

# Na<sub>2</sub>O 对 CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 渣中磷的富集行为影响

何 赛, 刘亚琴, 林 路\*, 侯中晓, 黄 芳, 胡砚斌

(钢铁研究总院冶金工艺研究所, 北京 100081)

**摘 要:**通过 MoSi<sub>2</sub> 高温箱式炉试验和 FactSage、扫描电镜及 XRD 等分析方法, 对渣中 Na<sub>2</sub>O 对含磷渣中磷的赋存形式、物相析出规律以及含磷渣中磷的富集行为的影响规律进行系统研究。结果表明: 对于 CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 渣系, Na<sub>2</sub>O 的加入会取代 nC<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>P 固溶体中部分钙, 形成 Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 固溶体, 随着 Na<sub>2</sub>O 进一步增加直至过量时, 前述反应生成的高磷固溶体 (Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) 中 Ca 和 Si 组分的比例进一步降低, 逐渐富集成为更高磷固溶体 Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 富磷相中磷的品位得以提高。随着渣中 Na<sub>2</sub>O 含量的增加, 炉渣熔点明显降低, 富磷相中磷含量明显增加, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量超过 30%, 完全满足钢渣磷肥对磷含量的要求。因此在炼钢过程加入适量的 Na<sub>2</sub>O (低于 6%) 代替 CaF<sub>2</sub> 作助熔剂造渣, 可以促进渣中磷富集, 进而改善含磷渣中磷资源回收作磷肥的效果。

**关键词:**含磷转炉渣; 钢渣磷肥; 物相析出; 富集行为; 资源化利用

中图分类号: TF713.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)02-0140-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.02.021

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 Na<sub>2</sub>O on the enrichment behavior of phosphorus in the slag system CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

He Sai, Liu Yaqin, Lin Lu\*, Hou Zhongxiao, Huang Fang, Hu Yanbin

(Metallurgical Technology Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In this paper, the effects of Na<sub>2</sub>O in slag on the existing forms, the law of phase precipitation and the phosphorus enrichment behavior of phosphorus-containing slag are systematically studied by high-temperature experiments in MoSi<sub>2</sub> furnace and analyzed by FactSage, SEM and XRD. The research results show that: for the CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> slag system, the addition of Na<sub>2</sub>O will replace solid solution calcium of nC<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>P, forming Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> solid solution. As the content of Na<sub>2</sub>O increases to excess, the content of Ca and Si in P-solid solution (Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) reduces, and the Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> phase produces the grade of phosphorus in the P-rich phase increases. With the increase of the content of Na<sub>2</sub>O in slag, the melting point of the slag decreases significantly, the content of phosphorus in the P-rich phase increases significantly, and the content of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> exceeds 30%, which ultimately meets the requirement of phosphorus content in the steel slag phosphate fertilizer. Therefore, adding an appropriate amount of Na<sub>2</sub>O (less than 6%) in the steel making process instead of CaF<sub>2</sub> as the fluxing agent can promote the phosphorus enrichment effect in the slag, and the converter slag can be used as a phosphate fertilizer.

收稿日期: 2022-02-06

基金项目: 国家自然科学基金 (51704080, 51874102, 52074093) 资助项目。

作者简介: 何赛 (1987—), 男, 博士生, 高级工程师, 研究方向: 钢渣资源化利用, E-mail: hesai\_1011@163.com; \* 通讯作者: 林路 (1985—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向: 转炉炼钢工艺、钢渣资源化利用等, E-mail: linlu\_luke@sina.com。

**Key words:** phosphorus-containing converter slag, steelslag phosphate fertilizer, phase precipitation, enrichment behavior, resource recovery

## 0 引言

在转炉炼钢过程中每生产 1 t 钢约产生 120 kg 渣, 2020 年我国钢产量达到 10 亿多吨, 转炉钢渣产生量超过 1 亿吨, 由于部分钢渣中含有较高的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 回收其中磷元素具有一定的经济和战略意义<sup>[1]</sup>。针对转炉双联工艺及使用高磷低品位矿冶炼的铁水, 其渣中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量更高, 如首钢京唐脱磷炉渣中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量在 4% ~ 10% 波动<sup>[2-3]</sup>, 这部分渣中磷含量接近甚至超过我国部分低品位磷矿中磷含量。随着我国转炉双联工艺的发展及国内高磷低品位矿的进一步使用, 高磷转炉渣产量逐渐增加, 这部分脱磷渣中磷资源将越来越受到重视。如果简单地将钢渣返回冶炼内部循环利用, 会造成磷在铁液中的循环富集, 并最终限制钢渣的再利用<sup>[4]</sup>; 如果用于建筑领域, 由于渣中 *f*-CaO 和 *f*-MgO 的存在, 渣容易水化膨胀, 限制了其使用, 同时如果高磷渣直接用于建筑领域也造成了磷资源的浪费。针对炉渣中磷资源的回收利用, 国内外学者进行了大量研究工作, 关于含磷钢渣资源化利用已成为备受关注的问题<sup>[5]</sup>。佟帅等<sup>[6]</sup>对脱磷渣进行气化脱磷, 降低脱磷渣中磷含量, 使脱磷渣达到回收利用的目的, 但是这一过程中渣的磷资源未得到有效利用; 将钢渣作为托马斯磷肥的原料又嫌磷含量太低<sup>[7]</sup>。因此, 如果能将钢渣中的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 富集并分离出来, 提取出来含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 相可以作磷肥或作为二次磷资源, 其余成分可返回冶炼内部循环使用, 如烧结、铁水脱硅、铁水脱磷过程, 实现脱磷渣的循环利用, 促进转炉钢渣在农业领域的资源化利用, 解决了环境污染并创造经济效益<sup>[8]</sup>。许多学者针对含磷渣中磷的赋存状态<sup>[9-11]</sup>及磷富集分离行为<sup>[12-15]</sup>进行了大量研究, 如王达志<sup>[16]</sup>对不同碱度和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的高磷渣中磷的富集行为进行了研究, 其研究表明炉渣碱度和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量都对渣中磷富集产生影响, Jiang 等<sup>[17]</sup>对不同 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量对渣中磷富集的影响进行了研究分析, Lin 等<sup>[18]</sup>利用不同 TiO<sub>2</sub> 改质脱磷渣, 研究了 TiO<sub>2</sub> 对脱磷渣磷富集的影响和作用机理。这些研究结果表明通过其它助溶剂的使用可以降低脱磷渣的熔点和粘度, 促进渣中磷的富集, 有利于后期渣中磷的回收。而在炼钢过程中, 通常在渣中加入一定量 CaF<sub>2</sub> 来降低炉渣熔点, 改善渣流动性进而促进脱磷过程, 但是渣中的

CaF<sub>2</sub> 严重侵蚀耐火材料及污染环境, 同时出于环保的目的部分研究工作者<sup>[19-20]</sup>利用 Na<sub>2</sub>O 替代 CaF<sub>2</sub> 作为造渣剂。如 Sun<sup>[21]</sup> 研究表明在一定条件下 Na<sub>2</sub>O 比 CaO 脱磷作用更强, Na<sub>2</sub>O 可起到很好的助熔化渣的作用, Na<sub>2</sub>O 对降低渣熔点及粘度有明显的效果, 所以脱磷渣中 Na<sub>2</sub>O 的加入有利于脱磷渣在冷却过程中磷的富集, 而现有研究工作中对于 Na<sub>2</sub>O 对高磷脱磷渣中磷富集行为影响的系统研究较少。

鉴于此, 笔者利用 MoSi<sub>2</sub> 高温箱式电阻炉对不同 Na<sub>2</sub>O 成分的合成含磷渣进行热态析出试验, 并利用 FactSage 软件、扫描电镜及 XRD 物相分析等手段, 分析了不同 Na<sub>2</sub>O 含量对合成含磷渣中磷的赋存形式、物相析出规律以及脱磷渣中磷的富集行为的影响规律, 为含磷渣的资源化利用提供一定的参考价值。

## 1 研究方法

采用分析纯试剂 CaO、SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 模拟配置合成渣, 因 Na<sub>2</sub>O 易吸水, 在试验时利用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 调整渣中 Na<sub>2</sub>O 成分。另一方面, 在试验过程中保持渣碱度为 2.5 ( $R=CaO/SiO_2$ ), 合成渣具体化学成分见表 1。图 1 为合成渣在 FactSage 计算软件绘制 CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相图中的成分范围, 标注为 X, 试验渣系处在硅酸二钙(C<sub>2</sub>S)初生区内, 在冷却过程中 C<sub>2</sub>S 首先析出, 容易形成 *n*C<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>P 固溶体(主要是 Ca<sub>15</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> 和 Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)。

表 1 试验渣化学成分

Table 1 Composition of the synthetic slag samples %

渣样	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O
A	42.86	17.14	30	10	0
B	42.15	16.85	30	10	1
C	41.43	16.57	30	10	2
D	40.71	16.29	30	10	3
E	40.00	16.00	30	10	4
F	39.29	15.71	30	10	5
G	38.57	15.43	30	10	6
H	37.86	15.14	30	10	7
I	37.15	14.85	30	10	8
J	36.43	14.57	30	10	9
K	35.72	14.28	30	10	10

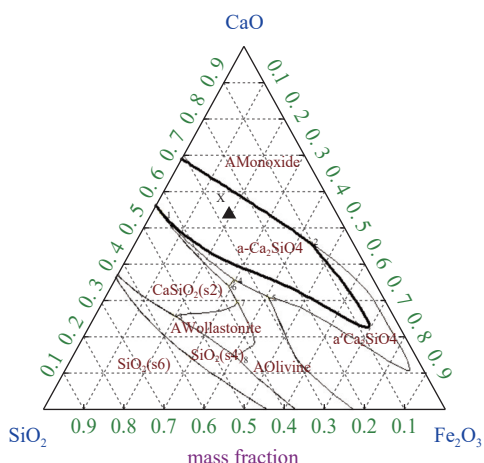


图1 CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元渣中试验渣系成分  
Fig. 1 Observed slag composition in the ternary phase diagram of the CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system

将配好的渣样 200 g 放入 Ø60 mm×100 mm 坩埚，坩埚外套石墨坩埚置于 MoSi<sub>2</sub> 高温箱式炉内加热，炉渣在箱式炉中加热到 1 450 °C，并保温 0.5 h 以保证炉渣充分熔化，然后以 3 °C/min 的速度使温度降到 1 350 °C 并保温 1 h，以充分促进 3CaO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的析出，再以 3 °C/min 的速度降温至 1 150 °C，然后关闭炉子，试样随炉冷却，炉渣升温降温曲线见图 2。并取研磨后粒度小于 300 目(48 μm)的试验渣做 XRD 分析。XRD 采用铜靶，电压 40 kV，电流 130 mA，2θ 10°~90°，扫描速度 5 °/min。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 Na<sub>2</sub>O 对熔渣凝固过程中析出相析出过程影响分析

利用 Factsage 中 Fact 和 FToxid 数据库计算

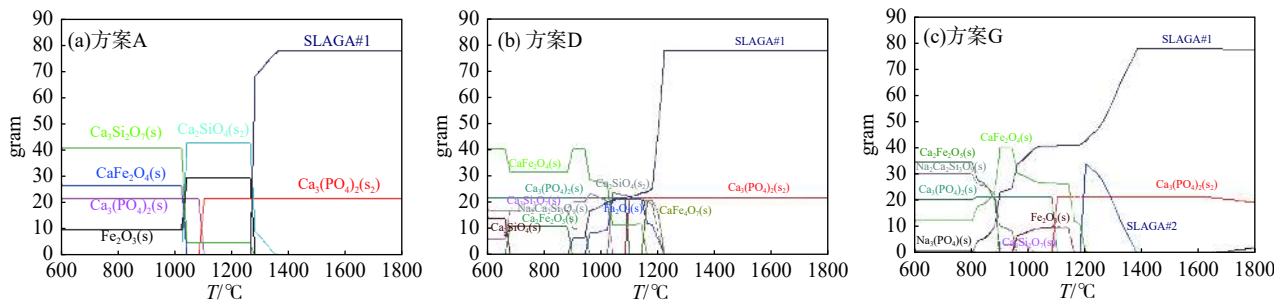


图3 A、D 和 G 方案熔渣凝固过程中析出相的析出过程  
Fig. 3 The precipitation process of precipitates during the solidification of A、D and G slag in schemes

从图 3 可以看出，各熔渣凝固过程中渣中磷均是以 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 的形式存在，Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 析出温度很高，在 1 800 °C 以上时渣中磷就以 α-Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 相形

式析出，在 1 100 °C 左右存在相变，α-Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 转变为等质量的 β-Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 相析出。炉渣 Na<sub>2</sub>O=0%、3% 和 6% 的渣样生成的 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 初始质量含量相

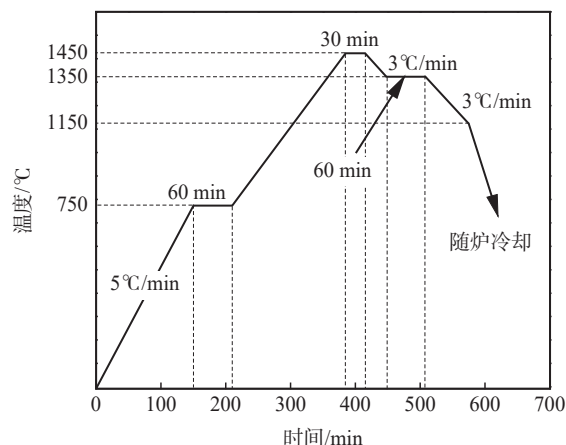


图2 热态试验温度曲线  
Fig. 2 Experimental temperature curve

式析出，在 1 100 °C 左右存在相变，α-Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 转变为等质量的 β-Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 相析出。炉渣 Na<sub>2</sub>O=0%、3% 和 6% 的渣样生成的 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 初始质量含量相

当,因此随着该渣系中 Na<sub>2</sub>O 含量的增加,平衡物相中生成的 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 并没有明显增减,只是随着熔渣中 Na<sub>2</sub>O 的加入,熔渣在 960 °C 是析出菱硅钙钠石相 (Na<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>),而随 Na<sub>2</sub>O 加入量增加,其析出量增加,nCaO·SiO<sub>2</sub> 相析出较少。当加入 Na<sub>2</sub>O 含量较高时(如 Na<sub>2</sub>O 为 6%),熔渣中甚至析出 Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>,使含磷相中硅酸钙减少,增加了富磷相中的磷含量,因此 Na<sub>2</sub>O 的加入有利于磷的富集。

## 2.2 Na<sub>2</sub>O 对含磷转炉渣中磷富集行为的影响

### 2.2.1 Na<sub>2</sub>O 对含磷转炉渣熔点的影响

利用 FactSage 热力学软件对试验渣熔点进行计算,结果见图 4。从计算结果看出,随 Na<sub>2</sub>O 含量的增加,炉渣熔点呈明显下降趋势,而对于试验渣系 A、D 和 G,炉渣熔点分别为 1 341.0、1 216.9 °C 和 1 207.9 °C。表明 Na<sub>2</sub>O 对于试验渣系具有良好的助熔作用,可以作为卤化物(CaF<sub>2</sub> 等)的替代物进行化渣。

### 2.2.2 Na<sub>2</sub>O 含量对含磷转炉渣中磷富集行为的影响

图 5 为 A、D 和 G 试验渣背散射电子图,表 2 为对应图 5 中试样各相成分的 EDS 结果,图 6 为对应 A 和 G 试验渣样 XRD 分析结果。从检测结果可知,A、D 和 G 渣主要由富磷相、RO 相及基体相组成;基体相中磷含量较低,主要为 nCaO·SiO<sub>2</sub>;RO 相主要是由铁氧化物或铁镁氧化物形式存在。A 渣

富磷相主要以 Ca<sub>15</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> 和 Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 形式存在;加入 3%Na<sub>2</sub>O 后,加入的 Na<sub>2</sub>O 取代富磷相中 Ca,形成磷品位更高的 Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 固溶体和硅酸磷酸钠钙 (Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>),最终富磷相中磷主要是以 Ca<sub>15</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>、Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 和 Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 形式共存,同时 FactSage 计算结果也证明了这点;对于 G 渣 (6%Na<sub>2</sub>O),随 Na<sub>2</sub>O 含量增加,Na<sub>2</sub>O 进一步取代富磷相中 Ca,反应生成的高磷固溶体 (Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) 中 Ca 和 Si 组分比例进一步降低,逐渐富集成为更高磷固溶体 Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>,富磷相中磷的品位也因此相应提高。因此,Na<sub>2</sub>O 的加入有利于渣中磷的富集。

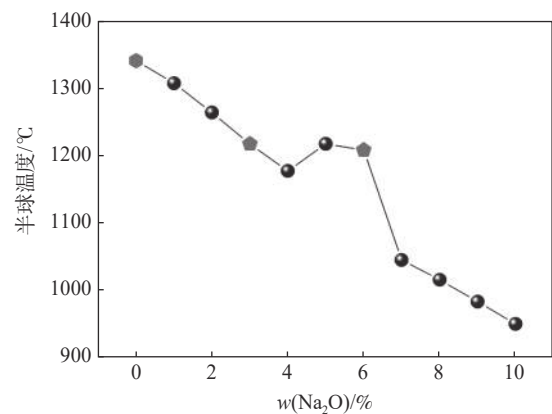
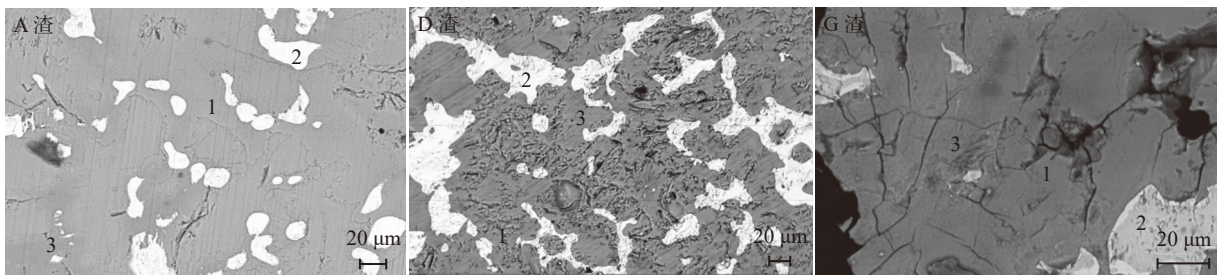


图 4 合成渣熔点随 Na<sub>2</sub>O 成分变化趋势  
Fig. 4 The tendency of the melting point of synthetic slag with different Na<sub>2</sub>O content



1-富磷相;2-RO 相;3-基体相

图 5 不同 Na<sub>2</sub>O 含量合成渣的背散射电子图  
Fig. 5 SEM-BSE image of experimental samples A, D, G slag

上述分析结果可知,A 号渣中富磷相中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 20% 左右,基体相中也有 3%~4% 的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,渣中富磷相分布较分散且粒径小,一般为 10~30 μm;而加入 3%Na<sub>2</sub>O 后,D 号渣富磷相中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量较 A 号渣略有增加,富磷相中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量一般为 23~26%,粒径也进一步增大,一般为 20~40 μm;对于 G 渣 (6%Na<sub>2</sub>O) 富磷相中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量进一步提高,达

到 32% 左右,加入 Na<sub>2</sub>O 改性后钢渣中富磷相 SiO<sub>2</sub> 含量比原渣低也说明这一点;因此渣中加入适量 Na<sub>2</sub>O 改性剂,有利于磷在 nC<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>P 固溶体中高浓度富集,改性后渣中富磷相 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量在 30% 以上,如此高的磷含量已经远远高出我国磷矿的平均品位,也满足磷肥工业中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量的要求,如能将渣中的富磷相提取出来,则完全能满足磷肥生产的要求。

表 2 相应合成渣终样 EDS 结果分析  
Table 2 Chemical composition of each phase from the sample in Fig.5 by EDS

序号	物相	Na <sub>2</sub> O	MgO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%
A	富磷相	0.00	2.95	15.24	20.75	58.90	2.16	
	RO相	0.00	5.30	0.07	0.17	0.61	93.85	
	基体相	0.00	11.46	31.29	3.56	53.68	0.00	
D	富磷相	2.16	0	14.58	23.63	59.61	0.00	
	RO相	0.00	10.48	0.00	0.00	0.00	89.52	
	基体相	1.53	0.00	25.32	3.32	68.80	1.03	
G	富磷相	12.31	0.00	8.63	31.74	47.01	0.31	
	RO相	4.36	0.00	0.38	1.55	0.00	93.71	
	基体相	3.70	0.00	22.51	2.95	68.31	2.53	

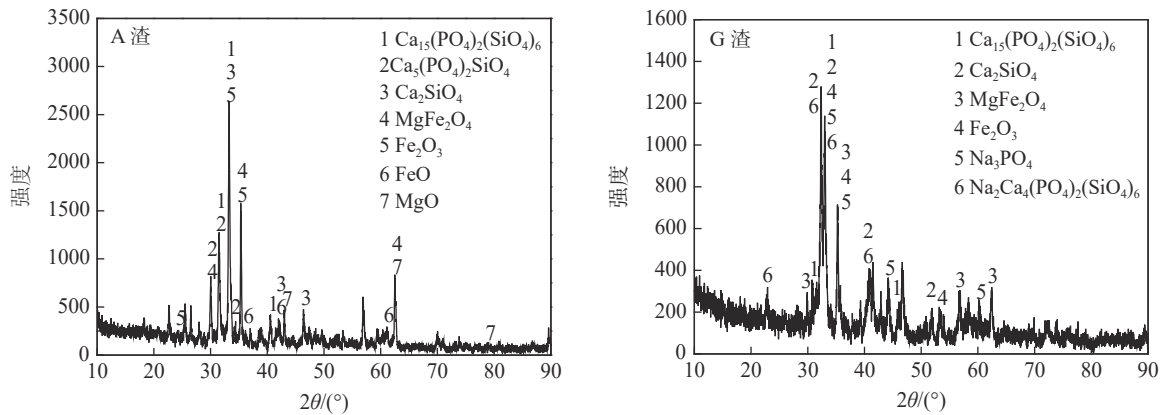


图 6 A、G 试验渣样 XRD 谱对比  
Fig. 6 X-ray diffraction patterns of A slag and G slag

### 3 结论

1) 随着 Na<sub>2</sub>O 的加入, 熔渣在 960 °C 时析出菱硅钙钠石相 (Na<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>), 且随 Na<sub>2</sub>O 增加其析出量增加, nCaO·SiO<sub>2</sub> 相析出较少, 当加入 Na<sub>2</sub>O 含量为 6% 时, 熔渣中析出 Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 使含磷相中硅酸钙减少, 提高了富磷相中的磷含量, 因此 Na<sub>2</sub>O 有利于磷的富集。

2) 对于 CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 渣系, 添加 Na<sub>2</sub>O 会改变渣中的赋存形式。在含磷转炉渣降温过程中, Na<sub>2</sub>O 的加入会取代 nC<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>P 固溶体的部分钙, 形成 Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 固溶体, 随着 Na<sub>2</sub>O 进一步增加直至过量时, 前述反应生成的高磷固溶体 (Na<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>-

SiO<sub>4</sub>) 中 Ca 和 Si 组分比例进一步降低, 逐渐富集成为磷含量更高的固溶体形式 (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), 富磷相中磷的含量得到提高, 因此通过控制渣中合适的 Na<sub>2</sub>O 含量, 有利于磷在富磷相中高浓度富集。

3) 钢渣中由富磷相、基体相以及富铁相组成, 渣中磷含量主要以 nC<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>P 固溶体形式存在于富磷相中; 加入 Na<sub>2</sub>O 后, 熔渣熔点明显降低, 富磷相中磷含量明显增加, 其 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量接近 30%, 完全满足钢渣磷肥对磷含量的要求。因此, 在炼钢过程加入适量的 Na<sub>2</sub>O (低于 6%) 代替 CaF<sub>2</sub> 作助熔剂造渣, 不仅可以促进渣中磷的富集, 同时可以改善含磷渣中磷资源回收作磷肥的效果。

### 参考文献

- [1] Yang Jinxing, Lv Ningning, Su Chang, *et al.* Research process on the recycling of phosphorus resource from converter steelmaking slag[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(6): 1440-1446.

- (杨金星, 吕宁宇, 苏畅, 等. 转炉钢渣中磷资源回收利用的研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(6): 1440-1446.)
- [2] Bai Xuefeng, Zhang Yimin, Sun Yanhui, *et al.* Research on recycling of hot slag in dephosphorization furnace of duplex process[J]. *Steelmaking*, 2018, 34(5): 31-36.  
(白雪峰, 张一民, 孙彦辉, 等. 转炉双联炼钢工艺热态渣再利用脱磷的工业试验[J]. *炼钢*, 2018, 34(5): 31-36.)
- [3] Dong Wenliang, Luo Lei, Tian Zhihong, *et al.* Recycle of decarburization-slag indephosphorization-furnace of duplex process in converter[J]. *Iron and Steel*, 2017, 52(5): 36-42.  
(董文亮, 罗磊, 田志红, 等. “全三脱”工艺流程中脱碳渣返回脱磷转炉利用[J]. *钢铁*, 2017, 52(5): 36-42.)
- [4] Cui Hongxu, Chen Qingwu, Shen Yingying, *et al.* Technology research on phosphorus enrichment and application of converter steel slag[J]. *China Metallurgy*, 2010, 20(3): 35-38,46.  
(崔虹旭, 陈庆武, 申莹莹, 等. 转炉钢渣磷富集与应用的技术研究[J]. *中国冶金*, 2010, 20(3): 35-38,46.)
- [5] Du Chuanming, Yu Yaohui, Yuan Lei, *et al.* Research status and development trend of phosphorus separation and recovery from steelmaking slag[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(12): 1-9.  
(杜传明, 于耀辉, 袁磊, 等. 钢渣中磷分离及回收的研究现状和发展趋势[J]. *钢铁*, 2020, 55(12): 1-9.)
- [6] Tong Shuai, Li Chenxiao, Wang Shuhuan, *et al.* Influence of temperature on dephosphorization of recycling converter gasification dephosphorization slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(5): 109-114.  
(佟帅, 李晨晓, 王书桓, 等. 温度对转炉气化脱磷渣再利用脱磷的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(5): 109-114.)
- [7] Boom R, Riaz S, Mills K C. Slags and fluxes entering the new millennium, an analysis of recent trends in research and development[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2005, 32(1): 21-25.
- [8] Ji Lipeng. Analysis and discussion on path of phosphorus flow in iron and steel plant[J]. *China Metallurgy*, 2018, 28(6): 19-24.  
(吉立鹏. 钢铁厂磷素流的路径分析及探讨[J]. *中国冶金*, 2018, 28(6): 19-24.)
- [9] Yang X, Matsuura H, Tsukihashi F. Condensation of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> at the interface between 2CaO•SiO<sub>2</sub> and CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO<sub>x</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> slag[J]. *ISIJ International*, 2009, 49(9): 1298-1307.
- [10] Kitamura S, Saito S, Utagawa K, *et al.* Mass transfer of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> between liquid slag and solid solution of 2CaO•SiO<sub>2</sub> and 3CaO•P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>[J]. *ISIJ International*, 2009, 49(12): 1838-1844.
- [11] Wu X R, Wang P, Li L S, *et al.* Distribution and enrichment of phosphorus in solidified BOF steelmaking slag[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2011, 38(3): 185-188.
- [12] Hironari K, Kazuyo Matsubae-Yokoyama, Tetsuya Nagasaka. Magnetic separation of phosphorus enriched phase from multiphase dephosphorization slag[J]. *Tetsu-to-Hagane*, 2010, 50(1): 59-64.
- [13] Lin L, Bao Y P, Wang M, *et al.* Influence of SiO<sub>2</sub> modification on phosphorus enrichment in P-bearing steelmaking slag[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2013, 40(7): 521-527.
- [14] Shimauchi K, Kitamura S, Shibata H. Distribution of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> between solid dicalcium silicate and liquid phases in CaO-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system[J]. *Tetsu-to-Hagane*, 2009, 95(3): 229-235.
- [15] Deo B, Halder J, Snoeijer B, *et al.* Effect of MgO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> variations in oxygen steelmaking(BOF) slag on slag morphology and phosphorus distribution[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2005, 32(1): 54-60.
- [16] Wang Dazhi, Bao Yanping, Wang Min. Study on the enrichment behavior of phosphorus in high phosphorus converter slag[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(S1): 65-72.  
(王达志, 包燕平, 王敏. 高磷转炉渣中磷的富集行为研究[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(S1): 65-72.)
- [17] Jiang L, Diao J, Yan X, *et al.* Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on enrichment of phosphorus in hot metal dephosphorization slag[J]. *ISIJ International*, 2015, 55(3): 564-569.
- [18] Lin Lu, Bao Yanping, Wang Min, *et al.* Influence of titania modification on phosphorus enrichment in P-bearing steel-making slag[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(8): 1013-1019.  
(林路, 包燕平, 王敏, 等. 二氧化钛改质对含磷转炉渣中磷富集行为的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(8): 1013-1019.)
- [19] Diao Jiang. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>O on dephosphorization of high phosphorus hot metal[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2013, 25(2): 9-13.  
(刁江. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Na<sub>2</sub>O对高磷铁水脱磷的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2013, 25(2): 9-13.)
- [20] Li Xianpeng, Gao Jintao, Zhang Yanling, *et al.* Distribution behavior of phosphorus between CaO-FeO-SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> slags and carbon-saturated iron[J]. *Iron and Steel*, 2017, 52(2): 18-23.  
(李显鹏, 高金涛, 张延玲, 等. CaO-FeO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Na<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub>渣系与碳饱和铁水间磷分配行为[J]. *钢铁*, 2017, 52(2): 18-23.)
- [21] Sun Jiali, Liu Chengjun, Jiang Maofa. Thermodynamic model for dephosphorization of CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(2): 146-151,178.  
(孙嘉丽, 刘承军, 姜茂发. CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>渣系的脱磷热力学模型[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(2): 146-151,178.)

实习编辑 梁光芬

编辑 杨冬梅