

低密度伴随湍流流场的仿真研究

刘 坤^{1,2} 朱苗勇¹ 王滢冰² 毕晓夫²

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 辽宁科技大学材料学院, 鞍山 114044)

摘 要 借助商业软件 Fluent, 采用数值模拟的方法, 分析了副孔压力 0.12 ~ 0.20 MPa 时中心射流轴线上速度分布, 副孔压力和环境温度 (300 ~ 2 000 K) 对射流横截面速度分布的影响, 以及环境温度对中心射流轴线上速度衰减规律的影响。结果表明, 中心射流在高温低密度伴随流保护下, 可显著减少对周围介质的卷吸量, 更大程度减缓轴线上速度衰减, 使核心区长度明显增加。

关键词 数值模拟 低密度伴随 湍流射流

A Study of Imitation on Flow Field of Low-Density Concomitancy Turbulence

Liu Kun^{1,2}, Zhu Miaoyong¹, Wang Yingbing² and Bi Xiaofu²

(1 Materials and Metallurgy School, Northeastern University, Shenyang 110004;

2 Materials School, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114044)

Abstract The velocity distribution of centre axis jet flow with sub-hole pressure 0.12 ~ 0.20 MPa, the effect of sub-hole pressure and ambient temperature (300 ~ 2 000 K) on velocity distribution of jet cross section, and the effect of ambient temperature on rule of velocity attenuation at centre axis jet have been analyzed by commercial software Fluent and using numerical simulation method. Results showed that the amount of entrapped and absorbed ambient medium could obviously decreased as centre jet flow was protected by high temperature and low-density concomitancy flow and the attenuation of velocity of centre axis jet flow was slowed down to markedly increase the length of core zone.

Material Index Numerical Simulation, Low Density Concomitancy, Turbulence Jet

借助商业软件 Fluent, 采用数值模拟方法分析并选取了所选模型的适用性, 通过对数据进行分析和处理, 明确了低密度伴随射流的特性, 获得了有、无伴随流两种射流特性差异的重要数据和结论, 即低密度气体的伴随, 可以保护中心孔氧气射流, 减缓其轴向衰减及径向扩散, 使其在一定程度上保持相对凝聚的状态。

1 模型的建立及计算条件

图 1 为低密度伴随湍流射流流场的空间几何建模。

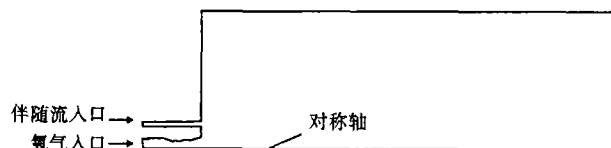


图 1 可压缩湍流流场空间几何建模

Fig. 1 Geometry modeling for compressible turbulence jet field

采用笛卡尔坐标系下平面对称稳态可压缩流动的控制方程形式^[1]:

(1) 连续方程; (2) 动量方程; (3) 能量方程;

(4) 标准化 $k-\epsilon$ 模型。

1.1 计算初始依据

环境压力 $P_b = 1.02$ 个大气压 (1.03×10^5 Pa) 保持恒定, Laval 喷管出口马赫数为 1.99, 入口处滞止压力 P_0 的变化将引起管内不同的流动过程, 并将进一步影响管外射流流场。

由理论分析^[2]可以确定, 当滞止压力取不同的数值, Laval 喷管内的流动情况具体归纳如下:

(1) 管内为亚音速流动时的压力范围 $0 \sim 1.14 \times 10^5$ Pa;

(2) 管内产生激波时的压力范围 ($1.14 \sim 1.79$) $\times 10^5$ Pa;

(3) 管外产生斜激波时的压力范围 ($1.79 \sim 7.99$) $\times 10^5$ Pa;

(4) 管外产生膨胀波时的压力范围大于 7.99×10^5 Pa。

1.2 边界条件

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。

1.3 副孔压力确定

主孔外加的环状副孔通以低密度的氦气,属于低密度同向伴随流的流动情况。

氦气在直通管道中的流动,流体的速度最大只能达到音速。根据理想气体定常等熵流动方程,当氦气在出口处刚好达到音速时即 $Ma = 1$ 时, $P_0 = 2.12 \times 10^5 \text{ Pa}$,此时若入口压力再增加,则在出口后剩余的压力将继续膨胀,压力能被转变为动能,氦气流的速度在出口后可达到超音速。使得整个流场中湍流度过大,模拟过程难以控制,模拟结果不具有真实可靠性。因此本模拟不考虑氦气压力超过临界值的状况,仅在临界值范围内取不同的压力来探讨对中心孔射流的流动状态影响。

2 数值模拟结果分析

2.1 副孔压力对中心射流轴线上速度衰减规律的影响

图2的环境温度为300 K,中心孔处于设计工况,无副孔伴随及副孔入口压力分别为0.12, 0.16, 0.20 MPa时,中心射流沿轴线的衰减情况。无副孔伴随下的模拟结果与文献[3]一致,验证了所采用数学模型的正确性。同时看出,随着副孔氦气压力的增加,核心区长度在18~30 De范围内呈增加趋势,速度衰减明显减缓,这是由于副孔氦气压力的提高导致氦气流量增加,有效伴随距离加长的缘故。

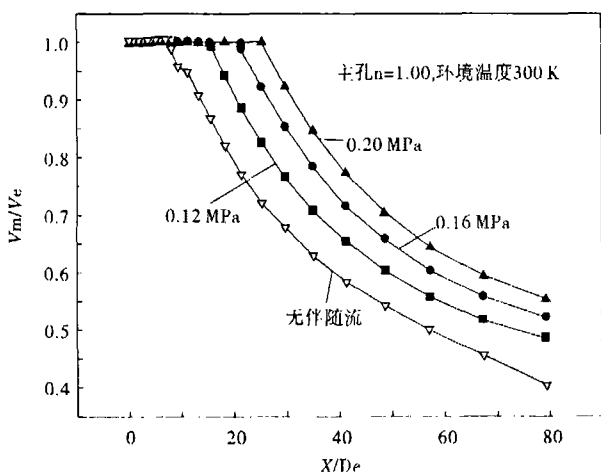


图2 中心射流轴线上速度分布: V_m -射流中心线上的速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); V_e -喷管出口速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); X -喷管与测点的距离/ m ; D_e -喷管出口直径/ m ; n -非工况程度

Fig. 2 Distribution of velocity of centre axis jet flow: V_m -velocity of jet flow at centre axis/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); V_e -velocity at outlet of jet tube/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); X -Distance between jet tube and measured spot; D_e -diameter of outlet of jet tube/ m ; n -non work condition

从图3速度场云图中可以看到射流流场的发展情况。图左边坐标表示速度值,单位是 m/s 。随着副孔压力的增加,氦气所产生的低密度保护区域在加长,这样中心射流的上游就处在低密度的环境中,减少了对周围介质的卷吸,使得射流核心区长度增大,且沿轴向速度的衰减变缓慢。

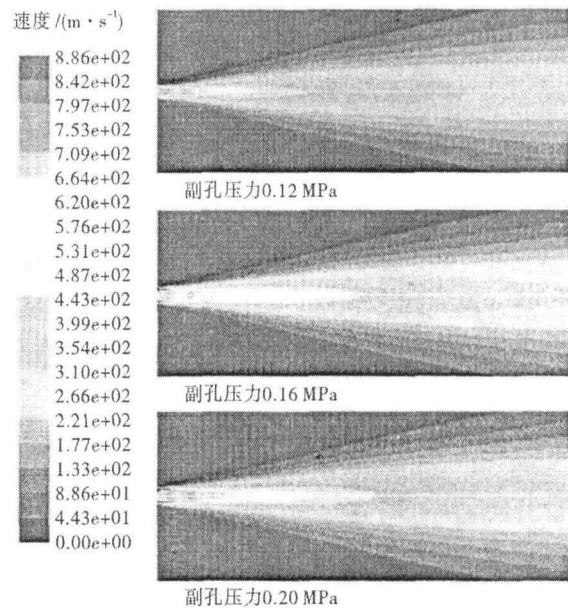


图3 不同副孔压力下射流速度场云图

Fig. 3 Nephogram of velocity field of jet flow with different sub-hole pressure

2.2 副孔压力对射流横截面上的速度分布的影响

如图4(a)所示,环境温度为300 K,主孔为设计压力,无副孔伴随及副孔压力分别为0.12, 0.16, 0.20 MPa时射流横截面上的变化情况。与无伴随流相比,射流不仅轴向速度衰减减缓且在距喷头出口为33 De的同一横截面上半径明显增大。即伴随流的存在使得射流在同样的出口距离内保持相对凝聚的状态,减小了射流的径向扩散。且随着伴随流压力的增加,射流的横截面只在半径为0.025 m的范围内有沿径向扩散的趋势,说明在距喷头出口同样距离时伴随流将比无伴随流具有更大的冲击面积。但伴随流压力的变化对射流的径向影响是微小的。

如图4(b)所示,主孔为设计压力,副孔压力为0.2 MPa,环境温度分别为1 000, 1 500, 2 000 K时,射流各横截面上的速度分布情况。可以看出随着环境温度的升高,射流流场在半径为0.175 m的范围内,射流径向扩散有增大的趋势,且轴向速度衰减减缓。对比发现伴随流压力对沿径向扩展的影响较

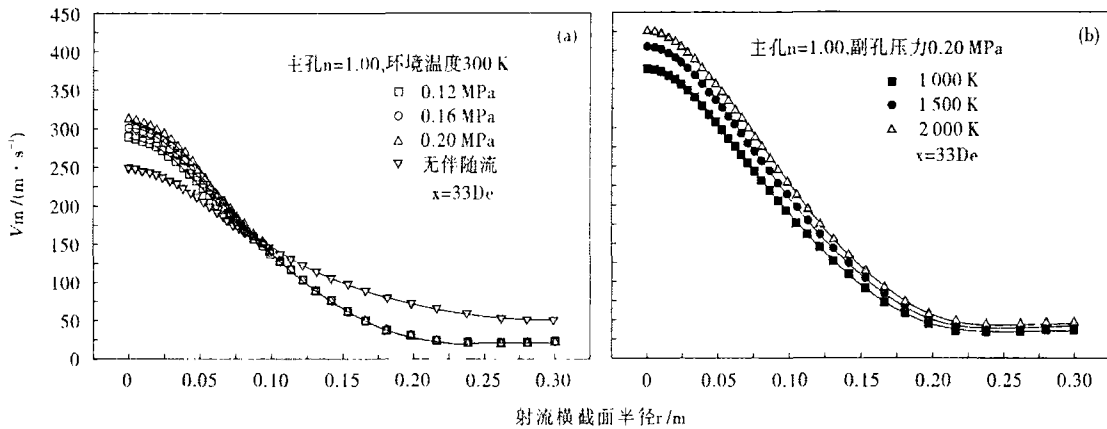


图 4 副孔压力(a)和环境温度(b)对射流横截面速度分布的影响

Fig. 4 Influence of sub-hole pressure (a) and ambient temperature (b) on distribution of velocity of jet cross section

小,相比之下环境温度对射流径向扩展增大趋势的影响是很明显的。

2.3 环境温度变化对中心射流轴线上速度衰减规律的影响

图 5 为中心孔处于设计工况时,环境温度分别为 1 000, 1 500, 2 000 K 无伴随流与环境温度为 2 000 K,伴随流温度为 3 000 K 情形下的中心射流轴线上的速度衰减情况比较。

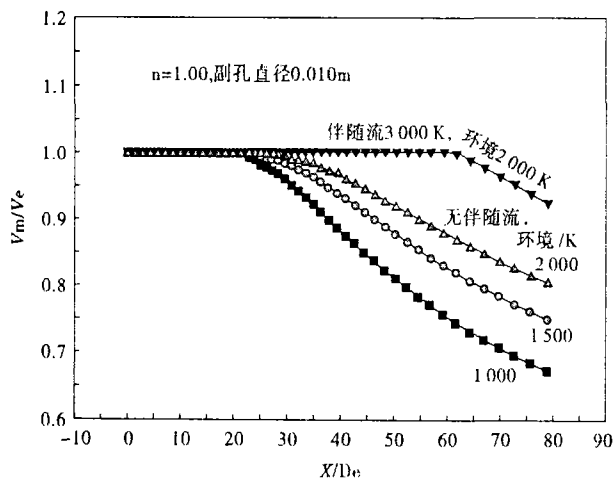


图 5 环境温度对中心射流轴线上速度衰减规律的影响

Fig. 5 Influence of ambient temperature on rule of velocity attenuation of jet centre axis

随环境温度的升高,可使中心射流轴线上的速度衰减变慢,但对核心区长度的影响不是十分明显;而当伴随流温度为 3 000 K 时,中心射流在 60 De 以后才出现逐渐衰减的趋势。由于伴随流温度升高,密度减小,使得中心射流在出口后处于密度更小的环境中,显著减小了对周围介质的卷吸量,更大程度地减缓了轴线上速度的衰减,核心区长度明显增加,使中心射流在距喷嘴更长距离内保持其初始

速度及冲击动量。

4 结论

(1) 伴随流的存在使得射流在同样的出口距离内保持相对凝聚的状态,减小了射流的径向扩散。说明在距喷头出口同样距离时,伴随流将比无伴随流具有更大的冲击面积。

(2) 随着伴随流压力的增加,核心区长度呈增加趋势,速度衰减明显减缓,但伴随流压力的变化对射流的径向影响是微小的。

(3) 无论传统氧枪射流还是低密度伴随氧枪射流,环境温度的升高都会导致射流径向膨胀,呈现出类似的规律性变化,可以使中心射流轴线上的速度衰减变慢,但对核心区长度的影响不是十分明显。

(4) 中心射流在高温低密度伴随流保护下,可显著减小对周围介质的卷吸量,更大程度减缓轴线上速度的衰减,核心区长度明显增加,使中心射流在距喷嘴更长距离内保持其初始速度及冲击动量。

国家自然科学基金资助项目(50574007)

参考文献

- 1 Shapiro A H. The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, New York: Ronald Press, 1953
- 2 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
- 3 Dahm W J A, Dimotakis P E. Measurements of Entrainment and Mixing in Turbulent Jets. AIAA J, 1987, 25: 1216

刘 坤(1965-),女,在读博士,辽宁科技大学毕业,教授,从事冶金传输方向研究。

收稿日期:2007-07-16