

50 t 转炉四孔变角氧枪射流融合距离的数值模拟

迟洪亮 李俊国 付少朋 冯 帅
(河北联合大学冶金与能源学院,唐山 063009)

摘 要 采用 Fluent 软件模拟了 50 t 转炉四孔变角和非变角氧枪气体射流,研究了喷孔倾角对氧气射流流场和流股融合距离的影响。结果表明,在距喷头出口距离较近时,各流股独立为自由射流,随着距喷头出口距离的增加,各流股不断扩张,并在一定距离时融合成单股射流;非变角喷头 A 的流股融合距离为 1.3 m,与冷态水模实验得出枪位 1.3 m 时炉口溅出量最大是一致的;变角氧枪 B 至 I 的对角喷孔倾角不同,射流流股融合了两次,大大降低了炉口溅出量;变角氧枪对角喷孔倾角相差 0.5° 较对角喷孔倾角相差 1° 时更有利于射流融合距离的增加;在研究喷孔倾角 $10.5^\circ \sim 11.5^\circ/12.5^\circ$ 的 9 个喷头中,倾角 $11^\circ/11.5^\circ$ 的喷头 H 射流融合距离最长,其理论炉口喷溅量最少。

关键词 50 t 转炉 变角氧枪 射流 融合距离 数值模拟

Numerical Simulation on Syncretizing Distance of Gas Jet from Variable Angle Four-Hole Oxygen Lance for a 50 t Converter

Chi Hongliang, Li Junguo, Fu Shaopeng and Feng Shuai
(School of Metallurgy and Energy, Hebei United University, Tangshan 063009)

Abstract The gas jets of variable and non-variable angle four-hole oxygen lances for 50 t BOF have been numerically simulated by using Fluent software to study the effect of inclining angle of jet nozzles on oxygen jet flow field and syncretizing length of jet-flows. Results show that in distance near the outlet of jet-nozzle the each jet-flow is independent free-flow, with increasing distance from outlet of jet nozzle the each jet-flow continuously spreads out and merges each other into one jet-flow (stream) at certain distance; the syncretizing distance of jet-flows of non-variable angle jet nozzle A is 1.3 m that is consistent with the cold water simulated test results in which at situation of lance level 1.3 m the spitting amount from furnace is maximum; the inclining angles of opposite angles jet hole of variable angle oxygen lances vary from lance B to lance I, and the jet-flows of these lances syncretize for two times led to abruptly reduce the furnace spitting amount; compared with difference 1° of inclining angles, the variable angle oxygen lances with difference 0.5° of inclining angles of opposite angles jet hole is more favorable to increase the syncretizing distance; among the studied nine jet nozzle with inclining angles $10.5^\circ \sim 11.5^\circ/12.5^\circ$, the jet nozzle H with inclining angle $11^\circ/11.5^\circ$ has maximum jet flow syncretizing distance, its theoretical furnace mouth spitting amount is lowest.

Material Index 50 t Converter, Variable Angle Oxygen Lance, Jet-Flow, Syncretizing Distance, Numerical Simulation

顶吹氧枪是转炉冶炼过程的重要供氧设备,其结构参数和操作参数影响氧气射流的特性参数,从而决定着对熔池的冶炼作用。大量研究表明^[1-4],氧气射流的流速衰减程度及各流股的融合距离是衡量射流特性的重要参数,不仅决定着射流达到熔池液面时的速度大小及其分布状态,而且决定着熔池的搅拌能力。针对对角喷孔倾角不同的变角氧枪,本课题组进行了四孔变角氧枪对熔池作用的相关研究,工业试验也证实了四孔变角氧枪具有更强的熔池搅拌能力和化渣能力^[5],并对变角氧枪射流流场、动压分布规律等^[6]进行了相关研究,但对四孔变角氧枪射流流场、流股的融合距离等特性参数的研究还不充分。因此,在前期研究的基础上,采用

CFD 软件重点研究了喷孔倾角对氧气射流流股融合距离的影响规律。

1 计算模型的建立

1.1 氧枪计算区域几何模型

为了保障研究结果的可比性,仍然以唐钢 50 t 转炉及其应用的四孔氧枪工艺参数为基础,采用 Gambit 2.3 软件以直角坐标系为基准进行建模。重点研究了 9 个喷头的射流特性参数,喷孔倾角变化如表 1 所示。喷头 A 为工业用四孔氧枪,喷孔倾角均为 10.5° ;喷头 B 至喷头 I 为对角喷孔倾角不同的变角氧枪喷头,喷头 B 至喷头 E 的对角喷孔倾角相关 1° ;喷头 F 至喷头 I 的对角喷孔倾角相差 0.5° 。

表1 数值模拟各氧枪喷头的喷孔倾角
Table 1 Numerical simulated jet hole inclining angles of nozzle of each oxygen lance

喷头类型	喷孔倾角/°
A	10.5
B	10/11
C	10.5/11.5
D	11/12
E	11.5/12.5
F	10/10.5
G	10.5/11
H	11/11.5
I	11.5/12

这里以喷头 C 为例给出变角氧枪喷头的结构简图如图 1(a) 所示。

考虑到氧气射流的应用条件,建模时以 50 t 转炉结构参数为基础,假设氧气射流自喷孔喷出后以 1 600 mm 的枪位进入到一个没有盛放钢液的转炉内,为了减少计算时间,根据喷头的对称性将模型的 1/4 作为计算域,喷头结构和计算域如图 1(b) 所示。数值模拟采用流体动力学软件 Fluent 6.3,后处理采用 Tecplot 360。将计算域进行划分,网格节点约 90 000 个,压力和速度采用 SIMPLE 算法。

1.2 数值模拟假设条件

根据氧气射流模拟的特殊性,进行如下假设:

- (1) Laval 喷嘴内部连接处光滑,摩擦力可以忽略;
- (2) 填充气体为理想可压缩气体,气源为氧气;
- (3) 整个过程为稳态、非等温过程。

1.3 基本方程

(1) 对于控制方程

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中: ϕ - 通用变量,可以代表 u, v, w, T 等求解变量; Γ - 广义扩散系数; S - 广义源项。

对于连续方程: $\phi = 1; \Gamma = 0; S = 0$ (2)

对于动量方程: $\phi = u_i; \Gamma = \mu; S = -\frac{\partial p}{\partial x_i}$ (3)

对于能量方程: $\phi = T; \Gamma = \frac{\gamma}{C_p}; S = 0$ (4)

式中: ρ - 密度; T - 温度; μ - 黏度系数; P - 大气压; γ - 流体的传热系数; C_p - 比热容。

(2) 标准 κ - ε 模型。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} G_k - \\ & C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ &= \frac{u'_i u'_i}{2} = \\ & \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \\ \varepsilon &= \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \\ G_k &= \mu_t \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: G_k - 由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ - 均为经验常数,取值分别为 1.44、1.92; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ - 与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数,取值分别为 1.0、1.3; C_μ - 取值 0.09。

1.4 边界条件的确定

模拟采用稳态、非耦合、隐式求解算法进行,选择常用的 k-epsilon 湍流模型,收敛残差除能量方程为 10^{-6} 外,其余均为 10^{-3} ,其他边界条件如下:

- (1) 入口条件采用压力入口,设定值 0.85 MPa,入口温度 300 K;
- (2) 出口条件采用压力出口,设定值 0.104 MPa,出口温度 1 873 K;
- (3) 壁面采用无滑移边界条件,近壁面处采用标准壁面函数处理。

2 数值模拟结果及分析

2.1 射流横截面随喷孔出口距离的变化规律

图 2 给出了喷头 A (喷孔倾角均为 10.5°) 射流横截面随喷孔出口距离的变化。由图 2 可见,随着距喷头出口距离

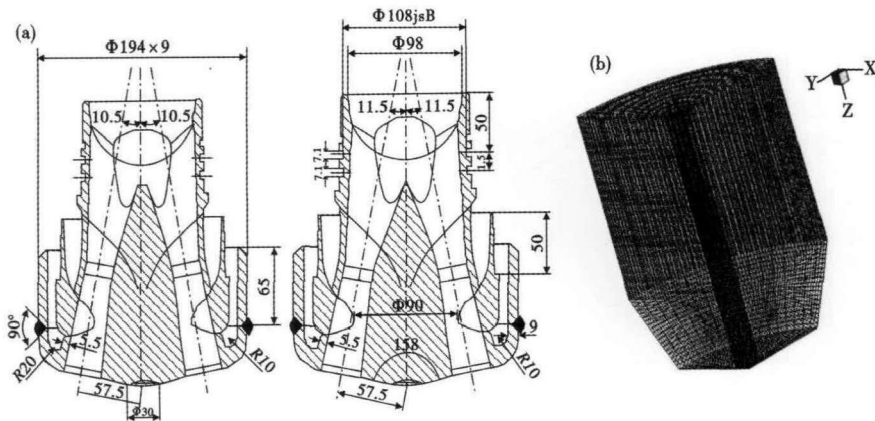


图 1 (a) 变角氧枪喷头 C 的结构简图; (b) 氧枪射流计算域
Fig. 1 (a) Schematics of jet nozzle C of variable angle oxygen lance; (b) Calculated domain of jet-flow of oxygen lance

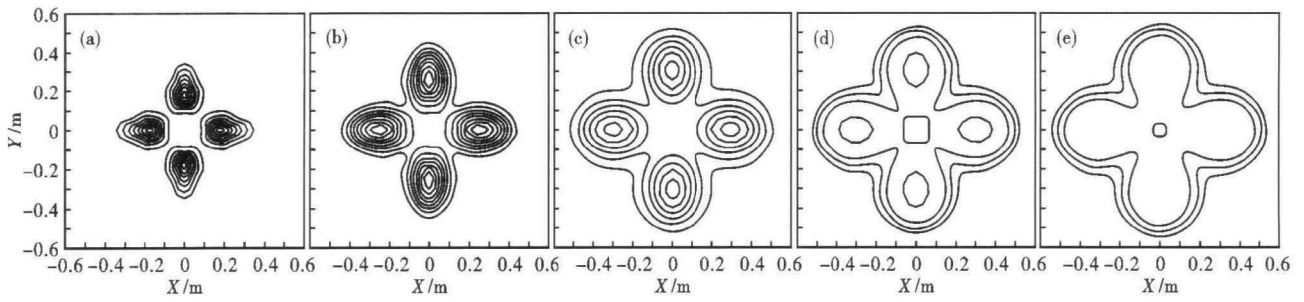


图2 四孔氧枪射流不同距离处截面图:距离/m- (a)0.5;(b)1.0;(c)1.5;(d)1.6;(e)1.7

Fig.2 Section plots of jet-flow for four-hole oxygen lance at different distance /m; (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 1.5; (d) 1.6; and (e) 1.7

的增加,射流流股不断地吸收周围环境介质,横截面积不断增加、射流流速不断减弱。与此同时,在距喷头出口距离较近时,各流股独立为自由射流,随着距喷头出口距离的增加,各流股不断扩张,并在距喷头出口一定距离时出现融合,射流流速方向变得与喷头轴线方向完全一致,此时,整个氧气射流失去多股自由射流的特性而融为一体。

2.2 射流流股融合距离的确定

流股中心线由偏离喷头轴线转变为与喷头轴线平行的拐点距喷头出口的轴向距离即为氧气射流流股的融合距离^[7]。在模拟出 9 个喷头射流流场后,统计流股中心线偏离喷头轴线的距离并分别作图,通过曲线拐点确定射流流股的融合距离,图 3 给出了非变角喷头 A 和变角喷头 C 射流流股中心偏移喷头轴线的变化情况。

由图 3(a)可知,对于非变角喷头 A 来说,气体射流距喷头出口 1.3 m 以内时,射流流股中心线与喷头中心线间的距离逐渐增加,射流流股能够保持自由射流的特性;当距喷头出口超过 1.3 m 时,射流流股中心线与喷头中心线间的距离不再增加,说明在距离喷头出口 1.3 m 处,射流流速方向已经与喷头轴线方向一致,射流流股失去了自由射流的特性而融合成单股射流。射流流股的融合与氧枪的稳定操作及炉口喷溅量关系密切,当射流流股保持自由射流特性时,射流流股中心线与喷头轴线具有一定夹角,冲击到熔池内钢液时具有侧向力作用,喷溅的液滴不易直接从炉口飞出,炉口溅出量较小;当射流流股失去自由射流特性而融合时,射流流股中心线与喷头轴线平行,射流将以单股射流形式冲击熔池,

炉口溅出量急剧增加。当然,随着距喷头出口距离的增加,射流对熔池的冲击力逐渐下降,射流对熔池搅拌能力降低的同时炉口溅出量也随之减少。本课题组通过冷态实验证实了喷头 A 在枪位 1.3 m 时炉口溅出量达到最大^[8],间接证实了本模拟确定的射流流股融合距离是比较准确的。

由图 3(b)可见,与非变角喷头 A 不同,变角氧枪喷头 C 两喷孔倾角与喷头 A 相同,而对角两喷孔倾角增加了 1°,使得喷头 C 两组射流流股的融合距离明显不同。在距喷头出口 0.9 m 内,喷孔倾角对流股的影响较小,不同喷孔倾角流股的中心线与喷头轴线的距离相等。但距喷头出口距离超过 0.9 m 以后,喷孔倾角对流股中心线与喷头轴线的距离产生一定的影响,流股速度方向的变化也并不一致,其中,小喷孔倾角射流流股先融合,大喷孔倾角射流流股后融合,融合距离分别为 1.3 m 和 1.4 m,由于流股融合具有先后,因此本研究将不同喷孔倾角流股融合距离的平均值作为变角氧枪射流的融合距离,从而对变角氧枪射流特性进一步分析。

由于不同喷孔倾角作用下的射流流股融合距离不同,使得变角氧枪对熔池的冲击作用与非变角氧

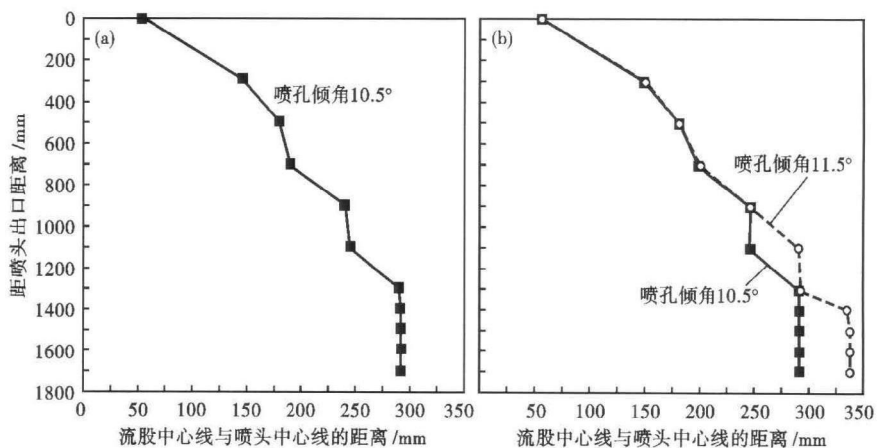


图3 喷头 A(a)和喷头 C(b)的射流流股中心的偏移

Fig.3 Deviation of jet-flow center from lance center for jet nozzle A (a) and jet nozzle C (b)

枪将以单股射流形式冲击熔池,

枪会有所区别。对于变角氧枪喷头 C 来说,距喷头出口距离达到 1.3 m 时,有一组喷孔流股融合并达到其最大金属喷溅量的位置,而另一组喷孔流股尚未融合,并对熔池钢液的冲击具有一定的切向力作用,直到距喷头出口距离 1.4 m 时,另一组喷孔流股才融合并达到最大金属喷溅量的位置。可见,由于变角氧枪射流流股的分步融合,使得在一定程度上减弱了整个射流对金属喷溅量的影响。因此,变角氧枪喷头 C 的金属喷溅量应低于非变角氧枪喷头 A 的金属喷溅量,这与课题组的冷态模拟研究结果是一致的^[8],在相同操作参数条件下,四孔变角氧枪炉口溅出量要比非变角氧枪炉口溅出量低 1/5。

2.3 喷孔倾角对射流流股融合距离的影响

根据上述变角氧枪射流流股融合距离的确定方法,在 9 个喷头射流模拟的基础上,对射流流股融合距离进行了统计,统计结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,与非变角喷头 A 相比,变角氧枪喷头的射流融合距离均有不同程度的增加,这与喷孔倾角的增加有直接关系。与非变角喷头 A 相比,变角喷头 B、C、D 和 E 的对角喷孔倾角相差 1°,随着最小喷孔倾角的逐渐增加,射流的融合距离呈现先增加后降低的趋势。而变角喷头 F、G、H 和 I 的对角喷孔倾角相差 0.5°,随着最小喷孔倾角的逐渐增加,射流的融合距离也同样呈现先增加后降低的趋势。比较研究的 9 个喷头,喷头 C 和喷头 H 的射流融合距离相对较长,最大喷孔倾角均为 11.5°,这可能是喷孔倾角为 11.5°时达到了喷孔倾角影响融合距离的临界值。

如前所述,射流流股融合距离与炉口喷溅量关系密切,射流流股融合距离较短时,射流同时具备较大的动能,射流引起的炉口溅出量也就随之增加。由表 2 可知,适当增加喷孔倾角,使射流融合距离适当增加,可减少炉口喷溅量。对比对角喷孔倾角相差 0.5°和 1°条件下,喷孔倾角对射流流股融合距离的影响可以发现,变角氧枪对角喷孔倾角相差 0.5°

时更有利于射流融合距离的增加。在研究的 9 个喷头中,喷头 H 射流的融合距离最大,理论上其炉口喷溅量应当最少。

3 结论

(1) 氧枪射流流场中,在距喷头出口距离较近时,各流股独立为自由射流,随着距喷头出口距离的增加,各流股不断扩张,并在一定距离时融合成单股射流,射流流速方向与喷头轴线方向完全一致。

(2) 变角氧枪射流流股融合存在先后,将不同喷孔倾角流股融合距离的平均值作为变角氧枪射流的融合距离可以进一步对变角氧枪射流特性进行研究。

(3) 非变角喷头 A 的喷孔倾角一致,流股融合距离为 1.3 m;冷态水模实验得出非变角喷头作用下枪位 1.3 m 时炉口溅出量最大。这不仅证实了炉口溅出量与射流融合距离相关,也证实了本研究给出的确定射流融合距离方法的可行性。

(4) 变角喷头 B 至 I 的对角喷孔倾角不同,射流流股融合出现两次,大大降低了炉口溅出量。

(5) 对于变角喷头来说,随着喷孔倾角的增加,射流融合距离呈现先增加后降低的趋势;与喷孔倾角相差 1°相比,喷孔倾角相差 0.5°时更有利于射流融合距离的增加;在研究的 9 个喷头中,喷孔倾角为 11°/11.5°的喷头 H 的射流融合距离最长,其理论炉口喷溅量应当最少。

河北省自然科学基金资助项目(No. E2012401063)

参考文献

- [1] 蔡志鹏,张春霞. 大型转炉氧枪多孔喷头的设计与其射流特性[J]. 北京科技大学学报,1995,12:75-79.
- [2] Schlüter J, Kempken J, Odenthal H-J, et al. Advantageous Numerical Simulation of the Converter Blowing Process[J]. Iron Steel Technology, 2007, 4(11):71-89.
- [3] 牛慧贤. 铜镍矿氧气顶吹自热熔炼氧枪射流速度分布规律[J]. 稀有金属,1999,23(4):275-278.
- [4] 卢帝维,朱 荣. 转炉氧枪喷头参数的数值模拟研究[J]. 冶金能源,2008,27(6):10-18.
- [5] Li Jun-guo, Zeng Ya-nan, Wang Jian-qiang, et al. Simulation of Flow Field of Oxygen Lance Gas Jet Utilized for 50 t Converter[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(4):11-18.
- [6] 付少鹏,李俊国,曾亚南,等. 变角氧枪气体射流数值模拟[J]. 河北联合大学学报(自然科学版),2013,35(2):17-25.
- [7] 袁章福,潘贻芳. 炼钢氧枪技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [8] 李俊国,曾亚南,韩志杰,等. 唐钢 50 t 复吹转炉水模型实验研究[J]. 特殊钢,2010,31(2):21-24.

迟洪亮(1984-),男,硕士研究生,2008 年河北理工大学(本科)毕业,炼钢新技术研究。E-mail:Lijgqq@163.com

收稿日期:2014-02-25

表 2 不同氧枪喷头射流流股的融合距离

Table 2 Syncrctizing distance of jet-flows of different oxygen lance nozzle

喷头类型	融合距离/m
A	1.30
B	1.32
C	1.35
D	1.30
E	1.32
F	1.32
G	1.35
H	1.40
I	1.35