

研究简报

小间距两喷嘴对置撞击流流场的 数值模拟与实验研究

李伟锋, 孙志刚, 刘海峰, 王辅臣, 于遵宏
(华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

关键词: 两喷嘴对置撞击流; 小喷嘴间距; 驻点偏移; 出口速度分布

中图分类号: TQ 021.1; O 358

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 06-1387-06

Numerical simulation and experimental study on flow field of two closely spaced opposed jets

LI Weifeng, SUN Zhigang, LIU Haifeng, WANG Fuchen, YU Zunhong

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

Abstract: Experimental study and numerical simulation were performed for the averaged flow field of two closely spaced opposed jets with hot wire anemometer (HWA) and CFD software and the simulation was compared with the measurement and approximate analytic solution in the literature. The results showed that the exit velocity profile of the single jet was top-hat distribution due to the presence of boundary layers. At $L < 2D$ (where L is nozzle separation and D is nozzle diameter), bimodal distribution of exit velocity profile, low in the middle and high on both sides, was present, while such bimodal distribution of exit velocity profile was absent at $L = 2D$. With increasing nozzle separation, the stagnation point offset of the impinging plane increased. With the same velocity ratio, stagnation point offset of the nozzles with uniform profiles was larger than that with top-hat profiles. The approximate analytic solution of the flow field of two opposed jets in the literature was only valid for the nozzles with uniform exit velocity profiles and the prediction accuracy became worse for the nozzles with top-hat exit velocity profiles.

Key words: two opposed jets; close nozzle separation; stagnation point offset; exit velocity profile

引 言

由于撞击流能够有效强化传质和混合, 因而在气化、燃烧、吸收、干燥、除尘、催化反应以及萃取等工业过程中显示出独特优点和巨大的应用潜

力。Tamir 等^[1-9]众多学者纷纷对其展开了基础和应用研究。但是到目前为止, 撞击流由于其复杂性, 相关的理论解析解非常少。值得一提的是 Champion 等^[7]从高 Reynolds 数的雷诺应力方程出发得出的小间距下 ($L \leq 2D$) 撞击流流场的近似解

2006-09-16 收到初稿, 2007-02-27 收到修改稿。

联系人及第一作者: 李伟锋 (1976—), 男, 博士研究生, 讲师。

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划项目 (NCET-05-0413); 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB217703)。

Received date: 2006-09-16.

Corresponding author: LI Weifeng, PhD candidate. E-mail: lliweif@ecust.edu.cn

Foundation item: supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-05-0413) and the National Basic Research Program of China (2004CB217703).

析式, 被证明和实验结果吻合较好。两喷嘴对置撞击流的一个重要的现象是撞击面的偏移。Kostiuk 等^[9]运用激光多普勒测速仪 (LDA) 研究两喷嘴对置湍流撞击流时发现, 在喷嘴间距为 $2D$ 时, 两喷嘴很小的流量偏差可以导致撞击面偏移中心达 $0.15D$ 。Lindstedt 等^[10]在运用 PIV 研究两喷嘴对置撞击流的速度应变率特征时也发现了撞击面偏离几何中心的现象。Hosseinlipour 等^[2-5]研究了两喷嘴对置层流撞击流驻点随两喷嘴的气速比的变化规律, 发现随着气速比增加, 撞击面向气速较小的喷嘴一方移动。虽然众多的学者在实验中发现了撞击面的偏移现象, 但是对湍流撞击流中撞击面的偏移规律和影响撞击面偏移的因素的相关实验研究和数值模拟结果仍然相当少。

本文以华东理工大学开发的多喷嘴对置气化炉为背景, 采用热线风速仪和商业软件 Fluent6.1 对小喷嘴间距撞击流流场进行实验研究和数值模拟, 并与文献中实验结果和解析式计算结果进行比较, 重点研究不同喷嘴间距、不同气速比下驻点的偏移规律以及喷嘴出口速度分布对流场和撞击面驻点偏移的影响。本文作者曾经详细研究了大喷嘴间距下撞击流流场^[11-12], 本文是后续研究。

1 湍流模型选择及数值模拟方法

目前, 数值模拟成为研究撞击流的重要手段, 通常运用的湍流模型有各种两方程模型和二阶矩模型。Stan 等^[13]运用标准 $k-\epsilon$ 模型模拟了不同工况下的撞击流流场, 该模型能预报出和实验数据相吻合的速度场, 但是预报的径向射流的增长率精度较差。Korusoy 等^[14]分别对无黏的、层流的和湍流的撞击流流场进行了模拟, 他们模拟湍流撞击流时运用了多尺度 $k-\epsilon$ 、Low-Reynolds $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ 模型, 并对不同模型的预报精度进行了评价, 发现这 3 种两方程湍流模型预报的速度分布精度较高, 但是湍流强度的预报精度都不能令人满意。Lindstedt 等^[10]、Sonia 等^[15]和 Chou 等^[16]分别运用了两方程模型以及二阶矩模型对撞击流进行了数值模拟, 均发现二阶矩模型预报的湍流强度较两方程模型准确。由于雷诺应力模型 (RSM) 抛弃了 Boussinesq 假设, 因而对撞击流这种强烈各向异性、流线弯曲的湍流流动有其优越性, 因此本文的数值模拟采用 Fluent6.1 软件自带的 RSM 湍流模型。模拟采用二维轴对称的四边形均匀网格。进口

边界条件采用速度进口, 本文涉及两种速度进口: 当喷嘴出口速度剖面为均匀分布时采用均一速度进口; 当喷嘴出口速度剖面为“礼帽”分布形式时, 在喷嘴的进口设定速度分布满足湍流 $1/7$ 次方规律, 用 UDF 函数在 Fluent 中来表达这种分布形式。湍流设定项为水力学直径和进口湍流强度; 出口采用压力出口, 出口表压为 0; 模拟的计算域为 L (长) $\times 2L$ (宽)。

2 实验方法

采用 DANTEC 公司的恒温热线风速仪 (CTA) 来测量驻点位置, 系统的采样频率为 20 kHz, 采样时间为 5 s。实验选用一维探头, 测量时热线探头固定在三维坐标架上, 可精确、方便地调节测量位置, 精度可达 0.1 mm。

如图 1 所示, 本文所用的两个喷嘴 nozzle I 和 nozzle II 直径 $D=30$ mm, 喷嘴间距 L/D 分别为 0.5、1 和 2。撞击流在撞击面中心处速度出现最小值, 即撞击驻点, 通过测量轴线上的轴向速度分布即可找出轴线上撞击驻点的位置。 x_1 、 x_2 分别为驻点离开两个喷嘴的距离, 在撞击驻点 $L=x_1+x_2$ 。实验中保持 nozzle I 的出口平均气速 $u_1=11.87$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 不变, 调节 nozzle II 的出口平均气速 u_2 , 且保持 $u_1 > u_2$, 则可以定义气速比 $a=u_2/u_1$, 撞击驻点偏移量 $\Delta x=L/2-x_2$ 或者 $\Delta x=x_1-L/2$ 。

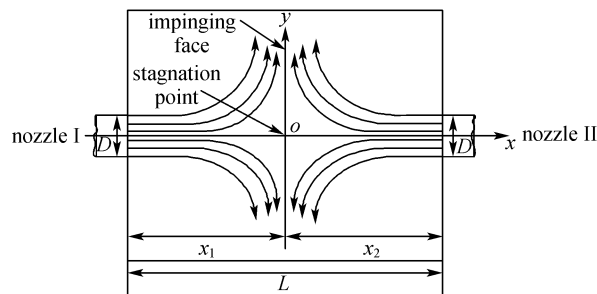


图 1 两喷嘴撞击流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two opposed jets

3 结果及讨论

3.1 模拟结果与文献结果的比较

首先运用两种两方程模型 (即 standard $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$) 以及 RSM 模型对 Kostiuk 等^[9]的实验数据进行了数值模拟, 结果见图 2、图 3。该文中喷嘴直径 $D=35$ mm, 喷嘴间距 $L=55$ mm, 两喷

嘴出口平均速度均为 $8.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，出口速度剖面为均一分布，相对湍流强度为 7%。从图 2 中可以看出 3 种湍流模型的预报值几乎完全一致，并且和文献中实验值吻合很好。Champion 等^[7] 从 Reynolds 数的雷诺应力方程出发推导出小喷嘴间距下 ($L \leq 2D$) 的撞击流的近似解析解，其中轴线速度表述为

$$u = -\frac{4u_0 x}{L} \left(1 + \frac{x}{L}\right), x < 0$$

$$u = -\frac{4u_0 x}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right), x > 0 \quad (1)$$

式中 u_0 为两喷嘴出口气速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文应用式 (1) 对上述工况进行了计算，结果见图 2。从图中可以看出，计算结果和模拟结果几乎完全吻合，说明在喷嘴出口为均匀分布时，上述解析式有很高的精度。从图 3 中可以看出 3 种湍流模型对湍流强度的预报都不太令人满意，standard $k-\epsilon$ 模型预报的湍流强度明显偏大；相比之下，RNG $k-\epsilon$ 模型精度有所改进；除了撞击区之外，RSM 模型在大部分区域都能吻合较好。

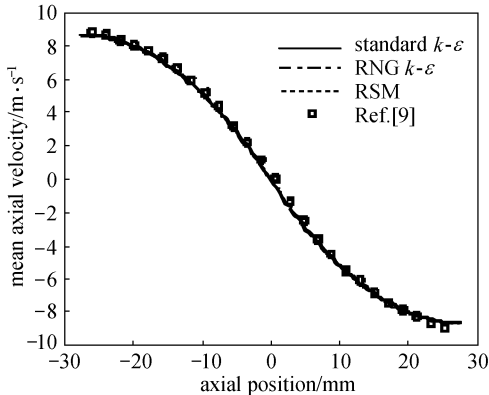


图 2 轴向时均速度分布的模拟值以及解析解和文献中测量值比较
Fig. 2 Comparison of simulation and analytic solution of axial mean velocity distribution to literature

3.2 实验测量及数值模拟结果

本文对 L/D 分别为 0.5、1 和 2，气速比 a 分别为 1、0.967、0.9、0.8 和 0.7 时撞击流流场进行了实验研究和数值模拟。

单股自由射流喷嘴出口量纲 1 轴向时均速度和速度的 rms 分布的热线测量值见图 4。从图中可以看出，速度剖面中央较为平坦，边缘出现厚度大约 $0.1D$ 的射流边界层，为一“礼帽”形状分布，相

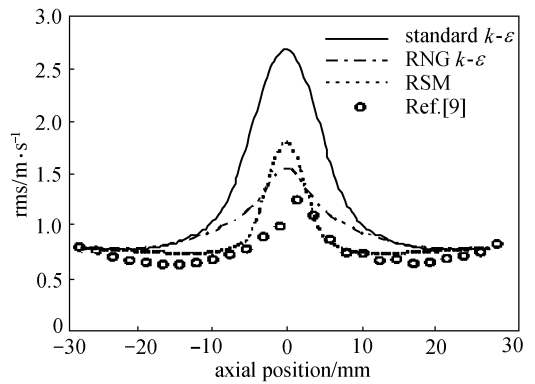


图 3 轴向湍流强度分布的模拟值以及解析解和文献中测量值比较
Fig. 3 Comparison of simulation and analytic solution of axial rms velocity distribution to literature

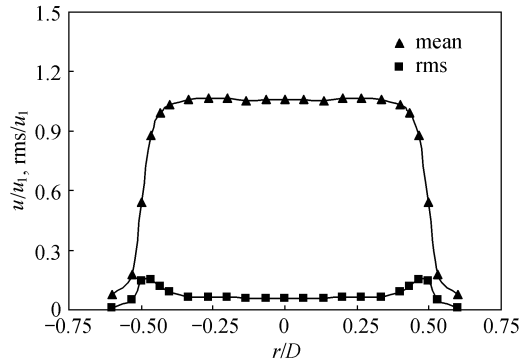


图 4 单股自由射流的喷嘴出口量纲 1 轴向平均速度和湍流强度分布的热线测量值
Fig. 4 Normalized axial mean and rms velocities at exit of single free jet measured by HWA

对湍流强度大约为 6%。Kostiuk 等^[9] 认为喷嘴出口速度为均匀分布，边界层的厚度可忽略，这是由于该文中特殊设计的喷嘴和本文中的喷嘴的结构不同所致。

3 种喷嘴间距下 $a=1$ 时撞击流喷嘴出口速度剖面的实验和数值模拟结果比较见图 5。从图中可以看出，当 $L/D=0.5$ 时，喷嘴出口速度剖面分布呈喷嘴轴线低、边缘附近高的“双峰”形状分布；当 $L/D=1$ 时，依然呈现“双峰”形状分布，但是相对 $L/D=0.5$ 中心值有所升高，边缘值有所降低； $L/D=2$ 时“双峰”形状基本消失。这是因为当喷嘴间距很小的时候，在两股射流的强烈碰撞下，轴线上正应力很大，流体从轴线附近向喷嘴边缘扩张，使喷嘴轴线附近速度减小，而喷嘴边缘附近速度增大。

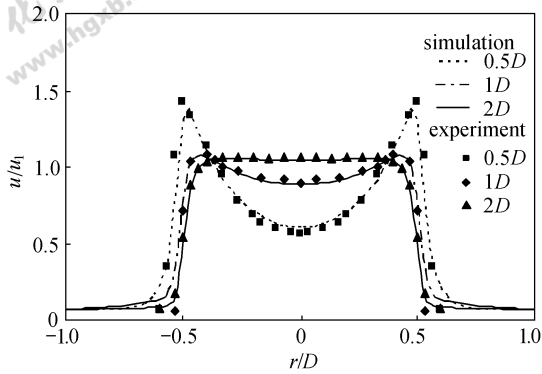


图 5 两对置撞击流喷嘴出口轴向速度剖面
Fig. 5 Axial velocity profiles at nozzle exit of opposed jets

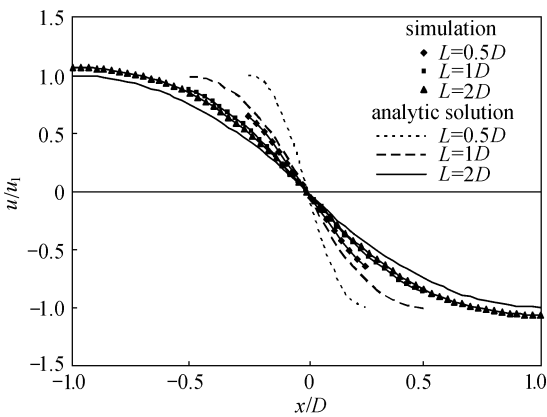


图 6 轴线速度的模拟值和解析解
Fig. 6 Simulation and analytic solution of axial velocity distributions

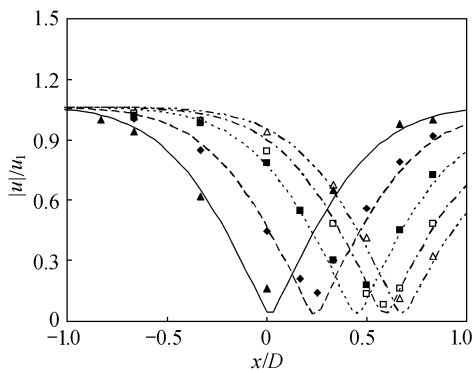


图 7 $L/D=2$ 时不同出口气速比下轴线上轴向速度大小分布
Fig. 7 Axial velocity magnitude distribution on axis of various exit velocity ratios at $L/D=2$
experiment: \blacktriangle $a=1$; \blacklozenge $a=0.967$; \blacksquare $a=0.9$;
 \square $a=0.8$; \triangle $a=0.7$
simulation: — $a=1$; --- $a=0.967$; - - - $a=0.9$;
 - - - $a=0.8$; - - - $a=0.7$

图 6 是 3 种喷嘴间距下式 (1) 解析解和本文喷嘴轴线速度模拟值的比较。从图中可以看出, 当喷嘴出口为“礼帽”分布时, 式 (1) 解析解预报的精度很差, 说明式 (1) 对喷嘴出口的射流边界层厚度不可忽略的情况不适用。从图中还可以看出, 对于本文的喷嘴, 当 L/D 为 0.5 和 1 时, 轴线速度近似为直线, 并且明显小于喷嘴出口为均匀分布时轴线速度。当 L/D 为 2 时, 尽管喷嘴出口的速度分布剖面的“双峰”形状消失, 但是式 (1) 解析解预报的结果仍然比模拟值小, 这是因为式 (1) 没有考虑边界层厚度和射流对环境流体的卷吸。

当 $L/D=2$ 时, 不同气速比下轴线速度的数值模拟结果和热线的测量值的比较见图 7, 从图中可以看出, 实验值和数值模拟值吻合较好。

图 8 是 3 种喷嘴间距下对应气速比分别为 1、0.967、0.9、0.8 和 0.7 时轴线速度的模拟结果, 图 9 是上述工况下驻点偏移量的模拟值和实验测量结果的比较。从图 9 可以看出, 实验测量值和数值模拟值基本吻合, 并且随着喷嘴间距的增大, 相同气速比导致的驻点偏移量增大。

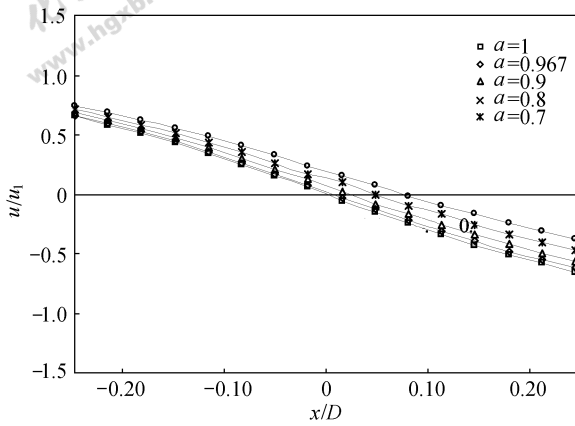
为了比较不同喷嘴出口速度分布对撞击流驻点偏移的影响, 本文还对 $D=30\text{ mm}$ 、 $u_1=11.87\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, L/D 分别为 0.5、1 和 2, 喷嘴出口气速为均匀分布时驻点偏移随着气速比变化进行了数值模拟。图 10 是喷嘴出口为“礼帽”分布和均匀分布时驻点偏移的比较。从图中可以看出, 相同气速比下, 本文喷嘴所对应的驻点偏移量要比出口速度为均匀分布的喷嘴大, 说明喷嘴出口的边界层厚度增大时, 撞击面驻点的位置对气速比的变化更为敏感。

4 结 论

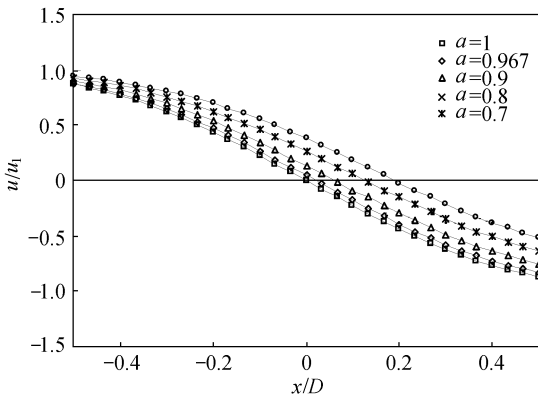
本文对小喷嘴间距下撞击流流场和驻点偏移规律进行了实验研究和数值模拟, 得到如下结论。

(1) 由于边界层存在, 自由射流喷嘴出口速度分布为“礼帽”分布。在 $L < 2D$ 时, 喷嘴出口速度剖面出现中间低、边缘高的“双峰”形状; $L = 2D$ 时, “双峰”形状逐渐消失。

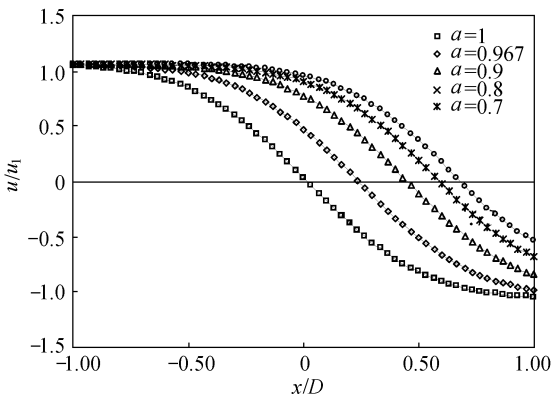
(2) 文献中解析式仅适用于小喷嘴间距、出口为均匀分布的情况, 当喷嘴的射流边界层厚度不可忽略时, 该解析式不适用。



(a) $L/D=0.5$



(b) $L/D=1$



(c) $L/D=2$

图 8 不同气速比下轴线上轴向速度分布

Fig. 8 Axial velocity distributions at various exit velocity ratios on axis

(3) 随着喷嘴间距的增大或者气速比的减小，撞击面驻点的偏移量增加。除了气速比和喷嘴间距外，喷嘴出口的速度分布也是影响撞击面驻点偏移的一个重要因素，相同气速比下，喷嘴出口为“礼帽”分布时驻点的偏移量比出口为均匀分布时大。

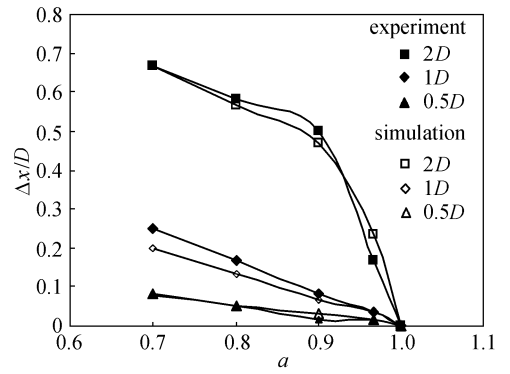


图 9 驻点偏移量的模拟值和测量值的比较

Fig. 9 Comparison of measured and simulated stagnation point offset

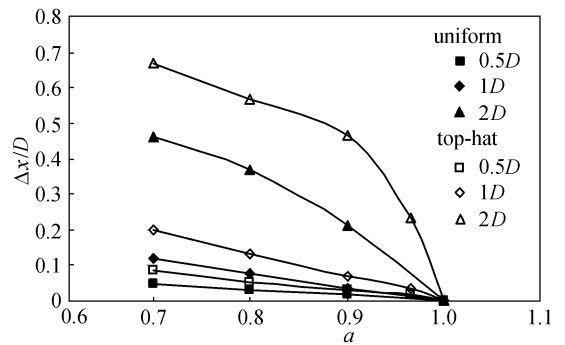


图 10 出口速度为均一分布和“礼帽”分布时撞击流驻点偏移量的比较

Fig. 10 Comparison of stagnation point offset of opposed jets with uniform and top-hat distributions

符号说明

a ——气速比

D ——喷嘴直径, m

L ——喷嘴间距, m

Re ——Reynolds 数

r ——径向坐标, m

rms——脉动速度均方根, $m \cdot s^{-1}$

u, u_1, u_2 ——轴向速度, $m \cdot s^{-1}$

Δx ——驻点偏移量, m

References

[1] Tamir A, Kitton A. Application of impinging streams in chemical engineering process review. *Chem. Commun.*, 1987, **50**: 241-330

[2] Hosseinalipour S M, Mujumdar A S. Flow and thermal characteristics of steady two dimensional confined laminar opposing jets (I): Equal jets. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1997, **1**:

- 27-38
- [3] Hosseinalipour S M, Mujumdar A S. Flow and thermal characteristics of steady two dimensional confined laminar opposing jets (II): Unequal jets. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1997, **1**: 24; 39-50
- [4] Johnson D A. Experimental and numerical examination of confined laminar opposed jets (I): Momentum balancing. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2000, **27**: 443-454
- [5] Johnson D A. Experimental and numerical examination of confined laminar opposed jets (II): Momentum imbalance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2000, **27**: 455-463
- [6] Johnson D A, Philip E Wood. Self-sustained oscillations in opposed impinging jets in an enclosure. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2000, **78**: 867-875
- [7] Champion M, Libby P A. Reynolds stress description of opposed and impinging turbulent jets (I): Closely spaced opposed jets. *Physics of Fluids*, 1993, **5**: 203-215
- [8] Kostiuk L W, Libby P A. Comparison between theory and experiments for turbulence in opposed streams. *Physics of Fluids*, 1993, **5** (9): 2301-2303
- [9] 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**: 377-395
- [10] Lindstedt R P, Luff D S, Whitelaw J H. Velocity and strain-rate characteristics of opposed isothermal flows. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2005, **74** (2): 169-194
- [11] 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): 168-172
- [12] Xu Jianliang (许建良), Li Weifeng (李伟锋), Cao Xiankui (曹显奎), *et al.* 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
- [13] Stan G, Johnson D A. Experimental and numerical analysis of turbulent opposed impinging jets. *AIAA Journal*, 2001, **39** (10): 1901-1908
- [14] Korusoy E, Whitelaw J H. Inviscid, laminar and turbulent opposed jets. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2004, **46**: 1069-1098
- [15] Sonia Besbes, Hatem Mhiri. Numerical and experimental study of two turbulent opposed plane jets. *Heat and Mass Transfer*, 2003, **39**: 675-686
- [16] Chou C P, Chen J Y, Janicka J, Mastorakos E. Modeling of turbulent opposed-jet mixing flows with $k-\epsilon$ model and second-order closure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47** (5): 1023-1035