

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220870-06

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220870

多电极等离子体合成射流激励器频率特性实验

高驰程, 李 挺, 邓江革, 王晋魁

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为研究多电极等离子体合成射流激励器(ME-PSJA)的重频工作特性, 实验使用微秒脉冲电源驱动 ME-PSJA, 实现了 ME-PSJA 的多脉冲工作模式。并通过电参数测量、高速纹影观测研究了不同激励频率下激励器的放电特性及流场特性。实验结果表明: ME-PSJA 完整放电通道建立所需时间小于 $2\ \mu\text{s}$, 实时响应频率大于 $1\ 400\ \text{Hz}$ 。当频率低于饱和频率时, 提高频率可有效提高合成射流的时均动量与扩散范围, 增强 ME-PSJA 的流动控制能力。当频率高于饱和频率时, ME-PSJA 无法持续产生稳定射流, 工作可靠性下降。

关 键 词: 多电极等离子体合成射流激励器(ME-PSJA); 激励频率; 放电特性; 高速纹影; 流动控制

中图分类号: V439.1

文献标志码: A

Experiment on frequency characteristics of multi-electrode plasma synthetic jet actuator

GAO Chicheng, LI Ting, DENG Jiangge, WANG Jinkui

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To investigate the repulsion characteristics of the multi-electrode plasma synthetic jet actuator (ME-PSJA), a microsecond pulse power supply was used to drive ME-PSJA, and the multi-pulse operating mode of ME-PSJA was realized. The discharge and flow field characteristics of the actuator under different excitation frequencies were studied by electrical parameter measurement and high-speed schlieren observation. The experimental results indicated that the time required to establish a complete discharge channel of ME-PSJA was less than $2\ \mu\text{s}$. The real-time response frequency was greater than $1\ 400\ \text{Hz}$. When the frequency was lower than the saturation frequency, increasing the frequency can effectively improve the time average momentum and diffusion range of the synthetic jet, and enhance the flow control ability of ME-PSJA. However, When the frequency surpassed the saturation frequency, ME-PSJA cannot continuously generate stable jet, leading to a reduction in operation reliability.

Keywords: multi-electrode plasma synthetic jet actuator (ME-PSJA); excitation frequency; discharge characteristics; high-speed schlieren; flow control

流动控制技术是流体技术最主要的研究领域之一。Kral^[1] 基于能量消耗将流动控制技术分为被动流动控制技术与主动流动控制技术。被动控制在流场实际工况偏离设计状态时, 无法达到最佳控制效果。主动流动控制技术则是在局部流场

中施加适当的扰动模式, 以与系统内部模式耦合进而实现控制效果, 可对不同工况进行自适应调节。其中等离子体合成射流技术由于响应迅速、工作频带宽、恶劣工况适应性强等特点, 成为近年来流动控制领域的研究热点之一。

收稿日期: 2022-11-14

基金项目: 高温气体动力学国家重点实验室基金(2021KF05)

作者简介: 高驰程(1998—), 男, 硕士, 主要从事等离子体流动控制研究。E-mail: 1241766641@qq.com

引用格式: 高驰程, 李挺, 邓江革, 等. 多电极等离子体合成射流激励器频率特性实验[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220870. GAO Chicheng, LI Ting, DENG Jiangge, et al. Experiment on frequency characteristics of multi-electrode plasma synthetic jet actuator[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220870.

Grossman 等^[2]于 2003 年提出等离子体合成射流激励器(PSJA)的概念,其结构包含一个小腔体、排气孔以及放电电极。电极放电触发后,放电电弧对腔内气体迅速升温加压,高压气体从排气孔喷出形成等离子体射流,射流喷出后腔内压力与温度下降,气体从外部向腔内回流。其完整的工作周期被归纳为能量沉积、射流喷出和吸气复原 3 个阶段。传统 PSJA 依据触发机制的差异分为三电极^[2-4]和双电极两种^[5-6]。三电极激励器包含阳极、阴极以及触发电极,脉冲电源通过击穿触发电极与阴极来触发阳极与阴极之间的电容放电。双电极激励器则将触发电极与阳极合并,通过脉冲高压直接建立放电通道。

国内外学者陆续开展了关于 PSJA 的应用研究,应用场景包括噪声抑制^[7]、流动分离控制^[8-9]、激波边界层相互作用^[10-11]和激波控制^[12-13]等。但与此同时,PSJA 效率低的缺点极大限制了其流动控制能力。多项研究均指出 PSJA 的效率低于 35%^[14-15],甚至低于 10%^[16]。Popkin 等^[17]认为增加放电间隙可以提高电能向热能的转化效率。Zong 等^[18]的研究也验证了这一结论。然而电极间隙的增加受制于击穿电压的大小,为了在不增加输入电压的前提下扩大电极间隙,Zhang 等^[19]利用电压中继的概念,提出一种新的多电极等离子体合成射流激励器(ME-PSJA),使得 PSJA 工作效率及射流性能均有显著提升。

从提升 PSJA 效率的角度,多电极的电路设计将是未来的研究重点。现有研究工作探明了 ME-PSJA 的单脉冲工作特性,而关于其重频激励特性的研究成果较少。本文借助微秒脉冲电源对 ME-PSJA 的重频工作特性进行了探究。通过观测高速纹影以及测量放电参数,分析了激励频率对 ME-PSJA 重频工作模式性能的影响。

1 实验设备

1.1 多电极等离子体合成射流激励器

多电极合成射流激励器由腔体和顶盖以及嵌入其中的 5 个放电电极构成(如图 1 所示),其中“HV”与“LV”分别表示高压端与低压端。腔体加工材料选用氮化硼陶瓷。氮化硼陶瓷在满足耐高温、绝缘等条件的同时,还具备良好的导热性能,以削弱腔体内部热量的积累,有助于提高激励器的饱和激励频率。激励器内径与高度均为 15 mm,腔体侧壁与腔底壁厚度均为 5 mm,腔体顶盖厚度

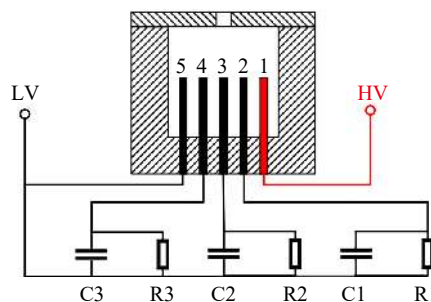


图 1 多电极等离子体合成射流激励器

Fig. 1 Multi-electrode plasma synthetic jet actuator

为 2 mm,中心射流孔直径 2 mm。5 个直径 1 mm 的电极从腔底部嵌入,相邻电极间距为 3 mm,所有电极尖端位于同一高度,距腔体底部 7.5 mm,电极材料选用耐烧蚀的纯钨,以提高多电极 PSJA 工作的可靠性。继电电阻 R1、R2、R3 的取值均为 1 M Ω ,继电电容 C1、C2、C3 选用高压瓷片电容,大小均为 200 pF。

放电通道的建立从红色高压端开始,低压端与脉冲电源低压端均接地。对 ME-PSJA 施加脉冲高压后,首先会将电极 1、2 击穿,C1 开始充电,电容 C1 充满后电极 2 成为高电位点,电极 2、3 由于电位差被击穿,依照相同的模式在电极 3、4 与电极 4、5 之间触发放电。利用继电电容充电升压的特性,即可在不增加击穿电压的情况下延长放电间隙。继电电阻则可以保证 ME-PSJA 在放电通道淬灭后消耗掉继电电容中剩余的电能。

1.2 放电电路及电参数测试系统

ME-PSJA 的工作电路以及电参数测试系统如图 2 所示,实验电源为高压微秒脉冲电源(microsecond-pulse power supply),脉冲宽度为 15 μ s,最大工作电压为 20 kV,最大工作频率可达 2 kHz,

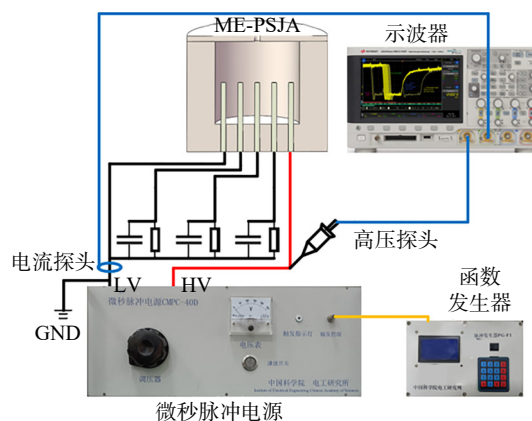


图 2 电源及电参数测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of power supply and electrical parameter measurement system

接地端用 GND 标出。本实验所采用电压探头为 Pintech P6028A 高压探头(衰减倍数为 1 000 : 1, 带宽为 200 MHz), 电流探头型号为 PEARSON-6595。电流电压采集设备选用 Keysight InfiniiVision 2000X 系列示波器。高压微秒脉冲电源的脉冲宽度设为 15 μs 保持不变。调整电源电压直至 ME-PSJA 的 4 个电极间隙成功顺次击穿。设置激励器在每个频率下均进行 200 次脉冲放电。

1.3 高速纹影系统

本实验采用透射式纹影系统对合成射流进行观测, 高速纹影系统如图 3 所示。光源选用单色性较好的 LED(light emitting diode) 光源, 狭缝位于准直透镜的焦点上, LED 发出的光在光阑处形成点光源, 经准直透镜平行出射, 到达聚光透镜后汇聚于刀口, 经刀口切光到达高速摄像(型号为 FASTCAM SA-Z)。高速摄像的采集频率为 25 000 帧/s, 曝光时间为 38.4 μs , 拍摄得到射流主要区域图片为 120 像素 $\times$ 204 像素。使用贴有绝缘层的夹子将合成射流激励器孔口固定于两准直透镜之间平行光场下边缘处, 这样就可以将诱导射流密度的变化在纹影灰度图中通过灰度变化进行可视化。



图 3 高速纹影系统示意图

Fig. 3 High-speed schlieren system

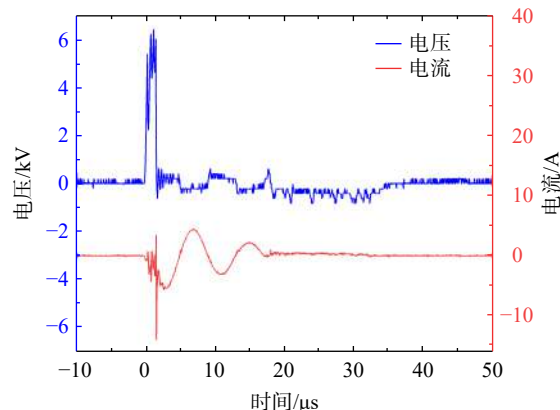
2 实验结果分析

本实验在一个标准大气压, 24 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行, 空气湿度为 33%, 激励器射流出射环境为静止空气。

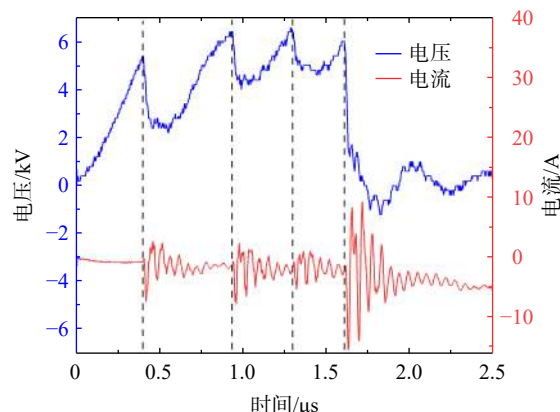
2.1 ME-PAJA 重频激励电参数特性分析

图 4 为激励频率为 400 Hz 时, 五电极 PSJA 单脉冲放电的电压-电流波形。放电开始后电压迅速升高, 在 1.61 μs 时跃升至 6.03 kV, 此时所有四个放电间隙均被击穿, 发生强烈火花放电。多电极合成射流激励器的放电图像如图 5 所示。随后电压迅速下降到零并伴有轻微的振荡, 电流则呈正弦振荡衰减趋势, 完整放电过程持续 35.8 μs 。

对放电开始后 2.5 μs 内波形细节进行观察(如图 4(b)所示), 发现在完全建立放电通道之前, 电流电压均出现严重高频波动。电压波形出现 4



(a) 总体电压电流波形



(b) 局部电压电流波形

图 4 放电电压-电流特性图

Fig. 4 Characteristic of discharge voltage-current



图 5 多电极合成射流激励器放电图

Fig. 5 Discharge image of ME-PSJA

个尖峰, 对应于 4 个电极间隙的放电特性, 当电压到达第 1 个峰值, 电极 1 与电极 2 之间空气被击穿产生电弧, 由于等离子体电弧的负阻特性, 电流迅速增加, 继电器电容 C1 开始充电。由脉冲电源、导线以及多电极射流激励器组成的电路等效为一个欠阻尼 RLC(电阻-电感-电容)系统, 电流开始做衰减振荡, 直至 C1 充满, 电极 2 电位升高, 电压波形出现第 2 个峰值。以此类推直到所有 4

个放电间隙被全部击穿,电流增幅相较继电电容充电阶段显著提高。

根据电流电压波形计算得到放电功率与能量波形(如图 6 所示)。放电过程中峰值功率为 24.3 kW,单脉冲放电的总能量为 22.8 mJ。

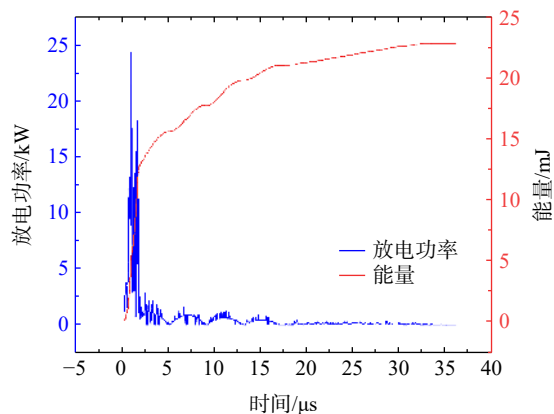


图 6 放电功率-能量特性图

Fig. 6 Characteristic of discharge power and energy

2.2 激励频率对射流特性影响分析

为了消除透镜球差对于射流观测的影响,对实验纹影图像进行背景减除处理,处理后的纹影图像如图 7、图 8 和图 9 所示。

依据激励器的几何尺寸进行长度标定,得到

每个像素对应 0.208 mm,激励器射流孔使用白色轮廓线标出。控制高压脉冲电源输入电压不变,以保证单脉冲放电能量一致,仅对比激励频率对于合成射流的影响。将在射流孔口处首次观测到射流的时刻记为 $t=0 \mu\text{s}$,单次脉冲激励周期为 T 。

在放电初期,大部分热能用于升温电极和腔体,直至电极与腔体温度满足稳定的周期性变化,腔内空气从单次脉冲放电获取的能量可近似为一个常量,激励器过渡到稳定工作阶段。图 7 为第 200 次脉冲过程中,激励器稳定工作状态下流场纹影结果,射流与激励器上表面距离用 x 表示。

分析图 7 可知,当频率低于 1 200 Hz 时,脉冲射流从射流孔喷出后形成涡环结构持续上升,喷出涡环互不干扰,且随频率升高,流场中可观测到的涡环数量也逐渐增加。当频率为 1 200 Hz 时,可同时在流场中观察到 5 个涡环组成的序列,并将涡环依据出射的先后顺序用白色阿拉伯数字 1~5 分别标出。由于黏滞阻力的作用,距射流孔口越远,涡环动量越低,直至在纹影图像上无法分辨出涡环与周围环境的灰度差异,即认为涡环完全耗散。本实验在激励频率低于 1 200 Hz 时,涡环平均耗散距离为 33.8 mm。通过计算不同周期内涡环运动至同一位置的时间差,得到涡环的

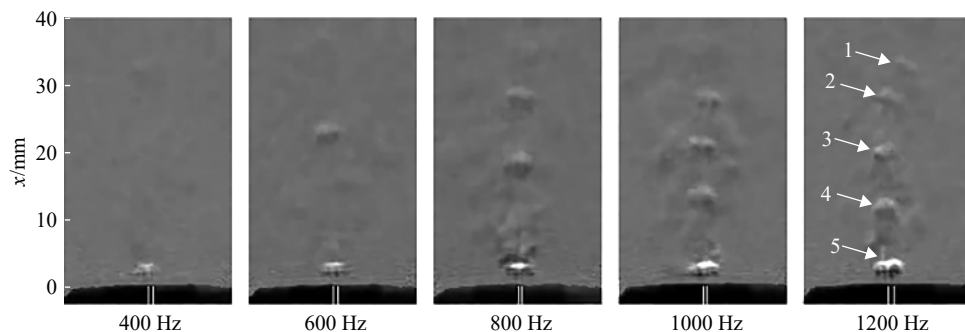


图 7 不同频率 $t=200T$ 流场纹影图

Fig. 7 Schlieren diagram of flow field at different frequencies at $t=200T$

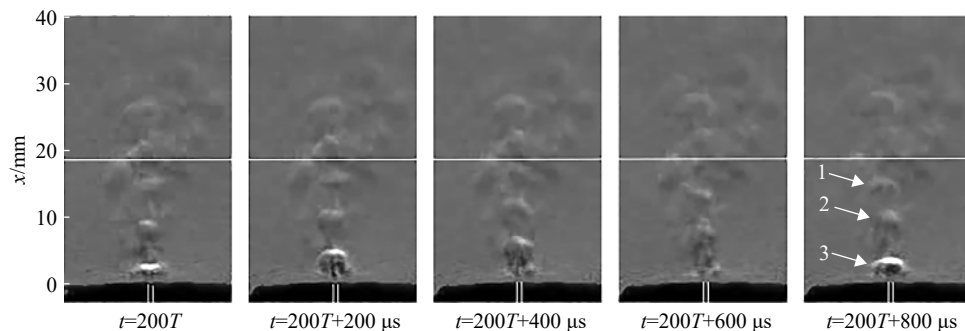


图 8 频率为 1 400 Hz 时射流流场演化图

Fig. 8 Evolution diagram of jet flow field at 1 400 Hz

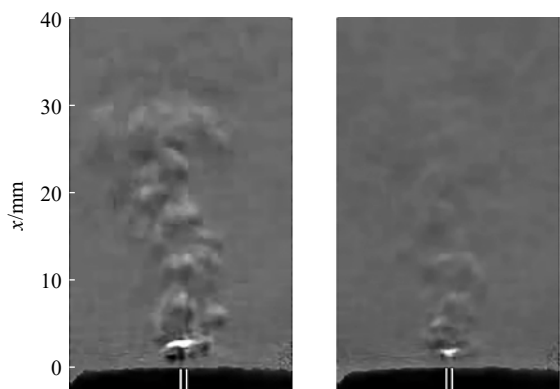


图 9 频率为 1600 Hz 流场纹影图

Fig. 9 Schlieren diagram of flow field at 1600 Hz

喷出频率与激励器放电频率保持一致, 表明每一次的放电均产生了明显的合成射流, ME-PSJA 具有极佳的频率响应特性。

随放电频率提高, 相邻涡环间距逐渐缩小, 新的脉冲放电产生的涡环更容易受到下游低速涡环的影响。当频率为 1400 Hz 时, 射流的瞬态演化如图 8 所示。从第一涡环出射频率仍与放电频率保持一致, 但涡环在完全耗散之前, 会首先与下游涡环发生相互作用, 形状开始畸变, 随后在图中水平白线附近与下游涡环发生融合, 形成无序射流, 流场中可观测到的涡环数量减少为 3 个。而其影响范围由于涡环的相干扩散, 相对低激励频率时的涡环序列则显著增加。

通过纹影测得每隔 200 μs 涡环前缘射流与激励器上表面距离(x), 将每 200 μs 内的涡环平均行进速度视作每 200 μs 时刻的瞬时速度, 对单像素标定后得到速度测量误差为 1.04 m/s。计算得到不同频率下涡环从射流孔出射后 200 μs 的瞬时速度如图 10 所示, 任一速度均为对激励器过渡至

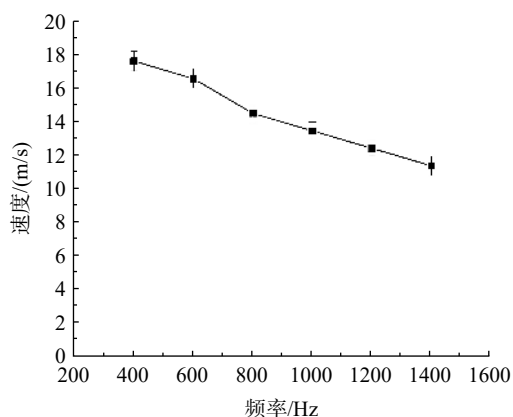


图 10 不同频率涡环速度特性图

Fig. 10 Characteristic diagram of vortex ring velocity at different frequencies

稳定工作状态后 10 个脉冲速度取算术平均的结果。结果显示随频率升高, 涡环速度缓慢降低, 频率为 400 Hz 时对应涡环速度最大为 17.68 m/s, 当频率提高至 1400 Hz 时, 涡环速度为 11.44 m/s。这表明即便控制 ME-PSJA 的击穿电压保持不变, 单脉冲放电的总能量也会随频率升高有所下降, 导致射流出射速度降低。

当频率为 1600 Hz 时, 观察第 60 个脉冲的流场纹影图像(如图 9 所示), 相邻脉冲喷出的涡环间隔极小, 几乎形成连续射流, 仅有最近一个脉冲喷出的射流可以短暂地维持涡环的形状, 其余涡环会迅速与下游涡环发生融合。

第 60 个脉冲时的流场纹影图明暗对比相对 1400 Hz 更加明显, 且射流影响范围进一步扩大, 这是由于脉冲频率的提高, 增加了单位时间内脉冲射流的通过数量, 提升了合成射流的时均能量密度, 也使合成射流的控制能力得到增强。但观察第 200 个脉冲的合成射流则发现, 合成射流现象不再明显。这是由于相邻涡环出射时间间隔缩短, 且更加频繁地放电加剧了腔体内的热能的积累, 使得腔内温度与压力始终保持在一个较高的水准, 阻碍了气体的回填, 激励器腔体没有足够时间冷却吸气以恢复到上一个脉冲开始前的状态。随时间推移, 腔内气体质量只损失而不增加, 进而导致射流动量锐减, 甚至出现只发生放电而无射流出射的现象。因此可以得出, 本实验中 ME-PSJA 的饱和频率低于 1600 Hz。

3 结 论

本文分析了多电极合成射流激励器重频激励的电参数特性以及射流特性, 主要结论如下:

1) 当微秒脉冲电源脉宽大于多电极合成射流激励器所有放电通道依次击穿时间时, 调整脉冲电源电压至适当值, 即可实现多电极合成射流激励器的重频激励工作状态。

2) ME-PSJA 在放电通道建立过程中, 电压电流波形特征取决于电极间隙的数量。

3) ME-PSJA 具有较好的频率响应特性, 实时射流合成频率大于 1400 Hz。

4) 当激励频率小于饱和频率时, ME-PSJA 在几十个脉冲放电后过渡到稳定工作状态, 增加激励频率可以扩大诱导射流的影响范围, 提升射流的控制能力。

5) 本实验 ME-PSJA 饱和频率介于 1400 Hz

与 1 600 Hz 之间,激励频率超过此范围,ME-PSJA 的工作可靠性骤降。

6) 由于激励器直接由脉冲电源驱动,放电电流较小导致射流动量较低,后续应并联直流源引入蓄电电容能量,以获得高能等离子体合成射流。

参考文献:

- [1] KRAL L D. Active flow control technology[J]. ASME Fluids Engineering Technical Brief, 2000: 1-28.
- [2] GROSSMAN K, BOHDAN C, VANWIE D. Sparkjet actuators for flow control[C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003: 57.
- [3] REEDY T M, KALE N V, DUTTON J C, et al. Experimental characterization of a pulsed plasma jet[J]. *AIAA Journal*, 2013, 51(8): 2027-2031.
- [4] 王林, 罗振兵, 夏智勋, 等. 三电极等离子体合成射流激励器工作特性参数影响实验[J]. 气体物理, 2017, 2(6): 1-8.
WANG Lin, LUO Zhenbing, XIA Zhixun, et al. Experimental study of the parameters influence on flow characteristic of the three-electrode plasma synthetic jet actuator[J]. *Physics of Gases*, 2017, 2(6): 1-8. (in Chinese)
- [5] CYBYK B Z, WILKERSON J T, GROSSMAN K R. Performance characteristics of the sparkjet flow control actuator[C]//Proceedings of the 2nd AIAA Flow Control Conference. Portland, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004: 2131.
- [6] 程林, 谭慧俊. 放电电阻对等离子合成射流激励器特性的影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(8): 1724-1730.
CHENG Lin, TAN Huijun. Effect of discharge resistor on performance of plasma synthetic jet actuator[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(8): 1724-1730. (in Chinese)
- [7] CARUANA D, BARRICAU P, HARDY P. The “plasma synthetic jet” actuator. aero-thermodynamic characterization and first flow control applications[C]// Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1307.
- [8] CARUANA D, ROGIER F, DUFOUR G, et al. The plasma synthetic jet actuator, physics, modeling and flow control application on separation[J]. *Aerospace Lab*, 2013(6): 1-13.
- [9] SU Zhi, SONG Guozheng, ZONG Haohua, et al. Control of flow separation over a wing model with plasma synthetic jets[J]. *Plasma Science and Technology*, 2022, 24(6): 156-168.
- [10] NARAYANASWAMY V, RAJA L L, CLEMENS N T. Control of unsteadiness of a shock wave/turbulent boundary layer interaction by using a pulsed-plasma-jet actuator[J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(7): 076101.
- [11] ZONG Haohua, KOTSONIS M. Interaction between plasma synthetic jet and subsonic turbulent boundary layer[J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(4): 045104.
- [12] ZHOU Yan, XIA Zhixun, LUO Zhenbing, et al. Characterization of three-electrode sparkjet actuator for hypersonic flow control[J]. *AIAA Journal*, 2019, 57(2): 879-885.
- [13] XIE Wei, LUO Zhenbing, ZHOU Yan, et al. Experimental study on ramp shock wave control in Ma3 supersonic flow using two-electrode Sparkjet actuator[J]. *Processes*, 2020, 8(12): 1679.
- [14] HAACK S, TAYLOR T, EMHOFF J, et al. Development of an analytical sparkjet model[C]// Proceedings of the 5th Flow Control Conference. Chicago, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010: 4979.
- [15] POPKIN S H, CYBYK B Z, FOSTER C H, et al. Experimental estimation of Sparkjet efficiency[J]. *AIAA Journal*, 2016, 54(6): 1831-1845.
- [16] GOLBABAIEIASL M, KNIGHT D, ANDERSON K, et al. Sparkjet efficiency[C]// Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Grapevine, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013: 928.
- [17] POPKIN S H, CYBYK B, LAND B, et al. Recent performance-based advances in Sparkjet actuator design for supersonic flow applications[C]// Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Grapevine, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013: 322.
- [18] ZONG Haohua, WU Yun, JIA Min, et al. Influence of geometrical parameters on performance of plasma synthetic jet actuator[J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2015, 49(2): 025504.
- [19] ZHANG Zhibo, WU Yun, SUN Zhengzhong, et al. Experimental research on multichannel discharge circuit and multi-electrode plasma synthetic jet actuator[J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2017, 50(16): 165205.

(编辑: 王碧琚)