

螺旋脉冲爆震室实验

王 玮¹, 肖俊峰¹, 邱 华², 李晓丰¹, 王 峰¹

(1. 西安热工研究院有限公司 燃气轮机技术部, 西安 710032;

2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为缩短脉冲爆震室轴向长度以及爆燃向爆震转变距离, 设计加工了螺旋脉冲爆震室, 采用液态汽油为燃料, 空气为氧化剂, 进行了一系列实验. 在实验过程中, 对比研究了常规直管脉冲爆震室以及螺旋脉冲爆震室的爆燃向爆震转变性能; 并分析研究了螺旋脉冲爆震室多循环工作特性. 结果表明: 与直管脉冲爆震室相比, 螺旋脉冲爆震室爆燃向爆震转变距离至少缩短了约 11.2%; 螺旋脉冲爆震室可以在 5~20 Hz 频率下稳定工作; 螺旋脉冲爆震室设计方案可行.

关 键 词: 脉冲爆震发动机; 爆震; 爆燃向爆震转变; 螺旋脉冲爆震室; 曲管脉冲爆震室设计

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on spiral pulse detonation chamber

WANG Wei¹, XIAO Jun-feng¹, QIU Hua²,

LI Xiao-feng¹, WANG Feng¹

(1. Gas Turbine Department,

Xi'an Thermal Power Research Institute Company Limited, Xi'an 710032, China;

2. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For the purpose of reducing the axial length of pulse detonation chamber and the DDT (deflagration to detonation transition) distance by the spiral pulse detonation chamber, the results of experimental investigation on spiral pulse detonation chamber using liquid gasoline and air mixture were presented. Results show that, compared with straight pulse detonation chamber, the DDT distance has reduced 11.2% at least by the spiral pulse detonation chamber; the spiral pulse detonation chamber can work stably under the frequency of 5~20 Hz; the spiral pulse detonation chamber design is a successful one.

Key words: pulse detonation engine; detonation; deflagration to detonation transition; spiral pulse detonation chamber; curved detonation chamber design

脉冲爆震发动机 (pulse detonation engine, PDE) 是一种利用脉冲爆震燃烧产生推力的发动机^[1]. 在其起爆过程中, 由于间接起爆需要的点火能量小, 点火系统简单, 在进行实验研究时, 普遍采用间接起爆方法.

在直管爆震发动机起爆时, 由于高碳氢燃料和空气混合物的间接起爆的爆燃向爆震转变

(deflagration to detonation transition, DDT) 距离较长^[2-3], 导致爆震室轴向长度过长, 阻挠了 PDE 的工程应用.

曲管爆震室是一种有效的解决途径^[4-10]. 西北工业大学爆震研究团队对螺旋爆震管的 DDT 特性进行了研究, 结果表明螺旋段曲率越小, DDT 性能越好, 即螺旋结构可以优化 DDT

收稿日期: 2015-11-02

基金项目: 国家自然科学基金 (50906072); 华能集团总部科技项目 (HNKJ14-H05)

作者简介: 王玮 (1985—), 男, 陕西宝鸡人, 工程师, 博士, 主要从事发动机燃烧与流动方面的研究.

特性^[4-5].

虽然上述研究提出了螺旋管可以优化 DDT 特性的结论,但其工作主要基于单次爆震数据,其结论是否适用于多循环爆震,螺旋脉冲爆震室是否可以连续工作,螺旋脉冲爆震室的设计方案是否可行等等问题仍需要通过实验进行验证.

基于上述问题,本文设计加工了螺旋脉冲爆震室(下文简称螺旋爆震室),对比研究了直管脉冲爆震室(下文简称直管爆震室)与螺旋爆震室的 DDT 性能,并对螺旋爆震室的可行性及其连续工作的可靠性进行了实验验证.

1 实验装置

图 1 是实验中采用的直管爆震室实验装置示意图.如图所示,直管爆震室由混合点火段和实验段组成.混合点火段前端设置有燃油进口以及空气进口,且其内部装有 Shchelkin 螺纹;实验段由 4 段内径为 50 mm、长为 500 mm 的直管组成,且在靠近爆震室出口位置一端的两段直管内部安装有 Shchelkin 螺纹;其余两段为光管,内部无任何障碍物.

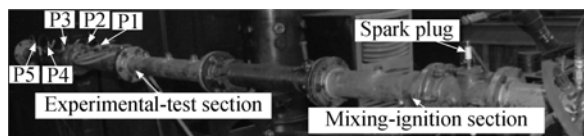


图 1 直管爆震室实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of straight detonation chamber

为监测直管爆震室内爆燃向爆震转变过程,如图 1 所示,在靠近爆震管出口位置安装压力传感器 P1~P5(所对应的压力值用 p_i 表示, $i=1, 2, 3, \dots$),P1 与 P2 之间的距离为 100 mm, P2 与 P3 之间的距离为 100 mm, P3~P4, P4~P5 之间的距离均为 200 mm, P5 距离爆震管出口 50 mm.

图 2 是实验中采用的螺旋爆震室实验装置示意图.如图所示,螺旋爆震室由混合点火段和螺旋段组成,其中混合点火段与直管爆震室中相同;螺旋段是内径为 50 mm 的螺旋管,其螺旋中径和螺旋截距分别为 300 mm 和 360 mm,轴向长度为 600 mm,伸展长度为 2 017 mm,在螺旋段内部不设任何爆震增强装置.

为监测螺旋爆震室内压力变化,如图 2 所示,在爆震室上布置 P1~P14 共 14 个压力传感器.其中,混合点火段上布置 1 个传感器 P1;混合点

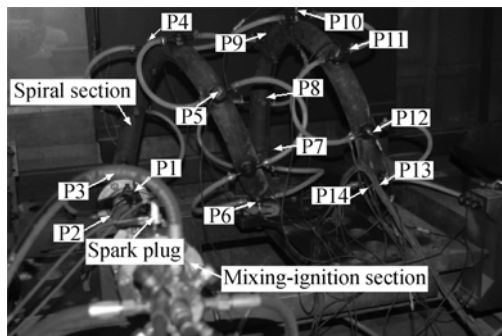


图 2 螺旋爆震室实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of spiral detonation chamber

火段与螺旋段之间布置传感器安装位置 P2, P1 与 P2 之间的距离为 280 mm; P2 与 P3 之间的距离为 450 mm; P3~P13 分布在同一螺旋线上,且相邻传感器之间的距离为 200 mm; P14 与 P13 之间的距离为 50 mm, P14 距爆震室出口 50 mm.

在实验中采用电火花塞点火,其安装位置距离空气入口 240 mm,点火能量设定为 1.0 J;采用气动雾化喷嘴向爆震室内填充汽油,采用压气机向爆震室内填充空气,并通过流量计控制燃油和空气流量,确保混合物当量比在 1.1 附近;采用压电式压力传感器测量压力信号,所有压力信号均通过 DEWETRAIN 数据采集系统采集处理,其最高采样率为 200 000 次/s.

2 实验结果

2.1 直管和螺旋爆震室 DDT 特性对比

直管爆震室在 5 Hz 频率下工作时爆震室内压力波形见图 3.分析其压力峰值可知,在爆震室工作过程中, P1~P2 位置爆震室内压力峰值在 1.2 MPa;而在 P4, P5 位置,爆震室内压力峰值均超过 2.0 MPa.

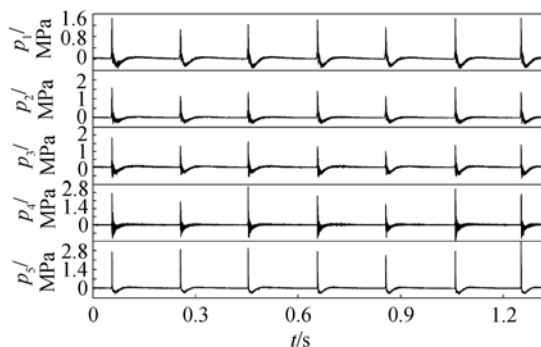


图 3 不同位置压力波形(直管爆震室)

Fig. 3 Pressure waveform at different positions (straight detonation chamber)

根据 CJ (Chapman-Jouguet) 爆震理论, 为确定爆震室内是否形成爆震, 不仅需要参考压力信息, 还需参考爆震室内的激波传播速度. 图 4 是图 3 压力波形展开图. 图中, dt 代表压缩波由 P_i 传播至 $P(i+1)$ 位置的时间, 通过 dt 以及相邻传感器之间的距离可以计算压缩波在爆震室内的平均传播速度. 分析图 4 数据可知, $P_3 \sim P_4$ 之间的激波平均速度大约为 1020 m/s , $P_4 \sim P_5$ 之间的激波平均速度约为 1481 m/s .

根据美国国家航空航天局 (NASA) 开发的 CEA (chemical equilibrium and applications) 计算程序, 当量比为 1.1 的 $\text{C}_8\text{H}_{16}/\text{Air}$ 成功起爆后, CJ 爆震压力和速度分别为 1.9 MPa 和 1819.2 m/s . 即 $P_3 \sim P_4$ 之间的激波平均速度约为 CJ 爆震速度 (V_{CJ}) 的 57%, 而 $P_4 \sim P_5$ 之间激波平均速度约为 CJ 爆震速度的 82%. 考虑到两相爆震波速的损失, 可以认为在爆震室内 $P_4 \sim P_5$ 之间已经形成爆震, 亦即直管爆震室的 DDT 距离介于 $2120 \sim 2320 \text{ mm}$ 之间.

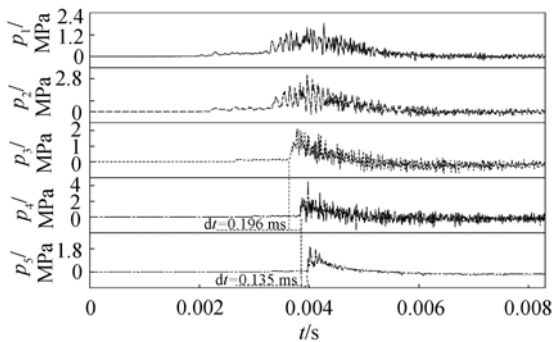


图 4 $P_1 \sim P_5$ 压力波形展开图 (直管爆震室)

Fig. 4 Pressure waveform when $P_1 \sim P_5$ moved forward (straight detonation chamber)

图 5 是螺旋爆震室在 5 Hz 频率下工作时爆震管内压力波形.

分析图 5 压力峰值数据可知, 由 P_6 位置开始直至 P_8 位置, 爆震管内压力峰值由 1.0 MPa 上升至 1.6 MPa , 在 P_9 位置之后爆震室内压力峰值大于 2.0 MPa , 大于 CJ 爆震压力.

图 6 是螺旋爆震室以 5 Hz 频率工作时压力波形放大图. 如图所示, 由于压缩波在螺旋爆震室内的反射、碰撞和叠加, 室内的压缩波逐渐转变为两道激波, 其中第 1 道激波压力峰值较小, 第 2 道激波峰值较大. 在第 1 道激波向爆震室出口传播过程时, 其对爆震室内可燃混合物进行预压缩, 促进了第 2 道激波转化为爆震波的过程.

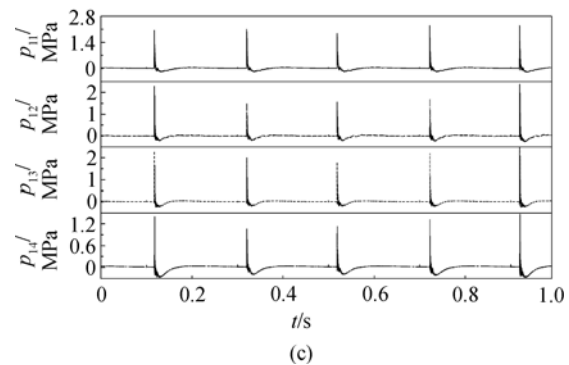
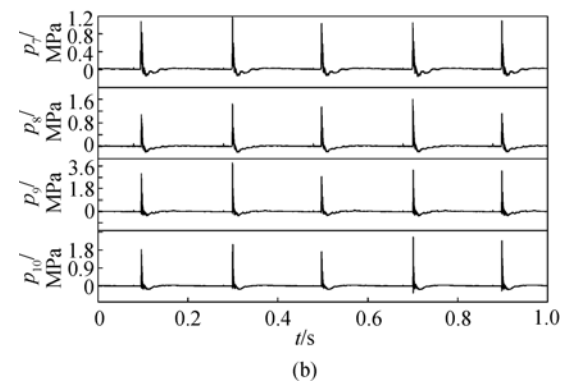
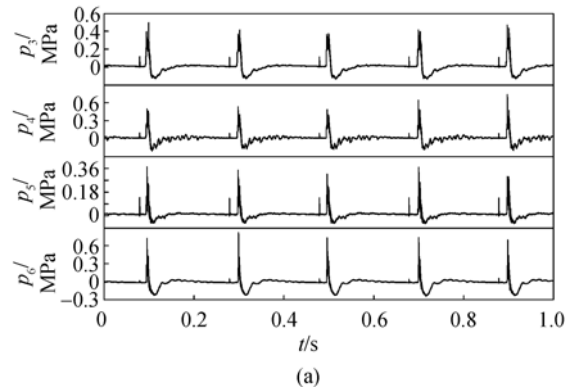
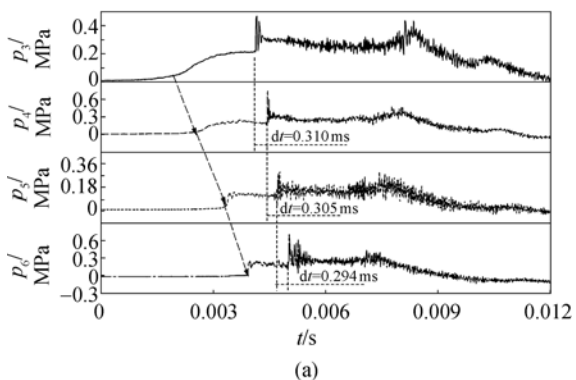
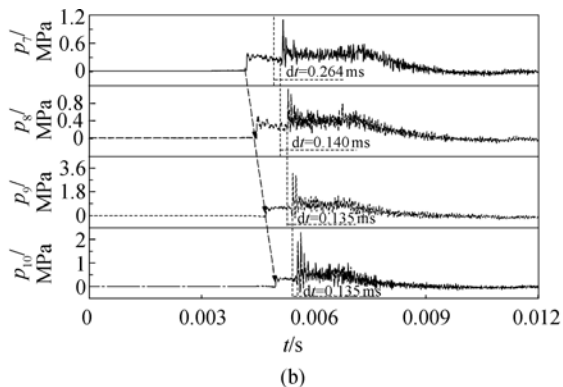


图 5 不同位置压力波形
(螺旋爆震室, 工作频率为 5 Hz)

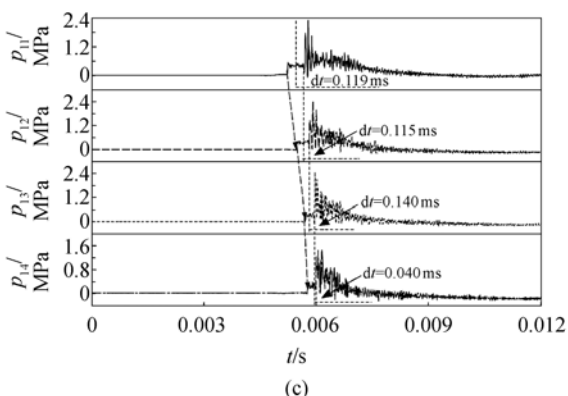
Fig. 5 Pressure waveform at different positions (spiral detonation chamber, working frequency of 5 Hz)

图 7 是 $P_3 \sim P_{14}$ 位置螺旋爆震室内压力峰值以及各区间段内压缩波平均传播速度曲线, 其





(b)



(c)

图6 P3~P14 压力波形展开图
(螺旋爆震室, 工作频率为 5 Hz)

Fig. 6 Pressure waveform when P3~P14 moved forward
(spiral detonation chamber, working frequency of 5 Hz)

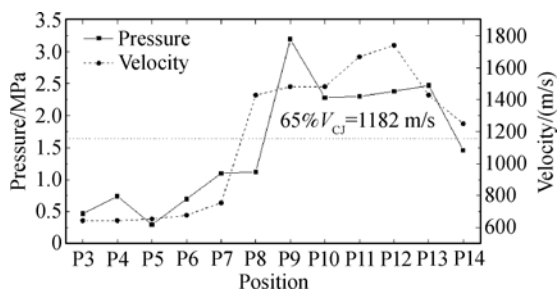


图7 压力峰值和激波平均速度曲线
(螺旋爆震室, 工作频率为 5 Hz)

Fig. 7 Pressure peaks and average speeds of the
shock wave

(spiral detonation chamber, working frequency of 5 Hz)

所有数据均来自图 6. 如图 7 所示, 在 P8 位置爆震室内激波传播速度大于 1400 m/s, 且在 P9 位置以后其速度均大于 1400 m/s.

根据 Gordon 等^[11]的研究内容, 在流阻较大的爆震室内, 爆震波速度会减小, 且根据两相爆震的研究^[12-14], 采用液态燃料进行爆震时, 爆震波损失可高达 35% 左右. 根据相关研究内容, 螺旋管阻力系数是直管的 2~10 倍^[15], 且考虑到两相效

应, 可以认为激波速度大于 65% 的 CJ 爆震速度时, 即激波传播速度大于 1182.5 m/s 时可以认为爆震已经形成.

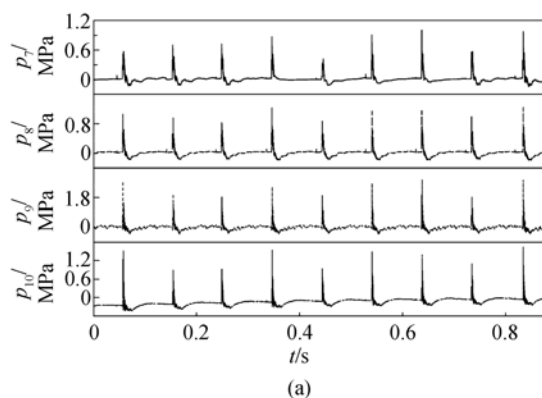
综上, 可知在螺旋爆震室内爆震波大约在 P9 位置形成, 其 DDT 距离约为 1882 mm.

分析比较直管与螺旋爆震室实验结果, 发现螺旋爆震室 DDT 距离较小, 约为直管爆震室 DDT 距离的 88.8%, 螺旋爆震室可以促进爆震的形成. 其原因主要归结于螺旋爆震室内压缩波的碰撞和反射^[8].

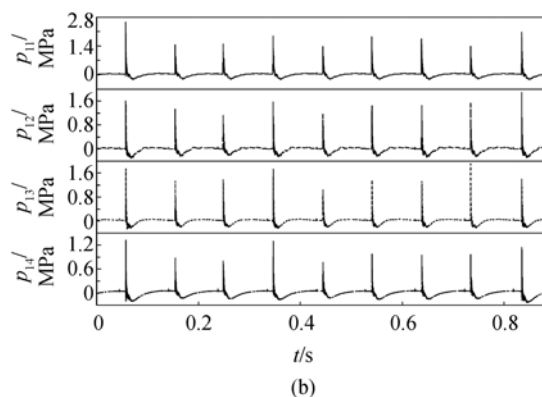
2.2 螺旋爆震室的可靠性和稳定性

为验证螺旋爆震室工作的稳定性以及可靠性, 对图 2 所示螺旋爆震室进行了频率为 10 Hz 和 20 Hz 的实验.

图 8 是螺旋爆震室在 10 Hz 频率下工作时爆震室内压力波形. 图 9 是 P3~P14 位置爆震管内压力峰值以及各区间段内压缩波平均传播速度曲线. 分析图 8 和图 9 数据可知, 爆震室内压力峰值和压缩波速度在 P9 位置之后均满足 CJ 爆震特征, 即与 5 Hz 结果相同, 爆震波同样在 P9 位置形



(a)



(b)

图8 不同位置压力波形
(螺旋爆震室, 工作频率为 10 Hz)

Fig. 8 Pressure waveform at different positions
(spiral detonation chamber, working frequency of 10 Hz)

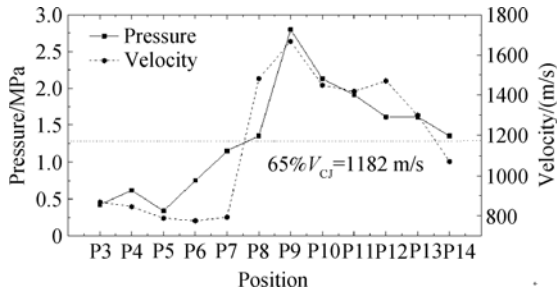


图 9 压力峰值和激波平均速度曲线
(螺旋爆震室,工作频率为 10 Hz)

Fig. 9 Pressure peaks and average speeds of the shock wave

(spiral detonation chamber, working frequency of 10 Hz)

成,且可自持,亦即螺旋爆震室可以在 10 Hz 频率下稳定工作。

图 10 是螺旋爆震室在 20 Hz 频率下工作时爆震室内压力波形。图 11 是 P3~P14 位置爆震室内压力峰值以及各区间段内压缩波平均传播速度曲线。分析图 10 和图 11 所示数据可知,在 P8 位置爆震室内压缩波传播速度已经大于 1 400 m/s,且在 P9 位置以后其速度均大于 1 400 m/s。

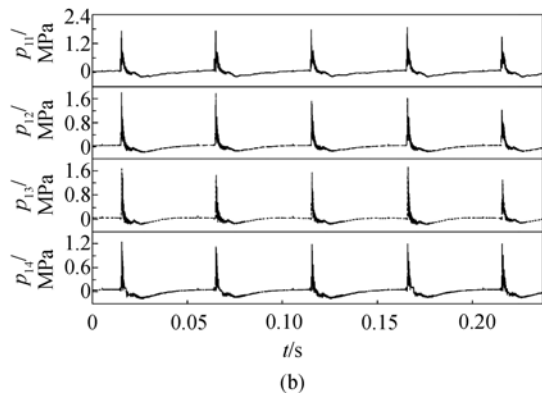
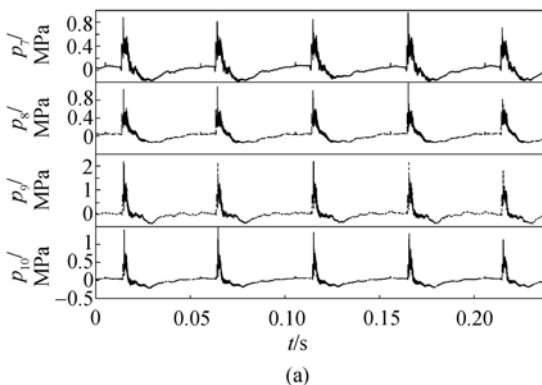


图 10 不同位置压力波形
(螺旋爆震室,工作频率为 20 Hz)

Fig. 10 Pressure histories at different positions
(spiral detonation chamber, working frequency of 20 Hz)

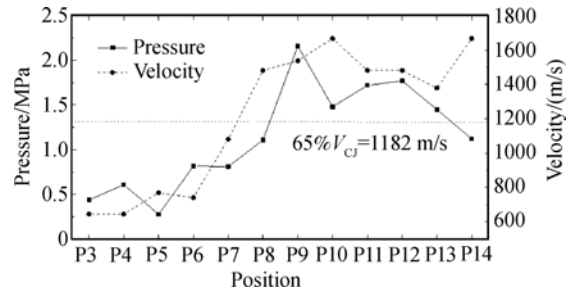


图 11 压力峰值和激波平均速度曲线
(螺旋爆震室,工作频率为 20 Hz)

Fig. 11 Pressure peaks and average speeds of the shock wave

(spiral detonation chamber, working frequency of 20 Hz)

综合压力波形可知,爆震波同样在 P9 位置形成,且持续向爆震室出口位置传播。即螺旋爆震室可以在 20 Hz 频率下稳定工作。

综上,螺旋爆震室在点火频率小于等于 20 Hz 时,其可以稳定工作。

需要注意的是,在提高螺旋爆震发动机工作频率时,爆震室内压力峰值以及激波平均速度在爆震形成后均呈下降趋势。这种现象可能是由于爆震管没有满填充引起的。根据螺旋管流阻的相关研究内容,螺旋管的阻力系数是直管的数倍,且随爆震管入口流量的增加螺旋管的流阻增加^[15]。也就是说,在进行高频实验时,为保证螺旋爆震室完全填充,其自身流阻是填充过程中不可忽略的因素之一。

3 结 论

根据螺旋爆震管实验结果设计了螺旋爆震室发动机进行了一系列实验,结论如下:

1) 螺旋爆震室在缩短爆震室轴向长度的同时可以加速爆燃向爆震转变过程,其 DDT 距离约为直管爆震室 DDT 距离的 88.8%。

2) 螺旋爆震室可在 5~20 Hz 频率之间稳定的运行,螺旋爆震室设计方案可行。

3) 与直管爆震室相较,在螺旋爆震室填充过程中,流阻是填充过程不可忽略的影响因素。

参考文献:

- [1] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion; challenges, current status, and future perspective[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(6): 545-672.
- [2] Austin J M, Shepherd J E. Detonations in hydrocarbon fuel blends[J]. Combustion and Flame, 2003, 132(1): 73-90.
- [3] Brophy C M, Hanson R K. Fuel distribution effects on

- pulse detonation engine operation and performance[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(6): 1155-1161.
- [4] 王玮, 邱华, 范玮, 等. 螺旋式脉冲爆震发动机试验研究[J]. *实验流体力学*, 2012, 26(2): 12-16.
- WANG Wei, QIU Hua, FAN Wei, et al. Experimental study on spiral pulse detonation engines[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2012, 26(2): 12-16. (in Chinese)
- [5] 王玮, 邱华, 范玮, 等. 弯曲方管内缓燃向爆震转变特性研究[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(8): 1796-1801.
- WANG Wei, QIU Hua, FAN Wei, et al. Deflagration to detonation transition characteristic in U-bend square tube[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(8): 1796-1801. (in Chinese)
- [6] WANG Wei, QIU Hua, FAN Wei, et al. Experimental study on DDT characteristics in spiral configuration pulse detonation engines[J]. *International Journal of Turbo and Jet-Engines*, 2013, 30(3): 261-270.
- [7] 邱华, 王玮, 范玮, 等. U型方管中爆燃向爆震转变特性实验研究[J]. *航空学报*, 2015, 36(3): 1788-1794.
- WANG Wei, QIU Hua, FAN Wei, et al. Experimental investigation on characteristic of deflagration to detonation in U-bend tube[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3): 1788-1794. (in Chinese)
- [8] Frolov S M. Liquid-fueled air-breathing pulse detonation engines demonstrator: operation principles and performance[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(6): 1162-1169.
- [9] Frolov S M, Aksenov V S, Shamshin I O. Shock wave and detonation propagation through U-bend tubes[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2421-2428.
- [10] Frolov S M. Fast deflagration-to-detonation transition[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry: B*, 2008, 2(3): 442-455.
- [11] Gordon P V, Sivashinsky G I. Pressure diffusivity and low velocity detonation[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 136(4): 440-444.
- [12] Dabora E K, Ragland K W, Nicholls J A, et al. A study of heterogeneous detonations[J]. *Acta Astronautica*, 1966, 12(1): 9-16.
- [13] Dabora E K, Ragland K W, Nicholls J A. Drop size effects in spray detonations[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1969, 12(1): 19-26.
- [14] Gubin S A, Sichel M. Calculation of the detonation velocity of a mixture of liquid fuel droplets and a gaseous oxidizer[J]. *Combustion Science and Technology*, 1977, 17(3/4): 109-117.
- [15] 王玮. 爆燃向爆震转变过程中能量转化效率研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- WANG Wei. Investigation on the characteristics and the energy conversion efficiency of deflagration to detonation transition in bend tubes[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)