

当量油气比对内燃波转子燃烧特性的影响

李 维¹, 李建中¹, 巩二磊¹, 张开晨¹, 袁 丽²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院

航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 南京 210016;

2. 中国人民解放军陆军工程大学 国防工程学院, 南京 210007)

摘 要: 为了研究当量油气比对内燃波转子燃烧特性的影响规律,采用控制变量法,保持内燃波转子转速、混气填充速度不变,通过调节燃料喷射体积流量改变混气的当量油气比。在不同的当量油气比下开展内燃波转子燃烧特性试验。试验结果表明:当量油气比对于内燃波转子燃烧过程影响很大,随着当量油气比的增加,内燃波转子获得的燃烧压力增益增大,在内燃波转子转速为 900 r/min、混气填充速度为 6.741 m/s、当量油气比为 1.442 时,6 个工作循环内平均燃烧压力增益达到 246.29%,火焰平均传播速度随当量油气比呈类似正态分布,在化学恰当比附近达到最大 10.8 m/s。当量油气比小于 1 时,两组工况下火焰锋面呈向下倾斜状传播,当量油气比大于 1 时,两组工况下火焰锋面呈向上倾斜状传播。

关 键 词: 内燃波转子; 燃烧特性; 当量油气比; 高速摄影; 离子探针; 增压燃烧

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Influence of equivalence fuel/air ratio on combustion characteristics of internal combustion wave rotor

LI Wei¹, LI Jianzhong¹, GONG Erlei¹, ZHANG Kaichen¹, YUAN Li²

(1. Key Laboratory of Aero-engine Thermal Environment and Structure,

Ministry of Industry and Information Technology,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of National Defense Engineering,

the Army Engineering University of the Chinese People's Liberation Army,

Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to study the influence of equivalence fuel/air ratio on combustion characteristics of internal combustion wave rotor, the control variable method was used to keep the combustion wave rotor speed and gas filling speed constant by adjusting the fuel injection volume to change of equivalence fuel/air ratio. The experimental investigations on combustion characteristics of internal combustion wave rotor were conducted under different equivalence fuel/air ratios. The results showed that the equivalence fuel/air ratio had great influence on combustion process of internal combustion wave rotor. As the equivalence fuel/air ratio increased, the combustion wave rotor obtaining combustion pressure gain in-

收稿日期: 2017-08-17

基金项目: 江苏省研究生培养创新工程(KYLX-0299); 国家自然科学基金(51476077)

作者简介: 李维(1992—),男,硕士生,研究领域为内燃波转子燃烧技术。

引用格式: 李维,李建中,巩二磊,等. 当量油气比对内燃波转子燃烧特性的影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(9): 2123-2128. LI Wei, LI Jianzhong, GONG Erlei, et al. Influence of equivalence fuel/air ratio on combustion characteristics of internal combustion wave rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(9): 2123-2128.

creased. When the speed of the internal combustion wave rotor was 900 r/min, the gas filling speed was 6.741 m/s, and the equivalence fuel/air ratio was 1.442, the average combustion pressure gain of the six working cycles was up to 246.29%. The flame propagation velocity was similar to normal distribution with the change of equivalence fuel/air ratio, which reached a maximum 10.8 m/s around the stoichiometric ratio. Under the condition of equivalence fuel/air ratio less than 1, the flame front was inclined downward, and the flame front was inclined upward in the case of the equivalence fuel/air ratio was greater than 1.

Key words: internal combustion wave rotor; combustion characteristics; equivalence fuel/air ratio; high speed photography; ion probe; pressurized combustion

内燃波转子作为一种新型燃烧装置,因其特有的波转子预增压技术和高效等容燃烧模式,取代传统航空发动机的核心机后能够大幅度提高发动机的性能^[1-3]。因此,许多学者对内燃波转子技术进行了研究。如:美国 NASA^[4]就将内燃波转子嵌入传统涡轮发动机上,开展了内燃波转子发动机性能研究。研究结果表明:将内燃波转子取代核心机后能够减少压气机级数,同时降低油耗。近年来,国外对内燃波转子的技术进行了模型分析及试验研究,Akbari 等^[5]建立了内燃波转子发动机分析模型,验证了内燃波转子技术可以大幅提高发动机性能。Wijeyakulasuriya^[6]模拟了内燃波转子射流掺混点火过程,对比了横向运动射流和静止射流,结果表明:移动射流和静止射流的掺混点火过程截然不同,移动射流形成的反向旋涡能够很好地实现冷热流体的掺混,有利于点火过程的发生。Matsutomi 等^[7]针对内燃波转子开展了初步试验,成功实现了内燃波转子的连续增压燃烧。这些研究都为内燃波转子的设计和工程应用提供了技术和理论的指导。国内关于内燃波转子的研究起步较晚,刘火星等^[8-10]主要对内燃波转子热力学循环性能、流动特性以及泄露模型进行了分析。李建中等^[11-13]主要针对内燃波转子对涡轴发动机的影响、单通道静止波转子的泄露问题开展了研究。而关于内燃波转子核心问题燃烧特性的研究,相关文献较少。为了深入了解内燃波转子燃烧特性,选用燃烧特性研究的一个重要参数当量油气比^[14-16]作为内燃波转子燃烧特性研究的变量,关于当量油气比很多学者对其开展了详细研究如:彭忠璟等^[17]的研究表明当量油气比对于预混火焰的传播速度、火焰结构变化有重要的影响。陈东梁等^[18]的研究表明当量油气比对燃烧特性的影响十分重要。为了研究当量油气比对内燃波转子燃烧特性的影响规律。本文针对

内燃波转子开展不同当量油气比对内燃波转子燃烧特性的影响规律研究。

1 试验系统及方法

内燃波转子试验系统如图 1 左上角所示,主要包括热射流点火器、旋转密封盘、波转子通道以及驱动电动机等组成。其中热射流点火器采用丙烷为燃料,丙烷在点火器中心腔内的燃烧形成高温燃气,经点火器的出口喷管形成持续稳定的热射流。其中旋转密封盘上各开有一个用于控制流体进、出波转子通道的端口,两端口具有不同开度和位置用于控制内燃波转子的工作时序,具体结构如图 1 左下角所示。波转子通道长为 200 mm,分别在 $X=160$ mm、 $X=100$ mm 和 $X=40$ mm 处布置压力传感器 PT1、PT2 和 PT3。内燃波转子工作时,驱动电动机通过连接轴带动密封盘旋转,波转子通道则处于静止状态,这样密封盘和波转子通道就处于相对运动。

数据采集系统如图 1 右边所示,主要包括计算机、数据采集卡、压力传感器(型号为 KD2004,灵敏度为 0.12 pC/kPa、谐振频率为 200 kHz,采样率为 500 kHz)和高速摄影等。当内燃波转子工作时,压力传感器检测的压力信号经由数据采集卡传送至计算显示并保存,用于研究通道内压力波的变化过程。波转子通道的一侧开有观察窗,高速摄影通过玻璃观察窗记录火焰的传播过程,用于研究火焰的发展特性。

在开始试验前,连接好试验系统的管路、采集系统的线路。然后调节热射流点火器的气路配合点火器完成热射流点火器的稳定持续工作。待热射稳定后,打开内燃波转子空气进气阀,调节空气填充速度至 6.741 m/s,同时开启电动机旋转至 900 r/min 的转速,之后通过调节内燃波转子乙烯燃料入口喷射体积流量,改变填充混气的当量油

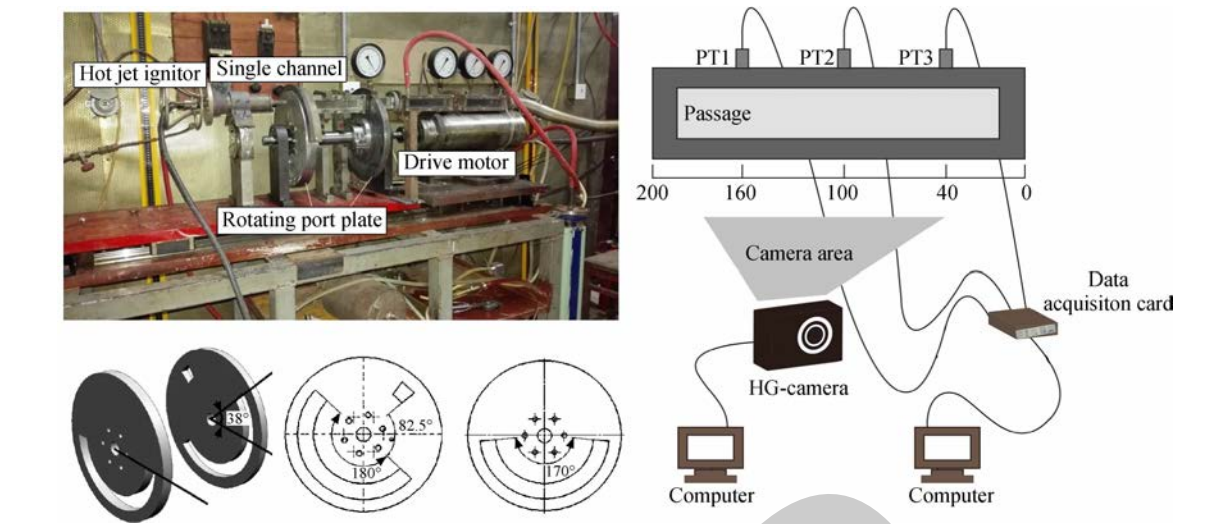


图 1 内燃波转子试验系统、密封盘结构和数据采集系统示意图

Fig. 1 Internal combustion wave rotor, sealing disc structure and data acquisition system

气比,实现不同当量油气比下内燃波转子燃烧特性研究。当量油气比 Φ 定义为实际油气比与化学恰当油气比之比,即

$$\Phi = \frac{f}{f_s}$$

(1)

具体试验参数如表 1 所示。

表 1 实验工况详细参数

Table 1 Detailed parameters of experimental conditions

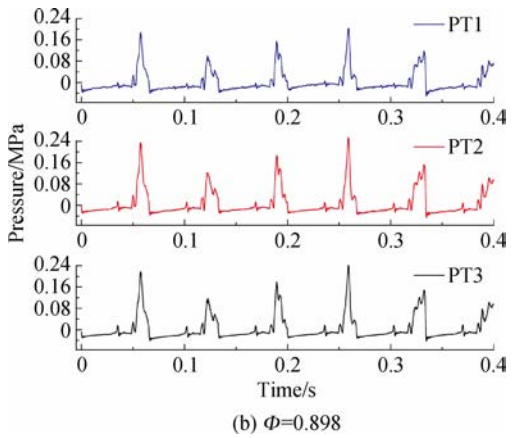
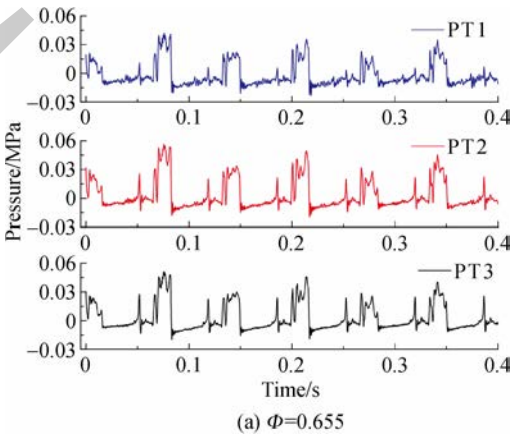
试验 工况	空气流量		乙烯流量		当量 油气比
	质量流量/ (g/s)	体积流量/ (m ³ /h)	质量流量/ (g/s)		
工况 1	23.126	0.5	0.952		0.655
工况 2	23.126	0.7	1.305		0.898
工况 3	23.126	1	1.865		1.284
工况 4	23.126	1.1	2.095		1.442

2 试验结果与分析

2.1 当量油气比对燃烧过程压力的影响

内燃波转子作为一种增压燃烧装置,其燃烧过程产生的压力增益是衡量内燃波转子性能的一个重要参数。图 2 给出了 4 种不同当量油气比下,三个不同位置测点的压力变化。从图中可以看出在 0.4 s 内每一条压力变化曲线均经历 6 个循环过程,也就是在 0.4 s 内波转子完成了 6 个工作循环,计算得内燃波转子的工作频率为 15 Hz,这与 900 r/min 电动机工作频率保持一致,说明在 4 种不同当量油气比下内燃波转子均实现了正

常工作,没有出现“掉频”现象。同时三个不同位置的测点出现压力波峰的时间几乎一致,这个主要是因为测点布置的间距较小与此同时压力波的传播速度较大,因此,在下面的讨论中将主要以 PT2 测点为主。分析一个循环压力的变化,可以发现存在明显的三种压力波:预压缩波、射流冲击波和燃烧波。预压缩波和射流冲击波的强度差不



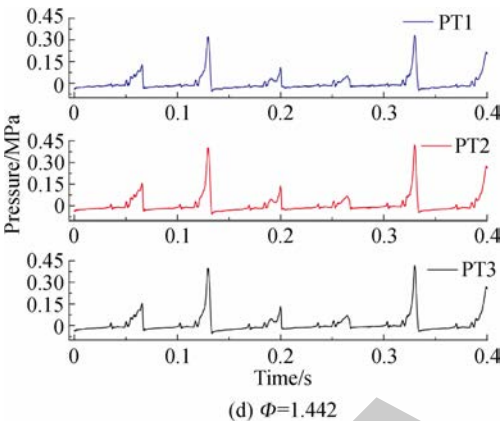
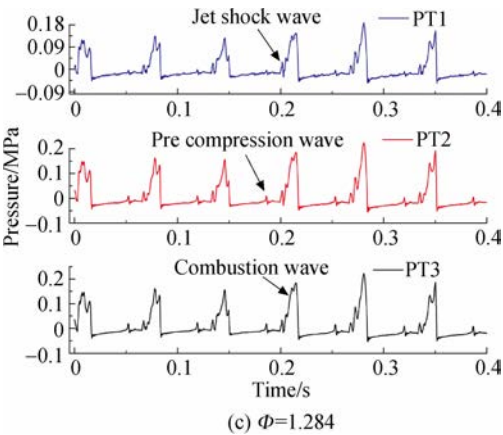


图 2 压力变化过程

Fig. 2 Pressure change process

多,但远小于燃烧产生的压力波。

图 3 给出了不同当量油气比下 PT2 测点处燃烧波峰值点压力及平均值压力。从图中可以看出,不同循环间峰值点压力有一定波动,且波动过程规律不明显。取平均峰值点压力(横线所示)后,可以发现随着当量油气比的增加平均峰值点压力在增大,在 $\Phi=1.442$ 时平均压力增益可达

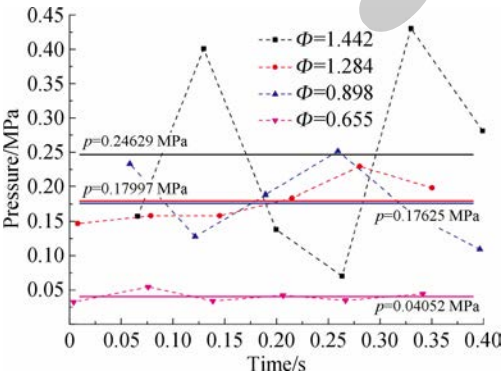


图 3 不同当量油气比下燃烧波峰值点压力及平均值压力(PT2)

Fig. 3 Peak value and mean pressure of different equivalence fuel/air ratios (PT2)

到 246.29%,相对于 $\Phi=0.655$ 压力增益获得极大提升。但是,对于 $\Phi=0.898$ 和 $\Phi=1.284$,燃烧波平均峰值点压力相差不大。

为了统计不同循环间的压力峰值点波动程度,对离散压力峰值点进行不均匀度统计,其定义为

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \right)} \quad (2)$$

其中 N 为测量时间内内燃波转子工作循环次数, p_i 为每个循环的峰值点压力, $\bar{p}$ 为测量时间内所有循环峰值点压力的平均值, σ_p 越小,表明燃烧波峰值点波动程度越小, σ_p 越大,表明燃烧波峰值点波动程度越大。因此 σ_p 值反映了内燃波转子循环间的稳定性。如图 4 所示,可以看到,随着当量油气比的增加,波转子工作循环间的燃烧波峰值点波动程度整体在增加。在 $\Phi=1.442$ 时不同循环间的压力峰值点波动达到 13.505%,在 $\Phi=0.655$ 时波动程度较小,可以认为内燃波转子循环间相互不影响。结合波转子的工作过程分析,主要是当量油气比的增加会提高燃烧强度,使得产生更大的燃烧波压力,在开始下一个循环的混气填充过程中,部分未充分膨胀排除波转子通道外的压力会阻碍混气的填充,从而影响下一个循环燃烧过程产生的最大燃烧波压力。

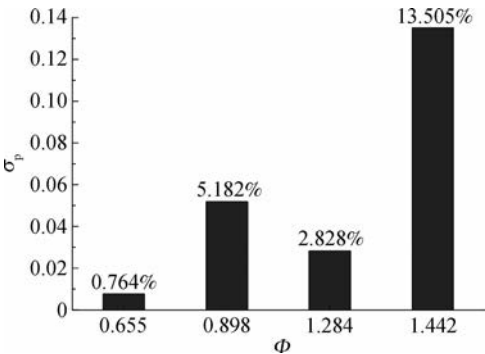


图 4 不同当量油气比对波转子循环间压力的影响

Fig. 4 Influence of different equivalence fuel/air ratios on the pressure of circulating

2.2 当量油气比对燃烧过程火焰发展的影响

图 5 给出了不同当量油气比下火焰发展过程,从图中可以看出, $\Phi=0.655$ 时火焰并没有完成整个通道的传播过程,其他三种当量油气比下火焰均完成整个通道的传播。随着当量油气比的增加燃烧反应区越来越强烈(亮度反应燃烧强度)。从 $\Phi=1.442$ 时火焰发展过程图中可以看到,反应区呈现出一个先增加后减小的趋势。同

时,对于 $\Phi=0.655$ 和 $\Phi=0.898$ 时,整个过程火焰锋面向下倾斜状传播,而 $\Phi=1.284$ 和 $\Phi=1.442$ 时,整个过程火焰锋面向上倾斜状传播。最主要的原因与波转子通道的截面形状有关,波转子通道的截面为扇形状,上端宽下端窄。从火焰发展过程图中可以看出,贫油时,火焰锋面向下倾斜状传播,也就是通道下端火焰传播速度快,主要原因是下端空间小,单位体积的未燃混气吸收的热量,点火延迟时间缩短,相同时间内火焰锋面出现的位置靠前。这就形成了火焰锋面向下倾斜状。富油时,燃烧比较剧烈,高温燃气受浮升力影响较大,波转子通道上端空间燃气受到下端高温燃气的挤压发生向两端加速溢出的过程,形成火焰锋面向上倾斜状传播。

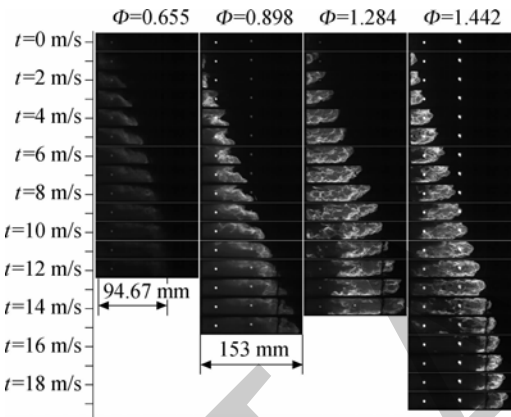


图 5 不同当量油气比下火焰发展过程
Fig. 5 Development of flame at different equivalence fuel/air ratios

图 6 中虚线给出了不同当量油气比下火焰锋面位置随时间的变化。实线为其对应线性拟合直线,其斜率 K 也就是平均火焰传播速度。从图中

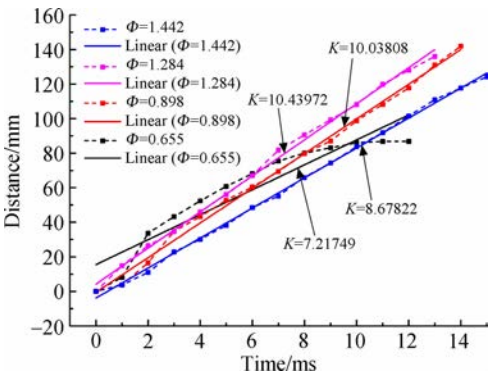


图 6 火焰锋面位置随时间变化
Fig. 6 Change of the position of the flame front with time

可以看出, $\Phi=0.655$ 时火焰锋面的位置最远能达到 94.67 mm,约占整个观察窗长度的 2/3,这使得波转子通道的部分容积未被充分利用,降低了波转子的燃烧性能。在 $\Phi\geq 0.898$ 时,内燃波转子均完成整个通道的燃烧。根据斜率可知,火焰传播速度随当量油气比呈类似正态分布,在化学恰当比附近最大火焰传播速度为 10.8 m/s。随着当量油气比远离化学恰当比,火焰传播速度在减小。

3 结 论

本文针对内燃波转子采用控制变量法保持内燃波转子转速、混气填充速度不变,通过调节乙烯燃料喷射体积流量改变混气的当量油气比,开展了不同当量油气比对内燃波转子燃烧特性的影响规律研究,研究结果如下:

- 1) 随着当量油气比的增加,内燃波转子燃烧产生的压力增益在增大,在内燃波转子转速为 900 r/min、混气填充速度为 6.741 m/s、当量油气比为 $\Phi=1.442$ 时 6 个工作循环内平均燃烧压力增益可达到 246.29%。
- 2) 当量油气比由 $\Phi=0.655$ 提高到 $\Phi=1.442$ 时,相应的燃烧产生的压力增益可由 40.52% 提高到 246.29%。
- 3) 内燃波转子火焰平均传播速度随当量油气比呈类似正态分布,在化学恰当比附近最大火焰传播速度为 10.8 m/s。
- 4) 在当量油气比小于 1 两组工况下火焰锋面呈向下倾斜状传播,在当量油气比大于 1 两组工况下火焰锋面呈向上倾斜状传播,且整过火焰传播过程,火焰锋面倾斜方向保持一致。

参考文献:

[1] AKBARI P, NALIM R, MUELLER N. A review of wave rotor technology and its applications[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(4): 717-735.

[2] AKBARI P, NALIM M R. Review of recent developments in wave rotor combustion technology[J]. Journal of Propulsion and Power, 2009, 25(4): 833-844.

[3] AKBARI P, SZPYNDA E, NALIM M R. Recent developments in wave rotor combustion technology and future perspectives: a progress review [J]. AIAA 2007-5055, 2007.

[4] WELCH G E. Overview of wave-rotor technology for gas turbine engine topping cycles[R]. London: Novel Aero Propulsion Systems International Symposium, The Institu-

- tion of Mechanical Engineers, 2000; 2-17.
- [5] AKBARI P, MÜLLER N. Performance improvement of small gas turbines through use of wave rotor topping cycles[R]. ASME Paper GT2003-38772, 2003.
- [6] WIJEYAKULASURIYA S D. Transient and translating gas jet modeling for pressure gain combustion applications [D]. West Lafayette, USA: Purdue University, 2011.
- [7] MATSUTOMI Y, HEIN C, LIAN C, et al. Facility development for testing of wave rotor combustion rig[J]. AIAA 2007-5052, 2007.
- [8] 刘火星, 姜冬玲, 邹正平. 波转子内部非定常流动分析[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 25-28.
LIU Huoxing, JIANG Donglin, ZOU zhengpin. Analysis of unsteady flow in wave rotor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(1): 25-28. (in Chinese)
- [9] 刘火星, 谈玲玲, 产世宁. 内燃波转子发动机循环分析[J]. 推进技术, 2015, 36(3): 352-357.
LIU Huoxing, TAN Linlin, CHAN Shiing. Analysis of internal combustion wave rotor engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(3): 352-357. (in Chinese)
- [10] 刘琛源, 刘火星. 波转子非定常泄漏流动机理[J]. 航空学报, 2017, 38(5): 91-104. .
LIU Chenyuan, LIU Huoxing. Mechanism of nonsteady leakage flow of wave rotors[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(5): 91-104. (in Chinese)
- [11] 李建中, 巩二磊, 温泉, 等. 内燃波转子技术对燃气涡轮发动机性能影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1928-1934.
LI Jianzhong, GONG Erlei, WEN Quan, et al. Effect of internal combustion wave rotor technology on performance of gas turbine engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9): 1928-1934. (in Chinese)
- [12] 巩二磊, 李建中, 刘博强, 等. 内燃波转子泄漏及密封问题分析[J]. 推进技术, 2016, 37(10): 1952-1957.
GONG Erlei, LI Jianzhong, LIU Boqiang, et al. Analysis of leakage and sealing of internal combustion wave rotor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(10): 1952-1957. (in Chinese)
- [13] 巩二磊, 李建中, 韩启祥, 等. 单通道内燃波转子燃烧性能实验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1127-1132.
GONG Erlei, LI Jianzhong, HAN Qixiang, et al. Experimental study on combustion performance of single channel internal combustion wave rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(5): 1127-1132. (in Chinese)
- [14] SATTELMAYER T. Influence of the combustor aerodynamics on combustion instabilities from equivalence ratio fluctuations[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(1): 11-19.
- [15] HA J Y, PARK J S, KANG J H. Effects of the throttle opening ratio and the injection timing of CNG on the combustion characteristics of a DI engine [J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(1): 11-17.
- [16] SCHILDBERG H P. Experimental determination of the static equivalent pressures of detonative decompositions of acetylene in long pipes and Chapman-Jouguet pressure ratio[C]//Proceedings of ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference. Anaheim, California, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2014: V005T05A018. 1-V005T05A018. 13.
- [17] 彭忠璟, 熊涛, 段强领, 等. 封闭矩形直管内的天然气/空气预混火焰传播[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(5): 419-425.
PENG Zhongjing, XIONG Tao, DUAN Qiangling, et al. Propagation of premixed natural gas/air flame in closed rectangular tubes [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(5): 419-425. (in Chinese)
- [18] 陈东梁, 孙金华, 刘义, 等. 甲烷/空气预混气体火焰的传播特征[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(5): 385-390.
CHEN Dongliang, SUN Jinhua, LIU Yi, et al. Propagation characteristics of premixed methane air flames [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5): 385-390. (in Chinese)

(编辑: 李岩梅)