表面介质阻挡纳秒脉冲放电能量特性和诱导流动特性研究

赵光银*, 梁华, 李应红, 化为卓, 韩孟虎, 吴云

空军工程大学航空航天工程学院等离子体动力学实验室, 西安 710038

* E-mail: zym19860615@163.com

收稿日期: 2014-10-29; 接受日期: 2015-05-07

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

摘要 聚焦于表面介质阻挡纳秒脉冲放电(NS DBD)基本问题, 设计不同结构激励器, 研究放电能量特性、诱导流动特性。结果表明: 单位展长激励器单次放电能量随激励电压增大而非线性增大, 其值在 0.1~1 mJ/cm 量级, 与激励器长度和激励频率无关; NS DBD 瞬时功率可达几百千瓦, 而时均功率较低, 仅为瓦量级。NS DBD 诱导流动的速度较低, 在 0.1 m/s 量级上; 提升激励电压对诱导速度提升不明显; 随激励频率增大有所增大。NS DBD 可诱导形成冲击波, 其初始运动速度稍高于音速, 不同结构激励器诱导冲击波在传播位置上无明显差别, 主要影响诱导冲击波个数; 激励电压对冲击波传播速度无明显影响; 唯象学仿真表明不同沉积能量诱导冲击波速度不同, 实验对应下的沉积能量诱导冲击波波速近于音速。

关键词

等离子体
纳秒脉冲
冲击波
介质阻挡放电
诱导流动

1 引言

基于介质阻挡放电(DBD)的等离子体激励在外流控制已取得重要进展。逐步认识到, 脉冲化的非定常等离子体激励控制效果和能量优于连续的定常激励^[1]; 非定常等离子体激励中, 纳秒脉冲等离子体(NS DBD)气动激励的控制效果优于毫、微秒脉冲激励^[2]。NS DBD 已被验证在机翼起飞着陆马赫数和雷诺数下能够推迟机翼失速^[3], 在 0.74 马赫数下可有效抑制翼型流动分离^[4], 在 0.85 马赫数下有效对翼型尾迹降噪^[4], 在 4~5 马赫数下对脱体激波强度和位置起到有效控制作用^[5,6]。

研究 NS DBD 激励特性对于揭示流动控制机理, 优化激励器结构, 提高激励强度和流动控制能力具

有重要意义。朱益飞^[7]通过对 NS DBD 建模仿真研究约化场强, 激励电压波形对能量传递特性的影响, 电压上升沿的斜率增大可提高局部热功率密度但降低总能量传递效率; 减小下降沿斜率可以提升总能量传递效率。Wu 等人^[8]进行了 NS DBD 体积力测试, PIV 测试, 冲击波特性测试, 发射光谱的诊断。发现水平方向体积力远小于垂直方向体积力, 诱导流场向上, 且速度很低(<1 m/s), 冲击波速度开始为超声速, 逐渐衰减为音速(60 μ s 之后)。在抑制流动分离上, 实现了 $Ma=0.5$, $Re=2.3\times 10^6$ 下 RAE2822 翼型有效控制。梁华等人^[9]对表面介质阻挡放电的能量转化过程进行了研究, ns 脉冲最大放电电流最大, 能耗最低, ns 脉冲等离子体气动激励的能量利用率最高, μ s 脉冲次之, ms 脉冲最弱。赵光银等人^[10]研究平面和锯齿类型

引用格式: 赵光银, 梁华, 李应红, 等. 表面介质阻挡纳秒脉冲放电能量特性和诱导流动特性研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1195–1206
Zhao G Y, Liang H, Li Y H, et al. Study of electrical characterization and induced flow by nanosecond pulsed dielectric barrier discharge actuator (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1195–1206, doi: 10.1360/N092014-00389

高压电极的表面介质阻挡放电激励器。在纳秒脉冲电压驱动下, 比较三种激励器放电能量、峰值功率、峰值电流、表面红外辐射温度。认为锯齿形激励器在流动控制上具有潜在优势; 对不同时间尺度的等离子体气动激励的放电特性和体积力等进行了测试诊断^[11], 纳秒脉冲的最大放电电流明显高于毫秒和微秒脉冲, 但是体积力却低于毫秒和微秒脉冲。Chen 等人^[12]通过求解带电粒子漂移扩散方程和泊松方程, 得到 NS DBD 放电粒子时空分布; 以焦耳热表征 NS DBD 放热耦合到流体方程, 研究临近空间 NS DBD 放电特性与气动响应规律。西北工业大学的李结等人^[13]通过粒子图像测速研究 NS DBD 诱导流动特性, 发现诱导速度大小不足 0.3 m/s, 主要诱导流场在逆电势方向。

俄罗斯 Starikovskii^[4]进行了不同脉宽的 ns 脉冲驱动 DBD 的实验, 放电图像表明放电是丝状放电, 且存在二次放电, 诱导气流的时均速度接近于 0, 研究了放电频率与诱导速度的关系, 频率对诱导速度有一定的影响, 但是在 0.1~10 kHz 范围内不超过 0.3 m/s, 发现 7, 12 和 50 ns 脉宽的电压可分别使等离子体层温升达到 70, 200, 400 K。快速加热产生激波和旋涡。文献[4]对 NS DBD 与气压的关系进行了研究, 在气压大于 200 torr, 放电能量与气压成反比, 近似线性关系。Takashima 等人^[14]通过实验研究了 NS DBD 放电能量与放电参数之间的关系。单次放电能量随激励峰值电压成近似指数关系; 同时得到, 单次放电能量与放电脉冲频率相关, 频率越大, 单次放电能量越大。Little 比较了毫秒和纳秒脉冲介质阻挡放电能量和功率, 得到在同样的频率和电压幅值下, NS DBD 激励器的平均功率低于 AC DBD, 且证实了 NS DBD 前缘分离控制能力优于 AC DBD, 而对尾缘无缝偏转襟翼分离控制效果不如 AC DBD^[15]; 研究了电压信号的正负极性、电压幅值、激励器长度、介质厚度的影响^[16], 对于薄介质层的激励器, 负极性的脉冲可以产生稍高的放电能量; 对于厚介质层的激励器, 正极性的脉冲可以产生稍高的放电能量。但是差异量竟然不超过测量误差。在给定脉冲电压和脉冲能量, 负极性脉冲电压可产生较强的冲击波。同时认为, 负极性放电可以产生更加强烈和均匀的等离子体; 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。冲击波强度随厚度的减小而增强, 虽冲击波强度有所不同,

但是其运动速度均是 $Ma=1$, 即为音速冲击波^[17]。文章中得出是音速的结论与理论不符, 因为随着电压的增大, 能量增大, 用于加热的能量增大, 使得冲击波形成之初的超压不同; 有超压, 则开始时冲击波必然是超音速^[18], 而实验中通过纹影求的冲击波传播为音速^[17], 但是从像素强度上认为冲击波有强度上的差异, 原因可能是纹影实验时间分辨率较大引起的。Zheng 等人^[19]建立一维自洽等离子体模型, 耦合可压 N-S 方程, 研究了电压对诱导冲击波的影响, 电压较低时, 冲击波为音速波, 当电压较高时, 可诱导较强的冲击波, 而后在几个微秒迅速衰减。冲击波特性和运动主要由峰值电压主导, 在给定电压下, 上升沿不会明显影响冲击波的整体结构和强度, 在激励后 35~40 μs 时激励区产生了对流, 但是强度较低; 通过实验和仿真研究了 NS DBD 诱导冲击波行为^[20], 冲击波在放电后 1~4 μs 形成, 依赖于输入电压, 而后由超音速迅速衰减至音速(距激励器 2~3 mm 位置, 5 μs 内), 冲击波诱导的冲击扰动(过压和速度)区域局限于激波波前后方一个很窄(约 1 mm)的区域, 存在仅几个微秒, 在放电之后存在一个相当弱的旋涡, 持续相对较长的时间。文献[21]采用正、负极性 ns 脉冲电压驱动激励器, 比较了电流特性, 能量沉积, 等离子体传播图像。发现正、负极性 ns 脉冲电压分别导致的是流注放电和电晕放电。然而, 他们所形成的均是音速冲击波。冲击波的强度与沉积能量直接相关, 而沉积能量与电压幅值成正比, 与上升沿时间成反比, 与脉宽关系不大。总的来说, 其实验条件下(峰值电压小于 10 kV)的沉积能量较低, 在 0.3 mJ/cm 以下, 可能是其得到音速压力比的原因。然而, 其得到的正极性的放电能量稍高于负极性的放电能量, 与上述文献略有不同。

本文聚焦于表面介质阻挡纳秒脉冲放电的基本问题, 设计了不同激励器结构, 从放电能量、诱导流动时均特性和瞬时特性、诱导冲击波传播特性等角度入手, 结合仿真, 研究纳秒脉冲介质阻挡放电诱导流场特性和能量特性。

2 实验系统及测试状态

2.1 实验系统

实验系统包括: 纳秒脉冲等离子体电源, 激励器,

粒子图像测速仪(PIV)系统, 放电参数测试系统, 纹影仪。

纳秒脉冲等离子体电源: 输入为 0~220 V, 50 Hz 的交流电, 输出电压为 2~100 kV, 上升沿为 10~25 ns, 半高宽为 30~40 ns, 下降沿为 20~25 ns, 脉冲频率为 200~2000 Hz 可调。DBD 等离子体气动激励器由电极、绝缘介质组成。高低压电极为铜箔, 厚度为 0.018 mm; 采用三层 Kapton 胶带作为绝缘介质, 单层胶带厚度为 0.065 mm。实验中采用的高低压电极宽度均为 10 mm, 高低压电极的间隙根据实验内容分为 -1, 0, 1 mm 三种。

采用粒子图像测速仪(particle image velocimetry)来测量等离子体气动激励诱导空气流动的流场特性。采用双脉冲的 Nd:YAG 激光器, 脉冲激光能量最大可达 135 mJ, CCD 相机像素为 1.6 k×1.2 k; 图像的后处理软件为 Davis7.0。对每一对图像, 查询区进行图形互相关处理时采用减小窗口大小 (64^2 pixel~ 32^2 pixel) 的多通道处理, 窗口重叠量 50%, 经后处理消除的乱真矢量通过邻近矢量平均插值得到。3×3 的高斯平滑滤波器用于计算后的速度场。

放电参数测试系统, 包括 DPO4104 示波器、P6015A 高压探针、TCPA300+TCP312 电流探针组合, 用于测量等离子体气动激励器放电的电压、电流等参数, 示波器的采样频率为 5 GHz。

采用 PCO.Dimax HS1 高速相机捕捉纳秒脉冲放电等离子体激励诱导流动的纹影图像。相机的最大帧频 180000 fps, 分辨率为 1000 pixel×1000 pixel, 相机的曝光时间为 0.00128 ms。实验中采用激励器放电电流触发高速相机采集。

2.2 测试状态

实验主要研究了激励器放电能量特性、PIV 测试诱导流动特性、纹影仪测量冲击波传播特性。放电能量特性的研究包括放电能量随激励器长度的关系, 放电能量随电压的关系, 放电能量随频率的关系, 放电能量随电极间隙的关系。PIV 测试诱导流动特性的研究包括电压对诱导流动的影响, 脉冲放电频率对诱导流动的影响。纹影仪测量冲击波传播特性的研究包括电极间隙对冲击波传播特性的影响, 电极形状对冲击波传播特性的影响, 电压对冲击波传播特性的影响。

3 实验结果

3.1 放电能量特性

首先进行不同展长激励器放电能量测试研究。单次脉冲激励放电能量表征激励强度, 是衡量流动控制效果的重要参数。通过 NS DBD 电压-电流波形可计算出单次脉冲放电能量。设计了长度分别为 10, 15, 20 cm 的 3 种激励器, 高低压电极间隙 d 为 0 mm, 如图 1(a)。固定激励频率为 500 Hz, 研究单位长度激励器放电能量对电压的依赖关系。

3.1.1 与激励器展长、激励电压、脉冲频率关系

同一电极间隙, 不同长度激励器单位展长放电能量随电压的变化如图 2(a)所示。不同长度激励器的数据有较好的吻合性, 可认为激励器长度对单位展长激励器放电能量影响较小; 随着激励电压增大, 单位展长激励器单次放电能量随激励电压增大而非线性增大, 这与文献[14]研究结果一致。同时本文得到的 NS DBD 放电能量在 mJ/cm 量级, 这与文献[4,14,22]结果一致。

Takashima 等人^[14]通过实验方法研究了 NS DBD 放电能量与放电脉冲频率之间的关系。发现单次放电能量与放电脉冲频率相关, 频率越大, 单次放电能量越大。本文研究了脉冲频率的对单次放电能量的影响, 如图 2(b)。利用实验室现有电源, 在大气压下,

图 1 实验用激励器结构示意图

(a) 同间隙不同展长的三组激励器; (b) 同展长不同间隙的三组激励器

图2 (网络版彩图) 单次放电能量与峰值电压和激励脉冲频率的关系

(a) 不同激励器长度下单次放电能量与峰值电压关系; (b) 不同电压下单次放电能量与激励脉冲频率关系

对纳秒脉冲电源进行类似的研究. 所用激励器长度为 10 cm, 激励器高低压电极之间间隙为 -1 mm, 如图 1(b). 限于电源可调频率的范围, 只进行 200~2000 Hz 范围内研究. 图 2(b) 为激励电压峰值 6, 10, 14 kV 下, 单位展长激励器放电能量与脉冲频率的关系. 可看到, 放电能量随激励频率的变化量较小, 可以认为单位展长激励器单次放电能量与脉冲激励频率没有关系.

通过对 NS DBD 放电能量与脉冲频率的关系, 可以得出结论, 本文所使用的纳秒脉冲电源在表面

介质阻挡放电中, 其单次放电能量并没有表现出对频率的依赖性. 与国外有关文献[14]结论不同, 而与文献[22]的研究结果一致. 分析原因, 这可能与电源的结构和设计原理有关.

3.1.2 与电极间隙关系

电极间隙是激励器结构设计的重要参数, 间隙过大则放电困难. 实验选用展长为 20 cm 的激励器, 固定激励频率为 500 Hz, 对高低压电极间隙分别为 -1, 0, 1 mm 的三组激励器进行放电特性的比较, 来研究高低压电极间隙对放电能量影响. 结果如图 3, 可看出电极间隙对放电能量是有一定影响的, 有待进一步深入研究. 由于放电本身的随机性和测量误差, 这里的结果没有表明出明显的规律性的差异, 从放电图像看(见图 4), 间距增大, 放电呈现不均匀的, 电流波形也较为杂乱.

通过观察放电图像, 间距为 1 mm 的激励器起始放电电压稍高于另外两组, 且三者放电形态有所不同, 1 mm 的激励器放电呈现明显的丝状, 放电展向分布也没有另外两组均匀. 距离增大则会造成放电起始时刻延迟, 意味着放电难度加大.

3.1.3 放电能量与功率分析

根据放电电压-电流波形, 对 NS DBD 放电能量和功率进行了分析, 选择长度为 10 cm, 电极间隙 0 mm 的激励器(同图 1(b))作为研究对象. 表 1 给出了

图3 (网络版彩图) 不同电极间隙的激励器单位展长放电能量随电压的变化, $f=500$ Hz

图 4 (网络版彩图)不同电极间隙对放电图像, $V_{p-p}=8\text{ kV}$, $f=500\text{ Hz}$

表 1 NS DBD 放电能量和功率特性(激励器长度 10 cm)

峰峰值电压	脉冲能量	脉冲功率	时均功率	最大瞬时功率
8 kV	0.45 mJ	225 W	0.225 W	5 kW
12 kV	1.55 mJ	774 W	0.774 W	23 kW
20 kV	13.65 mJ	6.8 kW	6.8 W	270 kW

该激励器在不同电压下, 固定脉冲频率 500 Hz, 激励器放电时的脉冲能量, 脉冲功率, 周期时均功率, 最大瞬时功率.

可看出, 随着激励电压的增大, 脉冲放电能量和功率均增大; 对于 10 cm 长的激励器, 500 Hz 激励时 NS DBD 时均功率较低, 在 0.1~1W 量级; 脉冲功率较大, 可达 0.1~1 kW 量级; 最大瞬时功率可达 1~100 kW 量级.

3.2 PIV 结果

进行 NS DBD 诱导流场 PIV 测试, 旨在研究重频激励稳定后, 激励对流场时均作用效果. 主要研究脉冲频率、激励电压对诱导流动影响. 所选激励器高低压电极间隙为 0 mm, 激励器长 10 cm, 其结构同图 1. 图 5 为不同激励参数下的测试结果. $x=0$ 处为高低压电极间隙对应位置, 其左为低压电极, 其右为高压电极. 由于 NS DBD 诱导速度较低, 其测量误差一方面

图 5 (网络版彩图)不同脉冲频率和电压下纳秒脉冲放电等离子体气动激励诱导的速度场

(a1) $V_{p-p}=10.5\text{ kV}$, $f=200\text{ Hz}$; (a2) $V_{p-p}=15\text{ kV}$, $f=200\text{ Hz}$; (b1) $V_{p-p}=10.5\text{ kV}$, $f=1000\text{ Hz}$; (b2) $V_{p-p}=15\text{ kV}$, $f=1000\text{ Hz}$; (c1) $V_{p-p}=10.5\text{ kV}$, $f=1500\text{ Hz}$; (c2) $V_{p-p}=15\text{ kV}$, $f=1500\text{ Hz}$

与 PIV 的测量的背景速度场有关(在 0.01 m/s 以下); 另一方面通过优化算法, 使每次处理得到的乱真矢量的个数不大于 5%.

图 6 给出了不同激励电压和频率下诱导流场最大速度值, 结合图 5, 可以得到如下结论.

在相同的激励电压下, 随着激励频率的增大, 诱导最大速度成上升趋势, 在 13 和 15 kV 时表现得尤为明显, 这是因为脉冲频率提高, 单位时间内放电次数增多, 向流场注入较多的能量, 一方面可使局部气体瞬间加热, 使近激励区热对流增强; 另一方面, 电场对放电粒子做功随重频增大而增大. 故而脉冲激励频率增高, 最大诱导速度亦提高.

电压对诱导流动的影响更倾向于改变诱导速度的方向. 随激励电压增大, 放电能量增大, 同时放电能量转化为热量的比例增大, 一方面气体受热带来浮力的影响加大, 另一方面冲击波传播出去后激励区内气体的对流加剧也使得诱导流动方向向上. 而电压对最大诱导速度的影响没有明显规律.

总之, NS DBD 诱导流动的速度较低, 在 0.1 m/s 量级上; 诱导速度激励电压提高变化不明显; 随激励频率增大有所增大.

3.3 纹影测试结果

3.3.1 电极间隙的影响

固定激励频率为 200 Hz, 相机采集分辨率 702 pixel×282 pixel. 10 cm 的激励器根据高低压电极的间隙分为-1, 0, 1 mm 的三组激励器进行比较, 来研究

图 6 (网络版彩图)不同激励电压和频率下诱导流场最大速度值

高低压电极间隙对诱导冲击波的影响. 根据所得纹影图像上灰度峰值确定冲击波运动位置, 结合对应的时刻, 计算出冲击波帧内的平均运动速度. 测试时环境温度 28.9°C, 气压 92.8 kPa. 激励电压为 $V_{p-p} = 13.4 \text{ kV}$, 激励频率为 200 Hz 时, 相机帧频 18729.397 fps, 单次激励诱导流动纹影图像如图 7.

由于从放电开始到冲击波形成需要一定的时间, 以电压或者电流触发相机的时刻为冲击波形成的初始时刻是不科学的, 这样计算出的冲击波速度误差较大. 本文将冲击波初始形成某一时刻为参考时刻, 计算冲击波的传播速度. 图 7 为不同电极间隙的激励器在同一电压驱动下诱导的冲击波纹影图像, 三者诱导冲击波结构及其传播位置上无明显差异. 由于相机的分辨率造成的数据处理误差约为一个像素 ($\approx 0.188 \text{ mm}$), 对应计算传播速度误差约 3.52 m/s. 由第一帧均速 355.5 m/s 可推测出冲击波在形成初始

图 7 (网络版彩图)单次激励诱导流动纹影图像($V_{p-p} = 13.4 \text{ kV}$)

(a) t_0 ; (b) $t_0 + 53.392 \mu\text{s}$; 355.5 m/s; (c) $t_0 + 106.784 \mu\text{s}$; 348.46 m/s

以超音速向外传播;第二帧均速为 348.46 m/s, 已经衰减为音速. 由于本文测量设备的限制, 时间分辨率较大(帧间隔 53.392 μs), 未能细致捕捉到冲击波初始运动速度.

3.3.2 高压电极结构的影响

设计了长度相等的具有锯齿形和平面形高压电极的 3 种激励器, 电极材料、宽度、长度相同, 绝缘介质厚度相同, 高低压电极间隙均为 0 mm. 激励器结构示意图见图 8, 其中高压电极的形状为 14 齿、7 齿和平面.

在激励电压为 $V_{p-p}=20$ kV, 激励频率为 200 Hz, 比较三种激励器诱导冲击波的特性. 图 9 给出了这三种激励器诱导冲击波图像, 相机的分辨率为 602 pixel $\times$ 302 pixel, 帧频为 26928.048 fps. 由于相机分

图 8 (网络版彩图)三种激励器结构及其放电图像($V_{p-p}=10$ kV, $f=1$ kHz)

辨率造成的误差约为一个像素(≈ 0.164 mm), 对应计算传播速度误差约 4.4 m/s.

图 9 可得, 在同一时刻, 三种激励器在诱导冲击波位置上没有明显差异, 但冲击波结构有所不同, 对平面形激励器, 诱导形成冲击波比较分散随机, 可反映出放电是随机性较强的丝状放电, 放电通道的随机性导致冲击波分布的随机性. 对锯齿形的激励器, 其诱导冲击波的位置比较集中, 因为放电集中于齿尖处, 冲击波位置集中在齿尖处, 诱导冲击波个数与齿尖个数一致. 因放电通道更为集中, 放电能量更为集中, 锯齿形的激励器理应诱导更强的冲击波, 推测原因是诱导冲击波较弱, 为近音速波, 致使不同结构激励器诱导冲击波速度相近, 位置的差异没有能体现出来. 在冲击波形成至第一帧时刻(37.136 μs), 传播速度为 357.3 m/s, 其后帧内的均速为音速, 即 348.46 m/s.

同时图 10 给出了平面形和锯齿形诱导冲击波初始时刻(2.18 μs)的图像, 可以看出初始冲击波呈弧形, 但运动的位置不尽相同, 有推测原因有二: 一是放电的随机性使得放电通道内能量分布不均, 从而使各放电通道诱导形成的冲击波强度不一; 二是放电的随机性, 也使得各放电通道在时间上存在先后, 致使各通道内能量释放有一定的时间差. 由于放电的本质是丝状放电, 使得平面形的激励器上诱导的也是随机分布的个数不确定的冲击波. 此外还进行了不

图 9 三种激励器诱导冲击波图像($V_{p-p}=20$ kV, $f=200$ kHz)

图 10 平面形和锯齿形激励器诱导冲击波初始时刻(2.18 μ s)图像

(a) 平面 2.18 μ s; (b) 14 齿 2.18 μ s

同激励电压下的实验, 得出了同样的结论: 激励诱导冲击波的传播速度与激励电压关系不大, 以近音速的速度向外传播, 然而, 不同电压诱导的冲击波纹影图像在灰度上和冲击波结构上有一定的差异, 或许用传播速度表征其差别在这种微观的、分辨率不够的情况下不合理. 基于这种考虑, 进行了不同能量注入的唯象学仿真, 来研究冲击波速度与激励强度的关系.

同时, 根据所得纹影结果, 发现在冲击波传播出去之后, 近激励区形成了近似“蘑菇云”状的流动, 见图 11. 如果用该密度梯度运动近似表征近激励区诱导流动的运动, 可以通过其运动变化对应的时刻计算出近激励区密度梯度的传播速度. 从诱导流动的

图 11 蘑菇云图

(a) T ; (b) $T + 55$ ms

蘑菇云图上可以看出是有差异的, 锯齿形的云图相对集中, 比较明显, 平面形的相对分散. 总体而言, 共同点是诱导流动是向上的. 在激励后不同时刻其运动速度在 1.5 m/s 以下. 开始最大, 不超过 1.5 m/s, 随后降低到 1 m/s 以下. 可作为 PIV 所测结果的补充, 由于 PIV 测量的帧频较低, 时间分辨率不够精细, 难以精细捕捉单脉冲诱导流动的瞬时运动.

4 仿真结果

将 NS DBD 放电对流场的作用简化为热量注入, 用功率密度表征其强度, 通过能量源项加载到流体能量方程, 研究不同注入能量对诱导冲击波速度的影响, 分析近激励区诱导流场的运动. 采用非定常可压缩 Navier-Stokes 方程来描述流场. 该唯象学模型在文献[23]中进行了详细介绍. 对 NS DBD 激励平板静止流动做了分析, 选取层流模型求解. 代表激励强度的热源以功率密度 Q 的形式表征. 热功率的作用时间固定为 200 ns, 选取五种 Q 值(对应注入能量分别为 0.112, 0.778, 3.11, 15.57, 31.4 mJ/cm)进行研究, 固定时间步长 $\Delta t=5$ ns. 计算域 x 方向: $-0.015 \sim 0.015$ m; y 方向: $0 \sim 0.015$ m. 网格采用均匀网格, 数量 50 万 (x 方向 1000, y 方向 500). 计算域及热源分布如图 12. 矩形计算域的上、左、右为压力出口, 静止大气环境 $p_0=101325$ Pa, $T=300$ K.

图 13 给出不同时刻 $x=0$ 处法向压力的演化过程, 在激励施加时, 由于激励区被瞬间加热, 激励区近似定容过程, 温度和压力瞬间得到提升. 逐渐形成冲击波, 其形态近似为弧形或半圆型, 冲击波在向外传播过程中, 一方面由于黏性耗散的作用, 另一方面冲击波弧形形态尺寸变大使得冲击波能量变得分散, 从而使得冲击波强度逐渐衰弱.

图 12 (网络版彩图)计算域及热源分布

图 13 (网络版彩图)不同时刻 $x=0$ 线上的静压分(3.11 mJ/cm)

图 14 给出了激励后 10, 20, 30 μs 流场和压缩-膨胀波发展过程. 近壁面激励区能量密度大, 开始产生的冲击波强度较大, 随后冲击波向远离壁面传播. 观察流线变化, 在 10 μs 激励形成的“驻点”线发展为半圆形, 将激励区包围其中. 同时, 由于膨胀波的作用, “驻点”线内部流动向激励区附近汇聚, 逐渐发展形

图 14 不同时刻冲击波位置和流场(3.11 mJ/cm)
(a) $t=10\ \mu\text{s}$, (b) $t=20\ \mu\text{s}$, (c) $t=30\ \mu\text{s}$

成焦点型旋涡, 如图 14(b); 之后, 运动的旋涡逐渐发展为两个反方向旋转的旋涡, 如图 14(c), 诱导流场向上运动, 与实验结果吻合.

图 15 为不同强度的热源诱导冲击波位置随时间的变化曲线. 表 2 给出不同注入能量激励结束后诱导的温升和压升, 以及诱导冲击波速度. 比较发现, 随着注入能量的增大, 激励后的温升和压升随之呈近似线性增长, 诱导冲击波的传播速度越大; 图 15 中曲线的斜率说明初始冲击波具有较高的速度, 随后很快衰减, 具体结果见表 2. 在 30 μs 处, 接近实验条件的热源 0.112 mJ/cm 诱导的冲击波位置与对应的音速扰动位置差距约 0.125 mm, 说明就目前 NS DBD 而言, 其放电能量诱导的冲击波速度接近音速, 与实验纹影测出的结果对应. 实验中由于时空分辨率的限制, 难以细节上分析冲击波的速度演化, 仿真可以作为实验的补充.

在 2.5~5 μs 时, 五种能量值诱导冲击波平均速度均为超音速, 注入能量值越高, 诱导冲击波速度越高, 但是其随能量增大的增长率是下降的, 如图 16. 在

图 15 (网络版彩图)不同强度的热源诱导冲击波位置

表 2 不同能量注入诱导冲击波速度

注入能量 (mJ/cm)	激励后温 升 ΔT (K)	激励后压 升 ΔP (Pa)	2.5~5 μs 均速 (m/s)	25~30 μs 均速 (m/s)	2.5~30 μs 均速 (m/s)
0.112	16.4	5536	353.6	351	351.82
0.778	114	36941	372	357	364.9
3.114	456	143664	420	372	388.36
15.57	2294	644625	516	390	433.1
31.14	4646.5	1179350	600	402	459.3

图 16 (网络版彩图)不同脉冲能量下的冲击波波速

25~30 μs 时, 平均速度比初始时大幅衰减. 当注入能量较低时, 产生的冲击波速度较低, 近于音速. 结合国内外研究进展和本文测量结果, NS DBD 单次放电能量较低, 在 0.1~1 mJ/cm 量级, 且放电能量转化为热量的比例与约化场强有关. 由此, 冲击波纹影试验中对应转化的热量应在 1 mJ/cm 以下, 由于试验中帧间隔较大, 得到的冲击波平均速度近于音速, 与仿真

结果相符. 图 17 为冲击波数值纹影图, 灰度的不同直观上表明冲击波强度不同.

5 结论

研究表面介质阻挡纳秒脉冲放电能量特性和诱导流动特性研究, 主要得出以下结论.

(1) 单位展长激励器单次放电能量随激励电压增大而非线性增大, 其值在 0.1~1 mJ/cm 量级, 与激励器长度无关, 与激励频率无关; NS DBD 瞬时功率可达几百千瓦, 而时均功率较低, 仅为瓦量级.

(2) NS DBD 诱导流动的速度较低, 在 0.1 m/s 量级上; 诱导速度的提升随激励电压提高变化不明显; 随激励频率增大有所增大. 锯齿形的激励器, 在放电能量上与平面形无较大差异, 但诱导冲击波数量上较少, 理应具有更强的强度.

(3) 从平面形激励器可以看出, 冲击波分布有随机性, 应是丝状放电的随机通道引起的, 侧面反映了表面 NS DBD 本质上是丝状放电; 有的通道波强, 有的通道波弱, 到一定时间后位置的差异不明显, 纹影灰度上可看出不同电压下冲击波强度存在差异.

图 17 三种不同沉积能量诱导的冲击波数值纹影

A1~A4 对应沉积能量 0.112 mJ/cm; B1~B4 对应沉积能量 0.778 mJ/cm; C1~C4 对应沉积能量 3.114 mJ/cm

(4) 不同电极间隙激励器和不同电极形状激励器诱导冲击波位置无明显差异, 说明本文选取的不同结构激励器放电时的释放能量没有量级上的差异.

不同强度激励的唯象学仿真证实了不同沉积能量诱导冲击波速度不同, 与实验条件下相应的沉积能量诱导冲击波波速近于音速.

参考文献

- 1 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. 航空学报, 2008, 29: 1429–1435
- 2 李应红, 吴云, 梁华, 等. 提高抑制流动分离能力的等离子体冲击流动控制原理. 科学通报, 2010, 55: 3060–3068
- 3 Rethmel C, Little J, Takashima K, et al. Flow separation control over an airfoil with nanosecond pulse driven DBD plasma actuators. AIAA-2011-487, 2011
- 4 Starikovskii A Y, Nikipelov A A, Nudnova M M, et al. SDBD plasma actuator with nanosecond pulse-periodic discharge. Plasma Sources Sci Technol, 2009, 18: 034015
- 5 Bisek N J, Poggie J, Nishihara M, et al. Computational and experimental analysis of Mach 5 air flow over a cylinder with a nanosecond pulse discharge. AIAA 2012-0186, 2012
- 6 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. 航空学报, 2014, 3: 657–665
- 7 朱益飞. 纳秒脉冲介质阻挡放电等离子体气动激励建模仿真研究. 西安: 空军工程大学. 2013
- 8 Wu Y, Hong Y, Liang H, et al. Nanosecond pulsed discharge plasma actuation: Characteristics and flow control performance. In: 45th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Atlanta, AIAA 2014-2118
- 9 梁华, 李应红, 贾敏, 等. 等离子体气动激励的能量转化过程分析. 高电压技术, 2010, 36: 3054–3058
- 10 赵光银, 李应红, 方浩百, 等. 锯齿形等离子体激励器纳秒脉冲放电与红外辐射温度特性研究. 高电压技术 2014, 40: 2077–2083
- 11 赵光银, 梁华, 吴云, 等. 不同时间尺度等离子体气动激励特性的测试诊断. 空军工程大学学报, 2011, 12: 20–24.
- 12 Che X K, Shao T, Nie W S H, et al. Numerical simulation on a nanosecond-pulse surface dielectric barrier discharge actuator in near space. J Phys D Appl Phys, 2012, 45: 145201
- 13 李结, 李华星, 王健磊, 等. 纳秒脉冲等离子体对静止大气的激励特性. 西北工业大学学报, 2014, 2: 176–180
- 14 Takashima K, Zuzek Y, Lempert W R, et al. Characterization of a surface dielectric barrier discharge plasma sustained by repetitive nanosecond pulses. Plasma Sources Sci Technol, 2011, 20: 055009
- 15 Little J C. High-lift airfoil separation control with dielectric barrier discharge plasma actuators. Dissertation of Doctor Degree. Ohio State: The Ohio State University, 2010
- 16 Dawson R A, Little J. Effects of pulse polarity on nanosecond pulse driven dielectric barrier discharge plasma actuators. J Appl Phys, 2014, 115: 043306
- 17 Dawson R, Little J. Characterization of nanosecond pulse driven dielectric barrier discharge plasma actuators for aerodynamic flow control. J Appl Phys, 2013, 113: 103302
- 18 余文力, 王涛, 高云亮. 爆炸气体动力学基础. 北京: 兵器工业出版社, 2007. 226–229
- 19 Zheng J G, Zhao Z J, Li J, et al. Numerical simulation of nanosecond pulsed dielectric barrier discharge actuator in a quiescent flow. Phys Fluids, 2014, 26: 036102
- 20 Zhao Z J, Li J M, Zheng J G, et al. Study of shock and induced flow dynamics by pulsed nanosecond DBD plasma actuators. In: 52nd Aerospace Sciences Meeting, National Harbor, Maryland, AIAA 2014-0402
- 21 Benard N, Zouzou N, Clavier A, et al. Optical visualization and electrical characterization of fast-rising pulsed dielectric barrier discharge for airflow control applications. J Appl Phys, 2012, 111: 033303
- 22 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. 强激光与粒子束, 2012, 24: 592–596
- 23 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. 物理学报, 2015, 64: 015101

Study of electrical characterization and induced flow by nanosecond pulsed dielectric barrier discharge actuator

ZHAO GuangYin, LIANG Hua, LI YingHong, HUA WeiZhuo, HAN MengHu & WU Yun

Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

Focusing on the basic issues of nanosecond pulse dielectric barrier discharge (NS DBD), different actuators are used to investigate the electrical properties, induced flows and shock wave by NS DBD. The results indicate that the coupled energy per unit length is basically controlled by the peak voltage and is nearly independent of the actuator length and the pulse frequency. The peak powers can up to several hundred kW, while the average power for the NS DBD is slightly low, on the orders of W. The very small induced flow velocity of NS DBD is on the order of 0.1 m/s. The compression waves are observed after discharge, initially spread faster than the speed of sound. Phenomenological simulation validates that deposited energy at different levels can bring shock wave propagates at different speed. Deposited energy corresponding to the experiment induces compression wave that propagates close to the speed of sound.

plasma actuation, nanosecond pulse, shock wave, dielectric barrier discharge, induced flow

doi: 10.1360/N092014-00389