

文章编号: 1000-8055(2005) 06-01000-05

压电驱动自耦合射流冲击冷却特性的实验

谭晓茗, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 利用热线风速仪测量了二维狭缝自耦合射流的速度和湍流度变化, 获得了激发器输入电压、频率对自耦合射流的影响规律, 获得了激发器的最佳激励电压和频率值; 并将自耦合射流应用于冲击换热, 通过红外热像仪得到了不同加热功率下加热靶板对流换热系数分布。实验结果表明: (1) 在冲击间距比小于20时, 射流处于发展区内, 冲击冷却效果较差; (2) 冲击间距比大于20以后, 射流完全形成并趋于稳定后, 冲击靶板的换热效果较好; (3) 但由于射流速度随着距离增大而衰减, 换热效果在冲击间距比为80时达到最佳。

关键词: 航空、航天推进系统; 自耦合射流; 冲击冷却; 强化传热

中图分类号: O354; V 231. 1

文献标识码: A

Experimental Study on Impingement Cooling Characteristics of Synthetic Jet Flux Activated by Piezoelectricity

TAN Xiao-ming, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Hot-wire anemoscope was used to measure the velocity and the turbulence intensity of a synthetic jet activated by piezoelectric actuator with a two-dimensional slot nozzle. The influences of the various voltages and frequencies imparting to the synthetic jet actuator were investigated and the best actuating parameters were obtained. The temperature distributions and convective heat transfer coefficients on the target surface cooled by synthetic jet were measured by an infrared camera. The results show that: (1) when the jet-to-surface spacing ratio is less than 20, the synthetic jet is in the formation process and the cooling effect is worse; (2) when the jet-to-surface spacing ratio is greater than 20, the synthetic jet is steady and fully developed, the cooling effect is better; (3) when the distance is too far away from the nozzle, the velocity of the synthetic jet decreases, and the heat transfer coefficient reached the highest when the jet-to-surface spacing ratio is 80.

Key words: aerospace propulsion system; synthetic jet; impinging cooling;
enhanced heat transfer

自耦合射流是一种零质量射流, 它是在一个开缝或孔的腔体上利用压电材料或薄膜的周期振

动使缝隙处产生一系列向外扩展的非定常涡环, 这一系列的涡环对外流的作用类似于一股射流,

收稿日期: 2004- 12- 16; 修订日期: 2005- 06- 27

基金项目: 国家自然科学基金资助(50276028)

作者简介: 谭晓茗(1976-), 女, 江苏徐州人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事传热研究

能够对附面层和主流产生重要的影响,甚至可以改变主流的方向,因此被认为是一种全新的流动控制概念(图1)^[1]。目前在自耦合射流的形成机理和演变过程^[2,3]、自耦合射流的数值模拟^[4,5]、自

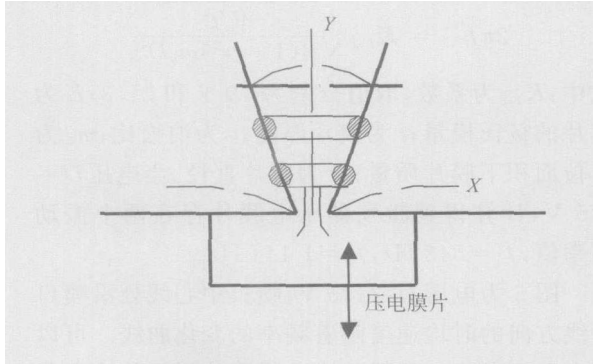


图1 自耦合射流原理简图

Fig. 1 Schematic drawing of the actuator

耦合射流激发器的研制和性能研究^[6,7]和自耦合射流激发器的应用^[8]等方面开展了众多基础性的研究,但是将自耦合射流用于强化传热的研究目前在国内外还很缺乏。由于自耦合射流流动具有脉动性,在相同雷诺数下,自耦合射流比常规的连续射流具有更强的夹带能力;而且,自耦合射流激发器结构简单,只需电能驱动,所以在强化换热方面具有良好的应用前景。本文对单膜片激励的自耦合射流进行了速度测量和分析,并初步研究了自耦合射流在冲击冷却方面的换热特性。

1 实验系统

实验中采用圆柱型自耦合射流激发器,腔体直径 $D=30\text{ mm}$,腔体高度 $H=5\text{ mm}$,上表面开矩形狭缝,狭缝宽度 $h=0.5\text{ mm}$,长度 $l=10\text{ mm}$ (图2)。激发器腔体底面采用压电膜片,由PZT-5型压电陶瓷片和紫铜膜片粘结而成,压电陶瓷片直径为 20 mm 。紫铜片厚度为 0.1 mm 。

实验系统包括:YDS966A型信号发生器,用于输出合适的波形;SA-750A型功率放大器,用于输出功率信号。在作用于同样阻抗和功率因子的电路上,方波输入功率最大,驱动激发器时将会使激发器获得的机械能最大,从而压电膜片的振幅最大,所以实验中采用方波输入^[9]。

速度测量采用TSI-1050型热线风速仪,用三维坐标架控制直径为 0.05 mm 长为 1 mm 的探针,在激发器腔体法线方向进行速度测量。

在冲击冷却实验中,冲击靶板采用康铜膜粘贴在聚丙烯塑料板上制成,塑料板中间开一个 70

$\text{mm}\times50\text{ mm}$ 的窗口,以便于红外热像仪拍摄。采用硅整流器对康铜膜进行加热,由于康铜膜电阻均匀,厚度非常薄,所以红外热像仪从康铜膜背面

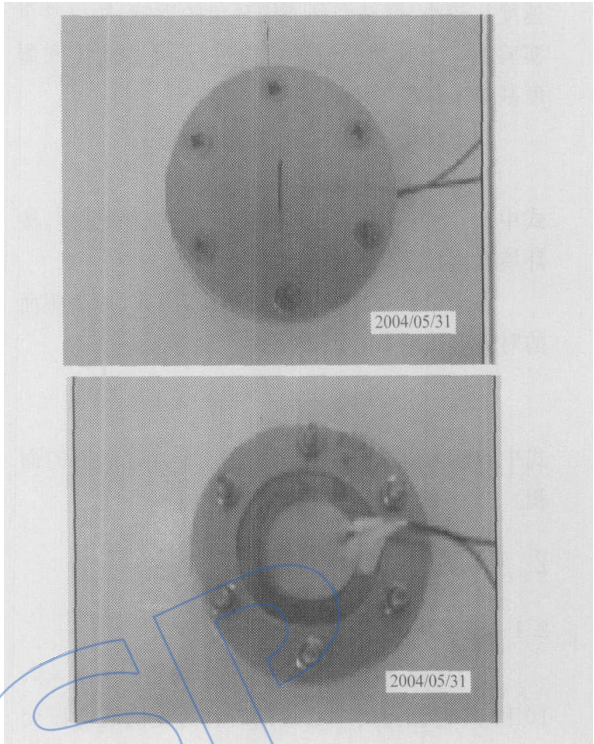


图2 激发器实验件

Fig. 2 Synthetic jet actuator device

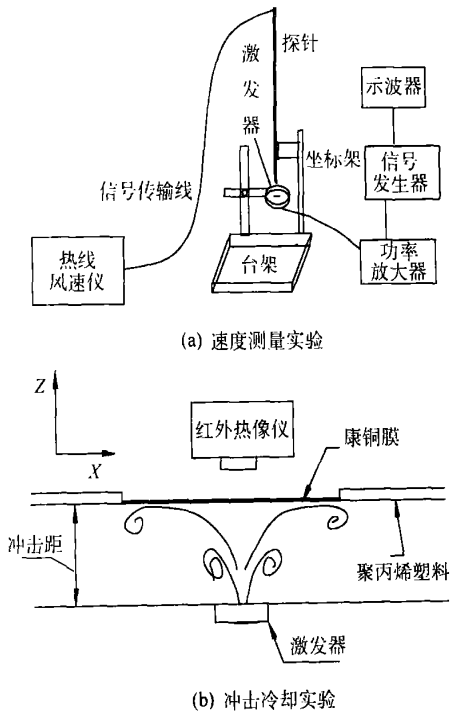


图3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic of experimental setup system

拍摄下来的图像就认为是射流冲击靶板冷却后的温度分布图像,从而可以根据测出的电加热功率得到连续的局部传热特性。考虑到自耦合射流的速度比较小,容易受到周围环境的影响,所以整个实验在一个封闭的玻璃房内进行,室内温度和湿度基本上保持不变。

冲击靶面的对流换热系数定义为:

$$q = h(T_s - T_j)$$

式中: T_s 为冲击靶面的温度, T_j 为射流的温度,按环境温度计算。

由于康铜膜背面的散热很小,因此,冲击靶面的对流换热系数可以表示为:

$$h = \frac{IV}{A(T_s - T_j)}$$

式中: IV 为康铜膜的加热功率, A 为康铜膜的面积。

2 实验结果和分析

2.1 速度测量

图4是在喷嘴法线方向上距离喷嘴 $y/h = 5, 10$ 和 15 时测得的中心线处时均速度随着电压变化的曲线,输入频率 $f = 1\,000\text{ Hz}$ 。可以看出,当输入电压从 20 V 开始增加时,在距喷嘴不同法向距离处的速度均增加;但当输入电压达到 175 V 后,

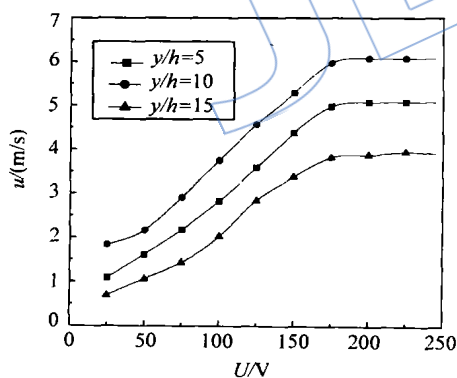


图4 时均速度随输入电压变化曲线

Fig. 4 Time-averaged centerline velocity profiles at different voltages

再增加输入电压值,在距喷嘴不同法向距离处的速度几乎不再变化。这与文献[7]的理论分析并不完全吻合。由于激发器本身是一个复杂的非线性系统,同时压电膜片受电压驱动的非线性变形影响使得输入电压在增大到一定值以后速度不再增大,所以在实际激发器中,形成射流最大时均速度的外加输入电压存在一个合理的范围。

在理论上,当输入信号频率和激发器压电膜的振动频率相同时会产生谐振,这时候膜的振幅最大,自耦合射流出口速度最大^[7]。圆形膜的共振频率可根据下式计算^[9]:

$$2\pi f_{1,2} = K_{1,2} \frac{4Ut^3}{3(1-\nu^2)m_a D^4}$$

式中: $K_{1,2}$ 为系数,取值分别为 10.2 和 21.3 ; E 为膜的杨氏模量; t 为膜片厚度; ν 为泊松比; m_a 为单位面积下膜片质量; D 为膜片直径。当电压 $U = 175\text{ V}$, 计算得到激发器压电膜片存在两个振动频率值, $f_1 = 548\text{ Hz}$, $f_2 = 1\,144\text{ Hz}$ 。

图5为电压 $U = 175\text{ V}$, 喷嘴中心线处沿喷嘴法线方向的时均速度随着频率的变化曲线。可以看出在距离喷嘴不同的法向位置处测得的速度曲线趋势变化基本一致,速度值随着频率的变化出现两个波峰,分别对应的频率值为 $f_1 = 340\text{ Hz}$, $f_2 = 1\,000\text{ Hz}$ 。这和计算所得到的谐振频率有一定差异,低频特征频率与理论值相差较大,而高频特征与理论值基本吻合,主要原因是振动膜片与空腔和腔内气体构成了一个复杂的动力学系统,特别是腔内气体的惯性使得系统的非线性特征更为复杂,表现为在低频条件下腔内气体的惯性对激发器特性影响更为显著,所以在 $f_1 = 340\text{ Hz}$ 时速度峰值要比 $f_2 = 1\,000\text{ Hz}$ 时的速度峰值小得多。

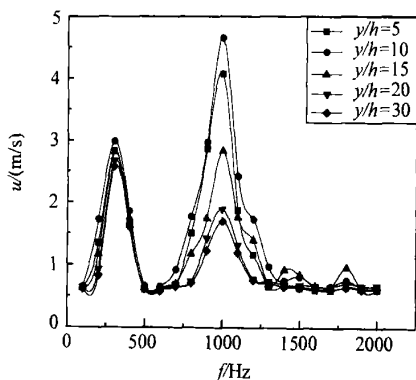


图5 时均速度随输入频率变化曲线

Fig. 5 Time-averaged centerline velocity Profiles at different frequencies

图6是当输入频率为 $1\,000\text{ Hz}$ 、驱动电压为 175 V 时,湍流度随无量纲轴向距离 y/h 的变化曲线,湍流度随着距喷嘴距离的增大而急剧下降,到 $y/h \approx 20$ 以后湍流度基本保持不变。这说明在此位置以前到喷嘴射流还没有充分发展,受压电膜片振动的影响射流速度变化很大,处于涡环生成破碎及卷绕过程,流动显示出非常显著的非定

常特性, 此位置以后, 射流充分发展成稳定的湍流, 速度波动不大, 湍流度基本保持不变。

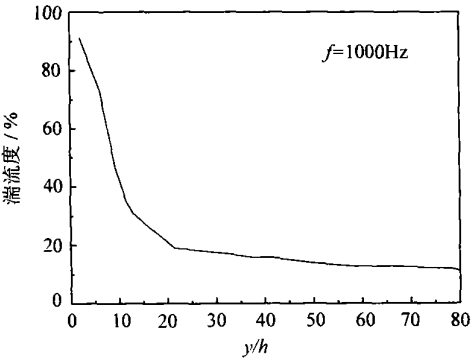


图6 沿流向中心线上的湍流度变化曲线
Fig.6 Turbulent intensity profiles at centerline
in stream wise

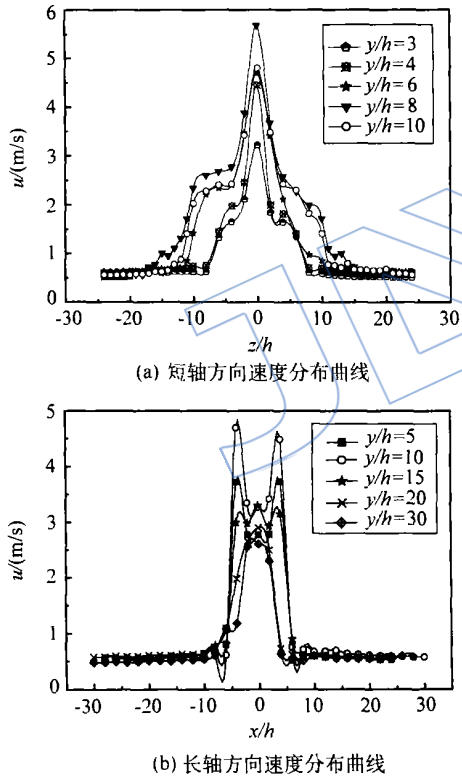


图7 喷口法线方向不同距离截面上的速度分布
Fig. 7 Time-averaged velocity profiles at
different distances

图7为输入频率为1 000 Hz、驱动电压为175 V 时利用热线风速仪测出的自耦合射流时均速度在喷口法线方向不同距离截面上的速度分布。图7 (a) 为短轴方向的速度分布曲线图, 自耦合射流速度分布与常规射流的速度分布相似, 呈现比较规

律的对称分布和速度分布自模的特征, 但其演变的过程并非呈现单调衰减的趋势, 而是在距喷口 $y/h=8$ 的法向位置上出现峰值速度最大、作用范围最宽的速度分布型, 这种差异体现了涡环的运动规律, 离喷口近的地方, 射流受压电膜片振动的影响严重, 还没有充分发展, 而涡环破碎以及主次涡环的交界处出现在流向下游 $y/h=8\sim 10$ 左右。图7(b) 为自耦合射流时均速度沿喷口长轴方向的速度分布曲线图。在距离喷口比较近的法向位置上, 沿喷口长轴方向的开缝长度内呈现一个明显的马鞍状的速度分布, 当距离增大到 $y/h=15$ 以后, 这种马鞍状的分布逐渐消失, 趋向于中间凸的波峰分布。分析其原因, 可能是由于喷口在长轴方向开口较大, 自耦合射流的形成和运动受喷口处气流的抽吸运动影响比较严重, 自耦合射流为非稳态射流, 离喷口越远, 自耦合射流越接近于稳态射流, 流动受到膜片振动的影响越小。

2.2 冲击冷却

图8是当 $y/h=20$, 加热功率为1 000 W/m² 时达到热稳定状态以后, 用红外热像仪拍摄获得的冲击靶面温度显示图像, 此时发生器的工作频率为1 000 Hz, 工作电压为175 V。图中蓝色显示的温度最低, 随着温度升高颜色渐变为绿色、黄色、红色, 相同颜色包围的区域面积大小可以从宏观上反映了冷却效果的相对优劣。根据图像显示, 尽管自耦合射流出口是一个狭缝, 但在冲击靶面上狭缝所对应的驻点区域呈现较为明显的圆形, 这一现象与常规的狭缝射流并不一致, 这进一步表明了 在喷口附近形成的一系列涡环在发展过程中将卷绕周围流体, 比常规的连续射流具有更强的夹带能力。

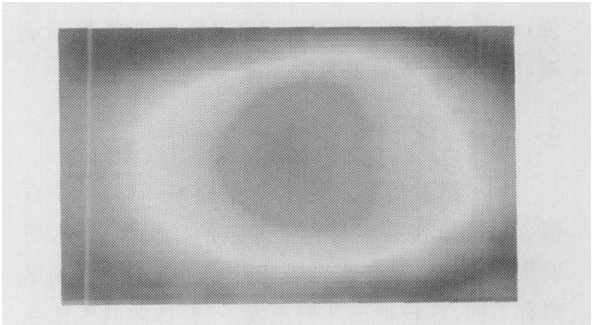
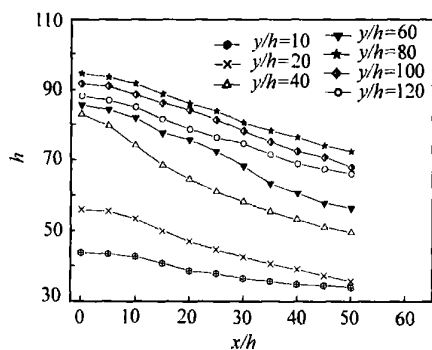


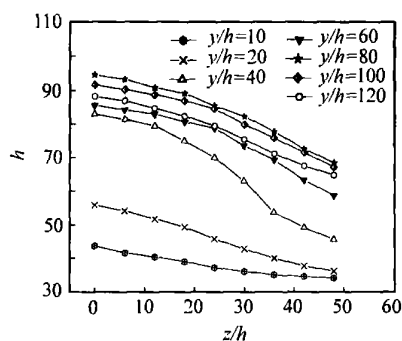
图8 冲击间距 $y/h=20$ 时靶面显示图像
Fig. 8 Picture of the heat-flux wall cooling by
synthetic jet at $y/h=20$

图9是根据不同冲击间距下热稳定后拍摄得到的冲击靶面温度图像, 得到的对流换热系数分

别在长轴和短轴方向的分布曲线。由图中可以看出换热系数的分布趋势基本一致,射流在驻点区的换热最强,沿着轴向距离的增大换热系数逐渐



(a) 换热系数沿喷嘴长轴方向分布图



(b) 换热系数沿喷嘴短轴方向分布图

图9 不同冲击间距下换热系数分布图

Fig. 9 Heat transfer coefficient distribution profiles

降低,当冲击距为 $y/h = 80$ 时,自耦合射流对加热壁面的冲击冷却效果最佳,分析其原因在于当冲击靶面处于自耦合射流的发展区内,即当 y/h 小于 20 时,射流还处于发展形成阶段,处于不稳定状态;当 y/h 大于 20 以后,射流充分发展成比较稳定的湍动射流,对壁面的冲击换热效果显著增强,但是随着冲击距离过大,射流速度将逐渐衰减,所以换热效果也有所下降。

3 结 论

(1) 激发器存在两个谐振频率,但是由于自耦合射流激发器本身是个复杂的非线性系统,所以实验得到的最佳激励频和计算所得的谐振频率略有不同。在较低的频率激发下,腔体内的气体受惯性影响比较大,射流在低频时的速度峰值比高频时的速度峰值小得多。在 8~10 倍狭缝宽度的下游截面上速度出现峰值。

(2) 自耦合射流的形成发展区在距喷口下游 20 倍狭缝宽度以内,随后射流完全形成,湍流度基本保持不变。

(3) 自耦合射流在喷口长轴方向的速度分布在接近喷口的位置呈现明显的对称马鞍状,随着离喷口法向距离的增加,这种马鞍状的分布逐渐消失。

(4) 自耦合射流激发器出口为狭缝,冲击靶面上得到的冲击冷却效果却与常规的狭缝射流并不一致,在喷口附近形成的一系列涡环在发展过程中将卷绕周围流体,比常规的连续射流具有更强的夹带能力。

(5) 冲击靶面处于自耦合射流的形成发展区内时,冷却效果较差;射流充分发展并趋于稳定以后,冲击换热效果较好;但距离过大,射流速度将逐渐衰减。冲击冷却效果在冲击间距比为 80 时达到最佳。

参考文献:

- [1] Bergles A E. Heat Transfer Enhancement - The Encouragement and Accommodation of High Heat Fluxes[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1995, 119: 8-19.
- [2] Smith B L, Glezer A. The Formation and Evolution of Synthetic Jets[J]. *Physics of Fluids*, 1998, 10(9): 2281~2297.
- [3] 罗小兵,李志信,过增元.合成喷形成的机理分析[J].清华大学学报,2000,40(12): 86-89.
LUO Xiao-bing, LI Zhi-xin, GUO Zeng-yuan. Analysis of the Mechanism of Synthetic Jet Formation[J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2000, 40(12): 86~89.
- [4] Linda D K, John F D. Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators[R]. *AIAA Paper*, 1997: 97~1924.
- [5] Goldstein D B. Two-Dimensional Synthetic Jet Simulation[R]. *AIAA Paper*, 2000, 2000-0406.
- [6] Mallinson S G. The Operation and Application of Synthetic Jet Actuators[R]. *AIAA Paper*, 2000: 2000~2402.
- [7] 罗小兵,过增元.压电驱动合成喷的设计及分析[J].功能材料与器件学报,2001,7(2): 116~120.
LUO Xiao-bing, GUO Zeng-yuan. Design and Analysis of Synthetic Jet Actuated by Piezoelectric Actuator[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2001, 7(2): 116~120.
- [8] Smith B L, Glezer A. Vectoring and Small-Scale Motions Affected in Free Shear Flows Using Synthetic Jet Actuators[R]. *AIAA Paper* 1997, 97-0213.
- [9] Yair G, Thomas E M, Julie A M. Velocity Measurements in a Synthetic Jet[R]. *AIAA Paper*, 2000, 2000-0118.