

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190395

## 漩流氧枪转炉炼钢熔体的喷溅行为

李琳<sup>1,2</sup>, 李明明<sup>1,2</sup>, 李强<sup>1,2</sup>, 邹宗树<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;  
2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 转炉冶炼过程金属熔体的喷溅对于转炉反应器的性能有重要影响。氧枪作为氧气射流的产生及控制单元, 决定了转炉吹炼过程熔体的喷溅行为。通过水模型试验, 研究了漩流氧枪转炉冶炼过程熔体的喷溅, 考察了氧枪喷孔扭转角设计及操作参数下熔体喷溅速率和喷溅的空间分布规律, 基于此, 分析了漩流氧枪对转炉反应器性能的影响。结果表明, 相比于传统氧枪吹炼, 漩流氧枪吹炼时熔体喷溅速率降低, 喷溅高度下降, 喷溅在径向空间分布趋于均匀, 且随着喷孔扭转角的增大, 该分布规律变化更为显著, 扭转角大于 20° 时, 喷溅到炉口及炉外的熔体降为零。漩流氧枪吹炼时, 喷溅速率及喷溅量在不同径向和高度位置处分布随着顶吹气量的增大而增大, 受枪位的影响规律与扭转角有关。

**关键词:** 转炉炼钢; 漩流氧枪; 喷孔扭转角; 喷溅速率; 喷溅分布

**文献标志码:** A **文章编号:** 0449-749X(2020)06-0054-07

## Melt splashing behavior of steelmaking converter with nozzle-twisted lance

LI Lin<sup>1,2</sup>, LI Ming-ming<sup>1,2</sup>, LI Qiang<sup>1,2</sup>, ZOU Zong-shu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

**Abstract:** In BOF steelmaking, the splashing of molten steel has a significant influence on the performance of the converter reactor. Oxygen lance is the operation unit that generates supersonic oxygen jets and controls their behavior and plays a critical role in controlling the splashing. The splashing of steelmaking converter with a nozzle-twisted lance was studied with water model experiments. The effects of the nozzle twist angle design of the nozzle-twisted lance and its operation parameters on the splashing rate and spatial distribution of splashing were discussed. And on this basis, the effect of nozzle-twisted lance on the performance of the converter reactor was analyzed. The results show that, compared with the splashing rate in converter with traditional oxygen lance, the splashing rate and height in the converter with the nozzle-twisted lance decreases. Also, the distribution of splashing droplets in radial space is more uniform. This splashing distribution trend is more pronounced with the increase of the nozzle twist angle. The melt quantity splashed onto the converter mouth and out of the converter is decreased to zero when the nozzle twist is bigger than 20°. For the converter with a nozzle-twisted lance, the splashing rate as well as the radial and vertical distribution of splashing quantity increase with the increase of top blowing flow rate but have a dynamic effect by the lance height depending on the nozzle twist angle.

**Key words:** BOF; nozzle-twisted lance; nozzle twist angle; splashing rate; splashing distribution

在氧气转炉炼钢过程中, 高压氧气通过水冷氧枪以超音速射流的形式吹入熔池, 为脱碳等反应提供氧化介质。同时, 高速氧射流以巨大动能冲击到金属熔池, 撕裂金属熔体, 引起熔体飞溅, 即喷溅。一方面, 冶炼过程大量喷溅的金属液滴进入泡沫渣,

极大地增加了渣-金反应界面积, 可显著强化脱碳反应<sup>[1]</sup>; 另一方面, 金属熔体的喷溅也会加剧炉衬耐火材料侵蚀、增加铁损、引起炉口结瘤<sup>[2-4]</sup>。因此, 转炉冶炼过程金属熔体的喷溅行为对于转炉反应器的性能有重要影响。氧枪作为氧气射流的产生及控制单

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51904062); 中国博士后科学基金资助项目(2019M650056); 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(N172503014)

**作者简介:** 李琳(1987—), 女, 博士生; **E-mail:** ll7may@163.com; **收稿日期:** 2019-08-26

元,决定了转炉吹炼过程熔体的喷溅行为。一直以来,探明氧枪射流动力学特性对转炉冶炼过程熔体喷溅行为的影响规律,进而优化和改进氧枪设计,是转炉过程优化的重要研究方向<sup>[5-13]</sup>。本文基于水模型试验,研究了一种漩流氧枪应用于炼钢转炉时熔体的喷溅行为,考察了漩流氧枪喷孔扭转角设计及漩流氧枪操作参数对熔体喷溅速率和喷溅空间分布规律的影响,以期为漩流氧枪的参数设计和实际应用提供理论参考。

## 1 试验原理及方法

### 1.1 试验参数的确定

试验以某钢厂 125 t 复吹转炉为原型,基于相似原理,建立相应的水模型,并用水模拟钢水,可压缩空气模拟顶吹氧气和底吹惰性气体。模型与原型几何相似比为 1 : 10。同时,为保证模型和原型的

动力学相似,模型与原型修正的弗劳德数相等<sup>[14-15]</sup>,即

$$Fr_m = Fr_p \quad (1)$$

$$\frac{u_m \rho_{gm}}{gd_m(\rho_{lm} - \rho_{gm})} = \frac{u_p \rho_{gp}}{gd_p(\rho_{lp} - \rho_{gp})} \quad (2)$$

因此可得到如下的模型顶吹及底吹流量与原型流量之间的关系

$$Q_m = \left(\frac{d_p}{d_m}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{\rho_{gp}}{\rho_{gm}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_{lp} - \rho_{gp}}{\rho_{lm} - \rho_{gm}}\right)^{\frac{1}{2}} Q_p \quad (3)$$

式中: $Fr_m$ 、 $Fr_p$  分别为模型与原型修正的弗劳德数; $u_m$ 、 $u_p$  分别为模型与原型喷枪出口气体流速, m/s; $\rho_{gm}$ 、 $\rho_{gp}$  分别为模型与原型气体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $d_m$ 、 $d_p$  分别为模型与原型喷孔出口直径, mm;  $\rho_{lm}$ 、 $\rho_{lp}$  分别为模型与原型液体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $Q_m$ 、 $Q_p$  分别为模型与原型气量, m<sup>3</sup>/h。

基于上述原理,模型和原型相关参数见表 1。

表 1 模型与原型相关参数

Table 1 Main parameters of water model and converter prototype

项目	熔池直径/mm	熔池深度/mm	喷孔数量	喷孔夹角/(°)	喷孔扭转角/(°)	顶吹流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	氧枪枪位/mm	底吹流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
原型	5 800	1 540	6	14	0	24 000~32 000	1 300~2 500	285.4
模型	580	154	6	14	0~30	27.8~34.0	36~186	1.25

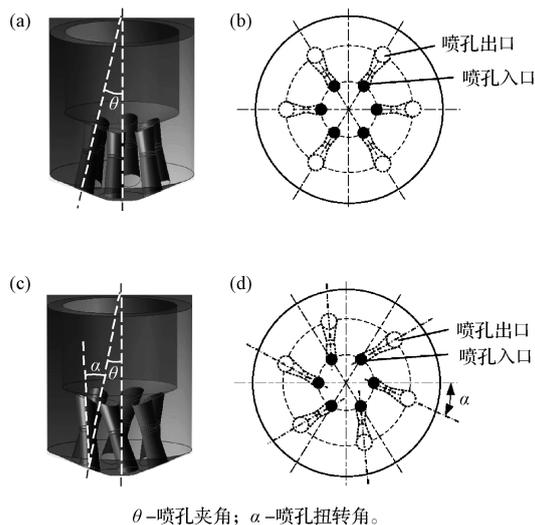
### 1.2 试验装置及方法

试验主要考察漩流氧枪转炉吹炼条件下的熔体喷溅行为,确定喷溅量及其空间分布规律。试验所用氧枪喷头如图 1 所示。相比于传统氧枪喷头,漩流氧枪喷头各喷孔沿氧枪轴线周向方向扭转一定角度。试验所用氧枪喷头均采用铝合金,用数控机床加工制作。

水模型试验装置示意图如图 2 所示。转炉模型由有机玻璃制成。试验过程采用固定底吹布置方案,底吹孔采用 6 孔同心圆对称布置,孔径为 2 mm,均匀分布在炉底 0.45D<sub>0</sub>(D<sub>0</sub> 为炉底直径)的同心圆上。转炉侧壁开有一个 20 mm×20 mm 的方孔,穿过方孔布置有可移动支撑杆 1 和支撑杆 2,支撑杆均为有机玻璃制成。支撑杆 1 固定在支撑架上,可沿转炉半径方向移动。支撑杆 2 与支撑杆 1 通过螺钉链接,通过改变两者链接位置,可使支撑杆 2 沿转炉高度方向移动。支撑杆 2 上设置有 5 个处于不同高度位置的有机玻璃制成的 40 mm×40 mm×5 mm 支撑平台,各平台间距可调。

试验开始前,将 5 个尺寸均为 40 mm×40 mm×40 mm 的吸水棉分别放置在支撑杆 2 的平台上,每

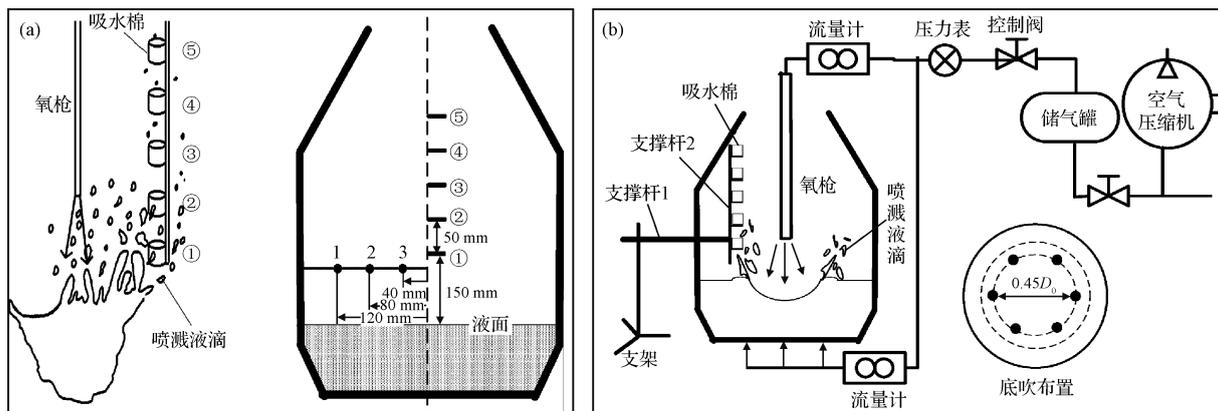
块吸水棉质量为 1.5 g。进行吹炼试验,15 s 后停止吹气,称量各吸水棉质量,确定各位置喷溅量。试验喷溅测量方案见表 2。



(a) 传统氧枪正视图; (b) 传统氧枪俯视图; (c) 漩流氧枪正视图; (d) 漩流氧枪俯视图。

图 1 传统氧枪与漩流氧枪喷头示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of conventional oxygen lance tip and nozzle-twisted oxygen lance tip



(a) 喷溅收集测量方案; (b) 示意图。

图 2 水模型试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

表 2 喷溅收集测量方案

Table 2 Scheme of splashing droplets collectors

项目	径向位置/mm (距转炉中心距离)			高度位置/mm (距液面高度)				
位置编号	1	2	3	①	②	③	④	⑤
数值	120	80	40	150	200	250	300	350

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 漩流氧枪对喷溅速率的影响

本研究中,采用图 2 所示①~⑤号高度位置收集的喷溅水滴之和表征喷溅量。转炉氧枪操作参数为枪位为 96 mm、顶吹气量为 29.6 m<sup>3</sup>/h 时,传统氧枪与漩流氧枪,以及漩流氧枪喷孔扭转角对熔体喷溅量的影响如图 3 所示。由图 3 可见,传统氧枪吹炼时,钢液的喷溅量为 43.7 g,漩流氧枪(喷孔扭转角为 30°)吹炼时,喷溅量急剧下降到 10 g,相比于传统氧枪,漩流氧枪可显著降低转炉冶炼过程熔体的喷溅速率。转炉冶炼时熔体的喷溅与氧射流的冲击动能有关,射流动能越大,对熔池的冲击作用越强,从熔池母相撕裂脱离的熔体越多。相比于传统氧枪,在相同氧枪操作参数下,漩流氧枪氧射流轴向速度减小,对熔池轴向冲击动能下降,因此造成熔体喷溅量下降。

由图 3 还可以发现,随着漩流氧枪喷孔扭转角的增大,钢液的喷溅量逐渐下降,且当氧枪喷孔扭转角为 10°~20°时,喷孔扭转角对钢液喷溅量的影响较为显著,喷溅速率随喷孔扭转角的增大快速下降;当喷孔扭转角为 20°~30°时,喷孔旋转角的改变对钢液喷溅速率的影响变小。

基于以上分析可知,从转炉泡沫渣内渣金反应

动力学方面看,相比于传统氧枪吹炼,漩流氧枪吹炼钢液滴喷溅速率下降,导致泡沫渣中金属液滴数量减少,可能使渣金界面面积减小,因此泡沫渣内脱碳反应速率降低。但另一方面,钢液喷溅速率下降可减轻对炉衬的物理冲刷侵蚀。

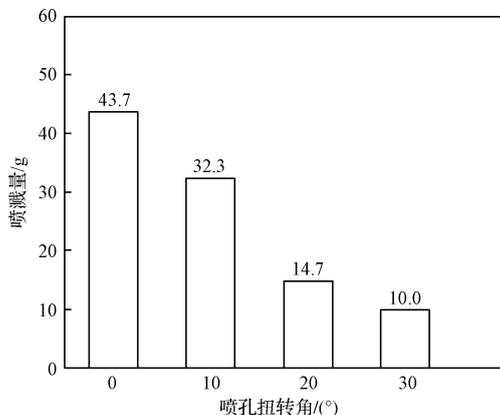


图 3 喷孔扭转角对喷溅量的影响

Fig. 3 Effect of nozzle twist angle on splashing quantity

### 2.2 漩流氧枪对喷溅空间分布的影响

冲击到熔池液面的氧气射流沿冲击凹坑表面剪切作用是引起熔体喷溅的根源。因此,反射气流与水平液面的夹角决定了熔体脱离母相发生喷溅的方向。通常而言,反射气流与水平液面的夹角越大,代表氧气射流对熔池的冲击动能越大,则冲击坑越深,不仅熔体的喷溅角度(液滴脱离母相发生喷溅的方向与水平液面的夹角)越大,而且喷溅熔体的初始动能也越大,导致液滴喷溅的高度越高,喷溅的径向距离减小。

枪位为 96 mm、顶吹气量为 29.6 m<sup>3</sup>/h 时,不同喷孔扭转角下,距转炉侧壁不同距离处的熔体喷

溅量如图 4 所示。由图 4 可见,传统氧枪转炉吹炼时,熔体的喷溅量随距离中心距离的增大而减小;漩流氧枪吹炼时,尽管喷溅熔体具有相似的径向空间分布规律,但随着喷孔扭转角的增大,这一分布规律趋于减弱,喷溅液滴量在径向空间位置上分布更均匀。这是由两方面原因所致:(1) 漩流氧枪射流轴向冲击动能随着喷孔扭转角的增大而降低,熔体喷溅角度减小,飞溅的径向距离增大,更易飞溅到炉壁位置;(2) 漩流氧枪射流切向冲击力随着喷孔扭转角的增大而增大,引起熔体更易向炉壁方向飞溅。此外,由图 4 可以看出,在相同的径向位置处,漩流氧枪吹炼相比于传统氧枪吹炼时产生更少的喷溅量,且喷溅量随喷孔扭转角的增大而减小。

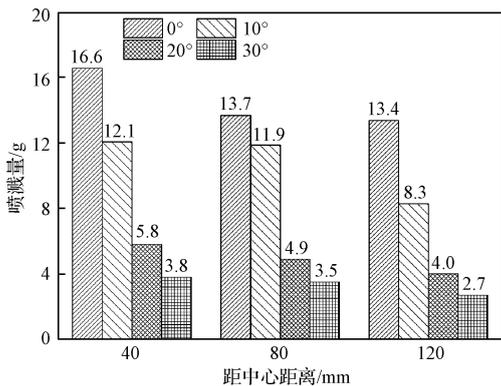


图 4 不同氧枪喷孔扭转角下喷溅量的径向分布  
Fig. 4 Radial distribution of splashing quantity under different nozzle twist angles

枪位为 96 mm、顶吹气量为 29.6 m<sup>3</sup>/h 时,不同氧枪喷孔扭转角下,喷溅量随转炉高度位置的变化如图 5 所示,其中径向取样位置为距中心 120 mm(径向位置 1)。由图 5 可见,随距离液面高度的增加,熔体喷溅量逐渐下降。对于传统氧枪吹炼过程,当距离液面高度从 150 增加到 350 mm 时,喷溅量由 3.4 下降到 2.1 g,这表明:吹炼过程钢液滴会飞溅到转炉炉口,造成炉口结瘤;同时,部分液滴会飞溅出转炉,引起铁损。当漩流氧枪吹炼时,飞溅到炉口及溅出转炉的钢液量下降,尤其当漩流氧枪的喷孔扭转角大于 20° 时,在距液面 300 mm 以上的高度处,喷溅液滴量为零,即飞溅到炉口及溅出转炉的钢液量几乎为零,因此可显著减轻炉口结瘤,降低铁损。此外,喷溅高度的下降也意味着能够飞溅到转炉上部炉衬的液滴减少,因此喷溅液滴对炉衬的冲刷面积减小。

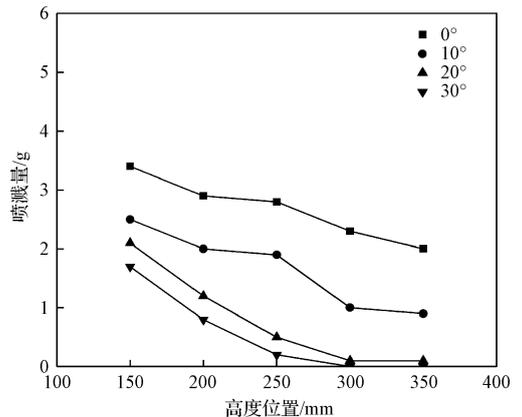


图 5 不同氧枪喷孔扭转角下喷溅量在高度上的分布  
Fig. 5 Vertical distribution of splashing droplets under different nozzle twist angles

### 2.3 漩流氧枪操作枪位对喷溅的影响

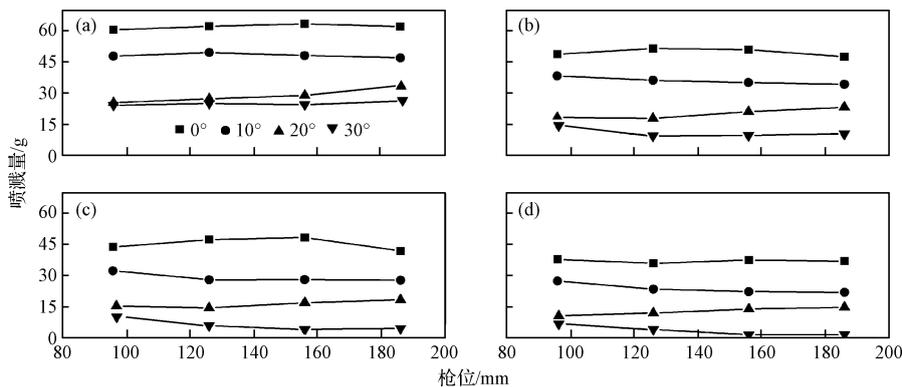
传统氧枪及漩流氧枪吹炼时转炉喷溅量随枪位的变化规律如图 6 所示。无论是传统氧枪吹炼,还是漩流氧枪吹炼,总体上枪位的改变对熔体喷溅量影响并不显著。传统氧枪吹炼时,喷溅量随枪位的提高呈先增大后减小的趋势,即存在一个临界枪位,该临界枪位在本试验条件下为 156 mm。漩流氧枪吹炼时,喷溅量随枪位的提高呈现出逐渐减小的趋势,但当漩流氧枪的喷孔扭转角为 20° 时,喷溅量随枪位的提高呈增加的趋势,喷溅增加的速率并不显著,这一现象可能是顶吹射流与底吹气体流相互作用的结果。

顶吹气量为 29.6 m<sup>3</sup>/h 时,不同漩流氧枪操作枪位下喷溅在径向上的分布如图 7 所示。对于传统氧枪,当枪位低于 156 mm 时,在距离转炉中心越远的径向位置处,喷溅量越小,此时射流对熔池的冲击深,熔体喷溅角度大,因而主要飞溅到靠近中心的径向空间位置;当枪位高于 156 mm 时,射流冲击深度浅,熔体喷溅角度减小,向远离中心的径向方向飞溅,因此距离中心的径向距离越远,喷溅量越大。对于漩流氧枪,当喷孔扭转角小于 10° 时,不同枪位下喷溅在径向上的分布规律与传统氧枪类似;当扭转角增大到 20° 时,随枪位的提高,各径向位置的喷溅量均增加,且距离中心越远,喷溅量越少;当扭转角增大到 30° 时,枪位对喷溅在径向上的分布影响较小,喷溅在径向方向上的分布趋于均匀。

顶吹气量为 29.6 m<sup>3</sup>/h 时,不同枪位下、距中心 120 mm(径向位置 1)处,喷溅在转炉高度上的分布如图 8 所示。对于传统氧枪,在距离液面近处的高度位置,喷溅量随枪位的提高呈先增大后减小的趋

势,而在距离液面较远的高度位置,喷溅量随枪位提高趋于减小。对于漩流氧枪,当喷孔扭转角小于 $10^\circ$ 时,在距离液面近处的高度位置,喷溅量随枪位的提高而增大,但在距离液面较远的高度位置,喷溅

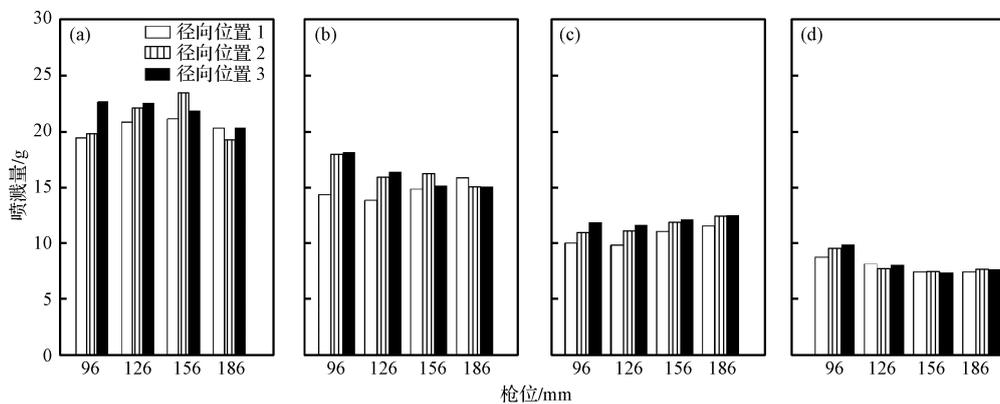
量随枪位提高而减小;当扭转角增大到 $20^\circ$ 时,不同高度位置处的喷溅量随枪位的提高而增加;当扭转角增大到 $30^\circ$ 时,不同高度位置处的喷溅量随枪位的提高而降低。



(a) 顶吹气量为  $27.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (b) 顶吹气量为  $29.6 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (c) 顶吹气量为  $31.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ; (d) 顶吹气量为  $34.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

图 6 不同喷孔扭转角和顶吹流量下喷溅量随枪位的变化

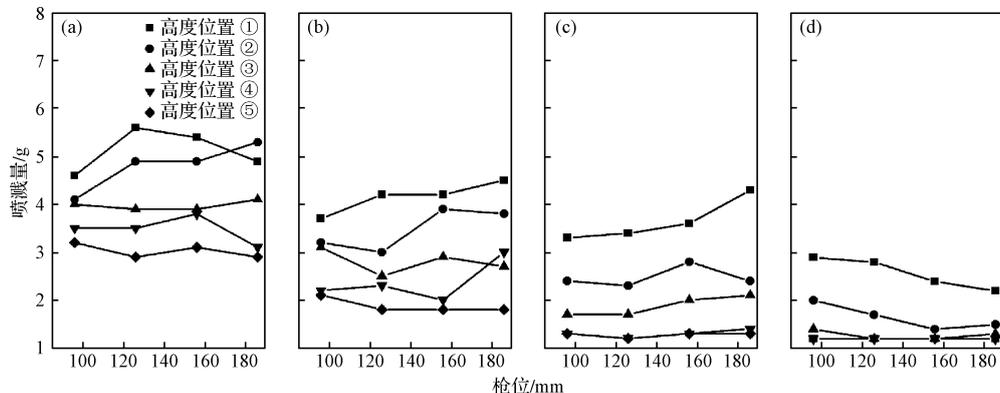
Fig. 6 Variation of splashing quantity with lance height under different nozzle twist angles and blowing flow rates



(a) 扭转角为  $0^\circ$ ; (b) 扭转角为  $10^\circ$ ; (c) 扭转角为  $20^\circ$ ; (d) 扭转角为  $30^\circ$ 。

图 7 不同操作枪位下喷溅量在径向上的分布

Fig. 7 Radial distribution of splashing quantity under different lance heights



(a) 扭转角为  $0^\circ$ ; (b) 扭转角为  $10^\circ$ ; (c) 扭转角为  $20^\circ$ ; (d) 扭转角为  $30^\circ$ 。

图 8 不同操作枪位下喷溅量在高度上的分布

Fig. 8 Vertical distribution of splashing quantity under different lance heights

### 2.4 漩流氧枪顶吹气量对喷溅的影响

操作枪位为 96 mm, 径向取样位置为距中心 120 mm 时, 传统氧枪及漩流氧枪吹炼时转炉喷溅量随顶吹气量的变化规律如图 9 所示。结果表明, 顶吹气量的改变对熔体喷溅量影响较大, 随顶吹气量的增大, 熔体喷溅速率增大。顶吹气量对喷溅在径向和高度方向上分布的影响如图 10 和图 11 所示, 随着顶吹气量的增大, 不同径向及高度位置的喷溅量均增加。

### 3 结论

(1) 相比于传统氧枪吹炼, 漩流氧枪吹炼时, 熔体的喷溅速率下降, 且喷溅速率随着氧枪喷孔扭转角的增大而减小, 因此可减轻对炉衬物理冲刷侵蚀,

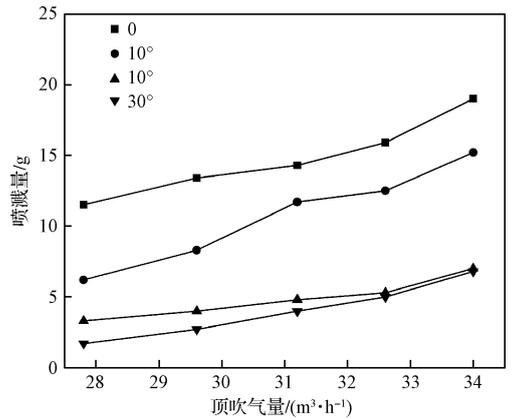
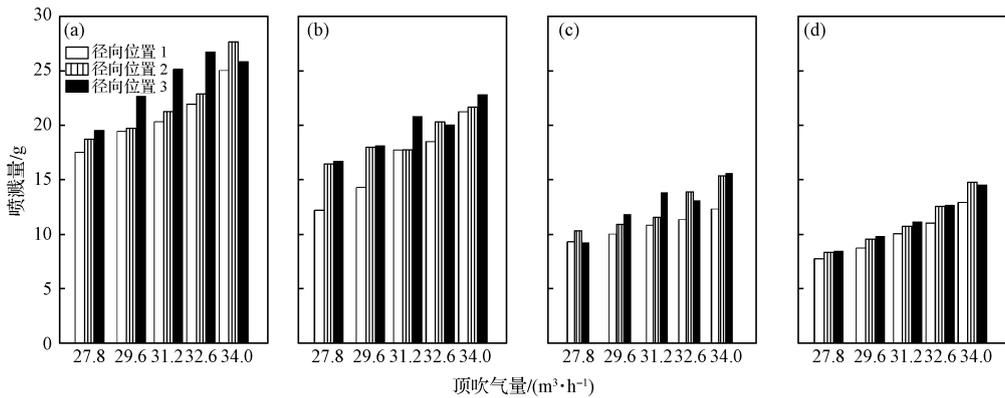


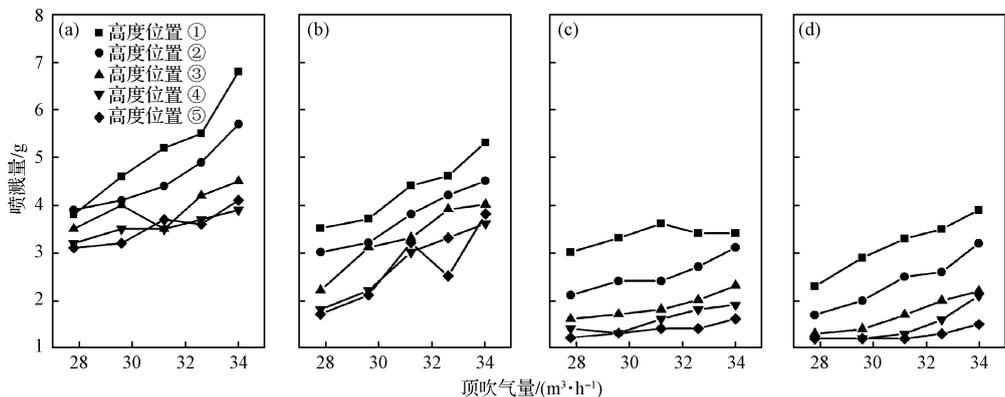
图 9 不同喷孔扭转角下喷溅量随顶吹气量变化  
Fig. 9 Variation of splashing quantity with top blowing flow rate under different nozzle twist angles



(a) 0°; (b) 10°; (c) 20°; (d) 30°.

图 10 不同顶吹气量下喷溅量在径向的分布

Fig. 10 Radial distribution of splashing quantity under different top blowing flow rates



(a) 0°; (b) 10°; (c) 20°; (d) 30°.

图 11 不同顶吹气量下喷溅量在高度上的分布

Fig. 11 Vertical distribution of splashing quantity under different top blowing flow rates

但同时也可能降低泡沫渣中渣-金界面面积。

溅液滴更易飞溅到侧壁, 喷溅量在径向空间分布更趋于均匀; 同时, 液滴的飞溅高度下降, 当喷孔扭转

(2) 相比于传统氧枪吹炼, 漩流氧枪吹炼时, 喷

角大于  $20^\circ$  时,几乎没有熔体飞溅到炉口及溅出炉外,因此可减小对炉衬冲刷面积,减轻炉口结瘤,降低铁损。

(3)随着枪位的提高,漩流氧枪喷孔扭转角小于  $10^\circ$  时,喷溅速率及喷溅在径向空间的分布有极大值,喷溅量在高度空间上靠近液面处有极大值,远离液面处逐渐减小,扭转角增大到  $20^\circ$  时,喷溅在径向和高度空间分布均逐渐增加,而增大到  $30^\circ$  时,该分布规律相反。

(4)随顶吹气量的增大,漩流氧枪转炉吹炼时,喷溅速率以及不同径向及高度空间位置处喷溅量均增大。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Dogan N, Brooks G A, Rhamdhani M A. Comprehensive model of oxygen steelmaking Part 2: Application of bloated droplet theory for decarburization in emulsion zone[J]. ISIJ International, 2011, 51(7): 1093.
- [ 2 ] 杨文远,房忠良.转炉溅渣护炉的炉渣控制及炉衬侵蚀机理[J].钢铁研究学报,1999,11(5):11.(YANG Wen-yuan, FANG Zhong-liang, et al. Slag control and lining erosion mechanism for slag splashing in BOF [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999, 11(5): 11.)
- [ 3 ] Fabritius T M J, Luomala M J, Virtanen E O, et al. Effect of bottom nozzle arrangement on splashing and spitting in combined blowing converter[J]. ISIJ International, 2002, 42(8): 861.
- [ 4 ] 陈凯,王瑞芳,张波,等.氧枪射流对转炉内钢液喷溅行为的影响研究[J].冶金工程,2019,6(1):18.(CHEN Kai, WANG Rui-fang, ZHANG Bo, et al. Effect of jet flow of oxygen lance on the molten steel splashing in converter[J]. Metallurgical Engineering, 2019, 6(1): 18.)
- [ 5 ] Alam M, Irons G, Brooks G, et al. Inclined jetting and splashing in electric arc furnace steelmaking[J]. ISIJ International, 2011, 51(9): 1439.
- [ 6 ] 蔡俊,曾加庆,梁强.复吹转炉顶吹枪位与非均衡底吹搅拌的水模拟[J].中国冶金,2019,29(10):26.(CAI Jun,ZENG Jia-qing,LIANG Qiang. Water simulation of combined blowing converter for top lance level and non equilibrium bottom blowing stirring[J]. China Metallurgy, 2019, 29(10): 26.)
- [ 7 ] Sabah S, Brooks G. Splashing in oxygen steelmaking[J]. ISIJ International, 2014, 54(4): 836.
- [ 8 ] Sabah S, Brooks G. Splashing distribution in oxygen steelmaking [J]. Metallurgical and Material Transaction B, 2015, 46(2): 863.
- [ 9 ] 宁林新,解家英,张利君,等.100 t 复吹转炉底吹透气砖分布的数值模拟[J].中国冶金,2018,28(7):8.(NING Lin-xin, XIE Jia-ying,ZHANG Li-jun, et al. Numerical simulation of purging plug distribution of 100 t top-bottom combined blown converter[J]. China Metallurgy, 2018, 28(7): 8.)
- [10] Brooks G, Sabah S, Rout B, et al. Splash generation in oxygen steelmaking: What is known? [C]//AISTech. Nashville:[s. n.], 2017:1253.
- [11] 薛志,郭伟达,李强笃,等.高效节能型漩流氧枪喷头的设计与应用[J].炼钢,2019,35(2):11.(XUE Zhi, GUO Wei-da, LI Qiang-du, et al. Design and application of high efficiency and energy saving swirl oxygen lance nozzle[J]. Steelmaking, 2019, 35(2): 11.)
- [12] 周振宇,唐萍,周遵传,等.200 t 提钒复吹转炉氧枪喷头优化[J].钢铁,2019,54(9):50.(ZHOU Zhen-yu, TANG Ping, ZHOU Zun-chuan, et al. Optimization on nozzle parameters of 200 t combined blowing vanadium extraction converter[J]. Iron and Steel, 2019, 54(9): 50.)
- [13] 赵冲,陈威,张立峰.转炉顶吹过程多相流数值模拟[J].中国冶金,2018,28(s1):1.(ZHAO Chong, CHEN Wei, ZHANG Li-feng. Numerical simulation of multiphase flow in converter top blowing process[J]. China Metallurgy, 2018, 28(s1): 1.)
- [14] 于鹏飞,刘小亮,曾加庆,等.转炉底吹元件非均衡供气搅拌的冷态水模拟[J].钢铁,2018,53(6):39.(YU Peng-fei, LIU Xiao-liang, ZENG Jia-qing, et al. Water simulation on mixing of bottom blowing parts with non equilibrium gas supply in coverter[J]. Iron and Steel, 2018, 53(6): 39.)
- [15] 陈敏,廖广府,李光强,等.210 t 顶底复吹转炉水模型实验研究[J].过程工程学报,2011,11(1):36.(CHEN Min, LIAO Guang-fu, LI Guang-qiang, et al. Water model study on a 210 t top-bottom combined blown converter[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(1): 36.)