

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20200357

MgO 对高碱度高铝烧结矿的影响

易正明^{1,2}, 覃佳卓^{1,2}, 姜志伟¹, 秦庆伟¹, 邵慧君¹, 杜 东³

- (1. 武汉科技大学钢铁冶金与资源利用省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;
2. 武汉科技大学高温材料与炉衬技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430081;
3. 水城钢铁集团有限公司铁焦事业部, 贵州 六盘水 553000)

摘 要: 随着钢铁企业高铝铁矿粉使用比例的提高,带来了高炉炉渣黏度增大、渣铁分离困难等一系列问题。采用烧结杯试验,研究了 MgO 含量增加对高碱度高铝烧结矿经济技术指标、冷强度和冶金性能的影响,采用 Nova400 NanoSEM 型场发射扫描电子显微镜分析了烧结矿微观结构。试验结果表明,高碱度高铝烧结矿中 MgO 质量分数从 1.72% 提高到 2.49% 时,垂直烧结速度降低 4.38 mm/min,利用系数降低 0.51 t/(m² · h),低温还原粉化指数增加 6.7%;当烧结矿中 MgO 质量分数为 2.11% 时,转鼓指数和还原度最高,分别达到 61.93% 和 86.39%;Mg²⁺ 主要固溶在磁铁矿晶格中并替代 Fe²⁺,替代的质量分数最高达 3.64%,生成的含镁磁铁矿抑制烧结矿降温过程中由 Fe₃O₄→Fe₂O₃ 氧化过程的相变,减少了二次赤铁矿的生成,有利于改善烧结矿的低温还原粉化性能。研究结果可以为改善高碱度高铝烧结矿性能和提高炉渣流动性提供理论指导和参考依据。

关键词: 高铝烧结矿; 高碱度烧结矿; MgO; 冶金性能; 微观结构

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2021)02-0050-07

Influence of MgO on high basicity high alumina sinter

YI Zheng-ming^{1,2}, QIN Jia-zhuo^{1,2}, JIANG Zhi-wei¹, QIN Qing-wei¹,
SHAO Hui-jun¹, DU Dong³

- (1. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. National-provincial Joint Engineering Research Center of High Temperature Materials and Lining Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 3. Coking Division, Shuicheng Iron and Steel Group Co., Ltd., Liupanshui 553000, Guizhou, China)

Abstract: The increase of the proportion of high Al₂O₃ content iron ore fine in iron and steel enterprises has brought about a series of problems such as the increase of the viscosity of blast furnace slag and the difficulty of the separation of slag and iron. The effect of increasing MgO content on the technical and economic index, the cold strength, and metallurgical properties of high basicity and high alumina sinter was studied through the sinter pot test. Nova400 NanoSEM field emission scanning electron microscope was used to analyze the microstructure of the sinter. The experimental results show that when the mass percent of MgO in the sinter with high alkalinity and high aluminum increases from 1.72% to 2.49%, the vertical sintering speed decreases by 4.38 mm/min, the utilization coefficient decreases by 0.51 t/(m² · h), and the low-temperature reduction degradation index increases by 6.7%. When the mass percent of MgO in the sinter is 2.11%, the drum index and the reducibility index are the highest, reaching 61.93% and 86.39% respectively. Mg²⁺ is mainly solid dissolved in the magnetite lattice and replaces Fe²⁺, and the mass fraction of the replacement reaches up to 3.64%. The generated magnesium-containing magnetite inhibits the phase transition from Fe₃O₄ to Fe₂O₃ oxidation process in the sinter cooling process, which reduces the generation of secondary hematite and is conducive to improving the low-temperature reduction degradation performance of the sinter. The research results can provide theoretical guidance and reference for improving the properties of high-basicity and high-alumina sinter and adjusting the fluidity of blast furnace slag.

Key words: high-alumina sinter; high-basicity sinter; MgO; metallurgical property; microstructure

目前,高品位铁矿资源的日益匮乏以及国内钢铁市场竞争日趋激烈,为降低生产成本,钢铁企业都

不断增加印度粉和澳粉等高 Al_2O_3 低价低品位铁矿粉的配比,使烧结矿中 Al_2O_3 含量进一步提高,带来了一系列的负面问题^[1]。一方面烧结矿低温还原粉化性能恶化,高炉上部透气性变差^[2];另一方面促进氧离子扩散,降低渣中 O^{2-} 的活度,恶化脱硫热力学条件^[3-4]。高炉渣中 Al_2O_3 含量提高,导致炉渣黏度上升、流动性明显变差,容易堵塞炉缸,造成高炉操作困难^[5-6]。

为改善高铝烧结矿对高炉冶炼的不利影响,提升高铝烧结矿自身的冶金性能,炼铁厂一般要求尽可能增加烧结矿中的 MgO 含量,避免从炉顶装入氧化镁含量高的生熔剂^[7]。适当地配加 MgO 可以在一定程度上抑制烧结矿的低温还原粉化^[8-13],有效改善炉渣的理化性能,提高脱硫能力,而 MgO 的含量过高,也会对烧结矿技术经济指标和烧结矿质量带来一定的负面影响^[14-15]。因此,研究 MgO 含量对高碱度高铝烧结矿的影响及其作用机理具有重要意义。本文采用烧结杯试验,研究不同 MgO 含量对高碱度高铝烧结矿生产过程参数、冷强度以及冶金性能的影响,采用场发射扫描电镜(FESEM)和 X 射线能谱仪(EDS)分别研究烧结矿的微观结构与

矿物组成,为炼铁厂生产提供有效的试验数据和理论基础。

1 试验原料与方法

试验所用原燃料全部取自某钢厂烧结车间生产现场,包括 6 种铁矿粉、3 种熔剂和焦煤粉,试验用原料与熔剂的主要化学成分见表 1 和表 2,其中褐铁粉和焙烧粉铁品位较低,分别为 48.02%和 51.92%;澳粉和焙烧粉的 Al_2O_3 质量分数较高,分别为 2.80%和 2.04%;褐铁粉和中粉含有较多的结晶水;焙烧粉中的 CaO、MgO 等碱性氧化物含量较高。

烧结配料中,返矿配比为 30%,通过调整白云石的配比来调节烧结矿中 MgO 含量,从试验编号 A 到试验编号 E,烧结矿中 MgO 目标质量分数分别为 1.7%、1.9%、2.1%、2.3%、2.5%。固定烧结矿二元碱度 R 为 2.0、配碳量为 6.0%,进行配料计算。烧结试验在 $\phi 200\text{ mm}\times 550\text{ mm}$ 的烧结杯上进行,在点火温度为 $(1\ 050\pm 50)\text{ }^\circ\text{C}$ 、点火负压为 4 kPa 的条件下点火 120 s,烧结过程中负压保持在 10 kPa,当废气温度到达最高值后开始下降时记为烧结终点,冷却 10 min 后取出烧结饼。

表 1 试验用原料化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental materials										
品名	$w(\text{TFe})/\%$	$w(\text{FeO})/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{MnO})/\%$	$w(\text{TiO}_2)/\%$	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	烧损
巴西粉	63.17	0.50	5.89	0.13	0.09	1.26	0.33	0.12	7.66	2.05
澳粉	61.63	0.34	4.17	0.12	0.11	2.80	0.11	0.10	8.12	4.53
南非粉	64.56	1.44	4.49	0.37	0.20	1.44	0.09	0.26	3.22	1.11
褐铁粉	48.02	6.38	6.41	4.49	0.79	0.87	1.78	0.04	13.76	16.55
中粉	55.78	0.17	3.79	2.24	0.23	0.47	1.38	0.03	11.42	12.09
焙烧粉	51.92	6.18	5.54	5.88	8.84	2.04	1.43	0.12	7.32	6.56

表 2 熔剂化学成分

Table 2 Chemical composition of fluxing agents					
名称	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	水分/ $\%$	烧损
配料白灰	80.18	1.17	—	—	45.16
白云石	33.23	2.11	19.18	3.4	40.37
石灰石	53.85	1.05	—	4	12.19

2 试验结果与分析

2.1 烧结矿化学成分

根据试验方案,分别进行烧结试验,各方案烧结矿成分检验结果见表 3。烧结矿 TFe 变化不大,FeO 质量分数略有波动,最高达到 9.67%, Al_2O_3

质量分数较高,在 2.7%~2.9%之间,随着白云石的配比增加,MgO 质量分数逐渐增加,最高达 2.49%。

2.2 烧结矿冷态性能

上述 5 组烧结矿经落下后的粒度组成见表 4。烧结过程参数见表 5。

表 3 烧结矿化学成分
Table 3 Chemical composition of sinters

方案	$w(\text{TFe})/\%$	$w(\text{FeO})/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	R
A	55.05	9.15	12.65	1.72	6.45	2.71	1.96
B	56.41	7.97	11.72	1.89	5.95	2.75	1.97
C	54.39	9.67	13.18	2.11	6.66	2.88	1.98
D	54.79	8.56	12.30	2.28	6.12	2.77	2.01
E	54.23	9.10	12.07	2.49	6.07	2.81	1.99

表 4 烧结成品矿的粒度组成及性能
Table 4 Particle size composition and properties of finished sintered ore

方案	落下粒度分布/ $\%$					转鼓强度/ $\%$ ($>6.3\text{ mm}$)
	$>40\text{ mm}$	$25\sim40\text{ mm}$	$16\sim25\text{ mm}$	$10\sim16\text{ mm}$	$<10\text{ mm}$	
A	0	11.83	24.13	33.28	30.76	61.87
B	1.45	9.71	23.62	41.45	23.77	62.81
C	0	12.63	22.01	30.20	35.15	62.93
D	0	11.25	20.15	29.88	38.72	60.05
E	0	10.63	19.92	28.53	40.92	57.26

表 5 烧结过程参数
Table 5 Sinter process parameters

方案	时间/min	垂直烧结速度/ $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	烧成量/kg	成品率/ $\%$	利用系数/ $(\text{t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$
A	17.63	31.20	23.22	54.78	2.52
B	18.45	29.81	22.78	62.49	2.40
C	17.96	30.62	23.16	50.95	2.46
D	19.20	28.64	22.25	48.77	2.21
E	20.50	26.82	21.55	46.20	2.01

烧结矿的粒度过大或者过小都不利于高炉冶炼。由表 4 可知:随着 MgO 质量分数的增加,烧结矿中小于 10 mm 粒级含量先减小后增加,在 MgO 质量分数为 1.89% 时达到最低(23.77%);10~40 mm 的优质烧结矿质量则先增加后减小,峰值为 74.78%。

由表 5 可以看出,随着 MgO 含量的增加,烧结时间延长,垂直烧结速度降低;高铝烧结矿成品率均较低,仅为 62.49%,且随着 MgO 含量上升呈先升高后降低趋势,当 MgO 质量分数为 1.89% 时达到最高。Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 性能相近,且与 CaO 结合的能力更强,易与 CaO 生成高熔点化合物,使得初始液相生成温度升高,这是造成高铝烧结矿成品率低的主要原因^[16]。由于 MgO 的加入能减少 2Ca·SiO₂ 的生成,并固溶于 β-2Ca·SiO₂ 中,具有稳定 β-2Ca·SiO₂ 的作用,抑制 β-2Ca·SiO₂ 向 α-2Ca·SiO₂ 的晶型转变,增加了 Fe₂O₃ 与 CaO 的接触机率,促

进铁酸钙形成;另一方面,白云石分解是吸热反应,在配碳量相同的情况下,多配白云石需要消耗更多的热量,引起烧结温度的降低,减少了高温持续时间,成品率下降。

利用系数的变化是烧结矿成品率和垂直烧结速度变化的综合结果。MgO 是高熔点物质,随着 MgO 质量分数从 1.72% 增加至 2.49%,高熔点的复杂钙镁橄榄石含量增加,导致铁酸钙含量减少。因此,随着 MgO 含量的增加,烧结矿冷态性能指标下降,利用系数从 2.52 下降到 2.01 t/(m²·h)。

MgO 含量对烧结矿转鼓强度的影响如图 1 所示。随着高铝高碱度烧结矿中 MgO 含量的增加,烧结矿的转鼓强度增大,当烧结矿中 MgO 质量分数达到 2.11% 时,烧结矿转鼓强度达到峰值(62.93%)。这是因为少量添加 MgO,容易形成铁酸镁(MgO·Fe₂O₃),这是一种强度较高的铁酸盐矿物。此外,还会生成镁铁橄榄石(MgO·FeO·SiO₂)

之类矿物,可使硅酸盐熔化温度降低,减少玻璃质含量,增强硅酸盐液相黏结,微观结构及强度得到加强。

随着 MgO 质量分数进一步增加,烧结矿的转鼓强度开始降低。Al₂O₃、MgO 都是高熔点物质,在配碳量一定的条件下,随着 MgO 质量分数增加,初始液相形成温度上升,烧结过程中生成的黏结相减少,液相流动性变差^[17-18]。另外,由于 Fe²⁺ 和 Mg²⁺ 具有相似性质,彼此可以相互替代,Mg²⁺ 容易扩散进入到磁铁矿晶格中替代了磁铁矿中的一部分 Fe²⁺ 形成含镁磁铁矿,可以稳定磁铁矿晶格,抑制磁铁矿氧化为赤铁矿,导致铁酸钙含量减少,而 CaO-Fe₂O₃ 体系是高铝烧结矿的主要黏结相,具有强度高,还原性好等特点。因此,随着 MgO 质量分数由 2.11% 进一步提升到 2.49%,烧结矿转鼓强度下降。

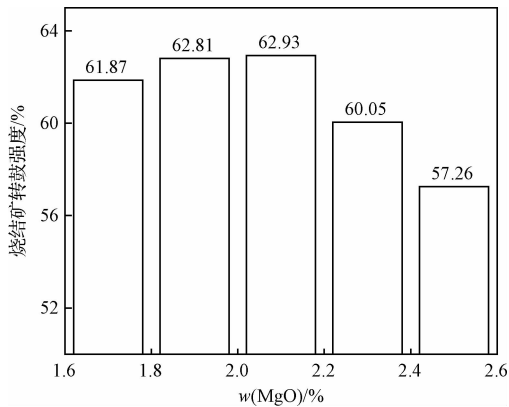


图 1 w(MgO)对烧结矿转鼓强度的影响
Fig. 1 Effect of w(MgO) on sinter drum index

2.3 烧结矿低温还原粉化性能

低温还原粉化性(RDI)指铁矿石在低温还原过程中发生碎裂粉化的特性。低温还原粉化的主要原因是烧结矿在高炉炉身上部块状区 500~600℃ 区间内,赤铁矿向磁铁矿晶型转变过程中伴随着体积膨胀和晶格畸变所产生的内应力,导致烧结矿破裂粉化,影响高炉上部的透气性。

MgO 含量对烧结矿低温还原粉化指数的影响如图 2 所示。在 MgO 质量分数为 1.72%~2.49% 范围内,烧结矿的低温还原粉化指数 RDI_{>3.15mm} 随着 MgO 含量的增加由 67.6% 上升到 74.3%,这表明 MgO 可以有效提高烧结矿低温还原粉化性能。主要原因是 MgO 可以起到稳固磁铁矿的作用,当 MgO 含量增加,Mg²⁺ 会渗入 Fe₃O₄ 晶格形成镁磁铁矿固溶体,完善了部分磁铁矿晶格,从而抑制磁铁

矿氧化为赤铁矿,减少二次赤铁矿的生成,改善烧结矿的低温还原粉化性能^[19-20]。此外,适量 Al₂O₃ 可以促进 SiO₂ 与铁酸钙的反应,抑制烧结矿中二次赤铁矿的生成,改善其黏结强度;而高铝烧结矿中过量的 Al₂O₃ 固溶于赤铁矿中,造成赤铁矿晶格发生畸变,赤铁矿向磁铁矿转变过程中发生体积膨胀,恶化烧结矿低温还原粉化性^[21],MgO 含量的增加能在一定程度上削弱 Al₂O₃ 带来的不利影响。

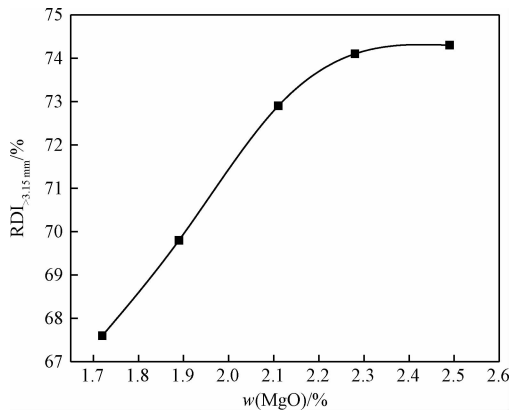


图 2 w(MgO)对低温还原粉化指数的影响
Fig. 2 Effect of w(MgO) on low-temperature reduction powdering index

2.4 烧结矿还原性能

烧结矿的还原性是模拟炉料上部进入高温区的条件,使用气体还原剂从烧结矿中夺取与铁结合氧难易程度的一种度量,它取决于烧结矿的物化特性,如粒度、孔隙率、化学成分和内部结构等。

5 种方案的烧结矿还原性能测试结果如图 3 所示。5 种方案的烧结矿的还原性能 RI 均较优,MgO 质量分数小于 2.1% 时,烧结矿还原性总体呈上升趋势;MgO 质量分数由 2.11% 增加到 2.49% 后,烧结矿还原性迅速下降到 79.08%。其原因与单晶体矿物的还原性与其晶格能量有关,晶格能低的晶体容易还原,晶格能高的晶体还原性差,赤铁矿的晶格能为 2 278 kJ,铁酸钙的晶格能为 2 593 kJ,而随着白云石的配比增加,还原性差的镁橄榄石生成量增加,其晶格能约为赤铁矿的 2 倍^[22],而还原性好的铁酸钙含量有所下降。另外,还原性与烧结矿的矿物组成有关,Mg²⁺ 易固溶于磁铁矿、铁酸钙中,随着 MgO 含量进一步增加,使得 Mg²⁺ 固溶量上升,降低磁铁矿氧化速率,铁酸钙含量减少,削弱了烧结矿的还原性。

2.5 烧结矿的微观结构

采用 Nova400 NanoSEM 型场发射扫描电子显

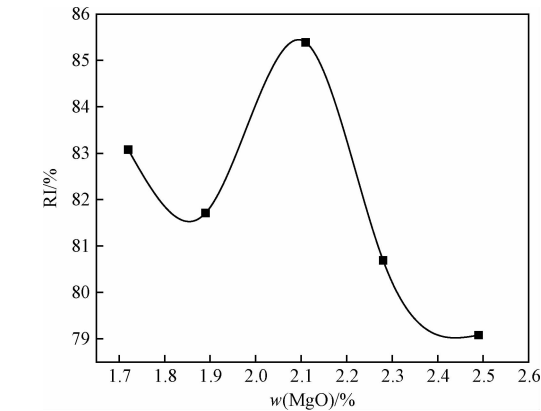


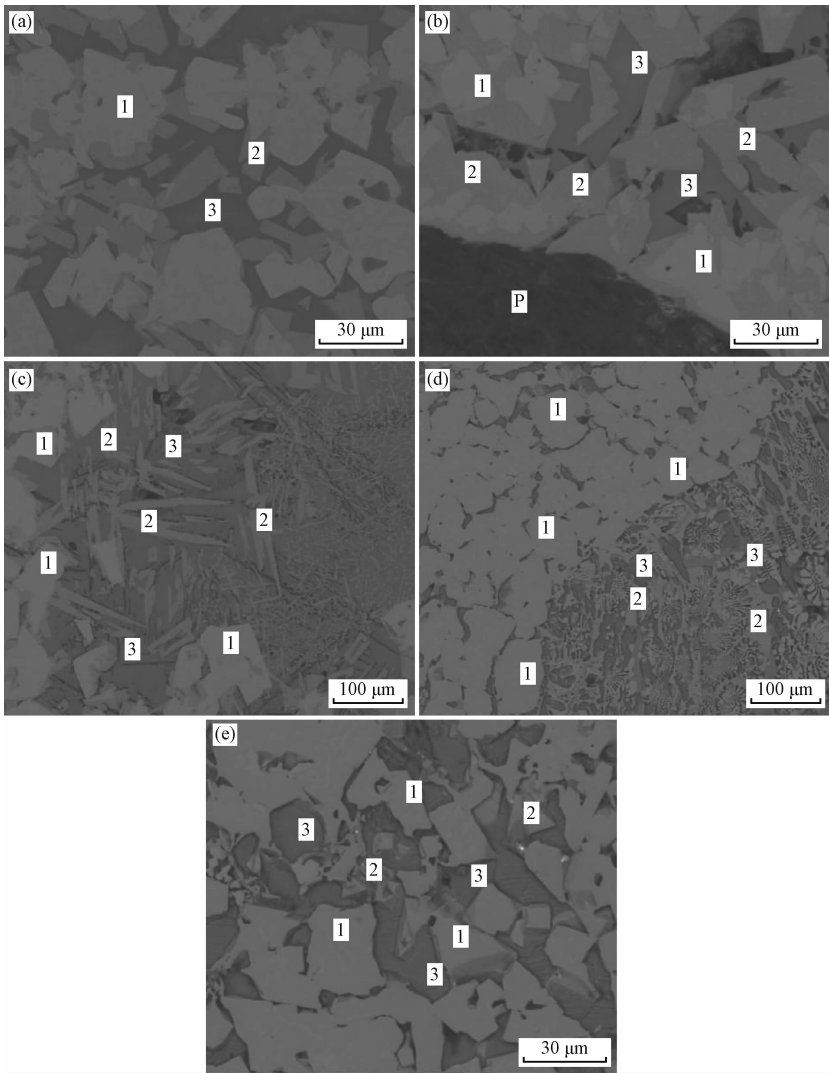
图 3 $w(\text{MgO})$ 对烧结矿还原性的影响

Fig.3 Effect of $w(\text{MgO})$ on reducibility index of sintered ore

显微镜(FESEM)-X 射线能谱仪(EDS)对烧结杯试

验得到的烧结矿进行了微观分析和矿相研究。首先用环氧树脂热镶样,然后对样品进行预磨,使之具有 1~3 mm 的横断面,再用抛光剂配加 40 倍的清水抛光并制成光片。不同 MgO 含量烧结矿电子显微镜图像如图 4 所示,对 MgO 质量分数为 2.11% 的烧结矿进行 X 射线能谱分析,主要矿物磁铁矿(1 点)、铁酸钙(2 点)、硅酸盐(3 点)的成分组成如图 5 所示。

由图 4 可以知,高碱度高铝烧结矿的主要黏结相是钙铝硅铁酸盐(SFCA),当 MgO 质量分数较低时, Fe_3O_4 与铁酸钙紧密胶结,液相生成量较少,铁酸钙多呈板块状,针柱状较少;当 MgO 质量分数达到 2.11% 后,氧化铁与铁酸钙紧密胶结,液相生成量较大,针柱状结构发达,并与硅酸盐形成交织结



P—孔洞； 1—磁铁矿； 2—铁酸钙； 3—硅酸盐。

(a) $w(\text{MgO})=1.72\%$ ； (b) $w(\text{MgO})=1.89\%$ ； (c) $w(\text{MgO})=2.11\%$ ； (d) $w(\text{MgO})=2.28\%$ ； (e) $w(\text{MgO})=2.49\%$ 。

图 4 $w(\text{MgO})$ 对烧结矿微观结构的影响

Fig.4 Effect of $w(\text{MgO})$ on microstructure of sinters

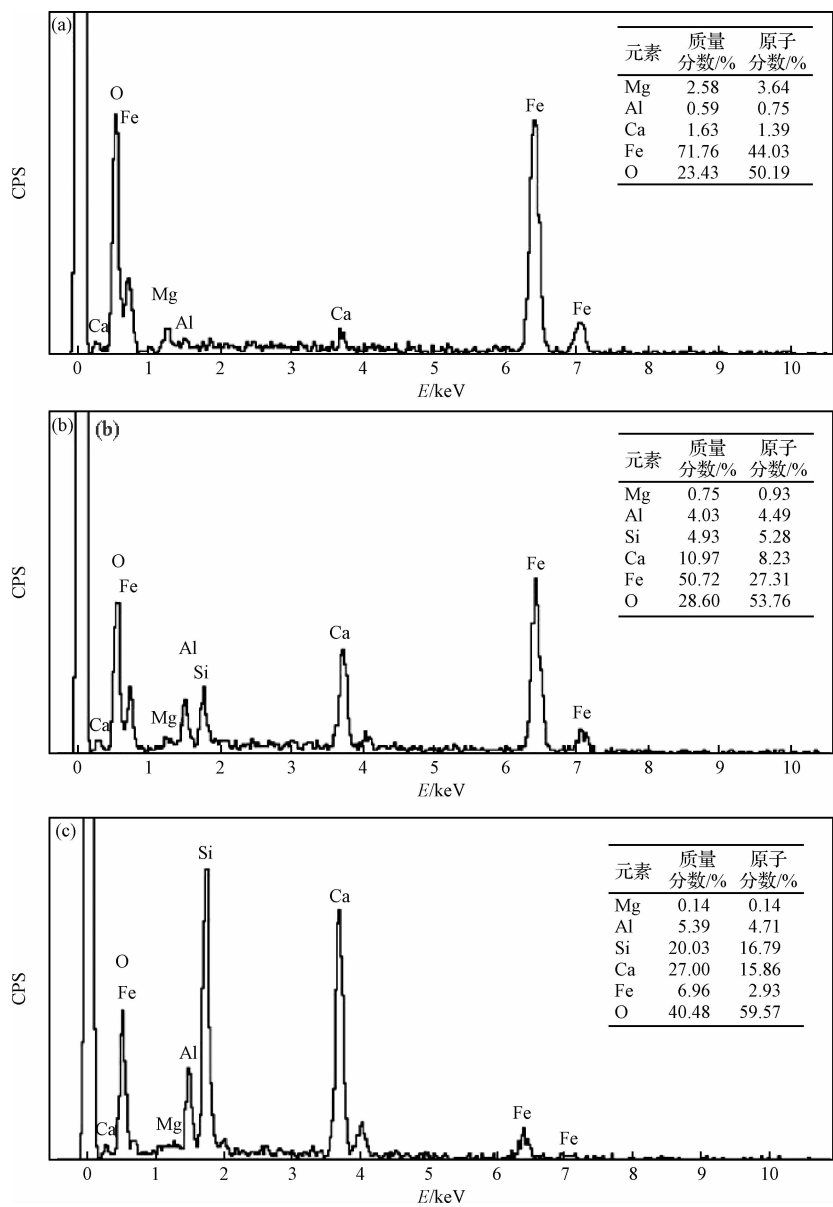


图 5 烧结矿能谱图
Fig. 5 Energy spectrum of sinter

构;当 MgO 质量分数进一步增加,铁酸钙生成量减少,块状结构逐渐增加。烧结的本质是混合料中的部分物料熔融产生液相并黏结其他未熔矿物而生成烧结矿的造块工艺,液相生成是烧结成矿的基础,过高 MgO 含量的不利于烧结液相生成与流动,抑制黏结相黏结,不利于烧结矿机械强度提高。

适量添加 MgO 对于高铝高碱度烧结矿可以有效促进铁酸钙的生成,而过量的 MgO 又会抑制黏结相的形成。过高的 MgO 含量会使得初熔相温度上升,熔体过热度降低,铁酸钙聚集生成速度降低^[22]。此外,还会在赤铁矿周围形成磁铁矿,阻碍

Fe₂O₃ 与 CaO 接触,恶化铁酸钙生成条件。

由图 5 可以看出,Mg²⁺ 很少固溶到铁酸盐与硅酸盐中,而大部分固溶到磁铁矿中并替代 Fe²⁺,最高达 3.64%,生成具有反尖晶石结构的 (Mg_{1-x},Fe_x)O • Fe₂O₃,其中 Mg²⁺ 不在四面体中,而在八面体孔隙中形成 [MgO₆],Fe³⁺ 一半在四面体间隙中形成 [FeO₄],另一半在八面体孔隙中形成 [FeO₆]^[23-25]。在低温条件下,(Mg_{1-x},Fe_x)O • Fe₂O₃ 比磁铁矿结构更加稳定,抑制了烧结矿降温过程中 Fe₃O₄→Fe₂O₃ 氧化过程的相变,减少了二次赤铁矿的生成,进而提高了烧结矿的低温还原粉化性能。

3 结 论

(1)MgO 质量分数从 1.72%增加到 2.49%时,高碱度高铝烧结矿成品率先上升后下降,垂直烧结速度、利用系数有所降低;当 MgO 质量分数为 2.11%时,烧结矿转鼓强度达到最高,其质量分数无论是低于还是高于 2.11%都会使转鼓强度下降。

(2)MgO 含量的增加有利于提高烧结矿的低温还原粉化性,当 MgO 质量分数超过 2.11%时,生成的镁橄榄石增加,其晶格能约为赤铁矿的 2 倍,导致烧结矿还原性下降。

(3)微观结构分析表明:Mg²⁺固溶在磁铁矿中较多,最高达 3.64%,形成的(Mg_{1-x},Fe_x)O·Fe₂O₃有利于抑制磁铁矿的氧化,减少二次赤铁矿的生成,提高烧结矿冶金性能。

(4)提高 MgO 含量对提高高炉渣的流动性与脱硫能力有利,但对于烧结矿而言,MgO 含量要适中,过高会恶化烧结矿质量不利于高炉炼铁,建议现场控制 MgO 质量分数为 2.1%,烧结矿各项指标最佳。

参考文献:

[1] 杜亮,韩秀丽,张全胜,等. 外矿型烧结矿矿相结构与冶金性能的定量关系[J]. 钢铁, 2020, 55(6): 38. (DU Liang, HAN Xiu-li, ZHANG Quan-sheng, et al. Quantitative relation between mineralogical structure and metallurgical properties of sinter of import iron ore [J]. Iron and Steel, 2020, 55(6): 38.)

[2] 胡长庆,韩涛,师学峰. 含铝铁酸钙 CFA 的生成行为[J]. 钢铁, 2020, 55(8): 70. (HU Chang-qing, HAN Tao, SHI Xue-feng. Formation behavior of calcium ferrite containing aluminum[J]. Iron and Steel, 2020, 55(8): 70.)

[3] 张汉泉. 烧结球团理论与工艺[M]. 北京:化学工业出版社, 2015. (ZHANG Hai-quan. Theory and Technology of Sintering and Pelletizing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.)

[4] 公言国,王广,李华,等. 高铝烧结矿中 MgO 的影响研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(1): 76. (GONG Yan-guo, WANG Guang, LI Hua, et al. Study on the influence of MgO on high-alumina sinter [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015, 35(1): 76.)

[5] 杨福. MgO 含量对高铝烧结矿冶金性能的影响[J]. 云南冶金, 2015, 44(3): 37. (YANG Fu. The effect of MgO content in the metallurgical performance of high-alumina sintered ore[J]. Yunnan Metallurgy, 2015, 44(3): 37.)

[6] 杨福,吴志清,程建文,等. w(MgO)含量对高炉高铝渣高温性能的影响[J]. 钢铁研究, 2011, 39(1): 4. (YANG Fu,

WU Zhi-qing, CHENG Jian-wen, et al. Effect of w(MgO) on high temperature properties of high alumina blast furnace slag[J]. Research on Iron and Steel, 2011, 39(1): 4.)

[7] 苏立新,吴胜利,翟晓波,等. 巴西某高硅铁矿粉对烧结黏结相流动性及劣质矿物的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(1): 18. (SU Li-xin, WU Sheng-li, ZHAI Xiao-bo, et al. Effect of high-silica iron ore from Brazil on fluidity and inferior minerals of sintered binding phase[J]. China Metallurgy, 2020, 30(1): 18.)

[8] Panigrahy S C, Verstraeten P, Dilewijn J. Influence of MgO addition on mineralogy of iron ore sinter[J]. Metallurgical Transactions, 1984, 15B(1): 23.

[9] Srinivas Dwarapudi, Tamal K Ghosh, Vilas Tathavadkar, et al. Effect of MgO in the form of magnesite on the quality and microstructure of hematite pellets[J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 112: 55.

[10] ZHU De-qing, CHUN Tie-jun, PAN Jian, et al. Influence of basicity and MgO content on metallurgical performances of Brazilian specularite pellets[J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 125: 51.

[11] 郭玉峰 郭兴敏. MgO 对赤铁矿粉矿烧结产物低温还原过程的影响[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(9): 697. (GUO Yu-feng, GUO Xing-min. Effect of MgO on low temperature reduction process of hematite fines sinter[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(9): 697.)

[12] 姜鑫,吴钢生,魏国,等. MgO 对烧结工艺及烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁, 2006, 41(3): 8. (JIANG Xin, WU Gang-sheng, WEI Guo, et al. Effect of MgO on sintering process and metallurgical properties of sinter[J]. Iron and Steel, 2006, 41(3): 8.)

[13] 王煜,何志军,湛文龙,等. 富氢气氛下不同含铁炉料的还原行为[J]. 钢铁, 2020, 55(7): 34. (WANG Yu, HE Zhi-jun, ZHAN Wen-long, et al. Reduction behavior of iron-bearing burdens in hydrogen-rich stream[J]. Iron and Steel, 2020, 55(7): 34.)

[14] 吴胜利,韩宏亮,姜伟忠,等. 烧结矿中 MgO 作用机理[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(4): 428. (WU Sheng-li, HAN Hong-liang, JIANG Wei-zhong, et al. MgO interaction mechanism in sinter[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(4), 428.)

[15] 范晓慧,李文琦,甘敏,等. MgO 对高碱度烧结矿强度的影响及机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(9): 3325. (FAN Xiao-hui, LI Wen-qi, GAN Min, et al. Influence and mechanism of MgO on strength of high basicity sinter[J]. Journal of Central South University(Natural Science), 2012, 43(9): 3325.)

[16] 宋鹤锴,吴胜利,阙志刚,等. 赤铁精粉配比对烧结矿强度的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(1): 8. (SONG He-kai, WU Sheng-li, QUE Zhi-gang, et al. Effect of ratio of hematite concentrate on strength of sinter[J]. Iron and Steel, 2019, 54(1): 8.)