

# 纳秒脉冲等离子体气动激励控制平板附面层的研究

岳太鹏 李应红 孙冬 崔巍  
(空军工程大学 工程学院 陕西 西安 710038)

**摘 要:** 为研究纳秒脉冲等离子体气动激励控制平板附面层的作用机理以及不同参数下的变化规律,利用自行研制的速度测量系统对纳秒脉冲等离子体气动激励诱导的气流速度进行了测量。结果表明:不同的激励组合方式下,等离子体气动激励效果不同,介质阻挡放电产生的效果最好;纳秒脉冲等离子体激励诱导气流加速的效果随激励电压的增大而增强,其作用于低速气流的效果强于高速气流;纳秒脉冲等离子体气动激励诱导射流方向与壁面有一定夹角;沿下游方向,等离子体气动激励诱导气流加速效果明显减弱。

**关 键 词:** 等离子体气动激励;附面层;诱导;激励组合;介质阻挡放电

中图分类号:TK121 文献标识码:A

## 引 言

等离子体流动控制是一项基于“等离子体气动激励”的新概念流动控制技术,已成为国际上空气动力学领域研究的新热点。通过等离子体气动激励控制物体表面边界层的流动,改变边界层的能量结构和特性,起到流动控制的作用。

国内外研究等离子体气动激励的结果表明:等离子体气动激励在边界层控制、翼型减阻、旋涡控制、激波控制、抑制噪声、提高燃烧稳定性和效率等方面都非常有效<sup>[1-6]</sup>,其中 Jukes 利用热线和冷线测试方法进行了等离子体气动激励控制平板附面层的实验研究<sup>[7-9]</sup>;Seraudie、Moreau 和 Soldati 研究了表面电晕放电、介质阻挡放电等离子体气动激励对附面层加速以及层流-紊流附面层转捩的影响<sup>[10-13]</sup>;Porter 使用皮托管对等离子体气动激励器诱导的气流速度和体积力进行了测试<sup>[14]</sup>,研究了等离子体气动激励的作用机理与随激励电压、功率等参数的变化规律。

在肯定等离子体流动控制效果的同时,发现同样存在不足之处,例如微妙脉冲等离子体气动激励

诱导的气流速度最大只能达到 6 m/s,在特定的条件下可以产生有效的激励作用,而其它条件下的作用十分微弱。寻找激励效果更好的激励方式十分迫切,而研究发现纳秒脉冲等离子体气动激励作用效果明显强于微妙脉冲放电,但其作用机理尚不清晰,不能很好地进行实际应用。因此,本研究对纳秒脉冲等离子体气动激励作用下平板附面层的速度特性进行了实验研究,总结了纳秒脉冲等离子体气动激励效果随激励组合方式、激励电压和来流速度等条件下的变化规律,探索提高等离子体气动激励强度的方法。

## 1 实验系统

实验系统包括低速直流风洞、高压高频电源、等离子体气动激励器、数据测量系统、电参数测试系统等。

### 1.1 低速直流风洞

低速直流风洞风速范围为 5~110 m/s,速度测量是在风洞实验段内进行,其尺寸为 0.2 m×0.2 m×0.6 m,实验段的实物图与速度测量流程如图 1 所示。

### 1.2 高压高频电源

采用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,脉冲功率为 10 MW,脉冲频率为 0~2 kHz 可调,电源功率为 2 kW。

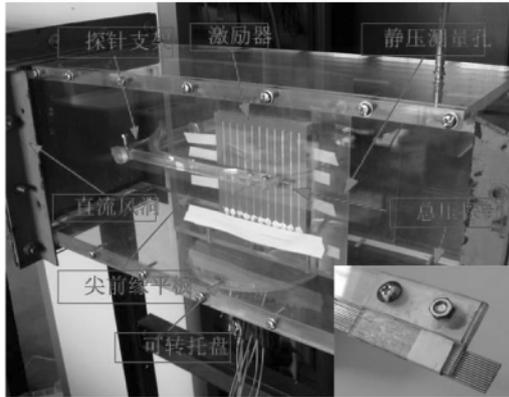
### 1.3 等离子体气动激励器

实验中选用典型布局的激励器,电极均为铜箔,绝缘材料为聚四氟乙烯,其结构和主要参数分别如图 2 和表 1 所示。

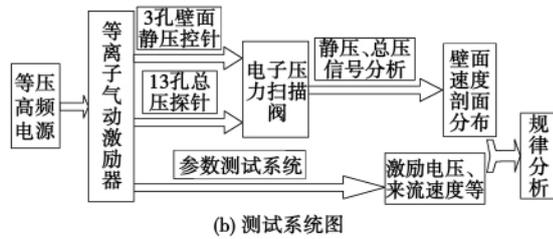
收稿日期:2010-04-09; 修订日期:2010-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50906100)

作者简介:岳太鹏(1986-),男,宁夏中卫人,空军工程大学硕士研究生。



(a) 实验段设备



(b) 测试系统图

图 1 实验段实物图与速度测量流程

Fig. 1 Material object drawing in the test section and speed measurement flow path

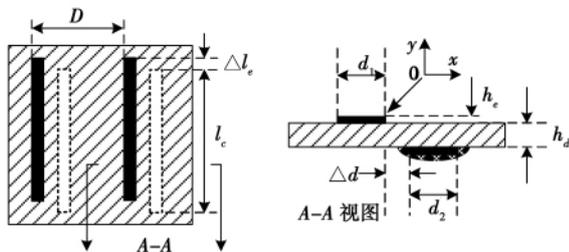


图 2 等离子体激励器结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of plasma excitor structure

表 1 激励器的主要几何参数

Table. 1 Main geometrical parameters of an excitor

几何参数	数值
电极长度 $l_c$ /mm	100
电极偏置长度 $\Delta l_c$ /mm	10
上层电极宽度 $d_1$ /mm	2
电极内间距 $\Delta d$ /mm	0
下层电极宽度 $d_2$ /mm	2
电极组间距 $D$ /mm	10
电极厚度 $h_c$ /mm	0.03
绝缘材料厚度 $h_d$ /mm	1
电极组数目 /个	2

### 1.4 数据测量系统

速度测量系统以伯努利方程为基础,包括自行研制的 13 孔总压探针、3 孔壁面静压探针、DSY - JB 电子式压力扫描阀等,其中压力扫描阀的测量量程为  $\pm 7$  kPa,测量精度优于 0.1% FS。

### 1.5 电参数测试系统

电参数测试系统由 P6015A 型高压探针、P6022 型电流探针和 TDS3012B 型示波器等组成,分别用来测量放电过程中激励电压、激励频率和放电电流等参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 纳秒脉冲放电电压 - 电流特性

在静止空气条件下,调节放电电压峰值为 10 kV,重复频率为 1 kHz 时,对纳秒脉冲放电特性进行测量,结果如图 3 所示。

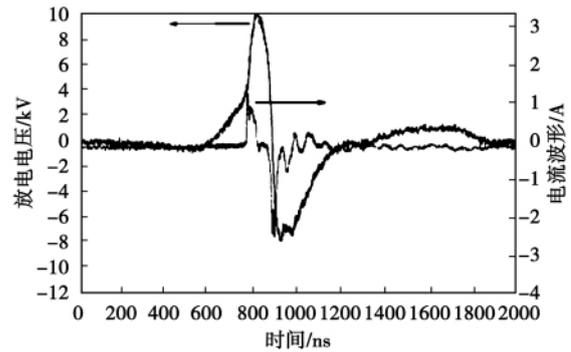


图 3 放电电压 - 电流波形图

Fig. 3 Discharge voltage-current wave shape drawing

由图 3 可知,纳秒脉冲放电最大放电电流为 2.6A。与微秒放电相比,纳秒脉冲放电的上升沿陡、脉宽窄,而空气在脉冲高压下的击穿电压降低,绝缘材料抗纳秒脉冲高压的击穿能力增强,这就使得纳秒脉冲放电的约化电场比微秒放电显著增大(1 倍以上,峰值约为 500 Td),并且能量集中在纳秒时间尺度内集中释放,使得峰值功率很大(几十千瓦量级)。由于放电重复频率较低,纳秒脉冲放电消耗的平均功率并不高,这种高峰值功率、低平均功率的激励对流动控制十分有利。

### 2.2 诱导气流速度随激励组合方式的变化

为比较不同放电方式下等离子体气动激励的作用效果,实验中选用了三种激励组合方式,如图 4 所示。

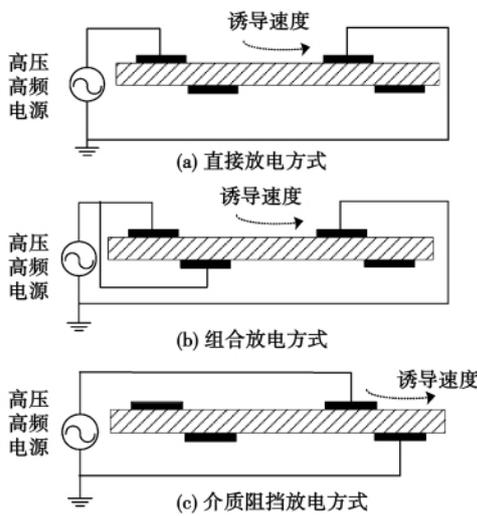


图 4 激励组合方式示意图

Fig.4 Schematic drawing of excitation combination modes

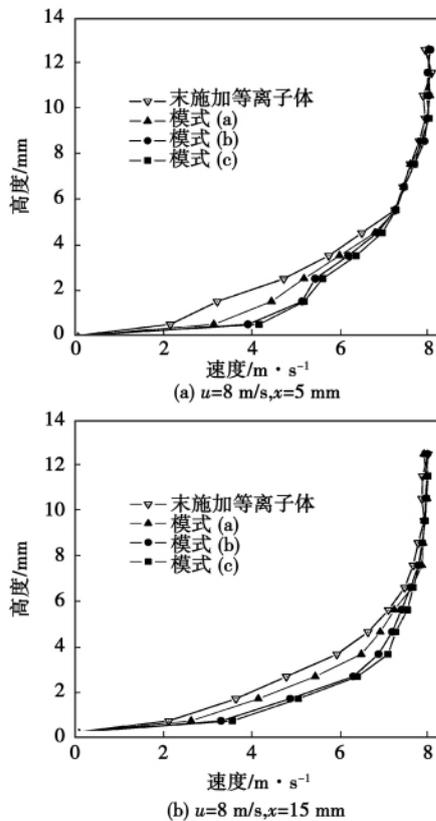


图 5 气流速度剖面分布随激励组合方式的变化  
Fig.5 Change of the air speed distribution in sections with the excitation combination modes

等离子体放电前半周期,前面电极是负极,其释放出的电子在电场作用下向上游运动,中途与中性粒子发生碰撞使其电离产生正离子,正离子向下游

运动,并将动量传递给中性粒子,从而形成了指向下游的作用力;当极性改变后,恰恰相反,后面电极释放出的电子向下游移动,加上前半周期放电残留的电子,使得后半周期电子数目增大,而在一个完整的放电周期结束前,几乎所有的电子都进到后面电极中,这样下一个放电周期开始时只有少量几个电子,一个放电周期结束,作用力得到积累,诱导气流向下游加速。

固定激励频率和激励电压分别为 1 kHz 和 9 kV,调节来流速度  $u$  为 8 m/s,对距第二组电极上层电极下游  $x = 5、15$  mm(对应雷诺数分别为  $3.56 \times 10^4$  和  $4.11 \times 10^4$ ) 处等离子体气动激励诱导的气流速度进行测量,结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出:在有来流情况下,等离子体气动激励可以增大平板表面的气流速度,改变平板附面层的流动状态,使得速度分布饱满。激励组合方式不同,其改变附面层流动状态的能力不同,介质阻挡放电方式效果最好,组合放电次之,直接放电方式最弱,原因可能是组合放电前半周期向上游的作用力对后半周期的抵消严重,从而减小了作用力积累;而直接放电中电极间距过大导致电场强度很弱,加速效果不明显。

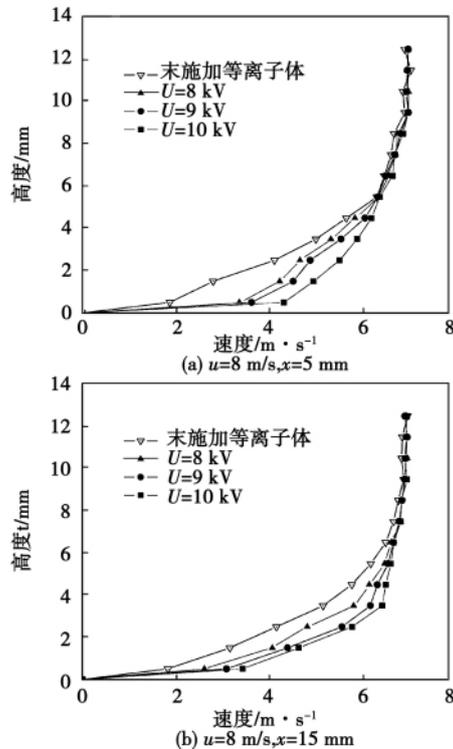


图 6 气流速度剖面分布随激励电压的变化  
Fig.6 Change of the air speed distribution in sections with the excitation voltage

### 2.3 诱导气流速度随激励电压的变化

固定激励频率 1 kHz, 调节来流速度  $u$  为 8 m/s, 采用介质阻挡放电组合方式, 调节电压分别为 8 kV、9 kV 和 10 kV, 测得距第二组电极上层电极下游  $x = 5、15$  mm 处气流速度随激励电压的变化关系如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 随着激励电压的增加, 电源对等离子体放电输入的能量增大, 激励器附近电场

强度增大, 用于正离子和中性粒子动量传递的有效功率增大, 加速气体的能力增强。

### 2.4 诱导气流速度随来流速度的变化

固定激励频率和激励电压分别为 1 kHz 和 9 kV, 采用介质阻挡放电组合方式, 调节来流速度  $u$  分别为 8 和 28 m/s, 对  $x = 5、15$  mm 处等离子体气动激励作用下的气流速度进行测量, 实验结果如图 7 所示。

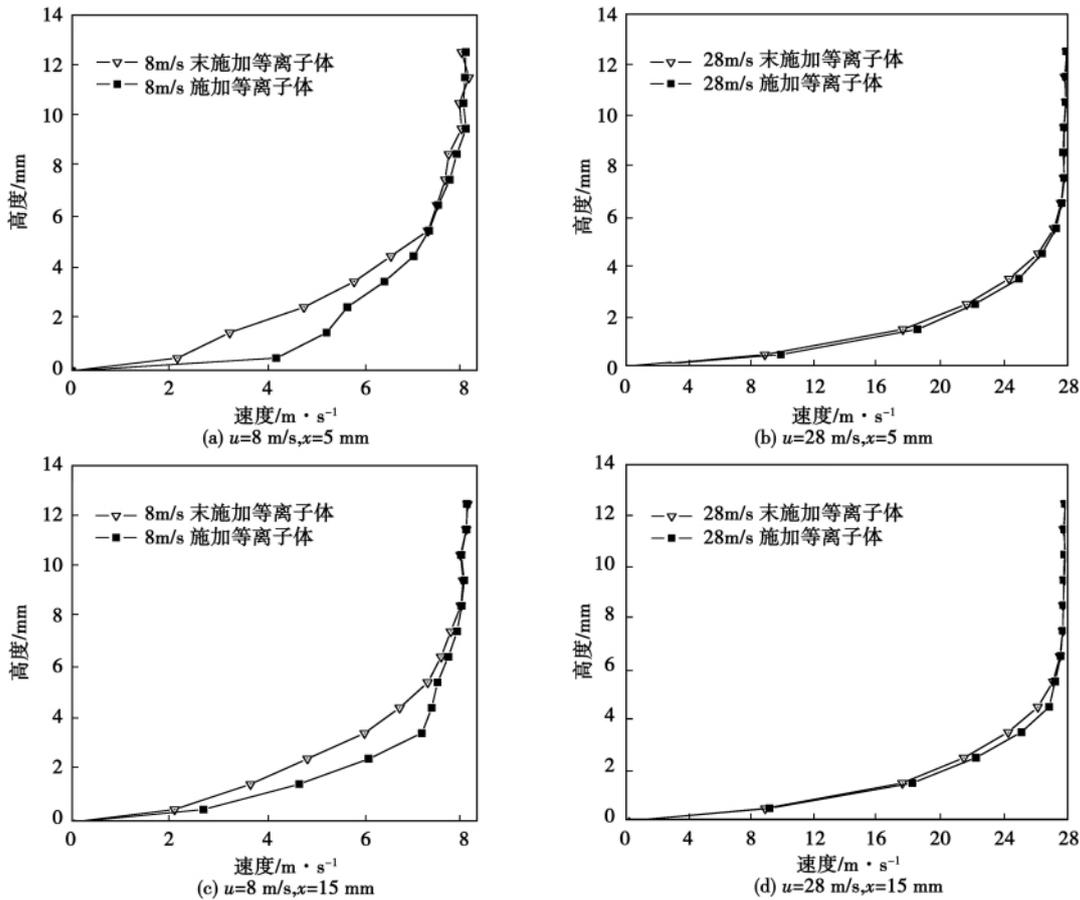


图 7 气流速度剖面分布在不同来流速度下的绝对变化

Fig. 7 Absolute change of the air speed distribution in sections at different incoming flow speeds

在来流速度为 8 m/s 时, 气流被明显加速, 当来流速度增加到 28 m/s 时, 气流加速效果减弱, 说明纳秒脉冲等离子体气动激励作用于低速气流的效果强于高速气流。

分别将两种来流速度下施加等离子体激励和未施加等离子体激励气流速度相减, 得到等离子体激励气流速度相对于基准速度的变化, 如图 8 所示。

由图 8 结果说明, 纳秒脉冲等离子体在来流速度为 28 m/s 时依然可以有效控制气流流动, 这是微妙脉冲等离子体激励很难实现的。比较图( a )、( b )

结果可以知道, 沿高度方向,  $x = 5、15$  mm 处纳秒脉冲等离子体气动激励诱导气流加速的最佳高度范围分别为 0.5 ~ 1.5 mm 和 2.5 ~ 3.5 mm, 说明纳秒脉冲等离子体气动激励诱导射流的方向与壁面有一定夹角; 沿下游方向, 纳秒脉冲等离子体气动激励诱导气流加速效果明显减弱, 因此, 在流动控制时应使等离子体气动激励器的敷设位置靠近作用点, 以便与流场充分耦合, 实现最佳激励效果。

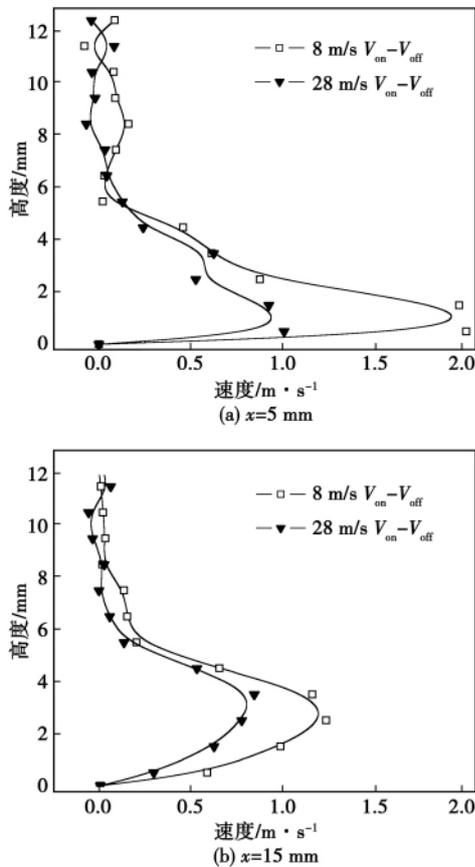


图 8 气流速度剖面分布在不同来流速度下的相对变化

Fig. 8 Relative change of the air speed distribution in sections at different incoming flow speeds

### 3 结 论

通过速度测量,分析纳秒脉冲等离子体气动激励诱导的气流速度随激励参数和来流参数的变化规律,得出以下结论:

- (1) 纳秒脉冲放电的上升沿陡、脉宽窄,具有高峰值功率、低平均功率的特点;
- (2) 激励组合方式不同,激励效果不同,介质阻挡放电诱导气流加速的作用效果最好;
- (3) 随着激励电压的增加,电源对等离子体放电输入的能量增大,激励器附近电场强度增大,用于正离子和中性粒子动量传递的有效功率增大,加速气体的能力增强;
- (4) 在不同的来流速度下,纳秒脉冲等离子体气动激励效果不同,纳秒脉冲等离子体气动激励作用于低速气流的效果强于高速气流;

(5) 纳秒脉冲等离子体气动激励诱导气流加速方向与壁面有一定夹角;沿下游方向,等离子体气动激励诱导气流加速效果明显减弱。

### 参考文献:

[1] ROUPASSOV 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.

[2] LI YING-HONG, SONG HUI-MIN, WU YUN, et al. Experiments of plasma actuation based compressor cascade flow separation suppression [C]//The 1st International Symposium on Jet Propulsion and Power Engineering, Kunming, 2006, 2006-4SJPE-5008, 2006, 2: 420-422, 2006.

[3] MORRAU E. Airflow control by non-thermal plasma actuators [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40: 605-636.

[4] SOSA R, AIRTANA G, MOREAU E, et al. Stall control at high angle of attack with plasma sheet actuators [J]. Experiments in Fluids, 2007, 42: 143-167.

[5] VO H D. Control of rotating stall in axial compressors using plasma actuators [R]. AIAA 2007-3845, Miami: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[6] 程邦勤, 孙 权, 李 军, 等. 基于等离子体气动激励的斜劈诱导激波控制 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 348-352. CHENG Bang-qin, SUN Quan, LI Jun, et al. Ramp-induced shock wave control aerodynamically excited by using plasma [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(2): 348-352.

[7] JUKES T N, CHOI K, JOHNSON G A, et al. Turbulent boundary-layer control for drag reduction using surface plasma [R]. AIAA 2004-2216, 2004.

[8] JUKES T N, CHOI K, JOHNSON G A, et al. Turbulent drag reduction by surface plasma through spanwise flow oscillation [R]. AIAA 2006-3693, 2006.

[9] JUKES T N, CHOI K S, JOHNSON G A, et al. Characterization of surface plasma-induced wall flows through velocity and temperature measurements [J]. AIAA Journal, 2006, 44(4): 764-771.

[10] SERAUDIE A, AUBERT E, NAUDE N, et al. Effect of plasma actuators on a flat plate laminar boundary layer in subsonic condition [R]. AIAA 2006-3350, 2006.

[11] MOREAU E, LEGER L, TOUCHARD G. Effect of a DC surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25 m/s [J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64: 215-225.

[12] SOLDATI A, MARCHIOLI C. Prospects for modulation of turbulent boundary layer by EHD flows [J]. Turbulence Structure and Modulation, 2001, 119-160.

[13] SOLDATI A. Influence of large-scale streamwise vortical EHD flows on wall turbulence [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23: 441-443.

[14] PORTER C O, MCLAUGHLIN T E, ENLOE C L, et al. Boundary layer control using a DBD plasma actuator [R]. AIAA 2007-0786, 2007.

[15] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社. ZHANG Zhao-shun, CUI Gui-xiang. Fluid Dynamic [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

Experimentally studied were the partial load characteristics of a gas-engine-driven heat pump unit and mainly analyzed was the law governing the influence of the end water flow rate and rotating speed on the heat production performance of the unit. It has been found that the load of the condenser, total waste heat, performance coefficient and primary energy source utilization rate will all increase with an increase of the end water flow rate. When the end water flow rate increases from  $1.8 \text{ m}^3/\text{h}$  to  $3.6 \text{ m}^3/\text{h}$ , the performance coefficient and primary energy source utilization rate will increase by 11.6% and 19.5% respectively. The load of the condenser and the total waste heat will increase with an increase of the rotating speed of the engine and the performance coefficient and the primary energy source utilization rate, however, will decrease by 40% and 9.8% respectively when the rotating speed of the engine increases from 1300 r/min to 2000 r/min. The gas-engine-driven heat pump unit boasts good partial load characteristics at various end water flow rates and rotating speeds of the gas-engine. **Key words:** gas-engine-driven heat pump, heat production operating condition, variable end water flow rate, variable speed, partial load

纳秒脉冲等离子体气动激励控制平板附面层的研究 = **Study of the Boundary Layer on a Plate Aerodynamically Excited and Controlled by Using Nanosecond Pulse Plasma** [刊, 汉] YUE Tai-peng, LI Ying-hong, SUN Dong, CUI Wei (Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, China, Post Code: 710038) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(5). - 528 ~ 532

To study the working mechanism of the boundary layer on a plate aerodynamically excited and controlled by using nanosecond pulse plasma and the law governing its change under different parameters, the speed of air flow aerodynamically excited and controlled by using the nanosecond pulse plasma was measured by utilizing a self-developed velocity measurement system. The measurement results show that under different combined excitation modes, the aerodynamic excitation effectiveness by using the plasma is varied and that produced by using the medium barrier discharge is regarded as the best. That achieved by using the nanosecond plasma to excite and induce the air to accelerate will be enhanced with an increase of the excitation voltage. Its effectiveness played on a low speed air flow is better than that on a high speed air flow. The jet flow direction aerodynamically excited and induced by using the nanosecond pulse plasma forms a certain angle with the wall surface. Along the downstream direction, the air flow acceleration effectiveness aerodynamically excited and induced by using the plasma is weakened obviously. **Key words:** aerodynamic excitation by using plasma, boundary layer, induction, excitation combination, medium barrier discharge

辐射传热定律下外燃机最大输出功优化 = **Optimization of the Maximum Power Output of an External Combustion Engine Under the Law of Radiation-based Heat Conduction** [刊, 汉] MA Kang, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Postgraduate School, Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(5). - 533 ~ 537

With a piston-type external combustion engine serving as an object of study, optimized was an external combustion