

· 试验研究 ·

超音速氧枪射流特性的数值模拟

包丽明¹ 刘坤² 吕国成¹

(1 吉林电子信息职业技术学院冶金学院, 吉林 132021; 2 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114044)

摘要 利用 GAMBIT 建立了轴向计算长度 2 200 mm 和径向计算长度 800 mm 的超音速氧枪的数学模型, 并采用 FLUENT 软件对氧枪射流特性进行数值仿真研究。分析了单孔氧枪超音速射流特性, 以及操作压力 (0.6 ~ 1.0 MPa) 和环境温度 (298 ~ 1 873 K) 对流动特性的影响。结果表明, 入口滞止压力在设计压力 $\pm 25\%$ 内对射流轴向衰减及径向扩展影响不大, 其与射流的超音速区长度呈二次曲线关系变化, 随环境温度升高, 射流轴向衰减变缓慢, 核心区长度增加, 超音速区长度和环境温度呈线性关系, 环境温度对射流径向影响很小。

关键词 超音速氧枪 数值模拟 操作压力 环境温度 超音速区域长度

Numerical Simulation on Jet Characteristic of Supersonic Jet Oxygen Lance

Bao Liming¹, Liu Kun² and Lü Guocheng¹

(1 Metallurgical Institute, Jilin Professional Technology College of Electronic Information, Jilin 132021; 2 School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114044)

Abstract A mathematical model for supersonic jet oxygen lance with axial calculated length 2 200 mm and diametrical calculated length 800 mm is established by using GAMBIT and the numerical simulation study on characteristics of the supersonic jet oxygen lance has been carried out by using FLUENT software. The supersonic jet characteristics of single-hole oxygen lance and the effect of operating pressure (0.6 ~ 1.0 MPa) and ambient temperature (298 ~ 1 873 °C) on flowing characteristics are analyzed. Results show that the effect of stagnating pressure at entrance within designing pressure $\pm 25\%$ on jet flow axial weakening and diametrical expanding is not obvious; the relation between stagnating pressure and length of flow jet supersonic region presents quadratic form curve change; with enhancing ambient temperature the jet flow axial weakening is slow and the length of core region increases, the length of supersonic jet region is linear with the ambient temperature, and the effect of ambient temperature on diametrical jet flow is minor.

Material Index Supersonic Jet Oxygen Lance, Numerical Simulation, Operating Pressure, Ambient Temperature, Length of Supersonic Jet Region

超音速氧枪是氧气转炉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。超音速氧枪射流对熔池的搅拌作用^[1]主要是由射流本身的特性决定的, 氧枪射流特性关系到炼钢的工艺操作和质量控制。

对氧枪射流流动状况进行计算, 在数值模拟中首先要生成相关计算区域的网格。这需要根据研究内容进行几何建模, 将描述氧枪射流的几何尺寸信息用软件绘制出来, 然后将这些几何信息传递到网格生成软件中所需的计算网格^[2]。本文利用 GAMBIT 原理建立了超音速氧枪的数学模型, 采用 FLUENT 软件对氧枪射流特性进行了数值仿真研究。

1 超音速氧枪几何模型的建立

炼钢过程中, 氧枪射流是由 Laval 喷管产生的超音速轴对称湍流自由射流, 由于主要分析射流的特性, 故省略了氧枪本身的复杂结构, 把研究的对象简化为单孔 Laval 喷管, 以及外部的无限大空间。

本文氧枪 Laval 喷管的结构尺寸依据生产中的氧枪按比例缩小而设计, 基本结构尺寸如图 1 所示。

在射流的轴向上计算长度为 2 200 mm, 径向上的计算长度为 800 mm。具体氧枪射流模型的几何平面如图 2 所示。

2 超音速氧枪射流流场特征的数值模拟分析

2.1 超音速氧枪射流特性分析

数值模拟条件: 滞止压力- 设计工况 0.8 MPa^[2,3], 环境温度- 常温 (298 K), 模拟气体- 空气。

从图 3(a, b) 中可以看出, 在常温下, 射流由喷

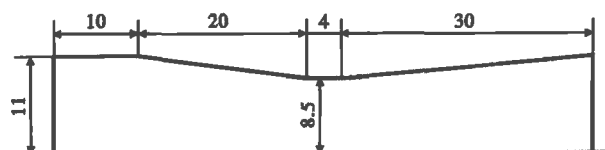


图 1 Laval 喷管的几何结构尺寸

Fig. 1 Geometry structure size of Laval nozzle

管流出后,与周围静止流体产生能量交换,把原来处于静止的流体卷吸到射流中,射流的边界不断向外扩展,从而使射流的速度开始降低,随着卷吸量的增加,速度逐渐衰减为0。射流的核心区长度为6~7 De,这与理论计算和实测的结果范围一致^[4,5],说明了计算模型的选择合理性。在核心区之后,射流因强

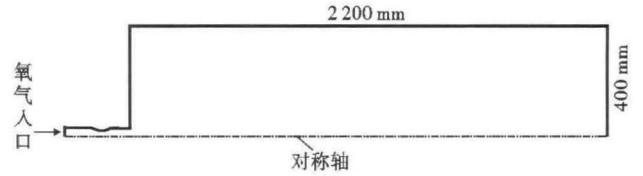


图 2 氧枪射流模型的几何结构平面尺寸
Fig. 2 Geometry structure plane size of oxygen lance jet model

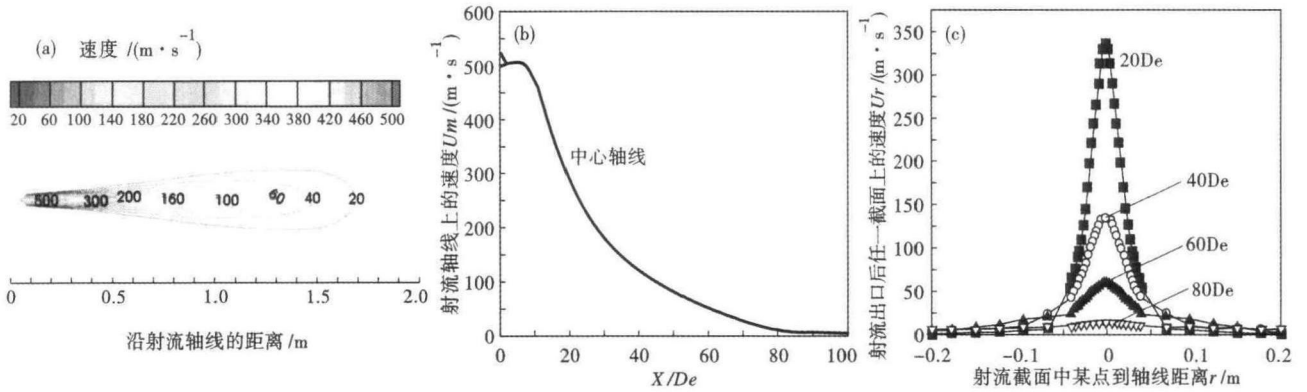


图 3 超音速射流轴向中心面上的速度场分布等值线图(a);超音速射流的中心轴线上速度衰减曲线;X-射流轴线上任一点到出口的距离,De-氧枪喷头出口直径(b);常温下超音速射流流场不同断面的速度分布(c)

Fig. 3 Distribution magnitude of velocity field at axial central section of supersonic jet (a); weakening curve of velocity at central line of supersonic jet, X- distance of any point at jet axial to outlet, De- diameter of outlet of oxygen lance nozzle (b); velocity distribution of supersonic jet flow field at different section, atmospheric temperature (c)

烈的吸引周围同密度的气体,使射流中心线上的速度衰减很快,而在30 De后,射流的衰减变得缓慢。

从图3(c)中可以看出,射流流场各个断面分布性质相似,轴线上的流速较大,距轴线越远流速越小,最终衰减为0。在20 De时,射流中心的速度可以达到300 m/s以上,接近于音速,但在射流的径向上速度的衰减很快,射流的半径很小。在40 De时,射流中心速度已经衰减到150 m/s,射流的径向扩展较大,从而导致射流的影响区域变大。对于60 De,射流的径向速度衰减比较缓慢,但射流的半径较大。射流到达80 De时,射流中心速度已经很小,射流衰减将要结束,射流将不再影响以后的区域。

2.2 操作压力对射流流场的影响

模型的理论计算滞止压力为0.8 MPa^[6],根据实际冶炼情况,操作压力在一定范围内波动是允许的,所以模拟选取的入口滞止压力在设计压力的25%上下波动。具体模拟条件:滞止压力0.6、0.8、1.0 MPa;出口压力0.103 MPa;环境温度- 常温(298 K)。

图4(a)为不同滞止压力下射流中心线上的速度的变化情况,压力为0.6、0.8、1.0 MPa时的核心区长度均在6~8 De,所以滞止压力对射流的核心区长度影响不大。随着入口滞止压力的增加,射流的衰减变慢,但减缓的幅度不大。当滞止压力为0.6 MPa时,射流速度衰减较快,实际氧枪操作中很难满足冶炼要求。而滞止压力为1.0 MPa时,射流速度衰减也变得缓一些,产生的膨胀波对其影响不是很大,所以实际的操作可以略大于理论设计的压

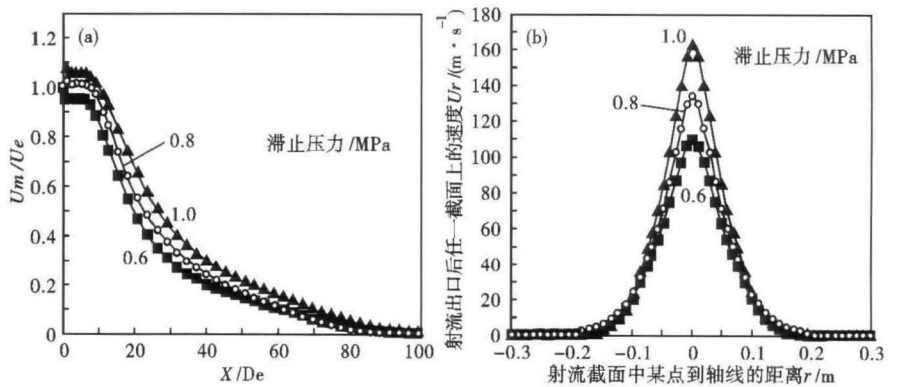


图 4 不同滞止压力下射流中心线上的速度的变化,U_e-射流出口的速度(a);不同滞止压力下同一截面上超音速射流流场的速度分布(b)

Fig. 4 Velocity change along jet central line at different stagnate pressure, U_e- velocity of jet flow at outlet (a); velocity distribution of supersonic jet flow field at same section with different stagnate pressure (b)

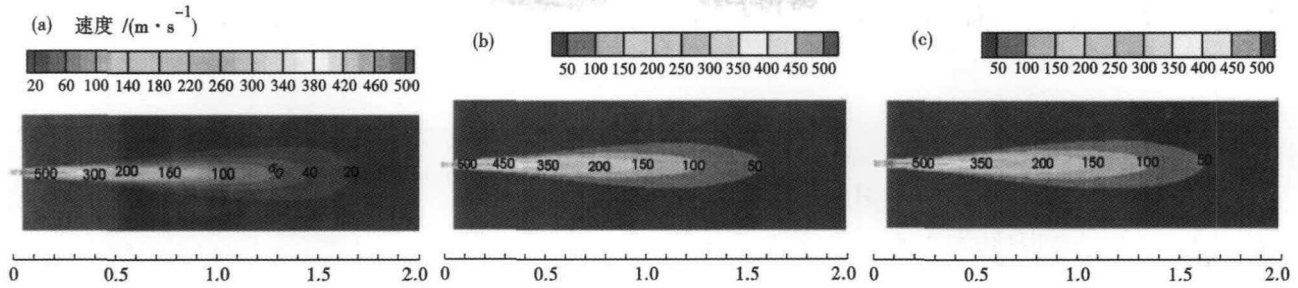


图5 射流流场的轴向中心截面的速度云图:(a)298 K;(b)1273 K;(c)1873 K

Fig.5 Velocity cloud of supersonic jet flow field at axial center section: (a) 298 K; (b) 1273 K; (c) 1873 K

力范围。

图4(b)为不同滞止压力下在距离出口40 De的截面上的速度的分布情况,可以看出在距离出口相同的截面位置上($X = 40 De$),射流在中心速度随着滞止压力的增加而增大,随着射流半径的增加而迅速衰减,在直径为0.1 m的范围内速度由100 m/s以上衰减为20 m/s以下。而滞止压力的增加对于径向上的扩展不是很明显,这说明在一定的枪位下,氧枪入口滞止压力的变化对于氧气射流的冲击面积影响很小,所以使用单孔氧枪吹炼,利用改变操作压力很难达到冶炼所需要的冲击面积。

2.3 环境温度对射流流场的影响

由于实际炼钢过程中炉膛内温度要高达1873 K左右,即射流射入到高温介质中,而温度的升高将会对射流流场产生很大的影响。对超音速氧枪在不同温度下的射流流场进行了模拟计算,计算结果和分析如图5。

从图5(a,b,c)可以直观看出,温度对射流的影响比较大,由于环境温度升高,导致环境介质的密度减小,吸引了更大体积的周围气体,使得射流轴线上速度衰减变慢,射流的影响区域变大。

图6(a)为不同环境温度下射流中心线上速度的变化情况,外界温度的升高,使射流中心的速度衰减变慢。当环境温度为1873 K时,射流的核心区长度增加明显,约为15 De。因温度升高致使周围静止气体的密度变小,从而导致核心区后面射流的衰减相对于常温时要慢一些。从图6(a)中可以看出,速度衰减在更大的范围内呈现出规律性的变化,即随着温度的增加,射流核心区后面的衰减由曲线逐渐呈直线变化。

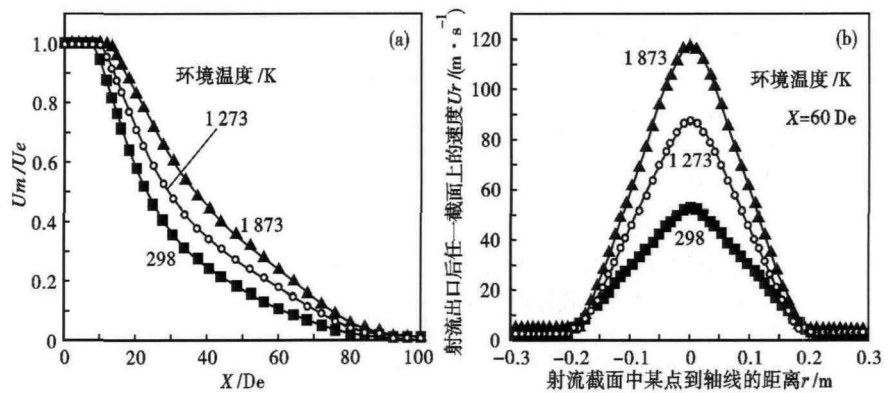


图6 环境温度对射流中心线上速度的变化影响(a);不同环境温度下同一截面上的速度衰减分布(b)

Fig.6 Influence of ambient temperature on velocity change along central line of supersonic jet (a); distribution of velocity weakening at same section with different ambient temperature (b)

图6(b)为不同温度下射流同一横向截面($X = 60 De$)速度的分布情况。从图6(b)可以看出,常温时射流的中心速度在60 De处已经衰减到60 m/s以下,在径向上的扩展比较明显。随着温度的升高,射流的中心速度衰减缓慢,当温度为1873 K时,射流中心的速度仍能达到120 m/s。而径向扩展情况和常温时的接近,说明在同一枪位下,温度的变化对射流的冲击深度影响较大,而对射流的冲击面积影响不是很大。

2.4 超音速区域长度的变化规律

由拉瓦尔喷管流出的超音速射流结构首先有一段势流核心区,其轴线速度保持不变,四周由于与炉内气体进行强烈的动量、质量及热量的传递而使其速度下降,形成边界层。此后,射流轴线速度开始下降,直到降至音速,这段距离被称为超音速区域长度 L_s (或叫做超音速核心流长度^[7])。再后面就进入亚音速完全展开流动区。

由于超音速区域长度可以直观描述超音速射流的速度衰减快慢,也是设计和掌握超音速射流特性的关键参数。本文使用马赫数为1.99的拉瓦尔喷

头,保持出口处压力不变,对超音速射流的操作压力以及环境温度的变化来进行数值模拟,其结果如图 7(a)所示。

从图 7(a)中可以看出,随着入口滞止压力与出口外界压力比值的增加,射流的超音速区域长度在增加,但是增加的幅度在不断减小,即二次曲线的斜率在不断减小,如果依靠加大氧枪射流的入口操作压力来增加射流的冲击深度是不合适的。从能量损失的角度看,滞止压力的提高势必造成出口产生膨胀波,不但不能最大限度的将压力能转化成为动能,而且一味地增加滞止压力将会造成设备的耗损和能量的浪费。

对模拟数据进行多项式拟合,得到关系式(1):

$$\frac{L_s}{D_e} = 1.26 + 2.85 \frac{P_0}{P_b} - 0.08 \left(\frac{P_0}{P_b} \right)^2 \quad (1)$$

式中: L_s - 超音速区长度/m; D_e - 喷管出口直径/m; P_0 - 喷管入口滞止压力/Pa; P_b - 出口外界压力/Pa。

环境温度的升高将会使射流的速度衰减变慢。保持射流的入口滞止压力为设计压力,分别对不同环境温度下的射流进行了数值模拟,得到了超音速区域长度随温度的变化规律(图 7b)。

从图 7(b)可以看出,环境温度的升高使射流的超音速区域长度变长,并且呈直线规律变化。说明射流射入到高温的环境中,会使射流中心速度的衰减变慢,这是由于高温环境下气体的密度很低,产生体积热膨胀,从而使射流的速度衰减变慢。由图 7(b)直线的斜率可知,环境温度的增加使射流的超音速区域长度的增加不大。

对各点采用线性拟合,得出超音速区域长度与温度之间的关系式:

$$\frac{L_s}{D_e} = 15.7 + 0.00453 T \quad (2)$$

式中: T - 环境温度/K。

3 结论

(1)超音速氧枪射流轴向衰减和径向扩展规律的模拟结果和实际结果相符。

(2)对于超音速氧枪射流来说,入口滞止压力在设计压力上下 25% 范围内波动对射流的轴向衰

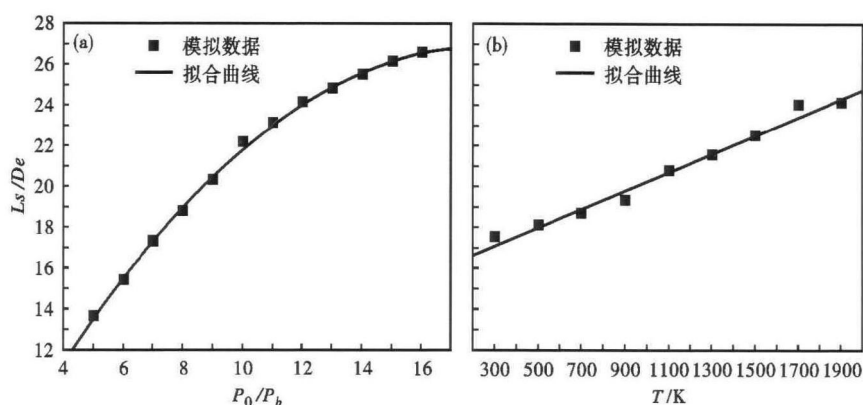


图 7 超音速区长度和入口滞止压力之间的关系(a);超音速区长度和环境温度之间的关系(b)

Fig.7 Relation between length of supersonic jet region and stagnant pressure at entrance (a); relation between length of supersonic jet region and ambient temperature (b)

减以及径向扩展影响不是很大,其与射流的超音速区域长度呈二次曲线 $\frac{L_s}{D_e} = 1.26 + 2.85 \frac{P_0}{P_b} - 0.08 \left(\frac{P_0}{P_b} \right)^2$ 变化。

(3)随着环境温度的升高,射流的轴向衰减变得缓慢,核心区长度变长,超音速区域长度和环境温度近似于呈直线 $\frac{L_s}{D_e} = 15.7 + 0.00453 T$ 变化,环境温度对射流径向上的影响很小。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 吕国成,刘坤.氧枪喷头 Laval 喷管内流场的数值模拟[J].特殊钢,2009,30(3):4-6.
- [3] 吕国成.超音速聚合射流氧枪射流特性的基础研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2009.
- [4] Chatterjee A. On Some Aspects of Supersonic Jets of Interest in LD Steelmaking[J]. Iron and Steel,1972(12):24-26.
- [5] Sarma B, Mathur P C, Engle D. Results of Oxygen Injection in the EAF with Praxair Coherent Jet Injector: A Novel Technology, Proceedings Electric Furnace Conference[C]. Iron and Steel Society, Warrendale, Pa,1997.
- [6] 刘坤.超音速聚合射流氧枪射流行为特征的数学物理模拟研究[D].沈阳:东北大学,2008.
- [7] 蔡志鹏,梁云,张春霞.化工冶金模型实验研究及其测试技术[M].北京:冶金工业出版社,2001.

包丽明(1983-),女,硕士(辽宁科技大学),讲师,2006年辽宁科技大学(本科)毕业,冶金工艺技术研究。

E-mail:baoliming0916@163.com

收稿日期:2014-02-25