

文章编号: 1001-1609(2006)06-0435-03

# 激励参数对等离子体 EHD 加速效应影响的试验研究

宋慧敏, 李应红, 苏长兵, 吴云, 张朴

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

Experimental Studies of Excitation Parameters' Influences on Plasma EHD Acceleration Effect

SONG Hui-min, LI Ying-hong, SU Chang-bing, WU Yun, ZHANG Pu

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

**摘要:** 在静止空气中, 进行了激励参数对等离子体 EHD 加速效应影响的试验研究。在激励频率固定的情况下, 诱导气流速度随激励电压的增加而近似线性地增加; 在激励电压固定的情况下, 诱导气流速度并非随频率的增加而线性增大, 而是存在一个最优频率, 在这个频率下测得的诱导气流速度最大。试验获得的激励电压、频率对诱导气流速度影响的定量关系有助于进一步揭示辉光放电等离子体 EHD 的机理, 也为等离子体在流动控制方面的应用奠定了基础。

**关键词:** 等离子体; 辉光放电; 电流体动力; 流动控制

中图分类号: TM89

文献标识码: A

**Abstract:** Experimental studies on excitation parameters' influences on plasma EHD acceleration effect are carried out in quiescent air. Under fixed excitation frequency, the induced airflow velocity increases almost linearly when the excitation voltage increases; While under fixed excitation voltage, the induced airflow velocity doesn't increase linearly when the excitation frequency increases. In fact, it gets its maximum value under an optimal frequency. The results of the experiments can help to discover the mechanism of glow discharge plasma EHD, and to establish the foundation for the application of plasma flowing control.

**Key words:** plasma; glow discharge; electrohydrodynamic; flow control

## 0 引言

近年来, 等离子体 EHD (Electrohydrodynamics, 电流体动力) 激励在国际空气动力学领域受到了极大的关注<sup>[1]</sup>。利用介质阻挡层和高频激励源, 可获得稳定均匀的大气压辉光放电<sup>[2]</sup>。空军工程大学飞机推进系统军队重点实验室在“863”计划的资助下, 开

展了辉光放电等离子体 EHD 流动控制与扩稳的研究。采用单相高压高频电源来激励交错电极布局的激励器, 常规大气条件下, 已经可以在激励器表面产生辉光放电等离子体, 并观察到等离子体的产生对中性气体有较为明显的加速作用。试验中注意到, 等离子体 EHD 加速效应与激励电压、频率有关, 需要通过试验对它们之间的关系进行量化。

Roth 等人在风洞中测量了等离子体激励器的速度剖面, 在静止空气中研究了蠕动流动速度与电源激励电压和频率的关系。所进行的试验表明: 在电源频率固定的情况下, 诱导的气流速度与电压呈近似的线性增大的关系; 在 3~3.8 kV 范围内电源电压固定的情况下, 诱导气流速度与频率并不是线性增大的关系, 而是在频率为 3 kHz 时出现一个最大值<sup>[3-4]</sup>。文[5]研究发现等离子体激励器在空气中诱导的最大速度与  $V^{3.5}$  成正比。文[6]研究了电源输出频率对等离子体激励器产生的力的影响, 并观察到在低于 3 kHz 的频率下, 基本上没有什么力产生; 频率为 5 kHz 时测得的等离子体激励器力最大; 再增大频率, 等离子体激励器力却减小。国内尚未进行过激励参数对等离子体 EHD 加速效应影响的研究。

## 1 等离子体 EHD 加速效应的理论基础

### 1.1 等离子体 EHD 顺电加速机制

大气压辉光放电等离子体 EHD 诱导中性气体加速的机制主要有三种, 即顺电流动加速、直流电场流动加速和蠕动流动加速<sup>[3]</sup>。三种机制中, 直流电场流动加速方案对电源的要求较高, 工程实用的难度较大。蠕动流动加速的效果最好, 但需要专门设计的多相电源。本试验中采用顺电流动加速机制。

等离子体的顺电 EHD 直接作用在大气压等离子体的净电荷密度上。所谓“顺电”是指非均匀电场

收稿日期: 2006-05-08

基金项目: 863 计划(2003AA753025)资助。

作者简介: 宋慧敏(1979-), 女, 讲师, 从事等离子体流动控制等方面的研究。

向电中性、但被极化了的电介质施加一个单一方向的作用力，这个作用力总是指向电场强度梯度的方向，而与电极的瞬时极性无关<sup>[4]</sup>。

当大气压等离子体被加速向电场梯度的方向运动时，能够在中性气体中诱导 1~10 m/s 的速度。产生诱导速度的原因是：等离子体受电场力作用，加速向电场梯度的方向运动，在运动过程中带动中性气体一起运动。

依据文[4]的推导，顺电 EHD 力诱导的中性气流速度，可由下式进行计算：

$$v = E \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho}} \quad (1)$$

式(1)中：E 是电场强度； $\rho$  是中性气体的密度； $\epsilon_0$  是真空介电常数。

这一诱导气流速度是工作气体密度的函数，也是电场 E 的函数。在多数试验中，电极几何尺寸是固定的，电场与所加的电压成正比，因此诱导气流速度与外加电压成正比。

### 1.2 基于顺电加速机制的等离子体激励器布局

基于顺电加速机制的典型等离子体激励器布局方式见图 1 和图 2，上、下层的条状电极交错、不对称地分布在绝缘板的两侧。给激励器加单相高压高频的激励时，激励器电极附近的空气被电离，产生等离子体。受空间不均匀电场的作用，等离子体中的正离子会被驱动向右加速运动。在正离子运动过程中，碰撞原本静止的中性气体分子，从而带动中性气体也向右运动，进而达到加速空气流动的目的。等离子体 EHD 的加速效应可以由测得的诱导气流速度来表征。

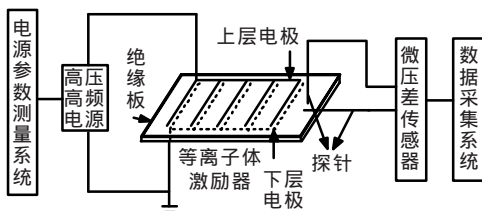


图 1 等离子体流动控制试验系统原理图

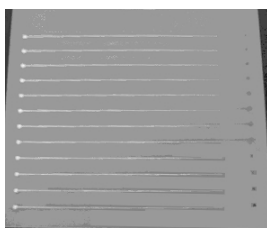


图 2 试验用等离子体激励器

### 1.3 诱导气流速度的测量

本试验采用微压差传感器测速系统测量诱导气流的速度，其基本原理是在电极板的末端安装一个正对诱导气流运动方向的水平的总压探针和一个垂直于气流运动方向的静压探针，利用总压和静压之间的数学关系计算速度，即  $v = \sqrt{2(p_t - p_s) / \rho}$ ，式中：

$\rho$  为空气的密度； $p_t$  为气体的总压； $p_s$  为气体的静压。

在静止空气中进行试验，研究激励电压、频率对等离子体 EHD 加速效应的影响，等离子体 EHD 的加速效应可以由测得的诱导气流速度来表征。

## 2 激励参数对等离子体 EHD 加速效应影响的试验

### 2.1 试验装置

等离子体流动控制试验系统的原理见图 1，主要包括等离子体电源、等离子体激励器、速度测量系统和激励参数测量系统等几部分。电源系统为单相高压高频电源，输出电压 0~20 kV 连续可调，输出频率 20~40 kHz 连续可调，电压的输出波形为正弦波。试验采用的等离子体激励器见图 2，电极布局为不对称布局，绝缘板为普通印刷电路板，上下表面铺设的是钼镀镍电极。采用微压差传感器测速系统进行诱导气流速度的测量，总压探针和静压探针距离激励器上表面最末一根电极(沿流向)5 mm，高出等离子体激励器约为 1 mm，参见图 1。采用 TDS3012B 型数字示波器配合电容分压器测量输出电压的幅值和频率。

电源系统的原理见图 3。主要由整流滤波、功率放大、高频高压变压器和控制电路四个部分组成。AC 220 V 的电源能量通过 AC-DC-AC 过程，高效地转换成高频能量。220 V 的工频电源经可调变压器变压后，输入给 KBPC-3510 单相桥式整流器进行整流，变换为单向脉动电压。为了满足负载要求，采用  $\pi$  形滤波器进行滤波，减小整流电压的脉动程度，这种滤波器的滤波效果比 LC 滤波器更好。等离子体电源系统升压部分的基本原理是一个 D 类功率放大器，其特点是断续地转换器件的开通，其频率超过音频，效率很高。功率器件采用 IGBT，输入阻抗高、开关速度快、驱动电路简单、热稳定好。控制电路包括波形发生电路和 MCU 控制电路。波形发生电路用于产生所需频率的信号，作为 D 类功率放大器的输入。通过调节精密多圈绕线电位器的电阻值，来改变谐振频率  $f_0$ 。MCU 控制电路用于控制波形发生电路和 D 类功率放大器，从而控制电源的输出。结合检测-控制-反馈，可以使电路的状态始终保持在最佳状态。高频高压变压器进行真空浸油处理，以改善来自射频干扰的电压尖峰造成的高电压击穿

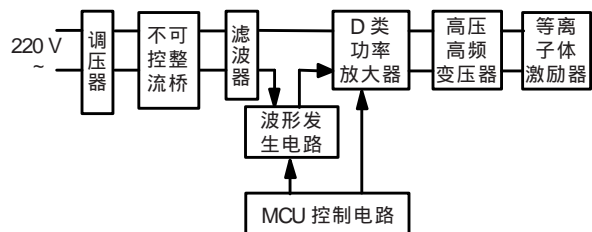


图 3 等离子体电源系统原理图

现象, 并提高输出电压有效值。高频高压变压器的漏感较高, 本设计利用了这一特点, 将等离子体激励器(容性负载)也作为电源电路的一部分, 组成谐振变换器, 减小损耗。

### 2.2 试验结果及分析

分别保持激励频率(电源的输出频率)为 20, 25 和 28 kHz 不变, 观察诱导气流速度对于激励电压的依赖关系。进行数据处理, 画出诱导的气流速度与激励电压之间的关系曲线, 见图 4。由图中的 3 条曲线可以看出: 在几个不同的固定频率下, 诱导气流速度均随电压的升高而近似线性地增大。图 4 反应的趋势与文[4]所得出的结论是一致的, 与文[5]的结论不一致。这一现象的解释是: 在激励频率一定的条件下, 激励电压升高时, 加在激励器上的场强增大, 由公式(1)可知, 会使诱导气流速度随之增大。

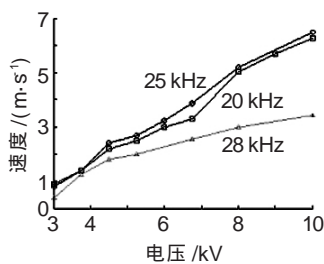


图 4 诱导气流速度与激励电压的关系

保持激励电压(电源的输出电压)分别为 4.5, 6 和 8 kV, 观察诱导气流速度对于激励频率的依赖关系。进行数据处理, 画出诱导的气流速度与激励频率之间的关系曲线, 见图 5。可以看出: 在电压固定的情况下, 频率 20~25 kHz 范围内, 随频率增加诱导气流速度有细微的增加; 频率 25~32 kHz 范围内, 随频率的增加诱导气流速度有显著的下降; 在 25 kHz 处诱导气流最大。因此, 在激励电压固定时, 诱导气流速度并非随频率的增加而线性增大, 而是存在一个最优频率 25 kHz, 在这个频率下测得的诱导气流速度最大。这一趋势与 Roth、VanDyken 等人试验中所得到的趋势是一致的, 频率对诱导气流速度的影响都是非单调的, 都存在一个最优频率, 在该频率处诱导气流速度最大。但最优频率的数值是各自不同的, Roth 等人进行的试验中为 3 kHz, VanDyken 等人进行的试验中为 5 kHz, 而我们进行

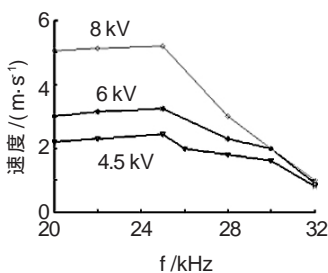


图 5 诱导气流速度与激励频率的关系

的试验中是 25 kHz。不同的电源原理和激励器布局可能是导致最优运行频率不同的原因。

本试验中将等离子体激励器作为电源电路的一部分, 与高压高频变压器一起组成谐振变换器, 谐振频率在 25 kHz 附近。在谐振点处放电强度最强, 诱导气流速度也最大, 因此测得的最优频率为 25 kHz。越远离谐振频率, 等离子体激励器上获得的实际电压相比谐振时的电压就越小<sup>[7]</sup>, 等离子体放电的程度就越低, 诱导的中性气流速度也会减小。

### 3 结论

通过激励参数对等离子体 EHD 加速效应影响的试验, 得到以下结论:

(1) 在激励器电极布局、电源激励频率固定的情况下, 诱导的气流速度随激励电压的增加而近似线性地增加。这一结论与 Roth 等人的试验结论一致, 与理论推导也一致, 从而证明了激励电压对诱导气流速度的影响是近似线性的。

(2) 在激励器电极布局、电源激励电压固定的情况下, 诱导的气流速度不随激励频率的增加而线性增加, 而是存在一个使诱导气流速度最大的最优频率。频率低于最优频率时, 随着频率的增加诱导气流速度增加; 频率高于最优频率时, 随着频率的增加诱导气流速度不增反降。这一结论反映的趋势与 Roth、VanDyken 等人试验中得到的结论是一致的, 从而证明了激励频率对诱导气流速度的影响是非单调的。

(3) 我们和 Roth、VanDyken 等人在各自的试验中得到的最优频率都是不同的。从而表明, 激励电源高频输出端的电路和等离子体激励器的布局不同, 相应的最优运行频率也不同。

通过激励参数对等离子体 EHD 加速效应影响的试验, 得到了激励电压、频率对诱导气流速度影响的定量关系, 对于等离子体在流动控制方面的应用有着重要意义。

在进一步的工作中, 需要研制其它原理的电源, 并结合理论计算和数值仿真, 更好地确定激励参数对诱导气流速度的影响, 从而更深入地理解辉光放电等离子体 EHD 的机理和等离子体参数对流动加速机制的影响。

### 参考文献:

- [1] 李应红, 张朴, 刘建勋, 等. 基于等离子体的流动控制研究现状及分析[C]// 中国航空学会航空百年学术论坛动力分论坛论文集: 自动控制分册(七分册). 北京: 中国航空学会动力专业分会, 2003: 131-136.
- [2] 孙岩洲, 邱毓昌, 谢建民. 大气压下辉光放电的产生[J]. 高压电器 2003, 39(6): 41-42
- [3] Sherman D M, Roth J R. Modification of Aerodynamic Boundary Layers Using a One (下转第 441 页)

断器的发热功率是一个很大的值，而散热功率则等于零，因此，多余的热量将使得熔断器的温度迅速升高；而温度的升高又导致散热功率的增大，如此往复，直至最后熔断器的发热功率与散热功率达到平衡，熔断器的温度也趋于稳定。另外，从图中还可以

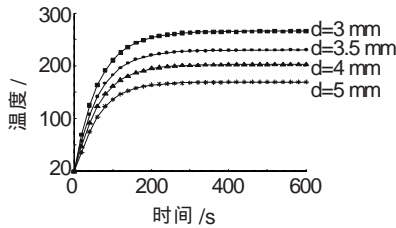


图7 正常情况下最高温度随时间变化曲线

看出，在正常工作情况下，熔断器的最高温度随着熔断器最窄处宽度 d 的增加是逐渐降低的。

(2) 熔断器在故障情况下最高温度点温度随时间的变化曲线见图 8。从图中可以看出，随着时间的推移，温度升高的速率逐渐增大。因为在故障情况下，负载电流是线性增长的，而发热功率与负载电流的平方是成正比的，因此熔断器的发热功率将迅速升高；而相对于熔断器的散热功率来讲，由于整个瞬态过程持续时间较短，温度变化所波及的范围也较小，所以熔断器两端的温度并没有太大的变化，因此可以近似认为在故障情况下熔断器的散热功率是一个恒定的值。正是由于发热功率与散热功率之间的这种不平衡，将使得熔断器的温度迅速升高，并且温度升高的速率逐渐增大。另外，从图中还可看出，在

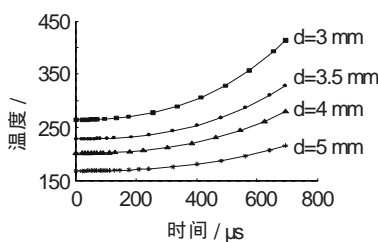


图8 故障情况下最高温度随时间变化曲线

故障情况下，熔断器最高温度随着宽度 d 的增加也是逐渐降低的。

(3) 不同情况下，熔断器的最高温度点温度随宽度 d 的变化曲线见图 9。

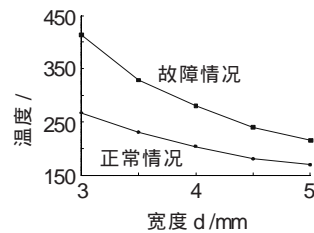


图9 最高温度随宽度 d 变化曲线

### 3 结语

利用有限元分析软件 ANSYS 建立了熔断器热电耦合温度场计算模型，并利用该软件对正常工作以及故障情况下的瞬态温度场变化过程进行了数值仿真。仿真中考虑了材料物理性能参数以及对流换热系数随温度的变化，仿真结果为熔断器的参数设计、制造以及改进提供了理论依据。由于目前该型熔断器尚处于设计阶段，没有相应的实验数据与仿真结果进行比较，因此，在以后的工作中还需要根据实验结果对仿真模型进行不断地修正和完善。另外在计算的过程中，由于计算机内存的限制，对实际模型做了一定程度地简化，并且有限元网格的划分还比较粗糙，在以后的工作中还需要进一步的改进。

### 参考文献:

- [1] 宋 勇, 艾宴清, 梁 波. 精通 ANSYS7.0 有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] 小飒工作室. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [3] 方昆凡. 工程材料手册 有色金属材料卷[M]. 北京: 北京出版社, 2002.
- [4] 陶文铨. 传热学基础[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.

(上接第 437 页)

Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma [C]// 25th IEEE International Conference on Plasma Science, Raleigh, North Carolina: 1998.

- [4] Roth J R. Aerodynamic Flow Acceleration Using Piezoelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic Effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma [J]. Physics of Plasmas, 2003, 10(5): 2 117-2 126.
- [5] Enloe C L, McLaughlin T E, Vandyken R D, et al.

Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator[J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 589-594.

- [6] Vandyken R D, McLaughlin T E, Enloe C L. Parametric Investigation of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator[R]. AIAA 2004: 846.
- [7] 张芝涛, 赵艳辉, 董克兵, 等. 介质阻挡放电系统中谐振问题的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 42-45.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!