

研究论文

两喷嘴对置撞击流径向射流流动特征

李伟锋, 孙志刚, 刘海峰, 王辅臣

(华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: 对喷嘴间距与喷嘴直径比为 0.5~100 范围内两喷嘴对置撞击流径向射流的湍流脉动特征、速度分布和扩展率等进行了实验研究和数值模拟。研究表明, 撞击流径向射流明显较自由射流湍动强烈; 从驻点开始径向射流速度逐渐增大到最大值后开始衰减, 射流呈现自相似性; 随着喷嘴间距增大, 撞击流径向射流的扩展率呈现增大的趋势, 大约为自由圆射流的 1.5~3 倍。采用 CFD 软件对撞击流径向射流的速度分布特征进行了数值模拟, 与实验结果相比, 两方程湍流模型预报的撞击流径向射流的扩展率明显偏小, 雷诺应力模型的预报精度有较大改进。

关键词: 两喷嘴对置撞击流; 径向射流; 扩展率; 热线风速仪

中图分类号: TQ 021.1; O 358

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 10-2453-07

Flow characteristics of radial jet from two opposed jets

LI Weifeng, SUN Zhigang, LIU Haifeng, WANG Fuchen

(College of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The fluctuation, velocity distribution and spread rate of the radial jet from two opposed nozzles at $L/D=0.5-100$ were experimentally investigated and numerically simulated, where L is the length of two nozzles separation and D is the nozzle diameter. Results show that the turbulence intensity of the radial jet is obviously higher than that of free jet. The velocity of the radial jet increases to a maximum from the stagnation point then decays and exhibits a self-similarity. With the increase of the nozzle separation, the spread rate of the radial jet increases, and is about 1.5—3 times as that of free round jet. The velocity distributions of the radial jet from two opposed nozzles were numerically simulated by CFD. Compared to experimental results, the spread rate is obviously underpredicted by two-equation turbulence models, and the prediction by Reynolds stress model (RSM) is improved.

Key words: two opposed jets; radial jet; spread rate; hot-wire anemometer

引 言

由于撞击流能够有效强化混合和相间传递, 因而在气化、燃烧、吸收、干燥以及催化反应等工业过程中显示出独特优点和较大应用潜力, 众多学

者^[1-9]对撞击流展开了基础和应用研究。

两股射流离开喷嘴后相向流动、撞击, 在喷嘴中间形成一个高度湍动的撞击区, 轴向速度趋于零, 并转为径向流动。撞击流流场一般可以分为 3 个区域: 一是流体离开喷嘴以后到还没有撞击之

2009-04-27 收到初稿, 2009-07-19 收到修改稿。

联系人及第一作者: 李伟锋 (1976-), 男, 博士, 讲师。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB217703)。

Received date: 2009-04-27.

Corresponding author: Dr. LI Weifeng, liweif@ecust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2004CB217703).

前，如同单喷嘴的自由射流，称为射流区；二是相向运动的流体撞击后形成撞击区（也称滞止区）；三是撞击后流体改变方向形成的区域称为径向射流区（也称折射射流区）。尽管撞击流径向射流也是一种射流，但与常见的自由轴对称射流有许多不同的特征。此外，径向射流的流动直接决定着撞击流反应器的流场特征和混合效果，因此值得进行深入研究。

从目前国内外撞击流研究的文献来看，对撞击流径向射流的研究还很不够，且多局限在小喷嘴间距下撞击区附近，例如，Kostiuk 等^[4]、Rolon 等^[10]和 Korusoy 等^[11]的实验研究表明，撞击流径向射流在撞击区附近呈直线分布形式。刘海峰等^[12]研究了大喷嘴间距下气化炉内受限撞击流径向射流的流动特征，发现用喷嘴间距作为长度比尺时，速度分布具有相似性。由于不同研究者研究的喷嘴间距不同，因而造成关于撞击流径向射流的增长率研究结论不一致，如 Rew 等^[13]研究了两股弯曲壁面撞击流的径向射流，发现撞击流径向射流扩展率为 0.15，Gilbert^[14-15]发现 $L/D = 20$ 时两股平面壁面射流撞击流径向射流扩展率为 0.2，Stan 等^[16]发现两股圆射流在 $L/D = 20$ 和 $Re = 11000$ 时径向射流扩展率约为 0.17，而 Kind 等^[17]发现在 $L/D = 240$ 时两股平面撞击流径向射流扩展率为 0.3，约为普通自由圆射流的 3 倍。

本文对 $L/D = 0.5 \sim 100$ 范围内的撞击流径向射流进行了实验研究及数值模拟，喷嘴间距涵盖了大多数文献和工业应用中的喷嘴间距范围，并对数值模拟的精度和产生误差的原因进行了分析和讨论。

1 实验测量和数值模拟方法

本文两喷嘴对置撞击流如图 1 所示，来自 Roots 鼓风机的空气经过流量计计量后进入如图中所示的两个喷嘴后形成两股射流 Jet 1 和 Jet 2，发生对置碰撞。用 u 和 v 分别表示轴线上的轴向速度和径向射流沿 y 轴方向的速度，如不特殊声明，本文中出现的“径向速度”均表示径向射流沿 y 轴方向的速度。由于径向射流的轴向速度相对径向速度要小 1~2 个数量级，因而本文不做研究。

本文采用 DANTEC Streamline4 型热线风速仪测量径向速度，实验中选用一维探头，测量时热线探头固定在三维坐标架上，可精确地调节测量点

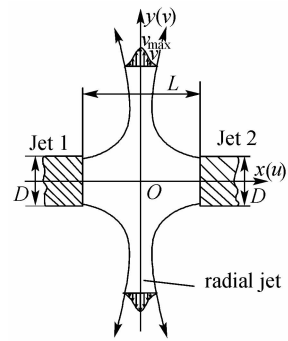


图 1 两喷嘴对置撞击流

Fig. 1 Schematic diagram of two opposed jets

位置。实验中采用的喷嘴直径 D 为 30 mm，测量工况见表 1。喷嘴出口的 Reynolds 数定义为

$$Re = Du_0\rho/\mu \quad (1)$$

式中 u_0 为喷嘴出口气速， $m \cdot s^{-1}$ ； ρ 为常温空气密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； μ 为常温空气动力学黏度， $Pa \cdot s$ 。

表 1 测量工况

Table 1 Measurement cases

| D/mm | L/D | $u_1, u_2/m \cdot s^{-1}$ | Re_1, Re_2 |
|--------|---------------------------------------|---------------------------|--------------|
| 30 | 0.5, 1, 2, 8, 12, 16, 20, 30, 50, 100 | 11.8 | 23460 |

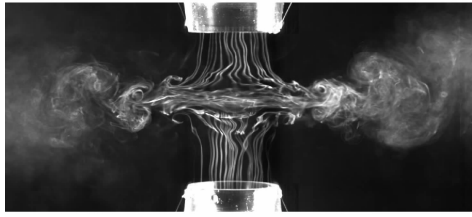
数值模拟采用 CFD 软件 Fluent 6.1，采用文献 [6] 中的二维轴对称网格和边界条件对撞击流径向射流进行数值模拟，湍流模型选用两种两方程模型（即标准 $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ ）以及 RSM 模型。

2 结果与讨论

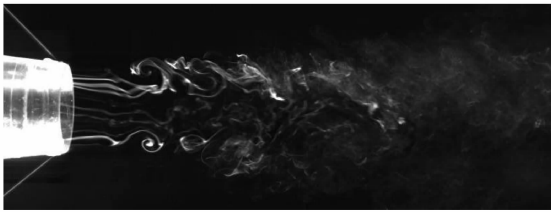
2.1 径向射流的湍流脉动特征

图 2 为撞击流和自由圆射流的烟线照片，图中喷嘴出口的气速均为 $2.36 m \cdot s^{-1}$ ， $L/D = 2$ ，关于烟线法见文献 [7]。从图中可以看出，撞击流径向射流和自由圆射流的边界层中都出现了对称的旋涡对，与自由圆射流相比，撞击流径向射流的扩展角明显较大，表明撞击流径向射流发展更快。烟线可视化结果表明，撞击流径向射流由大尺度涡结构组成，并且不断扭曲、变形，很不稳定。这种径向射流的不稳定性一方面与径向射流中的大尺度涡结构的不稳定性有关，另一方面也与撞击面驻点的轴向不稳定性有很大关系。因为径向射流是由轴向射流在撞击面驻点处压缩然后在径向上伸展发展而成

的，而撞击面驻点在轴向上或多或少是不稳定的，因而一定程度上导致径向射流的不稳定性^[7-9]。这种径向射流的不稳定性能有效地促进撞击流的混合和传质，这正是工程应用中所需要的。



(a) opposed jets



(b) free round jet

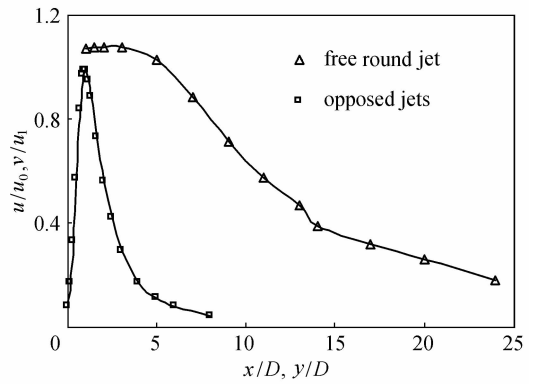
图 2 撞击流径向射流和自由圆射流烟线照片

Fig. 2 Smoke-wire photos of opposed jets and free round jet

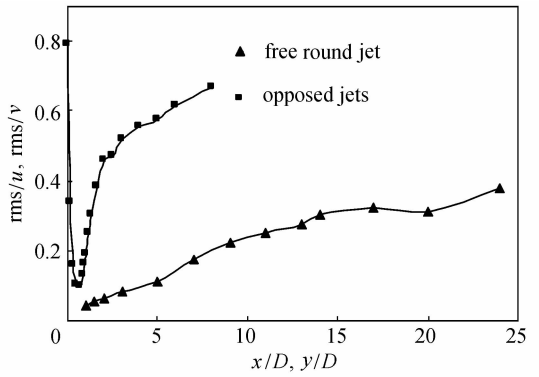
图 3 (a) 是撞击流径向速度与自由圆射流的轴线上轴向时均速度的实验测量值比较，图中喷嘴出口的气速均为 $11.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $L/D=2$ ；图 3 (b) 是撞击流径向射流径向与自由圆射流的轴线湍流强度的实验测量值比较，图中湍流强度值为脉动速度的均方根相对于当地平均速度的比值。从图 3 (a) 可以看出，撞击流径向射流径向速度增大到最大值（约为 u_1 ）后迅速衰减，在 $y=8D$ 处，速度衰减到 $0.1u_1$ 左右，而对于自由圆射流，经过一段势核区（长度约为 $5D$ ）之后，轴线速度开始衰减，在 $x=24D$ 处，速度衰减到约 $0.2u_0$ ，可见撞击流径向射流衰减速率要快得多。从图 3 (b) 中可以看出，撞击流径向射流湍流强度明显较自由射流轴线上湍流强度大得多，说明撞击流径向射流中流体微团的湍流脉动程度比一般自由圆射流大，这也是撞击流能强化混合和传递过程的一个有力证明。

2.2 径向射流速度分布特征

鉴于撞击流径向射流和自由射流的特点有很大不同，因而有必要对其展开更为深入的实验和模拟研究，特别是射流的扩展率等。如文献 [7] 指出， L/D 在 $2\sim 8$ 范围内，撞击流驻点位置不稳定，这对测量径向速度分布带来了很大的困难，因此只对 $2D$ 和 $8D$ 进行了测量。



(a) mean velocity



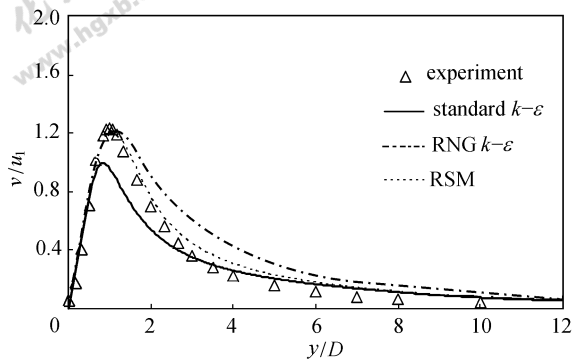
(b) local turbulence intensity

图 3 撞击流径向射流和自由圆射流轴线平均速度和湍流强度实验测量值

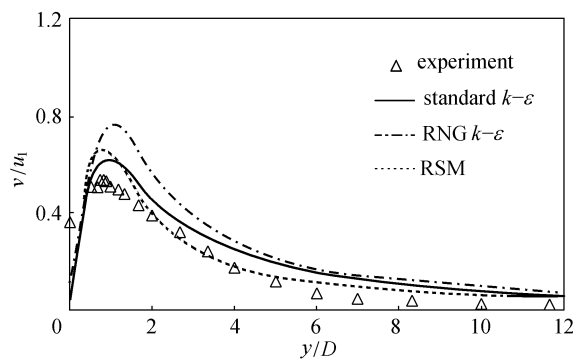
Fig. 3 Experimental axial mean velocity and local turbulence intensity of free jet and radial jet of opposed jets

2.2.1 径向射流速度分布 L/D 为 1、12、20 时撞击流径向射流沿 y 轴分布的实验测量值和不同模型的数值模拟值的比较如图 4 所示，图中径向速度均用喷嘴出口气速进行量纲 1 化。从图中可以看出， $L/D=1$ 时，径向速度在撞击面附近呈线性增大到最大值，此区间实验值和数值模拟值吻合较好；离开最大值，RSM 模型的预报值和实验结果相对吻合较好。当 L/D 为 12 和 20 时，驻点附近热线测量的径向速度值大于零，实验测量值和数值模拟的预报值不太吻合，这是由撞击区流体剧烈的湍流脉动导致流体的主流方向不确定造成的，随着喷嘴间距增大，撞击区的区域增大，这种情况更加明显。离开最大值后，RSM 模型的预报值相对两种两方程模型而言与实验结果吻合较好。在 L/D 为 $0.5\sim 100$ 范围内径向速度分布的实验测量值如图 5 所示。

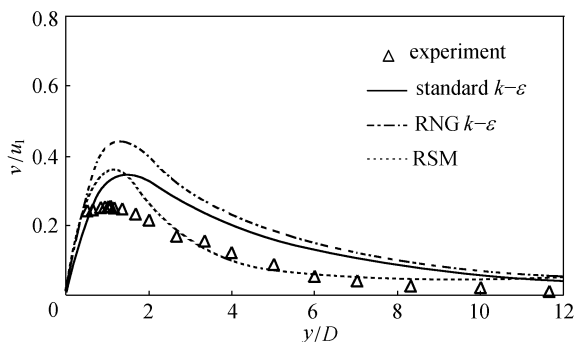
2.2.2 径向射流最大速度位置 在 $0.5\leq L/D<20$



(a) $L=D$



(b) $L=12D$



(c) $L=20D$

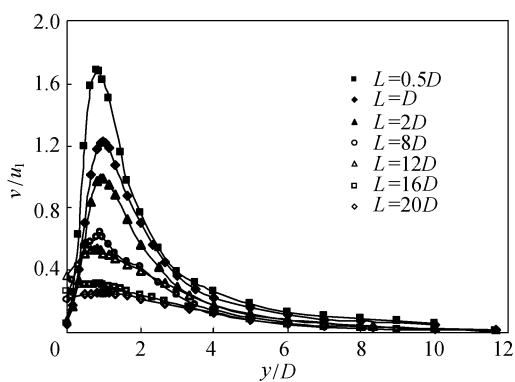
图 4 径向速度分布的实验测量值和数值模拟值比较

Fig. 4 Comparison of measured and simulated distributions of radial velocities

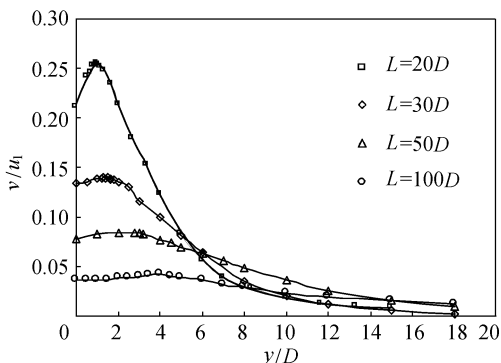
范围内, 不同喷嘴间距下撞击流径向射流最大速度位置如图 6 (a) 所示。从图中可以看出, 实验结果与 3 种湍流模型预报的结果大致相似, 均显示大约在距离对称轴 0.9D 处径向速度达到最大值。在 $0.5 \leq L/D < 20$ 范围内, 最大径向速度的位置可用如下近似关系式表示

$$y(v = v_{\max}) = 0.9D \quad (2)$$

在 $20 \leq L/D \leq 100$ 范围内, 不同喷嘴间距下撞击流径向射流最大速度位置如图 6 (b) 所示, 从



(a) $L/D=0.5-20$



(b) $L/D=20-100$

图 5 径向速度分布的实验测量值

Fig. 5 Experimental distribution of radial velocities

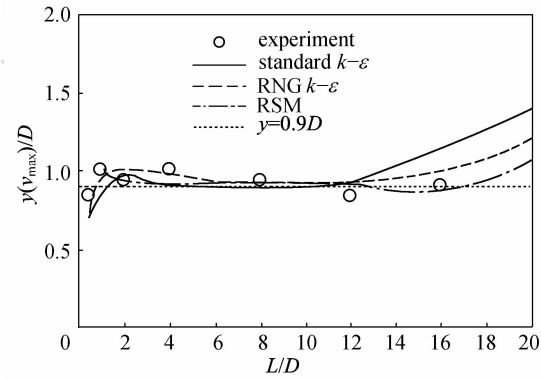
图中可以看出, 实验测量和数值模拟的预报值不吻合, 但是都表明在大喷嘴间距范围内随着喷嘴间距增大, 对应最大径向速度的位置逐渐远离对称轴。如果对大喷嘴间距下最大径向速度的位置用喷嘴间距量纲 1 化, 则发现最大径向速度大约出现在 $0.05L$ 处, 有如下近似关系式

$$y(v = v_{\max}) = 0.05L \quad (3)$$

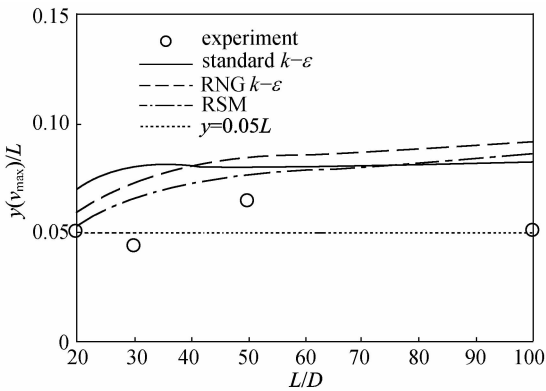
以上关系预示对于中、小喷嘴间距撞击流, 喷嘴直径 D 是长度比尺, 而对于大喷嘴间距撞击流, 喷嘴间距 L 是长度比尺。

2.3 径向射流扩展率

研究发现, 在 L/D 为 $0.5 \sim 100$ 范围内撞击流径向速度在离开最大径向速度后的平面上均具有很好的自相似性。如图 7 中以 L/D 为 1、20 为例, 图中 $b_{1/2}$ 为径向射流的半宽高。由于数值模拟结果显示不同平面上速度剖面完全重合, 为了便于显示, 仅用一条线来代替。从图中可以看出, $L/D=1$ 时, 实验值和数值模拟值吻合较好, 而 $L/D=20$ 时, 实验测量值的分布要比模拟值更宽一些, 说明



(a) $0.5 \leq L/D < 20$



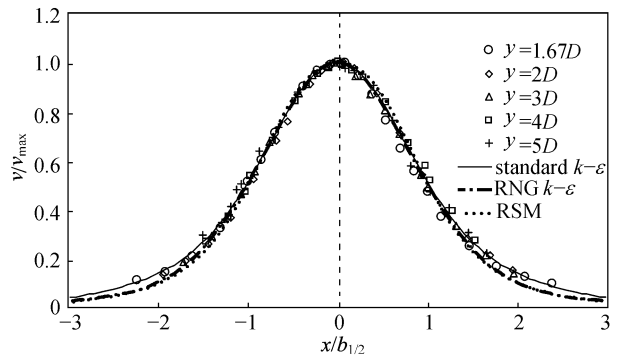
(b) $20 \leq L/D \leq 100$

图 6 撞击流径向射流最大速度位置

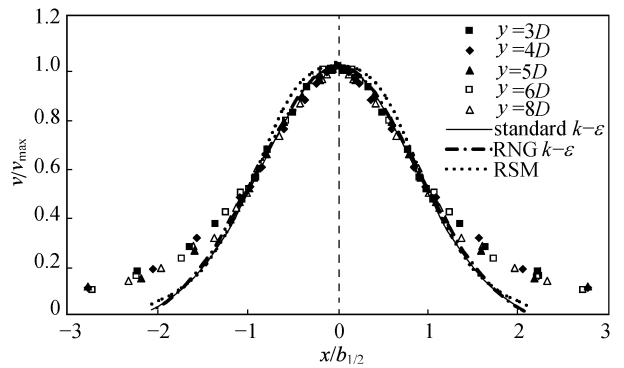
Fig. 6 Positions with maximum radial velocity of radial jet of opposed jets

随着喷嘴间距增大，数值模拟预报的径向射流的扩展率有一定的偏差。在 L/D 为 $0.5 \sim 100$ 范围内，不同喷嘴间距下径向射流的半宽高随径向位置的变化如图 8 所示，图中直线的斜率即为径向射流的扩展率，可见径向射流的半宽高增长呈线性增长趋势。

L/D 为 $0.5 \sim 100$ 范围内径向射流的扩展率见表 2。从表中数据可以看出，随着喷嘴间距增大，径向射流扩展率呈增长的趋势。在 L/D 为 $0.5 \sim 8$ 范围内，扩展率增长缓慢，基本为 0.15 左右；在 L/D 为 $8 \sim 20$ 范围内，扩展率很快从 0.15 增长到 0.3 左右；在 L/D 为 $20 \sim 100$ 范围内，径向射流的扩展率基本为 0.3 左右。从表中实验测量值和数值模拟预报值的比较可以看出：标准 $k-\epsilon$ 模型预报的扩展率的数值明显偏小，大约为 0.1 ，与自由射流扩展率相当；RNG $k-\epsilon$ 模型预报的扩展率在 $0.12 \sim 0.15$ ，也明显小于实验测量值；RSM 模型预报值尽管与实验测量值有些差异，但是相对两种两方程模型而言，预报精度有明显改善。产生这种



(a) $L/D=1$



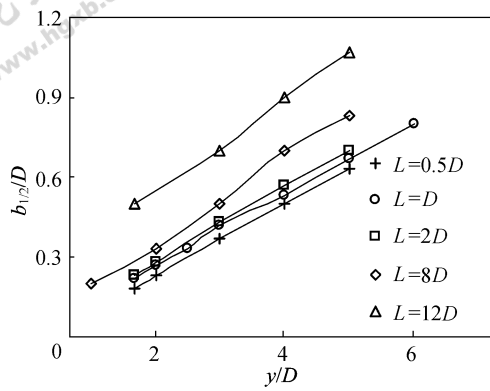
(b) $L/D=20$

图 7 撞击流不同径向平面上径向速度分布的实验测量值和数值模拟值

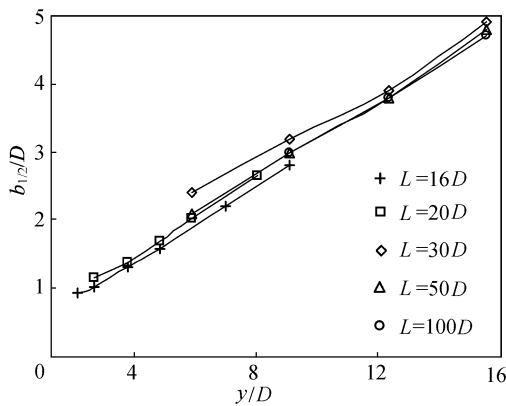
Fig. 7 Measured and simulated radial velocity distributions of radial jet of opposed jets on various planes

差别的原因：一是因为撞击流流动强烈各向异性、流线弯曲，因而目前的两方程模型会带来一定的误差；二是由于撞击流的驻点是不稳定的^[8-9]，因而用本文的稳态数值模拟方法会带来一定的误差。这种不稳定性对撞击流的速度分布会产生一定的影响，目前在撞击流的研究中这种不稳定性对流场的影响较少被关注。

文献中撞击流径向射流的扩展率多为壁面撞击流和壁面弯曲射流撞击流的，仅有的圆射流撞击流径向射流的扩展率为 Stan 等^[16]得出的两股水流射流在 $L/D=20$ 和 $Re=11000$ 下扩展率约为 0.17 。Kind 等^[17]发现平面撞击流在 $L/D=240$ 时径向射流扩展率为 0.3 ，这与本文研究结果基本相同。这些数据之间，以及与本文数据之间由于撞击流喷嘴的型式、喷嘴间距和 Reynolds 数等的差异，很难进行完全的比较。结合本文和这些研究结果可知：撞击流径向射流扩展率明显大于一般自由射流，约为其 $1.5 \sim 3$ 倍，并且随着喷嘴间距增大而增大。



(a)



(b)

图 8 撞击流径向射流扩展率的实验测量值
Fig. 8 Experimental spread rates of radial jet of opposed jets

表 2 径向射流扩展率的测量值和模拟值

Table 2 Measured and simulated spread rate of radial jets

| L/D | Standard $k-\epsilon$ | RNG $k-\epsilon$ | RSM | Experiment |
|-------|-----------------------|------------------|-------|------------|
| 0.5 | 0.109 | 0.120 | 0.118 | 0.134 |
| 1 | 0.107 | 0.122 | 0.124 | 0.134 |
| 2 | 0.098 | 0.118 | 0.129 | 0.140 |
| 4 | 0.099 | 0.116 | 0.131 | — |
| 8 | 0.100 | 0.118 | 0.162 | 0.163 |
| 12 | 0.103 | 0.123 | 0.151 | 0.207 |
| 16 | 0.105 | 0.131 | 0.208 | 0.295 |
| 20 | 0.109 | 0.130 | 0.213 | 0.307 |
| 30 | 0.111 | 0.136 | 0.292 | 0.273 |
| 50 | 0.109 | 0.147 | 0.416 | 0.297 |
| 100 | 0.105 | 0.123 | 0.435 | 0.283 |

2.4 讨论

从上述撞击流径向射流和自由圆射流的特征比较来看, 尽管径向射流保留了自由射流的一些特性, 但相对于自由射流, 撞击流径向射流又有其自身的特点, 并且要复杂得多。

(1) 射流的产生过程: 圆自由射流是由具有一定初速度的流体从圆断面处射出而形成; 撞击流径向射流是由轴向射流在撞击面驻点处压缩然后在径向上伸展而成, 由于驻点在轴向上位置不稳定, 因而一定程度上导致径向射流的不稳定性。

(2) 射流的构成: 按照自由圆射流理论, 自由射流由初始区、过渡区和发展区构成; 对于撞击流径向射流, 由撞击区和发展区构成。

(3) 射流相似性: 径向速度在离开最大径向速度后的平面上具有相似性, 这种相似性与自由射流相似, 不同的是自由射流在射流发展区才展现这种相似性 (一般 $x/D > 8$ 以后)。

(4) 射流扩展率: 撞击流径向射流扩展率约为自由射流的 1.5~3 倍。

3 结 论

本文对 L/D 为 0.5~100 范围内撞击流径向射流流动特征, 包括径向速度的湍流脉动特征、径向射流速度分布和扩展率等进行了系统研究, 主要结论如下:

(1) 对于中、小喷嘴间距撞击流, 喷嘴直径 D 可以作为长度比尺, 对大喷嘴间距撞击流, 喷嘴间距 L 是长度比尺;

(2) 撞击流径向射流扩展率约为自由射流的 1.5~3 倍, 且随着喷嘴间距增大, 径向射流扩展率呈增长的趋势;

(3) 标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型预报的撞击流径向射流的扩展率明显偏小, RSM 模型预报精度有较大改进, 撞击流驻点的不稳定性对撞击流径向射流的扩展率有一定影响, 下一步研究中需用非稳态模拟方法和非线性稳定理论对撞击流进行模拟。

符 号 说 明

- D ——喷嘴直径, m
- L ——喷嘴间距, m
- Re ——Reynolds 数
- u, v ——分别为轴向、径向速度, $m \cdot s^{-1}$
- u_1, u_2 ——撞击流两喷嘴出口平均车速, $m \cdot s^{-1}$
- x, y ——分别为轴向、径向坐标, m

References

[1] Tamir A, Kitton A. Application of impinging streams in chemical engineering process review. *Chemical*

- Engineering Communications*, 1987, **50** (1-6): 241-330
- [2] Champion M, Libby P A. Reynolds stress description of opposed and impinging turbulent jets (I): Closely spaced opposed jets. *Physics of Fluids*, 1993, **5** (1): 203-215
- [3] Kostiuk L W, Libby P A. Comparison between theory and experiments for turbulence in opposed streams. *Physics of Fluids*, 1993, **5** (9): 2301-2303
- [4] Kostiuk L W, Bray K N C, Cheng R K. Experimental study of premixed turbulent combustion in opposed streams (I): Nonreacting flow field. *Combustion and Flame*, 1993, **92** (4): 377-395
- [5] Xu Jianliang (许建良), Li Weifeng (李伟锋), Cao Xiankui (曹显奎), Dai Zhenghua (代正华), Liu Haifeng (刘海峰), Wang Fuchen (王辅臣), Gong Xin (龚欣), Yu Zunhong (于遵宏). Experimental research and numerical simulation of asymmetric impinging streams. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (2): 288-291
- [6] Li Weifeng (李伟锋), Sun Zhigang (孙志刚), Liu Haifeng (刘海峰), Wang Fuchen (王辅臣), Yu Zunhong (于遵宏). Numerical simulation and experimental study on flow field of two closely spaced opposed jets. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (6): 1385-1390
- [7] Li Weifeng (李伟锋), Sun Zhigang (孙志刚), Liu Haifeng (刘海峰), Wang Fuchen (王辅臣), Yu Zunhong (于遵宏). Stagnation point offset of two opposed jets. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59** (1): 46-52
- [8] Li Weifeng, Sun Zhigang, Liu Haifeng, Wang Fuchen, Yu Zunhong. Experimental and numerical study on stagnation point offset of turbulent opposed jets. *Chemical Engineering Journal*, 2008, **138** (1/2/3): 283-294
- [9] Sun Zhigang (孙志刚), Li Weifeng (李伟锋), Liu Haifeng (刘海峰), Yu Zunhong (于遵宏). The oscillation characteristic of two planar opposed jets. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2009, **60** (2): 338-344
- [10] Rolon J C, Veynante D, Martin J P. Counter jet stagnation flows. *Experiments in Fluids*, 1991, **11** (5): 313-324
- [11] Korusoy E, Whitelaw J H. Opposed jets with small separations and their implications for the extinction of opposed flames. *Experiments in Fluids*, 2001, **31** (1): 111-117
- [12] Liu Haifeng (刘海峰), Liu Hui (刘辉), Gong Xin (龚欣), Wang Fuchen (王辅臣), Yu Zunhong (于遵宏). Radial velocity of wide spaced impinging streams. *Journal of East China University of Science and Technology* (华东理工大学学报), 2000, **26** (2): 168-171
- [13] Rew H, Park S. The interaction of two opposing asymmetric curved jets. *Experiments in Fluids*, 1988, **6** (4): 243-252
- [14] Gilbert B L. Turbulence measurements in a two-dimensional upwash. *AIAA Journal*, 1988, **26** (1): 10-14
- [15] Gilbert B L. Turbulence measurements in a flow generated by the collision of radially flowing wall jets. *Experiments in Fluids*, 1989, **27** (2): 103-110
- [16] Stan G, Johnson D A. Experimental and numerical analysis of turbulent opposed impinging jets. *AIAA Journal*, 2001, **39** (10): 1901-1908
- [17] Kind R, Suthanthiran K. The interaction of opposing plane turbulent wall jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, **58** (2): 389-402