

· 试验研究 ·

### 单孔氧枪喷头射流流场的仿真研究

刘 坤<sup>1,3</sup> 朱苗勇<sup>1</sup> 高 茵<sup>2</sup> 李艳杰<sup>3</sup>

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 中钢集团鞍山热能研究院, 鞍山 114004;  
3 辽宁科技大学材料学院, 鞍山 114044)

**摘 要** 借助商业软件 CFX4.4 对单孔氧枪 Laval 喷管内及喷管外的射流场进行数值模拟, 分析了不同滞止压力下喷管外的轴对称射流流场的分布情况, 并验证了  $k-\epsilon$  湍流模型的适用性。结果表明, 300 K 环境温度下, 射流的径向横截面面积受轴向至喷口的距离影响较大, 而在不同滞止压力下 (0.596 ~ 0.996 MPa) 射流沿纵向扩展变化不大; 在相同滞止压力下, 随环境温度增加, 射流径向扩展明显加大。

**关键词** 单孔氧枪 Laval 喷管 轴对称湍流射流 数值模拟

### Imitation Study on Flow Field of Nozzle Jet of Single Hole Oxygen Lance

Liu Kun<sup>1,3</sup>, Zu Miaoyong<sup>1</sup>, Gao Yin<sup>2</sup> and Li Yanjie<sup>3</sup>

(1 Materials and Metallurgy School, Northeastern University, Shenyang 110004;  
2 Anshan Research Institute of Thermo-energy, Zhong Gang Group, Anshan 114004;  
3 Materials School, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114044)

**Abstract** The numerical simulation of jet flow field of inner and out of Laval tube has been carried out by commercial software CFX4.4, and the fluid flow distribution of axis symmetry turbulence jet out of tube with different stagnation pressure was analyzed to verify the  $k-\epsilon$  turbulence model. Results showed that at environment temperature 300 K, the cross section area of jet flow was obviously influenced by the distance from cross section to jet nozzle, but with different stagnation pressure (0.596 ~ 0.996 MPa) the change of jet flow expanding along radial was minor; and with same stagnation pressure the jet flow expanding along radial obviously increased.

**Material Index** Single Hole Oxygen Lance, Laval Tube, Axis Symmetry Turbulence Jet, Numerical Simulation

氧枪是炼钢生产中向炉内吹氧的专用设备, 是炼钢生产的关键设备之一。本研究借助商业软件 CFX4.4 对单孔氧枪 Laval 喷管内及喷管外的射流场进行了数值模拟, 分析不同滞止压力下喷管外轴对称射流流场的分布, 并验证  $k-\epsilon$  湍流模型的适用性。

#### 1 模型的建立及计算条件

可压缩湍流流场几何建模与网格划分见图 1。本文采用迪卡尔坐标系下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  $k-\epsilon$  模型)。

可压缩湍流流场几何尺寸见图 2。Laval 喷管出口面积记为  $A_e$ , 喉口面积记为  $A^*$ , 出口直径  $d_e = 22$  mm, 喉口直径  $d^* = 17$  mm, 环境压力  $p_b = 1.02$  个大气压保持恒定, 出口马赫数  $Ma$  为 1.99, 先确定入口处滞止压力的大小。

##### 1.1 入口处三个划界压力的确定

变工况下的拉瓦尔喷管内的流动, 设在缩放喷

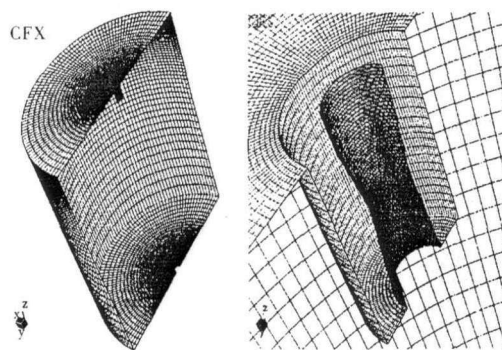


图 1 可压缩湍流流场几何建模与网格划分  
Fig. 1 Geometry modeling and grid divides of compressible turbulence field

管入口处的压强为  $p_0$ , 其背压为  $p_b$ , 由于  $p_0$  和  $p_b$  的相对大小的不同在喷管内形成了各种流动状态<sup>[1]</sup>。在这里  $p_b = 1.02 \times 1.013 25 \times 10^5$  Pa。所以有必要讨论滞止压力  $p_0$  的变化引起的流动变化。

由  $\frac{A_e}{A^*} = \left(\frac{d_e}{d^*}\right)^2 = 1.674 7$ , 查等熵流函数表对应有两个马赫数  $Ma$ , 其中  $Ma' = 0.375 < 1$ ,  $Ma'' =$

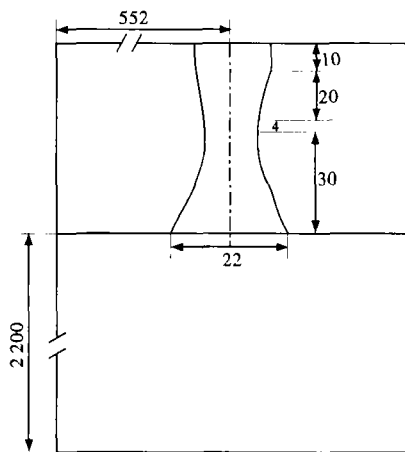


图 2 可压缩湍流流场几何尺寸简图

Fig. 2 Schematic of compressible turbulence field geometry dimension

1.  $1.990 > 1$ 。可求得划界压力如下:

$Ma' = 0.375$  时,  $\frac{p}{p_0} = 0.9075$ , 此时求得滞止压

力  $p_{01} = \frac{p_b}{0.9075} = 1.1388 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

$Ma'' = 1.990$  时,  $\frac{p}{p_0} = 0.1294$ , 此时求得滞止压

力  $p_{02} = \frac{p_b}{0.1294} = 7.96 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

当管口产生激波时, 来流马赫数  $Ma = 1.990$ , 由普朗特公式得到激波前后的压力比<sup>[1]</sup>:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} Ma^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} = \frac{2.8}{2.4} \times 1.990^2 - \frac{0.4}{2.4} = 4.453$$

波前压力:

$$p_1 = \frac{p_2}{4.453} = \frac{1.0335 \times 10^5}{4.453} = 0.232 \times 10^5 \text{ Pa}$$

此时的滞止压力:

$$p_{03} = \frac{p_1}{0.1294} = 1.79 \times 10^5 \text{ Pa}$$

以上求得的  $p_{01}$ 、 $p_{02}$ 、 $p_{03}$  为 3 个划界压力。

$p_0 = p_b$ , 管内无流动;

$p_0 > p_b$ , 管内产生流动, 随着  $p_0$  的增加, 管内可能出现以下 3 种情况: (1) 喉部未达音速; (2) 喉部达音速但扩张段为亚音速; (3) 扩张段变为超音速流动。具体分析如下:

$p_b < p_0 < p_{01}$  时, 管内全部流动为亚音速气流, 出口压力  $p_2 = p_b$ ;

$p_0 = p_{01}$  时, 此时喉部达到音速, 其余截面为亚音

速, 出口压力  $p_2 = p_b$ ;

$p_{01} < p_0 < p_{03}$  时, 喉部达到临界状态, 在扩张段内将出现非等熵流动, 在某一截面上产生了正激波, 激波前为超音速流动, 后面为亚音速流动。随着  $p_0$  的增加, 激波逐渐移向出口, 出口压强  $p_2 = p_b$ ;

$p_0 = p_{03}$  时, 激波出现在喷管出口处;

$p_{03} < p_0 < p_{02}$  时, 喷管的喉部达到音速, 扩张段为超音速流动, 此时在管外产生斜激波或拱型激波, 出口压力  $p_2 < p_b$ ;

$p_0 = p_{02}$  时, 喷管的喉部达到音速, 扩张段为超音速流动, 压力逐渐减小, 到出口时等于  $p_b$ ;

$p_0 > p_{02}$  时, 气流在喷管内为等熵的流动直至出口, 但出口处压力大于背压  $p_b$ , 此时将在出口处以膨胀波的形式继续膨胀, 此状态称膨胀不足。

## 1.2 边界条件的确定

在计算领域中应用的边界条件主要是: 入口处 (在收缩段) 的总压及温度和离喷管出口很远 (100 倍直径) 处的周围压力相等, 离喷管出口很远处速度将变成亚音速。设置入口处 (在收缩段) 的总压及温度和离喷管出口很远处的周边环境压力及温度。

## 2 数值模拟结果分析

在不同的驱动压力和环境温度条件下, 分析研究射流径向扩展的变化规律, 为进一步优化设计氧枪实际操作工艺曲线提供理论依据。

### 2.1 环境温度为 300 K 时, 在不同滞止压力下射流纵向各横截面的变化

在保持环境温度为 300 K 不变的条件下, 滞止压力小于或大于设计工况压力 0.796 MPa 条件下射流流场的变化规律。为使研究结果更具普遍性, 本文采用非工况程度来表示即实际滞止压力与设计工况压力之比, 用“ $n$ ”来表示。

保持环境温度为 300 K, 当非工况程度分别为  $n = 0.75$ 、 $n = 0.88$  (即滞止压力分别为 0.596 MPa、0.696 MPa) 与设计工况条件下, 分析与研究射流径向扩展的变化规律。

表 1 为保持环境温度 300 K, 滞止压力小于设计工况压力 0.796 MPa 情况下, 不同的滞止压力, 射流的径向横截面的扩展变化不大, 基本趋势是一致的。随着测点至出口距离的增加, 射流的径向横截面成比例增加。可以说明, 在保持环境温度为 300 K, 滞止压力小于设计工况压力 0.796 MPa 情况下, 射流的径向横截面面积主要受轴向至喷口距离的影响较大, 而不同的滞止压力, 射流的径向横截面的扩

表 1 不同滞止压力条件下射流径向扩展的变化  
 Table 1 Change of jet flow expanding along radial with different stagnation pressure

X/De	Y/De				
	n = 0.75 (0.596 MPa)	n = 0.88 (0.696 MPa)	n = 1.00 (0.796 MPa)	n = 1.13 (0.896 MPa)	n = 1.25 (0.996 MPa)
28	3.75	3.81	3.65	3.63	3.64
36	5.05	5.12	5.23	5.19	5.22
45	5.69	5.74	5.81	5.78	5.80
55	6.20	6.26	6.32	6.33	6.35

注: X- 测点至喷管出口的距离; De- 喷管出口直径; Y- 测点至喷管轴中心线的距离。

展变化不大。

保持环境温度为 300 K, 当非工况程度分别为  $n = 1.13$ 、 $n = 1.25$  (即滞止压力分别为 0.896 MPa、0.996 MPa) 与设计工况条件下, 分析与研究射流径向扩展的变化规律。

由表 1 可见, 同样保持环境温度为 300 K, 滞止压力大于设计工况压力的情况, 与滞止压力小于设计工况压力的 0.796 MPa 情况下射流径向扩展变化规律大体相同。

### 2.2 在不同滞止压力、环境温度下射流纵向各横截面的变化规律

分别取距离 Laval 喷管出口 0.5, 0.8, 1.2 m (相当于  $X/De = 22.7, 36.4, 54.5$ ) 处, 分析不同滞止压力、环境温度下射流纵向各横截面的变化规律。

图 3(a, b) 分别为驱动压力 0.796 MPa 和 0.896 MPa 条件下, 射流径向扩展 (冲击面积) 随环境温度的变化曲线图。由图 3 可以看出, 在同一温度下, 不同截面位置上, 氧枪冲击面积的大小随驱动压力的变化比较小; 而同截面位置上, 随环境温度的提高,

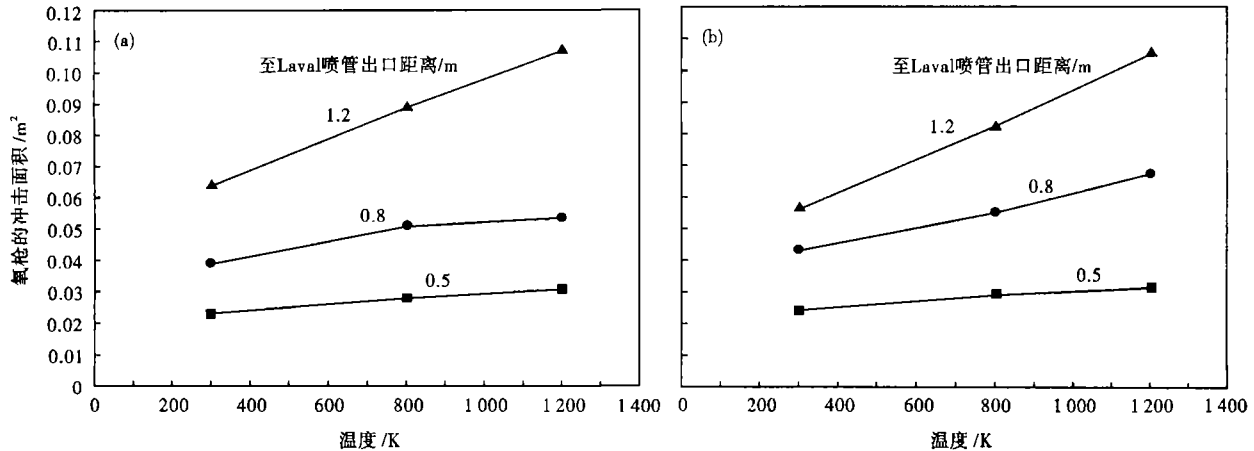


图 3 驱动压力为 0.796 MPa (a) 和 0.896 MPa (b) 时氧枪冲击面积与外界温度的关系

Fig. 3 Relation between oxygen lance impact area and environment temperature with driving pressure 0.796 MPa (a) and 0.896 MPa (b)

氧枪冲击面积随距喷口距离的增大而有明显增大的趋势; 在同一温度下, 随距喷口距离的增加, 氧枪冲击面积的变化比较明显。

### 3 结论

(1) 环境温度不变, 在不同滞止压力下, 射流沿纵向不同横截面变化不大, 基本趋势是一致的; 但随着测点距离逐步增长, 射流的径向半径呈现出逐渐增长趋势。

(2) 在相同滞止压力的条件下, 随环境温度的

增加, 射流径向扩展明显增大。

国家自然科学基金资助项目 (编号: 50574007)

### 参考文献

1 王保国, 刘淑艳, 黄伟光. 气体动力学. 北京: 北京理工大学出版社, 2005

刘 坤 (1965-), 女, 博士生, 教授, 1990 年鞍山钢铁学院毕业, 从事冶金传输方向研究。

收稿日期: 2007-03-26

欢迎订阅 2008 年《特殊钢》杂志

(邮发代号: 38-183)