

基于 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ 的铁矿粉烧结液相流动性测定方法

龙红明^{1,2}, 钱立新¹, 春铁军¹, 王毅璠¹, 李宁¹, 余正伟¹

(1. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山, 243032;
2. 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室(安徽工业大学), 安徽 马鞍山, 243002)

摘要: 针对以碱度($R=w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$, w 为质量分数)控制混合料 CaO 的添加量的铁矿粉液相流动性检测方法(R 值法)在评价 SiO_2 质量分数不同的铁矿粉时结论与烧结生产存在差异的问题, 提出以混合料铁钙的物质的量比($n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$)控制 CaO 添加量的铁矿粉液相流动性检测方法(N 值法)。分别以化学纯试剂和铁矿粉为原料, 对比研究了 R 值法和 N 值法对液相流动性指数检测结果的影响; 并基于 2 种检测结果进行优化配矿—烧结杯试验。研究表明: R 值法测得液相流动性指数与铁矿粉中 SiO_2 质量分数有明显的线性正相关关系, 掩盖了铁矿粉真实的液相流动特性; N 值法可以显著减小 SiO_2 含量对铁矿粉液相流动性指数的影响。基于 N 值法的优化配矿—烧结产质量指标与 R 值法相比, 成品率、利用系数、转鼓强度分别提高 4.62%, 0.11 t/(m²·h)和 1.91%, 固体燃耗降低 1.96 kg/t。

关键词: 碱度; $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$; 液相流动性; 配矿; 烧结

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)07-1605-07

Determination method of iron ore liquid phase fluidity index during sintering based on $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$

LONG Hongming^{1,2}, QIAN Lixin¹, CHUN Tiejun¹, WANG Yifan¹, LI Ning¹, YU Zhengwei¹

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China;
2. Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling (Anhui University of Technology), Ministry of Education, Maanshan 243002, China)

Abstract: The liquid phase fluidity indexes of iron ores are generally tested by controlling the basicity ($R= w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$) of mixture (R value method). In order to solve the problem that the liquid phase fluidity indexes of iron ores with different SiO_2 contents are inconsistent with the sintering actual production, a new improved method based on $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ was proposed to add CaO (N value method). The effects of R value method and N value method on liquid phase fluidity indexes were studied by using pure chemical reagent and iron ores as raw materials. Based on these results, the optimizing ore blending-sintering pot tests were investigated. The results show that the liquid phase fluidity indexes measured by R value method have obvious linear positive correlation with SiO_2 mass fraction of iron ores, which can not really reflect the liquid phase fluidity indexes of iron ores. N value method can significantly reduce the effect of SiO_2 content on the liquid phase fluidity indexes. Compared with optimizing ore blending-sintering based on R value method, the sintering yield, productivity and tumbler strength of optimizing ore blending-sintering based on N value method are increased by 4.62%, 0.11 t/(m²·h) and 1.91% respectively, while the solid fuel consumption reduces by 1.96 kg/t.

Key words: basicity; $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$; liquid phase fluidity; iron ore matching; sintering

收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-09-13

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点资助项目(U1660206); 国家自然科学基金资助面上项目(51674002); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51704009) (Project(U1660206) supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China; Project(51674002) supported by the General Program National Science Foundation of China; Project(51704009) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 余正伟, 博士, 讲师, 从事铁矿造块节能环保技术及矿产资源综合利用技术研究; E-mail: yuzhengwei@ahut.edu.cn

铁矿石烧结主要依靠铁矿物和碱性熔剂在高温下反应产生液相,黏结未熔颗粒而成矿,液相固结是烧结过程的主要成矿形式,且液相的生成量及其流动性对烧结产质量指标具有重要影响。一般液相流动性过大时,对周围物料的黏结厚度会变薄,烧结矿易形成薄壁大孔结构,导致烧结矿强度下降,反之,铁矿粉的液相流动性过低,容易导致液相量不足,使烧结矿强度降低^[1],因此,烧结过程需要了解各单种铁矿粉的液相流动特性,控制混合矿液相流动性在适宜范围,以满足烧结矿高质量要求。在高碱度烧结矿生产中,铁酸钙液相是烧结过程中的主导液相,其流动性好,黏结强度高^[2-3]。然而,烧结体系中 CaO 的含量是铁酸钙生成量和液相流动性(用液相流动性指数表示)的决定性因素^[4]。液相流动性作为铁矿石烧结性能的主要评价指标,由吴胜利教授提出^[5-6],并在烧结优化配矿领域得到了较广泛的应用^[7-8]。目前,其测定方法是以铁矿粉和化学纯 CaO 为原料进行混合并压样,利用微型烧结实验设备模拟实际烧结过程进行升温实验^[5],随着温度升高,试样在 500 °C 左右时开始发生固相反应,形成低熔点物质铁酸钙相^[9],当试样被加热到一定温度时,新生成的低熔点物质软化熔融,并形成液相^[3],试样在缺少骨架作用下发生变形坍塌,并在载物片流动形成一定面积。根据铁矿粉原料化学成分、物理性能等不同,铁矿粉液相流动形成的面积大小不同。吴胜利等提出的铁矿粉液相流动性测定通过固定碱度($R=w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$)控制 CaO 的加入量(以下简称 R 值法),这就造成铁矿粉中 SiO₂ 质量分数决定了 CaO 的加入量。因此,该方法在评价 SiO₂ 质量分数差异较大的单种铁矿粉时,评价结论往往与实际生产存在差异。以卡拉加斯矿粉(以下简称卡粉)为例,其是国内钢铁企业常用进口矿之一,其突出的特点是:全铁品位高、SiO₂ 质量分数低(一般<3%),按照目前液相流动性测定方法,其属于流动性极差的铁矿

粉^[10-11]。但国内钢铁企业通过配加不同比例的卡粉烧结,烧结矿产质量指标均得到明显提高,说明其是一种烧结性能优良的铁矿粉^[12-14]。测定高硅矿($w(\text{SiO}_2)>7\%$)液相流动性时, CaO 添加量大,高温时液相大量生成且流动性较好。但生产实践表明,碱度不变的条件下,提高高硅矿配比一方面降低了烧结矿的品位,另一方面易产生大量高熔点硅酸盐,液相黏度增加,流动性变差,影响铁酸钙的生成,造成烧结产质量指标下降,是铁矿烧结生产中不受欢迎的铁矿粉种类^[4, 15-16]。这一现象说明, R 值法检测 SiO₂ 含量差异较大的单种铁矿粉液相流动性存在较大偏差,难以有效指导烧结配矿。针对上述问题,并考虑到烧结体系中铁氧化物为主且含量相对稳定的实际情况,本文作者提出固定 Fe₂O₃ 和 CaO 物质的量比($n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$)的方式控制 CaO 加入量(以下简称 N 值法),以减小 SiO₂ 含量对单种矿液相流动性评价的不利影响,通过优化配矿—烧结杯实验验证该评价方式的可行性,进一步完善烧结优化配矿的理论依据和技术基础。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

本研究采用的原料包括化学纯 Fe₂O₃(质量分数≥99.0%), SiO₂(质量分数≥99.0%)和 CaO(质量分数≥98.0%),以及来源于国内某钢铁企业的进口铁矿粉,其主要化学成分如表 1 所示。

1.2 试验方法

1.2.1 液相流动性测定方法

液相流动性指数测定采用“基于流动面积测定法”,具体步骤如下: 1) 以铁矿粉为原料时,先将试样细磨至粒度在 0.074 mm 以下;以化学纯 Fe₂O₃ 和 SiO₂ 混合试剂为原料时,设定 $w(\text{SiO}_2)/(w(\text{SiO}_2)+w(\text{Fe}_2\text{O}_3))$

表 1 进口铁矿粉的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of imported iron ores

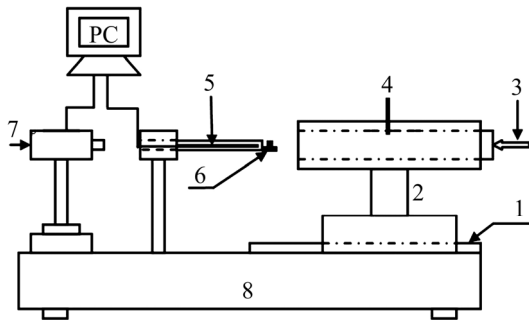
原料	TFe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	LOI
卡粉	64.57	2.12	0.04	1.52	0.04	0.99	2.57
PB 粉	61.22	3.72	0.40	2.54	0.20	0.65	4.95
纽曼粉	62.36	4.83	0.10	2.25	0.40	0.54	2.50
FMG 混合粉	57.90	5.61	0.23	2.75	0.07	0.64	7.78
巴西粉	62.13	6.11	0.08	1.90	0.07	1.08	2.70
图巴朗粉	62.35	7.21	0.10	1.15	0.08	0.89	2.21
FMG 摩卡粉	52.24	11.86	0.20	4.08	0.06	0.63	7.88

注: TFe 为全铁质量分数; LOI 为矿石粉末在 900 °C 空气气氛下焙烧 60 min 的烧损。

为 0, 2.5%, 5.0%, 7.5% 和 10.0%。2) 根据铁矿粉或化学纯混合样中 $w(\text{SiO}_2)$, 通过固定碱度 $R=4$ 加入 CaO 试剂或者根据铁矿粉中 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, 通过固定 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})=1.5$ 加入 CaO 试剂。3) 称取 (0.8 ± 0.01) g 混匀试样原料, 在 10 MPa 的压力下压制成直径为 8 mm 的圆柱体试样; 4) 将试样放入微型烧结实验装置中(见图 1), 按照设定的升温、降温曲线以及相应的实验气氛(见图 2)进行焙烧实验; 5) 待试验结束后取出样品小饼, 测定其垂直投影面积, 并根据下式计算出试样的液相流动性指数^[17]。

$$I_{\text{FLP}} = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \quad (1)$$

式中: I_{FLP} 为液相流动性指数; S_0 为试样流动前的垂直投影面积, mm^2 ; S_1 为试样流动后的垂直投影面积, mm^2 。



1—轨道; 2—炉体; 3—供气系统; 4—炉温热电偶; 5—样温热电偶; 6—载物台及试样; 7—摄像系统; 8—底座。

图 1 微型烧结实验装置

Fig. 1 Device of micro sintering experiment

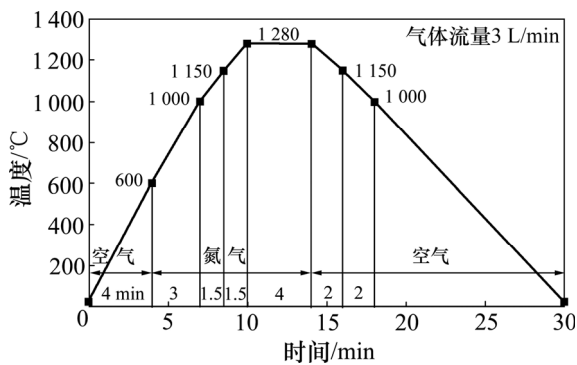


图 2 微型烧结温度及气氛制度

Fig. 2 Temperature and atmosphere of micro sintering

1.2.2 烧结杯试验方法

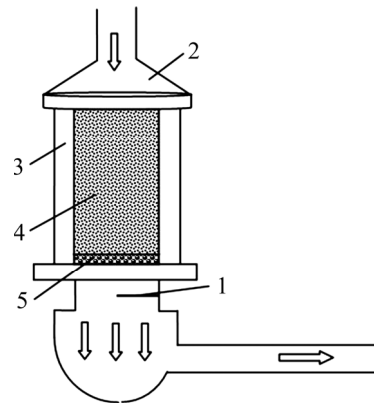
烧结杯实验所用的设备如图 3 所示, 烧结杯内径 200 mm, 高度 700 mm。实验分为配料、混合制粒、烧结、产品质量检测 4 个步骤。

1) 配料。根据文献研究成果, 混合矿的液相流动性与单种矿的液相流动性存在线性关系, 可以根据各单种矿的液相流动性及其配比确定混合矿的液相流动性, 烧结混合矿的液相流动性指数通常在 2.0~3.0 之间较为合适^[18], 因此, 配矿时根据优劣搭配原则, 控制混合矿的液相流动性指数在 2.5 左右。

2) 混合制粒。将各配好的原料在混合机内混合, 由压缩空气将雾化水喷入进行混合, 混合时间为 6 min。

3) 烧结。点火负压为 5 kPa, 点火 2 min 关闭点火罩, 负压调至 10 kPa 进行烧结, 待烧结废气温度达到最高值开始下降时, 调整负压为 5 kPa 冷却。

4) 产品质量检测指标包括成品率、转鼓强度、利用系数以及冶金性能, 其具体实验方法参考冶金行业标准(YB/T 421—2014)和国家标准(GB 13241—91, GB 13242—91)。



1—热电偶; 2—点火罩; 3—烧结杯; 4—混合料; 5—铺底料。

图 3 烧结杯试验装置

Fig. 3 Apparatus for sinter pot test

2 结果与分析

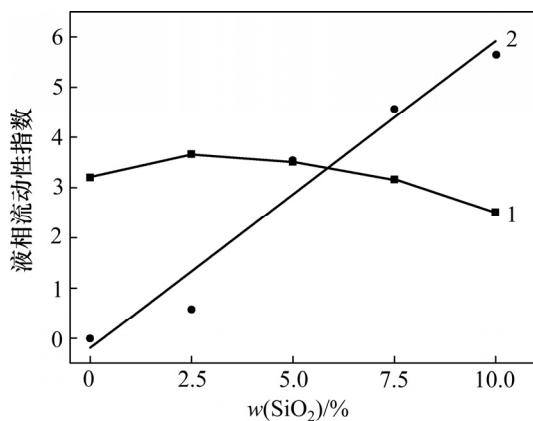
2.1 CaO 添加量计算方式对液相流动性的影响

为了研究 CaO 添加量计算方式对液相流动性的影响, 分别研究以不同 SiO_2 质量分数的 Fe_2O_3 化学纯混合试剂以及 7 种进口铁矿粉为主要原料时试样的液相流动性。

本文以化学纯混合试剂为原料, 目的是为了消除 SiO_2 外其他因素对液相流动性的影响, 试验结果如图 4 所示。当采用 R 值法时, 液相流动性指数随 SiO_2 质量分数的增加呈现单调递增的变化趋势, 两者存在明显的线性正相关关系。当 SiO_2 质量分数为 0~2.5% 时, 试样中 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ 大于 3.41, 根据烧结过程铁酸

钙形成理论^[19], 试样中生成的低熔点铁酸钙数量少, 大量残存的固体 Fe_2O_3 在试样中起到骨架支撑作用, 液相的流动性差。当 SiO_2 质量分数增加到 5% 时, 试样中 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ 为 1.66, 液相中残存的固体数量减少, 液相流动性逐渐增大; 当 SiO_2 质量分数增加到 7.5% 时, 试样中 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ 降低到 1.08, 考虑到部分 CaO 与 SiO_2 结合形成硅酸盐, 试样中 Fe_2O_3 与 CaO 不能按质量分数 1:1 反应, 液相流动指数未达到最大; 当 SiO_2 质量分数大于 7.5% 时, 试样中 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ 小于 1, 此时试样中 CaO 的量过剩, Fe_2O_3 能够全部反应形成铁酸钙, 液相流动性接近最大值。

当采用 N 值法时, 随着 SiO_2 质量分数的增加, 液相流动性呈现先增加后降低的变化规律。当 SiO_2 质量分数从 0 变化到 2.5% 时, 试样液相流动性呈现增加趋势; 当 SiO_2 质量分数为 2.5% 时, 液相流动性最大; 随着 SiO_2 质量分数的进一步增加, 液相流动性呈现单调递减的趋势。主要原因有: 一方面, SiO_2 是烧结液相生成的基础, SiO_2 能够熔解在二元铁酸钙中形成 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系铁酸钙降低二元铁酸钙熔化温度^[20], 增加液相过热度, 因此, 在一定范围内, 高 SiO_2 质量分数的铁矿粉有利于液相的形成, 从而相应增大液相流动性。另一方面, 由于 SiO_2 是硅酸盐网络的形成物, 当其含量达到一定值后, 继续增加会导致铁酸钙熔化温度升高, 并且会出现铁氧化物的析出^[21], 降低液相过热度, 增加液相黏度, 从而降低试样液相流动性。



1— $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})=1.5$; 2— $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)=4.0$ 。

图 4 CaO 添加量计算方式对化学纯混合试剂液相流动性指数的影响

Fig. 4 Effect of calculation method of CaO addition on liquid phase fluidity index of chemical pure mixed reagent

以铁矿粉为原料, 研究不同 CaO 添加量计算方式对其液相流动性的影响, 结果如图 5 所示。从图 5 可见: 对于同种铁矿粉, 液相流动性实验结果差异很大,

特别是 SiO_2 质量分数最低的卡粉和最高的 FMG 摩卡粉。卡粉采用 R 值法时, 液相流动性指数为 0, 在 7 种实验铁矿粉中最低; 采用 N 值法时, 液相流动性指数为 3.45, 在 7 种铁矿粉中最高。FMG 摩卡粉实验结果与卡粉实验结果正好相反, 采用 R 值法时, 液相流动性指数为 5.68, 而采用 N 值法时, 液相流动性指数为 0。

进一步分析, 将 7 种铁矿粉以碱度 $R=4$ 加入 CaO 后, 计算试样中 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$, 结果如表 2 所示。从表 2 可见: 随着铁矿粉中 SiO_2 质量分数的增加, 添加 CaO 后试样中 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ 从 3.76 降低到 0.55, 液相流动性指数与 SiO_2 质量分数存在线性正相关关系。其主要原因是铁矿粉液相流动性取决于试样中 CaO 的添加量, CaO 的添加量越多, 液相流动性越好, 其他物化性质(Al_2O_3 质量分数、烧损等)对液相流动性的影响都被其所掩盖。

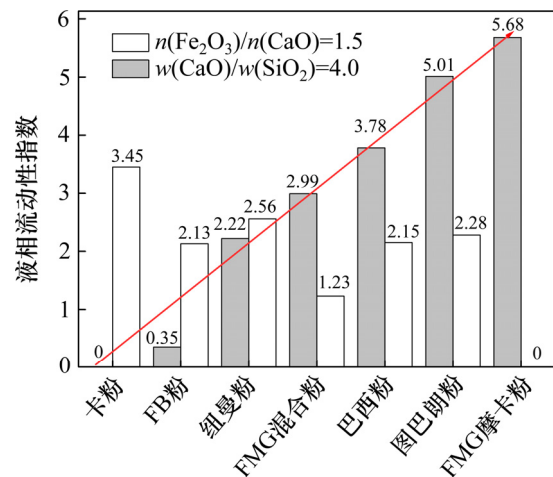


图 5 CaO 添加量计算方式对铁矿粉液相流动性指数的影响
Fig. 5 Effect of calculation method of CaO addition on liquid phase fluidity index of iron ore

表 2 采用 R 值法试样中主要化学成分及 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$
Table 2 Main chemical compositions and $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ with using R value method

试样	质量分数/%			$n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$
	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	
卡粉	84.73	1.97	7.88	3.76
PB 粉	75.64	3.24	12.98	2.04
纽曼粉	74.15	4.05	16.19	1.60
FMG 混合粉	67.61	4.63	18.50	1.28
巴西粉	70.69	4.93	19.73	1.25
图巴朗粉	68.78	5.61	22.45	1.07
FMG 摩卡粉	50.89	8.16	32.65	0.55

注: w 为质量分数; n 为物质的量。

2.2 Al_2O_3 质量分数对液相流动性的影响

铁矿粉采用 N 值法时, 其液相流动性指数与 SiO_2 质量分数之间线性相关关系不明显, 液相流动性随着其产地、物理性能, 化学成分等不同而不同。图 6 所示为 7 种铁矿粉中 Al_2O_3 质量分数对液相流动性的影响。从图 6 可知: 随着铁矿粉中 Al_2O_3 质量分数的增加, 液相流动性呈现降低的趋势。主要原因是 Al_2O_3 属于高熔点物质^[22], 且它对硅酸盐网络物质的形成有促进作用, 因此, 铁矿粉中 Al_2O_3 质量分数增加, 液相黏度增大^[4], 导致液相流动性相应降低。

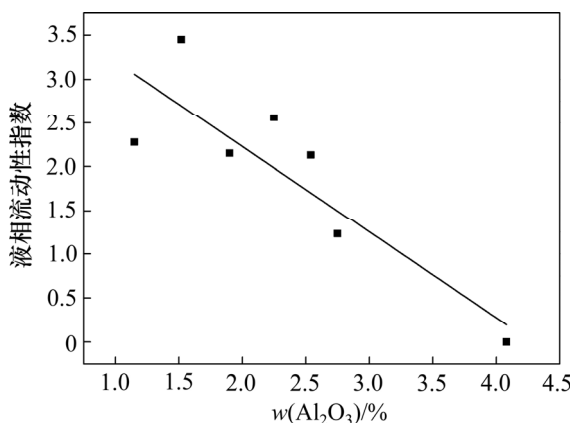


图 6 铁矿粉 Al_2O_3 质量分数与液相流动性指数的关系
Fig. 6 Relationship between Al_2O_3 content of iron ore and liquid phase fluidity index

2.3 烧损对液相流动性的影响

图 7 所示为烧损对液相流动性的影响。从图 7 可以看出: 烧损大的铁矿粉, 液相流动性较低。其主要原因是, 烧损大的铁矿粉在高温烧结时, 随着结晶水和碳酸盐的分解, 试样内部出现孔洞, 高温形成的液相会填充于孔洞中, 造成液相流动相应减小。

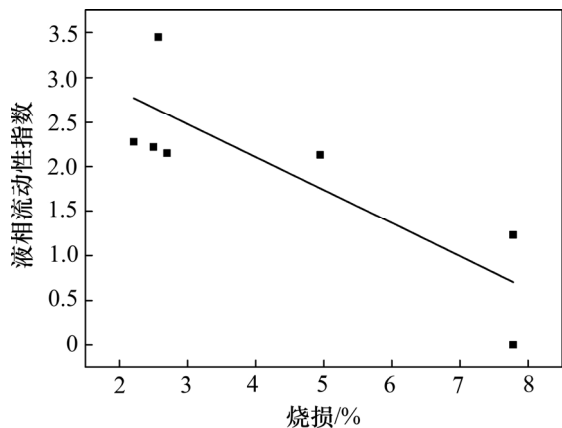


图 7 铁矿粉烧损与液相流动性指数的关系
Fig. 7 Relationship between burning loss of iron ore and liquid phase fluidity index

2.4 综合影响因素对液相流动性的影响

图 6 和图 7 所示分别为铁矿中 Al_2O_3 质量分数和烧损对液相流动性的影响。虽然整体上液相流动性随着 Al_2O_3 、烧损质量分数的升高而降低, 但也会存在 2 种铁矿粉 Al_2O_3 质量分数或者烧损相差不大, 液相流动性指数存在较大差异的情况。例如图巴朗粉的 Al_2O_3 质量分数为 1.15%, 卡粉的 Al_2O_3 质量分数为 1.52%, 但卡粉的液相流动性却比图巴朗粉的好, 卡粉和纽曼粉的烧损均在 2.50% 左右, 但是两者液相流动性指数相差较大, 其主要原因是同种铁矿粉液相流动性受到多种因素影响。因此, 本文认为不宜对多种铁矿粉研究其某一单一因素与液相流动性的关系, 应考虑这些因素的综合影响与液相流动性的关系。图 8 所示为单种铁矿粉中 SiO_2 , Al_2O_3 和烧损质量分数之和与液相流动性指数的关系。从图 8 可以看出: 液相流动性指数与三者质量分数之和成线性负相关关系, 与前面分析结论吻合。

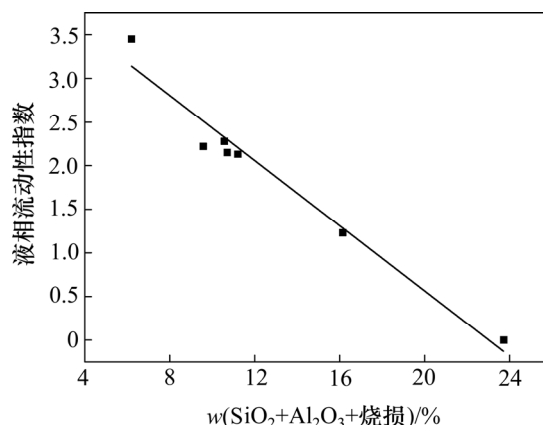


图 8 铁矿粉中 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 +$ 烧损质量分数之和与液相流动性指数的关系

Fig. 8 Relationship between $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 +$ burning loss content of iron ore and liquid phase fluidity index

2.5 基于液相流动性指数的优化配矿—烧结杯试验

分别基于 7 种铁矿粉的 2 种液相流动性检测结果进行优化配矿—烧结杯试验, 控制混合矿的液相流动性均在 2.5 左右。表 3 所示为 2 种配矿方案, 其中, FA-1 和 FA-2 分别是基于 R 值法和 N 值法液相流动性指数检测结果的优化配矿方案。根据表 3 中 2 组配矿

表 3 烧结杯试验方案(质量分数)

方案	卡粉	PB 粉	纽曼粉	FMG 混合粉	巴西粉	FMG 摩卡粉
FA-1	13	12	30	18	22	5
FA-2	22	18	30	8	22	0

表 4 配矿方案的烧结指标和冶金性能比较

Table 4 Comparison of sintering index and metallurgical property of ore blending scheme

方案	垂直烧结速度/ (mm·min ⁻¹)	成品率/ %	利用系数/ (t·m ⁻² ·h ⁻¹)	转鼓指数/ %	固体燃料/ (kg·t ⁻¹)	$I_{RI}/\%$	$I_{RDI-0.5}/\%$	$I_{RDI+3.15}/\%$
FA-1	17.95	71.19	1.12	66.36	67.36	84.14	7.23	66.49
FA-2	18.42	75.81	1.23	68.27	65.40	86.73	7.54	65.95

注：还原性能测试气体组成：CO 体积分数为 30%，N₂ 体积分数为 70%；流量为 15 L/min；温度为(900±10) °C，3 h。低温还原粉化性能测试气体组成：CO 体积分数为 20%，CO₂ 体积分数为 20%，N₂ 体积分数为 60%；流量为 15 L/min；温度为(500±10) °C，1 h。

方案进行烧结杯试验和烧结矿的冶金性能测试，试验结果如表 4 所示。对比分析 2 组配矿方案烧结杯试验结果可知：基于 N 值法的配矿 FA-2 的烧结产质量指标均优于基于 R 值法的 FA-1 的烧结产质量指标，相比之下，烧结成品率、利用系数、转鼓强度分别提高了 4.62%，0.11 t/(m²·h)和 1.91%，固体燃料降低 1.96 kg/t。在烧结矿冶金性能方面，FA-2 烧结矿的还原度比 FA-1 的高，达到了 86.7%；低温还原分化指数 $I_{RDI+3.15}$ 两者相差不大，均在 66%左右，说明提高低硅矿卡粉配比、降低高硅矿 FMG 摩卡粉配比能显著提高烧结产质量指标。因此，本文认为基于固定 $n(\text{Fe}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO})$ 的不同 SiO₂ 质量分数铁矿粉液相流动性评价结果对实际烧结生产更具有指导意义。

3 结论

1) 铁矿粉液相流动性测定实验中，采用 R 值法检测 SiO₂ 质量分数差异较大的单种铁矿粉时，液相流动性指数与铁矿粉中 SiO₂ 质量分数存在明显的线性正相关关系，并且掩盖了铁矿粉其他物化性质(Al₂O₃ 质量分数、烧损等)等对其液相流动性的影响。

2) 铁矿粉采用 N 值法的液相流动性测定实验中，液相流动性指数与 SiO₂ 质量分数线性相关关系不明显。随着铁矿粉中 Al₂O₃ 质量分数和烧损的增加，液相流动性指数呈现降低的趋势，液相流动性指数与铁矿粉中 SiO₂、Al₂O₃ 质量分数和烧损三者含量之和存在线性负相关关系。

3) N 值法对不同 SiO₂ 质量分数的铁矿粉液相流动性评价结果对实际烧结生产更具有指导意义。

参考文献:

[1] YAO Lu, REN Shan, WANG Xiaoqing, et al. Study on liquid phase formation and fluidity of iron ores[J]. Metallurgical

Research & Technology, 2017, 114(2): 204.

[2] 黄柱成, 梁之凯, 易凌云, 等. 高配比高铝褐铁矿烧结成矿机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1013–1020.
HUANG Zhucheng, LIANG Zhikai, YI Lingyun, et al. Metallogenic mechanism of sintering of high ratio of high alumina limonite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(4): 1013–1020.

[3] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2016: 75–90.
JIANG Tao. Principles and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha: Central South University Press, 2016: 75–90.

[4] 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: 48–70.
FAN Xiaohui. Principle and technology of iron ore matching for sintering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 48–70.

[5] 吴胜利, 杜建新, 马洪斌, 等. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 291–293.
WU Shengli, DU Jianxin, MA Hongbin, et al. Fluidity of liquid phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3): 291–293.

[6] 吴胜利, 戴宇明, DAUTER O, 等. 基于铁矿粉高温特性互补的烧结优化配矿[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(6): 719–724.
WU Shengli, DAI Yuming, DAUTER O, et al. Optimization of ore blending during sintering based on complementation of high temperature properties[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(6): 719–724.

[7] 袁晓丽, 范晓慧, 万新, 等. 烧结优化配矿模型的设计与软件开发[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1476–1481.
YUAN Xiaoli, FAN Xiaohui, WAN Xin, et al. Design and development of optimizing iron ores matching model and software[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(6): 1476–1481.

[8] YAN Bingji, ZHANG Jianliang, GUO Hongwei, et al. High-temperature performance prediction of iron ore fines and the ore-blending programming problem in sintering[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2014, 21(8): 741–747.

- [9] 朱德庆, 熊守安, 仇宏亮, 等. 铬铁矿球团烧结工艺与机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1658-1667.
ZHU Deqing, XIONG Shouan, ZHANG Hongliang, et al. Pellets sintering process of chromite concentrate and mechanism of consolidation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2010, 41(5): 1658-1667.
- [10] 苏步新, 张建良. 基于主成分分析的烧结铁矿粉性能评价[J]. 烧结球团, 2014, 39(6): 1-6.
SU Buxin, ZHANG Jianliang. Evaluation of sintering iron ore fines performance based on principal component analysis[J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(6): 1-6.
- [11] 武铁, 吴胜利, 杜建新. 马钢常用铁矿石的烧结基础特性研究[J]. 钢铁研究, 2008, 36(4): 5-8.
WU Yi, WU Shengli, DU Jianxin. Study on basic sintering characteristics of fine ores used in Masteel[J]. Research on Iron and Steel, 2008, 36(4): 5-8.
- [12] 陈绍国, 裴元东, 潘文, 等. 首钢京唐主流铁矿粉单种矿烧结试验研究[C]// 第十四届全国炼铁原料学术会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 87-91.
CHEN Shaoguo, PEI Yuandong, PAN Wen, et al. Experimental research on single sintering pot test of mainstream iron ore in Shougang Jingtang[C]// The 14th Ironmaking Raw Materials Conference Proceedings. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2015: 87-91.
- [13] 贺淑珍. 太钢配用巴西矿粉的烧结试验研究与生产实践[C]// 第十二届全国炼铁原料学术会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 112-116.
HE Shuzhen. Lab test and practice of sintering Brazilian fines in TISCO[C]// The 12th Ironmaking Raw Materials Conference Proceedings. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2011: 112-116.
- [14] 赵俊花, 宋福亮, 甄晓初. 高比例配加巴卡粉对烧结生产的影响[C]// 第13届全国大高炉炼铁学术年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 878-883.
ZHAO Junhua, SONG Fuliang, ZHEN Xiaochu. Influence of adding high proportion baka powder on iron ore sintering[C]// The 13th National blast furnace ironmaking Conference Proceedings. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2012: 878-883.
- [15] 马莉, 孟君, 秦娇平, 等. 巴西高硅粉烧结性能试验研究[J]. 工业技术创新, 2014, 1(4): 393-399.
MA Li, MENG Jun, QIN Jiaopin, et al. The research of brazil's high-silicon fine iron ore performance in Sintering[J]. Industrial Technology Innovation, 2014, 1(4): 393-399.
- [16] 范晓慧, 孟君, 陈许玲, 等. 铁矿烧结中铁酸钙形成的影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(6): 1125-1131.
FAN Xiaohui, MENG Jun, CHEN Xuling, et al. Influence of factors of calcium ferrite formation in iron ore sintering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(6): 1125-1131.
- [17] 吴胜利, 裴元东, 陈辉, 等. 铁矿粉烧结液相流动性评价[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(10): 1095-1100.
WU Shengli, PEI Yuandong, CHEN Hui, et al. Evaluation on liquid phase fluidity of iron ore in sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(10): 1095-1100.
- [18] 裴元东. 铁矿粉的烧结配合性及其应用技术研究[D]. 北京: 北京科技大学冶金与生态工程学院, 2008: 50-60.
PEI Yuandong. Study on sintering compatibility of iron ore powder and its application technology[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing. School of Metallurgical and Ecological Engineering, 2008: 50-60.
- [19] MATSUURA H, KURASHIGE M, NAKA M, et al. Melting and solidifying behaviors of the $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}_x$ slags at various oxygen partial pressures[J]. ISIJ International, 2009, 49(9): 1283-1289.
- [20] DING Xiang, GUO Xingmin, MA Chenyan, et al. Effect of SiO_2 on the crystal structure stability of SFC at 1 473 K (1 200 °C)[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(3): 1146-1153.
- [21] DING Xiang, GUO Xingmin. Study of SiO_2 , involved in the formation process of silico-ferrite of calcium (SFC) by solid-state reactions[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 149(2): 69-77.
- [22] LONG Hongming, WU Xuejian, CHUN Tiejun, et al. Assimilation behavior of calcium ferrite and calcium diferrite with sintered Al_2O_3 and MgO [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(5): 1-7.

(编辑 杨幼平)