

# 旋转横流中侧边射流偏斜和扩散的实验研究

李国能, 林江

(浙江科技学院轻工学院, 浙江省 杭州市 310023)

## Experimental Study on the Bending and Mixing in a Lateral Jet Issuing Into a Swirling Crossflow

LI Guoneng, LIN Jiang

(School of Light Industry, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** In order to study the bending and mixing characteristics in a lateral jet issuing into a swirling crossflow, a flow-visualization based experimental setup was built. A phase tunable laser and CCD system was employed, and several jet to crossflow velocity ratios ( $r=15, 30, 45, 60, 75$ ) were investigated. The Reynolds number  $Re$  based on the characteristic length of the crossflow tunnel and the jet velocity lies between 22 537 and 112 683. Experimental results showed that the penetration depth of the lateral jet maintains nearly unchanged when the jet to crossflow velocity ratio is large enough ( $r>30$ ), which is different from the results from the jet injected into uniform crossflow. On the other hand, the larger jet to crossflow velocity ratio is not the greater access to the spread width. In this work, the case of  $r=60$  obtained largest spread width, and the spread width maintains relatively large in a large penetration zone, which is good for the mass diffusion and species mixing.

**KEY WORDS:** swirling crossflow; lateral jet; central trajectory; spread width

**摘要:** 为研究旋转横流中侧边射流的偏斜和扩散特性, 搭建了横向射流流动显示实验台架, 采用可调同步激光器和 CCD 摄影技术获得了不同射流速度比率时( $r=15、30、45、60、75$ ) 横向射流的流场结构, 基于横流槽道特征尺寸和射流速度的雷诺数  $Re$  介于 22 537 和 112 683 之间。实验结果表明, 旋转横流中侧边射流的射流速度比率较大( $r>30$ )时, 射流深度基本不变, 异于均匀横流中侧边射流的气流偏斜特性。另外, 并非越大的射流速度比率就能获得越大的射流扩展宽度, 当  $r=60$  时, 系统的射流扩展宽度最大, 而且在较大的射流深度区域内维持较大的扩展宽度, 有利于物质的混合扩散。

**基金项目:** 浙江省自然科学基金项目(Y1110642); 浙江省高校创新团队项目(T200918); 浙江省高校科研计划项目(Y201016927)。

Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Y1110642); The Project of College Innovative Team of Zhejiang Province (T200918); The Project of College Scientific Research of Zhejiang Province (Y201016927)。

**关键词:** 旋转横流; 侧边射流; 中心轨迹; 扩展宽度

## 0 引言

工业中广泛存在着横向射流(jet in crossflow, JICF)问题, 如火力发电厂燃煤锅炉中, 为降低  $SO_x$  和  $NO_x$  等污染物的排放, 一种可行的改造方案是在燃尽区增加一层或数层的分级空气, 或喷入天然气、尿素、携带超细煤粉的循环烟气等营造还原气氛以实现燃煤锅炉的低污染排放<sup>[1]</sup>。另外, 燃气轮机燃烧室中的燃气、保护气膜和稳定控制气流也属于横向射流问题。但是, 上述工业设备中横向射流喷入的主流(即横流)并非均匀往下游流动的气流, 而是旋转气流, 大型电站锅炉的燃尽区域内往上流动的气流存在扭转残余, 属于低旋流强度的横流, 燃气轮机中燃烧区域内的气流属于强旋流横流, 因此, 仅仅研究均匀横流中侧边射流的流动特性是不够的, 需要研究旋转横流中侧边射流(jet in swirling crossflow, JISCF)的气流偏斜和扩散特性。

横向射流是一个古老而新颖的流体力学问题, 由于其流动的复杂性, 至今仍不断有文献报道。国外的研究文献很多, 如 New<sup>[2]</sup>采用激光诱导荧光技术(laser induced fluorescence, LIF)研究了 JICF 椭圆形喷口的流场和涡系发展, 发现导流型椭圆喷口的横向射流具有更大的射流深度。Kelso<sup>[3]</sup>采用流动显示技术和热线风速仪研究了 JICF 圆形喷口的流场和涡系发展, 认为逆向旋转涡对(counter-rotating vortex pair, CVP)主导了射流和横流的混合过程。Margason<sup>[4]</sup>和 Karagozian<sup>[5]</sup>对 JICF 的研究作了综述, 提供了非常广泛的研究背景、应用和文献列表。在国内, 郭婷婷等<sup>[6]</sup>采用热线风速仪研究了 JICF 圆形喷口的流场, 获得了射流角度对尾涡发展的影响

规律。李炜等<sup>[7]</sup>采用粒子图像测速仪(*particle imaged velocimeter*, PIV)研究了 JICF 圆形喷口的射流中心轨迹和涡系结构,认为虚质量源对涡系发展起着重要的作用。此外,关于 JICF 的流动和涡系发展,存在大量的数值模拟研究报告,分别采用了雷诺平均方法<sup>[8-10]</sup>,大涡方法<sup>[11-12]</sup>和直接数值模拟方法<sup>[13]</sup>研究了 JICF 的流动机制。上述的文献均是研究均匀横流中侧边射流的流动特性,根据笔者的文献检索,研究旋转横流中射流的流动规律的文献尚不多见。在 1991 年和 1992 年的文献报道中,Chao 等<sup>[14-15]</sup>采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型研究了旋转横流中侧边射流的射流深度,认为旋流强度减小了侧边射流的穿透深度,但是旋转气流改善了混合效果。在 2006 年的文献报道中,Gong 等<sup>[16]</sup>采用流动显示技术获得了燃气轮机内旋流喷口上方斜角喷入的气液两相气流,发现对于特定的旋流强度,存在最佳的射流速度比率和最佳的入射角度使得液滴的破碎以及液滴与横流的混合效果最好。旋转横流中射流的气流偏斜特性、混合扩散规律和涡系结构等值得深入研究。本文采用激光流动显示技术获得了基于烟雾颗粒示踪的 JISCF 流动图片,通过图像后处理方法获得图片的灰度矩阵,从而得到了 JISCF 在不同射流速度比率下的射流中心轨迹和射流扩展宽度,为工程应用提供参考。

## 1 实验简介

实验搭建的 JISCF 系统由方形有机玻璃槽道和圆形侧边喷口组成,如图 1 所示。方形有机玻璃槽道由 4 片有机玻璃粘合而成,垂直布置,其横断面的尺寸为  $80\text{mm}\times 80\text{mm}$ ,高度为  $600\text{mm}$ ,经水压试验保证了槽道四周的气密性。方形槽道的底部密封,底部上方  $30\text{mm}$  处四周设置 4 个进气口。进气口上方  $50\text{mm}$  处安装一层厚度为  $3\text{mm}$ ,孔隙率为  $0.283$  的有机玻璃板整流层;该整流层上方  $50\text{mm}$  处安装了一层厚度为  $10\text{mm}$ ,孔隙率为  $0.315$  的铝

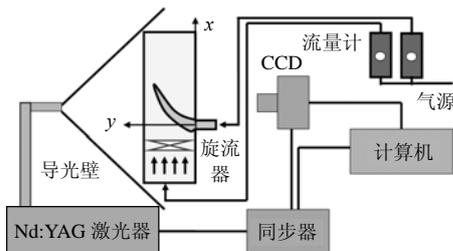


图 1 旋转横流中侧边射流的实验系统示意图  
Fig. 1 Sketch map of the experimental system of lateral jet issuing into swirling crossflow

板整流层,2 层整流层的布置可以获得均匀往上流动的气流;在铝板上方  $70\text{mm}$  处安装了厚度为  $30\text{mm}$  的叶片式旋流器。紫铜圆形喷口与方形槽道垂直布置,安装在方形槽道一个侧面的中心位置,喷口内径  $d$  为  $4\text{mm}$ ,安装在旋流器上方  $50\text{mm}$  处,即方形槽道高度方向  $280\text{mm}$  处,喷口出口平面与方形槽道内壁面平齐,喷口采用专业黑色油漆喷涂,从而避免对激光的反射,造成 CCD 相机拍摄的亮点。

横流和射流的空气流率由 2 个玻璃转子流量计控制,精度分别为  $6\%$  和  $4\%$ 。激光器采用 Nd:YAG 脉冲式激光器,最大输出的脉冲能量为  $200\text{mJ}$ ,最大工作频率为  $15\text{Hz}$ ,CCD 分辨率为  $1920\times 1080$ 。激光器和 CCD 的协同工作由 MicroPulse 725 系列同步器控制,CCD 获得的图像经过图像采集卡由虚拟仪器平台 MicroVec 进行记录和处理,多帧图像的平均采用积分平均方法。实验时由 Nd:YAG 激光器通过导光臂将片激光面垂直投射于实验系统,片激光面经过侧边射流喷口中心轴线,CCD 的布置垂直于激光面进而进行图像拍摄。本文进行了多工况的实验研究,以初步探索旋转横流中侧边射流的中心轨迹和射流扩展宽度。实验工况如表 1 所示。表 1 中  $Q_c$  为旋转横流的总流率; $Q_j$  为射流流率; $r$  为射流速率比率,定义为射流速度与截面平均横流速度的比值; $Re$  为基于射流速度和横流特征尺寸的雷诺数。旋流强度是实验系统的一个重要参数,这个参数能说明实验结论是在多强的旋转横流的条件下产生的,需要定量。在实验中,无法通过测速方法获得系统的旋流强度,气流经过旋流器后,在旋流器出口处旋流强度最大,随后随着气流的上升其旋流强度不断下降。为定量地获得系统的旋流强度,作为实验结果分析的参考,采用 Gambit 对实验系统进行等比例建模,建模时忽略 2 层多孔型整流板,但是对叶片式旋流器进行全尺寸建模,基于 FLUENT 平台采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型对流场进行数值模拟,在旋流器出口上方  $5\text{mm}$  处的旋流强度为

表 1 旋转横流中侧边射流的实验工况表  
Tab. 1 Experimental cases of lateral jet issuing into swirling crossflow

编号	$Q_c/(\text{mL/s})$	$Q_j/(\text{mL/s})$	$r$	$Re$
1	1 722	50	15	22 537
2	1 722	100	30	45 073
3	1 722	150	45	67 610
4	1 722	200	60	90 146
5	1 722	250	75	112 683

0.49, 在侧边射流出口的横截面的旋流强度为 0.32。值得注意的是, 此时获得的旋流强度并非实验结果, 仅作为实验结果分析的参考数据。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 流场显示

图 2 给出了表 1 中所有工况在 CCD 连续拍摄 25 张流场图片的平均结果, 为使得实验结果更具有统计意义, 因而采用了积分平均方法对多张瞬时图片进行平均。由图 2 可见, 不同的射流速度比率下, 旋转横流中侧边射流的偏斜程度不同, 随着射流速度比率的增加, 其射流穿透深度迅速增大, 但是图 2 中后 4 张图的偏斜程度较为接近, 具体情况将在下文给出其中心轨迹的变化规律。另外, 图 2 中所示的方形槽道的上下壁面处各存在一个灰度值很大的狭长区域, 这些区域有机玻璃粘合处对激光面的反射造成的, 这些高灰度区域不会影响到本文对结果的分析。实验采用蚊香烟雾进行示踪, 示踪粒子具有良好的跟随性, 因此图 2 在转换成灰度矩阵后, 其灰度值的大小代表了当地的颗粒浓度(壁面粘合处的高灰度区域除外)。按照 Margason<sup>[4]</sup>和 Karagozian<sup>[5]</sup>等人的理论, 射流的中心轨迹有两种定

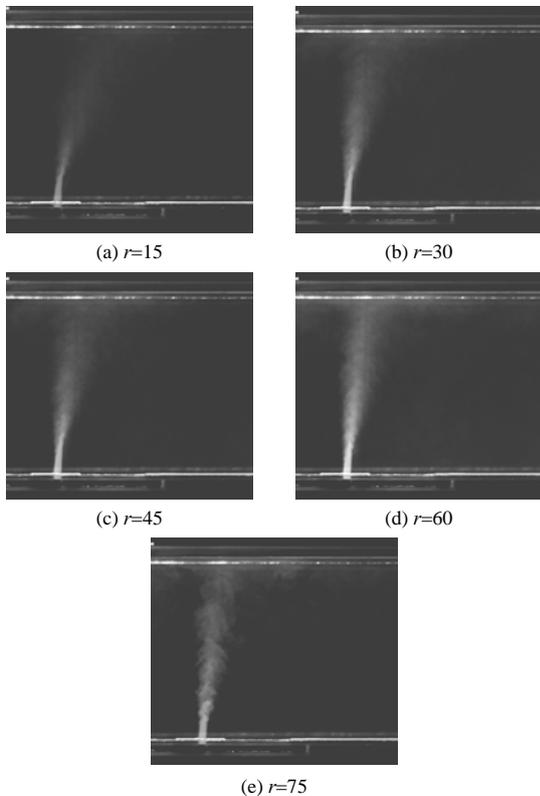


图 2 不同射流速度比率下流场的平均图像  
Fig. 2 Averaged images of the flow field under different jet to crossflow velocity ratio

义方法, 一种是图 2 所示截面中最大颗粒浓度的点的连线, 另外一种是图 2 所示截面中最大纵向速度的点的连线; 在本文中, 取最大灰度值的连线作为射流的中心轨迹, 统计得到的结果如图 3 所示。

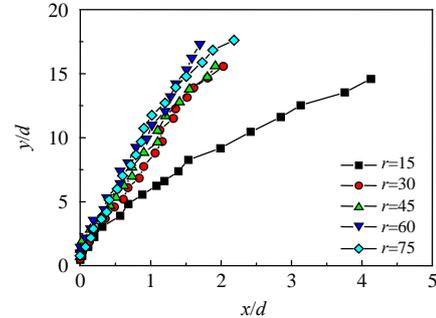


图 3 不同射流速度比率下射流的中心轨迹  
Fig. 3 Central trajectory of the jet under different jet to crossflow velocity ratio

### 2.2 射流中心轨迹

图 3 给出了不同射流速度比率下的中心轨迹变化规律, 由图 3 可见,  $r=15$  的工况的射流深度远小于其他工况, 在  $x/d=2$  时, 射流深度  $y$  仅为  $9.2d$ , 而其他工况的射流深度  $y$  均大于  $15.0d$ 。另外,  $r=30$ 、 $r=45$ 、 $r=60$  和  $r=70$  这 4 个工况的射流深度随着射流速度比率的增加轻微增加, 但是变化不明显, 基本上可认为这 4 个工况获得了相同的射流中心轨迹。在实际应用中, 提高射流速度比率意味着其质量流率更大, 在某些情况下为获得足够的射流深度不得不掺入惰性介质。本文的实验结果表明, 当射流速度比比较大时, 仅仅提高射流速度比率并不能获得更高的射流深度。前文已述侧边射流喷入的横流是旋转的横流, 根据旋转横流的流场特性, 在方形槽道的径向外周往上流动的速度较大, 而中心区域的速度较小, 因此当射流速度比比较大时, 射流能容易地穿透方形槽道径向外周往上流动的气流, 而在中心区域受到往上冲击的动量相对较小, 因此后 4 个工况的射流偏斜特性较为接近, 这与文献获得的结果一致<sup>[14-15]</sup>, 当射流动量较小时, 旋流气流降低了射流穿透深度, 当射流能克服旋流造成的径向压强时, 射流穿透深度则保持基本不变。

对于均匀横流中的侧边射流, 在 Margason<sup>[4]</sup>和 Karagozian<sup>[5]</sup>等人的文献中, 对射流深度  $y$  的无量纲化更多是将射流深度  $y$  除以射流速度比率  $r$  和射流喷口直径  $d$  的乘积  $rd$ , 从而获得经验回归公式为  $y/(rd)=A(x/(rd))^B$ , 常数  $A$  和  $B$  的取值范围为  $1.2 < A < 2.6$ ,  $0.28 < B < 0.34$ 。因此, 对图 3 采用  $rd$  作为无量纲因子进行归一化处理, 将结果与已有文献的

结果进行对比<sup>[17-20]</sup>,结果如图4所示。已有文献的数据点分散程度较大,说明横向射流的中心轨迹受多种因素决定,除 $r$ 和 $d$ 外,仍需考虑其他因素的影响。由图4可见本文获得的射流中心轨迹结果在文献结果的范围之内。对实验结果进行曲线拟合,拟合结果为 $y/(rd)=2.6472(x/(rd))^{0.6859}$ ,其相关系数 $R$ 为0.9896,常数 $A=2.6472$ ,可认为在文献取值范围之内,常数 $B=0.6859$ ,不在文献取值范围之内。值得注意的是,图4中的数据均是均匀横流中侧边射流的中心轨迹数据点,而本文的数据点是旋转横流中侧边射流的中心轨迹数据,两者有明显的区别。上文已述射流所在的横截面的旋流强度约为0.32,为低旋流条件,所以实验数据与均匀横流条件下的侧边射流的中心轨迹规律既有相似,又有区别。在大型电站锅炉SOFA层高位喷入分级空气或天然气或携带超细煤粉的气流以降低 $\text{NO}_x$ 的排放时,喷入层锅炉的横截面的气流往往存在一定程度的扭转残余,属于低旋流强度的旋转气流,本文的实验结果对于类似系统的设计提供参考。另外,由于已有文献对旋转横流中侧边射流的中心轨迹的报道较少,在图4中只能采用均匀横流中侧边射流的中心轨迹数据进行比较,虽然本文的工作是在低旋流强度的条件下,但是仍是2种不同的系统,可比性相对较差,本文的工作可为将来的研究积累基础数据。

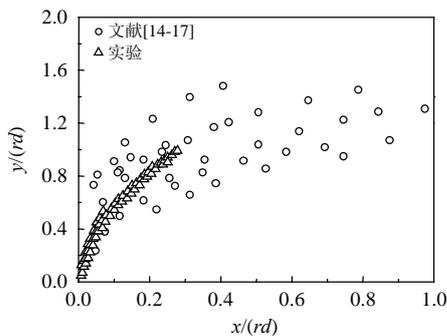


图4 射流中心轨迹与文献结果的对比

Fig. 4 Comparison between the central trajectory of the jet and the results from literatures

### 2.3 射流扩展宽度

射流穿透深度是工程设计的一个重要参数,在一个JISCF系统中,射流扩展宽度是另外一个重要参数,这直接决定了截面处设置侧边喷口的数量。射流扩展宽度 $w$ 需要进行定义,由于目前查找不到相关的文献定义,考虑到甲烷和天然气的富燃极限体积分数为0.15,因此作者对射流扩展宽度作出如下定义:沿射流深度方向 $y$ 在某一恒定 $y$ 值的线上,

存在一个灰度值最大的点,该点已被定义为被射流中心轨迹上的点,在该点的横流方向的左右各存在一个灰度值为最大灰度值的15%的点,这2个点之间的距离定义为射流扩展宽度。因此,只需要将图2进行灰度矩阵的运算,提取等高线边界并进行统计,即可获得沿射流深度方向的射流扩展宽度,结果如图5所示,可见,所有工况的射流扩展宽度均是先增加后减小。另外,由图5可知,对于一个固定的系统,并非越大的射流速度比率就能获得越大的射流扩展宽度, $r=15、30、45、60$ 和 $75$ 这5个工况的最大射流扩展宽度先增加后轻微下降,最大的射流扩展宽度依次为 $w=1.4d、2.58d、2.77d、3.16d$ 和 $2.89d$ ,最大射流扩展宽度的位置分别为 $y=6.25d、8.75d、10.0d、12.5d$ 和 $12.5d$ 。从混合角度而言, $r=15$ 工况的射流扩展宽度小,不利于混合; $r=30、45$ 和 $75$ 这3个工况其射流扩展宽度达到最大值后迅速减小,同样不利于混合; $r=60$ 的工况的射流扩展宽度在 $6.25d \leq y \leq 16.25d$ 的范围内,射流扩展宽度 $w$ 均大于 $2d$ ,具备了良好的混合特性。另外,由图5可见,当 $r=45、60$ 和 $75$ 时,均存在一个明显的奇异点,该奇异点紧挨着最大射流扩展宽度所在的位置,多次测量后证实该奇异点并非测量误差,产生这一现象的物理机制尚不清楚,将来工作可采用高速摄影技术进行深入研究。

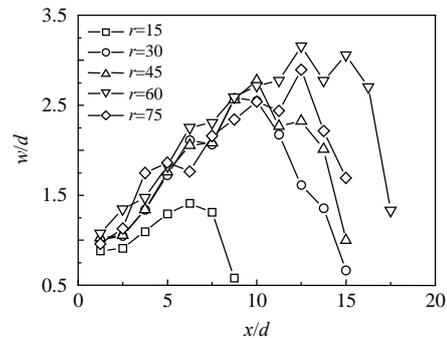


图5 旋转横流中侧边射流扩展宽度的变化规律

Fig. 5 Change law of the spread width of the lateral jet issuing into the swirling crossflow

### 3 结论

采用可调同步的激光流动显示技术获得了基于烟雾颗粒示踪的旋转射流中侧边射流流场结构,研究了不同射流速度比率下( $r=15、30、45、60、75$ )的射流中心轨迹和射流扩展宽度的变化规律,侧边喷口喷入的横流截面的气流旋流强度为0.32,获得了以下结论:

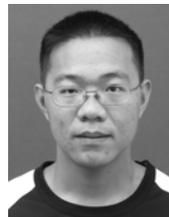
1) 低旋流条件下旋转横流中侧边射流的偏斜

特性与均匀横流条件下的侧边射流的中心轨迹规律既有相似, 又有区别; 对于本文的系统, 射流中心轨迹的拟合公式为  $y/(rd)=2.6472(x/(rd))^{0.6859}$  进行预测, 其相关系数  $R$  为 0.9896。另外, 当射流速度比率较大时, 仅仅提高射流速度比率并不能获得更大的射流深度。

2) 并非越大的射流速度比率就能获得越大的射流扩展宽度, 对于本文的系统,  $r=60$  时获得最大的射流扩展宽度, 而且在较大的区域内保持较大的射流扩展宽度, 其混合效果远优于其他工况。

## 参考文献

- [1] 沈伯雄, 孙幸福. 天然气先进再燃区脱硝效率影响因素的实验与模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 146-149.  
Shen Boxiong, Sun Xingfu. Study on the parameters that influence the efficiency of DE-NO in advanced natural gas reburning area by experimental and kinetic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 146-149(in Chinese).
- [2] New T H, Lim T T, Luo S C. Elliptic jets in cross-flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 494(11): 119-140.
- [3] Kelso K R, Lim T T, Perry A E. An experimental study of round jets in cross-flow[J]. Journal of fluid Mechanics, 1996, 306(00): 111-144.
- [4] Margason R J. Fifty years of jet in cross-flow research[C]// Computational and experimental assessment of jets in cross-flow. Winchester: The Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1992: 34-75.
- [5] Karagozian A R. Background on and applications of jets in cross-flow[C]// Manipulation and control of jets in cross-flow. Udine: The International Center for Mechanical Sciences, 2001: 3-13.
- [6] 郭婷婷, 徐忠, 李少华. 2种角度横向紊动射流的实验分析[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(11): 1207-1210.  
Guo Tingting, Xu Zhong, Li Shaohua. Experimental study on turbulent jets injected obliquely into a cross-flow[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(11): 1207-1210(in Chinese).
- [7] 李炜, 姜国强, 张晓元. 横流中圆孔端射流的漩涡结构[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 576-582.  
Li Wei, Jiang Guoqiang, Zhang Xiaoyuan. Vortex structures of round turbulent jets in cross-flow[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(5): 576-582(in Chinese).
- [8] 郭婷婷, 李少华, 徐忠. 横向紊动射流流场结构的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 191-195.  
Guo Tingting, Li Shaohua, Xu Zhong. A numerical simulation of three-dimensional turbulent jets in crossflow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 191-195(in Chinese).
- [9] 李少华, 袁斌, 刘利献, 等. 多孔横向紊动射流涡量场的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 100-104.  
Li Shaohua, Yuan Bin, Liu Lixian, et al. Numerical investigation on the vortices of multiple turbulent jet in crossflow[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(23): 100-104(in Chinese).
- [10] 郭婷婷, 金建国, 李少华, 等. 不同出射角度对气膜冷却流场的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 117-121.  
Guo Tingting, Jin Jianguo, Li Shaohua, et al. A numerical simulation in film cooling flows with different injection angles[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 117-121(in Chinese).
- [11] 李国能, 周昊, 杨华, 等. 横流中湍流射流的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 87-91.  
Li Guoneng, Zhou Hao, Yang Hua, et al. Numerical study of turbulent jet in cross-flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 87-91(in Chinese).
- [12] 杨华, 李国能, 周昊, 等. 横向椭圆射流的大涡模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(7): 1181-1185.  
Yang Hua, Li Guoneng, Zhou Hao, et al. Large eddy simulation of transverse elliptic jet[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(7): 1181-1185(in Chinese).
- [13] Muppidi S, Mahesh K. Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 530(5): 81-100.
- [14] Chao Y C, Ho W C. Heterogeneous and nonisothermal mixing of a lateral jet with a swirling crossflow[J]. Journal of Thermophysics, 1991, 5(3): 394-400.
- [15] Chao Y C, Ho W C. Numerical investigations of heated and unheated lateral jets discharging into a confined swirling crossflow [J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 1992, 22(3): 343-361.
- [16] Gong X, Choi K J, Cernansky N P. Lean direct wall injection mode atomization of liquid jets in swirling flow[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 209-210.
- [17] Smith S H, Mungal M G. Mixing, structure and scaling of the jet in cross-flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 357(9): 83-122.
- [18] Kamotani Y, Greber I. Experiments on turbulent jet in a crossflow [J]. AIAA Journal, 1972, 10(11): 1425-1429.
- [19] Su L K, Han D, Miraflor M, et al. Measurements of scalar and velocity fields in turbulent crossflowing jets with low velocity ratio [J]. AIAA Paper, 2000, 815(1): 1-11.
- [20] Chochua G, Shyy W, Thankur S, et al. A computational and experimental investigation of turbulent jet and crossflow interaction [J]. Numerical Heat Transfer A, 2000, 38(4): 557-572.



李国能

收稿日期: 2010-09-25。

作者简介:

李国能(1981), 男, 工学博士, 讲师, 主要从事流体力学测量和燃烧热声不稳定的研究工作, gnlene@163.com。

(责任编辑 王庆霞)