

MgO/Al₂O₃ 对烧结矿冶金性能的影响

潘向阳^{1,2}, 龙跃^{1,2}, 李神子^{1,2}, 马保良³, 杜培培^{1,2}

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063210; 2. 华北理工大学现代冶金技术教育部重点实验室, 河北唐山 063210; 3. 邢台钢铁有限责任公司, 河北邢台 054027)

摘要: 采用实验室烧结杯试验装置, 研究 MgO/Al₂O₃ 在 0.8~1.2 时, MgO/Al₂O₃ 对烧结矿强度、粒度组成、RDI 和 RI 的影响, 采用金相显微镜和 X-射线衍射仪对烧结矿微观结构和矿物组成进行分析。表明: 随着 MgO/Al₂O₃ 的增加, 烧结矿强度呈先升高后降低的趋势, 且当 MgO/Al₂O₃ 为 1.0 时, 强度最好, 10~40 mm 粒度所占比例为 58.85%。随着 MgO/Al₂O₃ 由 0.8 增加到 1.2 的过程中, 烧结矿 RDI 得到改善, 还原性变差。当 MgO/Al₂O₃ 在 0.9~1.0 时, 球团矿微观形貌和矿物组成较好, 在此范围内, 赤铁矿和复合铁酸钙数量较多, 强度较好。在用进口矿和本地磁铁矿搭配烧结时, MgO/Al₂O₃ 控制在 0.9~1.0 范围内, 微观形貌和冶金性能较好。

关键词: 烧结矿; MgO/Al₂O₃; 冶金性能; 矿物组成

中图分类号: TF046.6 **文章标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2019)04-0100-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.04.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of MgO/Al₂O₃ on Metallurgical Properties of Sinter

Pan Xiangyang^{1,2}, Long Yue^{1,2}, Li Shenzi^{1,2}, Ma Baoliang³, Du Peipei^{1,2}

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Modern Metallurgical Technique Key Laboratory of Ministry of Education, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 3. Xingtai Iron and Steel Co., Ltd., Xingtai 054027, Hebei, China.)

Abstract: The effect of MgO/Al₂O₃ on the metallurgical properties of sinter was studied by laboratory sintering cup test device. The effects of MgO/Al₂O₃ on sinter strength, particle size composition, RDI and RI were studied in the range of 0.8 to 1.2. Microstructure and mineral composition of sinter were analyzed by metallographic microscope and X-ray diffraction. With the increase of MgO/Al₂O₃, the strength of sinter increases first and then decreases. When MgO/Al₂O₃ is 1.0, the strength is the best, and the proportion of 10 to 40 mm particle size is 58.85%. With the increase of MgO/Al₂O₃ from 0.8 to 1.2, the RDI of sinter is improved and the reducibility is worse. When MgO/Al₂O₃ is in the range of 0.9 to 1.0, the micro-morphology and mineral composition of pellets are better. Within this range, hematite and composite calcium ferrite have more quantity and better strength. When sintering with imported ore and local magnetite, MgO/Al₂O₃ is controlled in the range of 0.9 to 1.0 in order to obtain better micro-morphology and metallurgical properties.

Key words: sinter, MgO/Al₂O₃, metallurgical properties, mineral composition

收稿日期: 2019-02-21

基金项目: 河北省科技计划项目(编号: 17217691D)。

作者简介: 潘向阳(1991—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生。研究方向: 炼铁工艺, E-mail: 925049860@qq.com; 通讯作者: 龙跃(1976—), 男, 重庆忠县人, 教授, 硕士研究生导师。研究方向: 炼铁工艺、冶金固体废物综合利用。E-mail: longyue@ncst.edu.cn。

0 引言

目前,我国炉料结构的主要模式为高碱度烧结矿配加部分球团矿及天然块矿的结构^[1],烧结矿具有机械强度高、粒度均匀、高温冶金性能好和易储存等优点^[2-3]。烧结矿冶金性能对高炉降低焦比和提高生产效率起着至关重要的作用。近年来,进口矿比例的增加使炉料中 Al₂O₃ 含量增加,高 Al₂O₃ 含量导致炉渣脱硫能力降低,带来渣铁分离困难等一系列问题^[4-5],对高炉冶炼产生不利的影响,严重时还会导致高炉的不顺。对烧结矿来说,适宜的 MgO 含量能降低烧结矿的低温还原粉化率,提高烧结矿的强度和软熔温度等^[6-7]。在钢铁企业激烈的竞争之下,提高产量、质量和降低冶炼成本成为重中之重。因此,在特定原料条件下寻求烧结矿中适宜的 MgO/Al₂O₃ 至关重要。

烧结矿的冶金性能主要取决于烧结矿的矿物组成和微观结构,而微观结构又取决于烧结矿混合料的化学成分。为了满足高炉对烧结矿质量的要求,必须对烧结矿混合料中的 MgO/Al₂O₃ 进行优化,以获得最优的冶金性能。当前国内外对改善烧结矿冶金性能进行了较多的研究,武轶等^[8]研究了烧结矿中适宜 MgO 含量,研究得出:随着 MgO 含量的降低,烧结固体燃料耗降低,并改善烧结矿强度和提高烧结成品率。王喆等^[9]研究 MgO/Al₂O₃ 对烧结矿矿物组成及冶金性能的影响,研究得出: MgO/Al₂O₃ 在

1.06~1.22 时,烧结矿具有较好的矿物组成,纤维状复合铁酸钙含量较高,同时, MgO/Al₂O₃ 影响烧结矿的矿物组成,进而影响烧结矿的还原性。但采用烧结矿粒度、建立矿相组成、显微结构与综合冶金性能之间的协同调控机制研究 MgO/Al₂O₃ 对烧结矿冶金性能的影响并不多见。为此笔者在提高烧结矿质量、产量和降低冶炼成本的前提下,确定烧结矿中适宜的 MgO/Al₂O₃ 范围,以期改善烧结矿冶金性能,优化炉料结构提供依据。

1 试验

1.1 试验原料

烧结混合料一般包括铁矿粉、熔剂和燃料,原燃料的化学成分和燃料的工业分析如表 1 和表 2 所示。表 1 中,研山精粉和司家营精粉为本地铁矿粉,巴卡粗粉、一钢粉和澳粉为进口铁矿粉,进口铁矿粉中 Al₂O₃ 含量相对较高。由表 2 可知,焦粉和煤粉的挥发分分别为 1.36% 和 8.29%,固定碳含量分别为 84.82% 和 74.77%,质量相对较好。试验原料的粒度组成如表 3 所示,烧结使用的矿粉大部分为进口富矿粉,有害杂质较少,矿粉粒度相对于本地磁铁矿来说较粗,有利于改善烧结料层的透气性,提高生产效率。白云石和石灰石中都有较大的颗粒,>2.5 mm 的颗粒分别占 19.75% 和 17.99%,在烧结配料过程中应把较大颗粒筛除,以免这些大颗粒导致烧结矿的化学成分产生偏析,进而保证烧结矿的化学成分稳定。

表 1 烧结原燃料的主要化学成分
Table 1 Chemical composition of sintering raw and fuel materials %

种类	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	H ₂ O	烧损
研山精粉	65.95	5.34	0.42	0.42	0.57	0.052	20.79	3.59	-1.48
司家营精粉	66.05	5.96	0.45	0.36	0.42	0.14	22.92	6.50	-2.29
巴卡粗粉	64.93	2.05	0.20	0.058	1.20	0.094	0.79	6.11	1.98
一钢粉	57.66	7.05	0.40	0.47	2.14	0.14	0.089	4.30	4.98
澳粉	61.16	4.93	0.23	0.14	2.42	0.087	0.49	5.68	3.68
白云石	0.11	1.76	29.44	21.39	0.26	0.0078	0.12	3.18	45.55
石灰石	0.42	5.19	47.26	3.56	1.65	0.071	0.11	3.33	40.54
白灰	0.19	2.16	72.61	7.13	0.65	0.031	0.018	15.2	23.19
焦粉	0.84	7.05	0.74	0.84	5.03	0.20	0.00	9.53	84.81
煤粉	0.54	6.44	1.14	0.13	4.87	0.27	0.96	9.22	85.46
返矿	56.68	5.22	9.78	2.03	2.20	0.13	10.61	0.84	-0.91

表 2 焦粉和煤粉的工业分析
Table 2 Industrial analysis of coke powder and pulverized coal %

种类	V _{daf}	A _d	F _{cd}
焦粉	1.36	13.70	84.82
煤粉	8.29	17.57	74.77

1.2 试验方法

将铁矿粉、熔剂、燃料和返矿按照比例加水混匀,其中烧结混合料中水分控制在 7.5%,混匀后进行制粒、烧结,试验结束后对烧结矿进行破碎,然后检测其冶金性能,如粒度组成、落下强度、转鼓强度、

低温还原粉化和还原性等,并利用 XRD 和金相显微镜等对其微观结构、矿物组成进行分析。不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的烧结试验配比方案如表 4 所示。表 4 中用澳粉和白云石来调节烧结混合料的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$,其中 1[#]~5[#]对应的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 分别为 0.8、0.

9、1.0、1.1 和 1.2。试验过程中研山精粉、司家营精粉、巴卡粗粉、一钢粉、白灰和返矿分别固定为 13.70%、4.50%、20.00%、2.50%、3.85% 和 10%,用石灰石和白灰调节烧结矿的碱度,其中碱度固定在 2.0。

表 3 烧结原料的粒度组成

Table 3 Particle size composition of sintered raw materials

种类	占比/%					
	>5 mm	2.5~5 mm	1~2.5 mm	0.3~1 mm	0.150~0.3 mm	-0.150 mm
研山精粉	0.00	0.00	0.10	1.07	1.65	97.18
司家营精粉	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100
澳粉	27.67	16.27	20.76	13.30	5.69	16.31
巴卡粗粉	27.55	16.24	28.24	14.30	5.95	7.72
一钢粉	39.12	12.80	19.46	11.92	4.50	12.20
白云石	0.00	19.75	49.46	13.77	3.79	13.23
石灰石	0.30	17.69	41.99	20.24	5.95	13.83
白灰	0.00	0.36	31.18	15.84	7.47	45.15
焦粉	31.96	13.91	24.78	14.80	4.99	9.56
煤粉	38.91	17.27	27.40	11.20	2.65	2.57
返矿	58.96	38.02	1.26	0.07	0.24	1.45

表 4 不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的烧结试验配比方案Table 4 Matching scheme of sintering test with different $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

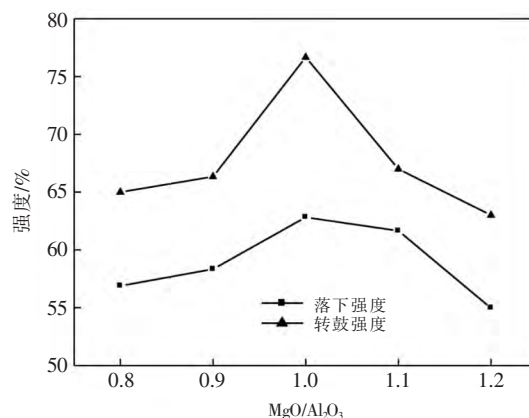
方案	配比/%											$\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$
	研山精粉	司家营精粉	巴卡粗粉	一钢粉	澳粉	白云石	石灰石	白灰	焦粉	煤粉	返矿	
1 [#]	13.70	4.50	20.00	2.50	27.94	2.04	9.65	3.85	3.17	2.65	10.00	0.8
2 [#]	13.70	4.50	20.00	2.50	27.79	2.84	9.00	3.85	3.17	2.65	10.00	0.9
3 [#]	13.70	4.50	20.00	2.50	27.59	3.69	8.35	3.85	3.17	2.65	10.00	1.0
4 [#]	13.70	4.50	20.00	2.50	27.40	4.52	7.71	3.85	3.17	2.65	10.00	1.1
5 [#]	13.70	4.50	20.00	2.50	27.20	5.34	7.09	3.85	3.17	2.65	10.00	1.2

2 试验结果与分析

2.1 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿强度的影响

$\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿转鼓强度和落下强度的影响如图 1 所示。

由图 1 可知,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加,烧结矿的转鼓强度和落下强度均呈先升高后降低的趋势,当 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为 1.0 时,均取得最大值,分别为 76.67% 和 62.84%。由于 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 增加,烧结混合料中 MgO 含量也增加,适宜的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 在烧结过程中能够生成更多的低熔点化合物,能生成适量的液相使烧结矿固结成块,从而使烧结矿的强度增加^[4]。随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 持续增加,烧结混合料中 MgO 含量过高,过量的 Mg^{2+} 会取代 Fe^{2+} 在晶格中的空位,形成高熔点的含镁磁铁矿,导致铁酸钙生成数量降低。因此,在燃料比不变的情况下,过量的 MgO 会使粘结相降低,影响烧结矿强度。

图 1 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿强度的影响Fig.1 Effect of $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on the strength of sinter

2.2 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿粒度组成的影响

众所周知,烧结矿的粒度过大会阻碍煤气流与烧结矿的接触面积,使烧结矿的还原率降低,不利于高炉冶炼,当烧结矿粒度过小时,会使炉内料柱的透

气性变差,为了提高入炉原料的性能,应提高 10~40 mm 烧结矿的占比。不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的烧结矿 10~40 mm 粒级所占比例如图 2 所示。

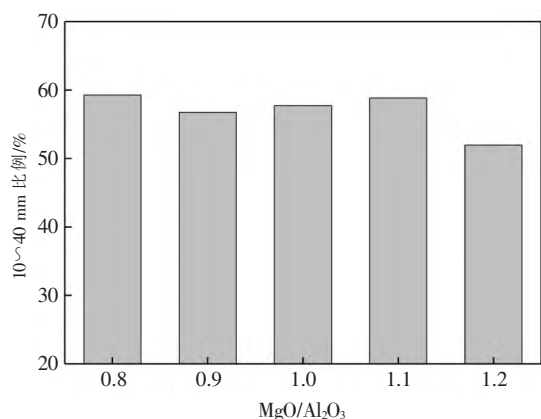


图 2 不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的烧结矿 10~40 mm 粒级所占比例

Fig.2 Ratio of 10 to 40 mm granularity of sinter with different $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

由图 2 可知,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 由 0.8 增加到 1.1 的过程中,10~40 mm 烧结矿粒级所占比例变化不大,大约维持在 55%~60%。当 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为 1.1 时,所占比例为 58.85%,当 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为 1.2 时,所占比例为 51.96%。 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 过大时,10~40 mm 烧结矿粒级所占比例降低,这是因为 MgO 含量过高,导致玻璃质增加,使烧结矿强度降低,粉末增加。由此可知,当 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 在 0.8~1.1 时,烧结矿的粒度组成相对较好。

2.3 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿低温还原粉化性能的影响

低温还原粉化是指矿石在高炉上部区域会发生粉化现象,使高炉上部透气性变差,粉化的矿石会发生粘结现象,严重时还会导致高炉结瘤,因此烧结矿的低温还原粉化性能对高炉的冶炼十分重要。 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿低温还原粉化性能的影响如图 3 所示。由图 3 可知,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加,烧结矿的低温还原粉化指数 ($\text{RDI}_{+3.15}$) 呈逐渐升高的趋势, $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为 1.2 处,取得最大值为 83.29%。随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加, $\text{RDI}_{-0.5}$ 范围变化不大,在 4.5% 左右。在特定的 MgO 含量范围内, $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加能提高烧结矿的低温还原粉化性能,机理在于:适量的 Mg^{2+} 能进入磁铁矿晶格中并取代 Fe^{2+} 的空位,形成高熔点的含镁磁铁矿 ($\text{Mg} \cdot \text{Fe}$) $\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$,同时含镁磁铁矿不易被氧化,增加了 Fe_3O_4 的稳定性,即抑制了再生赤铁矿的生成^[1]。因此,适当提高 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 有助于改善烧结矿的低温还原粉化性能。

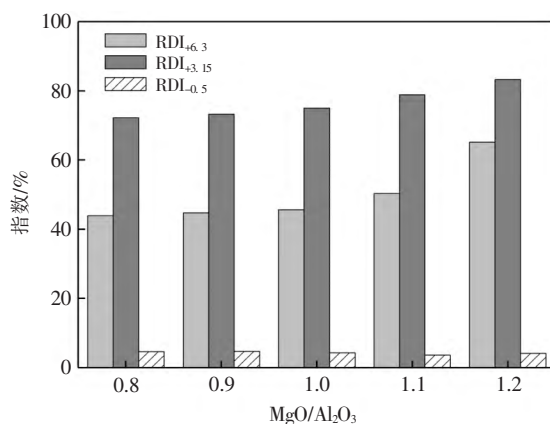


图 3 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿低温还原粉化的影响

Fig.3 Effect of $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on low-temperature reduction and pulverization of sinter

2.4 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿还原性能的影响

还原性就是利用还原煤气分离与铁结合的氧的难易程度,还原性较好的烧结矿,能降低焦比,有利于钢铁企业的节能减排。 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿还原性的影响如图 4 所示。

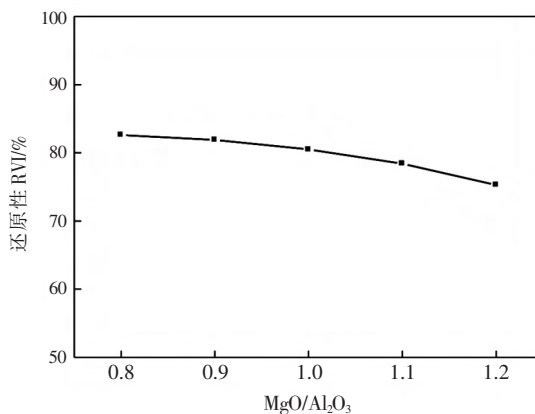


图 4 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿还原性的影响

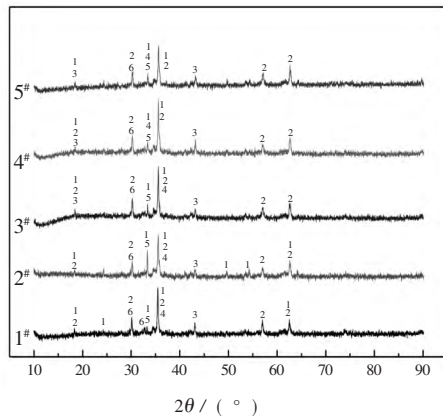
Fig.4 Effect of $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on the reduction of sinter

由图 4 可知,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加,烧结矿的还原性呈逐渐降低的趋势,还原性大约在 75%~83%,还原性最大值在 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为 0.8 处取得,为 82.6%。在特定的 MgO 含量范围内,当 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 较低时, Fe_2O_3 、 CaO 和 SiO_2 之间反应生成了适量的渣相,防止了 SiO_2 溶解到铁酸钙中,使铁酸钙生成数量增加,提高了烧结矿的还原性能^[2]。随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的持续增加,烧结矿的还原性能变差,是因为过量的 MgO 在反应过程中会生成大量高熔点的铁酸镁,使铁酸钙生成数量降低,而铁酸钙的还原

性较好,因此 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加使烧结矿的还原性变差。

2.5 不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的烧结矿 X-射线衍射分析

烧结矿中不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的 XRD 衍射图谱如图 5 所示,其中 1[#]~5[#] 对应的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 分别为 0.8、0.9、1.0、1.1 和 1.2。



1-赤铁矿;2-磁铁矿;3-含镁磁铁矿;4-铁酸二钙;5-铁酸二钙;6-硅酸盐

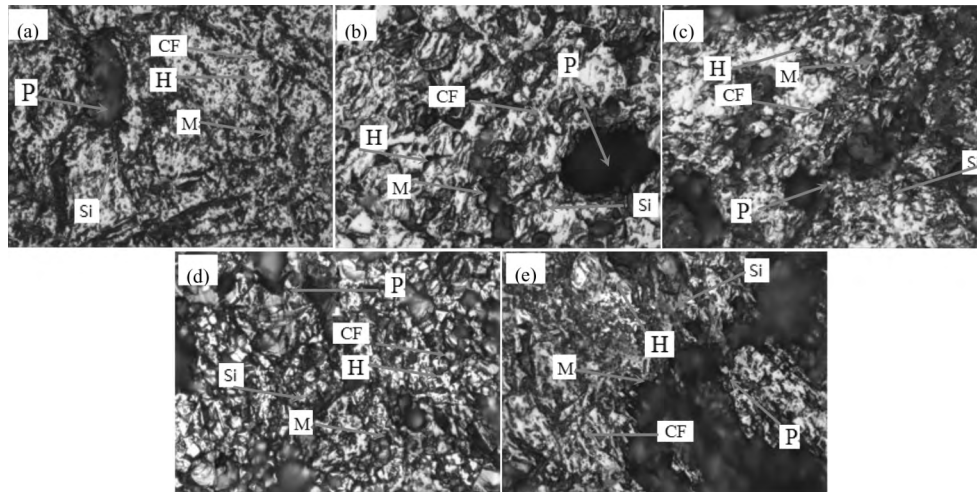
图 5 不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的烧结矿 X-射线衍射图谱

Fig.5 X-ray diffraction picture of sinter with different $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

由图 5 可知,不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的烧结矿物组成基本相同,物质含量变化不大。烧结矿矿物组成为:以赤铁矿(Fe_2O_3)和磁铁矿(Fe_3O_4)为主的铁氧化物、含镁磁铁矿($(\text{Mg} \cdot \text{Fe})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)、铁酸二钙(CaFe_2O_4)、铁酸二钙($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$)和硅酸盐(Ca-SiO_3 、 Ca_2SiO_4)等。当烧结矿 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 在 0.9~1.0 时,赤铁矿、磁铁矿和铁酸钙生成数量相对较多,有利于烧结矿冶金性能的提升。随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的持续增加, Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 的半径相差不大,在一定的温度范围内 Mg^{2+} 在晶格中很容易取代磁铁矿中 Fe^{2+} 的空位,形成高熔点的含镁磁铁矿($(\text{Mg} \cdot \text{Fe})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$),使铁酸钙生成数量降低,导致烧结矿强度降低,还原性变差^[13]。另一方面,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加,烧结矿中硅酸盐生成量也增加,增大了烧结矿的孔隙度,强度降低。

3 金相显微镜测定结果

在烧结成矿过程中会发生一系列的物理化学反应,生成各种液相和固相,也会生成一些有害物质。因此,需要不断改善其微观结构,以期最大限度地提高烧结矿质量。烧结矿的微观结构如图 6 所示。



P-孔; H-赤铁矿; M-磁铁矿; CF-铁酸钙; Si-硅酸盐

其中 a~e 对应的烧结矿 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 分别为 0.8、0.9、1.0、1.1 和 1.2

图 6 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿微观结构的影响

Fig.6 Microstructure of sinter with different $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

由图 6 可知,烧结矿物组成主要包括赤铁矿、磁铁矿、复合铁酸钙和硅酸盐等。a 图中赤铁矿分布较散乱,大量的铁酸钙分布于赤铁矿之间,气孔率增加。b 图和 c 图中赤铁矿成片紧密排列,适量的铁酸钙分布于赤铁矿之间,赤铁矿结晶较好。d 图和 e

图中赤铁矿分布较散乱,铁酸钙生成量降低。由图中物质变化量可知,适量的铁酸钙分布于赤铁矿之间时,赤铁矿结晶良好,成片联结。因为 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加,生成适量的铁酸钙,烧结矿多孔结构被液相填充和粘结,使烧结矿强度得到提高。当烧结矿

$\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 持续增加时,过量的 MgO 会生成高熔点的铁酸镁导致铁酸钙生成数量降低,从而使烧结矿强度降低。

4 结论

通过研究 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿冶金性能的影响规律,得出结论:

1) 随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的增加,烧结矿的转鼓强度和落下强度均呈先升高后降低的趋势,当 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为 1.0 时,强度最高。当 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为 1.2 时,10~40 mm 烧结矿所占比例降低。

2) 随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 由 0.8 增加到 1.2 的过程中,烧结矿的低温还原粉化指数呈逐渐升高的趋势,还原性指数呈逐渐降低的趋势,当烧结矿中 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 在 0.9~1.0 时,低温还原粉化性能和还原性能相对较好。

3) 当烧结矿 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 在 0.9~1.0 时,烧结矿中铁酸钙生成数量相对较多,高熔点的含镁磁铁矿生成量较低,矿物组成相对较好。在此范围内,烧结矿矿物组成中赤铁矿成片紧密排列,适量的铁酸钙分布于赤铁矿之间,赤铁矿结晶良好,烧结矿强度得到提升。

参考文献

- [1] Lin Chengcheng. Effect of burden structure on blast furnace smelting [N]. China Metallurgical News, 2016-03-24(005).
(林成城. 炉料结构对高炉冶炼的影响 [N]. 中国冶金报, 2016-03-24(005).)
- [2] Yu Shanshan, Wen Zhijun, Liu Dongliang, et al. Study on metallurgical properties of blast furnace burden in WISCO [J]. Iron and Steel Research, 2014, 42(5): 8-10.
(余珊珊, 文志军, 刘栋梁, 等. 武钢高炉炉料冶金性能的研究 [J]. 钢铁研究, 2014, 42(5): 8-10.)
- [3] Jiang Xin. Basic theoretical study on rational utilization of MgO -containing raw materials in blast furnace burden [D]. Shenyang: Northeast University, 2008.
(姜鑫. 高炉炉料中合理利用含 MgO 原料的基础理论研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.)
- [4] Chang Jiuzhu, Zhao Yong. Effect of Al_2O_3 on the properties of blast furnace slag of Tangshan Iron and Steel Co. [J]. Ironmaking, 2004(3): 10-13.
(常久柱, 赵勇. Al_2O_3 对唐钢高炉炉渣性能的影响 [J]. 炼铁, 2004(3): 10-13.)
- [5] Jiang Chunhe, Li Kejiang, Zhang Jianliang. Effect of $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio on the structure and properties of blast furnace slags: A molecular dynamics simulation [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2018(502): 76-82.
- [6] Guo He, Shen Fengman, Zhang Li, et al. Effect of MgO and coke blending on droplet properties of sinter [J]. Journal of Northeast University (Natural Science Edition), 2018, 39(7): 990-994.
(郭贺, 沈峰满, 张栢, 等. MgO 和矿焦混装对烧结矿熔滴性能的影响 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(7): 990-994.)
- [7] Wu Shengli, Han Hongliang, Jiang Weizhong, et al. Action mechanism of MgO in sinter [J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2009, 31(4): 428-432.
(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): 428-432.)
- [8] Wu Yi, Liu Zimin, Li Xiaojing, et al. Study on the appropriate MgO content in sinter [J]. Iron and Steel Research, 2016, 44(3): 6-8, 13.
(武轶, 刘自民, 李小静, 等. 烧结矿中适宜 MgO 含量的研究 [J]. 钢铁研究, 2016, 44(3): 6-8, 13.)
- [9] Wang Zhe, Zhang Jianliang, Zuo Haibin, et al. Effects of $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on mineral composition and metallurgical properties of sinter [J]. Sintered Pellets, 2013, 38(5): 1-4, 7.
(王喆, 张建良, 左海滨, 等. $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对烧结矿矿物组成及冶金性能的影响 [J]. 烧结球团, 2013, 38(5): 1-4, 7.)
- [10] Fan Xiaohui, Li Wenqi, Gan Min. Effect of MgO on the strength of high alkalinity sinter and its mechanism [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(9): 3325-3330.
- [11] Guo Yufeng. Study on the metallogenic mechanism of MgO inhibiting low-temperature reduction and pulverization of sinter [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2018.
(郭玉峰. MgO 抑制烧结矿低温还原粉化的成矿机理研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.)
- [12] Guo He. Study on the mechanism of the effect of MgO on sinter strength and reduction droplet properties [D]. Shenyang: Northeast University, 2016.
(郭贺. MgO 对烧结矿强度以及还原熔滴性能影响的机理研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2016.)
- [13] Zheng Anyang, Liu Zhengjian, Cang Daqiang. The effect of MgO on phase structure and soft melting dripping properties of titanium-bearing sinter [J]. Journal of Engineering Science, 2018, 40(2): 184-191.
(郑安阳, 刘征建, 苍大强. MgO 对含钛烧结矿相结构及软熔滴落性能的影响 [J]. 工程科学学报, 2018, 40(2): 184-191.)