

The Nanosecond-Pulse Surface Dielectric Barrier Discharge Actuation and Its Applications in External Flow Control

Guangyin Zhao, Hua Liang, Yinghong Li, Jie Ma, Weizhuo Hua, Menghu Han

Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Aeronautical and Astronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi
Email: zym19860615@163.com

Received: Jun. 9th, 2016; accepted: Jun. 27th, 2016; published: Jun. 30th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The nanosecond-pulse surface dielectric barrier discharge actuation is the research hotspot in flow separation control. For the typical NS-DBD actuator used in flow control, the basic characteristics and its current research states are briefly presented in this paper. Also, this paper presents a review of the international research progress in the external flow separation control using NS DBD plasma actuation, and then previews the future development of plasma flow control from the aspects of theoretical investigation and engineering applications.

Keywords

Flow Control, External Flow, Flow Separation, Surface Dielectric Barrier Discharge, Nanosecond Pulse

表面介质阻挡纳秒脉冲放电及其外流控制研究进展

赵光银, 梁 华, 李应红, 马 杰, 化为卓, 韩孟虎

空军工程大学航空航天工程学院, 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安
Email: zym19860615@163.com

收稿日期：2016年6月9日；录用日期：2016年6月27日；发布日期：2016年6月30日

摘要

表面介质阻挡纳秒脉冲放电(nanosecond-pulse surface dielectric barrier discharge, 简称NS-DBD)等离子体气动激励是流动分离控制研究中的热点。本文介绍了流动控制中常用NS-DBD激励器的基本特性及研究现状, 综述其在机翼分离流和旋涡控制中的研究进展. 从理论研究和工程应用的角度, 对其发展进行展望。

关键词

流动控制, 外流, 流动分离, 表面介质阻挡放电, 纳秒脉冲

1. 引言

近十几年, 国内外对等离子体气动激励用于流动控制进行了广泛而深入的研究。发展至今已有多种等离子体激励用于流动控制研究, 主要有介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)激励、电弧放电激励、电晕放电激励、微波放电激励、激光电离激励、组合放电和其它新型激励。文献[1]对多种典型的等离子体气动激励的特性及其在抑制流动分离、控制附面层、控制激波与激波/附面层干扰、控制压气机与涡轮内部流动、控制管道流动和飞行控制等方面的研究进展情况进行了全面的综述。其中的 NS-DBD 激励因其突出的流动控制能力在近几年备受关注[2]-[6]。

典型的表面介质阻挡放电激励器如图 1 所示。

对于图 1 激励器, 放电产生的激励特性与其电极两端电压信号关系紧密。按施加电压上升沿的时间尺度分为, 有三种电源信号常用于激励产生: 连续/脉冲毫秒正弦波信号, 微秒/亚微秒脉冲信号, 纳秒脉冲信号(如图 2 所示)。虽同为介质阻挡放电激励, 三者的激励流场的原理有着本质的不同。目前研究普遍认为, 连续/脉冲毫秒正弦波高压带来的主要是体积力效应[7], 微秒/亚微秒量级的脉冲高压引起的激励是体积力和快速放热兼而有之[8], 纳秒脉冲高压引起的激励主要是快速放热效应[2] [5]。

2. NS DBD 激励基本特性

对于 NS-DBD 激励有几个明显的特点, 下面从诱导流动特性、产生时间要求、放电机理、特性影响因素等方面依次论述。

2.1. 诱导流动特性

对于纳秒脉冲诱导流动特性的研究主要是通过粒子图像测速(PIV, Particle Image Velocimetry)技术和纹影技术, PIV 技术主要是看诱导速度场, 纹影主要是研究诱导冲击波的结构和运动规律。

图 3 为单次 NS DBD 激励诱导流动在不同时刻的纹影图像, 可以观察到明显的冲击波结构。沿激励器展向看, 诱导冲击波结构为半圆弧形外加一个较平的“尾巴”构成, 这说明 NS-DBD 激励产生的主要热源较为集中; 沿激励器横向看, 有很多随机分布的圆弧形冲击波结构, 而不是均匀分布的, 且有的明显, 有的不明显, 这对应了丝状放电通道诱导的冲击波强度不一, 即随机分布的丝状放电能量差别较大。

PIV 对流场的测试有两方面研究: 一是单次激励诱导流场的演化; 二是重频激励下诱导流场的演化。前者研究对相机曝光时间和示踪粒子粒度要求较高。

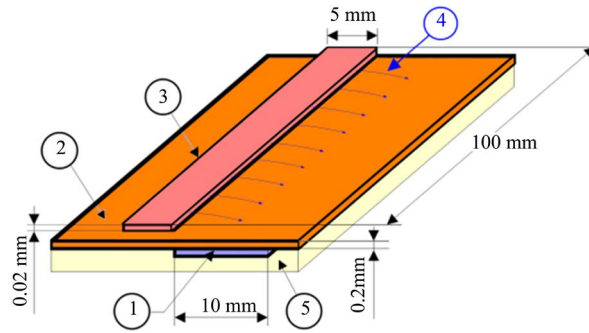


Figure 1. Schematic diagram of DBD actuator in flow control: ① grounding electrode; ② dielectric material; ③ high-voltage electrode; ④ plasma region; ⑤ insulating base

图 1. 流动控制中常用的 DBD 激励器示意图: ① 接地电极; ② 绝缘介质层; ③ 高压裸露电极; ④ 等离子体区域; ⑤ 绝缘底板

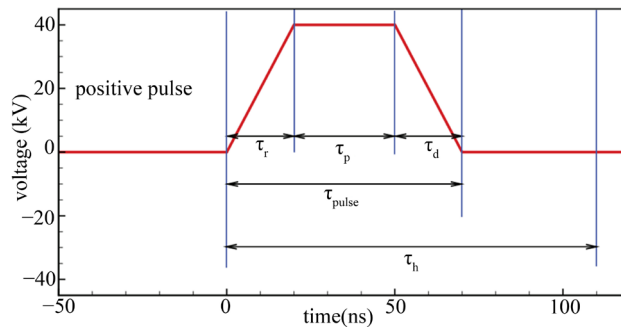


Figure 2. Typical positive nanosecond pulse voltage signal: τ_r is the rising edge, τ_d is the falling edge, τ_p is the horizontal edge, $\tau_{pulse} = \tau_r + \tau_p + \tau_d$, τ_h is the duration

图 2. 典型正极性纳秒脉冲电压信号: τ_r 上升沿, τ_d 下降沿, τ_p 水平沿, 脉宽 $\tau_{pulse} = \tau_r + \tau_p + \tau_d$, τ_h 是加热持续时间

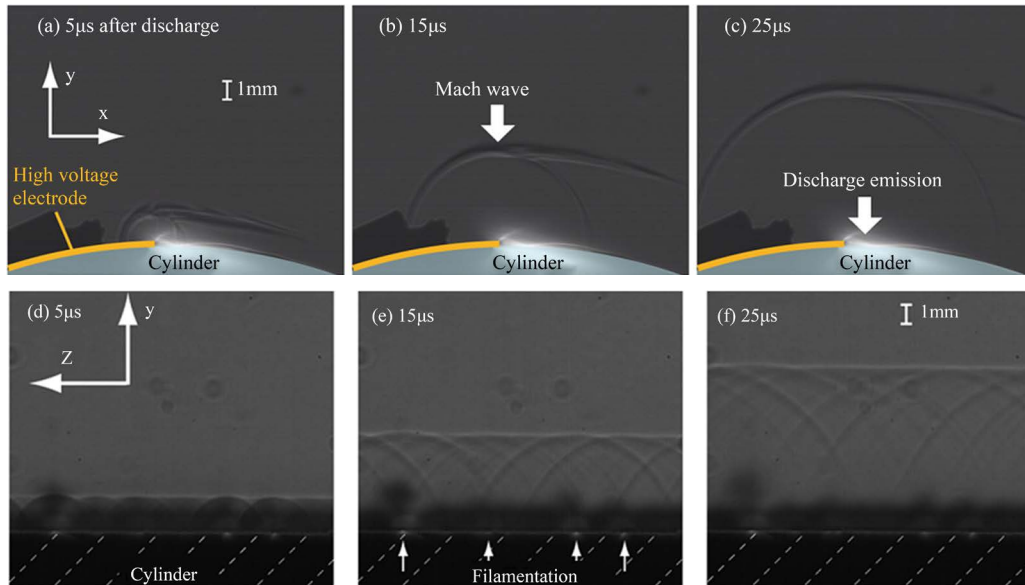


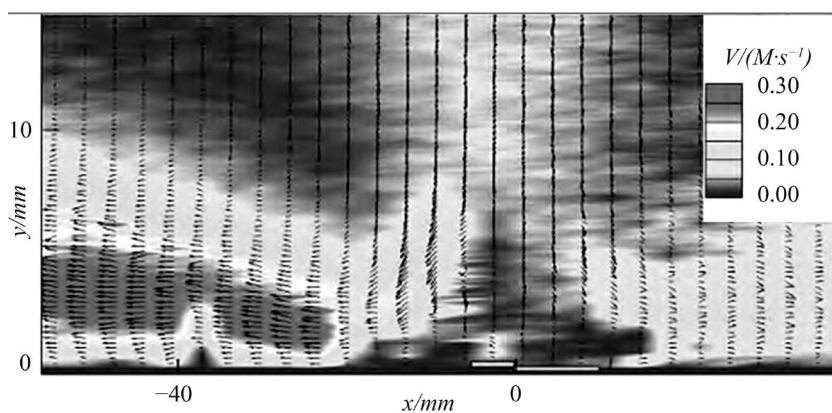
Figure 3. NS-DBD at different time after excitation along the spanwise exciter and transverse shock ripple shadow figure [9], (a)-(c) for the development, (d)-(f) for horizontal

图 3. NS-DBD 激励后不同时刻沿激励器展向和横向诱导的冲击波纹影图[9], (a)-(c)为展向, (d)-(f)为横向

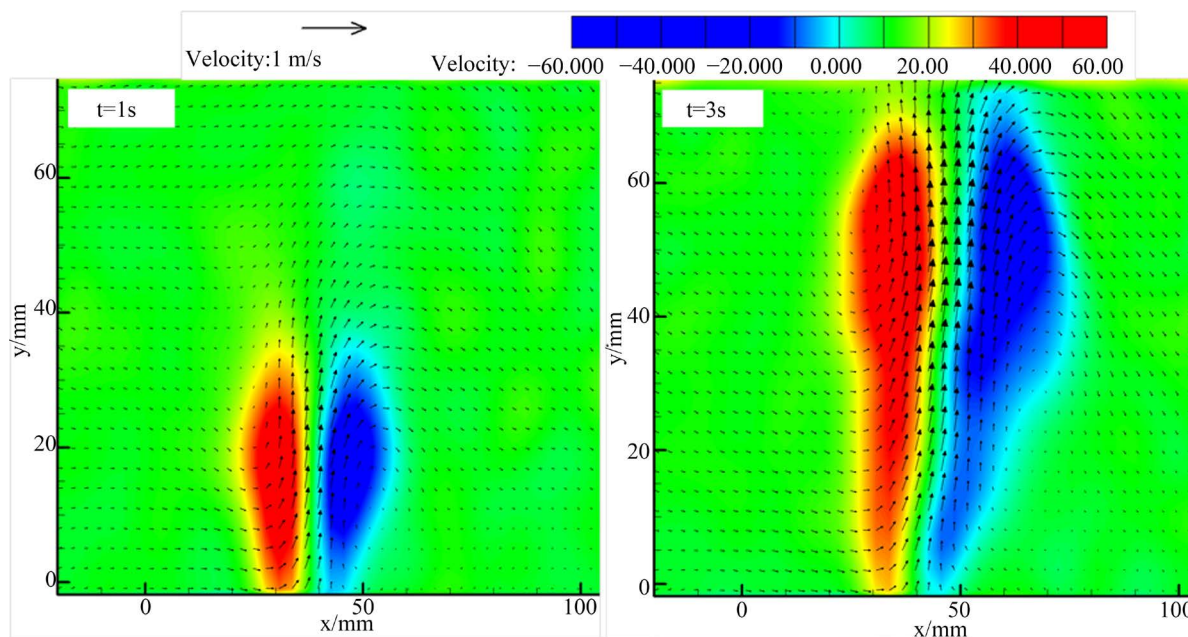
在重频激励下,文献[10]利用 PIV 对 1.712 kHz 下 NS-DBD 激励诱导速度场的测量表明 NS-DBD 激励在激励器顺电势和逆电势方向均有诱导速度,主要诱导速度场出现在激励器逆电势方向,最大诱导速度约为 0.3 m/s;然文献[11]中 1.0 kHz 下 NS-DBD 激励诱导的流场方向呈近似垂直向上分布,诱导速度不足 0.5 m/s,如图 4。二者实验中最大的不同是纳秒脉冲激励电压信号不同。

Zhao 等人采用锁相 PIV 技术[12],研究了单次 NS-DBD 激励诱导速度场的变化,捕捉了激励形成早期和晚期诱导瞬时流场,如图 5;发现早期冲击波处的诱导速度可达 35 m/s,晚期在近激励区诱导旋涡,最大速度不足 0.3 m/s。

总的来说,就目前的研究进展来看,虽然对 NS-DBD 诱导速度场的方向存在不同的结论,然而诱导流场的宏观速度或时均速度很低,不足 0.3 m/s,分析原因是由于快速的放电即便是诱导产生较大体积力,然其作用时间太短,以致流场没有足够的时间响应。



(a) 激励电压 9.8 kV, 频率 1.712 kHz [10]



(b) NS-DBD 诱导速度场在较长时间内的演化[11]

Figure 4. Induced velocity field by NS-DBD excitation

图 4. NS-DBD 激励诱导速度场

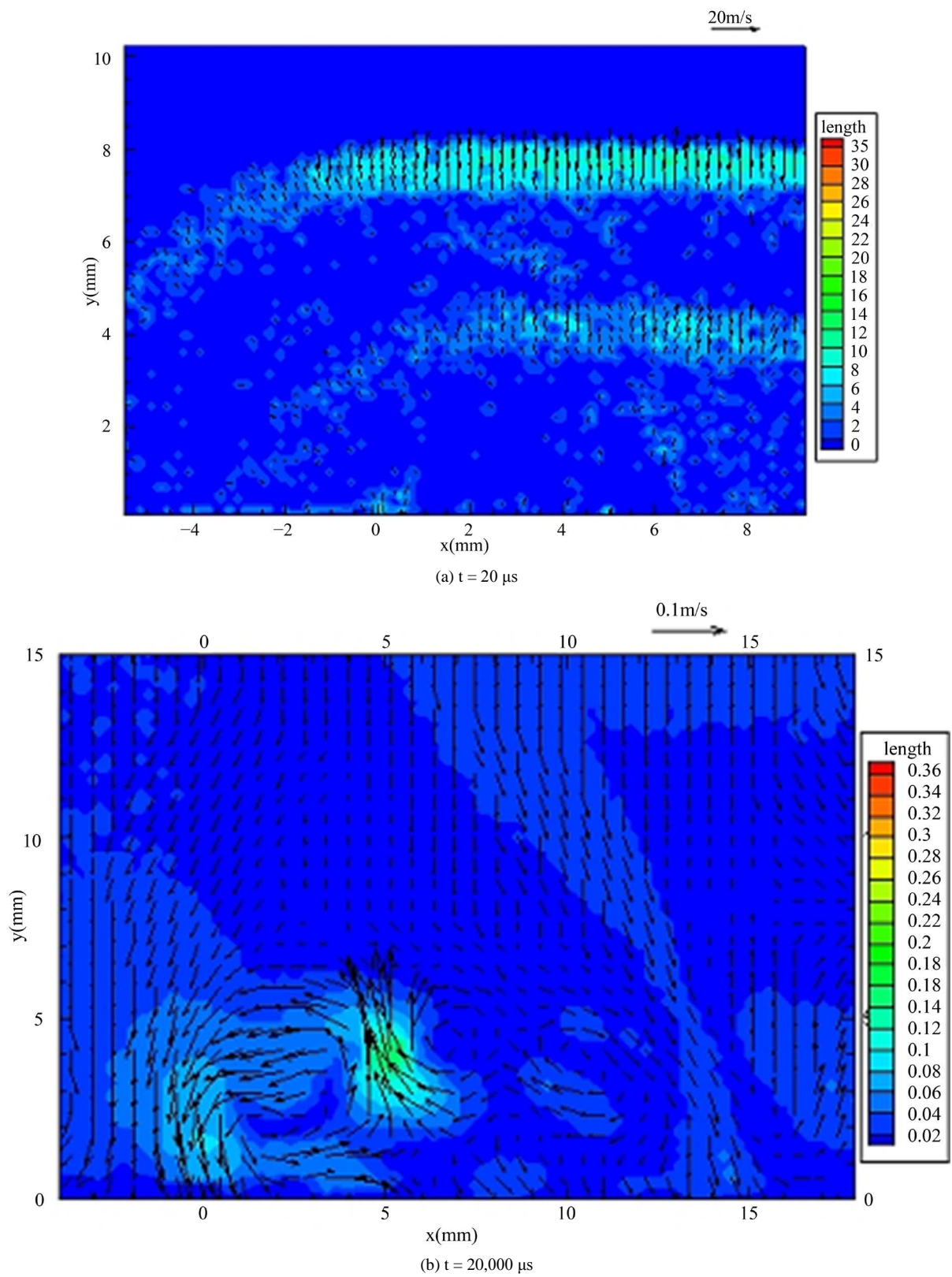


Figure 5. Induced velocity field by NS-DBD excitation with the actuation voltage of 40 kV
 图 5. 激励电压 40 kV 时不同时刻的速度场

2.2. 放热时间尺度

等离子体在放电和湮灭过程中热量释放的时间尺度在合理的范围内才能产生压缩波。文献[9]认为,快速加热的的时间尺度小于 $t_{acoustic} \sim d/a \sim 300$ ns, 就会诱导产生强压缩波, 其中 $d \sim 0.1$ mm, 是放电通道中流注直径的特征尺寸, $a \sim 300$ m/s 是音速。

文献[5]从激励诱导压力演化上支撑了激励可诱导近一个大气压的瞬间压力升, 如图 6(a), 是较强冲击波产生原因。同时也表明随着激励电压的增大压力升是增大的, 峰值对应的时刻不变, 表明激励加热的时间比较稳定约几百纳秒量级。Boeuf 等[13]对 NS-DBD 激励进行建模仿真, 考虑了电子振动激发释放热量在不同的时间尺度对最大温升的影响, 发现在 100 ns 内温升达到最高, 此后逐渐降低, 不同的 t_{VT} 对最大温升的值和时间点影响较小, 见图 6。文献[14]通过 0 维建模仿真, 预测了快速加热能量释放的时间尺度, 从 30 torr 下 2~3 μ s 到 760 torr 下 0.2~0.3 μ s。

事实上从放电能量的转化上分析, 等离子体用于气体加热能量可分为两大部分: 离子的贡献和电子的贡献[13]。离子(正离子和负离子)的贡献为 $(\vec{j}_+ + \vec{j}_-) \cdot \vec{E}$ (其中 \vec{j}_+ , \vec{j}_- 为正负离子的粒子流密度, \vec{E} 为电场), 这部分能量在瞬间释放加热气体, 伴随放电的过程。从这个角度上讲, 电流与电压信号相关, 根据脉冲放电电流 - 电压波形, 在电压信号上升沿和下降沿各存在一次较为强烈的放电, 加热能量中离子贡献部分的作用时间不会短于电压信号的脉宽。电子的贡献分为三部分: 第一部分是来自弹性和转动碰撞激发, 第二部分是电子激发, 这两部分随放电释放; 第三部分来自振动激发, 这部分能量释放的时间 t_{VT} 较长, 大于 5 μ s [15]。

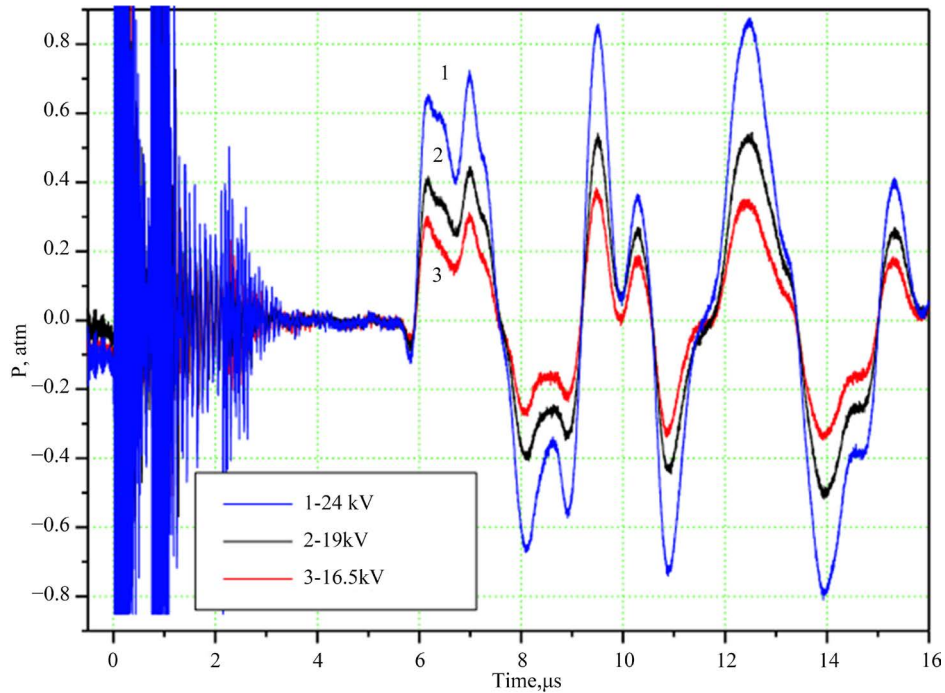
整体上, 热量注入分为焦耳热和熄灭放热, 时间尺度差别较大, 通过比较认为小于 1 μ s 的时间是合理的, 激励在 1 μ s 以后由于振动激发释放的能量可以忽略; 同时, 用于气体加热的不应短于电压信号的脉宽。

2.3. 放热机理

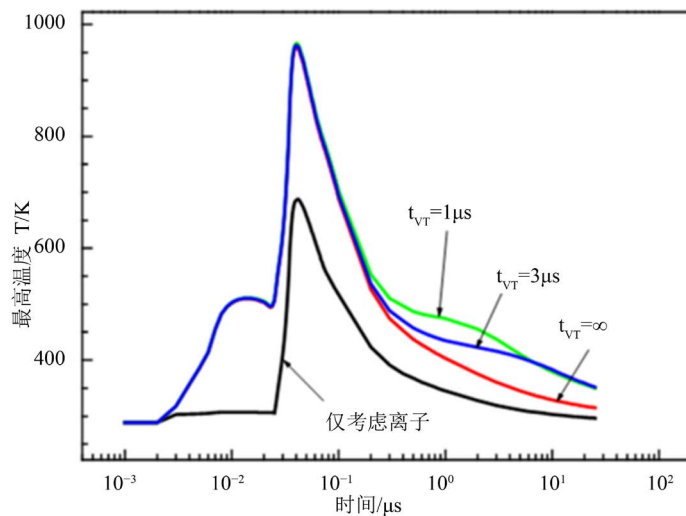
当采用交流正弦高压驱动激励器时, 表面气体的击穿电压与静态直流击穿电压相近; 而采用短脉冲高压驱动时, 快速上升沿使气体被击穿时电压明显高于其静态击穿电压, 使击穿时约化场强 E/N 明显比交流时更高, 使得电子获得过能量, 导致电子能量分布函数向高能端偏移, 从而产生更多的高能电子, 提高了电离率带来等离子体的化学活性更高, 比如, 原子/分子的激发、分解、电离等过程随着 E/N 的增大而迅速加强, 而其中对气体加热的反应, 与约化场强有着密切关系。

中科院电工所的严萍等人对大气压脉冲放电等离子体的研究现状进行了综述和展望[16], 结合国外文献[17], 从放电机理上解释热效应的产生, 认为大气环境放电产生非平衡等离子体的过程中, 加热的典型物理化学过程包括: $N_2(v)$ 的振动 - 转动弛豫反应、电子碰撞导致的氮分子和氧分子离解、氧分子碰撞导致的氮分子电子激发态的熄灭、分子离子与电子的复合。根据约化场强 (E/N , E 为电场强度, N 为粒子数密度) 的不同, 电子能量分布发生变化, 上述加热反应的发生概率也显著变化。如果折合电场强度大于 80~100 Td (1 Td = 10^{-17} V cm²), 高能电子增多, 氮分子电子激发态的熄灭、分子离子与电子的复合、分子离解导致放电初始阶段的快速加热, 并且随着折合电场强度的增大, 加热速率也相应增大。同样的解释在文献[2]中也进行了分析。

文献[18]通过实验和仿真研究了氮气 - 氧气混合物的击穿放电, 认为在约化场强 $E/N = 200\sim 400$ Td 时, 主要能量释放发生在氮氧分子的电子碰撞离解上, 以及氧分子导致的电子激发态氮分子的熄灭上, N_2 分子碰撞导致的激发态氧原子的熄灭上。文献[19]氮氧混合物被击穿放电的快速加热模型表明, 当 $E/N \leq 200$ Td, 对加热主要的贡献的反应为电子碰撞导致的 O_2 的离解反应和氧分子碰撞导致的电子激发态



(a) 激励诱导压升时间特性



(b) 不同假设下局部气体最大温升与时间的关系

Figure 6. Time characteristic of disturbance by NS-DBD actuation**图 6.** NS-DBD 激励后流场扰动的时问特性

的 $N_2(B^3\Pi_g, C^3\Pi_u, a'^1\Sigma_u^-)$ 的熄灭、氮分子碰撞导致的激发态氧原子的熄灭。当约化场强大于 400 Td, 电子碰撞导致的 N_2 分子的离解反应, 以及带电粒子的反应占主要部分。

Pancheshnyi [20]研究了快速脉冲放电中放热能量构成, 将从放电中电子能量分为三部分: 电子通常是将电场能转化为气体的粒子, 不同的加热机理主要依赖放电中电子的能量。1) 弹性碰撞和转动激发; 2) 振动激发; 3) 离解、电离, 附着等与电子能级有关的激发过程。指出在约化场强较高($E/N > 100$ Td)的情况下, 分配给转动激发和分子弹性碰撞的能量极少, 振动激发的较多; 大部分的电源功率分配给了高能级分子激发、离解、电离和复合反应。见图 7(a)。

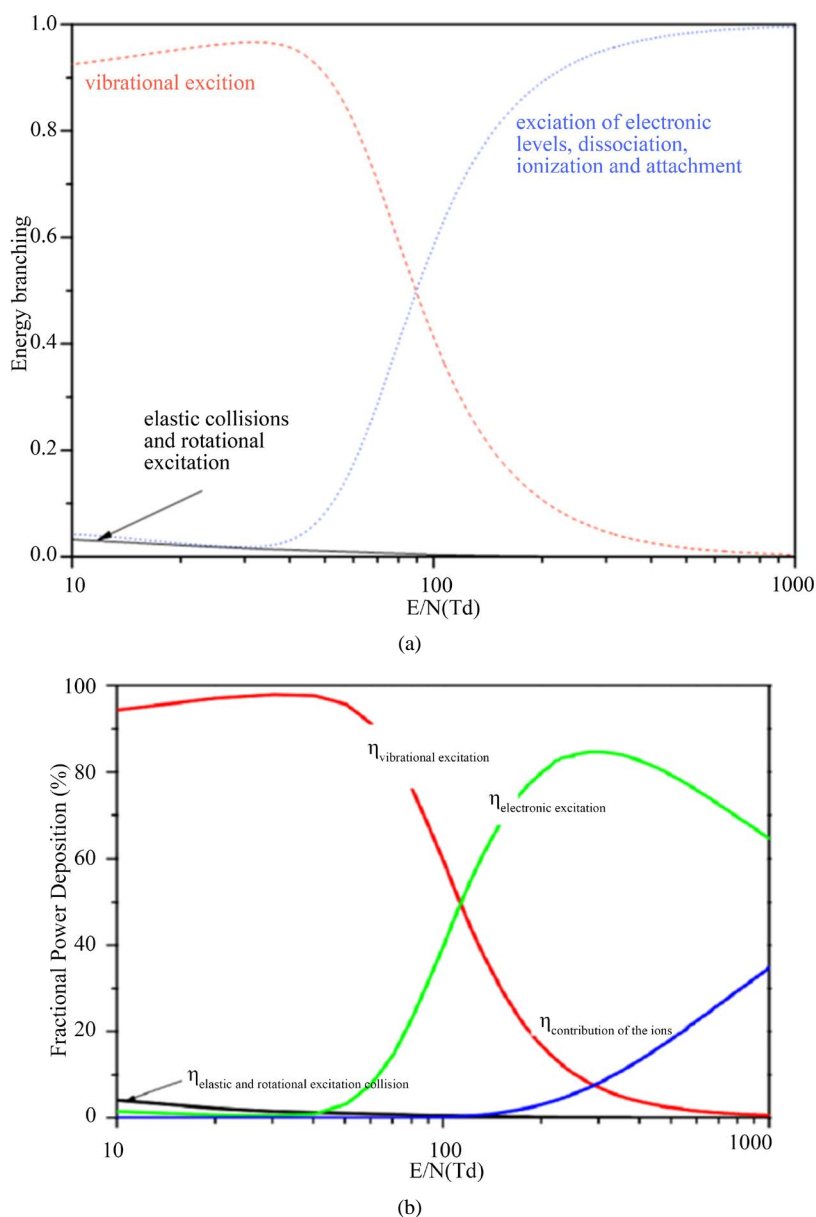


Figure 7. The heat component of different chemical reactions by NS-DBD

图 7. NS-DBD 等离子体中不同化学反应产热组分

说明弹性碰撞和转动激发，反应快，但是通常在低场强下起到重要作用。类似的文献[21]，对 NS-DBD 建模仿真时，将沉积功率分为四部分，如图 7(b)。对于 NS-DBD 中一些主要的化学反应在文献[22]中列了出来。

2.4. 激励特性影响因素

NS-DBD 激励的影响因素主要有波形、气压、来流，脉冲频率、绝缘介质层等。

① 电压极性或波形的影响

有几种典型的高压纳秒脉冲波形用于流动控制研究和特性研究。根据电压极性大致分四种：正极性脉冲，负极性脉冲，双极性脉冲，多极性脉冲。根据放电电压 - 电流信号，强烈的放电发生在电压的上

升沿和下降沿,这与毫、微秒脉冲 DBD 一致,文献[34]对 AC-DBD 和 NS-DBD 的放电特性进行了比较,文献[7]也进行了 AC-DBD、 μ s-DBD 和 NS-DBD 三者放电特性和体积力特性的比较。发现其电流却比毫、微秒脉冲放电大得多,这也就导致了更为明显的焦耳热释放流场中,诱导强烈的温升压升,产生冲击波。

它们在驱动激励器放电时产生较高的放电电流、瞬时放电功率和单脉冲功率。波形因素主要包括激励电压脉宽、幅值、下降沿和上升沿斜率,这些因素对 NS-DBD 的影响在文献[23]中通过仿真进行了研究,文献[17]就这些因素对脉冲放电的影响进行了研究综述。值得一提的是,脉冲放电的上升沿(或下降沿)是不是越窄越好,还有待研究,从流动控制的角度来说,要看上升沿(或下降沿)对应的放电注入流场的热量,这也决定是否有必要发展皮秒或飞秒脉冲 DBD 用于提升等离子体流动控制能力。因为对于定容过程的完全气体满足:

$$Q \times \eta = C_v \times m \times \Delta T \quad (1)$$

$$P = \rho \times R \times T \quad (2)$$

其中, m 为局部体积内空气质量; C_v 为空气定容比热; T 为温度, Q 为注入热量。从流场对扰动的响应时间(微秒量级)看, NS-DBD 瞬间放热可假设为局部定容的热力学过程,那么皮秒或飞秒脉冲 DBD 也可以这么假设,所以决定诱导扰动强度(压升 Δp 或温升 ΔT)的关键参数为单脉冲放电注入流场的热量,一方面是放电能量 Q ; 另一方面是放电能量转热率 η 。

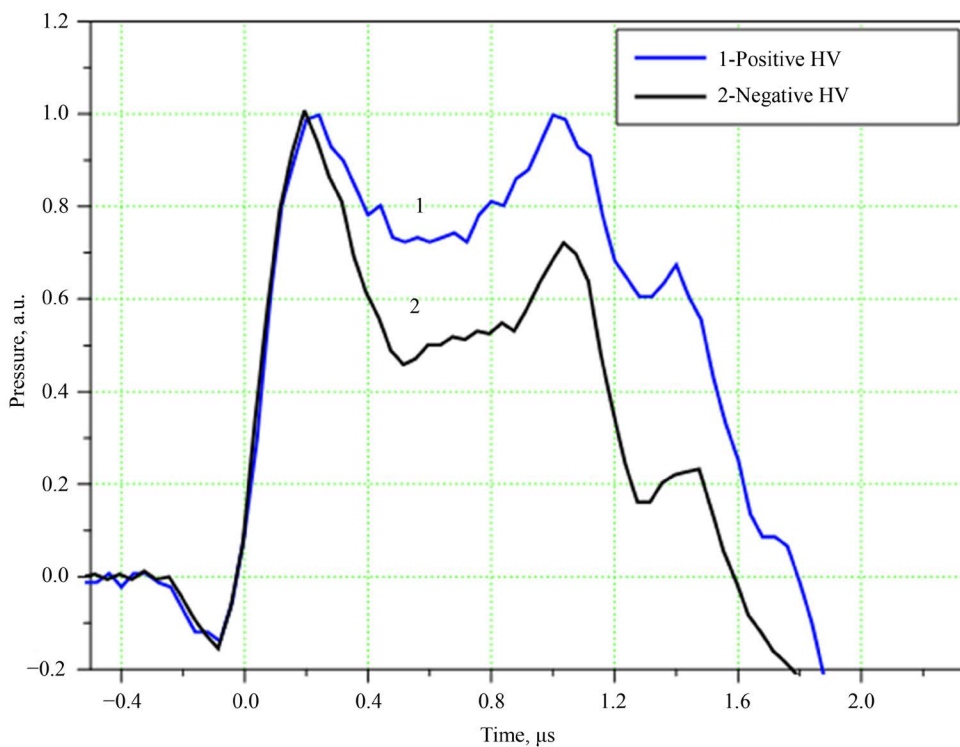
文献[24]研究大气压空气中电压极性对 NS-DBD 特性的影响,研究发现放电中的能量沉积不依赖于电压极性,正极性电压导致的放电更加均匀,电场更强。然而在文献[25] [26]发现上升沿和下降沿对放电电流影响较大,主放电电流大于二次放电电流,发生在上升沿。较宽的下降沿没有明显的二次放电。沉积能量主要依赖于电压上升沿和电源幅值,决定诱导压力波的强度,同样的电压幅值和上升沿(下降沿)下,正极性脉冲可诱导较强的压力波。通过调节脉宽(大于 500 ns)可以诱导产生双波结构,分别对应上升沿和下降沿的两次放电,而脉宽对放电能量没有明显的影响;且从诱导冲击波结构上看,上升沿和下降沿诱导的冲击波结构没有明显区别,即弧形波外加一个平直形尾巴,这或许暗示上升沿和下降沿放电过程中放热的热源分布相似。而 NS-DBD 激励上升沿热分布和下降沿热分布在朱益飞等人[27]的仿真研究中并不相同(图 8)。

通过文献[5]诱导的压力升研究中可以看出,在同样放电能量下,电压极性对压力升的影响不大(没有明显的差异),放电能量与诱导压升成近似线性关系。然而,对于电压极性和介质厚度的影响研究结果在文献[28]有所不同,对于较薄介质层激励器,负极性脉冲放电产生较多的放电能量;对于较厚介质层激励器,正极性脉冲放电产生较多的放电能量,然而对于多数测量结果,二者的差异不超过测量误差,这也说明正极性放电和负极性放电没有产生明显的放电能量的不同。然而,保持其他条件相同情况下,负极性脉冲诱导的冲击波强度稍强于正极性脉冲诱导的,作者讨论认为一方面是由于二者放电区域大小不同导致的积分差异,一方面也表明在放电能量转化热的效率上二者有不同。

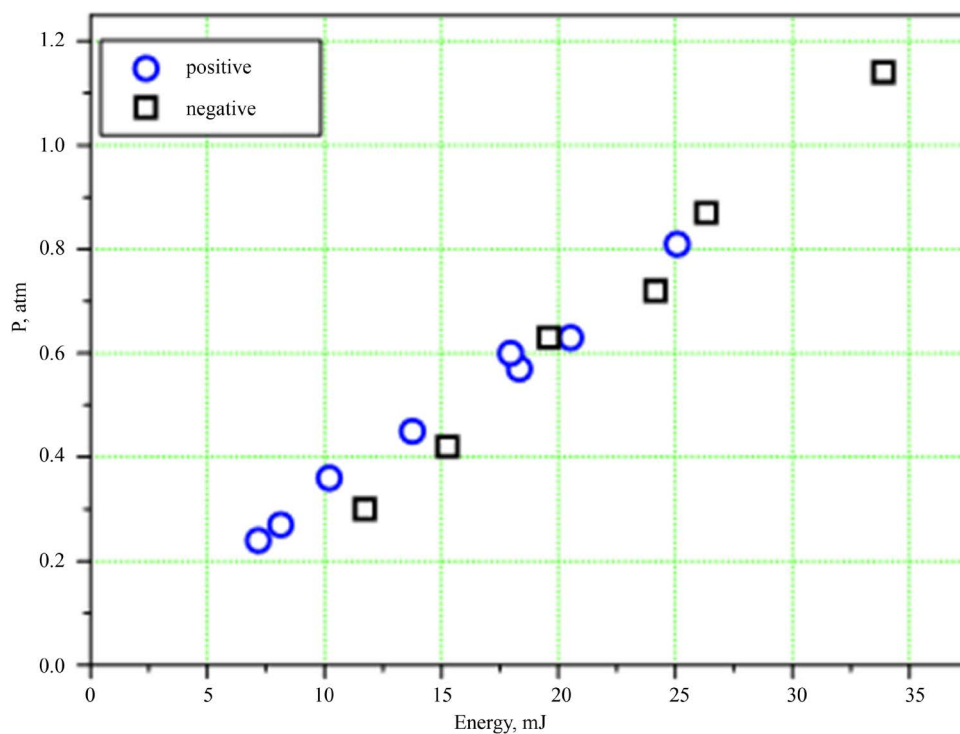
② 介质材料、厚度和电极间隙的影响

文献[29]认为用介电常数较大、且较薄的材料易于产生较为强烈的放电。文献[30]认为电极间隙对放电影响较大,当电极间隙较大时,放电变得困难,起始放电时间越长,当间隙为 0 mm 和 1 mm 时,差别不大,且放电功率高于其他间隙。文献[31]利用正极性 NS-DBD 研究了放电特性随峰值电压、脉冲频率、放电长度、介质厚度的变化。放电能量、压力波强度随介质厚度的减小而增强,虽压力波强度有所不同,但是其运动速度均是 $Ma = 1$, 即为音速波。

文献[9]研究了电压极性对放电中耦合能量的影响,得到耦合能量随电压是近似指数增长,负脉冲的电压耦合能量相对较低,然而文中并没有给出负脉冲的电压波形,其上升沿和下降沿是否与正极性脉冲一致(图 9)。



(a) The time characteristics of induced pressure rise
(a) 诱导的压升的时间演化



(b) The discharge energy versus the pressure rise
(b) 放电能量与压升的关系

Figure 8. When the same actuator driven by positive and negative high voltages
图 8. 正负极性纳秒脉冲高压驱动同一激励器

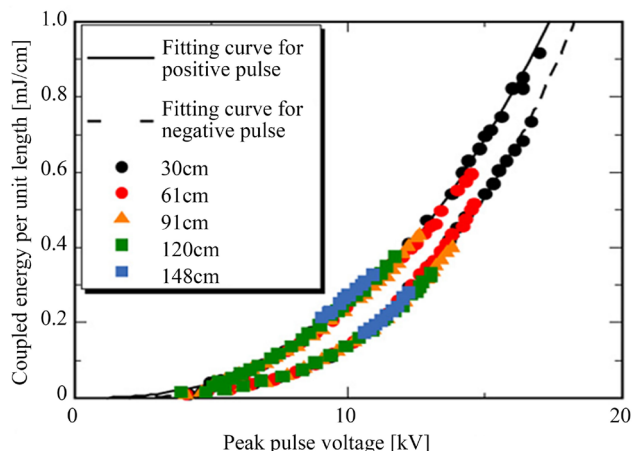


Figure 9. Discharge energy of DBD with different polarity nanosecond pulsed high voltage

图 9. 不同极性纳秒脉冲高压驱动 DBD 时放电能量

图 10 中可看到在电压的上升沿和下降沿均存在一次明显的放电，正极性和负极性的差别：正极性脉冲放电能量、峰值电流、峰值功率稍大，上升沿对应放电的峰值电流和峰值功率大于下降沿。在脉宽较大时，可观测到激励诱导双波结构，即上升沿和下降沿放电均能诱导冲击波，但是两阶段的放电的图像确有不同。文献[17]综述了上升沿和下降沿对放电的影响，认为对于脉冲上升沿和下降沿所起作用，研究结论虽还存在分歧。但是认为脉冲下降沿对二次放电仍是非常重要的。

③ 脉冲重复频率的影响

在进行流动控制的实验或仿真研究中，通常认为电源工作的脉冲频率对单次放电的影响不大，在这一前提下研究频率对流动控制效果的影响。事实上，人们对这一问题并没有形成统一的认识。文献[31]通过实验得出 NS-DBD 最大电流和实时功率随频率的变化不大，然从放电图像上看，频率增大可使丝状放电更剧烈，电压增大则是使放电趋于均匀化。文献[9]则发现放电频率对放电耦合能量有很大影响，频率越大，耦合能量越大。文章没有对这一结果做解释，这可能与电源的构造或者工作原理有关。文献[32]在 10 Torr 气压下发现随着放电频率的增大，纳秒脉冲放电逐渐变为均匀的，并解释为当频率很低时，脉冲间隔长，等离子体快速复合，初始电子密度降到非常低以至于不能够产生均匀放电。如果解释成立，那么在大气压下等离子体复合的会更快。在文献[33][34]对纳秒脉冲的放电能量研究中，发现频率对放电能量影响较小，不同的是文献[34]得出随频率增大，脉冲能量略有增大，文献[35]得出随频率增大脉冲能量略有降低。文献[9]研究中认为频率有一定的影响；与激励器有关，在一定的条件下与频率有些关系，当激励器较短时(6.8 cm)，放电能量随频率增大略有增大，其他较大长度的激励器则没有表现出明显频率依赖性。

文献[28]在 1000 Hz 频率下研究了 NS-DBD 对加热动力学和压力演化的影响，文中未给出相关数据，仅说明脉冲串模式下与单脉冲模式下诱导的压力振荡是一致的，意思是激励形成相对于 1 ms 的时间间隔足够小，使激励引起的流场参数改变可以得到恢复。

④ 流动对放电的影响

与合成射流等别的激励方式最大的不同是 DBD 放电激励受流场条件的影响明显，即与流场是相互干扰的。文献[35]在 NACA 3506 翼型上研究了来流对 NS-DBD 的影响，如图 11。通过放电图像可以看到，在来流下放电区域增大，亮度增强。置于机翼前缘的 NS-DBD 比尾缘的放电较为强烈。对应了下面放电发光辐射强度。说是来流对放电的影响，其实含有气压的因素在里面。有来流时，静压低，易于放电，

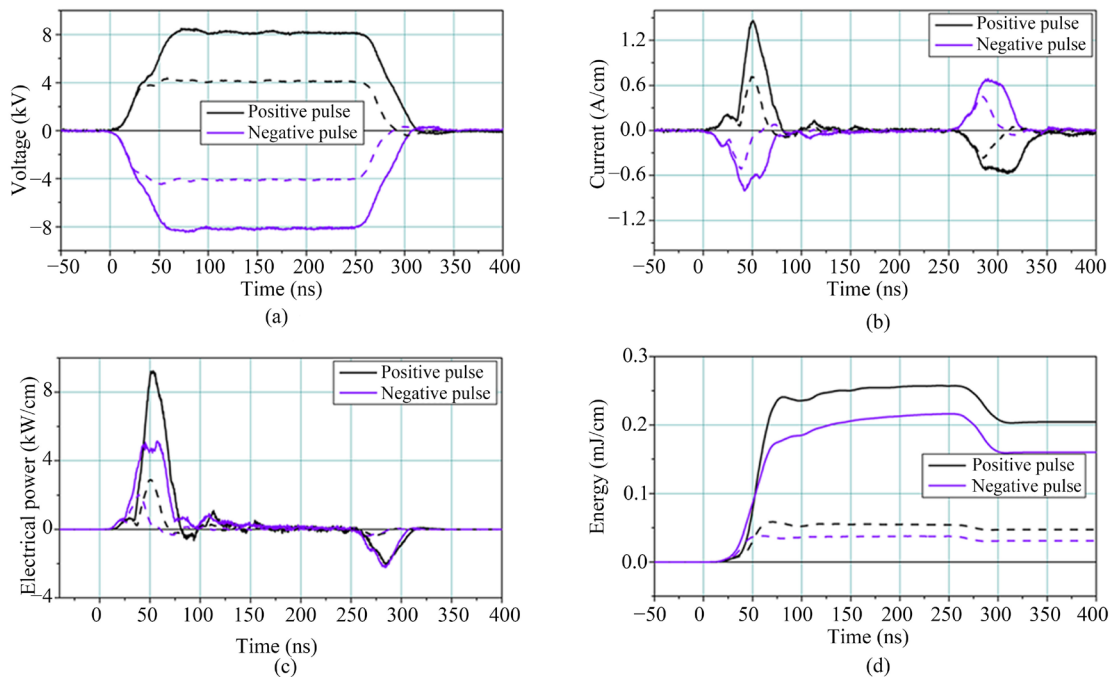


Figure 10. Discharge characteristics of S-DBD with different polarity [26]

图 10. 不同极性 NS-DBD 放电特性[26]

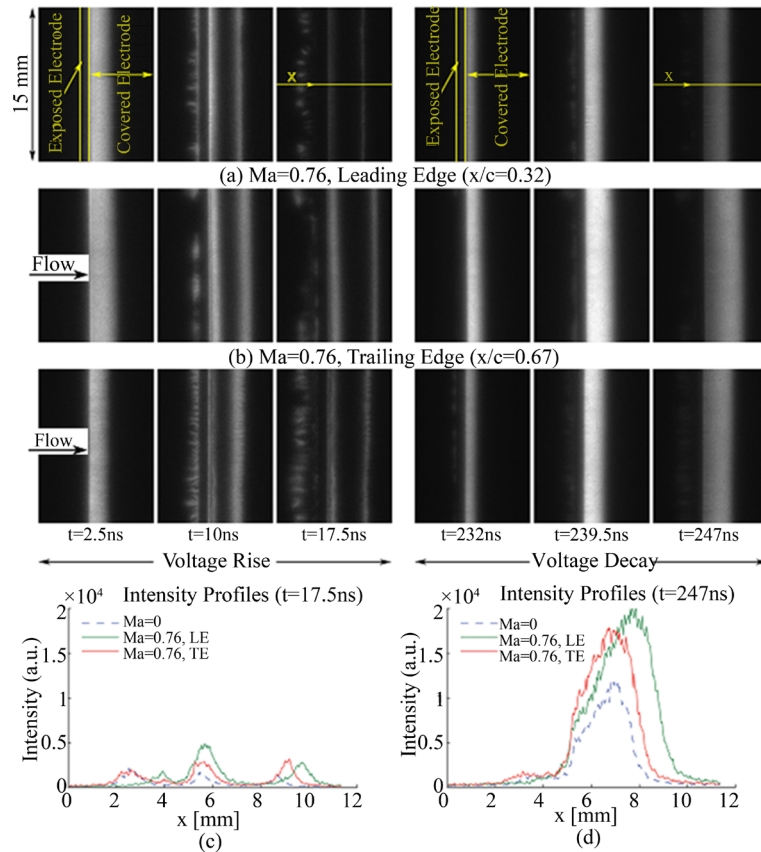


Figure 11. The discharge images and light intensity of rising and trailing edge under the incoming flows [36]

图 11. 来流下上升沿放电和下降沿对应的放电图像，发光强度[36]

也可以解释这一现象。不过最大亮度值对应的坐标位置有了一定的变化,从放电原理上可以认为是来流的影响。因为有来流速度时,带电粒子的漂移和扩散速度受到来流的影响[36]。同时,激励器寿命在无来流的条件下可以持续几个小时以上,然而,在 $Ma = 0.6$ 以上,激励器在相对较低的电压下仅能维持几分钟的寿命,只有介质层较厚的激励器才能满足跨音速条件下长时间放电的要求。

然而在控制翼型上翼面激波结构的研究中没有取得效果。

文献[37]通过仿真研究了来流对 NS-DBD 的影响,将来流速度叠加到带电粒子漂移扩散速度中,求解其运动方程。发现来流不光影响激波的结构。还影响了放电沉积能量和峰值电流。在来流的作用下,峰值电流降低了,放电沉积能量降低了。同时也研究电压幅值、水平沿等因素的对电流、温升、沉积能量影响。发现水平沿对电流幅值影响不大,当水平沿对能量沉积总量产生的影响不大,整体上水平沿宽的沉积能量稍大。对主放电电流无影响。

通过对 NS-DBD 基本特性的回顾,可以认为只要驱动电压的上升沿或者下降沿达到纳秒到几十纳秒的量级, DBD 激励都可诱导形成快速加热,引起局部温升和压升,进而诱导形成冲击波。

由于大气压放电诊断本身就很难,纳秒脉冲放电快速的时空演化过程进一步加大了对测试诊断的难度。对其研究还受到脉冲电源参数的限制,对测量设备的精度要求高,加上放电本身具有随机性,一些研究还没有形成共识,比如正极性脉冲和负极性脉冲对放电和诱导流动的影响孰强孰弱,冲击波运动速度的计算有的认为是超音速,有的认为是音速,原因是测量设备的时空分辨率相对较大,对冲击波的测量误差较大。

3. NS-DBD 激励建模仿真

对于 NS-DBD 激励特性的测试诊断,要求测量设备具有很高时空分辨率,且得到的流场参数有限。为进一步研究流场对激励响应特性,国内外学者在 NS-DBD 激励仿真上发展了有多种物理模型。

国内外对等离子体气动激励建模仿真的研究一开始主要集中在对 AC-DBD 动力效应的研究上,相继发展出了利用体积力来模拟等离子体激励器对周围流动影响的唯象学模型[37],根据等离子体激励器电路结构设计的电路模型[38],用于获取等离子体放电特性及精确边界条件的粒子群-蒙特卡罗(PIC-MCC)模型[39]、等离子体和流体方程耦合模型等[40]。

NS-DBD 激励的主要作用原理并非“体积力效应”,传统 AC-DBD 仿真模型已不再适用。近年来国内外针对 NS-DBD 激励特性的建模仿真均做了大量探索,提出了各具特色的仿真模型。这些模型根据仿真方法的不同,主要分为唯象学模型、化学反应动力学模型、流体两方程模型和流体三方方程模型等。根据研究对象的空间尺度不同,可以分为零维、一维、二维和三维模型。这些模型的研究进展在文献[1]进行了较为详细的阐述,此处不再赘述。以等离子体动力学模型耦合 N-S 方程研究流动控制效果及参数的影响规律的代价是计算资源巨大,一方面放电的计算要求时间尺度足够小,约 0.01 ns 或者更小,而计算 1000 Hz 激励下一个完整周期的计算尚需 10^8 步(不考虑变步长时);同时放电区域足够小($0.1 \sim 1 \text{ mm}$ 量级),要求网格尺寸足够小。这些模型更多的是用于对放电过程和放电特性的研究。为了便捷的将 NS-DBD 激励与 Navier-Stokes 方程耦合,节约计算耗时,一些唯象学的模型得到建立和发展。根据实验结果发展的基于唯象学的仿真或半经验模型,不关注放电的细节,但是能抓住等离子体对流场的直接效应,将激励以动量源项和能量源项的形式耦合到流体方程,便于研究激励参数(激励位置、强度、频率等)对流动控制影响的规律。

最初进行 NS-DBD 唯象学建模的是俄罗斯莫斯科物理技术学院的 D. V. Roupasov 等人根据纹影结果、放电能量等,反推温升和压升,将激励简化为两区域均匀分布的热源[5],尽管得到了与实验较为一致的冲击波结构(弧形波 + 平面形尾巴),然其两区域的简化不符合物理情况,激励器法向温升和压升不变也

不合理；根据定容假设，其激励的注入是通过局部温度和压力初始化实现的，没有考虑热量注入的时间过程。

美国俄亥俄州立大学(The Ohio State University)的 D. V. Gaitonde 等人建立了服从高斯分布的单区域 NS-DBD 激励唯象学模型，见图 12，最开始是将等离子体激励以服从高斯分布的壁面热通量形式给出[41]，后来在此基础上发展了不同等离子体高度的空间单区域的热源分布[42]。单区域非均匀热源分布模型比以往模型较为合理，然其未考虑放电产生热量沿激励器法向变化，等离子体区域高度的确定存在猜测；这样会导致在注入热量相同，不同等离子体高度的激励诱导不同的最大温升和压升；仿真得到的诱导压缩波结构与实验纹影结果也存在一定的差异。

国内西北工业大学的陈真利等人，根据国外文献相关 NS-DBD 放电特性的研究，将表征激励的热源假设与放电发射光谱强度一致，拟合导出了另一种不同于高斯分布的激励唯象学模型[43]，同时也综合考虑了激励电压、脉冲频率、电压极性对注入能量的影响，得到了与实验结果较为一致的冲击波特性。该模型适用于研究物体绕流分离控制的参数影响规律和分析控制机理。

空军工程大学的赵光银等人在此基础上考虑了气压、激励器尺寸、放电能量转热率等因素，发展了类似的仿真模型[44]，并分析了激励诱导流场的涡量特性。张海灯等根据文献[45]导出类似椭圆分布的 NS-DBD 热源模型，并用于叶栅流动分离控制的仿真[46]，然其诱导激波结构与实验有较大差异。

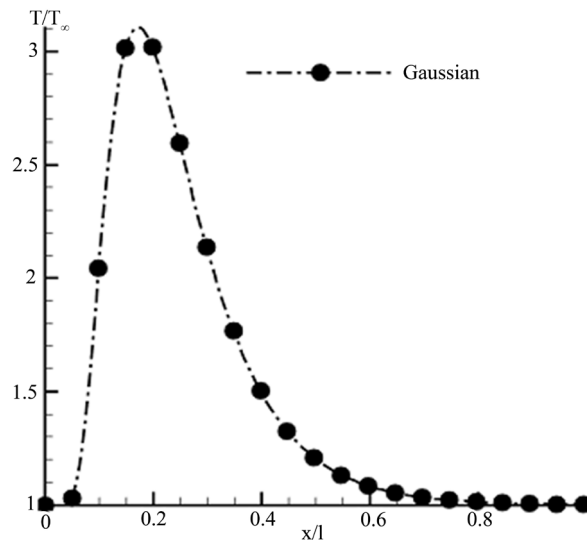
新加坡国立大学的 J. G. Zheng 等人研究 NS-DBD 在静止大气环境下的仿真(表 1) [47]，基于一维、自相似、局部电离动力学模型[48]用来预测表征 NS-DBD 热源的关键参数，进而将热源耦合到可压 Navier-Stokes 方程。在激波结构和位置上，耦合方法计算结果与实验结果一致；给出了气体加热、激波形成演化的综合分析。

综合来看，合理的激励唯象学模型有一个共性，见图 13，一是热源或温升分布上。在热源横向分布上，最高温升处向两侧是以近似指数数衰减的，向低压电极一侧衰减慢 $F_{slow}(x)$ ，向高压电极一侧衰减快 $F_{fast}(x)$ ，最高温升处一般在高低压电极附近；在纵向分布上，一般是认为近似指数分布或者抛物线分布 $F_{normal}(y)$ ；只要把握住了这个共性，在合适的注入能量和注入时间下，会获得与实验一致的激波结构和冲击波速度。

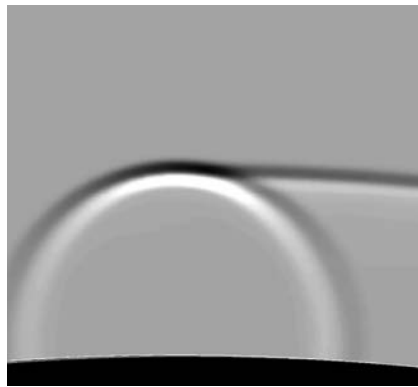
4. 外流控制

从外加能量对分离流场的作用方式看，等离子体激励可分为间接控制和直接控制。以间接控制为主的等离子体激励用于外流控制研究多是针对绕流分离流和旋涡流开展，主要是利用等离子体激励在剪切层敏感区产生扰动致使主流与分离流、旋涡流相互作用，激发剪切层不稳定性，从而改变流场结构，进而改变物体所受气动力，起到“四两拨千斤”的控制目的。围绕着分离和旋涡，外流上的研究主要有翼型大迎角绕流分离控制[2]、后缘襟翼分离控制[34]、三角翼前缘涡控制[35]、激波诱导边界层分离控制[93]、翼尖涡控制[50]-[52]、降噪[53] [54]、圆柱流动分离[55]、细长旋成体前体分离涡控制[56] [57]等，间接控制需要等离子体激励作用于合适的位置，一般是强剪切层产生的分离点附近。等离子体激励直接控制流动则是直接靠等离子体产生的力或能量进行流动控制，例如靠激励诱导冲击波控制激波强度进行减阻[3] [6]、靠等离子体诱导体积力产生虚拟型面进行环量控制[58] [59]、等离子体推进[60]等，直接控制则需要等离子体产生较强的冲击波或者电磁力，以至于能直接改变流场结构。

在翼型/机翼等离子体流动控制研究中，随着研究的深入，逐步认识到脉冲等离子体激励方式比定常等离子体激励方式的分离控制效果好；非定常等离子体激励中，纳秒脉冲等离子体激励比毫、微秒脉冲等离子体激励控制效果好。就毫、微秒脉冲等离子体激励，文献[1] [11] [61]对国内外研究现状进行了综述，总的来说，对其参数影响规律有了一定的认识[62] [63]，对其流动分离控制机理认识更深入[64]-[68]，



(a) 高斯分布的热源



(b) 仿真得到的诱导压缩波

Figure 12. Heat source of Gaussian distribution with the corresponding induced shock wave [43]

图 12. Gaussian 形式的热源分布和对应的诱导压缩波[43]

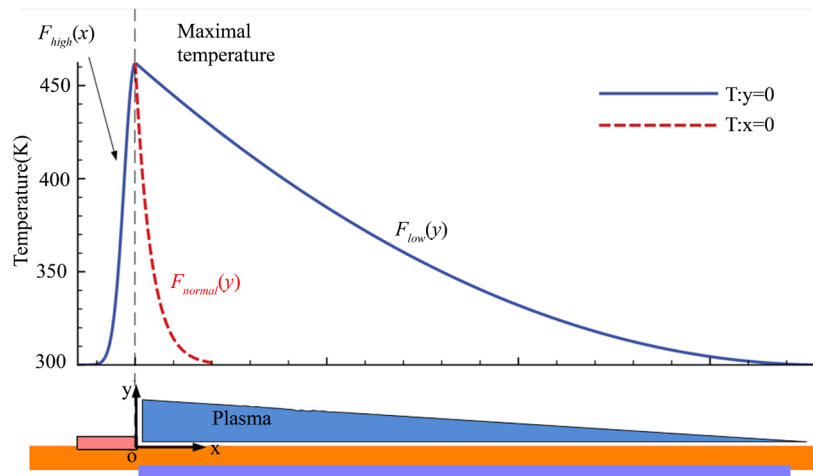


Figure 13. Schematic diagram of heat resource distribution

图 13. 热源分布示意图

Table 1. Current research situation of phenomenological modeling and simulation of NS-DBD
表 1. 目前 NS-DBD 激励唯象学建模仿真研究情况

| 研究者 | 单位 | 加热效率 | 热分布 | 加热时间 | 湍流模型 |
|--------------------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------|
| 梁华[2] | 空军工程大学 | 10% | $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ | 定容过程 | $k-\varepsilon$ |
| G. Correale [49] | 代尔夫特大学 | >50% | $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ | 定容过程 | 层流模型 |
| D. V. Roupasov [5] | 莫斯科物理技术学院 | -- | $0.4 \times (0.4 + 5) \text{ mm}^2$ | 定容过程 | -- |
| D. V. Gaitonde [42] [43] | 俄亥俄州立大学 | 0.659 mJ/cm | 高斯分布热壁面、单区域热源 | 50 ns | LES |
| Nicholas J. Bisek [46] | 美国空军实验室 | 30% | 椭圆分布单区域热源 (二维和三维) | 800 ns | LeMANS code |
| 张海灯 | 空军工程大学 | 最大热功率密度 10^{13} W/m^3 | 椭圆分布单区域热源 | 50 ns | SST |
| 陈真利 | 西北工业大学 | $35\% \pm 5\%$ | 光强分布单区域热源 | 50 ns | URANS |
| 赵光银 | 空军工程大学 | $f(E/N)$ | 光强分布单区域热源 | 100 ns、50 ns | SST $k-w$ |
| J. G. Zheng | 新加坡国立大学 | 35% | 一维等离子体模型预测 | 350 ns | -- |

激励器的诱导流动速度通过布局优化可达 10.5 m/s [68], 在 0.4 马赫可取得一定的分离控制效果[69], 在飞行实验上也开始尝试, 并取得了一定的姿态控制效果[70]-[72], 在三角翼上对前缘涡控制也有一定效果[73]-[79]。国内的中国空气动力研究与发展中心也验证了 AC-DBD 在 100 m/s 下机翼分离控制效果[80]。以下仅介绍 NS-DBD 等离子体激励的外流控制的研究现状。

4.1. 翼型分离控制实验

2008 年俄罗斯莫斯科物理技术学院的 Roupasov 在文献[28]中将 NS-DBD 用于翼型绕流分离的控制, 在低速、起飞着陆速度、巡航速度下, 研究了 NS-DBD 用于边界层分离控制的研究, 实现了 0.05~0.85 Ma (雷诺数 $Re = 1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6$) 高亚音速以下分离和噪音的有效控制, 超出 AC-DBD 所达到的控制能力, 从此引起了国际上对 NS-DBD 外流控制的广泛研究和关注。

荷兰代尔夫特理工大学的 G. Correale 等人在多种翼型上(NACA0015, NLF-MOD22A, NACA63618)进行了 NS-DBD 前缘分离控制实验, 实验速度达到 80 m/s。研究得到在来流速度 40 m/s, 纳秒脉冲可将翼型最大升力系数可提高 20%, 临界迎角提高 5 到 7 度, 最佳的激励频率为 $F^+ = 1$, 最佳的激励位置在分离点附近[95] [96]。

2010 年美国俄亥俄州立大学气体动力学与湍流实验室的 Jesse Little 在 $Re = 0.75 \times 10^6$ (45 m/s) 和 $Re = 1 \times 10^6$ (62 m/s) 来流条件下验证了 NS-DBD 在 EET 超临界翼型大迎角分离控制效果[81]。系统研究了激励参数对流动控制效果的影响, 在较广的激励频率内均可取得明显的控制效果。锁相 PIV 实验表明前缘 NS-DBD 可充当 active trip, 在前缘产生高强度的扰动操纵流动的不稳定性, 在过失速状态下诱导产生相干展向涡结构, 促进主流和分离流之间的掺混, 从而抑制分离。比较了 AC-DBD 和 NS-DBD 的前缘分离流动控制效果, 实验验证了 NS-DBD 的效果优于 AC-DBD; 且与传统控制中的偏置前缘装置相比, NS-DBD 取得了优势效果。

2011 年美国俄亥俄州立大学的 C.Rethmel 等人[4]在起飞和着陆相对应马赫数和雷诺数验证了 NS-DBD 抑制 NACA0015 翼型前缘分离控制的能力, 雷诺数达到 1.15×10^6 , 马赫数 0.26, 有效推迟翼型绕流失速攻角。研究发现在低雷诺数、低迎角下($Re = 0.25 \times 10^6$, $\alpha = 14^\circ$)控制效果对激励频率的依赖不

大, 激励有转捩带的效果; 在较高雷诺数、大迎角下($Re = 1.15 \times 10^6$, $\alpha = 18^\circ$), 存在一个最佳的激励频率, $F^+ \approx 2$, 激励在分离剪切层处诱导大尺度涡, 激发流体自然不稳定性。尝试用激励器结合热线风速仪, 用于闭环分离控制。设计了两种闭环控制方案——低雷诺数、低迎角对应的转捩控制方案和高雷诺数、大迎角对应的涡控制方案。

亚利桑那州立大学 Jesse Little 等人在雷诺数 2.4×10^5 (15 m/s) 和 7.5×10^5 (45 m/s) 下, 进行了 AC-DBD 等离子体控制带偏折襟翼的高升力翼型湍流边界层分离的研究, 增大雷诺数和襟翼偏转角, 控制效果减弱[82] [83]。然而在 NS-DBD 却没有取得后缘襟翼分离控制的明显效果。2011 年在 $Re = 1 \times 10^6$ (62 m/s) 验证了 NS-DBD 前缘分离控制能力, 研究认为在较高雷诺数下, 时速之前, 激励充当 active trip 的作用, 在过失速是激励诱导产生展向相干涡结构, 这些相干涡结构可带走主流动量使得分离流附体, 在所测激励频率下都有相干涡结构出现, 在 $F^+ = 4\sim 6$ 时控制效果最明显[84]。

2011~2012 年, 俄罗斯科学院高温研究所(Joint Institute of High Temperature RAS)的 Kazansky 等人研究了高频激励控制 NACA 23012 翼型分离的研究[85] [86], 采用的是经过调制($10\sim 10^4$ Hz)后的高频(350 kHz)电压驱动激励器, $Ma\sim 0.3$, $Re\sim 3 \times 10^5$ 时机翼阻力降低达 40%, 分离点得到推迟, 然而 $Re > 4 \times 10^5$ 时, 控制效果大幅下降。这或许和层流分离和湍流分离有关, 层流分离时激励充当转捩带作用, 湍流分离时激励效果下降。值得注意的是, 电源信号对应的周期是微秒量级。

日本庆应义塾大学(Keio University)的 K.Kato 等人将 NS-DBD 用于 Gö 387 翼型分离的实验研究[87]。来流条件 $Re = 1.6 \times 10^5$ 和 2.3×10^5 , (26 m/s 和 37 m/s), 虽来流速度和雷诺数不高, 然其系统的研究了激励参数的影响, 对揭示流动控制机理有重要意义。为避免电磁干扰, 采用传统的水排测压进而积分导出升力系数, 研究了电压和频率对升力系数的影响。结果表明, NS-DBD 翼型增升存在两种模式, 依赖于攻角: 模式 1 是近失速攻角下流体定常分离, 激励频率的影响较小; 模式 2 是过失速攻角下非定常分离, 存在一个最佳的频率。激励效果的延迟作用也得到发现, 即激励关闭之后, 升力仍可维持一段时间。在过失速迎角下, 流动控制效果强烈的依赖于激励频率, 与流体剪切层和尾迹的不稳定性有关, 通过热线测量的谱分析得到的。不过根据其测得的最佳激励频率和流场不稳定性频率主频对应, 均对应无量纲频率为 $F^+ = 0.5$ 。

圣母大学和波音公司进行了 $Ma = 0.4$ 和 $Re = 2.3 \times 10^6$ 来流下的 NASA EET 翼型前缘分离的控制[88], 发现 AC-DBD 和 NS-DBD 激励均可提高最大升力系数和推迟失速, 且 NS-DBD 并没有表现出比 AC-DBD 好的控制效果。

在国内, 中国空气动力研究与发展中心、中科院工程热物理研究所、北京大学、清华大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、空军工程大学、解放军装备学院、中航工业气动院、中科院电工所、南京理工大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学、厦门大学、大连海事大学等单位开展了大量等离子体流动控制研究工作, 航空工业部门也开始参与有关研究工作。其中多用 AC-DBD 为激励方式, NS-DBD 用于流动控制的实验研究还不多。

空军工程大学率先开展了 NS-DBD 等离子体用于翼型大迎角绕流分离控制的研究, 李应红教授等受到激光冲击强化原理启发[2] [89], 提出“等离子体冲击流动控制”原理[1], 即采用与高功率激光脉冲宽度同一量级的短脉冲气体放电, 产生温度升和压力升, 将能量集中在瞬间释放, 提高激励强度, 在流场中产生强脉冲扰动甚至是冲击波扰动, 诱导旋涡、促进附面层与主流掺混的能力。其内涵有三个方面: 一是“冲击激励”, 即利用短时间尺度气体放电, 提高放电的峰值功率, 产生强的温度升和压力升, 形成强脉冲扰动甚至是冲击波扰动; 二是“涡流控制”, 冲击扰动在传播的过程中产生旋涡, 通过涡流动控制, 促进附面层与主流的能量掺混, 借助主流的能量提高近壁面流动的动能, 进而抑制流动分离; 三是“频率耦合”, 使等离子体气动激励的脉冲频率接近流场的最佳响应频率, 从非定常、非线性的角度,

实现等离子体气动激励和流场耦合,既能提升等离子体流动控制的效果,又可以降低功耗。风洞实验表明,纳秒脉冲激励可以在高亚音速流动中有效抑制翼型/机翼流动分离,激励电压幅值、频率和位置是主导流动控制效果的主要因素。在 0.4 马赫来流条件下,其在超临界翼型上和后掠飞翼布局上也有较好的控制效果[90],测力实验表明,NS-DBD 可使 RAE2822 翼型和飞翼布局升力系数提高,失速攻角推迟。

总的来说,NS-DBD 在流动控制能力上得到验证,对其流动控制规律有了较深的认识,对最佳频率的有一定认识,还不统一。相比国外,国内开展 NS-DBD 流动控制实验研究的单位偏少,国内开展 NS-DBD 激励流动控制应用研究的单位较少,较多的集中于其激励特性的研究[10] [31]和一些仿真研究[3] [91]。

4.2. 翼型分离控制仿真

在外流控制上,实验设备时空分辨率的限制,所测的变量有限,将 NS-DBD 激励模型用于外流控制的建模仿真研究有助于补充实验测量结果,揭示潜在的控制机理。其中有两个需要关注的问题:一是 NS-DBD 激励诱导激波结构的准确模拟;二是绕流流场的准确模拟。流场的准确模拟主要是运用高精度的求解格式和先进的湍流模型。这两方面均要求迭代求解时间步长足够小,纳秒量级;网格要足够细密,壁面第一层网格尺度满足 $y^+ < 1$ 等要求。所以目前的仿真多采用唯象学模型研究流动控制规律和机理,以降低对计算平台的要求;尽管如此,对计算机要求依然较高,目前的仿真多研究二维或准二维翼型绕流,三维流场绕流的计算研究并不多。

梁华等人在 NACA0015 翼型大迎角绕流研究中,将等离子体冲击气动激励简化为一个 $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ 的高压(5 atm)、高温(1488 K)点源,以一定的重复频率施加于流场,进行冲击气动激励抑制流动分离的数值仿真研究[2]。从能力上验证了 200 m/s 下的控制效果,分析了 NS-DBD 激励的机理及提高其抑制流动分离能力的原理,然其仿真未给出激励与流场的作用过程,对控制机理的支撑不足。

文献[95] [96]在翼型上将 NS-DBD 激励简化为 $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ 的热源,发现翼型前缘层流分离时,激励可以诱导涡结构的产生;为进一步明确激励机理,进行了在后台阶绕流的激励控制,发现台阶上表面的激励可以增大剪切层的不稳定性,然而文章将 NS-DBD 激励简化为均匀加热区域不合理,不适用于揭示流动控制的机理,所用的层流模型也不适用于揭示流动控制机理。

陈真利等进行了跨声速鼓包上激波诱导分离的控制仿真研究[92],将表征 NS-DBD 热效应半经验唯象学模型耦合到非定常 RANS 流体方程,引入二维涡量输运方程将热源和涡量产生联系起来。两种位置分别位于上游壁面无分离位置和下游壁面诱导分离处。NS-DBD 激励在上游壁面没有诱导明显的涡结构,在下游壁面每次激励诱导展向涡;结果表明,NS-DBD 可以用来跨音速激波诱导分离的控制。主要的控制机理是激励时的斜压效应带来涡量源项。为优化流动控制,研究了激励位置、频率、沉积能量的影响。

文献[6]建立了唯象学的仿真模型,将 NS-DBD 激励表征为椭圆形面内的热源,用于控制圆柱前脱体激波,同时也提出改善基于能量注入的唯象学模型的必要性。文献[93]用两区域的热源分布表征 NS-DBD 激励,研究了受 NS-DBD 激励控制的小幅振荡的 NACA 0015 模型在过失速下空气动力阻尼特性,仿真表明 NS-DBD 可以增加或降低气动阻尼,但是 $8.3 \mu\text{s}$ 的热量持续时间缺乏依据。文献[43]用高斯分布的热源表征 NS-DBD 进行了控制翼型失速的大涡模拟,假设热源服从高斯分布,激励效应通过壁面能量和体积能量等不同的方法加入流场,合理的热分布可以重现激波结构和速度。在无量纲激励频率 $F^+ = 2$ 时,发现施加激励后 5 个特征时间时出现了流动附体,在取消激励后 5 个特征时间时出现了流动分离;仿真得出布置在前缘的激励器诱导产生附体的湍流边界层。文献[44]假设等离子体发射光谱与能量分布呈正比导出热源分布,得到了更为合理的压缩波结构;并将该模型用于 NACA0015 翼型大迎角流动分离控制,对仿真结果进行了深入的分析[94],对揭示 NS-DBD 激励的作用机理有借鉴意义(表 2)。

Table 2. Current research situation of modeling and simulation of external flow control by NS-DBD
表 2. 目前 NS-DBD 用于外流控制的仿真研究情况

| 绕流翼型 | 来流速度 | 雷诺数或尺寸 | 网格数量 | 湍流模型 | 时间步长 |
|----------------------|-----------|---------------------------------|--|---------------------------|---------------------|
| NACA 0015 [2] | 200 m/s | 弦长 0.12 m | 18 万 | k- ϵ | — |
| NACA 0015 [44] | 90 m/s | $Re = 1.15 \times 10^6$ | 845×245 | RSM | 变时间步长 |
| NACA 0015 [53] | 15 m/s | $Re = 100,000$ | 429×206 ; $577 \times 217 \times 26$ | URANS 和 LES | 变时间步长 |
| NACA 0015 [45] | 0.1 Ma | $Re = 0.21 \times 10^6$ | 15 万 | SST $k-w$ | — |
| NACA63-618 [53] [95] | <30 m/s | — | — | 层流模型 | — |
| NACA 0015 [43] | 15 m/s | $Re = 100,000$ | $643 \times 395 \times 75$ | LES | 6.7×10^7 s |
| NACA 0015 [94] | 15.33 m/s | $Re = 100,000$ | 251,000 | URANS | $\approx 10^6$ s |
| Delery bump [93] | 0.6125 Ma | $Re = 5.86 \times 10^6$ | 668×182 | SSG Reynolds stress model | 变步长 |
| 圆柱[6] | 5 Ma | $Re = 1.5 \sim 2.5 \times 10^6$ | 200×200 | LeMANS code | ≤ 1 ns |

4.3. 三角翼涡控制

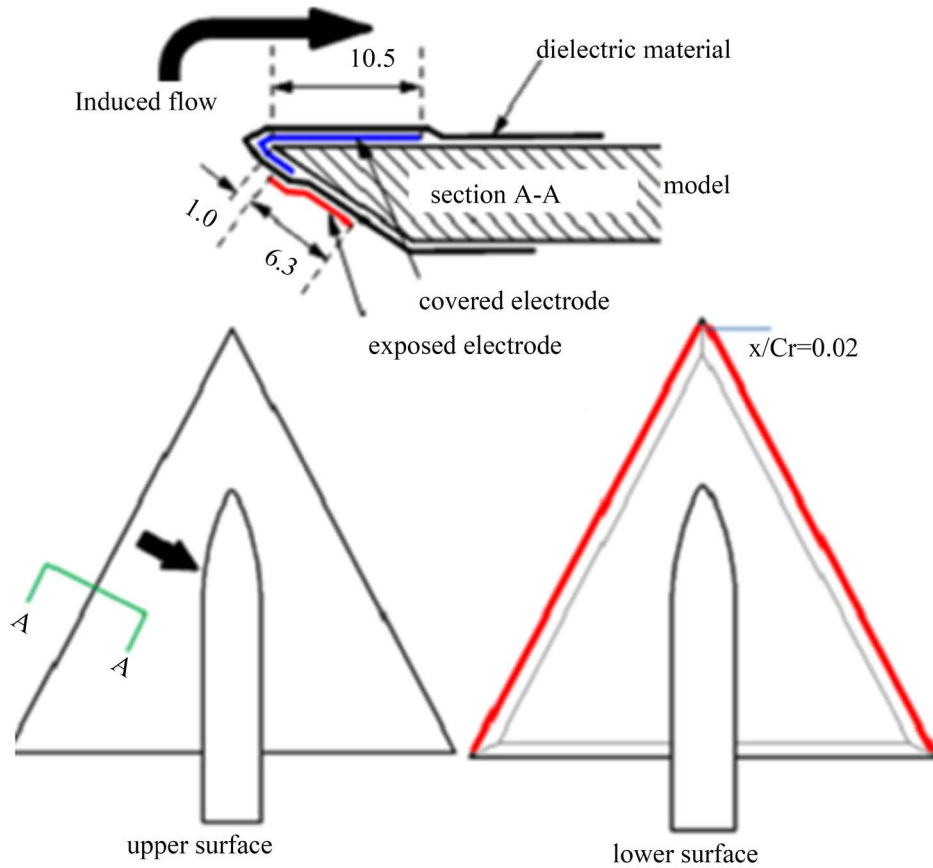
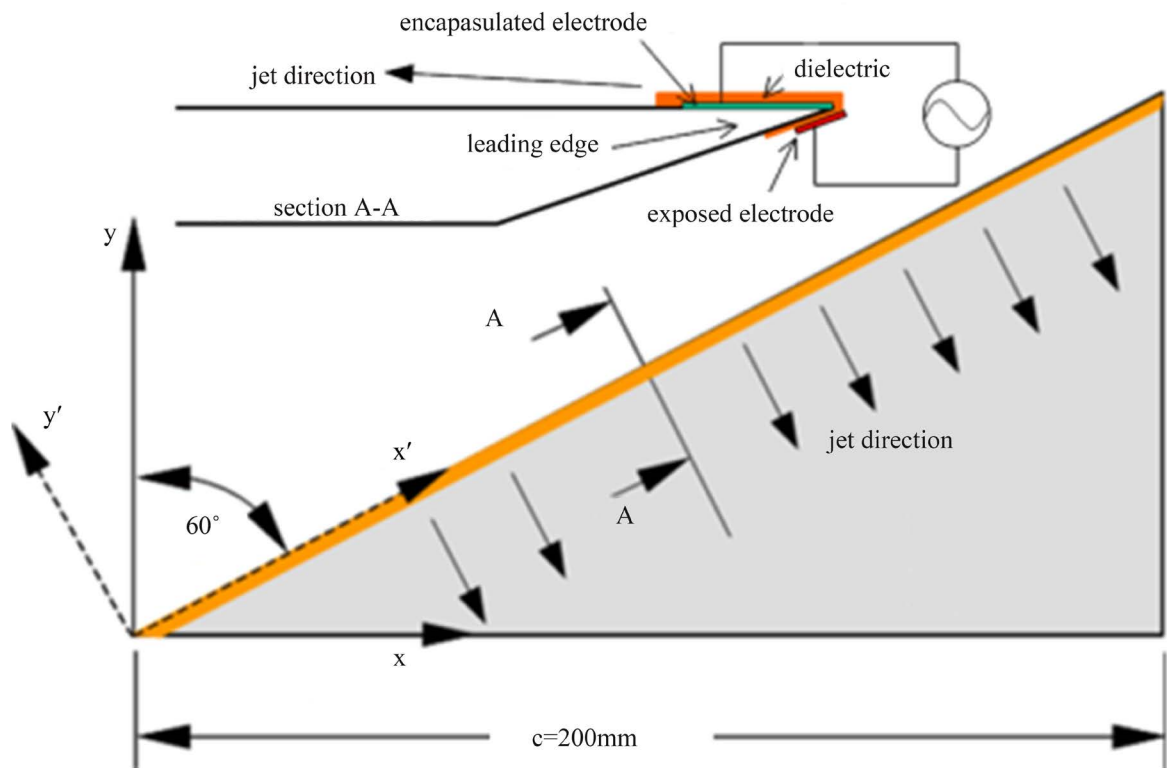
介质阻挡放电等离子体气动激励用于三角翼涡控制的研究中, 还没得到广泛研究, 多采用毫秒脉冲 DBD 等离子体激励, 且多以大后掠三角翼为研究对象。基于不同的控制原理, 主要有四种介质阻挡放电等离子体激励器布局较多地用于三角翼涡流动控制的探索研究(见图 14): 1) 激励器布置在机翼前缘[74] [77], 研究认为脉冲式放电引入前缘非定常扰动比连续式放电效果好, 最佳的无量纲激励频率 $F^+ \approx 1$; 2) 激励器布置在垂直于前缘[77] [80]以诱导附面层向下游加速, 研究认为定常连续放电激励效果比非定常脉冲激励效果好, 逆气流方向的连续激励可导致旋涡提前破裂[80]; 3) 激励器沿二次分离线布置[80], 研究认为这种布局下的非定常激励对旋涡的稳定性有效果; 4) 激励器布置在上翼面不同弦向或垂直于翼根, 以涡轴向加速[75] [76]。

上述 DBD 等离子体激励用于三角翼流动控制研究均取得有一定控制效果, 前缘激励主要利用非定常等离子体激励诱导非定常扰动效应, 起到增强前缘涡强度的效果, 对非细长三角翼有良好的控制效果[77]; 上翼面不同弦长激励主要利用定常激励对流场的加速效应, 起到推迟脱体涡破裂的目的, 对细长三角翼有良好的控制效果[76] [77]。总的来说, 毫秒脉冲 DBD 激励对三角翼涡流场有效控制的来流速度较低(30 m/s 以下)。纳秒脉冲等离子体激励用于外流控制的研究多围绕翼型开展, 三角翼流动控制的研究不多, 且其控制机理还不清楚。

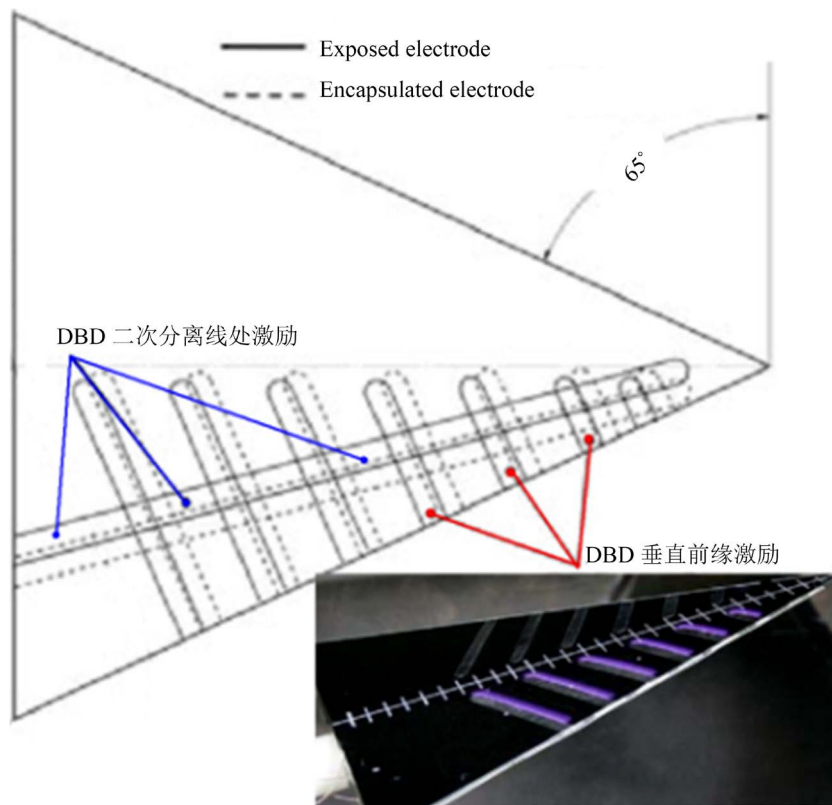
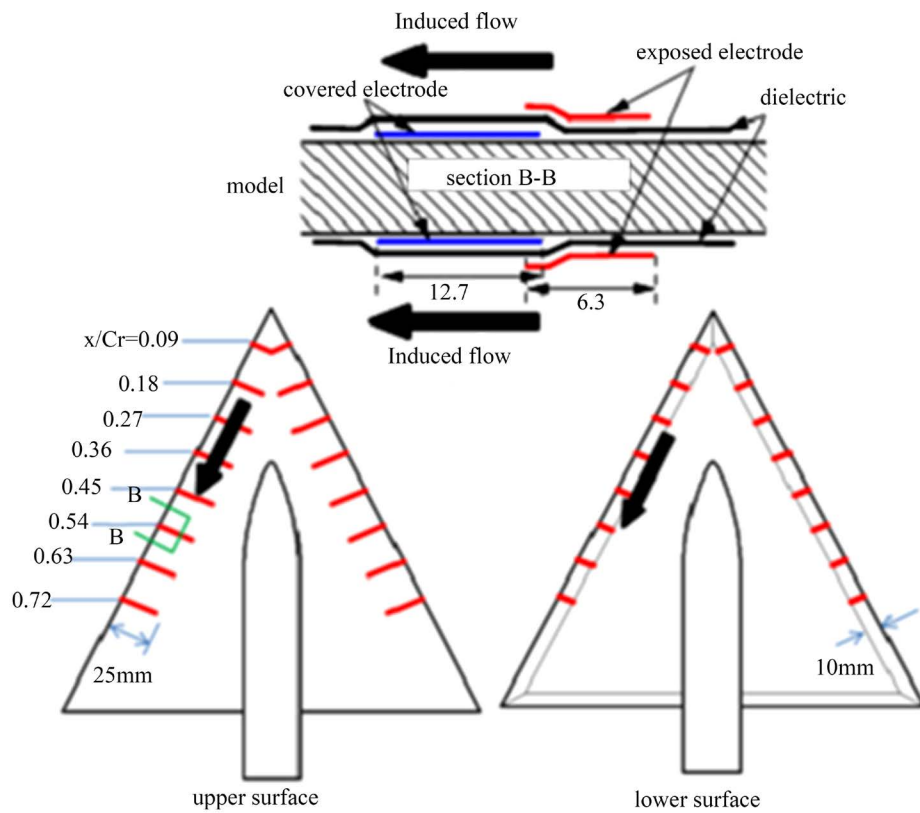
空军工程大学与中航工业气动研究院合作, 在国际上率先开展了 NS-DBD 用于三角翼前缘涡控制的实验研究[34] [96] [97], 探索了其在三角翼上的流动控制规律, 发现来流速度、几何模型、激励参数是影响流动控制效果的主要参数。对于非定常形式的 NS-DBD 激励, 最佳的激励位置在机翼最前缘, 最佳的激励频率为 $F^+ = 1 \sim 2$, 激励电压越大效果越好。随着后掠角的增大, 控制效果逐渐减弱, 对于大后掠(60° 后掠), 则无控制效果。对钝前缘三角翼的控制效果好于尖前缘。

4.4. 激波及其诱导分离控制

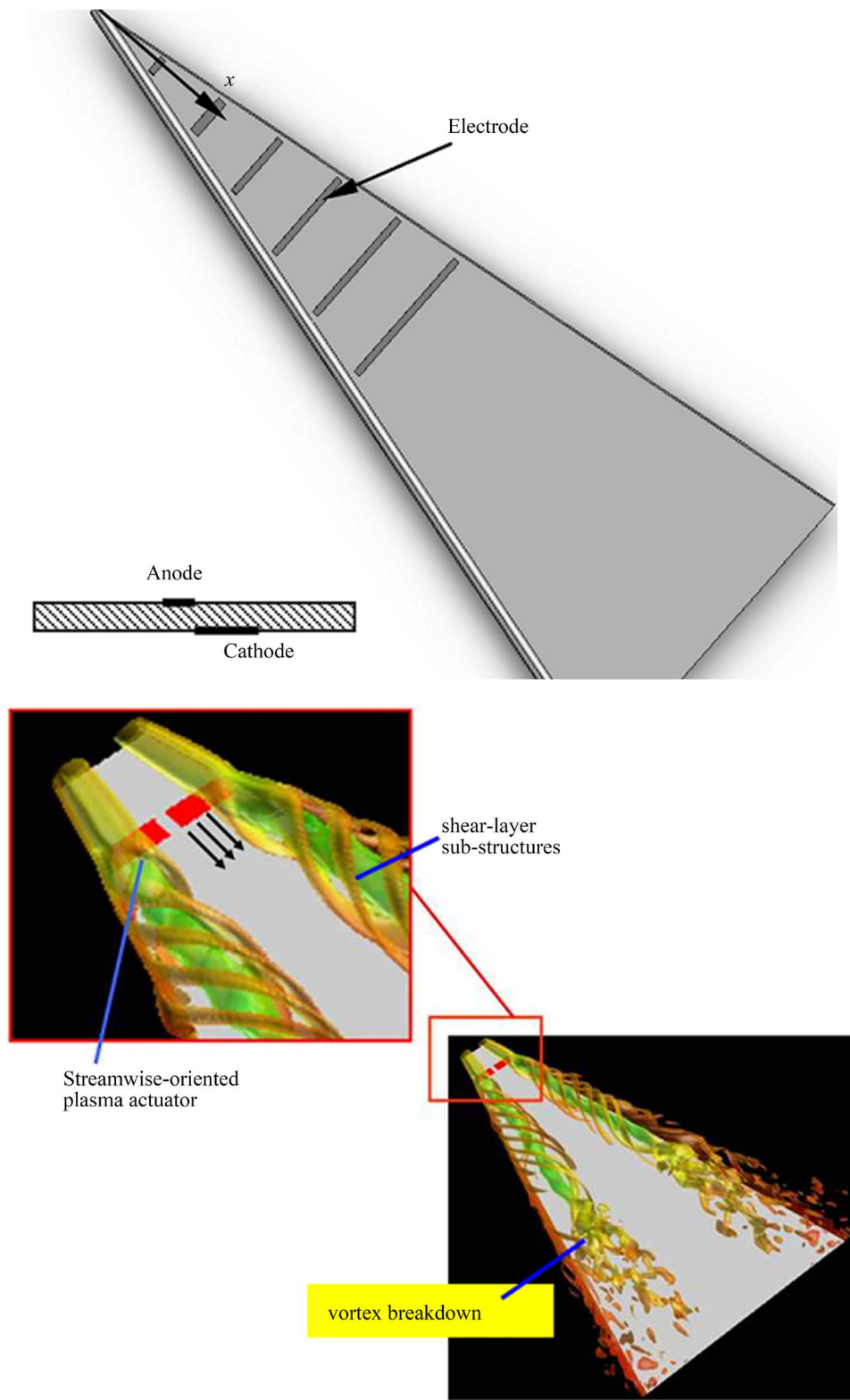
作为一种新型的气动激励, NS-DBD 激励在激波控制和激波诱导边界层分离控制上也有尝试。其实根据文献[28]中 0.74 Ma 下分离控制结果, 如图 15。在 10° 迎角上翼面出现了激波, 前缘激励没有取得控制效果, 20° 迎角下激励可使前缘分离附体, 激波后移。由于缺乏流场显示, 难以深入分析。



(a) 沿前缘激励[74] [77]



(b) 垂直前缘激励[77] [80]



(c) 垂直于翼根激励[75] [76]

Figure 14. Actuator arrangements mostly used in delta-wing flow control
图 14. 三角翼流动控制常用的等离子体激励器布局

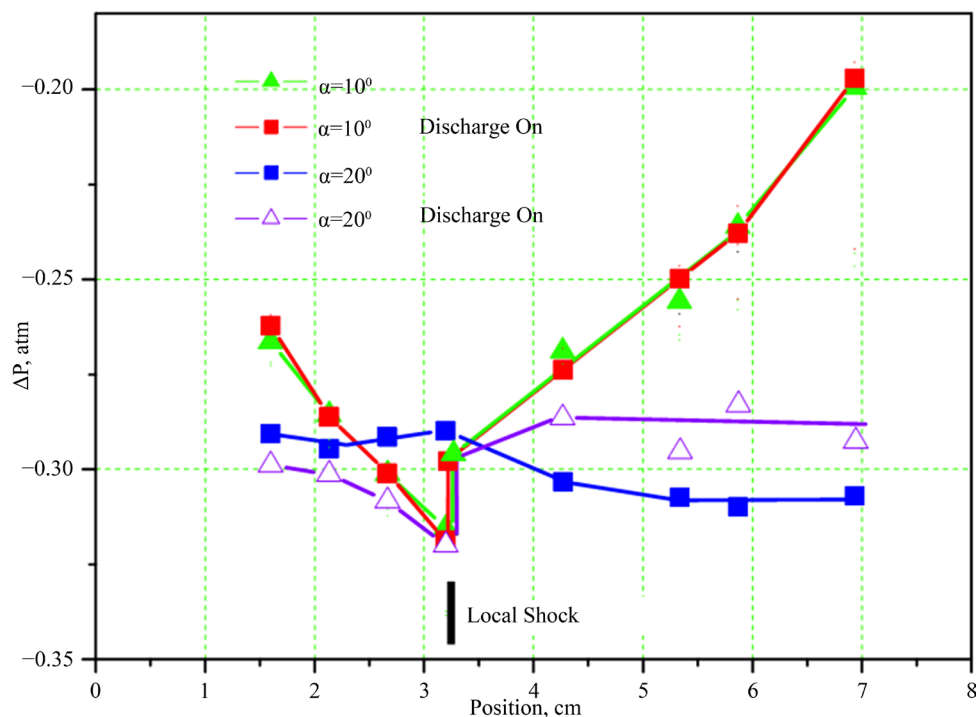


Figure 15. The static pressure distribution before and after applying NS-DBD on the stimulation of transonic airfoil, $Ma = 0.74$ [28]

图 15. 施加 NS-DBD 激励前后跨音速翼型上静压分布, $Ma = 0.74$ [28]

在 NS-DBD 激励推迟跨音速激波/附面层干扰导致的颤振方面, 洛桑联邦理工学院(EPFL)的 Marino 等[98]、Peschke 等[36] [99]进行了初步尝试, 实验表明, NS-DBD 激励在翼型表面产生的压缩波对激波位置和强度影响十分微弱。然而, 文中仅用纹影测量手段研究 NS-DBD 激励对翼面上激波的作用效果, 缺乏定量数据分析; 且激励后翼面激波形态和位置没有明显的变化。

俄亥俄州立大学机械与航空工程系的非平衡热力学实验室的 M. Nishihara 等人进行了 NS-DBD 激励控制高马赫数下圆柱绕流的实验研究, 纳秒脉冲激励产生的压缩波向上游传播, 与脱体激波相互作用, 使脱体激波的脱体距离前移 25% [100]。然而, 实验中的脱体距离仅为 1.2 mm, 激励开启 5 μ s 时脱体距离为 1.51 mm, 作者说明基准流场引起的激波位置不稳定在 3% 左右, 在测量精度上对测量结果提出疑问; 就减弱激波强度而言, 相应的仿真[46]得到总阻力减弱 1%, 这一结果表明, 就目前激励强度而言, NS-DBD 在控制激波方面仍需进一步研究。

在国内空军工程大学的吴云等[91], 进行了 NS-DBD 激励控制激波诱导边界层分离的纹影实验研究, 研究发现平行于来流的激励基本没有取得效果, 垂直于来流的激励使得分离区减小, 指出需要进一步通过壁面静压测量和 PIV 测试对这一问题进行研究。

5. 总结与展望

本文对国内外等离子体流动控制中常用的 NS-DBD 激励进行了回顾, 包括: NS-DBD 激励基本特性、激励的建模仿真现状、外流控制研究进展等方面内容。可以看出, NS-DBD 发展至今, 在仿真建模、实验验证、机理认识上已取得了重要的进展。国外研究起步早, 美国和俄罗斯占领先地位; 相比国外, 国内开展 NS-DBD 等离子体激励流动控制实验研究起步较晚, 研究单位偏少; 对激励特性的研究较多, 对受控流场精细化测量较少, 有待于进一步研究。其发展趋势有以下特点:

1) 高速来流、高雷诺数下流动分离的控制虽然得到了部分实验验证,但实验研究的还不多,主要是应用背景还不清楚。大迎角下分离控制针对的应用背景有抖振控制、噪音控制、缩短起飞着陆距离(增加起飞载重)、飞行控制、非对称涡控制等,目前分离控制的基础研究较多,针对应用背景的研究较少,这些有实际应用背景的研究直接针对应用转化。因此,基础研究和应用研究相结合,高校、研究机构和工业界开展合作,针对工程应用背景开展研究,是将来发展的趋势。

2) 如何提高激励强度,从而增强气动激励控制流动分离的能力仍是一个亟待解决的问题,虽前缘分离取得一定的控制效果,然高速来流、高雷诺数下的控制效果不如低速下的效果好,通过电源优化、激励器优化提高激励强度是一个趋势。

3) 针对应用背景,继续加强基础理论研究,通过实验和精细化流场仿真,揭示相应的流动控制机理,为向应用转化提供理论支持。理论研究上为工程应用提供基础,理论研究一方面揭示流动控制机理,另一方面优化激励的产生;在工程应用上,可应用的方向较多,主要应有明确的应用背景和控制需求。针对背景和需求,一方面风洞实验验证,另一方面飞行实验验证。

基金项目

国家自然科学基金(批准号: 51336011、51276197、51207169)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] 吴云, 李应红. 等离子体流动控制研究进展与发展展望[J]. 航空学报, 2015, 36(2): 381-405.
- [2] 李应红, 吴云, 梁华, 宋慧敏, 贾敏. 提高抑制流动分离能力的等离子体冲击流动控制原理[J]. 科学通报, 2010, 55(31): 3060-3068.
- [3] 倪芳原, 史志伟, 杜海. 纳秒脉冲等离子体激励器用于圆柱高速流动控制的数值模拟[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 657-665.
- [4] Rethmel, C., Little, J., Takashima, K., Sinha, A., Adamovich, I. and Samimy, M. (2011) Flow Separation Control over an Airfoil with Nanosecond Pulse Driven DBD Plasma Actuators. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, 4-7 January 2011. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2011-487>
- [5] Roupasov, D.V., Nikipelov, A.A., Nudnova, M.M. and Starikovskii, A.Yu. (2009) Flow Separation Control by Plasma Actuator with Nanosecond Pulse-Periodic Discharge. *AIAA Journal*, **47**, 168-185. <http://dx.doi.org/10.2514/1.38113>
- [6] Bisek, N.J., Poggie, J., Nishihara, M. and Adamovich, I. (2012) Computational and Experimental Analysis of Mach 5 Air Flow over a Cylinder with a Nanosecond Pulse Discharge. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9-12 January 2012. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-186>
- [7] 赵光银, 梁华, 吴云, 宋慧敏, 贾敏. 不同时间尺度等离子体气动激励特性的测试诊断[J]. 空军工程大学学报, 2011, 12(5): 20-24.
- [8] 车学科, 聂万胜, 周朋辉, 等. 亚微秒脉冲表面介质阻挡放电等离子体诱导连续漩涡的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(22): 279-288.
- [9] Takashima, K., Zuzeeq, Y., Lempert, W.R. and Adamovich, I.Y. (2011) Characterization of a Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma Sustained by Repetitive Nanosecond Pulses. *Plasma Sources Science and Technology*, **20**, Article ID: 055009. <http://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/20/5/055009>
- [10] 李结, 李华星, 王健磊, 孟宣市. 纳秒脉冲等离子体对静止大气的激励特性[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(4): 176-180.
- [11] 梁华. 翼型等离子体流动控制研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 空军工程大学, 2008.
- [12] Zhao, Z.J., Li, J.-M., Zheng, J.G., Cui, Y.D. and Khoo, B.C. (2014) Study of Shock and Induced Flow Dynamics by Pulsed Nanosecond DBD Plasma Actuators. *52nd Aerospace Sciences Meeting*, National Harbor, Maryland, 13-17 January 2014. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2014-0402>
- [13] Unfer, T. and Boeuf, J.P. (2009) Modelling of a Nanosecond Surface Discharge Actuator. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **42**, Article ID: 194017. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/42/19/194017>

- [14] Poggie, J., Bisek, N., Adamovich, I. and Nishihara, M. (2012) Numerical Simulation of Nanosecond-Pulse Electrical Discharges. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9-12 January 2012. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-1025>
- [15] Klochko, A.V., Popov, N.A. and Starikovskaia, S.M. (2012) Study of a Fast Gas Heating in a Capillary Nanosecond Discharge. Discharge Parameters and Temperature Increase in the Afterglow. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9-12 January 2012.
- [16] 卢新培, 严萍, 任春生, 邵涛. 大气压强脉冲放电等离子体的研究现状与展望[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2011, 41(7): 801-815.
- [17] Babich, L.P. and Stankevich, Y. (1973) Criterion of a Transition from the Streamer Mechanism of Gas Discharge to the Continuous Electron Acceleration. *Soviet Physics-Technical Physics*, **2**, 1333-1336.
- [18] Mintousov, E.I., Pendleton, S.J., Gerbault, F.G., Popov, N.A. and Starikovskaia, S.M. (2011) Fast Gas Heating in Nitrogen-Oxygen Discharge Plasma: II. Energy Exchange in the Afterglow of a Volume Nanosecond Discharge at Moderate Pressures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **44**, Article ID: 285202. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/44/28/285202>
- [19] Popov, N.A. (2011) Fast Gas Heating in a Nitrogen-Oxygen Discharge Plasma: I. Kinetic Mechanism. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **44**, Article ID: 285201. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/44/28/285201>
- [20] Flitti, A. and Pancheshnyi, S. (2009) Gas Heating in Fast Pulsed Discharges in N₂-O₂ Mixtures. *The European Physical Journal Applied Physics*, **45**, Article ID: 21001. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap/2009011>
- [21] Unfer, T. and Boeuf, J.P. (2009) Modelling of a Nanosecond Surface Discharge Actuator. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **42**, Article ID: 194017. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/42/19/194017>
- [22] Aleksandrov, N.L., Kindysheva, S.V., Nudnova, M.M. and Starikovskiy, A.Yu. (2010) Mechanism of Ultra-Fast Heating in a Non-Equilibrium Weakly Ionized Air Discharge Plasma in High Electric Fields. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **43**, Article ID: 255201. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/43/25/255201>
- [23] 朱益飞. NS-DBD 等离子体气动激励建模仿真研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 空军工程大学, 2013.
- [24] Nudnova, M.M., Aleksandrova, N.L. and Starikovskii, A.Y. (2010) Influence of the Voltage Polarity on the Properties of a Nanosecond Surface Barrier Discharge in Atmospheric-Pressure Air. *Plasma Physics Reports*, **36**, 90-98. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063780X10010071>
- [25] Benard, N., Zouzou, N., Claverie, A., Sotton, J. and Moreau, E. (2012) Optical Visualization and Electrical Characterization of Fast-Rising Pulsed Dielectric Barrier Discharge for Airflow Control Applications. *Journal of Applied Physics*, **111**, Article ID: 033303. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3682568>
- [26] Benard, N., Bayoda, K.D., Pai, D.Z., et al. (2014) Electrical and Optical Characteristics of Pulsed Dielectric Barrier Discharges under Altitude Conditions. AIAA 2014-0145, AIAA, Reston.
- [27] Zhu, Y.F., Wu, Y., Cui, W., Li, Y.H. and Jia, M. (2013) Modelling of Plasma Aerodynamic Actuation Driven by Nanosecond SDBD Discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **46**, Article ID: 355205. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/46/35/355205>
- [28] Dawson, R.A. and Little, J. (2014) Effects of Pulse Polarity on Nanosecond Pulse Driven Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. *Journal of Applied Physics*, **115**, Article ID: 043306. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4863175>
- [29] 罗毅, 方志, 邱毓昌. 材料性质对介质阻挡放电特性的影响[J]. 绝缘材料, 2003, 36(4): 45-47.
- [30] 姜慧, 章程, 邵涛, 等. 纳秒脉冲表面介质阻挡放电特性实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 592-596.
- [31] Dawson, R.A. and Little, J. (2013) Characterization of Nanosecond Pulse Driven Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Aerodynamic Flow Control. *Journal of Applied Physics*, **113**, Article ID: 103302. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4794507>
- [32] Kirpichnikov, A.A. and Starikovskii, A.Yu. (2008) Nanosecond Pulsed Discharge—Always Uniform. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **36**, 898-899. <http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2008.920291>
- [33] Little, J.C. (2010) High-Lift Airfoil Separation Control with Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, Columbus.
- [34] Zhao, G.-Y., Li, Y.-H., Liang, H., Han, M.-H. and Hua, W.-Z. (2015) Control of Vortex on a Non-Slender Delta Wing by a Nanosecond Pulse Surface Dielectric Barrier Discharge. *Experiments in Fluids*, **56**, 1864. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-014-1864-8>
- [35] Peschke, P., Goekce, S., Hollenstein, C., Leyland, P. and Ott, P. (2011) Interaction between Nanosecond Pulse DBD Actuators and Transonic Flow. *42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Honolulu, 27-30 June 2011. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2011-3734>
- [36] Boeuf, J.P., Unfer, T. and Pitchford, L. (2010) Studies of the Electrohydrodynamic Force Produced in a Dielectric Bar-

rier Discharge for Flow Control. Report No. 2, Phase 3, Grant FA8655-06-C-4004.

- [37] Shyy, W., Jayaraman, B. and Andersson, A. (2002) Modeling of Glow Discharge-Induced Fluid Dynamics. *Journal of Applied Physics*, **92**, 6434-6443. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1515103>
- [38] Orlov, D.M., Corke, T.C. and Patel, M.P. (2006) Electric Circuit Model for Aerodynamic Plasma Actuator. *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, 9-12 January 2006. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2006-1206>
- [39] Font, G.I. (2004) Boundary Layer Control with Atmospheric Plasma Discharges. *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Fort Lauderdale, 11-14 July 2004. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2004-3574>
- [40] Roy, S. (2005) Flow Actuation Using Radio Frequency in Partially Ionized Collisional Plasmas. *Applied Physics Letters*, **86**, Article ID: 101502. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1879097>
- [41] Gaitonde, D.V. and McCrink, M.H. (2012) A Semi-Empirical Model of a Nanosecond Pulsed Plasma Actuator for Flow Control Simulations with LES. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9-12 January 2012. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-184>
- [42] Gaitonde, D., Shaler, K., Sahin, M., Glaz, B. and Dinavahi, S. (2013) High-Fidelity Simulations of NS-DBD-Based Control of a Stalled NACA0015 Airfoil. *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Grapevine, 7-10 January 2013. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2013-1118>
- [43] Chen, Z.L., Hao, L.Z. and Zhang, B.Q. (2013) A Model for Nanosecond Pulsed Dielectric Barrier Discharge (NSDBD) Actuator and Its Investigation on the Mechanisms of Separation Control over an Airfoil. *Science China Technological Sciences*, **56**, 1055-1065. <http://dx.doi.org/10.1007/s11431-013-5179-4>
- [44] 赵光银, 李应红, 梁华, 等. 纳秒脉冲表面介质阻挡等离子体激励唯象学仿真[J]. 物理学报, 2015, 64(1): 166-176.
- [45] Bisek, N.J., Poggie, J., Nishihara, M. and Adamovich, I. (2012) Computational and Experimental Analysis of Mach 5 Air Flow over a Cylinder with a Nanosecond Pulse Discharge. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9-12 January 2012. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-186>
- [46] 张海灯, 李应红, 吴云, 赵勤. 高速压气机叶栅纳秒脉冲等离子体流动控制仿真研究[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1560-1570.
- [47] Zheng, J.G., Zhao, Z.J., Li, J., Cui, Y.D. and Khoo, B.C. (2014) Numerical Simulation of Nanosecond Pulsed Dielectric barrier discharge Actuator in a Quiescent Flow. *Physics of Fluids*, **26**, Article ID: 036102. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4867708>
- [48] Takashima, K., Yin, Z. and Adamovich, I.V. (2013) Measurements and Kinetic Modeling of Energy Coupling in Volume and Surface Nanosecond Pulse Discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, **22**, Article ID: 015013. <http://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/22/1/015013>
- [49] Correale, G., Popov, I.B., Rakitin, A.E., Starikovskii, A.Y., Hulshoff, S.J. and Veldhuis, L.L.M. (2011) Flow Separation Control on Airfoil with Pulsed Nanosecond Discharge Actuator. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, 4-7 January 2011. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2011-1079>
- [50] Chappell, S. and England, D. (2012) Active Control of a Wing Tip Vortex with a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator. *6th AIAA Flow Control Conferenc*, New Orleans, 25-28 June 2012. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-2952>
- [51] 何伟, 牛中国, 潘波, 林麒. 等离子抑制翼尖涡实验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 277-281.
- [52] Boesch, G., Vo, H.D., Savard, B., Wanko-Tchatchouang, C. and Mureithi, N.W. (2010) Flight Control Using Wing Tip Plasma Actuation. *Journal of Aircraft*, **47**, 1836-1846. <http://dx.doi.org/10.2514/1.44003>
- [53] Li, Y., Zhang, X. and Huang, X. (2010) The Use of Plasma Actuators for Bluff Body Broad Band Noise Control. *Experiments in Fluids*, **49**, 367-377. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-009-0806-3>
- [54] Lemire, S. and Vo, H.D. (2011) Reduction of Fan and Compressor Wake Defect Using Plasma Actuation for Tonal Noise Reduction. *Journal of Turbomachinery*, **133**, Article ID: 011017. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4000540>
- [55] 苏长兵, 宋慧敏, 李应红, 等. 基于等离子体气动激励的圆柱绕流控制实验研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(4): 45-48.
- [56] Liu, F., Luo, S., Gao, C., Meng, X., Hao, J., Wang, J. and Zhao, Z. (2008) Flow Control over a Conical Forebody Using Duty-Cycled Plasma Actuators. *AIAA Journal*, **46**, 2969-2973. <http://dx.doi.org/10.2514/1.39435>
- [57] 刘锋, 罗时钧, 高超. 圆锥前体涡的等离子体控制特性及机理[J]. 中国科技论文, 2010, 5(10): 831-836.
- [58] 冯立好, 王晋军, Choi Kwng-So. 等离子体环量控制翼型增升的实验研究[J]. 力学学报, 2013, 45(6): 815-821.
- [59] Feng, L.H., Jukes, T.N., Choi, K.-S. and Wang, J.J. (2012) Flow Control over a NACA0012 Airfoil Using Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator with a Gurney Flap. *Experiments in Fluids*, **52**, 1533-1546.

<http://dx.doi.org/10.1007/s00348-012-1263-y>

- [60] 谢泽华, 周进, 李自然. 脉冲等离子体推力器内部流场的数值分析[J]. 火箭推进, 2014, 40(1): 39-44.
- [61] Wang, J.J., Choi, K.S., Feng, L.H., Jukes, T.N. and Whalley, R.D. (2013) Recent Developments in DBD Plasma Flow Control. *Progress in Aerospace Sciences*, **62**, 52-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2013.05.003>
- [62] 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.
- [63] Benard, N., Jolibois, J. and Moreau, E. (2009) Lift and Drag Performances of an Axisymmetric Airfoil Controlled by Plasma Actuator. *Journal of Electrostatics*, **67**, 133-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2009.01.008>
- [64] Sato, M., Asada, K., Nonomura, T., Aono, H., Yakeno, A. and Fujii, K. (2014) Effective Mechanisms for Turbulent-Separation Control by DBD Plasma Actuator around NACA0015 at Reynolds Number 1,600,000. *7th AIAA Flow Control Conference*, Atlanta. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2014-2663>
- [65] Nonomura, T., Aono, H., Sato, M., Yakeno, A., Okada, K., Abe, Y. and Fujii, K. (2013) Control Mechanism of Plasma Actuator for Separated Flow around NACA0015 at Reynolds Number 63,000—Separation Bubble Related Mechanisms. *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Grapevine, 7-10 January 2013. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2013-853>
- [66] Fujii, K. (2014) High-Performance Computing-Based Exploration of Flow Control with Micro Devices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **372**, Article ID: 20130326. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0326>
- [67] Greenblatt, D., Schneider, T. and Schuele, C.Y. (2012) Mechanism of Flow Separation Control Using Plasma Actuation. *Physics of Fluids*, **24**, Article ID: 077102. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4733399>
- [68] Debien, A., Benard, N. and Moreau, E. (2012) Streamer Inhibition for Improving Force and Electric Wind Produced by DBD Actuators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **44**, Article ID: 215201. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/45/21/215201>
- [69] Kelley, C.L., Bowles, P., Cooney, J., et al. (2012) High Mach Number Leading-Edge Flow Separation Control Using AC DBD Plasma Actuators. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9-12 January 2012. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-906>
- [70] Sidorenko, A.A., Budovsky, A.D., Pushkarev, A. and Maslov, A. (2008) Flight Testing of DBD Plasma Separation Control System. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, 7-10 January 2008. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2008-373>
- [71] Grund, T. and Nitsche, W. (2013) Wind Tunnel and Flight Tests with Active Flow Control on a S10 Glider Configuration. In: Dillmann, A., Heller, G., Kreplin, H.-P., Nitsche, W. and Peltzer, I., Eds., *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics VIII*, Vol. 121, Springer, Berlin, 117-124. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-35680-3_15
- [72] King, R., Heinz, N., Bauer, M., Grund, T. and Nitsche, W. (2013) Flight and Wind-Tunnel Tests of Closed-Loop Active Flow Control. *Journal of Aircraft*, **50**, 1605-1614. <http://dx.doi.org/10.2514/1.C032129>
- [73] Greenblatt, D., Kastantin, Y., Nayeri, C.N. and Paschereit, C.O. (2008) Delta-Wing Flow Control Using Dielectric Barrier Discharge Actuators. *AIAA Journal*, **46**, 1554-1560. <http://dx.doi.org/10.2514/1.33808>
- [74] Visbal, M.R. and Gaitonde, D.V. (2006) Control of Vortical Flows Using Simulated Plasma Actuators. *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, 9-12 January 2006. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2006-505>
- [75] Zhang, P.F., Wang, J.J., Feng, L.H. and Wang, G.B. (2010) Experimental Study of Plasma Flow Control on Highly Swept Delta Wing. *AIAA Journal*, **48**, 249-252. <http://dx.doi.org/10.2514/1.40274>
- [76] Kwak, D.Y. and Nelson, R.C. (2010) Vortical Flow Control over Delta Wings with Different Sweep Back Angles Using DBD Plasma Actuators. *5th Flow Control Conference, Fluid Dynamics and Co-Located Conferences*, Chicago, 28 June-1 July 2010. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2010-4837>
- [77] Patel, M.P., Ng, T.T., Vasudevan, S., Corke, T.C. and He, C. (2007) Plasma Actuators for Hingeless Aerodynamic Control of an Unmanned Air Vehicle. *Journal of Aircraft*, **44**, 1264-1274. <http://dx.doi.org/10.2514/1.25368>
- [78] Nelson, R.C., Corke, T.C., Otham, H., et al. (2007) Modification of the Flow Structure over a UAV Wing for Roll Control. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, 8-11 January 2007. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2007-884>
- [79] Sidorenko, A.A., Budovskiy, A.D., Maslov, A.A., et al. (2013) Plasma Control of Vortex Flow on a Delta Wing at High Angles of Attack. *Experiments in Fluids*, **54**, 1585. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-013-1585-4>
- [80] 张鑫, 黄勇, 沈志洪, 等. 高风速下介质阻挡放电等离子体气动激励抑制翼-身组合体失速分离的试验研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(3):17-20.
- [81] Little, J., Takashima, K., Nishihara, M., Adamovich, I. and Samimy, M. (2010) High Lift Airfoil Leading Edge Sepa-

- ration Control with Nanosecond Pulse Driven DBD Plasma Actuators. *5th Flow Control Conference, Fluid Dynamics and Co-Located Conferences*, Chicago, 28 June-1 July 2010.
- [82] Little, J. and Samimy, M. (2010) High-Lift Airfoil Separation with Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuation. *AIAA Journal*, **48**, 2884-2898. <http://dx.doi.org/10.2514/1.J050452>
- [83] Little, J., Nishihara, M., Adamovich, I. and Samimy, M. (2010) High-Lift Airfoil Trailing Edge Separation Control Using a Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator. *Experiments in Fluids*, **48**, 521-537. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-009-0755-x>
- [84] Little, J., Takashima, K., Nishihara, M., Adamovich, I. and Samimy, M. (2012) Separation Control with Nanosecond-Pulse-Driven Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. *AIAA Journal*, **50**, 350-365. <http://dx.doi.org/10.2514/1.J051114>
- [85] Moralev, I., Klimov, A., Bityurin, V., Chertov, D. and Kazansky, P. (2011) Flow Separation Control near NACA23012 Airfoil by a Capacity Coupled Surface HF Discharge. *42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Honolulu, 27-30 June 2011. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2011-3733>
- [86] Pavel, K., Moralev, I., Klimov, A. and Bityurin, V. (2012) Flow Control over NACA 23012 Airfoil Model by Surface HF Plasma Actuator. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9-12 January 2012. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-1031>
- [87] Kato, K., Breitsamter, C. and Obi, S. (2014) Flow Separation Control over a Gö 387 Airfoil by Nanosecond Pulse-Periodic Discharge. *Experiments in Fluids*, **55**, 1795. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-014-1795-4>
- [88] Kelley, C.L., Bowles, P.O., Cooney, J., et al. (2014) Leading-Edge Separation Control Using Alternating-Current and Nanosecond-Pulse Plasma Actuator. *AIAA Journal*, **52**, 1871-1884. <http://dx.doi.org/10.2514/1.J052708>
- [89] Wu, Y., Li, Y.H., Liang, H., Jia, M. and Song, H.M. (2011) On Mechanism of Plasma-Shock-Based Flow Control. *AIP Conference Proceeding*, **1376**, 521. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3651965>
- [90] Wu, Y., Li, Y., Liang, H. and Li, J. (2014) Nanosecond Pulsed Discharge Plasma Actuation: Characteristics and Flow Control Performance. *45th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Atlanta, 16-20 June 2014. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2014-2118>
- [91] Che, X., Shao, T., Nie, W. and Yan, P. (2012) Numerical Simulation on a Nanosecond-Pulse Surface Dielectric Barrier Discharge Actuator in Near Space. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **45**, Article ID: 145201. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/45/14/145201>
- [92] Chen, Z., Zhang, S., Zhang, B. and Ma, J. (2014) Shock-Induced Separation Control by Using Nanosecond Pulsed SDBD Plasma Actuators. *7th AIAA Flow Control Conference*, Atlanta, 16-20 June 2014. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2014-2368>
- [93] Glaz, B., Dinavahi, S.P.G. and Gaitonde, D.V. (2012) Nanosecond pulsed plasma actuation effects on aerodynamic damping and implications for aeroelastic stability in the post-stall regime. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, 23-26 April 2012. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-1482>
- [94] 郝琳召, 张彬乾, 陈真利. 纳秒等离子体激励控制翼型流动分离机理研究[J]. 航空工程进展, 2014, 5(1): 25-32.
- [95] Popov, I.B., Nikipelov, A., Pancheshnyi, S., Correale, G., et al. (2013) Experimental Study and Numerical Simulation of Flow Separation Control with Pulsed Nanosecond Discharge Actuator. *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Grapevine, 7-10 January 2013. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2013-572>
- [96] 化为卓, 李应红, 牛中国, 赵光银, 梁华, 韩孟虎. 低速三角翼纳秒脉冲等离子体激励实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10): 2331-2339.
- [97] Zhao, G., Li, Y., Hua, W., et al. (2015) Experimental Study of Flow Control on Delta Wings with Different Sweep Angles Using Pulsed Nanosecond DBD Plasma Actuators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, **229**, 1966-1974. <http://dx.doi.org/10.1177/0954410014562630>
- [98] Marino, A., Catalano, P., Marongiu, C., Peschke, P., Hollenstein, C. and Donelli, R. (2013) Effect of High Voltage Pulsed DBD Plasma on the Aerodynamic Performances in Subsonic and Transonic Conditions. *43rd Fluid Dynamics Conference, Fluid Dynamics and Co-Located Conferences*, San Diego. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2013-2752>
- [99] Peschke, P., Goekce, S., Leyland, P., Ott, P. and Hollenstein, C. (2013) Experimental Investigation of Pulsed Dielectric Barrier Discharge Actuators in Sub- and Transonic Flow. *44th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, San Diego. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2013-2885>
- [100] Nishihara, M., Takashima, K., Rich, J. and Adamovich, I. (2011) Mach 5 Bow Shock Control by a Nanosecond Pulse Surface DBD. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, 4-7 January 2011. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2011-1144>

再次投稿您将享受以下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>