

260 t 转炉用双角度六孔氧枪的射流特性研究

孙梦丽¹, 刘广强², 李艺璇¹, 韩鹏¹

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

摘要:通过 CFD 数值模拟研究了 260 t 转炉用双角度氧枪的倾角变化对射流偏移程度和融合距离的影响, 比较了双角度六孔氧枪在喷孔倾角 12°-15°~14°-17° 下的射流特性, 明确了双角度氧枪的射流偏移系数 A。研究结果表明:对于双角度六孔氧枪的两股不同射流, 倾角越大, 射流偏移程度和融合距离越大;与射流偏移程度相比, 喷孔倾角对融合距离的影响占主导地位;一组倾角相同时, 另外一组倾角越大, 融合距离越大, 偏移程度越小, 聚并现象发生得越晚, 射流偏移系数 A 的变化范围在 $(3.38 \sim 4.12) \times 10^{-3}$ 。

关键词:260 t 转炉; 双角度氧枪; 融合距离; 径向距离; 射流偏移系数

Jet Characteristics of Double-Angle Six Hole Oxygen Lance for 260 t BOF

Sun Mengli¹, Liu Guangqiang², Li Yixuan¹, Han Peng¹

(1 School of materials and metallurgy, University of science and technology Liaoning, Anshan 114051

2 School of civil Engineering of Liaoning University of science and technology, Anshan 114051)

Abstract: The influence of the inclination change of double-angle oxygen lance for 260 t BOF on the jet offset degree and fusion distance is studied through CFD numerical simulation. The jet characteristics of the double-angle six hole oxygen lance with 12°-15° to 14°-17° nozzle inclination are compared, and the jet offset coefficient A of the double-angle oxygen lance is defined. The results show that for two jets with different inclination angles of the double-angle six hole oxygen lance, the greater the inclination angle of the jet, the larger the offset degree and fusion distance of the jet. Compared with the jet offset degree, the influence of jet hole inclination on the fusion distance is dominant. When one group has the same inclination angle, the larger the inclination angle of the other group, the greater the fusion distance, the smaller the migration degree, and the later the coalescence phenomenon occurs. The variation range of jet offset coefficient A is $(3.38 \sim 4.12) \times 10^{-3}$.

Key Words: 260 t BOF; Double-angle Oxygen Lance; Fusion Distance; Radial Distance; Jet Offset Coefficient

氧枪喷头的主要作用是通过拉法尔管加速氧气, 让氧气获得理想的出口速度, 氧气出口速度在很大程度上决定了射流品质。出口速度过大, 会造成过量的钢液和炉渣喷溅, 不仅容易降低氧枪喷头寿命, 还会造成热量损失; 速度过小, 射流冲击强度不够, 无法充分的搅拌熔池^[1-2]。氧枪喷头的设计研发随着高效冶炼的需求愈发新颖, 国内外科研人员在过去几年对聚合射流氧枪喷头^[3]、双结构氧枪喷头^[4-6]以及旋流氧枪喷头等^[7-8]的射流特性及与熔池作用进行了大量研究, 相关结果表明: 与传统氧枪相比聚合射流氧枪对熔池的冲击深度更深、双结构氧枪喷头的混匀时间更短、旋流氧枪喷头对熔池的

搅拌力更强。国外 TATA 钢铁公司生产并使用了一种新型氧枪, 由六个中心距相同并与氧枪中线存在一定夹角的超声速氧枪喷头及位于氧枪中线处的一个亚音速喷头构成的七孔氧枪喷头, 通过调节中心喷头的流量, 既能最大化控制液滴的产生, 又能防止喷溅^[9]。

作为一种新型氧枪喷头, 双角度氧枪区别于传统结构氧枪的特征在于其喷头喷孔由倾角不同的两组喷孔交错组成, 日本和歌山钢厂首先对这种类型喷头进行了研究, 并应用于工业实践, 国内武钢和宝钢也先后对双角度氧枪进行了工业应用, 取得了良好的吹炼效果, 然而目前双角度氧枪还没有得到大范

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB3702000), 大学生创新创业训练项目-中型转炉六孔氧枪喷头射流特性研究

作者简介: 孙梦丽(2000-), 女, 本科; E-mail: 1846278695@qq.com; 收稿日期: 2022-08-26

通讯作者: 刘广强(1987-), 男, 博士, 副教授; E-mail: lgqiang0305@sina.com

围推广^[10-12],究其原因在于对双角度氧枪的研究还不够全面深入,因此,进一步深入分析双角度氧枪的射流特性,对于其大范围的工业应用具有重要意义。

1 研究方法

1.1 研究模型

假设氧枪喷头中的气体为氧气并且为理想可压缩气体;流动过程为三维可压缩非等温流动;喷管内壁光滑无摩擦。采用 CFD 数值模拟分析射流特征,模拟遵循质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律,此外还符合气体状态方程,其数学表述如下:

连续性方程

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

动量守恒方程

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

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

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_\tau \quad (4)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_j C_p T)}{\partial x_j} = u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \lambda_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (5)$$

气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (6)$$

式(1~6)中: ρ 为流体密度,kg/m³; u_i 和 u_j 表示 i 和 j 方向上的速度,m/s; p 为静压,Pa; τ_{ij} 为粘性应力,Pa; μ_{eff} 为有效动力粘度,Pa·s; δ_{ij} 表示克罗内克函数; μ 为分子粘度,Pa·s; μ_τ 为湍流粘度 Pa·s; C_p 为比热容,J/kg·K; T 为热力学温度,K; λ_{eff} 为有效导热系数,W/m·K; R 为气体常数。

结合前人在湍流模型上的研究,标准 $k-\varepsilon$ 模型

模拟结果与实际吻合更好,另外 $k-\varepsilon$ 模型相较于 $k-\omega$ 模型更稳定、精度更高,因此,本文选择标准 $k-\varepsilon$ 模型,具体方程如下所示。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\alpha_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M - S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\alpha_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (8)$$

$$\mu = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

式(7~9)中: k 为湍动能, ε 为湍动能耗散率; G_k 为平均速度梯度造成的 k 的产生项; G_b 为浮力造成的 k 的产生项; Y_M 为可压缩湍流中脉动膨胀的贡献; σ_k 为 k 对应的普朗特数; σ_ε 为 ε 对应的普朗特数; S_k 和 S_ε 为用户定义的源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 和 C_μ 为经验常数,一般取默认值。

1.2 氧枪喷头尺寸及方案

以 260 t 转炉双角度六孔氧枪为对象,分析喷头倾角的变化对其射流特性的影响。共设计 6 套方案,其中喷头出口直径为 $De = 58.6$ mm,喉部直径为 $Dt = 44$ mm,轴心距 $L = 110$ mm,根据不同倾角的变化,设计具体参数见表 1。

使用 SolidWorks 建立几何模型,以 12°-15°为例,将模型导入 ICEM 中,采用结构化网格进行划分并对网格加密,网格数量 340 万,网格质量 0.75 以上,具体如图 1(a)所示。氧枪喷头入口处设为压力

表 1 260 t 转炉氧枪喷头参数

Table 1 Parameters of oxygen lance nozzle for 260 t BOF						
双角度氧枪方案	a	b	c	d	e	f
角度/°	12-15	12-16	12-17	13-16	13-17	14-17

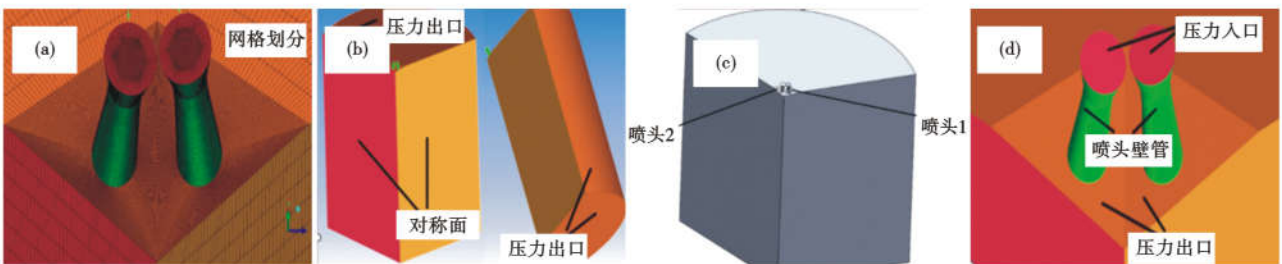


图 1 双角度氧枪物理模型和网格划分

Fig. 1 Physical model and mesh generation of double-angle oxygen lance

表 2 氧枪喷头边界条件

Table 2 Boundary conditions of oxygen lance nozzle

区域	边界条件	压力/MPa	温度/K
氧气入口	压力入口	0.9	298
射流场空间边界	压力出口	0.104	-
氧枪喷头侧面	外壁面	-	-
射流场空间对称面	对称面	-	-

入口,其他面设为压力出口,壁面设置为无滑移壁面,如图 1(b)、图 1(d)所示,边界条件设置具体见表 2。

2 结果分析与讨论

2.1 聚并现象

图 2 示出了 6 支双角度氧枪的射流流股图,可以看出,对于任意两个方案,当小倾角相同时,大倾角越大,射流流股的聚并现象越不容易发生,各流股越独立,如方案 a/12°-15°和方案 b/12°-16°;当大角度相同时,小角度越大,流股独立性也越好,如方案 b/12°-16°和方案 d/13°-16°。分析原因在于 6 个设计方案的氧枪喷头流量是一致的,因此,六个方案各股射流的冲击强度基本相等,任意两方案进行比较时,喷孔倾角越大,两股射流间距离就越远,流股间相互卷吸强度越弱,即干扰性越差,所以聚并现象发生得就越晚。

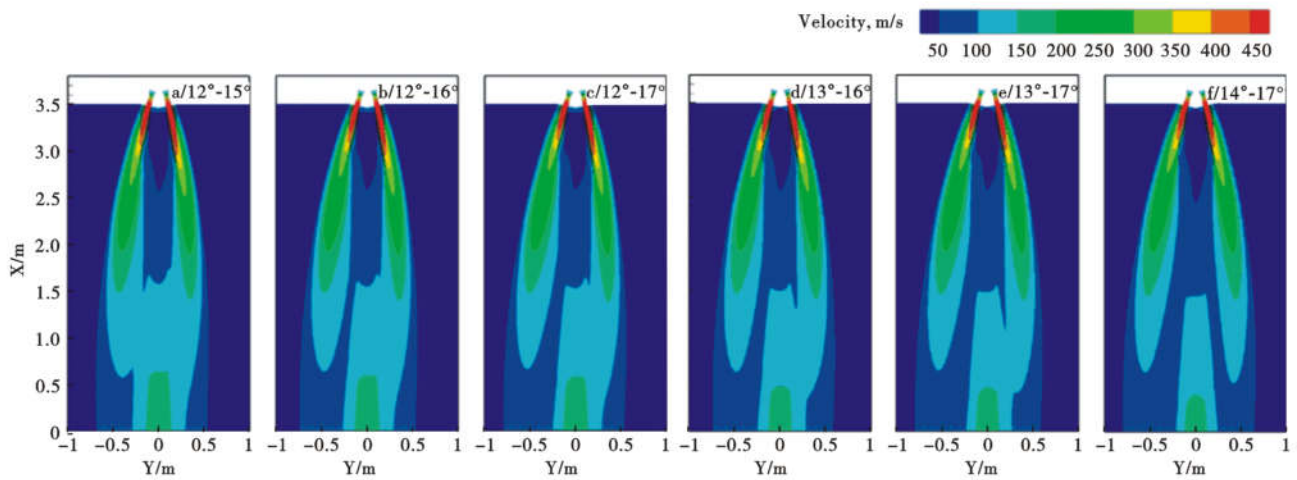


图 2 双角度六孔氧枪的射流流股图

Fig. 2 Jet stream diagram of double-angle six hole oxygen lance

2.2 偏转临界枪位

根据相关文献介绍,伴随射流聚并现象的发生,各股射流中心线逐渐偏移喷头中心线并与氧枪枪身中心线平行,定义此时对应的枪位为偏转临界枪

位^[1],射流喷嘴与该点位置的垂直距离为融合距离 Hom。对于双角度六孔氧枪,结合数值模拟结果,可以发现:同一氧枪喷头的不同倾角会形成两个不同的偏转临界枪位,六个方案的射流偏转临界枪位同

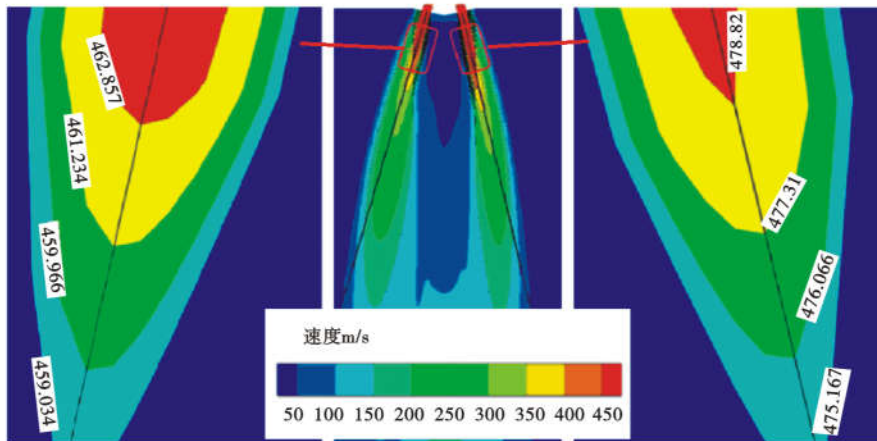


图 3 偏转临界枪位图

Fig. 3 Deflection critical lance bitmap

样随角度的变化均在 0.24 ~ 0.3 m 范围内。以方案 a/12°-15° 为例,同一氧枪的两股不同射流,角度为 12° 的射流偏转临界枪位为 4.67De、角度为 15° 的射流偏转临界枪位为 4.62De,如图 3 所示。

表 3 总结了 6 个方案的偏转临界枪位,结果发

现:偏转临界枪位与倾角之间没有形成明确的变化规律,分析原因在于:偏转临界枪位一方面受流股自身倾斜角度的影响,而另一方面,两流股之间的协同干扰同样对偏转临界枪位产生一定影响。

2.3 径向距离

表 3 双角度氧枪喷头的偏转临界枪位/mm

Table 3 Deflection critical position of double angle constant flow oxygen lance nozzle/mm

方案	a/12°-15°	b/12°-16°	c/12°-17°	d/13°-16°	e/13°-17°	f/14°-17°
小角度 θ_1	4.67 De	5.01 De	4.79 De	4.64 De	4.83 De	4.98 De
大角度 θ_2	4.62 De	4.88 De	4.72 De	4.73 De	5.11 De	4.60 De

径向距离是分析射流特性的另一个重要物理量,定义射流发生聚并时,射流中心线与氧枪中心线的水平距离为径向距离。径向距离是定量分析射流偏移量的关键参数,图 4 和图 5 分别给出了六个方案的射流中心线的径向距离图和射流中心线水平速度随枪位的变化图。

对比图 4 和图 5,可以发现:射流中心线的径向速度为零时,对应点所在枪位均在径向距离最大值枪位范围内,这说明射流中心线水平速度为零的点

对应的枪位即为融合距离。从图 4(a) 中可以发现,设计方案 a、b、c 的小角度射流中心线轨迹几乎相同;而方案 d、e 的小角度射流中心线轨迹也几乎相同,这说明五支氧枪的大角度变化对小角度射流中心线轨迹影响不大。从图 4(b) 中可以发现,当小角度相同时,大角度越大,大角度射流的径向距离越大。另外从图 4 中还可以看出,c/12°-17°、e/13°-17°、f/14°-17°、b/12°-16°、d/13°-16° 五组氧枪的小角度变化对大角度射流中心线轨迹有一定影响,当

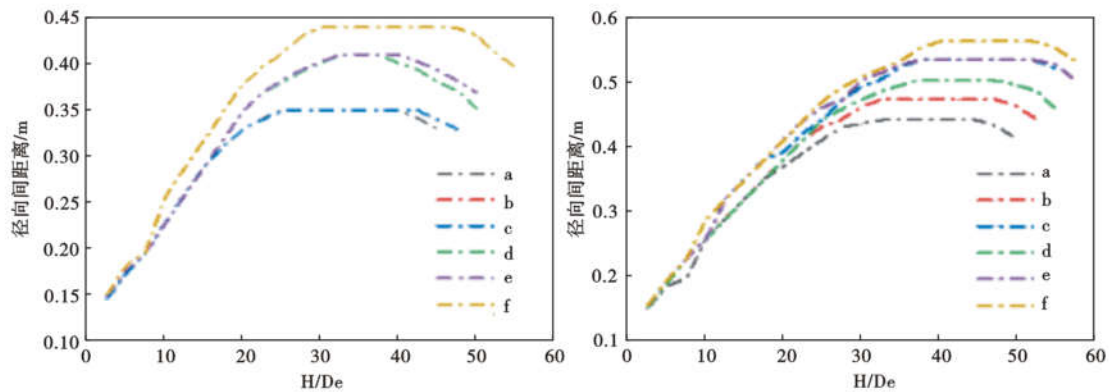


图 4 射流中心线径向距离图:(a)小角度射流;(b)大角度射流

Fig. 4 Radial distance diagram of jet center line: (a) jet with small angle; (b) jet with large angle

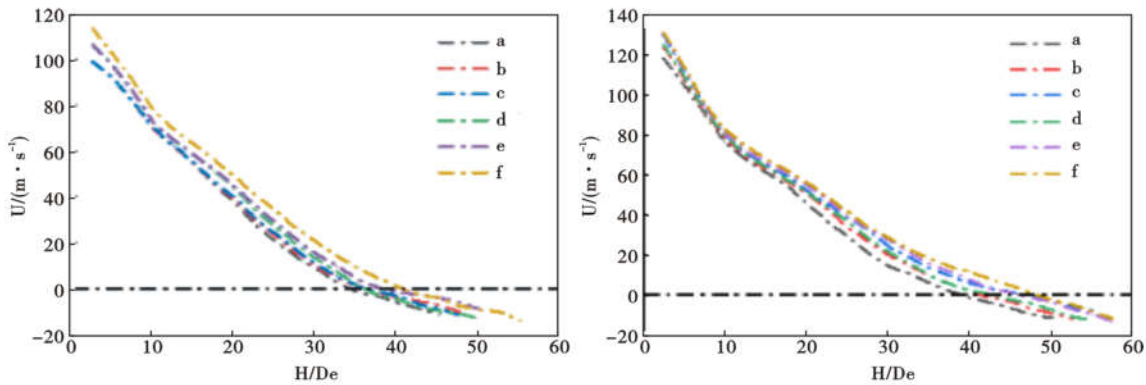


图 5 射流中心线水平速度图:(a)小角度射流;(b)大角度射流

Fig. 5 Horizontal velocity diagram of jet center line: (a) jet with small angle; (b) jet with large angle

大角度相同时,小角度越大,大角度射流的径向距离越大,小角度射流的径向距离也越大。

从上述现象中能够发现:大角度对小角度的射流中心线轨迹影响不大,虽然小角度对大角度射流中心线轨迹有些许影响,但影响径向距离的主要因素还是自身角度的大小。另外对于同一型号氧枪,尽管流量是均等的,但对比大角度与小角度的射流中心线轨迹图能够发现:大角度的射流径向距离明显高于小角度的射流径向距离。根据以上分析可以

得到结论:对于双角度等流量六孔氧枪,角度越大,射流中心线的径向距离越大。

表4统计了与之对应的不同射流的融合距离。从表4中可以看出,小角度相同时,随着大角度的增大,小角度及大角度射流的融合距离都呈现出增大的趋势;当大角度相同时,随着小角度的增大,大角度及小角度射流的融合距离也都呈现出增大的趋势。这说明对于双角度六孔氧枪,具有融合距离随角度的增大而增大的特点。

表4 双角度等流量氧枪的融合距离
Table 4 Fusion distance of double angle constant flow oxygen lance

方案	a/12°-15°	b/12°-16°	c/12°-17°	d/13°-16°	e/13°-17°	f/14°-17°
小角度 θ ₁	32.5	35	35	35	37.5	40
大角度 θ ₂	37.5	40	45	42.5	45	47.5

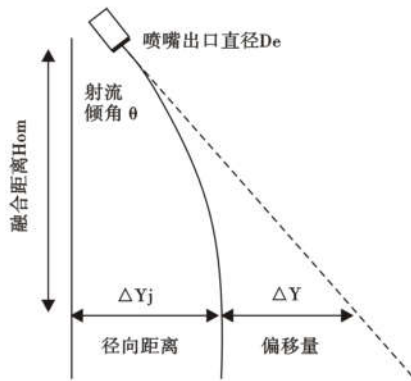


图6 氧枪射流参数示意图

Fig.6 Schematic diagram of jet parameters of oxygen lance

$$\frac{\Delta Y}{De} = A \left(H - Hom + \frac{\tan\theta}{2A} \right)^2 \quad (10)$$

因此,射流偏移系数 A 的确定是预测双角度氧枪射流特性的关键。图6示出了各射流参数的示意图。

基于不同枪位,结合模拟结果对式(10)进行拟合,分别计算射流偏移系数 A,以 12°-15°方案为例,拟合结果如图7所示,可以发现:在研究的枪位范围内整体拟合效果良好,小角度和大角度的射流 R2 分别为0.954 28 和0.969 01。统计5个方案的具体拟合数据,见表5和表6。

2.4 射流偏移系数

根据相关文献[1],融合距离 Hom,枪位 H,偏移量 ΔY,射流倾角 θ 以及射流偏移系数 A 的关系表达式如式(10)所示:

可以发现:当小角度相同时,大角度越大(例如 a/12°-15°、b/12°-16°、c/12°-17°; d/13°-16°、e/13°-17°),小角度射流流股的偏移程度越小,融合距离越大,同时大角度射流的偏移程度也越小,融合距离也

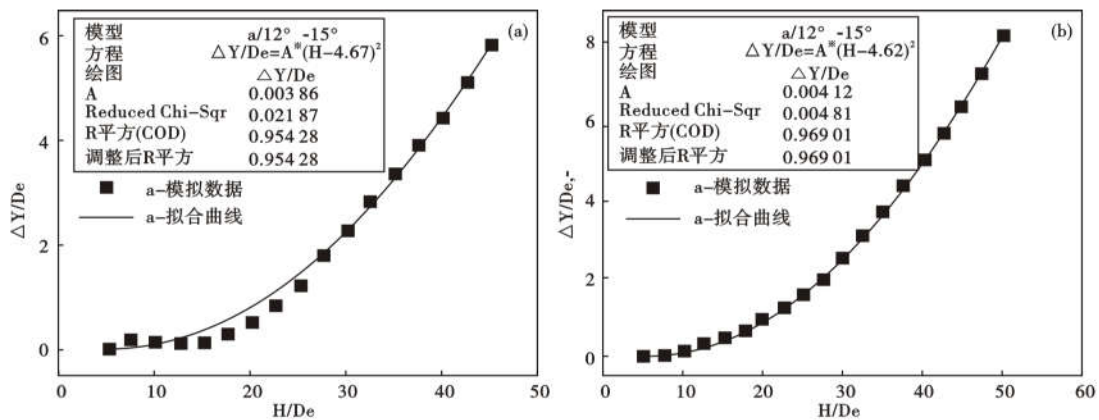


图7 氧枪射流偏移程度系数拟合结果:(a)小角度(b)大角度

Fig.7 Fitting results of offset coefficient of oxygen lance with:(a) Small angle and (b) large angle

表 5 氧枪小角度射流偏移程度系数拟合结果
Table 5 Fitting results of offset coefficient of small angle jet of oxygen lance

模型	方程	A	R 平方	调整后 R 平方
a/12°-15°	$\Delta Y/De = A(H-4.67)^2$	0.003 86	0.954 28	0.954 28
b/12°-16°	$\Delta Y/De = A(H-5.01)^2$	0.003 57	0.955 56	0.955 56
c/12°-17°	$\Delta Y/De = A(H-4.79)^2$	0.003 54	0.945 56	0.945 56
d/13°-16°	$\Delta Y/De = A(H-4.64)^2$	0.003 53	0.952 49	0.952 49
e/13°-17°	$\Delta Y/De = A(H-4.83)^2$	0.003 43	0.943 92	0.943 92
f/14°-17°	$\Delta Y/De = A(H-4.98)^2$	0.003 38	0.934 66	0.934 66

表 6 氧枪大角度射流偏移程度系数拟合结果
Table 6 Fitting results of offset coefficient of large angle jet of oxygen lance

模型	方程	A	R 平方	调整后 R 平方
a/12°-15°	$\Delta Y/De = A(H-4.62)^2$	0.004 12	0.969 01	0.969 01
b/12°-16°	$\Delta Y/De = A(H-4.88)^2$	0.004 09	0.956 40	0.956 40
c/12°-17°	$\Delta Y/De = A(H-4.72)^2$	0.004 06	0.954 00	0.954 00
d/13°-16°	$\Delta Y/De = A(H-4.73)^2$	0.003 91	0.949 39	0.949 39
e/13°-17°	$\Delta Y/De = A(H-5.11)^2$	0.003 82	0.937 35	0.937 35
f/14°-17°	$\Delta Y/De = A(H-4.6)^2$	0.003 60	0.948 56	0.948 56

越大;当大角度相同时,小角度越大(例如 b/12°-16°、d/13°-16°;c/12°-17°、e/13°-17°、f/14°-17°),大角度射流流股的偏移程度越小,融合距离越大,同时小角度射流的偏移程度也越小,融合距离也越大。这说明对于双角度六孔氧枪,小角度相同,大角度越大(或大角度相同,小角度越大),其小角度及大角度的射流偏移程度越小,射流刚性较强,其小角度及大角度的射流融合距离也具有增大的趋势。

对于确定的氧枪设计方案,大角度射流偏移程度相较于小角度更大。原因在于:二者流量均等,大角度射流流股与氧枪中线的距离相较于小角度射流流股要远一些,虽然小角度流股受到氧枪中线上负压区的影响相较于大角度流股稍大,但由于流股间的相互抽引作用,它还受到大角度射流流股向外的抽引作用,而大角度射流流股受到小角度射流流股向里的抽引作用,因此,小角度射流的偏移程度更小。

虽然大角度的射流偏移程度较大,射流刚性较

弱,但根据模拟结果,其融合距离相比于小角度却更大,这是因为尽管大角度射流偏移程度系数 A 较大,但它的正切值 $\tan\theta$ 同样很大,所以其融合距离更大,由此可见,虽然射流偏移程度与喷孔倾角都对融合距离存在影响,但喷孔倾角对融合距离的影响更大。

3 结论

通过对双角度六孔氧枪进行数值模拟,研究不同氧枪之间及同一氧枪之间的倾角变化对射流偏移程度和融合距离的影响,比较了双角度六孔氧枪在不同喷孔倾角下的射流特性,得出:(1)喷孔倾角越大,两股射流间距离越远,流股间相互卷吸越弱,干扰性越差,聚并现象发生越晚。(2)倾角越大,融合距离越长,射流中心线的径向距离越大。(3)射流偏移系数 A 的变化范围为 $(3.38 \sim 4.12) \times 10^{-3}$ 。

参考文献

- [1]张春霞,蔡志鹏,许志宏.转炉氧枪超音速射流速度衰减和分布参数的研究[J].钢铁,1995,30(9):10-13.
- [2]马恩祥,蔡志鹏,钱占民,等.氧气射流对炼钢过程的影响[J].化工冶金,1991,50(3):175-184.
- [3]刘广龙.转炉用聚合射流氧枪基础研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2016.
- [4]刘广强,张国新,朱国强,等.260 t 转炉用新型双结构氧枪水模实验与工业应用[J].钢铁研究学报,2020,32(11):951-957.
- [5]刘广强,朱国强,张国新,等.260 t 转炉用新型双结构氧枪的工业实验[J].特殊钢,2020,41(3):39-42.
- [6]巴凯杰.双结构氧枪射流特性及与熔池相互作用的研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2021.
- [7]吕明,李航,谢堃.120 t 转炉旋流氧枪的射流搅拌特性[J].钢铁,2021,56(4):31-38.
- [8]王玺,刘广强,韩鹏,等.260 t 转炉用五孔旋流氧枪的数值模拟[J].特殊钢,2021,42(1):20-24.
- [9]杨文远,冯超,王明林,等.大型转炉高供氧强度吹炼的水模实验[J].钢铁研究学报,2017,29(10):807-815.
- [10]蒋晓放,杨文远,吴亚明,等.大型转炉双角度氧枪喷头高供氧强度炼钢[J].钢铁,2021,56(9):62-73.
- [11]方爱民,刘小鸥.双角度氧枪的研究与实践[J].武钢技术,1998,36(1):9-11+24.
- [12]方爱民,刘小鸥.双角度氧枪的应用与研究[J].炼钢,1995,2(1):3-6.