



Effect of P_2O_5 on lime dissolution process in steelmaking slag

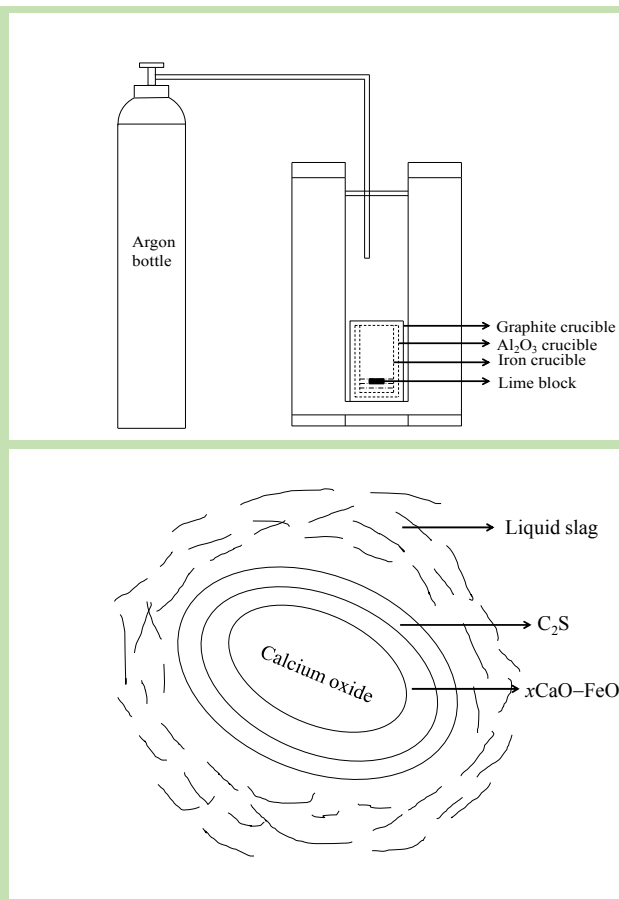
Yanbo CAO¹, Yunjin XIA^{1,2*}, Jie LI^{1,2}, Dingdong FAN^{1,2}

1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

2. Key Lab of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling, Ministry of Education, Ma'anshan, Anhui 243002, China

Abstract: The dissolution behavior of lime in two groups of slag systems under static conditions was studied by introducing lime blocks with an average size of $\phi 15\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ into $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ and $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-P}_2\text{O}_5$ slag at 1400°C . The results showed that four areas were formed along reaction interface around in two slag, namely base slag layer, C_2S permeable layer, calcium ferrite permeable layer and lime layer. C_2S permeable layer and calcium ferrite permeable layer were formed by the interpenetration of Ca^{2+} in lime and Fe^{2+} in liquid slag. The presence of a dense solid phase layer in the permeable layer affected the dissolution of lime. The calcium ferrite layer in the permeable layer was gradually replaced by C_2S layer. The thickness of C_2S layer increased and reached maximum. Finally C_2S layer was dissolved in liquid slag. The dissolution rate of lime in the two groups of slag was similar in reaction time of 5~60 s, and the dissolution rate of lime in phosphorus-containing slag was significantly accelerated in reaction time of 60~80 s. When P_2O_5 was added to the slag, phosphorus was dissolved in C_2S to form a $\text{C}_2\text{S-C}_3\text{P}$ solid solution layer. The formation of this layer will displace FeO into the slag, improve the permeability of the slag, and accelerate the dissolution of lime.

Key words: lime; dissolution; solid solution; free calcium oxide content; P_2O_5



收稿: 2019-10-22, 修回: 2019-12-22, 网络发表: 2020-01-13, Received: 2019-10-22, Revised: 2019-12-22, Published online: 2020-01-13

基金项目: 钢铁联合研究基金资助项目(编号: U15601109; U1660116)

作者简介: 曹彦博(1997-), 男, 安徽省黄山市人, 硕士, 冶金工程专业, E-mail: 472880668@qq.com; 夏云进, 通讯联系人, E-mail: xyjsssss@aliyun.com.

引用格式: 曹彦博, 夏云进, 李杰, 等. P_2O_5 对炼钢炉渣中石灰溶解过程的影响. 过程工程学报, 2020, 20(9): 1074-1081.

Cao Y B, Xia Y J, Li J, et al. Effect of P_2O_5 on lime dissolution process in steelmaking slag (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(9): 1074-1081, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219324.

P_2O_5 对炼钢炉渣中石灰溶解过程的影响

曹彦博¹, 夏云进^{1,2*}, 李杰^{1,2}, 范鼎东^{1,2}

1. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002

2. 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室, 安徽 马鞍山 243002

摘要: 在 1400 ℃ 下, 将平均尺寸 $\phi 15\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的石灰块投入 $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ 及 $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-P}_2\text{O}_5$ 两组渣系中, 研究了静态条件下石灰在两组渣系中的溶解行为。结果表明, 两组渣系在反应界面周围形成四个区域, 即基体渣层、 C_2S 渗透层、铁酸钙渗透层和石灰层。渗透层为石灰中的 Ca^{2+} 与液渣中的 Fe^{2+} 相互渗透所形成的一个多相共存区域, 存在致密固相层影响石灰的溶解。渗透层中的铁酸钙层逐渐被 C_2S 层取代, C_2S 层厚度不断增加最终溶解于液相渣中。5~60 s 两组渣系石灰溶解速度相近, 60~80 s 含磷渣系石灰溶解速度显著加快。当渣中加入 P_2O_5 时, 磷会固溶于 C_2S 中形成 $\text{C}_2\text{S-C}_3\text{P}$ 固溶体层, 该层的形成会排挤 FeO 进入渣中, 提高渣的渗透能力, 加速石灰溶解。

关键词: 石灰; 溶解; 固溶体; 自由氧化钙含量; P_2O_5

中图分类号: TQ460.6+4

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)09-1074-08

1 前言

石灰作为炼钢过程的主要原料, 在转炉内的溶解速度直接影响转炉渣的脱磷能力^[1]。石灰的快速溶解可及时形成流动性良好、碱度适宜的炉渣, 为转炉脱磷提供有利的热力学和动力学条件, 实现钢水高效脱磷, 减少回磷, 降低造渣料消耗及渣中自由氧化钙含量^[2]。但在实际炼钢操作过程中, 受到各种因素影响, 炼钢炉渣中存在部分石灰未充分溶解, 造成脱磷效率低及钢渣自由氧化钙含量高难以综合利用等问题^[3-5]。同时, 为降低生产成本, “双渣+留渣”工艺成为近些年转炉炼钢企业主要生产工艺。该工艺的关键在于低温下实现石灰快速、充分地溶解^[6-10]。

为提高石灰的溶解速率, 炼钢工作者研究了石灰在炼钢炉渣的溶解过程。张莉霞^[11]研究了在不同动态条件下实验室内石灰的溶解机理, 发现穿过渣/石灰颗粒存在致密且连续的 $\text{C}_2\text{S-C}_3\text{P}$ 固溶体层和紧邻石灰的 FeO/MnO 富集层。李远洲等^[12]采用旋转圆柱体法研究了渣中 FeO/SiO_2 对石灰溶解速度的影响, 发现随 FeO 含量增加石灰在渣中的溶解速度与传质速度均提高。孟金霞等^[13]采用旋转圆柱法研究了炉渣成分及温度对石灰溶解速率的影响, 发现增加渣中 FeO 含量、减少 MgO 含量、降低碱度、提高炉渣温度均有利于石灰快速溶解。Umakoshi 等^[14]采用旋转圆柱法研究了煅烧后的致密石灰柱的溶解速率, 发现石灰的溶解速率受温度影响较大, 随温度升高

而上升, 同时也发现了在石灰与渣层界面处生成了致密的硅酸二钙层。Shahriar 等^[15]研究了石灰在 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系中的溶解情况, 观察到有致密的硅酸二钙固相层。前人对石灰溶解过程进行的研究主要侧重于 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系及 $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-MgO}$ 系炉渣, 采用旋转圆柱法或石灰微粒投入法研究高温下石灰溶解过程^[16,17]。但实际炉渣在脱磷过程中会形成 P_2O_5 进入渣中, 可能会影响石灰的溶解过程。目前关于 P_2O_5 对石灰溶解过程中的影响研究较少。本工作将压制成的圆柱石灰投入两组不同的渣系中研究了 1400 ℃ 下 P_2O_5 对炼钢过程中石灰溶解过程的影响, 探究了炉渣中的 P_2O_5 成分对实际炼钢过程中脱磷炉初期的石灰溶解速度是否有促进作用及其影响机理。

2 实验

2.1 实验材料

炉渣配制: 设定渣系碱度为 1.5, 在 $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ 相图中找出该碱度下渣系硅酸二钙饱和的成分点, 配制 1 号渣系, 同时固定 P_2O_5 含量为 10wt%, 其他成分不变配制 2 号渣系, 见表 1。在实际配料中, CaO 采用分析纯粉末加入, FeO 以草酸亚铁形式加入, P_2O_5 以 $3\text{CaO} \cdot P_2O_5$ 形式加入。

圆柱石灰制备: 将块状石灰置于井式坩埚炉中, 于 1200 ℃ 下煅烧 60 min 活化后取出, 用玛瑙研钵粉碎后, 采用油式液压机在 50 MPa 压力下, 加水作黏合剂压制成直径 15 mm、高 10 mm ($\phi 15\text{ mm} \times 10\text{ mm}$) 的圆柱体,

置于井式坩埚炉中在 1000℃ 下保温 120 min 后取出密封保存。

表1 两组实验渣成分

Table 1 Composition of two experimental slag

Number	Content/wt%				
	CaO	SiO ₂	FeO	Basicity, <i>R</i>	P ₂ O ₅
1	40.9	27.3	31.8	1.5	—
2	36.8	24.5	28.7	1.5	10

2.2 实验方法

根据表1配制 40 g 合成渣, 混合均匀后装入铁坩埚中, 外套氧化铝坩埚及石墨坩埚保护, 置于井式坩埚炉中, 以 6℃/min 的升温速度升至 1400℃, 保温 60 min 确保炉渣完全融化, 实验过程中全程通氩气保护; 之后将制备好的圆柱石灰投入渣中, 分别保温 5, 30, 60, 80 s 后取出, 吹氩气冷却防止粉化, 镶嵌石灰样并用不同粒度的砂纸打磨抛光后, 在 JEM-6510 型扫描电镜(SEM, 日本电子株式会社)下观察, 并用电镜附带的 EDS 能谱分析其界面成分。取适量各时间段炉渣于 DX-2700 型 X 射线衍射仪(XRD, 丹东浩元仪器有限公司)下进行物相分析。利用 Factsage 软件画出 CaO-SiO₂-FeO 三元相图, 并将具有代表性时段的渣成分及能谱分析结果于相图中标示进行分析。

3 结果与讨论

3.1 石灰在 CaO-SiO₂-FeO 渣系中的溶解过程

图1为加入石灰不同时间后炉渣的 SEM 照片(石灰试样被渣侵蚀包裹后取出冷却时易破碎, 故 30 s 时的侵蚀样未取得电镜图), 图2为侵蚀界面成分变化较大的 5 和 60 s 时各点的能谱分析结果, 图3为各炉渣试样的 XRD 谱, 图4为炉渣各点成分及各时间段炉渣成分在相图中的位置。根据图1(a)各区域点成分及图3的 XRD 谱推测, A 区域呈深黑色, 成分接近原始渣料成分, 应

为液相基体渣层; B 区域为深灰色夹杂灰白色, 含少量铁酸钙及固溶体, 为硅酸二钙渗透层; C 区域呈白色夹杂灰色, 为靠近石灰的铁酸钙渗透层; 灰色 D 区域为未被侵蚀的石灰内部。

如图1(a)所示, 反应时间为 5 s 时, 由于煅烧后的石灰气孔率较大, A 区域液相渣沿气孔大量深入石灰内部形成 B, C 区域, 其中原子半径较小的 Fe²⁺ 渗透速度较快, 与石灰界面反应形成含铁酸钙的区域 C, 由于硅酸离子团半径较大, 渗透速度较慢, 只在靠近液渣一侧生成含 C₂S 的区域 B。B 区域内点 2 处的成分点在图4中位于液相 L+C₂S(硅酸二钙)相区, 成分主要为硅酸盐和硅酸二钙, Factsage 软件计算得液相 L 与 C₂S 固相比为 0.48:0.52。由图2(a)可以看出, 点 2, 3 处 FeO 含量较高, 这是因为点 2, 3 附近形成 2CaO·SiO₂ 致密层将 FeO 排挤出, 使附近渣中 FeO 含量较高。B 区域由外(点 2)向内(点 5)的 FeO 含量呈逐渐升高趋势。在靠近石灰内部的点 4 处存在 CaO-FeO 固溶体, 计算得液相(L)与 CaO-FeO 相质量比为 0.39:0.61。C 区域中点 5 处 Ca:Fe 摩尔比约为 1:1, 结合其在图4中成分点推测含铁酸钙相, 点 6 处 CaO 含量较高, FeO 与 SiO₂ 含量较 B 区域点 5 处显著降低。可见, 由于区域 B 的形成, 阻碍了 FeO 向石灰内部的进一步渗透。

如图1(b)所示, 反应时间为 60 s 时, 情况与 5 s 时类似, 区别是 B 区域厚度增大, C 区域厚度减小, 表明渣层向石灰内部继续侵蚀, 渗透层厚度进一步增加。B 区域中点 3 处 Ca:Si 摩尔比约为 2:1, 结合其在图4中成分点推测其主要成分为 C₂S 相, 此处为液相 L+C₂S 相共存区域, 由 Factsage 软件分析得液相与 C₂S 相质量比为 0.71:0.29, 比反应时间 5 s 时 B 区域点 2 的液相比例上升, 表明渗透层中 2CaO·SiO₂ 致密层在形成后, 仍会向渣中逐渐溶解。点 4 处位置靠近基体渣层 A 区域, FeO 含量较低, CaO 含量较高, 成分点位于相图(图4)中的 L+C₂S 区, 相比于图1(a)同样靠近基体渣层 A 区

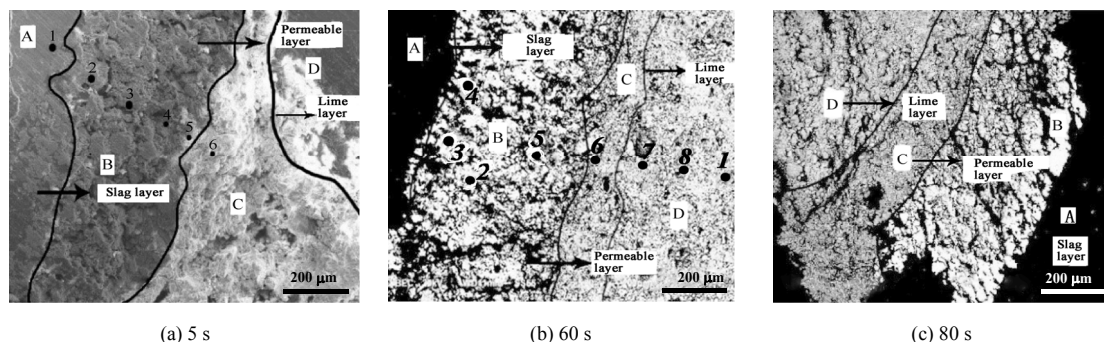


图1 加入石灰不同时间后炉渣的 SEM 照片
Fig.1 SEM images of slag after adding lime for different times

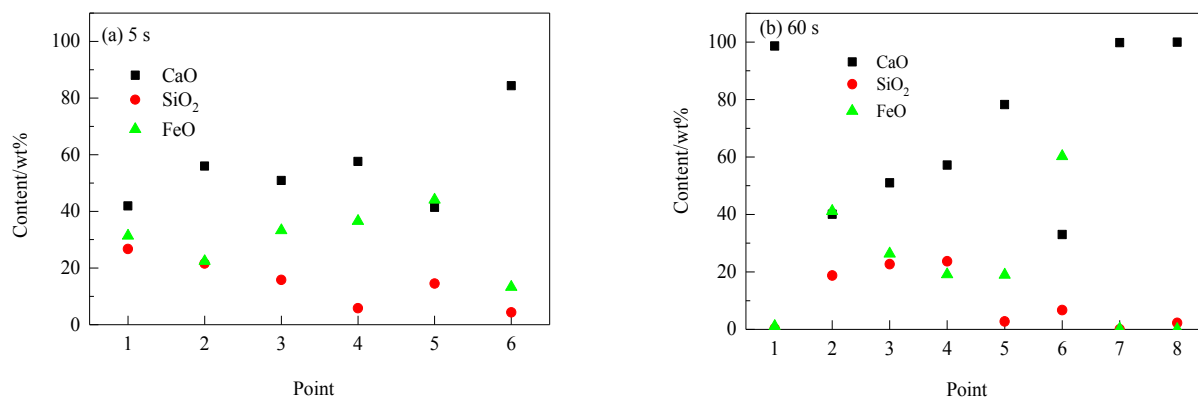


图 2 图 1 中各点的 EDS 分析结果
Fig.2 EDS analysis results of slag points in fig.1

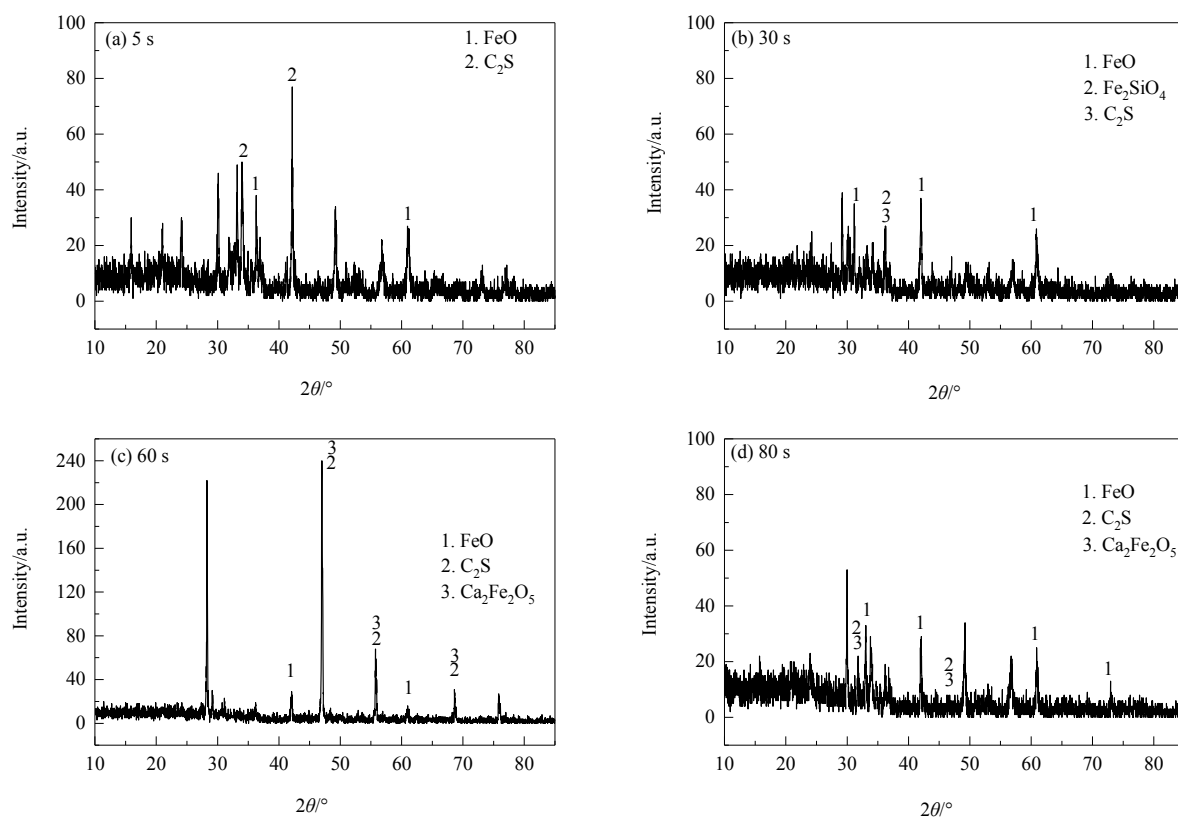


图 3 不同反应时间后炉渣试样的 XRD 谱
Fig.3 XRD patterns of slag samples under different reaction times

域的成分点 2, FeO 含量下降了 14.8%, 表明 Fe^{2+} 能快速扩散进入石灰内。区域 C 中点 6 离区域 B 较近, 结合图 4 相图分析点 6 主要为 $L+C_2S$ 相, 位于液相线边缘, 可知 $CaO-FeO$ 层会在炉渣渗透过程中逐渐消失并转变为含 C_2S 的 B 区域。原因是液态渣向石灰的渗透造成 C_2S 逐渐增加, 阻碍了石灰中 Ca^{2+} 向渣中的扩散, 但渣一侧 FeO 聚集氧化性提高, 炉渣黏度下降有利于液态渣向石灰内部的侵蚀。

如图 1(c)所示, 反应时间为 80 s 时, 结合图 3(d)中 C_2S 峰高变化分析, 渣中 C_2S 结晶析出大量减少, 可知

C_2S 相被破坏, 黑色液相区域的渗透取代了 C_2S , 破坏了石灰颗粒结构使石灰外部变质裂解, 石灰小颗粒被渣完全包裹, 较小的颗粒增大了石灰与渣反应的表面积, 使石灰表面生成低熔点固相后快速溶解。C 区域转变为含大量 C_2S 固相颗粒及少量 $CaO-FeO$ 的 C_2S 层, $CaO-FeO$ 层消失。D 区域存在少量黑色液相, C 区域下部有液态渣渗透, 可能是由于 C 区域形成的固相致密度不高, 液渣由 B 区域直接进入石灰内部。

利用 Factsage 软件, 选择 FactPS 数据库, 设定温度 1673 K, 气压为 1 个标准大气压, 输入 CaO , FeO , SiO_2

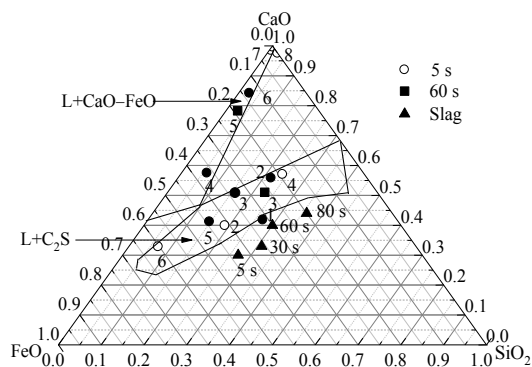
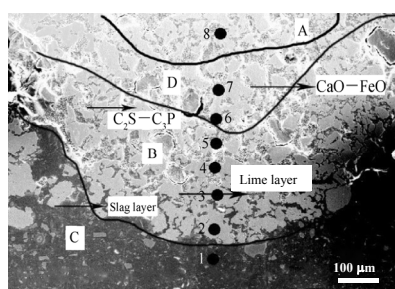


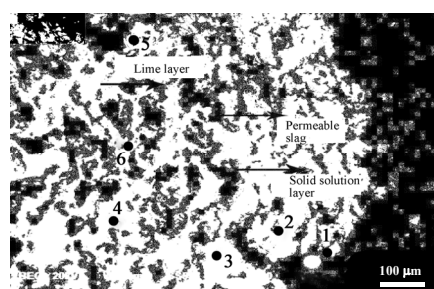
图4 1400 °C及1个标准大气压下加入石灰不同时间后炉渣各点及各时间段炉渣在CaO-SiO₂-FeO相图中的位置

Fig.4 The positions of slag in CaO-SiO₂-FeO phase diagram after adding lime at 1400 °C and 1 atm under different reaction times

三元体系,画出不同成分组成的三元相图(图4)。由图4中各点成分在相图中的位置可知,随着时间的推移,初期炉渣中FeO含量不断下降,而CaO含量不断增加。推测出由于Fe²⁺的离子半径最小,所以最先向石灰中快速渗透,FeO含量迅速下降,后期伴随硅酸二钙固溶体的析出,少部分FeO被排挤进入渣中。而石灰中的Ca²⁺则一直向渣中溶解,所以渣中CaO含量不断增加。推测出石灰的溶解从外部开始经历L+CaO→L+C₂S→L相的过程。由相图可以看出,在靠近渣的B区域[图1(a)]中成分点的位置均处于液相区及液相与C₂S共存区如点1,2,靠近石灰的区域成分点在相图中处于CaO-FeO与液相共存区,如点3,4。



(a) 30 s



(b) 80 s

图5 加入石灰不同时间后渣系的扫描电镜结果

Fig.5 SEM results of slag system after adding lime for different times

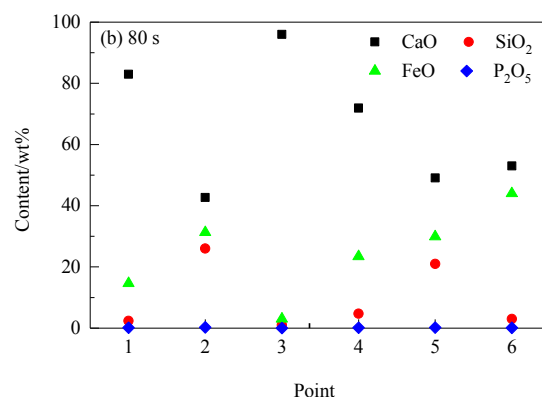
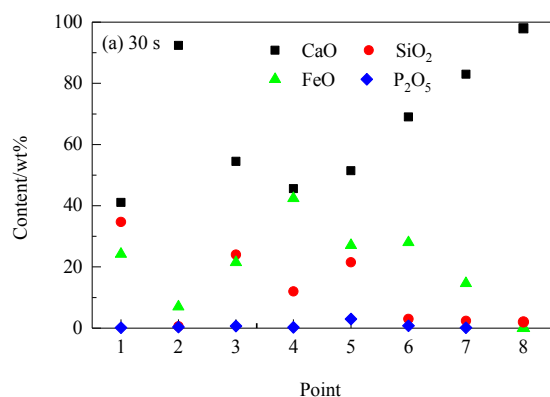


图6 图5中各点的EDS分析结果

Fig.6 EDS analysis results of slag points in fig.5

3.2 石灰在CaO-SiO₂-FeO-P₂O₅渣系中的溶解过程

图5选取了部分加入石灰不同时间后反应界面分界明显的扫描电镜照片,其中5(a)和5(b)分别为反应时间30,80 s的扫描电镜图片,图6为图5中各点的EDS分析结果,图7为各炉渣试样的XRD谱,图8为炉渣各点成分及各时间段炉渣成分在相图中的位置。

根据图5(a)中各区域点成分,结合图8中各成分点在相图中的位置可知,A区域成分与合成渣接近,呈黑

色,为液相基体渣层;B区域含硅酸二钙固相及C₂S-C₃P固溶体,还含少量铁酸钙,为深灰色夹杂白色的固溶体渗透层;C区域呈浅灰色夹杂白色,主要由铁酸钙组成,为靠近石灰的铁酸钙渗透层;D区域主要成分为CaO,为未被侵蚀的氧化钙层。

反应时间为5 s时[图7(a)],渣中的主要成分为硅酸盐液相及2CaO-Fe₂O₃相,未检测到C₂S固相的生成。反应时间为30 s时,与上一组渣系相似的是渣中Fe²⁺及

石灰中 Ca^{2+} 的双向扩散, 在 A 区域与 D 区域之间同样生成了含 C_2S 固相的 B 区域及含铁酸钙的 C 区域[图 5(a)]。不同的是 B 区域中由于液相渣中 P 固溶于 C_2S 中, 形成致密度更高的 C_2S-C_3P 固溶体层。B 区域中点 3 处在相图中位于 $L+C_2S$ 相区, Factsage 软件计算得液相(L)与固溶体质量比为 0.56:0.44, FeO 含量比相临点 4 低, SiO_2 含量较高[图 6(a)], 存在 P 元素的富集, 结合图 7(b)的 XRD 谱中 C_2S-C_3P 相的出现猜测, 点 3 处磷固溶于硅酸二钙固相中形成了 C_2S-C_3P 固溶体。同处于 B 区域的点 5 处磷含量较点 3 处稍高, 应是点 3 处固溶体逐渐溶解于渣中导致。C 区域中点 6 处主要成分为铁酸钙, 由于致密固溶体层 B 区域的存在, SiO_2 及 P 含量较低, Factsage 软件分析得液相(L)与 $CaO-FeO$ 固溶体质量比为 0.78:0.21。点 4 之后的区域 FeO 含量均较低, C_2S-C_3P 致密层的形成明显阻碍了 Fe^{2+} 向石灰中扩散。

反应时间 80 s 时, 未发现 C 区域铁酸钙层, 固溶体层 B 区域占据石灰表面的绝大部分, D 区域几乎消失, 被 B 区域取代[图 5(b)]。由图 7(d)可知渣中的磷固溶于 C_2S 中形成 C_2S-C_3P 固溶体, 黑色液相渣基本完全渗透, 石灰完整结构消失。点 4 位于相图中 $L+C_2S$ 区(图 8), 含 CaO 及少量 SiO_2 与 FeO , 不含磷[图 6(b)], 液相(L)与固相质量比为 0.90:0.10, 相对于图 5(a)中相似区域

点 5 成分变化较大, 可能是渣中 P 在 B 区域靠近渣侧富集后, 铁酸钙层被深入的溶解后反应生成少量 C_2S , 冷却后析出。点 5 处 CaO 含量较高且含 FeO , 位于石灰与液态渣的边缘, 不含磷, 有 $2CaO-Fe_2O_3$ 相存在。由图 8 可知点 6 处为 $L+C_2S$ 相区, 位于裂解后被渣包裹的石灰内部 D 区域, 主要成分为 CaO , 含少量 FeO [图 6(b)]。点 5, 6 成分差异较大的原因可能是点 5 处于 C_2S 与石灰的界面处, 点 6 在 C_2S 与液相渣的界面处, Ca^{2+} 的传质受到限制。

利用 Factsage 软件, 选择 FactPS 数据库, 设置温度 1673 K, 气压为 1 个标准大气压, 输入 CaO , FeO , SiO_2 三元体系, 画出不同成分组成的三元相图(如图 8 所示)。分析图 8 发现, 靠近渣层的点 1 成分处于液相区, 在靠近反应界面上点 4, 有 C_2S 存在, 成分处于固溶体相和液相共存区域。图 5(a)中点 6 及图 5(b)中点 5 处在液相及 $CaO-FeO$ 共存区。距离石灰越远, CaO 含量越低, 成分越向液相区靠近。推测石灰的溶解经历 $L+CaO \rightarrow L+C_2S \rightarrow L$ 相的过程。相对于上一组渣系, 由于 C_2S-C_3P 这一致密固溶体层的生成, 在靠近石灰的区域位于 $L+CaO-FeO$ 相区的成分点较多, 60~80 s 的石灰颗粒内层并无高熔点 C_2S 固相的生成; 同时随着时间推移, 渣中 FeO 含量先减少后上升, 原因是初期

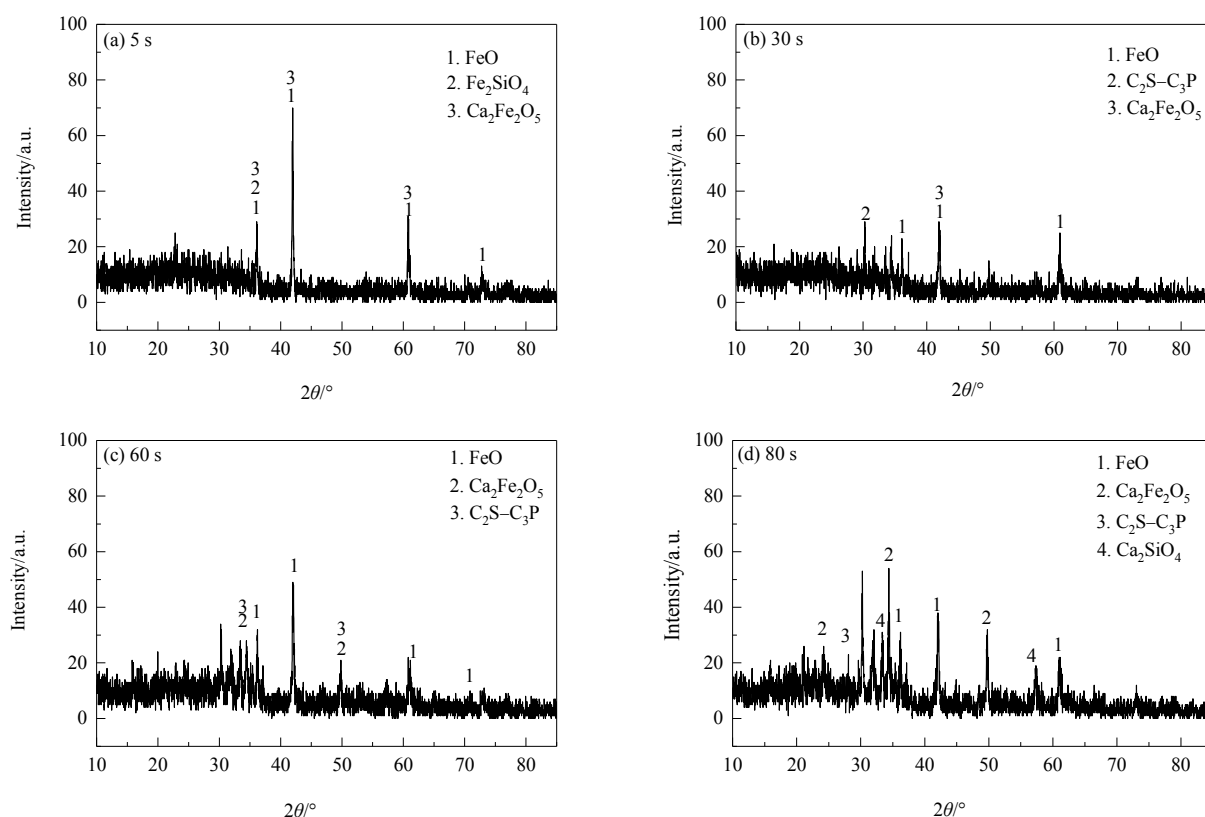


图7 不同反应时间下炉渣试样的 XRD 谱
Fig.7 XRD patterns of slag samples under different reaction times

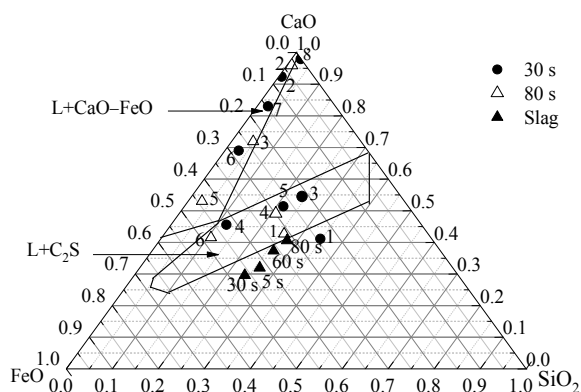


图8 1400℃及1个标准大气压下加入石灰不同时间后炉渣各点及各时间段炉渣在CaO-SiO₂-FeO相图中的位置

Fig.8 The positions of slag in CaO-SiO₂-FeO phase diagram after adding lime at 1400℃ and 1 atm under different reaction times

Fe²⁺向石灰中快速渗透而减少后,反应界面上有C₂S固相生成将FeO排出进入渣中使FeO含量有所回升。CaO-FeO低熔点相生成及渣中FeO含量上升均显著加快了后期石灰的溶解速度。

3.3 P₂O₅对溶解速度的影响

石灰在渣系中的反应表现为石灰层被基体渣层不

断侵蚀为渗透层的过程,所以初期渗透层厚度的变化可反映石灰的溶解速度。石灰向渣系中的溶解会导致液相渣的碱度不断上升,所以分析两组渣系碱度的变化可以判断出石灰的溶解快慢。

为进一步分析P₂O₅对石灰溶解的影响,测量了不同反应时间后石灰的渗透层厚度与液相渣碱度的变化,如图9和10所示。

不含磷渣系中石灰渗透层的厚度变化见图9(a),反应时间为5s时,渗透层的平均厚度只有200 μm;60s时已达约450 μm,80s时达500 μm,渗透层的厚度呈逐渐增加的趋势。含磷渣系中石灰渗透层厚度变化见图9(b),反应时间为5s时,渗透层的平均厚度只有30 μm,30s时约为200 μm,80s时已超过400 μm。分析两组渣系的渗透层厚度增速可知,5~30s时两组渣系石灰溶解速度均很缓慢,30~60s含磷渣系石灰溶解速度较低,60~80s溶解速度加快。

无磷渣系[图10(a)]的液相渣碱度上升速度与含磷渣系[图10(b)]也有所不同,5~60s两组渣系碱度上升速度均很慢,但含磷渣系炉渣碱度更高,60~80s含磷渣系炉渣碱度上升速度更快,表明含磷渣系中60~80s石灰

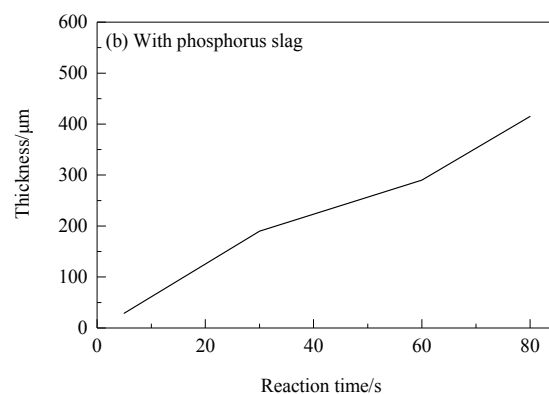
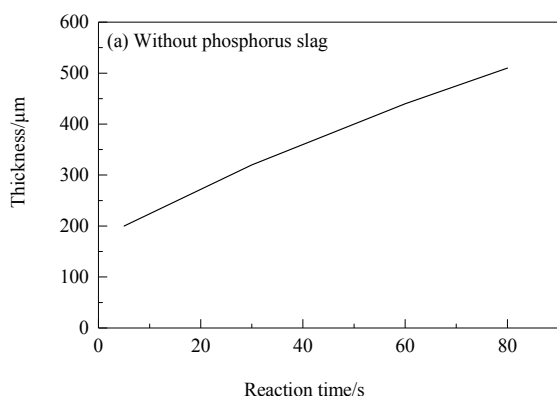


图9 P₂O₅对石灰渗透层厚度的影响

Fig.9 Effects of P₂O₅ on the thickness of lime permeable layer

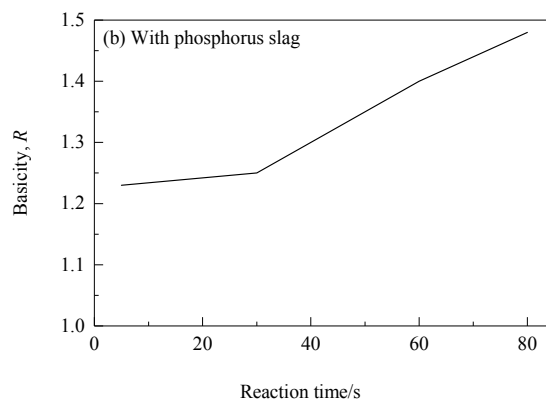
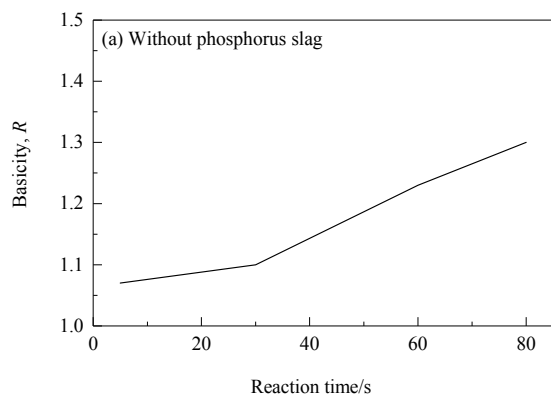


图10 P₂O₅对炉渣渣碱度的影响

Fig.10 Effects of P₂O₅ on basicity of slag

向液相渣中的溶解速度更快。原因是高熔点固溶体 C_2S – C_3P 层的生成会影响石灰与渣间的传质, 但也会排挤出 FeO 使周边液态渣中 FeO 含量升高, 渣黏度降低, 有利于渣的扩散与低熔点固溶体的生成, 加快石灰溶解。

通过以上分析可知, 含一定 P_2O_5 成分的炉渣对石灰溶解速度有促进作用。在转炉双联工艺实际生产中, 脱磷炉初期造渣过程加入一定量 P_2O_5 有利于石灰渣料的快速溶解。

4 结 论

通过观察石灰在 CaO – FeO – SiO_2 及 CaO – FeO – SiO_2 – P_2O_5 渣系中的溶解结果, 研究了 P_2O_5 对石灰溶解过程的影响, 得到以下结论:

(1) 石灰加入两组渣系后的不同在于含磷渣系中生成 C_2S – C_3P 固溶体而不是 C_2S 固相, 两者均会阻碍石灰与液相间的传质。

(2) 石灰在两种渣系中的溶解均会生成四个明显区域, 渗透层为石灰中 Ca^{2+} 与液渣中 Fe^{2+} 相互渗透形成的多相共存区域。基体渣层侧生成 C_2S 固相层, 石灰层侧生成铁酸钙层。铁酸钙层逐渐被 C_2S 层取代且不断增厚后逐渐溶解。

(3) 反应时间为 5~80 s 过程中, 由于致密固相层形成限制了渗透条件, 渗透层厚度的增速减缓。含磷渣系中 C_2S – C_3P 固溶体的形成排挤出 FeO 使液相渣渗透性提高。石灰在含磷渣系中溶解速度更快。

参考文献

- [1] 陈晨. 转炉炼钢快速成渣工艺探讨 [J]. 武钢技术, 1998, (7): 10–14.
Chen C. Discussion on the rapid slag formation process of converter steelmaking [J]. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology, 1998, (7): 10–14.
- [2] 张洪彪, 董凌燕, 陈登福, 等. 高磷铁水脱磷的热力学分析及实验研究 [J]. 过程工程学报, 2009, 9(S1): 137–141.
Zhang H B, Dong L Y, Cheng D F, et al. Thermodynamic analysis and experimental research on dephosphorization of high phosphorus hot metal [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(S1): 137–141.
- [3] 郝赳赳, 鲁华, 李宏. 石灰石与石灰在高 FeO 渣中的溶解速度研究 [J]. 炼钢, 2018, 34(1): 71–74.
Hao J J, Lu H, Li H. Research on the dissolution rate of limestone and lime in high FeO slag [J]. Steelmaking, 2018, 34(1): 71–74.
- [4] 崔鹏辉. 造渣速率对炼钢过程脱硫的影响 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2016: 50.
Cui P H. The influence of slag formation rate on desulfurization in the process of steelmaking [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016: 50.
- [5] 郭成. 转炉双联法脱磷炉石灰溶解行为研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011: 31–67.
Guo X. Study on dissolution of lime in dephosphorization slags by duplex process in converter [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011: 31–67.
- [6] 吕延春. “留渣+双渣”转炉炼钢工艺高效脱磷技术研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2019: 25–123.
Lü Y Q. Study on high efficient dephosphorization technology in double slag+remaining slag BOF steelmaking process [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019: 25–123.
- [7] 李翔, 包燕平, 王敏, 等. 转炉留渣双渣工艺脱磷阶段成渣路线研究 [J]. 炼钢, 2016, 32(1): 6–11.
Li X, Bao Y P, Wang M, et al. Study on slag forming route of dephosphorization stage during converter slag-remaining and double slag process [J]. Steelmaking, 2016, 32(1): 6–11.
- [8] 周朝刚. 转炉双渣法深脱磷工艺研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2016: 23–128.
Zhou C G. Study on deep dephosphorization technology by double-deslagging operation for converter steelmaking process [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016: 23–128.
- [9] 丁瑞锋, 冯士超, 王艳红. 转炉双渣法少渣炼钢工艺新进展及操作优化 [J]. 上海金属, 2015, 37(5): 57–61.
Ding R F, Feng S C, Wang Y H. New progress of double-slag steelmaking process for converter and the optimization measures [J]. Shanghai Metals, 2015, 37(5): 57–61.
- [10] 李伟东, 杨明, 何海龙, 等. 转炉“留渣+双渣”少渣炼钢工艺实践 [J]. 鞍钢技术, 2015, (5): 41–45.
Li W D, Yang M, He H L, et al. Practice of steelmaking by less slag in converter based on slag reserving and duplex slag process [J]. Angang Technology, 2015, (5): 41–45.
- [11] 张莉霞. 实验室炉渣中石灰的溶解及机理研究 [N]. 世界金属导报, 2014–11–04(B03).
Zhang L X. Study on dissolution and mechanism of lime in laboratory slag [N]. World Metals, 2014–11–04(B03).
- [12] 李远洲, 李晓红, 孙亚琴, 等. 固体石灰在 CaO – MgO ($=7.4\% \sim 8.0\%$)– FeO – SiO_2 渣系中的溶解速度实验研究 [J]. 钢铁, 1993, (10): 18–23.
Li Y Z, Li X H, Sun Y Q, et al. Experimental study on dissolution rate of CaO into liquid slag of CaO – MgO – FeO – SiO_2 [J]. Iron and Steel, 1993, (10): 18–23.
- [13] 孟金霞, 陈伟庆. 活性石灰在炼钢初渣中的熔解研究 [J]. 炼钢, 2008, (2): 54–58.
Meng J X, Chen W Q. Investigation of active lime liquation in initial slag of steel-making [J]. Steelmaking, 2008, (2): 54–58.
- [14] Umakoshi M, Katsumi M, Yasuji K. Dissolution rate of burnt dolomite in molten FeO – CaO – SiO_2 slags [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1984, 24(7): 532–539.
- [15] Shahriar A, Michael B, Oleg O. Dissolution of dense lime in molten slags under static conditions [J]. ISIJ international, 2007, 47(1): 32–37.
- [16] Nobuhiro M, Akira I, Hiroyuki S, et al. Dissolution rate of various limes into steelmaking slag [J]. High Temperature Materials and Processes, 2013, 32(1): 15–24.
- [17] Li Z S, Whitwood M, Millman S, et al. Dissolution of lime in BOS slag: from laboratory experiment to industrial converter [J]. Ironmaking Steelmaking, 2014, 41(2): 112–120.