

湍流空气射流引射特性的模拟研究

王海兴¹ 陈熙² 潘文霞³

(1. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100083 ;
2. 清华大学工程力学系, 北京 100084 ;
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 本文采用数值模拟方法, 研究了湍流空气射流对环境空气的引射特性, 包括等温射流和非等温射流情形。结果表明, 由于射流不停地引射环境空气, 射流“势核”区下游的温度与轴向速度迅速降低; 射流引射量的模拟结果与文献中报道的、采用多孔壁技术进行实验所建立的关联式良好符合。

关键词 湍流射流; 引射; 数值模拟

中图分类号: TK124; TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)06-1025-03

MODELING STUDY ON THE ENTRAINMENT CHARACTERISTICS OF TURBULENT AIR JETS

WANG Hai-Xing¹ CHEN Xi² PAN Wen-Xia³

(1.School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2.Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3.Institut of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Modeling study is performed to reveal the special features of the entrainment of ambient air into turbulent air jets. Two different types of jet flows are considered, i.e. the isothermal and non-isothermal jets. It is found that due to the continuous entrainment of ambient air into the free jet, the temperature, axial velocity in downstream of the jet potential core rapidly decrease in the direction of jet axis. The modeling results concerning the jet entrainment rate agree well with those calculated by the experimental correlation built in the literature for the gas jet entrainment using a specially designed porous chamber technique.

Key words turbulent jet; entrainment; modeling

0 引言

射流的引射现象常见于燃烧、化工反应、材料加工等领域^[1,2]。在燃烧过程中, 射流的引射时常决定燃烧过程的发展; 在材料加工过程中, 高温气体对环境气体的引射往往影响加工过程的质量。文献 [3] 研究了温度为万度量级的等离子体射流对环境空气的引射规律, 但目前找不到直接的实验数据进行比较; 因此本文研究非电离的湍流空气射流的引射特性, 以便和已有的实验结果^[1,2]进行比较, 检查所采用的数值模拟方法的可靠性。

文献 [1], [2] 采用多孔壁技术直接测量了室温湍流气体射流对环境气体的引射量。通过对不同种类气体射流引射量的测量, 总结出如下关联式:

$$\frac{dm}{dx} = C \frac{m_0}{d_0} \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, m 是轴向距离 x 处射流横截面上的轴向质量通量; m_0 , d_0 和 ρ_0 分别是射流入口处的质量流量、直径和气体密度, ρ_a 是被引射环境气体的密度, C 为引射系数。在湍流射流的充分发展区, 引射系数为常数 0.32。若要详细了解引射特性对射流中参数空间演化的影响, 还需另外进行实验或数值模拟研究。本文采用数值模拟方法对室温或炽热湍流空气射流对室温环境空气的引射特性进行研究, 系统考察各有关参数的影响, 并与文献 [1] 中的实验数据对比。

1 数值模拟方案

本文数值模拟中采用的基本假定包括: (1) 气

收稿日期: 2007-12-10; 修订日期: 2008-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.10772016, No.10575127)

作者简介: 王海兴 (1969-), 男, 山东济南人, 博士, 目前主要从事热等离子体条件下流动与传热问题研究。

体流动定常、轴对称；(2) 气体物性依赖于温度；(3) 周向速度和自然对流影响可以忽略。模拟中采用的控制方程组如下：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] - 2 (\mu + \mu_t) \frac{v}{r^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v h)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{k}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_h} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{k}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_h} \right) \frac{\partial h}{\partial r} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u K)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r v \rho K)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_K} \right) \frac{\partial K}{\partial r} \right] + G - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u \epsilon)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r v \rho \epsilon)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right] + \frac{\epsilon}{K} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \quad (7)$$

此处 u 与 v 分别是轴向 (x -) 与径向 (r -) 速度分量； ρ 、 h 、 μ 、 k 和 c_p 分别是空气密度、比焓、分子粘性系数、热导率和定压比热，可以随温度变化；方程 (6) 与 (7) 中的湍流产生项 G 和其它模型参数参见文献 [3]。计算域的径向尺寸为 50 mm，长度 L 分别取为 100 mm 和 200 mm 两种情况。射流入口半径在 0.5~4 mm 之间变化。在射流进口处采用均匀的温度与速度分布， $T=T_0$ ， $u=U_0$ ， $v=0$ 。沿射流轴线，采用轴对称条件。在计算域的外侧采用自由边界条件。计算域下游用单向条件。数值模拟中采用 180×78 的计算网格，以 SIMPLE 型算法方程求解。

2 数值模拟结果与讨论

为了系统地研究湍流空气射流的引射特性，我们采用了多种不同的射流入口参数组合。图 1 给出了射流入口温度为 $T_0=1000$ K、入口速度为 $U_0=100$ m/s 时计算得到的射流中的流线与温度分布。从图中可以看出，由于射流的引射作用，沿射流轴

向，射流的质量流量不断增加。图 2 更为清楚地给出了射流参数的轴向变化。图 2(a) 比较了射流入口速度固定为 100 m/s，温度分别为 600 K、800 K 和 1000 K 时射流温度沿轴线的变化；图 2(b) 则比较了射流入口温度固定为 300 K，射流入口速度分别为 60 m/s、80 m/s 和 100 m/s 时射流轴向速度的演化。如图所示，在射流入口附近，由于“势核”的存在，射流轴线附近温度和速度不变；但是随着轴向距离的增加，由于射流不停地引射入环境空气，射流的温度与轴向速度迅速降低。

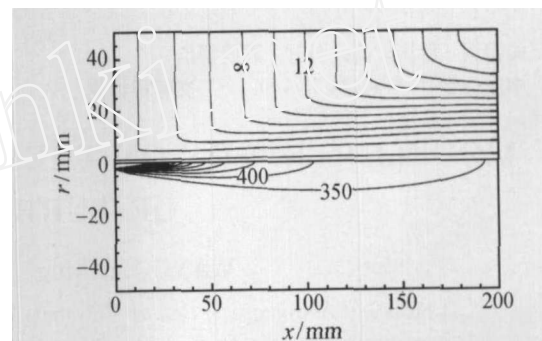


图 1 典型的湍流空气射流中的流线(上半平面)与温度场(下半平面)(流线间隔 2×10^{-4} kg/s，等温线间隔 50 K)
Fig.1 Typical computed streamlines(upper semi-plane) and temperature (lower semi-plane) in turbulent air jet (stream line interval is 2×10^{-4} kg/s per radian, isothermal interval is 50 K)

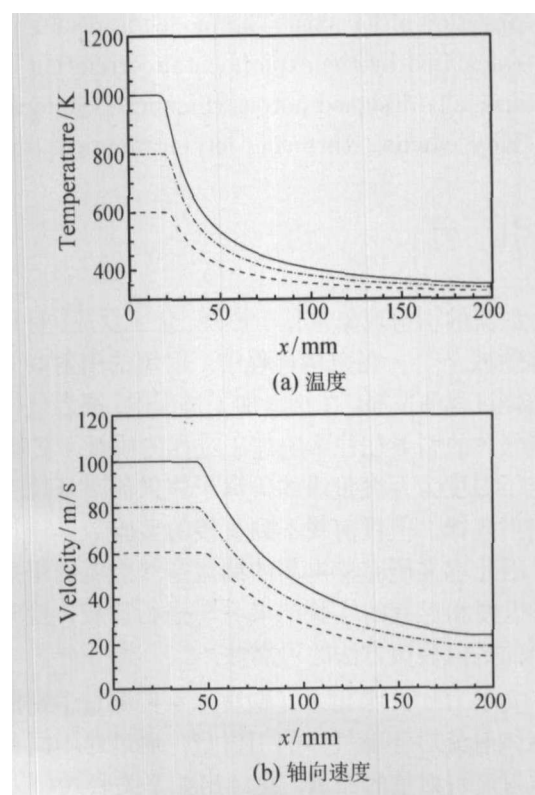


图 2 射流温度 (a) 和轴向速度 (b) 沿轴线方向的变化
Fig.2 Variations with the axial distance of the jet temperature (a) and axial velocity (b)

图 3 给出了无因次引射量 m_1/m_0 随 Re 数的变化, m_1 为射流的净引射量, 由下面的公式计算

$$m_1 = m - m_0 = 2\pi \int_0^R \rho u r dr - \left(2\pi \int_0^R \rho u r dr \right)_{\text{inlet}} \quad (8)$$

图 3 中曲线 (a) 对应于轴向距离与射流入口直径比 $x/d_0 = 25.6$ 的情形, 曲线 (b) 对应 $x/d_0 = 13.7$ 的情形。从图中可以看出, 在低雷诺数时, 实验和数值模拟获得的引射量变化规律并不一致; 实验数据表明, 无因次引射量随雷诺数增加而减少, 而数值模拟恰好相反。产生这种分歧的原因还不清楚, 有待于今后进一步研究。高雷诺数情形下数值模拟和实验结果均给出与雷诺数几乎无关的值。

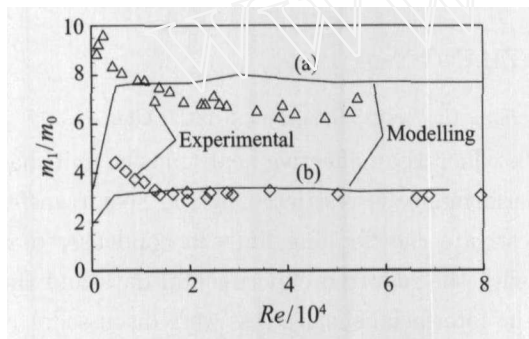


图 3 无因次引射量随雷诺数的变化

Fig.3 Variation of entrainment rate with the Reynolds number

图 4 给出了射流进口与环境温度均为 300 K, x/d_0 值较大时, m/m_0 与无因次轴向距离的变化关系。从图中可以看出, 等温空气湍流射流的数值模

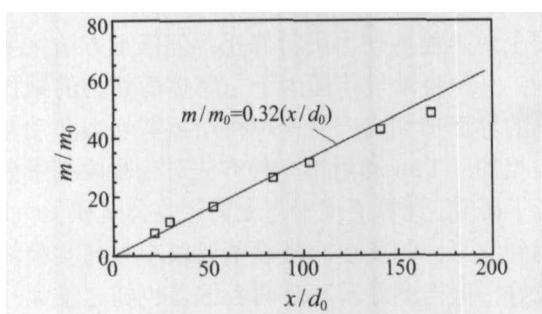


图 4 等温射流引射率沿轴向距离的变化

Fig.4 Variation with the axial distance of entrainment rate of isothermal jets

拟结果与文献 [1] 中的实验结果符合良好, 均满足 $m/m_0 = 0.32(x/d_0)$ 的定量关系。

图 5 给出了射流入口温度与环境气体温度不相同、非等温空气湍流射流引射量的模拟结果和文献 [1] 中的实验数据的比较, 从图 5 中看到, 当 x/d_0 较大时, 模拟结果和实验数据也符合良好, 可用关联式 $m/m_0 = 0.32(x/d_0)(\rho_a/\rho_0)^{1/2}$ 表示。

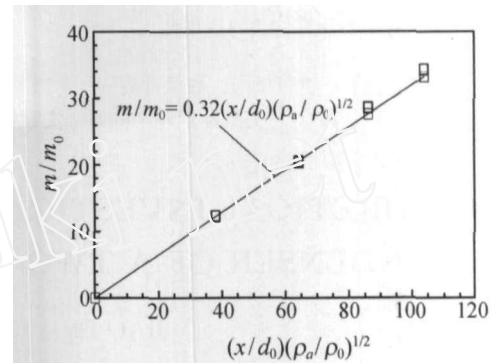


图 5 非等温射流引射率沿轴向距离的变化

Fig.5 Variation with the axial distance of entrainment rate of non-isothermal jets

3 结论

本文采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型, 对等温与非等温湍流空气射流的引射特性进行了数值模拟研究。由于射流不停地引射环境空气, 射流“势核”区下游的温度与轴向速度迅速降低; 将数值模拟结果与文献 [1] 中采用多孔壁技术所获得的空气引射量测量结果比较表明, 在 x/d_0 值较大时, 数值模拟获得的等温空气湍流射流和非等温空气湍流射流的引射规律与文献 [1] 给出的实验关联式 (1) 一致。

参考文献

- [1] Ricou F P, Spalding D B. Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 11: 21-32
- [2] Hill B J. Measurement of Local Entrainment Rate in the Initial Region of Axisymmetrical Turbulent Air Jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 51: 773-779
- [3] Wang Hai-Xing, Chen Xi, Pan Wenxia. Modeling Study on the Entrainment of Ambient Air into Laminar and Turbulent Plasma Jets. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2007, 27 (2): 141-162