

基于高温特性的新品种矿替代劣化矿烧结配矿研究

方叶晗¹, 牛长胜², 王纪元², 司云鹏¹, 曾 旺¹, 周 恒¹, 寇明银¹

(1. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083;

2. 宝山钢铁股份有限公司 制造部, 上海 201900)

摘要: 本文针对国内某钢铁企业实际烧结生产配矿结构中的中硅低铝赤铁矿粉(OI)无成球性导致烧结透气性变差以及高硅中铝赤铁矿粉(OD)即将枯竭的问题,以3种新品种铁矿粉(OA、OB、OC)为对象,研究其替代方案。首先分析了其化学成分、粒度特征等常温特性;其次明晰了其高温特性与OD和OI铁矿粉的区别,建立了铁矿粉高温特性与基础理化性质的关联关系;最后依据微型烧结试验结果指导烧结杯试验设计,以烧结杯试验为依据考察不同比例新品种矿替代OD和OI铁矿粉后烧结矿产质量的变化。研究表明,以新品种矿替代OD和OI铁矿粉具有可行性。替代OD矿时,采用“OC-OD”的“一对一”配矿方案,烧结矿成品率可保持在75.67%、转鼓指数达70.65%,垂直烧结速度提升至25.93 mm/min,固体燃料消耗仅较基准组增加0.52 kg/t,产量与质量均维持在较好水平;替代OI矿时,采用“OA+OC-OI”的“二对一”配矿方案,相较于基准组,垂直烧结速度提升1.01 mm/min,利用系数提高至1.31 t/(m²·h),固体燃料消耗控制在53.91 kg/t的较低水平,同时成品质率达75.05%、转鼓指数达70.67%,烧结杯综合指标显著优化。

关键词: 配矿结构; 透气性; 烧结; 高温特性; 烧结杯

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0035-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.076

Research on sintering and blending of new varieties of ores based on high temperature characteristics to replace deteriorated ore

FANG Yehan¹, NIU Changsheng², WANG Jiyuan², SI Yunpeng¹, ZENG Wang¹,

ZHOU Heng¹, KOU Mingyin¹

(1. National Key Laboratory of Green and Low-Carbon Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Manufacturing Department, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: In this paper, aiming at the problem that the sintering air permeability of medium silicon low aluminum hematite concentrate powder (OI) in the actual sintering production ore blending structure of a domestic iron and steel enterprise is not spherical, resulting in poor sintering air permeability and the imminent depletion of high silicon medium aluminum hematite powder (OD), three new varieties of iron ore powder (OA, OB, OC) are taken as the object to study their alternatives. Firstly, its chemical composition, particle size characteristics and other room temperature characteristics are analyzed. Secondly, the difference between its high temperature characteristics and OD & OI iron ore powder is clarified, and the correlation between the high temperature characteristics of iron ore powder and the basic physical and chemical properties is established. Finally, the sinter pot test design is guided according to the results of the micro-sintering test, and based on the results of the sinter pot test to investigate the changes of the output and quality of sinter after replacing

收稿日期: 2025-03-11; **修回日期:** 2025-07-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902404); 国家自然科学基金资助项目(51804027)

作者简介: 方叶晗(1998—),女,硕士,从事炼铁、烧结方面的研究。

通信作者: 寇明银(1988—),男,博士,教授,从事低碳炼铁、智能炼铁、氢冶金等方面的工作。

OD & OI iron ore powder with different proportions of new varieties of ore. The results show that it is feasible to replace OD and OI iron ore powder with new varieties of ore. When replacing OD ore, the “one-to-one” ore blending scheme of “OC - OD” is adopted, the yield of sinter could be maintained at 75.67%, the drum index is 70.65%, the vertical sintering speed is increased to 25.93 mm/min, and the solid fuel consumption is only increased by 0.52 kg/t compared with the reference group, and the yield and quality are maintained at a good level. Compared with the reference group, the vertical sintering speed is increased by 1.01 mm/min, the utilization coefficient is increased to 1.31 t/(m²·h), the solid fuel consumption is controlled at a low level of 53.91 kg/t, the yield rate is 75.05%, the drum index is 70.67%, and the comprehensive index of the sinter pot is significantly optimized.

Key words: ore blending structure; air permeability; sintering; high temperature characteristics; sinter pot

随着中国钢铁工业的快速发展,对优质铁矿粉的需求持续攀升。然而,现有矿粉质量日益下降及产量不足已成为钢铁行业发展的瓶颈^[1-2]。在宝山钢铁厂现有配矿结构中,中硅低铝赤铁精矿粉(OI)无成球性(成球性指数 $K < 0.2$)且黏附粉颗粒较多,导致烧结透气性变差,影响烧结效率和烧结矿质量^[3];高硅中铝赤铁矿粉(OD)于2021年供应量开始大幅减少,直至面临枯竭。因此,为应对铁矿粉质量劣化及供应量减少的问题,需进行新品种矿的性能研究,评估其替代现有铁矿粉后烧结矿质量,为扩展企业用矿并改善烧结矿产质量提供重要的理论和技术支持。

铁矿粉特性包括常温与高温特性,基于铁矿粉常温特性的烧结配矿研究主要考虑矿粉成分、粒度分布、矿物组成、有害元素及气孔率等指标^[4-7]。在铁矿粉成分方面,QIAN等^[8]发现低SiO₂质量分数(SiO₂ < 3%)会促进低熔点共晶化合物的生成,降低铁矿粉的最低同化性温度。WU等^[9]研究发现低Al₂O₃质量分数(Al₂O₃ < 1.5%)促进铁矿石与CaO的反应,更易形成低熔点共晶化合物和复合铁酸钙。XIAO等^[10]研究发现SiO₂的加入显著提高了烧结矿中液相的数量和流动性,Al₂O₃有较小的促进作用,而MgO则有抑制作用。铁矿粉粒度搭配对烧结矿质量也有明显影响,较大粒度铁矿粉比例增加,小粒度矿粉比例减小,使得料层透气性变好,烧结矿转鼓指数提高,烧结矿低温还原粉化性能提升^[11]。最低同化性温度、液相流动特性、黏结相自身强度、铁酸钙生成性能等作为表征铁矿粉高温特性的指标,明确了铁矿石在烧结过程中生成液相的难易程度、黏结相的有效黏结范围、液相对核矿石进行固结的能力等,现已成为指导烧结优化配矿的重要理论依据^[12-16]。罗

尧升等^[17]对SP10矿粉进行了烧结优化配矿试验研究,针对矿粉进行常温、高温特性研究及烧结杯试验,获得了SP10替代现有矿粉的可行性及最佳配比。滚思皓等^[18]经同化性温度和液相流动性试验预测澳PMI粉是否满足烧结矿粉要求,并对其进行工业外配试验,得到外配比例为8%时技术指标相对较好。任强等^[19]针对高硅蛇纹石停配而导致的烧结矿产质量下降问题,采用微型烧结法和烧结杯对白云石替代蛇纹石后的适宜配矿结构进行了研究,得到蛇纹石被白云石替换后烧结高温性能下降,经在混匀矿中使用流动性高的铁矿粉替代流动性低的铁矿粉后,可以提高烧结矿产质量。田铁磊等^[20]、赵勇等^[21]、寇明银等^[22]、郑瑞^[23]结合铁矿粉高温特性试验和烧结杯试验,得到烧结基础特性能够指导烧结优化配矿。

本文在某钢铁企业实际烧结生产配矿结构的基础上,首先对3种“新品种矿”及9种“常用富矿”的化学成分、粒度特征等常温特性进行研究,为解析其烧结行为特征提供技术依据;其次采用微型烧结法研究上述铁矿粉的烧结高温特性,为新品种铁矿粉替代OD和OI铁矿粉提供方向;最后使得烧结矿在保持成分稳定的前提下,形成烧结配矿技术方案,得到最优的配矿结构。

1 铁矿粉理化特性

1.1 化学成分

本文以3种新品种铁矿粉(OA、OB、OC)和9种该厂常用铁矿粉为原料,原料主要化学成分及烧损如表1所示。表1中,OA为中硅低铝磁铁矿,OB和OC为高硅中铝赤铁矿。OD~OL为该钢厂常用铁矿粉。由表1可知,拟替代铁矿粉OD的 $w(\text{TFe})$ 中等, $w(\text{SiO}_2)$ 高于6%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 介于

1%~2%,属高硅中铝赤铁矿;OI铁矿粉 $w(\text{TFe})$ 高于66.5%, $w(\text{SiO}_2)$ 介于4%~6%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 低于1%,属中硅低铝赤铁矿。其余铁矿粉中,铁矿粉OG为赤铁矿,OJ、OK、OL为半褐铁矿,OE、OF、OH为褐铁矿。在该钢厂现行配矿结构中,OD与OI分别作为关键矿种,其替代需兼顾成分稳定与高温行为适配性,后续将重点围绕新品种矿与目标矿种的常温-高温特性匹配展开研究。

表1 铁矿粉主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and losses on

名称	TFe	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	烧损	%
OA	67.01	24.28	0.30	0.35	5.39	0.38	-1.33	
OB	59.47	2.81	0.62	0.25	9.89	1.18	2.60	
OC	61.28	1.53	0.12	0.14	7.97	1.12	1.90	
OD	61.63	1.65	0.66	0.34	7.94	1.13	1.96	
OE	58.49	0.90	0.30	0.12	5.01	1.58	10.45	
OF	54.37	0.65	1.11	0.30	7.60	1.93	11.24	
OG	65.19	0.94	0.20	0.14	1.71	1.25	2.91	
OH	58.28	0.26	0.18	0.11	5.49	2.50	7.57	
OI	66.59	7.52	0.57	0.45	4.28	0.46	-0.43	
OJ	60.03	0.51	0.26	0.10	4.37	2.26	6.44	
OK	60.45	0.55	0.23	2.37	4.15	2.37	6.67	
OL	62.71	0.85	0.42	0.17	3.48	1.11	4.91	

1.2 粒度组成

各铁矿粉的粒度组成如表2所示。由表2可知,铁矿粉分为三类:一是粒度大于1mm的核颗粒,二是粒度小于0.25mm的黏附粉颗粒,三是粒度在0.25~1mm之间的中间粒子,该部分颗粒比例较高时不利于烧结制粒过程,会加剧烧结料偏析从而破坏料层透气性。拟替代铁矿粉OD的

表2 各铁矿粉的粒度组成(质量分数)

Table 2 Size distribution of iron ores

铁矿粉	核颗粒 (>1 mm)	中间颗粒 (0.25 ~ 1 mm)	黏附粉 (<0.25 mm)	平均粒径/mm	成球性指数
OA	7.69	2.60	89.71	0.37	0.987
OB	45.52	11.19	43.29	2.40	0.516
OC	31.08	21.12	47.80	1.50	0.432
OD	35.32	12.07	52.62	1.61	0.579
OI	0.17	12.56	87.27	0.33	0.052

平均粒径为1.61mm,黏附粉比例较高;铁矿粉OI的平均粒径为0.33mm,黏附粉比例高达87.27%,但其铁矿粉颗粒呈片状,经压滤法和毛细吸水法测得其成球性指数 $K < 0.2$,属于无成球性铁矿粉。OA与OI铁矿粉粒度组成规律相同,小于0.25mm的铁矿粉比例达85%以上,经试验测得其成球性指数为0.987,属于优等成球性铁矿粉。OB、OC铁矿粉粒度组成与OD铁矿粉规律相同,且皆属于中等成球性铁矿粉。

1.3 气孔率

本研究针对常温条件下和在500℃焙烧30min后的铁矿粉,采用气体吸附法进行脱除结晶水前后气孔率测定,试验结果如表3所示。

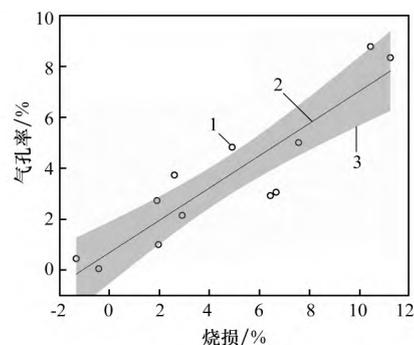
表3 各铁矿粉脱除结晶水前后气孔率测定结果

(体积分数)

Table 3 Porosity determination results of each

气孔率	OA	OB	OC	OD	OE	OF	%
脱水前气孔率	0.418	1.954	3.877	0.616	8.389	9.493	
脱水后气孔率	0.439	3.729	2.723	0.994	8.788	8.354	
气孔率	OG	OH	OI	OJ	OK	OL	
脱水前气孔率	4.108	4.458	0.049	4.804	8.735	4.788	
脱水后气孔率	2.142	5.010	0.041	2.921	3.055	4.824	

铁矿粉由于成因不同,气孔率差异较大,从而对其在烧结过程中的行为产生影响。图1显示了铁矿粉烧损对脱除结晶水后气孔率的影响。由图1可知,随着铁矿粉烧损的增加,脱除结晶水后气孔率有上升的趋势。这是因为在热处理过程中,结晶水脱除后留下了大量的孔洞,增加了铁



1—气孔率; 2—线性拟合结果; 3—置信带。

图1 结晶水脱除后各铁矿粉的气孔率与烧损的关系

Fig. 1 Relationship between porosity and losses on ignition of each iron ore

矿粉的气孔率,并且结晶水含量越高,气孔率的增幅越大。整体而言,褐铁矿由于质地疏松,气孔率较高,而赤铁矿质地紧密,气孔率较低。铁矿粉 OA 和 OI 由于较低的烧损,气孔率较低。铁矿粉 OB、OC 和 OD 铁矿粉脱除结晶水后气孔率大小顺序为: $OB > OC > OD$ 。整体而言,铁矿粉气孔率与烧损呈正相关,即随着铁矿粉烧损的增加,气孔率呈上升趋势。

2 新品种矿高温特性

2.1 同化性

同化性是指铁矿粉与 CaO 反应生成一定液相的能力,其采用最低同化温度表征铁矿粉在烧结过程中生成黏结相的难易程度^[24]。不同铁矿粉的最低同化温度结果如表 4 所示。由表 4 可知,新品种矿中铁矿粉 OA 的同化温度最高,OB 的同化温度最低,OC 介于二者之间。

表 4 各铁矿粉的最低同化温度

Table 4 Minimum assimilation temperature of iron ores

铁矿粉	OA	OB	OC	OD	OE	OF
同化温度	1 303	1 230	1 243	1 280	1 200	1 210
铁矿粉	OG	OH	OI	OJ	OK	OL
同化温度	1 250	1 214	1 290	1 205	1 207	1 215

影响铁矿粉同化特性温度的主要因素有铁矿粉致密程度、结晶水含量以及脉石成分等。一般而言,结构疏松的铁矿粉与 CaO 反应生成液相的能力较强,这是因为其与 CaO 反动力学条件较好,如图 2 所示。随着铁矿粉脱水后气孔率增加,最

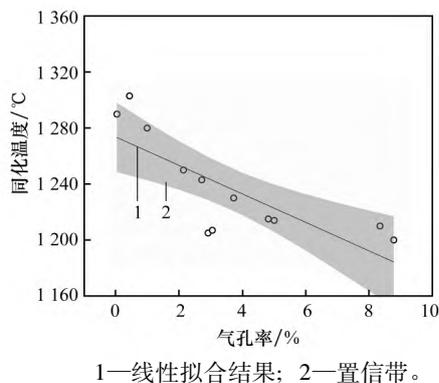


图 2 铁矿粉脱水后气孔率对其最低同化温度的影响

Fig. 2 Influence of porosity on the minimum assimilation temperature

低同化温度逐渐降低,整体呈现赤铁矿最高,半褐铁矿次之,褐铁矿最低的规律。在高温条件下结晶水逸出使得铁矿粉的气孔率增加,矿粉比表面积增大,从而增加了铁矿粉与 CaO 的接触面积,改善了反应动力学条件,降低了同化反应的温度。另外,试验得到 OA 铁矿粉的同化温度高达 1 303 °C,这是因为其中含有较高含量的 Fe_3O_4 ,而 Fe_3O_4 几乎不与 CaO 发生固相反应,减弱了 OA 铁矿粉生成液相的能力,提高了同化温度^[25]。

2.2 液相流动性

液相流动性是指铁矿粉与 CaO 反应生成液相的流动能力,用液相流动特性指数表征铁矿粉在烧结过程中生成黏结相的有效黏结范围^[26]。本研究在 1 300 °C、外配 15% CaO 的条件下,测定了各铁矿粉的液相流动性指数,如表 5 所示。

表 5 各铁矿粉的液相流动性指数

Table 5 Liquid phase fluidity index of iron ores

OA	OB	OC	OD	OE	OF
0.78	0.98	1.26	1.50	1.62	1.51
OG	OH	OI	OJ	OK	OL
2.98	1.13	1.82	1.53	0.98	1.75

由表 5 可知,3 种新品种矿的液相流动性较低。其中,OA 铁矿粉的液相流动性较低是因为 Fe_3O_4 几乎不与 CaO 发生固相反应从而限制了液相的生成。OB 和 OC 铁矿粉的液相流动性相较常用赤铁矿较低,这与铁矿粉含有较高的 SiO_2 相关。由图 3 可知,随着铁矿粉 SiO_2 含量的增加,液相流动性逐渐降低。分析原因认为,随着铁矿粉 SiO_2 含量的升高,黏附粉偏析碱度降低,易与 CaO 反应生

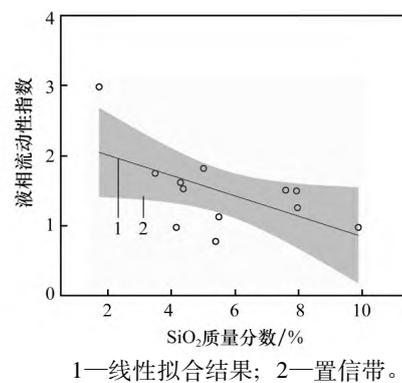


图 3 铁矿粉 SiO_2 质量分数对其液相流动性的影响

Fig. 3 Influence of SiO_2 mass fraction on the liquid phase fluidity

成高熔点的硅酸盐化合物,致使液相流动性降低。

3 烧结杯试验

为了解 OA、OB 和 OC 铁矿粉替代 OD 和 OI 铁矿粉后的烧结性能,以原配矿结构为基准,在保证混匀矿 SiO₂ 含量基本保持不变的条件下,通过烧结杯中试验考察分别以 OA、OB、OC 铁矿粉为主,“一对一”、“二对一”、“三对一”分别替代 OD 和 OI 铁矿粉后烧结矿产质量指标的变化规律。

试验采用 $\varnothing 234$ mm 烧结杯,烧结工艺参数:料层高度为 700 mm,铺底料为 2.0 kg,装料总量为 42 kg 左右,点火时间为 120 s,点火负压为 8 kPa,烧结负压为 10 kPa,烧结后在 5 kPa 的负压下冷却 5 min。

3.1 “一对一”替代

试验配加新品种矿 OA、OB 和 OC “一对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉,烧结杯试验矿粉配比方案及结果分别如表 6、7 所示。

表 6 “一对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉混匀矿配矿方案(质量分数)

方案	OA	OB	OC	OD	OI	杂辅料
基准	0	0	0	9	7	6
OA - OI	7	0	0	9	0	6
OB - OD	0	9	0	0	7	6
OC - OD	0	0	9	0	7	6

表 7 “一对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉烧结杯试验结果

方案	垂直烧结速度 / (mm·min ⁻¹)	成品率 / %	转鼓指数 / %	利用系数 / (t·m ⁻² ·h ⁻¹)	固体燃料消耗 / (kg·t ⁻¹)
基准	25.75	76.91	70.73	1.27	53.40
OA - OI	27.80	73.94	70.33	1.32	55.51
OB - OD	25.83	73.27	70.20	1.24	54.66
OC - OD	25.93	75.67	70.65	1.26	53.92

由表 7 可知,从烧结速度来看,新矿粉替代 OD 和 OI 铁矿粉后的垂直烧结速度都有不同程度的提升,其中 OA - OI 方案影响最大,垂直烧结速度较基准提高 2.05 mm/min; 成品率和转鼓指

数方面,新品种矿替代 OD 粉和 OI 粉后皆有所降低; 对于利用系数,除 OA - OI 方案较基准有所提升外,其余方案皆较基准降低; OA - OI、OB - OD 和 OC - OD 方案较基准固体燃料消耗分别上升 2.11、1.26 kg/t 和 0.52 kg/t。

对于上述结果,新品种铁矿粉液相流动性较差,烧结过程中形成的铁酸钙相流动性减弱,使得料层高温区透气性好,垂直烧结速度增加。但由于液相发展不充分,液相黏附性较基准矿差,烧结成品率和转鼓指数有所降低。另一方面,OA 铁矿粉由于其同化性温度高,与 CaO 反应动力学条件较差,产生液相数量少,替换同化温度较低的铁矿粉 OI 后影响烧结矿质量。OB 铁矿粉由于其高烧损,替换 OD 铁矿粉后烧成率低于基准组,导致能耗指标上升^[27]。OC - OD 方案的烧结矿指标最佳,其垂直烧结速度较基准矿增加,成品率和转鼓指数较基准仅降低了 1.24% 和 0.08%, 固体燃料消耗处于较低水平,较基准仅增加了 0.52%。

3.2 “二对一”替代

试验配加 OA、OB 和 OC “二对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉,烧结杯试验矿粉配比方案及结果分别如表 8、9 所示。

表 8 “二对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉混匀矿配矿方案(质量分数)

方案	OA	OB	OC	OD	OI	杂辅料
基准	0	0	0	9	7	6
OA + OB - OI	5	2	0	9	0	6
OA + OC - OI	5	0	2	9	0	6
OA + OB - OD	4	5	0	0	7	6
OB + OC - OD	0	2	7	0	7	6
OA + OC - OD	2	0	7	0	7	6

由表 9 可知,OA + OC - OI 相比 OA + OB - OI 方案,其烧结杯质量指标均有了不同程度的优化,垂直烧结速度、成品率、转鼓指数、利用系数均提高,固体燃料消耗下降。这主要是因为铁矿粉 OC 的气孔率较 OB 高,在烧结过程中的传热、传质条件好,这既促进了垂直烧速度等指标的提升,又降低了燃料消耗。且其液相流动性高于 OB,在烧结过程中生成黏结相的有效黏结范围较大,部分散料得

表 9 “二对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉烧结杯试验结果

Table 9 Sintering pot test results of “Two to one” replacement of OD and OI

方案	垂直烧结速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/($\text{t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	固体燃料消耗/($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)
基准	25.75	76.91	70.73	1.27	53.40
OA + OB - OI	26.34	74.16	70.00	1.29	54.55
OA + OC - OI	26.76	75.05	70.67	1.31	53.91
OA + OB - OD	26.55	73.01	69.33	1.27	54.92
OB + OC - OD	25.99	75.36	70.17	1.25	54.37
OA + OC - OD	27.15	73.85	68.67	1.29	56.31

到有效黏结,从而提高烧结矿固结强度和成品率。

在替代 OD 铁矿粉试验中,OB + OC - OD 方案产质量指标较好,成品率、转鼓指数提高且固体燃料消耗较低。OA 铁矿粉减少,使得混合料同化性温度阈值降低,产生液相数量增多,替换同化温度较高的铁矿粉 OD 后烧结矿质量有所提升。但由于 OC 铁矿粉中间颗粒占比较高,这部分铁矿粉既不能充当核颗粒促进铁矿粉成球性能增加,又不宜作为黏附粉,在烧结制粒过程中使得铁矿粉粘附率下降,降低烧结料层的透气性,使得垂直烧结速度降低。

3.3 “三对一”替代

试验配加 OA、OB 和 OC “三对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉,烧结杯试验矿粉配比方案及结果分别如表 10、11 所示。编号 A 表示三种新品种矿以不同比例替代 OI 矿,编号 B 表示三种新品种矿以不同比例替代 OD 矿。

表 10 “三对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉混匀矿配矿方案
(质量分数)

Table 10 “Three to one” replacement of OD and OI
mixing ore blending scheme %

方案	OA	OB	OC	OD	OI	杂辅料
基准	0	0	0	9	7	6
A - 1	5	0.5	1.5	9	0	6
A - 2	5	1.0	1.0	9	0	6
A - 3	5	1.5	0.5	9	0	6
B - 1	1	1.0	7.0	0	7	6
B - 2	2	2.5	4.5	0	7	6
B - 3	3	4.0	2.0	0	7	6

由表 11 可知,垂直烧结速度较基准方案均有所增加,且随着铁矿粉 OA 占比的增加呈现递增趋势,这归因于铁矿粉 OA 具有优良成球性,增

表 11 “三对一”替代 OD 和 OI 铁矿粉烧结杯试验结果

Table 11 Sintering pot test results of “Three to one” replacement of OD and OI

方案	垂直烧结速度/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	固体燃料消耗/ ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)
基准	25.75	76.91	70.73	1.27	53.40
A - 1	26.65	74.61	70.50	1.31	53.66
A - 2	26.57	74.50	70.47	1.30	53.92
A - 3	26.10	74.95	70.40	1.28	53.57
B - 1	26.04	74.46	70.33	1.29	53.92
B - 2	26.48	73.95	70.17	1.26	54.55
B - 3	26.77	74.17	70.00	1.29	55.93

强了混合料颗粒间的黏附力,使得 3 ~ 8 mm 粒级准颗粒比例增加,优化了料层孔隙结构并改善气流分布。利用系数与固体燃耗较基准增加,这是由于 OA 的增加使得混合料与 CaO 反应能力减弱,需要在更高的温度下形成烧结混合料的有效黏结。转鼓指数较基准降低,这是由于磁铁矿 OA 在烧结过程中生成 FeO 含量相对较高的液相,其流动性较大,容易形成薄壁大孔结构的烧结矿。就成品率而言,随着 OB 配入比例提高,A 组和 B 组方案均出现了先降低后升高的趋势。分析原因为铁矿粉 OB 同化性温度较低,配入比例提高使得混匀矿与 CaO 的反应能力增强,烧结过程中液相生成量增多,恶化了烧结料层的热态透气性;随着铁矿粉 OB 的进一步增加,烧结混合料中 SiO_2 含量升高,烧结时能够获得更多的液相,使得烧结成品率有所提高。

综合以上指标结果,使用铁矿粉 OA 进行全替代 OI 时,垂直烧结速度有较大的提升,但成品率较低,固体燃料消耗较高,搭配一定比例的 OC

铁矿粉使得烧结杯指标有所优化;替代 OD 铁矿粉时,使用较高比例的 OC 铁矿粉进行替代,可以较大程度优化烧结杯质量指标。

4 结 论

(1) 铁矿粉同化特性与液相流动性分别与铁矿粉脱水后气孔率和 SiO_2 含量呈负相关。气孔率的提升增加了铁矿粉与 CaO 的接触面积,从而改善反应动力学条件,降低同化温度。铁矿粉 SiO_2 含量的升高,降低了黏附粉偏析碱度,使其易与 CaO 反应生成高熔点的硅酸盐化合物,从而液相流动性降低。但磁铁矿中 Fe_3O_4 几乎不与 CaO 发生固相反应,使得铁矿粉 OA 的同化温度较高,液相流动性较低。

(2) 铁矿粉 OA 虽然成球性优异,但受限于其较高的同化温度及低液相流动性,单独替代铁矿粉 OI 时垂直烧结速度虽增加,但成品率下降 2.97%。搭配铁矿粉 OC 后(OA + OC - OI),成品率和转鼓指数分别提升 1.11% 和 0.34%,固体燃料消耗下降 1.6 kg/t。

(3) 结合高温特性与烧结杯试验,铁矿粉 OC 可有效替代铁矿粉 OD,且使用较高比例的铁矿粉 OC 进行替代时,可以较大程度优化烧结杯质量指标。替代后烧结矿成品率保持在 75.67%,固体燃料消耗仅增加 0.52 kg/t。

参考文献:

- [1] 罗尧升,陈绍国,石江山,等.京唐烧结配矿结构优化及生产实践[J].山西冶金,2024,47(3):14-16.
LUO Yaosheng, CHEN Shaoguo, SHI Jiangjing, et al. Optimization of the sintering ore blending structure and production practices in Jingtang [J]. Shanxi Metallurgy, 2024,47(3):14-16.
- [2] 陈亮亮,刘养洁.世界铁矿资源分布对我国钢铁工业发展的影响[J].经济研究导刊,2010(5):35-37.
CHEN Liangliang, LIU Yangjie. The distribution of the world's iron ore resources of the impact of the development of China's iron and steel industry [J]. Economic Research Guide, 2010(5):35-37.
- [3] 傅菊英.含铁矿物成球性指数 K 的研究[J].烧结球团,1992(4):4-7.
FU Juying. Study on the index K of iron-bearing mineral sphericity [J]. Sintering and Pelletizing, 1992(4):4-7.
- [4] 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.
FANG Liang, WANG Ping, SUN Shesheng, et al. Practice of increasing proportion of non-primary ore and economic ore in sintering [J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(4):26-32.
- [5] 李彬,张宗旺,吴胜利,等.不同铁矿粉替代澳洲低铝矿粉对烧结黏结相高温行为的影响[J].中国冶金,2021,31(12):8-14.
LI Bin, ZHANG Zongwang, WU Shengli, et al. Effect of different iron ore replaced Australian low aluminum ore powder on high temperature behavior of sintered binder phase [J]. China Metallurgy, 2021, 31(12):8-14.
- [6] 狄明军,王雪超.低品质烧结铁料配矿优化实践[J].新疆钢铁,2021(1):12-15.
DI Mingjun, WANG Xuechao. Optimization practice of sinter blending with low quality iron [J]. Xinjiang Iron and Steel, 2021(1):12-15.
- [7] 张建良,刘东辉,刘征建,等.比表面积对钒钛磁铁矿粉烧结制粒的影响[J].钢铁钒钛,2017,38(6):91-97.
ZHANG Jianliang, LIU Donghui, LIU Zhengjian, et al. Effects of specific surface area on granulation behavior of vanadium titano-magnetite concentrate [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(6):91-97.
- [8] QIAN L, ZHANG Y, LONG Q. Effect of gangue composition on assimilation characteristic of iron ore in the sintering process [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2020, 47(9):973.
- [9] WU S, ZHANG G, CHEN S, et al. Influencing factors and effects of assimilation characteristic of iron ores in sintering process [J]. ISIJ International, 2014, 54(3):582.
- [10] XIAO Z, CHEN L, YANG Y, et al. Effect of coarse-grain and low-grade iron ores on sinter properties [J]. ISIJ International, 2017, 57(5):795.
- [11] LI B, ZHOU H, Huang 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.
- [12] 吴胜利,刘宇,杜建新,等.铁矿石的烧结基础特性之新概念[J].北京科技大学学报,2002,24(3):254.
WU Shengli, LIU Yu, DU Jianxin, et al. New concept of basic sintering characteristics of iron ore [J]. Chinese Journal of Engineering, 2002, 24(3):254.

- [13] 单长冬,张建良,刘征建,等. 铁矿粉烧结基础特性之同化性研究进展[J]. 中国冶金,2022,32(12):1.
SHAN Changdong, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Research progress on assimilation property in basic sintering characteristics of iron ore powder[J]. China Metallurgy,2022,32(12):1.
- [14] 胡鹏,唐文博,黄楚,等. 攀钢铁矿粉高温性能及优化配矿研究[J]. 钢铁钒钛,2022,43(3):118.
HU Peng, TANG Wenbo, HUANG Chu, et al. Study on high temperature properties and optimal ore blending of Pangang iron ore powder[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2022,43(3):118.
- [15] 李鹏飞,唐舒扬,郭亮,等. 铁精粉烧结特性优化配矿研究与生产实践[J]. 烧结球团,2021,46(5):15.
LI Pengfei, TANG Shuyang, GUO Liang, et al. Research and production practice on optimization of ore proportioning according to the sintering characteristics of iron powder[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):15.
- [16] 马辉,秦华伟. 铁矿石同化性能试验研究与配矿优化[J]. 烧结球团,2022,47(5):13-19.
MA Hui, QIN Huawei. Experimental research on assimilation performance of iron ore and ore matching optimization[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(5):13-19.
- [17] 罗尧升,张亚鹏,潘文,等. 配加 SP10 粉的烧结试验与生产实践[J]. 河北冶金,2023(11):52-56.
LUO Yaosheng, ZHANG Yapeng, PAN Wen, et al. Experimental research and production practice of sintering with SP10 powder[J]. Hebei Metallurgy,2023(11):52-56.
- [18] 滚思皓,毛世松,朱梦飞,等. 澳 PMI 粉烧结特性和配矿研究[J]. 金属材料与冶金工程,2023,51(3):37-42.
GUN Sihao, MAO Shisong, ZHU Mengfei, et al. Study on sintering characteristics and ore blending of Australian PMI powder[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering,2023,51(3):37-42.
- [19] 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.
REN Qiang, WANG Yici, LUO Guoqing, 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.
- [20] 田铁磊,刘金涛,董复明. 国外铁矿粉烧结基础特性及优化配矿研究[J]. 山西冶金,2020,43(2):41-43.
TIAN Tielei, LIU Jintao, DONG Fuming. Study on sintering basic characteristics of imported iron ore powder and optimum proportioning ores[J]. Shanxi Metallurgy,2020,43(2):41-43.
- [21] 赵勇,吴铿,申威,等. 基于烧结基础特性的新评价方法指导烧结配矿[J]. 钢铁,2015,50(9):23-27.
ZHAO Yong, WU Keng, SHEN Wei, et al. Guiding sintering ore matching based on a new evaluation method about sintering basic characteristics[J]. Iron and Steel,2015,50(9):23-27.
- [22] 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.
KOU Mingyin, ZHANG Zhong, ZENG Wang, et al. Research progress on optimization technology and its model of ore-blending for sinter process[J]. Iron and Steel,2022,57(2):1-11.
- [23] 郑瑞. 基于铁矿粉的高温性能特征数指导烧结配矿应用研究[J]. 中国金属通报,2019(4):270-272.
ZHENG Rui. Research on the application of sintering ore blending based on the high temperature performance characteristic number of iron ore powder[J]. China Metal Bulletin,2019,(4):270-272.
- [24] 胡容,刘树林,金龙. 酒钢本部铁矿粉烧结基础性能试验研究[J]. 甘肃冶金,2024,46(5):31-34.
HU Rong, LIU Shulin, JIN Long. Experimental study on the basic performance of iron ore powder sintering at Jiugang headquarter[J]. Gansu Metallurgy,2024,46(5):31-34.
- [25] 阎丽娟,吴胜利. 一种巴西低铝粉矿在宝钢的试验研究[J]. 宝钢技术,2020(2):6-11.
YAN Lijuan, WU Shengli. Study on sinter feed low alumina of Brazil in Baosteel[J]. Baosteel Technology,2020(2):6-11.
- [26] 亢庆锋,张建良,刘征建,等. 烧结熔剂的同化行为试验[J]. 中国冶金,2017,27(9):9-12.
KANG Qingfeng, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Assimilation behavior experiment of sinter fluxes[J]. China Metallurgy,2017,27(9):9-12.
- [27] 毛世松,朱梦飞,刘杰,等. 老挝粉烧结特性和配矿实验研究[J]. 矿业工程,2024,22(2):55-58.
MAO Shisong, ZHU Mengfei, LIU Jie, et al. Experimental study of sintering characteristics and ore blending of Laos' ore powder[J]. Mining Engineering,2024,22(2):55-58.