

## 260 t 转炉用五孔旋流氧枪的数值模拟

王 玺<sup>1</sup> 刘广强<sup>2</sup> 韩 鹏<sup>1</sup> 冯亮花<sup>1</sup> 刘 坤<sup>1</sup>

(辽宁科技大学 1 材料与冶金学院; 2 土木工程学院, 鞍山 114051)

**摘 要** 为克服传统氧枪在转炉炼钢工艺技术中的局限性, 利用数值模拟对不同结构的五孔旋流氧枪进行模拟研究, 分析了旋流氧枪的倾斜角 ( $13^\circ \sim 15^\circ$ )、旋流角 ( $0 \sim 15^\circ$ ) 对射流的衰减、聚并形态和冲击面积的影响。结果表明: 与普通氧枪相比, 旋流氧枪的射流速度较低, 但因存在切向力, 对熔池的搅拌能力更强; 倾斜角增大会导致射流径向的速度分量增大; 旋流氧枪由于旋流角的作用, 发生射流聚并的可能性降低; 倾斜角对射流的聚并有重要影响, 倾斜角减小, 射流聚并更加严重并且射流冲击面积会减小; 当倾斜角  $15^\circ$  并且旋流角为  $10^\circ$  时冲击面积最大。

**关键词** 旋流氧枪 数值模拟 射流衰减 聚并形态 冲击面积

## Numerical Simulation of Five-Hole Swirl Oxygen Lance for a 260 t Converter

Wang Xi<sup>1</sup>, Liu Guangqiang<sup>2</sup>, Han Peng<sup>1</sup>, Feng Lianghua<sup>1</sup> and Liu Kun<sup>1</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy; 2 School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051)

**Abstract** In order to overcome the limitation of traditional oxygen lance in converter steelmaking technology, the five-hole swirl oxygen lance with different structure parameters is simulated study by numerical simulation. The effects of the tilt angle ( $13^\circ \sim 15^\circ$ ) and swirl angle ( $0 \sim 15^\circ$ ) of swirl oxygen lance on jet attenuation, coalescence morphology and impact area are analyzed. The results show that the jet velocity of the swirl lance are lower than that of the ordinary lance, but the stirring capacity to the molten pool is stronger because of the tangential force; the increase of the inclination angle will increase the radial velocity component of the jet; the possibility of jet coalescence will be reduced because of the effect of the swirl angle. The tilt angle has an important effect on the jet coalescence, with the decrease of tilt angle, the coalescence of jet is more serious, and the impact area of jet decreases. When the inclination angle is  $15^\circ$  and the swirl angle is  $10^\circ$ , the impact area is largest.

**Material Index** Swirl Oxygen Lance, Numerical Simulation, Jet Attenuation, Coalescence Morphology, Impact Area

前苏联叶那基耶沃钢厂首先用旋流氧枪喷头进行转炉炼钢的实验证明, 存在合适旋流角能提供最佳的冶金效果<sup>[1]</sup>。旋流氧枪可以很好降低喷溅<sup>[2]</sup>。国内早期安钢和酒钢都对旋流氧枪做了工业实验研究, 得出旋流喷头具有化渣快、冶炼效果好的优点<sup>[3-4]</sup>。旋流氧枪喷头可提高炉帽部位溅渣密度, 有利于延长炉衬寿命<sup>[5]</sup>。图 1 为普通氧枪喷头和旋流氧枪喷头的示意图。普通氧枪喷头的特点是喷孔中心线与喷头中心轴线共面且相交, 而旋流氧枪喷头的喷孔中心线和喷头中心轴线既不共面也不相交。 $\alpha$  为普通氧枪喷孔中心线与喷头中心轴线的夹角, 设为倾斜角;  $\beta$  为普通氧枪喷孔中心线与旋流氧枪喷孔中心线的夹角, 设为旋流角。然而, 旋流氧枪目前仍然没有实现大范围的工业

应用, 究其原因在于对旋流氧枪的吹炼特性认识不足, 尤其是结构参数中倾斜角和旋流角耦合作用对射流特性的影响, 因此有必要对其进行更深入研究。

### 1 数学模型求解方法

#### 1.1 假设

为了建立该模型的输运方程, 做了如下假设:

(1) 氧气被认为是一种牛顿流体和可压缩气体; (2)

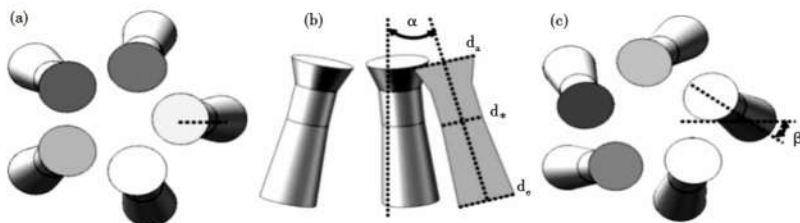


图 1 普通氧枪喷头(a-b)和旋流氧枪喷头(c)的结构图

Fig. 1 Structure diagram of ordinary oxygen lance nozzle (a-b) and swirl oxygen lance nozzle (c)

流动是三维的、稳定的、非等温的;(3)根据动力学理论,氧分子的粘度取决于温度。

### 1.2 控制方程

在此模型中,基于上述假设,质量、动量和能量的运动方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j c_p T)}{\partial x_j} = u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + k_{\text{eff}} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

式中: $\rho$ -氧密度, $\rho = p/RT$ ;  $u_i, u_j$ -  $i$  和  $j$  方向的速度;  $p$ -压力;  $k_{\text{eff}}$ -有效导热系数;  $T$ -射流温度;  $\sigma_{ij}$ -粘滞应力张量。

$$\sigma_{ij} = \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

### 1.3 湍流模型

本文使用标准的  $k-\omega$  湍流模型代替  $k-\varepsilon$  湍流模型。该模型中湍流动能  $k$  和比耗散速率  $\omega$  的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta_1 \rho k \omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_2 \rho k \omega^2 \quad (6)$$

式中: $\tau_{ij}$ -雷诺兹压力张量,  $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ ,  $\mu_t = \rho k / \omega$ ,  $\sigma_k = 2.0$ ,  $\sigma_\omega = 2.0$ 。

假设气体射流进入一个半径为 3 m, 高 2.6 m 的圆柱形空间内,对其空间内的射流特性进行模拟。在保证计算精度的基础上缩短模拟时间,选取模型的 1/5 进行计算,划分六面体网格共计约 150 万,计算域及拉瓦尔喷管几何参数和边界条件设置为表 1。整个模拟的边界条件设置为入口为压力进口,出口为压力出口,管壁设为壁面,侧面采用周期性边界条件,壁面设为无滑移壁面。计算利用基于压力的求解器,压力速度耦合使用 SIMPLE 格式,湍动能和湍流耗散率的离散使用二阶迎风格式,当能量残差小于  $10^{-6}$ ,其他变量残差小于  $10^{-3}$  时认为计算收敛。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型验证

通过前期模拟结果与著名半经验公式<sup>[6]</sup>进行比较:

表 1 喷头的几何参数和边界条件

Table 1 Boundary conditions and geometric parameters of nozzle

几何参数	喷孔喉口直径( $d_a$ ) /mm	45.7
	喷孔出口直径( $d_e$ ) /mm	61.1
	喷孔数量( $N$ )	5
	喷孔倾斜角度( $\alpha$ ) /°	13, 14, 15
	喷孔旋流角度( $\beta$ ) /°	0, 5, 8, 10, 12, 15
	马赫数(Ma)	2.07
边界条件	进口压力( $P_0$ ) /MPa	0.97
	进口温度( $T_0$ ) /K	300
	环境温度( $T_b$ ) /K	300
	环境压力( $P_b$ ) /MPa	0.104
	枪位( $H$ ) /m	1.2 ~ 2.6

$$\frac{u_m}{u_e} = A \left( \frac{\rho_e}{\rho_a} \right)^{1/2} \frac{d_e}{H} \quad (7)$$

式中: $u_m, u_e$ -轴间距离  $H$  处射流轴线速度和喷管出口射流轴线速度;  $d_e, H$ -喷孔出口直径和枪位;  $\rho_e, \rho_a$ -喷管出口射流密度和环境气体密度;  $A$ -常数,一般取 5.13 ~ 7.7<sup>[7-11]</sup>。对所模拟的单个射流的无量纲轴向速度与无量纲轴向距离进行拟合,结果满足线性关系且  $A = 5.2$ ,模拟结果与公式吻合较好,验证了数值模型的准确性。

### 2.2 射流轴向速度分布规律

图 2(a) 表示了倾斜角  $\alpha$  为 15° 的普通氧枪和旋流氧枪的射流速度在枪位为 25  $d_e$  ~ 40  $d_e$  的变化情况,可以看出普通氧枪和旋流氧枪在射流轴线上速度分布趋势大致相同,都是随轴向距离的增加逐渐减少。这是因为气体的势能通过氧枪喷头转变为射流动能,高速气流从喷头喷出后,由于射流与周围环境介质之间存在动量传递和能量交换,射流的动能持续衰减,表现为射流在射流中心轴线上的速度持续下降。从图 2(a) 还可以看出射流在射流轴线上的速度在相同枪位下随旋流角的增加而下降。这是由于旋流氧枪相比于普通氧枪多了旋流角,造成射流从喷口喷出后到到达相同枪位所走过的路程大于普通氧枪,在这个过程中射流消耗更多的能量,导致射流的速度进一步降低,且旋流角越大,射流消耗的能量越多,速度下降的幅度越明显。图 2(b) 为旋流角  $\beta$  为 10° 时不同倾斜角下氧枪射流轴线的速度分布,可以发现高枪位下倾斜角对射流中心线上的速度影响较小,在低枪位时倾斜角越小速度越大。

图 3 表示射流径向和切向速度在 25  $d_e$  ~ 40  $d_e$  下的分布情况,可以发现,射流的径向和切向速度都表现出随距喷头出口距离增加而下降的趋势。普通氧枪射流在冲击熔池的过程中,射流速度可分解成轴向速度和径向速度。轴向速度主要用于冲击坑的

形成及熔池搅拌, 径向速度则会促进液滴从溶液表面脱离, 造成转炉生产过程金属液发生喷溅<sup>[12]</sup>。旋流氧枪因旋流角的缘故, 除了轴向和径向上的速度外, 还存在切向方向上的速度。切向速度会使熔池产生水平旋转的运动, 加强熔池的搅拌, 促进化渣和强化冶金反应。从图 3 中还可以看出, 旋流氧枪相比于普通氧枪会有较大的径向速度和切向速度, 这

种差异会随旋流角的增大进一步加大。因此, 在设计旋流氧枪的过程中, 要根据转炉实际的生产状况, 合理确定旋流角的大小。从图 4(a) 可以看出随倾斜角的增大, 射流的径向速度会增大, 这是因为随倾斜角的增大会在径向方向上给予更多的速度分量, 相应的径向速度会增大。图 4(b) 表示随倾斜角的增大, 射流切向方向上的速度变化很小。

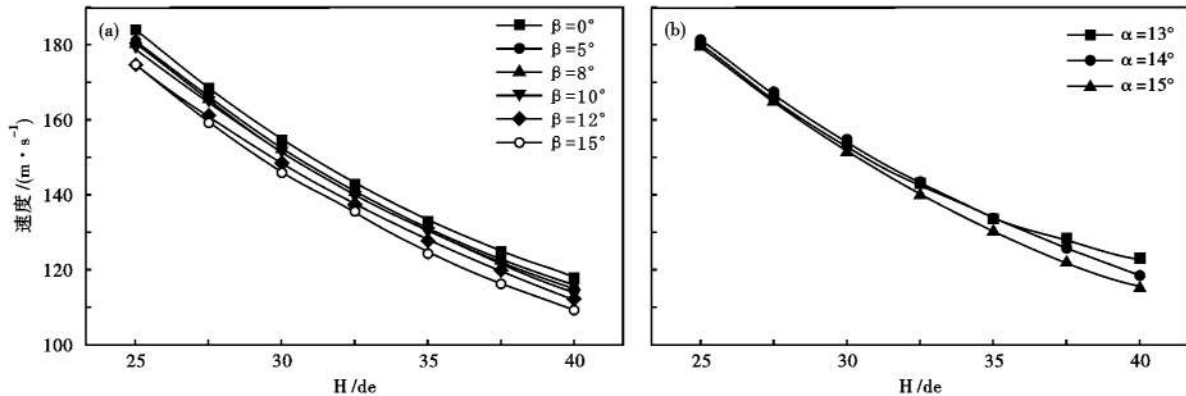


图 2 不同旋流角(a)和倾斜角(b)下射流速度分布  
Fig. 2 Jet velocity distribution with different swirl angle(a) and inclined angle(b)

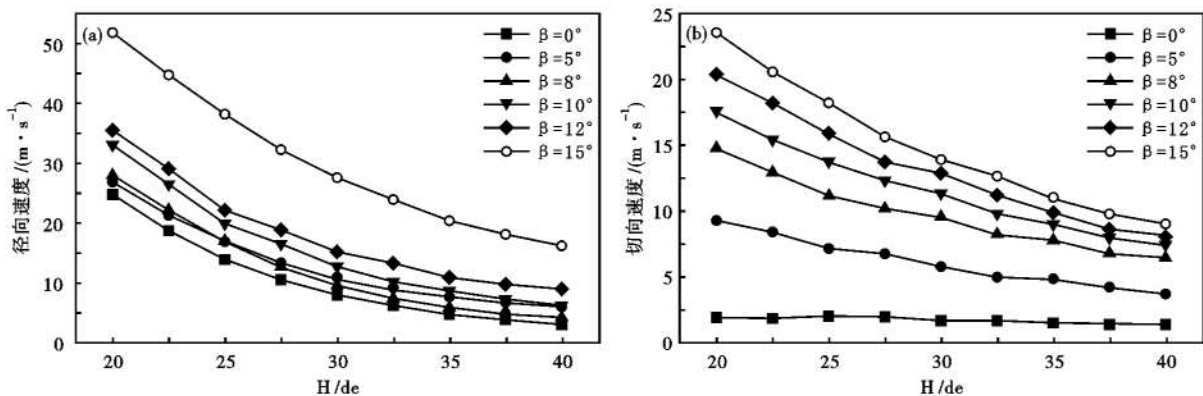


图 3 旋流角对射流径向速度(a)和切向速度(b)分布的影响  
Fig. 3 Effect of swirl angle on radial (a) and tangential (b) velocity distribution of jet

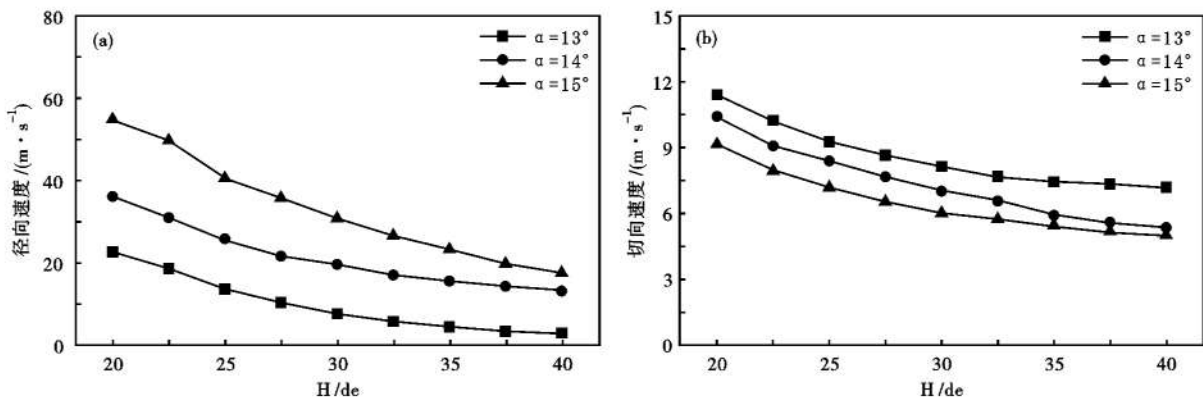


图 4 倾斜角对射流径向速度(a)和切向速度(b)分布的影响  
Fig. 4 Effect of inclination angle on radial (a) and tangential (b) velocity distribution of jet

### 2.3 射流聚并

氧气从氧枪喷口喷出后,各股射流保持着独立的射流特性,但由于射流在运行过程中与周围环境气体发生掺混,射流流股变大,各股射流之间出现边界相交的情况,射流独立的特性逐渐消失并偏离喷孔轴向方向,表现为向氧枪中心轴线方向聚合,这被称为射流的聚并现象。当各股射流聚成单股射流时,射流冲击熔池液面时的冲击强度会明显增加,发生熔池喷溅的概率也会增加。图 5 表示的是倾斜角  $\alpha$  为  $15^\circ$ ,旋流角  $\beta$  为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  时以  $100\text{ m/s}$  速度等值面所包围的射流在整个流场中的分布,可以看出氧气射流从氧枪喷头喷出

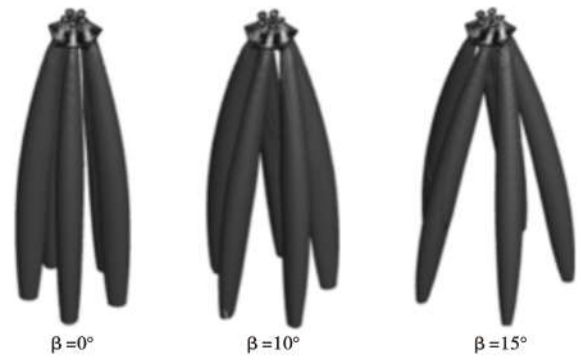


图 5  $100\text{ m/s}$  速度时不同旋流角氧枪射流在流场中的分布  
Fig. 5 Distribution of oxygen lance jet with different swirl angle in the flow field at  $100\text{ m/s}$  velocity

后,表现出各股射流向中间汇聚的趋势;随旋流角的增大,在相同枪位时各股射流之间的距离也在增大,射流之间的相互作用减弱,射流发生聚并的可能性降低,这说明旋流氧枪相比于普通氧枪更多是以分散的射流形态冲击熔池液面,金属液发生喷溅的可能性也会显著降低。产生这种现象的原因可以由图 6(a) 解释,旋流氧枪射流相比于普通氧枪射流具有更大径向速度,这会使得射流在相同枪位时在水平方向上走过更长的路程,射流中心距离氧枪喷头中心轴线更远,射流相互之间的距离更大。图 6(b) 表示的是在旋流角  $\beta$  为  $10^\circ$  时倾斜角的改变对射流中心与氧枪喷头轴线距离的影响,从中可以看出随倾斜角的减小,两者之间距离也在减小,各股射流之间的距离较近,发生射流聚并的可能性增加。

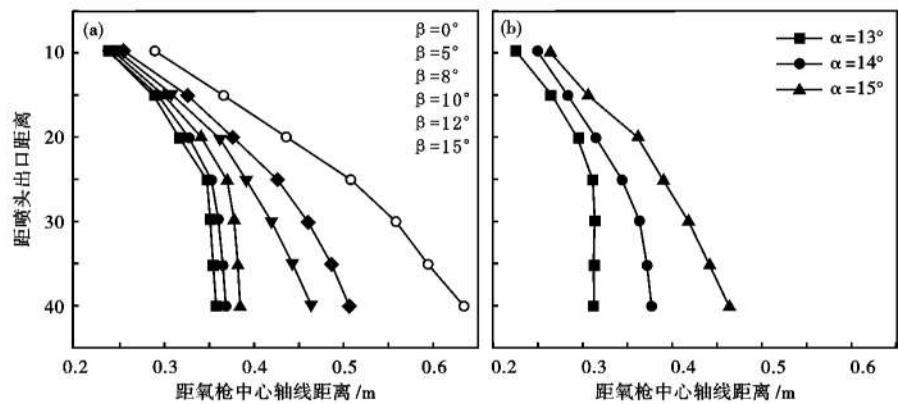


图 6 不同旋流角(a)和倾斜角(b)氧枪射流轨迹图  
Fig. 6 Jet trajectory of oxygen lance with different swirl angle (a) and inclination angle (b)

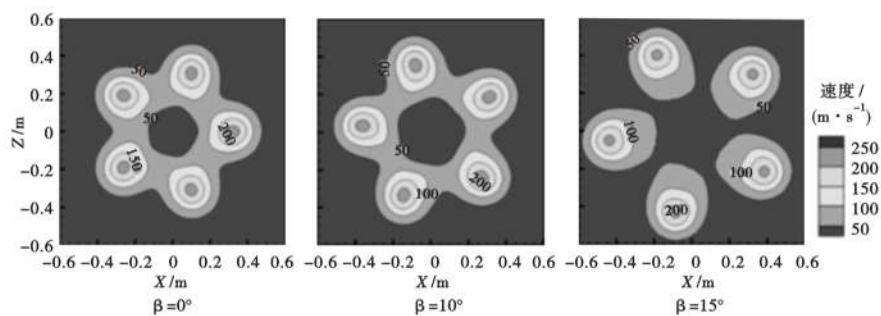


图 7 不同旋流角氧枪射流在  $H = 20 d_e$  处的射流速度分布  
Fig. 7 Jet velocity distribution of oxygen lance with different swirl angle at  $H = 20 d_e$

### 2.4 冲击面积

从图 7 中可以看出,普通喷头和旋流喷头射流在流场中表现出不同的分布特性,普通喷头在 XZ 平面上不会发生转动,旋流喷头的射流会沿逆时针发生旋转,且旋流角越大,旋转的越大。旋流氧枪与普通氧枪相比射流在运行过程中倾向于分离,同时旋流氧枪由于射流发生旋转,在相同枪位走过的路程更长,卷吸更多的周围环境气体,中心线上的速度下降,射流的流股直径增大,射流流股距离氧枪中心

轴线更远。在冶炼过程中,冲击面积通常定义为氧气射流与熔池接触时的流股截面积,较大的冲击面积意味着氧气与熔池的反应面积越大,加快熔池内反应速率,有助于吹炼初期的化渣和脱磷反应的发生。为了具体确定不同氧枪在  $H = 20 d_e$  下的冲击面积,将冲击面积定义为以速度  $50\text{ m/s}$  的等速线所围成的射流横截面积。图 8 展示了不同氧枪在  $H = 20 d_e$  下的射流的冲击面积随旋流角的增大的变化情况。可以看到射流对熔池的冲击面积在旋流角为

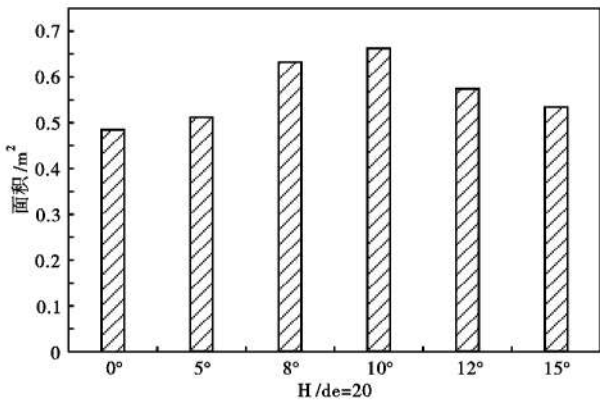


图 8 氧枪旋流角对  $H=20 d_0$  处冲击面积的影响

Fig. 8 Effect of oxygen lance swirl angle on impact area at  $H=20 d_0$ .

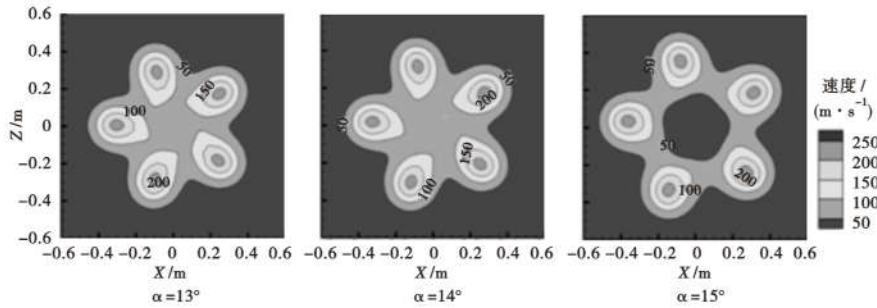


图 9 不同倾斜角氧枪射流在  $H=20 d_0$  处的射流速度分布

Fig. 9 Jet velocity distribution of oxygen lance with different inclination angles at  $H=20 d_0$ .

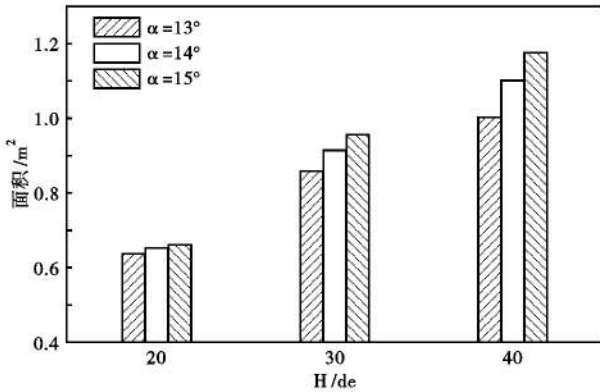


图 10 氧枪倾斜角对不同截面的冲击面积的影响

Fig. 10 Effect of oxygen lance inclined angle on impact area at different sections

10°时达到最大。

从图 9 中可以看到随倾斜角的增大,各股射流之间的距离增大,射流之间的相互作用减弱,射流逐渐由聚合的流股转变为各自独立的流股,射流中心与氧枪中心轴线的距离增加而且流股直径也在增大,这表明倾角大的氧枪对熔池的冲击面积也比较大。图 10 也说明了这一点,在不同的枪位下随倾斜

角的增大,射流对熔池的冲击面积也相应增大。

### 3 结论

(1)与普通氧枪相比,旋流氧枪射流的速度较低,但因存在切向力,对熔池的搅拌能力更强;倾斜角增大会导致射流径向的速度分量增大。

(2)旋流氧枪由于旋流角的作用,发生射流聚并的可能性降低;倾斜角对射流的聚并有重要影响,倾斜角减小,射流聚并会更加严重。

(3)倾斜角增大,射流的冲击面积也会相应增大。倾斜角 15°并且旋流角为 10°时冲击面积最大。

辽宁省教育厅项目(2020LNQN12,2020LNJC03),国家重点研发计划项目(2017YFC0805100)

### 参考文献

[1] 袁章福,潘贻芳. 炼钢氧枪技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.

[2] Higuchi Y, Tago Y. Effect of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process[J]. ISIJ International, 2003, 43(9):1410-1414.

[3] 顾克井,田勇,朱德生,等. Φ168 旋流氧枪喷头在转炉炼钢中的应用[J]. 钢铁研究,1998,26(2):7-8.

[4] 杜永远,程官江,殷春玺,等. 三孔旋流氧枪射流特性及其冶金效果实践[J]. 河南冶金,2002,10(3):31-32.

[5] 钟良才,朱英雄,姜永林,等. 旋流氧枪喷头对转炉溅渣护炉效果的影响[J]. 炼钢,2000,16(6):45-48.

[6] Laufer J. On Turbulent Shear Flows of Variable Density[M]. California: Rand Corp, 1968.

[7] Banks R B, Chandrasekhara D V. Experimental Investigation of the Penetration of a High-Velocity Gas Jet Through a Liquid Surface[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1963, 15(1):13-34.

[8] Cheslak F R, Nicholls, J A and Sichel M. Cavities Formed on Liquid Surfaces by Impinging Gaseous Jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 36(1):55-63.

[9] 蔡志鹏,谢裕生,夏安武. 氧气炼钢过程中射流对熔池的作用[J]. 钢铁,1980,15(1):15-19.

[10] Qian F, Mutharasan R and Farouk B. Studies of Interface Deformations in Single and Multi-Layered Liquid Baths Due to an Impinging Gas Jet[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, 27(12):911-920.

[11] Asahara N, Naito K I and Kitagawa I, et al. Fundamental Study on Interaction Between Top Blown Jet and Liquid Bath[J]. Steel Research International, 2011, 82(5):587-594.

[12] 袁章福,徐安军,顾克井. 旋流喷头参数的确定及其应用研究[J]. 炼钢,1998,14(5):37-41.

王玺(1995-),男,硕士,2018年辽宁科技大学(本科)毕业,氧枪数值模拟。E-mail:Wangxi950725@sina.com

收稿日期:2020-07-31