

表面介质阻挡放电等离子体体积力实验

田希晖¹, 周朋辉², 聂万胜¹, 李晓楠³, 车学科¹, 侯志勇¹

(1. 装备学院 航天装备系, 北京 101416;

2. 中国人民解放军 95927 部队, 河北 沧州 061736;

3. 空军指挥学院 外训系, 北京 100097)

摘 要: 采用粒子图像测速(PIV)技术,在2200,4800,7300,14600 Pa空气压力条件下,测量了高频高压表面介质阻挡放电(surface dielectric barrier discharge, SDBD)等离子体诱导流场。根据速度场和N-S方程求解了等离子体体积力分布,分析了空气压力和激励器电压对等离子体体积力影响。实验结果表明:相同空气压力时,激励器电压越高体积力越大,相同激励器电压时,体积力随空气压力升高减小。在体积力分布区域,体积力方向一致,较大体积力区域分布于体积力方向线上游,流场高速流动区域紧挨较大体积力分布区域,位于体积力方向线下游。

关 键 词: 表面介质阻挡放电; 等离子体; 体积力; 空气压力; 粒子图像测速

中图分类号: V211

文献标志码: A

Experiment on plasma body force of SDBD

TIAN Xi-hui¹, ZHOU Peng-hui², NIE Wan-sheng¹,

LI Xiao-nan³, CHE Xue-ke¹, HOU Zhi-yong¹

(1. Department of Space Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. The Unit 95927, the Chinese People's Liberation Army, Cangzhou Hebei 061736, China;

3. Department of Foreign Training, Air Force Command College, Beijing 100097, China)

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) technology was applied to obtain the flow field induced by high frequency and high voltage SDBD plasma aerodynamic actuation at pressures of 2200, 4800, 7300, 14600 Pa. The body force was calculated though N-S equation based on the velocity field, and the effects of air pressure and voltage on the plasma body force were analysed. Experiments showed that: at the same air pressure, the body force increased at a higher voltage, while at the same voltage, the body force decreased at a higher air pressure. The body force direction lines are consistent at the body force distribution region, and comparatively large body force area is located at the upstream region of the body force direction lines and comparatively fast velocity area is located at the downstream region of the body force direction lines.

Key words: surface dielectric barrier discharge (SDBD); plasma; body force; air pressure; particle image velocimetry (PIV)

基于等离子体气动激励的表面介质阻挡放电(SDBD)等离子体流动控制技术,通过等离子体与空气分子的碰撞,能够将电能转化为动能,可有

效改变飞行器气动性能,在飞行器增升减阻、发动机增效等方面具有巨大的潜在应用前景,已成为国际空气动力学领域的研究热点^[1-8]。

收稿日期: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(11205244)

作者简介: 田希晖(1971—),男,山东青州人,副教授,博士,主要研究方向为等离子体流动控制。

国内外对 SDBD 等离子体流动控制技术进行了大量的仿真和实验研究,但其内在机理仍不清楚.主要的仿真研究模型有唯象学模型^[9-10]、集总参数电路模型^[11]、多场耦合流体力学模型^[12-13]和粒子群模型^[14].在仿真研究等离子体气动激励对边界层气流作用时,唯象学模型具有不可替代的地位.唯象学模型构建方式符合等离子体气动激励宏观物理过程,计算量小,核心是如何构建添加 N-S 方程体积力源项,体积力源项直接关系到模型的准确性.近几年来,通过研究体积力分布来完善唯象学模型成为等离子体流动控制技术研究的重要方向. Marios 等人^[15]根据 PIV 实验数据,通过求解 N-S 方程,研究了 SDBD 体积力分布情况,并通过实验对计算结果合理性进行了验证.此后 Murphy 等人^[16]利用 PIV 技术,研究了最大诱导速度和体积力随电压及激励器参数的变化规律. Kriegseis 等人^[17]根据动量守恒方程和 N-S 方程,研究了体积力随电压的变化规律和体积力在电极表面的二维空间分布. Meng 等人^[18]测量了 SDBD 流场的压强变化,采用相同办法,研究了 N-S 方程中有无压强项对体积力二维空间分布的影响, Wang 等人^[19]也进行了类似研究.

飞行器全空域的飞行现实,要求研究等离子体流动控制技术必须考虑压力的影响,但目前利用 PIV 技术对体积力二维空间分布的研究全部是在常压条件下展开的,低压条件下体积力分布研究还没有.本文采用 PIV 技术测量了不同空气压力下,高频高压 SDBD 等离子体诱导流场,根据 N-S 方程求解了等离子体体积力分布,分析了激励器电压以及空气压力对体积力的影响.

1 实验系统

实验系统主要包括:低压实验舱及其控制系统、PIV 系统、SDBD 激励器、激励电源系统. 低压实验舱净尺寸为 1 000 mm × 800 mm × 1 750 mm (长 × 宽 × 高)如图 1(a)所示,辅助设备包括充气阀、微调阀、薄膜规、温度传感器、隔断室、氮气瓶等,实验舱气压由真空罐控制柜控制,极限真空度为 10 Pa,真空泵抽速为 14 L/s. PIV 观测范围为 165 mm × 165 mm,计算网格步长为 1.312 mm,壁面位于观测区 $y=60$ mm 处.示踪粒子为烟粒子,由发烟饼燃烧产生,低压实验舱观察窗口直径为 200 mm,材料为 5 mm 厚钢化玻璃,透光性好.

SDBD 激励器电极采用铜箔制作,暴露电极和植入电极宽度均为 5 mm,极间距离为 0 mm,介

质层为 1 mm 厚的环氧树脂复合板.激励电源采用中国科学院电工研究所研制的高频高压电源 HFHV30-1,电压调节范围为 0 ~ 30 kV,频率调节范围 1 ~ 50 kHz.

实验设置如图 1(b)所示,激励器面板水平放置于低压实验舱内,下侧为暴露电极,上侧为植入电极;高频高压电源通过两个电压输送通道引入真空舱;激光器片光源镜头位于实验舱上方,激光束垂直于平板且激光在平板上投影与电极长轴垂直;PIV 相机光轴与电极长轴重合位于水平面内,PIV 相机焦平面为激光投影面.激励器面板为 $x-z$ 平面,激光面为 $x-y$ 平面, x 正方向从暴露电极指向植入电极, z 轴为电极长轴, y 轴垂直于 $x-z$ 平面指向上.

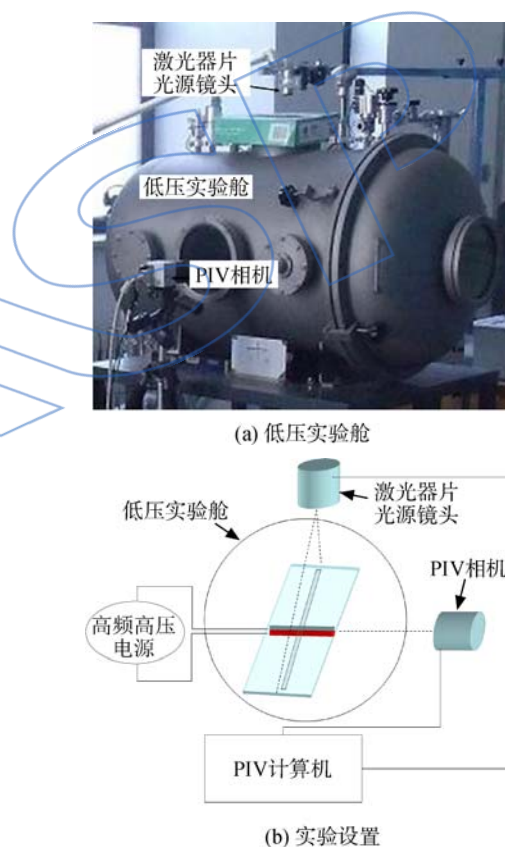


图1 实验系统

Fig. 1 Experiment system

2 体积力计算

PIV 系统实验数据为二维空间分布,因此选取二维 N-S 方程求解体积力分布,如式(1).

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} - \nabla^2 \mathbf{U} = -\nabla p + \frac{\mathbf{F}}{\rho} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{U}$ 为流场速度矢量, ν 为运动黏度, p 为空气压力, $\mathbf{F}$ 为体积力, t 为时间.假设流场为定常、层

流、不可压,忽略压强影响,则式(1)简化为

$$\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} - \nu \nabla^2 \mathbf{U} = \frac{\mathbf{F}}{\rho} \quad (2)$$

将式(2)沿 x, y 方向分解,分别得到 x, y 方向体积力求解公式

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) &= \frac{F_x}{\rho} \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) &= \frac{F_y}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 u, v 为速度分量,体积力合力求解需要考虑流线方向,公式推导如下。

如图 2(a)所示,位于同一流线上的两点 S_1 和 S_2 处速度分别为 U_1, U_2 , U_1, U_2 为流线切向速度,为标量。微团到达两点间隔时间为 Δt 。令

$$\mathbf{U} = f(s, t) \quad (4)$$

假设 S_1 点处速度为 $\mathbf{U}$, 经过 Δt 后, S_2 点处速度为

$$\mathbf{U} + \Delta \mathbf{U} = f(s + \mathbf{U} \Delta t, t + \Delta t) \quad (5)$$

按泰勒级数展开后得到

$$\begin{aligned} \mathbf{U} + \Delta \mathbf{U} &= f(s + \mathbf{U} \Delta t, t + \Delta t) = \\ &f(s, t) + \left[\frac{\partial f}{\partial s} \cdot \mathbf{U} \Delta t + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t \right] + o(\Delta t) \end{aligned} \quad (6)$$

忽略高阶小项 $o(\Delta t)$, 且同一般 N-S 方程法一样不考虑非定常项, 则式(2)左侧第 1 项化简为

$\mathbf{U} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s}$, 考虑黏性项后, 体积力合力公式为

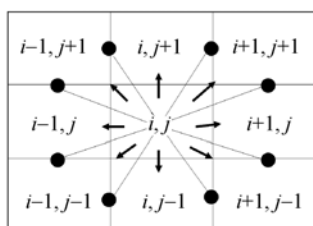
$$\mathbf{U} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} - \nu \left[\frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial l^2} \right] = \frac{\mathbf{F}}{\rho} \quad (7)$$

式中 s 为流线切线方向, l 为流线法向方向。

式(3)、式(7)均由式(2)推导得出, 因此数据处理过程中需要对速度方向进行判定。由 PIV 测量数据包含流场中每一数据点的流场矢量速度 $\mathbf{U}$, x 方向速度 u , y 方向速度 v 。图 2(b)为方向判



(a) 流线速度分布



(b) 方向选取

图2 数据处理

Fig. 2 Data processing

定方法, PIV 每一个数据点速度分为 8 个方向进行判定, 速度场 x, y 方向空间步长相等, 9 个区域均为正方形, 黑色实心点为几何点, 不具有实际物理意义, 外围 8 个点均位于相应正方形边线中心, 用其来判定速度方向。

3 实验结果

不同空气压力条件下, 激励器电压范围是不同的, 空气压力越低, 激励器电压越低, 相关数据见表 1。

表1 不同空气压力下激励器电压

Table 1 Voltages of actuator at different air pressures

空气压力/Pa	激励器电压(峰峰值 U_{p-p})/kV
2 200	3, 4
4 800	3, 4
7 300	4, 6, 8
14 600	4, 6, 8, 10

3.1 不同空气压力下诱导流场

图 3 中激励器电压为 4 kV, 电源频率为 10 kHz 时, 不同空气压力下诱导流场。

当空气压力等于 2 200 Pa 时, 由图 3(a)可见, 流场中壁面射流上侧存在一个直径约为 100 mm 的诱导涡, 涡心坐标约为 (95 mm, 85 mm), 直径约为 90 mm。诱导涡靠近激励器区域速度最高, 壁面最大诱导射流速度为 0.87 m/s, 流场整体结构呈 O 型。

当空气压力等于 4 800 Pa 时, 由图 3(b)可见, 与空气压力为 2 200 Pa 时相比, 壁面最大诱导速度降低, 为 0.72 m/s, 诱导涡消失, 引流区(流线方向指向电极的区域)速度明显减弱。射流与壁面约成 15°角向右发展, 流场整体结构呈 L 型。

当空气压力等于 7 300 Pa 时, 由图 3(c)可见, 壁面最大诱导速度进一步降低约为 0.48 m/s, 射流与壁面夹角增大约为 25°, 流场结构呈 L 型。

当空气压力等于 14 600 Pa 时, 壁面最大诱导速度减小至 0.35 m/s, 射流沿壁面发展至 100 mm 处后, 径直呈火焰式向上发展, 中心流线速度大, 两侧流线速度小。整体来看射流是斜向上发展的, 与壁面夹角约为 60°, 流场结构近似呈 V 型。

空气压力进一步升高, 4, 10 kHz 电源频率不能使空气发生电离, 流场静止不变。

可见, 激励电源参数保持不变时, 流场最大诱

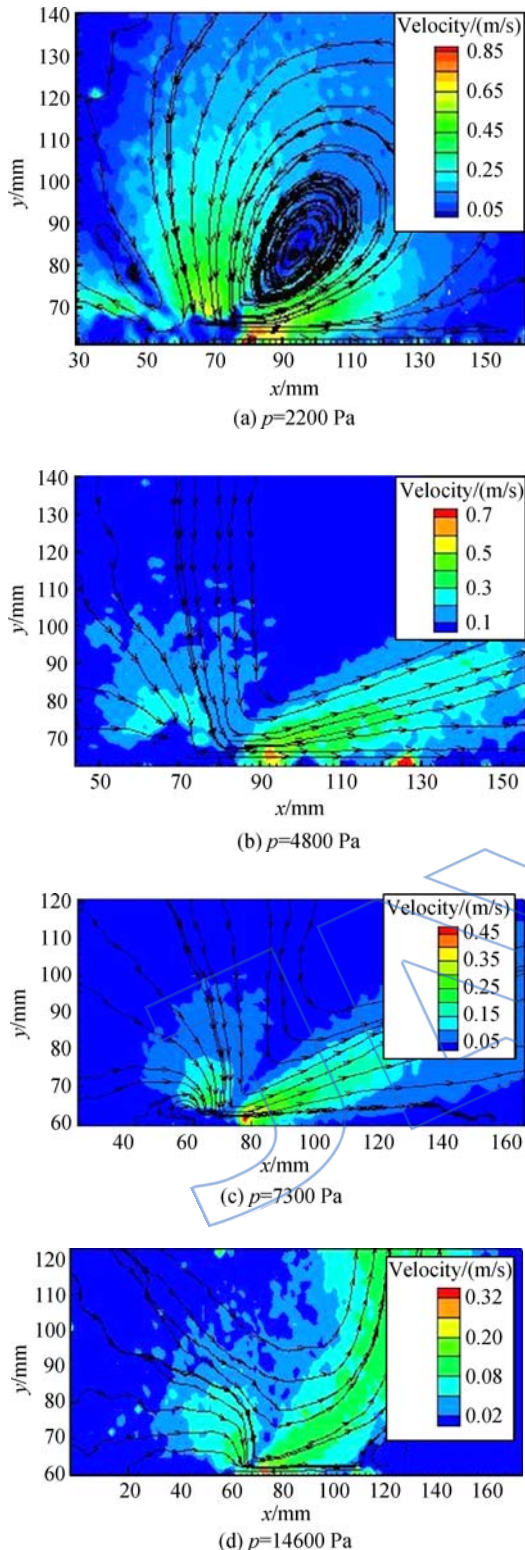


图3 不同空气压力下诱导流场

Fig. 3 Actuation flow field at different air pressures

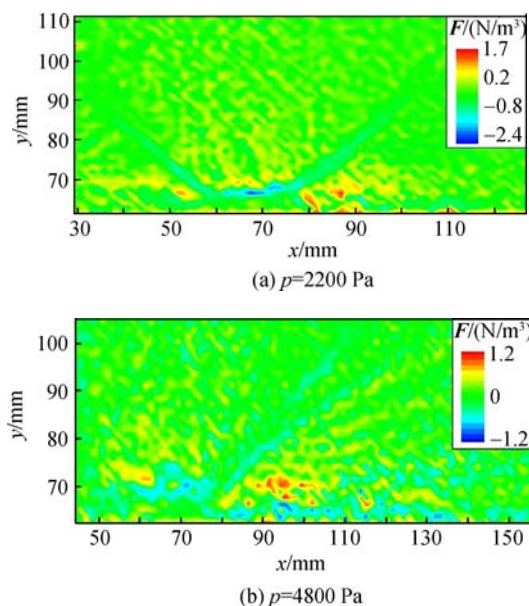
导速度随激励器压力升高减小,同时流场结构随压力升高由O型演化为L型,最终演化为V型。上述变化均与SDBD放电强度紧密相关,实验中发现,激励电源参数保持不变时,空气压力升高,SDBD放电强度减弱,放电强度减弱导致体积力

减小,因此流场最大诱导速度减小。2200 Pa时SDBD放电为双侧放电,即暴露电极距植入电极的另一侧也产生了明显的放电现象,反映在流场图中即图3(a) $x=30\sim 50$ mm, $y=60\sim 70$ mm区域内,流场存在明显的左向流动。左向流动的存在极大地减小了引流区范围,因此总流量基本恒定时,范围减小必然导致流速增加,如图3所示,空气压力为2200 Pa时引流区速度明显大于其余压力条件时引流区速度。空气压力为2200 Pa时引流最大速度与壁面射流最大速度相近,因此两者沿流线速度扩散的范围和距离也近似相等,图3(a)中引流和壁面射流速度大于0.3 m/s的流线长度为50~60 mm,同时空气运动沿流线法向存在扩散,越靠近流场外围流动范围越大,当外围引流和射流连接在一起时形成诱导涡。其余压力条件时,引流速度和射流速度差异很大,因此没有诱导涡。

3.2 不同空气压力下体积力分布

图4为激励器电压为4 kV,电源频率为10 kHz时,不同压力条件下体积力 F 分布(为更好表现体积力分布,标尺尺度非等间隔)。

由图4(a)可见,空气压力为2200 Pa时,最大体积力出现在距壁面高度为5 mm, $x=80\sim 90$ mm处,最大值为 1.7 N/m^3 。体积力沿 x 轴分布范围不断扩展,数值不断减小。由图4(b)可见,空气压力为4800 Pa时,与2200 Pa时相比较,正体积力分布区域距壁面高度增加,主要位于 $x=85\sim 105$ mm, $y=70$ mm区域,最大体积力为 1.20 N/m^3 。近壁面出现负体积力分布,最大值为 -1.2 N/m^3 。



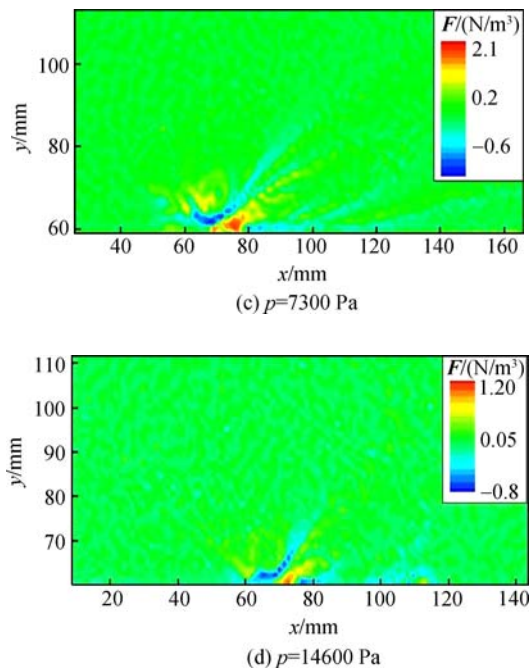


图4 不同空气压力下体积力分布

Fig. 4 Distribution of the body force at different air pressures

由图4(c)、图4(d)可见,空气压力为7300 Pa时,壁面正体积力分布呈射流状,正向体积力最大为 2.1 N/m^3 ,从70 mm处与壁面约成 30° 角度沿 x 方向发展,范围不断增大,数值减小,负体积力紧挨正体积力位于其上方,沿 x 方向不断减小.空气压力为14600 Pa时,体积力分布与7300 Pa时相似,但整体上看体积力范围减小,最大体积力为 1.2 N/m^3 .

不同压力下最大体积力随空气压力升高无明显变化趋势,先降低后升高,然后又降低.但不同空气压力下体积力分布面积差别很大,因此最大体积力变化并不能反映体积力随空气压力的变化情况.选取 $x=50 \sim 110 \text{ mm}$, $y=60 \sim 80 \text{ mm}$ 流场矩形区域内体积力为研究对象,忽略负体积力影响,将正体积力求和.图5为不同空气压力下体积力之和 F_{sum} 变化情况.由图可见,所选区域内体积力之和随空气压力升高降低.尽管最大体积力存在波动现象,但从整体来看,相同激励电源参数时,空气压力升高,等离子体体积力整体降低.主要是由于激励电源参数不变时,空气压力升高导致气体电离程度下降,放电区域减小,电荷密度降低,因此整体体积力下降.

图4中负体积力分布的出现主要是由于忽略压强影响造成的.由式(1)~式(3)可知,图4中体积力为负的压强梯度与空气密度的乘积与实际体

积力之和,因此负体积力区域表明该处压强梯度为正,压强梯度越大,负体积力也越大.由伯努利方程可知,流速低的区域静压高,因此负体积力均位于流场中压强梯度大且流速低的区域,如图3、图4所示.

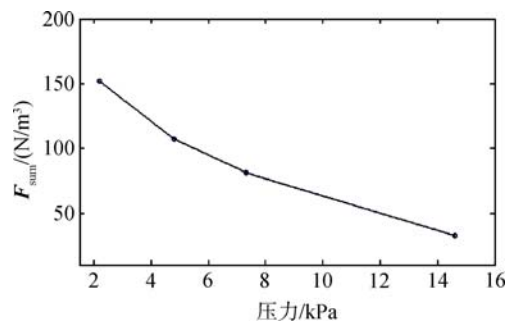
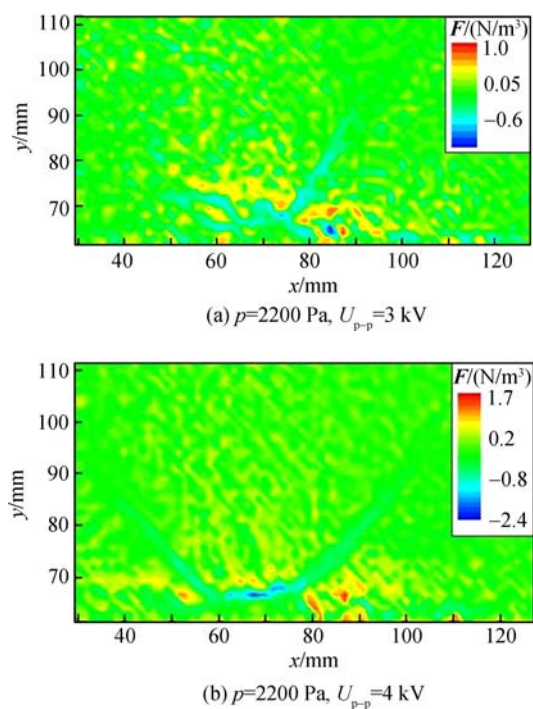


图5 不同空气压力下体积力和

Fig. 5 Sum of the body force at different air pressures

3.3 体积力分布与激励器电压

空气压力为2200 Pa,激励器电压为3,4 kV时;空气压力为14600 Pa,激励器电压为4,6,8,10 kV时,体积力分布情况(电源频率均为10 kHz)如图6所示.由图可见,随激励器电压增高,壁面体积力分布面积和数值均增大.空气压力为2200 Pa时,在激励器电压为3~4 kV范围内,体积力增加约 0.7 N/m^3 ;空气压力为14600 Pa时,在激励器电压为4~8 kV范围内,最大体积力随激励器电压升高增加约 3.6 N/m^3 ,体积力分布面积随激励器电压升高不断向右侧发展.激励器电



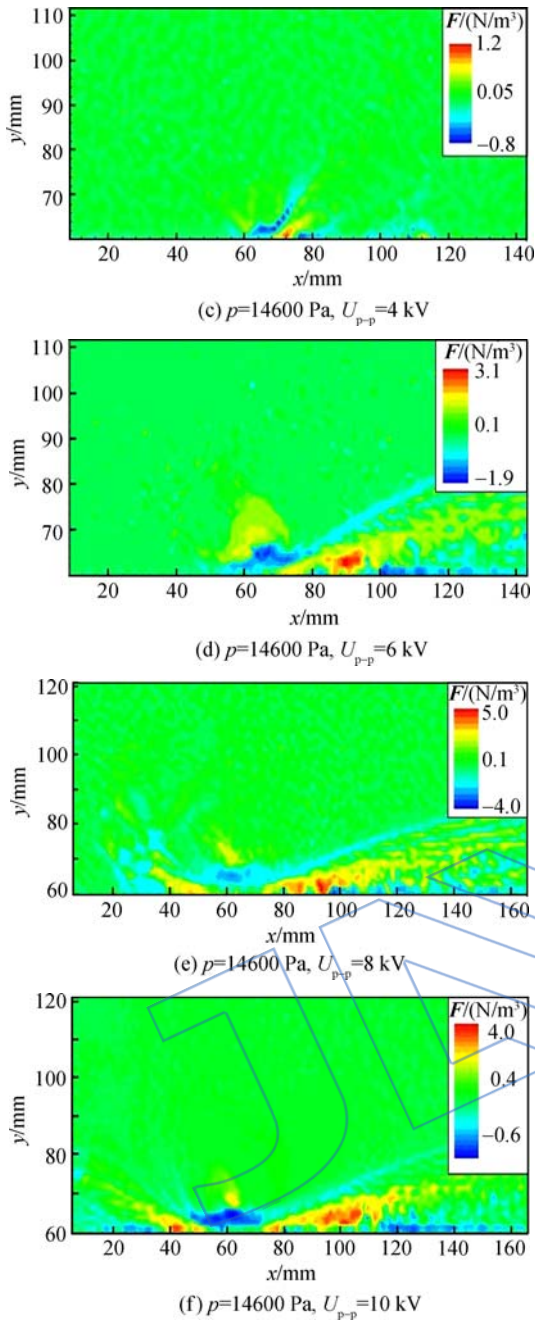


图 6 不同激励器电压下体积力分布

Fig. 6 Distribution of body force at different voltages of actuator

压高于 8 kV 后,发生双侧放电,由图 6(d)、图 6(e)可见,空气压力为 14 600 Pa 时,激励器电压从 6 kV 升高到 8 kV 后,在激励器左侧 $x=40 \sim 60 \text{ mm}$ 处出现反向体积力分布,与右侧体积力对称,但分布面积和数值均小于右侧体积力情况。

空气压力不变时,激励器电压升高,空气电离程度和电场强度增大,体积力分布面积和最大体积力均增加。空气压力为 2 200 Pa 时,放电区域随激励器电压升高变化小(激励器电压幅度小),因此体积力主要表现为数值增大;空气压力为

14 600 Pa 时,放电区域随激励器电压升高增加,因此体积力不仅数值增大,且分布面积也增大。在激励器工作电压内(激励器未烧毁),激励器电压持续增大使激励器产生双侧放电,双侧放电制约了右侧体积力的持续增大。因此由于激励器的材料和结构的限制,体积力不能无限增大。

3.4 体积力分布与速度分布

图 7 是空气压力为 4 800 Pa,激励器电压为

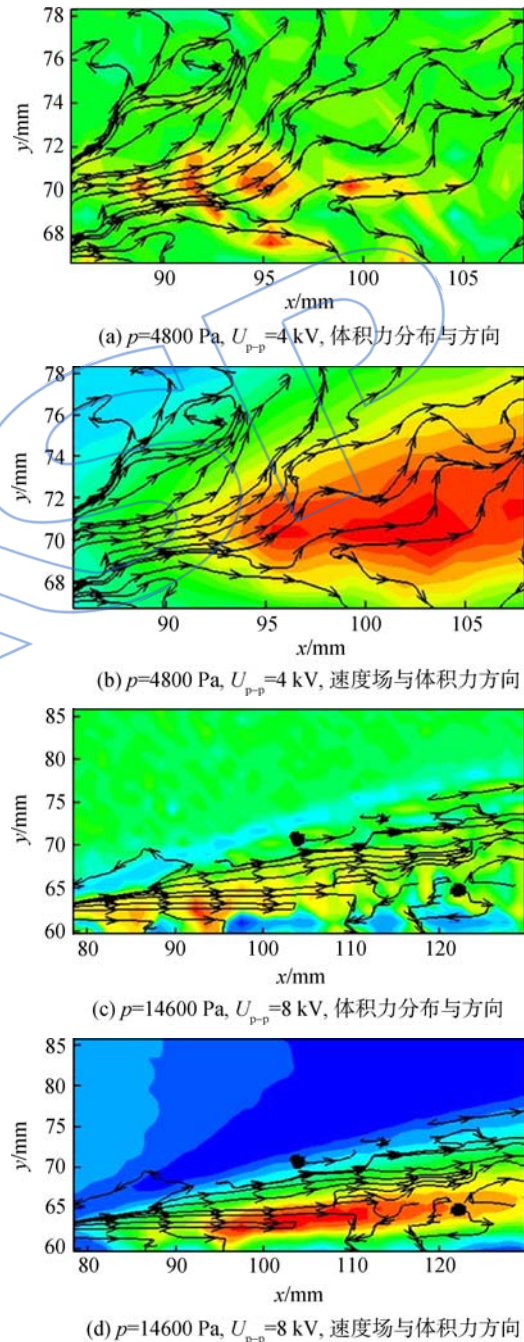


图 7 不同空气压力和激励器电压下, 体积力分布与速度场

Fig. 7 Distribution of body force and velocity field at different air pressures and voltages of actuator

4 kV时;空气压力为 14600 Pa,激励器电压为 8 kV 时,体积力分布和速度分布情况,图中方向线为体积力方向线(电源频率均为 10 kHz)。

由图 7(a)可见,空气压力为 4800 Pa 时,体积力的分布不连续,但体积力方向线整体上一致,指向右上,且体积力较大的区域方向线指向一致性很强(见 $x=90\sim 95$ mm, $y=70$ mm 处区域)。由速度分布图 7(b)可见,高流速区域沿体积力线方向,出现体积力较大区域后面。整体来看,以 $x=95$ mm 为边界,体积力区域位于体积力线上游,高速流动区域位于体积力线下游。这是因为体积力是流动产生的动力源,推动气体运动,因此高速区域沿体积力方向位于体积力下游区。

由图 7(c)、图 7(d)可见,空气压力为 14600 Pa 时,体积力分布的连续性要高于空气压力为 4800 Pa 时分布情况。整体来看,体积力线在 $x=80\sim 110$ mm 范围内指向统一,与 4800 Pa 时相比分布更加规则。与 4800 Pa 时一样,体积力区域位于体积力线上游,高速流动区域位于体积力线下游。

4 结 论

本文利用 PIV 技术,测量了不同环境压力下,高频高压 SDBD 放电等离子体诱导流场,根据 N-S 方程求解了等离子体体积力,分析了激励器电压以及压力对流场和体积力的影响。主要结论如下:

1) 激励电源参数保持不变时(激励器电压为 4 kV,电源频率为 10 kHz),流场最大诱导速度随压力升高减小,流场结构随压力升高由 O 型演化为 L 型,最终演化为 V 型。

2) 激励器电压影响体积力的分布和大小,空气压力主要影响体积力的分布。相同空气压力时,激励器电压越大,体积力分布面积和数值越大;相同激励器电压时,空气压力越小,体积力分布面积越大,体积力和随气压升高减小。

3) 最大体积力分布区域,体积力方向相同;体积力分布区域位于体积力方向线上游,流场高速区域位于体积力方向线下游。

参考文献:

- [1] Porter C O, Baughn J W, McLaughlin T E, et al. Plasma actuator force measurements[J]. AIAA Journal, 2007, 45(7):1562-1570.
- [2] Corke T C, Mertz B, Patel M P. Plasma flow control optimized airfoil[R]. AIAA-2006-1208, 2006.
- [3] Roupasov D, Zavialov I, Starikovskii A, et al. Boundary-layer separation plasma control using low-temperature non-equilibrium plasma of gas discharge[R]. AIAA-2006-0373, 2006.
- [4] Roupasov D V, Nikipelov A A, Nudnova M M, et al. Flow separation control by plasma actuator with nanosecond pulse periodic discharge[R]. AIAA-2008-1367, 2008.
- [5] 周朋辉, 田希晖, 车学科, 等. 不同压力下微秒脉冲表面介质阻挡放电流场实验[J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2691-2697.
ZHOU Penghui, TIAN Xihui, CHE Xueke, et al. Experiment of airflow induced by microsecond pulse surface dielectric barrier discharge under pressure influences [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2691-2697. (in Chinese)
- [6] Che X K, Shao T, Nie W S, et al. Numerical simulation on a nanosecond-pulse surface dielectric barrier discharge actuator in near space[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(14): 145201. 1-145201. 14.
- [7] 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): 279-287.
CHE Xueke, NIE Wansheng, ZHOU Penghui, et al. Study on continuous vortices induced by sub-microsecond pulsed surface dielectric barrier discharge plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(22): 279-287. (in Chinese)
- [8] 程钰锋, 聂万胜, 车学科, 等. 不同压力下介质阻挡放电等离子体诱导流场演化的实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(10): 295-302.
CHENG Yufeng, NIE Wansheng, CHE Xueke, et al. Experimental investigation on the evolution of dielectric barrier discharge plasma induced flow at different operating pressures[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(10): 295-302. (in Chinese)
- [9] Shyy W, Jayaraman B, Anderson A. Modeling of glow-discharge induced flow dynamics [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(11): 6434-6443.
- [10] Suzen Y B, Huang P G, Jacob J D. Numerical simulations of plasma based flow control applications[R]. Tronto, Ontario; 35th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2005.
- [11] Orlov D M, Corke T C, Patel M P. Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator [R]. AIAA-2006-1206, 2006.
- [12] Boeuf J P, Lagmich Y, Unfer T, et al. Electrohydrodynamic force in dielectric barrier discharge plasma actuators[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(3): 652-662.
- [13] Lagmich Y, Callegari T, Pitchford L C, et al. Model description of surface dielectric barrier discharges for flow control[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(9): 095205. 1-095205. 10.
- [14] Font G, Jung S, Enloe C, et al. Simulation of the effects of force and heat produced by a plasma actuator on neutral flow evolution[R]. AIAA-2006-0167, 2006.

- [15] Marios K, Sina G, Rogier G, et al. Experimental study on the body force field of dielectric barrier discharge actuators [R]. AIAA-2010-4630, 2010.
- [16] Murphy J P, Lavoie P. Characterization of DBD plasma actuators via PIV measurements[R]. AIAA-2013-0346, 2013.
- [17] Kriegseis J, Schwarz C, Duchmann A, et al. PIV-based estimation of DBD plasma-actuator force terms[R]. AIAA-2012-0411, 2012.
- [18] Meng X S, Wang Y S, Wang J L, et al. Body force produced by plasma actuator using PIV and pressure measurements [R]. AIAA-2013-0396, 2013.
- [19] Wang Y S, Zheng B R, Gao C. Experimental study of DBD plasma actuation body force based on PIV [R]. AIAA-2013-0350, 2013.

JALSP