杨迪矿替代巴西矿对烧结过程的影响机理

雷仕江[1]，杜 东[1]，蔡 源[2]，聂 礼[1]，郝好稳[2]，高德喜[2]，易凌云[2]，李光辉[2]

（1. 首钢水城钢铁（集团）有限公司，贵州 六盘水 553028；
2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：杨迪矿和巴西矿为国内钢铁企业大规模使用的进口矿种。为降低铁前生产成本，在烧结生产中提高廉价的杨迪矿配比已成为各大钢铁企业关注的焦点。本文基于某钢铁公司的原料条件，通过烧结杯试验系统研究杨迪矿替代巴西矿对混匀料性质和烧结过程产、质量指标的影响。结果表明：杨迪矿替代巴西矿后，烧结混合料的平均粒度减小、透气性指数略有降低，该矿替代巴西矿烧结的最佳配比为 23.81%，所得烧结矿的成品率为 72.03%，转鼓强度为 67.07%，固体燃料消耗为 69.56 kg/t；相较于基准配矿方案，转鼓强度和成品率分别提高 3.31% 和 0.40%。烧结矿微观结构和物相分析显示：适当的杨迪矿替代比（≤23.81%）会改善黏结相侵入烧结矿孔隙中与铁矿颗粒的胶结状态，提高烧结矿强度；过高的替代比（>23.81%），会使得混合料中黏附粉的含量减少、料层温度降低，导致黏结相含量不足，烧结矿强度下降。

关键词：杨迪矿；巴西矿；配矿替代；液相生成量；矿相结构

中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）02－0001－07

doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.017

Influence mechanism of Yandicoogina substitution of Brazilian ore on sintering process

LEI Shijiang[1], DU Dong[1], CAI Yuan[2], NIE Li[1], HAO Haowen[2], GAO Dexi[2], YI Lingyun[2], LI Guanghui[2]

(1. Shougang Shuicheng Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Liupanshui 553028, Guizhou, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Yandicoogina and Brazilian ore are imported minerals used on a large scale by domestic iron and steel enterprises. In order to reduce the production cost before iron, increasing the proportion of cheap Yandicoogina in sintering production has become the focus of attention of major iron and steel enterprises. Based on the raw material conditions of an iron and steel company, the effect of Yandicoogina substitution of Brazilian ore on mixture properties and yield and quality indexes of sintering process is studied by sinter pot test system. The results show that, after the replacement of Brazilian ore by Yandicoogina, the medium grain size of the sintered mixture decreases and the air permeability index decreases slightly, and the best proportion of the ore to replace the sintering of Brazilian ore is 23.81%, the yield of the resulting sinter is 72.03%, the drum strength is 67.07%, and the solid fuel consumption is 69.56 kg/t. Compared with the benchmark ore blending scheme, the drum strength and yield are increased by 3.31% and 0.40%, respectively. The microstructure and phase analysis of sinter show that the appropriate substitution of Yandicoogina (≤23.81%) will improve the cementation

收稿日期：2022－12－06；**修回日期**：2022－12－28

基金项目：湖南省自然科学基金资助项目（2021JJ40719）；国家自然科学基金资助项目（52274286）

作者简介：雷仕江（1975—），男，高级工程师，从事烧结工艺技术管理方面的工作。

通信作者：易凌云（1985—），男，博士，副教授，从事铁矿烧结球团、高炉炉料结构优化、直接还原、矿产及二次资源综合利用等方面的研究。

state of iron ore particles in the pores of sinter intruded by the binder phase and increase the strength of sinter. An excessively high substitution ratio (> 23.81%) will reduce the content of adhesive powder in the mixture and the temperature of the bed of material, resulting in insufficient binder content and a decrease in sinter strength.

Key words: Yangdiloogina ore; Brazilian ore; ore blending substitution; mount of liquid phase generation; ore phase structure

原料价格上涨，炼钢成本不断攀升是当前钢铁企业面临的主要问题之一[1]。因此，钢铁企业需要在维持产品性能的基础上调节原料配比，降低原料成本，进而提高市场竞争力。巴西混合矿粉是一种高品位铁矿粉，具有高铁、低钙、低镁等特点，质量优良。国内大部分钢铁企业均使用了部分巴西矿粉作为烧结原料[2]。武汉科技大学[3]通过对巴西 MBR 粉与国内铁矿粉部分替代试验，研究发现，当巴西 MBR 粉配比增大至 15% 时，烧结矿的成品率、机械强度以及冶金性能均有明显下降。鞍钢[4]在实验室进行了配加巴西铁矿粉的烧结杯试验，研究结果表明，当巴西粉配比超过 20% 时，烧结矿的转鼓强度明显下降。澳大利亚杨迪粉价格低廉，地理位置距离我国较近，应用该铁矿粉生产可以节约大量原料成本。褐铁矿在国内众多企业中的配比已经超过 30%，而围绕继续提高其使用配比的研究和实践仍在继续[5-6]。杨迪矿以高结晶水的褐铁矿为主，结构疏松多孔，具有易融化和还原性高等特点[7]。尽管如此，褐铁矿用量的提升依旧会对烧结矿强度造成不利影响。需要合理的烧结制度以及原料配比才能将烧结矿质量保持稳定甚至提高[8]。张国成等[9]研究发现提高褐铁矿配比的同时，需要相应增加磁铁精矿配比，旨在改善液相生成量、使液相分布均匀，以此提高烧结矿强度改善烧结矿性能。裴元东等[10]以实际钢铁企业原料配比为基础进行优化配矿试验，研究发现当在原料中配加 50% 的杨迪粉时，烧结矿的成品率以及转鼓指数较配加 30% 杨迪粉有明显提升。两种铁矿粉各有优劣，在节约成本的前提下，保证烧结矿质量稳定的关键在于铁矿原料的合理搭配[11]。

尽管当前各钢铁企业及研究单位对巴西矿和杨迪矿在烧结过程中的应用已经有较多的研究，但不同铁矿化学成分和成矿机制不同，利用实验室条件对进口铁矿的配比进行分析，研究其对烧结矿的质量影响可以促进钢铁企业更加高效合理地利用进口矿。因此，本文在某公司现有烧结原料配比的条件下，开展杨迪矿替代巴西矿的烧结优化配矿试验，从热力学理论角度研究黏附粉的液相生成量，从烧结矿微观结构及物相变化分析烧结矿产、质量指标变化的原因，为降低烧结生产成本，提高烧结矿质量提供理论依据。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验原料为某钢铁企业的烧结原料，其含铁原料有 8 种(粉矿 7 种、精矿 1 种)；熔剂为生石灰、白云石和石灰石，用以调节烧结矿碱度以及镁铝比。固体燃料为焦粉与无烟煤两种。含铁原料、熔剂的主要化学成分如表 1 所示，固体燃料的工业分析如表 2 所示。由表 1 可知：8 种含铁原料中巴西矿、PB 粉以及铁精矿 A 的全铁质量分数均大于 60%；杨迪矿和磁选粉的 SiO_2 质量分数在 6% 以上；PB 粉产于澳大利亚，其结晶水质量分数在 6% 以下，属于部分褐铁矿；杨迪粉烧损则达到了 10% 以上，属于褐铁矿；外矿中巴西矿的烧损在 3% 左右，属于低水化的赤铁矿。

1.2 试验方法

针对烧结机的实际生产需求，开展烧结杯试验，探究杨迪矿与巴西矿在其烧结条件下的合理配比。基于钢铁企业现场生产数据，制定基准烧结矿配比，熔剂、燃料以及部分返矿作为外配，基准配矿方案如表 3 所示。基于基准配比，以杨迪矿取代巴西矿，调节熔剂添加量以控制镁铝比为 1、碱度为 1.9，具体配矿方案如表 4 所示。试验流程如图 1 所示。由图 1 可知：将烧结原料混合加生石灰消化 5 min 后置于滚筒制粒机内制粒，在∅160 mm 的烧结杯内加入厚度为 780 mm 的烧结混合料进行烧结试验。烧结过程中点火温度为 1 100 ℃、点火时间为1 min、点火负压为5 kPa、

表 1　烧结用铁矿粉、熔剂的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and burning loss of iron ore powder and flux for sintering　　%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	烧损
巴西矿	62.86	0.92	5.07	0.130	0.062	1.450	3.27
PB 粉	61.19	0.74	4.22	0.120	0.130	2.240	5.78
铁精矿 A	61.02	7.35	4.87	0.800	0.550	2.540	2.06
杨迪矿	55.34	0.21	7.67	0.065	0.120	1.730	10.74
红焙砂	48.87	3.24	4.45	3.180	11.690	0.820	5.16
菱铁矿	35.21	42.60	3.24	1.530	9.010	0.940	32.31
磁选粉	34.38	31.64	11.26	24.360	5.730	1.660	5.72
返矿	54.61	9.18	6.34	10.360	2.040	1.980	0.98
白云石	0.53	—	0.44	30.850	20.290	0.031	46.82
石灰石	0.58	—	3.82	51.160	0.860	0.610	42.14
生石灰	0.32	—	5.85	70.880	3.570	0.250	16.28

表 2　固体燃料的工业分析及灰分化学成分(质量分数)

Table 2　Fuel industry analysis and ash chemical composition　　%

燃料名称	固定碳	挥发分	灰分	灰分化学成分分析				
				TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3
焦粉	73.76	4.23	22.01	18.29	41.64	6.08	1.25	17.43
无烟煤	77.19	7.82	15.00	14.47	44.61	2.38	0.78	20.65

表 3　基准烧结矿配比(质量分数)

Table 3　Ratio of benchmark sinter　　%

混匀矿								白云石	石灰石	生石灰	焦粉	煤粉	返矿
巴西矿	PB 粉	铁精矿 A	杨迪矿	返矿	红焙砂	菱铁矿	磁选粉						
21.0	27.0	15.0	6.0	18.0	7.0	4.0	2.0	1.9	6.2	6.0	3.6	2.4	16.0

表 4　烧结配矿方案(质量分数)

Table 4　Sintering ore blending scheme　　%

方案编号	巴西矿	杨迪矿	PB 粉	白云石	石灰石	生石灰
1#(基准)	21.0	6.0	27.0	1.9	6.2	6.0
2#	16.0	11.0	27.0	1.9	6.8	6.0
3#	11.0	16.0	27.0	1.9	7.5	6.0
4#	6.0	21.0	27.0	1.9	8.1	6.0

保温时间为 1.5 min、保温负压为 10 kPa，烧结结束后在 5 kPa 负压下冷却 3 min 后进行烧结矿产、质量指标检测。

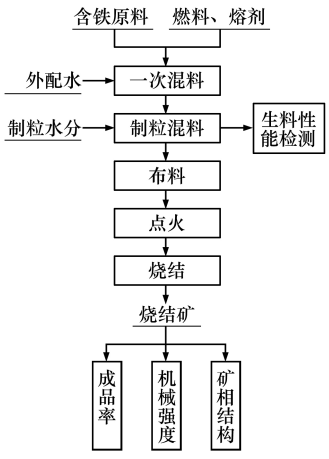


图 1　试验工艺流程

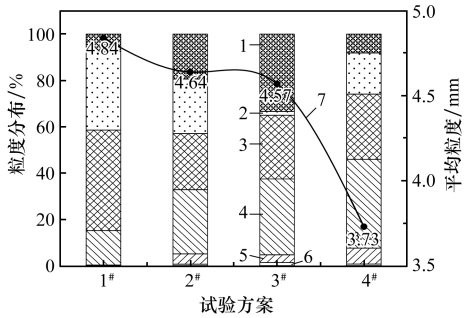
Fig. 1　Test process flow

2　试验结果及讨论

2.1　杨迪矿替代巴西矿对混合料性能的影响

经混合制粒后的混合料检测指标主要有粒度组成、堆密度以及料层透气性等[12]。混合料粒度组成如图2所示，堆密度以及料层透气性如图3所示。由图 2 可知，随着杨迪矿配比的增加，混合料的平均粒度降低，当巴西矿∶杨迪矿的配比为 6∶21 时(即替代基准方案中 71.43% 的巴西矿)，

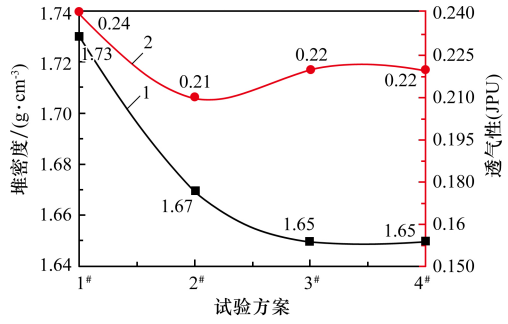
杨迪矿的平均粒度从基准方案的 4.84% 降低到 3.73%。在杨迪矿替代巴西矿的过程中，<3 mm 粒级占比升高、>5 mm 粒级占比减少，直接导致了混合料平均粒度的降低。经检测，杨迪矿的成球性能为 0.03，低于巴西矿的 0.88，因此铁矿颗粒上的黏附粉减少，无法长大成为大颗粒混合料，同时大量无法黏附的铁矿粉便以小颗粒的形式存在于混合料中。由图 3 可知，随着杨迪矿替代巴西矿比例的增加，混合料的透气性先降低，后增加，但总体差别较小，基本在 0.22 左右；而混合料的堆密度则随着杨迪矿配比的增加逐步降低，这主要是由于杨迪矿的密度为 3.82 g/cm^3，小于巴西矿的密度 4.32 g/cm^3。



粒度/cm：1—>8；2—(5,8]；3—(3,5]；4—(1,3]；5—(0.5,1]；6—≤0.5；7—平均粒度。

图 2　杨迪矿替代巴西矿对混合料粒度组成的影响

Fig. 2　Effect of replacing Brazilian ore with Yangdi mine on particle size composition of mixture



1—堆密度；2—透气性。

图 3　杨迪矿替代巴西矿对混合料性质的影响

Fig. 3　Effect of Yangdi mine replacing Brazil mine on the properties of the mixture

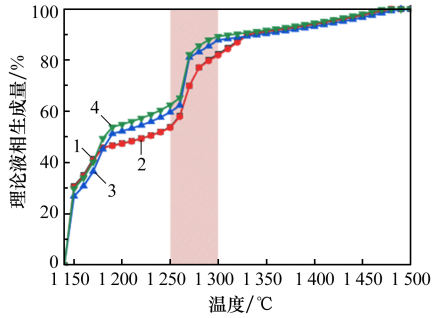
在烧结过程中，熔剂与≤0.5 mm 铁矿粉作为黏附粉附着在 >0.5 mm 的铁矿石颗粒上[13]。将混合料烘干后置于振动筛中进行筛分，得到混合料中≤0.5 mm 粒级的黏附粉。表 5 为不同配料结构的黏附粉化学成分。由表 5 可知：由于杨迪矿粒度比巴西矿粗，随着杨迪矿配比的增加，混合料中≤0.5 mm 的铁矿颗粒减少导致黏附粉中熔剂含量增高，因此黏附粉的碱度逐渐提高。

表 5　不同配料结构的黏附粉化学成分和碱度

Table 5　Adhesive powder components and basicity of different ingredient structures

方案编号	质量分数					R
	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	
1#	72.57	5.32	16.71	2.80	2.61	3.14
2#	72.80	5.26	16.61	2.75	2.58	3.16
3#	71.72	5.22	17.64	3.06	2.36	3.38
4#	71.68	5.09	17.84	2.84	2.55	3.50

为了进一步探明烧结过程中液相的生成能力，针对黏附粉，采用 Factsage8.0 热力学软件中的 Equilib 模块进行理论液相量计算，结果如图 4 所示。



配矿方案：1—1#；2—2#；3—3#；4—4#。

图 4　烧结过程理论液相量随烧结温度的变化趋势

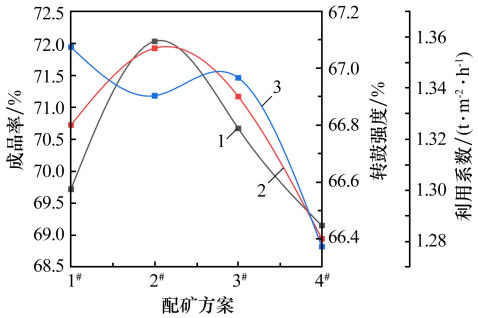
Fig. 4　The variation trend of theoretical liquid phase volume with sintering temperature in the sintering process

由图 4 可知，黏附粉的液相生成量随着温度的提高而增加。在杨迪矿替代巴西矿的过程中，黏附粉的碱度逐渐提升，同一温度下，黏附粉的理论液相生成量增加，当杨迪矿替代 71.43% 巴西矿时，理论液相生成量最多。烧结过程中燃烧带的最高温度为 1 250 ~ 1 400 ℃[14]，当温度为 1 250 ~ 1 300 ℃时，理论液相生成量变化剧烈，当温度发生波动时，理论液相生成量会有明显的增高或降低。因此，除了黏附粉化学成分外，烧结过程燃烧带的温度也会影响黏附粉理论液相生成量。

2.2　杨迪矿替代巴西矿对烧结矿产、质量指标的影响

图 5 为不同杨迪矿和巴西矿配比对烧结矿产、

质量指标的影响。由图 5 可知，当杨迪矿逐步替代巴西矿时，烧结矿的成品率与转鼓强度有所波动，呈现先增加后降低的趋势。当巴西矿∶杨迪矿的配比为16∶11(即取代基准方案中 23.81% 的巴西矿)时，烧结矿的成品率和转鼓强度达到最大，分别为 72.03% 和 67.07%，此时固体燃料消耗也降至最低(69.56 kg/t)；然后随着巴西矿被进一步替代，烧结矿的强度和成品率不断降低，固体燃料消耗也逐渐上升。当杨迪矿替代 23.81% 的巴西矿时，由于黏附粉的碱度提高，液相生成量增加，烧结矿的转鼓强度升高；然而，随着杨迪矿配比的逐渐增加，一方面由于杨迪矿粒度较粗导致混合料中黏附粉含量降低，形成的液相量不足；另一方面杨迪矿结晶水含量高、烧损高，需要消耗更多的热量，导致烧结矿成品率降低。



1—成品率；2—转鼓强度；3—利用系数。

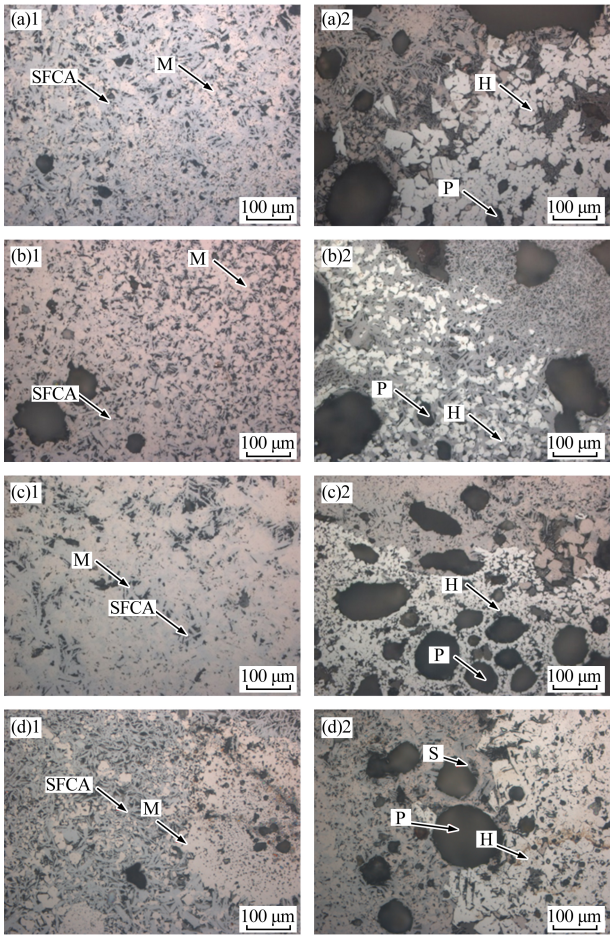
图 5　烧结矿产、质量指标

Fig. 5　Output and quality indicators of sinter

2.3　烧结矿矿相结构分析

利用光学显微镜对不同配矿方案烧结矿的矿相进行分析。为精准描述杨迪矿替代巴西矿后烧结矿的结构变化，选取烧结矿中铁矿颗粒与黏结相胶结面处进行研究，结果如图 6 所示。由图 6 可知：当杨迪矿与巴西矿配比为 6∶21 时(1#方案)，杨迪矿配加量较少，烧结矿的黏结相主要为复合铁酸钙与磁铁矿的交织熔蚀结构。复合铁酸钙多呈现柱状和针状，强度较好，硅酸盐含量较低，多嵌布在铁酸钙周围，孔隙率较低，结构均匀。孔隙较多的赤铁矿为原褐铁矿高温分解结晶水形成。为粒状或板状，孔隙较多。杨迪矿颗粒较粗，分解后产生的裂缝没来得及愈合[11]被黏结相侵入到赤铁矿孔隙当中形成赤铁矿与复合铁酸钙熔融结构，强度较高。

当杨迪矿配比增加，替代 23.81% 的巴西矿时(2#方案)，烧结矿的黏结相依旧为复合铁酸钙与磁铁矿的交织熔蚀结构。磁铁矿细小多为它形晶和半自形晶，复合铁酸钙多呈现柱状和针状，强度较好。杨迪矿粒度较粗，黏附粉碱度的升高降低了液相生成温度，提高了液相渗透作用，导致孔隙率减少，结构均匀。赤铁矿与黏结相交界处，有大量液相渗透，铁酸钙填充在赤铁矿孔隙中，提高了烧结矿的转鼓强度。



配矿方案：(a) 1#；(b) 2#；(c) 3#；(d) 4#；

1 为黏结相；2 为黏结相与铁矿颗粒胶结部位。

SFCA—复合铁酸钙(针状或条状，略带蓝灰色)；H—赤铁矿(粒状或板状，白色或灰白色)；M—磁铁矿(块状、互连状或板状，棕黄或暗黄色)；P—孔洞(不规则状，黑色)；S—硅酸盐(棒状或竹叶状，黑色)。

图 6　不同配矿方案下烧结矿的矿相结构

Fig. 6　Mineral phase structure of sinter under different ore blending schemes

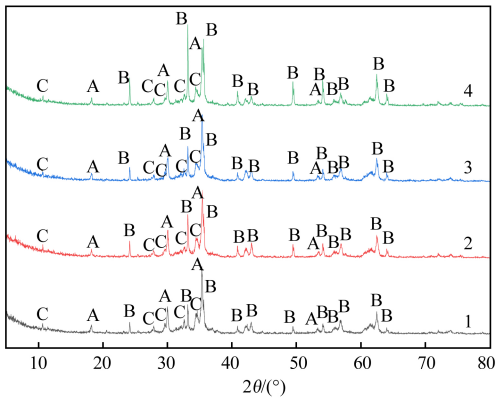
当杨迪矿配比增加，替代 47.62% 的巴西矿时(3#方案)，烧结矿的黏结相主要为复合铁酸钙与

磁铁矿的共晶结构，少部分为交织熔蚀结构。磁铁矿逐步长大多为半自形晶，复合铁酸钙多呈现柱状和团聚状，强度降低。褐铁矿核心与黏结相交界处存在明显界面。这是由于一方面杨迪矿配比增加，褐铁矿转变为赤铁矿所需要的热量增加，降低烧结温度导致液相生成量减少，液相黏度增加；另一方面褐铁矿结晶水去除后留下了大量的孔洞，加速烧结矿冷却，减少了烧结矿高温带持续时间[15-16]，进而导致液相无法及时侵入赤铁矿内部孔隙。

当杨迪矿配比增加，替代 71.43% 的巴西矿时（4#方案），烧结矿的黏结相主要为复合铁酸钙与磁铁矿的共晶结构，磁铁矿主要为自形晶或半自形晶，复合铁酸钙多呈现柱状和团聚状，强度进一步低。褐铁矿核心与黏结相交界处存在明显界面，赤铁矿孔隙率增多强度变差。

2.4 烧结矿物相分析

图 7 为不同配矿方案下所得烧结矿的 XRD 谱图。由图 7 可知：烧结矿中的主要物相为磁铁矿、赤铁矿以及复合铁酸钙。复合铁酸钙作为烧结矿中主要的黏结相，随着杨迪矿配比的增加而略有减少；烧结矿中的赤铁矿则随着杨迪矿配比的增加而增加。黏结相减少是导致烧结矿产、质量指标下降的主要因素。黏结相减少的原因在于：褐铁矿中结合水的蒸发消耗了过多的热量，导致烧结过程中燃烧带温度降低；黏附粉量的减少导致液相生成量降低。赤铁矿的增加则是由于杨迪矿烧结过后发达的孔隙令烧结矿具有更好的透气性，使较高温度的烧结矿带具有更好的氧化动力学条件。



A—Fe_3O_4；B—Fe_2O_3；C—$Ca_5Si_2(FeAl)_{18}O_{36}$。

图 7 不同配矿方案下所得烧结矿的 XRD 谱图

Fig. 7 XRD patterns of sinter obtained under different ore blending schemes

3 结 论

（1）杨迪矿替代巴西矿时烧结混合料平均粒度减小、透气性指数略有降低，其中≤0.5 mm 粒级黏附粉的碱度升高使得烧结过程液相生成温度降低。

（2）杨迪矿取代基准方案中巴西矿的适宜比例为 23.81%，此时烧结矿成品率为 72.03%，转鼓强度为 67.07%，固体燃料消耗为 69.56 kg/t，相较于基准配矿方案，转鼓强度和成品率分别提高 3.31% 和 0.40%。

（3）在基准配矿方案基础上，适当的杨迪矿替代占比（≤23.81%），会增加烧结矿孔隙率，黏结相侵入到孔隙中与铁矿颗粒胶结，提高烧结矿强度；过高的替代比例（>23.81%），会使得黏附粉含量减少、烧结温度降低，导致黏结相不足，烧结矿强度下降。

参考文献：

[1] 闫利娥，高长涛. 太钢 450 m^2 烧结机用杨迪粉替代巴西粉生产实践[J]. 山西冶金，2008(6)：11-12；22.
YAN Lie，GAO Changtao. Taiyuan iron and steel 450 m^2 sintering machine uses Yangdi powder to replace Brazilian powder[J]. Shanxi Metallurgy，2008(6)：11-12；22.

[2] 曹丽华，谢志勇，李新华，等. 宣钢配加印度粉和巴西粉烧结的试验研究[J]. 烧结球团，2002，27(5)：8-11.
CAO Lihua，XIE Zhiyong，LI Xinhua，et al. Sintering pot test with proportioning of Indian fine ore and Brazilian fine ore[J]. Sintering and Pelletizing，2002，27(5)：8-11.

[3] 周国凡，彭志坚，毕学工，等. 添加巴西 MBR 矿对烧结影响的试验研究[J]. 烧结球团，2001，26(5)：20-22.
ZHOU Guofan，PENG Zhijian，BI Xuegong，et al. Influence of proportioning Brazilian MBR ore on sintering technico-economic indices and sinter metallurgical properties[J]. Sintering and Pelletizing，2001，26(5)：20-22.

[4] 王俊山,周明顺,翟立委,等. 鞍钢烧结配加巴西南部粉矿试验研究[J]. 中国冶金,2013,23(5):26 – 29.
WANG Junshan, ZHOU Mingshun, ZHAI Liwei, et al. Experimental study on sintering with addition of Brazilian southern fine ore in Ansteel[J]. China Metallurgy,2013, 23(5):26 – 29.

[5] 王跃飞,吴胜利,韩宏亮. 高褐铁矿配比下提高烧结矿产质量指标[J]. 北京科技大学学报,2010,32(3):292 – 297.
WANG Yuefei, WU Shengli, HAN Hongliang. Improvement in quality and quantity indices of sinter with high proportion of limonite[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(3): 292 – 297.

[6] MACHIDA S, HIGUCHI T, OYAMA N, et al. Optimization of coke breeze segregation in sintering bed under high pisolite ore ratio[J]. ISIJ international,2009, 49(5):667 – 675.

[7] 沈铁,陈伟. 大比例褐铁矿烧结的试验研究及应用[J]. 矿冶,2010,19(4):75 – 78.
SHEN Tie, CHEN Wei. Experimental study and application about large proportion brown iron ore sintering[J]. Mining and Metallurgy,2010,19(4):75 – 78.

[8] 黄柱成,易凌云,胡兵,等. 高配比褐铁矿的烧结配矿试验研究[J]. 钢铁,2012,47(5):9 – 13.
HUANG Zhucheng, YI Lingyun, JIANG Tao. Experimental investigation on sintering with high ratio of limonite[J]. Iron and Steel,2012,47(5):9 – 13.

[9] 张国成,罗果萍,柴轶凡,等. 褐铁矿在烧结工艺中的优化配置[J]. 工程科学学报,2022,44(1):39 – 49.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Optimal allocation of limonite in sintering process[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(1):39 – 49.

[10] 裴元东,赵志星,马泽军,等. 高比例褐铁矿烧结机理分析及试验研究[J]. 烧结球团,2011,36(5):1 – 7.
PEI Yuandong, ZHAO Zhixing, MA Zejun, et al. Mechanism analysis and experimental research on high ratio limonite sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2011,36(5):1 – 7.

[11] LOO C E. A perspective of goethitic ore sintering fundamentals[J]. ISIJ international,2005,45(4):436 – 448.

[12] 黄小波. 湿容量在烧结混合料制粒工艺中的应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
HUANG Xiaobo. Application of moisture capacity on granulation process of the mixture in sintering[D]. Chongqing:Chongqing University,2011.

[13] 范晓慧. 铁矿烧结优化配矿原理与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2013.
FAN Xiaohui. Principle and technology of iron ore matching for sintering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2013.

[14] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社,2016.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha:Central South University Press, 2016.

[15] 黄伟青,张旭孝,刘燕霞,等. 褐铁矿在烧结中的高效使用技术[J]. 钢铁研究学报,2016,28(7):13 – 19.
HUANG Weiqing, ZHANG Xuxiao, LIU Yanxia, et al. High effective utilization technology of limonite in sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research,2016, 28(7):13 – 19.

[16] 陈付振,孙俊波. 国内褐铁矿烧结技术发展现状及影响因素分析[J]. 鞍钢技术,2015(4):8 – 12.
CHEN Fuzhen, SUN Junbo. Current development situation on technology for limonite-sintering at home and analysis on its influence factors[J]. Angang Technology, 2015(4):8 – 12.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵，不再另行支付)，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明，如有异议请来稿说明，本刊将作适当处理。