

单通道内燃波转子燃烧性能实验

巩二磊, 李建中, 韩启祥, 刘博强

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 建立简化单通道内燃波转子系统, 以连续热射流的点火方式, 采用实验方法研究了点火位置, 射流作用时间, 初始预混气当量油气比对波转子通道内点火及燃烧性能的影响。结果表明: 随着射流逐渐推进, 喷管出口距波转子通道 38 mm 附近时, 对点火不利, 但点火位置对火焰锋面发展影响不大; 在不同当量油气比下, 射流作用时间对波转子通道内燃烧过程压力增益具有不同的影响规律, 同时火焰锋面倾斜角随着射流作用时间增加而有所减小; 当量油气比为 2.0 时不利于波转子内组织燃烧, 且此时火焰锋面出现反向倾斜, 倾斜角高达 58°。

关 键 词: 内燃波转子; 增压燃烧; 点火位置; 射流作用时间; 当量油气比

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Experiment on combustion performance of single channel wave rotor combustor

GONG Er-lei, LI Jian-zhong, HAN Qi-xiang, LIU Bo-qiang

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: An experimental system of a simplified single channel wave rotor combustor was established. Experimental investigations were conducted to evaluate the influences of igniting position, jet acting time and initial pre-mixing equivalence fuel/air ratio of premixed gas on the combustion performance. Continuous hot jet was applied to ignite the premixed gas. Results show that ignition is most difficult when the distance between the nozzle exit and the wave rotor channel is approximately 38 mm. However, the igniting position has little influence on development of the flame front. The influences of jet acting time on the pressure gain depend on equivalence fuel/gas ratio. The tilt angle of flame front decreases as jet acting time increases. When the equivalence fuel/gas ratio is 2.0, the combustion is unsatisfactory in the wave rotor. Meanwhile, reverse inclination of the flame front emerges with 58 degree tilt angle.

Key words: wave rotor combustor; pressurize combustion; igniting position; jet acting time; equivalence fuel/air ratio

内燃波转子 (wave rotor combustor, WRC) 是一种非定常燃烧装置^[1], 利用非定常波的运动实现能量的快速交换, 与传统的等压燃烧装置相比, 其采用的 Humphrey 循环有显著提高推进系统性能的潜力^[2-6]。典型的 WRC 一般由密封盘、

波转子及各种进排气端口组成^[7], 其中主体部分由一系列周向均匀分布的通道所构成。随着波转子的旋转, 各个通道依次经过不同作用的端口, 完成混气填充、点火、燃烧以及排气过程。由于气流的气动作用、燃烧放热等现象的存在, 会在波转子

收稿日期: 2015-08-11

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

作者简介: 巩二磊 (1988—), 男, 安徽宿州人, 博士生, 主要从事非定常燃烧技术以及内燃波转子关键技术的研究。

内产生激波、压缩波、膨胀波等非定常运动波系,从而造成能量密度呈不均匀分布;不同类型波之间存在相交、反射等作用,形成复杂波系的运动,并由此实现不同能量密度气体之间的能量交换.因其结构和工作过程的特殊性,通常采用热射流点火方式^[8-9].

尽管 WRC 发动机在提高推进系统性能方面具有诱人的优势,但作为新概念的动力装置,仍有很多难题和挑战亟待解决, WRC 通道内燃烧过程就是其中一个需要深入研究的热点问题. Kilchyk 等^[10]模拟了离心力场对 WRC 通道内湍流燃烧过程的影响,研究发现在 4000 g (g 表示重力加速度)以内,离心力对波转子内燃烧过程影响很小; Wijeyakulasuriya 等^[11]数值模拟了 WRC 热射流点火过程点火延迟时间的变化规律,研究表明点火延迟时间除了受燃料种类影响外,在很大程度上受到射流量影响;罗·罗公司与普度大学合作,建立了 WRC 实验平台^[12],并于 2010 年和 2011 年^[13-14]以乙烯为燃料实现了快速增压燃烧,并全面论述了燃料喷注、点火延迟以及火焰发展等问题; Karimi 等^[15]采用数值模拟的方法研究了几种喷管运动方式对 WRC 通道内点火延迟时间及火焰传播速度的影响,微观分析引起化学反应速率不同的原因; Chinnathambi^[16]通过实验研

究了 WRC 通道内横向射流点火特性,实验结果表明以乙烯为燃料相对于甲烷可以获得较短的点火延迟时间,甲烷和氢气混合,可以大大缩短点火延迟时间并加速火焰传播,射流作用时间为 6.1 ms 时最佳. Elharis^[17]发展了用于计算二维 WRC 通道点火及燃烧过程的计算方法,采用两步 4 组分化学反应机理,可以跟实验较好地吻合; 巩二磊等^[18]数值模拟了 WRC 通道内氢气的燃烧过程,燃烧激波与火焰锋面耦合,实现了爆震燃烧.目前国外对 WRC 点火及燃烧过程的实验研究基础薄弱,且多采用间歇射流为点火源,而国内关于 WRC 研究更是处于起步阶段.

本文建立单通道简化 WRC 实验系统,采用连续、变截面、纵向传播的射流点火方式,研究了点火位置、射流作用时间以及预混气当量油气比等对 WRC 燃烧过程的影响,研究结果为 WRC 研究与应用奠定基础.

1 实验系统及实验方法

WRC 工作过程主要包括填充、预压缩、点火、等容燃烧及排气等过程,本文选择单个内燃波转子通道为研究对象,研究 WRC 从混气填充完毕至点火燃烧过程.如图 1 所示,图中 D 为喷管出口直径, d 为移动滑块孔的纵向尺寸, s 为初始

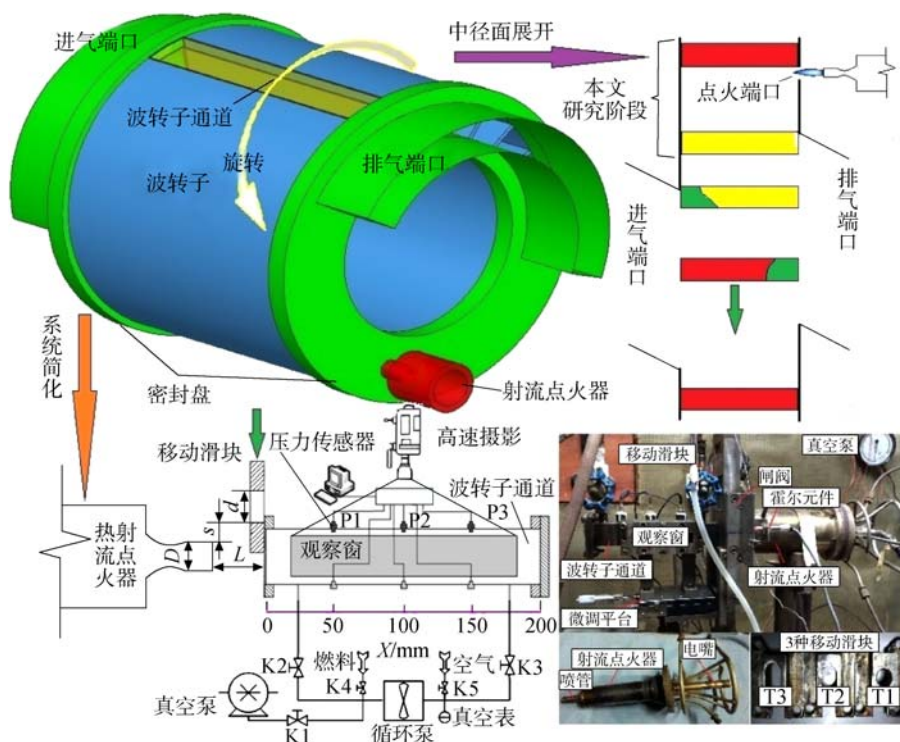


图1 实验系统原理及实物结构

Fig. 1 Principle and structures of experimental system

状态移动滑块孔下边缘距喷管出口上边缘距离。实验系统包含一个静止的波转子通道,其相对于点火源的旋转运动通过移动滑块的移动来实现;移动滑块可以实现 WRC 通道相对于点火端口的渐开闭过程,通道静止可以方便实现其内部压力等信号的采集以及火焰发展过程的观测。

WRC 通道上等间距布置 3 个高频动态压力传感器(P1,P2,P3,分别布置在 $X=50,100,150$ mm 位置,其中 X 为 WRC 通道长度方向距离),用于测量燃烧过程当地压力变化。高速摄影通过观察窗可以拍摄燃烧过程火焰的发展,并根据不同时刻火焰锋面所在位置,计算沿程火焰传播速度。

实验前移动滑块(T1,T2,T3)处于提起的初始状态,打开阀门 K1,K2,K3,开启真空泵将 WRC 通道内抽至真空状态,然后关闭真空泵及 K1。打开 K4 向通道内填充一定量丙烷燃料,然后打开 K3 使 WRC 通道内恢复到常压状态。打开循环泵使填充的混气充分混合,调节射流点火器,使射流稳定,并调节其位置,保证射流喷管出口到波转子通道间的距离 L 。射流点火器以丙烷为燃料,混气在点火器内燃烧后的高温燃气经喷管排出形成点火源。调节微调平台控制 WRC 通道和移动滑块之间间隙(约为 0.5 mm),放下移动滑块,在其下落过程射流通过移动滑块上的孔进入到 WRC 通道内,并点燃混气,本文通过改变移动滑块的结构(如图 1 右下角所示 3 种结构),实现调节射流作用时间的目的。霍尔元件通过感应移动滑块位置信号,触发采集系统和高速摄影,完成信号采集。

实验研究了点火位置(L)、射流作用时间(τ)以及预混气当量油气比(Φ)等参数对燃烧过程的影响,具体实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数
Table 1 Experiment parameters

参数	数值
L/mm	58,48,38,33,28
τ/s	0.13306,0.20027,0.26905
Φ	1.0,1.5,2.0

2 燃烧过程性能分析

2.1 点火位置对燃烧过程的影响

研究点火位置对 WRC 燃烧过程影响时,波转子通道位置固定不动,调节热射流相对于

WRC 通道的位置,改变 L 值,即改变用于 WRC 点火的射流参数(温度、速度等)。图 2 给出了射流点火位置的影响规律,图中上方数据为平均值所对应的点火位置。

实验过程中 L 大于 58 mm 之后,多次点火均失败,因此将 $L=58$ mm 作为点火成功与否的极限位置。由图 2(a)可知,随着 L 的不断减小,3 个测点的峰值压力呈先减小后增大的变化趋势;图中用虚线的形式以 3 个测点的平均压力表示 L 对 WRC 燃烧过程影响,从图中可以看出,虽然 L 越小,用于点火的能量越高,但并不是 L 越小越有利于 WRC 内组织燃烧,这是因为 WRC 的点火及燃烧过程受到湍流度及化学反应两方面因素综合影响。实验过程中,波转子通道内混气处于近似静止状态,初始湍流度可以忽略;点火过程的湍流度由射流引起,随着射流推进,起始阶段射流引起的湍流度较小。因此,点火过程主要受化学反应因素影响。随着 L 减小,点火能量增加,更有利于

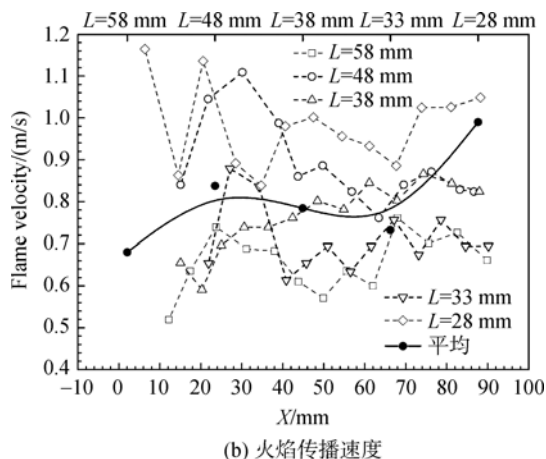
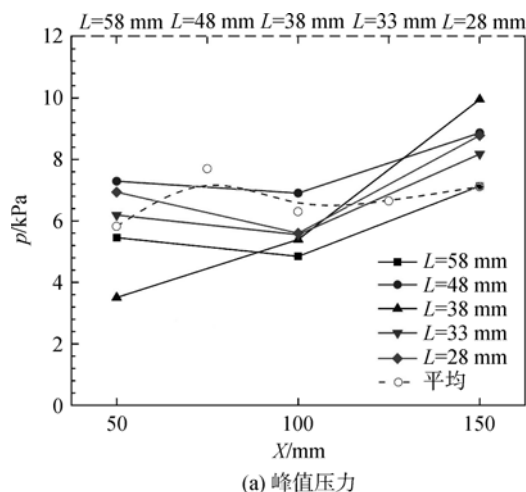


图 2 点火位置对燃烧过程影响

Fig. 2 Effect of igniting position on combustion process

波转子点火和火焰传播,当 $L=38\text{ mm}$ 时,射流扰动引起的湍流度增加,削弱了波转子内的燃烧性能,测点峰值压力降低.随着射流进一步推进,射流核心进入 WRC 通道,射流能量急剧增加,最终导致点火及燃烧过程向着有利的方面发展.图 2(b)从火焰传播速度层面也得到了类似的影响规律.图中显示波转子通道内火焰传播速度只有 $0.5\sim 1.2\text{ m/s}$,说明燃烧过程进行十分缓慢,有待采取措施增加化学反应速率.

当 $L=38\text{ mm}$ 时,燃烧峰值压力表现出特殊的变化规律,其他点火位置燃烧所测得的峰值压力中间测点最低.这是因为火焰传播到第 1 个测点时,燃烧过程受射流影响仍比较强烈,燃烧较剧烈;而火焰传播至第 2 测点时,移动滑块所处位置完全遮挡射流,射流影响消失;燃烧过程经历短暂衰退期后,随着火焰继续发展加速,至第 3 测点位置,峰值压力重新到达较高值.在 $L=38\text{ mm}$ 时,由于点火相对困难,燃烧过程起始阶段受射流影响不明显,3 个测点的峰值压力随着燃烧的发展,依次升高.

2.2 射流作用时间对燃烧过程影响

射流作用时间 τ 定义为移动滑块下落到射流开始进入波转子通道起,至移动滑块再次完全挡住射流的时间,移动滑块近似为自由落体运动(如图 1 所示),则

$$\tau = \frac{\sqrt{2g(d+s+D)} - \sqrt{2gs}}{g}$$

式中 g 为重力加速度.

射流作用时间对 WRC 的影响有两方面原因,一方面射流作用时间越长,点火过程进入波转子通道的射流量增加,点火能量更高;而另一方面,射流作用时间增加,波转子通道内预混气燃烧压力升高对射流的影响愈强,甚至出现回流造成燃烧性能损失.

图 3 给出了波转子通道内混气当量油气比分别为 $\Phi=1.0$ 和 $\Phi=1.5$ 时的峰值压力 p 分布,在 $\Phi=1.0$ 时,随着射流作用时间增加,波转子的燃烧性能明显降低,而在 $\Phi=1.5$ 时又呈现出完全相反的规律,说明在 $\Phi=1.0$ 的情况下,混气更容易被点燃.在保证点火能量足够的情况下,较短射流作用时间可以减小回流损失,对提高内燃波转子燃烧性能有好处.进而说明了当量油气比和射流作用时间对 WRC 的影响存在相互交叉的作用.

2.3 波转子内当量油气比对燃烧过程影响

为了研究预混气当量油气比的影响,固定点

火位置及射流作用时间,分别研究了预混气当量油气比为 $\Phi=1.0$, $\Phi=1.5$ 和 $\Phi=2.0$ 的情况. $\Phi=1.5$ 时最有利于燃烧,获得最高压力增益; $\Phi=2.0$ 时接近丙烷的富油燃烧极限,虽然可以采用热射流点燃,但实验过程经反复实验发现点火成功率较低,只有 $15\%\sim 20\%$,且燃烧情况很差.

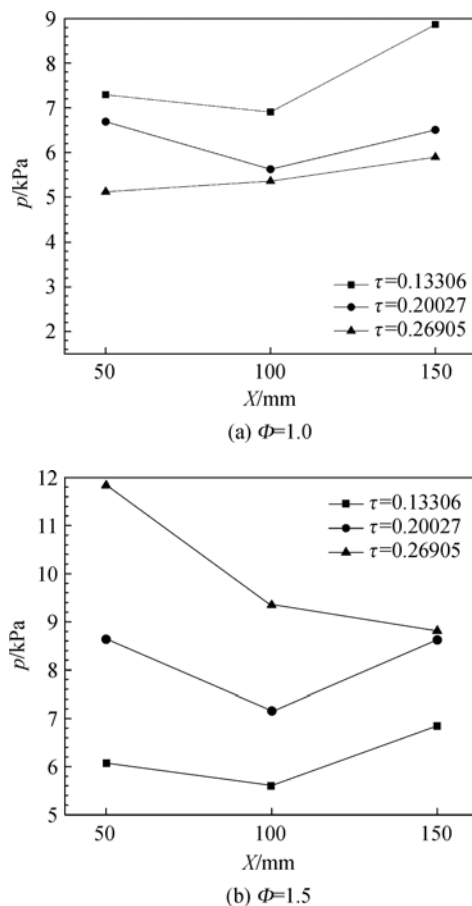


图 3 射流作用时间燃烧过程影响

Fig. 3 Effect of jet acting time on combustion process

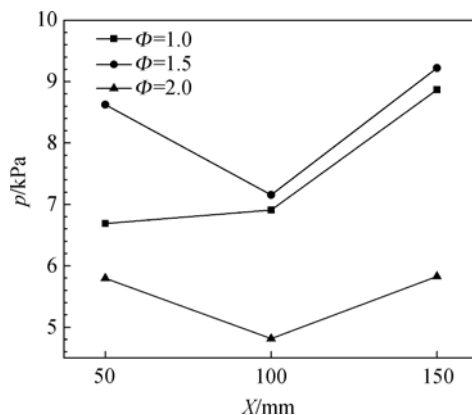


图 4 预混气当量油气比对燃烧过程的影响

Fig. 4 Effect of equivalence fuel/air ratio of the pre-mixing on combustion process

如图 4 所示,其燃烧峰值压力显著减小.

3 各因素对火焰锋面的影响

图 5 给出了不同初始条件下,火焰稳定传播时火焰锋面形状.由图中可知,所有状态下,WRC 通道内的火焰锋面均为曲面;除初始预混气当量油气比 $\Phi=2.0$ 以外,火焰锋面保持一致的倾斜方向,且通道下方火焰位置更靠前,说明了扇形

WRC 通道的内弧面火焰传播更快;在 $\Phi=2.0$ 时火焰锋面倾斜方向相反,外弧面的火焰传播更快一些.

定义图 5 中绿线与黄线之间的夹角为火焰锋面倾斜角 α , $\Phi=2.0$ 时火焰倾斜方向相反,其倾斜角用 β 表示加以区分,为了进一步分析各因素对火焰锋面的影响,对火焰锋面倾斜角进行量化处理.

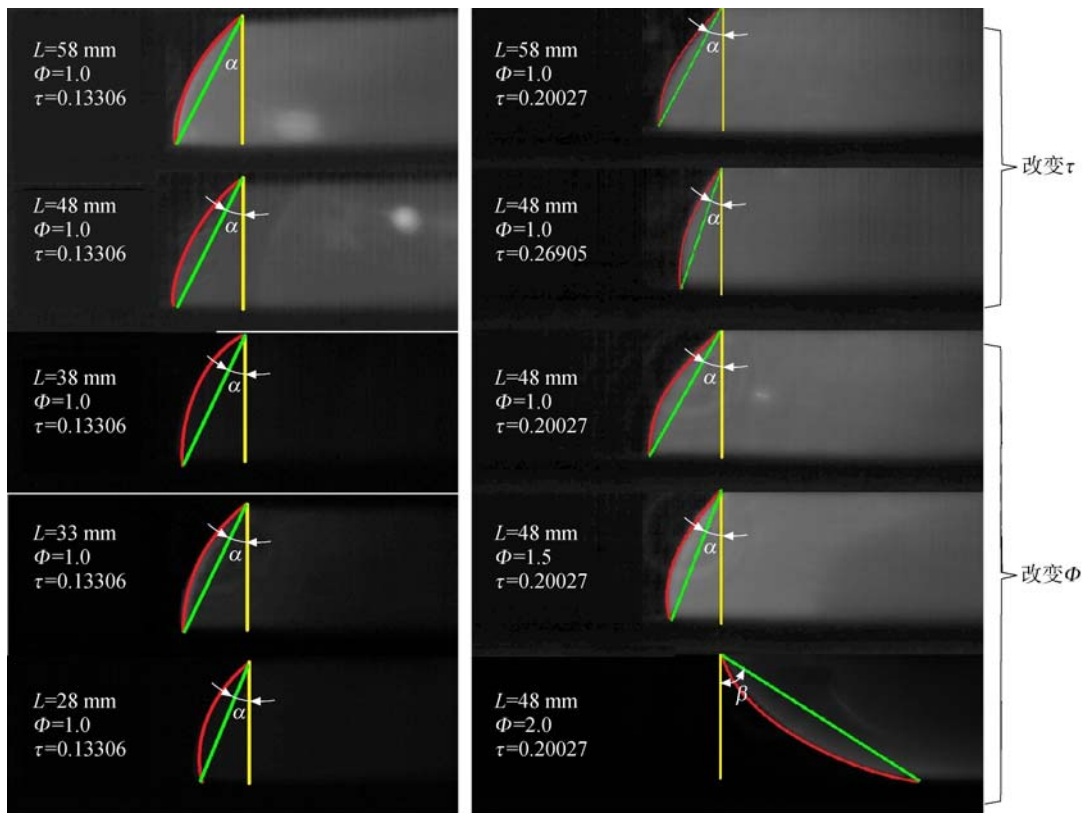


图 5 不同条件下火焰锋面结构
Fig. 5 Structure of the flame front under different conditions

图 6 给出了火焰锋面倾斜角 $\alpha(\beta)$ 随 L , τ 和 Φ 的变化规律,图中 $\alpha(\beta)$ 均取代数值.由图可知,随着 L 的变化,火焰锋面倾斜角上下波动,但并没有明显变化;随着射流作用时间的增加,火焰锋面倾斜角有逐渐减小的趋势,火焰锋面从曲面向平面发展.这是因为射流作用时间增加,用于点燃混气的射流能量增加,削弱了火焰分层发展的趋势.随着预混气当量油气比的增加,火焰锋面先是减小,当混气成分富到不利于组织燃烧时,火焰锋面发生极度倾斜,从而使得 $\Phi=2.0$ 时火焰锋面反向倾斜 58° .

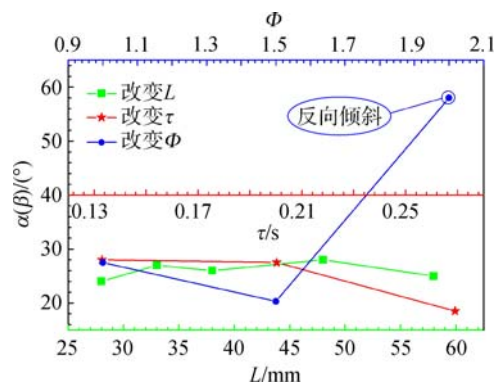


图 6 火焰锋面倾斜角随不同因素的变化
Fig. 6 Variation of flame front angle with different factors

4 结 论

1) 建立了单通道内燃波转子实验平台,以丙烷为燃料,热射流为点火源进行了点火及燃烧实验,研究了点火位置,射流作用时间,初始预混气当量油气比对内燃波转子点火及燃烧过程的影响。

2) 化学反应和湍流度共同影响内燃波转子点火及燃烧过程,针对本文实验系统,在 $L=38$ mm 时,射流引起的湍流度增加,不利于波转子点火。

3) 射流作用时间在不同预混气当量油气比下对波转子燃烧过程表现出不同的影响规律;改变预混气当量油气比时,发现在 $\Phi=1.5$ 时燃烧过程增压比最高。

4) 点火位置对火焰锋面影响不大;射流作用时间增加,火焰锋面倾斜角有逐渐减小趋势;预混气当量油气比不仅影响火焰倾斜程度,还影响火焰倾斜方向。

参考文献:

- [1] Akbari P, Nalim M R. Numerical simulation and design of a combustion wave rotor for deflagrative and detonative propagation[R]. AIAA-2006-5134, 2006.
- [2] Akbari P, Nalim M R. Analysis of flow processes in detonative wave rotors and pulse detonation engines [R]. AIAA-2006-1236, 2006.
- [3] 胡晓煜. 波转子增压循环发动机技术[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2005, 18(1): 57-62.
HU Xiaoyu. Wave rotor topping cycle gas turbine engine technology[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2005, 18(1): 57-62. (in Chinese)
- [4] 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 Lingling, CHAN Shining. Thermodynamic analysis of gas turbine engines using wave rotor combustion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(3): 352-357. (in Chinese)
- [5] 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): 1928-1933.
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): 1928-1933. (in Chinese)
- [6] 成本林, 李建中, 巩二磊, 等. 内燃波转子影响涡轴发动机性能研究[J]. 推进技术, 2012, 33(5): 726-731.
CHENG Benlin, LI Jianzhong, GONG Erlei, et al. Impact of internal combustion wave rotor on performance of turboshaft engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(5): 726-731. (in Chinese)
- [7] Akbari P, Szpynda E, Nalim M R. Recent developments in wave rotor combustion technology and future perspectives: a progress review[R]. AIAA-2007-5055, 2007.
- [8] Wijeyakulasuriya S D, Elharis T, Nalim M R. Fuel proximity effect on hot jet ignition in a wave rotor constant volume combustor[R]. AIAA-2012-4171, 2012.
- [9] Perera U. Experimental investigation into combustion torch jet ignition of methane-air, ethylene-air, and propane-air mixtures[D]. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 2012.
- [10] Kilchyk V, Merkle C. Effect of channel rotation on premixed turbulent combustion in a wave rotor combustor [R]. AIAA-2007-5053, 2007.
- [11] Wijeyakulasuriya S D, Nalim M R. Mixing and ignition potential of a transient confined turbulent jet in a wave rotor constant volume combustor[R]. AIAA-2010-7024, 2010.
- [12] Matsutomi Y, Hein C, LIAN Chenzhou, et al. Facility development for testing of wave rotor combustion rig[R]. AIAA-2007-5052, 2007.
- [13] Matsutomi Y, Scott E M, Wijeyakulasuriya S, et al. Experimental investigation on the wave rotor constant volume combustor[R]. AIAA-2010-7043, 2010.
- [14] Elharis T M, Wijeyakulasuriya S D, Nalim M R. Analysis of deflagrative combustion in a wave-rotor constant-volume combustor[R]. AIAA-2011-583, 2011.
- [15] Karimi A, Rajagopal M, Nalim R. Traversing hot-jet ignition in a constant volume combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(4): 1-8.
- [16] Chinnathambi P. Experimental study of traversing hot-jet ignition of lean hydrocarbon-air mixtures in a constant volume combustor[D]. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 2013.
- [17] Elharis T M. A multi-step reaction model for stratified-charge combustion in wave rotors[D]. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 2007.
- [18] 巩二磊, 李建中, 韩启祥, 等. 内燃波转子非定常流动和燃烧特性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(3): 309-315.
GONG Erlei, LI Jianzhong, HAN Qixiang, et al. Analysis of unsteady flow and combustion characteristics of combustion wave rotor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(3): 309-315. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)