

文章编号: 1000-8055(2007)03-0412-07

不同出口型与驱动频率的活塞型 自耦合射流研究

李 念, 张堃元, 沙 江, 李 富

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用 PIV 对驱动频率为 10, 20, 30 Hz 的活塞式自耦合射流作动器流场进行测量, 应用相位锁定技术, 测得了一个周期内 72 个相位的瞬时流场。对 3 种频率下的自耦合射流的变化规律的分析, 发现当前实验条件下, 在几何尺寸不变时, 随着频率的增加, 冲程长度 L_0 与平均出口速度 U_0 迅速上升; 当频率不变时, 随着出口孔长宽比 AR 的增加, 冲程长度 L_0 于平均出口速度 U_0 呈下降趋势; 而随着孔板厚度 d 的增加, 冲程长度 L_0 却随之下降。通过 5 个周期 360 张瞬时流场图的平均得到了自耦合射流的时均流场, 数据分析表明, 自耦合射流方向性很好, 其沿流方向速度剖面具有自模化特征。相对于定常二维平面射流, 其稳定发展段中心线上沿流向方向速度衰减较快。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 自耦合射流; PIV 技术; 相位锁定

中图分类号: V231. 3

文献标识码: A

Experimental investigation of the characteristics of synthetic jet with different orifice aspect ratio and frequency

LI Nian, ZHANG Kun-yuan, SHA Jiang, LI Fu

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: By means of experimental investigation of the unsteady flow near the orifice of synthetic jet actuator using PIV technology and using the phase-locked sample technique, 72 instantaneous images and quantitative measurements during one actuating cycle for three different frequencies 10, 20, 30 Hz are obtained. The PIV measurements display the properties and structures of the unsteady flow field. Detailed study shows that in the current experiment, with fixed orifice scale and increasing frequency, the corresponding average orifice velocity U_0 and stroke length L_0 increase. While with constant driving frequency and increasing aspect ratio, both average orifice velocity U_0 and stroke length L_0 decrease. Also with increasing thickness of the orifice plate d , the friction in the orifice channel increases, consequently the average orifice velocity U_0 and stroke length L_0 decreases. Time-averaged flow field obtained by 350 image pairs overlapped shows the similarity of dimensionless cross-stream velocity profile and the centerline velocity decay ratio of synthetic jet in the fully developed segment is higher than the conventional 2D free jet.

Key words: aerospace propulsion system; synthetic jet; PIV technique; phase-locked

收稿日期: 2006-02-24; 修订日期: 2006-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(10072027)

作者简介: 李念(1976-), 男, 江苏泰州人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事自耦合射流及射流矢量技术的研究。

自耦合射流 (synthetic jet) 是国际上近年来提出的一种新颖的主动流控制技术^[1-3]. 乔治亚理工大学的 Smith B L 与 Glezer Ari 最早进行了压电陶瓷自耦合射流实验研究,并成功地应用于低速流的矢量偏转^[4,5]. NASA 兰利研究中心对自耦合射流数值模拟进行了较为详细的实验验证^[6]. 国内清华大学的罗小兵等、西北工业大学的高峰等与国防科技大学的罗振兵等对其机理进行了研究,建立了初步的数学模型,并采用数值模拟方式研究了影响自耦合射流的因素,且进行了射流矢量偏转的计算^[7-10]. 南航的顾蕴松等首次对声波激励型自耦合射流进行了 PIV 测量^[11],获得了自耦合射流的流场结构,验证了自耦合射流是由于一系列不断形成的涡诱导之下产生的. 作者应用压电式作动器进行了射流矢量控制初步研究^[12],使速度为 5 m/s 的主喷流实现了约 30° 的矢量偏转. 但由于当前的工艺限制,压电陶瓷作动器功率偏小,因此采用活塞型作动器来形成较高功率的自耦合射流是目前较为有效的手段. Texas A &M 大学的 Gilarranz 等利用连体并排的活塞作动器形成的自耦合射流成功控制了大功角飞行时机翼上表面的气流分离^[13]. 本文中作者借助于 PIV 测量技术对活塞型作动器流场进行了较为细致的研究,考察了 3 种驱动频率,6 种出口形状及 3 种厚度的出口孔板下形成的多种自耦合射流. 通过对一个周期内 72 次相位锁定,拍摄了瞬态流场结构,测量了自耦合射流的关键参数冲程长度 L_0 ,并分析了影响自耦合射流性能的因素,从而为进一步应用提供必要的参考.

1 实验设备及测量方法

1.1 活塞自耦合射流作动器

图 1 是自耦合射流活塞作动器示意图. 它由密闭腔、运动活塞及出口孔组成.

在电机的驱动下,活塞周期性地对密闭腔体内的气体进行压缩,从而在出口边缘形成一系列的涡对,并向下游迁移. 同时环境气体在涡对的诱导及夹带下逐步加速,从而形成了自耦合射流. 在一个周期内,腔体内吸入与喷出的气体质量是相同的,从而净质量为零,因此又称为“零质量”射流.

图 2 是本文实验所用活塞作动器,活塞直径为 23.6 mm,最大行程 22.6 mm,腔体体积约为 10 mm³. 出口孔长宽比从 1~9.7,具体参数见表 1. 每种出口孔流道均设计了 3 种厚度,分别是 $d = 6, 4, 2$ mm,通道内壁为直线型. 作动器由步进

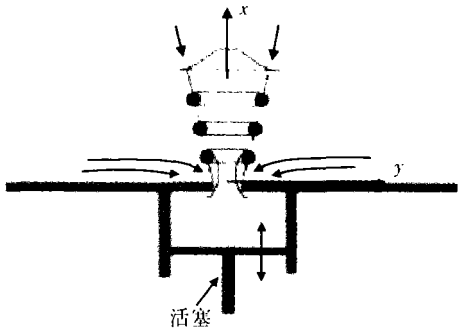


图 1 自耦合射流形成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a synthetic jet

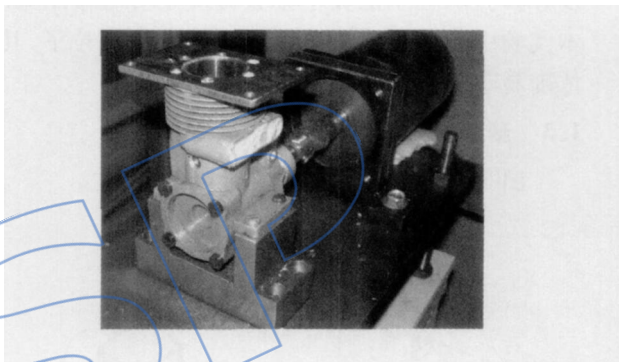


图 2 活塞型自耦合射流作动器

Fig. 2 Photo of the piston driven actuator

电机驱动,频率分别为 10, 20, 30 Hz. 实验中通过改变驱动频率,出口孔形状及孔板厚度来考察形成的自耦合射流.

表 1 作动器出口形状参数

Table 1 Orifice parameters of the actuator

长宽比 AR	长/mm	宽/mm	出口面积/ mm ²
9.7	16.5	1.7	28
7	14	2	28
5	11.7	2.4	28
3	9	3.1	28
1	5.3	5.3	28
圆孔	直径 $D = 5.97$		28

1.2 PIV测量系统

本文采用的 PIV 系统由以下部分组成:

(1) 双脉冲激光器:最大输出功率 200 kW,双脉冲激光重复频率 15 Hz. 激光器出口为厚度小

于 1 mm 的片光。

(2) 互相关 CCD 数字相机: PIV 所配的是 TSI 公司的产品,分辨率 $1\,600 \times 1\,200$ 像素,帧频为 30。

(3) 同步器(Synchronizer):由计算机控制的同步器控制双脉冲激光、CCD 相机以及相位锁定电路发出的信号工作时序。

(4) 操作系统:由计算机、高速图像采集卡,PIV 专用分析软件包与处理结果软件组成,进行图像采集、处理、流场显示。

(5) 示踪粒子:其跟随性至关重要,而投放密度、均匀性、粒子的大小则直接决定着测量结果。本实验中采用香燃烧产生的烟作为示踪粒子,其浓度易于调节。

1.3 测量方法

图 3 为 PIV 测量系统布局示意图。

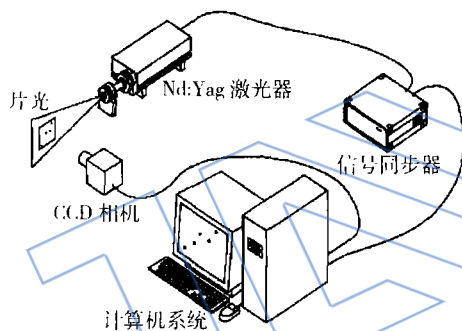


图 3 PIV 系统示意图

Fig. 3 PIV component system overview

测量时激光片光与射流中心线重合并照亮所测量的流场区域,相机光轴与片光平面垂直。相机所拍摄的图像通过采集卡输入到计算机中,通过软件进行相应的处理得到流场的速度矢量分布结果。实验时将活塞作动器置于事先充满烟雾透明玻璃罩内。由于实验件表面的激光反射,故 PIV 图像识别距实验件表面 1 mm 左右。为得到较高的流场空间分辨率,相机采集区域大小约为 $100\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 。每对图像将计算后得到 $90 \times 67 = 6\,030$ 个速度矢量,进行互相关计算时查问区的大小取 32×32 像素。每个速度矢量的空间分辨率小于 1.5 mm。由于 PIV 测量系统最高采样率为 15 Hz,不能满足实际动态连续采样的要求,故本实验中采用了相位锁定技术,通过同步电路精确对步进电机转角控制,同时输给 PIV 同步器,从而得到一个周期内 72 个相位的流动结构图。

2 实验结果与分析

2.1 作动器出口流场结构

图 4 为 PIV 拍摄的 $f = 30\text{ Hz}$,长宽比 $AR = 7$,板厚 $d = 4\text{ mm}$ 的自耦合射流不同相位下的速度矢量图,从图中可以清楚地看出自耦合射流的形成过程。当活塞从下止点向上运动时,腔内气体受到压缩,但由于与环境气体间存在速度梯度,在剪切力作用下,出口两侧形成涡对(见 $t/T = 5, 7$)。随着涡对向下游发展,旋涡之间的气体受诱导形成射流。当活塞运动到上止点并开始向下运动时,出口两侧的环境气体开始被吸入腔内,但由于喷射半周期内形成的射流已到达下游较远处,不再受腔体卷吸影响,因此流场中出现了较为明显的驻点(见 $t/T = 41$)。从出口至驻点处,流场表现出强烈地卷吸作用,环境流体从两侧吸入腔体内;而驻点向后的流场则不再受腔体卷吸影响。涡对在继续向下游发展的过程中开始破碎,其能量大部分转化为射流的动能,从而形成了充分发展的湍流,如此周期作用形成一股间歇不断的自耦合射流。

图 5 为 $f = 30\text{ Hz}$, $d = 4\text{ mm}$ 时作动器出口沿流向速度分布。图中纵坐标 $u_{cl}(t)$ 为出口附近自耦合射流沿流向方向的瞬时速度,单位为 m/s 。横坐标为无量纲时间 t/T ,与相位锁定点相对应,全周期一共 72 个测点。以 $AR = 7$ 为例,前 38 个测点为喷射过程,约在 $t/T = 18$ 时,达到最高峰值速度 38 m/s 左右,后速度逐步下降;在 $t/T = 54$ 时,达到最大吸入速度在 -7 m/s 左右。在一个周期过程,射流喷射方向是垂直于出口平面的,而腔体则是从两侧卷吸环境气体,因此图中最大吸气速度幅值是小于最大喷射速度的。

图 6 为对 $f = 30\text{ Hz}$, $d = 6\text{ mm}$ 的圆孔型自耦合射流 5 个周期的 350 张瞬时流场叠加而成的时均流场速度矢量图与流线图。

从图中可见自耦合射流方向性很好,在接近出口处气体流向方向朝向出口孔,这是由于作动器腔体的卷吸作用,可见自耦合射流质量来源于出口孔两侧的环境气体。

图 7 为对应图 6 的自耦合射流沿下游各测量截面的时均速度分布,图中横坐标用对应中心线速度 u_{cl} 一半的半宽 y_b 无量纲化,纵坐标用对应下游位置的中心线速度 u_{cl} 进行无量纲化。

从图中可看出自耦合射流接近在出口孔平面 $x = 0\text{ mm}$ 处,环境气体被连续不断地从两侧吸入

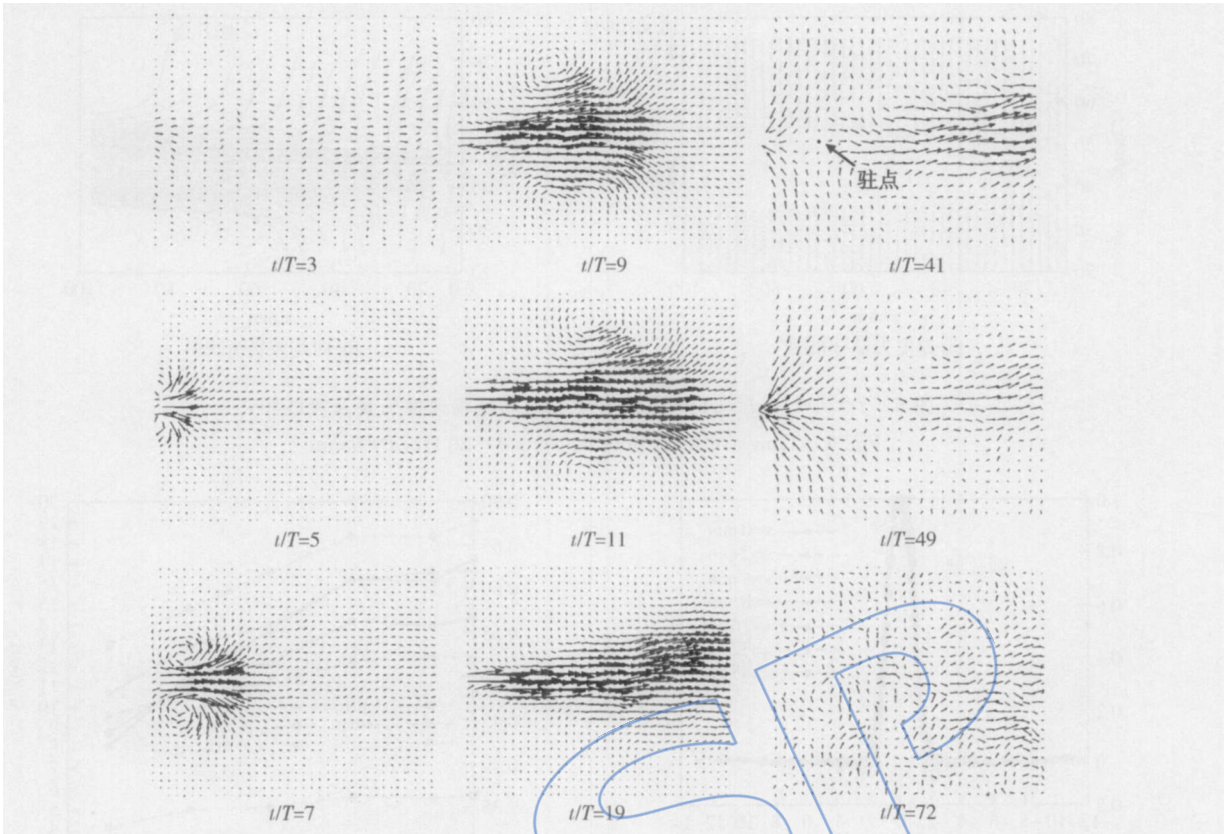


图 4 $AR = 7, f = 30 \text{ Hz}, d = 4 \text{ mm}$ 自耦合射流瞬时相位速度矢量图
Fig. 4 Phase-locked images of flow field of synthetic jet for $f = 30 \text{ Hz}, d = 4 \text{ mm}$

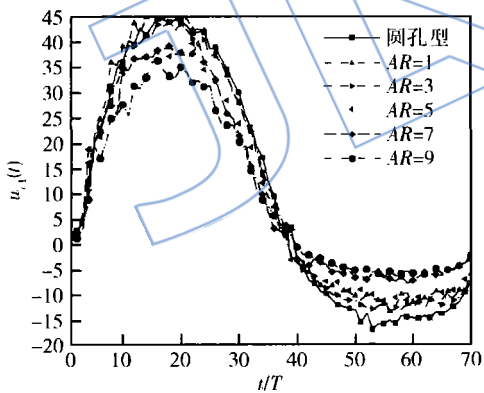


图 5 $f = 30 \text{ Hz}, d = 4 \text{ mm}$ 时出口平面中心
沿流向速度随时间变化
Fig. 5 Distributions of streamwise orifice center
velocity in one oscillation cycle for
 $f = 30 \text{ Hz}, d = 4 \text{ mm}$

到腔体内,而出口中央却是一股较强的射流,因而曲线下端呈现出 2 个负速度峰值;在达到出口下游约 $x > 8 \text{ mm}$ 后,自耦合射流已达到驻点下游,因而不受出口附近卷吸影响,其表现出与常规射流相似的特性.随着对周围环境气体的卷吸,射流的宽度也逐步增加,沿流向方向速度剖面也表现出自模化特征.

2.2 3 种参数对参数 L_0 与 u_0 的影响

根据参考文献[3],在考核作动器性能时引入冲程长度 $L_0 = \int u(t) dt, \tau = 1/2 T$, 其中 $u(t)$ 为出口平面中心瞬时速度, T 为周期. L_0 表示“喷”的过程中射流往下游运动的距离,其对应的平均出口流速 $u_0 = L_0 / T = L_0 f$, 其中 f 为频率.

图 8 是 3 种频率下的作动器测量结果,其中左边的纵轴为冲程长度 L_0 , 单位 (m), 右边的纵轴为平均出口速度 u_0 , 单位为 (m/s), 横坐标为长宽比 AR , 其中 $AR = 0$ 为圆孔.

本实验条件中,自耦合射流的速度取决于活塞驱动频率 f , 出口缝长宽比 AR 与孔板厚度 d .

2.2.1 驱动频率 f 的影响

在固定长宽比 AR 与板厚 d 的情况下,随着驱动频率 f 的增加, L_0 与 u_0 均呈增加趋势.特别是对圆孔型射流,当 f 从 10 Hz 增加到 20 Hz 时, u_0 的增长率高于 100% ,很显然驱动频率的增高源于电机输出功率的增加,由于活塞行程不变,因此单位时间内对腔内气体压缩功增大,射流的速度进而得到提升.可见驱动频率 f 占主导因素,它直接决定了作动器的性能,但根据文献[13],当

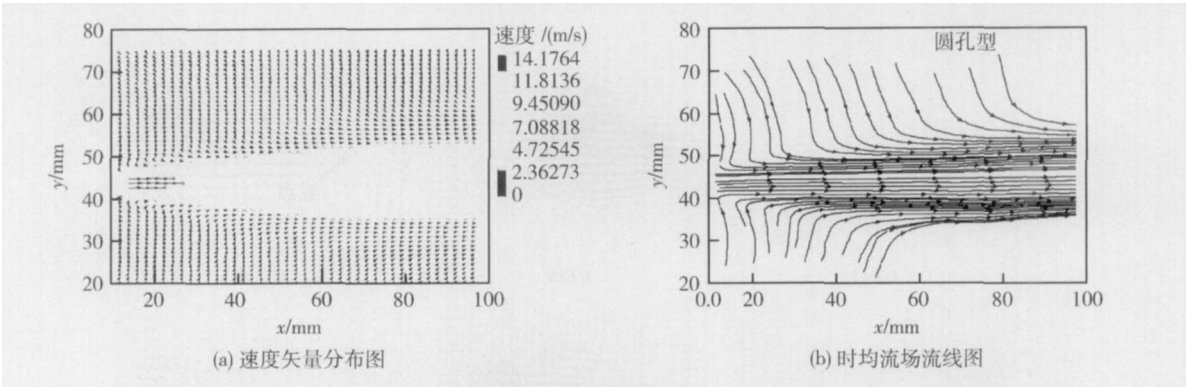


图 6 $f = 30\text{ Hz}$, $d = 6\text{ mm}$ 自耦合射流时均流场速度矢量及流线图

Fig. 6 Time-averaged flow map for $f = 30\text{ Hz}$, $d = 6\text{ mm}$

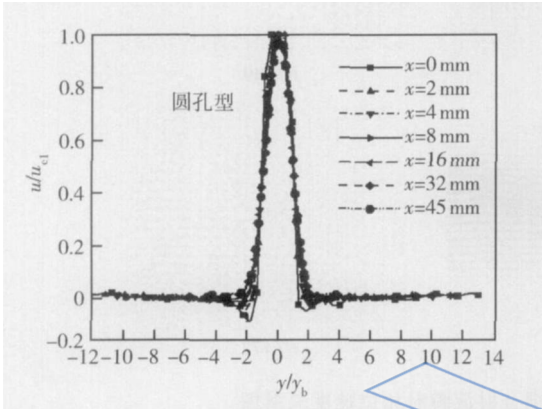


图 7 $f = 30\text{ Hz}$, $d = 6\text{ mm}$ 圆孔型自耦合射流时均流场沿流向方向速度剖面

Fig. 7 Distributions of cross-stream velocity profile of time-averaged synthetic jet flow field for $f = 30\text{ Hz}$, $d = 6\text{ mm}$

频率 f 较高时应考虑气体的压缩性.

2.2.2 出口孔板厚度 d 的影响

在固定频率 f 与长宽比 AR 时,随着板厚 d 的增加, L_0 与 u_0 呈下降趋势,这与文献[14]中的所述随着板厚增加,出口速度呈上升趋势相反.这是因为随着板厚 d 的增加,出口孔内壁表面的摩擦力与形成的附面层均会对射流产生影响.本实验中当长宽比 $AR = 9$ 时,出口宽为 1.7 mm ,与文献[14]中出口宽相比要大,此时形成的附面层厚度相对于出口宽 1.7 mm 可忽略不计,此时主要影响因素将是内壁表面的摩擦力.随着板厚 d 的增加,出口孔内壁的摩擦力也随之增大,使得出口处速度有所降低.

2.2.3 出口型长宽比 AR 的影响

在板厚 d 与驱动频率 f 不变的情况下,随着长宽比 AR 的增大, L_0 与 u_0 均呈下降趋势;实验中所有出口型面积相同,但在相同驱动频率 f 下,圆孔与 $AR = 1$ 的方型出口的 L_0 与 u_0 均高于

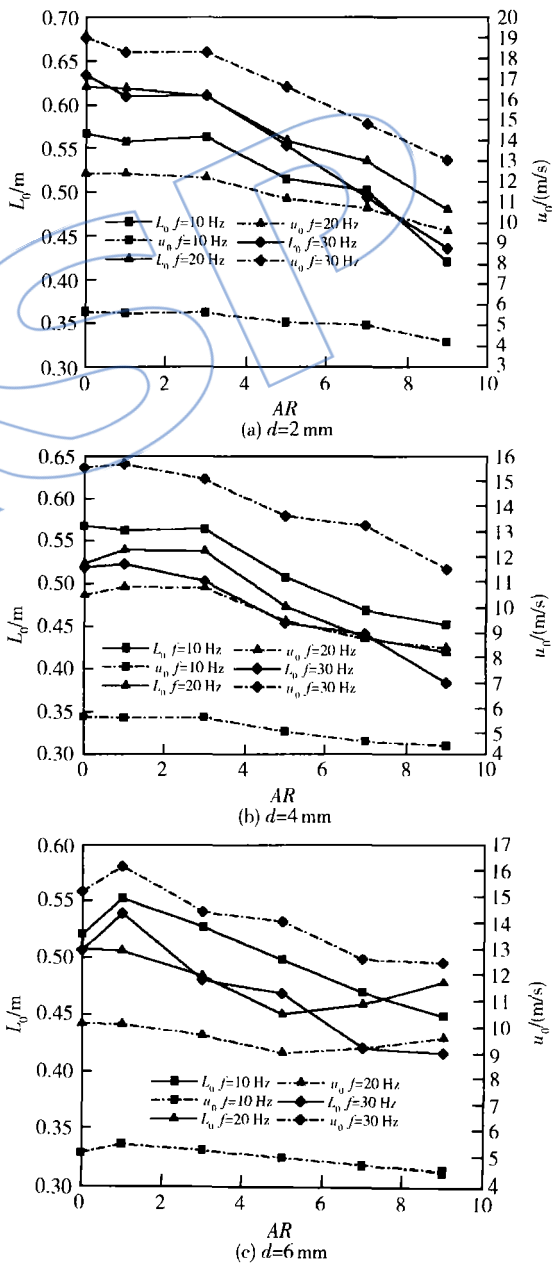


图 8 3 种孔板厚度下 L_0 与 u_0 随 AR 增长变化规律

Fig. 8 Distributions of L_0 and u_0 with the increasing aspect ratios of three plate thickness

其它情况.这是因为随着长宽比 AR 的增加,出口面积保持不变,而浸润面积增长,进而湿周长增大.表 2 中各长宽比下的湿周长以 d_w 表示,圆孔周长用 d_c 表示,可见当长宽比 $AR=9.7$ 时,其相应的湿周长 d_w 是圆孔周长的 1.93 倍,这就导致了摩擦力上升,所以形成的自耦合射流平均出口流速 u_0 有所降低.

表 2 不同出口长宽比及其湿周长长度

Table 2 Aspect ratios and corresponding wetted perimeters

长宽比 AR	湿周长 d_w	d_w/d_c
9.7	36.4	1.93
7	32	1.71
5	28.2	1.50
3	24.2	1.29
1	21.2	1.13
圆孔	18.8	1

可见为获得高性能的自耦合射流,应尽量从提高激励率、采用圆型出口孔及适当减小孔板厚度 3 个方面入手.

2.3 自耦合射流时均流场中心线速度沿程变化

自耦合射流沿流向的衰减规律是人们所关注的问题,图 9 是 $d=2\text{ mm}$ 时测量的结果.图中横坐标采用对数坐标,表示沿流向的距离,以出口宽度 h (直径)进行无量纲化;纵坐标为自耦合射流中心线沿流向速度,用平均出口速度 u_0 进行无量纲化.从中可以看出速度变化大致可分为 2 个区域:(1)速度增长段,从出口平面约至 $x/h \leq 3$ 处;(2)速度衰减段,在沿程距离 $x/h \geq 3$ 以后.

在活塞的压缩下,腔内气体迅速向外喷出,由于剪切力作用在出口缝两侧形成涡对.从出口平面至 $x/h \leq 3$ 处,中心线速度逐步增长并达到最大峰值,但与压电激励器不同的是,其增长率比较低.在 $x/h \geq 3$ 后,中心线速度迅速下降.在射流向下游发展的过程中,涡对不停地卷吸环境气体,能量逐步耗散,相干结构最终消失,成为充分发展的湍流.在此区域流场结构的发展与常规射流十分相似.从图 9 中看出圆孔与 $AR=1$ 时形成的射流变化极为相近,而 $AR \geq 3$ 时形成的射流变化类似.同时随着 AR 的增长,最大峰值速度有所下降,且随着频率的上升,速度的下降变的更加平缓.对 $x/h \geq 3$ 后的速度分布采用函数 $u_c/u_0 = C_1$

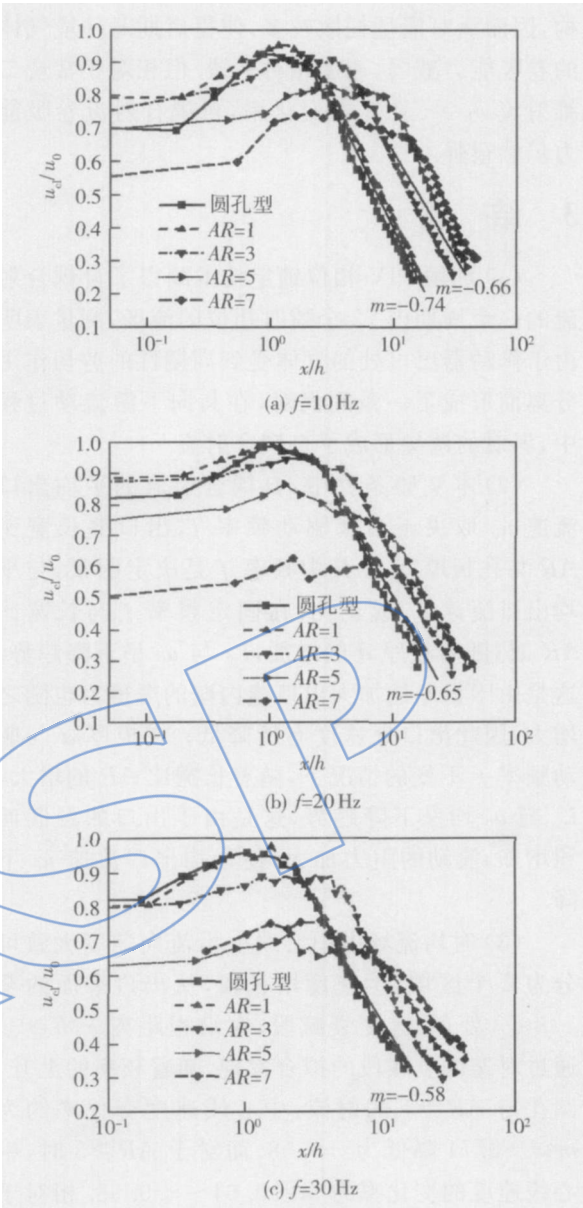


图 9 $d=2\text{ mm}$ 时均流场中心线沿流向速度分布

Fig.9 Distributions of time-averaged streamwise velocity for $d=2\text{ mm}$

$(x/h)^m + C_2$ 进行拟合,其中 C_1 与 C_2 为常数,发现当频率 $f=10\text{ Hz}$ 时,圆孔与 $AR=1$ 的中心线速度的变化率 m 约为 -0.74 , $AR \geq 3$ 时中心线的速度变化率 m 约为 -0.66 ;当频率 $f=20\text{ Hz}$ 时,对于所有出口型中心线速度变化率 m 约为 -0.65 ;当频率 $f=30\text{ Hz}$ 时,速度变化率 m 约为 -0.58 ,与文献[3]拟合的结果相近.由于频率较低时形成的自耦合射流动量较低,在向下游发展的过程很快与环境气体相融,因而中心线速度衰减较快.而当长宽比 AR 较大时,出口形成的自耦合射流由于边角处局部应力过大,结果出口形成的涡对很快进行自重组以获得更稳定的流场结

构,因而涡对能量耗散较多,使得后期对环境气体的卷吸能力减弱,速度相对平缓.但相对于常规二维射流 $m = -0.5$ 的变化率,自耦合射流卷吸能力仍然很强.

3 结 论

(1) 利用 PIV 相位锁定技术测得了自耦合射流的一个周期内 72 个瞬时相位的流场,测量表明由于作动器出口处的气体受到周期性的剪切作用分离而形成了一系列涡对,在其向下游流动过程中,涡对的诱导形成了自耦合射流.

(2) 本实验条件中,自耦合射流的平均出口流速 u_0 取决于活塞驱动频率 f ,出口缝长宽比 AR 与孔板厚度 d . 其中频率 f 是决定因素,与平均出口流速 u_0 成正比;在固定频率 f 与长宽比 AR 时,随着板厚 d 的增加, L_0 与 u_0 呈下降趋势,这是由于板厚的加大出口缝内壁的摩擦力也随之增大,因此出口处速度有所降低;在板厚 d 与驱动频率 f 不变的情况下,随着长宽比 AR 的增大, L_0 与 u_0 均呈下降趋势,这是由于出口的浸润面积增加,流动的阻力加大,使平均出口流速 u_0 下降.

(3) 时均流场中中心线上沿流向速度大致可分为 2 个区域:①速度增长段,从出口平面约至 $x/h \leq 3$ 处;②速度衰减段,在沿程距离 $x/h \geq 3$. 通过对速度衰减段的拟合发现,随着频率的上升,圆孔与 $AR = 1$ 的射流,中心线速度变化率约为 $m \approx -0.74$ 降低为 -0.58 ;而对于 $AR \geq 3$ 时,中心线速度的变化率为 $m \approx 0.64 \sim -0.58$. 相对于常规二维射流 $m = -0.5$ 的变化率,自耦合射流卷吸能力较强.

参考文献:

- [1] Amitay M, Smith B L, Glezer A. Aerodynamic flow control using synthetic jet technology[R]. AIAA 98-0208.
- [2] Kral L D. Active flow control technology[R]. ASME Paper No. FEDSM 2001-18196.
- [3] Smith B L, Glezer A. The formation and evolution of synthetic jets[J]. Physics of Fluids, 1998, 10(9): 2281-2297.
- [4] Smith B L, Glezer A. Jet vectoring using synthetic jets[J]. J. Fluid Mech, 2002, 458: 1-34.
- [5] Smith B L, Glezer A. Vectoring and small-scale motions effects in free shear flows using synthetic jet actuators[R]. AIAA 1997-0213.
- [6] YAO Chungsheng, Chen F J, Neuhart D. Synthetic jet flow field database for CFD validation[R]. AIAA 2004-2218.
- [7] 罗小兵,李志信,过增元. 合成射流形成的机理分析[J]. 清华大学学报, 2000, 40(12): 86-89.
LUO Xiaobing, LI Zhixin, GUO Zengyue. Analysis of the mechanism of synthetic jet formation[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(12): 86-89.
- [8] 高峰,汪亮,杜新. 微射流作动器外流场数值模拟[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(2): 244-247.
GAO Feng, WANG Liang, DU Xing. Numerical simulation of synthetic jet flow[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003, 21(2): 244-247.
- [9] 罗振兵,夏智勋,胡建新,等. 合成射流流场数值模拟及激励器参数分析[J]. 推进技术, 2004, 25(3): 199-205.
LUO Zhengbing, XIA Zhixun, HU Jianxin, et al. Numerical simulation of synthetic jet flow field and parameter analysis of actuator[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(3): 199-205.
- [10] 罗振兵,朱伯鹏,夏智勋,等. 合成射流激励器对射流矢量的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(5): 405-410.
LUO Zhengbing, ZHU Bopeng, XIA Zhixun, et al. Jet vectoring using synthetic jet actuators[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(5): 405-410.
- [11] 顾蕴松,明晓. 应用 PIV 技术研究“零质量”射流的非定常流场特性[J]. 实验流体力学, 2005, 19(1): 83-86.
GU Yunsong, MING Xiao. Investigation on the characteristics and structures of unsteady flow field near the zero-mass flux jet with PIV[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(1): 83-86.
- [12] 李念,张堃元,徐惊雷. 自耦合射流对平主行主射流的矢量偏转实验研究[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 248-251.
LI Nian, ZHANG Kunyuan, XU Jinglei. Experimental investigation of primary flow vectoring using parallel synthetic jets[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 248-251.
- [13] Glarraz J L, Traub L W, Rediniotis O K. Characterization of a compact, high-power synthetic jet actuator for flow separation control[R]. AIAA 2002-0127.
- [14] ZHONG Shan, Garcillan L, Wood Z P N J. A PIV study of synthetic jets with different orifice shape and orientation[R]. AIAA 2004-2213.