

烧结成矿过程中镁元素运移规律

段博文^{1a}, 韩秀丽¹, 徐良平^{1b,2}, 司天航^{1a}, 王伟伟^{1a}, 饶明军^{1b,2}

(1. 华北理工大学 a. 矿业工程学院; b. 燕赵钢铁实验室; c. 矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北 唐山 063210; 2. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 原料中的镁元素是影响高碱度烧结矿矿相结构的重要因素之一, 为揭示其影响机理, 丰富高碱度烧结矿成矿理论, 本文以化学纯试剂为主要原料, 在实验室进行微型烧结, 借助偏光显微镜、电子探针, 分析了不同成矿阶段高碱度烧结矿中镁的赋存状态和运移规律。结果表明: 烧结成矿过程中, $w(\text{MgO})$ 的变化对烧结矿各矿物的含量及形态具有明显影响。 $w(\text{MgO})$ 的增加(1.0%~3.0%), 可促进磁铁矿生成, 抑制赤铁矿、铁酸钙、玻璃相生成。不同成矿阶段, 原料中不同 $w(\text{MgO})$ 的烧结矿显微结构均依次表现为松散状、熔融胶状、熔蚀状、斑状和骸晶状、交织-熔蚀状。升温阶段(室温~1 400 °C), 1 280 °C 时镁元素开始运移进入到烧结矿各矿物晶格, 并主要赋存在磁铁矿和铁酸钙中; 随着水淬温度升高到 1 400 °C, 铁酸钙和玻璃相中的镁元素逐渐运移到磁铁矿中; 降温过程中(1 400~1 100 °C), 镁元素逐渐运移进入到磁铁矿和铁酸钙中, 并主要存在于磁铁矿中。不同水淬温度下, 磁铁矿和玻璃相中的 $w(\text{MgO})$ 均与原料中 $w(\text{MgO})$ 成正比, 赤铁矿和铁酸钙中 $w(\text{MgO})$ 随原料中 $w(\text{MgO})$ 的变化不明显。

关键词: 成矿过程; MgO; 赋存规律; 高碱度烧结矿; 矿相结构

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0009-10

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.073

Magnesium migration law during sintering mineralization

DUAN Bowen^{1a}, HAN Xiuli¹, XU Liangping^{1b,2}, SI Tianhang^{1a}, WANG Weiwei^{1a}, RAO Mingjun^{1b,2}

(1. North China University of Science and Technology a. College of Mining Engineering; b. Yanzhao Iron and Steel Laboratory; c. Collaborative Innovation Center of Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. School of Minerals Processing and Bio-engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Magnesium in raw materials is one of the important factors affecting the mineral structure of high-alkalinity sintered ores. In order to reveal its influence mechanism and enrich the mineralization theory of high-alkalinity sinter, chemical pure reagents is used as the main raw materials, micro-sintering is carried out in the laboratory, and the occurrence state and migration law of magnesium in high-alkalinity sinter at different metallogenic stages are analyzed with the help of polarizing light microscope and electron probe. The results show that the change of $w(\text{MgO})$ has a significant impact on the content and morphology of various minerals in sinter during sintering mineralization. The increase of $w(\text{MgO})$ (1.0%~3.0%) can promote the formation of magnetite and inhibit the formation of hematite, calcium ferrite and glass phase. At different metallogenic stages, the microstructures of sintered ores with different $w(\text{MgO})$ in the raw

收稿日期: 2025-01-07; 修回日期: 2025-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574105); 河北省科技计划项目(23564101D); 中央引导地方科技发展资金项目(246Z4102G); 华北理工大学重点科技项目(ZD-ST-202308)

作者简介: 段博文(1998—), 男, 博士研究生, 从事工艺矿物学方面的研究。

通信作者: 韩秀丽(1966—), 女, 教授, 从事矿物学、固体资源低碳高效利用及新型矿物材料开发等方面的研究。

materials are loose, molten gel, melted, maculosus, skeletal & crystalline, and interwoven-fused. In the heating stage (room temperature ~ 1 400 °C), magnesium begins to migrate into the mineral lattice of sinter at 1 280 °C, and is mainly present in magnetite and calcium ferrite. With the increase of water quenching temperature to 1 400 °C, the magnesium elements in calcium ferrite and glass phases gradually migrates to magnetite. During the cooling process (1 400 ~ 1 100 °C), magnesium gradually migrates into magnetite and calcium ferrite, and mainly exists in magnetite. At different water quenching temperatures, the $w(\text{MgO})$ in magnetite and glass phases is directly proportional to the $w(\text{MgO})$ in the raw material, while the $w(\text{MgO})$ in hematite and calcium ferrite does not change significantly with the $w(\text{MgO})$ in the raw material.

Key words: ore-forming process; MgO; occurrence regularity; high-alkalinity sinter; mineral phase structure

近年来,随着国外高铝铁矿粉的大量引进与使用,烧结矿中的铝含量呈持续上升趋势,这一变化直接导致其质量显著下降。已有研究证实,适量添加 MgO 能够有效优化烧结生产工艺,对改善烧结矿性能、缓解铝含量过高带来的负面影响具有关键作用^[1-5]。国内外学者围绕 MgO 含量对烧结矿矿物组成、显微结构及冶金性能的影响规律开展了系统研究,并取得了一些重要进展。司天航等^[6]研究发现, MgO 能够以固溶形式进入磁铁矿晶格,形成含镁磁铁矿,不仅稳定了磁铁矿的晶体结构,还能有效抑制其在高温条件下的相变和分解过程,从而促进烧结矿显微结构的均匀化,并显著减少骸晶结构的形成。沈峰满等^[7]、齐玉磊等^[8]研究表明,过量配加 MgO 会抑制还原性能良好的赤铁矿和铁酸钙生成,同时导致铁酸钙的晶体形态从理想的针状、柱状向不规则的他形转变,使烧结矿矿物相结构变差。从热力学角度来看,过量 MgO 会显著提高烧结矿的熔化温度,抑制低熔点矿相的形成,导致液相生成量不足;同时促进高熔点矿相的形成,增加液相黏度,降低液相流动指数^[9-11]。在改善烧结矿质量方面, MgO 对烧结矿低温还原粉化指数、还原性和转鼓强度均具有显著影响。适量添加 MgO 可以减少烧结矿中次生骸晶赤铁矿的含量,促进针状铁酸钙的生成,进而改善烧结矿的低温还原性能^[12-14]。此外,原料中镁的配加可以使烧结矿结构更加致密,可提高烧结矿的机械强度^[15]。对于高炉冶炼方面, MgO 的添加不仅能够增加炉缸热储备,还能改善炉渣的流动性,显著提高炉渣的脱硫能力^[16-17]。

以上学者仅研究了镁含量对烧结矿矿物相结构和质量的影响规律,未深入探讨镁元素在烧结成

矿过程中的微观运移规律和反应机制及其对烧结矿矿物相结构的影响机理。本文采用化学纯试剂为原料,在实验室进行微型烧结实验,并采用偏光显微镜、电子探针,系统研究了在烧结成矿过程中,原料中 $w(\text{MgO})$ (1%~3%) 对烧结矿矿物组成、显微结构的影响规律。研究重点分析了镁元素在烧结矿各矿物中的赋存状态和运移规律,揭示了镁元素对烧结矿矿物相结构的作用机制,以期为进一步完善烧结成矿理论,提升高碱度烧结矿质量提供指导。

1 原料与方法

为了探讨高碱度烧结矿中镁元素的运移规律,根据现场烧结料层温度分布特点,设计了不同温度梯度实验室微型烧结试验。以化学纯试剂为主要原料进行配料,固定碱度为 2.0。试验方案见表 1,具体配料方案见表 2。

将 Fe_3O_4 、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 以及 Al_2O_3 化学纯试剂混匀后置于 120 °C 烘箱内干燥 2 h,冷却后筛分至 0.074 mm 以下,根据表 2 配料后装入 50 mL 刚玉坩埚,并采用 Micro-X 型可变温箱式高温炉在

表 1 试验方案

Table 1 Experimental scheme

温度/°C	成矿阶段	备注
室温~900	去水干燥	
900~1 150	固相反应	升温阶段
1 150~1 280	液相初期	
1 280~1 400	液相扩展	
1 400~1 350	金属相结晶	降温阶段
1 350~1 280	黏结相结晶	
1 280~1 200	黏结相结晶基本完成	
1 200~1 100	结晶基本完成	

表2 烧结矿配料方案
Table 2 Sinter proportioning scheme

编号	质量分数/%					碱度
	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	
M1	82.5	5.0	10.0	1.0	1.5	2.0
M2	82.0	5.0	10.0	1.5	1.5	2.0
M3	81.5	5.0	10.0	2.0	1.5	2.0
M4	81.0	5.0	10.0	2.5	1.5	2.0
M5	80.5	5.0	10.0	3.0	1.5	2.0

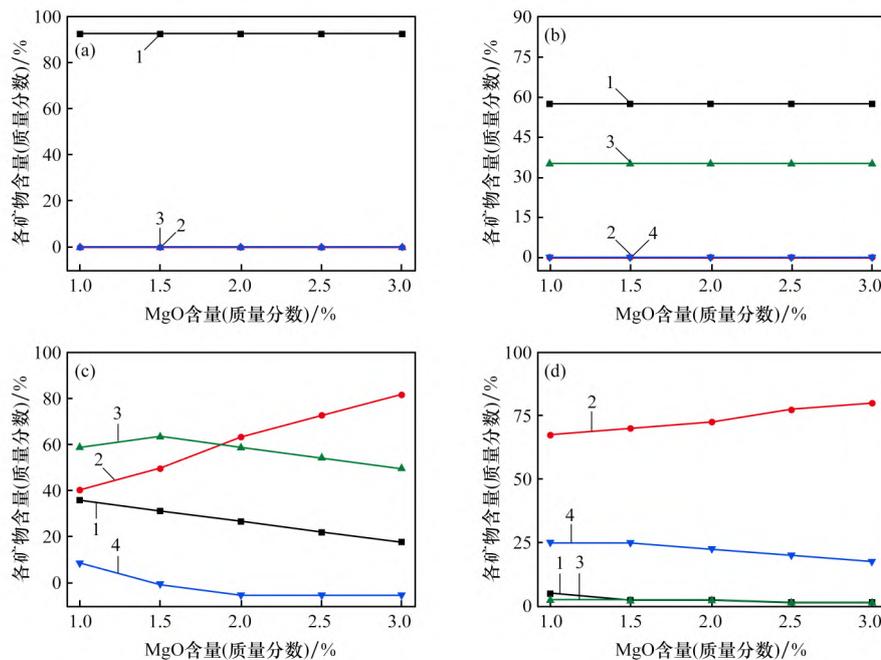
空气氛围下进行微型烧结试验。升温阶段, 以 10 °C/min 升温速度分别从室温升至 900、1 150、1 280、1 400 °C, 恒温 30 min 后水淬; 降温阶段, 以 10 °C/min 降温速度从 1 400 °C 分别降至 1 350、1 280、1 200、1 100 °C, 恒温 30 min 后水淬。

最后, 将试样制备成光薄片, 采用偏光显微镜观察矿相变化并统计含量; 对烧结矿光薄片表面进行喷碳处理, 利用 JXA-8230 电子探针 X 射线显微分析仪对光薄片不同区域的矿物颗粒进行微区成分分析。为确保数据的准确性, 烧结矿各矿物中 MgO 的含量采用多次电子探针测试数据的平均值。

2 烧结成矿过程中 Mg 含量对矿相结构的影响

2.1 烧结成矿过程中 Mg 含量对烧结矿矿物组成的影响

升温阶段烧结矿各矿物含量随原料中镁含量的变化如图 1 所示。由图 1 可知, 升温过程中, 当水淬温度为 900 °C 时, 水淬试样中主要矿物为赤铁矿, 由于烧结温度过低, 无其他矿物生成, 原料中 MgO 含量对赤铁矿含量无影响 [图 1(a)]。当水淬温度为 1 150 °C 时, Fe₂O₃ 与 CaO 固相反应生成铁酸钙, 赤铁矿的含量开始降低, 烧结矿中赤铁矿和铁酸钙含量随 MgO 含量的增加无明显变化 [图 1(b)]。当水淬温度为 1 280 °C 时, 大量液相开始生成, Fe₂O₃ 以低熔点化合物的形式还原成磁铁矿, 部分参与铁酸钙的形成, 随着原料中 MgO 质量分数增加 (1.0% ~ 3.0%), 烧结矿中磁铁矿含量显著增加, 赤铁矿、铁酸钙、玻璃相含量均显著降低 [图 1(c)]。随着水淬温度升高到 1 400 °C, 赤铁矿分解和还原形成磁铁矿, 铁酸钙熔融成为液相, 磁铁矿和玻璃相的含量较上一阶



水淬温度/°C: (a) 900; (b) 1 150; (c) 1 280; (d) 1 400

1—赤铁矿; 2—磁铁矿; 3—铁酸钙; 4—玻璃相。

图1 升温阶段烧结矿各矿物含量随原料中镁含量的变化

Fig. 1 Variation of the content of each mineral in the sinter with the Mg content in the raw material

段显著增加, 烧结矿中磁铁矿含量与原料中 MgO 含量呈正比, 玻璃相含量与原料中 MgO 含量呈反比 [图 1(d)]。

降温阶段烧结矿各矿物含量随原料中镁含量的变化如图 2 所示。由图 2 可知, 随着烧结原料中 MgO 质量分数由 1.0% 增加到 3.0%, 1 350 °C 水淬试样中赤铁矿和铁酸钙含量变化不明显, 其他三个水淬温度下赤铁矿和铁酸钙的含量均与原料中 MgO 含量呈反比。无论水淬温度如何变化, 烧结矿中磁铁矿的含量均随着原料中 MgO 含量的增加显著升高, 玻璃相的含量变化则相反。

2.2 烧结成矿过程中 Mg 含量对烧结矿显微结构的影响

900 ~ 1 280 °C 烧结矿显微结构的变化如图 3 所示, 水淬温度 1 400 °C 时烧结矿显微结构随原料中镁含量的变化如图 4 所示。由图 3、4 可知, 900 ~ 1 280 °C 水淬试样中, 无论 MgO 含量如何变化, 烧结矿的显微结构均依次呈现松散状结构 [图 3(a)]、熔融状结构 [图 3(b)]、熔蚀结构 [图 3(c)], 且各矿物的形态变化较小。当水淬温度升高到 1 400 °C 时, 不同 MgO 含量的烧结矿试样均表现为斑状结构, 但磁铁矿晶粒尺寸随原料中

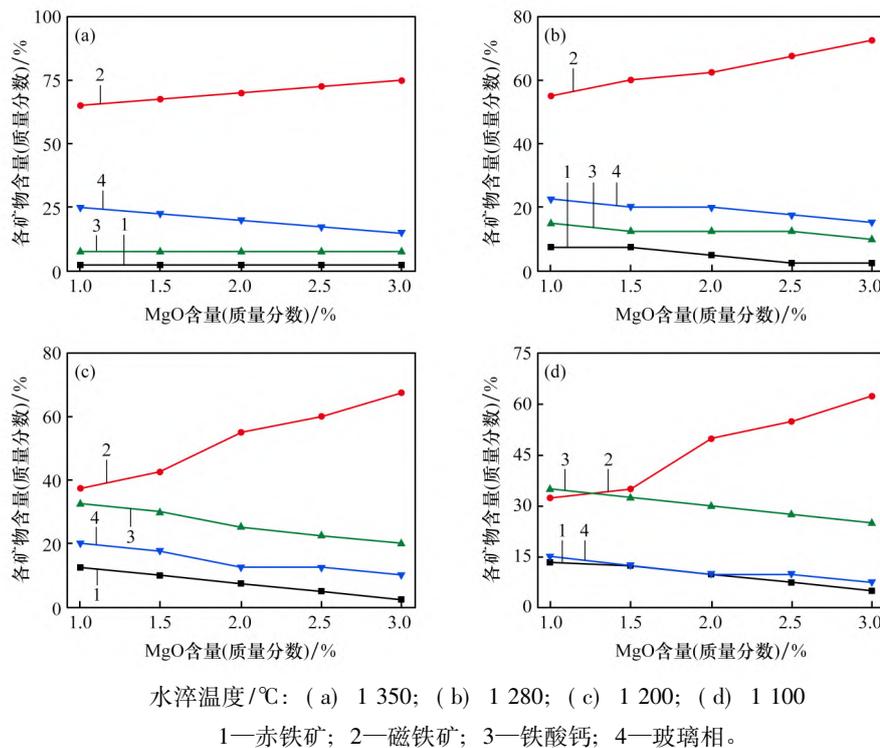
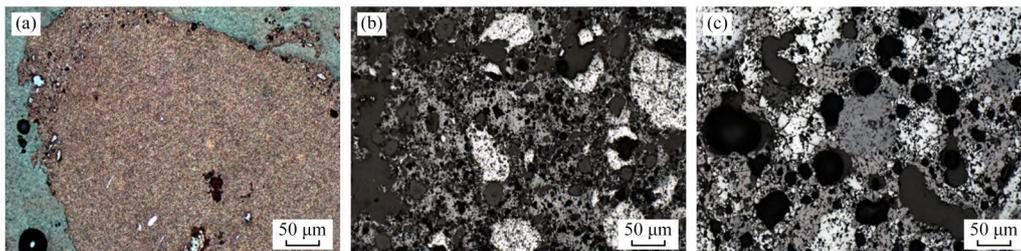


图 2 降温阶段烧结矿各矿物含量随原料中镁含量的变化

Fig. 2 Variation of the content of each mineral in the sinter with the Mg content in the raw material during the cooling stage



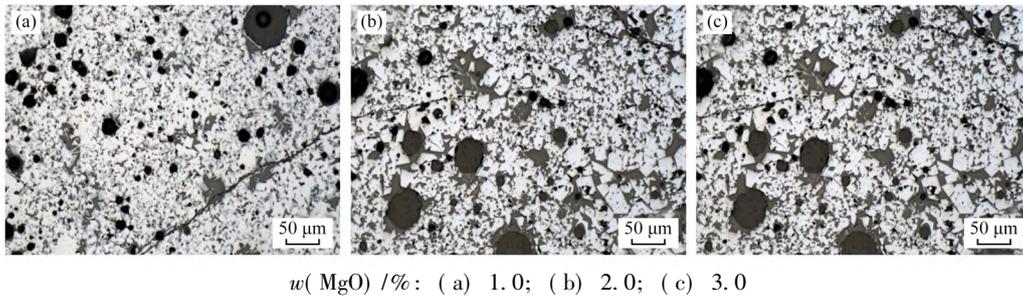
水淬温度/°C: (a) 900; (b) 1 150; (c) 1 280

图 3 900 ~ 1 280 °C 烧结矿显微结构的变化

Fig. 3 Changes in microstructure of sinter from 900 °C to 1 280 °C

MgO 含量的增加明显增大, 且晶型更加完整 [图 4(a) ~ (c)]。

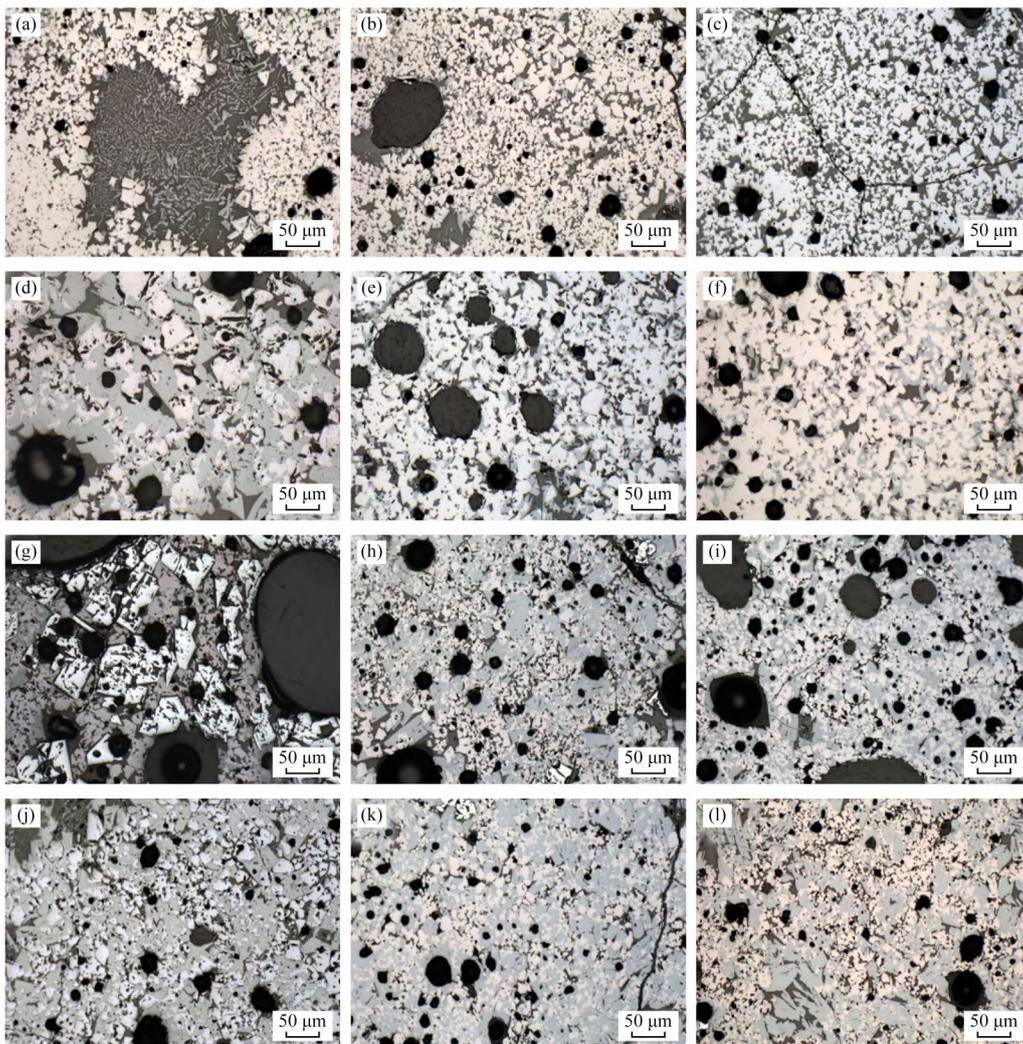
1 350 ~ 1 100 °C 烧结矿显微结构随原料中镁含量的变化如图 5 所示。由图 5 可知, 降温过程



$w(\text{MgO}) / \%$: (a) 1.0; (b) 2.0; (c) 3.0

图 4 水淬温度 1 400 °C 时烧结矿显微结构随原料中镁含量的变化

Fig. 4 Variation of sinter microstructure with Mg content in raw material at 1 400 °C



(a) 1 350 °C, $w(\text{MgO}) = 1.0\%$; (b) 1 350 °C, $w(\text{MgO}) = 2.0\%$; (c) 1 350 °C, $w(\text{MgO}) = 3.0\%$;
 (d) 1 280 °C, $w(\text{MgO}) = 1.0\%$; (e) 1 280 °C, $w(\text{MgO}) = 2.0\%$; (f) 1 280 °C, $w(\text{MgO}) = 3.0\%$;
 (g) 1 200 °C, $w(\text{MgO}) = 1.0\%$; (h) 1 200 °C, $w(\text{MgO}) = 2.0\%$; (i) 1 200 °C, $w(\text{MgO}) = 3.0\%$;
 (j) 1 100 °C, $w(\text{MgO}) = 1.0\%$; (k) 1 100 °C, $w(\text{MgO}) = 2.0\%$; (l) 1 100 °C, $w(\text{MgO}) = 3.0\%$

图 5 1 350 ~ 1 100 °C 烧结矿显微结构随原料中镁含量的变化

Fig. 5 Changes of sintered ore microstructure with Mg content in raw materials from 1 350 °C to 1 100 °C

中, 1 350 °C 水淬试样以斑状结构为主, 磁铁矿的形态变化规律与 1 400 °C 一致 [图 5 (a) ~ (c)]。当水淬温度分别为 1 280、1 200、1 100 °C 时, 试样均表现为交织 - 熔蚀结构, 但随着原料中 $w(\text{MgO})$ 由 1.0% ~ 3.0%, 矿物形态发生明显变化。1 280 °C 水淬试样中, 随着 MgO 含量的增加, 铁酸钙的形态由板柱状逐渐转为他形, 磁铁矿的粒径变小并趋于均匀, 形态由他形逐渐转变为自形 - 半自形, 且分布更加均匀 [图 5 (d) ~ 5 (f)]。1 200 °C 水淬试样中, 赤铁矿含量开始增加, 随着 MgO 含量的增加, 赤铁矿形态由骸晶状逐渐转为他形粒状, 当 $w(\text{MgO})$ 为 3.0% 时, 试样中几乎无骸晶状赤铁矿出现 [图 5 (g) ~ (i)]。当水淬温度为 1 100 °C 时, 矿物结晶基本完成, $w(\text{MgO})$ 为 1.0% 的试样中, 可见大量骸晶结构; 当原料中的 $w(\text{MgO})$ 为 2.0% 时, 形成了均匀的交织熔蚀结构, 骸晶结构减少, 铁酸钙的形态呈针柱状、板柱状黏结磁铁矿; 随着 MgO 含量的进一步增加, 铁酸钙的形态逐渐转为他形, 烧结矿相结构变差, 见图 5 (j) ~ 5 (l)。

3 烧结成矿过程中 Mg 的运移规律

3.1 温度对 Mg 运移规律的影响

升温阶段不同镁含量烧结矿各矿物中 MgO 含量随水淬温度的变化如图 6 所示。由图 6 可知, 升温过程中, 无论原料中的 MgO 含量如何变化, 烧结矿各矿物中 MgO 含量的运移规律随水淬温度的变化均较为一致。当水淬温度为 900 °C 时, 由于烧结温度过低, 试样中仅形成少量矿物相, MgO 基本没有发生化学反应。1 150 °C 水淬的样品仅生成赤铁矿和铁酸钙, 少量 MgO 固相反应接触进入赤铁矿和铁酸钙中。随着水淬温度升高到 1 280 °C, 原料中的 MgO 逐渐运移进入到磁铁矿和铁酸钙中, 少量赋存在玻璃相中。当水淬温度升高到 1 400 °C, 铁酸钙熔融分解成液相, 铁酸钙中的 MgO 含量显著降低, MgO 主要运移到磁铁矿晶格, 参与磁铁矿的生成。随着水淬温度的升高, 赤铁矿中的 MgO 含量均较低, 且随水淬温度的变化不明显。

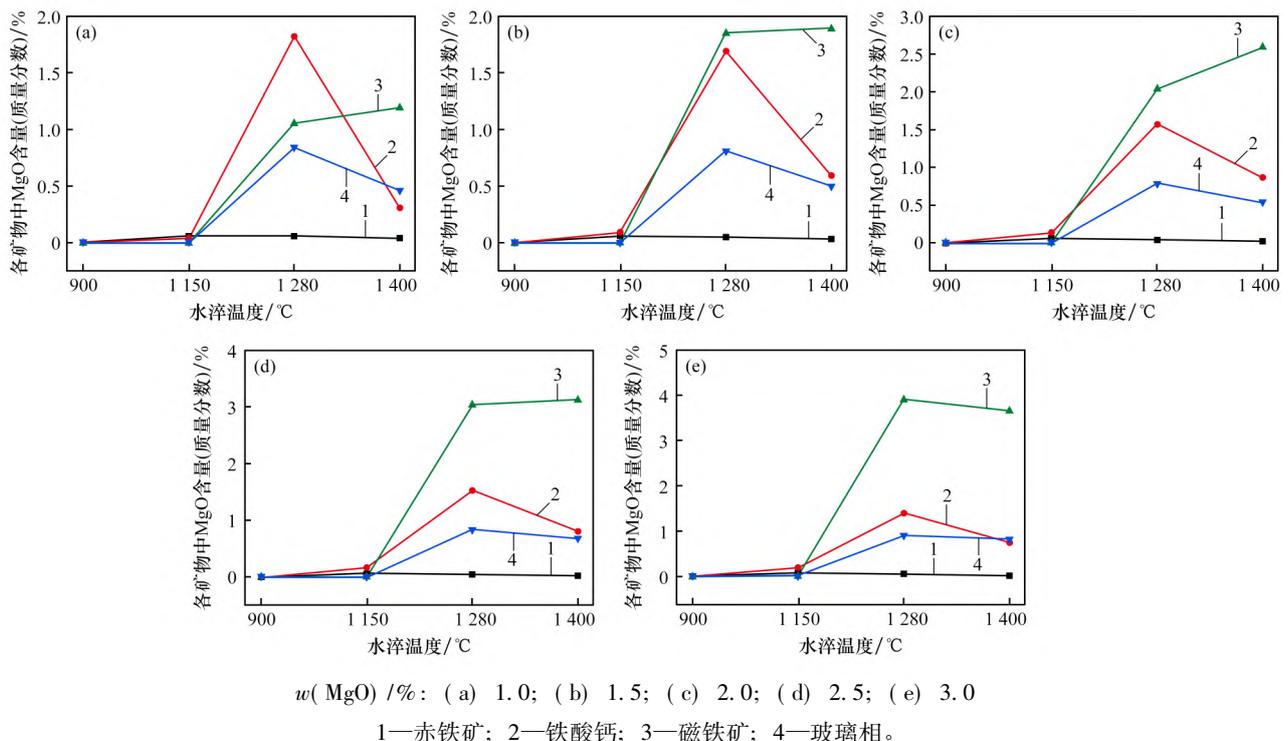


Fig. 6 Variation of Mg content in each mineral of sinter with water quenching temperature for different MgO contents in raw materials at the warming stage

降温阶段不同镁含量烧结矿各矿物中 MgO 含量随水淬温度的变化如图 7 所示。由图 7 可知, 降温过程中, 无论原料中的 MgO 含量如何变化, 随着水淬温度的降低(1 350 ~ 1 100 °C), 赤铁矿中的 MgO 含量均较低, 且含量随水淬温度的变化不显著。MgO 主要存在于磁铁矿中, 部分存在于铁酸钙中。当水淬温度由 1 350 °C 降低到 1 100 °C 时, 磁铁矿和铁酸钙中的 MgO 含量均呈现上升的趋势, 玻璃相中的 MgO 含量呈现降低的趋势, 主要运移到磁铁矿和铁酸钙中。当水淬温度为 1 100 °C 时, 金属相和黏结相结晶基本完成, MgO 主要赋存在磁铁矿中。

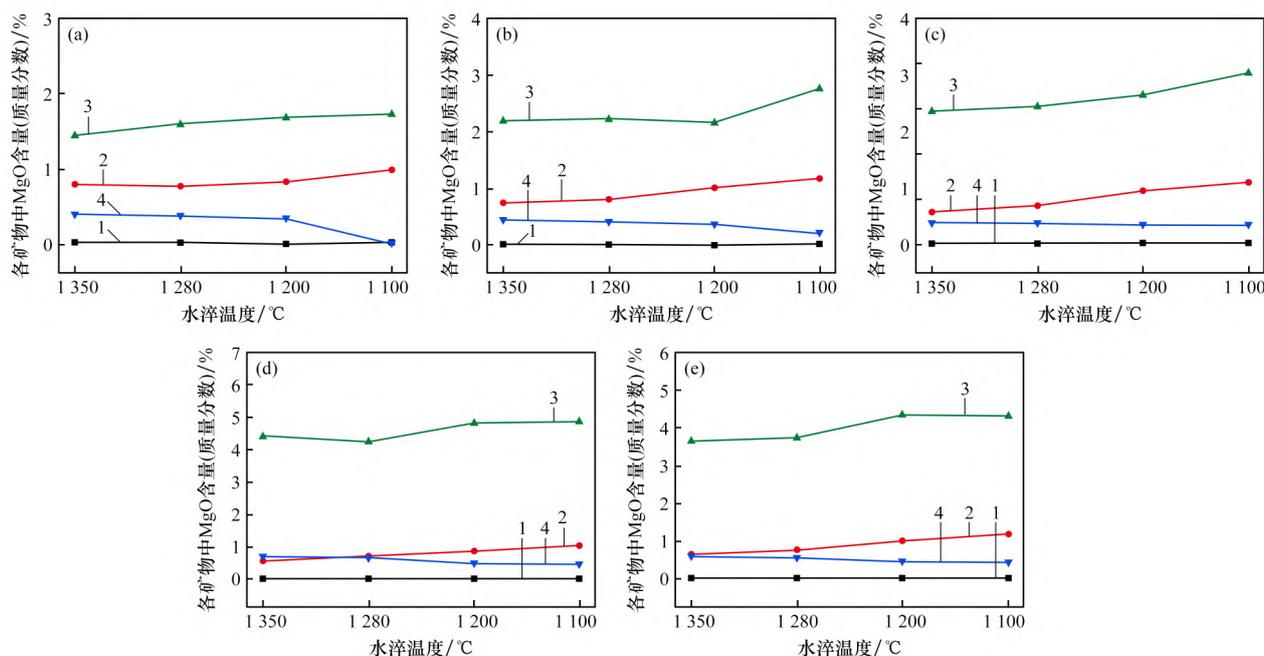
3.2 Mg 含量对镁运移规律的影响

不同水淬温度下烧结矿各矿物中 MgO 含量随原料中镁含量变化的运移规律如图 8 所示。由图 8 可知, 随着原料中 $w(\text{MgO})$ 的增加(1.0%~3.0%), 不同水淬温度烧结矿各矿物中 MgO 含量的运移规律较为一致。除水淬温度为 1 280 °C 且 $w(\text{MgO})$ 为 1% 的样品中, MgO 主要赋存于铁酸钙中, 其它条件下 MgO 均主要赋存于磁铁矿中。当原料中

$w(\text{MgO})$ 由 1.0% 增加到 3.0% 时, 磁铁矿中的 MgO 含量均显著增加, 玻璃相中的 MgO 含量略有增加, 赤铁矿、铁酸钙中 MgO 含量变化不明显。

4 Mg 元素对烧结矿矿相结构的影响机理

结合上述研究分析可知, 烧结成矿过程中 Mg 元素在 1 280 °C 液相反应阶段开始大量运移进入烧结矿各矿物中, 并主要存在于磁铁矿中。由于 Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 离子半径值相近 [$r(\text{Mg}^{2+}) = 0.072 \text{ nm}$, $r(\text{Fe}^{2+}) = 0.078 \text{ nm}$], 在一定温度下, Mg^{2+} 很容易取代磁铁矿晶格中 Fe^{2+} 而占据其空位(图 9), 导致镁元素主要赋存于磁铁矿中^[18-20]。当水淬温度达到 1 400 °C 时, 随着原料中 MgO 含量的增加, Mg^{2+} 对磁铁矿晶格中 Fe^{2+} 的置换作用显著增强。这一置换过程不仅稳定了磁铁矿的晶体结构, 同时抑制了其向骸晶金属相的转变及熔融分解过程, 致使水淬试样中玻璃相含量显著降低且骸晶结构减少。在此过程中, 磁铁矿含量增加并呈现更为完整的晶体形貌。这些矿相结构的协同优化作用会提升烧结矿的低温还原粉化性能和机械强度。

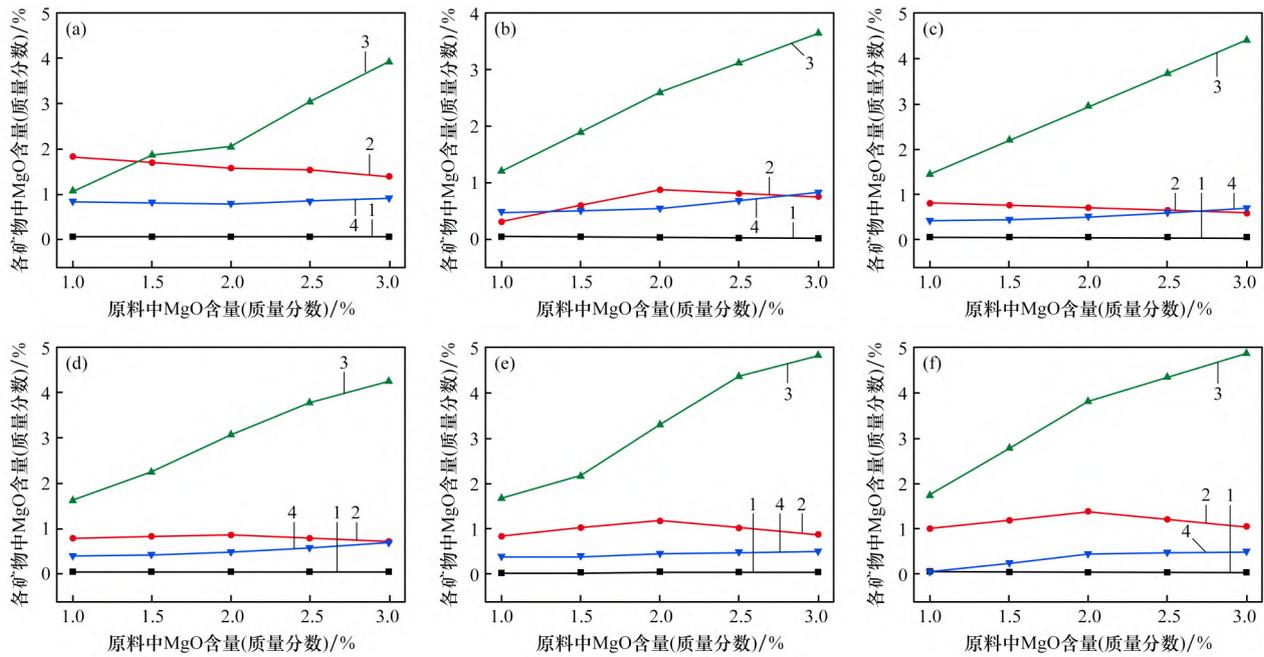


$w(\text{MgO})$ / %: (a) 1.0; (b) 1.5; (c) 2.0; (d) 2.5; (e) 3.0

1—赤铁矿; 2—铁酸钙; 3—磁铁矿; 4—玻璃相。

图 7 降温阶段不同镁含量烧结矿各矿物中 MgO 含量随水淬温度的变化

Fig. 7 Variation of Mg content in each mineral of sinter with water quenching temperature for different MgO contents in raw materials at the cooling stage



升温阶段温度/°C: (a) 1 280; (b) 1 400. 降温阶段温度/°C: (c) 1 350; (d) 1 280; (e) 1 200; (f) 1 100

1—赤铁矿; 2—铁酸钙; 3—磁铁矿; 4—玻璃相。

图 8 不同水淬温度下烧结矿各矿物中 MgO 含量随原料中镁含量变化的运移规律

Fig. 8 Transport law of MgO content in each mineral of sintered ore with the change of Mg content in raw materials under different water quenching temperatures

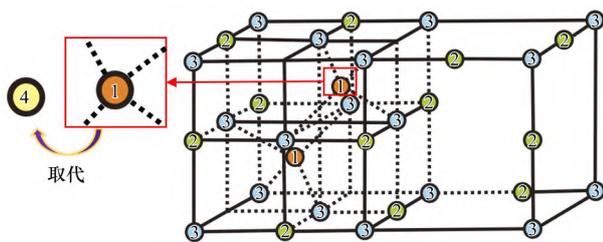


图 9 Mg^{2+} 取代磁铁矿中的 Fe^{2+} 示意

Fig. 9 Schematic diagram of the substitution of Mg^{2+} for Fe^{2+} in magnetite

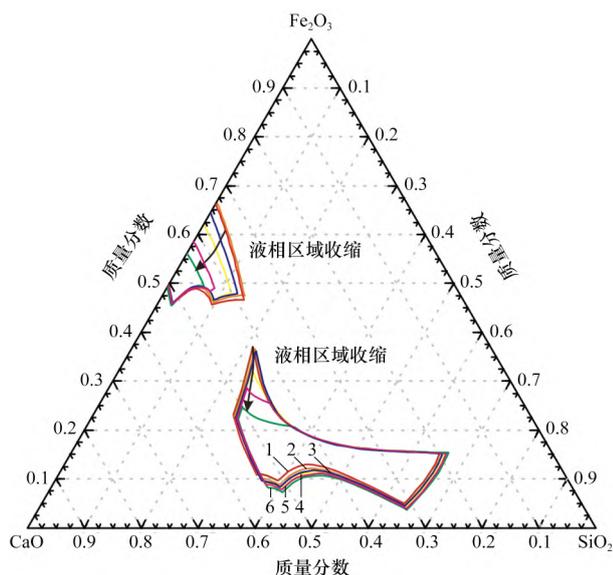
在降温过程中(1 400 ~ 1 100 °C), 水淬温度为 1 280 °C 时, Fe_3O_4 开始氧化生成 Fe_2O_3 , Fe_2O_3 与 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 反应生成复合铁酸钙。但随着原料中 MgO 含量的增加, 不同水淬温度下赤铁矿、铁酸钙的含量显著降低, 烧结矿的显微结构由交织 - 熔蚀结构逐渐转变为熔蚀结构。 MgO 的加入会导致 Fe_3O_4 的氧化反应温度升高, 且化学键更加稳定^[21-22]。这意味着在更高的温度下, 含镁磁铁矿才开始发生氧化反应, 从而抑制了降温阶段 Fe_3O_4 向 Fe_2O_3 的氧化, 导致烧结矿中赤铁矿含量的降低。此外, 结合 Factsage 模拟结果分析, MgO 的适量配加(1.0% ~ 2.0%) 对液相

生成量的影响较小; 当 MgO 配加量在 2.0% 以上时, 液相区域收缩明显, 液相生成量显著降低, 进而导致降温结晶过程中黏结相铁酸钙含量的减少, 见图 10。

文献研究表明, MgO 的配加会提高液相生成温度并增加液相黏度^[23-25]。结合电子探针数据分析, 降温过程中, 随着原料中 MgO 含量的增加, 玻璃相中 MgO 含量呈现上升的趋势, 说明液相中 MgO 含量增加, 导致液相流动性下降和黏度升高, 从而显著降低了溶质的扩散速率。这种扩散受限的现象引发了两方面的影响: 一方面, 液相的局部过饱和度会出现差异, 导致析出的铁酸钙晶体各部分生长速率不一致, 最终形成不规则的晶体形态; 另一方面, 溶质扩散受限进一步限制了铁酸钙晶体的生长空间, 促使其更容易形成不规则的他形晶。

5 结 论

(1) 成矿过程中, 随着 $w(MgO)$ 的增加(1.0% ~ 3.0%), 烧结矿中磁铁矿含量逐渐增加且粒度趋于均匀, 铁酸钙和赤铁矿含量逐渐减少, 矿相结构



$w(\text{MgO}) / \%$: 1—0; 2—1.0; 3—1.5; 4—2.0;
5—2.5; 6—3.0。

图 10 1400 °C 时镁含量对 $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 体系液相区的影响

Fig. 10 Effect of Mg content on the liquid-phase region of $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ system at 1400 °C

更加均匀; 随着水淬温度的变化, 烧结矿的显微结构依次表现为松散粒状、熔融状、熔蚀状、斑状和骸晶状、交织-熔蚀结构。

(2) 升温过程, 1280 °C 时, MgO 开始运移进入各矿物中, 主要赋存在磁铁矿和铁酸钙中; 1280~1400 °C 时, 铁酸钙和玻璃相中的 MgO 逐渐运移到磁铁矿中; 1350~1100 °C 时, 玻璃相中的 MgO 含量显著降低, 逐渐运移到磁铁矿和铁酸钙中。随着原料中 $w(\text{MgO})$ 由 1% 增加到 3%, MgO 逐渐运移到磁铁矿中, 少量运移到玻璃相中。

(3) MgO 的配加能够稳定磁铁矿晶格, 抑制骸晶结构的生成, 改善烧结矿强度和低温还原粉化性能; 但过量配加会减少液相量并增加黏度, 限制针柱状铁酸钙生长。当原料中 $w(\text{MgO})$ 为 2% 时, 烧结矿骸晶结构显著减少, 矿相结构较均匀, 呈现理想的交织-熔蚀结构。

参考文献:

- [1] 韩秀丽, 司天航, 刘盈盈, 等. 不同含量 Al_2O_3 烧结矿矿相结构与 $\text{RDI}_{>3.15\text{mm}}$ 的定量关系 [J]. 中国冶金, 2022, 32(2): 34-38.
HAN Xiuli, SI Tianhang, LIU Yingying, et al. Relationship between mineralogical structure and $\text{RDI}_{>3.15\text{mm}}$ of sinter with different contents of Al_2O_3 [J]. China Metallurgy, 2022, 32(2): 34-38.
- [2] 王建芳, 孙艳芹, 赵文书, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 对烧结矿铁酸钙生成能力的影响 [J]. 烧结球团, 2021, 46(1): 43-48.
WANG Jianfang, SUN Yanqin, ZHAO Wenshu, et al. Influence of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ on formation ability of calcium ferrite in sinter [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1): 43-48.
- [3] 易正明, 覃佳卓, 姜志伟, 等. MgO 对高碱度高铝烧结矿的影响 [J]. 钢铁, 2021, 56(2): 50-56.
YI Zhengming, QIN Jiazhao, JIANG Zhiwei, et al. Influence of MgO on high basicity high alumina sinter [J]. Iron & Steel, 2021, 56(2): 50-56.
- [4] 胡容, 张有余, 杨春, 等. 烧结矿不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比对烧结性能及冶金性能影响的试验研究 [J]. 甘肃冶金, 2022, 44(2): 33-37.
HU Rong, ZHANG Youyu, YANG Chun, et al. Experimental study on the influence of $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio on metallurgical properties of sinter [J]. Gansu Metallurgy, 2022, 44(2): 33-37.
- [5] 丁成义, 杨涛, 龙红明, 等. $w(\text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 对烧结矿成矿特性及冶金性能的影响 [J]. 钢铁, 2023, 58(3): 25-33.
DING Chengyi, YANG Tao, LONG Hongming, et al. Effect of $w(\text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ on sintered ore mineralization characteristics and metallurgical properties [J]. Iron & Steel, 2023, 58(3): 25-33.
- [6] 司天航, 韩秀丽, 刘磊, 等. 镁铝对烧结矿矿相结构的影响规律 [J]. 烧结球团, 2021, 46(2): 24-31.
SI Tianhang, HAN Xiuli, LIU Lei, et al. Influence of Mg and Al on mineralogical structure in sinter [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 24-31.
- [7] 沈峰满, 安海玮, 姜鑫, 等. 烧结工艺中复合铁酸钙黏结相的研究进展 [J]. 钢铁, 2024, 59(2): 1-12.
SHEN Fengman, AN Haiwei, JIANG Xin, et al. Research progress on sillico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) bonding phase in sintering process [J]. Iron & Steel, 2024, 59(2): 1-12.
- [8] 齐玉磊, 陈衍彪, 郭豪. MgO 对复合铁酸钙生成和还原行为的影响 [J]. 有色金属科学与工程, 2025, 16(3): 367-375.
QI Yulei, CHEN Yanbiao, GUO Hao. Study on formation

- and reduction behavior of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) by MgO [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2025, 16(3) : 367 – 375.
- [9] 于银俊,龙防,陈伟,等. 烧结矿成分体系对软熔滴落性能的影响 [J]. *烧结球团*, 2021, 46(6) : 55 – 61.
YU Yinjun, LONG Fang, CHEN Wei, et al. Effect of sinter composition system on soft droplet performance [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2021, 46(6) : 55 – 61.
- [10] 单长冬,张建良,刘征建,等. 铁矿粉烧结基础特性之同化性研究进展 [J]. *中国冶金*, 2022, 32(12) : 1 – 6.
SHAN Changdong, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Research progress on assimilation property in basic sintering characteristics of iron ore powder [J]. *China Metallurgy*, 2022, 32(12) : 1 – 6.
- [11] 马辉,秦华伟. 铁矿石同化性能试验研究与配矿优化 [J]. *烧结球团*, 2022, 47(5) : 13 – 19.
MA Hui, QIN Huawei. Experimental research on assimilation performance of iron ore and ore matching optimization [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(5) : 13 – 19.
- [12] 包国营,刘磊,韩秀丽,等. 基于 RDI_{>3.15mm} 响应面法的烧结原料配矿方案优化 [J]. *钢铁*, 2023, 58(1) : 31 – 38.
BAO Guoying, LIU Lei, HAN Xiuli, et al. Optimization of sintering raw material blending scheme based on RDI_{>3.15mm} response surface methodology [J]. *Iron & Steel*, 2023, 58(1) : 31 – 38.
- [13] 张聪,韩秀丽,刘磊,等. 基于响应面法的烧结矿还原指数优化 [J]. *烧结球团*, 2024, 49(4) : 1 – 9.
ZHANG Cong, HAN Xiuli, LIU Lei, et al. Optimization of sinter reduction index based on response surface method [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2024, 49(4) : 1 – 9.
- [14] 周祥. Mg/Al 在烧结矿中的赋存规律对其冶金性能的影响 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
ZHOU Xiang. Influence of the occurrence regularity of Mg and Al in sinter on metallurgical properties [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- [15] 韩宏松,沈峰满,姜鑫,等. MgO 对烧结矿强度影响研究及应用 [C] // 2017 年全国高炉炼铁学术年会论文集(下). 昆明: 中国金属学会, 2017: 387 – 390.
HAN Hongsong, SHEN Fengman, JIANG Xin, et al. Study on the effect of MgO on sinter strength and its application [C] // Proceedings of the 2017 National Academic Conference on Blast Furnace Ironmaking(Part II). Kunming: The Chinese Society for Metals, 2017: 387 – 390.
- [16] 冯聪,李玉柱,白晓光,等. MgO 对包钢高炉渣流变特性及熔化性影响的实验研究 [J]. *包钢科技*, 2024, 50(3) : 14 – 21.
FENG Cong, LI Yuzhu, BAI Xiaoguang, et al. Experimental study on effects of MgO on rheological and melting properties of blast furnace slag of Baotou steel [J]. *Science & Technology of Baotou Steel*, 2024, 50(3) : 14 – 21.
- [17] 潘玉柱,徐益军,郑林,等. Al₂O₃ 和 MgO 含量对高炉渣熔化和流动性能的影响研究 [J]. *金属材料与冶金工程*, 2023, 51(6) : 31 – 37.
PAN Yuzhu, XU Yijun, ZHENG Lin, et al. Influence of Al₂O₃ and MgO content on melting and flow properties of blast furnace slag [J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2023, 51(6) : 31 – 37.
- [18] 梁晓亮,杨士建,钟远红,等. 类质同象置换对磁铁矿表面反应性的制约机制 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(1) : 1 – 10.
LIANG Xiaoliang, YANG Shijian, ZHONG Yuanhong, et al. Constraint mechanism of isomorphous substitution on the surface reactivity of magnetite [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 38(1) : 1 – 10.
- [19] 林师整. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨 [J]. *矿物学报*, 1982, 2(3) : 166 – 174.
LIN Shizheng. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1982, 2(3) : 166 – 174.
- [20] 韩秀丽,司天航,李鸣铎,等. 镁铝对烧结矿中铁酸钙的矿物学特性影响 [J]. *地学前缘*, 2020, 27(5) : 280 – 290.
HAN Xiuli, SI Tianhang, LI Mingduo, et al. Influences of MgO and Al₂O₃ on the mineralogical properties of calcium ferrite in iron ore sinter [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(5) : 280 – 290.
- [21] LI T L, SUN C Y, SONG S, et al. Roles of MgO and Al₂O₃ on the viscous and structural behavior of blast furnace primary slag, part 1: C/S = 1.3 containing TiO₂ [J]. *Metals*, 2019, 9(8) : 866. (下转第 52 页)

- containing dust sludge disposal in iron and steel enterprises [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2024, 49(2): 115–122.
- [14] JAAFAR I, GRIFFITHS A J, HOPKINS A C, et al. An evaluation of chlorination for the removal of zinc from steelmaking dusts [J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(9): 1028–1030.
- [15] SUN X, HWANG J Y, HUANG X D. The microwave processing of electric arc furnace dust [J]. *JOM*, 2008, 60(10): 35–39.
- [16] 陈卓, 郑睿琦, 堵伟桐, 等. 含锌粉尘协同处置含铬污泥的碳热还原试验 [J]. *钢铁*, 2021, 56(11): 148–159.
- CHEN Zhuo, ZHENG Ruiqi, DU Weitong, et al. Experiment on co-processing of chromium-containing sludge with zinc-bearing dust by carbothermic reduction method [J]. *Iron & Steel*, 2021, 56(11): 148–159.
- [17] NAYAK D, RAY N, DASH N, et al. An optimal route for the preparation of metallized composite pellets from ilmenite concentrate [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2021, 7(3): 1102–1115.
- [18] MANDAL A K, SINHA O P. Effective utilisation of waste fines in preparation of high-basicity double-layer DRI pellets for minimisation of sticking [J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2017, 126(3): 182–190.
- [19] WANG Z H, GUO J, GUO H J, et al. Thermodynamic and experimental study of high-temperature roasting of blast furnace gas ash for recovery of metallic zinc and iron [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2024, 31(1): 108–120.
- [20] 王佳, 何环宇, 刘志豪, 等. 含锌尘泥金属化球团还原特性及动力学研究 [J]. *钢铁研究学报*, 2024, 36(7): 866–874.
- WANG Jia, HE Huanyu, LIU Zhihao, et al. Research on reduction characteristics and kinetics of metallized pellets containing zinc dust and mud [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2024, 36(7): 866–874.
- [21] ZHU D Q, WANG D Z, PAN J, et al. A study on the zinc removal kinetics and mechanism of zinc-bearing dust pellets in direct reduction [J]. *Powder Technology*, 2021, 380: 273–281.
- [22] ZHANG W J, DONG T, ZHU D Q, et al. Improving zinc reduction and removal from pellets of zinc-bearing dusts via vacuum microwave-assisted carbothermal reduction process [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 192: 896–906.
- [23] MATSUKEVICH I, KULINICH N, ROMANOVSKI V. Direct reduced iron and zinc recovery from electric arc furnace dust [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2022, 97(12): 3453–3458.
- (上接第 18 页)
- [22] WANG Y Z, ZHANG J L, NIU L L, et al. Inhibition mechanism of MgO addition on high-temperature oxidation of magnetite: Density functional theory and ab initio molecular dynamics methods joint research and experimental verification [J]. *Steel Research International*, 2023, 94(8): 2200887.
- [23] 郑安阳, 刘征建, 苍大强, 等. 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.
- ZHENG Anyang, LIU Zhengjian, CANG Daqiang, et al. Effects of MgO on the mineral structure and softening-melting property of Ti-containing sinter [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(2): 184–191.
- [24] 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.
- WU Shengli, HAN Hongliang, JIANG Weizhong, et al. MgO interaction mechanism in sinter [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(4): 428–432.
- [25] 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 Changqing, ZHANG Guozhu, CUI Limin. Influence of MgO/Al₂O₃ ratio on liquid phase generation during iron ore sintering [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2016, 41(5): 19–23.