

# Flow Structure of the Supersonic BOF Oxygen Lance and Jet Characteristics

Baokuan Li, Guangqiang Li

School of Materials & Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, 430081, China.

Correspondent: LI Bao-kuan, E-mail: lbk6382@163.com

**Abstract:** numerical simulation of the supersonic jet flow field inside an oxygen lance nozzle was carried out with the computational fluid dynamics (CFD) method. Analyzing the results targeted at the lines of the equal speed of sound, flow field, shock wave structure and the impact of the lance tip application, and so on. The results showed that the shock wave structure has a significant impact to the jet flow field. The reasonable structure of oxygen lance (not damage) is a good basis to ensure the good jet characteristics. It will be helpful to the structure optimization of the oxygen lance.

**Keywords:** BOF, supersonic top lance nozzle, flow field, numerical simulation

## 超音速氧枪射流结构及其工作特性

李宝宽, 李光强

武汉科技大学 材料与冶金学院 湖北 武汉 430081

Correspondent: LI Bao-kuan, E-mail: lbk6382@163.com

**摘要:** 本文利用计算流体力学 (CFD) 方法对氧枪喷头其中一个枪体内部的超音速流场射流情况进行冷态数值模拟, 主要针对等音速线、流场激波结构和对枪头应用的影响等几方面对结果进行了分析。结果表明, 激波结构对射流流场的影响较大, 氧枪的合理结构 (不损毁) 是保证良好射流流场的基础, 同时也为进一步研究氧枪的结构优化提供了参考。

**关键词:** 转炉, 超音速氧枪, 流场, 数值模拟

### 1 引言

自氧气顶吹转炉<sup>[1-2]</sup>问世以来, 供氧在转炉炼钢过程中占有非常重要的地位, 它是保证杂质去除速度、熔池升温速度、造渣制度、控制喷溅、去除钢中气体的关键操作, 关系到终点的控制和炉衬的寿命。而氧枪<sup>[3-4]</sup>是向炼钢炉内输送氧气的关键设备, 设计工艺参数必然影响着冶炼技术经济指标的优劣, 氧枪喷头各参数的合理选取、精细的加工制造技术及最佳的熔炼操作工艺, 是实现高效平稳吹炼的必要途径。

我国每年消耗氧枪喷头约40000个, 氧枪喷头的平均寿命只有70炉左右。大型转炉使用铸造喷头, 枪龄为200~250炉, 使用锻造组合式喷头其寿命为500~600炉, 中小转炉枪龄在40~350炉之间,

国家自然科学基金重点项目 (50934008) 资助。

氧枪喷头的寿命普遍偏低<sup>[5]</sup>。因此, 优化用氧制度, 提高转炉枪龄, 对大多数中小转炉而言, 具有重要意义。

如果喷头参数设计<sup>[6-8]</sup>不合理, 就会造成吹炼面积小, 化渣速度慢, 喷溅大、吹损高、粘枪和粘烟罩严重, 造成钢铁料消耗增加。所以对其射流的速度场、压力场进行检测分析成为衡量氧枪性能的重要手段。通过对氧气射流的流场分析, 掌握氧气射流的一些特性和规律, 确定氧枪的最佳工艺参数。不仅可以指导氧枪设计, 而且所提供的氧气射流数据, 可以为炼钢生产实践服务。

本文利用计算流体力学 (CFD) 方法<sup>[9]</sup>对氧枪喷头其中一个枪体内部的超音速流场射流情况进行冷态数值模拟, 主要针对等音速线、流场激波结构和对枪头应用的影响几方面对结果进行了分析。

## 2 数学模型

### 2.1 几何模型及网格划分

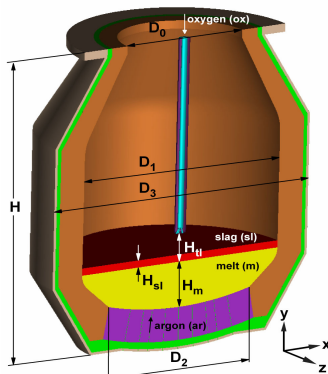


图 1 氧枪在转炉中的布置图  
Fig.1 The entity of oxygen lance tip

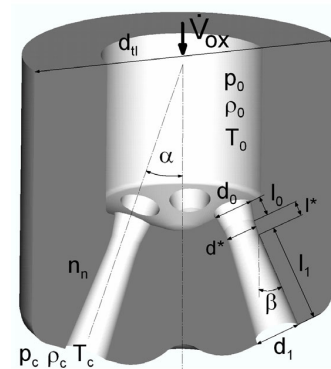


图 2 氧枪喷头结构图  
Fig.2 The structure of oxygen lance tip

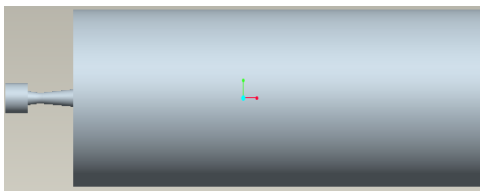


图 3 氧枪的几何模型  
Fig.3 The geometric model of oxygen lance

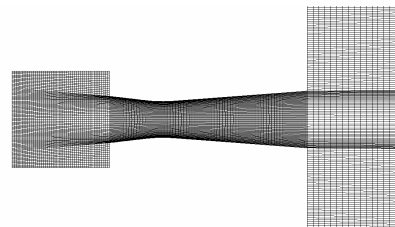


图 4 枪头局部的网格划分  
Fig.4 The grid of the partial oxygen lance tip

四孔氧枪喷头的尺寸参数入口径  $d_0$  为 48mm, 喉口径  $d^*$  为 38mm, 出口径  $d_1$  为 60mm, 入口长  $L_0$  为 36.7mm, 喉口长  $L^*$  为 29.2mm, 扩张段  $L_1$  为 135.8mm, 喷嘴长  $L$  为 201mm, 扩张角  $\beta$  为  $3.6^\circ$ , 孔倾角  $\gamma$  为  $12^\circ$ .

本文依据图 2 结构图, 使用 Gambit 软件对其中一个氧枪枪体进行建模。因计算对象为轴对称图形, 所以我们只计算一半, 另外一半的计算结果可在计算完成后由软件的对称功能得到。采用结构化网格, 为增强模拟效果, 对枪体部分的网格划分进行了加密处理。为了加快计算速度, 将取整体模型的二分之一来研究。划分后物理模型的网格总数为 67186 个节点。

### 2.2 基本方程

实际情况下, 可压缩流动是一个很复杂的、综合的现象。喷管中的实际流动是非等熵的。为将问题简化, 理论上通常将喷管内的流动看作是定常等熵流。

假设从喷头喷出的气体射流进入一个长度 0.1m、半径 0.05m 的圆柱形空间内, 对射流的速度分布进行了冷态数值模拟。描述该过程的控制方程如下:

(1) 控制方程通用形式

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

(1)

式中:  $\phi$  为通用变量, 可以代表  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $T$  等求解变量;  $\Gamma$  为广义扩散系数;  $S$  为广义源项。 $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别代表坐标轴三个方向的速度;  $\rho$  为密度;  $T$  为温度;  $\mu$  为粘性系数;  $p$  为压力;  $k$  为流体的传热系数;  $c_p$  为比热容。

(2) 标准  $k-\varepsilon$  湍流模型用于求解湍流有效粘度。

### 2.3 边界条件及求解方法

由于入口压力已知但是流动速度和/或速率未

知, 我们选择压力入口边界条件 (图 3.2 中蓝色边界), 压力出口边界条件 (图 3.2 中红色边界)。在实际应用当中 wall 边界 (图 3.2 中白色边界) 是有热流密度, 本文简化为无热流密度, 图 3.2 中黄色边界为对称边界。只需设定压力入口边界和压力出口边界:

(1) 压力入口边界条件。主要输入入口总压, 因是超音速流动, 必须指定静压。设定入口总压为 13atm;

(2) 压力出口边界条件。出口的背压为 0.8atm~1.5atm。

本文采用轴对称稳态可压缩流动的控制方程形式包括连续、动量、能量方程和标准化  $\kappa$ - $\xi$  模型。由于流动为超音速流动, 气体是可压缩的, 所以选择基于密度的求解器, 流动方程选择二阶迎风差值格式。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 计算参数

本文模拟的是转炉用超音速氧枪的射流流场, 首先要确定产生超音速流动的条件, 即采用适当的收缩形喷管, 只要造成在喷管进出口气体压力之比为

$$p^*/p_0 = 0.5283$$

喷管出流速度达到最大值, 即声速。此时, 出口处压力为临界压力, 马赫数是 1。如果在收缩型喷管的下游接一段扩张性喷管, 只要满足:

$$0.5283P_{in} > P^* > P_{outlet}$$

就能获得超音速流。

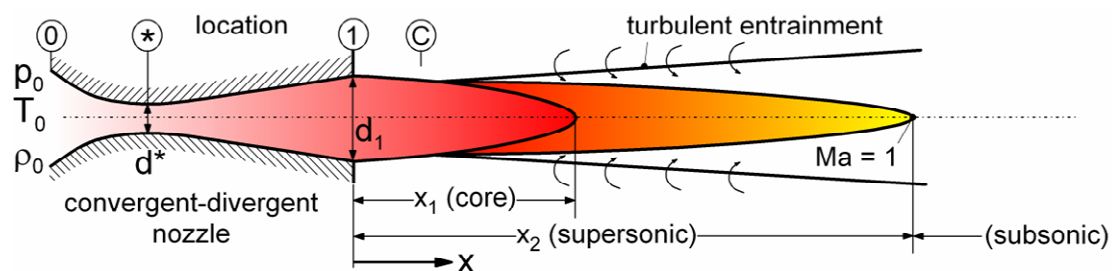


图 5 枪内超音速气体的射流制度

Fig.5 Flow regimes in a supersonic gas jet; (0) vessel, (\*) throat, (1) exit, (c) converter ambience

#### 3.2 等音速线

图 6 显示了氧枪枪体及其出口外的速度分布, 由图可知 (图中数据为  $\times 10^2$ ), 速度在喉口后面达到声速 (340m/s), 并逐渐增大, 在出口处达到最大值。从出口出来的射流, 由于激波的存在, 导致出口出线低速涡区, 即图中中心线上的黄色区域 (冲

击波损失)。

氧枪枪体及其出口的等音速线分布如图 7 所示, 它是超音速与亚音速的分界线, 在等音速线里靠近中心线的区域为超音速区, 而在等音速外面的区域为亚音速区。等音速线的分布情况为判断氧枪的射流强度提供了一定依据。

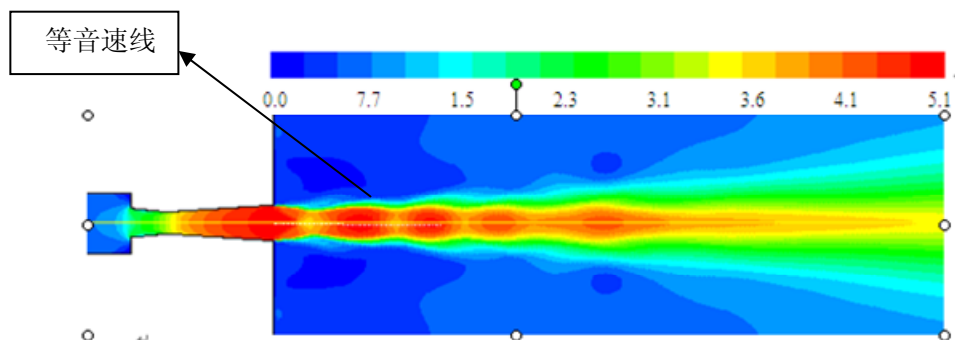


图 6 氧枪及其出口外的速度分布

Fig.6 The velocity distribution of the oxygen lance and the the export

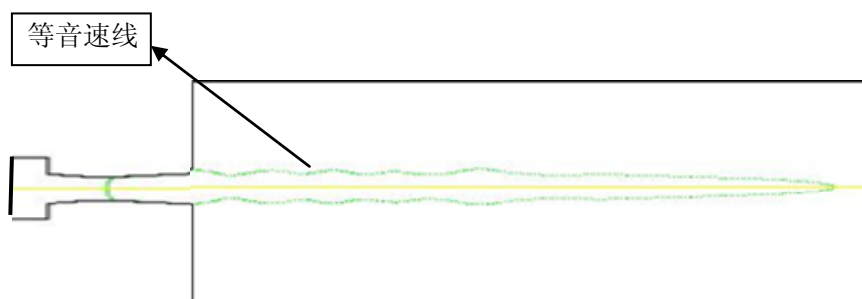


图7 氧枪及其出口外的等音速线分布

Fig.7 The equal speed of sound distribution of the oxygen lance and the the export

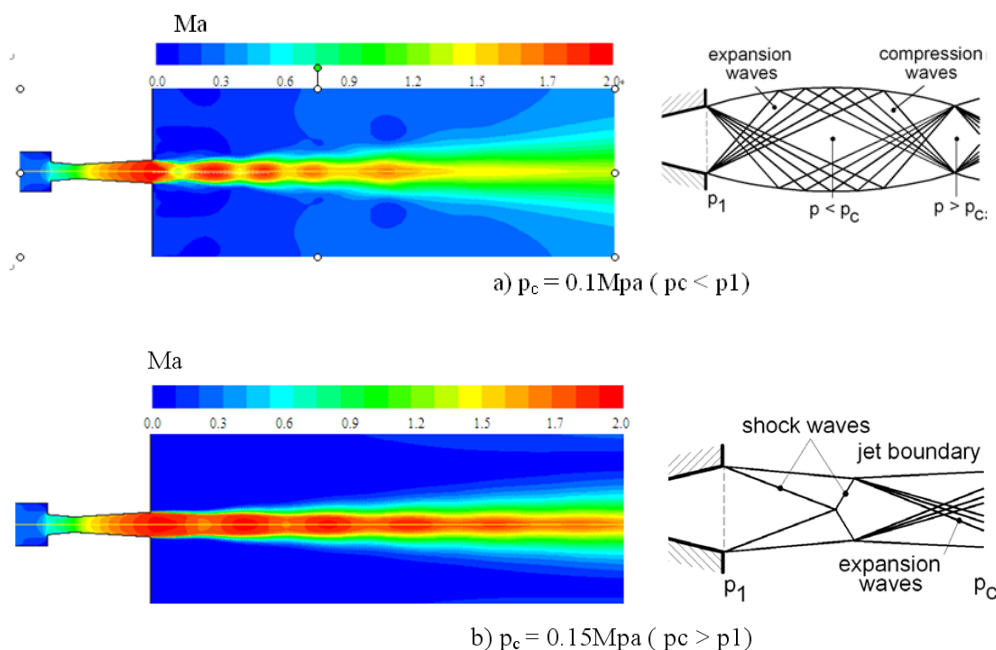
### 3.3 流场激波结构

激波是运动气体中的强压缩波,是由于当物体以超音速运动时,扰动来不及传到物体的前面去,结果前面的气体受到运动物体突跃式的压缩,形成集中的强扰动,这时出现一个压缩过程的界面。经过激波,气体的压强、密度、温度都会突然升高,而流速则突然下降。

如果 $P_c < P_1$ ,如图8(a)所示,超声速来流在壁面折转处产生一扇型膨胀波组,此扇型膨胀波是无限多的马赫波所组成,经过膨胀波组时,气流参数是连续变化的,其速度增大,压强、密度和温度相应减小,流动过程为绝热等熵的膨胀过程。沿膨胀波束的任一条马赫线,气流参数不变,固每条马

赫线也是等压线。而且马赫线是一条直线。

如果 $P_c > P_1$ ,如图8(b),在喷嘴的出口出现一个斜激波。斜激波伴随着变量 $P$ ,  $T$ ,  $\rho$ ,  $s$ ,  $Ma$ 和 $u$ 的不确定的变化,即变量 $P$ ,  $T$ ,  $\rho$ ,  $s$ 的增加和 $Ma$ 和 $u$ 的减小。在冲击波的下游,亚音速速度是永远存在的。自由射流受到制约且下游射流的中心气压上升到高于背压水平,导致静压水平在射流过程中不断下降。气流经过斜激波时指向必然突然折转。因而有两个角度,一个是波阵面与来流指向之间的夹角,或称激波斜角,另一个是波后气流折离原指向的折转角。角越大,激波越强。角小到等于马赫角时,激波就减弱到变成微弱扰动波或马赫波了。

图8 背压  $P_c$  对  $Ma$  数的影响Fig.8 Influence of the converter back-pressure  $p_c$  on the  $Ma$  distribution



### 3.4 对枪头应用的影响

图9显示了实际工作一定时间后的喷嘴实物照片,从照片中可以看出喷嘴出口已损坏,出现

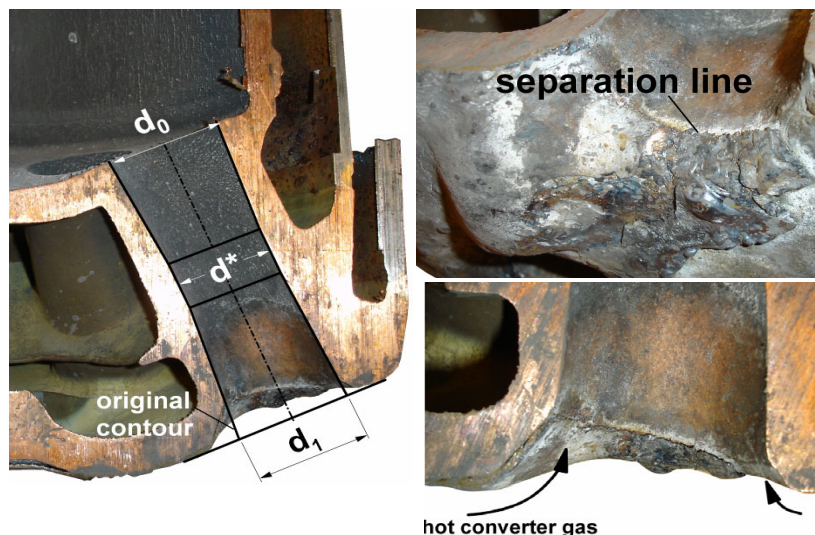


图9 工作一定时间后的喷嘴实物图片  
Fig.9 The physical picture of the nozzle of working for a certain time

## 4 结论

(1) 建立了转炉用超音速氧枪的数学模型,阐述了超音速氧枪的射流制度,为以后的模拟计算提供了依据。

(2) 数值模拟结果表明,流场的激波结构对射流流场的影响较大,直接影响氧枪的寿命,所以激波结构的模拟结果为氧枪结构的优化设计提供了一定的理论基础。

(3) 由数值计算结果与实物对比的一致性,说明了数值模拟的可行性。

## References (参考文献)

- [1] Hans-Jürgen Odenthal, William H. Emling, Jens Kempken, Jochen Schlüter, SMS Demag AG. Advantageous Numerical Simulation of the Converter Blowing Process[J]. Eduard-Schloemann-Straße 4, 40237 Düsseldorf, Germany.
- [2] Zhu Miao-yong. Modern Metallurgy(Ferrous Metallurgy Research) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005. 朱苗勇. 现代冶金学(钢铁冶金卷) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [3] Sun Zheng-mao, Song Zhan, Zhang Ping, Jiang Shao-hai, Sheng Yan. Optimum Design of Spray Nozzle of Oxygen Lance for Converter and its Application [J]. Angang technology, 2000,(9):4~9. 孙正茂,宋战,张评,蒋绍海,绳艳. 转炉氧枪喷头的优化设计与应用[J]. 鞍钢技术,2000,(9):4~9.

了一定角度的张角,射流经过的枪体路径已缩短,即分离线向前移动,并变得不规则,使高温气体在此产生回流,损毁喷嘴。

- [4] Chen Shou-qian, Sun Zong-hui, Miao Gang, Xie Jing-quan. Discussion on Improving Technique of Using Oxygen [J]. Shandong Metallurgy, 2003,(10):50~52. 陈守乾,孙宗辉,苗刚,谢京全. 提高用氧技术的探讨[J]. 山东冶金,2003, (10): 50~52.
- [5] Yang Wen-yuan, Zheng Cong-jie, Cui Jian, et. Current State of Oxygen Steelmaking in China and Suggestions on Further Development [J]. Steelmaking, 2001, 17(3):1-5. 杨文远, 郑丛杰, 崔健, 等. 我国炼钢用氧技术的现状及今后工作的建议[J]. 炼钢, 2001, 17 (3): 1-5.
- [6] Wang Zhen-zhou, Zhu Rong, Jiao Bing, et. Oxygen-Blowing of Intensify Smelting in Arc Furnace[J]. Industrial Furnace, 2005,27(2):11-13. 王振宙, 朱荣, 焦兵, 等. 强化冶炼用氧技术在电炉上的应用[J]. 工业炉, 2005, 27 (2): 11-13.
- [7] Yang Wen-yuan, Chen E. Discussion on Characteristics of Spray Nozzle of Oxygen Lance for Converter and Its Metallurgical Performance[J]. Steelmaking, 1992, (2): 42. 杨文远, 陈峨. 转炉氧枪喷头射流特性及其冶金效果的研究[J]. 炼钢, 1992, (2): 42.
- [8] Zhang Chun-xia et. Study On The Parameters Of Velocity Decay and Distribution For The Supersonic Jet Of Bof Oxygen Lance[J]. Steelmaking, 1995, (9): 10~13. 张春霞等. 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, (9): 10~13.
- [9] Han Zhan-zhong, Wang Jing, Lan Xiao-ping. The Modeling and Application of Simulation in Fluids Engineering with Fluent[M]. Beijing Institute of Technology Press, 2004. 韩占忠, 王敬, 兰小平编. FLUENT流体工程仿真计算实例与应用, [M]. 北京理工大学出版社, 2004.