

基于复合造块工艺处理含锰尾矿的试验研究

滕 飞¹, 曾志彦², 郭培民^{1*}, 岳崇峰³

(1. 钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081; 2. 五矿矿业股份有限公司, 湖南 衡阳 421513; 3. 北京钢研新冶工程技术中心有限公司, 北京 100081)

摘 要: 针对一种含锰尾矿资源用于普通烧结工艺时存在料层透气性差和烧结矿产量、质量低等问题, 基于复合造块工艺探索含锰尾矿资源的合理利用方式。考虑到高炉冶炼对炉渣碱度的要求, 通过在基体料中配加熔剂调节复合烧结矿(简称复合矿)的碱度。通过实验室烧结杯试验, 对复合料固定碳配比、球团料比例以及布料方式等影响因素进行系统研究。结果表明, 采用复合造块工艺处理这种含锰尾矿资源是可行的。适宜的基体料固定碳配比为 3.3%, 最佳的球团比例为 40%。冶金性能检测结果表明, 复合矿还原度指数为 72.49%, 低于普通烧结矿 3.27 个百分点, 低温还原粉化指数为 79.53%, 高于普通烧结矿 3.49 个百分点, 熔滴性能明显优于普通烧结矿。复合矿显微结构中主要以磁铁矿和少量玻璃相构成的斑状结构为主, 基体部分铁酸钙粘结相含量相比普通烧结矿明显减少, 硅酸二钙生成量较多。

关键词: 烧结; 含锰尾矿; 复合造块工艺; 冶金性能; 矿物结构

中图分类号: TF046

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)04-0114-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.04.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Experimental study on treatment of the tailings containing manganese using composite agglomeration process

Teng Fei¹, Zeng Zhiyan², Guo Peimin^{1*}, Yue Chongfeng³

(1. State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. China Minmetals Beryllium Co., Ltd., Hengyang 421513, Hunan, China; 3. China Iron and Steel Research Institute Engineering Technology Center Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In order to address the issue of poor material permeability and low yield and quality of sinter when a kind of tailings containing manganese was used in the 100% concentrate sintering process, the rational utilization of tailings containing manganese was investigated by the composite agglomeration process. Considering the requirements of blast furnace ironmaking on raw material and slag basicity, the silica, dolomite and burnt lime were added to adjust the basicity of the composite sinter. Through the lab-scale sintering pot test, the influencing factors such as fixed carbon ratio of composite material, the ratio of pellet and the distribution mode were systematically studied. The results showed that it was feasible to utilize the tailings containing manganese by the composite agglomeration process. The appropriate fixed carbon ratio could be reduced to 3.3%, and the suitable pellet ratio was 40%. The reduction index (RI) was 72.49%, which was 3.27 percentage points lower than that of ordinary sinter. The low-

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 科技部十三五国家重点研发计划(2019YFC1904604)。

作者简介: 滕飞(1987—), 吉林扶余人, 博士研究生, 工程师, 研究方向: 烧结、球团, E-mail: 13426292269@139.com; *通

讯作者: 郭培民, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向: 炼铁新技术, E-mail: guopm@pku.org.cn。

temperature reduction-disintegration index ($RDI_{+3.15\text{ mm}}$) of composite sinter was 79.53%, which was 3.49 percentage points higher than that of ordinary sinter. The melting and dropping property of the composite sinter was better than those of the ordinary sinter. The microstructure of the composite ore was mainly porphyritic structure composed of magnetite and a small amount of glass phase. The content of calcium ferrite binder phase in the matrix parts was significantly lower and the amount of dicalcium silicate was higher than that of ordinary sinter.

Key words: sintering, tailings containing manganese, composite agglomeration process, metallurgical performance, mineral microstructure

0 引言

近年来我国钢铁产量不断增加,虽然在供给侧结构性改革以及“碳达峰、碳中和”目标指导下,国家出台了一系列缩减钢铁产能政策,但整体产能依然巨大。受我国铁矿石资源分布特征和开采技术限制,我国铁矿石长期大量依赖于进口,由此导致我国钢铁行业的发展一直受制于原料供应^[1-3]。2021年我国生铁产量为8.69亿t,全国铁矿石原矿产量为9.81亿t,全国铁矿石进口量达到11.24亿t,进口铁矿石数量持续保持历史高位。2021年1~12月份,品位62%的进口铁矿石价格指数平均为160美元/t,同比上涨47%,导致钢铁企业面临较大的成本压力。

某国外进口锰矿石经过磁化焙烧处理后,选出其中的锰,剩余部分作为尾矿。该尾矿中TFe含量可达67%以上,是一种低成本优质的铁矿资源。本研究团队前期通过对含锰尾矿的球团性能研究发现,该尾矿被用于生产球团时,需进行磨矿处理。膨润土配比应不低于2.0%,适宜的预热温度为1020℃,预热时间20min,焙烧温度为1280℃,焙烧时间25min,在此条件下,成品球团抗压强度接近2500N/球^[4]。但该尾矿资源用于球团生产时,需额外投入磨矿设备。此外,较高的预热和焙烧温度必然导致能耗的增加,进一步增加企业的生产成本,同时也不符合低碳绿色冶炼的理念。

相较于传统的烧结和球团工艺,复合造块工艺具有明显优势。首先,不需要增加磨矿设备,采用现有烧结设备即可完成整个原料的生产过程,对于新建企业来说尤其具有吸引力。其次,可以通过调整布料方式,利用烧结过程的自动蓄热来达到焙烧球团的目的,起到节能降耗作用。第三,复合造块工艺对于原料的适应性较强^[5],可以根据原料条件生产出合格的中低碱度炉料,直接用于高炉冶炼。陈革

等^[6]通过复合造块工艺解决了超细精矿配比较高条件下,普通烧结存在的产量低、质量差难题,取得了增产降耗的效果。饶家庭等^[7-9]针对钒钛磁铁矿常规烧结时强度差、利用系数和成品率低等问题,采用复合造块工艺,通过优化工艺参数,达到了提高烧结利用系数和转鼓强度,降低固体燃耗的目的。张荣华等^[10]针对酒钢自产高镁精矿制粒与烧结性能差等问题,采用复合造块工艺成功制备出机械和冶金性能俱佳的产品,其成品率与转鼓强度均有较大幅度提高,固体燃耗降低。张元波等^[11]采用复合造块工艺开展难处理的钒钛磁铁矿、镜铁矿、高硅、高镁铁精矿的应用研究,与常规烧结工艺相比,均取得了良好的造块指标。

目前,通过复合造块工艺处理上述铁精矿的应用研究较多,但在处理尾矿方面的研究鲜有报道。笔者主要基于复合造块工艺对含锰尾矿应用开展试验研究,探寻尾矿资源的合理利用方式,为企业创造经济效益的同时,还可以减少因尾矿堆积对环境造成的污染和破坏,具有良好的社会效益。

1 试验条件与方法

1.1 原料性能

试验的铁料采用100%含锰尾矿。由于含锰尾矿中的硅含量仅为0.89%,在烧结过程中难以产生足够的液相。因此,为保证成品复合烧结矿(简称复合矿)强度,采用配加硅石的方法,调整基体料中的 SiO_2 含量。试验所用硅石为外购,其余熔剂和燃料均为普通烧结用熔剂和燃料,取自国内某烧结厂。试验所用原料的化学成分和粒度组成如表1和表2所示。从表1化学成分可以看出,含锰尾矿的全铁品位高达67.46%,Mn含量为2.92%,其余杂质元素含量均较低。根据表2原料粒度组成可以看出,含锰尾矿的粒度偏粗,+0.063mm部分的比例在70%以上。

表 1 试验用原料化学成分
Table 1 Chemical compositions of the raw materials

%

原料	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Mn	LOI
含锰尾矿	67.46	27.20	0.12	0.89	0.05	0.80	2.92	-2.63
白云石			50.21	3.93	34.33	1.04		7.76
硅石			0.13	98.00	0.08	0.25		
生石灰			75.23	5.82	1.93	1.34		12.57
焦粉灰成分	2.17		1.50	51.08	1.05	41.29		

注: 焦粉工业分析结果: 固定碳 85.46%, 挥发分 1.07%, 灰分 13.37%。

表 2 试验用原料的粒度组成
Table 2 Size distribution of the raw materials

原料	粒度组成 /%								合计
	>4 mm	4~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.125 mm	0.125~0.063 mm	<0.063 mm	
含锰尾矿	0.00	0.00	0.00	0.00	36.57	19.31	14.92	29.20	100
白云石	0.00	2.07	24.42	13.61	13.21	10.67	16.27	19.75	100
硅石	0.00	0.00	59.50	39.28	0.96	0.14	0.08	0.03	100
生石灰	1.39	7.14	11.71	5.16	5.36	8.13	22.62	38.49	100
焦粉	1.93	13.50	21.82	14.50	10.60	9.09	12.18	16.38	100

1.2 试验流程及方法

通过实验室烧结杯试验, 对复合料固定碳配比、球团比例以及布料方式等影响复合造块工艺效果的关键因素进行系统研究。

复合造块试验流程如下: 首先按照球团料和基体料的比例, 分别进行球团料和基体料配料计算。考虑到试验用含锰尾矿粒度偏粗, 为保证生球强度, 膨润土配比定为 3.0%, 生球水分控制在 11%。造球用圆盘造球机直径 800 mm, 边高 200 mm, 倾角 42°, 转速 21 r/min, 球团粒度在 10~12.5 mm 比例要求大于 90%。根据配料计算结果, 分别称取相应的含锰尾矿、燃料及熔剂, 其中生石灰需加水消化, 然后将所有原料加水混匀, 用圆筒混合机完成制粒, 制粒时间为 5 min。将球团料和基体料按照预先设计的布料方式布入烧结杯中, 准备点火烧结。实验室所用烧结杯直径为 300 mm, 烧结杯高度为 600 mm, 点火负压 8 kPa, 烧结负压 14 kPa, 点火温度 1 100 °C±50 °C, 点火时间 90 s, 冷却负压 8 kPa, 冷却时间 3 min。复合造块工艺试验流程如图 1 所示。

含锰尾矿复合造块试验方案如表 3 所示, 方案 0 为普通烧结工艺对照组, 方案 1~9 为复合造块工艺试验组。试验组分为两个阶段, 方案 1~4 为复合

料固定碳配比试验, 根据烧结技术指标确定适宜的固定碳配比。在此条件下进行第二阶段球团料比例以及布料方式的试验研究。四种布料方式如下:

- 1) 交替布料: 球团料和基体料分层交替布入, 球团料主要布在料层中下部;
- 2) 分批布料: 先布入球团料, 再布入基体料;
- 3) 混匀布料: 将球团料和基体料充分混匀后布入, 球团料在料层中均匀分布;
- 4) 偏析布料: 将球团料和基体料充分混匀, 模拟反射板偏析布料方式。

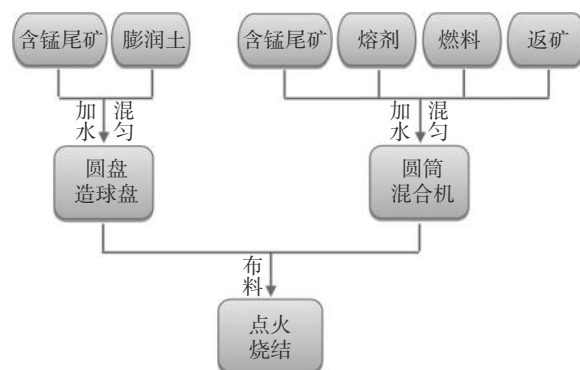


图 1 含锰尾矿复合造块工艺流程

Fig. 1 Flow chart of composite agglomeration process of the tailings containing Manganese

表 3 含锰尾矿复合造块试验研究方案
Table 3 Experiment scheme of tailings containing manganese composite agglomeration

烧结工艺	方案	固定碳配比/%	球团比例/%	布料方式
普通烧结	0	3.8	0	常规装料
	1	3.8	35	交替布料
复合造块第一阶段	2	3.6	35	交替布料
	3	3.3	35	交替布料
	4	3.0	35	交替布料
	5	3.3	40	交替布料
	6	3.3	45	交替布料
复合造块第二阶段	7	3.3	40	分批布料
	8	3.3	40	混匀布料
	9	3.3	40	偏析布料

2 试验结果及分析

普通烧结工艺及复合造块工艺的烧结杯试验结果见 表 4。根据方案 0 的试验结果可知, 采用 100% 含锰尾矿进行烧结时, 混合料制粒所需水分高达 11.30%, 垂直烧结速度仅有 11 mm/min, 烧结

时间接近 55 min, 由此说明烧结料层的透气性很差。成品率和利用系数均处于极低的水平, 固体燃耗接近 90 kg/t。采用复合造块工艺处理含锰尾矿时, 各组方案的成品率、利用系数和固体燃耗指标均优于普通烧结工艺。

表 4 含锰尾矿普通烧结工艺及复合造块工艺的烧结杯试验结果
Table 4 Sintering pot test results under regular sintering process and composite agglomeration process

方案	基体料水分/%	生球水分/%	垂烧速度/(mm·min ⁻¹)	成品率/%	利用系数/[t·(m ² ·h) ⁻¹]	返矿平衡	转鼓强度/%	固体燃耗/(kg·t ⁻¹)
0	11.30		10.97	52.63	0.52	2.35	61.33	89.27
1	8.28	11.08	18.22	82.61	1.50	0.91	64.80	55.46
2	8.76	11.10	15.30	82.44	1.24	0.89	63.13	52.84
3	8.72	11.07	17.55	80.33	1.41	1.03	62.72	50.04
4	8.36	11.14	21.88	77.16	1.72	1.16	61.14	46.45
5	8.56	11.15	18.03	81.68	1.50	0.97	61.96	48.21
6	8.62	11.19	12.37	79.63	1.00	1.04	63.60	49.71
7	9.16	11.06	11.35	82.66	0.96	0.94	58.33	47.44
8	9.16	11.06	23.78	75.54	1.82	1.25	56.67	52.39
9	8.12	11.28	16.29	80.74	1.43	1.02	60.63	48.87

2.1 配碳优化试验

考虑到普通烧结工艺混合料层透气性差, 烧结时间长, 成品率低等问题。在第一阶段试验中, 将球团料比例设定为 35%, 采用交替布料方式, 在保证成品率和烧结矿强度的基础上, 寻找适宜固定碳配比。

配碳优化系列烧结杯试验结果表明: 随着固定碳配比从 3.0% 增加至 3.8%, 成品率由 77.16% 增加至 82.61%, 复合烧结矿转鼓强度从 61.14% 增加

至 64.80%, 固体燃耗从 46.45 kg/t 增加至 55.46 kg/t。在固定碳配比为 3.6% 和 3.8% 时, 产生的返矿量偏少, 说明配碳量还有进一步降低的空间。综合考虑成品率、利用系数以及固体燃耗, 推荐适宜的固定碳配比为 3.3%。

2.2 球团配比优化试验

在第二阶段试验中, 以方案 3 为基准, 将方案 5 和 6 中的球团比例分别调整为 40% 和 45%。烧结

杯试验结果表明:当球团比例由 35% 提高至 40% 时,成品率由 80.33% 提高到 81.68%,利用系数由 $1.41 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 提高至 $1.50 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,增长约 6%,同时固体燃耗降低约 $1.8 \text{ kg}/\text{t}$,转鼓强度变化不明显。当球团比例增加至 45% 时,烧结时间明显变长,烧结利用系数降至 $1.00 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,降幅达到约 30%。综合考虑利用系数及固体燃耗,适宜的球团料配比为 40%。

2.3 布料方式优化试验

考虑到实际生产中,采用分层交替布料的方式会导致布料工艺流程复杂化,因此进行布料方式优化试验。从烧结杯试验结果可以看出,不同的布料方式对烧结经济技术指标影响较大。方案 7 为采用分批布料方式,试验过程中发现当烧结废气温度升高到一定值后,升温速度变得异常缓慢。整个烧结过程接近 53 min,导致垂直烧结速度只有 $11.35 \text{ mm}/\text{min}$,利用系数仅为 $0.96 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。分析认为,在火焰前锋穿过基体料层移动到球团料层时,由于球团料层没有配加燃料,仅凭烧结料层自蓄热进行焙烧,高温带移动速度非常缓慢,因此严重影响垂直烧结速度;方案 8 采取混匀布料方式时,垂直烧结速度

大幅度提高,达到 $23.78 \text{ mm}/\text{min}$,此时利用系数高达 $1.82 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。但此时烧结速度过快,料层上部蓄热不足,导致转鼓强度仅有 56.67%。方案 9 采用偏析布料方式得到的各项烧结技术指标相比方案 5 略微有所下降,但仍在可接受范围内,考虑到工艺可操作性,建议实际生产中采用偏析布料方式更为合理。

3 烧结矿化学成分及冶金性能

将普通烧结工艺方案 0 和复合造块工艺方案 9 得到的成品矿混匀、整粒,取样进行化学成分和冶金性能测定。

3.1 烧结矿化学成分

采用两种造块工艺得到的成品烧结矿化学成分如表 5 所示。其中复合烧结矿全铁品位为 59.63%,相比普通烧结矿的全铁品位提高 3.44%。这主要是由于普通烧结工艺中为调整烧结矿碱度,配加了大量的熔剂导致全铁品位降低。复合烧结矿二元碱度 $R=1.40$,四元碱度 $R=1.28$,可以满足高炉冶炼对炉渣碱度的要求^[12]。复合烧结矿中 FeO 含量较高,为 15.59%, K_2O 、 Na_2O 、S、P 等杂质含量较低。

表 5 成品烧结矿的化学成分
Table 5 Chemical compositions of the sinter products

烧结工艺	w/%											R (倍)
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	Mn	S	P	
普通烧结	56.19	9.46	4.80	9.36	0.45	0.29	0.12	0.025	1.64	0.007	0.011	1.95
复合造块	59.63	15.59	3.94	5.51	1.30	1.22	0.14	0.037	2.76	0.009	0.014	1.40

3.2 烧结矿冶金性能

成品烧结矿的还原度 (RI)、低温还原粉化指数 ($\text{RDI}_{+3.15 \text{ mm}}$) 依据 GB/T 13241、13242 执行,软熔滴

落性能参照 GB/T 34211 标准执行,试验测定结果见表 6。

表 6 成品烧结矿冶金性能测定试验结果
Table 6 Test results of metallurgical properties of the sinter products

工艺	低温还原粉化($\text{RDI}_{+3.15 \text{ mm}}$)/%	还原度(RI)/%	$T_{10\%}/^\circ\text{C}$	$T_{40\%}/^\circ\text{C}$	$\Delta T_1/^\circ\text{C}$	$T_s/^\circ\text{C}$	$T_d/^\circ\text{C}$	$\Delta T_2/^\circ\text{C}$	$\Delta P_m/\text{kPa}$	$S/(\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C})$
普通烧结	76.04	75.76	1 061.1	1 213.0	151.9	1 288.2	1 467.5	179.3	10.76	864.6
复合造块	79.53	72.49	1 011.6	1 160.1	148.5	1 270.8	1 359.3	88.5	8.27	222.0

注: ΔT_1 (软化温度区间) = $T_{40\%} - T_{10\%}$; ΔT_2 (熔滴温度区间) = T_d (滴落开始温度) - T_s (熔化开始温度)。

根据冶金性能测定结果,复合矿的还原度指数 RI 为 72.49%,相比普通烧结矿还原度指数低 3.27 个百分点,但仍可达到中低碱度烧结矿二级品指标 ($\text{RI} \geq 72\%$)。低温还原粉化指数 $\text{RDI}_{+3.15 \text{ mm}}$ 为

79.53%,优于中低碱度烧结矿一级品指标 ($\text{RDI}_{+3.15} \geq 74\%$)^[13]。

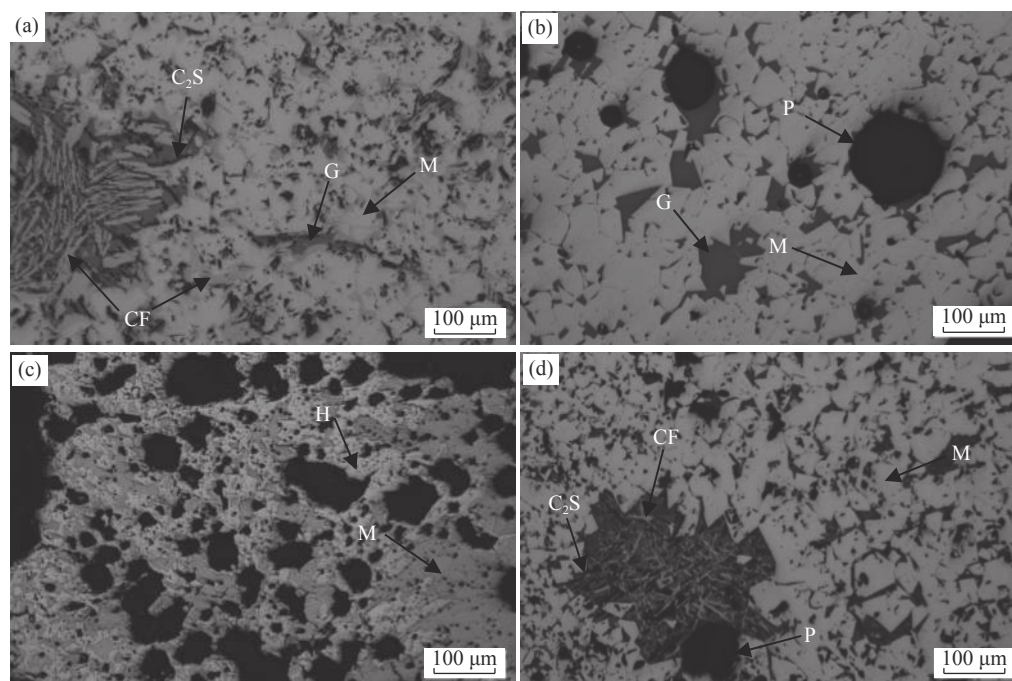
复合矿软化开始温度 ($T_{10\%}$) 为 1 011.6 $^\circ\text{C}$,相比普通烧结矿低约 50 $^\circ\text{C}$,软化终了温度 ($T_{40\%}$) 为

1 160.1 ℃, 软化温度区间与普通烧结矿较为接近。熔化开始温度 (T_s) 为 1 270.8 ℃, 相比普通烧结矿低约 20 ℃, 滴落开始温度 (T_d) 为 1 359.3 ℃, 相比普通烧结矿低约 110 ℃, 复合矿的熔滴温度区间较窄, 仅为 88.5 ℃, 相比普通烧结矿熔滴区间降幅约为 50%, 最大压差降低 2.5 kPa, 降幅约为 23%, 说明软熔带透气性增加。复合矿熔滴性能总特征值 (S)

为 222.0 kPa·℃, 仅为普通烧结矿的 25%, 由此说明, 复合矿的熔滴性能有明显改善。

4 烧结矿矿物组成和显微结构

对两种工艺下的烧结矿取样, 磨制成光片, 观察矿物的显微结构, 两种烧结工艺条件下典型的矿相显微结构照片如图 2 所示。



M: 磁铁矿; G: 玻璃相; P: 气孔; CF: 铁酸钙; C₂S: 硅酸二钙; H: 次生赤铁矿

(a) 普通烧结矿一般显微结构; (b) 复合矿球团中部显微结构; (c) 复合矿球团边缘显微结构; (d) 复合矿基体部分显微结构

图 2 烧结矿显微结构

Fig. 2 The mineral compositions and microstructures of the composite sinter products

普通烧结矿显微结构主要以玻璃相粘结磁铁矿形成的斑状结构和铁酸钙粘结磁铁矿形成的交织熔蚀结构为主, 局部区域有较多的板状铁酸钙和少量针状硅酸二钙析出(见图 2(a)), 铁酸钙粘结相总量约为 10%, 说明该尾矿的铁酸钙生成能力较差。

复合烧结矿的显微结构分两部分, 其中球团体部分主要是磁铁矿和少量玻璃质构成的斑状结构, 磁铁矿呈半自形、他形粒状, 玻璃质含量约为 5%, 无定形填充于磁铁矿晶粒间(见图 2(b)), 在球团边缘及气孔周围可见少量次生赤铁矿(见图 2(c))。复合烧结矿基体部分的显微结构与球团体部分较为类似, 在局部玻璃质富集区域有少量板状硅酸二钙和针状铁酸钙析出(见图 2(d)), 基体部分没有观察到赤铁矿存在。

从矿相分析结果来看, 复合矿球团体部分由粒

状的磁铁矿构成, 没有形成类似赤铁矿的晶桥, 故而强度较低; 复合矿基体中铁酸钙粘结相含量相比普通烧结矿明显减少, 硅酸二钙生成量较多, 故而复合烧结矿还原度相比普通烧结矿有所降低。

5 结论

1) 采用复合造块工艺处理含锰尾矿可以生产出合格的复合烧结矿。适宜的固定碳配比为 3.3%, 球团料比例为 40%, 采用交替布料方式时, 各项烧结技术指标最佳, 但考虑布料工艺可实现性, 推荐采用偏析布料方式。

2) 试验所得复合烧结矿全铁品位高达 59.63%, 比普通烧结矿提高 3.44 个百分点, SiO₂ 和 CaO 含量均低于普通烧结矿。复合矿二元碱度 $R=1.40$, 四元碱度 $R=1.28$, 可以满足高炉冶炼对入炉料碱度的

要求。

3) 复合烧结矿还原度指数为 72.49%, 相比普通烧结矿低 3.27 个百分点, 低温还原粉化性能优于普通烧结矿。复合烧结矿熔滴性能有明显改善, 熔滴温度区间仅有 88.5 ℃, 最大压差相比普通烧结矿降低 23%, 熔滴性能总特征值“S”值仅为 222.0 kPa·℃。

4) 复合烧结矿显微结构主要是磁铁矿和少量玻璃质构成的稠密斑状结构。球团体边缘或气孔处可观察到少量赤铁矿。复合矿基体部分出现玻璃质富集区域, 其中有少量板状硅酸二钙和针状铁酸钙析出, 相比普通烧结矿, 铁酸钙粘结相含量明显减少, 硅酸二钙含量较多, 因此复合矿的还原度有所降低。

参考文献

- [1] Zhao Liqun, Wang Chunnv, Zhang Min, *et al.* Current exploration status and supply-demand situation of iron ore resources in China mainland[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(3): 635–642.
(赵立群, 王春女, 张敏, 等. 中国铁矿资源勘查开发现状及供需形势分析[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(3): 635–642.)
- [2] Wu Qiuji, Lv Zhenfu, Cao Jincheng. Study on the current situation of development and utilization of large iron ore resource bases in China[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(8): 113–115.
(武秋杰, 吕振福, 曹进成. 我国铁矿大型资源基地开发利用现状研究[J]. *现代矿业*, 2020, 36(8): 113–115.)
- [3] Zhang Xiang. The present situation and countermeasures of iron ore resource safety in China[J]. *Fujian Metallurgy*, 2021, 50(3): 56–58.
(张翔. 浅谈我国铁矿资源安全的现状和对策[J]. *福建冶金*, 2021, 50(3): 56–58.)
- [4] Teng Fei, Zeng Zhiyan, Guo Peimin. Experimental study on pellets performance of a kind of manganese-containing iron concentrate[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2021, 46(5): 47–53.
(滕飞, 曾志彦, 郭培民. 一种含锰铁精矿球团性能试验研究[J]. *烧结球团*, 2021, 46(5): 47–53.)
- [5] Jiang Tao, Li Guanghui, Zhang Yuanbo, *et al.* Composite agglomeration process [C]//Proceedings of 2010 National Ironmaking Production Technology Conference and Annual Ironmaking Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2010: 181–186.
(姜涛, 李光辉, 张元波, 等. 铁矿粉复合造块法[C]//2010年全国炼铁生产技术会议暨炼铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2010: 181–186.)
- [6] Chen Ge, Wang Ruijun, Shen Maosen. Application of superfine iron ore concentrate in composite agglomeration process[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2011, 31(3): 100–103.
(陈革, 王瑞军, 沈茂森. 超细精矿在复合造块工艺中的应用[J]. *矿业工程*, 2011, 31(3): 100–103.)
- [7] Rao Jiating, Hu Peng, Qin Xingguo, *et al.* Parameters optimization of composite sintering titanium magnetite concentrate[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2017, 38(3): 83–87.
(饶家庭, 胡鹏, 秦兴国, 等. 钒钛磁铁精矿复合烧结参数优化研究[J]. *钢铁钒钛*, 2017, 38(3): 83–87.)
- [8] Zhang Zhanlei, Yu Heng, Song Zhifang, *et al.* Experimental study on composite agglomeration of vanadium-titanium magnetite concentrates[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2014, 39(4): 1–5.
(张展雷, 于恒, 宋志芳, 等. 钒钛磁铁精矿复合造块试验研究[J]. *烧结球团*, 2014, 39(4): 1–5.)
- [9] Wan Xinyu, Lv Qing, Zhang Shuhui, *et al.* Researches on vanadium-titanium magnetite concentrates by composite agglomeration process[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2014, 35(3): 63–68.
(万新宇, 吕庆, 张淑会, 等. 难烧钒钛磁铁精粉的复合造块研究[J]. *钢铁钒钛*, 2014, 35(3): 63–68.)
- [10] Zhang Ronghua, Liu Bingbing, Zhang Yuanbo, *et al.* Research on preparation of low-medium basicity BF burden from high-MgO content iron ore concentrates by composite agglomeration process[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2017, 42(6): 27–33.
(张荣华, 刘兵兵, 张元波, 等. 高镁精矿复合造块法制备中低碱度炉料研究[J]. *烧结球团*, 2017, 42(6): 27–33.)
- [11] Zhang Yuanbo, Du Minghui, Li Guanghui, *et al.* New advances on application of composite agglomeration process in hard-to-treat iron-bearing mineral resources[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2016, 41(4): 39–44.
(张元波, 杜明辉, 李光辉, 等. 复合造块法在难处理含铁资源中的应用新进展[J]. *烧结球团*, 2016, 41(4): 39–44.)
- [12] Maarten Geerdes, Renard Chaigneau, Oscar Lingardi, *et al.* Modern blast furnace ironmaking (Fourth edition)[M]. Sha Yongzhi's Translation. Beijing: China Science and Technology Press, 2021: 84–86, 145–149
(马丁·戈德斯, 瑞纳德·谢尼奥, 奥斯卡·林格阿迪, 等. 现代高炉炼铁(4版)[M]. 沙永志译. 北京: 中国科学技术出版社, 2021: 84–86, 145–149.)
- [13] Jiang Tao. Technical manual of sintering pellet production[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 875.
(姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 875.)