

脉冲控制模式电弧等离子体对凹腔性能改变的研究

周思引^{1,2} 聂万胜¹ 冯伟¹ 程钰锋¹⁽¹⁾ 装备学院航天装备系, 北京 101416; ⁽²⁾ 国防科学技术大学高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要 基于准直流电弧放电热阻塞原理,以超燃燃烧室凹腔为研究对象,在凹腔后向台阶上部与凹腔底部靠近前壁面附近布置电极,脉冲控制方式产生丝状等离子体,分析了不同脉冲控制频率下壁面压力、剪切层、凹腔阻力以及质量交换率等性能参数的变化。结果表明:前后缘附近特征点的第一振荡特征频率都接近脉冲控制频率,之后的特征频率则与控制频率成倍频关系;丝状等离子体的存在破坏了凹腔内大回流区结构;等离子体对凹腔产生了预热效果;等离子体的存在减小了凹腔冷流阻力,且在较高控制频率下的阻力系数更低;凹腔质量交换率因等离子体的存在而大幅提高,较高控制频率下具有更高的质量交换率。

关键词 物理光学; 等离子体; 热源; 凹腔; 脉冲控制; 数值模拟

中图分类号 V236 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP50.072601

Research on the Performance Change of Cavity by Pulsed Control Plasma

Zhou Siyin^{1,2} Nie Wansheng¹ Feng Wei¹ Cheng Yufeng¹¹ Department of Space Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China² Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The effect of quasi-DC discharge plasma filament on the cavity in a scramjet combustor is numerically investigated based on the dominant thermal mechanism. The electrodes are located near the upper edge of the back-step and at the bottom of the cavity. And plasma filament is formed in pulsed control mode. Change of performance parameters such as wall pressure, shear layer, cavity drag force and mass exchange rate under the different pulsed control frequencies is analyzed. Simulation results demonstrate that the first oscillation frequencies of the key points are close to the pulsed control frequencies, and other oscillation frequencies are the multiple of the pulsed control frequencies. The big recirculation zone is destroyed by the plasma filament, yet the cavity is preheated. The drag coefficient drops more apparently with higher control frequency, while the rate of mass exchange increases much more by the plasma, the mass exchange rate is higher under higher control frequency.

Key words physical optics; plasma; heat source; cavity; pulsed control; numerical simulation

OCIS codes 260.2160; 350.5400; 150.5495

1 引言

超燃冲压发动机是未来高超声速推进动力装置的最佳方案之一,如何在超声速气流里实现高效、稳定的燃烧是首先要突破的关键技术。一系列实验都表明,对于超燃燃烧室,凹腔在很宽当量比范围内都是一个非常有效的助燃、稳焰装置^[1-2]。然而凹腔构型不具备动态可调性,在一定飞行工况下性能有限,如何拓展其助燃、稳燃能力是一新兴的研究方向。

等离子体是由大量带电粒子组成的非束缚态宏观体系,它由自由电子、自由离子和中性粒子混合而成。不带电的普通气体在受到外界高能作用后,部分原子中的电子吸收的能量超过原子电离能后会脱离原子核而成为自由电子,同时原子因失去电子而成为正离子,就可形成等离子体。在超燃冲压发动机工作环境下,

收稿日期: 2013-02-01; **收到修改稿日期:** 2013-03-15; **网络出版日期:** 2013-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(11205244)、高超声速冲压发动机技术重点实验室开放基金

作者简介: 周思引(1988—),男,硕士研究生,主要从事等离子体流动控制方面的研究。E-mail: darwinyin@sina.com

导师简介: 聂万胜(1969—),男,博士,教授,主要从事液体火箭发动机方面的研究。E-mail: nws69@126.com

基于等离子体的控制燃烧的方法已经被公认为该领域最具有希望的技术之一^[3-4]。从等离子体辅助燃烧的概念可知,等离子体效能一般体现在三个方面:空气与燃料混合增强;由于加热和活性粒子出现所致的燃烧增强;控制流动结构来稳定火焰。将等离子体与凹腔技术结合起来,将会出现不同于过去二者单独应用时的稳燃、助燃效果,有望在使超燃冲压发动机燃烧室工作范围更宽、工作性能更优越方面取得重大突破。

本文研究冷流条件下的稳焰凹腔在等离子体作用下性能的变化,在没有外界磁场干扰下,准直流电弧放电等离子体对流场的影响主要反映在静电力及热效应^[5]方面,有关研究表明增大激励器输入功率,等离子体温度会升高,而静电力不会增大^[6],故在超声速流动中准直流放电等离子体产生的静电力作用可以忽略,主要考虑其热效应。Leonor 等^[7]在准直流放电等离子体助燃实验中,得到的放电持续时间达 50~500 ms,通过单个电极的电流为 1~4 A,平均输入电功率为 1~10 kW,其数值仿真中将等离子体区域简化为一可控热源,并与实验结果进行了比较,认为简化处理是合理的。

本文采用准直流电弧放电等离子体热阻塞机理^[8],将等离子体简化为一可控热源,针对冷流条件下安装了单个开式火焰稳定凹腔的超燃燃烧室进行数值模拟。通过改变脉冲控制产生等离子体的频率,详细分析了凹腔关键性能参数变化趋势,为等离子体凹腔性能优化提供参考。

2 数学物理模型

准直流电弧放电的物理过程为等离子体场发射过程^[9],增加电流到一定程度时,发射电子对微尖加热作用使得尖端温度上升,随即使其被发射电子电离。进而形成包围阴极的等离子体壳层,它以一定速度向阳极膨胀,之后整个阴阳极间发生短路,即发生了准直流电弧放电。当温度达到 5000 °C 以上时,气体放电电离过程性质接近于纯粹的热电离,等离子体中的电子平均动能趋近于中性气体原子的平均动能,因而此类放电可以用热力学理论加以解释。基于此,本文对等离子体区域作简化处理,输入等离子体电功率为 1.25 kW,观察其对燃烧室流场的影响。

含等离子体源项的 Navier-Stokes (N-S)控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{U} + \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{X} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{Y} = \mathbf{H}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{U} 、 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 的具体表达式见文献^[10], $\mathbf{H} = (0 \ f_x \ f_y \ P)^T$ 。

理想气体状态方程为

$$p = (\gamma - 1)\rho\epsilon, \quad (2)$$

式中 ρ 是气体密度; γ 是气体比热比; ϵ 是单位质量内能; f_x 、 f_y 是基于电动力学的等离子体体积力源项,对于超声速流动可以忽略^[11]; P 是等离子体能量源项, $P = \epsilon_e\sigma_bAT_1^4$, 其中 ϵ_e 是电极材料的热辐射系数, σ_b 是斯特藩-玻尔兹曼常量, A 是电弧的表面积, T_1 是电弧温度^[12]。

湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型^[13],该模型考虑了正交发散项等,对近壁面及远壁面都合适。

3 模拟对象与边界条件

仿真常规等直通道超燃燃烧室,为考察等离子体对火焰稳定凹腔性能的影响,固定凹腔几何构型,取凹腔底壁长度 $L = 30$ mm,深度 $D = 5$ mm,后壁面倾角为 45° ^[14],燃料喷孔位于凹腔上游 20 mm 处,喷孔直径 $d = 2$ mm,垂直喷射氢气;等离子体区域弯曲跨过凹腔后向台阶,形如丝状,具体电极布置方案与等离子体丝区域如图 1 所示,其中等离子体丝直径取 2 mm。为提高计算网格质量,对流场分区生成结构化网格,其中等离子体丝、壁面等关键区域进行加密。

等离子体脉冲方式产生的控制频率分别为 5 kHz、10 kHz;燃烧室入口来流 $Ma = 2.5$,入口静温 $T = 823$ K,静压 101 kPa,来流组分为空气,燃料喷孔喷注总压 0.6 MPa,静压 334 kPa,喷流总温 290 K。所有壁面采用无滑移、绝热条件,出口参数由外插值获得。

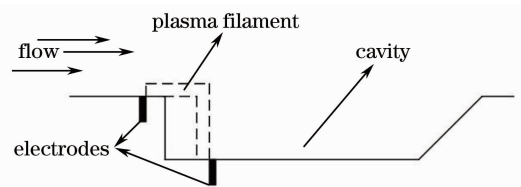


图 1 等离子体丝位置简化示意图

Fig. 1 Schematic of plasma filament in cavity

4 仿真结果与讨论

取某个流场变化稳定的周期,选取一些特征时刻的瞬态流场进行分析。5 kHz 控制频率时一个周期为 0.2 ms,从 2.40 ms 开始产生等离子体,2.44 ms 时刻对应控制段刚结束;控制频率为 10 kHz 时,一个周期为 0.1 ms,2.51~2.52 ms 为施加等离子体控制期间。

4.1 壁面压力变化与温度场分析

图 2 为两种控制频率在一个周期中几个典型时刻的壁面压力分布。曲线的起点位于喷嘴之后的壁面,受喷流后再附激波影响,压力从喷流后的回流区较低静压开始上升,一直上升到凹腔上游电极附近,之后在凹腔后壁面附近受撞击激波与后缘激波作用,压力又出现增长,而后趋于稳定。等离子体脉冲控制下使凹腔及其附近压力分布较无等离子体时大为平缓。各条压力分布曲线在非波系等结构出现区域基本重合,故重点关注凹腔及其附近压力波动幅度的改变。进一步分析,在凹腔存在区域及其附近壁面,10 kHz 控制频率时的几个时刻的压力分布较 5 kHz 时更加平坦,这是由于凹腔前后缘附近压缩波强度减弱所致。

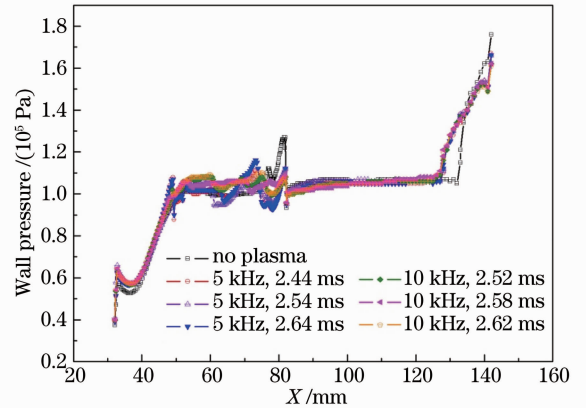


图 2 壁面压力分布

Fig. 2 Distribution of the wall pressure

图 3 给出了一个周期下凹腔流场温度变化。最初的等离子体丝存在区域温度明显高于其他地方,随着凹腔进入无控制段,高温等离子体向下游流动,热量也通

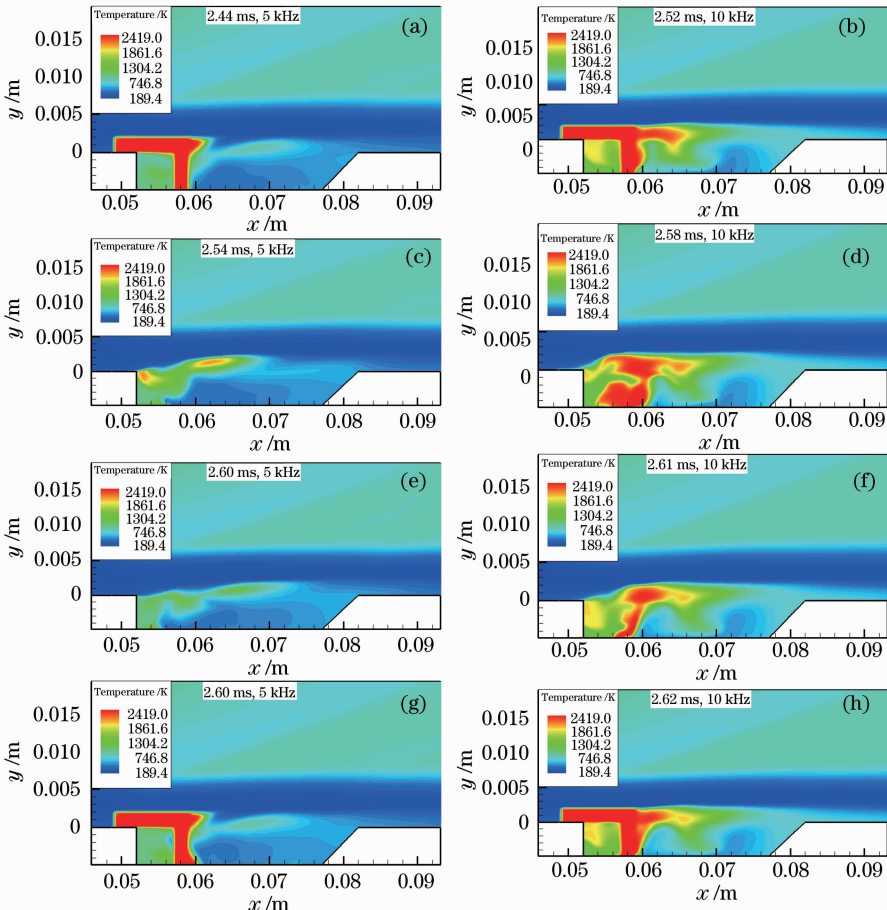


图 3 一个周期中几个典型时刻流场温度等值图

Fig. 3 Temperature contour of the flow field at several key moments in one period

通过对流、扩散方式传给凹腔内其他气体,慢慢腔内温度趋于均匀。在相同占空比、相同输入电功率下,与5 kHz控制频率相比,10 kHz时的凹腔内部整体温度更高,等离子体扩散作用更强,使得整个凹腔获得一定预热,进而可能导致剪切层上抬,影响其与凹腔后缘的撞击。

4.2 剪切层与回流区变化

超声速流中剪切层起始于凹腔前缘,其撞击凹腔后壁会产生撞击激波,另外凹腔前缘也常存在一定的波系结构,故监测这两处附近某点压力值。产生脉冲控制等离子体时前后缘附近特征点的压力呈现较均匀的振荡,如图4(a)、(b)所示,尤其在 $t=2.00$ ms后振荡出现明显的周期性特征,整体而言前缘附近高频控制下压力幅值较高,后缘则低频控制下幅值较高。

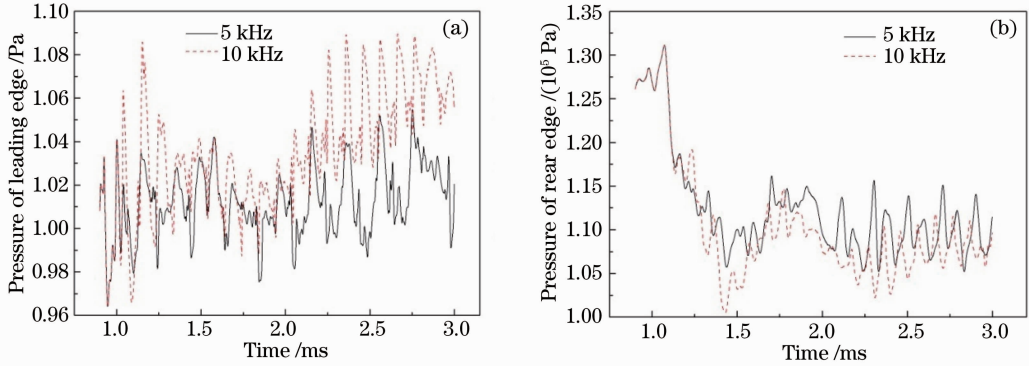


图4 压力历程。(a)前缘附近特征点;(b)后缘附近特征点

Fig. 4 Pressure history. (a) Key point near leading edge; (b) key point near rear edge

对图4(a)、(b)作快速傅里叶变换,获得的频谱如图5所示,对因施加等离子体后出现的前后缘附近监测点的特征频率标示于图中各个峰值旁。观察发现,不论是前缘还是后缘附近的压力振荡出现的第一个特征频率(主频)都近似于所施加等离子体的控制频率,其后各特征振荡频率与主频成倍频关系,振荡强度逐渐衰减。比较两种控制频率下的前缘点频率,发现图中标示的特征频率下的归一化功率谱密度值存在对应关系,即不同控制频率下的各个主、倍频对应的能量谱密度值相当,这说明振荡强度不受等离子体控制频率影响。

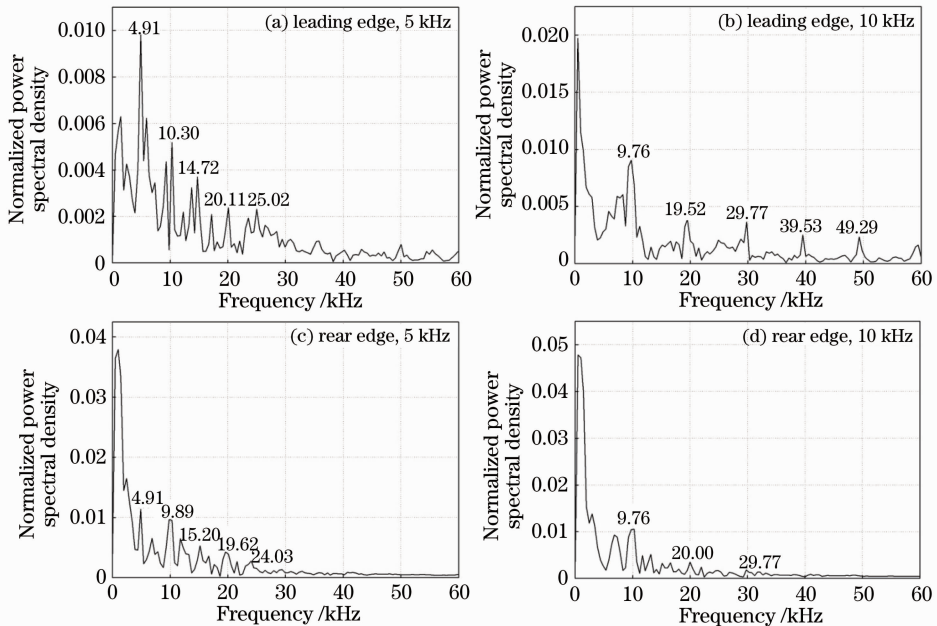


图5 特征点频率

Fig. 5 Frequencies of the key points

另外为了观察脉冲控制模式等离子体对回流区的影响,给出了凹腔局部流场马赫数及流线图,如图6所示。丝状等离子体的存在极大地改变了凹腔内的回流区结构,腔内本来存在的一个大回流区结构被破坏,出现一些小回流结构。

4.3 凹腔阻力特性分析

凹腔阻力包括压阻和摩阻,一般摩阻和压阻相比很小,故仅分析压阻特性。计算凹腔前、后壁面在流向上的受力,对于本文的等截面燃烧室,燃烧室阻力主要由凹腔产生,其值等于前、后壁受力之差。动态考察不同时刻的阻力大小,结果概括于表1、表2中,规定阻力为正值。

由于受脉冲控制等离子体激励,不同时刻后壁面受力较无等离子体凹腔的后壁受力值576.9 N都存在不同的减小量,将前后壁受力值作差,最终发现凹腔阻力比无等离子体凹腔的小。另外,两种控制频率下凹腔阻力在某些特征时刻出现了负值,这表明此刻凹腔产生了正推力;计算时均阻力发现高频控制下(即10 kHz)凹腔阻力更小,其时均阻力值为-6.54 N,凹腔产生的为正推力,而控制频率为5 kHz时凹腔时均阻力为9.92 N。

表1 控制频率为5 kHz时凹腔阻力计算结果

Table 1 Calculation results of the cavity drag force under the control frequency of 5 kHz

| Time /ms | Front wall /N | Back wall /N | Drag force /N |
|----------|---------------|--------------|---------------|
| 2.44 | -507.2 | 497.0 | -10.2 |
| 2.48 | -494.5 | 555.2 | 60.7 |
| 2.54 | -513.2 | 505.5 | -7.7 |
| 2.60 | -512.5 | 533.2 | 20.7 |
| 2.64 | -510.3 | 496.5 | -13.8 |

定义凹腔阻力系数为

$$C_D = \frac{2F_D}{A\rho V^2}, \quad (3)$$

式中 F_D 为凹腔火焰稳定器的冷流阻力, A 、 ρ 、 V 分别为燃烧室入口截面积、来流密度和速度。进一步计算获得了两种控制频率下一个周期中凹腔阻力系数历程,如图7所示。由图可知阻力系数存在较大波动,在某些时刻甚至出现负值,代表推力的出现;大部分时刻阻力系数数值较低;另外在10 kHz下的阻力系数确实整体上较5 kHz控制时低,故推测高频控制等离子体有利于凹腔阻力的降低。

4.4 质量交换特性分析

凹腔质量交换率是指单位时间内主流流体被卷吸入凹腔内的质量。质量交换主要是通过剪切层内生成的脱落涡有效卷吸凹腔内部组分并对流带走,快速流动则能在相同时间内带走更多质量流体。

由于剪切层覆盖凹腔上方,故对通过凹腔腔口的进出流量进行监测,对某一稳定时刻的非正常流场中的凹腔内混合气体标记为Y,通过动态观察,直到所有Y气体离开凹腔为止,记经历时间为 τ ,则质量交换率 $m' = m/\tau$, m 为凹腔内流体总质量。计算所得不同激励强度下凹腔的质量交换率如表3所示。

对比发现脉冲控制产生等离子体的方式使得凹腔的质量交换率大为提高,在所研究的5 kHz和10 kHz控制

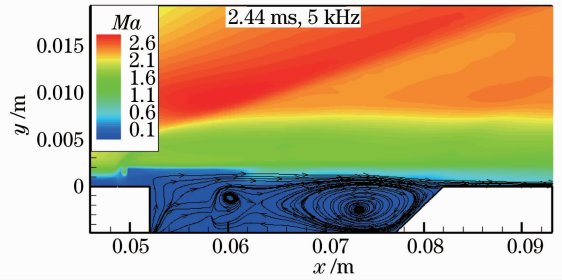


图6 典型时刻流场马赫数与流线图

Fig. 6 Contour of Mach number and streamline of the flow field at a typical moment

表2 控制频率为10 kHz时凹腔阻力计算结果

Table 2 Calculation results of the cavity drag force under the control frequency of 10 kHz

| Time /ms | Front wall /N | Back wall /N | Drag force /N |
|----------|---------------|--------------|---------------|
| 2.52 | -524.8 | 511.4 | -13.4 |
| 2.54 | -525.4 | 536.2 | 10.8 |
| 2.58 | -533.8 | 529.3 | -4.5 |
| 2.61 | -528.8 | 516.2 | -12.6 |
| 2.62 | -526.7 | 513.6 | -13.1 |

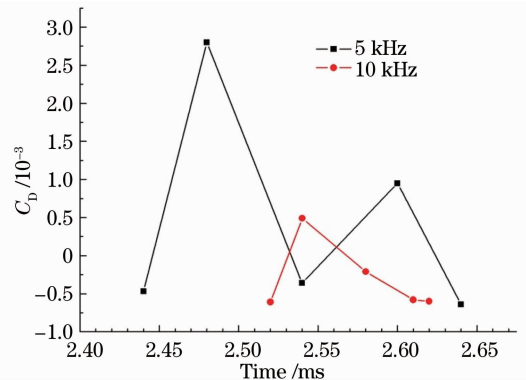


图7 不同控制频率下的阻力系数

Fig. 7 Drag coefficients under different control frequencies

频率下较无等离子体控制增长约 27 倍。本文所选择的两种脉冲控制方式中占空比相同,都约为 0.11。进一步分析不同频率的质量交换率,发现相比连续控制($m' = 7.57$),提高脉冲频率仅使得 m' 增加约 19%。从考虑产生同样效果的质量交换率来说,脉冲控制方式能大大节省输入电能,对延长电源使用寿命也有益。

表 3 不同控制频率下凹腔质量交换率

Table 3 Mass exchange rates in the cavity under different control frequencies

| Control frequency | No plasma | 5 kHz | 10 kHz |
|---------------------|-----------|-------|--------|
| $m' / (\text{g/s})$ | 0.862 | 24.92 | 29.67 |

5 结 论

脉冲控制产生等离子体丝跨过凹腔后向台阶,对整个凹腔的性能产生了重要的影响:

- 1) 等离子体的存在削弱了凹腔附近波系的强度,使得壁面压力分布更平滑;
- 2) 脉冲控制等离子体对凹腔起到了预热作用,且高频率的预热效果更好;
- 3) 前后缘特征点各特征振荡频率与控制频率成倍频关系,第一特征频率即为控制频率,振荡强度不受频率控制;另外等离子体丝状结构改变了凹腔内的回流区尺寸;
- 4) 脉冲控制下凹腔阻力降低显著,高频控制效果更好;
- 5) 脉冲控制产生等离子体会极大地提高凹腔质量交换率,在占空比相同时,不同控制频率对之影响不大。

参 考 文 献

- 1 T Mathur, M Gruber, K Jackson, *et al.*. Supersonic combustion experiments with a cavity-based fuel injector[J]. *J Propulsion and Power*, 2011, 17(1): 146–155.
- 2 T Mathur, K C Lin, P Kennedy, *et al.*. Liquid JP-7 Combustion in a Scramjet Combustor[R]. AIAA Paper 2000–3581, 2000.
- 3 D Van Wie, D Risha, C Suchomel. Research Issues Resulting from an Assessment of Technologies for Future Hypersonic Aerospace Systems[R]. AIAA Paper 2004–1357, 2004.
- 4 A Klimov, V Bitururin, V Brovkin, *et al.*. Plasma generators for combustion[C]. *Workshop on Thermo-Chemical Processes in Plasma Aerodynamic*, 2000. 74.
- 5 S B Leonov, D A Yarantsev, G G Valery, *et al.*. Mechanisms of Flow Control by Near Surface Electrical Discharge Generation[R]. AIAA Paper 2005–0780, 2005.
- 6 S B Leonov, D A Yarantsev, V G Gromov, *et al.*. Mechanisms of flow near surface electrical discharge generation[J]. *Vacuum*, 2006, 80(11): 1199–1205.
- 7 Sergey B Leonov, Dmitry A Yarantsev. Plasma Assisted Ignition and Flame Holding in High Speed Flow[R]. AIAA Paper 2006–563, 2006.
- 8 Hai-Xing Wang, Fu-Zhi Wei, A B Murphy, *et al.*. Numerical investigation of the plasma flow through the constrictor of arc-heated thrusters[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2012, 45(23): 235202.
- 9 Jiang Jianping, Weng Jiahui. Cathode Electronics and the Principle of Gas Discharge[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1980. 151–152.
江剑平, 翁甲辉. 阴极电子学与气体放电[M]. 北京: 清华大学出版社, 1980. 151–152.
- 10 John D Anderson, Jr. The Basics of Computational Fluid Dynamics[M]. Yao Zhaohui, Zhou Qiang Transl.. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 83–84.
John D Anderson, Jr. 计算流体力学入门[M]. 姚朝晖, 周强译. 北京: 清华大学出版社, 2002. 83–84.
- 11 Wang Jian, Li Yinghong, Cheng Bangqin, *et al.*. The mechanism study of plasma aerodynamic excitation control on the shock wave[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(8): 5513–5519.
王健, 李应红, 程邦勤, 等. 等离子体气动激励控制激波的机理研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(8): 5513–5519.
- 12 Cheng Yufeng, Nie Wansheng, Li Guoqiang. Numerical study of plasma aerodynamic actuation mechanism[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 060509.
程钰锋, 聂万胜, 李国强. 等离子体气动激励机理数值研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 060509.
- 13 F R Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1995, 33(8): 1418–1425.
- 14 Ding Meng. Research on the Flame Holding Technology Based on Cavity in Supersonic Combustion[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
丁猛. 基于凹腔的超声速燃烧火焰稳定技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.