

交错电极介质阻挡放电等离子体弦向特性的研究

李 钢¹, 李汉明^{2,3}, 穆克进¹, 张 翼², 聂超群¹, 朱俊强¹

1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080

2. 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080

3. 中国矿业大学理学院, 北京 100083

摘 要 在绝缘材料两侧交错布置电极的方式是航空领域所使用的等离子体激励器与众不同之处, 因此航空等离子体激励器生成的等离子体具有沿弦向变化特点。利用光谱仪、红外热像仪、激光诱导荧光系统(LIF)对交错电极介质阻挡放电等离子体弦向特性进行了实验研究, 并对介质阻挡放电等离子体流动控制机理作了初步的探讨。实验中发现等离子体发光强度和温度沿弦向的分布基本符合高斯分布; 发射等离子体光谱强度随着电压升高而增大; 等离子体弦向温度随激励电压的增大而增加; 通过 LIF 系统直接检测到放电产生的 NO。通过数值模拟得到电极附近的电势和电场强度分布进而对实验现象作了初步的解释, 并在以上实验的基础上, 将等离子体流动控制机理归纳为撞击效应、温升效应和化学反应效应。

关键词 介质阻挡放电; 流动控制; 发射光谱; 红外热像; 激光诱导荧光

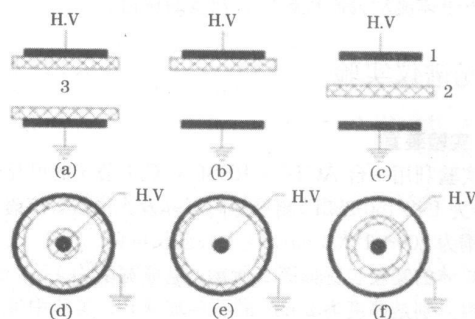
中图分类号: O539, O646 9 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)10-2209-05

引 言

介质阻挡放电等离子体在电子、材料、制造、环保、化工等行业有着广泛的应用^[1-3]。目前这类等离子体也受到航空领域的重视。自美国田纳西(UTK)大学的 Roth^[4] 教授于1994年首先开展应用 DBD 等离子体进行飞行器减阻、边界层控制、隐身、除冰等研究以来, 美、俄等发达国家的航空机构对其开展了大量研究。

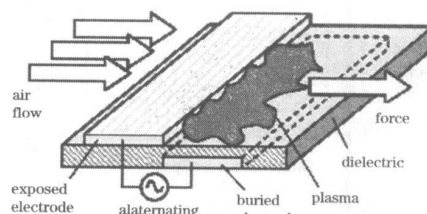
在绝缘材料两侧交错布置电极的方式是航空领域所使用的等离子体激励器与众不同之处, 因此航空等离子体激励器生成的等离子体具有沿弦向变化特点。两个由绝缘材料隔开的电极一个暴露漏在大气中, 另一个镶嵌在绝缘材料里。在高压高频交流电的作用下, 可在嵌入绝缘材料内的电极上方生成弱电离的低温非平衡等离子体(如图1B), 并使周围空气形成静流量为零(ZNMF)的水平方向射流, 等离子体诱导的流动使水蒸汽流向偏转, 随着激励电压的增大水蒸汽偏转角度也增大。

研究表明, 通过向近壁区的流场输入能量, 等离子体激励器可以减小湍流边界层阻力, 控制边界层的分离, 也就是说可以利用等离子体激励器来进行流动控制。等离子体流动控制是基于“等离子体气动激励”这一新概念的主动流动控制



1. Electrode 2. Dielectric 3. Discharge gap

(A) Plasma actuators used in chemical industry and material industry



(B) The aerodynamic plasma actuator

Fig 1 Different kinds of DBD plasma actuators

收稿日期: 2007-07-28, 修订日期: 2007-11-02

基金项目: 国防基础科研项目(A B20070090)资助

作者简介: 李 钢, 1974年生, 中国科学院工程热物理研究所博士研究生

e-mail: ligang_beijing010@163.com

技术,其所采用的等离子体气动激励,是以等离子体为载体对流场施加的一种可控扰动。等离子体流动控制的主要优势是,等离子体气动激励是电场作用,没有运动部件,具有结构简单、施加的气动激励作用频带宽、激励参数便于实时控制、响应迅速、能耗较低等优点。因此,等离子体流动控制的最大特色是便于大范围通过实时控制改善空气动力特性。可以利用微量的、局部的“气流扰动”来控制大流量、全局性的流动特性(例如,抑制分离及控制旋涡流场等),并通过改善设计状态性能、拓宽工作范围、提高非设计状态性能等作用,来改善飞行器^[5]和航空发动机的气动性能,或者直接产生气动力控制飞行状态等。已开展的大量相关实验研究包括,平板流动分离控制实验^[6]、不同形状电极特性的实验^[7]、增大机翼升力实验^[8]、低压涡轮叶栅流动分离控制^[9]实验以及压气机^[5, 10]和机身方面的实验^[11]等。

流动控制的效果与等离子体密度沿弦向分布有密切关系,由于 DBD 放电产生的是低密度等离子体(10^{16} particles $\cdot$ m⁻³ 量级)^[12],直接测量等离子体密度有很大难度,Enloe^[13]通过光电倍增管实验对等离子体沿弦向分布的特点进行了有益的探讨。发射光谱已广泛应用于等离子体的诊断研究^[14-15],本文以光谱仪、红外热像仪、PLIF 测量系统等基于光谱学理论的测试设备为等离子体诊断手段,实验研究了 DBD 等离子体的弦向特性,并在此基础上对介质阻挡放电等离子体流动控制机理作了初步的探讨。

1 光谱仪实验

1.1 实验装置

实验利用一台 ACTON RESEARCH 公司的可见光谱仪(型号为 INS-150-252F)测量等离子体发光谱线,该谱仪的测量范围为 200~1 200 nm,且中心波长可调。

具体的实验装置如图 2 所示。电极宽度为 12.5 mm,绝缘材料分别是厚度为 2 mm 的石英玻璃片。实验中通过固定在支架上的螺旋测微器调整石英片的高度。

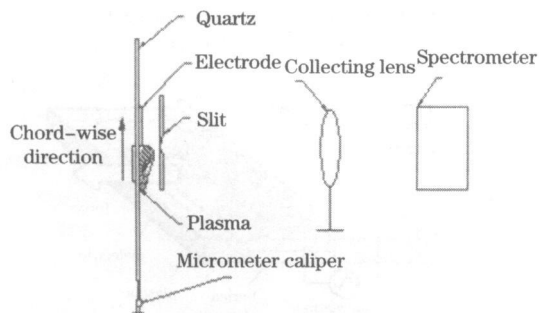


Fig 2 Lay out of slit experiment

1.2 实验结果

测量了电压和发射谱强度的对应关系,其中把最强的 339 nm O II 谱线等价于等离子体发光强度,电压频率取为 33.3 kHz,电压幅值从 7 500 V 增加到 10 500 V 的过程中,谱线强度从 1 000 增加到 3 250。结果如图 3 所示,从图中可

以推断,发射等离子体光谱强度随着电压升高而增大。图 4 为最强发射谱线(O 谱 339 nm)强度沿弦向的变化,基本符合高斯分布。

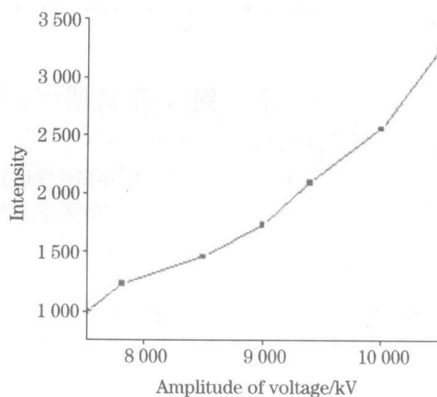


Fig. 3 Relation between the intensity of the most intensified spectrum (O 339 nm) and the amplitude of voltage

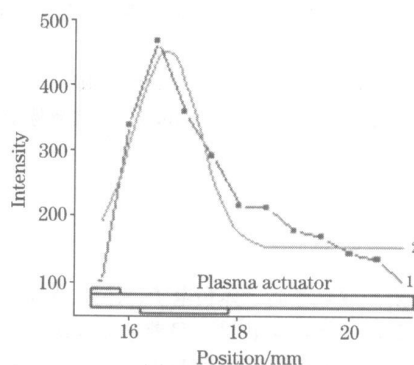


Fig. 4 Intensity of the most intensified spectrum (O 339 nm) distributing in chord-wise direction

1: Experimental Result; 2: Gauss Fit

2 红外热像仪实验

2.1 实验装置

热像仪为 AVIO 公司的 TVS-8000M K II 型红外热像仪,该系统的测量波段为 3.6~4.6 μ m,像素分辨率为 120 $\times$ 160,测温范围为 -40~300 $^{\circ}$ C。

2.2 实验结果

DBD 放电得到的是非平衡低温等离子体,电子温度与离子温度并不相同,实验中得到的是离子等重粒子的温度。

通过图 5 可以看出,等离子体在弦向的温度分布呈高斯分布。图 6 表明,随着电压从 7 500 V 递增至 9 500 V,等离子体弦向温度随激励电压的增大而增加,这与光谱测量的结果一致。

3 激光诱导荧光实验

LIF 灵敏度高,最适于测量等离子体中以微量或示踪量

过程中有痕量组分 NO 产生, 集中在电极边缘附近, 并且 NO 浓度的产生呈现不稳定性。

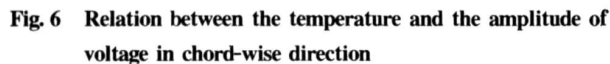
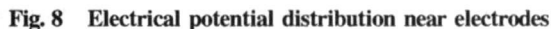


图 7 是 PLIF 测量系统示意图。利用 Nd: YAG 固体激光器产生的三倍频光(波长 355 nm, 脉宽 3 ns, 单脉冲能量约 250 mJ, 脉冲频率 10 Hz)泵浦染料激光器, 经染料激光器中的光栅调谐获得波长约为 567.84 nm 的窄带激光束, 再经 BBO 倍频晶体倍频为 283.92 nm 附近的紫外光, 对于 NO 分子的检测, 采用 226.03 nm 的紫外激发光, 用以激发 NO 的 $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0, 0)$ 跃迁中的 $Q_1(13)$ 和 $R_{12}(19)$ 线。紫外激光束经过片光透镜组扩束为宽 160 mm、厚 0.5 mm 的薄片, 透镜组包括一组圆凸透镜和一个凹柱面镜($f = -20$ mm)。利用配备紫外镜头($f = 105$ mm, $f/4.5$)的 ICCD 接受荧光, CCD 分辨率为 1600×1200 像素, 动态范围 14 位, 像素尺寸为 $0.07 \text{ mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$ 。测量 NO 时, 采用 BP254/10 的滤光片, 接受 244~264 nm 波段的 NO 荧光。通过纳秒级的可编程同步控制板触发和控制激光脉冲、像增强器和 CCD 相机的同步。实验中, ICCD 快门速度设为 200 ns, 延迟时间值为 2000 ns, 这样可以保证在每个脉冲的脉宽内进行测量, 并减少杂波的干扰。

在激光入射区域, NO 分子受到特定波长的激光诱导发射出荧光, 从而形成了条状荧光信号带。这说明在 DBD 放电



等离子体是在电场强度足够大时空气被击穿后产生的。图 8 是激励电压为 10 kV 时, 通过数值模拟得到的电极周围电势分布和电场强度分布。



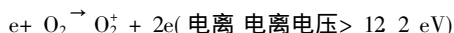
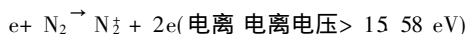
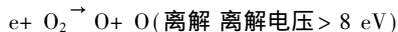
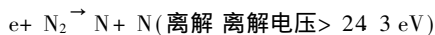
由图 9 可见电极边缘的电场强度最大, 这使得附近的电子加速获得足够能量, 并通过碰撞使中性粒子发生电离, 新生成的电子也在电场中加速进而引起电子雪崩, 因此等离子

体在裸露电极边缘下游(指向掩埋电极)产生,随之产生了以上实验中所观察到的光学、热学、化学反应等特性——核外电子被激发到不稳定的高能级,随后向低能级跃迁产生发光效应;微观粒子运动加剧产生热效应;空气分子的离解与复合产生化学反应效应。

在以上实验的基础上,可以将等离子体流动控制机理归纳为撞击效应、温升效应和化学反应效应。

4.1 撞击效应

实验中观察到有 NO 产生,这表明空气中的氮分子和氧分子被离解成氮原子和氧原子,而后氮原子与氧原子复合生成了 NO。而 N_2 的离解电压为 24.3 eV,大于 N_2 , O_2 的电离电压,分别是 15.58, 12.2 eV,因此会有氮离子、氧离子生成,氮离子、氧离子在电场加速运动通过撞击会将动量传递给中性的气体分子,这就产生了加速气体运动的效果。



4.2 温升效应

壁面附近的气体被加热而温度升高,密度减小,在重力场作用下产生浮升力;此外温度升高还会造成气体粘性增大。有研究表明,通过壁面加热的方法^[16]就可以获得边界层逆转旋转的效果。

4.3 化学反应效应

由于 DBD 在放电过程中会产生大量的自由基和准分子,如 OH, O, NO 等,并伴随着能量的交换,这些会影响气体流动的结构和形态。

5 结 论

实验表明基于光谱学理论实验仪器是介质阻挡放电等离子体的有效诊断手段。实验中发现等离子体发光强度和温度沿轴向分布基本符合高斯分布;发射等离子体光谱强度随着电压升高而增大;等离子体轴向温度随激励电压的增大而增加。

在以上实验的基础上,将等离子体流动控制机理归纳为撞击效应、温升效应和化学反应效应。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Lianshui, LI Yi, ZHAO Xiaohui(张连水, 李 裔, 赵晓辉). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2003, 23(1): 140.
- [2] WANG Weiguo, XU Yong, LIU Zhongwei, et al(王卫国, 徐 勇, 刘忠伟). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(9): 1589.
- [3] TANG Xiaoliang, FENG Xianping, LI Zhi guang, et al(唐晓亮, 冯贤平, 黎志光, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(11): 1437.
- [4] SUN Zongxiang(孙宗祥). Advance in Mechanics(力学进展), 2003, 33(1): 87.
- [5] Huu Duc Vo. Control of Rotating Stall in Axial Compressors Using Plasma Actuators. AIAA 2007-3845, 2007.
- [6] Boxx L, Rivir R. Reattachment of a Separated Boundary Layer on a Flat Plate in a Highly Adversed Pressure Gradient Using a Plasma Actuator. AIAA 2006-3023, 2006.
- [7] Arvind Santhanakrishnan, Jamey D Jacob, Yildirim BSuzen. Flow Control Using Plasma Actuators and Linear/ Annular Plasma Synthetic Jet Actuators. AIAA 2006-3033, 2006.
- [8] Alexander N Vorobiev, R Mark Renier, Eric J Jumpre. An Experimental Investigation of Lift Enhancement and Roll Control Using Plasma Actuators. AIAA 2006-3383, 2006.
- [9] Junhui Huang, Thomas C Corke, Flint O Thomas. Plasma Actuators for Separation Control of Low-Pressure Turbine Blades. AIAA Journal Vol. 44. No. 1, January 2006.
- [10] Yun Wu, Yingiong Li, Junqiang Zhu, et al. Experimental Investigation of a Subsonic Compressor with Plasma Actuation Treated Casing. AIAA 2007-3849, 2007.
- [11] Mehul P Pater, T Terry Ng, Srikanth Vasudevan. Plasma Actuators for Hingeless Aerodynamic Control of an Unmanned Air Vehicle. AIAA 2006-3495, 2006.
- [12] Roth J. Industrial Plasma Engineering. Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1995.
- [13] Enloe CL, Thomas E McLaughlin, Font G I. Parameterization of Temporal Structure in the Single Dielectric Barrier Aerodynamic Plasma Actuator. AIAA 2005-564, 2005.
- [14] SU Yongxuan, YANG Pengyuan, CHEN Dengyun, et al(苏永选, 杨 原, 陈登云, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 1998, 18(5): 565.
- [15] LIU Liying, ZHANG Jiarliang, MA Tengcai, et al(刘莉莹, 张家良, 马腾才, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2002, 22(6): 1013.
- [16] LI Yiming, YAN Dacun(李轶明, 颜大椿). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis(北京大学学报), 2005, 41(3): 381.

Investigation of the Characteristics of the Stagger Electrodes Dielectric Barrier Discharge Plasmas in Chord-Wise Direction

LI Gang¹, LI Hang-ming^{2, 3}, MU Ke-jin¹, ZHANG Yi², NIE Chao-qun¹, ZHU Jun-qiang¹

1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

3. School of Sciences, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract The aerodynamic plasma actuator distinguishes itself from others by a set of highly asymmetric electrodes arranged on dielectric. So the plasma produced by the aerodynamic plasma actuator has special characteristics along chord-wise direction. In the present paper the characteristic of the stagger electrodes dielectric barrier discharge plasmas in chord-wise direction was investigated experimentally through spectrometer, infrared imager and laser induced fluorescence system. The mechanisms behind plasma flow control were discussed briefly based on these experimental results. It was found in the experiments that the distributions of light intensity and temperature in chord-wise direction accord with Gaussian distribution. Light intensity and temperature were enhanced by increasing supplied voltage. NO produced by DBD discharge was detected directly by the LIF system. Through numerical simulations, the distributions of electric potential and electric field near the electrodes were determined and the phenomena observed in experiments were explained. Based on these experimental results, the mechanisms behind plasma flow control were ascertained to be the consequence of collisions, temperature increasing and chemical reactions.

Keywords Dielectric barrier discharge; Flow control; Emitted spectrum; Infrared imager; Laser induce fluorescent

(Received Jul. 28, 2007; accepted Nov. 2, 2007)