

MgO 掺杂对高炉渣熔融调质钢渣物相组成及结构的影响^①

郝帅, 罗果萍, 陈银胜, 柴轶凡, 安胜利, 宋巍

(内蒙古科技大学材料与冶金学院(稀土学院), 内蒙古包头 014010)

摘要: 为了探明 MgO 掺杂对高炉渣熔融调质钢渣(混合渣)物相组成与结构的影响,采用 X 射线衍射仪和 SEM-EDS 扫描电镜对高温调质后混合渣物相组成及形貌进行了分析。结果表明,掺杂 MgO 能有效抑制 $MgFe_2O_4$ 相和非胶凝性 $Ca_2Al_2SiO_7$ 物相生成、促进 $MgFeAlO_4$ 物相生成,提高混合渣熔点。MgO 掺杂量 2% 的高温调质混合渣截面呈层状结构,内层 $MgFeAlO_4$ 物相占比增加,孔洞均匀且细小;中间具有层状结构的 $MgFe_2O_4$ 尖晶石包裹在 $MgFeAlO_4$ 物相周围;外层 $Ca_2Al_2SiO_7$ 物相孔洞均匀,致密度适中;此结构的混合渣是较好的重金属离子过滤材料。

关键词: 钢渣; 高炉渣; MgO; 高炉渣熔融调质钢渣; 混合渣; 高温调质; 过滤材料

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.021

文章编号: 0253-6099(2023)01-0095-04

Effect of MgO Doping on Phase Composition and Structure of Molten Mixture of Steel Slag and Blast Furnace Slag

HAO Shuai, LUO Guoping, CHEN Yinsheng, CHAI Yifan, AN Shengli, SONG Wei

(School of Materials and Metallurgy (School of Rare Earth), Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The phase composition and morphology of a molten mixture of steel slag and furnace slag prepared at a high temperature was analyzed by X-ray diffraction and SEM-EDS scanning electron microscope to investigate the effect of MgO doping. The results show that MgO doping can effectively inhibit the formation of $MgFe_2O_4$ phase and non-gel $Ca_2Al_2SiO_7$ phase, and promote the formation of $MgFeAlO_4$ phase, thus increasing the melting point of the mixed slag. It is found that the mixed slag after doping 2% MgO presents a layered structure on its cross section. The inner layer has an increased proportion of $MgFeAlO_4$ phase, with uniform and fine pores; and the $MgFeAlO_4$ phase is wrapped by $MgFe_2O_4$ spinel with layered structure in the middle part; and the outer layer has $Ca_2Al_2SiO_7$ phase with uniform pores and moderate density. The mixed slag with such kind of structure is suitable to be used as the filter material for removing heavy metal ions.

Key words: steel slag; blast furnace slag; MgO; mixture of blast furnace slag and steel slag molten at high temperature; mixed slag; preparation at high temperature; filter material

钢渣是钢铁冶炼的主要附属产品,属于玻璃态物质与多种矿物所构成的集合体^[1]。高碱度钢渣呈褐灰色或灰白色,低碱度钢渣呈灰色^[2-3];急冷钢渣表层玻璃化严重,渣坨与渣壳结构致密、界面分明、段口整齐。采用高炉渣高温熔融调质钢渣^[4],可提升钢渣胶凝组分含量和活性^[5-6]、降低钢渣中 $f-CaO$ 含量、提升

钢渣安定性^[7-8]。然而高炉渣调质后的钢渣(称为混合渣)依然存在渣样强度高、表层孔洞粗大、内部致密等缺陷^[9-10],限制了混合渣在重金属离子废水净化方面的应用^[11-12]。为了调整混合渣结构,在混合渣中掺入 MgO 改善其结构特性^[13],可提升混合渣对废水中重金属离子的吸附能力^[14-15];同时将混合渣在废水中

① 收稿日期: 2022-08-02

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1909105);国家自然科学基金(51664045);内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0016);内蒙古自治区高等学校碳达峰碳中和研究专项(STZX202231)

作者简介: 郝帅(1989—),男,内蒙古包头人,博士研究生,主要研究方向为冶金固废综合利用。

通信作者: 罗果萍(1964—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,教授,主要研究方向为钢铁冶金理论与新技术和冶金固废资源化利用。

陈化处理^[16-17],能够提高安定性,有利于其在水泥和混凝土方面的应用^[18],实现“固废资源化”的目标。为此本文开展了 Mg 掺杂对混合渣物相组成及结构的影响研究,为混合渣应用于重金属离子废水净化提供技术支持。

1 实验原料及研究方法

1.1 实验原料及设备

实验所用钢渣与高炉渣均取自包钢集团。钢渣为选铁前的热泼渣,其 TFe 含量 27.32%,二元碱度约 2.5;高炉渣选用水淬渣,其粒度均匀,碱度约 1.2, Al_2O_3 含量 14.79%。高炉渣和钢渣主要化学成分如表 1 所示。

表 1 高炉渣和钢渣主要化学成分(质量分数) %

渣样名称	TFe	CaO	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5	MgO
高炉渣	0.36	36.72	31.58	14.79	0	9.28
钢渣	27.32	33.67	13.49	1.86	1.95	7.36

实验主要设备包括电子天平、台式压片机、电热恒温鼓风干燥箱、三辊四筒棒磨机、电磁式鄂式破碎机、金相试样预磨机、高温立式炉、X 射线衍射仪、钨灯丝扫描电镜和能谱仪等。

1.2 研究方法

将钢渣和高炉渣经破碎机反复破碎后、筛分,并用标准筛筛分得到 $-74\ \mu\text{m}$ 粒级粉末样品。将粉末原料置于电热恒温鼓风干燥箱烘干($105\ \text{C}$, 2 h),装入球磨罐中,在球磨机上混匀(2 h),使用压片机制样,试样置于刚玉坩埚中,放入 KTF-1700-VT 高温立式炉中,以升温速率 $5\ \text{C}/\text{min}$ 从室温升温到 $1\ 000\ \text{C}$,再以升温速率 $8\ \text{C}/\text{min}$ 从 $1\ 000\ \text{C}$ 升温至 $1\ 450\ \text{C}$,保温 1 h,随炉自然冷却,期间用高纯氩气气体保护。

按高炉渣比例 20.2%、钢渣比例 79.8% 调配成碱度 2.0 的混合渣 M-1,在 M-1 基础上分别加入 2%、4% MgO 得到 M-2、M-3,以分析纯试剂 Fe_2O_3 、CaO、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 P_2O_5 为原料,依据 M-1 化学成分调配成不含 MgO 的混合渣 M-0。各混合渣主要化学成分如表 2 所示。

表 2 混合渣主要化学成分(质量分数) %

样品名称	TFe	CaO	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5	MgO
M-0	21.87	34.28	17.14	4.47	1.55	—
M-1	21.87	34.28	17.14	4.47	1.55	7.75
M-2	21.87	34.28	17.14	4.47	1.55	9.49
M-3	21.87	34.28	17.14	4.47	1.55	11.23

通过拍摄试样焙烧后自然冷却的表观形貌,评估其反应程度;采用 D8-advanced 型 X 射线衍射仪测试焙烧

试样;采用 SEM-EDS 扫描式电子显微镜分析混合渣微观形貌及化学成分。

2 实验结果与讨论

采用乙二醇-EDTA 络合滴定法测定了各渣中 $f\text{-CaO}$ 含量,结果如表 3 所示。由表 3 可知,高炉渣掺杂能显著降低混合渣中 $f\text{-CaO}$ 含量。随着 MgO 掺杂量增加,混合渣中 $f\text{-CaO}$ 含量略有增加,但其 $f\text{-CaO}$ 含量均低于 3%,满足 GB/T 20491—2006《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》的要求。高炉渣中 SiO_2 含量约 31.58%, SiO_2 与钢渣中 $f\text{-CaO}$ 反应,降低了混合渣中 $f\text{-CaO}$ 含量,提高了混合渣安定性。

表 3 渣中 $f\text{-CaO}$ 含量(质量分数) %

钢渣	M-0	M-1	M-2	M-3
4.52	1.02	1.08	1.12	1.17

MgO 调质后的混合渣在 $1\ 450\ \text{C}$ 下焙烧后的实物如图 1 所示。焙烧后混合渣出现熔融现象,随着 MgO 掺杂量增加,混合渣熔融现象明显减弱。

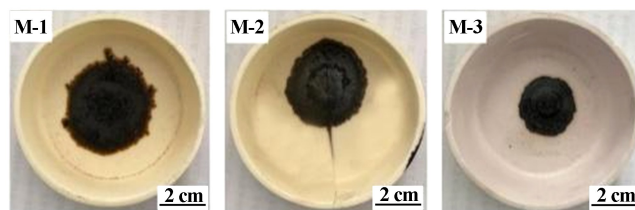


图 1 混合渣在 $1\ 450\ \text{C}$ 下焙烧后实物图

为探明 MgO 对混合渣物相组成的影响,采用 XRD 及 SEM-EDS 对焙烧后的混合渣物相组成及结构进行分析,为了避免坩埚对物相组成的影响,测试所用样品取自未与刚玉坩埚接触部分。

MgO 调质后的混合渣焙烧试样 XRD 图谱见图 2。由图 2 可知,M-2 的主要物相仍为 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 、 MgFe_2O_4 、 MgFeAlO_4 和 Ca_2SiO_4 ,但 M-3 有另一种新物相生成,即镁铝石($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)。随着 MgO 掺杂量增加, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 衍射峰明显减弱, MgFe_2O_4 衍射峰稍微减弱, MgFeAlO_4 衍射峰明显增强。MgO 掺杂量 4% 时,焙烧试样中并未发现明显的 MgFe_2O_4 相特征峰, MgFeAlO_4 相在 $2\theta = 30.425^\circ$ 和 43.743° 处特征峰强度明显增强,说明焙烧过程中混合渣中 MgFe_2O_4 大部分转变为 MgFeAlO_4 ; C_2S 相特征峰强度并未发生明显变化, C_2S 晶型并未发生转变,说明随着 MgO 掺杂量增加, MgFeAlO_4 生成量增加、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 生成量减少,不利于液相的生成。这与图 1 结果相符,即随着 MgO 掺杂

量增加,试样熔融现象变弱。

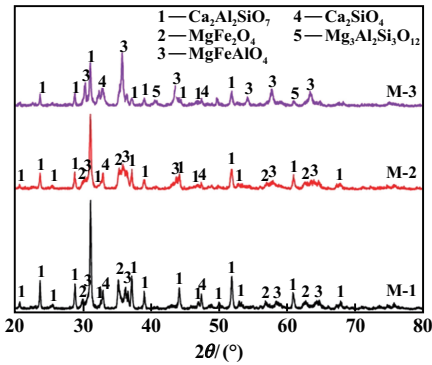


图2 混合渣焙烧试样 XRD 图谱

MgO 调质混合渣焙烧后 SEM 矿相如图 3 所示。通过能谱分析仪对混合渣各物相的化学成分进行打点分析、元素含量检测,结果如表 4 所示。结合图 2 分析可知,调质混合渣主要有 6 种矿物结构:点 A 处为 MgFe₂O₄ 相,点 B 处为钙铝黄长石相(C₂AS),点 C 处为富磷 C₂S 相,点 D 处为尖晶石相,点 E 处为铁酸钙相,点 G 处为新相镁铝石。各物相具有如下性质: MgFe₂O₄ 相主要含铁镁氧化物、铁锰氧化物,属于黑色八角形晶体,相对密度 4.44~4.60,熔点(1 750±25) °C; 钙铝黄长石属斜长石,呈白色或灰色玻璃状晶体,质地较脆,抗水能力良好,主要组成元素为 Ca、Al、Si 和 O;

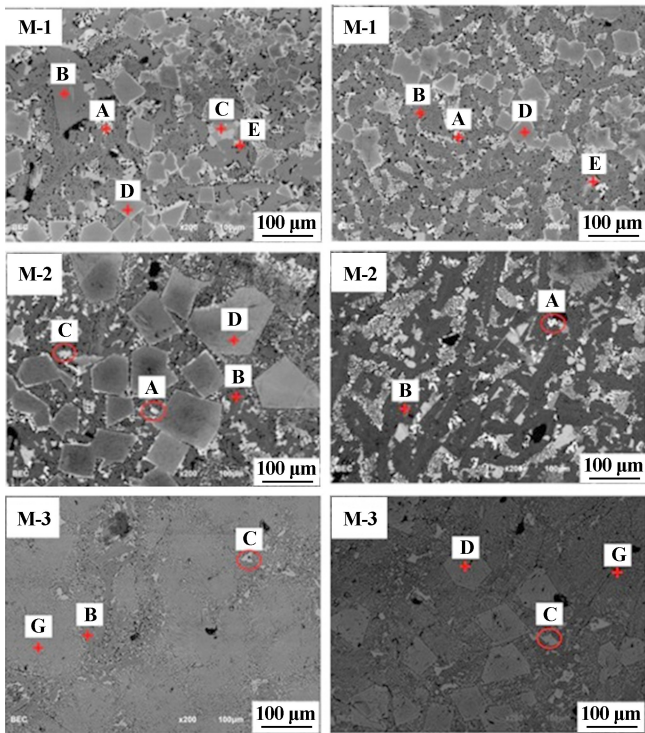


图3 MgO 调质混合渣焙烧后 SEM 矿相图

A—MgFe₂O₄; B—Ca₂Al₂SiO₇; C—Ca₂SiO₄ 和 Ca₃(PO₄)₂;
D—MgFeAlO₄; E—Ca₂Fe₂O₅; G—Mg₃Al₂Si₃O₁₂

表 4 混合渣各物相元素含量(质量分数) %

点	Ca	Si	O	P	Fe	Mn	Mg	Al
A	2.21	1.44	23.60	0.44	50.54	11.43	7.65	1.18
B	28.82	13.82	31.01	0.07	8.54	0.33	1.28	15.79
C	47.01	5.98	24.38	15.23	1.28	0.35	0.19	0.22
D	0.32	0.00	28.86	0.15	26.34	3.87	15.11	23.93
E	16.49	6.00	27.82	0.93	18.49	2.18	0.63	1.47
G	0.79	15.09	28.97	0.21	13.25	4.67	15.83	21.19

富磷相主要以 Ca₇P₂Si₂O₁₆(2C₂S—C₃P)形式存在,渣中磷氧化物优先与 CaO 反应生成 Ca₃(PO₄)₂,并赋存于 C₂S 相之中,抑制 C₂S 晶型转变^[19]。铁酸钙或铝酸钙呈灰色无定形状。尖晶石是由氧、镁、铁、铝、锰等元素组成的一种矿物,其外观透明色美,常被用作宝石原料。MgFeAlO₄ 尖晶石为块状晶体。

为了进一步确定熔融混合渣中各元素富集状态及验证 SEM 点扫描分析结果准确性,同时明晰混合渣矿相组成的分布情况,对 M-1 和 M-2 混合渣焙烧试样进行面扫描分析,结果如图 4~5 所示。

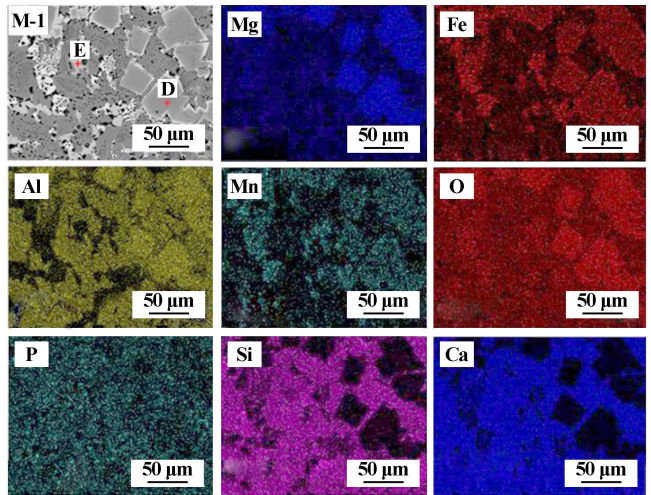


图4 M-1 混合渣 SEM 面扫描图

D—MgFeAlO₄; E—Ca₂Fe₂O₅

由图 4 可知,混合渣矿相图中点 D 呈块状晶体,有大量 Mg、Fe、Al、O 和微量 Mn 元素集中分布,可以判定为 MgFeAlO₄;点 E 主要有 Ca、Fe、O 元素分布,夹杂着微量的 P、Mn、Mg 元素,结合表 4 数据,认为点 E 处为 Ca₂Fe₂O₅ 相。

由图 5 可以看出,混合渣矿相图中点 A 有大量 Mg、Fe、O、Mn 元素覆盖,认为是含有 Mn 的 MgFe₂O₄ 相;点 B 均匀分布着大量 Ca、Al、Si、O 元素,与点扫描的元素分析结果一致,判定为 Ca₂Al₂SiO₇ 相;点 C 含有大量 Ca、O、P 元素和少量 Si 元素,大致判定为富 P 的 C₂S 相。

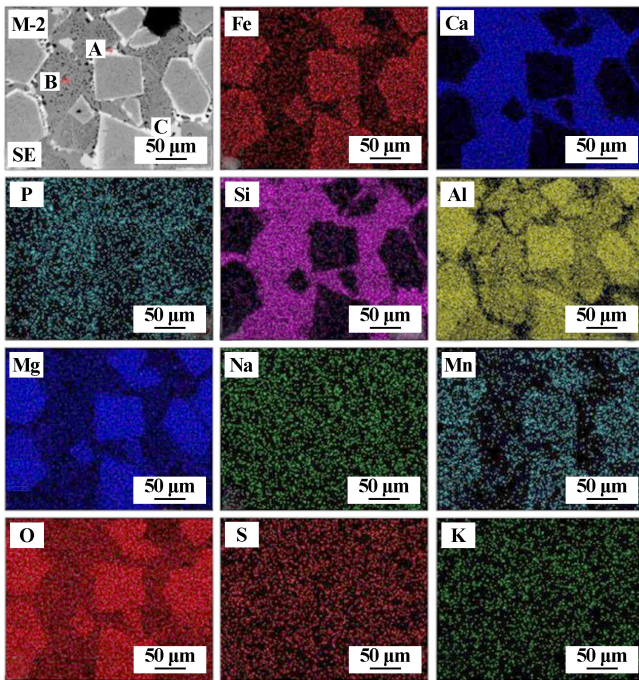


图5 M-2混合渣SEM面扫描图

A— MgFe_2O_4 ；B— $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ；C— Ca_2SiO_4 和 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

对比图4与图5发现, MgO 掺杂量 2% 的试样, 点 D 处 MgFeAlO_4 孔洞增多, 同时图 4 中 Al 元素密集程度高于图 5 中 Al 元素密集程度, 结合已有研究, 认为 Al_2O_3 能够促进钢渣物相中低熔点物质的生成, 有利于液相生成。 MgO 掺杂量 2% 的试样, MgFeAlO_4 物相处变得疏松多孔, 占比增大, 结合面扫描图中 Al 元素的分布情况, 认为 MgO 的掺杂能有效抑制 Al_2O_3 与混合渣中物质反应生成低熔点 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, 这与 XRD 分析结果相符, 即随着 MgO 掺杂量增加, MgFeAlO_4 衍射峰增强, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 衍射峰减弱。 因此认为, 增加 MgO 掺杂量, 有利于降低钢渣中 MgFeAlO_4 物相的致密程度, 一方面降低钢渣强度、节约钢渣破碎成本, 另一方面, 钢渣孔洞增加, 能提升钢渣对重金属离子废水的净化能力。 SEM 面扫描图显示, MgFeAlO_4 物相周围包裹着一层层状结构的 MgFe_2O_4 尖晶石, MgFe_2O_4 是一种潜在的光催化剂^[20], 在光催化降解染料废水领域具有广阔应用。 MgFe_2O_4 尖晶石外层主要由 Ca、Si 和 Al 元素组成, 认为主要为 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 物相, 呈多孔结构, 孔洞相对较大, 适合作为大颗粒有害物质的过滤层, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 物相属于低熔点物相, 高温状态下熔入液相, 提升混合渣流动性, 使得 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 物相内部孔洞粗大且不均匀^[21], 不利于混合渣在重金属离子废水净化方面的应用, 而 MgO 掺杂量 2% 的混合渣试样中 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 物相孔洞明显变小、孔洞致密程度增加, 适

合作为前置过滤层。

综上所述, MgO 掺杂量 2% 的混合渣, 内层 MgFeAlO_4 物相占比增加, 孔洞细小, 可作为有害物质最终净化层, 中间层 MgFe_2O_4 尖晶石具有光催化降解染料废水的能力, 可对有害物质进行降解; 外层 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 物相孔洞均匀, 致密度提高, 可作为粗过滤层。 因此认为, MgO 掺杂量 2% 的混合渣, 截面具有层状结构, 是较好的过滤材料。 研究结果可为混合渣在重金属离子过滤方面的应用提供理论支持。

3 结 论

1) 混合渣主要有 5 种矿物结构, 分别为尖晶石 (MgFe_2O_4) 相、钙铝黄长石 ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) 相、富磷 ($\text{Ca}_7\text{P}_2\text{Si}_2\text{O}_{16}$) 相、尖晶石 (MgFeAlO_4) 相和铁酸钙 ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) 相; MgO 掺杂量 4% 的混合渣试样中产生了新物相镁铝石 ($\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) 相。

2) MgO 掺杂量 2% 的高温调质混合渣, 截面呈层状结构, 内层 MgFeAlO_4 物相占比增加, 孔洞均匀且细小; 中间具有层状结构的 MgFe_2O_4 尖晶石包裹在 MgFeAlO_4 物相周围; 外层 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 物相孔洞均匀, 致密度适中。

3) MgO 的掺杂能抑制 MgFe_2O_4 和非胶凝性 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 物相生成、促进 MgFeAlO_4 物相生成、提高混合渣熔点、调整混合渣物相结构、改善致密程度。

参考文献:

- [1] 邓志豪. 转炉钢渣相演变和自粉化规律研究[D]. 北京: 北京科技大学冶金与生态工程学院, 2015.
- [2] 林超, 高卫, 钟娜娜, 等. SiO_2 改质对转炉钢渣中 C_2S 相优势析出及钢渣自粉化的影响[J]. 冶金工程, 2018, 5(2): 77-84.
- [3] O'Connor J, Nguyen B T. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review[J]. Journal of hazardous materials, 2021, 419: 126478.
- [4] 刘仕业, 王占军, 彭 彝, 等. 高炉渣对钢渣改性的物理化学基础研究[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5): 557-564.
- [5] 伊海赫. 微生物提升钢渣胶凝材料安定性和利用率的作用及机理[D]. 南京: 东南大学材料科学与工程学院, 2020.
- [6] LI X M, WU Y Q, MA Y W, et al. Effect of Si-based reductive modifying auxiliary on the recovery of iron and the cementitious reactivity of modified EAF slag[J]. Metallurgical Research & Technology, 2022, 119(1): 107.
- [7] 谢礼兰, 邓 敏. 率值对含磷硅酸盐水泥熟料矿物组成和微观结构的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 473-479.
- [8] 王振地, 黄 文, 王 敏, 等. 矿物组成对低热硅酸盐水泥抗海水侵蚀性能的影响[J]. 中国建材科技, 2022, 31(2): 32-35.

(下转第 104 页)

温度刚达到 1 400 ℃ 时已反应了 1.3%, 而 Nb 元素尚未参与反应。随后渣中 NbO₂ 与铁中 C 在渣金界面反应生成 NbC, NbC 的生成速率大于溶解进铁相速率, 因此在 6 min 时生成的 NbC 已将铁滴完全包裹, 阻碍渣金间传质进而限制 Nb 元素继续还原。在 1 400 ℃ 保温 10 min 时, Nb、Si 元素反应率分别为 36% 和 1.7%。

3 结 论

1) 通过添加熔剂 CaO 调节铌精矿配碳球团的碱度可有效抑制渣液喷溅、提高渣金分离效果, 合理的熔渣碱度为 1.0。

2) 在升温阶段 1 350 ℃ 时发现渣中 SiO₂ 与渣中残余 C 发生还原反应, 产物开始进入渗碳铁相。在 1 400 ℃ 保温 2 min 后渣金界面处有 NbC 生成, 除少量 NbC 溶入渗碳铁水外, 生成的 NbC 主要堆积在渣金界面形成致密外壳。

3) 渣金界面处致密 NbC 层阻碍了渣金界面传质, 降低了还原反应速率。1 400 ℃ 保温 10 min 后 Nb、Si 元素反应率分别为 36% 和 1.7%。Ti、RE 元素在熔分过程中不参与反应。

参考文献:

- [1] 何海洋, 何敏, 李建武. 我国铌矿资源供需形势分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 1-5.
- [2] 刘玉宝. 浅议白云鄂博铌矿资源开发及展望[J]. 稀土信息, 2015(9): 30-31.
- [3] 孙林泉, 王丽娜, 于宏东, 等. 低品位含铌矿物中铌的提取工艺研究进展[J]. 化工学报, 2021, 72(4): 1847-1862.
- [4] 张诗瀚, 王广, 杜亚星, 等. 含钛铌铁精矿含碳球团熔分过程试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(3): 5-10.
- [5] 王广, 薛庆国, 宁晓宇, 等. 含碳球团还原熔分综合利用铌铁精矿新工艺[J]. 矿冶工程, 2014, 34(1): 65-69.
- [6] 李林, 郭汉杰, 孟祥龙, 等. 钛磁铁矿球团还原与熔分关系试验研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(3): 106-110.
- [7] 孙志杰, 魏国, 刘占华, 等. 铜渣球团还原-熔分工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(2): 103-106.
- [8] 张波, 姜茂发. 利用白云鄂博含铌尾矿制备铌铁工艺的研究[J]. 工业加热, 2011, 40(3): 56-59.
- [9] 何旭初, 范鹏, 周渝生, 等. 高炉中铌还原产生的碳化铌滞留带[J]. 北京科技大学学报, 1990, 12(6): 504-509.
- [10] 何旭初, 杨永宜, 董一诚. 富铌炉料还原冶炼时铌进入铁相过程的研究[J]. 湖南冶金, 1994(5): 8-12.
- [11] 何旭初, 范鹏, 杨天钧, 等. 提高高炉冶炼含铌铁矿铌回收率的研究[J]. 湖南冶金, 1990(4): 1-3.
- [12] 王宁. Nb 变质处理铸造高速钢的组织 and 性能[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(2): 68-71.
- [13] 卢林, 黄进峰, 侯院刚, 等. 铌对喷射成形 M3:2 型高速钢组织和性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(10): 1292-1298.
- [14] 程军明, 吴伟烽, 聂娟, 等. 气泡在静水中上升破裂产生射流特性的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 513-517.
- [15] Oratis A T, Bush J W M, Stone H A, et al. A new wrinkle on liquid sheets: Turning the mechanism of viscous bubble collapse upside down[J]. Science, 2020, 369: 685-688.
- [16] 高蕾, 罗剑, 闵义, 等. 碱度和温度对结晶器保护渣表面张力的影响[J]. 辽宁科技大学学报, 2015, 38(6): 408-411.
- [17] 杨宏博. 夹杂物穿越钢渣界面过程运动行为研究[D]. 北京: 北京科技大学冶金与生态学院, 2015.
- [18] MA Z, ZHAO Z W, GUO W T, et al. Influence of Nb₂O₅ and basicity on the viscosity and structure of CaO-SiO₂-Nb₂O₅-CeO₂-CaF₂ slag system[J]. Metallurgical Research & Technology, 2020, 117(3): 307.
- [9] 张国成, 白晓光, 邬虎林, 等. 钢渣脱硫剂用于湿法石灰石-石膏法脱硫工艺的试验研究[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 647-653.
- [10] LI Z B, ZHAO S Y, ZHAO X G, et al. Cementitious property modification of basic oxygen furnace steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 575-579.
- [11] 谢雪珍, 叶有明, 黄小芳, 等. 改性甘蔗渣吸附剂的制备及其对废水中铬的吸附[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 166-169.
- [12] 张金矿, 黄业豪, 孙景敏, 等. 重金属污染土壤浮选修复方法概述[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 67-71.
- [13] 曹丰泽. MgO 膨胀剂的作用机理及在补偿收缩水泥基材料中的应用[D]. 北京: 清华大学土木工程系, 2021.
- [14] 吴吉响, 冯博, 陈燕, 等. 粉煤灰-硅藻土复合材料对选矿废水中 Cr(VI) 的吸附行为研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4): 125-129.
- [15] 牟文宁, 辛海霞, 雷雪飞, 等. 表面改性对铁尾矿基复合材料吸水性能的影响[J]. 矿冶工程, 2018, 38(4): 139-143.
- [16] 韦武举, 徐金玉, 郑炳峰, 等. 基于不同陈化工艺的水泥稳定钢渣基层试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(6): 1169-1172.
- [17] 李婷婷, 张廷安, 吕国志, 等. 钛白废酸直接浸出含钒钢渣基础研究试验研究与机理分析[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 104-108.
- [18] 杜惠惠, 倪文, 高广军. 水淬高钛高炉渣制备 C40 固废混凝土试验研究[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24055-24060.
- [19] 郝帅, 罗果萍, 陈银胜, 等. 磷铝复掺对 C₂S 晶型转变的影响[J]. 中国冶金, 2022, 32(9): 126-133.
- [20] Kaur Ubhi M, Kaur M, Singh D, et al. Hierarchical Nanoflowers of MgFe₂O₄, Bentonite and B-, P- Co-Doped Graphene Oxide as Adsorbent and Photocatalyst: Optimization of Parameters by Box-Behnken Methodology[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(17): 9678.
- [21] 刘佳文, 陈铁军, 周仙霖, 等. 基于无碳烧结的褐铁矿型红土镍矿固结机理研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(3): 1-7.

引用本文: 郝帅, 罗果萍, 陈银胜, 等. MgO 掺杂对高炉渣熔调质钢渣物相组成及结构的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 95-98.

(上接第 98 页)