

介质材料对等离子体激励器放电特性的影响

周章文, 李益文, 刘展

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:选取不同组织结构的4种绝缘介质材料:陶瓷(含氧化铝99%, Al_2O_3)、聚四氟乙烯(氟塑料)、有机玻璃、环氧树脂,在相同外加激励作用下,研究不同介质材料和不同厚度的同一介质对放电特性的影响。结果表明,不同绝缘介质材料和不同厚度的同一介质阻挡层对介质阻挡放电特性都有明显差异,介电常数较大(陶瓷)、厚度较薄的绝缘介质材料易产生强烈均匀的放电,并解释了试验结果的合理性。

关键词:等离子体激励器;流动控制;介质阻挡放电;介电常数;放电电流

中图分类号:TP121.1 **文献标识码:**A

Effect of Dielectric Material on the Characteristics of Plasma Actuator Discharge

ZHOU Zhangwen, LI Yiwen, LIU Zhan

(College of Engineering, Airforce Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: By selecting four different structure insulating materials of chinaware (containing 99% of aluminum oxide, Al_2O_3), polytetrafluoroethylene, organic glass and epoxide resin, the effects of different dielectric material and the same material with different thickness on the discharge characteristics have been studied under the same external excitation. The experimental results indicate that there exist significant differences of dielectric barrier discharge characteristics for different insulating materials and the same dielectric barrier layer with different thickness. The thin insulating materials with big dielectric constant (chinaware) can generate strong and uniform discharge easily. The rationality of the experimental results has been explained.

Key words: plasma actuator; flow control; dielectric barrier discharge; dielectric constant; discharge current

0 引言

等离子体边界层控制是利用航空等离子体激励器的介质阻挡放电(DBD)来实现。等离子体激励器是由固体绝缘介质插入不正对着的两个电极间,一个电极位于绝缘介质之上并裸露在空气中,另一个电极则完全被绝缘介质包裹,两电极在高频高压等离子体电源激励下,电极附近空气被电离,产生的等离子体带电粒子在电场力作用下运动,运动过程中与空气中各种粒子相互碰撞,产生动量传递和能量传输,诱导其边界层空气运动形成诱导气流。介质阻挡放电能在很大频率和气压范围内工作而成为最活跃的研究课题,它没有运动部件,结构简单紧凑,功耗较低,激励频带宽,激励参数易调节,响应迅速等优点,在飞行器外流和推进系统内流流动控制方面具有重要应用前景^[1-6]。

影响介质阻挡放电的因素很多,其中阻挡层介质材料是一个重要因素。当其他条件相同,介质阻

挡放电时,阻挡层的介电常数越大,放电越剧烈,越有利于产生臭氧^[7]。因此研究介质材料对介质阻挡放电影响十分重要。实验中利用不同介电常数的几种典型材料作为介质阻挡层,研究其放电特性,并从理论上对所出现的放电特征给出合理解释。

1 介质阻挡放电机理

航空等离子体激励器不同于平行板或同轴式介质阻挡放电激励器,其横截面具有的特征^[8]如图1所示。

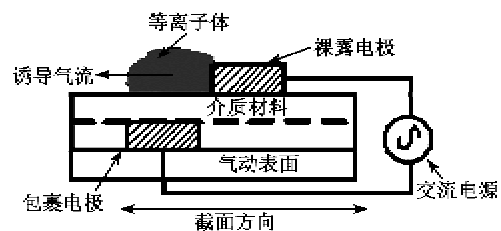


图1 等离子体激励器结构图

收稿日期:2011-10-25

作者简介:周章文(1979-),男,湖南湘潭人,讲师,硕士,主要从事等离子体技术及激光推进技术的研究。

航空等离子体激励器结构虽不尽相同,但放电机理类似。当两电极上施加交流电压大于两极间击穿空气电场强度(空气平均击穿电场强度为 1×10^6 V/m)时,两极附近空气在强电场作用下电离,产生的带电粒子同时在不均匀电场中分别向阳极和阴极运动。由于电子质量比正离子小,且气体间隙一般为毫米量级,当外加激励交流电源频率小于 100 kHz 时,离子和电子分别运动到两极的时间远小于外加激励交流电源的周期,因而放电过程中可近似认为电子和离子在强电场中运动具有瞬时性;当外加激励交流电源频率大于 10 MHz 时,电子运动到两极时间远小于外加激励交流电源的周期,可认为正离子在放电空间是不动的。当电荷到达包裹的下电极前,会在介质表面集聚下来。集聚于介质表面的电荷产生一个与外加电场方向相反的自洽电场,随着介质上集聚电荷的增加,总电场强度下降,当两极间场强下降到小于气体击穿场强时,放电中断。介质上堆积电荷不能在绝缘介质表面上自由移动,因而在电源的下半个周期,会使前次放电区域较早达到放电阈值而首先放电,从而保证了放电空间的稳定性。放电期间出现大量时空上随机分布的电流细丝,在示波器中显示为电流波形上的电流脉冲。

2 介质阻挡放电实验

等离子体^[9]气激励器一般由多组电极构成,实验系统原理如图 2 所示,包括激励器放电和放电特性诊断部分,主要有高压高频等离子体电源、等离子体激励器、放电电压和放电电流测试系统组成。

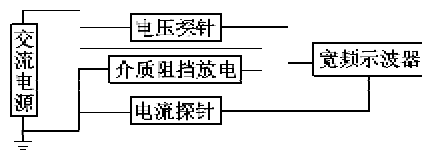


图2 实验系统原理图

实验中等离子体激励器为(2-1-2)型,表示每个电极宽度为 2 mm,两电极水平距离为 1 mm,激励电压在 8~18 kV,并规定裸露电极电压为正时称为正半周期,激励频率在 6~30 kHz。实验中选择绝缘介质有陶瓷(纯度为 99% 的氧化铝)、聚四氟乙烯(氟塑料)、有机玻璃、环氧树脂等。表 1 为其介电常数和组织结构,其中陶瓷板为晶体绝缘介质,击穿机理主要为本征击穿和热击穿,哪种击穿占主导地位 and 晶体参杂情况密切相关。聚四氟乙烯为非极性

聚合物,其击穿机理以热击穿为主。有机玻璃为玻璃态固体,环氧树脂为固态绝缘材料,它们击穿机理均以热击穿为主,4 种材料均具有较好抗击穿性能。

表 1 4 种绝缘介质的介电常数和组织结构

介质材料	介电常数	组织构成	组织类型
陶瓷	11.28	Al_2O_3	晶体
聚四氟乙烯(氟塑料)	2.20	$-(CF_2-CF_2)-$	非极性聚合物
有机玻璃	3.80	SiO_2	玻璃态
环氧树脂	3.90	—	聚合物
大气	1.01	混合气体	气态

3 实验结果分析

3.1 不同介电常数的绝缘介质对放电电流的影响

选用表 1 中 4 种不同组织结构的绝缘介质,厚度均为 1 mm,且保持放电间隙距离为 1 mm,外加激励频率 22 kHz,相同激励电压条件下分别进行放电试验。加载激励时发现,陶瓷起始电压最低,有机玻璃和环氧树脂次之,聚四氟乙烯最高。当所加电压有效值为 11 kV 时(均高于材料放电起始电压),不同材料放电存在明显差异,陶瓷放电剧烈而稳定,形成明亮、均匀放电图像,并伴有丝丝声,玻璃和环氧树脂放电也十分剧烈,可以观察到明亮跳动细丝。聚四氟乙烯放电较稳定,但没听到明显放电声,出现放电细丝密度也远少于前两者。测得 4 种绝缘材料介电常数对放电电流的影响,如图 3 所示。

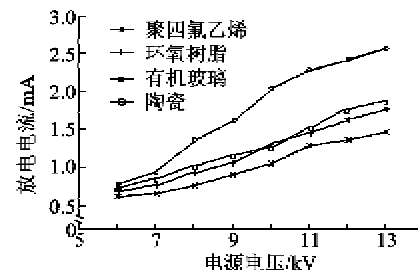


图3 4 种绝缘材料介电常数对放电电流的影响

由图 3 可知,外加电压较低时 4 种材料放电电流较接近,随着外加激励电压增加,较大介电常数介质具有较大放电电流,且放电电流增大趋势明显较介电常数较小的更迅速。

3.2 绝缘材料厚度对放电特性的影响

选用聚四氟乙烯(氟塑料)作为绝缘介质,分别采用厚 2 mm、1 mm 和 0.5 mm 制作激励器,保持其他条件不变,分别进行放电试验。测得这种绝缘材料介质厚度对放电电流的影响,如图 4 所示。

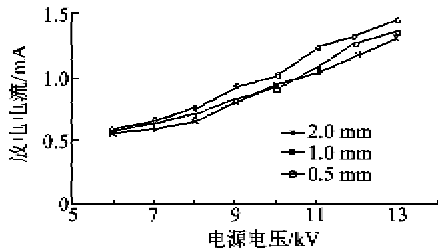


图 4 不同厚度聚四氟乙烯对放电电流影响

图 4 中,外加激励频率为 22 kHz,测得不同厚度聚四氟乙烯放电电流情况。由图可知,厚为 2 mm 的聚四氟乙烯起始放电电压最高,厚为 1 mm 的激励器次之,厚为 0.5 mm 激励器起始放电电压最低。随着外加激励电压增加,同一厚度介质有相类似的变化规律,并且厚为 0.5 mm 时放电电流变化最快。

3.3 结果分析

从 DBD 物理过程来看,绝缘介质被插入两电极间,等离子体激励器电容值可等效为两部分电容串联组成,绝缘介质形成电容 C_d ,在阻挡放电过程中,这部分电容值几乎保持常数;空气介质形成电容 C_k ,当外加激励电压大于空气临界击穿电压时,空气介质开始放电,对此等离子激励器击穿空气介质仅需 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ s,其等效电路如图 5 所示, T_1 、 T_2 为晶体二极管,当空气介质完全击穿时, T_1 、 T_2 才能反向击穿,其门限值与空气介质击穿电压和击穿介质时间内激励电压变化值之和近似。

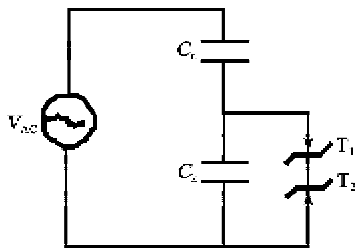


图 5 介质阻挡放电等效电路

绝缘介质形成电容

$$C_d = (\epsilon_d A_d) / l_d \quad (1)$$

式中: ϵ_d 为绝缘介质相对于真空的介电常数; A_d 为等效正对面积; l_d 为等效极间距离。

空气介质形成电容

$$C_k = (\epsilon_k A_k) / l_k \quad (2)$$

式中: ϵ_k 为绝缘介质相对于真空的介电常数; A_k 为等效正对面积; l_k 为等效极间距离。

当空气介质没有击穿之前,激励器的等效电容值为 C_d 和 C_k 串联的电容值,即 $C = (\epsilon_k \epsilon_d A_k A_d) / (\epsilon_d A_d l_k + \epsilon_k A_k l_d)$;当空气介质完全击穿后,激励器

的等效电容可用 C_d 近似,即 $C_d = (\epsilon_d A_d) / l_d$ 。

3.3.1 不同介电常数介质对放电电流的影响

由图 5 可知,激励器电容可近似等价于 C_d 及 C_k 串联。由电容分压原理可知,保持其他条件不变, $C_d \propto \epsilon_d$,而串联电容电压压降 $U_d \propto 1/C_d$,即介电常数大, C_d 压降也越小。

当外加激励电压不大时,空气介质空间未形成自持放电,因而外加激励电压大小影响不显著,随着外加激励电压持续增加,空气介质放电从非自持向自持转化,当达到自持放电时,空气介质上压降与放电电流呈指数关系变化。因此介电常数大的绝缘介质激励起气隙中场强大,放电更剧烈。

3.3.2 绝缘介质厚度对放电电流的影响

研究同一绝缘介质不同厚度对放电电流的影响时,选择聚四氟乙烯(氟塑料)作为绝缘介质是因为这样的 C_d 电容值与 C_k 电容值可比拟,且 C_d 与 C_k 比值对 C_d 参数-等效厚度值敏感。在保持其他条件不变时, $C_d \propto 1/l_d$,空气介电常数厚度分别为 2 mm、1 mm 和 0.5 mm C_d 值与 C_k 比值为 8.0~0.5,介质厚度更小的激励器由于加工不便而未采用。

当外加激励电压不大时,同介质不同厚度的激励器随着 l_d 增大 C_d 减小,而气隙等效电容 C_k 不变,故 C_k 两端电压降低,即气隙中场强变小,放电电流较弱。当外加激励电压较大且阻挡放电达到自持放电时,空气介质电容压降与放电电流呈指数关系。因此绝缘介质厚度越小,放电电流越大。但厚度减小,增大 C_d ,而放电时维持介质上电压值为常数,即增大了介质上电场强度,将降低该介质电容的耐压值。因而介质厚度不能无限变薄,具体值由实验确定。

4 结论

通过对不同介电常数绝缘介质和不同厚度聚四氟乙烯介质在相同外加激励下实验,对放电特征进行理论分析得到:

1) 对不同绝缘介质而言,保持其他条件不变时,放电强度随介电常数增大而增大。

2) 对不同厚度介质而言,保持其他条件不变时,放电强度随介质厚度减小而增大。

因此,当外加激励相同时,为了获得较强介质阻挡放电和较大流场控制力,应尽量选用介电常数较大、较薄的绝缘介质材料。

(下转第 911 页)