

# 等离子体激励控制圆柱绕流的影响因素分析

魏泮亭, 宋慧敏, 李应红, 苏长兵, 张朴

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:**通过等离子体激励控制圆柱绕流的实验,研究了等离子体电源激励电压和等离子体激励器激励电极数目对圆柱绕流流动控制效果的影响。研究表明,较高的激励电压可以获得较强的流动扰动,达到较好的流动控制效果;较多的激励电极数目可以激励较大区域的边界层流动,有利于增强流动控制效果。

**关键词:**等离子体;流动控制;圆柱绕流;电极

**中图分类号:** V23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)03-0001-03

圆柱绕流是流体力学的基本研究课题。研究圆柱绕流的流动控制技术,有助于解决由于流动诱导的振动、尾迹湍流、噪声和阻力等问题。目前常用的圆柱绕流控制方法有:在圆柱后放置分隔板或小棒、吹吸气以及在圆柱上布置基于电磁力的激励器等<sup>[1-6]</sup>。

随着等离子体流动控制这种新型流动控制手段的出现,越来越多的研究人员对等离子体激励控制圆柱绕流的问题开展了研究。如 Artana 进行了利用电晕放电等离子体控制圆柱近尾迹区域旋涡的实验研究<sup>[7]</sup>; Asghar 采用 5 000 Hz 的频率给上层裸露的电极供电,采用  $5\ 000 + \Delta f$  的频率对下层封装的电极进行激励,构成差频,与旋涡脱离的频率同步,实现了两个圆柱后的脱体涡同相<sup>[8]</sup>。

等离子体激励能够控制圆柱绕流,其根本原因是等离子体激励在圆柱近壁区诱导了一定强度和结构的流动扰动。因此,等离子体控制圆柱绕流的效果,也将受到这种流动扰动的强度和结构的影响。据此,本文对影响等离子体激励控制圆柱绕流的主要因素进行研究。

## 1 实验装置和步骤

实验装置由低速风洞试验系统、等离子体电源系统、烟流显示系统、数码摄像机和敷设等离子体激励器的圆柱试验件组成<sup>[9]</sup>。

试验装置中,压气机为风洞试验系统提供气源,为开口回流式低速风洞;等离子体电源系统为敷设在圆柱上的等离子体激励器提供高压、高频电源,输出电压 0 kV - 20 kV 连续可调,输出频率 20 kHz - 40 kHz 连续可调,电压的输出波形为正弦波;烟流显示系统由大功率直流电源、发烟丝组成,发烟油为甘油;数码摄像机拍摄试验过程中烟线反映出来的圆柱绕流流动图像。

用圆柱形的有机玻璃壁作为等离子体激励器的绝缘介质,在其内外表面沿展向平行铺设 10 组电极构成等离子体激励器,电极材料为锡箔。圆柱上侧面和下侧面各铺设 5 组电极;其中第 3 组电极距离迎风向驻点  $\pm 90^\circ$ 。铺设激励器后的圆柱剖面示意图如图 1 所示,为便于说明电极布局方案,图中电极厚度没有按比例绘制。图 1 中只给出了圆柱上侧的电极

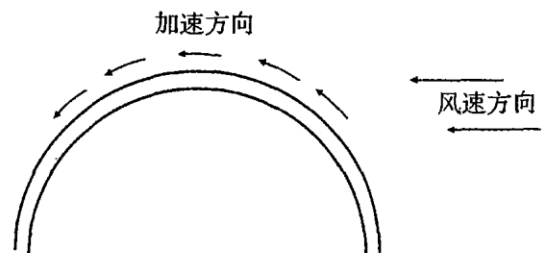


图 1 铺设激励器的圆柱剖面示意图

收稿日期:2006-12-05

基金项目:国家“863”计划资助项目(2003AA753025)

作者简介:魏泮亭(1974-),男,陕西西安人,博士生,主要从事航空发动机控制及可靠性等研究

组,圆柱下侧的电极与上侧对称敷设。图1中布置的激励器诱导的射流方向与风洞风速方向相同,可加速靠近圆柱表面边界层的流动。

试验中,采用高压射频电源给激励器供电,激励器附近的空气被电离,在圆柱的周围产生一层介质阻挡辉光放电等离子体。等离子体在电场力作用下定向运动,诱导附近的空气一起定向运动,形成激励,从而形成流动扰动,向圆柱绕流的边界层内注入能量,改变圆柱绕流的特征,达到流动控制的目的。

## 2 实验结果及分析

等离子体激励器的激励电压对诱导的流动扰动强度有直接影响。同时,激励电极数目对诱导的流动扰动结构有直接影响。为此,重点进行了激励电压和激励电极数目对圆柱绕流影响的研究。通过实验,获得了多种不同的激励电压和激励电极数目下,等离子体激励控制圆柱绕流的流动图像。

### 2.1 激励电压对圆柱绕流控制的影响

在风洞风速为4.27 m/s的情况下进行实验。该来流条件对应的基于圆柱直径的雷诺数为 $1.60 \times 10^4$ 。将上下层10根电极全部与高压射频电源相连。等离子体电源频率设定为25 kHz。在未施加等离子体激励的基准条件下和激励电压分别为4.5 kV,6.0 kV,7.0 kV的条件下进行试验,获得的圆柱绕流图像如图2所示。

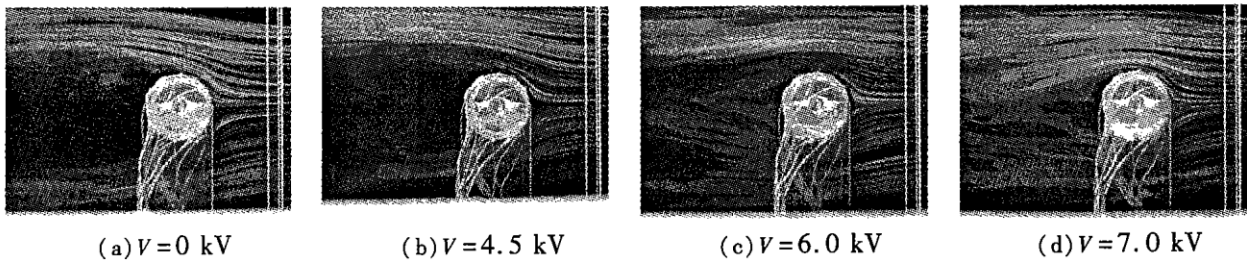


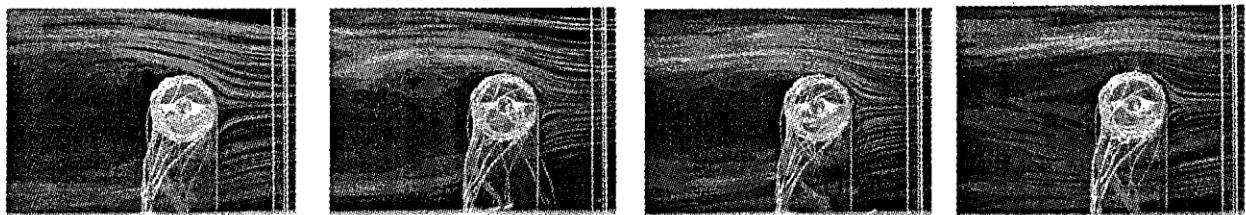
图2 不同激励电压下的圆柱绕流图像( $Re = 1.60 \times 10^4$ )

由图2可以看出,未施加等离子体激励时,圆柱绕流发生流动分离;等离子体激励电压为4.5 kV时,激励诱导的流动扰动对流动分离有一定的抑制作用,但效果并不理想;激励电压为6.0 kV时,圆柱后的流动分离区和旋涡结构基本消失,流动控制效果明显;等离子体激励电压为7.0 kV时,流动分离亦得到较好的抑制。由此可知,在试验雷诺数条件下,等离子体电源的激励电压对圆柱绕流流动的控制效果有直接影响。较高的激励电压可以诱导较强的流动扰动,从而取得较好的流动控制效果。反之,激励电压较低时,诱导的流动扰动过弱,难以有效改善圆柱绕流的流动。

### 2.2 激励电极数目对圆柱绕流控制的影响

在同样的雷诺数条件下,研究激励电极数目对圆柱绕流形态的影响。激励电压设定为6.0 kV,激励频率设定为25.0 kHz。试验中,改变激励电极的位置和数目,并分别拍摄圆柱的绕流图像。

在不加等离子体激励的条件下,进行基准实验,实验图像如图3(a)所示。单独激励上侧的任一组电极时,都没有观察到明显的圆柱绕流控制效果。分别激励上侧中间3组电极、上侧所有5组电极和上下侧所有10组电极的条件下,圆柱的绕流图像依次如图3(b)–3(d)所示。



(a) 等离子体激励关闭 (b) 激励上侧中间3组电极 (c) 激励上侧5组电极 (d) 激励上下侧10组电极

图3 不同激励电极数目时的圆柱绕流烟线显示图

图3(a)是未施加等离子体激励时,试验获得的雷诺数 $Re = 1.60 \times 10^4$ 条件下圆柱绕流的基准流动图像。由图可见气流绕流圆柱时发生明显的分离。图3(b)是激励圆柱上侧3组电极时获得的绕流图像。对比上、下侧的流动图像可以发现,由于圆柱仅上侧施加了等离子体激励,烟流图像上、下侧并不对称,上侧的

流动有所改善,表明等离子体激励起到了一定的流动控制效果。图3(c)与图3(b)相似,主要的差别在于激励了圆柱上侧全部5组电极。由于激励的电极组数目增加,电极组诱导的流动扰动区域增大,因此对流动分离的抑制效果明显强于图3(b)中仅激励3组电极时获得的效果。图3(d)是同时激励圆柱上、下侧5组电极组时获得的流动图像。由于上、下侧同时激励,因此流动图像显示了较好的对称性。同时,就单侧而言,可以观察到抑制流动分离的效果要优于仅激励上侧5组电极组时的效果。这一现象估计与上、下两侧同时激励时电极组之间电磁场的相互作用有关,还需要进一步研究。

### 3 结论

对等离子体电源的激励电压和接通的电极数目对圆柱绕流的影响进行了试验研究。研究结果表明:①等离子体电源的激励电压对流动的控制效果有直接影响,较高的激励电压可以取得较好的流动控制效果,而激励电压较低时流动控制效果并不明显;②激励电极数目对流动控制效果也有明显的影响,较多的激励电极数目可以激励较大区域的边界层流动,从而起到较好的流动控制效果。综合起来,获得最佳等离子体流动控制效果的基本前提,就是需要对等离子体电源的激励强度和激励器的结构、形式进行恰当的设计。

#### 参考文献:

- [1] Poshko A. On the Wake and Drag of Bluff Bodies[J]. *Journal of Aerospace Sciences*, 1955, 22: 124 - 130.
- [2] Oertel H. Wakes Behind Blunt Bodies[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1990, (22): 539 - 564.
- [3] 邵传平,鄂学全,魏庆鼎. 中等雷诺数圆柱尾流旋涡脱落的控制[J]. *力学学报*, 2002, 34(4): 609 - 615.
- [4] Park D S, Ladd D M, Hendricks E W. Feedback Control of Von Karman Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers[J]. *Physics of Fluids*, 1994, 6(7): 2390 - 2404.
- [5] 谭广琨,王晋军,李秋胜. 圆柱体减阻技术及其机理初步研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2001, 27(6): 658 - 661.
- [6] 周本谋,范宝春,陈志华,等. 电磁力连续控制圆柱绕流态变化的研究[J]. *流体力学实验与测量*, 2004, 18(1): 10 - 14.
- [7] Artana G, Diprimio G, NMoreau E, et al. Electrohydrodynamic Actuators on a Subsonic air Flow around a Circular Cylinder [R]. AIAA 2001 - 3056.
- [8] Asghar A. Controlling Shedding From Circular Cylinders Using Plasma Actuators [D]. Indiana: the University of Notre Dame, 2004.
- [9] 李应红,吴云,宋慧敏,等. 大气压等离子体流动控制实验[J]. *空军工程大学学报:自然科学版*, 2006, 7(3): 1 - 3.

(编辑:姚树峰)

## Analysis of Factors Affecting Plasma Actuation Based Cylinder - Around - Flow Control

WEI Feng - ting, SONG Hui - min, LI Ying - hong, SU Chang - bing, ZHANG Pu  
(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Experiments are performed to investigate the effect of plasma power supply voltage and the numbers of plasma actuator electrodes on the flow control effectiveness of the test cylinder. It is demonstrated that with a higher actuating voltage, an enhanced flow disturbance could be attained, and a better flow control effectiveness is achieved. It is also observed that when more electrodes are activated, larger area of boundary layer would be activated, which is beneficial to enhancing the flow control effectiveness.

**Key words:** plasma; flow control; the cylinder - around - flow; electrode