

介质阻挡放电等离子体对近壁区流场的控制的实验研究^{*}

李 钢^{1)†} 李轶明²⁾ 徐燕骥¹⁾ 张 翼³⁾ 李汉明³⁾ 聂超群¹⁾ 朱俊强¹⁾

1) (中国科学院工程热物理研究所先进能源动力实验室, 北京 100190)

2) (北京提赛流速测量研究中心, 北京 100871)

3) (中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100190)

(2007 年 8 月 20 日收到, 2008 年 9 月 18 日收到修改稿)

采用粒子图像测速仪对介质阻挡放电等离子体在静止流场中诱导出的速度场、等离子体激励对平板附面层的改变进行了研究. 实验结果表明, 等离子体激励作用主要集中在近壁面附近, 激励电压与诱导速度近似为线性关系, 激励频率对诱导速度的影响不大. 将等离子体流动控制原理初步归纳为撞击效应和热效应, 并通过数值模拟的方法研究了热效应对等离子体激励诱导速度场的影响. 数值模拟结果表明, 在无来流的情况下等离子体热效应对流场的影响比较明显, 使局部水平方向速度大小提高近 30%. 简要介绍了提高等离子体激励强度的方法.

关键词: 介质阻挡放电等离子体, 流动控制, 边界层

PACC: 5190, 4790, 5290

1. 引 言

在流体力学研究领域, 流动控制是一个重要的研究方向. 人们已经探索了几种改变和控制流场的方法^[1], 主要分为主动控制和被动控制两大类. 被动控制方法不需要输入外部能量, 文献中公开的被动控制方法有在边界层加肋^[2]、开槽^[3]、布置粗糙单元^[4]等. 主动控制方法需要输入外部能量, 但具有便于控制的优点, 可以根据需要而打开或关闭. 主动控制方法包括表面运动^[5]、连续或间断的吸吹^[6], 以及以激光、电子束、等离子体^[7]等为载体输入能量的方法.

等离子体流动控制是通过等离子体对其周围气流施加定向作用力来改善气动部件动力特性的一种技术手段, 对于提升飞行器和航空发动机气动性能具有重要意义, 目前已成为国际上的研究热点. 人们对介质阻挡放电等离子体激励在提高机翼升力^[8]、低压透平叶栅流动分离控制^[9]、压气机扩稳^[10, 11]、改善无人驾驶飞机的气动性能^[12]等方面开展了基础性研究. 等离子体流动控制是基于“等离子体气动激

励”这一新概念的主动流动控制技术, 其所采用的等离子体气动激励, 是以等离子体为载体, 对流场施加的一种可控扰动, 具有结构简单、施加的气动激励作用频带宽、激励参数便于实时控制、响应迅速、能耗较低等优点.

本文所使用的等离子体激励器构成如图 1 所

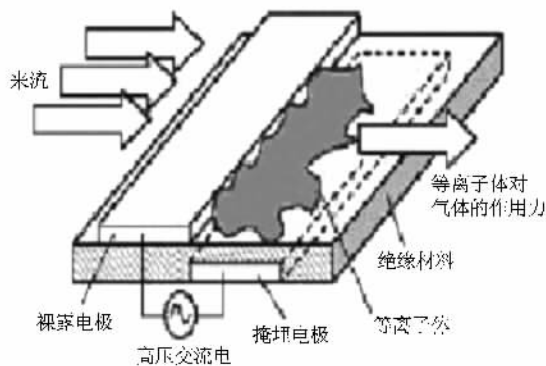


图 1 等离子体激励器简图

示. 在绝缘材料(石英玻璃片)两侧非对称地布置两块金属电极, 一块电极裸露在周围的空气中, 另一块电极嵌在绝缘材料里. 在高压高频交流电的作用下,

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 50676094, 50676095, 50776086, 50736007)资助的课题.

[†] E-mail: ligang_beijing010@163.com

可在嵌入绝缘材料内的电极上方生成弱电离的低温等离子体,通过离子与中性气体分子的碰撞向边界层输送能量,诱导出空气射流,加速边界层内的气体流动.文献[13]利用平面激光诱导荧光技术对介质阻挡放电过程中产生的痕量组分 NO 进行了检测;文献[14]利用红外热像仪研究了介质阻挡放电过程中的热量交换过程.可以把等离子体对周围气体的作用力称为电动力,图2是对电动力的直观认识,由

图2可见等离子体诱导的流动使水蒸汽流向偏转,随着激励电压的增大水蒸汽流向偏转角度也增大. 等离子体流动控制是一个交叉学科,涉及到流体力学、等离子体物理学、电工学、热力学、材料学、化学等诸多学科,因而等离子体的诊断方法也是多种多样,可以采用光谱学、质谱学、电工学、声学、热学、力学、流场测量等方法.本文采用流场测量方法,研究等离子体的流动控制效果.

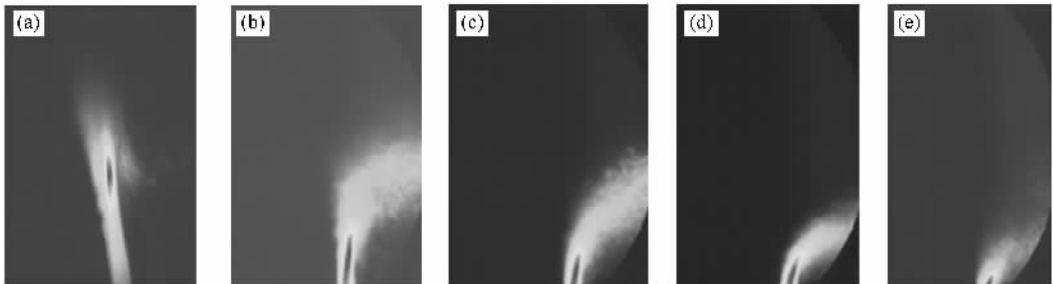


图2 等离子体诱导的流动使水蒸汽流向偏转图 (a)0 kV ,(b)12 kV ,(c)18 kV ,(d)20 kV ,(e)21 kV

2. 实验系统

实验布局如图3所示.实验中使用的二维粒子图像测速仪(PIV)测量系统由激光器、激光器电源、CCD相机、同步器、透镜组、导光臂、PC机等组成.采用两台独立的YSG激光器,单脉冲激光能量可达120 mJ,由同步器控制两激光脉冲的时间间隔,最短可达1 μs;CCD像素为1280×1024;采用定焦镜头,根据不同视场大小要求,镜头焦距分别采用28 mm(大区域)和60 mm(小区域);通过由柱面镜和球面镜组成的透镜组形成片光源,根据视场要求采用不同焦距的柱面镜(−12.5FL/−25.4FL/−50FL)和球面镜(500 mm);示踪粒子为直径为10 μm左右的固体颗粒物,由近风口直接吸入,播撒至测量区;后处理软件为Insight6.0;采用先用相机拍摄测量面上的标尺然后将实际尺寸与像素相对应的标定方法. PIV图像处理技术通过将CCD相片划分成许多方形的查询区,并对每一块查询区进行图形的相关处理,进而得到每一块查询区所有示踪粒子的平均速度,完整区域的速度场就是由所有查询区的速度构成的.通过对CCD相机两次曝光时刻示踪粒子的图像进行相关处理,可获得在两次曝光间隔内示踪粒子的位移.实验中使用的CCD相机为1280×1024像素,每个查询区为32×32像素.

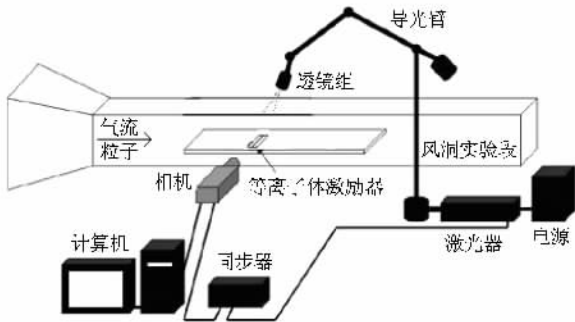


图3 丘形物流动分离控制PIV实验布局图

3. 实验结果与分析

3.1. 等离子体在静止流场中诱导出的速度场

在静止流场中施加等离子体激励,实验中电极宽12.5 mm,电极间距为1 mm,石英玻璃片厚度为2 mm.图4为PIV测量结果,起始边缘与壁面距离约为1 mm.等离子体生成区间对应图4中的20—30 mm. 由图4可见当激励电压达到11 kV时,就可以看出等离子体的微弱加速效果,诱导出的最大速度出现在等离子体生成区域附近,只有0.1 m/s左右;激励电压提高到12 kV时,等离子体的加速作用逐渐增强,在等离子体生成区域下游30—80 mm区域

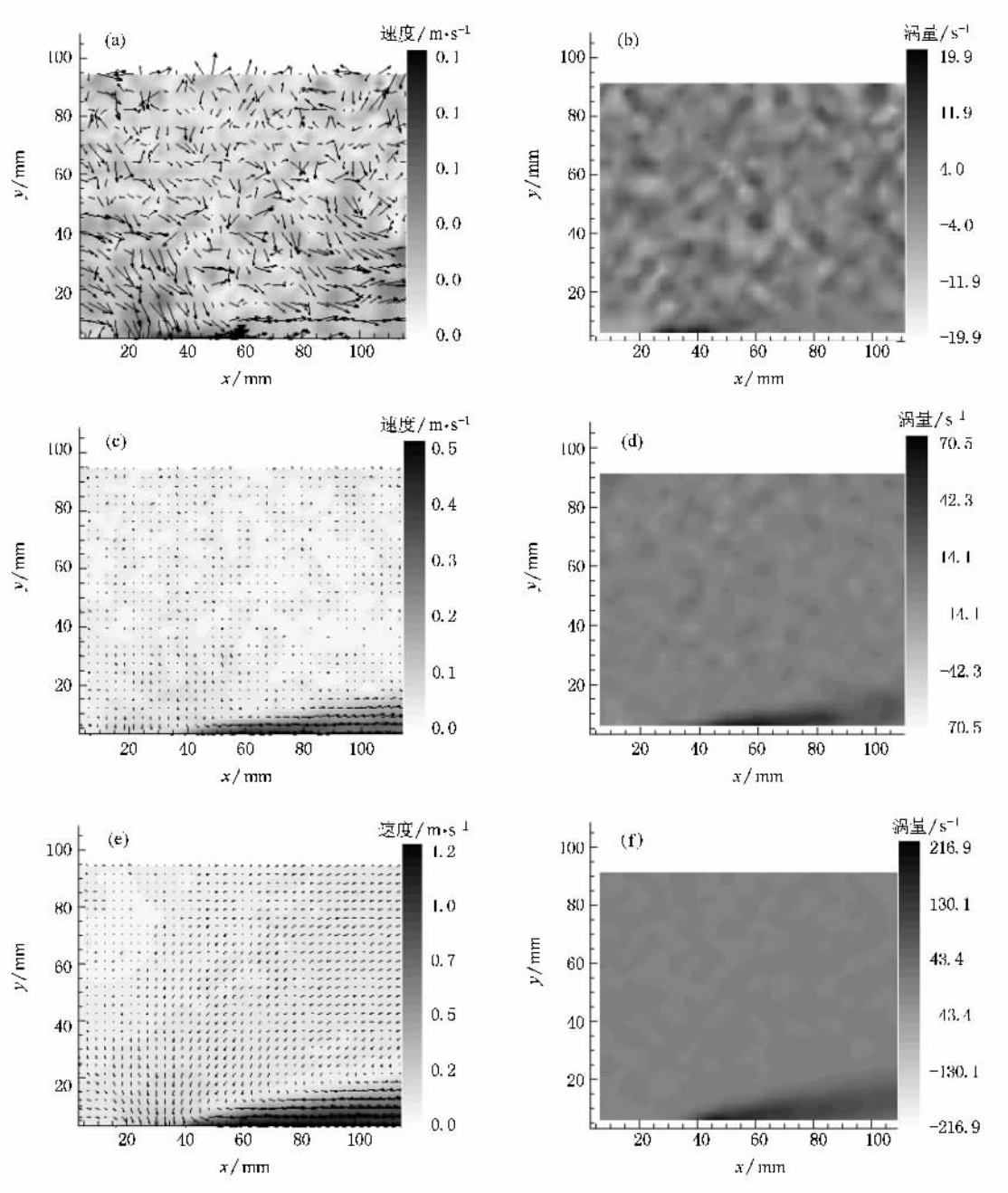


图 4 等离子体激励在静止流场中诱导的速度场、涡量场 PIV 测量结果 (a)速度场(激励电压 11 kV)(b)涡量场(激励电压 11 kV)(c)速度场(激励电压 12 kV)(d)涡量场(激励电压 12 kV)(e)速度场(激励电压 20 kV)(f)涡量场(激励电压 20 kV)

内都可以观察到等离子体的效果,进一步增强激励电压至 20 kV,等离子体的加速作用更加明显,诱导出的最大速度达到 1.2 m/s.通过比较图 5 中各图可见加速区集中在等离子体生成区下游 30—80 mm,距离壁面 5 mm 的范围,且距离壁面越近加速效果越明显,但等离子体激励能否改变局部壁面的无滑移边界条件还需进一步的实验观测;涡量场集中在等离子体生成区下游的 10—50 mm,距离壁面 5 mm

的范围.随着激励电压的提高速度和涡量大小都逐渐增大,等离子体激励的影响区域也逐渐增大.图 5 给出了在不同激励电压下图 4 中 60,80,100 mm 处的速度剖面.由图 5 可见随着与壁面距离的增大,等离子体诱导出的水平方向速度大小下降很快.图 6 给出了 100 mm 处速度剖面上前三个点上的水平速度大小与激励电压大小的关系,由图 6 可见随着激励电压的增大,水平方向速度近似按线性增大.

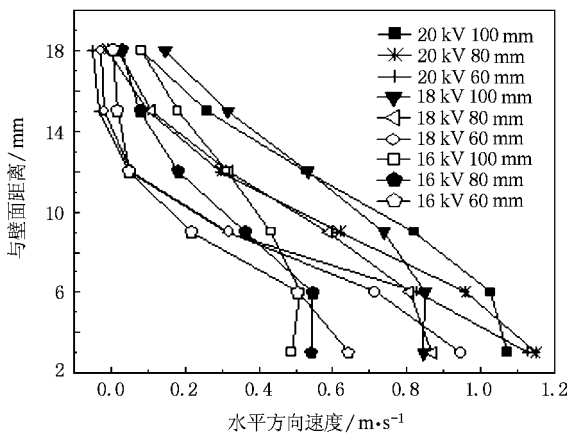


图5 不同激励电压下速度剖面

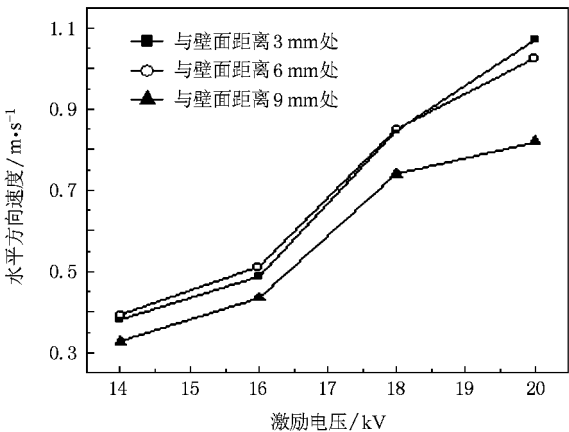


图6 诱导速度与激励电压的关系

将激励电压固定为 18 kV ,改变电源频率由 34 kHz 增大至 41 kHz ,观察电源频率对流场的影响。

通过图 7 我们可以看到在固定电压的情况下 ,改变电源频率 ,速度大小和涡量大小略有提高但并不明显 ,由此可见电源频率对速度场和涡量场的影响很小。

3.2. 平板附面层实验

实验工况 :来流速度约为 7 m/s ,湍流度不超过 1% .等离子体生成区间对应图 8 中的 6—16 mm .图 8 是 PIV 的测量结果 ,起始边缘与壁面距离约为 1 mm .

图 8 (a)和(b)为施加等离子体激励前后的速度场云图和流线图 ;图 8 (c)和(d)为施加等离子体激励前后的涡量场云图和速度矢量图 .由图 8 可见施加等离子体激励后等离子体附近的流线弯曲 ,速度和涡量大小变化明显 ,这表明等离子体激励通过向

边界层输入能量可以改变附面层的速度特性 ,有增速消涡的作用 .图 9 为施加等离子体前后图 8 中 16 , 18 20 22 mm 处的速度剖面 .由图 9 可见施加等离子体激励后边界层内的速度得到了明显的提高 ,最大增幅达到了 1.3 m/s ,20 mm 处的速度剖面改变最大 ,在距壁面 4—8 mm 的区域 ,施加等离子体激励后使水平方向速度略有降低 ,降幅小于 0.5 m/s .

3.3. 流动控制原理

初步将等离子体流动控制机理归纳为撞击效应、温升效应 ,其中起主导作用的是撞击效应。

撞击效应 电场强度足够大时 ,引发电子雪崩 ,空气被击穿 ,产生氮离子、氧离子 ,这些离子在电场中加速运动通过撞击会将动量传递给中性的气体分子 ,这就产生了加速气体运动的效果。

温升效应 壁面附近的气体被加热而温度升高 ,密度减小 ,在重力场作用下产生浮升力 ;此外温度升高还会改变气体物性如使气体黏性增大。

等离子体流动控制中的温升效应是指等离子体使附近空气温度升高 ,改变了空气的物理性质 ,进而对空气的流场施加影响 .参考文献 [15]介绍了一种等离子体流动控制的数值模拟方法 ,但该模型没有考虑温升效应对流场的影响 .本文将温升效应的影响引入该模型 ,通过红外测温实验中获得等离子体弦向温度分布来确定求解能量方程时绝缘材料表面的边界条件 ,采用分段线性拟合 ,如图 10 (a)所示 ,其他边界设为环境温度 293 K ,如图 10 (b)所示。

空气的温度与密度、导热系数、动力黏度的拟合函数关系如下：

$$\rho = 2.88 - 0.00771 T + 6.8 \times 10^{-6} T^2 , \quad (1)$$

$$\lambda = 0.436 + 0.0074 T , \quad (2)$$

$$\mu = - 6.78 \times 10^{-7} + 7.65 \times 10^{-8} T - 4.24 \times 10^{-11} T^2 . \quad (3)$$

图 11 给出了考虑温升效应前后 ,通过数值模拟得到的无来流情况下等离子体激励诱导出的水平方向速度分布 .图 12 给出了掩埋电极外沿水平方向速度剖面。

对比图 11 (a)和(b)可见 ,在掩埋电极上方的等离子体生成区域 (对应图 11 中 0—0.012 mm 处)水平方向速度大小增加比较明显 .图 12 (a)给出了 $x = 0.01$ m 处的速度剖面 ,考虑热效应后 ,距离壁面 1—3 mm 区域的水平方向速度增大较明显 ;而距壁面 3—8 mm 区域的水平方向速度略有减小 .图 12 (b)给

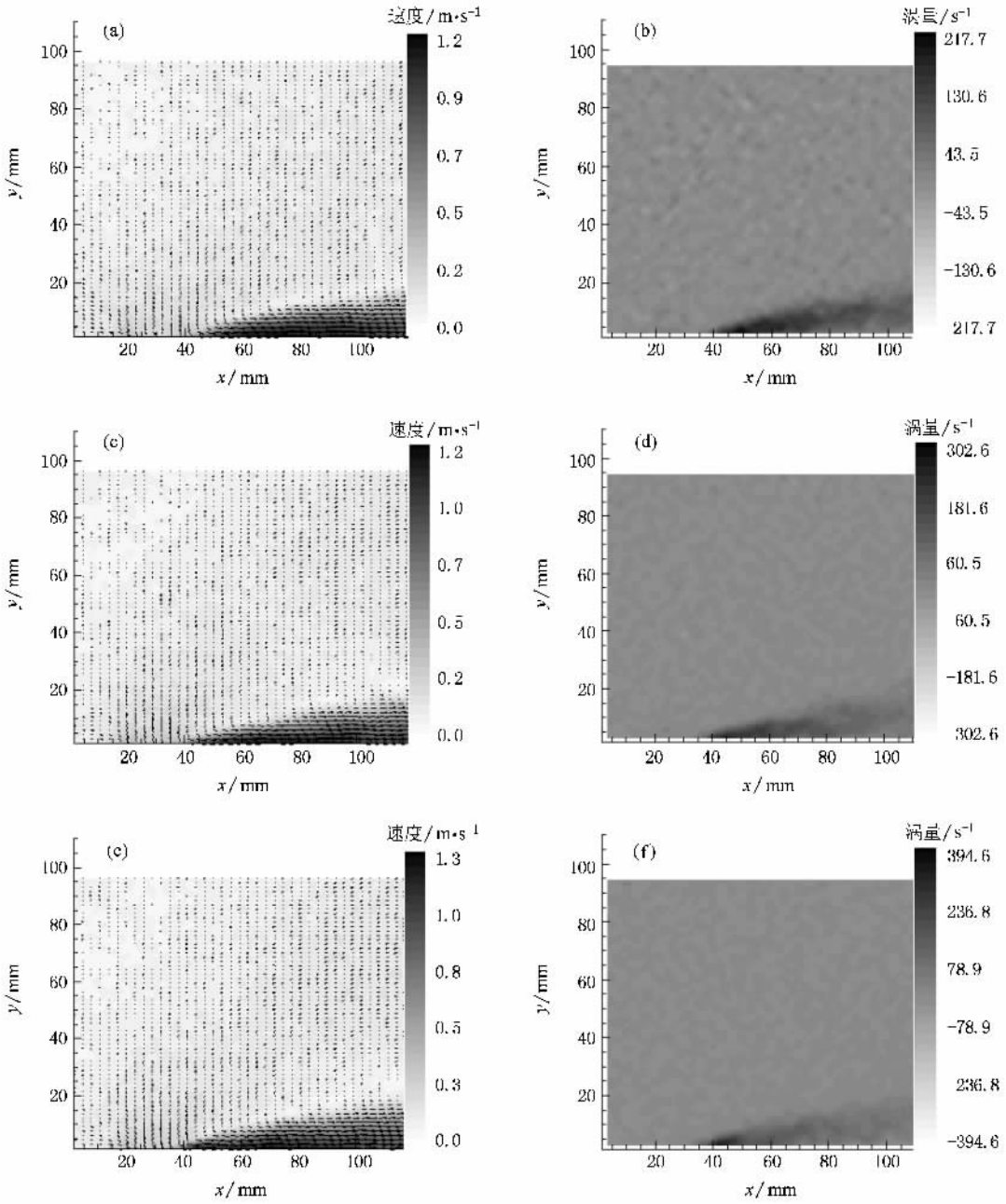


图7 电源频率对速度场、涡量场的影响 (a)速度场(电源频率 34 kHz)(b)涡量场(电源频率 34 kHz)(c)速度场(电源频率 37 kHz)(d)涡量场(电源频率 37 kHz)(e)速度场(电源频率 41 kHz)(f)涡量场(电源频率 41 kHz)

出了热效应引起的速度大小变化,距壁面1.3 mm处的速度改变最大,考虑热效应后该处的水平方向速度大小提高近 30%.

通过以上实验和数值模拟分析,得出如下结论:“撞击效应”是等离子体激励器直接产生的流向动量的途径,而“温升效应”是等离子体激励器间接产生的流向动量的途径.

3.4. 提高等离子体激励强度的方法

由以上实验可见,等离子体激励影响区域很小、作用效果很弱,为使其具有实用价值,必须扩大作用范围、增强激励强度.

增强等离子体作用效果有以下几条途径:

- 1) 提高激励电压,如图 4 所示.
- 2) 使用多对电极以及优化电极的布置形式,如锯齿形电极、倒圆形电极.

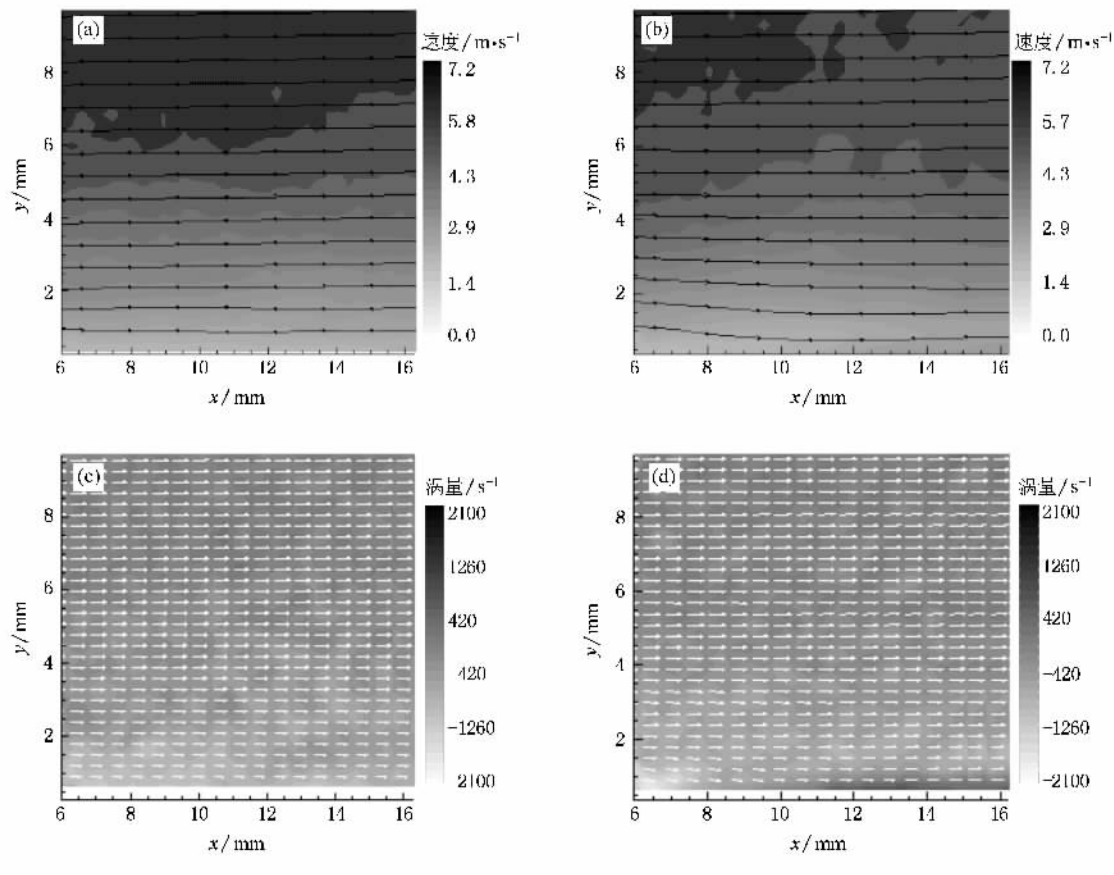


图8 来流速度为7 m/s时 PIV 测量结果 (a)未施加等离子体激励时的速度场 (b)施加 18 kV 等离子体激励的速度场 , (c)未施加等离子体激励时的涡量场 (d)施加 18 kV 等离子体激励的涡量场

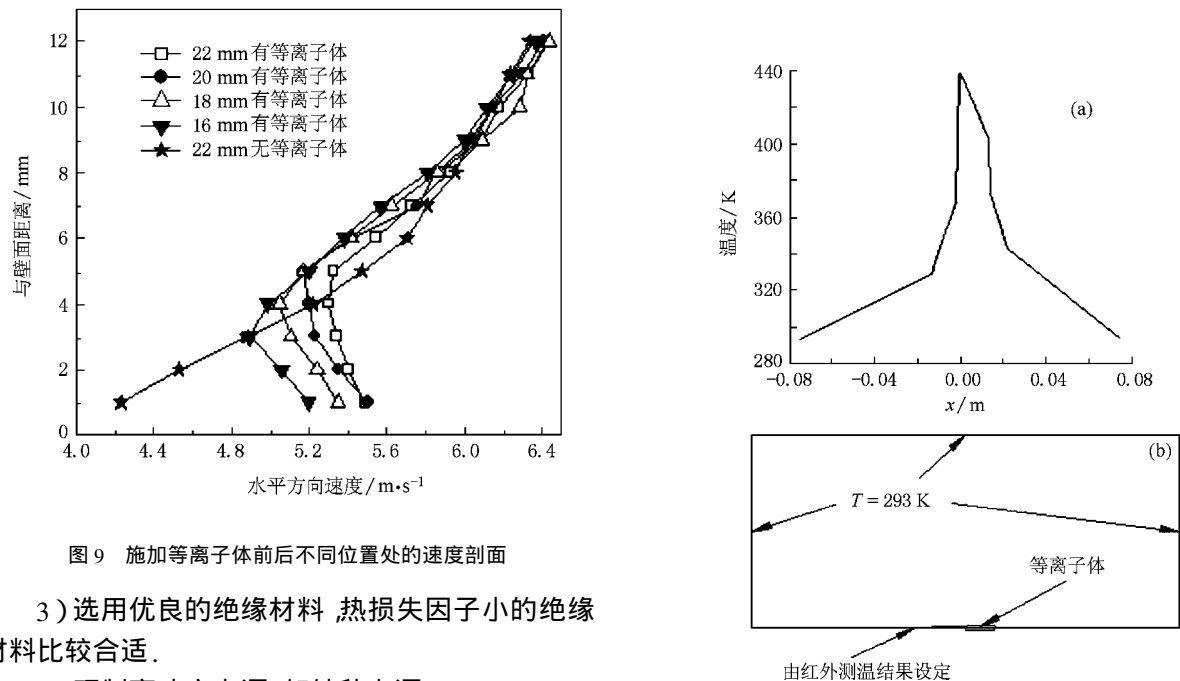


图9 施加等离子体前后不同位置处的速度剖面

3) 选用优良的绝缘材料 ,热损失因子小的绝缘材料比较合适.

4) 研制高功率电源 ,如纳秒电源.

5) 与其他的激励方法相结合 ,如引入磁场、激光、电子束等.

图10 红外测温结果拟合及能量方程边界条件 (a) 红外测温实验结果拟合 (b) 能量方程边界条件

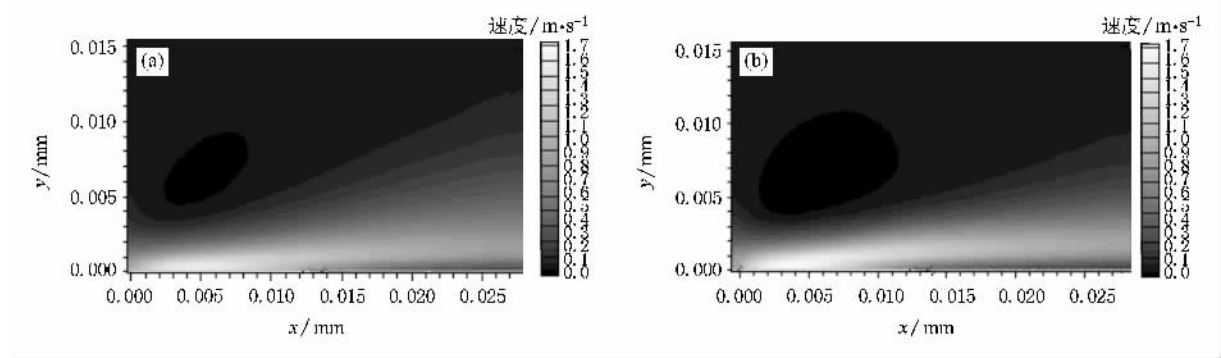


图 11 热效应对水平方向速度的影响 (a) 不考虑热效应 (b) 考虑热效应

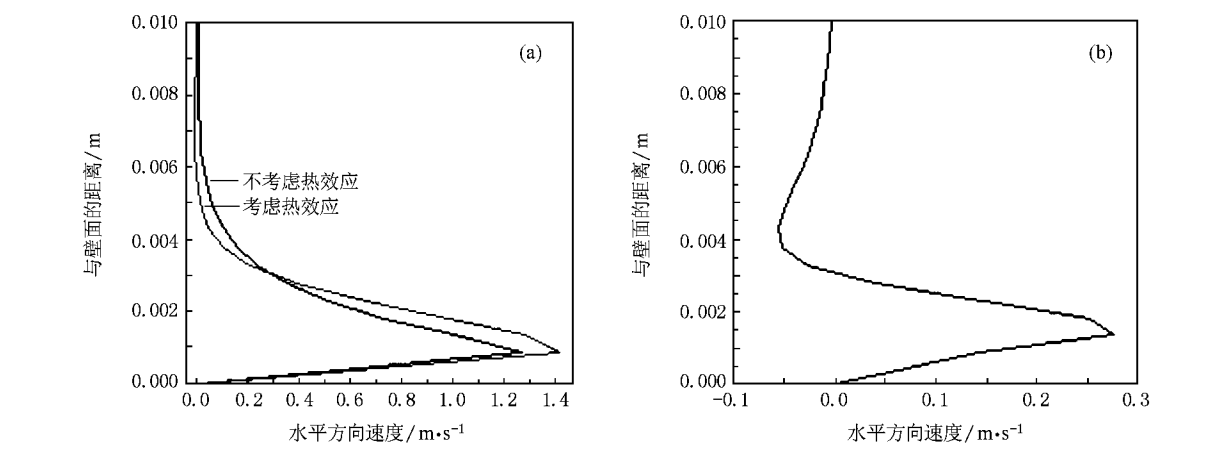


图 12 热效应对 10 mm 处速度剖面的影响 (a) 考虑热效应前后的速度剖面 (b) 考虑物性改变对速度剖面的影响

4. 结 论

利用 PIV 流场测试手段,采用介质阻挡放电等离子体激励的方法开展了一系列流动控制实验.通过对等离子体激励在静止空气中诱导出的速度场的测量明确了等离子体激励的作用范围,并研究了激励电压和频率对速度场和涡量场的影响;通过平板附面层实验进一步认识了等离子体激励对附面层特性的影响.数值模拟结果表明在无来流的情况下等

离子体热效应对流场的影响比较明显,距壁面 1.3 mm 处的速度改变最大,考虑热效应后该处的水平方向速度大小提高近 30%。“撞击效应”是等离子体激励器直接产生的流向动量的途径,而“温升效应”是等离子体激励器间接产生的流向动量的途径.

本文实验表明等离子体激励可以作为一种流动控制手段,但要获得实际应用还需解决激励强度过弱这一关键问题,通过对实验结果简要分析总结出了几种提高激励强度的方法.

[1] Gad E H M 2001 *Journal of Aircraft* **38** 402

[2] Lyon C A , Selig M S , Broeren A P 1997 *35st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit , AIAA Reno , USA* 1997-0511

[3] Ma H W , Yan W Y , Tian Q 2006 *Journal of Thermal Science* **15** 193

[4] Kerho , M F , Bragg M B 1997 *AIAA Journal* **35** 75

[5] Kang S , Choi H , Lee S 1999 *Phys. Fluids* **11** 3312

[6] Nie C Q , Xu G , Cheng X B , Chen J Y 2002 *ASME Journal of Turbomachinery* **124** 572

[7] Richard B M 2000 *Fluids Conference and Exhibit , AIAA Denver , USA* 2000-2324

[8] Corke T C , Mertz B 2006 *44th Aerospace Sciences Meeting , AIAA Reno , USA* 2006-1208

[9] Huang J H , Thomas C , Flint O 2006 *AIAA Journal* **44** 51

[10]

Wu Y , Li Y H , Zhu J Q 2007 37th Fluid Dynamics Conference and Exhibit , AIAA Miami , USA 2007-3849

[11]

Huu D V 2007 37th Fluid Dynamics Conference and Exhibit , AIAA Miami , USA 2007-3845

[12]

Mehul P P , Terry N , Srikanth V 2006 3rd Flow Control Conference , AIAA Portland , USA 2006-3495

[13]

Li G , Xu Y J , Mu K J , Nie C Q , Zhu J Q , Zhang Y , Li H M 2008 Acta Phys . Sin . 57 6444 (in Chinese) [李 钢、徐燕骥、穆克进、聂超群、朱俊强、张 翼、李汉明 2008 物理学报 57 6444]

[14]

Li H M , Li G , Li Y J , Li Y T 2008 Acta Phys . Sin . 57 969 (in Chinese) [李汉明、李 钢、李英俊、李玉同 2008 物理学报 57 969]

[15]

Suzen Y B , Huang P G , Jacob J D 2005 5th Fluid Dynamics Conference and Exhibit , AIAA Toronto , USA 2005-46333

Experimental study of near wall region flow control by dielectric barrier discharge plasma^{*}

Li Gang^{1)†} Li Yi-Ming²⁾ Xu Yan-Ji¹⁾ Zhang Yi³⁾ Li Han-Ming³⁾ Nie Chao-Qun¹⁾ Zhu Jun-Qiang¹⁾

1)(Laboratory of Advanced Energy and Power , Institute of Engineering Thermophysics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China)

2)(Tsai Flow Measurement Research Center , Beijing 100871 , China)

3)(Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China)

(Received 20 August 2007 ; revised manuscript received 18 September 2008)

Abstract

Flow field induced by the plasma actuator in quiescent air was measured by particle image velocimetry system. Boundary layer flow control in flat plate by the plasma actuator was investigated experimentally. Experimental results showed that the relation between exciting voltage and induced velocity magnitude was linear , but the influence of supply frequency was not evident. Mechanisms of plasma flow control were preliminarily ascertained to be results of collisions and temperature increase. Numerical simulation results showed that the thermal effect of the plasma was evident without incoming velocity. Methods of increasing plasma actuator ' s intensity were introduced briefly.

Keywords : dielectric barrier discharge plasma , flow control , boundary layer

PACC : 5190 , 4790 , 5290

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50676094 , 50676095 , 50776086 , 50736007).

[†] E-mail : ligang _ beijing010@163.com