

激励电压对沿面介质阻挡放电特性的影响分析

杨盼奎¹, 何帅^{2†}, 王帅², 陈少坤², 李成坤²

1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111;

2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031

收稿日期: 2019-10-25; 接收日期: 2020-11-02

【摘要】 近年来, 沿面介质阻挡放电(SDBD)用作大气压下气流控制的等离子体激励器因其众多的优点受到了广泛的关注. 然而, 国内外对沿面介质阻挡放电及其应用的研究尚处于探索阶段, 对其放电特性的影响因素缺乏规律性的认识. 因此, 对 SDBD 相关特性和影响因素进行研究具有重要理论意义和应用价值. 本文使用频率 5~20 kHz, 峰值电压 0~30 kV 的可调正弦交流电源激励大气压环境下的 SDBD 装置. 通过调节激励电压大小, 研究了其与 SDBD 放电特性之间的关系, 对等离子体放电电流、放电形貌、功率损耗、诱导气流以及机械效率进行了分析. 实验结果表明, SDBD 消耗功率、放电强度和诱导气流均会随着激励电压的增大而增大, 但机械效率存在先增大后减小的趋势, 说明等离子体流动控制中研究中存在最佳效率点.

关键词: 沿面介质阻挡放电, 放电特性, 功率损耗, 诱导气流

PACS: 51.35.+a, 51.50.+v, 52.80.-s

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.02.008

Influence of Applied Voltage on Surface Dielectric Barrier Discharge Characteristics

YANG Pankui¹, HE Shuai², WANG Shuai², CHEN Shaokun², LI Chenkun²

1. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266111;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Received date: 2019-10-25; accepted date: 2020-11-02

【Abstract】 In recent years, surface dielectric barrier discharge (SDBD) with numerous advantages has been widely used as a plasma actuator for gas flow control at atmospheric pressure. However, the researches on the SDBD and its applications at the home and abroad are still in the exploratory stage, and there is a lack of regular understanding of the factors affecting its discharge characteristics. Therefore, it is of great theoretical significance and application value to study the related characteristics and influencing factors of SDBD. In this paper, an adjustable sinusoidal AC power supply with a frequency of 5~20 kHz and a peak voltage of 0~30 kV is used to excite the SDBD device under atmospheric pressure. By adjusting the magnitude of the applied voltage, the relationship between the voltage and the discharge characteristics of SDBD was studied. In this paper, aspects of the plasma discharge current, the plasma morphology, the power consumption, the induced airflow, and mechanical efficiency were analyzed. The experimental results indicate that the power consumption, the discharge intensity and induced airflow increase with the increasing of applied voltage. While the mechanical efficiency increase firstly and then decrease, as the applied voltage increase, suggesting that there is a best efficiency value in the study of plasma flow control filed.

[†] 13088067595@163.com

Keywords: surface dielectric barrier discharge, discharge characteristics, power consumption, induced airflow

PACS: 51.35.+a, 51.50.+v, 52.80.-s

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.02.008

Reference method: YANG Pankui, HE Shuai, WANG Shuai, CHEN Shaokun, LI Chenkun, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0110 (2020)

1 引言

沿面介质阻挡放电等离子体凭借其结构简单,重量轻,能耗低,体积小等优势^[1-3],在增加飞行器升力,较少飞行阻力,改善气流重新附着等方面得到了广泛的关注^[4-5].

目前,国内外的学者对 SDBD 做了很多研究,得到了一些有意义的结论,推动了等离子流动控制的发展. SDBD 激励器受众多影响因素影响,其放电机理复杂,结构参数和实验环境会对其激励效果产生明显的影响^[6],文献^[7]研究了不同电极间隙下 SDBD 放电强度,消耗功率,诱导气流的变化情况. 研究表明,随着电极间距的增加, SDBD 放电电压值呈略微增加的趋势,而放电电流值和功率消耗呈先增加后减小趋势. 文献^[8]展开了不同锯齿形电极对 SDBD 放电特性与气动特性的研究. 同理, Thomas 等^[9]在对比了线型电极与三角型电极 SDBD 放电,发现三角型电极不仅可以增加极间电场强度,还可以提升体积力. Abe 等^[10]通过实验分析比较了不同激励电压波形下的 SDBD 体积力,研究表明,正弦波作用下的体积力最大. 同时, Corke 等^[11]也指出正弦激励电压下的 SDBD 装置具有更好的流动控制能力. Roth 和 Dai^[12]对比分析了不同绝缘介质材料对 SDBD 放电特性的影响,发现绝缘介质材料相对常数的增加会使得诱导气流增大. Pons 等^[13]实验研究发现 SDBD 放电消耗功率会随着绝缘材料相对介电常数增加而增加.

综上所述,国内外学者已大量研究了电极间隙,电极形状,激励电源波形等因素对 SDBD 激励器放电特性的研究. 激励电压作为影响 SDBD 放电的重要参数,缺少对其机械性能的深入研究. 本文针对激励电压对 SDBD 放电特性的影响,自行搭建了激励器实验装置. 通过保持激励电源频率为固定值,调节激励电压大小,采集典型的放电压电流波形,并拍摄对应激励电压下的放电图像,进行等离子体功率消耗的定量计算和等离子体延伸度的定性分析,采用诱导气流测速装置测量激励器机械特性,并分析其机械效率. 实验结果对进一步研究 SDBD 放电特性及其在流动控制领域的运用有一定的参考作用.

2 实验装置

SDBD 放电实验装置如图 1 所示. 激励电源采

用输出电压调节范围 0~30 kV, 输出频率调节范围 5~20 kHz 的专用低温等离子体实验电源 CTP-2000K. 暴露电极和植入电极均采用长为 60 mm, 宽为 8 mm, 厚为 56 μm 的铜箔材料且两电极间的间距固定为 5 mm; 绝缘介质采用厚为 10 mm、宽为 150 mm、长为 20 mm 的玻璃板. 实验过程中放电压电流波形通过数字示波器 Tectronix MDO3024 (带宽为 200 MHz, 采样频率为 2.5 Gs/s) 采集存储, 采用相机 Canon EOS 700D 拍摄 SDBD 放电可见光图像, 曝光时间设置为 1 s.

诱导气流测速装置由皮托管与微压传感器以及数据采集系统组成. 皮托管选择实验室定制的 PMMA 玻璃管, 内径为 0.9 mm. 微压传感器 Alpha 168 压力带宽为 50 Pa, 精度为 0.2 Pa, 测量频率 50 Hz, 对应输出电流 4~20 mA. 精密位移台可以支持 x, y, z 三个方向的移动, 精度为 0.01 mm, 利用此装置可以精密控制移动的距离, 实现不同方向诱导气流的定点测量. 本文中激励电压值为电源的峰峰值.

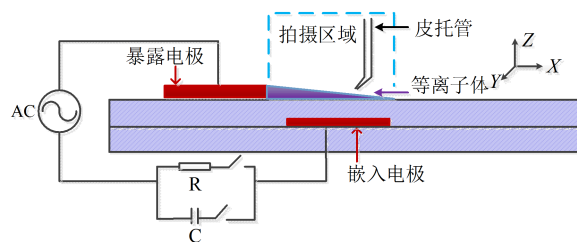


图1 SDBD 放电实验系统

3 实验结果

3.1 SDBD 放电波形

电极间距保持为 5 mm, 电源频率固定在 9.15 kHz. 将激励电压从 18 kV 增加至 25 kV 进行 SDBD 放电实验, 采集典型激励电压值 19 kV、22 kV、25 kV 下的电压电流波形, 分别如图 2、图 3 和图 4 所示. 由图可以看出:

1) 不同激励电压下的 SDBD 激励器都呈现为容性放电, 即放电电流波形相位超前电压波形 90° . 从电流波形可以看出, 放电电流由位移电流和传导电流组成, 且传导电流的放电脉冲主要存在于电压的正半周, 负半周几乎不存在电流脉冲. 这主要是由于植入电极封装隔绝空气, 抑制了植入电极表面放电的形成及其附近等离子体层的形成.

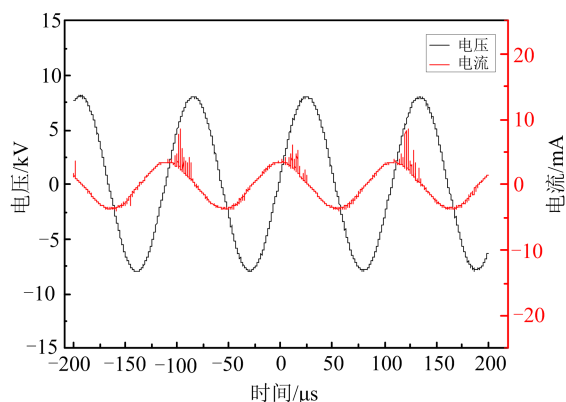


图2 激励电压 19 kV 时,放电电流电压波形

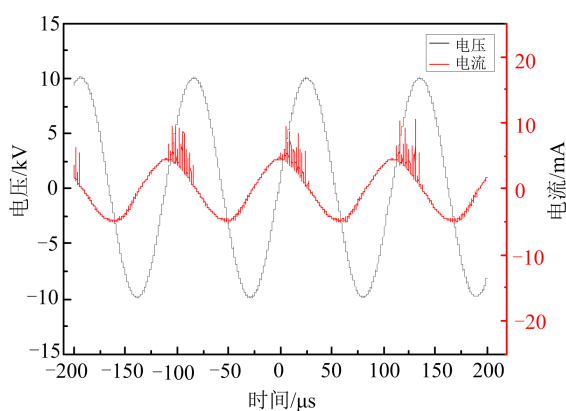


图3 激励电压 22 kV 时,放电电流电压波形

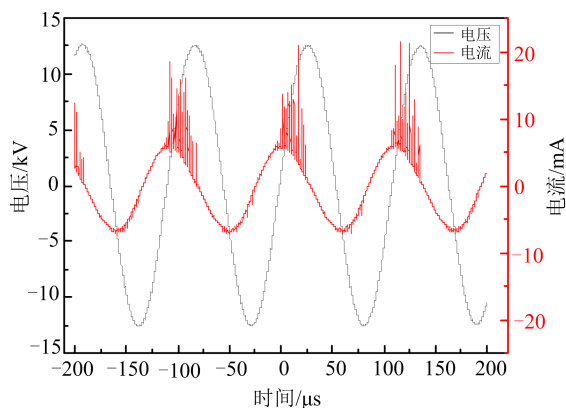


图4 激励电压 25 kV 时,放电电流电压波形

2) 放电电流由数目较多的放电脉冲组成,每个脉冲代表着一个放电通道,且每个脉冲持续时间短.随着激励电压的增加,位移电流与传导电流都呈现增大的趋势,不同电压对应下的最大脉冲电流幅值分别为 5.1 mA、10.6 mA、21.2 mA,放电电压峰值分别约为 19 kV、22 kV、25 kV.

3.2 SDBD 放电图像

为了更直观的观察不同激励电压下 SDBD 的放电行为的,实验用高速相机拍摄放电图像如图 5 所示.由图可以看出:

1) SDBD 激励器放电现象发生在暴露电极紧贴玻璃介质板表面的气体区域,呈现出一层紫色光芒的等离子层,且随着距离暴露电极距离的增大,等离子体延伸度逐渐减小,紫色强度逐渐减弱.

2) SDBD 放电呈现为丝状放电,放电丝为簇状分布,且随着距离暴露电极距离的增大,放电图像在视觉上表现的更为暗淡和均匀.

3) 当激励电压逐渐增大时, SDBD 放电细丝数目变得更多,且每一个细丝放电都更强更亮,分布也变得更加密集,从而导致能量耗散的增加.

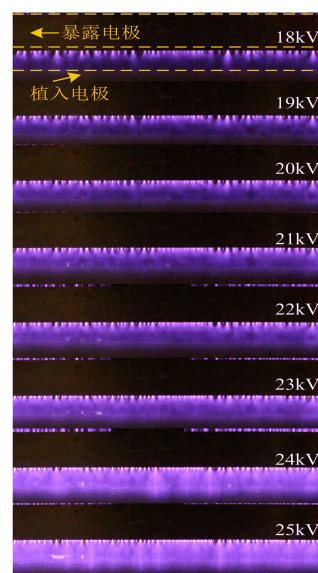


图5 不同电压幅值下 SDBD 放电图像

3.3 SDBD 放电功耗

为了避免因为瞬时电流脉冲不稳定带来的误差和等离子体放电造成的电磁干扰对 SDBD 等离子体放电功率的影响,采用电荷-电压 Lissajous 如图像素计算法准确计算其有功功率^[14].经典的 SDBD Q-V Lissajous 类似于平行四边形,如图 6 所示.其中 AB、CD 边对应着放电阶段,BC、AD 边表示放电截止阶段. A、C 两点分别表示正负半周截止转为放电,其对应的电压 V_1 即为放电起始电压; B、D 两点则分别表示正负半周放电转为截止,对应的电压值 V_2 为激励电压^[15].

基于 Q-V Lissajous 图的功耗计算原理如

下^[16]:在 SDBD 放电的植入电极处串联一个电容 C_0 , 流过该电容的电流为:

$$I = C_0 \frac{dU_0}{dt} \quad (1)$$

式中 U_0 表示电容 C_0 两端的电压, t 为放电时间.

SDBD 放电消耗功率为:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI dt = f C_0 \oint U dU_0 = f \cdot A \quad (2)$$

式中 U 为 SDBD 放电电压, T 为放电周期, f 为放电频率, A 为 Q-V Lissajous 图的闭合区域面积.

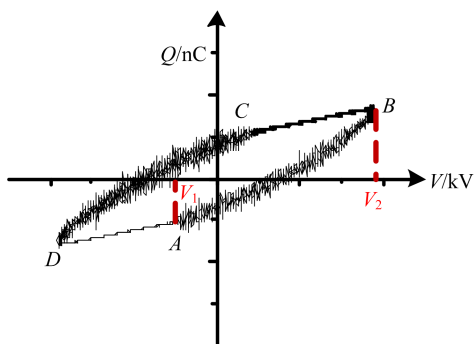


图 6 典型的 Q-V Lissajous 如图

由 Q-V Lissajous 图计算的不同激励电压下的功耗如图 7 所示. 由图可以看出, SDBD 放电功耗会随着激励电压的增加而增加. 主要是由于随着激励电压的增加, 放电电流和放电电压都呈现增大的趋势, 从而导致功率消耗的增加.

为了精确量化放电功率损耗与激励电压的变化趋势, 对原始功率值进行曲线拟合, 其经验公式如下^[17]:

$$P = C_{act} f_{ac} L_{act} (V_{pp})^n \quad (3)$$

式中 C_{act} 为常数系数, 其值受激励器几何形状, 介质参数以及环境条件的影响. f_{ac} 激励电源频率, L_{act} 为激励器电极长度, V_{pp} 为激励电压峰值.

由拟合结果可知, 随着外加激励电压的升高, SDBD 激励器的功率损耗呈现指数增长, 其拟合指数 n 为 3.42, 这与 Enloe 等^[18]指出的消耗功率并非与电压二次方成一定的关系的结论相一致, 说明 SDBD 激励器放电时其等效阻抗并非定值, 这是由于放电时等效电容和等效电阻均会随着外施电压的变化而变化.

3.4 诱导气流

SDBD 激励器虽由正弦电压驱动, 却可以产生定向的诱导气流. 目前, 动力效应^[19-20]是阐述产生

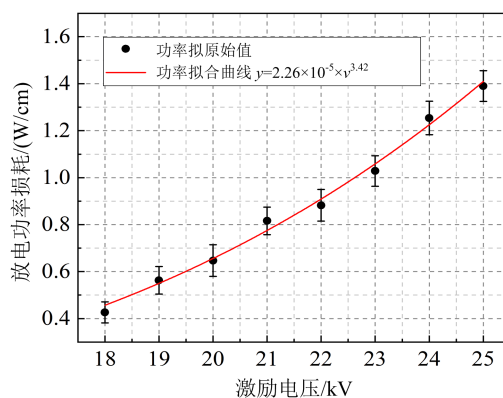


图 7 不同激励电压下 SDBD 放电功率消耗

诱导气流较为普遍的机理, 当给 SDBD 装置施加激励电压后, 由暴露电极向嵌入电极延伸的等离子体区域中存在的粒子受到电场力的作用形成定向运动, 由于电子的质量较离子小很多, 在介质表面运动的速度快, 在流场中停留的时间短, 因此对流场产生的可控扰动小, 故动力效应中起主要作用的是离子, 离子受电场力的作用定向运动碰撞中性气体分子产生新的电子与离子, 新的离子继续运动碰撞和电离, 离子将能量以动量的形式传递到中性气体分子中, 形成等效体积力, 最终产生定向壁面射流.

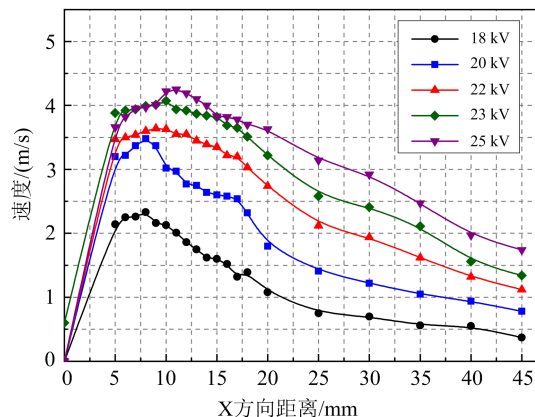


图 8 不同激励电压下 SDBD 水平方向诱导气流

不同电压等级下诱导气流沿介质表面水平速度分布如图 8 所示, 靠近暴露电极距离较小的位置诱导气流的速度不明显, 从 5~12 mm 之间, 诱导气流相对稳定且增幅明显, 出现最大有诱导气流的位置大约在 10 mm 左右, 随着外施电压等级的升高, 水平速度最大值出现的位置沿着 X 方向后移, 在放电等离子体下游诱导气流迅速衰减.

随着外施电压的升高, 等离子体区域的电场强

度增强,离子受到的电场力变大,加速碰撞中性分子电离,诱导气流速度随着外施电压的升高而增加,但增幅逐渐减小,这点与文献[21]中提到的诱导气流长度虽会随着外施激励电压幅值增加而增大,但也存在饱和效应,超过一定范围时,受介质板温升效应和粘性系数影响,诱导气流长度相对稳定的结论相类似。离子主要产生在暴露电极附近并沿介质表面移动,距离电极附近的离子浓度相对较高,此时离子受到的电动力更大,随着离子继续向前运动,离子浓度降低,积累电荷的影响削弱了外加电场,距离电极较远的位置离子所受电动力减小,因此,随着 X 方向的延伸,诱导气流呈现先增加后减小的趋势。

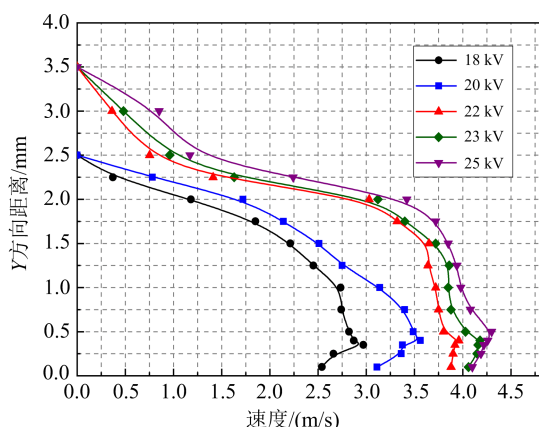


图9 不同激励电压下 SDBD 竖直方向诱导气流

不同激励电压下 SDBD 激励器在距离暴露电极 10 mm 处产生的离子风的垂直速度剖面分布如图 9 所示。在任意一个电压等级下,其纵向速度剖面图中均有一个峰值位于 $y = 0.5$ mm 左右,随着电压升高,其最大垂直速度分别为 2.95 m/s、3.54 m/s、3.96 m/s、4.18 m/s、4.31 m/s。当竖直高度增加,粒子加速受到空气粘滞作用增强,诱导气流迅速衰减,形成一个稳定的射流高度^[19]。

3.5 机械功率

SDBD 制动器的机械功率可以由下式表示,该方法基于能量守恒方程的方法,考虑速度剖面,在定常流的假设下,机械功率对应于动能密度流率^[22]。式中, ρ 为空气密度, L 为电极的长度。

$$P_{\text{meca}} = \frac{1}{2} \rho L \int_0^{\infty} V^3(y) dy \quad (4)$$

随着激励电压的增长,SDBD 机械功率的变化如图 10 所示。

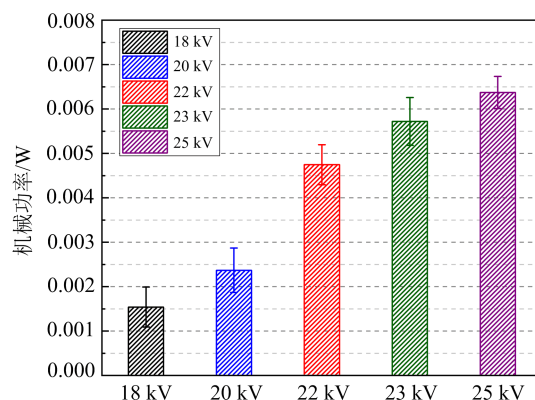


图10 不同激励电压下 SDBD 机械功率

计算后的机械功率均很低,这可能是由于电场的能量主要传递给电子,而离子—中性粒子碰撞被认为是 SDBD 主要能量耦合机制,电场—离子的能量传输效率很低,再考虑到离子—中性粒子的能量传输效率,故 SDBD 激励器的机械功率很低。由 10 可知,机械功率随着激励电压的增大而增大,但在 18 kV~22 kV 电压变化范围内机械功率增幅明显,随着电压进一步升高,机械功率的增幅呈下降趋势,这说明 SDBD 激励器诱导气流的机械特性下降,在赵小虎等^[23]对激励电源幅值这一关键参数的研究中,发现 SDBD 激励器的体积力会随着激励电压幅值呈现线性增加的变化,这点与我们的机械功率随外施电压增长而增加的变化相类似,但是考虑到外施电压的饱和效应,实验中还需要特别关注机械功率增幅的变化,为指导 SDBD 激励器电源参数优化研究提供思路。

3.6 机械效率

SDBD 激励器的机械效率是用来衡量其机械特性最直接的参数,其值可由机械功率与功率损耗之间的比值计算得出^[24]。

$$\eta = \frac{P_{\text{meca}}}{P_{\text{elec}}} \quad (5)$$

不同激励电压下 SDBD 机械效率的变化如图 11 所示。

随着外施电压的升高,机械效率呈现先增大后下降的趋势,这说明 SDBD 的机械效率存在饱和效应,激励电压超过某个特定值之后,SDBD 激励器功率损耗的增幅将明显大于其机械功率的增幅,因此在研究中存在最佳效率点,本实验中的最佳效率点在 22 kV~23 kV 之间。

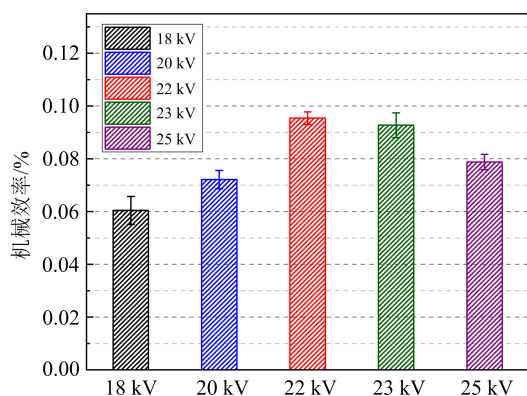


图 11 不同激励电压下 SDBD 机械效率

4 结 论

本文通过逐步调节激励电压大小,研究了外加电压对 SDBD 放电特性的影响规律.采用示波器采集 SDBD 放电电压、电流波形,进而分析了电压对放电电流脉冲的影响特性,并通过 Q-V Lissajous 如图精确计算不同电压下的放电功耗,同时采用高速相机拍摄放电图像,利用皮托管与精密位移台测

量了诱导气流的分布规律,并分析了其机械效率特性,其主要结论如下:

1) SDBD 放电表现为容性放电,且正半周放电强于负半周,放电发生在暴露电极紧贴玻璃介质板表面的气体区域,且表现为丝状放电.随着激励电压的增加, SDBD 放电传导电流和位移电流幅值也随着增大,放电细丝变得多而密集且亮度增强.

2) SDBD 放电消耗功率随着激励幅值的上升而呈现指数增大的趋势,放电过程中 SDBD 的等效阻抗并非固定值,其值会随着外施电压的变化而变化.

3) SDBD 激励器产生的水平诱导气流和竖直诱导气流均随着激励电压的升高而增大,最大水平诱导气流出现的位置随着激励电压的升高而略微后移.

4) SDBD 机械功率随着激励电压幅值增大而增大,但是在低电压范围(18 kV~22 kV)时机械效率增幅明显,随着电压进一步升高,机械功率的增幅呈下降趋势. SDBD 机械效率随着激励电压幅值增大先增大后减小,说明在等离子体流动控制研究领域存在最佳效率点.

参 考 文 献

- [1] Y. Liang, Y. Hui Jie, Q. Xiao Hua, et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **43**(2015), 3653.
- [2] T. Udagawa, Keisuke, Zuzeek, Yvette, Lempert W, et al. *Plasma Sources Science & Technology*, **20**(2011), 055009.
- [3] 田希晖,周朋辉,聂万胜,航空动力学报, **29**(2014),1426.
- [4] 史志伟,杜海,李铮,高压电器, **53**(2017),72.
- [5] 聂万胜,程钰锋,车学科. 力学进展, **42**(2012),722.
- [6] 罗朋振,孙丹凤,鲁娜,高压电器, **53**(2017),65.
- [7] 魏文赋,吴广宁,高国强,等离子体科学与技术:英文版, **6**(2017),70.
- [8] G. Guo Qiang, D. Lei, P. Kai Sheng, et al. *Physics of Plasmas*, **24**(2017), 013510.
- [9] T. Flint O, C. Thomas C, I. Muhammad, et al. *AIAA Journal*, **47**(2012), 2169.
- [10] A. Takashi, T. Yuji, S. Shunichi, et al. *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2011.
- [11] C. Thomas C, P. Martiqua L, O. Dmitriy M. *Experiments in Fluids*, **46**(2009),1-26.
- [12] R. J. Reece, D. Xin. *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2013,1-28.
- [13] PONS J, MOREAU E, TOUCHARD G. In: *28th ICPG*, July 15 - 20, 2007, Prague, Czech Republic.
- [14] Benard, Nicolas, M. Eric. *Experiments in Fluids*, **55**(2014), 1846.
- [15] 房新振. 山东大学, 2013
- [16] D. Lei, G. Guo Qiang, P. Kai Sheng, et al. *AIP Advances*, **7**(2017), 075112.
- [17] Joussot R, Leroy A, Weber R, et al. *Journal of Physics D Applied Physics*, **46**(2013), 125204.
- [18] Enloe C L, M. Thomas E, V. Dyken R D, et al. *AIAA Journal*, **42**(2004), 589.
- [19] 吴云,李应红. 航空学报, **36**(2015),381.
- [20] 李金龙,李修乾,张政,等. 高压电器, **55**(2019),71.
- [21] 高国强,彭开晟,董磊,等. 电工技术学报, **32**(2017),55.
- [22] Y. Liang, Y. Hui Jie, Q. Xiao Hua, et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **43**(2015), 1-1.
- [23] 赵小虎,李应红,李益文等. 航空动力学报, **25**(2010),1791.
- [24] W. Wen Fu, H. Shuai, Y. Ze Feng, et al. *AIP Advances*, **9**(2019), 045127.