

5 mm 直径翘边孔横向耦合射流轨迹实验

姚尚宏¹, 雷雨冰²

(1. 中国飞行试验研究院 发动机所, 西安 710089;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用粒子图像测速仪(PIV)对 5 mm 直径翘边孔横向耦合射流流场进行了研究,实验结果表明:射流入射角与翘边孔角度有较大的偏差,但是随着翘边孔角度的增加,射流入射角增大;引入翘边孔射流有效直径,由试验数据得到了有效直径的数值。对射流轨迹曲线进行了拟合,考虑了两种主通道气流速度、四种不同角度的翘边孔和三种不同深度的主通道,方程式能较好地反映小尺寸通道翘边孔射流的流动结构,为今后的流场设计提供依据。

关 键 词: 粒子图像测速仪; 横向耦合射流; 5 mm 直径翘边孔; 流动结构; 轨迹曲线

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Experiment on coupled jet-in-crossflow trajectory of 5 mm diameter warped hole

YAO Shang-hong¹, LEI Yu-bing²

(1. Engine Department, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China;
2. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) was used for learning the 5 mm diameter warped hole flow field in jet-in-crossflow. The result shows that: the jet angle differs from the warped hole angles, the larger of the warped hole angle means the larger jet angle; there will be a useful parameter named effective diameter from the experiment data. Jet flow trajectory curves were fitted in condition of two types of velocity, four different warped hole angles and three tunnels with different depth. The curve is well fitted with the real jet flow, contributing to the future flow field design in micro combustors or other small tunnels.

Key words: particle image velocimetry (PIV); coupled jet-in-crossflow;
5 mm diameter warped hole; flow structure; trajectory curve

横向紊动射流流动的实验研究对认识流场结构,研究射流与主气流的掺混特性,以及发展用于模拟横向紊动射流流动的湍流模型有着十分重要的作用^[1]。由于国内外学者的不懈努力,在实验测量方面对横向紊动射流的研究取得了一定的进展,并且随着平面激光诱导荧光(PLIF)成像仪^[2-3]、PIV^[4-5]、激光多普勒测速仪(LDV)^[6-7]和热线风速仪^[8]正逐渐成为流场测量实验中的主流

设备,射流倾斜入射的横向紊动射流问题在工程实际中有着广泛的应用,对这一问题的研究同时也具有重要的理论意义。目前,关于射流倾斜入射大多是关于气膜冷却方面的研究^[9-12],研究点侧重于传热和冷却,对于主流区域的掺混关注相对较少。同时,研究表明孔的形式对流场有很大的影响。

翘边孔因其结构形式简单,对射流的角度控

收稿日期:2012-12-11

基金项目:国家自然科学基金(10577011)

作者简介:姚尚宏(1984—),男,重庆万州人,硕士,主要从事航空发动机工作特性试飞研究。

制比较容易已经被应用于燃烧室的设计之中,但是国内外并未见学者对翘边孔研究的成果进行发表,对于翘边孔对射流角度的控制、射流轨迹线的影响并不明确.翘边孔简图如图1所示,翘边孔角度为 γ .

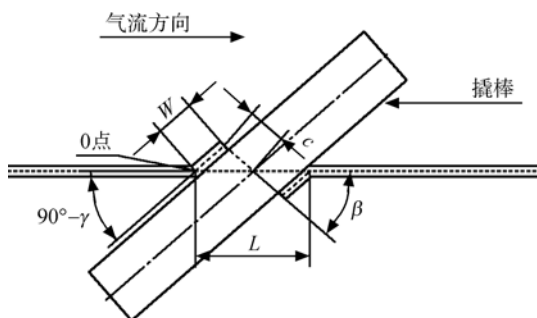


图1 翘边孔简图

Fig. 1 Schematic of warped hole

本文借助于 PIV 测量技术对带有翘边孔的横向耦合射流进行了较为细致的研究,考察了翘边孔角度、主通道高度、主通道气流速度和主、次通道流量比对射流流场的影响.通过对流场的测量,得到了沿主通道流向射流孔中心截面的速度场,提取了射流轨迹曲线并对其进行拟合,得到了射流轨迹的拟合曲线,为微型燃烧室流场或小通道内气流的分布设计提供参考.

1 横向耦合射流实验件设计

横向耦合射流实验件尺寸:孔的直径为 5 mm,孔的平均射流速度达到 50 m/s, Re 大于 10^4 .

实验段采用两个矩形气流通道构型,分别为主通道和次通道,主、次通道之间用实验板隔开,实验段尾部和侧面都有玻璃.为研究通道高度对流场的影响,主通道高度设计为可调节的.为了控制通过孔口的流量,次通道进口和出口均设计了阀门和流量计,主通道出口直接通大气.实验段设计示意图如图2所示.

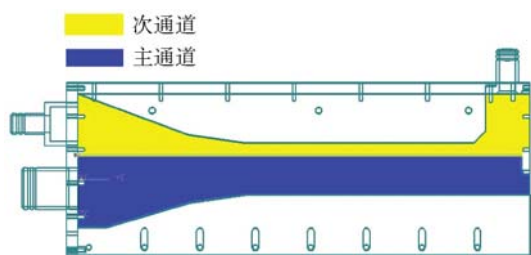


图2 实验段设计示意图

Fig. 2 Design schematic of the test section

为配合 PIV 的观测,实验段采用从尾部打进片光,从侧面拍摄观测的方法.尾部和侧面均采用玻璃并使用密封胶进行密封.实验件实物图如图3所示.

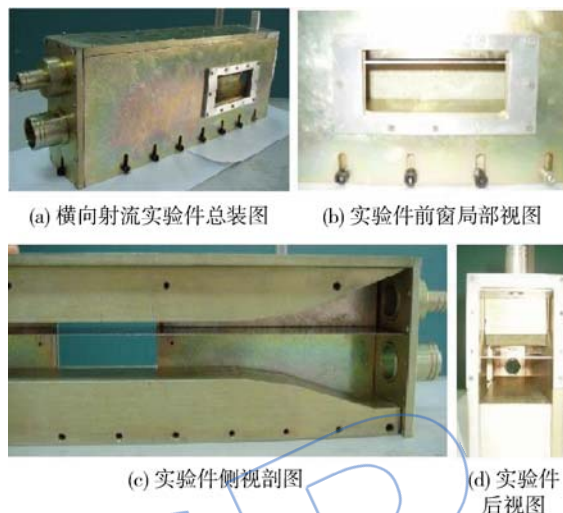


图3 实验件实物图

Fig. 3 Photos of test section

2 实验系统和测量方法

2.1 实验测量系统

本文采用的 PIV 系统为南京航空航天大学能源与动力学院所使用的测量系统,该系统经多次使用,得到了很多有价值的研究成果^[13-14].本实验示踪粒子采用了直径为纳米级的二氧化钛颗粒.

气源由一台空气压缩机提供, LGFD 系列螺杆式空气压缩机,功率为 37 kW.

为了对次通道和主通道的气流进行控制,需要对通道的气流进行测量.本文采用玻璃浮子流量计对流量进行测量,流量计如图4所示,根据各个通道流量的要求,选择型号为 LZB-15,量程为



图4 玻璃浮子流量计

Fig. 4 Glass float flow meter

0.6~6 m³/h 和型号为 LZB-40, 量程为 6~60 m³/h 的流量计。

2.2 测量方法和方案

测试系统见图 5 所示。本文研究的几何方案有翘边孔角度 γ 和主通道的深度 H , 具体方案见表 1, 主通道气流速度 U 分别为 5 m/s 和 10 m/s, 实验测量方案共 24 种。

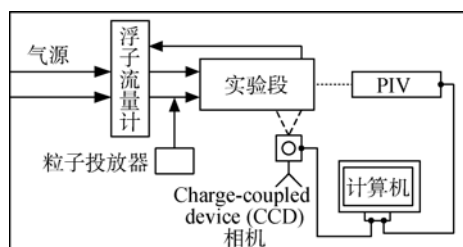


图 5 测试系统

Fig. 5 Test system

表 1 翘边孔几何实验方案

Table 1 Geometry test scheme of warped hole

H/mm	$\gamma/(\circ)$			
	0	30	45	60
24	A	B	C	D
30	E	F	G	H
36	M	N	P	R

3 实验结果及分析

在实际工作中, 人们首先关心的是射流的轨迹。通过研究射流轨迹, 我们可以从宏观上了解射流在主流中的穿透能力, 以及射流与主流的掺混情况。目前对射流轨迹线的确定方法主要是基于射流在对称平面上的最大流速连线来确定, 如 Subramanya 等^[15]的结果。本文测试得到的流场曲线如图 6 所示。

3.1 翘边孔横向射流轨迹公式的推导

目前, 圆孔横向射流无论是在理论推导、数值模拟还是实验方面都得到了较多的研究, 对于圆孔垂直射流, 理论推导显示其是关于等效直径 D 和射流速度比 R 的乘积的函数, 其形式如式(1)所示。

$$\frac{z}{R \cdot D} = f\left(\frac{x}{R \cdot D}\right) \quad (1)$$

根据 Platten 和 Han 等的实验研究发现, 射流轨迹符合幂函数分布规律, 即有

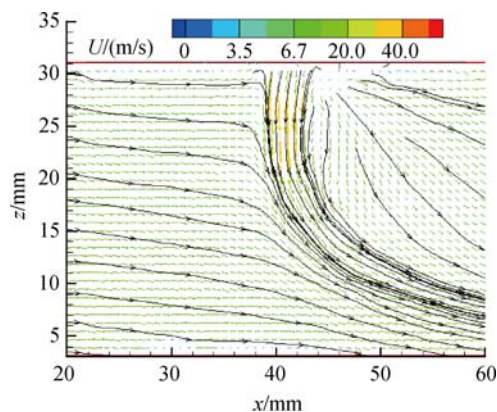


图 6 $U=10 \text{ m/s}$ 的射流流场结构

Fig. 6 Jet flow structure in the condition of $U=10 \text{ m/s}$

$$\frac{z}{R \cdot D} = A \left[\frac{x}{R \cdot D} \right]^B \quad (2)$$

式中 A, B 为系数。

在工程应用中, 带角度的射流情况很普遍, 带有一定角度的射流对流场有一定的影响, 为了考虑不同的入射角对射流流场的影响, 研究者将倾斜坐标引入到射流轨迹公式中, 倾斜坐标系如图 7 所示, 图中, x 轴沿横向主气流方向, 与直角坐标系中的 X 轴重合, z 轴沿射流射出方向, 射流与 X 轴之间的夹角为 α 。其中

$$Z = z / \sin \alpha \quad X = x - z \cdot \cot \alpha$$

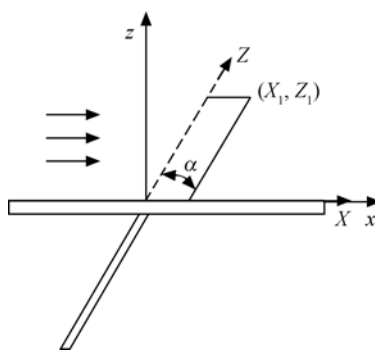


图 7 倾斜坐标系

Fig. 7 Tilted coordinate system

对于有角度的射流轨迹分布, 由

$$\frac{Z}{R \cdot D} = A \left[\frac{X}{R \cdot D} \right]^B \quad (3)$$

换算成 xz 坐标为

$$x = R \cdot D \left[\frac{z}{A \cdot R \cdot D \cdot \sin \alpha} \right]^{\frac{1}{B}} + z \cot \alpha \quad (4)$$

当 $\alpha=90^\circ$ 时, 射流垂直入射, 式(4)与式(3)一致。

由于翘边孔形状比较复杂, 射流入射角与翘

边孔几何角有一定的偏差,另外,由于翘边孔造成的孔流量系数的变化,使得孔的等效直径有所变化,因此,对于公式(2)~式(4),需要确定的参数为孔的等效直径 D 和射流偏转角 α 。

另外,随着等效直径 D 的改变,在通过孔的空气流量 $\dot{m}$ 一定的情况下,射流速度 v_j 有所变化,导致不同的射流孔有不同的速度比 R 。

$$R = \frac{v_j}{U}$$

$$\dot{m} = \rho v_j A = \rho v_j \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (5)$$

由式(2)~式(5)得到

$$R = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} \cdot \rho U \cdot D^2} \quad (6)$$

可以看出,当空气流量和主通道气流速度一定时,速度比 R 是关于等效直径 D 的函数,随着等效直径的变化而变化。本文通过实验的方法确定出了翘边孔的等效直径 D 和射流偏转角 α 。

本文通过对轨迹的拟合,最终确定系数 $A=1.9$, $B=3.125$,因此,翘边孔横向射流轨迹方程为

$$x = R \cdot D \left[\frac{z}{1.9 \times R \cdot D \sin \alpha} \right]^{\frac{1}{3.125}} + z \cot \alpha \quad (7)$$

3.2 主通道气流速度为 10 m/s 射流轨迹分析

图 8 至图 15 给出了翘边孔角度 γ 为 0° , 30° , 45° 和 60° ,主通道气流速度 U 为 10 m/s 工况下,射流轨迹、数据拟合与实验结果的对比图,射流轨迹图坐标采用无量纲坐标,用 $R \cdot D$ 值来标定。 D 和 α 值由实验结果拟合得出,具体数值参考表 2 所示。

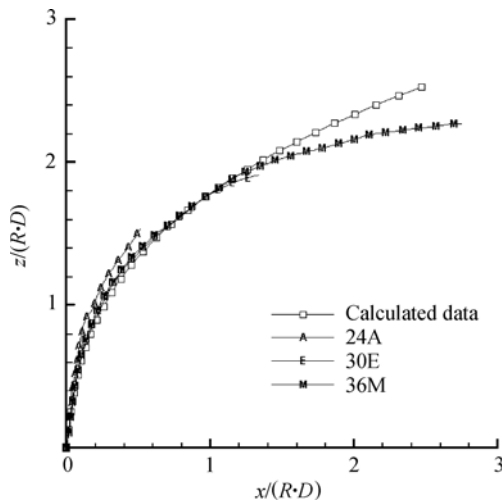


图 8 翘边孔射流轨迹曲线拟合 ($\gamma=0^\circ$, $U=10$ m/s)

Fig. 8 Trajectory curves fitted with warped hole jet flow ($\gamma=0^\circ$, $U=10$ m/s)

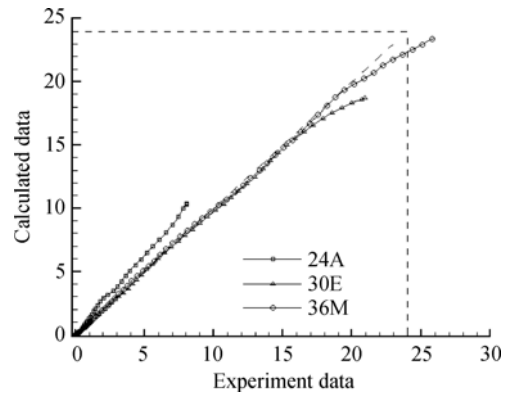


图 9 翘边孔射流轨迹实验结果与数据拟合曲线对比

($\gamma=0^\circ$, $U=10$ m/s)

Fig. 9 Experimental trajectory curves of warped hole jet flow contrast with fitted curve

($\gamma=0^\circ$, $U=10$ m/s)

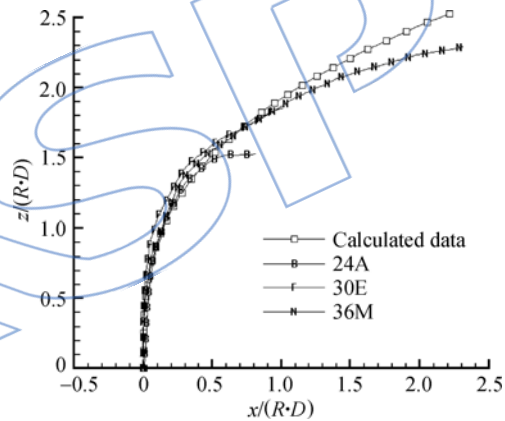


图 10 翘边孔射流轨迹曲线拟合 ($\gamma=30^\circ$, $U=10$ m/s)

Fig. 10 Trajectory curves fitted with warped hole jet flow ($\gamma=30^\circ$, $U=10$ m/s)

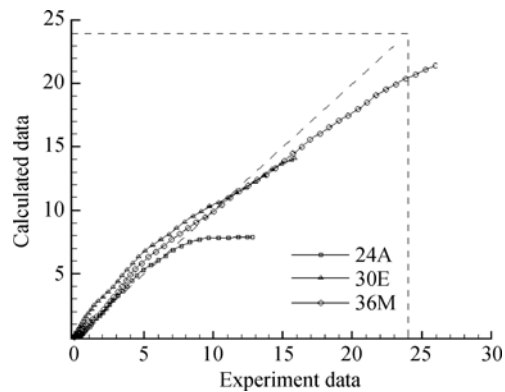


图 11 翘边孔射流轨迹实验结果与数据拟合曲线对比

($\gamma=30^\circ$, $U=10$ m/s)

Fig. 11 Experimental trajectory curves of warped hole jet flow contrast with fitted curve

($\gamma=30^\circ$, $U=10$ m/s)

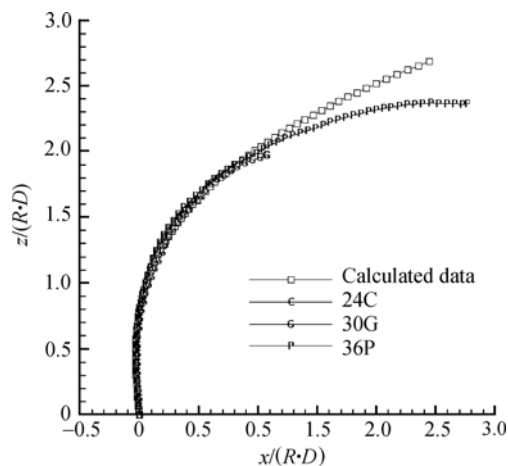
图 12 翘边孔射流轨迹曲线拟合 ($\gamma=45^\circ, U=10 \text{ m/s}$)

Fig. 12 Trajectory curves fitted with warped hole jet flow ($\gamma=45^\circ, U=10 \text{ m/s}$)

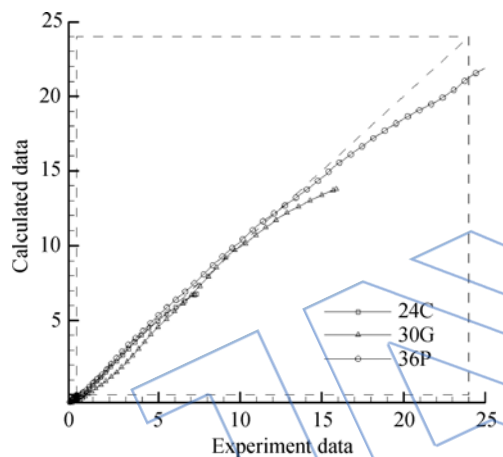
图 13 翘边孔射流轨迹实验结果与数据拟合曲线对比 ($\gamma=45^\circ, U=10 \text{ m/s}$)

Fig. 13 Experimental trajectory curves of warped hole jet flow contrast with fitted curves ($\gamma=45^\circ, U=10 \text{ m/s}$)

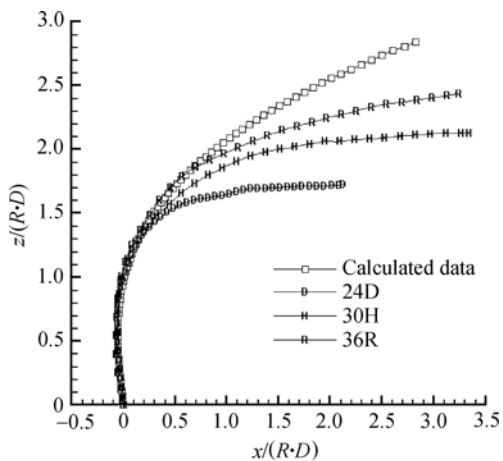
图 14 翘边孔射流轨迹曲线拟合 ($\gamma=60^\circ, U=10 \text{ m/s}$)

Fig. 14 Trajectory curves fitted with warped hole jet flow ($\gamma=60^\circ, U=10 \text{ m/s}$)

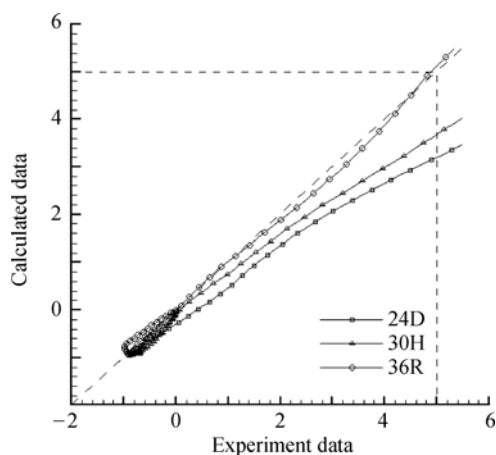
图 15 翘边孔射流轨迹实验结果与数据拟合曲线对比 ($\gamma=60^\circ, U=10 \text{ m/s}$)

Fig. 15 Experimental trajectory curves of warped hole jet flow contrast with fitted curves ($\gamma=60^\circ, U=10 \text{ m/s}$)

表 2 主通道气流速度为 10 m/s 条件下 D 和 α 实验数据拟合结果

Table 2 D and α at the $U=10 \text{ m/s}$

$\gamma/(\circ)$	D/mm	$\alpha/(\circ)$	R	$R \cdot D$
0	8.0	-6	1.95	15.6
30	8.0	1	1.95	15.6
45	8.5	5	1.73	14.7
60	9.0	8	1.54	13.9

实验结果表明:射流入射角 α 与翘边孔角度 γ 有一定偏差,翘边孔角度越大,射流入射角也随着增大,但是增大的幅度并不相同.这是因为在壁厚较薄的情况下,射流受到内外壁气流的耦合作用较强,只是在一定程度上的受到翘边孔的导流作用.

翘边孔的等效直径随着翘边孔角度的增加有所加大,在主通道气流速度为 10 m/s 条件下,变化并不明显.受等效直径影响的射流主流速度比变化也不大,都在 2 以内.

从射流的轨迹可以看出,以 $R \cdot D$ 参数为尺度,射流轨迹在纵坐标小于 2 的范围内曲线各个翘边孔角度都拟合得比较好,因此可以确定本拟合曲线的适用范围是 $z/(R \cdot D) < 2$.

图 16 给出了主通道气流速度为 10 m/s ,不同翘边孔角度条件下所对应的射流轨迹曲线关系.从图可以看出:射流入射角度对射流影响很大,射流入射角随着翘边孔角度的增大而增大,当射流

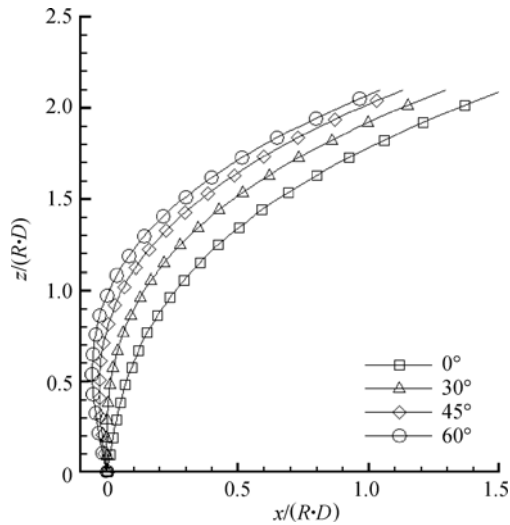


图 16 主通道气流速度为 10 m/s 条件下不同翘边孔角度射流轨迹曲线图

Fig. 16 Trajectory curves with the different warped hole angles at $U=10$ m/s

孔为平孔时,射流对主流的影响较小,当翘边孔角度增大到 60° 时,射流对主流上游以及对射流的深度都有较大的影响.从射流轨迹增长的幅度看,随着入射角增大,向主流上游增长的幅度变小,可以预计,当入射角增加到一定程度,射流对主流的影响将不再增大.

3.3 主通道气流速度为 5 m/s 射流轨迹分析

图 17 至图 20 给出了主通道气流速度为 5 m/s 时不同翘边孔角度的射流轨迹曲线,图中坐标仍为无量纲坐标,采用 $R \cdot D$ 参数进行标定.射流轨迹近似符合幂函数分布规律,通过对实验数据的拟合,得到了翘边孔射流等效直径 D 和入射角 α ,具体参数如表 3 所示.

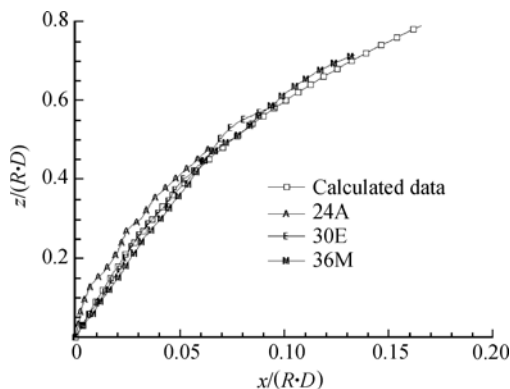


图 17 翘边孔射流轨迹曲线拟合 ($\gamma=0^\circ, U=5$ m/s)
Fig. 17 Trajectory curves fitted with warped hole jet flow ($\gamma=0^\circ, U=5$ m/s)

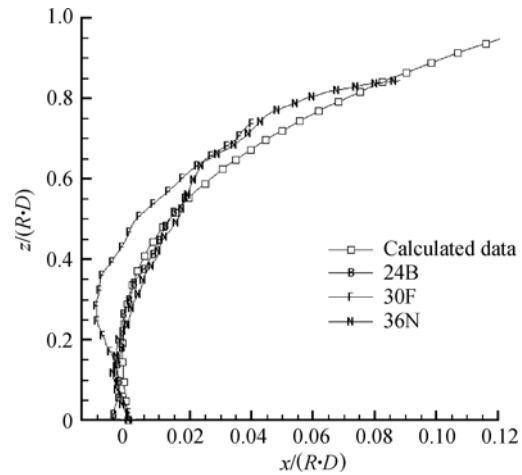


图 18 翘边孔射流轨迹曲线拟合 ($\gamma=30^\circ, U=5$ m/s)
Fig. 18 Trajectory curves fitted with warped hole jet flow ($\gamma=30^\circ, U=5$ m/s)

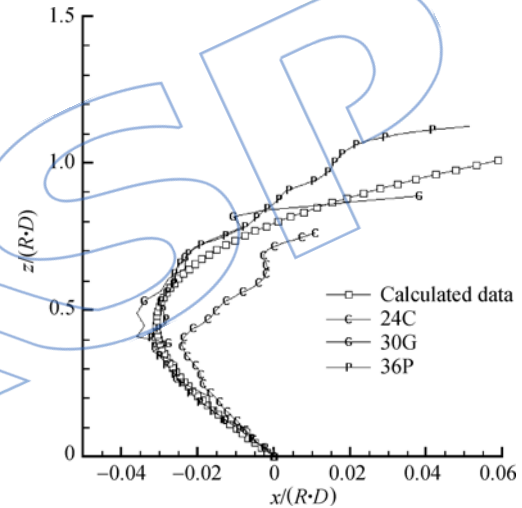


图 19 翘边孔射流轨迹曲线拟合 ($\gamma=45^\circ, U=5$ m/s)
Fig. 19 Trajectory curves fitted with warped hole jet flow ($\gamma=45^\circ, U=5$ m/s)

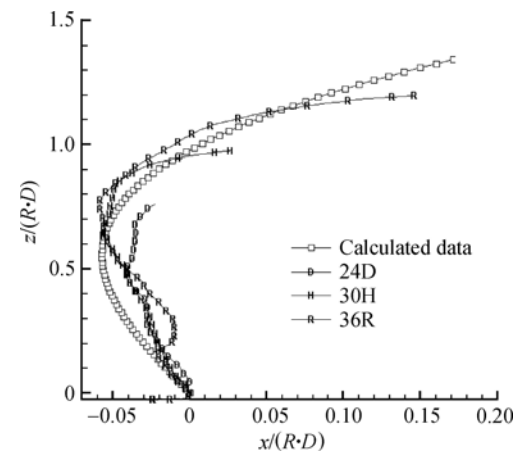


图 20 翘边孔射流轨迹曲线拟合 ($\gamma=60^\circ, U=5$ m/s)
Fig. 20 Trajectory curves fitted with warped hole jet flow ($\gamma=60^\circ, U=5$ m/s)

表3 主通道气流速度为5 m/s条件下D和 α 实验数据拟合结果

Table 3 D and α at $U=5$ m/s

$\gamma/(\circ)$	D/mm	$\alpha/(\circ)$	R	$R \cdot D$
0	5.0	-6	10.00	50.0
30	6.0	1	6.94	41.6
45	8.0	5	3.91	31.3
60	8.5	8	3.46	29.4

对比主通道气流速度为10 m/s时的射流参数,从表2的数据可以看出,射流入射角相同,等效直径有不同程度的减小,速度比R变大,事实上,从式(2)~式(7)分析,起作用的是R和D的乘积 $R \cdot D$,从表3中可以看出, $R \cdot D$ 值一直在下降,在射流流量和主通道气流速度一定的条件下,从式(2)~式(6)可以得出

$$R \cdot D = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} \cdot \rho v_{\infty} \cdot D^2} \cdot D = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi}{4} \cdot \rho v_{\infty} \cdot D} \sim f\left(\frac{1}{D}\right)$$

因此,可以表明翘边孔的等效直径随着翘边孔的角度增大而增大。

从图21可以看出,由于主通道气流速度的减小,速度比相对较大,对主流的影响也加大。由于主流是在有限通道内流动,射流在主流区会形成回流,影响射流轨迹曲线。从各条曲线和实验数据的对比来看,主通道气流速度5 m/s条件下,公式适用的范围是 $z/(R \cdot D) < 0.8$ 。图21给出了各

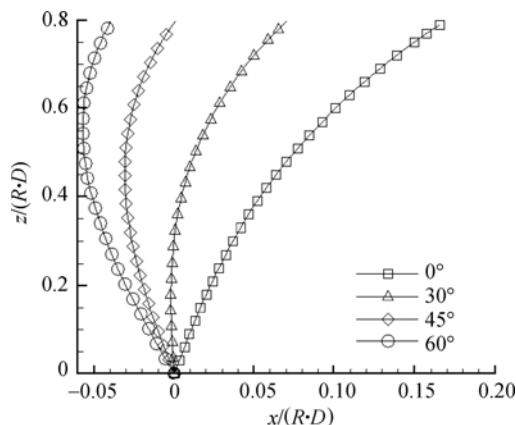


图21 主通道气流速度为5 m/s条件下不同翘边孔角度射流轨迹曲线图

Fig. 21 Trajectory curves with the different warped hole angles at $U=5$ m/s

个射流入射角对射流的影响,从图中可以看出,随着入射角的增大,射流对主流的影响区域增大,对主流上游的影响很明显。

4 结 论

通过对翘边孔的横向耦合射流进行实验测量,得到以下结论:

1) 由于翘边孔形状不规则,射流入射角 α 与翘边孔角度 γ 有较大的偏差,但是随着翘边孔角度的增加,射流入射角是增大的。

2) 引入翘边孔有效直径D,由实验数据得到了有效直径D的数值,对带有翘边孔的横向耦合射流流场进行了实验测量,得到了射流孔中心截面的速度流场,总结出带翘边孔横向射流的射流轨迹方程,方程关系式为

$$x = R \cdot D \cdot \left\{ \frac{z}{1.9 \times R \cdot D \sin \alpha} \right\}^{\frac{1}{3.125}} + z \cot \alpha$$

关系式能较好地符合小通道内翘边孔射流的流动结构,为今后的流场设计提供依据。

参考文献:

- [1] McGuirk J J, Spencer A. Coupled and uncoupled CFD prediction of the characteristics of jets from combustor air admission ports[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(2): 327-332.
- [2] Haven B A, Kurosaka M. Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 352: 27-64.
- [3] Johari H, Pacheco-Tougas M Y, Hermanson J C. Penetration and mixing of fully modulated turbulent jets in crossflow[J]. AIAA Journal, 1999, 37(7): 842-850.
- [4] Han D, Orozco V. Gross-entrainment behavior of turbulent jets injected obliquely into a uniform cross flow[J]. AIAA Journal, 2000, 38(9): 1643-1649.
- [5] 王卫东. 横喷射流与空气混合增强的实验研究[J]. 推进技术, 1998, 19(3): 52-56.
WANG Weidong. Experimental study on mixing enhancement of vortex generator jets[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(3): 52-56. (in Chinese)
- [6] Ligrani P M, Wigle J M, Jackson S W. Film-cooling from holes with compound angle orientations; Part 2 results downstream a single row of holes with 6d span wise spacing[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1994, 116(2): 353-362.
- [7] Spencer A, McGuirk J J. LDA measurements of feed annulus effects on combustor liner port flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(2): 219-227.
- [8] 张勃, 吉洪湖, 黄伟, 等. 圆转矩形喷管射流掺混特性实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2476-2482.

- ZHANG Bo,JI Honghu,HUANG Wei,et al. Experimental investigation of mixing characteristics of jet from circle-rectangular transition nozzle[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(11):2476-2482. (in Chinese)
- [9] 郭婷婷,刘建红,宋东辉,等. 不同形状气膜孔对气膜冷却效果的影响[J]. 动力工程,2006,26(3):333-336.
- GUO Tingting,LIU Jianhong,SONG Donghui,et al. Influence of jet orifice geometry on film cooling effectiveness[J]. Journal of Power Engineering,2006,26(3):333-336. (in Chinese)
- [10] 李少华,宋东辉,刘建红,等. 不同孔型平板气膜冷却的数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2006,26(17):112-116.
- LI Shaohua,SONG Donghui,LIU Jianhong,et al. Numerical simulations of flat plate film cooling using respectively different shaped jet holes[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(17):112-116. (in Chinese)
- [11] 郭婷婷,徐忠,李少华. 2种角度横向紊动射流的实验分析[J]. 西安交通大学报,2003,37(11):1208-1210.
- GUO Tingting,XU Zhong,LI Shaohua. Experimental study on turbulent jets injected obliquely into a crossflow[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2003,37(11):1208-1210. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 李念,张堃元,沙江. 应用 PIV 技术测量压电型自耦合射流[J]. 航空学报,2007,28(1):20-24.
- LI Nian,ZHANG Kunyuan,SHA Jiang. Experiments on the characteristics and structure of unsteady flow field of synthetic jet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2007,28(1):20-24. (in Chinese)
- [14] 李念,张堃元,徐惊雷,等. 自耦合射流对平行主射流的矢量偏转 PIV 实验[J]. 航空动力学报,2006,21(4):675-680.
- LI Nian,ZHANG Kunyuan,XU Jinglei,et al. Experimental investigation of primary flow vectoring using parallel self-coupling jets[J]. Journal of Aerospace Power,2006,21(4):675-680. (in Chinese)
- [15] Subramanya K,Porey P D. Trajectory of a turbulent cross flow[J]. Hydraulic Research,1984,22(5):343-354.