

基于连铸旋流井沉泥资源化利用的铁水 预脱磷剂研究开发

杨 光^{1,2}, 李海强³, 贾吉祥^{1,2}, 王海伟^{1,2}, 顾洪飞³

(1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009; 2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009;
3. 鞍钢铸钢有限公司, 辽宁 鞍山 114009)

摘 要: 为了利用连铸旋流井沉泥开发铁水预脱磷剂以期实现沉泥的资源化, 基于连铸旋流井沉泥的成分分析及脱磷热力学计算, 配制了 $w(\text{CaO}): w(\text{沉泥})=0, 7\%, 14\%, 20\%, 25\%, 30\%$ 的预脱磷剂, 进行了熔化性能测定及脱磷效果评价试验。结果表明, 连铸旋流井沉泥中 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 含量较高、碱度为 0.86, 其作为配制脱磷剂的基料在热力学上可行。随着 CaO 配加比例由 0 增加至 30%, 脱磷剂的熔点先降低后升高, 熔速先增大后减小, 当 $w(\text{CaO}): w(\text{沉泥})=20\%$ 时, 脱磷剂熔点最低, 熔速最快。随着 CaO 配加比例由 14% 增加至 25%, 渣剂的脱磷率先上升后下降, 金属 Fe 回收率逐渐增加, 当 $w(\text{CaO}): w(\text{沉泥})=20\%$ 时, 脱磷率和 Fe 回收率分别为 73.6% 和 86.76%, 可同时实现深度脱磷和铁元素高效回收。

关键词: 旋流井沉泥; 铁水预处理; 脱磷剂

中图分类号: TF044

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)03-0107-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.016

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Development of hot metal pre-dephosphorization agent based on the re-source utilization of sludge in continuous casting swirl wells

YANG Guang^{1,2}, LI Haiqiang³, JIA Jixiang^{1,2}, WANG Haiwei^{1,2}, GU Hongfei³

(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Ansteel Foundry Co., Ltd., Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: In order to develop a P-removal agent for molten iron by using the sludge from the continuous casting swirl well to realize the resource utilization, the pre-dephosphorization agent with $w(\text{CaO}): w(\text{sludge})=0, 7\%, 14\%, 20\%, 25\%$ and 30% was prepared, and the melting performance measurement and P removal evaluation experiment were carried out based on the composition analysis and thermodynamic calculation. The results show that the sludge contains high quantity of $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ and has an alkalinity of 0.86, and it is thermodynamically feasible as the base material for the preparation of pre-dephosphorization agent. With the increase of CaO from 0 to 30%, the melting point of the P-removal agent decreases first and then increases, and the melting rate rises first and then declines. When $w(\text{CaO}): w(\text{sludge})=20\%$, the melting point of the P-removal agent is the lowest and the melting rate is the fastest. With the increase of CaO from 14% to 25%, the P removal rate first increases and then decreases, and the recovery rate of Fe gradually rises. Overall, when $w(\text{CaO}): w(\text{sludge})=20\%$, the removal rate of P and recovery rate of Fe are 73.6% and 86.76%, respectively, both deep removal of P and efficient ferrite recovery can be achieved at the same time.

Key words: sludge in continuous casting swirl wells, pretreatment of molten iron, pre-dephosphorization agent

收稿日期: 2024-12-07

作者简介: 杨光, 1994 年出生, 男, 辽宁凌源人, 硕士, 工程师, 长期从事固废资源化利用及铸坯质量控制方面的研究工作,

E-mail: yangguang1994 neu@163.com。

0 引言

铁水预脱磷是为了冶炼生产低磷钢,满足复吹转炉冶炼高碳钢的需要以及对含磷较高的铁矿资源进行充分利用而迅速发展起来的重要工艺^[1-3]。目前常见的脱磷剂主要为人工配制的合成粉剂^[4]或颗粒^[5]。与此同时,利用炼钢过程副产物进行铁水预脱磷不仅能实现固废资源化,还有利于降低铁水预处理成本,提升企业经济效益^[6]。例如以炼钢除尘和转炉渣可替代部分烧结矿、石灰用作铁水预处理脱磷剂,减少氟化物的危害^[7-8],吴淇澳^[9]在探索中磷铁水预处理最佳途径时,将转炉烟尘和石灰按一定比例焙烧后生成铁酸二钙用于处理中磷铁水,发现合成的 $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 有良好的脱磷能力。目前以旋流井沉泥为基料的铁水预处理脱磷剂开发未见相关报道,连铸旋流井沉泥是连铸生产过程中的副产物,中国钢企每年会产生大量的旋流井沉泥,不定期清理可能造成淹井堵泵等恶性事故,若按照沉泥中连铸保护渣回收量约 $0.5 \sim 1 \text{ kg/t}$,氧化铁皮回收量约 $3.5 \sim 4.0 \text{ kg/t}$ 估计,将其用于制备脱磷剂的基料,将有助于实现渣料的循环利用和铁素回收。文中在充分了解沉泥特性的前提下,通过成分调整来优化渣

剂的熔点和熔速,满足脱磷要求和实现铁素回收,为沉泥的资源化利用提供新途径。

1 沉泥成分检测及脱磷热力学分析

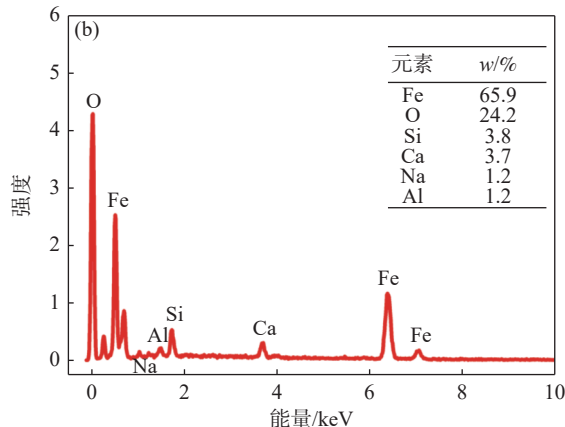
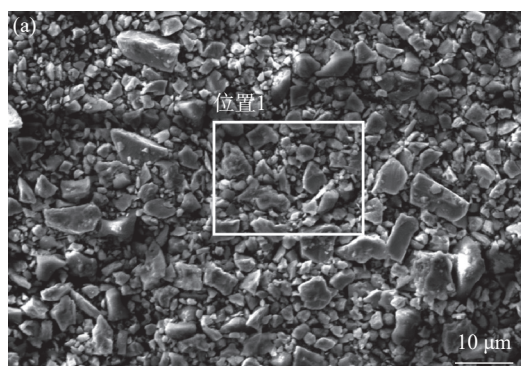
1.1 沉泥成分检测

将连铸旋流井沉泥进行烘干破碎处理,采用 ICP 直读光谱仪进行成分检测,如表 1 所示,可以看到沉泥的主要化学成分为 FeO 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 SiO_2 。其中 $w(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 高达 83%,这可能是由于连铸过程产生的大量氧化铁皮流入旋流井内所致, CaO 、 SiO_2 占比分别为 4.69%、5.46%,碱度约为 0.86,其余则为少量 Al_2O_3 、 MnO 以及碱金属氧化物 Na_2O 、 K_2O ,这与连铸保护渣成分相似。采用扫描电镜 (SEM+EDS) 对沉泥进行了微观形貌及成分分析,结果如图 1 所示,破碎处理后的沉泥颗粒形状各异,以片状为主,平均尺寸小于 $10 \mu\text{m}$,微区成分分析显示大颗粒片状物为 Fe_xO_y ,与 ICP 成分分析结果基本一致。

表 1 旋流井沉泥化学成分

Table 1 Chemical composition of sludge in continuous %

TFe	MFe	Fe_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MnO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	C
62.20	0.61	36.38	46.49	4.69	5.46	1.29	0.94	0.82	0.19	0.045	0.63



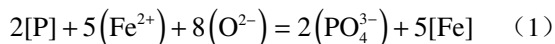
(a)沉泥的微观形貌;(b)为(a)中对应位置 1 的 EDS 谱图

图 1 旋流井沉泥的微观形貌及微区成分分析

Fig. 1 Analysis of micromorphology and composition of sludge in continuous casting swirl wells

1.2 脱磷热力学分析

基于离子理论的熔渣脱磷认为,磷在熔渣中以磷氧络合离子 PO_4^{3-} 存在,而 PO_4^{3-} 是通过 $[\text{P}]$ 被氧化成为 P^{5+} ,在熔渣界面极化 O^{2-} 形成,反应式可以书写为:



上述反应式的平衡常数 K_p 和 L_p 可以分别表示为:

$$K_p = \frac{a_{(\text{PO}_4^{3-})}^2}{a_{[\text{P}]}^2 \cdot a_{(\text{Fe}^{2+})}^5 \cdot a_{(\text{O}^{2-})}^8} = \frac{x(\text{PO}_4^{3-})^2}{f_p^2 \cdot w[\text{P}]^2 \cdot x(\text{Fe}^{2+})^5 \cdot x(\text{O}^{2-})^8} \cdot \frac{\gamma_{\text{PO}_4^{3-}}^2}{\gamma_{\text{Fe}^{2+}}^5 \cdot \gamma_{\text{O}^{2-}}^8} \quad (2)$$

$$L_p = \frac{x(\text{PO}_4^{3-})}{w[\text{P}]} = K_p^{1/2} \cdot \frac{x(\text{Fe}^{2+})^{2.5} \cdot x(\text{O}^{2-})^4 \cdot \gamma_{\text{Fe}^{2+}}^{2.5} \cdot \gamma_{\text{O}^{2-}}^4 \cdot f_p}{\gamma_{\text{PO}_4^{3-}}} \quad (3)$$

式中 K_p —脱磷反应平衡常数; L_p —磷的分配常数; a —活度; x —以摩尔分数表示浓度; f —活度系数(以质量分数为 1% 的溶液为标准态); w —质量分数, %;

γ —活度系数(以纯物质为标准态)。

根据推导出的 L_p 可以发现,在提升渣中 FeO ($\text{Fe}^{2+} \cdot \text{O}^{2-}$) 活度的同时降低 $\gamma_{\text{PO}_4^{3-}}$, 会使 L_p 增大, 有利于促进脱磷反应。事实上, 由于 Fe^{2+} 对脱磷有两方面作用: 一方面 O^{2-} 会与 Fe^{2+} 形成 $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{O}^{2-}$ 对, 提高 FeO 活度及供给 O^{2-} 来促进 PO_4^{3-} 形成, 另一方面由于 Fe^{2+} 的极化力较大 ($Z/r=2.67$), 其易向 PO_4^{3-} 周围聚集, 极化、破坏 PO_4^{3-} 结构, 因此会降低渣中 PO_4^{3-} 的稳定性, 而当向渣中加入 CaO 提升碱度后, 由于引入的 Ca^{2+} 能与 PO_4^{3-} 形成弱离子对, 提高 PO_4^{3-} 的稳定性, 使 $\gamma_{\text{PO}_4^{3-}}$ 降低。因此渣中 $w(\text{CaO}): w(\text{FeO})$ 应存在适宜值, 从而保证较高的 L_p 值。

熔渣的光学碱度决定于组成熔渣的各氧化物的光学碱度, 查阅 CaO、 Fe_2O_3 、FeO、 SiO_2 等的光学碱度汇总于表 2 中, 计算渣中各组分摩尔分数列于表 3, 然后借助式 (4) ~ (7) 来计算熔渣的光学碱度 Λ , 以便于得出不同温度下旋流井沉泥的磷容量 C_p 和磷在渣金间分配比 L_p 。

$$x_B = n_O x'_B / \left(\sum n_O x'_B \right) \quad (4)$$

$$\Lambda = \sum x_B \Lambda_B \quad (5)$$

$$\lg C_p = 17.55\Lambda + \frac{29990}{T} - 23.74 \quad (6)$$

$$L_p = \frac{w(\text{P})\%}{w[\text{P}]\%} = C_p \cdot \frac{M_p}{M_{\text{PO}_4^{3-}}} \cdot a_{[\text{O}]}^{5/2} \cdot f_p \quad (7)$$

式中 x'_B —氧化物的摩尔分数; x_B —氧化物在渣中氧原子的摩尔分数; n_O —氧化物分子中的氧原子数; Λ_B —为氧化物对应的光学碱度; Λ —熔渣的光学碱度; C_p —磷容量; L_p —磷的分配常数; T —温度, K; w —质量分数, %; M —摩尔分数; a —活度; f —活度系数;

表 2 部分氧化物的光学碱度^[10]
Table 2 Optical alkalinity of some oxides

	CaO	Fe_2O_3	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MnO	Na_2O	K_2O
Λ_B	1.00	0.48	0.51	0.48	0.60	0.59	1.15	1.40

表 3 各组分摩尔分数
Table 3 Molar fraction of each component

	CaO	Fe_2O_3	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MnO	Na_2O	K_2O
x'_B	0.077	0.208	0.593	0.084	0.012	0.012	0.012	0.002

根据式 (4) 和 (5) 可以得到: $\sum n_O x'_B = 1.524$, $\Lambda = 0.528$ 。贝格曼通过研究渣系中 C_p 和光学碱度 Λ 的关系, 得出磷容量可按式 (6) 计算, 依据式 (6) 得到 1 300、1 350、1 400 °C 对应的 $\lg C_p$ 分别为 4.59, 4.00, 3.45。按照 $a_{[\text{FeO}]}=0.86$, $a_{[\text{O}]}=0.20$ 带入式 (7), 得到 1 300、1 350、1 400 °C 对应的 L_p 为 155.6, 40, 11.27。可以看到温度由 1 300 °C 上升至 1 400 °C,

$\lg C_p$ 和 L_p 逐渐减小, 即处理温度低, 脱磷效果更好。有学者^[11] 计算了 1 450 °C 下 CaO 基脱磷剂的 $\lg C_p=6.21$, 以 20% 渣金比将该脱磷剂用于处理铁水, 脱磷率约为 70%。笔者的研究中 1 300 ~ 1 350 °C 下沉泥基料的 $\lg C_p$ 为 3.45 ~ 4.59, 说明连铸旋流井沉泥作为配制脱磷剂的基料在热力学上可行。

2 预脱磷渣剂配制及熔化性能测定

2.1 渣剂配制

沉泥在 120 °C 下烘干 2 h, 研磨至粒径小于 0.10 mm, 然后将分析纯 CaO 与沉泥按照不同的比例配制脱磷剂, 并在研钵中充分混合均匀, 配制后渣剂的具体成分如表 4 所示。

表 4 脱磷渣剂化学成分

Table 4 Chemical compositions of the pre-dephosphorization

编号	$w(\text{CaO}):$ $w(\text{沉泥})$	Fe_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MnO	Na_2O	K_2O
1	0	37.79	48.3	4.87	5.67	1.34	0.98	0.85	0.2
2	7	35.23	45.02	11.32	5.28	1.25	0.91	0.79	0.18
3	14	33.00	42.16	16.96	4.95	1.17	0.85	0.74	0.17
4	20	31.29	39.99	21.24	4.70	1.11	0.81	0.70	0.16
5	25	30.01	38.34	24.48	4.51	1.06	0.77	0.68	0.15
6	30	28.81	36.84	27.47	4.32	1.02	0.74	0.65	0.15

2.2 熔化性能测定

熔点测定方法为半球测定法, 规定随着温度升高, 试样高度分别熔化至原始高度的 3/4、1/2、1/4 时对应的温度为软化温度、半球(熔化)温度和流动温度。熔速测定方法为将炉子升温至 1 350 °C 恒温 10 min, 然后将试样推入电阻炉恒温区并开始计时, 当试样高度降至原始高度的一半时所需的时间定义为熔速。熔点和熔速均进行至少 3 次平行试验测定并取平均值。表 5 为熔点和熔速测定的试验结果。

表 5 熔点和熔速测定试验结果

Table 5 Results of the melting point and melting velocity

编号	$w(\text{CaO}):$ $w(\text{沉泥})/\%$	软化温度 平均值/°C	熔化温度 平均值/°C	流动温度 平均值/°C	熔化 速度/s
1	0	1 323.3	1 352.3	1 382.4	152.6
2	7	1 223.0	1 303.4	1 321.0	117.6
3	14	1 135.7	1 195.1	1 253.3	65.4
4	20	1 128.2	1 155.0	1 216.4	30.6
5	25	1 179.7	1 222.2	1 246.6	52.3
6	30	1 231.3	1 261.0	1 302.6	95.3

结合表 5 可以看到在沉泥基料中适量配入 CaO 可以降低渣剂的熔化温度和流动温度, CaO 配比量由 7% 增至 30%, 脱磷剂的熔化温度和流动温度先降低后升高, $w(\text{CaO}): w(\text{沉泥})=20\%$ 时, 脱磷剂

的平均熔化温度和流动温度达到最低,分别为 1 155.0 ℃ 和 1 216.4 ℃,比沉泥基料(熔化温度 1 352.3 ℃,流动温度 1 382.4 ℃)降低了 14.6% 和 12.0%。从熔速测定试验结果发现配加 CaO 同样可有效提升脱磷剂熔化速度,随着沉泥基料中配比 CaO 含量提升,脱磷渣剂的熔速先增大后减小,在 $w(\text{CaO}):w(\text{沉泥})=20\%$ 时,熔化时间仅为 30.6 s,熔速提升了 79.9%。

由于旋流井沉泥基料中 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{CaO})$ 高达 87.56%,因此借助 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO-CaO}$ 三元相图(图 2)对脱磷剂熔化特性变化规律进行分析, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO-CaO}$ 相图中蓝色阴影部分为 1 400 ℃ 下的液相区,图中黄色点为沉泥基料成分在相图中落点位置,其对应的温度约为 1 400 ℃,沿黄色点向上的红色落点依次分别为 $w(\text{CaO}):w(\text{沉泥})=7\%、14\%、20\%、25\%、30\%$,添加 CaO 后落点位置向上移动,经过的液相区温度可归纳为:1 400 ℃→1 300 ℃→1 150 ℃→1 300 ℃,呈先下降后升高趋势,当 $w(\text{CaO}):w(\text{沉泥})=20\%$ 时对应的成分点落于 1 150 ℃ 液相区,落点对应温度最低,分析认为这与形成的低熔点 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 相有关,因此 $w(\text{CaO}):w(\text{沉泥})=20\%$ 的脱磷剂熔点最低,熔速最快,而随着 CaO 配加比例继续提升,渣剂中将形成高熔点(1 420 ℃)的 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 相,因此脱磷剂熔点上升,熔速变慢。

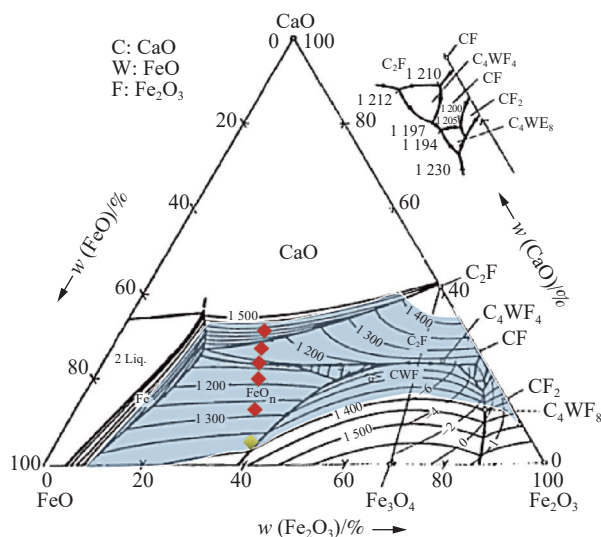


图 2 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO-CaO}$ 三元相图^[12]

Fig. 2 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO-CaO}$ ternary phase diagram

3 脱磷效果评价试验研究

脱磷试验在电阻炉内进行,选取 $w(\text{CaO}):w(\text{沉泥})=14\%、20\%、25\%$ 渣剂进行脱磷试验,分别对应编号为 S1、S2、S3,将工业纯铁和磷铁按照成分设

计配比置于外套石墨坩埚的内径为 70 mm,高度为 94 mm 的 Al_2O_3 坩埚内,在 Ar 气保护下加热至 1 350 ℃,保温后恒温 30 min 至熔清,所设计的铁水初始成分为: $w(\text{C})=4.50\%$, $w(\text{Si})=0.12\%$, $w(\text{Mn})=0.12\%$, $w(\text{P})=0.40\%$, $w(\text{S})=0.03\%$ 。溶清后加入脱磷渣剂,渣金比为 3%,加渣时刻记为 0 时刻,加渣后用石英管分别在 3、5、10、15、20 min 取样并进行成分检测,表 6 为加渣后不同取样时间测得铁水中的 P 含量,可以看到添加脱磷剂后,随着反应的进行,铁水中 P 含量不断降低。整体上看,0~5 min 区间 P 含量降低最快,而后脱磷速度逐步减缓直至趋于平衡,15 min 以后 S1 和 S3 渣剂有轻微的回 P 现象。对比发现, S2 渣剂在反应至 3 min 时 P 含量降低至 0.150%, P 含量降低速度最快且后续稳步降低,无回 P 现象,同时随着配加 CaO 比例提升,反应脱磷率先升高再降低, S2 渣剂脱磷率最高,为 73.6%, S1~S3 渣剂的脱磷率均高于 72%。

表 6 不同取样时间测得铁水中的 P 含量

Table 6 The P content in molten iron measured at different sampling time

编号	$w(\text{P})/\%$						脱磷率/%
	0 min	3 min	5 min	10 min	15 min	20 min	
S1	0.413	0.165	0.123	0.118	0.109	0.115	72.2
S2	0.414	0.150	0.132	0.112	0.107	0.109	73.6
S3	0.412	0.153	0.115	0.104	0.105	0.112	72.8

由于脱磷过程中渣中铁氧化物会被还原进入铁水中,以反应前后渣系中金属氧化物质量分数的变化来计算金属回收率存在较大误差,因此可利用反应前后铁水中 P 含量来反推渣中金属 Fe 的回收率。以 S1 渣剂为例,分别带入式(8)、式(9)、式(10)计算初始渣中 FeO 含量 $I_{(\text{FeO})}$ 、反应过程中消耗渣中 FeO 含量 $P_{(\text{FeO})}$ 及金属 Fe 回收率 $R_{[\text{Fe}]}$,得到 S1 渣剂的 $I_{(\text{FeO})}$ 为 2.156 g, $P_{(\text{FeO})}$ 为 1.73 g, $R_{[\text{Fe}]}$ 为 80.24%。同样, S2, S3 渣剂的金属 $R_{[\text{Fe}]}$ 分别为 86.76% 和 88.78%。

$$I_{(\text{FeO})} = [w(\text{Fe}_2\text{O}_3) \times 0.9 + w(\text{Fe}_2\text{O}_3)] \times 3\% \times 100 \quad (8)$$

$$P_{(\text{FeO})} = [w(\text{P})_{\text{initial}} - w(\text{P})_{\text{final}}] \times 100 \times (5 \times R_{\text{am}[\text{FeO}]} / (2 \times R_{\text{am}[\text{P}]}) \quad (9)$$

$$R_{[\text{Fe}]} = P_{(\text{FeO})} / I_{(\text{FeO})} \quad (10)$$

式中 R_{am} 为相对原子质量。

将金属 Fe 回收率与脱磷率试验结果作图 3,可以看到随着沉泥中 CaO 比例提升,脱磷率先上升后下降,金属 Fe 回收率逐渐升高,综合来看,选用 S2 渣剂,即在沉泥基料中配加 20% CaO 时,可以保证脱磷率和 Fe 回收率均处于较高水平。

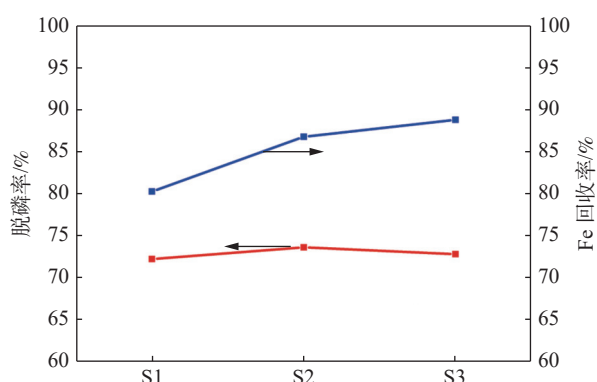


图3 S1~S3渣剂的脱磷率和Fe回收率试验结果

Fig. 3 Results of P removal and Fe recovery of S1-S3 slags

4 结论

1)破碎处理后的连铸旋流井沉泥主要以FeO、

Fe₂O₃为主,平均尺寸<10 μm,其在1 300~1 400℃下的lgC_p=3.31~4.45, L_p=11.9~164.5,作为配制脱磷剂的基料在热力学上可行。

2)向连铸旋流井沉泥中配加7%~30%的CaO可有效改善渣剂熔化特性,使脱磷渣剂的熔点先降后升,熔速先快后慢。沉泥中配加CaO比例为20%时,脱磷剂熔点最低,其平均熔化温度和流动温度分别为1 155.0℃和1 216.4℃,熔化速度最快为30.6 s。

3)沉泥中配加CaO的比例由14%增加至25%,渣剂脱磷率先升后降,金属Fe回收率逐渐增加。总体来看,当w(CaO):w(沉泥)=20%时,脱磷率和Fe回收率分别为73.6%和86.76%,均处于较高水平。

参考文献

- [1] PAN F F. Study on the reaction behavior between CaO-Fe₂O₃ based slag and the hot metal[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
(潘飞飞. CaO-Fe₂O₃基渣系与铁水反应行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.)
- [2] LIU Q, WANG C Y, JI L L. Present situation and development of hot metal pretreatment process[J]. Metallurgical Equipment, 2022(S1): 149-155.
(刘倩, 王长勇, 季乐乐. 铁水预处理工艺现状与发展[J]. 冶金设备, 2022(S1): 149-155.)
- [3] WANG Y M, TAO L, GUO H Y, et al. Dephosphorization influence factors in converter hot metal pretreatment[J]. Iron and Steel, 2020, 55(9): 29-37.
(王雨墨, 陶林, 郭皓宇, 等. 转炉铁水预处理脱磷的影响因素[J]. 钢铁, 2020, 55(9): 29-37.)
- [4] ZHAO J X. Researches on secondary dephosphurization[J]. Steelmaking, 1995(6): 25-29.
(赵俊学. 炉外脱磷剂研究概况[J]. 炼钢, 1995(6): 25-29.)
- [5] DU F. The development of hot metal dephosphorization pretreatment[J]. Shanghai Metals, 1999(6): 16-20.
(杜锋. 铁水脱磷预处理工艺的发展[J]. 上海金属, 1999(6): 16-20.)
- [6] LIU Y Q, LUO L, ZHANG P, et al. Development of green recycling system of hot slag and molten steel at Shougang Jingtang[J]. China Metallurgy, 2018, 28(6): 25-31, 42.
(刘延强, 罗磊, 张鹏, 等. 首钢京唐热态渣、钢绿色循环利用体系开发[J]. 中国冶金, 2018, 28(6): 25-31, 42.)
- [7] XU B, WANG Z D, DING J Y. LT-Dust and BOF slag as hot metal dephosphorization fluxes at Baosteel[J]. Baosteel technology, 2006(1): 6-9.
(徐兵, 王兆达, 丁建勇. 宝钢LT灰及转炉渣用于铁水预处理脱磷剂的实践[J]. 宝钢技术, 2006(1): 6-9.)
- [8] SUN G B. Efficiency enhancement mechanism of fluorine-free steel-making dephosphorizer made from collected dust and its harm reducing effect[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
(孙国斌. 除尘灰基无氟炼钢脱磷剂增效机理与降害作用研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.)
- [9] WU Q A, ZHU B L, LI D J. The preliminary study of the pretreatment of medium phosphorus hot metal(semi-steel)[J]. East China Metallurgical Institute Newspaper, 1986(4): 1-10.
(吴淇澳, 朱本立, 李大经. 中磷铁水(半钢)预处理初探[J]. 华东冶金学院报, 1986(4): 1-10.)
- [10] HUANG X H. Principles of iron and steel metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 298-299.
(黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 298-299.)
- [11] ZHANG H B, DONG L Y, CHEN D F, et al. Thermodynamic analysis of dephosphorization for high phosphorus hot metal and experimental study[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(S1): 137-141.
(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.)
- [12] M. Allibert, et al. Slag atlas[M]. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1981: 58-59.