

· 试验研究 ·

## 传统与聚合射流氧枪冲击炼钢熔池效果的数值模拟

冯亮花 刘 坤 梁慧坤 张安坤  
(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

**摘 要** 通过90 t转炉的传统氧枪喷孔周围增加环氧孔, 通入辅助氧气保护主氧射流形成聚合状态, 建立二维两相数值模型, 分析传统氧枪和聚合射流氧枪射流轴线上氧气射流速度分布及不同枪位下熔池中钢液的流动特性和冲击深度。结果表明, 与传统氧枪相比, 枪位相同时, 聚合射流氧枪射流衰减慢, 冲击力大, 冲击凹坑深度深; 在30De (De-氧枪出口直径) 枪位下的最大冲击深度与20De枪位下的传统氧枪相同, 当聚合射流氧枪在40De枪位下喷吹得平均冲击深度与传统氧枪20De枪位喷吹时相当。

**关键词** 聚合射流氧枪 90 t转炉 熔池 钢液 冲击深度 数值模拟

## Numerical Simulation of Impact Effect of Traditional Jet and Coherent Jet Oxygen lance on Steelmaking Pool

Feng Lianghua, Liu Kun, Liang Huikun and Zhang Ankun  
(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051)

**Abstract** The two dimensional numerical model is established with adding shrouding gas holes around traditional lance oxygen Laval tube for a 90 t LD injecting auxiliary oxygen to protect main oxygen jet and form coherent state, of traditional oxygen lance and coherent lance the oxygen jet velocity distribution at jet axis and the flow characteristics of liquid steel and impact depth in pool with different lance level are analyzed. Results show that as compared with traditional oxygen lance at same lance level the attenuation of jet of coherence oxygen lance is slower, the impact force is stronger and the depth of impact pit is deeper; with lance level 30De (De-diameter of oxygen lance outlet) the max impact depth of coherent lance is just the same that of traditional lance with lance level 20De and the average impact depth of coherent lance with lance level 40De is corresponding to that of traditional lance with lance level 20De.

**Material Index** Coherent Jet Oxygen Lance, 90 t LD, Pool, Liquid Steel, Impact Depth, Numerical Simulation

聚合射流氧枪射流能量集中, 射流距离长, 穿透力强, 首先应用于电弧炉, 发展至今已有 10 多年的历史<sup>[1-2]</sup>。30 t 转炉用集束射流氧枪的基础研究得出, 与传统氧枪相比, 它的射流距离更长, 在同等条件下耗氧量及钢铁消耗均有所下降<sup>[3]</sup>。使用聚合射流氧枪后电弧炉冶炼效果改善, 平均冶炼周期缩短 10 ~ 15 min, 各项消耗指标得到改善<sup>[4]</sup>。与顶底复吹氧枪相比, 用聚合射流氧枪时铁水均混时间短、喷溅小、冲击深度大<sup>[5-6]</sup>。本文采用四孔氧枪顶吹转炉, 取其中一孔并尝试在其周围增加环氧保护孔, 通入辅助氧气以保护主氧射流形成聚合状态, 建立二维两相流数值模型, 分析两种氧枪射流轴线上氧的速度分布及不同工况下熔池中钢液的流动特性以及冲击深度。

### 1 模型建立及网格划分

#### 1.1 模拟假设条件

(1) 氧气为可压缩流体; (2) 采用光滑壁面和标准壁面函数; (3) 氧气、钢液均视为牛顿流体; (4) 聚

合射流氧枪伴随孔用环缝代替。

#### 1.2 数学模型

氧气射流与熔池中钢液相互作用, 气相、液相交界面分层流动, 且液面在喷吹过程中起伏变化, 因此用 VOF 模型对其进行动态分析计算。

体积分数方程:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + v_q \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} + \frac{1}{\rho_q} \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \quad (1)$$

式中:  $m_{pq}$  -  $p$  相到  $q$  相的质量输送;  $m_{qp}$  -  $q$  相到  $p$  相的质量输送;  $\alpha_q$  -  $q$  相的体积分数;  $\rho_q$  -  $q$  相密度;  $S_{\alpha_q}$  - 质量源相;  $v_q$  -  $q$  相速度。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\tau + \tau_\omega)] + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad (2)$$

式中:  $\bar{v}$  - 平均速度;  $\tau$  - 粘性应力;  $\tau_\omega$  - 湍流应力;  $\rho \bar{g}$  - 平均体积力;  $\bar{F}$  - 外部体积力。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\bar{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

式中： $E$ - 内能； $k_{\text{eff}}$ - 有效导热系数； $T$ - 温度； $S_h$ - 热源相。

为研究氧气射流同炼钢熔池相互作用情况，本文选以钢厂钢水容量为 90 t 转炉及其所用氧枪喷头为研究对象，相关参数见表 1，表 2。

1.3 模型结构及计算方法

模型为钢厂 90 t 转炉及其所用氧枪。其中聚合射流氧枪是在传统氧枪喷孔周围开设环缝，通入副氧保护主氧射流形成聚合状态，转炉及氧枪模型的网格划分如图 1 所示。

为加快收敛和提高计算精度，对氧枪喷头和炉体分别进行网格划分，其中，对氧枪喷头进行网格划分时，靠近壁面处划分较密，而靠近轴心部分划分较为稀疏，如图 1(a) 所示。氧枪和转炉模型均为圆筒状，且氧枪位于转炉中央，关于中心轴线对称，因此采用轴对称边界条件；进口压力和环境压力已知，因此采用压力进口和压力出口边界条件。

采用耦合、隐式、非定常求解法，氧枪喷头入口，入口 1 处通入氧气，采用压力入口，为 0.8 MPa；伴随流入口 2 通入高温氧气压力大小为 0.2 MPa，温度为 2 000 K；转炉模型中采用压力出口，为 0.103 MPa。氧气和钢液的物理参数如表 3 所示。计算过程中，速度、压力采用 PISO 算法耦合，压力用包含体积力的方法进行离散，体积分数用 QUICK 进行离散，其余采用一阶迎风格式离散残差，计算 2 s 左右数据。

2 结果与分析

2.1 转炉模型内射流速度衰减规律

用  $D_e$  表示氧枪出口直径，出口直径的倍数表示喷枪距离熔池表面的距离（枪位）及射流在轴线上的位置。图 2 为枪位是  $20D_e$  时，两种氧枪射流速度分布云图，图 2(a) 为传统氧枪射流，图 2(b) 为聚合射流氧枪。图 2 中射流中心灰色区域表示氧气射流的速度为 500 m/s，及射流核心区，对比聚合射流核心区长度长于传统氧枪的核心区长度。

表 1 90 t 顶吹转炉主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of 90t LD converter

炉体有效高度/mm	截锥体高度/mm	熔池直径/mm	熔池深度/mm	炉容比/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	炉衬厚度/mm	平均装入量/t	平均出钢量/t
5 200	0.5	4 000	1 200	0.9	350	92	90

表 2 氧枪喷头尺寸/mm

Table 2 Size of nozzle of oxygen lance / mm

入口直径	喉口直径	出口直径	收缩段长度	扩张段长度	喉口长度	环缝宽度
47	36	47	43	63	4	4

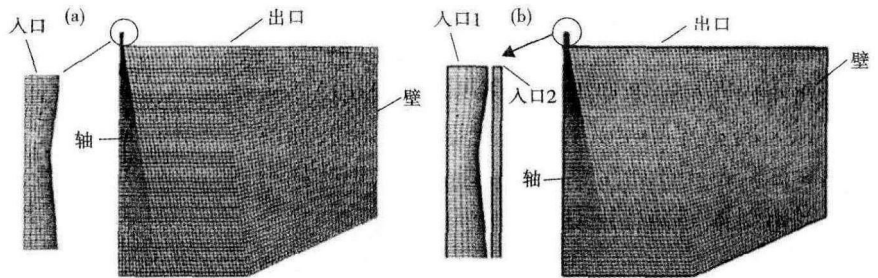


图 1 传统氧枪(a)和聚合射流氧枪(b)顶吹转炉模型网格

Fig. 1 Model mesh for LD converter with traditional lance (a) and coherent lance (b)

表 3 氧气与钢液的热物理参数

Table 3 Thermal-physical parameters of oxygen and liquid steel

参数	温度/K	粘性系数( $\mu$ )/ [ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ]	比热容/ [ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	导热系数/ [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	密度( $\rho$ )/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
主氧/副氧	298.15/2 000	$1.92 \times 10^{-5}$	919.31	$2.46 \times 10^{-2}$	可压
熔池	1 873	$6.5 \times 10^{-3}$	670	15	7 100

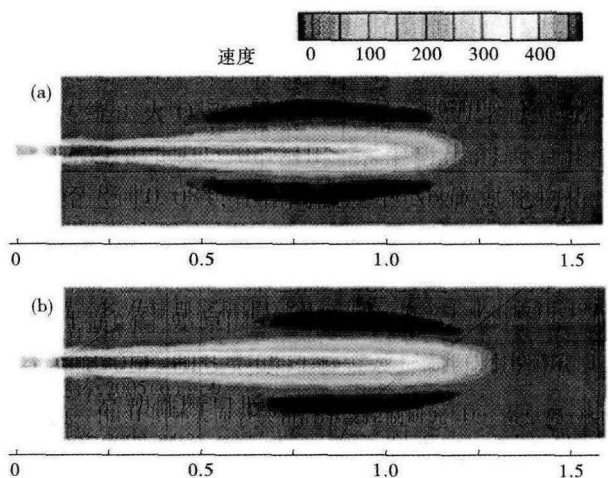


图 2 氧气射流速度分布云图：(a)传统氧枪；(b)聚合射流氧枪  
Fig. 2 Cloud diagram of velocity distribution of oxygen jet: (a) traditional lance; (b) coherent jet lance

图 3 中横坐标  $X/D_e$  为射流在轴线上的枪位同氧枪出口直径的比值，可以看出相同枪位时，聚合射

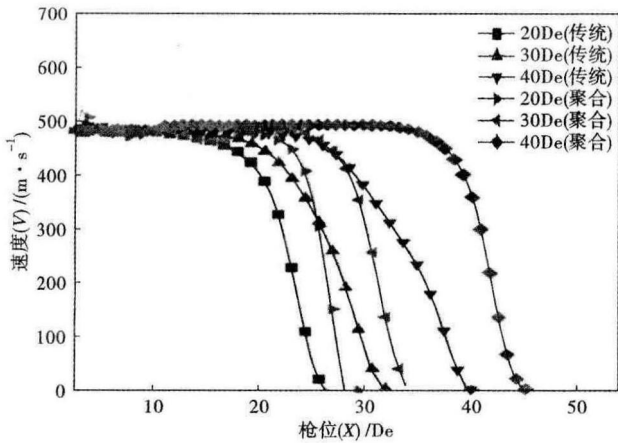


图3 枪位对射流轴线上速度分布的影响,De- 氧枪出口直径  
Fig.3 Effect of lance level on velocity distribution at jet axis, De- diameter of lance outlet

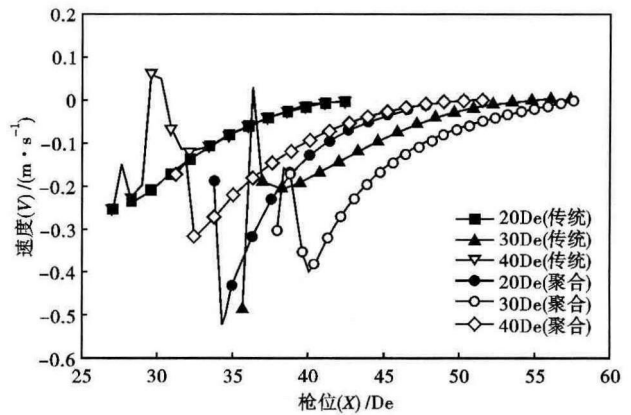


图5 枪位对中心轴线上液相区速度分布的影响  
Fig.5 Effect of lance level on velocity distribution at center axis in liquid phase area

流氧枪射流核心区长,超音速区域也 longer,轴向速度衰减慢。氧枪 20De 枪位下喷吹时,传统氧枪在距离氧喷口 26De 位置处速度衰减为 0 m/s,聚合射流氧枪在 28De 位置处射流速度衰减为 0 m/s;30De 枪位传统氧枪 33De,聚合射流氧枪 35De,以及 40De 枪位传统氧枪 41De,聚合射流氧枪 45De 位置时氧气射流速度衰减至 0 m/s。氧气射流自喷口喷出后随着枪位的提高,聚合射流氧枪射流长度增加的幅度更加明显。并且,随着枪位提升,聚合射流氧枪的射流核心区长度不断增加,而传统氧枪射流核心区长度至 24De 时便不再增加,在相同枪位下,聚合射流氧枪射流比传统氧枪有更大的冲击力。

2.2 转炉模型内钢液速度分布状况

由图 4 可知,氧气喷吹过程中,熔池中心处钢液速度最大,至两边炉壁处逐渐减小。距熔池底部同

一位置处的钢液速度,随着枪位提升,逐渐减小;聚合射流喷吹时该点钢液速度大于传统氧枪喷吹时。

图 5 中纵坐标曲线表示的是相对于氧气射流中心轴线的速度,为负数的代表与氧气射流方向相反。从图 5 中可以看枪位相同时,熔池中心同一位置处,聚合射流氧枪喷吹时,钢液速度较大,在该中心线上距氧枪喷口相同位置的一点为例,其斜率均大于传统氧枪喷吹熔池的斜率,即聚合射流喷吹相同时间后,熔池内钢液获得更多的能量,其流动性能也较传统氧枪喷吹时好。无论是传统氧枪还是聚合射流氧枪喷吹时随着枪位提升,中心轴线上钢液的速度逐渐减小;相同枪位喷吹时,中心轴线上距喷管口距离相同的任一点处,该点的斜率聚合射流氧枪要小些,即随枪位提升,聚合射流喷吹时中心轴线上钢液速度分布梯度差较小,其衰减也更加缓慢。

2.3 枪位对凹坑深度的影响

图 6 为传统氧枪和聚合射流氧枪顶吹熔池时,不同枪位下凹坑深度随时间变化规律,其中统计 0.1 ~ 2.0 s 之间 20 组数据。图 6 中可以看出,聚合射流氧枪喷吹时尽管枪位不同,均在 0.3 s 左右冲击深度最大,而传统氧枪喷吹时,仅在 20De 枪位下到 0.3 s 时,冲击深度最大。传统氧枪在 30De 和 40De 枪位下到 0.5 s 左右冲击深度最大。这说明聚合射

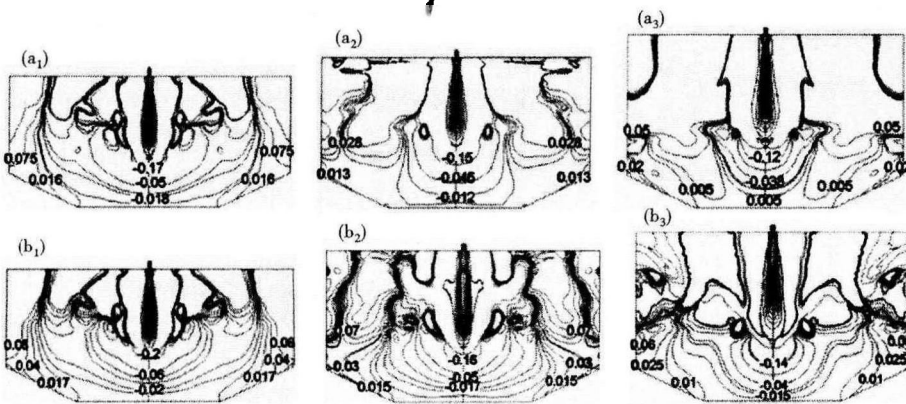


图4 传统(a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>)和聚合射流(b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>)氧枪顶吹转炉内速度场分布图:(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>) 20De; (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>) 30De; (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>) 40De

Fig.4 Velocity distribution profile in top-blown oxygen (LD) converter with traditional lance (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> and a<sub>3</sub>) and coherent jet lance (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> and b<sub>3</sub>): (a<sub>1</sub>) (b<sub>1</sub>) 20De; (a<sub>2</sub>) (b<sub>2</sub>) 30De and (a<sub>3</sub>) (b<sub>3</sub>) 40De

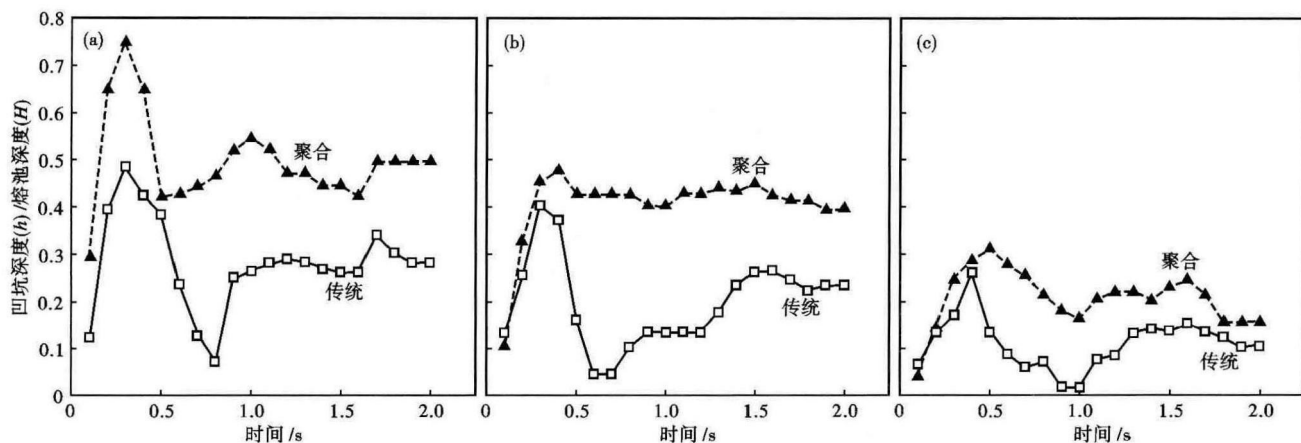


图6 枪位20De(a),30De(b)和40De(c)时冲击凹坑深度随时间变化

Fig.6 Change of impact pit depth with time, lance level: 20De (a), 30De (b) and 40De (c)

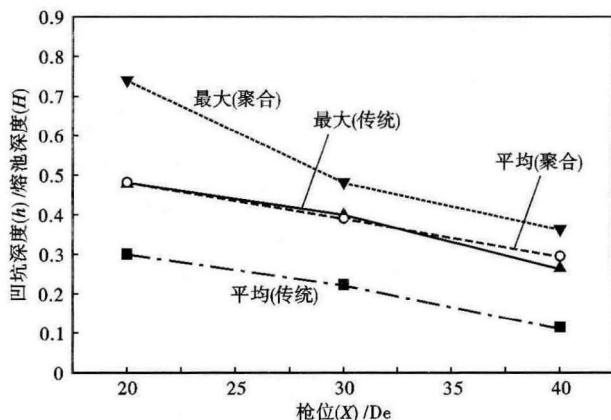


图7 枪位对冲击凹坑深度的影响

Fig.7 Effect of lance level on impact pit depth

流氧枪由于射流集中,冲击力强在短时间内即可冲击形成深度较大的凹坑。

传统氧枪在20De、30De、40De枪位下冲击熔池时的最大冲击深度与熔池深度的比值分别为0.48、0.40、0.26,平均冲击深度与熔池深度的比值为0.30、0.22、0.12;聚合射流氧枪在20De、30De、40De枪位下冲击熔池时的最大冲击深度与熔池深度的比值分别为0.74、0.48、0.36,平均冲击深度与熔池深度的比值为0.48、0.38、0.28。可以看出聚合射流氧枪30De枪位最大冲击深度与传统氧枪20De相同,而聚合射流氧枪40De枪位平均喷吹深度与传统氧枪20De时相当(图7)。

#### 4 结论

(1)传统氧枪射流核心区长度随枪位提升几乎不增加,聚合射流氧枪射流核心区长度增加明显,且聚合射流氧枪射流衰减缓慢。

(2)相同枪位聚合射流氧枪喷吹时,熔池中心

轴线上液相区同一位置处钢液的速度要比传统氧枪喷吹时大得多,冲击深度也更深,且钢液速度分布的梯度差比较小。随着枪位提高,传统氧枪和聚合射流氧枪冲击熔池时,液相区中心轴线上同一位置处钢液速度均减小,但是聚合射流氧枪喷吹时,钢液速度减小的幅度比单孔氧枪小。

(3)20De、30De和40De枪位下,聚合射流氧枪平均喷吹深度分别比传统氧枪喷吹深度深35%、31%和22%。聚合射流氧枪在30De枪位下的最大冲击深度与20De枪位下的传统氧枪相同,而聚合射流氧枪在40De枪位下喷吹得平均冲击深度与传统氧枪20De枪位喷吹时相当。

国家自然科学基金项目资助(No51204093)

#### 参考文献

- [1] 程长建,沈明刚,苏在静.聚合射流氧枪技术的特点及其应用[J].炼钢,2002,18(5):47-49.
- [2] 袁章福,潘贻芳.炼钢氧枪技术[M].北京:冶金工业出版社,2007:101-103.
- [3] 李存牢,王慧霞,朱荣,等.30t转炉用集束射流氧枪的基础研究[J].过程工程学报,2009,9(6):218-221.
- [4] 傅振祥,潘贻芳,王宝明,等.聚合射流氧枪射流特性的数值模拟及应用[J].炼钢,2011,27(6):1-4.
- [5] 包丽明,刘坤,吕国成,等.转炉氧枪顶吹工艺的水力学模拟[J].特殊钢,2007,28(5):13-16.
- [6] 包丽明,刘坤,吕国成,等.复吹转炉射流与钢水熔池相互作用的水模型试验[J].特殊钢,2008,29(5):32-34.

冯亮花(1974-),女,硕士(鞍山科技大学),副教授,1998年鞍山钢铁学院(本科)毕业,冶金过程模拟研究。

E-mail:fenglianghua1974@126.com

收稿日期:2015-04-15