

文章编号:1000-8055(2009)03-0596-06

利用等离子控制凸包流动分离的数值模拟

刘华坪, 颜培刚, 陈 浮

(哈尔滨工业大学 推进理论与技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要: 基于等离子发生器简化模型求解电势方程, 得到电场及等离子分布, 并将电场对等离子的作用力耦合到流动方程中. 结果表明, 电场力在电极交接处附近诱导气体运动并产生“壁面射流”效应, 增加低能流体动量, 显著改善附面层内速度分布; 与无等离子控制措施相比, 分离点位置最大延迟约 4 % 特征尺寸, 再附点位置最大提前约 12 % 特征尺寸, 分离范围明显减小. 此外, 电压较大、电极与流体接触式布置均能提高等离子控制流动分离的能力.

关 键 词: 等离子; 流动控制; 流动分离; 壁面射流

中图分类号: V231

文献标识码: A

Numerical simulation of plasma-based separation control over a hump

LIU Hua-ping, YAN Pei-gang, CHEN Fu

(Institute of Propulsion Theory and Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Using the simplified model of plasma generator, this paper solved electric equation to obtain the electric field and the plasma distribution, and then coupled the electrical force on the ions to flow equation. The results indicate that the electrical field could induce air flowing nearby the electrode interface and generate “wall surface jet flow” effect, increasing the fluid momentum and greatly improving the velocity in the boundary layer. Compared with the flow without plasma, the separation point was deferred about 4 % chord, the attachment point was moved up approximately 12 % chord, thus the separation scope was reduced obviously. In addition, increasing the voltage and exposing electrode to the surrounding air can enhance the plasma control ability.

Key words: plasma; flow control; flow separation; wall surface jet flow

近年来发展起来的等离子流动控制技术具有输入能量少、结构小、控制灵活等优点, 等离子诱导流动机制、诱导速度产生机理及其对附面层内流动的影响等方面研究已成为该领域较为前沿的课题, 受到众多研究者的重视.

自上世纪末以来, 国外学者对等离子流动控制技术进行了实验^[1-5]、数值研究^[6-9]. Corke^[1]对

NACA0009 机翼进行的实验研究表明, 等离子流动控制能有效提高升力; Jukes^[2]的实验也表明, 等离子可使静止流场近壁流体速度达 2.1 m/s. List^[3], Morris^[4]进行了等离子控制涡轮吸力面分离及顶部间隙流动的实验研究, 流动状况均得到有效改善. Suzen^[6], Corke^[7]提出了等离子发生器简化模型; Font^[8]则利用 PIC-DSMC 方法模拟

收稿日期: 2008-03-17; 修订日期: 2008-07-02

收稿日期: 国家科技部 973 项目 (2007CB210100); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20060213007)

作者简介: 刘华坪 (1983 -), 男, 四川峨眉人, 博士, 主要从事叶轮机流动控制研究.

了纯氧条件下等离子分布及壁面附近流动.国内在该领域的研究相对较少,刘万刚^[10]等实验验证了静止流场中等离子诱导流动现象,张攀峰^[11]等进行了等离子控制平板附面层分离的研究.

本文在 Corke^[7]等离子发生器简化模型基础上求解电势方程,得到了电场及等离子分布,将该电场对离子的作用力耦合到流动方程中,初步探讨了等离子驱动静止气流运动及其控制凸包流动分离的机理.

1 等离子简化模型及电势方程推导

等离子发生器见图1,金属电极分别裸露于空气中和埋入于绝缘材料中.在高压电流作用下,埋入电极的绝缘介质表面附近区域的空气被弱电离而产生等离子,并在电场驱动下运动,等离子通过离子、电子与中性气体碰撞对其施加作用,该作用简化为电场力对气流的作用力.

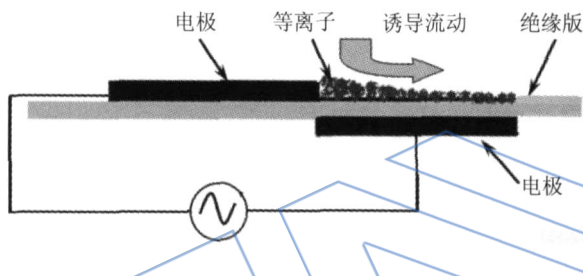


图1 等离子发生器示意图

Fig.1 Schematic drawing of plasma generator

电场力 $f = \rho_c E$, E 为电场矢量, ρ_c 为净电荷密度,它与电位移矢量 D 的关系如下:

$$\nabla \cdot D = \rho_c \quad (1)$$

因为 $D = \xi \xi_0 E$, ξ 为相对介电常数, ξ_0 为真空介电常数,电场强度满足 $E = -\nabla \phi$, 可得

$$\nabla \cdot (\xi \nabla \phi) = -\frac{\rho_c}{\xi_0} \quad (2)$$

净电荷密度 ρ_c 为等离子中正、负电荷之和,且

$$\rho_c = e(n_i - n_e) \approx -en_0 \left(\frac{e\phi}{kT_i} + \frac{e\phi}{kT_e} \right) \quad (3)$$

得到

$$\rho_c = -\frac{\xi_0}{\lambda_D} \phi \quad (4)$$

式中 λ_D 为德拜长度,其定义如下:

$$\lambda_D = \left[\frac{e^2 n_0}{\xi} \left(\frac{1}{kT_i} + \frac{1}{kT_e} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

综上得到

$$\nabla \cdot (\xi \nabla \phi) = \frac{1}{\lambda_D} \phi \quad (6)$$

电场作用于等离子区域的体积力为

$$f = \rho_c E = -\frac{\xi_0}{\lambda_D} \phi E \quad (7)$$

通过该简化模型即可考虑电荷对电场的影响.利用用户自定义函数(UDF)将 ϕ 加入到软件中求解式(6),得出电势分布及场强,可将电场对电荷的作用力作为体积力源相耦合到流动方程中.

2 计算结果与分析

2.1 静态流场等离子诱导流动

图2为电极附近区域计算网格放大图,电势计算边界条件如下给出,电极电压 ϕ_p 为5 kV, ϕ_n 为0 V,空气相对介电常数 ξ 为1,绝缘材料取 ξ 为3.电极厚度为0.102 mm,长为10 mm,电极 y 向距离为0.127 mm.等离子主要分布在埋入电极的壁面附近流场中,体积力也仅加在该区域.

图3为等离子诱导流场流线与 x 方向速度

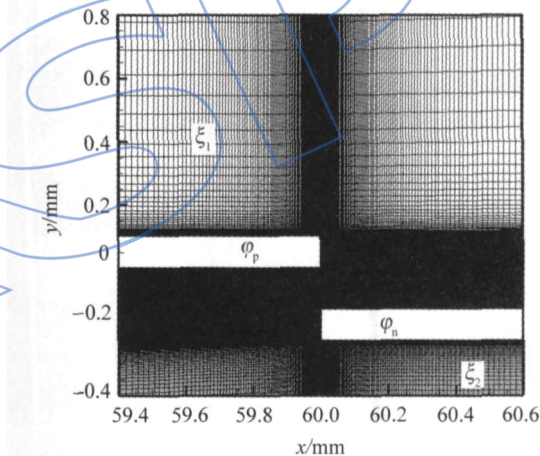


图2 电极附近区域计算网格

Fig.2 Computational grid near the electrodes

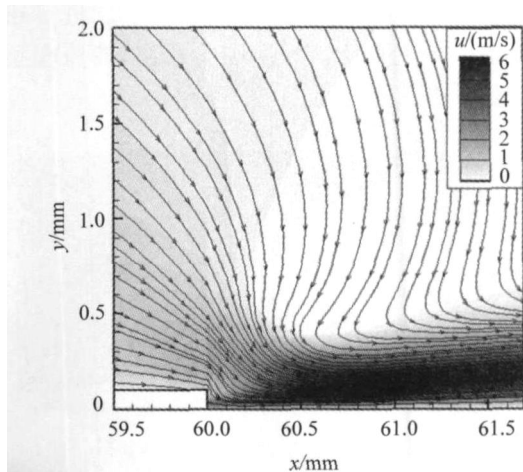


图3 诱导流场流线与 x 方向速度分量分布

Fig.3 Induced streamlines and x component of velocity

分量分布. 可以看出, 等离子在电场力作用下运动并与气体分子碰撞, 在裸露电极后半部附近, 诱导气体向壁面附近运动, 然后在埋入电极上方的壁面附近向下游运动. 速度分布表明, 诱导流动高速区集中在埋入电极上方的壁面附近, 最大速度约为 6 m/s , 距壁面约为 0.15 mm , 随流动向下游发展逐渐远离壁面. 因此, 等离子体积力诱导流动的机理类似于“壁面射流”效应.

图 4 给出的电极交接处附近场强分布表明, 场强高于空气的击穿电场强度 ($3 \times 10^6\text{ V/m}$) 区域主要分布在电极交接处附近, 即等离子实际也仅分布在该区域.

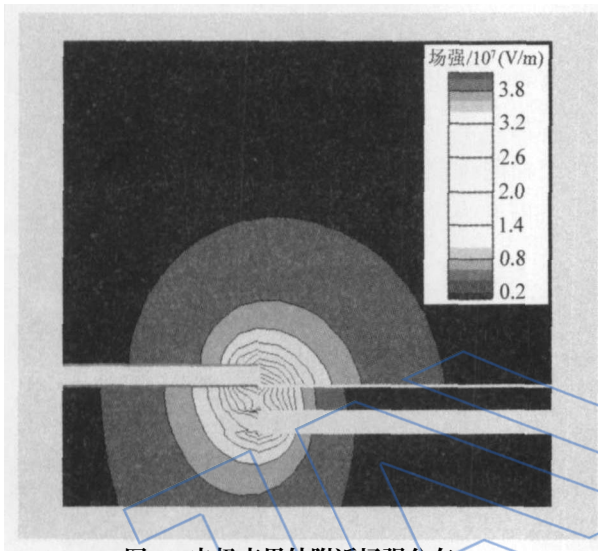


图 4 电极交界处附近场强分布

Fig. 4 Electric potential near the electrode intersection

2.2 等离子控制凸包流动分离

图 5 为 2004 年 NASA 用来验证湍流模型预估流动分离能力的凸包模型^[12]及计算网格. 凸包弦长 c 为 420 mm , 高度 h 为 53.7 mm . 文中计算域为凸包前缘上游 $-2.17c$ 至下游 $4c$ 处. 进口速度边界条件参照文献^[12]由图 6 给出, 湍流模型为 $k-\varepsilon$ 模型^[13].

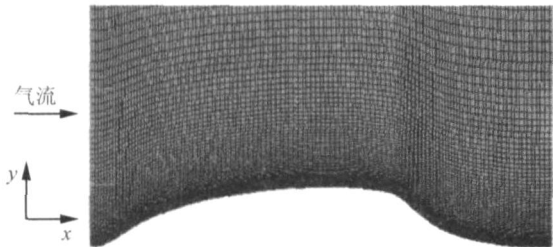


图 5 NASA 凸包模型^[12]及计算网格

Fig. 5 NASA hump^[12] and computational grid

图 7 给出的无等离子控制措施时实验^[12]与

数值模拟结果对比表明二者吻合良好, 分离区范围、分离点及再附点位置基本一致, 分别在 $x/c = 0.66, 1.11$ 处. 根据 2.1 节结果, 在分离起始位置安装长度为 5 mm 的电极以考察等离子控制流动分离的效果及能力.

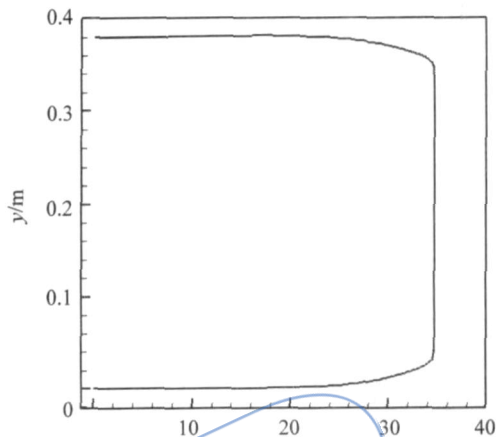
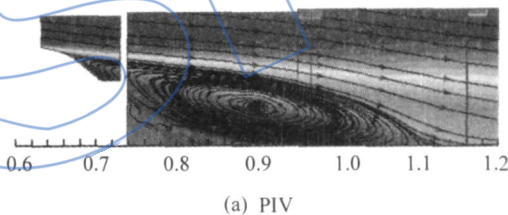
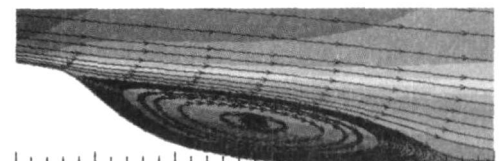


图 6 实验进口速度分布^[12]

Fig. 6 Inlet velocity distribution^[12] in experiment



(a) PIV



(b) Num

图 7 无等离子控制措施时实验^[12]与数值模拟结果对比

Fig. 7 Results of test^[12] and numerical simulation without plasma

利用等离子控制流动分离时, 电极埋入凸包以内以免破坏凸包表面光滑性. 保持 ϕ_n 为零, 通过改变 ϕ_p 大小以研究电压不同时等离子控制凸包流动分离的效果和机理.

图 8 为不同电极电压下分离区流线与 x 向速度分布, 可以看出, 绝缘介质表面附近电场强度随电压增高而增加, 等离子增多, 其注入到附面层内的动量增加, 分离延迟发生, 再附点提前, 分离区范围明显减小, 对流动分离控制的能力显著提高.

表 1 给出的不同电压下凸包分离点与再附

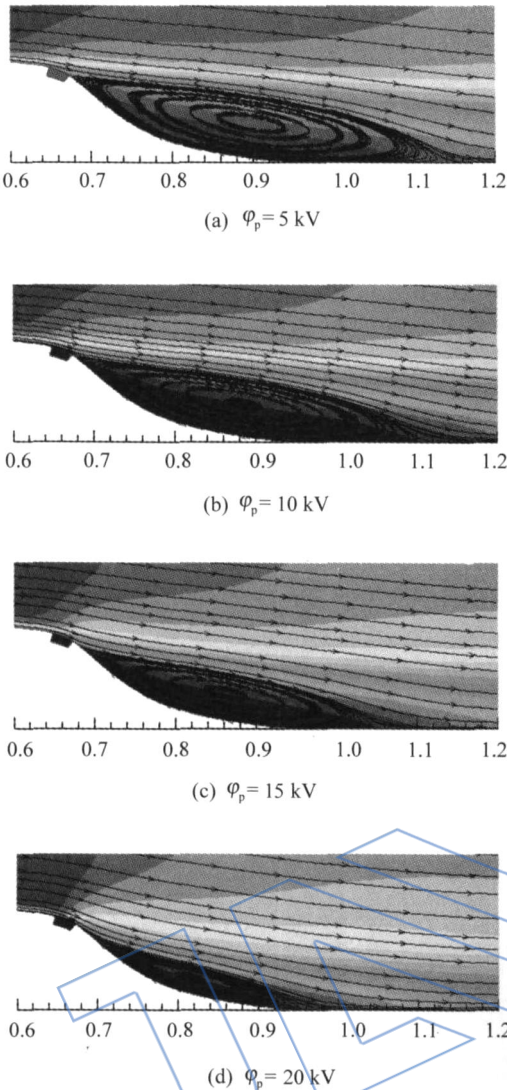


图 8 不同电极电压下分离区流线与 x 向速度分布对比
Fig.8 Streamlines and x component of velocity in separation area with different electrode voltages

点位置变化表明,与无等离子控制措施相比,分离点位置最大延迟约 4 %特征尺寸,再附点位置最大提前约 12 %特征尺寸.

表 1 不同电极电压下分离点与再附点位置对比
Table 1 Separation point and attachment point under different electrode voltages

	原型	5 kV	10kV	15kV	20kV
分离点(x/c)	0.66	0.68	0.68	0.68	0.7
再附点(x/c)	1.12	1.14	1.1	1.06	1.0

图 9 为不同方案下从 $-0.5c$ 至 $2.0c$ 壁面压力系数分布, $C_p = -(p - p_{in}) / (0.5 \times u_{in}^2)$, p_{in} 和 u_{in} 分别为进口处的平均压力和速度.可以看出,

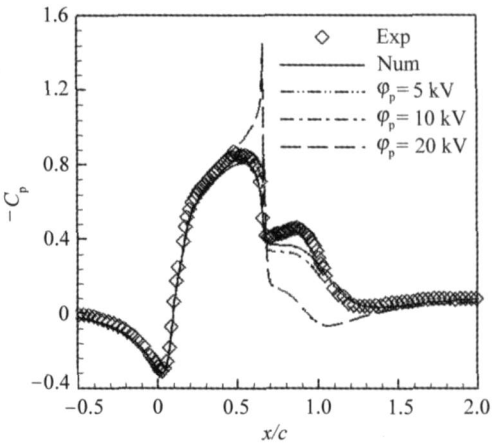


图 9 不同方案下壁面压力系数

Fig.9 Surface pressure coefficients

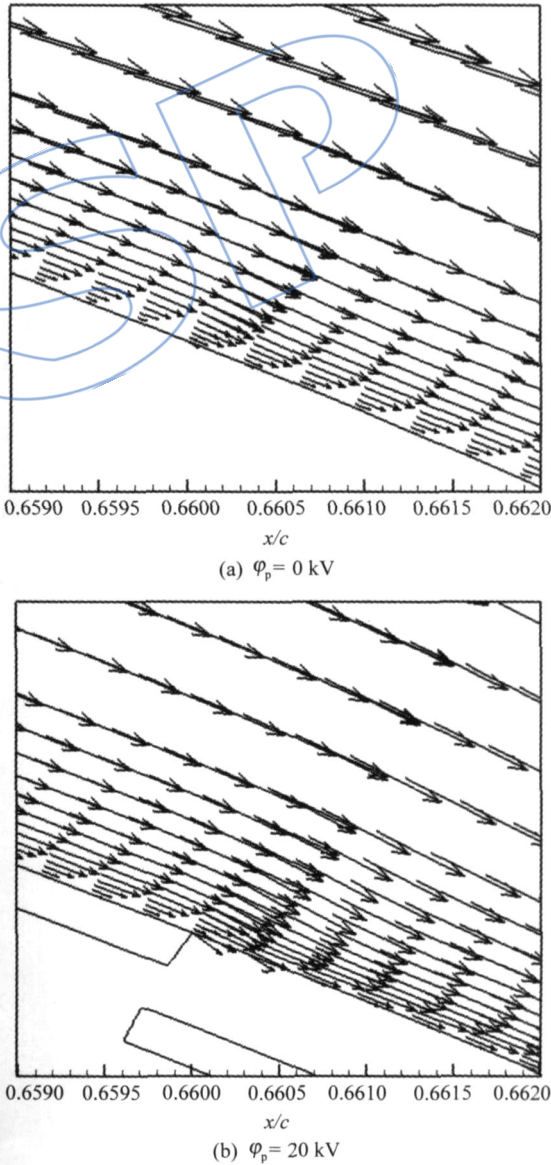


图 10 有无等离子控制措施时壁面附近流动对比

Fig.10 Vectors near the wall surface with and without plasma

无等离子控制措施的数值模拟与实验结果吻合较好。 ϕ 为 5 kV 时压力分布基本不变,随电压增大,等离子增多,体积力增强,在促使等离子区气流向下游加速流动的同时,也诱导上游区域气流加速运动,使得壁面压力降低.等离子区内,在电场力作用下气流产生与壁面外法线方向相反的速度分量(见图 10),导致壁面压力升高.且电压越高,上述趋势越明显.如 ϕ 为 20 kV 时上游区域流体急剧加速使得压力降至低峰值,而后很快升高.

图 11 为不同 x 位置处为附面层内速度分布.与实验结果相比,数值模拟的附面层内速度略低,这可能与给定的来流湍流度与实验条件不尽相同有关.图 11 (a) 表明,位于分离区起始位置 ($x/c=0.66$) 之前的附面层内低能流体随电压增加而动量增加,速度分布饱满,抗分离能力强,分离将延迟发生.图 11 (b) 表明, ϕ 为 20 kV 时回流已完全消失,证明等离子减小了流动分离.从图 11 (c) 可以看出,即使在再附点位置以后,应用等离子控制措施的附面层内速度也明显增加.

2.3 不同电极布置方式对流动控制效果的影响

2.2 节的结果表明 ϕ 为 5 kV 时等离子对附面层内流动基本无影响,初步分析是由于电极埋入绝缘介质的设计使得电极上方空气中电场强度较低,等离子数量过少,进而导致对壁面附近流动影响较弱.因此,在 ϕ 为 5 kV 的条件下,对比研究电极裸露与埋入式布置方案下等离子控制流动分离的能力.

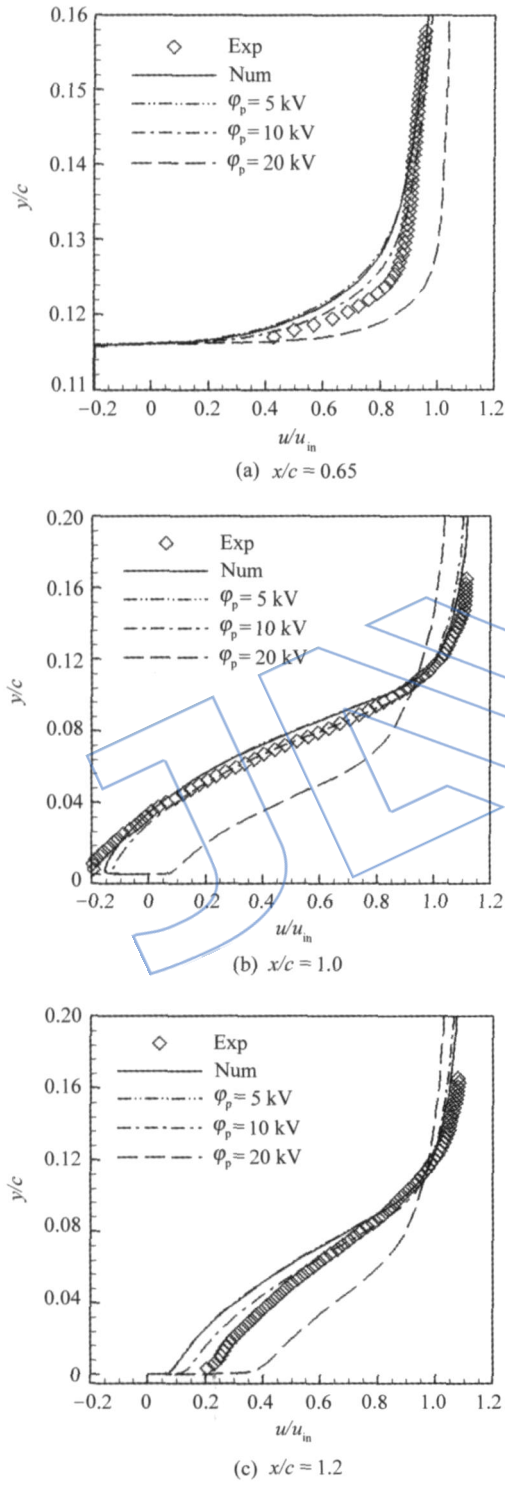


图 11 不同 x 向位置处附面层内 x 向速度分布
Fig. 11 x component of velocity profiles in boundary layer at different x positions

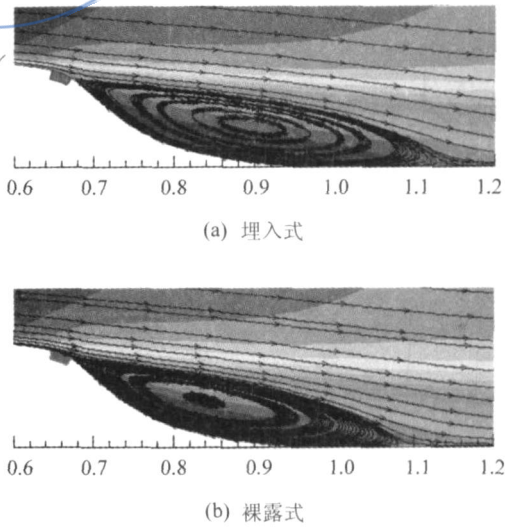


图 12 不同电极布置方式下流线与 x 向速度分布
Fig. 12 Streamlines and x component of velocity with different electrode arrangement

图 12 表明,与埋入式布置相比,电极裸露布置方案虽然破坏了凸包表面的光滑性,但有效的减小了分离,再附点提前至 $x/c=1.1$ 处,分离涡涡心也有所提前.从图 13 则可看出,电极裸露式附面层速度比埋入式最大增加约 0.5 m/s. 因此电

极裸露式布置更有利于在流场中产生更多的等离子,从而产生更大的电场力,其控制附面层分离的效果也更明显。

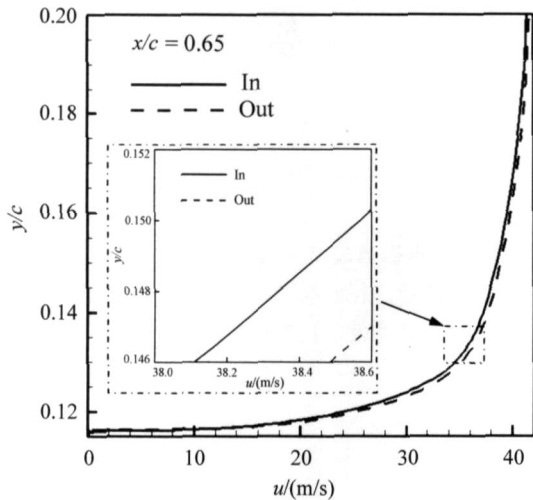


图13 不同电极布置方式0.65c处附面层速度分布

Fig. 13 Velocity profiles in boundary layer at 0.65c with different electrode arrangement

3 结 论

基于等离子发生器简化模型,求解电势方程,得出了电场及等离子分布,将电场力作为动量源相耦合到流动方程中,分析了静止流场中等离子诱导流动机制,并在NASA凸包模型上开展了等离子控制流动分离研究,初步探讨了不同电压与不同电极布置方式下等离子控制流动分离机理。研究结果表明:

1) 等离子受电场力作用而运动并与气体分子相互碰撞,可在静止流场中诱导出“壁面射流”。

2) 只有在电极交接处附近电场强度大于气体击穿电压的区域才有等离子,因此电极长度不必太长即可获得较好的等离子控制流动分离效果。

3) 等离子为附面层低能流体加入动量,能改变壁面附近速度分布,从而能抑制和减小流动分离。电压越大,其控制流动分离效果越明显。本文所研究的方案中,等离子作用促使分离点位置最大延迟达4%特征尺寸,再附点位置最大提前约12%特征尺寸。

4) 电极裸露在大气中,虽然略微破坏了壁面光滑性,但由于电极在该布置方式下能在气体中

产生更大的场强,从而有利于等离子的产生,其控制流动分离效果更显著。

参考文献:

- [1] Corke T, Jumper E, Post M, et al. Application of weakly-ionized plasmas as wing flow-control devices[R]. AIAA 2002-0350, 2002.
- [2] Jukes T N, Choi K, Johnson G, et al. Turbulent boundary-layer control for drag reduction using surface plasma[R]. AIAA 2004-2216, 2004.
- [3] List J, Byerley A R, Mc Laughlin T E, et al. Using a plasma actuator to control laminar separation on a linear cascade turbine blade[R]. AIAA 2003-1026, 2003.
- [4] Morris S C, Corke T C, Van Ness D, et al. Tip clearance control using plasma actuators [R]. AIAA 2005-0782, 2005.
- [5] Ramakumar K, Jacob J D. Flow control and lift enhancement using plasma actuators[R]. AIAA 2005-4635, 2005.
- [6] Suzen Y B, Huang P G, Jacob J D. Numerical simulation of plasma based flow control application[R]. AIAA 2005-4633, 2005.
- [7] Dmitriy M O, Corke T. Numerical simulation of aerodynamic plasma actuator effects [R]. AIAA 2005-1083, 2005.
- [8] Font G I, Jung S, Enloe C L, et al. Simulation of effects of force and heat produced by a plasma actuator on neutral flow evolution[R]. AIAA 2006-0167, 2006.
- [9] Gaitonde D V, Visbal M R, Roy S. Control of flow past a wing section with plasma-based body forces[R]. AIAA 2005-5302, 2005.
- [10] 刘万刚, 李一滨. 应用等离子体实现主动流动控制的实验研究[J]. 火箭与制导学报, 2006, 26(2): 110-111.
LIU Wangang, LI Yibin. Experimental study of using plasma to induce flow in the quiet air[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(2): 110-111. (in Chinese)
- [11] 张攀峰, 王晋军, 施威毅, 等. 等离子体激励低速分离流动控制实验研究[J]. 实验流体力学, 2007, 21(2): 35-39.
ZHANG Panfeng, WANG Jinjun, SHI Weiyi, et al. Experimental study on the separation control by plasma actuator in subsonic flow[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 21(2): 35-39. (in Chinese)
- [12] Greenblatt D, Paschal K B, Yao C S. A separation control CFD validation test case Part 1: Baseline and steady suction[R]. AIAA 2004-2220, 2004.
- [13] Chuan He, Cork T, Patel M P. Numerical and experimental analysis of plasma flow control over a hump model[R]. AIAA 2007-0935, 2007.