

文章编号: 1000-8055(2008) 03-0490-06

介质阻挡放电等离子体发光特性的光谱分析

李 钢¹, 李汉明^{2,3}, 聂超群¹, 张 翼², 李英骏^{2,3},
朱俊强¹, 李玉同², 张 杰²

- (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: 利用光谱仪作为等离子体的诊断手段,开展了一系列实验,包括等离子体光谱强度与电源电压和频率的关系、等离子体光谱强度沿弦向的变化规律、降低气压以及冲入其它气体对等离子体发光强度的影响.实验中发现等离子体发光强度与电源电压是线性关系而频率对发光强度影响不大;发光强度沿弦向变化规律近似为高斯分布;降低气压、冲入氦气都可增强等离子体发光强度.这些工作为开展进一步的实验研究以及数值模拟工作奠定了基础.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 等离子体; 光谱; 发光强度; 气压; 冲入气体
中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A

Spectrum analysis of the characteristic of light emission from dielectric barrier discharge plasmas

LI Gang¹, LI Hanming^{2,3}, NIE Chaqun¹, ZHANG Yi²,
LI Yingjun^{2,3}, ZHU Junqiang¹, LI Yutong², ZHANG Jie²

- (1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences 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 effects of high voltage, frequency, pressure and injection of gases on plasma generation were investigated by measuring the spectra of the plasma. It is found that the relation between light intensity of plasma and the supplied voltage is linear whereas the effect of frequency is not distinct. The variation of light intensity in chord wise direction accords with Gauss function. In lower pressure the light intensity of plasma is enhanced and injection of helium could have the same effect. These results have established necessary basis for further experiments and numerical simulations.

Key words: aerospace propulsion system; plasma; spectrum; intensity; pressure; gas injection

利用绝缘阻挡放电时产生的等离子体进行流动控制,是目前航空领域中的一个热门话题.对交

错布置在绝缘材料两侧的电极通以高压高频的交流电,如图 1 所示,就可以形成绝缘阻挡放电,放

收稿日期: 2007-04-20; 修订日期: 2007-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(50676094; 10474137; 60621063; 10510490; 10575129; 10675164)

作者简介: 李钢(1972),男,辽宁锦州人,博士生,主要从事等离子体流动控制研究.

电将电极附近的空气电离成为等离子体。

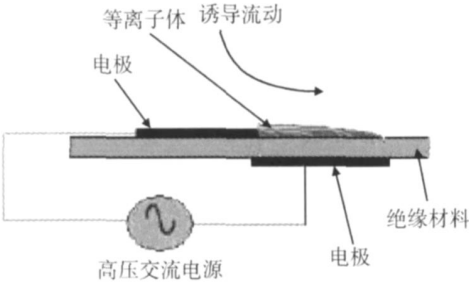


图 1 等离子体激励器结构简图
Fig. 1 Plasma actuator

1994 年美国田纳西(UTK)大学的 Roth^[1]教授首先开展了大气均匀辉光放电等离子体的研究。Roth 在研究中发现等离子体通过将静电体力传输到气动边界层,能够起到减小边界层的湍流度、抑制湍流涡系形成的作用,从而可以减小大气层内飞机的阻力系数。

在 Junhui Huang^[2]的实验中涡轮低压级叶栅上可观察到分离泡,当雷诺数低于 2.5×10^4 时流动分离无法自动复合,在等离子体激励器作用下低雷诺数时也可使流动复合并且可使复合点提前。

涡轮叶栅顶部间隙流动控制实验表明^[3],当 $Re = 10^5$ 时施加等离子体激励对泄漏流有显著的影响,在等离子体的作用下,泄露涡的最大值略有下降,对通道涡的影响不大;马蹄涡的尺度减小但强度增大;泄露涡的最大压力损失系数降低了 29.5%。

此外还有将等离子体用于机翼、机身等方面的实验,总之等离子体流动控制改善飞行器空气动力特性的主要途径是:减阻、增升、提高失速攻角和机动性;以及降噪、减振、改善进/排气系统流场品质、形成新的飞行控制力等。

等离子体激励器对流动有加速的作用,这点是确定无疑的,但其作用机理还不是很清楚。其中一个原因是这类等离子体的密度较低(10^{16} Particles/ m^3)、生成区域较小(在绝缘材料表面),很难采用直接测量的方法确定等离子体的密度和温度。由于这类通过施加高压电产生的等离子体会发光、发声,因此对其机理的研究主要通过电动力学^[45]、光学^[47]、声学^[8]的手段。

等离子体是电离了的气体,通常由光子、电子、基态原子(分子)、激发态原子(分子)、正离子、负离子六种基本粒子构成的集合体。在受激原子中,处于高激发态的电子是不稳定的,会跃迁到低激发态或基态,并会发射出特定波长的光波(由能级差决定),而且等离子体密度越大发光强度也越

强,因此光谱仪是等离子体的有效诊断手段。

本文通过光谱仪得到了等离子体发光的光谱图,对影响等离子体产生的因素,如电源的电压和频率、气压、冲入其它气体等进行了分析,研究发现,等离子体发光光谱强度随着电压升高而增大;随着气压降低而增大。注入氦气可以显著提高等离子体的发光强度,这为提高等离子体密度、进而增强等离子体对周围流体的作用提供了一个有效的方法。此外通过在电极前设置狭缝、调整狭缝与电极相对位置的方法,确定了等离子体发光强度沿弦向的变化规律,这为数值模拟中电荷密度方程边界条件的设置提供了依据。

1 实验装置

在中科院物理研究所光物理实验室开展了本次实验。实验中利用了一台 ACTON RE2 SEARCH 公司的可见光谱仪(型号为 INS21502 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 和图 3 所示。电极宽

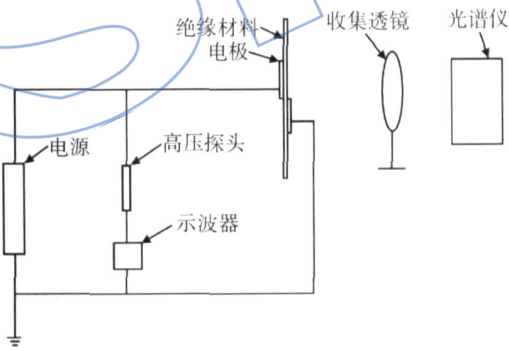


图 2 光谱仪测量等离子体发光光谱成分实验布局图
Fig. 2 Experiment layout of component measurement of spectrum emitted from plasma by spectrogram

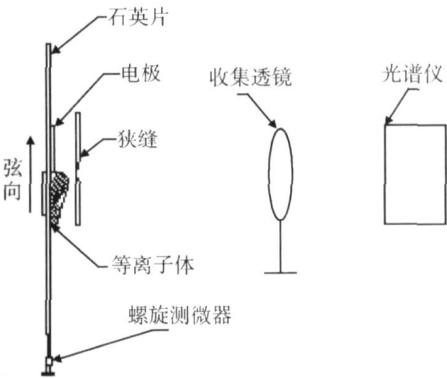


图 3 狭缝实验布局简图
Fig. 3 Lay out of slit experiment

度为 12.5 mm, 绝缘材料分别是有机玻璃(压机叶栅叶片) 和厚度为 2 mm 的石英玻璃片.

狭缝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.

2 实验结果及分析

2.1 等离子体荧光光谱成分实验

实验中, 首先研究了通过改变光谱仪的中心波长, 得到了通过在电极上施加高压高频电压获得的等离子体发光总的谱线图, 其中电压幅值取为 7.5 kV, 电压频率取为 33.3 kHz, 结果如图 4 所示. 通过图 4 可以看出, 谱线主要集中在 300~400 nm(近紫外区) 以及 600~800 nm 范围内, 且 300~400 nm 的谱线强度比 600~800 nm 强得多. 所以在后面的实验讨论中, 我们所主要关注的波长范围为 300~400 nm, 其中最强的谱线为 339 nmO₂ 线, 光谱仪的中心波长取为 350 nm.

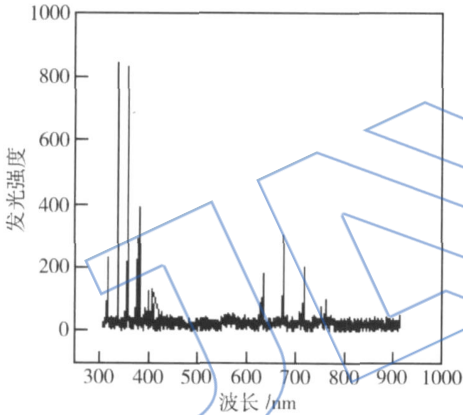


图 4 电压幅值为 7 500 V, 电压频率为 33.3 kHz 时, 光谱仪得到的等离子体发光总谱图

Fig.4 Total spectrum graph measuring by spectrogram with 7.5 kV of voltage and 33.3 kHz of frequency

接着, 测量了电压和发射谱强度的对应关系, 其中把最强的 339 nmO₂ 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 7.5 kV 增加到 10.5 kV 的过程中, 谱线强度从 1 000 增加到 3 250, 结果如图 5 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.

然后测量了电压频率和发射谱强度的对应关系, 电压幅值取为 7.5 kV, 电压频率从 30 kHz 增加到 45 kHz 的过程中, 谱线强度起伏不定, 结果如图 6 所示.

通过实验得到的等离子体发光谱线与理论值

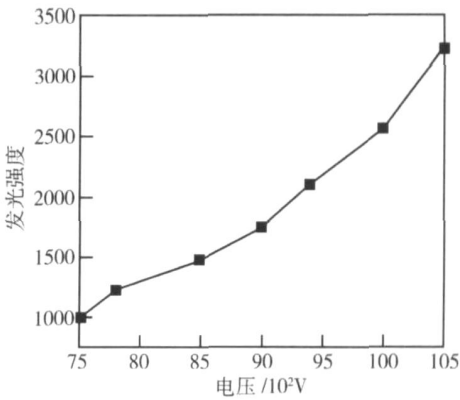


图 5 最强发射谱线(O₂ 谱 339 nm)强度随着电压幅值的变化关系

Fig.5 Relation between the intensity of the most intensified spectrum and the amplitude of voltage

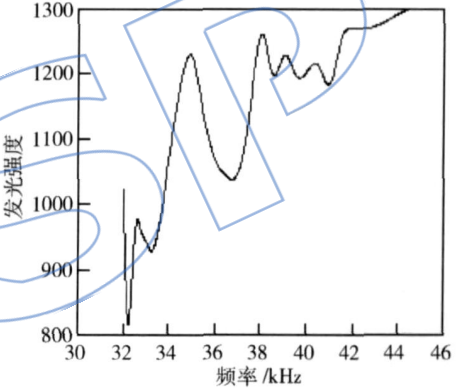


图 6 最强发射谱线(O₂ 谱) 强度随着频率的变化关系

Fig.6 Relation between the intensity of the most intensified spectrum and the frequency

符合的很好, 具体见表 1.

表 1 氧气和氮气分子的发射谱线
Table 1 Emitted spectrum of O₂ and N₂

	理论结果/ nm	实验结果/ nm
O ₂	313.4	318
	339.0	339
	372.7	372
	374.9	375
N ₂	395.5	401
	404.1	408

2.2 狭缝实验

在等离子体流动控制的数值模拟中^[9], 需要求解赫姆霍兹方程的变形形式得到电荷密度分布

如图 7, 该方程边界条件的设置是人为估算的, 其准确性需要通过实验来验证.

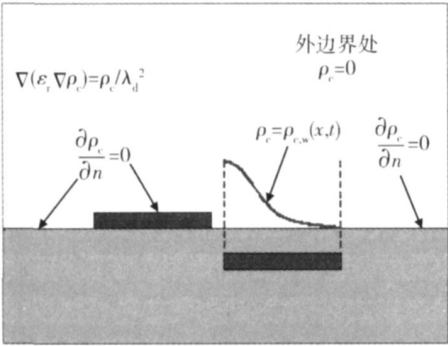


图 7 求解电荷密度方程的边界条件

Fig. 7 Boundary condition for charge density equation

实验中两电极间距 1 mm, 狭缝与石英片距离为 18 mm, 狭缝宽度为 0.6 mm. 螺旋测微器起始读数为 15.5 mm, 终止读数为 21 mm, 每隔 0.5 mm 光谱仪采集一次. 在距下电极上沿 1 mm 时(螺旋测微器读数为 15.5 mm), 从采集到的光谱中可明显分辨出等离子体的发射谱线. 图 8 为最强发射谱线(O_2 谱 339 nm)强度沿弦向的变化规律.

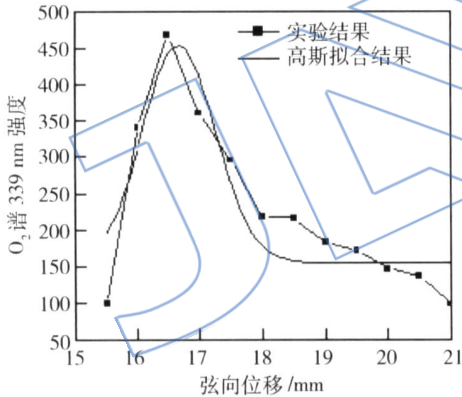


图 8 最强发射谱线(O_2 谱 339 nm)强度沿弦向变化
实验结果及高斯拟合结果

Fig. 8 Experiment result and Gauss fitted result of the intensity of the most intensified spectrum distributing in chordwise direction

归一化后拟合得到的高斯函数为

$$0.33 + 0.638 \exp\left[-2 \left(\frac{x - 16.7}{11.2}\right)^2\right]$$

这个结果与光电倍增管实验^[7]得到的半周期弦向发光强度分布规律基本一致.

2.3 气压的影响

随着飞行器飞行高度的增加, 周围空气越来越稀薄、气压越来越低, 因此有必要研究等离子体激励器在低气压下的工作效果. 实验中将等离子

体激励器置于一个密闭的容器, 通过真空泵抽气降低容器的压力. 图 9 是在不同气压下等离子体的发射光谱强度. 激励电压为 5 kV, 频率为 34 kHz.

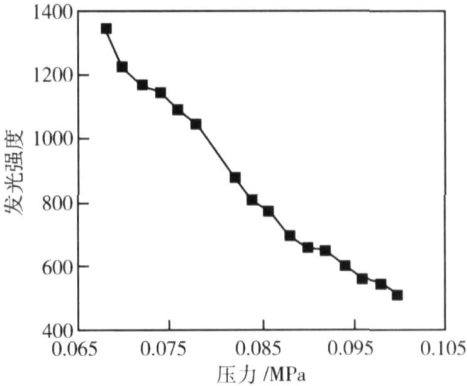


图 9 最强发射谱线(O_2 谱 339 nm)强度与气压
大小的关系

Fig. 9 Relation between the intensity of the most intensified spectrum and pressure

由图可见, 随着气压的降低, 等离子体发射光谱强度逐渐增大, 其变化规律近似为线性. 这表明在低气压下, 空气更容易被电离, 因此等离子体的激励效果在高空中很可能更好.

2.4 冲入其它气体的影响

实验中利用直径为 4 mm 细管向电极表面冲入其它气体, 管子与电极平面垂直、距离 10 mm. 通过浮子流量计读出气体的流量. 实验中发现冲入氮气后各条谱线强度都得到了大幅度提升, 如图 10 所示, 这是因为冲入的氮气较空气更易电离, 氮气电离产生的电子与空气分子撞击, 引发了空气的电离, 因此氮气起到了种子气体的作用.

图 11 是等离子体发射光谱强度与氮气流量的关系.

由图 11 可见对应等离子体发射光谱强度的最大值有一个最佳的氮气流量. 这可能是由于随着氮气流量的增大, 流速也提高了, 因此滞止压力增大了, 当压力增大所产生的抑制氮气、空气电离的效果超过氮气流量增大促进空气电离的作用后, 再继续增大氮气流量就得到了抑制空气电离的效果. 紧接着做了冲入氮气、氧气的实验, 测量结果表明冲入氮气也可以增强等离子体的发光强度, 但没有冲入氮气的效果显著, 而氧气的冲入却使等离子体的发光强度变弱.

实验中发现现在氮气中掺混氮气可以进一步增强等离子体的发射光谱强度, 图 12 是氮气流量为

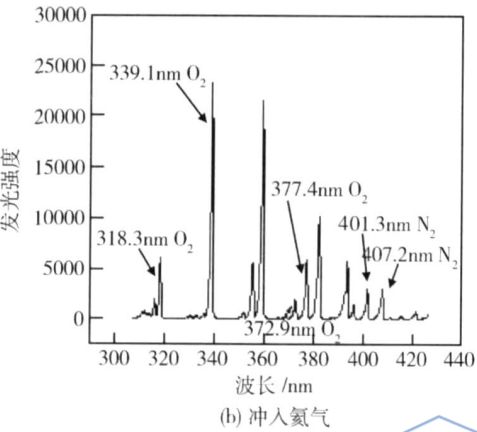
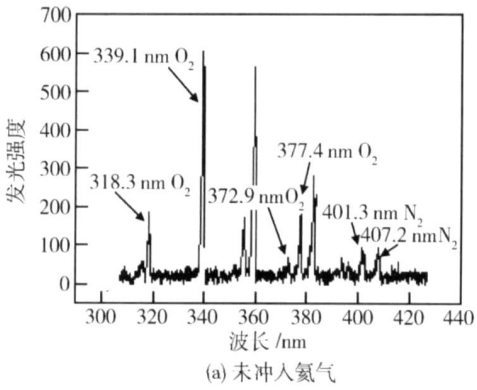


图 10 冲入氦气前后得到的等离子体发光光谱
Fig. 10 Spectrum emitted from plasma with and without helium injection

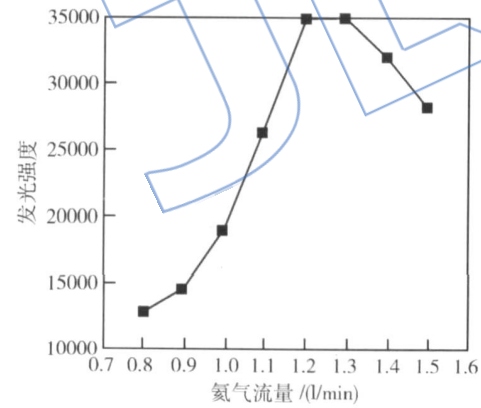


图 11 氦气流量对等离子体发光强度的影响
(最强谱线 O₂ 谱 339 nm)

Fig. 11 Effect of volume flow rate of He on spectrum intensity emitted from plasma

1.5 l/min、改变氦气流量时等离子体发射光谱强度的变化。

由图 12 可见, 通过向氦气中掺混氮气, 可使等离子体的发光强度增大近一倍。

为了更好的检验氦气对等离子体发光强度的

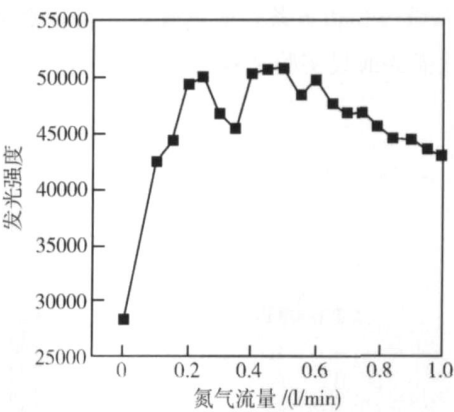


图 12 在氦气中掺混氮气的效果
(最强谱线 O₂ 谱 339 nm)

Fig. 12 Effect of adding N₂ in He

影响, 还进行了真空下的充气实验。

2.5 真空容器充注氦气实验

将容器抽真空至 0.001 5 MPa, 然后充注氦气, 通过光谱仪测量不同压力下等离子体的发射光谱强度, 测量结果见图 13。

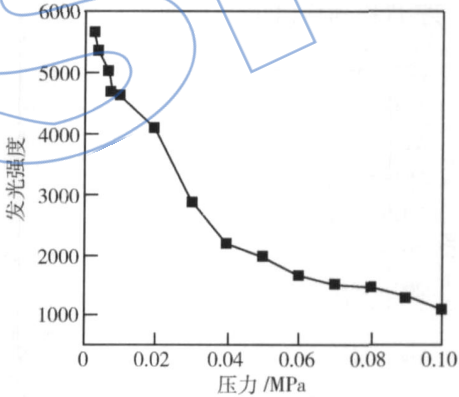


图 13 真空容器里充注氦气实验结果
(最强谱线 O₂ 谱 339 nm)

Fig. 13 Result of injection He to vacuum vessel

由图 13 可见, 随着气压的增大, 等离子体发射光谱强度按指数规律衰减。向真空容器充入氦气使发光强度减小的结果与 2.4 中在大气里冲入氦气使发光强度增大的结果并不矛盾, 这是因为真空容器里的空气非常少, 氦气不再发挥种子气体的作用。因此 2.5 的实验结果进一步支持了 2.4 实验的结论。

3 结 论

实验发现, 发射等离子体光谱强度随着电压升高而增大; 最强发射谱线(O₂ 谱 339 nm) 沿弦向变化规律基本符合高斯分布; 在保持电压不变

的情况下,降低气压可以增强等离子体发光强度;冲入氦气可以显著增强等离子体的发光强度,且有一个最佳氦气流量;在氦气中掺入氮气又可进一步增强等离子体的发光强度.实验表明光谱测量是绝缘阻挡放电等离子体的简易有效的诊断工具,本文的工作为寻求提高等离子体密度的方法,以及相关的数值模拟工作提供了有益的参考.

参考文献:

[1] Roth J R. Investigation of a uniform glow discharge plasma in atmospheric air[R]. ADA296928, 1995.

[2] Huang Junhui, Corke T C, Thomas F O. Plasma actuators for separation control of low2pressure turbine blades[J]. AIAA 2006, 44 (1): 51257.

[3] Van Ness II Daniel K, Corke T C, Thomas F O. Turbine tip clearance flow control using plasma actuators[R]. AIAA Paper 2006221.

[4] Enloe C L, McLaughlin T E, Van Dyken R D. Mechanisms

and responses of a single dielectric barrier discharge plasma actuator: plasma morphology [J]. AIAA Journal, 2004, 42: 5892594.

[5] Enloe C L, McLaughlin T E, Van Dyken R D. Mechanisms and responses of a single dielectric barrier discharge plasma actuator: geometric effects [J]. AIAA Journal, 2004, 42: 5952604.

[6] Enloe C L, McLaughlin T E, Van Dyken R D. Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator[R]. AIAA Paper 20042844.

[7] Enloe C L, McLaughlin T E, Font G I. Parameterization of temporal structure in the single dielectric barrier aerodynamic plasma actuator[R]. AIAA 20052564.

[8] Baird C, Enloe C L, McLaughlin T E. Acoustic testing of the dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuator [R]. AIAA 20052565.

[9] Suzen Y B, Huang P G, Jacob J D. Numerical simulations of plasma based flow control applications [R]. AIAA 200524633.