

MgO/Al₂O₃ 质量比对褐铁矿型红土镍矿烧结成矿行为的影响

候三亚¹, 黄家豪¹, 张豆¹, 陈靖¹, 胡前盛², 罗骏¹, 饶明军¹

1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 广东广青金属科技有限公司, 广东 阳江 529500

中图分类号: TF815; TF046 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)01-0140-08

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.01.015

摘要 为了提高红土镍矿烧结矿的产质量指标, 基于热力学分析, 查明了 MgO/Al₂O₃ 质量比对高温烧结过程液相量及其黏度的影响; 再通过微型烧结试验探讨了镁/铝质量比对烧结矿的物相组成、黏结相强度的影响, 阐明其对褐铁矿型红土镍矿烧结成矿行为的影响; 最后通过烧结杯烧结扩大试验进行了有效性验证。微型烧结试验结果表明, 在烧结温度为 1 300 ℃、烧结气氛为 5% CO+95% N₂、二元碱度 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)=1.3$ 的条件下, $m(\text{MgO})/m(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.5\sim 0.8$ 范围内, 黏结相主要由钙镁黄长石和钙镁橄榄石构成, 强度超过 4 000 N/个。烧结杯验证试验表明, 镁/铝质量比由 0.5 提高至 0.7 时, 烧结矿的成品率无明显变化保持在 70% 左右, 但是其转鼓强度由 49.73% 提高至 56.67%, 烧结矿的转鼓强度得到有效改善, 适宜的镁/铝质量比为 0.6~0.7。

关键词 红土镍矿; 烧结成矿; MgO/Al₂O₃; 黏结相

引言

镍作为一种重要的金属元素, 具有优良的抗氧化和抗腐蚀性能, 被广泛应用于不锈钢、电池、电镀等领域^[1-3]。近年来, 随着已勘探硫化镍矿资源的逐渐消耗及新勘探硫化镍矿资源逐渐减少, 占镍资源总量 70% 的红土镍矿逐渐成为当前镍工业开发利用的重心^[4]。按照所处矿层分类, 红土镍矿可分为褐铁矿层、过渡层和腐泥土层三种, 其中褐铁矿型红土镍矿储量丰富, 占红土镍矿资源总量的 60% 左右^[5-6]。褐铁矿型红土镍矿具有高铁低镍的特点, 可采用烧结—高炉工艺生产低品位镍铁, 再用于 200 系不锈钢的生产^[7-8]。

烧结—高炉工艺处理低品位褐铁矿型红土镍矿具有工艺成熟、产量大、原料适应性强等优势, 但红土镍矿原料水含量高、化学成分波动大、含有 Al₂O₃ (>4%)、Cr₂O₃ (2%~5%)、MgO (0.5%~5%) 等高熔点氧化物, 导致烧结过程固体燃料消耗高、烧结矿转鼓强度低、返矿率大的问题, 高炉冶炼时还存在炉渣黏度大、渣铁分离困难等问题^[8-10]。因此, 提高红土镍矿烧结矿的产质量指标受到广泛关注。

为提高红土镍矿烧结矿产质量指标, 众多学者进行了研究。薛钰霄^[11]通过调节褐铁矿型红土镍矿中 (MgO+Al₂O₃)/SiO₂ 质量比达到改善烧结矿质量的目的, (MgO+Al₂O₃)/SiO₂ 质量比由 1.5 调节至 1.1 时, 烧结矿转鼓强度由 45.87% 提高至 49.64%, 提高了烧结矿的产质量指标。但现有研究中, 缺乏 MgO/Al₂O₃ 质量比对红土镍矿烧结矿产质量指标的影响。

在铁矿烧结中, 较高的 Al₂O₃ 会改变烧结矿的物相组成、微观结构, 恶化烧结矿的产质量指标和冶金性能, 在高炉冶炼时还会提高炉渣的黏度、造成渣铁分离困难^[12-14]。为了降低 Al₂O₃ 带来的负面影响, 通常会配入一定量的 MgO 调节 MgO/Al₂O₃ 质量比从而提高烧结矿的产质量指标。王喆^[15]通过烧结杯试验发现适宜的 MgO/Al₂O₃ 质量比可以提高烧结矿的转鼓强度和改善烧结矿的冶金性能。胡长庆^[16, 17]基于热力学计算和实验室试验查明了适宜的 MgO/Al₂O₃ 质量比有利于降低液相的有效生成温度、提高烧结液相的生成量和复合铁酸钙的硬度, 从而提高烧结矿的产质量指标。

本研究以低镁高铝的褐铁矿型红土镍矿为原料,

收稿日期: 2022-05-22

基金项目: 中南大学研究生创新项目资助 (1053320215529)。

作者简介: 候三亚 (1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为难处理资源综合利用。

通信作者: 罗骏 (1988—), 男, 博士后, E-mail: luojun2013@csu.edu.cn。

通过热力学分析和微型烧结试验研究了 MgO/Al₂O₃ 质量比对褐铁矿型红土镍矿烧结成矿行为的影响, 并采用烧结杯试验进行验证, 旨在为褐铁矿型红土镍矿烧结生产提供理论和技术指导。

1 原料性能与研究方法

1.1 原料

试验所用原料的化学成分见表 1, 燃料的工业分析见表 2。试验所用三种红土镍矿均来自于印度尼西亚

亚, 原料中镍含量较低、铁含量较高, 是典型的褐铁矿型红土镍矿。其中红土镍矿 1*和 2*用于烧结杯试验, 红土镍矿 3*用于微型烧结试验。原料中 MgO 含量较低, 但 Al₂O₃ 含量较高, 三种原料 MgO/Al₂O₃ 质量比分别为 0.08、0.41 和 0.08。所用熔剂为生石灰和蛇纹石粉, 生石灰用于调节烧结矿的二元碱度, 蛇纹石粉的 MgO 和 SiO₂ 含量较高, 用于调节烧结矿的 MgO/Al₂O₃ 质量比和 SiO₂ 含量。所用返矿包括高炉返矿和烧结返矿, 均来自生产现场。固体燃料为焦粉和无烟煤, 固定碳质量分数分别为 79.37% 和 83.80%。

表 1 原料的主要化学成分和烧损 (干基) %

Table 1 Main chemical composition and burning loss of raw materials

原料名称	TFe	Ni	Cr ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	烧损
红土矿-1*	47.88	0.53	3.33	0.69	4.66	0.58	6.62	1.66	0.11	11.55
红土矿-2*	47.72	0.54	5.64	0.65	3.34	1.65	3.98	2.79	0.13	11.03
红土矿-3*	48.37	0.81	3.22	0.80	0.57	0.64	7.89	2.50	0.20	12.29
生石灰	0.42	-	-	-	79.06	3.36	2.06	4.59	-	6.54
蛇纹石粉	14.64	1.00	1.17	0.27	2.69	25.20	1.55	30.73	0.04	14.15
高炉返矿	51.99	0.87	2.50	1.19	8.54	3.14	5.39	6.13	0.05	-
烧结返矿	52.02	0.86	2.43	1.19	8.46	3.28	5.30	5.97	0.04	-
焦粉	8.00	-	-	-	5.20	2.51	28.39	48.39	-	82.00
无烟煤	6.61	-	-	-	1.43	1.31	24.06	52.48	-	88.81

表 2 燃料的工业分析 %

Table 2 Proximate analysis of solid fuels

固体燃料	固定碳 (FC _{daf})	挥发分 (A _d)	灰分 (V _{daf})
焦粉	79.37	2.63	18.00
无烟煤	83.80	5.01	11.19

注: d 为干燥基, daf 为干燥无灰基。

1.2 研究方法

1.2.1 微型烧结试验

将红土镍矿干燥后磨细至 80% 低于 74 μm, 按照试验所需配入 CaO (以 Ca(OH)₂ 代替)、SiO₂、MgO 等分析纯试剂, 配加量及其主要化学成分见表 3。混合均匀后加适量水混匀, 在 5 MPa 压力下压制成尺寸为 10×10 mm 的圆柱形团块, 将团块干燥后在竖式管炉中进行焙烧, 焙烧温度为 1 300 ℃, 焙烧时间为 10 min, 焙烧气氛为 5%CO+95%N₂, 气体流量为 4 L/min。焙烧后的烧结团块经自动抗压机检测其黏结相强度, 并进行 X 射线分析和显微结构分析, 研究 MgO/Al₂O₃ 质量比对高铝褐铁矿型红土镍矿成矿行为的影响。

1.2.2 烧结杯试验

红土镍矿烧结工艺流程与传统铁矿烧结工艺流程相同。结合烧结现场生产情况, 返矿配比为 35.24% (高炉返矿 9.06%、烧结返矿 26.18%)、燃料配比为 6.70% (焦粉 1.74%、无烟煤 4.96%), 混合料水分为 19%, 固定烧结矿二元碱度为 R₂=1.3、SiO₂=6.5%, 研究不同 MgO/Al₂O₃ 质量比对烧结矿产质量指标的影响。

烧结杯试验方法是 将红土镍矿、熔剂、燃料和返矿按比例配料, 混合料混匀后在尺寸为 Φ600 mm×1 200 mm 的圆筒混合机中进行制粒, 制粒时间为 5 min。烧结杯试验在尺寸为 Φ180 mm×1 000 mm 的烧结杯中进行, 料层高度为 900 mm, 点火时间为 2 min、点火温度为 1 100 ℃、点火结束后保温 1 min、点火负压为 5 kPa、烧结负压为 10 kPa。烧结结束后, 在抽风负压为 5 kPa 的条件下冷却 3 min, 冷却后将烧结饼用辊式破碎机进行破碎, 破碎后的成品烧结矿用于成品率、转鼓强度、物相组成及微观结构等分析。

2 结果与讨论

2.1 热力学分析

与普通铁矿烧结相比, 红土镍矿烧结时需要配加

表 3 化学试剂配加量及混合料主要化学成分

Table 3 Chemical reagents and the main chemical composition of the mixture

No.	配加量/g					主要化学成分/%						
	红土矿-3 ⁺	Ca(OH) ₂	SiO ₂	MgO	TFe	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	R ₂	MgO/Al ₂ O ₃	
1	10	1.19	0.45	0	47.81	8.45	0.64	7.93	6.50	1.30	0.08	
2	10	1.20	0.46	0.11	47.27	8.45	1.58	7.84	6.50	1.30	0.20	
3	10	1.21	0.48	0.29	46.40	8.45	3.08	7.69	6.50	1.30	0.40	
4	10	1.24	0.49	0.48	45.99	8.45	3.82	7.63	6.50	1.30	0.50	
5	10	1.27	0.50	0.66	45.56	8.45	4.54	7.55	6.50	1.30	0.60	
6	10	1.29	0.52	0.84	44.75	8.45	5.94	7.42	6.50	1.30	0.80	

更多的固体燃料,导致红土镍矿烧结矿中含有较高的 FeO(>20%),涂义康等人^[8]以褐铁矿型红土镍矿为原料,研究了 FeO 含量对烧结矿质量的影响,研究结果表明烧结矿中 FeO 含量在 23%~26% 时烧结矿的综合指标较好。基于此在固定 $m(\text{FeO})=25\%$ 、 $R_2=1.3$ 、 $m(\text{SiO}_2)=6.5\%$ 、 $m(\text{Al}_2\text{O}_3)=8.0\%$,利用 FactSage8.1 热力学软件的 Equilib 模块计算不同 MgO/Al₂O₃ 质量比对液相生成量及其黏度的影响。图 1 为 MgO/Al₂O₃ 质量比对烧结液相生成量的影响,由图可知,液相生成量随着温度的升高而逐渐增加;在 1360 °C 以内,相同温度下,随 MgO/Al₂O₃ 质量比的增加,液相生成量呈先降低、升高再降低的规律。主要是因为当 MgO 含量较低时, MgO 会首先参与尖晶石相的生成,从而导致液相生成量降低。增加 MgO 的含量, MgO 会与 SiO₂、CaO 等反应生成低熔点的钙镁橄榄石和钙镁黄长石等化合物,温度升高时生成液相,强化液相固结,提高烧结矿的质量。此外, MgO 作为一种高熔点氧化物,含量过高时会提高液相的初始生成温度,液相生成量减少,导致烧结矿的质量降低。

图 2 为 MgO/Al₂O₃ 质量比对液相黏度的影响,结果表明,随着温度的升高,液相的黏度逐渐降低;在相

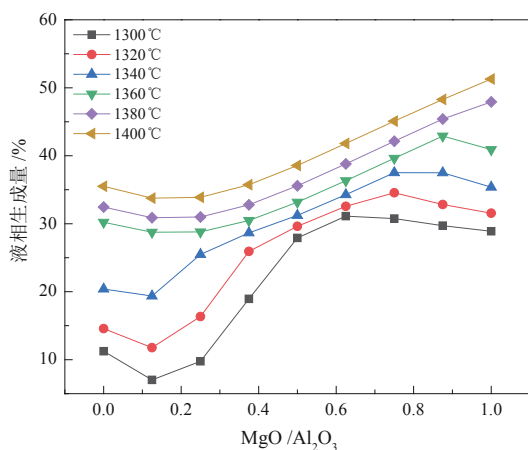


图 1 MgO/Al₂O₃ 质量比对液相生成量的影响
Fig. 1 Effect of MgO/Al₂O₃ mass ratio on generated amount of liquid phase

同温度下,随 MgO/Al₂O₃ 质量比的增加液相的黏度呈先降低再升高的规律,主要是因为 MgO 作为一种碱性氧化物,可以解离产生自由氧离子,从而破坏液相中复杂的硅酸盐网络结构,使液相的黏度降低^[18-19];另一方面 MgO/Al₂O₃ 质量比的增加可以降低液相的表面张力,降低液相的黏度,但是当 MgO/Al₂O₃ 质量比超过某一极限值时,分子表面能增加,会提高固液接触面的表面张力,降低液相的流动性,使液相的黏度增大^[20]。

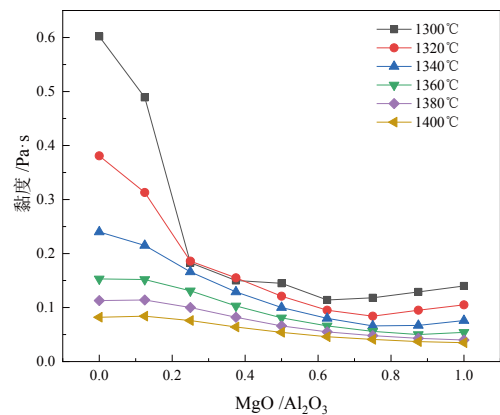


图 2 MgO/Al₂O₃ 质量比对液相黏度的影响
Fig. 2 Effect of MgO/Al₂O₃ mass ratio on liquid viscosity

热力学分析表明,可通过调节烧结混合料中适宜的 MgO/Al₂O₃ 质量比,提高液相的生成量、降低液相的黏度从而提高红土镍矿烧结矿的产质量指标。

2.2 微型烧结试验

基于热力学分析结果,通过微型烧结试验研究 MgO/Al₂O₃ 质量比对红土镍矿物相转变及黏结相强度的影响。不同 MgO/Al₂O₃ 质量比下烧结团块 XRD 分析结果如图 3 所示,结果表明,在 MgO/Al₂O₃ 质量比为初始比值 0.08 时,烧结团块的主要物相为尖晶石相、浮土体相和钙铝黄长石相,随着 MgO/Al₂O₃ 质量比的增加,烧结团块中生成钙镁橄榄石相和钙镁黄长石相。

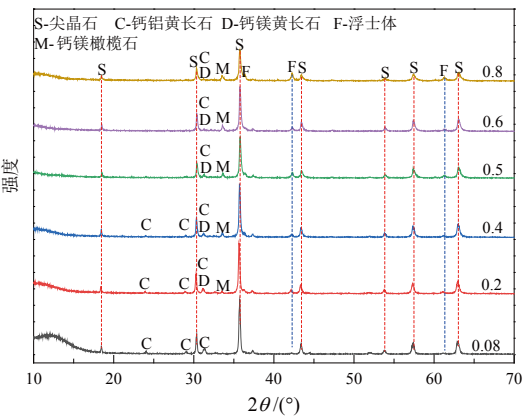


图 3 不同 MgO/Al₂O₃ 质量比下烧结团块 X 射线衍射图谱
Fig. 3 X-ray diffraction analysis of roasting products at different MgO/Al₂O₃ mass ratio

烧结团块的黏结相强度与 MgO/Al₂O₃ 质量比的关系如图 4 所示,随着 MgO/Al₂O 质量比的增加,烧结团块的黏结相强度先升高再降低。MgO/Al₂O₃ 质量比由 0.08 增加至 0.6 时,黏结相强度由 2 572.1 N/个提高至 4 599.9 N/个,继续提高 MgO/Al₂O 质量比,黏结相强度开始降低。结合热力学分析结果可知,主要是在 1 300 ℃ 时,MgO/Al₂O 质量比超过 0.6 以后烧结液相的生成量降低,液相黏度增加,从而降低了烧结团块的黏结相强度。

图 5 是 MgO/Al₂O₃ 质量比分别为 0.08、0.2、0.5 和 0.8 时烧结团块的微观结构,其中图 5a~5d 为光学显微镜照片,由图可知,随着 MgO/Al₂O₃ 质量比的增

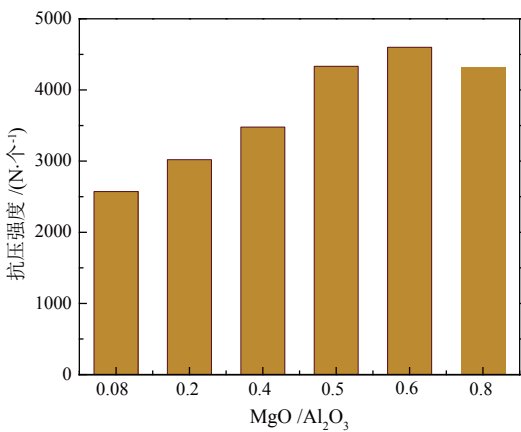


图 4 MgO/Al₂O₃ 质量比对烧结团块黏结相强度的影响
Fig. 4 Effect of MgO/Al₂O₃ mass ratio on the strength of the bonded phase of sinter

加,烧结团块的结构变得致密。图 5e~5h 为烧结团块的背散射电子图片,在不同 MgO/Al₂O₃ 质量比下,图中主要有 4 种颜色不同的区域,结合能谱结果可知,分别为铬铁尖晶石相(点 1、5、9、13)、铁尖晶石相(点 2、6、10、14)、浮士体相(点 3、7、11、15)和黏结相(点 4、8、12、16)。

随着 MgO/Al₂O₃ 质量比的增加,烧结团块中铁尖晶石相、浮士体相和黏结相中 Mg 含量逐渐增加。尖晶石相中 Mg 含量增加主要是因为 MgO 与 Al₂O₃、Fe₂O₃ 等反应生成 MgAl₂O₄、MgFe₂O₄ 等尖晶石相,促进了尖晶石相的生成;浮士体中 Mg 含量增加,是因为 MgO 固溶于浮士体中生成镁铁浮士体相;黏结相

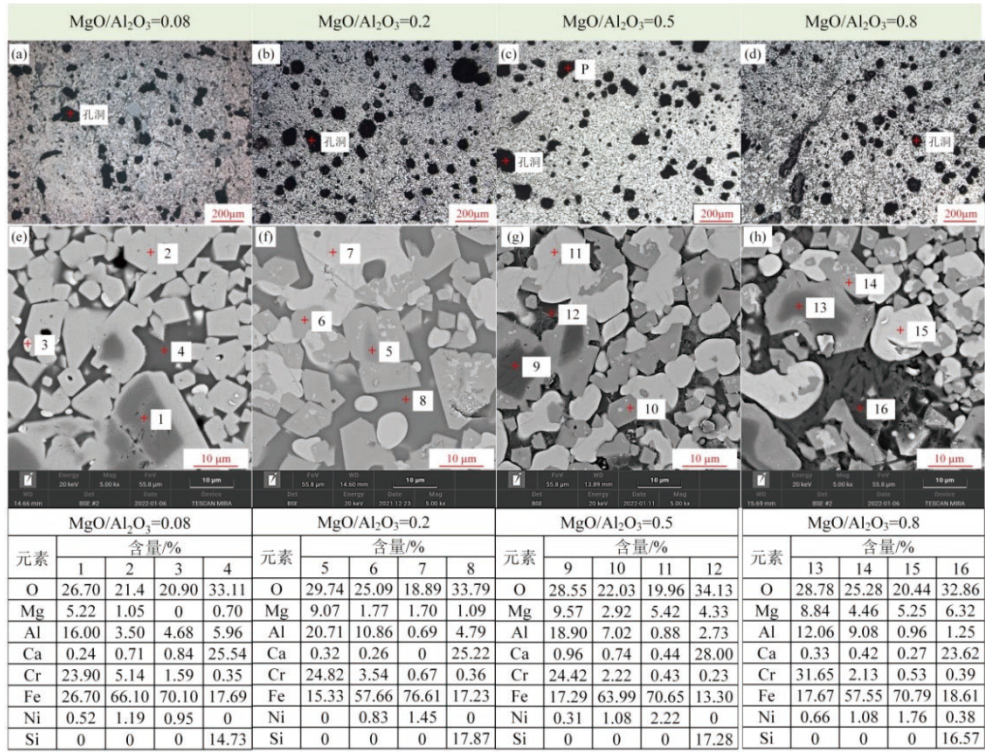


图 5 不同 MgO/Al₂O₃ 质量比烧结团块微观结构
Fig. 5 Microstructure of sinter under different MgO/Al₂O₃ mass ratios

中 Mg 含量的增加主要是因为 Mg 与钙铝黄长石相中的 Al 发生了类质同相替换,使黄长石相中的 Al 含量减少、Mg 含量增加,促进了低熔点的钙镁黄长石相的生成。同时,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比的增加,MgO 也会参与钙镁橄榄石相的生成,提高了黏结相中 Mg 的含量,黏结相主要为钙镁橄榄石和黄长石组成的复合黏结相。

2.3 烧结杯扩大试验

基于热力学分析及微型烧结试验结果,采用烧结杯试验进行验证。图 6 为 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比对红土镍矿烧结指标的影响。 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比由 0.5 增加至 0.8 时,烧结矿的成品率并无明显改变基本维持在 70% 左右,烧结矿转鼓强度则先增加再降低, $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比为 0.7 时,烧结矿的转鼓强度达到 56.67%,试验结果与微型烧结试验结果规律一致。在实际烧结过程中,烧结燃烧带最高温度可达到 1 350 °C,结合热力学计算,在 1 340 °C、 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比超过 0.7 时,液相生成量开始降低,液相的黏度增加,导致烧结矿的产质量指标有所降低。

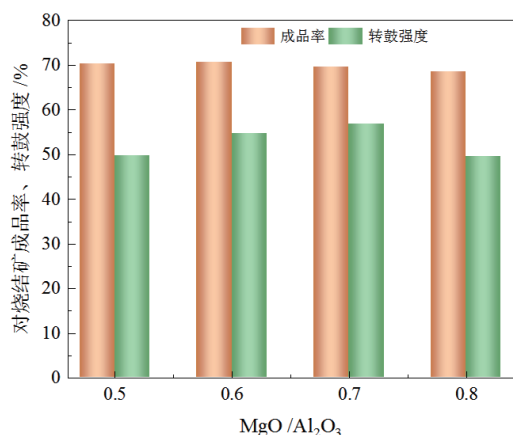


图 6 不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比对烧结矿成品率和转鼓强度的影响

Fig. 6 Effect of different $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ mass ratios on sinter yield and tumbler strength

对 $m(\text{MgO})/m(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.7$ 的成品烧结矿进行 X 射线衍射分析,结果如图 7 所示,由图可知,烧结矿的主要物相为尖晶石相、浮士体相、黄长石相和钙镁橄榄石相,烧结矿的主要物相组成与微型烧结试验结果一致。

对 $m(\text{MgO})/m(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.7$ 烧结矿进行微观结构分析,结果如图 8 所示。由图 8a~8c 可知,烧结矿内部呈多孔结构,而且有更多的裂纹,导致烧结矿的强度不高。由于烧结物料分布的不同导致烧结矿中生成的主要物相存在差异,图 8d 中生成的主要物相为浮士体、黏结相和少量的镍铁合金,主要是因为燃料的偏析导致烧结过程中还原气氛增强, Fe_2O_3 被还原为

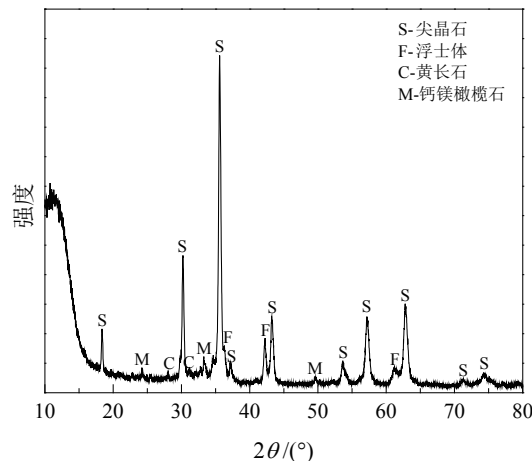


图 7 $m(\text{MgO})/m(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.7$ 时烧结矿 X 射线衍射图谱

Fig. 7 X-ray diffraction analysis of sinter at $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ mass ratio of 0.7

FeO 和金属铁。图 8e 中生成的主要物相为铁尖晶石相、浮士体相和黏结相,在浮士体相含量较多的区域,浮士体相也充当黏结相对尖晶石相进行黏结。图 8f 为烧结矿边缘区域,烧结过程中接触的空气较为充足,因此生成了针状及片状的复合铁酸钙(SFCA),在常规铁矿烧结过程中复合铁酸钙是优良的黏结相,但是在红土镍矿烧结过程中因为较多的固体燃料和较低的碱度,导致很难生成大量的复合铁酸钙黏结相。图 8g、8h、8i 中生成的主要物相为铁尖晶石相、黏结相和少量的浮士体相,烧结矿内部结构较为致密,黏结相分布于铁尖晶石相四周,保证了烧结矿的强度。

图 9 为烧结矿的 SEM 分析,烧结矿的主要物相组成为黏结相(点 1)、铬铁尖晶石相(点 2)、铁尖晶石相(点 3)和浮士体相(点 4)。结合能谱分析结果,黏结相主要是由 Ca、Si、Fe、Mg 组成的硅酸盐,Al 不参与黏结相的生成,黏结相主要为钙镁黄长石及钙镁橄榄石。

综上所述,通过调节红土镍矿烧结混合料中的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比可以提高红土镍矿烧结矿的质量指标,为高炉提供优质的炉料。

3 结论

(1)热力学分析表明,液相生成量随温度的升高而逐渐增加,相应液相的黏度则逐渐降低;相同温度下,通过调节适宜的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比可以提高液相的生成量、降低液相的黏度。

(2)微型烧结试验表明,在焙烧温度为 1 300 °C、焙烧时间为 10 min、焙烧气氛为 5% $\text{CO}+95\%\text{N}_2$ 、 $R_2=1.3$ 、 $m(\text{MgO})/m(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.5\sim 0.8$ 的条件下,红土镍矿烧结矿主要物相为尖晶石、浮士体、钙镁橄榄石及黄长石,其中黏结相为钙镁黄长石和钙镁橄榄石、强度超过 4 000 N/个。

(3)烧结杯试验表明,在 $R_2=1.3$ 的条件下, $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比由 0.5 增加至 0.7 时,烧结矿的成品率保

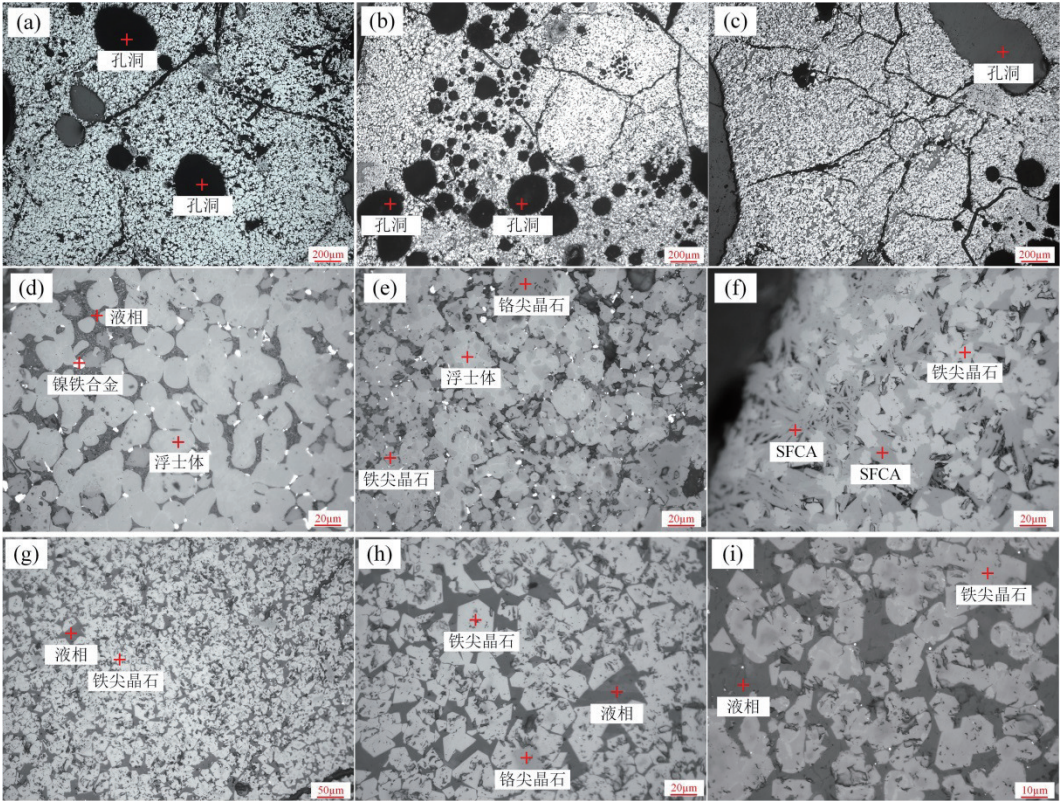


图 8 $m(\text{MgO})/m(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.7$ 时烧结矿微观结构 ((a)、(b)、(c):50X 烧结矿矿相图片; (d)、(e)、(f):500X 烧结矿不同区域矿相图片, (g)、(h)、(i) 分别为 200X、500X、1000X 烧结矿内部矿相图片)
Fig. 8 Microstructure of sinter at $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ mass ratio of 0.7((a), (b), (c): 50X sinter phase diagram; (d), (e), (f): 500X pictures of different areas of sinter mineral phases, (g), (h), (i): 200X, 500X, 1000X sinter internal ore phase pictures respectively)

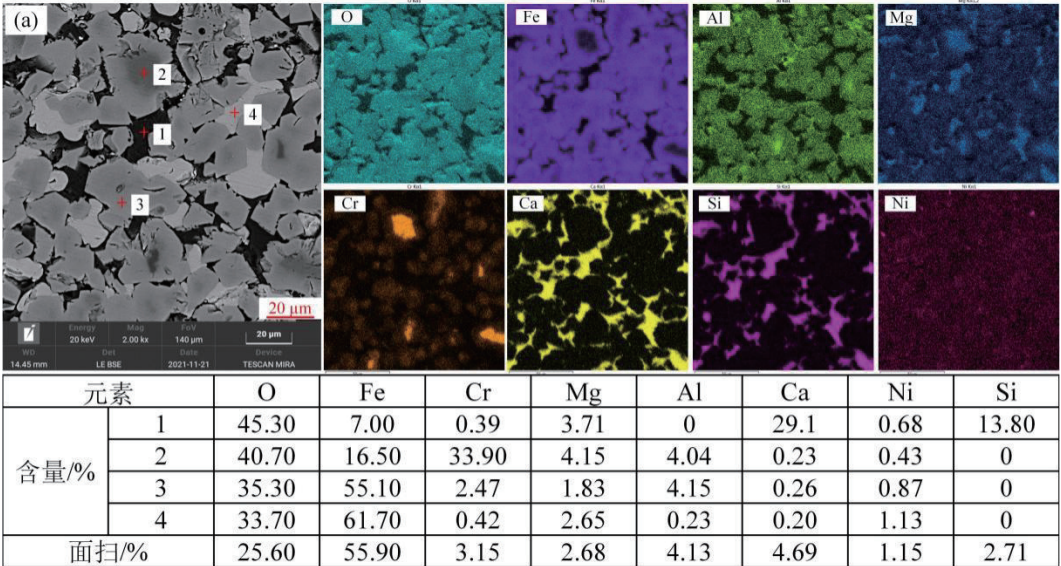


图 9 $m(\text{MgO})/m(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.7$ 时烧结矿 SEM-EDS 图谱
Fig. 9 SEM-EDS pattern of sinter at $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ mass ratio of 0.7

持在 70% 左右, 烧结矿转鼓强度由 49.73% 提高至 56.67%, 适宜的镁/铝质量比为 0.6~0.7。

参考文献:

[1] 党晓娥, 谭金滔, 卢苏君. 低品位褐铁矿型红土镍矿资源化利用与新技术研发现状[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(4): 12-20.

DANG X E, TAN J T, LU S J, et al. Resource utilization and new technology development of low grade limonite laterite nickel ore[J]. Non-ferrous metals (smelting part), 2022(4): 12-20.
[2] 李光辉, 姜涛, 罗骏, 等. 红土镍矿冶炼镍铁新技术: 原理与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018: 1-5.
LI G H, JIANG T, LUO J, et. al. New technologies for marking ferronickel from laterite ores: principles and applications [M]. Beijing:

- Metallurgical Industry Press, 2018: 1-5.
- [3] 杨志强, 王永前, 高谦, 等. 中国镍资源开发现状与可持续发展策略及其关键技术[J]. 矿产保护与利用, 2016(2): 58-69.
- YANG Z Q, WANG Y Q, GAO Q, et al. Present situation and development strategy and key technologies of China's nickel resources sustainable development[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016(2): 58-69.
- [4] ZHANG J, GAO L, HE Z, et al. Separation and recovery of iron and nickel from low-grade laterite nickel ore by microwave carbothermic reduction roasting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 12223-12235.
- [5] 薛钰霄, 潘建, 朱德庆, 等. 红土镍矿烧结节能降耗技术研究及应用[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 92-97.
- XUE Y X, PAN J, ZHU D Q, et al. Research and application on energy saving and consumption reduction technology of lateritic nickel ore sintering[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 92-97.
- [6] 刘云峰, 陈滨. 红土镍矿资源现状及其冶炼工艺的研究进展[J]. 矿冶, 2014, 23(4): 70-75+78.
- LIU Y F, CHEN B. The current status of laterite nickel ore resources and advance in its processing technology[J]. Mining & Metallurgy, 2014, 23(4): 70-75+78.
- [7] ZHU D, XUE Y, PAN J, et al. An investigation into the distinctive sintering performance and consolidation mechanism of limonitic laterite ore[J]. Powder Technol, 2020, 367: 616-631.
- [8] TU Y K, ZHANG Y B, SU Z J, et al. Mineralization mechanism of limonitic laterite sinter under different fuel dosage: Effect of FeO[J]. Powder Technol, 2021, 198: 117064.
- [9] 郭恩光. 褐铁矿型红土镍矿烧结行为研究及工艺优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- GUO E G. Sintering behaviour and process optimization of nickel laterite based of limonitic style[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [10] KESKINKILIC E. Nickel laterite smelting processes and some examples of recent possible modifications to the conventional route[J]. METALS, 2019, 9(9): 974.
- [11] XUE Y, ZHU D, PAN J, et al. Promoting the effective utilization of limonitic nickel laterite by the optimization of (MgO+Al₂O₃)/SiO₂ mass ratio during sintering[J]. ISIJ International, 2022, 62(3): 457-464.
- [12] LI H P, WU S L, HONG Z B, et al. The mechanism of the effect of Al₂O₃ content on the liquid phase fluidity of iron ore fines[J]. Processes, 2019, 7(12): 931.
- [13] CHAI Y F, YU W T, ZHANG J L, et al. Influencing mechanism of Al₂O₃ on sintered liquid phase of iron ore fines based on thermal and kinetic analysis[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 46(5): 424-430.
- [14] JI, ZHAO, GAN, et al. Microstructure and Minerals Evolution of Iron Ore Sinter: Influence of SiO₂ and Al₂O₃[J]. Minerals, 2019, 9(7): 449.
- [15] 王喆, 张建良, 左海滨, 等. MgO/Al₂O₃比对烧结矿物组成及冶金性能的影响[J]. 烧结球团, 2013, 38(5): 1-5.
- WANG Z, ZHANG J L, ZUO H B, et al. Influence of MgO/Al₂O₃ ratio on sinter mineral composition and metallurgical properties[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(5): 1-5.
- [16] 胡长庆, 张国柱, 崔利民. MgO/Al₂O₃比对铁矿粉烧结液相生成的影响[J]. 烧结球团, 2016, 41(5): 19-23.
- HU C Q, ZHANG G Z, CUI L M, et al. Influence of MgO/Al₂O₃ ratio on liquid phase generation during iron ore sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(5): 19-23.
- [17] 胡长庆, 闫龙飞, 张国柱, 等. MgO/Al₂O₃对复合铁酸钙显微形貌和显微硬度的影响[J]. 烧结球团, 2018, 43(2): 14-20.
- HU C Q, YAN F L, ZHANG G Z, et al. Effect of MgO/Al₂O₃ on microscopic structure and micro-hardness of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA)[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(2): 14-20.
- [18] 龙明华, 张东升, 肖扬武, 等. MgO/Al₂O₃比值对高炉炉渣流动性和结构的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(7): 49-53.
- LONG M H, ZHANG D S, XIAO Y W, et al. Effect of MgO/Al₂O₃ on fluidity and structure of blast furnace slag[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2015, 29(7): 49-53.
- [19] ORIMOTO T, NODA T, ICHIDA M, et al. Desulfurization technology in the blast furnace raceway by MgO-SiO₂ flux injection[J]. ISIJ International, 2008, 48(2): 141-146.
- [20] 胡长庆, 闫龙飞, 张国柱, 等. MgO/Al₂O₃对复合铁酸钙润湿性和黏度的影响[J]. 烧结球团, 2018, 43(1): 6-9+14.
- HU C Q, YAN F L, ZHANG G Z, et al. Effect of MgO/Al₂O₃ on wettability and viscosity of SFCA[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(1): 6-9+14.

Effect of MgO/Al₂O₃ Mass Ratio on Mineralization Behavior of Limonitic Laterite Ore During Sintering

HOU Sanya¹, HUANG Jiahao¹, Zhang Dou¹, CHEN Jing¹, HU Qiansheng², LUO Jun¹, RAO Mingjun¹

1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. Guangdong Guangqing Metal Technology Co. Ltd., Yangjiang 529500, Guangdong, China

Abstract: To improve the production and quality indices of laterite ore sinter, the effect of MgO/Al₂O₃ mass ratio on the liquid volume and viscosity during high-temperature sintering was investigated, based on thermodynamic analysis. The influence of MgO/Al₂O₃ ratio on the phase composition and bonding phase strength of sinter was discussed through micro-sintering test, and the impact of MgO/Al₂O₃ mass ratio on sintering mineralization behavior of limonitic laterite ore was clarified. Finally, the validity of our findings was confirmed through sinter-pot large-scale sintering test. The results of micro-sintering test showed that the bond phase was mainly composed of calc-magnesia melilite and olivine and their compressive strength exceeded 4 000 N/P, under the condition of $m(\text{MgO})/m(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.5\sim0.8$, sintering temperature of 1 300 °C, sintering atmosphere of 5%CO+95%N₂, binary basicity of $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)=1.3$. The sinter-pot verification test revealed that increasing the MgO/Al₂O₃ mass ratio from 0.5 to 0.7, the yield of sinter did not change significantly and remained at approximately 70%, but its tumbling strength of sinter increased from 49.73% to 56.67%, and the optimal MgO/Al₂O₃ mass ratio was in the range of 0.6-0.7.

Keywords: limonite laterite ore; sintering mineralization; MgO/Al₂O₃; bonding phase

引用格式: 候三亚, 黄家豪, 张豆, 陈靖, 胡前盛, 罗骏, 饶明军. MgO/Al₂O₃ 质量比对褐铁矿型红土镍矿烧结成矿行为的影响[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 140-147.

HOU Sanya, HUANG Jiahao, Zhang Dou, CHEN Jing, HU Qiansheng, LUO Jun, RAO Mingjun. Effect of MgO/Al₂O₃ mass ratio on mineralization behavior of limonitic laterite ore during sintering[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(1): 140-147.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn