

电流体动力等离子体发生器低电极封装实验研究

刘 勇, 许光可, 李清泉

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 电流体动力 (EHD) 等离子体发生器产生的常压等离子体可以在不存在机械活动部件的条件下把电能转化为空气的动能, 在气流控制领域具有巨大的发展前景。但是目前 EHD 等离子体发生器的能量转化效率仍然很低。笔者通过实验探讨了利用 Kapton 将低电极进行封装对 EHD 等离子体发生器产生的影响。实验表明, 低电极进行封装后低电极附近及电压周期负半周内的等离子体的产生被有效抑制, 等离子体发生器产生的气流速度增加, 能量转化效率得到显著提高。

关键词: 电流体动力; 等离子体发生器; 低电极封装; 效率

中图分类号: TM89

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0021-03

Experimental Study of Electrohydrodynamic Plasma Actuators with Sealed Lower Electrodes

LIU Yong, XU Guang-ke, LI Qing-quan

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Electrohydrodynamic plasma actuator induces the atmosphere plasma to directly convert electric energy into kinetic energy of air without involving moving mechanical parts. Thus it holds a promising future in air flow control. However, until now the converting efficiency of EHD plasma actuator is quite low. This paper focuses on the impact of sealing the lower electrodes with Kapton on the performance of EHD plasma actuator. Experimental results show that the plasma induced near the lower electrodes and in the negative half cycle of voltage is completely quenched, the air flow induced by the plasma actuator is accelerated, and the energy converting efficiency of EHD plasma actuator increases significantly.

Key words: electrohydrodynamic(EHD); plasma actuator; lower electrode sealing; efficiency

0 引言

基于常压等离子体的电流体动力学(EHD)气流控制技术在不存在活动部件的条件下可以把电能转化为空气的动能, 避免了传统机械控制设备结构复杂、产生噪声和振动、易磨损、易故障等缺点, 在飞机起降、风力发电等空气动力学领域具有巨大的发展前景^[1-4]。

目前, EHD 等离子体发生器将电能转化为空气动能的效率仍然很低(尚不到 0.1%)^[5], 严重制约了 EHD 等离子体气流控制技术的应用, 如何提高 EHD 等离子体发生器的能量转化效率是 EHD 气流控制技术研究中的核心问题。

笔者研究了利用 Kapton 封装 EHD 等离子体发生器低电极对等离子体产生情况的影响, 并分别测

量了封装前后 EHD 等离子体发生器的消耗功率及产生的气流速度。实验表明, 低电极封装后 EHD 等离子体发生器的能量转化效率得到了较大的提高。

1 实验装置与测量方法

实验是在静止空气中进行的, 实验时的温度为 18 ℃, 气压为 98 kPa。实验采用非对称结构的 EHD 等离子体发生器, 见图 1, 其中高电极宽度 W_1 为 3.2 mm, 低电极宽度 W_2 为 6.4 mm, 两金属电极长度均为 75 mm, 厚度 s 均为 0.065 mm; 介质板参数为 127 mm×50 mm×1 mm, 材料为石英; 电极间水平距离 d 为 0。实验中低电极用厚度为 0.1 mm 的 Kapton 进行封装。

图 2 为采用的实验装置示意图。其中 EHD 等离子体发生器高电极接正弦电压, 低电极接地。电源由高频电源经高频高压变压器升压而成, 电压电流波形由数字示波器 Tektronix TDS 3014B 记录。EHD 等

收稿日期: 2008-12-01; 修回日期: 2009-03-06

基金项目: 山东省科技发展计划(2006GG3204007)。

作者简介: 刘 勇(1985), 男, 硕士研究生, 从事气体放电和常压等离子体应用方面的科研工作。

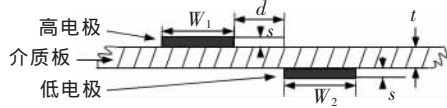


图1 EHD 等离子体发生器参数示意图

离子体发生器产生气流的速度由皮托测速管在介质板表面上方 1 mm,高电极右侧 10 mm 处进行测量。EHD 等离子体发生器放电发光图像, 由照相机 Nikon D70 俯视拍摄。

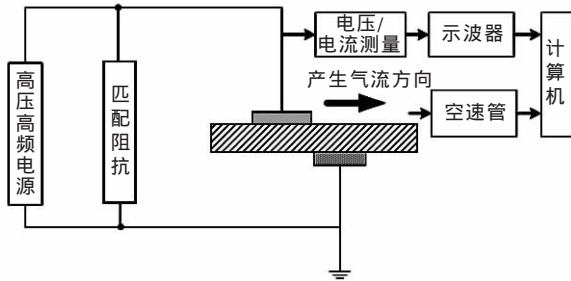


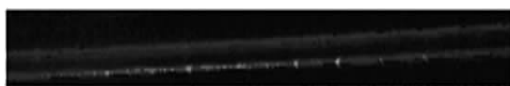
图2 实验装置示意图

笔者分别在 5 kHz、5 kV 和 5 kHz、8 kV 下对 EHD 等离子体发生器低电极利用厚度 0.1 mm 的 Kapton 封装前后进行放电发光图像的拍摄和电压电流波形的记录,同时进行消耗功率、产生气流速度的计算和测量。

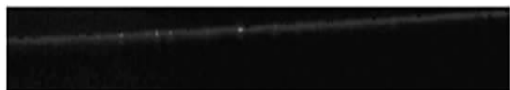
2 实验结果与分析

2.1 放电发光情况

图 3 为所加电源为 5 kHz、5 kV 时 EHD 等离子体发生器低电极封装前后放电发光图。从图 3(a)可以看出, 在低电极没有封装时高低电极附近均有明显的肉眼可见的放电发光层, 并且两个电极表面均有间断的发光较强的点。而图 3(b)中,低电极附近观察不到明显的发光现象, 但高电极附近发光层的发光强度比图 3(a)中明显增强。这表明低电极进行封装后, 低电极附近发光的等离子体几乎全部被扑灭,而高电极附近产生的等离子体有所增多。



(a)5 kHz、5 kV 时低电极没有封装



(b)5 kHz、5 kV 时低电极封装

图3 5 kHz、5 kV 时等离子体发生器发光情况

图 4 为所加电源为 5 kHz、8 kV 时等离子体发生器低电极封装前后放电发光图。通过图 4 与图 3 的对比可以发现, 电源电压幅值的增加(5~8 kV), 不论低电极是否封装, EHD 等离子体发生器两个电极附近发光层发光强度均明显增强, 这与其他实验

结果相吻合^[5]。从图 4(b)可以看出,厚度 0.1 mm 的 Kapton 封装并不能使低电极附近的发光的等离子体如图 3(b)中那样完全被扑灭,但是相比较封装前发光层的发光强度已明显降低, 并且观察不到明显的发光较强的点。再次证明低电极封装对低电极附近等离子体的产生有着明显的抑制作用。而这种对等离子体的抑制作用显然是由于 Kapton 封装抑制了低电极表面的放电过程导致的。



(a)5 kHz、8 kV 时低电极没有封装

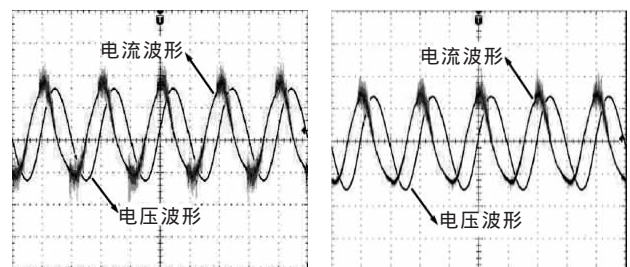


(b)5 kHz、8 kV 时低电极封装

图4 5 kHz、8 kV 时等离子体发生器发光情况

2.2 放电电压电流波形

图 5 为所加电源为 5 kHz、5 kV 时 EHD 等离子体发生器低电极封装前后放电电压电流波形图。从图 5(a)中可以看出, 在一个电压周期内, 电流波形中出现两次密集的放电脉冲, 意味着在一个电压周期内的正负两个半周等离子体各产生一次。而通过图 5(b)与图 5(a)的对比可以看出, EHD 等离子体发生器在低电极封装后电压周期负半周内电流波形中几乎没有放电脉冲的出现, 这表明电压周期负半周内没有流注的产生。而文[1]显示只有流注产生的等离子体可有效推动气流加速, 所以低电极封装后电压周期负半周内不再产生可推动气流加速的等离子体。



(a)低电极没有封装

(b)低电极封装

图5 5 kHz、5 kV 时等离子体发生器电压电流波形

考虑到图 3(b)中低电极附近的等离子体在封装后基本被完全扑灭, 可以推测封装前低电极附近发光的等离子体是产生于电压周期负半周的, 而电压周期负半周内是否只在低电极附近产生等离子体尚不能确定。

图 6 为所加电源为 5 kHz、8 kV 时 EHD 等离子体发生器低电极封装前后放电电压电流波形图。图 6 中情况与图 5 相似, 但是图 6 中电压周期负半周内的电流脉冲并没有完全消失, 只是电流脉冲的个

数和幅值都有所降低,这也与图4中低电极附近放电发光情况相对应,证明低电极附近发光的等离子体是在电压周期负半周产生的。并且低电极封装对低电极附近和电压周期负半周内的放电、等离子体的产生有明显的抑制作用。

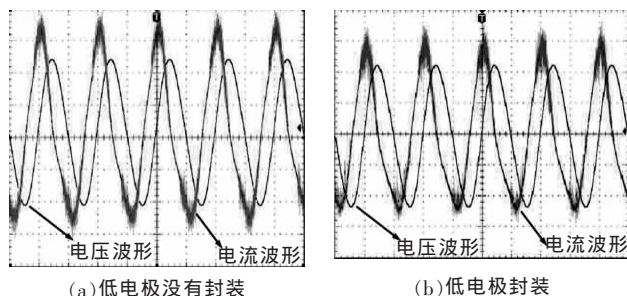


图6 5 kHz、8 kV 时等离子体发生器电压电流波形

2.3 消耗功率及产生气流速度

文[6,7]指出在电压周期负半周内 EHD 等离子体发生器会对周围空气产生拉力,而正半周内产生数十倍于拉力的推力,即工作在“推-拉”模式下(见图7)。整体来看 EHD 等离子体发生器对周围气流施加的是推力,从而实现气流的加速(见图2)。利用 Kapton 将低电极封装无疑会影响等离子体发生器周围电场分布,由于 Kapton 较大的介电常数,高电极附近电场强度必得到相当程度的增加,高电极附近等离子体的产生亦应该加强,这一点图3中高电极等离子体发光情况已经证明。因此电压周期正半周内对周围空气的推力应该增加,而整体来看 EHD 等离子体发生器产生的气流速度相比封装之前应有所上升。并且由于电压周期负半周放电及等离子体的产生被抑制,电压周期负半周内的功率消耗大大降低,EHD 等离子体发生器的整体消耗功率也应该显著降低。

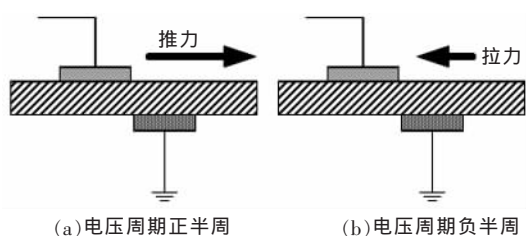


图7 等离子体发生器对空气作用力示意图

表1示出了测得的 EHD 等离子体发生器消耗功率与气流速度。从表1中可以看出,所加电源为 5 kHz、5 kV 时,低电极封装后 EHD 等离子体发生器消耗的功率由 5.0 W 下降到 3.9 W,而产生的气流速度却由 1.97 m/s 上升到 2.19 m/s。EHD 等离子体发生器在消耗功率显著降低的情况下产生的气流速度却有所增加。所加电源为 5 kHz、8 kV 时情况类似。实验结果与上面的理论分析完全吻合。

表1 等离子体发生器消耗功率与产生气流速度表

	5 kHz, 5 kV		5 kHz, 8 kV	
	消耗功率/W	气流速度/(m·s ⁻¹)	消耗功率/W	气流速度/(m·s ⁻¹)
封装前	5.0	1.97	18.9	4.6
封装后	3.9	2.19	14.1	4.8

低电极封装以后,EHD 等离子体发生器产生的气流速度有所增加,而在电源参数没有变化的情况下,消耗的功率却有显著的降低,这表明 EHD 等离子体发生器将电能转化为空气动能的能力大大增加,EHD 等离子体发生器的能量转化效率有较大的提高。

3 结语

(1)EHD 等离子体发生器产生的常压等离子体可以在不存在活动部件的条件下将电能转化为空气的动能,但是目前转化效率仍然很低。

(2)EHD 等离子体发生器低电极封装可以有效抑制低电极表面的放电过程,进而抑制等离子体的产生。电压周期负半周电流放电脉冲明显减少表明低电极附近发光的等离子体产生于电压周期负半周。

(3)EHD 等离子体发生器低电极封装后,等离子体发生器消耗功率明显降低,产生的气流速度却有所增加。这表明低电极封装可以有效地提高 EHD 等离子体发生器的能量转化效率。

参考文献:

- [1] ROTH J R. Industrial Plasma Engineering [M]. London: IOP, 2001.
- [2] ROTH J R, SHERMAN D M, WIKINSON S P. Boundary Layer Flow Control with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma [C]// AIAA Aerospace Sciences Meeting Exhibit, Reno, 1998: 28-30.
- [3] ENLOE C L, MCLAUGHLIN T E, VANDYKEN R D, et al. Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects [C]// AIAA Aerospace Sciences Meeting Exhibit 2004, Reno, 2004: 595-605.
- [4] PONS J, MOREAU E, TOUCHARD G. Asymmetric Surface Dielectric Barrier Discharge in Air at Atmospheric Pressure: Electrical Properties and Induced Airflow Characteristics [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2005, 38(19): 3 635-3 642.
- [5] MOREAU E. Airflow Control by Non-thermal Plasma Actuators [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40(33): 605-636.
- [6] PORTER C O, BAUGHN J W, MCLAUGHLIN T E, et al. Temporal Force Measurements on an Aerodynamic Plasma Actuator [C]// AIAA, 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2006: 104.
- [7] FONT G I. Boundary Layer Control with Atmospheric Plasma Discharges [C]// AIAA, 40th AIAA/ASMA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, 2004: 3 574.