

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180167

自摆动喷枪喷吹石灰石粉脱磷的水模拟

张 波¹, 吴 巍¹, 吴 伟¹, 王天明², 罗林根³, 王雨晗³

(1. 钢铁研究总院冶金工艺所, 北京 100081; 2. 中国钢研科技集团有限公司集团办公厅, 北京 100081;
3. 新冶高科技集团有限公司资源应用与合金材料事业部, 北京 100081)

摘 要: 为了探究自摆动喷枪喷吹石灰石脱磷的可行性,建立了自摆动喷枪喷吹石灰石粉脱磷的冷态模型,用水模拟铁水,PMMA粉模拟石灰石粉,真空泵油模拟炉渣,压缩空气模拟氧气,研究了喷头马赫数、喷孔夹角、枪位、供料速度和石灰石粉粒度对熔池内传输动力学条件的影响。结果表明,拉瓦尔喷头可以用于石灰石粉喷吹,但是马赫数不宜太大,最佳马赫数为1.8;熔池内传输的动力学条件随喷孔夹角的增大逐渐改善,但喷孔夹角过大会导致穿透比急剧减小和喷溅程度急剧恶化,最佳喷孔夹角为25°;试验喷枪最佳操作参数为,枪位200 mm,供料速度1.8 kg/min,石灰石粉粒度0.164 mm。

关键词: 自摆动喷枪; 脱磷; 混匀时间; 颗粒穿透比; 喷溅

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)01-0028-05

Water model of freely swing lance injecting limestone powder to dephosphorization

ZHANG Bo¹, WU Wei¹, WU Wei¹, WANG Tian-ming², LUO Lin-gen³, WANG Yu-han³

(1. Metallurgical Technology Research Department, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;
2. Administration Office, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 3. Resource Application and Alloy Materials Business Department, New Metallurgy Hi-Tech Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of dephosphorization by the free swing lance injecting limestone powder, a cold model of the free swing lance injecting limestone powder to dephosphorization system was established to investigate the effect of the Mach number of nozzle, the nozzle's angle, the lance height, the feeding speed and the particle size of injection system on the transmission dynamics condition in the melt bath. The water, the polymethylmethacrylate particle, the vacuum-pump oil and the compressed air were used to simulate the hot metal, the limestone powder, the slag and the oxygen respectively. The results showed that the Laval nozzle could be used to inject limestone powder, but the Mach number of the nozzle should not be too large. The optimal Mach number was 1.8. The transmission dynamics condition in the melt bath became better with the increasing of the nozzle's angle, but the particle penetration ratio would increase and the splash would decrease sharply if the nozzle's angle was too large. The optimum parameters of the nozzle's angle, the lance height, the feeding speed and the particle size were 25°, 200 mm, 1.8 kg/min and 0.164 mm respectively.

Key words: freely swing lance; dephosphorization; mixing time; particle penetration ratio; splash

中国粗钢产量多年来稳居世界第一,但铁矿石的自给率不足,对进口矿的依存度超过一半。随着铁矿石价格不断攀升,对中高磷铁矿的利用越来越受到人们的关注。中国鄂西、河北和四川等地储有大量的中高磷铁矿,因不能满足炼钢脱磷的技术要求尚未大量使用^[1-7]。因此,研究开发铁水脱磷预处理新工艺具有重要意义。

国内外学者对铁水脱磷预处理工艺进行了大量试验研究。杨文远等^[8]利用1/9有机玻璃模型测定了脱磷预处理转炉在不同喷吹条件下的熔池混匀时间、顶吹射流对熔池的穿透深度,渣-钢之间的乳化率。周进东等^[9]在实验室条件下研究了供氧方式、粉剂用量对高磷铁水脱磷预处理过程的温降和脱磷率的影响。Miyata M等^[10]在2 t的试验转炉内

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304000, 2017YFB0304003); 北京市自然科学基金面上资助项目(2172057); 国家自然科学基金资助项目(51704080)

作者简介: 张 波(1989—),男,博士生; **E-mail:** zhangbo530925@163.com; **收稿日期:** 2018-04-19

模拟了以氧气为载气顶吹喷石灰粉对铁水预处理脱磷的影响,认为熔池火点区域的脱磷贡献率约为35%,喷吹过程中火点区域渣中氧化亚铁的质量分数约为37%。唐彪等^[11]利用水模拟的方法模拟了顶吹喷石灰石粉对转炉脱磷的影响,并得到最佳实验室喷吹工艺参数。根据凝聚相定律,Masakatsu Hasegawa等^[12]提出通过使用多相脱磷剂可以显著减少渣量,为高磷铁水脱磷剂的研制指明了方向。Tasuku Hamano等^[13-14]采用SEM/EDS技术对多相熔剂中磷酸盐的形成反应以及CaO(2CaO·SiO₂)颗粒与熔渣间的传质过程进行了研究。范全荣^[15]提出的自由喷枪喷吹法不需要机械转动系统,并成功应用于铁水包脱硫工艺。自摆动喷枪指的是在喷吹流体的反作用下枪体可自由摆动,可以增大喷吹面积,明显改善熔池内传输动力学条件。吹氧喷粉铁水脱磷处理火点区域温度较高,脱碳速率加快,温度迅速升高,脱磷率较低。石灰石高温分解吸热可降低火点局部区域温度,而且分解产生的气体可改善熔池的搅拌条件。本文利用水模拟试验方法,探究自由喷枪喷吹石灰石粉用于铁水脱磷预处理的可行性。

1 试验过程

本试验以国内某钢厂的100 t脱磷转炉为原型,建立1/6脱磷转炉物理模型和自摆动单孔吹氧喷粉枪物理模型,以工业生产中相关参数为蓝本,设定相关水模拟试验参数来模拟自摆动喷枪吹氧喷吹石灰石粉脱磷铁水预处理过程。试验装置的示意图如图1所示,由气源、转炉和喷枪模型、喷吹系统和检测系统组成。转炉模型由有机玻璃组成,喷枪由内壁光滑的耐磨钢管和铜制单孔拉瓦喷头组成。

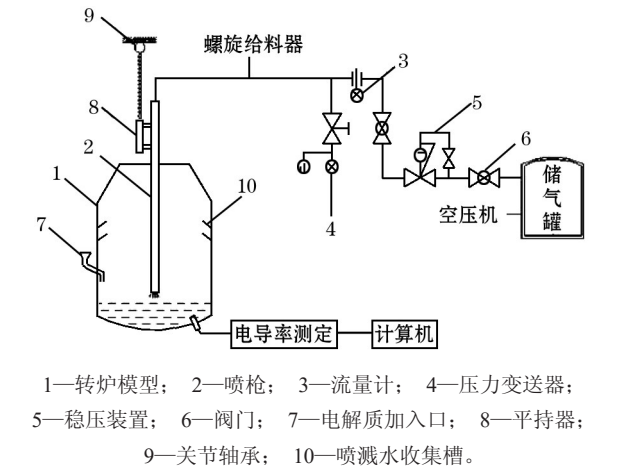


图1 水模拟试验装置示意图

Fig. 1 Chart of water simulation test device

试验以水模拟铁水,真空泵油模拟炉渣,压缩空气模拟氧气,不同粒径的PMMA模拟石灰石颗粒。试验采取单因子变量试验方案分别探究喷头马赫数和喷孔夹角、枪位、供料速度、喷吹物粒度对熔池内传输动力学条件的影响。根据修正佛劳德准数和转炉实际生产确定实际方案,试验时压缩空气流量保持在20 m³/h不变。喷吹物颗粒添加采用自行研制的喷吹设备(图2)喷入,该设备可以精确控制实验室条件下供料速度。原型与模型的相关参数见表1。

Table 1 Parameters of prototype and watermodel					
参数	熔池深度/mm	气体密度/(kg·m ⁻³)	熔体密度/(kg·m ⁻³)	渣密度/(kg·m ⁻³)	固体密度/(kg·m ⁻³)
原型	1 320	1.4	7 000	3 100	2 700
模型	220	1.2	1 000	860	1 190

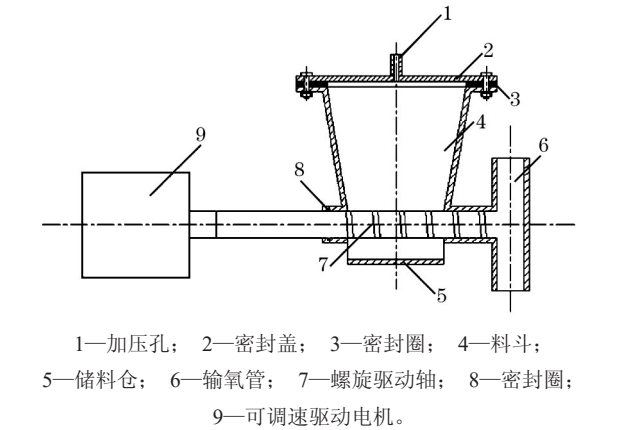


图2 喷吹试验装置

Fig. 2 Experimental injection device

试验以熔池的混匀时间、颗粒穿透比和熔池溅量来评价熔池内传输动力学条件的优劣。以电导率仪测量混匀时间,以饱和食盐水为示踪剂,每次测量时待喷吹稳定后加入30 mL示踪剂,加入位置为熔池液面30 cm上方电导率仪探头对角线方向位置(图1中7位置),计算机全程进行混匀时间终点的自动判定,每组试验的混匀时间为3次重复试验的平均值。颗粒穿透比测定试验同样以熔池电导率变化作为穿透比的检测标准,试验使用饱和食盐水浸泡烘干后的PMMA颗粒进行喷吹,PMMA颗粒表面的氯化钠进入水中后很快溶解,会引起熔池电导率变化,而不能进入熔池或者进入熔池后迅速上浮到渣层的部分在真空泵油中颗粒表面的氯化钠不会溶解,所以只要有效穿透的颗粒质量相等,熔池电导率的变化应为定值,从而计算求得颗

粒穿透比。以每分钟内固定位置的喷溅量来代表喷溅程度。在模型内壁的液面以上 40 cm 位置设有倾角为 30° 的水槽,水槽内设有小孔与外界收集瓶相连,通过称量该位置收集瓶内的水质量判断喷溅程度。

2 结果与分析

2.1 测量喷吹物穿透比预试验

温度控制是铁水脱磷预处理的关键,温度过高,脱碳反应剧烈发生,严重影响后续转炉炼钢。石灰石高温分解,可降低火点区域的局部高温。但如果石灰石颗粒不能进入铁液,在渣中分解吸热会造成化渣困难,因此以石灰石颗粒的穿透比作为喷吹试验的重要指标。定义穿过渣层进入铁水的石灰石量占喷吹石灰石总量的质量比为试验的穿透比。水模拟试验中不能穿过渣层到达熔池内部或者到达熔池内部没完全反应就上浮到渣层中的颗粒(实际喷吹中未完全分解熔化就上浮到渣层)被真空泵油吸附,使其表面的氯化钠不再对熔池的电导率变化产生影响,可由此得到石灰石的穿透比。为了确定电导率随穿透量的关系,在不加入真空泵油的情况下做预试验。由于喷吹物粒度较小,近似认为相同质量颗粒的总表面积是相同的,与颗粒粒度无关。通过多次喷吹不同质量的粉剂颗粒,等待足够长的时间,待电导率仪示数稳定,得到电导率变化量与穿透量的关系如图 3 所示。

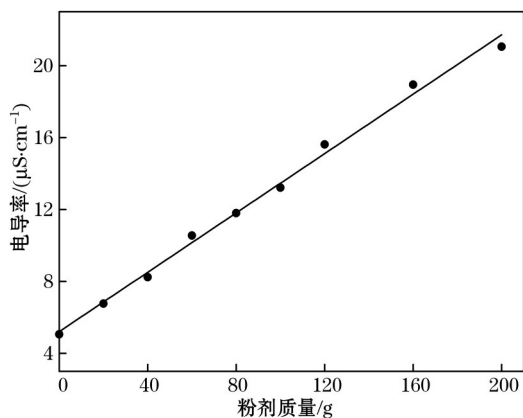


图 3 喷吹粉剂质量与熔池电导率的关系

Fig. 3 Relationship between mass of powder injection and conductivity of molten bath

通过线性拟合近似得到电导率变化与穿透量之间的关系为: $y = 5.2063 + 0.0825x$ 。由此可算出每次穿透比测量试验的穿透量,从而得到对应的穿透比。

2.2 喷头马赫数对熔池内传输动力学条件的影响

以喷枪的喷头马赫数为自变量,喷孔夹角为 20°,试验枪位为 200 mm,供料速度为 1.8 kg/min,颗粒粒度为 0.164 mm,熔池混匀时间、喷吹颗粒穿透比和单位时间喷溅量如图 4 所示。

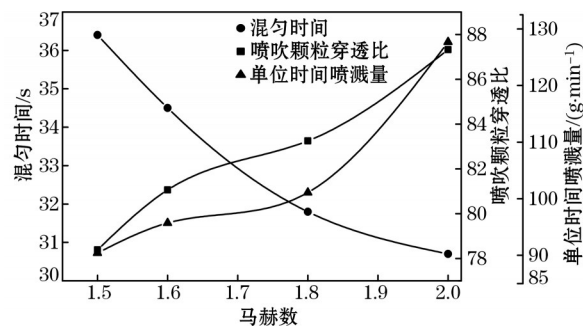


图 4 马赫数对混匀时间、喷吹颗粒穿透比和单位时间喷溅量的影响

Fig. 4 Effect of Mach number on mixing time, particle penetration ratio and splash

随着喷头马赫数的增加,熔池的混匀时间逐渐减小,颗粒穿透比和单位时间喷溅量逐渐增加,马赫数为 2.0 时喷溅程度急剧恶化,如图 4 所示。这是因为喷头马赫数增加,喷头出口处的气体和粉剂的动能越大,对液面的搅拌作用和冲击力越大。因此混匀时间减小,粉剂穿透比和单位时间喷溅量增加,考虑到喷溅程度对金属收得率及枪体寿命的影响,喷头最佳马赫数为 1.8。

2.3 喷孔夹角对熔池内传输动力学条件的影响

以喷头的喷孔夹角为自变量,喷头马赫数为 1.8,试验枪位为 200 mm,供料速度为 1.8 kg/min,颗粒粒度为 0.164 mm,熔池混匀时间、喷吹粉剂的穿透比和单位时间喷溅量如图 5 所示。

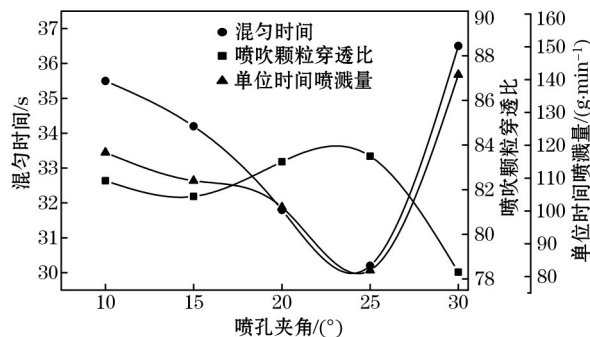


图 5 喷孔夹角对混匀时间、喷吹颗粒穿透比和单位时间喷溅量的影响

Fig. 5 Effect of nozzle's angle on mixing time, particle penetration ratio and splash

随着喷孔夹角的增加,混匀时间逐渐减小,颗粒穿透比变化幅度不大,单位时间喷溅量基本上逐

渐减小;当喷孔夹角超过 25° 以后,随着喷孔夹角的增加,混匀时间和单位时间喷溅量急剧增加,颗粒穿透比急剧减小,如图5所示。这是因为随着喷孔夹角的增加,枪体所受流体对其的径向反作用力逐渐增加,枪体的摆动幅度和频率越来越大,冲击面积增加,切向搅拌能增加,但当喷孔夹角过大后,喷吹流体的切向运动加剧,对液面的纵向冲击减弱,部分流体直接作用在液面炉壁处从而导致动能部分损失,造成混匀时间反增,颗粒穿透比减小,喷溅程度加剧,因此喷孔夹角不宜超过 25° 。

2.4 枪位对熔池内传输动力学条件的影响

以喷枪试验枪位为自变量,喷孔马赫数为1.8,喷头夹角为 25° ,供料速度为 1.8 kg/min ,颗粒粒度为 0.164 mm ,熔池混匀时间、喷吹粉剂的穿透比和单位时间喷溅量如图6所示。随着喷吹枪位的增加,混匀时间不断增加,颗粒穿透比和单位时间的喷溅量不断减小。这是因为随着枪位的增加,流体到达液面的动能减小,流体的冲击力和搅拌动能减小。最佳试验枪位为 200 mm 。

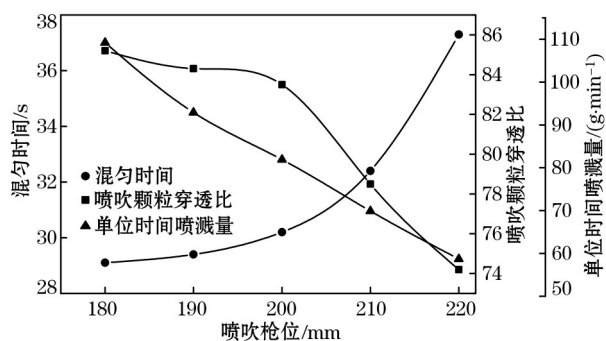


图6 喷吹枪位对混匀时间、喷吹颗粒穿透比和单位时间喷溅量的影响

Fig. 6 Effect of lance height on mixing time, particle penetration ratio and splash

2.5 供料速度对熔池内传输动力学条件的影响

以喷吹颗粒供料速度为自变量,喷孔马赫数为1.8,喷头夹角为 25° ,试验枪位为 200 mm ,颗粒粒度为 0.164 mm ,熔池混匀时间、喷吹粉剂的穿透比和单位时间喷溅量如图7所示。

由图7可以看出,开始随着供料速度的增加,混匀时间和颗粒穿透比变化幅度不大,喷溅程度逐渐减弱;当供料速度超过 1.8 kg/min 时,混匀时间急剧增加,颗粒穿透比急剧下降,喷溅程度依然呈减弱趋势。这是因为,随着供料速度的增加,颗粒的加速消耗点越来越多的载气动能,导致气体和颗粒的喷孔出口速度都在一定程度上有所减小,但颗粒的速度足以使之穿透液面进入熔池,因此流体的搅拌

能变化幅度不大,因此开始混匀时间和颗粒穿透比的变化幅度不大;当供料速度超过 1.8 kg/min 后,气体和颗粒的喷孔出口速度降低的幅度较大,部分颗粒的到达液面的速度不足以使之穿透渣层,因而熔池搅拌动能急剧减小,混匀时间急剧增加,颗粒穿透比急剧减小,喷溅程度急剧减弱。综合考虑喷吹效果和效率,试验供料速度应保持在 1.8 kg/min 以下。

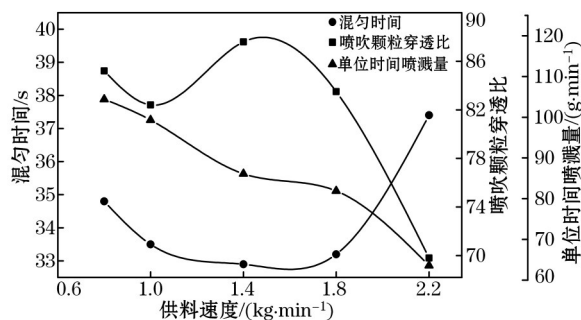


图7 供料速度对混匀时间、喷吹颗粒穿透比和单位时间喷溅量的影响

Fig. 7 Effect of feeding speed on mixing time, particle penetration ratio and splash

2.6 石灰石粒度对熔池内传输动力学条件的影响

以颗粒粒度为自变量,喷孔马赫数为1.8,喷头夹角为 25° ,试验枪位为 200 mm ,供料速度为 1.8 kg/min ,熔池混匀时间、颗粒穿透比和单位时间喷溅量如图8所示。

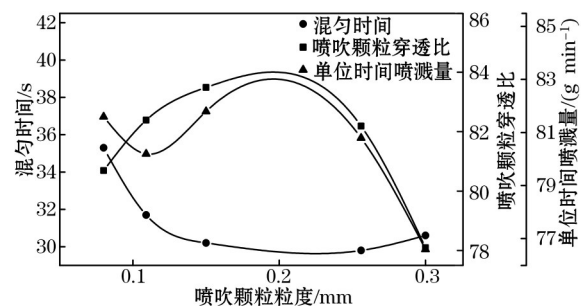


图8 喷吹颗粒粒度对混匀时间、喷吹颗粒穿透比和单位时间喷溅量的影响

Fig. 8 Effect of particle size of injection on mixing time, particle penetration ratio and splash

由图8可以看出,开始随着喷吹颗粒粒度的减小,混匀时间的几乎不变;颗粒穿透比和单位时间喷溅量呈增加趋势;当颗粒粒度超过 0.15 mm 时,随着喷吹颗粒粒度的减小,混匀时间逐渐增加,颗粒穿透比和单位时间喷溅量逐渐减小。这是因为随着喷吹颗粒粒度的减小,单个颗粒的出口速度增加,对液面的冲击力增加,但流体的总动能不变,因此混匀时间几乎不变,颗粒穿透比和单位时间喷溅

量有所增加。然而喷吹颗粒的总比表面积随颗粒粒度的减少急剧增加,喷吹阻力逐渐增大,当颗粒粒度超过 0.15 mm 后,部分颗粒因流体呈弥散状而导致方向改变因而无法穿透液面。综合考虑喷吹效果,最佳喷吹颗粒粒度为 0.15 mm 左右。

综上所述,喷枪系统的摆动程度主要由喷头马赫数、喷孔夹角和枪位共同决定,只有当 3 个操作参数都处于适宜范围内,喷枪系统才会取得良好的摆动效果;供料速度和石灰石粒度主要是影响粉剂的出口速度,从而影响喷吹效果。

3 结论

(1) 拉瓦尔喷头可以用于石灰石石喷吹,但是马赫数不宜太大,最佳马赫数为 1.8。

(2) 随着喷孔夹角的增大,枪体的摆动频率和幅度逐渐增加,熔池传质的动力学条件得到改善;但喷孔夹角过大导致流体的切向运动而使得穿透比急剧减小和喷溅程度急剧恶化,试验最佳喷孔夹角为 25°。

(3) 综合考虑喷吹效果和效率,试验最佳自摆喷枪喷吹操作参数如下,枪位为 200 mm,供粉速度为 1.8 kg/min,石灰石石颗粒粒度为 0.164 mm。

参考文献:

- [1] 邓建军,张明博,李建新,等. CaO 基含 TiO₂ 和 Al₂O₃ 半钢渣系脱磷能力的热力学[J]. 钢铁, 2018, 53(3): 27. (DENG Jian-jun, ZHANG Ming-bo, LI Jian-xin, et al. Thermodynamics of dephosphorization capacity of containing TiO₂ and Al₂O₃ of CaO-based semi-steel slag[J]. Iron and Steel, 2018, 53(3): 27.)
- [2] 叶玉奎,王向红,秦福同,等. 复吹转炉双渣脱磷工艺实践[J]. 中国冶金, 2018, 28(1): 40. (YE Yu-kui, WANG Xiang-hong, QIN Fu-tong, et al. Practice of double-slag dephosphorization technology for combined blown converter[J]. China Metallurgy, 2018, 28(1): 40.)
- [3] 范振林. 中国铁矿资源保障程度研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(6): 124. (FAN Zhen-lin. Research on the indemnification of iron ore resources in China[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(6): 124.)
- [4] 李厚民,王登红,李立兴,等. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 559. (LI Hou-min, WANG Deng-hong, LI Li-xing, et al. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 559.)
- [5] 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. (DONG Wen-liang, LUO Lei, TIAN Zhi-hong, et al. Recycle of decarburization-slag in dephosphorization-furnace of duplex process in converter[J]. Iron and Steel, 2017, 52(5): 36.)
- [6] 吴伟,戴诗凡. 石灰石对转炉冶炼效果的影响[J]. 中国冶金, 2016, 26(5): 52. (WU Wei, DAI Shi-fan. Influence of limestone on metallurgical effect of converter[J]. China Metallurgy, 2016, 26(5): 52.)
- [7] 韩跃新,孙永升,高鹏,等. 高磷鲕状赤铁矿开发利用现状及发展趋势[J]. 金属矿山, 2012, 41(3): 1. (HAN Yue-xin, SUN Yong-sheng, GAO Peng, et al. Exploitation situation and development trend of high phosphorus oolitic hematite[J]. Metal Mine, 2012, 41(3): 1.)
- [8] 杨文远,李林,彭小艳,等. 转炉铁水脱磷预处理水模试验[J]. 钢铁, 2015, 50(9): 34. (YANG Wen-yuan, LI Lin, PENG Xiao-yan, et al. Water model experimental of dephosphorization pretreatment in converter[J]. Iron and Steel, 2015, 50(9): 34.)
- [9] 周进东,毕学工,吴杰,等. 高磷铁水预脱磷合理工艺的实验研究[J]. 过程工程学报, 2011, 11(1): 50. (ZHOU Dong-jin, BI Xue-gong, WU Jie, et al. Experimental study on rational technology of dephosphorization pretreatment for high phosphorus content hot iron[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(1): 50.)
- [10] Miyata M, Tamura T, Higuchi Y. Development of hot metal dephosphorization with limestone powder top blowing: Part 1. low blowing rate[J]. ISIJ International, 2017, 57(10): 1751.
- [11] 唐彪,王晓鸣,邹宗树,等. 复吹转炉氧枪喷吹石灰石颗粒的物理模拟[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2014, 35(5): 695. (TANG Biao, WANG Xiao-ming, ZOU Zong-shu, et al. Physical simulation of BOF limestone particles blowing via top lance[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2014, 35(5): 695.)
- [12] Masakatsu Hasegawa, Masanori Iwase. Thermodynamics of CaO-based slags for hot metal pretreatment[C]//Proceedings of the Second Baosteel Biennial Academic Conference. Shanghai: Metallurgical Industry Press, 2006: 210.
- [13] Tasuku Hamano, Shinya Fukagai, Fumitaka tsukihashi reaction mechanism between solid CaO and FeO_x-CaO-SiO₂-P₂O₅ slag at 1 573 K[J]. ISIJ International, 2006, 46(4): 490.
- [14] Shinya Fukagai, Tasuku Hamano, Fumitaka Tsukihashi. Formation reaction of phosphate compound in multi phase flux at 1 573 K[J]. ISIJ International, 2007, 47(1): 187.
- [15] 范全荣. 动态自由喷枪铁水预处理脱硫[C]//2010 年全国炼钢—连铸生产技术会议. 北京: 中国金属学会, 2010: 116. (FAN Quan-rong. Dynamic free lance for desulphurization of molten iron[C]//National Conference on Steelmaking and Continuous Casting Technology. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2010: 116.)