3 可知, 3 组烧结杯涉及了本研究所使用的 5 种铁矿粉, 通过优化搭配, 在澳洲矿配比达到 40%, 巴西矿达到 38%, 相同的烧结工艺制度下, 3 组烧结杯的成品率在 80% 以上, 转鼓指数均在 62% 以上。

配矿方案 SC-2 与 SC-1 相比, 用同样配比的 E 矿

替代 D 矿, 其他铁矿粉不变, 由烧结指标可知, 其成品率和转鼓指数都有下降, 推测其主要原因为与 D 矿相比, E 矿黏结相自身强度略有下降; 配矿方案 SC-3 与 SC-2 相比, 用同样配比的 B 矿取代 A 矿, 其他铁矿粉不变, 由烧结指标可知, 其转鼓指数有下降, 分析其主要原因为与 A 矿相比, B 矿的黏结相自身强度较低。

由此可见, 烧结杯试验结果进一步验证了基于铁矿粉黏结相自身强度进行优化配矿的有效性。

7 结论

(1) 除铁矿粉的化学成分外, 其气孔特征、结构和晶粒大小以及黏结相的矿物组成、形貌和结构等微观特征均影响铁矿粉的黏结相自身强度。

(2) 铁矿粉 SiO_2 含量过高, 黏结相中孔洞的孔径相差过大, 均不利于改善烧结黏结相的自身强度。

(3) 铁矿粉原始气孔率和小饼烧结后的黏结相气孔率并无明显的对应关系, 因为这涉及熔剂和铁矿粉高温反应的动力学条件以及反应进程。

(4) 铁矿粉具有高的黏结相自身强度, 有助于改善烧结矿的固结强度, 故在烧结配矿实践中,

应通过优化方案设计, 合理搭配, 予以最大限度地确保。

参考文献

- 1 周传典. 高炉炼铁生产技术手册. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 22
- 2 吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念. 北京科技大学学报, 2002, 24 (3): 254 ~ 257
- 3 Eiki Kasai, Wu Shengli, Yasuo Omori. Factors governing the strength of agglomerated granules after sintering. ISIJ International, 1991, (31): 17 ~ 22
- 4 Yang L X, Davis L. Assimilation and mineral formation during sintering for blends containing magnetite concentrate and hematite/pisolite sintering fines. ISIJ International, 1999, 39 (3): 239 ~ 245
- 5 Debrincat D, Loo C E, Hutchens M F. Effect of iron ore particle assimilation on sinter structure. ISIJ International, 2004, 44 (8): 1308 ~ 1317
- 6 Takaho Otomo, Yasushi Takasaki, et al. Properties of core ore in quasi-particle Required for large amounts usage of limonitic ores in iron ore sintering Process. ISIJ International, 2005, 45(4): 532 ~ 537
- 7 王筱留. 钢铁冶金学 (炼铁部分). 北京: 冶金工业出版社, 2004: 45

铁矿粉的同化特性及其互补配矿方法的研究

张海涛^{1,2} 吴胜利¹ 陈 辉¹ 裴元东¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院; 2 山东石横特钢集团有限公司炼铁厂)

摘 要: 铁矿粉的同化性表征的是其在烧结过程中产生液相的能力, 对烧结矿产质量有重要的影响。本文对来自巴西、澳大利亚、印度、南非以及国产的 12 种铁矿粉进行了同化特性的实验研究, 分析了影响铁矿粉同化性的因素, 并提出了基于同化性互补的配矿方法, 丰富烧结优化配矿的内涵以指导烧结生产和完善烧结配矿理论。

关键词: 铁矿粉 烧结 同化特性 互补 配矿

The Study on Assimilation of Iron Ores and Ore Blending of Its Complementary

Zhang Haitao^{1,2} Wu Shengli¹ Chen Hui¹ Pei Yuandong¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 2 Shandong Shiheng Special Steel Group Co., Ltd., Feicheng 271612)

Abstract: The assimilation of iron ores, which shows the ability of liquid produced during sintering process, has important effect on the quality and yield of sinter. 12 kinds of iron ores from Brazil, Australian, India, South Africa and China have been tested on their assimilation in this paper. Besides, the factors on assimilation of iron ores have been analyzed. And then, the method of iron ore blending is presented on the basis of the complementary action of assimilation, which will enrich the meaning of iron ore blending to instruct the sintering practice and perfect the ore-blending theory of sinter.

Key words: iron ores sintering assimilation complementary ore-blending

1 引言

近年来铁矿粉烧结生产工艺技术取得了长足的进步。低温烧结技术, 可以生产出兼顾烧结矿强度和还原性的高质量烧结矿, 故已被普遍接受和运用。然而, 烧结的固结机理并没有改变, 仍然是依靠烧结混合料中低熔点物质熔化再凝固而形成的联结桥固相联结力将未熔颗粒黏结成块^[1]。因而, 在烧结温度下产生足够的液相仍是低温烧结生产的成矿基础。

液相的生成起始于铁矿粉与熔剂间反应生成的低熔点矿物。因而, 铁矿粉与熔剂的矿化反应将直接影响烧结液相的生成以及液相的性质。前人对铁矿粉与熔剂间的矿化反应进行过大量的研究^[2-9], 并提出了铁矿粉的同化性、反应性等概念, 但其描述的实质是类似的。在中国以北京科技大学开发的微型烧结实验装置研究铁矿粉的烧结基础特性为其代表, 生产企业利用该方法和实验装置对铁矿粉的同化性进行了大量的研究, 并指导生产实践^[6-9]。然而, 对根据不同种类铁矿粉的同化性进行互补配矿的研究还未见有详细

报道。因而, 有必要对基于铁矿粉同化特性的烧结互补配矿方法进行深入研究和探讨。

本文首先利用微型烧结试验装置对铁矿粉的同化性进行测定, 并对导致铁矿粉同化性差异的因素进行相关分析, 然后提出适宜于低温烧结的、基于铁矿粉同化特性的配矿方法, 以便更为详尽地指导现场烧结优化配矿和完善烧结优化配矿理论。

2 铁矿粉的同化特性及其测定结果

2.1 铁矿粉的同化性

铁矿粉的同化特性是指铁矿粉在烧结过程中与 CaO 反应的能力, 它表征铁矿粉在烧结过程中生成液相的难易程度, 是烧结矿有效固结的基础, 可以通过测定铁矿粉与 CaO 接触面上发生反应而开始熔化的“最低同化温度”来评价^[4]。

一般而言, 若铁矿粉的“最低同化温度”低, 表明其同化性高, 不仅烧结液相生成量多, 而且容易获得铁酸钙体系的高质量黏结相, 从而改善烧结矿的

强度和还原性。但是，铁矿粉的同化性也并不是越高越好，这是因为过高的同化性会使烧结料过熔而恶化烧结料层透气性，影响烧结矿产质量。因此，烧结过程需要混合矿有适宜的同化特性。

2.2 实验原料

本研究共选取 12 种铁矿粉。OCSD-A 为莱芜精粉，为山东省钢铁企业常用的当地铁矿粉，属于磁铁矿类型的铁矿粉。11 种进口铁矿粉属于赤铁矿或褐铁矿类型的铁矿粉。在 5 种巴西铁矿粉中，OBR-D 为精矿粉，其余 4 种铁矿粉为富矿粉，OBR-A 来自巴西北部，OBR-B 为巴西南部出产的标准烧结粉，OBR-C 为巴西新上市的一种铁矿粉，OBR-E 为原 MBR 公司的粗粉。在 4 种澳大利亚富矿粉中，OAU-A 为褐铁矿粉，OAU-B 为标准烧结粉，OAU-C 为新近进入中国市场的一种新铁矿粉，OAU-D 为高硅澳洲铁矿粉。OIN-A 为产自印度的富矿粉；OSA-A 为国内钢铁企业所熟知的南非富矿粉。12 种铁矿粉的主要化学成分见表 1。

表 1 铁矿粉化学成分 (%)

代号	TFe	/ SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	LOI
OCSD-A	65.60	4.30	0.88	1.02	0.88	1.23
OBR-A	66.53	1.32	0.04	0.03	0.79	1.63
OBR-B	65.83	3.35	0.05	0.04	0.64	0.81
OBR-C	64.05	4.35	0.05	0.04	0.73	1.75
OBR-D	67.53	1.14	0.03	0.01	0.39	0.40
OBR-E	66.21	1.72	0.13	0.03	1.73	1.64
OAU-A	57.87	4.18	0.01	0.05	1.59	10.71
OAU-B	64.00	3.92	0.01	0.05	1.73	2.57
OAU-C	62.66	3.40	0.01	0.04	2.26	4.31
OAU-D	59.50	6.83	0.26	0.12	3.07	4.42
OIN-A	60.35	6.13	0.13	0.07	2.65	4.00
OSA-A	65.50	3.86	0.09	0.04	1.43	0.90

2.3 实验方法

实验采用微型烧结法，所用的主要设备包括自行开发研制的微型烧结装置和压样装置^[4]。通过测定铁矿粉与 CaO 接触面上发生反应而开始熔化的“最低同化温度”来评价铁矿粉与 CaO 的反应能力，即同化性。

2.4 实验结果

经实验测定，12 种铁矿粉最低同化温度的实验数据如表 2 和图 1 所示。

表 2 铁矿粉最低同化温度的实验结果 (°C)

矿种	最低同化温度	矿种	最低同化温度
OCSD-A	1318	OAU-A	1227
OBR-A	1362	OAU-B	1228
OBR-B	1373	OAU-C	1237
OBR-C	1337	OAU-D	1263
OBR-D	1392	OIN-A	1247
OBR-E	1322	OSA-A	1251

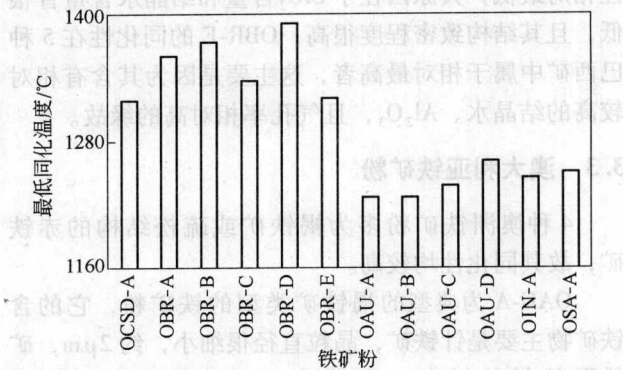


图 1 各种铁矿粉的最低同化温度比较

由实验结果可知：5 种巴西铁矿粉和国产精粉的最低同化温度较高，均属于同化性较低的铁矿粉，而澳大利亚、印度、南非等铁矿粉的最低同化温度较低，低于 1280℃，都属于同化性较高的铁矿粉。

12 种铁矿粉同化性由低到高的排序为：OBR-D < OBR-B < OBR-A < OBR-C < OBR-E < OCSD-A < OAU-D < OSA-A < OIN-A < OAU-C < OAU-B < OAU-A。

3 铁矿粉同化性影响因素分析

同化性是铁矿粉自身特性之一，影响铁矿粉同化性的因素主要包括含铁矿物类型、铁矿物的晶粒大小和形貌、SiO₂和 Al₂O₃的含量、脉石矿物的赋存状态、结晶水含量以及致密程度等。对某一具体铁矿粉，其同化性能往往受特定的因素影响。

结合各种铁矿粉的上述特征对其同化性作如下简要分析。

3.1 国内莱芜精粉

OCSD-A 属于磁铁矿类型的铁矿粉，相对于赤铁矿类型的铁矿粉，同化性要低一些。但由于其含有较多的 SiO₂，故相比巴西铁矿粉，同化性要略高一些。另外，它的铁矿物晶粒较粗，矿粉颗粒质地较为致密，孔隙少，这也抑制了它与 CaO 的矿化程度，故其同化性较低。

3.2 巴西铁矿粉

5 种巴西铁矿粉中，尽管主要含铁矿物均为赤铁

矿,但是脉石赋存状态以石英为主,并含有少量的三水铝石,再加上它们的铁矿物晶粒尺寸相对较大,矿粉颗粒质地致密,孔隙很少,故受上述因素的影响,巴西铁矿粉的同化性均较低。

与 OBR-A 矿相比, OBR-B 的 SiO_2 含量虽然较高,但由于其结构致密,气孔率低,故其同化能力相对更低一些; OBR-C 因含有较高的 SiO_2 和结晶水,故同化性高于 OBR-A 和 OBR-B 两种铁矿粉; OBR-D 的同化性相对最低,其原因在于 SiO_2 含量和结晶水含量皆很低,且其结构致密程度很高; OBR-E 的同化性在 5 种巴西矿中属于相对最高者,这主要是因为其含有相对较高的结晶水、 Al_2O_3 , 且气孔率相对高的缘故。

3.3 澳大利亚铁矿粉

4 种澳洲铁矿粉多为褐铁矿或疏松结构的赤铁矿,故其同化性均较高。

OAU-A 为典型的褐铁矿类型的铁矿粉,它的含铁矿物主要是针铁矿,晶粒直径很细小,约 $2\mu\text{m}$,矿粉颗粒结构疏松,孔隙多,且结晶水含量达到 10.71%, 这些因素促使它与 CaO 的矿化程度明显增大,从而表现出相对最高的同化性。

OAU-B 是典型的赤铁矿类型的铁矿粉,其含铁矿物主要是赤铁矿,虽然结晶水含量不高,但由于 SiO_2 含量较高,晶粒直径细小,约为 $5\mu\text{m}$,故其与 CaO 的矿化能力并不低,即同化性也很高。

OAU-C 为 2007 年 7 月开始进入中国市场的一种新铁矿粉,含铁矿物以赤铁矿和针铁矿形式共存,平均晶粒直径约为 $4\mu\text{m}$,含较多的结晶水,故也表现出较高的同化性。但是,由于其 SiO_2 含量相对 OAU-B 要低些,故其同化性也略低于铁矿粉 OAU-B。

OAU-D 是一种高硅澳矿粉,含铁矿物以赤铁矿和针铁矿形式共存,脉石矿物主要以石英和高岭石形式共存,平均晶粒直径约为 $4\mu\text{m}$ 。它的 SiO_2 含量在澳洲矿中属于相对最高者,而同化性则在澳洲矿中属于相对最低水平,因其过高的 SiO_2 含量使正硅酸钙的生成量明显增多,进而导致液相熔化温度升高所致。

3.4 印度和南非铁矿粉

OIN-A 和 OSA-A 的含铁矿物均以赤铁矿为主。OIN-A 的 SiO_2 含量和 Al_2O_3 含量均高,铁矿物晶粒直径约 $8\mu\text{m}$,脉石主要以黏土类矿物形式存在,故表现出较高的同化性。与 OIN-A 相比, OSA-A 的 SiO_2 含量、 Al_2O_3 含量以及结晶水含量均相对低,晶粒尺寸也相对大一些,晶粒直径约为 $11\mu\text{m}$,故同化性比铁矿粉 OIN-A 要略低一些,但也属于同化性较高的铁矿粉。

4 基于铁矿粉同化性互补的配矿方法

前文已有表述,铁矿粉与 CaO 的反应能力过弱或

过强均对烧结生产不利,即铁矿粉的同化性过低或过高均难以获得质量指标优良的烧结矿。因此,在烧结生产进行配矿时,应重视同化性能不同的铁矿粉搭配使用以达到互补的效果。例如:对于同化性高的铁矿粉,需要搭配同化性低的铁矿粉,使烧结过程中铁矿粉与 CaO 的反应能力适宜,以获得综合同化性合适的烧结混合矿。

图 2 给出了不同种类的铁矿粉在同化性方面的搭配原则示意图。图中: T 为铁矿粉的最低同化温度,虚线为 1280°C ,代表铁矿粉在烧结过程中的合适同化温度;矿 A、矿 B、矿 C 和矿 D 分别代表最低同化温度不同的 4 种铁矿粉;“ $\rightarrow$ ”表示将“搭配矿”配置于“基准矿”中。图中 4 种矿可得到 12 种搭配模式。

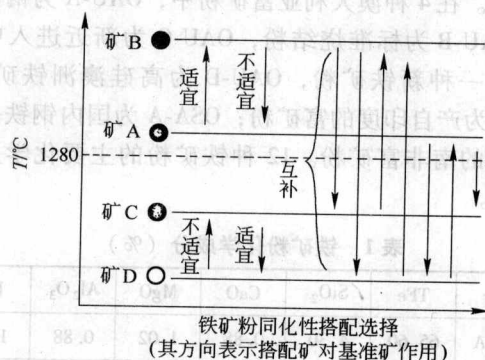


图 2 铁矿粉同化性互补搭配原则示意图

根据搭配矿对基准矿的作用效果,即搭配矿将引起基准矿最低同化温度至合适同化温度的接近或远离程度,对 12 种铁矿粉的搭配模式可给出如下三种评价:“不适宜”、“适宜”和“互补”。“不适宜”表示搭配矿对基准矿而言,对基准矿的同化性没有改善作用;“适宜”表示搭配矿对基准矿的同化性具有改善作用;“互补”表示搭配矿具有将基准矿改善至合适同化温度的能力。

由图 2 可见,矿 A 对矿 B “适宜”,因为矿 A 搭配矿 B 后,使两者最低同化温度比后者低,即混合矿最低同化温度向合适同化温度方向靠近;但矿 B 对矿 A “不适宜”,因为矿 B 搭配矿 A 后,使两者最低同化温度比矿 A 单独时还高。矿 C 和矿 D 基于同化性互补配矿的情形与矿 A 和矿 B 类似。然而,矿 A 和矿 C、矿 A 和矿 D、矿 B 和矿 C 以及矿 B 和矿 D 则属于“互补”,如矿 A 和矿 D,因矿 A 搭配矿 D 或矿 D 搭配矿 A 后,混合矿的最低同化温度均趋于接近合适的同化温度。

在图 2 基础上,12 种铁矿粉在同化性方面的搭配性评价见表 3。表中第一行铁矿粉为搭配矿,第一列铁矿粉为基准矿;搭配矿对基准矿的影响效果如表中所示,铁矿粉两两搭配的同化性变化效果用“不适宜”、“适宜”和“互补”来表示。

表 3 12 种铁矿粉同化性互补配矿的效果

搭配矿 基准矿	OCSD-A	OBR-A	OBR-B	OBR-C	OBR-D	OBR-E	OAU-A	OAU-B	OAU-C	OAU-D	OIN-A	OSA-A
OCSD-A		不适宜	不适宜	不适宜	不适宜	不适宜	互补	互补	互补	互补	互补	互补
OBR-A	适宜		不适宜	适宜	不适宜	适宜	互补	互补	互补	互补	互补	互补
OBR-B	适宜	适宜		适宜	不适宜	适宜	互补	互补	互补	互补	互补	互补
OBR-C	适宜	不适宜	不适宜		不适宜	适宜	互补	互补	互补	互补	互补	互补
OBR-D	适宜	适宜	适宜	适宜		适宜	互补	互补	互补	互补	互补	互补
OBR-E	适宜	不适宜	不适宜	不适宜	不适宜		互补	互补	互补	互补	互补	互补
OAU-A	互补	互补	互补	互补	互补	互补		适宜	适宜	适宜	适宜	适宜
OAU-B	互补	互补	互补	互补	互补	互补	不适宜		适宜	适宜	适宜	适宜
OAU-C	互补	互补	互补	互补	互补	互补	不适宜	不适宜		适宜	适宜	适宜
OAU-D	互补	互补	互补	互补	互补	互补	不适宜	不适宜	不适宜		不适宜	不适宜
OIN-A	互补	互补	互补	互补	互补	互补	不适宜	不适宜	不适宜	适宜		适宜
OSA-A	互补	互补	互补	互补	互补	互补	不适宜	不适宜	不适宜	适宜	不适宜	

由表 3 所示可以更为清楚地得到铁矿粉种类之间在同化性上两两搭配的详细信息。例如：OCSD-A 和 OIN-A 两者搭配属于互补型的情况。又如：OAU-C 较 OAU-A 同化性为小，则 OAU-A 作为基准矿时，两者搭配后同化性将比 OAU-A 低，则此种搭配方式便为“适宜”。再如：南非粉同化性已较高，但 OAU-B 同化性比 OSA-A 还高，则南非粉作为基准矿时，搭配 OAU-B 便为“不适宜”，反之，若 OAU-B 作为基准矿时，搭配 OSA-A 便为“适宜”，因为后者使两者混合料同化性比前者单独时有所降低，并向烧结合适的同化温度靠近。

5 结论

- (1) 不同产地的铁矿粉，其同化性差别明显，澳大利亚、印度和南非的铁矿粉同化性较高，而巴西铁矿粉和国产精粉的同化性较低；
- (2) 导致铁矿粉同化性差异的主要因素在于受地质条件影响而表现出的个体特征，包括铁矿粉的化学成分、矿物组成、微观特性等；
- (3) 实际烧结过程要求混合矿有合适的同化性，

放在烧结配矿时应运用基于铁矿粉同化性互补的配矿方法，以求更好地满足低温烧结技术条件。

参考文献

1 王筱留. 钢铁冶金学(炼铁部分). 北京: 冶金工业出版社, 2000: 32

2 Eiki Kasai, Fumio Saito. Differential thermal analysis of assimilation and melt-formation phenomena in the sintering process of iron ores. ISIJ international, 1996, 36(8): 1109 ~ 1111

3 吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 254 ~ 257

4 吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿粉与 CaO 同化能力的试验研究. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 258

5 Caporali Lafayette. 铁矿粉烧结的反应性. 现代冶金, 2005, (2): 7

6 陈宏, 张美芳. 铁矿粉反应性的研究. 宝钢技术, 2001, (5): 35

7 曹立刚. 包钢用铁矿粉的烧结基础特性研究. 烧结球团, 2005, (10): 5 ~ 7

8 翟立委, 周明顺, 李艳茹. 几种典型铁矿石烧结基础特性的实验与评价. 鞍钢技术, 2007, (3): 12 ~ 14

9 陈桂英. 采用微型烧结试验快速测定铁矿石的烧结基础特性. 烧结球团, 2004, 24(1): 24 ~ 26