

# 纳米复合聚酰亚胺基 DBD 等离子体气动激励器研究

马 赛, 李应红, 卞栋梁, 宋飞龙

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 等离子体流动控制技术具有响应快、频带宽、结构简单等优点, 具有显著技术优势。介质阻挡放电(DBD)等离子体气动激励器是研究最为广泛的激励器形式, 但是国际上鲜有研究关注其介质材料的寿命, 这严重制约了等离子体流动控制技术的发展和應用。为解决这一问题, 进行了聚酰亚(PI)/纳米复合聚酰亚胺基等离子体气动激励器实验研究。实验结果表明, 纳米复合结构有利于提高激励器的导热性能, 其放电区域最高温度与传统激励器相比, 降低了 10%~20%; 发现了纳米复合聚酰亚胺基激励器的高温点自愈现象; 纳米结构激励器抑制了结构损伤, 从而阻止了放电功率和表面温度的快速增加; 普通聚酰亚胺表面在放电老化后, 形成大量孔洞、沟槽以及烧蚀痕迹, 纳米复合聚酰亚胺在老化后表面出现大量的白色球形纳米粒子团簇, 减轻了绝缘材料受到的侵蚀与破坏。

**关键词** 等离子体流动控制; 等离子体气动激励器; 介质阻挡放电; 聚酰亚胺

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.003

**中图分类号** V211 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0016-05

## A Study on DBD Plasma Aerodynamic Actuator with Nanocomposite Polyimide

MA Sai, LI Yinghong, BIAN Dongliang, SONG Feilong

(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The advantages of plasma flow control are fast in response, wide in frequency band, and simple in structure. Dielectric barrier discharge (DBD) plasma aerodynamic actuator is the most popular form of actuators. However, in the international work, its life characteristics is almost in a state of neglect, thus seriously restricting the development and application of plasma flow control technology. In the light of solving the scientific problem, the experimental study of PI/nanocomposite PI-based plasma aerodynamic actuator is carried out. The results show that the nanocomposite has the advantage of improving the thermal conductivity of the actuator, and the maximum temperature is 10%~20% lower than that of the traditional actuator; the self-healing phenomenon of the nanocomposite PI-based actuators is found; nanocomposite actuators inhibit structural damage, thereby preventing rapid increase in discharge power and surface temperature; after the aging of the PI surface, a large number of holes, trenches and ablation traces are formed on the surface of the PI, and a large number of white spherical nanoparticle clusters appear on the surface of the nanocomposite PI after aging, reducing the damage of the insulating material.

**Key words:** plasma flow control; plasma actuator; dielectric barrier discharge; PI

流动控制技术利用微量、局部“气流扰动”控制大流量、全局性的流场特性, 起到“四两拨千斤”效

果, 可显著改善飞行器/发动机的气动特性<sup>[1-10]</sup>。等离子体流动控制是常见的主动流动控制方法<sup>[11]</sup>。

**收稿日期:** 2016-11-03

**基金项目:** 国家自然科学基金(51336011)

**作者简介:** 马 赛(1991—), 男, 北京人, 硕士生, 主要从事等离子体流动控制研究. E-mail: ms1881@163.com

**引用格式:** 马赛, 李应红, 卞栋梁, 等. 纳米复合聚酰亚胺基 DBD 等离子体气动激励器研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 16-20. MA Sai, LI Yinghong, BIAN dongliang, et al. A Study on DBD Plasma Aerodynamic Actuator with Nanocomposite Polyimide[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 16-20.

目前, DBD 等离子体气动激励抑制流动分离的能力已经具备实用的潜力<sup>[12]</sup>。但是高性能、长寿命等离子体气动激励器的发展十分缓慢。绝缘介质材料是决定 DBD 等离子体气动激励器寿命的重要环节, 目前广泛采用的聚四氟乙烯、聚酰亚胺等绝缘材料, 在交变高电压和等离子体的作用下很快失效。为此, 迫切需要发展新的绝缘材料或结构, 延长 DBD 等离子体气动激励器的寿命。

近年来, 国际上正在探索新的激励器工艺和监控方法, 提高性能和寿命, 例如: 无碱硼硅酸盐玻璃衬底的钨电极激励器<sup>[13]</sup>, 陶瓷基微尺度激励器<sup>[14]</sup>, 利用功耗和电容进行绝缘材料状态监控, 采用聚二甲基硅氧烷延长绝缘材料寿命<sup>[15]</sup>等。

## 1 实验设备与测试方案

### 1.1 DBD 等离子体气动激励器测试表征实验系统

针对 DBD 等离子体气动激励器的发热特性、介质材料特性、放电特性、介质微观形貌特性等, 建设了包括等离子体电源、等离子体气动激励器、示波器、高压探针、电流探针、红外热像仪、数字显微成像系统和扫描电子显微镜等的 DBD 等离子体气动激励器测试表征实验系统。

### 1.2 聚酰亚胺/纳米复合聚酰亚胺基等离子体气动激励器

采用的等离子体激励器介质分别为纳米复合聚酰亚胺薄膜和普通聚酰亚胺薄膜。介质厚度 0.3 mm, 铜箔电极长 40 mm, 宽 5 mm, 无水平内间距。分别制备未放电和放电老化 12 h 的激励器各若干组, 规格保持一致。使用毫秒正弦波电源 CTP-2 000 K, 正弦波电压峰峰值 10 kV, 频率 6 kHz。

## 2 聚酰亚胺/纳米复合聚酰亚胺基等离子体气动激励器发热特性

### 2.1 发热特性对比

采用 Flair 公司的 SC7000 红外热像仪拍摄不同老化程度的激励器在放电开始后的温度分布情况, 激励器两端电压 10 kV, 电源频率 6 kHz。放电环境选取金属舱室, 排除环境热辐射干扰。温度分布云图见图 1。对比未老化和老化 12 h 各组纳米复合聚酰亚胺与聚酰亚胺, 可以发现: 未经过放电老化时, 纳米复合聚酰亚胺介质与普通聚酰亚胺介质的发热程度基本相同; 经过放电老化后, 纳米复合介质的发热程度均明显低于普通介质。纳米复合介质在老化后表面发热程度下降, 普通介质在老化后, 局部

高温点增多, 出现击穿的先兆。

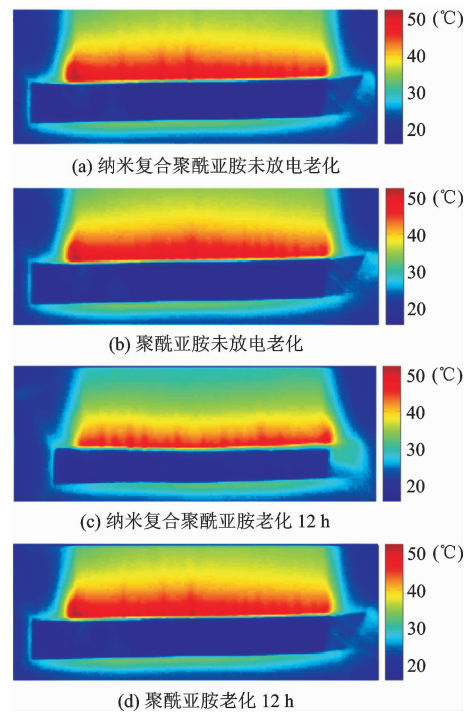


图 1 激励器温度分布云图

Fig. 1 temperature distribution of Actuators

### 2.2 温度的空间分布特点

统计不同放电区域的温度分布, 见图 2。

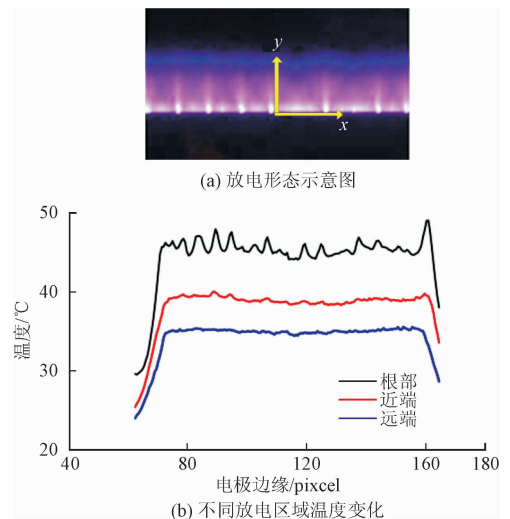


图 2 放电区域温度的空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of discharge district temperature

激励器放电区域根部、近端与远端分别取平行于电极边缘水平线。结果表明: 温度沿着等离子体流动方向(y)降低, 根部区域温度最高, 存在明显发热点。放电根部区域沿着电极边缘方向(x)温度变化较剧烈, 呈现出不稳定的放电状态。放电区域由近到远温度分布趋于稳定, 且逐步降低。放电结束后整个放电区域温度基本与环境温度相同, 未观察

到热辐射的滞后效应。

### 2.3 放电区域的温度变化规律

为对比纳米材料和普通材料发热特性,研究了放电老化 12 h 后,2 种介质的激励器放电区域最高温度变化规律,见图 3。结果表明:纳米材料区域最高温度明显低于普通材料,纳米复合介质激励器的最高温度比传统激励器降低了 10%~20% 左右。

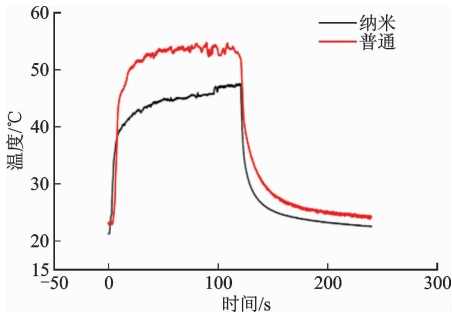


图 3 两种介质放电区域最高温度变化规律

Fig. 3 The variation of maximum temperature in discharge areas of two media

### 3 纳米介质材料高温异常点自愈现象

实验中发现,放电过程中会出现高温异常点。对于普通材料,高温异常点的出现通常是击穿的先兆,但是对于纳米材料作为绝缘介质的激励器,随着放电继续,高温异常点将会消失。这一现象表明纳米复合的电介质材料存在自愈特性。普通材料未观察到该现象。施加放电电压为 10 kV,放电 12 h 后温度随时间的变化见图 4。

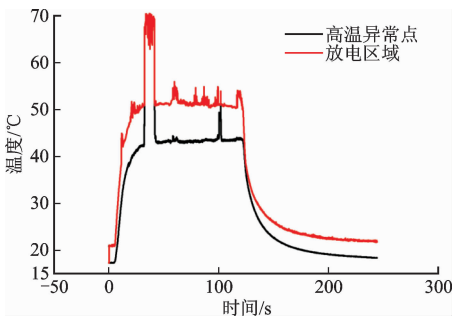


图 4 激励器放电时温度变化曲线

Fig. 4 Temperature fluctuation curve of actuator discharge

分析认为,无机纳米粒子掺杂进入材料,在放电过程中,纳米粒子析出并附着在材料表面,由于大量纳米粒子难以分解,所以在其均匀分布后,在材料表面形成新的绝缘层。由电磁场理论可知,当电场不均匀时,无机绝缘层中,相对介电常数更高的小分子自发地移向高电场强度部位。因此,放电过程中,材料表面被侵蚀形成的划痕,尖端和缝隙部分,会吸引

纳米颗粒聚集。这一现象有利于缺陷电场趋于平均化,保持放电形态稳定。所以,观察到异常高温点出现一段时间后消失。

图 5 表示高温异常点出现前后激励器表面温度分布云图。图 5(a)是高温点出现前温度分布情况,可以看到激励器电极边缘已经出现高温点。图 5(b)、(c)中该高温点温度急剧上升,远远超过周围放电区域。图 5(d)中异常高温点消失后,没有任何滞后的热辐射逸出。

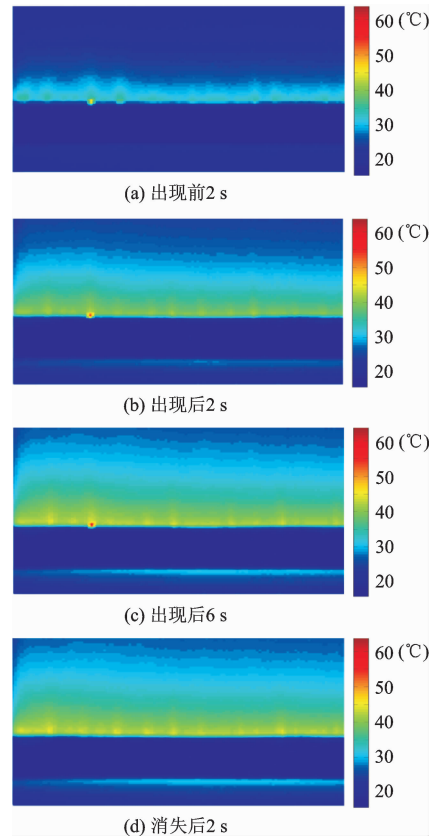


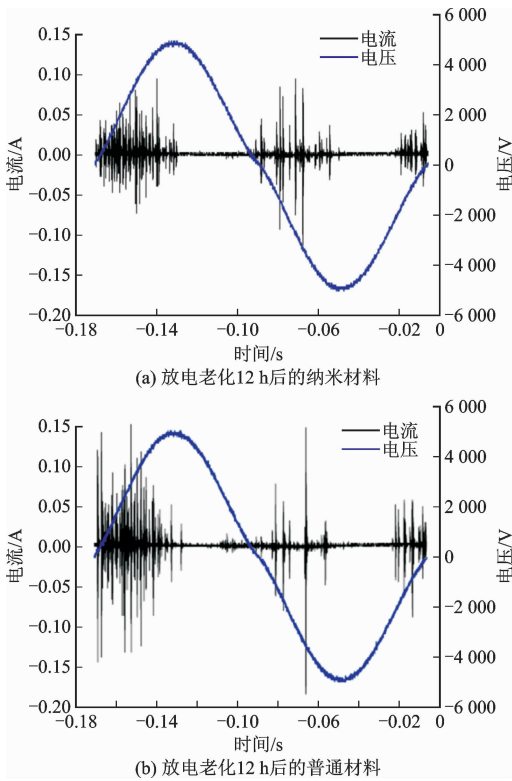
图 5 激励器在异常点出现前后温度云图

Fig. 5 The temperature distribution of the actuator before and after the anomaly

### 4 聚酰亚胺/纳米复合聚酰亚胺基等离子体气动激励器放电特性实验

#### 4.1 电压-电流波形分析

为了从放电角度去研究纳米复合后等离子体激励器的放电特性,分别从放电电压-电流波形和李萨如图形开展研究。图 6 为激励器老化 12 h 后的电压-电流波形。分析发现,普通材料放电电流高于纳米材料,且出现局部大电流和强放电现象相较于纳米材料更加频繁,放电形态更加不稳定。纳米材料虽然出现局部强电流,但是这一现象旋即消失,未能延续,因此,纳米材料具有维持稳定放电性质。



(a) 放电老化12 h后的纳米材料

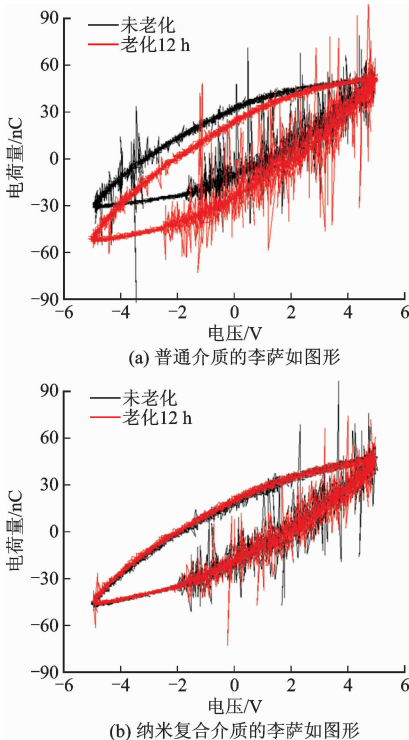
(b) 放电老化12 h后的普通材料

图 6 电压-电流波形图

Fig. 6 Voltage-current waveform

#### 4.2 李萨如图形分析

图 7 为普通介质和纳米复合介质激励器的李萨如图形,放电老化后普通材料李萨如图形斜率增加,即激励器电容增加。这主要是因为普通材料烧蚀后厚度减少相关。而纳米材料性质稳定,无明显烧蚀,所以放电老化前后李萨如图形无明显变化。



(a) 普通介质的李萨如图形

(b) 纳米复合介质的李萨如图形

图 7 李萨如图形

Fig. 7 Lissajous figure

根据李萨如图形计算激励器放电功率,见图 8。由于初始功率不同,为了方便比较,对功率数据进行归一化处理, $P$  为放电功率, $P_0$  初始放电功率,两项数据均由实验测得。结果表明:普通材料功率上升快,纳米材料功率上升慢。这是因为普通材料随着放电的进行,表面烧蚀,介质变薄,激励器电容增加,损耗增加,功率迅速上升。

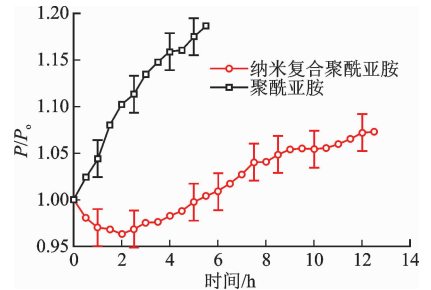


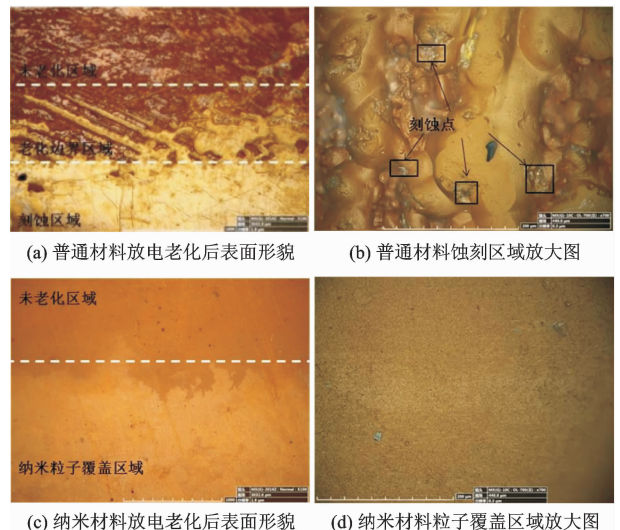
图 8 纳米材料与普通材料功率变化比较

Fig. 8 Comparison of power variation between nanomaterials and common materials

## 5 材料表面形貌

### 5.1 显微成像系统图像分析

为比较纳米和普通聚酰亚胺薄膜老化前后表面形貌的差异,对 2 种介质阻挡材料进行相同时间(12 h)和相同激励条件下(10 kV、6 kHz)的老化处理。采用 KH8700 显微系统对两种材料在放电老化前后表面形貌观测,观察到的薄膜的表面形貌图 9。普通材料表面在老化后出现明显的蚀刻区,蚀刻区内可观察到大量蚀刻点和破损结构。纳米材料在老化后,表面出现纳米粒子覆盖区,未见刻蚀痕迹,放大图中纳米粒子均匀平整。



(a) 普通材料放电老化后表面形貌

(b) 普通材料蚀刻区域放大图

(c) 纳米材料放电老化后表面形貌

(d) 纳米材料粒子覆盖区域放大图

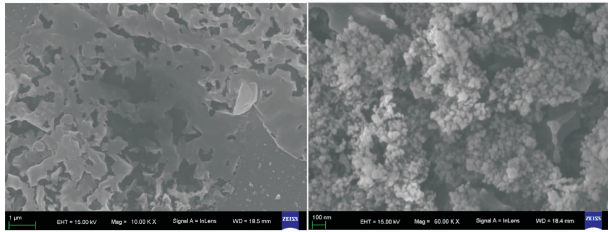
图 9 显微系统展现激励器表面形貌变化

Fig. 9 The microscopic system exhibits changes in the surface topography of the actuator

## 5.2 扫描电子显微镜图像分析

为进一步观察材料表面微观变化,采用 Zeiss 扫描电子显微镜观察老化后薄膜的表面形貌。由于聚酰亚胺薄膜不导电,样品在观察前喷涂了一层金膜,以防止扫描电子显微镜观察时产生电荷积累。

采用高能电子束轰击的方法,研究 2 种薄膜表面形貌的变化,得到的实验结果见图 10。放电过后,普通材料表面由于高温碳化和侵蚀,形成大量孔洞、沟槽以及烧蚀痕迹。纳米材料表面出现大量白色球形纳米粒子团簇,清晰明显地覆盖材料表面。普通材料厚度减小,这主要是由烧蚀导致的,纳米材料无明显变化,性质稳定。



(a) 普通介质材料表面破坏情况 (b) 纳米复合介质材料表面析出纳米颗粒

图 10 高能电子轰击后薄膜表面形貌变化

Fig. 10 Surface morphology of thin films after high energy electron impact

## 6 结论

1) 纳米材料有利于提高激励器的导热性能,降低激励器表面热量累积。相同条件下,表面纳米介质材料激励器的最高温度比传统激励器降低了 10%~20%,提高了热击穿电压。

2) 发现了聚酰亚胺/纳米复合聚酰亚胺基等离子体气动激励器的高温自愈现象。由于无机纳米粒子掺杂进入材料,在放电过程中,析出的纳米粒子将弥补介质材料表面缺陷,使放电形态保持稳定。

3) 纳米结构激励器抑制了结构损伤,从而阻止了放电功率的增加,避免了激励器放电热功率增加引发激励器表面温度升高而导致热击穿的发生。放电老化后普通聚酰亚胺李萨如图形斜率增加,即激励器电容增加。而纳米材料性质稳定,无明显烧蚀,所以放电老化前后李萨如图形无明显变化。

4) 普通聚酰亚胺表面在放电老化后,由于高温碳化和侵蚀,形成大量孔洞、沟槽以及烧蚀痕迹,蚀刻区内可观察到大量蚀刻点和破损结构。纳米复合聚酰亚胺在老化后,纳米材料表面出现大量白色球形纳米粒子团簇,清晰明显地覆盖材料表面,纳米粒子均匀平整。纳米复合介质材料表面析出的纳米颗粒抑制了材料损伤的扩展,弥补了材料内部的破损

空腔,还使材料表面更加均匀,宏观上减轻了绝缘材料受到的侵蚀与破坏,从而有效抑制击穿现象的产生,延长激励器使用寿命。

## 参考文献(References):

- [1] 吴云, 李应红. 等离子体流动控制研究进展与展望[J]. 航空学报, 2015, 36(2): 381-405.  
WU Y, LI Y H. Progress and Outlook of Plasma Flow Control [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(2)381-405. (in Chinese)
- [2] PATEL M P, NG T T, VASUDEVAN S, et al. Plasma Actuators for Hingeless Aerodynamic Control of an Unmanned Air Vehicle [J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(4): 1264-1274.
- [3] CORKE T C, JUMPER E J, POST M L, et al. Application of Weakly Ionized Plasmas as Wing Flow Control Devices [R]. AIAA 2002-0350.
- [4] POST M L, CORKE T C. Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators [J]. AIAA Journal, 2004, 42(11): 2177-2184.
- [5] CORKE T C, HE C, PATEL M P. Plasma Flaps and Slats an Application of Weakly Ionized Plasma Actuators [R]. AIAA 2004-2127.
- [6] POST M L, CORKE T C. Separation Control Using Plasma Actuators Dynamic Stall Control on an Oscillating Airfoil [R]. AIAA 2004-2517.
- [7] KELLEY C, BOWLES P, COONEY J, et al. High Mach Number Leading Edge Flow Separation Control Using AC DBD Plasma Actuators [R]. AIAA 2012-0906.
- [8] POST M L, CORKE T C. Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators [R]. AIAA 2003-1024.
- [9] POST M L, CORKE T C. Separation Control Using Plasmas Actuators; Stationary and Oscillating Airfoils [R]. AIAA 2004-0841.
- [10] POST M L, CORKE T C. Separation Control Using Plasma Actuators; Dynamic Stall Vortex Control on Oscillating Airfoil [J]. AIAA Journal, 2006, 44(12): 3125-3135.
- [11] 李应红, 梁华, 马清源, 等. 脉冲等离子体气动激励抑制翼型吸力面流动分离的实验研究 [J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1429-1435.  
LI Y H, LIANG H, MA Q Y, et al. Experimental Investigation on Airfoil Suction Side Flow Separation by Pulse Plasma Aerodynamic Actuation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6)1429-1435. (in Chinese)
- [12] 李应红. 航空等离子体动力学与技术的发展 [J]. 航空工程进展, 2011, 2(2)127-132.  
LI Y H. Development of Aero-Plasma Dynamics and Technology [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(2)127-132. (in Chinese)
- [13] HOUSER N M, GIMENO L, HANSON R E, et al. Microfabrication of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 101-104.
- [14] ZITO J C, ARNOLD D P, DURSHCER R J, et al. Exploration of Ceramic Dielectrics for Microscale Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators [R]. AIAA 2013-2495.
- [15] HANSON R E, HOUSER N M, LAVOIE P. Dielectric Material Degradation Monitoring of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115: 043301.

(编辑: 姚树峰)