

钢铁冶金与材料

脱磷剂对高磷铁矿球团气化脱磷的影响

郭园征¹, 李 杰¹, 李 飞², 李大亮², 刘文强¹, 程 扬¹

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 教育部现代冶金技术重点实验室, 河北 唐山 063210; 2. 山西建龙实业有限公司, 山西 运城 043801)

摘 要: 高磷铁矿由于磷含量过高, 限制其大规模开发利用。通过 XRD 衍射仪分析高磷铁矿中磷的赋存状态, 并基于 FactSage7.2 热力学计算结果的基础, 采用配料造球、球团焙烧等手段, 探究不同脱磷剂 SiO_2 和 CaCl_2 对高磷铁矿球团气化脱磷的影响。结果表明: 高磷铁矿中磷的存在形式为 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$, 加入脱磷剂后气化脱磷开始反应温度降低至 815 $^{\circ}\text{C}$, 在温度 1 250 $^{\circ}\text{C}$, 配碳 5% 的条件下, 加入 SiO_2 和 CaCl_2 配比分别为 0.8%、1.6% 作为混合脱磷剂, 气化脱磷效果最佳, 脱磷率达 22.1%。为高磷铁矿在球团焙烧过程中气化脱磷提供了新思路。

关键词: 高磷铁矿; 球团; 气化脱磷; 脱磷剂; 焙烧

中图分类号: TF046.6 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)04-0103-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.019

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 Dephosphorization Agent on Gasification and Dephosphorization of High Phosphorus Iron Ore Pellets

Guo Yuanzheng¹, Li Jie¹, Li Fei², Li Daliang², Liu Wenqiang¹, Cheng Yang¹

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Key Laboratory of Modern Metallurgy Technology, Ministry of Education, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Shanxi Jianlong Industry Co., Ltd., Yuncheng 043801, Shanxi, China)

Abstract: The development and utilization of high-phosphorus iron ore are restricted due to its high content of phosphorus. The occurrence state of phosphorus in high-phosphorous iron ores had been investigated by XRD diffraction. And based on the thermodynamic calculation results of FactSage7.2, the measures of pelletizing and pellet roasting had been carried out to explore the influence of different dephosphorization agents SiO_2 and CaCl_2 on the gasification and dephosphorization of high-phosphorous iron ores. The results showed that the phosphorus in high-phosphorous iron ores was in the form of $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$. After adding dephosphorization agent, the reaction temperature of gasification and dephosphorization began to decrease to 815 $^{\circ}\text{C}$. Under the experimental conditions of 1 250 $^{\circ}\text{C}$ and 5% carbon, 0.8% SiO_2 and 1.6% CaCl_2 were added as the mixed dephosphorization agent, the optimum gasification dephosphorization performance had been achieved with dephosphorization rate of 22.1%.

Key words: high phosphorus ore, pellet, gasification dephosphorization, dephosphorization agent, roasting

收稿日期: 2019-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(51974131); 河北省优秀青年科学基金项目(E2018209248)。

作者简介: 郭园征(1992—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事烧结、球团、冶金节能及资源综合利用方面的研究, E-mail: 15100570223@163.com; 通讯作者: 李杰(1982—), 男, 河北灵寿人, 博士, 副教授, 主要从事冶金节能与资源综合利用方向、冶金过程数值模拟等方面研究, E-mail: lijie-2573017@163.com。

0 引言

近年来,随着钢铁产量的增加,国内钢铁工业对矿石的需求与日俱增,而优质矿石主要依赖国外进口,由于矿石价格的不断上涨,使得钢铁生产成本大大提高,利润空间被压缩。我国高磷铁矿储量达上百亿吨,其中宁乡式铁矿储量40亿t,是我国分布最广、储量最多的沉积型铁矿,但因其含磷高且难以有效脱除而未被钢铁企业利用,尚属于呆滞矿产资源。

目前,高磷铁矿脱磷主要以选矿法、化学法、微生物法及还原法为主,但以消耗大量化学药剂为代价,存在时间长、成本高、污染严重、难以工业化等问题^[1-4]。还原法脱磷主要以碳热还原为主,使磷以气体形式脱除,取得了一定的效果。陈津^[5]利用微波碳热还原技术,实现了高磷铁矿中的磷脱除,气化脱磷率可达40%~60%,为高磷铁矿脱磷提供了新思路。邢宏伟的研究^[6]结果表明:添加少量脱磷剂,能够实现烧结气化脱磷。侯向东^[7-8]利用微波设备研究了含碳氧化锰矿粉体还原过程中磷的迁移行为,发现微波气相脱磷率可达53%~67%。李永军等^[9]进行了高温碳热还原转炉渣等方面的研究,结果表明:1 800℃时转炉渣经碳热还原,渣中的磷32.8%可实现气化脱除。王书桓^[10]利用真空碳管电阻炉对转炉渣进行硅热还原,结果表明:在适宜的条件下,气化脱磷率最高达到81.23%。日本学者宫下、柳井明等人^[11]研究发现:钢渣中60%的磷进入铁相合金

中,40%的磷以气体形式脱除,硅和锡元素都可使铁中磷的活度提高,促进更多的磷元素脱除。

笔者在前人研究基础上,进行高磷铁矿球团气化脱磷的试验研究,通过添加脱磷剂 SiO_2 和 CaCl_2 ,使含磷化物在球团焙烧过程中转化为 PCl_3 稳定气体排出,以达到脱磷目的。通过改变脱磷剂的配加量,探究混合脱磷剂的最佳配比,为高磷铁矿开采利用的实际应用提供理论依据。

1 试验研究

1.1 试验原料

试验所用原料为广西来宾的高磷赤铁矿,其铁品位为49.84%,属于较低品位的铁矿石,为保证球团铁品位,考虑造球过程中加入铁品位较高的研山粉作为原料之一,主要化学成分如表1所示。试验所用试剂为分析纯 SiO_2 和 CaCl_2 。选用0.074~0.15 mm的焦粉作为还原剂,其工业分析如表2所示。粘结剂为膨润土,其理化性能如表3所示。

表1 原料主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of raw materials %

原料	TFe	FeO	MgO	SiO_2	P	Al_2O_3	CaO
高磷赤铁矿	49.84	0.55	0.16	15.10	0.94	5.34	2.70
研山粉	66.45	24.56	0.26	6.31	0.031	0.84	0.15

表2 焦粉工业分析

Table 2 Industrial analysis results of coke powder %

固定碳	灰分	挥发分	水分	P
85.52	13.36	1.12	0.68	0.056

表3 膨润土理化性能

Table 3 Physical and chemical properties of bentonite

原料	蒙脱石/%	胶质价/%	膨胀容/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	吸蓝量/g	2 h 吸水率/%	水分/%
膨润土	64.72	284.35	13.00	28.21	30	12.67

为确定所用高磷赤铁矿中磷化物的存在形式以及矿物组成,采用X射线衍射仪和扫描电镜进行分析。通过XRD衍射可知,高磷赤铁矿石中铁氧化物主要的存在形式为 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ,脉石成分主要是 SiO_2 ,磷化物的主要存在状态为 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 。

通过扫描电镜图1可知,点1主要是铁元素和氧元素,有少量的铝和硅元素。结合XRD衍射图的分析可知,主要的铁氧化物为 Fe_2O_3 ,同时有少量的

Fe_3O_4 。点2中元素较多,磷化物主要有钙、氧、磷和微量的氟元素组成,可以确定在高磷赤铁矿中磷化物的存在形式为 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$,为热力学分析和热态气化脱磷试验提供了理论依据。

1.2 试验方法

根据计算确定配比称量物料,使用500 mm×150 mm圆盘造球机造球,圆盘造球机转速为32 r/min,造球盘周边线速度为0.9 m/s,倾角可调,一般为45°~48°。选取10.0~12.5 mm的生球1 kg左右,在

竖式电炉中焙烧,高温吊篮装入生球,待电炉温度升至设定温度,将吊篮放入电炉炉顶,然后使吊篮缓慢下行。干燥预热约 20 min,焙烧约 15 min,均热和冷却约 20 min,全过程共计 55 min。对冷却后的球团取样,进行 XRD 衍射分析,同时测定磷含量,计算气化脱磷率。

1.3 试验方案

通过探究不同 SiO₂ 含量对气化脱磷的影响进行研究,得到最佳的 SiO₂ 配量,然后在此基础上探究 CaCl₂ 对气化脱磷的影响,得到混合添加剂的最佳配比。试验方案如表 4 所示。

2 试验结果与分析

2.1 高磷铁矿球团气化脱磷反应热力学计算

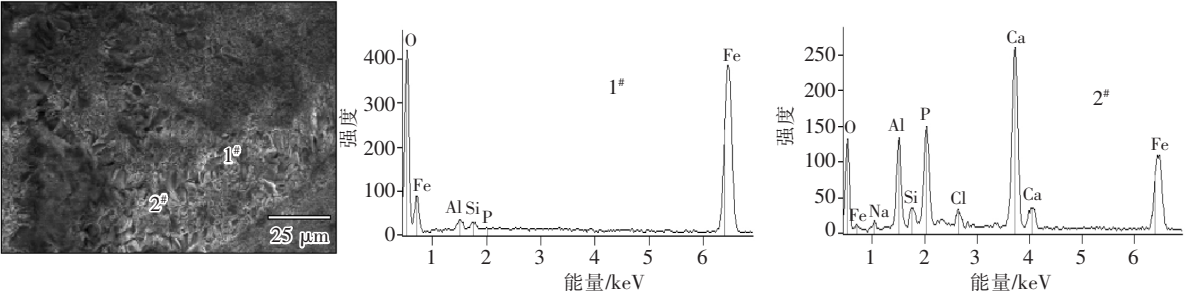
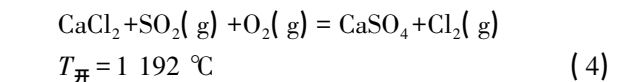
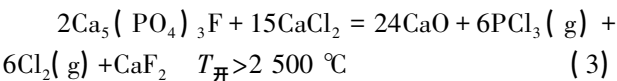
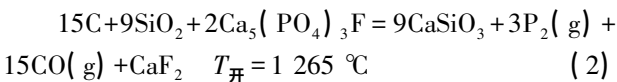
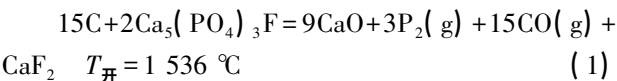


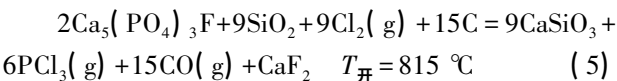
图 1 高磷赤铁矿的 SEM 形貌
Fig.1 SEM scanning diagram of high phosphorus hematite

表 4 试验方案
Table 4 Experimental scheme matrix

编号	温度/℃	配碳量/%	铁矿粉/%	SiO ₂ 量/%	CaCl ₂ 量/%	研山粉/%	膨润土/%	TFe/%
1 [#]	1 280	5	40	0.2	0	53.8	1	55.5
2 [#]	1 280	5	40	0.4	0	53.6	1	55.4
3 [#]	1 280	5	40	0.8	0	53.2	1	55.1
4 [#]	1 280	5	40	1.6	0	52.4	1	54.6
5 [#]	1 280	5	40	3.2	0	50.8	1	53.5
6 [#]	1 250	5	40	0.8	0.4	52.8	1	55.1
7 [#]	1 250	5	40	0.8	0.8	52.4	1	54.8
8 [#]	1 250	5	40	0.8	1.6	51.6	1	54.3
9 [#]	1 250	5	40	0.8	3.2	50.0	1	53.2
10 [#]	1 250	5	40	0.8	6.4	46.8	1	51.1

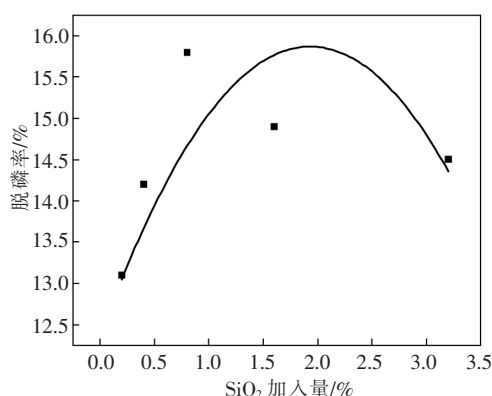


气化脱磷主要是利用高磷铁矿球团焙烧过程中温度高,配碳周围形成局部还原性气氛等特点,将高磷铁矿中的磷氟磷酸钙,通过碳热还原成含磷气体,由球团的空隙,随着其他气体一起排出,从而达到脱磷效果。采用 FactSage7.2 的 Reaction 模块对高磷赤铁矿气化脱磷的反应开始温度进行模拟计算,结果表明用碳直接还原高磷铁矿的开始温度较高,在球团焙烧过程中难以实现。加入适量的 SiO₂ 可以明显降低气化脱磷的开始反应温度。仅加入 CaCl₂ 的条件下,开始温度超过 2 500 ℃,若同时加入 SiO₂ 和 CaCl₂ 作为脱磷剂,开始温度降低至 815 ℃,该温度在焙烧过程中可以达到,同时生成 PCl₃ 稳定气体排出,抑制磷蒸汽氧化,为气化脱磷的实现提供了热力学理论基础。



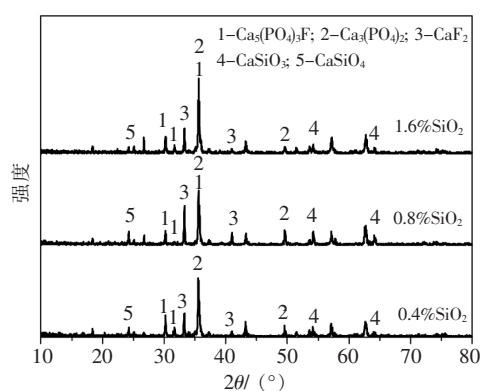
2.2 SiO₂ 对气化脱磷影响

通过热力学模拟计算结果,在配碳 5% 的基础上,分别加入 0.2%、0.4%、0.8%、1.6%、3.2% 的 SiO₂ 进行造球,根据热力学开始反应温度的计算选取试验温度为 1 280 ℃ 进行焙烧试验,试验结果如图 2 所示。

图2 SiO_2 加入量对脱磷率的影响Fig.2 Effect of SiO_2 addition on dephosphorization rate

由图2可知,温度为1280℃时, SiO_2 加入量对高磷赤铁矿气化脱磷率有明显促进作用,并且在0.8%的加入量时气化脱磷率达到15.8%。随着配加量的增加,高磷铁矿球团的气化脱磷率先增加后降低。随着温度的升高, SiO_2 活性增强,可以明显降低气化脱磷开始反应温度,从而加速磷化物的还原过程;但加入过量后, SiO_2 与高磷赤铁矿中的碱性氧化物反应,生成大量的低熔点液相,影响物料的透气性,阻碍了 P_2 的溢出,因此 SiO_2 加入量的最佳值为0.8%。

为进一步探究添加 SiO_2 作为脱磷剂对含磷矿物的气化脱磷机理,对 SiO_2 配加量为0.4%、0.8%、1.6%的焙烧产物进行X射线衍射分析,分析图谱如图3所示。

图3 不同 SiO_2 含量时焙烧产物的XRD衍射图谱Fig.3 XRD patterns of roasting products under different SiO_2 contents

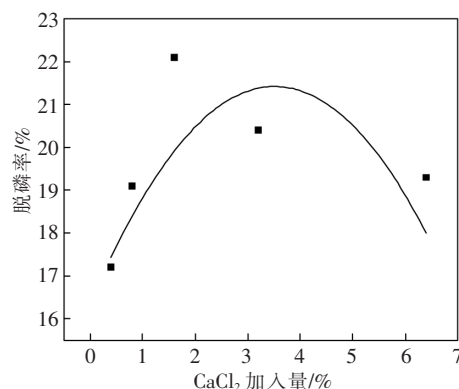
由图3可知,当 SiO_2 加入量为0.8%时, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 的衍射峰明显减弱,同时出现较强的

CaSiO_3 和 Ca_2SiO_4 衍射峰,可以推断磷矿物反应后有 CaSiO_3 与 Ca_2SiO_4 生成,结合热力学分析,说明气化脱磷反应发生,脱磷产物为 P_2 。当 SiO_2 的加入量继续增大到1.6%时, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 的衍射峰有所增强, SiO_2 与碱性氧化物反应,生成的液相增加,气化脱磷率降低。通过衍射图谱可以进一步证明,加入 SiO_2 可以提高气化脱磷率,但是加入量要适宜。

2.3 CaCl_2 对气化脱磷影响

由于磷蒸汽极易被氧化,与铁氧化物生成磷酸盐,残留球团矿中,所以需要考虑加入其它辅助添加剂,使磷蒸汽转化为稳定存在的气体。由热力学计算可知,造球混合料中添加 CaCl_2 后,可以生成 PCl_3 , PCl_3 为稳定的含磷气体,解决了生成磷蒸汽被氧化后不能达到气化脱磷的问题。生成的 PCl_3 气体随气孔外排,达到气化脱磷的目的。通过热力学模拟计算结果和前述试验结果,选取在配碳量为5%, SiO_2 加入量为0.8%的条件下,分别选取 CaCl_2 配加量0.4%、0.8%、1.6%、3.2%、6.4%进行造球,保证脱磷率的同时,焙烧条件对球团强度的影响不可忽略,因此选取试验温度1250℃焙烧,从而探究 CaCl_2 对球团气化脱磷的影响,试验结果见图4。

由图4可知,不同 CaCl_2 加入量对气化脱磷率影响较大,加入适量分析纯 CaCl_2 试剂有利于提高气化脱磷率,当加入量达到1.6%时,脱磷效果最好。 CaCl_2 配比较小时,因为其沸点较低,在球团焙烧过程中温度升高,气化蒸发,起不到气化脱磷作用。当 CaCl_2 过量时,过多的 CaCl_2 将与高磷铁矿中的 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 反应,生成更加稳定的 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$,不利于气化脱磷的正常进行,从而降低气化脱磷率。因此 CaCl_2 加入量为1.6%时为最佳,此时脱磷率为22.1%。

图4 CaCl_2 加入量对脱磷率的影响Fig.4 Effect of CaCl_2 addition on dephosphorization rate

为进一步探究添加 CaCl_2 作为脱磷剂对含磷矿物的气化脱磷机理,对 CaCl_2 配加量为 0.8%, 1.6%, 3.2% 的焙烧产物进行 X 射线衍射分析,分析图谱如图 5 所示。

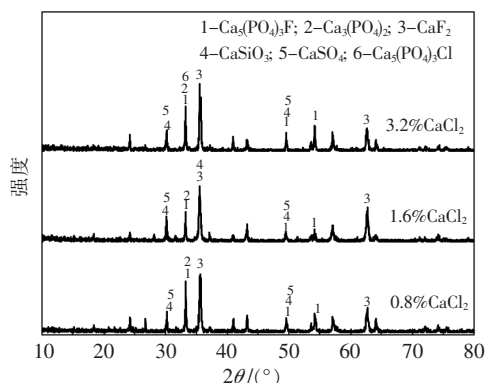


图5 不同 CaCl_2 含量时焙烧产物的 XRD 衍射图谱

Fig.5 XRD patterns of roasting products under different CaCl_2 contents

由热力学分析反应式(5)可知,当温度为 815 $^{\circ}\text{C}$ 时, CaCl_2 参与的气化脱磷反应就可以发生。由图 6 可知,随着 CaCl_2 加入量的增多, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 的衍射峰先降低然后上升, CaSiO_3 衍射峰强度明显,且始终

出现,可以说明 1 250 $^{\circ}\text{C}$ 时气化脱磷反应发生,生成了 PCl_3 气体通过气孔排出,生成的硅酸盐为 CaSiO_3 和 Ca_2SiO_4 ,同时有 CaF_2 和 CaSO_4 生成。随着 CaCl_2 加入量的增加 CaSiO_3 生成量没有明显的增加,并且伴有 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ 新的衍射峰出现,因此过量的 CaCl_2 加入量并不能提高气化脱磷率,这和图 4 中反映的 CaCl_2 对气化脱磷率影响规律一致。

3 结论

1) 在配碳量 5% 时,焙烧温度选取 1 280 $^{\circ}\text{C}$,改变 SiO_2 加入量,气化脱磷率有明显的变化,随着加入量的升高,高磷铁矿球团的气化脱磷率先升高后下降,在加入量为 0.8% 时,脱磷率达到最高,为 15.8%。

2) 在配碳量 5%, SiO_2 加入量为 0.8%, 试验温度为 1 250 $^{\circ}\text{C}$, CaCl_2 添加量为 1.6% 时,气化脱磷率达到最高,为 22.1%。

3) 经过探索试验,结合实际生产等因素,选择 SiO_2 (配比为 0.8%) 和 CaCl_2 (配比为 1.6%) 的混合添加剂作为高磷铁矿球团气化脱磷的脱磷剂比较适宜,既可以使高磷铁矿得到有效利用,降低成本,又可以保证入炉球团的铁品位,为实际应用投产提供理论基础。

参考文献

- [1] Matinde E, Hino M. Dephosphorization treatment of high phosphorus iron ore by pre-reduction, mechanical crushing and screening methods [J]. ISIJ International, 2011, 51(2): 220-227.
- [2] Xia Wentang, Ren Zhengde, Gao Yifeng. Removal of phosphorus from high phosphorus iron ore-s by selective HCl leaching method [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(5): 1-4.
- [3] Delvasto. Exploring the possibilities of biological beneficiation of iron-ores: The phosphorus problem [C] // In Proceedings of the 15th Steelmaking Conference, 5th Ironmaking Conference & 1st Environment and Recycling Symposium IAS. Argentinean Steel-making Institute(IAS). San Nicolas, Buenos Aires, Argentina, 2005: 71-82.
- [4] Xu Chengyan, Sun Tichang, Kou Jue. Mechanism of phosphorus removal in beneficiation of high phosphorous oolitic hematite by direct reduction roasting with dephosphorization agent [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(11): 2806-2812.
- [5] Chen Jin, Hou Xiangdong, Song Pingwei, et al. Microwave reduction dephosphorization of manganese ore powder [J]. Journal of Process Engineering, 2008(S1): 231-235.
(陈津, 侯向东, 宋平伟, 等. 锰矿粉微波加热还原脱磷 [J]. 过程工程学报, 2008(S1): 231-235.)
- [6] Xing Hongwei, Li Dongliang, Zhang Yuzhu, et al. Sintering cup experiment with high phosphorus iron ore [J]. Hebei Metallurgy, 2012(3): 3-8.
(邢宏伟, 李东亮, 张玉柱, 等. 配加高磷铁矿的烧结杯实验 [J]. 河北冶金, 2012(3): 3-8.)
- [7] Hou Xiangdong, Chen Jin, Zhang Meng, et al. Phosphorus migration behavior in the reduction process of carbon bearing manganese oxide powder by microwave heating [J]. China Manganese Industry, 2009(3): 24-28.
(侯向东, 陈津, 张猛, 等. 微波加热含碳氧化锰矿粉体还原过程中磷的迁移行为 [J]. 中国锰业, 2009(3): 24-28.)

(下转第 114 页)

- [5] Wang Xuebing, Zhang Xinzong, Qiu Shengtao, *et al.* Numerical simulation of electromagnetic stirring in slab secondary cooling stage [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(7): 117–120.
(王学兵, 张兴中, 仇圣桃, 等. 板坯二冷段电磁搅拌数值模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(7): 117–120.)
- [6] Zhang Wenjie, Luo Sen, Chen Yao, *et al.* Numerical simulation of fluid flow, heat transfer, species transfer, and solidification in billet continuous casting mold with M-EMS [J]. Metals, 2019, 9(1): 66.
- [7] Trindade, Leonardo B, Nadalon, *et al.* Modeling of solidification in continuous casting round billet with mold electromagnetic stirring (M-EMS) [J]. Steel Research International, 2017, 88(4): 1600319.
- [8] Ren B Z, Chen D F, Wang H D, *et al.* Numerical simulation of fluid flow and solidification in bloom continuous casting mould with electromagnetic stirring [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2015, 42(6): 401–408.
- [9] Yang Zhenguo, Wang Bao Zhang, Xiaofeng, *et al.* Effect of electromagnetic stirring on molten steel flow and solidification in bloom mold [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 21(12): 1095–1103.
- [10] Yi Jun, Xing Shuqing, Wang Jun, *et al.* The numerical simulation of the magnetic and flowing fields in M-EMS bloom casting process [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2013, 32(2): 162–168.
(易军, 邢淑清, 王军, 等. 350 mm 大方坯连铸结晶器电磁搅拌电磁场与流场耦合数值模拟 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2013, 32(2): 162–168.)
- [11] Li Guidong, Ma Yonglin, Xing Shuqing, *et al.* Numerical simulation of electromagnetic field and flow field in square wave electromagnetic stirring of continuous casting mould [J]. Foundry Technology, 2019, 40(3): 276–282.
(李桂东, 麻永林, 邢淑清, 等. 连铸结晶器方波电流电磁搅拌电磁场—流场数值模拟 [J]. 铸造技术, 2019, 40(3): 276–282.)
- [12] Zhao Fei, Bai Minghua, Xu Kuan, *et al.* Numerical simulation on flow field in curved mold with electromagnetic stirring [J]. Continuous Casting, 2017, 42(1): 13–19.
(赵菲, 白明华, 徐宽, 等. 电磁搅拌作用下弧形结晶器流场的数值模拟 [J]. 连铸, 2017, 42(1): 13–19.)
- [13] Sun Biao, Liu Xuehua, Liang Jun, *et al.* Effects of M-EMS on quality of medium-carbon steel billet [J]. Continuous Casting, 2015, 40(6): 54–58.
(孙彪, 刘学华, 梁军, 等. 结晶器电磁搅拌对中碳钢小方坯质量的影响 [J]. 连铸, 2015, 40(6): 54–58.)
- [14] Wang Linjing, Bao Yanping, An Hanghang, *et al.* Effect of M-EMS on quality of 55CrSi spring steel billet [J]. Continuous Casting, 2015, 40(5): 62–66.
(王林静, 包燕平, 安航航, 等. 结晶器电磁搅拌对 55CrSi 弹簧钢铸坯质量的影响 [J]. 连铸, 2015, 40(5): 62–66.)

编辑 邓淑惠

(上接第 107 页)

- [5] Hou Xiangdong, Chen Jin, Shi Xuehong, *et al.* Analysis of factors influencing solid-phase reduction and dephosphorization of carbon bearing manganese ore powder by microwave heating [J]. Science and Technology Innovation Guide, 2009(3): 17–19.
(侯向东, 陈津, 史学红, 等. 微波加热含碳锰矿粉固相还原脱磷影响因素分析 [J]. 科技创新导报, 2009(3): 17–19.)
- [6] Li Yongjun, Li Guangqiang, Zhu Chengyi, *et al.* Experimental study on simultaneous dephosphorization by carbothermal reduction of high phosphorus iron ore [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2012(4): 254–259.
(李永军, 李光强, 朱诚意, 等. 高磷铁矿碳热还原同步脱磷的试验研究 [J]. 武汉科技大学学报, 2012(4): 254–259.)
- [10] Wang Shuhuan, Wu Yanqing, Liu Xinsheng, *et al.* Experimental study on the gasification dephosphorization of converter slag by silicon reduction [J]. Iron and Steel, 2008(2): 31–34.
(王书桓, 吴艳青, 刘新生, 等. 硅还原转炉熔渣气化脱磷试验研究 [J]. 钢铁, 2008(2): 31–34.)
- [11] Fangxiong miyashi, Liu Jingming, Yamada Jiansan, *et al.* Processing method of molten steel, Japanese Patent: tk-51-121030 [P]. 1975–04–16.
(宫下方雄, 柳井明, 山田健三, 等. 製鋼溶融スラク処理方法, 日本专利: 特开昭 51-121030 [P]. 1975–04–16.)

编辑 杨冬梅