

# 某高铝铁矿粉替代澳洲低铝矿粉 对烧结高温特性影响

刘勇君<sup>1</sup>, 邢亚璞<sup>2</sup>, 罗尧升<sup>1</sup>, 刘华阳<sup>1</sup>, 寇明银<sup>2</sup>, 吴胜利<sup>2</sup>, 周恒<sup>2\*</sup>

(1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北 唐山 063210; 2. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 澳洲某优质低铝铁矿粉 OE 是国内钢铁企业主要原料之一, 其资源面临逐渐枯竭的挑战。OA 铁矿粉因具备一定价格优势且资源充足, 成为替代 OE 的选项之一, 然而 OA 铁矿粉的  $Al_2O_3$  较高, 因此如何高效使用 OA 矿粉替代低铝 OE 矿粉, 已成为当前钢铁行业关注的热点。采用微型烧结方法, 系统探究 OA 部分及完全替代 OE 后, 烧结混匀矿的液相流动性、粘结相自身强度以及铁酸钙与高铝脆性物生成特性变化规律。与 OE 矿粉相比, OA 矿粉的同化温度较高, 液相流动能力较强, 两者的粘结相自身强度较为接近。随着 OA 替代 OE 比例的升高, 混匀矿的液相流动性指数及粘结相自身强度逐渐升高, 但混匀矿中铁酸钙含量随 OA 替代比例增加而逐渐降低。XRD 矿相结构分析表明, OA 替代 OE 比例的升高, 使得铁酸钙含量降低但高铝脆性物增加。由于 OA 矿粉的  $Al_2O_3$  含量较高, 过量配加 OA 矿易抑制铁酸钙生成并导致高铝脆性物形成。因此, 实际生产中, 需精准调控 OA 替代 OE 比例, 以提升高铝混匀矿的烧结性能, 强化后续高炉冶炼的稳定性。

**关键词:** 液相流动性指数; 粘结相自身强度; 铁酸钙; 高铝脆性物

中图分类号: TF046

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0164-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听  
语  
音  
聊  
科  
研  
与  
作  
者  
互  
动

## Effect of replacing Australian low-alumina iron ore fines with specific high-alumina iron ore fines on high-temperature sintering properties

LIU Yongjun<sup>1</sup>, XING Yapu<sup>2</sup>, LUO Yaosheng<sup>1</sup>, LIU Huayang<sup>1</sup>, KOU Mingyin<sup>2</sup>,  
WU Shengli<sup>2</sup>, ZHOU Heng<sup>2\*</sup>

(1. Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063210, Hebei, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A type of high-quality low-aluminum iron ore fines(OE) from Australia has been served as one of the core raw materials in the production of domestic iron and steel enterprises. However, its reserves are gradually being depleted. OA iron ore fines have emerged as one of the potential alternatives to OE due to their favorable price advantage and abundant reserves. Nevertheless, OA iron ore fines exhibit a relatively high  $Al_2O_3$  content. Therefore, how to efficiently utilize OA iron ore fines as a substitute for the low-aluminum OE has become a key research focus in the iron and steel industry. In this study, the mini-sintering method was employed to systematically investigate the variation patterns of the liquid phase fluidity index, intrinsic strength of bonding phase, and formation characteristics of calcium

收稿日期: 2026-01-19; 修回日期: 2026-01-23; 接受日期: 2026-02-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902401); 教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220037, 202201314)。

作者简介: 刘勇君, 1982 年出生, 男, 湖南郴州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事烧结相关工作, E-mail: 15832551180@163.com; \*通信作者: 周恒, 1988 年出生, 男, 湖南衡阳人, 博士, 副教授, 主要从事炼铁新工艺和冶金过程的数值模拟方向研究。E-mail: zhouheng@ustb.edu.cn。

ferrite and high-alumina brittle phases in sintered blended ore after partial or complete replacement of OE with OA. Compared with OE iron ore fines, OA iron ore fines exhibit a higher assimilation temperature and better liquid phase fluidity, whereas their bonding phase strengths are relatively similar. As the OA replacement ratio for OE increases, the liquid phase fluidity index and intrinsic strength of bonding phase of the blended ore increase progressively, whereas the calcium ferrite content decreases correspondingly. X-ray diffraction (XRD) mineral phase analysis reveals that an increase in the OA replacement ratio results in a reduction in calcium ferrite content but an increase in high-alumina brittle phases. Given the high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content of OA iron ore fines, excessive incorporation of OA tends to inhibit calcium ferrite formation and promote the formation of high-alumina brittle phases. Therefore, in practical production, precise control of the OA replacement ratio is essential to improve the sintering performance of high-aluminum blended ore and enhance the stability of subsequent blast furnace smelting.

**Key words:** liquid phase fluidity index; intrinsic strength of bonding phase; calcium ferrite; high-alumina brittle material

## 0 引言

烧结矿是高炉炼铁主要原料, 占高炉炉料结构的 70% 以上<sup>[1-3]</sup>, 其质量对冶炼成效影响显著。我国炼铁行业对进口铁矿石的依赖程度较高<sup>[4-6]</sup>, 其中某澳洲低铝矿粉 OE 是国内钢铁企业的主要原料之一。然而, 伴随该铁矿石资源的逐渐枯竭, 如何高效、经济替代该主流矿成为炼铁工作者关注的焦点。在此背景下, 选用其他铁矿粉进行替代, 实施烧结配矿成为降低生产成本、稳定烧结矿质量的关键环节<sup>[7-14]</sup>。

目前, OA 由于其价格优势且资源充足, 受到越来越多的关注和使用, 但 OA 中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量偏高, 高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组分一方面可提高体系熔点, 使液相黏度上升, 恶化液相流动性; 另一方面易生成高铝脆性矿物, 劣化烧结黏结相及成矿性能。合理高效地使用低价铁矿粉不仅可以降低生产成本, 还可以为降低能耗奠定基础。李国栋等人<sup>[15]</sup>研究了用 FMG 混合粉替换杨迪粉(低铝褐铁矿粉), 结果显示, 以 15% FMG 混合粉替代杨迪粉时, 烧结料层透气性略降, 烧结矿物理性能指标下滑, 产量与质量仍能满足超大型高炉生产需求。王宁等人<sup>[16]</sup>研究了添加乌克兰精粉替代部分卡粉以降低配矿成本, 结果显示, 乌克兰精粉配比为 5% 的新配矿方案的烧结综合指标良好, 同时配矿成本得到了显著降低。赵鸿波等人<sup>[17]</sup>分析了 7 种常用铁矿石特性, 基于线性规划原理, 提出了优化配矿方法, 并通过烧结杯试验验证其科学性, 结果表明, 优化后烧结矿质量达标, 降本效益显著。LI 等人<sup>[18]</sup>通过微型烧结试验揭示  $\text{SiO}_2$  含量对烧结行为的影响机理, 对比不同铁矿粉的高温性能, 最终实现 OM 替代澳大利亚低铝褐铁矿的优化配矿方案。方叶晗等人<sup>[19]</sup>对新品种矿开展了常温特性分析、高温特性测试及烧结杯试验, 明确了新品种矿替代劣化矿种的最优替代方案。上述研究为指

导 OA 替代 OE 提供了有效借鉴, 但 OA 作为新铁矿粉品类, 其烧结基础特性有待进一步全面分析, 特别是其替代 OE 对烧结高温特性影响规律还有待进一步研究, 以期为后续烧结配矿奠定理论基础。

因此, 在某钢铁企业实际烧结生产配矿结构基础上, 采用微型烧结法研究了 OA 高铝矿粉以及以 OE 为代表的 11 种常用铁矿粉的烧结基础特性, 探究各铁矿粉的同化性、液相流动性和粘结相自身强度等高温特性的差异性, 明确 OA 铁矿粉替代 OE 比例对烧结高温特性的影响规律。相关研究可为 OA 矿粉替代澳洲低铝矿粉 OE 的烧结配矿优化提供理论依据。

## 1 试验原料及方法

### 1.1 试验原料

以澳洲矿粉、南美铁矿粉等 13 种铁矿粉为原料, 各铁矿粉的化学成分与烧损如表 1 所示。对比 OE 的成分可知, OA 的  $w(\text{TFe})$  较高, 提高 OA 比例, 有利于提高烧结矿品位。然而 OA 的  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{TiO}_2)$  等脉石含量相对较高, 可能会使得 OA 在烧结配加时面临挑战。

表 1 试验用铁矿粉的化学成分  
Table 1 Chemical compositions of experimental iron ore fines %

Ores	TFe	$\text{SiO}_2$	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	FeO	Loss on ignition
OA	58.02	4.36	0.12	2.95	0.16	0.24	9.00
OB	61.79	3.43	0.08	2.25	0.09	0.24	4.75
OC	56.26	6.57	0.10	3.00	0.20	0.21	8.20
OD	58.49	5.50	0.10	3.20	0.19	0.30	7.00
OE	56.20	5.72	0.14	1.60	0.08	0.32	11.30
OF	57.50	6.10	0.02	2.70	0.15	0.22	7.10
OG	57.50	6.28	0.14	3.03	0.21	0.54	6.50
OH	56.80	12.00	0.28	2.30	0.30	1.24	4.20
OI	65.07	2.38	0.01	1.22	0.07	1.18	4.67
OJ	61.63	8.19	0.11	1.11	0.16	3.15	2.20
OK	63.00	8.07	0.05	0.45	0.12	2.43	0.40
OL	61.93	7.56	0.14	1.22	0.11	1.49	2.55
OM	69.60	1.40	0.43	0.26	0.07	29.50	-2.5

### 1.2 高温特性试验方法

针对 OA 以及 OE 为代表的其余 11 种常用铁矿粉, 对其同化性、液相流动性与粘结相自身强度开展系统研究, 明确各铁矿粉高温性能差异。在此基础上, 探究 OA 替代 OE 对混匀矿高温特性的影响规律。

将铁矿粉破碎并筛分至 75 μm(200 目) 以下, 随后置于烘箱中, 在(100±5) °C 条件下干燥 2 h, 同化性、液相流动性与粘结相自身强度沿用前人试验方法以保障试验结果可靠性<sup>[20-24]</sup>。试验使用微型烧结设备, 试验过程控制条件如图 1 所示。

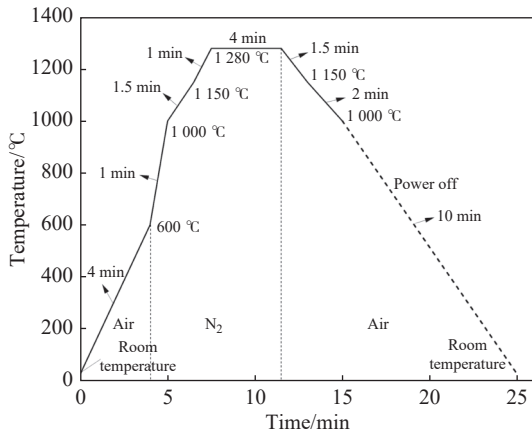


图 1 铁矿粉的烧结基础特性试验控制条件

Fig. 1 Experimental control conditions for basic sintering properties of iron ore fines

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同铁矿粉的烧结高温基础特性

#### 1) 最低同化温度

烧结矿的固结机制主要依赖于液相的形成与再结晶<sup>[25]</sup>。铁矿粉的同化温度越低, 意味着液相可在较低温度区间生成, 然而过低的同化温度易破坏料层透气性, 从而影响烧结颗粒的固结效果; 反之, 同化温度过高则会抑制液相生成, 进而影响烧结矿的强度。

图 2 为铁矿粉的最低同化温度, 由图 2 可知, 不同矿粉之间的同化温度表现出较大差异性, 整体上褐铁矿 (OA~OG) 的最低同化温度低于赤铁矿 (OH~OL) 和铁精粉 OM。OE 矿粉的最低同化温度为 1 155 °C, 在所有矿粉中最低, OC 矿粉的最低同化温度为 1 210 °C, 相较于其他褐铁矿矿粉, 其同化性能具有优势, OA 矿粉的最低同化温度为 1 250 °C, 该数值不仅在褐铁矿系列中处于较高水平, 且相较于多数赤铁矿也表现出相对劣化的特征。

#### 2) 液相流动性

铁矿粉的液相流动性主要通过测定铁矿粉与熔

剂发生反应生成液相时所具备的流动能力来确定<sup>[26]</sup>。液相流动性的评价指标即液相流动性指数。液相流动性体现了黏结相的有效黏结范围。只有具备适宜的液相流动性方能确保拥有充足的固液连接面积, 从而得以收获较高的粘结相自身强度。

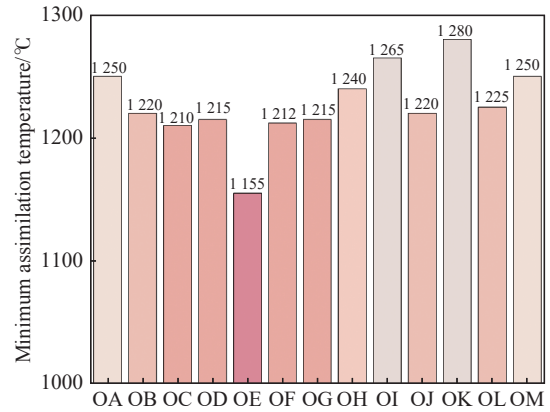


图 2 铁矿粉的最低同化温度

Fig. 2 Minimum assimilation temperature of iron ore fines

图 3 为铁矿粉的液相流动性指数, 由图 3 可知, 整体上 1 320 °C 下的液相流动性指数与 1 280 °C 相比显著升高, 而 OH 铁矿粉的液相流动性指数在两温度区间内的变化幅度相对较小, OC 与 OH 两种铁矿粉的液相流动性指数均处于较低水平, 其主要原因是二者 SiO<sub>2</sub> 含量较高, 导致粘附粉偏析碱度较低, 不利于低熔点矿物铁酸钙生成, 最终导致两种矿粉液相流动性处于较低水平。另外, 1 280 °C 下褐铁矿中 OA 的液相流动性指数为 0.52, 相对较高, 这主要是因为 OA 的 SiO<sub>2</sub> 含量较低, 因此配矿增加 OA 占比有利于提升混匀矿的二元碱度, 降低液相的黏度, 增强液相流动性。

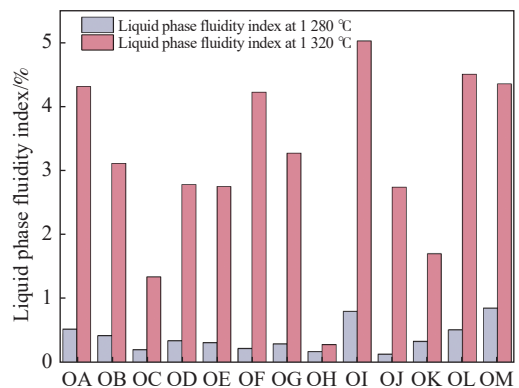


图 3 铁矿粉的液相流动性指数

Fig. 3 Liquid phase fluidity index of iron ore fines

图 4 为铁矿粉 SiO<sub>2</sub> 含量对其液相流动性指数的影响。由图可知, 在 1 280 °C 与 1 320 °C 下铁矿粉的液相流动性指数均随着 SiO<sub>2</sub> 含量的升高呈降

低趋势, 相关研究表明, 在试样 CaO 配比保持 15% 恒定的条件下, SiO<sub>2</sub> 含量的增加会促使更多高熔点

硅酸盐矿物的形成, 进而造成体系液相生成量的减少, 最终导致液相流动性呈现下降趋势。

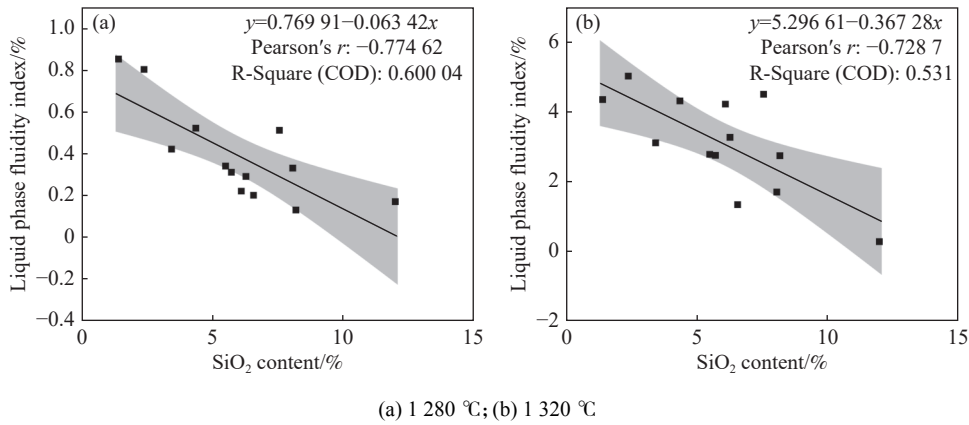


图 4 铁矿粉 SiO<sub>2</sub> 含量对其液相流动性指数的影响  
Fig. 4 The impact of silicon dioxide content in iron ore fines on the liquid phase fluidity index

### 3) 粘结相自身强度

粘结相自身强度指铁矿石生成的液相混合未熔烧结料后液相冷凝所形成的自身强度。其对烧结矿的强度有着极其重要的影响。

图 5 为 1 320 °C 下铁矿粉的粘结相自身强度, 由图 5 可见, 各单矿的粘结相自身强度差异显著, OA 的粘结相自身强度最低为 118 N, OJ 与 OL 的粘结相自身强度较高, 分别为 233.5 N 和 245.7 N。在实际配矿中应该将不同粘结强度的铁矿粉混合使用, 确保烧结矿强度满足生产要求。

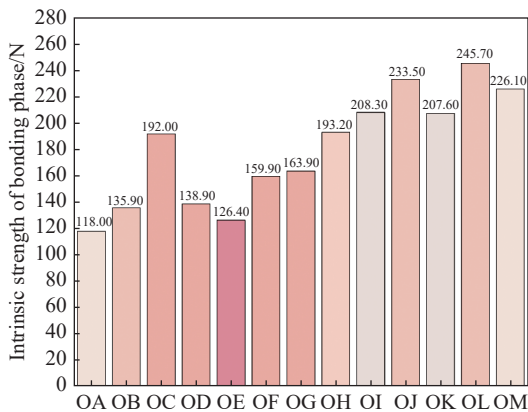


图 5 铁矿粉的粘结相自身强度  
Fig. 5 Intrinsic strength of the bonding phase of iron ore fines

图 6 为铁矿粉 SiO<sub>2</sub> 含量对其粘结相自身强度的影响, 从图中可以看出, 除铁精粉 OM 外, 随着 SiO<sub>2</sub> 含量的升高, 粘结相自身强度呈现升高的趋势。这是因为 SiO<sub>2</sub> 含量上升对硅酸钙的生成是有利的, 硅酸钙又是高强度的矿物, 这样就提高了粘结相自身的强度。铁精粉 OM 则因为铁矿粉组成中含有较高的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 在烧结过程中 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 氧化放热, 从而可以产生高强度的粘结相, 提高了粘结相自身的强度。

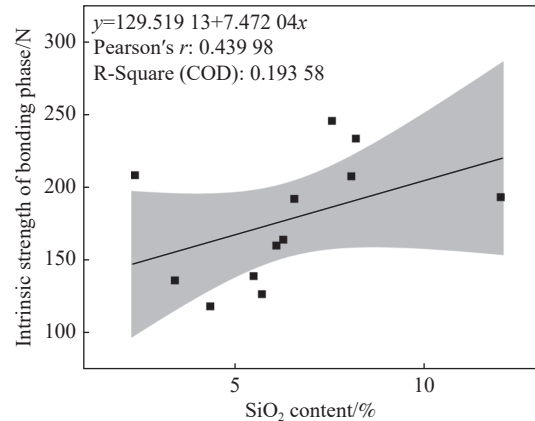


图 6 铁矿粉 SiO<sub>2</sub> 含量对其粘结相自身强度的影响  
Fig. 6 The influence of SiO<sub>2</sub> content in iron ore fines on the intrinsic strength of their bonding phase

## 2.2 OA 替代 OE 后高温烧结性能变化

### 2.2.1 替代方案

通过对上述常用铁矿粉的化学组成及高温烧结基础特性进行深入分析, 发现不同种类的铁矿粉在这些方面存在显著差异。在烧结配矿过程中, 依据互补性原则, 充分结合不同铁矿粉的特性, 合理搭配混合使用, 能使烧结矿的各项性能指标契合高炉的需求, 这对炼铁生产的降本增效发挥着至关重要的作用。基于 OA 液相流动性较高, 可通过增加 OA 使用量改善烧结矿的液相流动性, 增大有效粘结相, 进而提高烧结矿强度。紧密围绕实际生产需求, 以确保烧结矿质量满足高炉生产标准为基本前提, 选取 OA 作为褐铁矿 OE 的单一替代变量, 系统探究其在不同替代比例下混匀矿高温特性的演化规律。其中, 表 2、表 3 分别给出了 OA 替代 OE 后的配矿结构及相应化学成分。

表2 OA替代OE混匀矿的配矿结构  
Table 2 Ore blending structure of the blended ore with OA replacing OE

Experimental scheme	OA	OB	OC	OD	OE	OF	OG	OH	OI	OJ	OK	OL	OM	Total
Baseline scheme	1.50	7.50	11.50	3.00	14.00	6.00	4.50	18.00	17.00	1.00	1.00	1.00	14.00	100.00
Scheme 1	6.50	7.50	11.50	3.00	9.00	6.00	4.50	18.00	17.00	1.00	1.00	1.00	14.00	100.00
Scheme 2	11.50	7.50	11.50	3.00	4.00	6.00	4.50	18.00	17.00	1.00	1.00	1.00	14.00	100.00
Scheme 3	15.50	7.50	11.50	3.00	0.00	6.00	4.50	18.00	17.00	1.00	1.00	1.00	14.00	100.00

表3 OA替代OE后混匀矿的化学成分  
Table 3 Chemical compositions of the blended ore after OA replacing OE

	TFe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ZnO	S	P	TiO <sub>2</sub>	FeO	C
Baseline scheme	64.22	6.56	0.19	0.14	1.96	0.03	0.02	0.01	0.04	0.05	0.14	4.87	0.12
Scheme 1	64.17	6.52	0.19	0.14	2.03	0.03	0.02	0.01	0.04	0.05	0.14	4.86	0.11
Scheme 2	64.11	6.47	0.20	0.13	2.10	0.03	0.02	0.01	0.04	0.06	0.13	4.84	0.09
Scheme 3	64.07	6.44	0.20	0.13	2.16	0.03	0.02	0.01	0.04	0.06	0.13	4.83	0.08

### 2.2.2 替代OE后对液相流动性及粘结相自身强度的影响

OA对OE实施单一变量替代后,混匀矿的液相流动性试验在1280℃条件下完成,粘结相自身强度则在1320℃下测定,试验参数、装置及流程均与第2.1节所述保持一致。

图7为OA替代OE后混匀矿液相流动性指数与粘结相自身强度的烧结基础特性变化规律,从图中可以看出,随着OA替代OE比例的提高,混匀矿的粘结相自身强度与液相流动性指数均有明显改善。在使用OA替代OE的试验方案中方案3的粘结相自身强度与液相流动性指数均最高,分别为185.5 N与0.22。

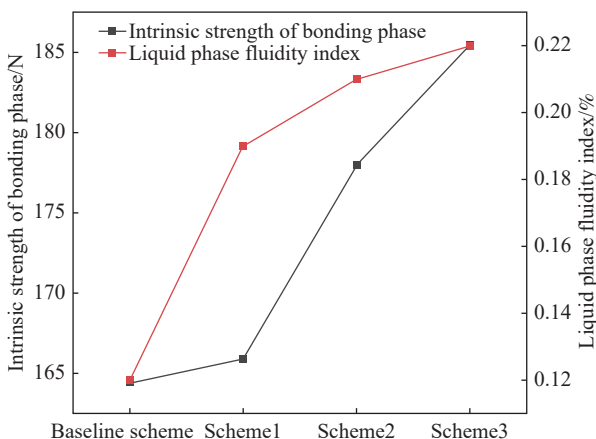


图7 OA替代OE后混匀矿的烧结基础特性

Fig. 7 Basic sintering properties of the blended ore after OA replacing OE

从图7可以看出使用OA替代OE时,液相流动性呈现上升趋势。其主要受SiO<sub>2</sub>含量变化的影响,结合表3数据可知,随着混匀矿中OA比例的增加,SiO<sub>2</sub>含量逐渐降低。由于SiO<sub>2</sub>含量高会降低粘附粉的偏析碱度,不利于低熔点矿物铁酸钙生成,从

而恶化液相流动性。因此提高混匀矿中OA比例有利于改善混匀矿液相流动性。

此外,由图5、7数据可知,尽管OA单品种粘结相强度低于OE,但在OA替代OE的不同比例下,混匀矿粘结相的自身强度均呈现上升趋势。这是因为随着OA替代比例的增加,混匀矿液相流动性指数同步升高,液相流动性的改善使得焙烧过程中生成的液相能够更充分地覆盖并黏附于核颗粒表面,液相成分冷却后,黏附于核颗粒表面的液相形成致密的块状结构,进而显著提升了粘结相的整体强度。因此,随着OA替代比例的增加,粘结相的强度也随之逐步提升。

### 2.3 替代OE后对铁酸钙生成特性的影响

表4为基准案例及不同方案下铁酸钙含量。由表中数据可知,基准方案下混匀矿中铁酸钙相含量最高为15.31%,然而随着混匀矿中OA比例增加铁酸钙含量呈现下降趋势。其中使用OA完全替代OE时,混匀矿铁酸钙含量最低为11.46%。这是因为铁酸钙相的生成与体系中Al元素含量密切相关,适量的Al元素含量有利于复合铁酸钙的生成。已有前人研究成果表明,复合铁酸钙中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>固溶的物质的量分数在6%~31%,当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量超过这个固溶范围时,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以C<sub>2</sub>(F<sub>1-x</sub>A<sub>x</sub>)的形式存在,从而限制了复合铁酸钙的生成量,适宜于复合铁酸钙生成的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量在1.7%左右<sup>[27]</sup>。OA作为一种高Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的铁矿粉,其Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为2.95%,远超复合铁酸钙生成的适宜含量范围。因此若OA铁矿粉的配加量超出一定比例,会因体系Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量过高而对复合铁酸钙的生成产生抑制作用,最终变现为复合铁酸钙含量下降。

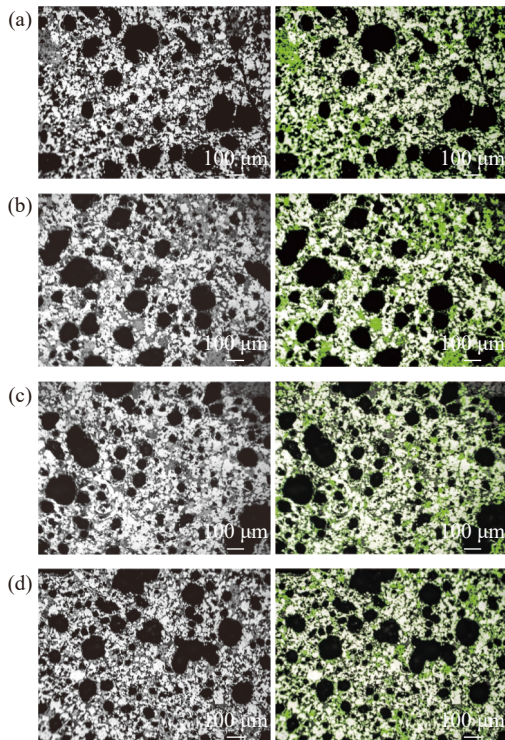
表 4 OA 替代 OE 后混匀矿的铁酸钙含量  
**Table 4 Calcium ferrite content of the blended iron ore after replacing OE with OA** %

Baseline scheme	Scheme 1	Scheme 2	Scheme 3
15.31	14.07	12.22	11.46

为了考察不同配矿结构对烧结成品矿中铁酸钙的影响,对烧结矿进行镶样、抛光,然后在矿相显微镜下观察其形貌特征。

对于粘结相矿物而言,同一强度的入射光照射到矿物光片(表面经研磨、抛光)之上,不同矿物有不同的反射色。研究的粘结相属于不透明矿物没有内反射,矿物颜色与反射色一致。因此,通过反射色的精确判定,能够准确确定粘结相中铁酸钙的含量。基于上述分析,采用 Image Pro Plus 软件处理 100 倍放大率下的矿相显微结构图像,并利用不同绿色标记区分铁酸钙相。

图 8 为 OA 替代 OE 后混匀矿的矿相显微结构及铁酸钙分布情况(绿色所示),矿相显微结构主要是灰色复合铁酸钙与亮白色铁氧化物形成的交织结构,此外部分区域有少量灰黑色硅酸盐填充于块状白亮区域和板状区域的缝隙之间。



(a) 基准案例铁酸钙分布(绿); (b) 方案 1 铁酸钙分布(绿); (c) 方案 2 铁酸钙分布(绿); (d) 方案 3 铁酸钙分布(绿)

图 8 OA 替代 OE 后混匀矿的铁酸钙生成特性

Fig. 8 Calcium ferrite formation characteristics of the blended ore after OA replacing OE

由图 8 所示的矿相显微结构观测结果可知,随着 OA 对 OE 替代比例的增加,灰黑色硅酸盐粘结相的占比呈显著上升趋势。由于硅酸盐相自身具有更高的强度,从而会显著提升粘结相自身强度。该矿相变化规律与第 2.2 节中通过试验测得的 OA 替代 OE 后粘结相自身强度上升的趋势高度一致,进一步从矿相学的角度验证了试验结果。

2.4 高铝脆性物生成特性

图 9 为 OA 替代 OE 后混匀矿的 X 射线衍射图。从表 3 的化学成分可以看出不同方案的化学成分差异较小,因此导致不同配矿方案的 X 射线衍射结果的差异性不大,相对明显的是不同案例峰值的强度有所差异。

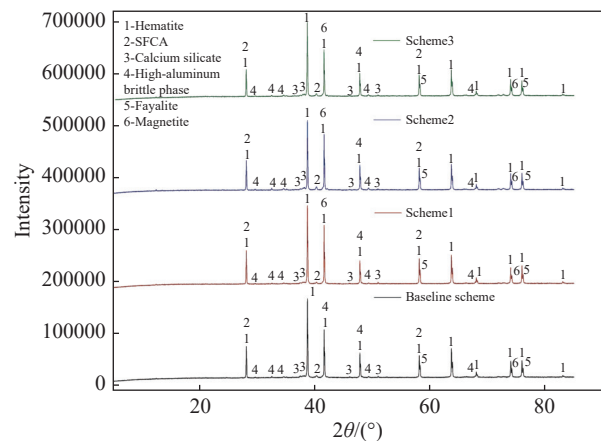


图 9 OA 替代 OE 后混匀矿的 X 射线衍射图  
 Fig. 9 X-ray diffraction pattern of blended iron ore after replacing OE with OA

通过 X 射线衍射分析结果可知,在混匀矿粘结相的衍射图中,赤铁矿对应的特征衍射峰强度最高,这表明赤铁矿在粘结相矿物组成中占据主导地位,其相对含量显著高于其他矿物相。进一步分析不同配矿方案的 XRD 数据发现,随着配矿体系中 OA 铁矿粉配比的升高,粘结相中具有胶凝作用的铁酸钙矿物含量呈现规律性降低趋势,而高铝脆性矿物的相对含量则略有增加。

从矿物生成机理来看,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在烧结过程中主要通过两种路径影响矿物组成,一方面,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可作为成矿组分参与高铝脆性矿物的生成,另一方面,当体系中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量超出铁酸钙矿物生成的适宜阈值时,过量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 会抑制铁酸钙矿物的成核与生长过程,最终导致其含量下降。

结合前期不同配矿方案下混匀矿烧结基础特性(液相流动性、粘结相自身强度)的试验结果,在以降低 OE 铁矿粉配比为核心目标的配矿框架下,采

用方案1可实现混匀矿烧结性能改善,为工业化配矿方案的确定提供理论支撑。

### 3 结论

1) OA 替代 OE 时,随着替代比例增加,混匀矿的液相流动性指数升高,如方案三 OA 完全替代 OE 时,液相流动性指数升至 0.22。

2) OA 完全替代 OE 均可提高混匀矿的粘结相自身强度,粘结相自身强度 185.5 N,随着

OA 替代 OE 比例上升,粘结相自身强度均呈上升趋势。

3) 基准方案中铁酸钙含量最高为 15.31%,随着混匀矿中 OA 比例增加,铁酸钙含量呈现下降趋势,而高铝脆性物略微有所增加,使用 OA 替代 5% OE 铁酸钙含量降低较少。

4) 结合不同配矿方案的烧结基础特性,在考虑降低 OE 配比的前提下,可采用方案 1 使用 OA 替代 5% OE 实现混匀矿烧结性能改善。

### 参考文献

- [1] KOU M Y, ZHANG Z, ZENG W, *et al.* Research progress on optimization technology and its model of ore-blending for sinter process[J]. *Iron & Steel*, 2022, 57(2): 1-11.  
(寇明银, 张众, 曾旺, 等. 铁矿粉烧结优化配矿及其模型研究进展[J]. *钢铁*, 2022, 57(2): 1-11.)
- [2] SU Y C, SUN G P, JIN B T, *et al.* Influence of types and components of iron ore power on its sintering basic characteristics[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 26(2): 94-99.  
(苏永仓, 孙高鹏, 金炳彤, 等. 铁矿粉种类和成分对其烧结基础特性的影响[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2024, 26(2): 94-99.)
- [3] LIU S, ZHAO Y D, GAN L, *et al.* Discussion on intelligent manufacturing of sintering system and application of big data technology[J]. *Iron & Steel*, 2021, 56(10): 54-64.  
(刘颂, 赵亚迪, 甘丽, 等. 烧结系统智能制造与大数据技术应用探讨[J]. *钢铁*, 2021, 56(10): 54-64.)
- [4] HOU J, BAI C G, HU M L, *et al.* Optimization on ore-blending of PMC concentrate and two typical limonite ores[J]. *Iron & Steel*, 2023, 58(6): 45-52, 60.  
(侯健, 白晨光, 扈玫玫, 等. 南非 PMC 精粉与两种典型褐铁矿的配矿优化[J]. *钢铁*, 2023, 58(6): 45-52, 60.)
- [5] ZHOU M S, WANG Y D, ZHAO D M, *et al.* Development on sintering technologies with high proportion of magnetite concentrates[J]. *Iron & Steel*, 2020, 55(5): 1-9.  
(周明顺, 王义栋, 赵东明, 等. 高配比磁铁精矿烧结技术的研究进展[J]. *钢铁*, 2020, 55(5): 1-9.)
- [6] TANG J, WANG M Y, CHU M S, *et al.* Process of ore blending optimization in sintering at home and abroad[J]. *Iron & Steel*, 2024, 59(9): 102-113.  
(唐珏, 王茗玉, 储满生, 等. 国内外烧结优化配矿研究进展[J]. *钢铁*, 2024, 59(9): 102-113.)
- [7] FANG L, WANG P, SUN S S, *et al.* Practice of increasing proportion of non-primary ore and economic ore in sintering[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2024, 49(4): 26-32, 43.  
(方亮, 王平, 孙社生, 等. 烧结提高非主流矿与经济矿比例实践[J]. *烧结球团*, 2024, 49(4): 26-32, 43.)
- [8] MA Y F, LI Q, ZHANG J L, *et al.* Synergistic optimization model of sintering ore allocation cost and energy consumption based on PSO-VIKOR[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(11): 1868-1877.  
(马云飞, 李擎, 张建良, 等. 基于 PSO-VIKOR 的烧结配矿成本与能耗协同优化模型[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(11): 1868-1877.)
- [9] SUN C H. Research on optimization of iron ore blending and thermal strength of sinter based on high temperature basic characteristics of iron ore concentrate[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2022.  
(孙彩虹. 基于高温基础特性优化配矿及烧结矿热态强度研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2022.)
- [10] CHEN D F. Optimize blending and ore distribution to improve sinter quality[J]. *Metallurgy and materials*, 2022, 14(1): 9-10.  
(陈东峰. 优化混匀配矿提高烧结矿质量[J]. *冶金与材料*, 2022, 14(1): 9-10.)
- [11] ZHANG W H, LIU H L, SHEN H L, *et al.* Optimization of sinter ore blending and coping practice of blast furnace[J]. *Metal World*, 2022, (1): 45-49.  
(张卫华, 刘怀路, 沈洪流, 等. 烧结配矿优化及高炉生产应对实践[J]. *金属世界*, 2022, (1): 45-49.)
- [12] REN Q, WANG Y C, LUO G P, *et al.* Experimental study on basic sintering characteristics and optimum ore blending

- scheme of iron ore powder[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(2): 26-30.  
(任强, 王艺慈, 罗果萍, 等. 铁矿粉的烧结基础特性及最佳配矿试验研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(2): 26-30.)
- [ 13 ] CAO Y, WU S, HAN H, *et al.* Mixed state and high effective utilization of pilbara blending iron ore powder[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(9): 1-5.
- [ 14 ] LÜ X F, HAN H L, WU S L. Research on ore-proportioning optimization technology in sintering[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 117: 980-983.
- [ 15 ] LI G D. Experimental study on sintering of FMG blend fines instead of yandi fines[J]. Heavy Machinery, 2024, (6): 60-63.  
(李国栋. FMG 混合粉替代 YD 矿粉的烧结试验研究[J]. 重型机械, 2024, (6): 60-63.)
- [ 16 ] WANG N, ZHAO W, LU K, *et al.* Research on ore blending using ukrainian refined powder as a substitute for some card powder[J]. Shanxi Metallurgy, 2025, 48(2): 19-22, 25.  
(王宁, 赵伟, 卢宽, 等. 乌克兰精粉替代部分卡粉的配矿研究[J]. 山西冶金, 2025, 48(2): 19-22, 25.)
- [ 17 ] ZHAO H B, JIANG X, HE L, *et al.* Low-cost sintering ore blending[J]. Hebei Metallurgy, 2025(1): 55-61.  
(赵鸿波, 姜鑫, 何亮, 等. 基于优质低成本的烧结配矿[J]. 河北冶金, 2025(1): 55-61.)
- [ 18 ] LI B, ZHOU H, HUAN J, *et al.* Optimization of iron ore blending based on replacing Australian low alumina limonite[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30(9): 1675-1686.
- [ 19 ] FANG Y H, NIU C S, WANG J Y, *et al.* Research on sintering and blending of new varieties of ores based on high temperature characteristics to replace deteriorated ore[J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(5): 35-42. )  
(方叶晗, 牛长胜, 王纪元, 等. 基于高温特性的新品种矿替代劣化矿烧结配矿研究[J]. 烧结球团, 2025, 50(5): 35-42.)
- [ 20 ] WU S L, SU B, QI Y H, *et al.* Major melt formation characteristic factor analysis of iron ore liquid phase fluidity during the sintering process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(3): 321-329. )  
(吴胜利, 苏博, 齐渊洪, 等. 铁矿粉液相流动性的主要液相生成特征因素解析[J]. 工程科学学报, 2018, 40(3): 321-329.)
- [ 21 ] YAN L J, WU S L, YOU Y, *et al.* Assimilation of iron ores and orematching method based on complementary assimilation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(3): 298-305.  
(阎丽娟, 吴胜利, 尤艺, 等. 各种铁矿粉的同化性及其互补配矿方法[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(3): 298-305.)
- [ 22 ] LI J C, YIN F Y, LI F M, *et al.* Sintering basic characteristics of blending iron ore[J]. Iron and Steel, 2013, 48(5): 7-10, 40.  
(李建朝, 伊凤永, 李福民, 等. 混合铁矿粉的烧结基础特性[J]. 钢铁, 2013, 48(5): 7-10, 40.)
- [ 23 ] WU S L, DU J X, MA H B, *et al.* Self-intensity of binding phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005(2): 169-172.  
(吴胜利, 杜建新, 马洪斌, 等. 铁矿粉烧结粘结相自身强度特性[J]. 北京科技大学学报, 2005(2): 169-172.)
- [ 24 ] LI H X, WU S L, LI Q. Experimental study on iron ore sintering basic characteristics of Yangdi[J]. Shandong Metallurgy, 2007(1): 30-32.  
(李海霞, 吴胜利, 李强. 扬迪矿烧结基础特性的试验研究[J]. 山东冶金, 2007(1): 30-32.)
- [ 25 ] WARE N, MANUEL J. Fundamental nucleus assimilation behaviour of haematite and goethite containing ores in iron ore sintering[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2016, 125(3): 149-155.
- [ 26 ] LÜ X, BAI C, DENG Q, *et al.* Behavior of liquid phase formation during iron ores sintering[J]. ISIJ international, 2011, 51(5): 722-727.
- [ 27 ] DING X. Study of the mechanism on formation of calcium ferrite in the  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$  system[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.  
(丁祥.  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$  系铁酸钙 (SFC) 生成机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.)