

有阀式脉动喷气发动机出口瞬态速度场测量

蔡文祥¹, 祁斌¹, 马虎¹, 武晓松¹, 宋孝东²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094;

2. 空军航空大学 教官训练基地, 安徽 蚌埠 233000)

摘 要: 通过使用 TR-PIV(time-resolved-particle image velocimetry)系统对某亥姆霍兹型有阀式脉动喷气发动机出口瞬态速度场进行测量. 实验结果表明:有阀式脉动喷气发动机出口压力及速度场呈明显的周期性变化过程,时均速度最高的区域并不在尾喷管出口截面,排气阶段的旋度及持续时间均大于吸气阶段. 有阀式脉动喷气发动机出口未完全膨胀的高温燃气在排出尾喷管后仍会继续膨胀,对于提高性能不利.

关 键 词: 流动特性; 瞬态速度场; TR-PIV; 脉动燃烧; 涡旋特性

中图分类号: V231

文献标志码: A

Measurement of transient velocity field at exit zone of valve pulse jet engine

CAI Wen-xiang¹, QI Bin¹, MA Hu¹, WU Xiao-song¹, SONG Xiao-dong²

(1. School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Flight Instructor Training Base, Air Force Aviation University,
Bengbu Anhui 233000, China)

Abstract: Advanced TR-PIV (time-resolved-particle image velocimetry) system was used to measure transient velocity field at a Helmholtz-type valve pulse jet engine exit zone. Test results indicate the cyclical evolution process of velocity field and pressure at the exit zone of valve pulse jet engine, and the maximum time-averaged velocity of the engine is not at the nozzle's exit. The vorticity and duration in the exhaust stage was stronger than that in the inspiratory stage. Measured velocity field shows that transient high-temperature combustion gas does not fully expand at the exit plane, but continues to be expanded at the following exit zone, which is disadvantageous for improving the performance of pulse jet engine.

Key words: flow characteristic; transient velocity field; TR-PIV;
pulse combustion; vorticity characteristic

脉动燃烧现象包含复杂的物理化学过程. 周期性变化的压力及速度强化了脉动燃烧装置中的传热、传质等现象,从而使其具有结构简单紧凑、燃烧效率高以及污染物排放低等优点,除控制阀门外无活动部件,可用于低成本飞行动力装置^[1]、农药雾化喷洒器^[2]、污泥水雾化干燥炉等^[3],具有

广泛的工程使用价值^[4].

由于脉动燃烧的工作频率较高,其内流动、传热及温度变化过程的测量极为困难,多以宏观物理量为主^[5-9],理论分析多采用简化的热力学模型^[10],瞬态工作过程分析较为缺乏. 较为典型的研究有 John^[11]对脉动喷气发动机出口推力放大

收稿日期:2013-07-27

基金项目:国家自然科学基金(51306092)

作者简介:蔡文祥(1978—),男,江苏徐州人,副教授,博士,主要从事发动机燃烧过程实验研究及数值模拟.

器时均速度场进行测量。谢翔燕^[12]利用激光粒度测试仪研究脉动气流中燃料流量及其黏度对雾化效果的影响。由于缺乏对脉动燃烧装置所涉及的瞬态速度场的实验研究,对脉动燃烧机理的研究仍存在极大的困难。长期以来,多采用 PIV 系统对动力装置中的湍流流动进行测量^[13],但随着现代流动测量技术的发展,使用时间分辨粒子图像测速系统对瞬态速度场的测量已成为可能^[14-18]。为此,本文利用 TR-PIV 及水冷压力传感器对某亥姆霍兹型有阀式脉动喷气发动机的尾喷管出口瞬态速度场及燃烧器压力特性进行测量,分析相关变量的变化规律,为分析脉动燃烧机理以及数值分析方法的研究奠定基础。

1 实验模型及装置

实验研究对象为某亥姆霍兹型有阀式脉动喷气发动机尾喷管的出口瞬态速度场,实验在南京理工大学航空宇航实验中心进行。有阀式脉动喷气发动机结构如图 1 所示,发动机燃烧室直径为 80 mm。有阀式脉动喷气发动机稳定工作燃料流量为 4.9 g/s,环境压力为 0.101 MPa,环境温度为

26 °C。测量坐标系原点位于距发动机尾喷管对称中心出口 50 mm 处, x 轴与尾喷管中心线重合,以出口方向为正, y 轴与尾喷管垂直,向上为正,测量区域为约 140 mm×210 mm 的出口区域。



图 1 有阀式脉动喷气发动机结构

Fig. 1 Structure of valve pulse jet engine

实验使用丹迪 TR-PIV 系统,该系统激光器频率为 1 kHz 时的平均功率为 30 W。高频相机拍摄频率为 2 000 帧/s,分辨率为 1 280 像素×800 像素。查询窗口大小为 32 像素×32 像素,相邻窗口重叠率为 50%。使用檀香烟雾作为示踪粒子。每组实验采样时间为 2 s,共采集 2 000 个瞬态速度场。实验过程中将 Kistler 7061B 型高精度水冷压力传感器位于距尾喷管出口 50 mm 处的尾喷管壁面上(如图 1 所示),传感器顶端与尾喷管内壁面相切。实验台总体布局如图 2 所示。

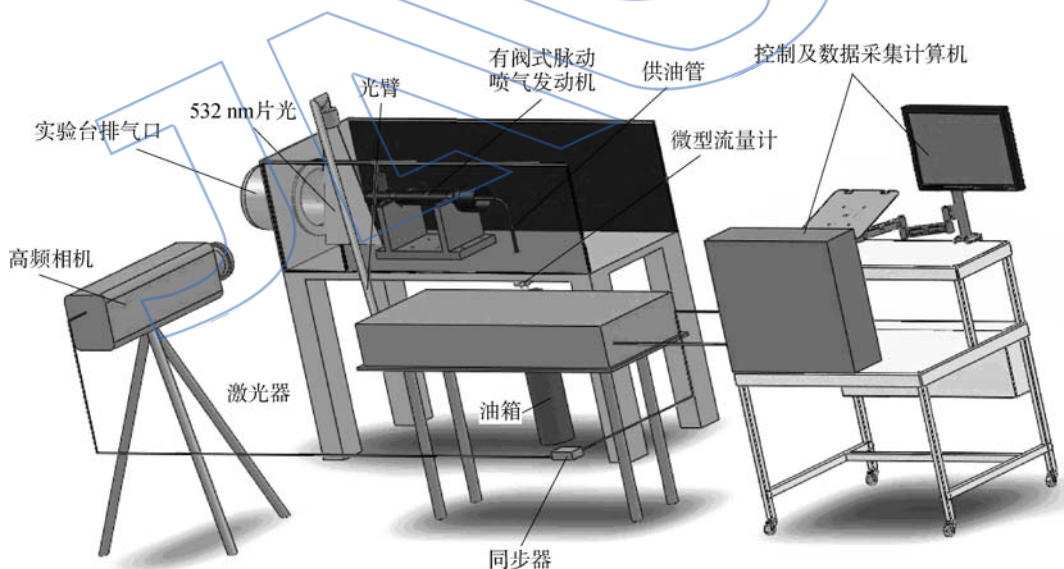


图 2 流场测试实验台

Fig. 2 Test bench for flow field measurement

2 出口速度场分析

图 3 为 Kistler 7061B 型高精度水冷压力传感器所测得的有阀式脉动喷气发动机尾喷管壁面燃气压力随着时间的变化过程。由图可知,该发动机工作周期约为 0.006 s,工作频率约为 167 Hz。排气过程压力峰值约为 0.24 MPa,吸气过程压力峰值

约为 -0.05 MPa。此外,由于有阀式脉动喷气发动机在高频周期性变化声热耦合作用下工作,机身振动对压力传感器的测量产生一定影响,从而导致压力峰值并不恒定而是略有变化,有必要在后续实验研究中进一步改进测量方案,减少振动的影响。

2.1 时均速度场分析

图 4 为尾喷管出口 2 000 个瞬态速度场进行

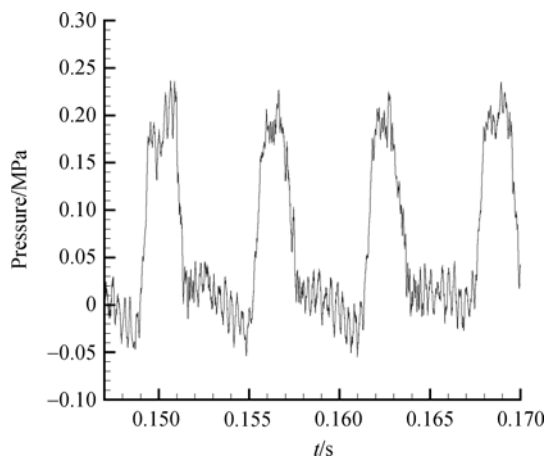


图3 尾喷管壁面燃气压力随时间变化趋势

Fig. 3 Tendency of gas pressure varying with time at exhaust wall

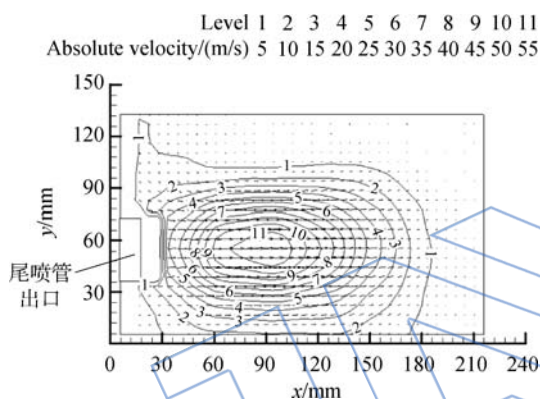


图4 尾喷管出口时均速度矢量及轴向速度等值线图

Fig. 4 Time-averaged velocity vector distribution and axial velocity contours at exhaust zone

时均后的速度分布. 有阀式脉动喷气发动机尾喷管出口存在高频周期性变化且方向相反的吸排气过程, 时均之后的速度吸排气速度场有所抵消. 但是, 由于有阀式脉动喷气发动机排气压力峰值约为吸气时的5倍, 排气速度要远大于其吸气速度, 时均后的脉动喷气发动机尾喷管出口速度场仍显示为发动机轴线向外排气, 出口区域的时均速度最大值仅为58.3 m/s. 时均速度最大值位于距尾喷管出口约75 mm处, 产生这种现象的原因主要是排气过程产生的高温燃气在流出尾喷管后进一步沿着主流方向上膨胀, 但随着主流引射作用使得新鲜空气不断进入高温燃气并加以掺混, 最终使得时均速度最大值并不位于尾喷管出口截面.

有阀式脉动喷气发动机尾喷管出口上下两侧的气流在吸排气过程中受主流引射的影响, 这两个区域的气体总体上向有阀式脉动喷气发动机轴

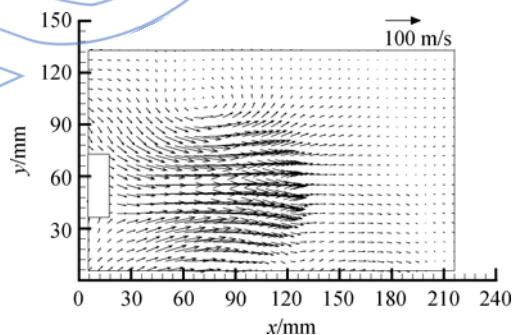
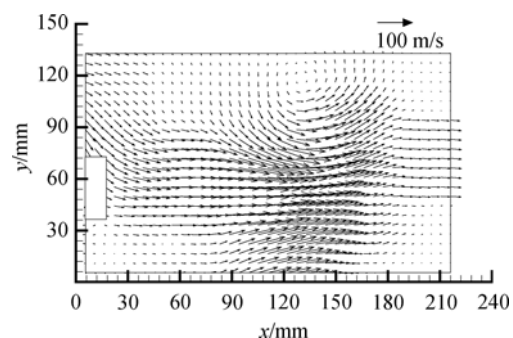
线中心运动. 在有阀式脉动喷气发动机尾喷管吸气过程中主要进入尾喷管, 在排气过程中与排出的高温燃气相混合并降低排气温度.

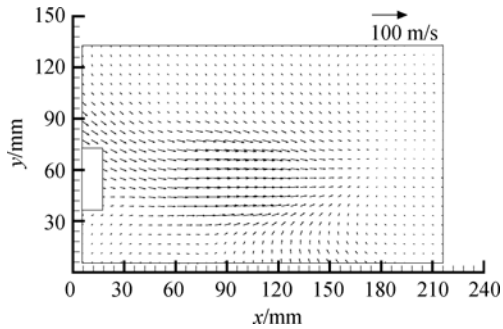
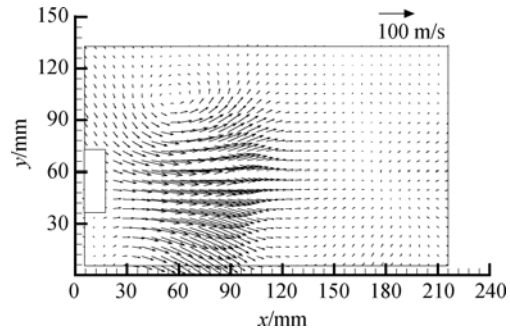
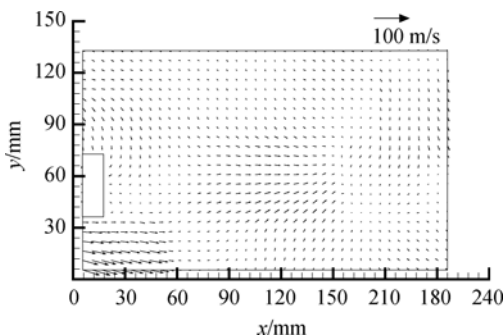
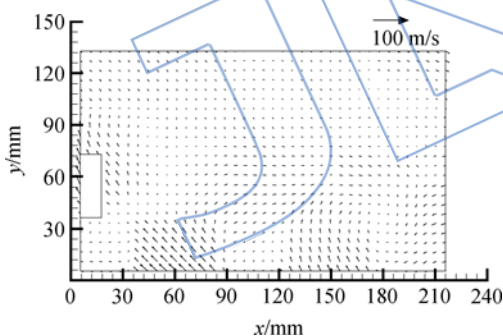
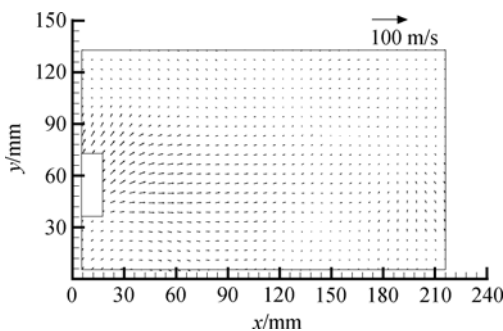
2.2 瞬态速度场分析

图5~图11分别为0~6 ms时的瞬态速度场. 由图可知在 $t=0$ ms时刻, 由于尾喷管射流的强烈引射作用, 在主流上下两侧均可形成较为强烈的回流区域. 由于测量区域的限制, 在图5中仅测量获得下侧回流区的边缘. 在1 ms的时间内, 回流区中心即沿有阀式脉动喷气发动机轴向向前运动约60 mm, 回流区中心的前进速度约为60 m/s. 在2 ms时该回流区运行到测量区域之外, 表明此阶段的回流区前进速度应大于80 m/s. 在上述过程中可发现, 在有阀式脉动喷气发动机的排气阶段, 主流不仅高速向后运动并产生推力, 其强烈的引射作用对周围气流的影响极大. 引射进来的新鲜空气将降低排气温度.

图7所示的 $t=2$ ms时刻, 瞬态速度场整体分布较为均匀, 排气过程的强度逐渐降低但主流仍向背离尾喷管的方向运动.

在图8、图9所示的 $t=3, 4$ ms时刻, 尾喷管

图5 $t=0$ ms 速度矢量分布Fig. 5 Velocity vector distribution at $t=0$ ms图6 $t=1$ ms 速度矢量分布Fig. 6 Velocity vector distribution at $t=1$ ms

图 7 $t=2$ ms 速度矢量分布Fig. 7 Velocity vector distribution at $t=2$ ms图 11 $t=6$ ms 速度矢量分布Fig. 11 Velocity vector distribution at $t=6$ ms图 8 $t=3$ ms 速度矢量分布Fig. 8 Velocity vector distribution at $t=3$ ms图 9 $t=4$ ms 速度矢量分布Fig. 9 Velocity vector distribution at $t=4$ ms图 10 $t=5$ ms 速度矢量分布Fig. 10 Velocity vector distribution at $t=5$ ms

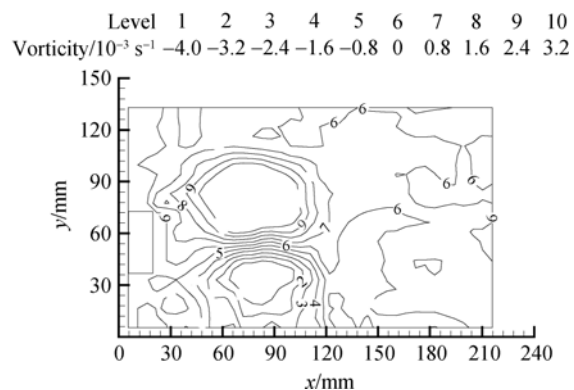
内的压力低于环境压力,新鲜空气被吸进尾喷管.由于吸气阶段时尾喷管内的压力差的绝对值要比排气时小,吸气速度要明显小于排气阶段,吸气所影响的区域要明显小于排气阶段,以上讨论仅对距离尾喷管出口约 70 mm 的范围.在此范围之外气流仍呈现略微向前运动的趋势,这也是导致时均速度最大值没有出现在尾喷管出口而出现在距尾喷管出口 75 mm 处的可能原因之一.

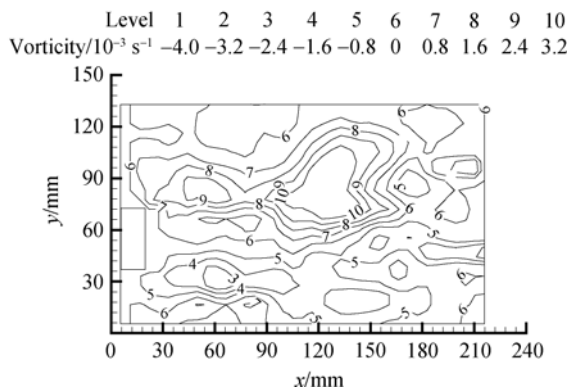
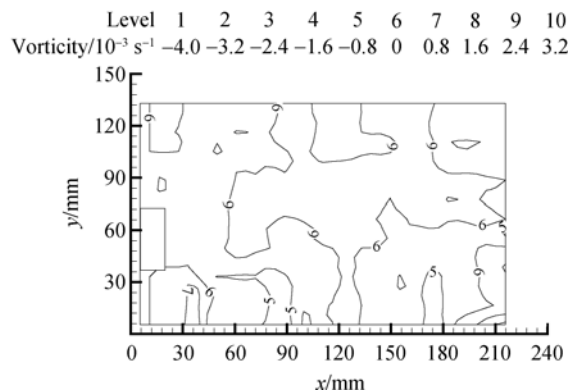
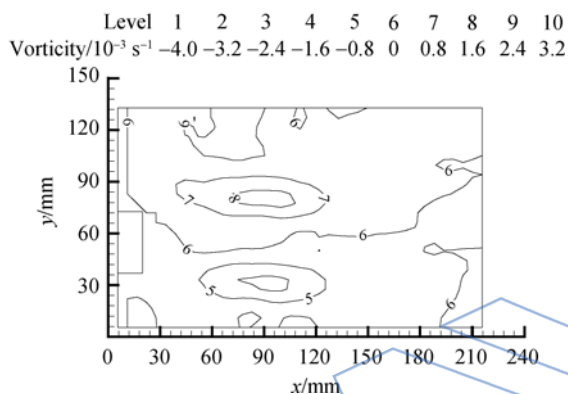
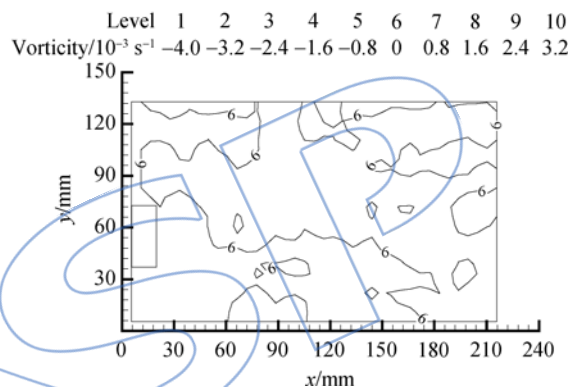
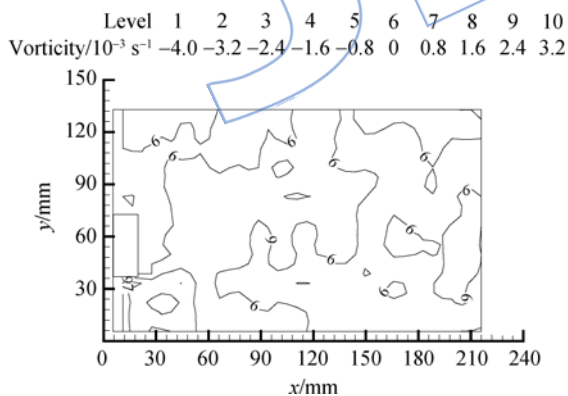
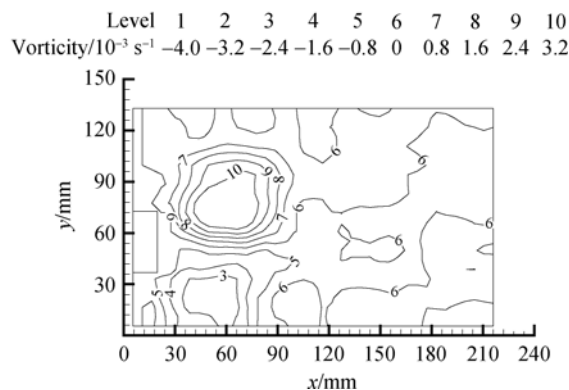
在图 10 所示的 $t=5$ ms 时刻,吸气过程已结束,进入下一阶段的排气过程,此时尾喷管出口的负速度区域已经消失,高温燃气开始从尾喷管排入大气.

图 12~图 18 为 0~6 ms 时测量的二维旋度等值线图的变化规律,显示了涡量云图的演化过程.旋度最早是通过研究水流涡旋建立起来的,对于二维平面的速度场测量结果,可用来分析区域内是否存在涡旋以及速度场在某点旋度的大小.旋度 ω_z 为负则涡旋沿顺时针方向,反之则为逆时针方向,其值可由下式计算得到

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

通过对周期内的涡旋的变化过程来分析,在

图 12 $t=0$ ms 二维旋度等值线图Fig. 12 Isoline of two-dimensional vorticity at $t=0$ ms

图 13 $t=1$ ms 二维旋度等值线图Fig. 13 Isolines of two-dimensional vorticity at $t=1$ ms图 16 $t=4$ ms 二维旋度等值线图Fig. 16 Isolines of two-dimensional vorticity at $t=4$ ms图 14 $t=2$ ms 二维旋度等值线图Fig. 14 Isolines of two-dimensional vorticity at $t=2$ ms图 17 $t=5$ ms 二维旋度等值线图Fig. 17 Isolines of two-dimensional vorticity at $t=5$ ms图 15 $t=3$ ms 二维旋度等值线图Fig. 15 Isolines of two-dimensional vorticity at $t=3$ ms图 18 $t=6$ ms 二维旋度等值线图Fig. 18 Isolines of two-dimensional vorticity at $t=6$ ms

尾喷管的排气过程,其旋度要明显大于吸气阶段。在不同的时刻均存在正负旋度,表明在吸排气的过程中均存在涡旋,且涡旋的方向在旋度较强的排气阶段基本沿有阀式脉动喷气发动机轴线方向成对称分布。这种现象表明,在有阀式脉动喷气发动机的工作过程中,涡旋随时间的变化非常迅速。

3 结 论

使用 TR-PIV 系统成功地对某亥姆霍兹型有阀式脉动喷气发动机出口的时瞬态速度场进行了测量,研究结果表明:

1) 有阀式脉动喷气发动机出口的时均速度场仍沿尾喷管向外流动。

2) 排出的未完全膨胀的高温燃气在尾喷管后仍会继续膨胀,时均速度最高的区域距离尾喷管出口约 75 mm.

3) 脉动燃烧过程所涉及的压力变化呈明显的周期性规律,速度场周期变化也较为明显,实验证实脉动燃烧现象中压力及速度场的周期性特性.

4) 有阀式脉动喷气发动机排气阶段的旋度及持续时间均大于吸气阶段.

致谢:

本文实验研究前期,硕士李华伦、汪杰、弓可及孙宏斌等对有阀式脉动喷气发动机调试进行大量细致工作.后期设备调试受到 Dantec 公司胡良杰、许力子工程师帮助,在此一并感谢.

参考文献:

- [1] Kentfield J A C. The potential of valveless pulse jets for small UAV propulsion applications[R]. AIAA 98-3879, 1998.
- [2] 周宏平,赵东裕,郑加强,等.大型稳态燃烧烟雾机燃烧模拟及尾气成分分析[J].农业工程学报,2010,26(6):146-151.
ZHOU Hongping, ZHAO Shuyu, ZHENG Jiaqiang, et al. Exhaust gas components of large-scale steady combustion forger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 146-151. (in Chinese)
- [3] WU Zhonghua, WU Long, LI Zhangyong, et al. Atomization and drying characteristics of sewage sludge inside a Helmholtz pulse combustor[J]. Drying Technology, 2012, 30(10): 1105-1112.
- [4] 曹传钧,许登峰,朱长海,等.脉动燃烧技术的回顾和展望[J].航空动力学报,1991,6(1):73-78.
CAO Chuanjun, XU Dengfeng, ZHU Changhai, et al. A review and prospect of pulsating combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(1): 73-78. (in Chinese)
- [5] Kilicarslan A, Arisoy A. Acoustic analysis of a liquefied petroleum gas-fired pulse combustor[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(9): 770-777.
- [6] Naples A G, Hoke J L, Paxson D E, et al. Operation and control of a pulsejet with high pressure liquid fuel injection[R]. AIAA-2010-209, 2010.
- [7] Zheng F, Geng T, Schariton T D, et al. Numerical study of the effect of inlet size and interior obstructions on the performance of valveless pulsejets[R]. AIAA-2007-5056, 2007.
- [8] WU Zhonghua, Mujumdar A S. Pulse combustion characteristics of various gaseous fuels[J]. Energy and Fuels, 2008, 22(2): 915-924.
- [9] Kilicarslan A. Frequency evaluation of a gas-fired pulse combustor[J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29(5): 439-454.
- [10] 魏涛,武晓松,蔡文祥.无阀式脉冲喷气发动机性能预示简化模型[J].航空动力学报,2012,27(1):225-232.
WEI Tao, WU Xiaosong, CAI Wenxiang. Simplified catalytical models for performance prediction of valveless pulsejet[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 225-232. (in Chinese)
- [11] John W T. Conditionally sampled pulsejet driven ejector flow field using DPIV[R]. AIAA-2002-3231, 2002.
- [12] 谢翔燕.脉动气流雾化模型和实验[D].北京:中国农业大学,2004.
XIE Xiangyan. Atomizing model in pulse airflow produced by pulse combustion and experiment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [13] 于霄,罗翔,徐国强,等.用PIV技术测量镜像进气旋流盘腔内的流动[J].航空动力学报,2009,24(11):2483-2488.
YU Xiao, LUO Xiang, XU Guoqiang, et al. Particle image velocimetry (PIV) measurements of the flow in a rotating cavity with a radial inflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(11): 2483-2488. (in Chinese)
- [14] 陈建民,刘应征,魏润杰.高频响流场测试TR-PIV系统技术及其应用[J].实验流体力学,2012,26(1):83-87.
CHEN Jianmin, LIU Yingzheng, WEI Runjie. High-repetition TR-PIV measurement system technology and its application[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(1): 83-87. (in Chinese)
- [15] Honkatukia J, Saari E, Knuuttila T, et al. Feasibility of pulse combustion in micro gas turbines[J]. Journal of Thermal Science, 2012, 21(5): 466-473.
- [16] Elkhadim B, Grégory G, Philippe D. Time-resolved PIV investigations of the flow field around cod-end net structures[J]. Fisheries Research, 2011, 108(2): 344-355.
- [17] Wernet M P. Time resolved PIV for space-time correlations in hot jets[R]. AIAA-2006-0047, 2006.
- [18] 杨绍琼,姜楠.湍流边界层空间特征尺度的层析TRPIV测[J].实验力学,2011,26(4):269-275.
YANG Shaoqiong, JIANG Nan. On the measurement of spatial characteristic scale in turbulent boundary layer based on tomographic time-resolved PIV[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2011, 26(4): 269-275. (in Chinese)