

内燃波转子燃料填充方案研究^{*}

李建中¹, 巩二磊¹, 袁 丽², 刘双丽¹, 刘博强¹

(1. 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, 江苏 南京 210016;

2. 中国人民解放军理工大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要: 为获得内燃波转子进气端口内可靠的燃料填充方案, 研究混气形成规律, 采用数值模拟与实验相结合的方法, 从燃料分布不均匀度及涡轮径向温度分布要求方面考虑, 比较了壁面单孔喷射、单孔逆喷、双孔逆喷以及多孔侧喷四种燃料喷注方案下混气的掺混情况。研究表明, 单孔逆喷方案实现了与典型涡轮进口温度要求一致的燃料分布, 且燃料分布不均匀度适中, 距进口150mm以后混气分布不均匀度趋于恒定, 确定为最佳方案; 主流与喷孔射流以燃料进口压力等于0.3MPa为界, 分别主导混气的掺混。

关键词: 波转子; 内燃波转子; 燃料填充; 喷注方案; 掺混

中图分类号: V235.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2016) 11-2120-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2016.11.016

Investigation on Fuel Injection Strategies of Wave Rotor Combustor

LI Jian-zhong¹, GONG Er-lei¹, YUAN Li², LIU Shuang-li¹, LIU Bo-qiang¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing 210016, China;

2. School of National Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to acquire the authentic fuel-filling scheme of wave rotor combustor, and study the mixed gas formation principles, with experiments and numerical simulation, the mixing results of four fuel injection strategies which include single hole on the wall, single-hole inverse injection, double-holes inverse injection and multi-holes tangential injection, were compared from fuel distribution unevenness and the turbine radial temperature distribution aspects. The results show that, the single-hole reverse injection scheme was identified as the best strategy for achieving the fuel distribution. It is consistent with the typical turbine inlet temperature and appropriate fuel distribution unevenness. It tends to be constant backwards the position of 150mm away from the inlet. The mainstream and jet flow respectively dominant the mixing with taking the fuel inlet pressure of 0.3MPa as the dividing line.

Key words: Wave rotor; Wave rotor combustor; Fuel filling; Injection strategies; Mixing

1 引 言

波转子是利用不稳定波实现不同能量密度气体间能量交换的装置, 将波转子技术作为顶层循环应

用于燃气涡轮发动机可以在不增加涡轮前进口温度的前提下提高涡轮进口总压, 从而达到大幅度提高推进系统性能的目的, 此时波转子也称为压力交换器或外燃波转子; 除此之外还可以用波转子取代原

^{*} 收稿日期: 2015-08-30; 修订日期: 2015-12-22。

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: 李建中, 男, 博士, 副教授, 研究领域为航空发动机燃烧理论与技术。E-mail: ljzh0629@nuaa.edu.cn

有燃烧室,燃烧过程以等容燃烧的模式在波转子通道内完成,形成内燃波转子发动机^[1]。理论上在进出口条件一样的条件下,两种波转子形式可以实现相当的性能提升,但相比而言,内燃波转子具有结构简单、低排放易实现等特点,因此更加具有应用前景。

目前内燃波转子^[2]研究面临两大课题:(1)低排放问题;(2)转子及其它部件的热负荷问题。而这两方面问题都会直接受到内燃波转子内可燃混气分布特性的影响,因此内燃波转子内可燃混气形成及其分布规律成为相关领域的重要研究课题。

自20世纪50年代内燃波转子概念提出以来^[3],可燃混气形成与分布问题逐渐受到关注,Akbari P等^[4]在分析内燃波转子流动过程中,假设燃料以均匀混气的形式进入波转子通道,没有考虑燃料在进气端口内的掺混,所采用的一维计算方法成为内燃波转子结构设计的有力工具。2006年Khalid等^[5]在原有的一维算法的基础上加以改进,数值模拟了波转子通道内流动与混气分布特性,研究结果体现了可燃混气形成与控制的重要性。

Nalim MR和Pekkan K等^[6,7]提出了内燃波转子内燃料分层填充的理念,将内燃波转子进气端口分成若干区域,每个区域以不同的油气比及初始参数填充燃料,最终混气以特定的分布进入波转子通道,其中点火区域处于富油状态而壁面附近处于贫油状态甚至为纯净空气,这样在保证可靠点火和火焰稳定快速传播的同时,减少了高温燃气对轴承及其他部件的危害,另外该方法可以作为调节燃烧室出口温度分布的手段,使波转子排气温度满足涡轮进口要求。

Wijeyakulasuriya S D等^[8]提出了内燃波转子进气端口内气态燃料填充的几种方案,并通过数值模拟的手段比较了几种方案的优缺点,研究结果表明燃料横向射流所产生的反向旋转涡对有利于燃料和周围空气的掺混。

近年来普度技术与工程大学^[9]建立了内燃波转子实验平台,采用丙烷为燃料,以燃料分层填充理念为基础,并加以改进,提出了更加精细的燃料填充与控制方法,并于2010年完成了初步的实验研究,实验采用热射流点火装置,成功点燃了波转子通道内的混气,并实现了增压燃烧,作为首次公开发表的实验研究案例,有利于促进内燃波转子技术的深入研究。

目前国内也对波转子技术作了大量研究,如胡晓煜、刘火星等^[10~12]对波转子工作原理等做了系统介绍,并针对波转子作为燃气涡轮发动机顶层循环

作了性能分析,李建中等^[13~16]针对内燃波转子应用于燃气涡轮发动机做了理论分析,数值模拟了内燃波转子内的非定常流动与燃烧特性,并完成了内燃波转子实验系统的建立。

本文研究目的在于探索适用于所建立试验系统的最佳燃料填充方案,为进一步实验研究作充分准备。

2 物理问题与研究方法

2.1 物理问题

内燃波转子结构一般包括进气端口、波转子和排气端口几个部分,如图1上方部分所示,与传统燃烧室相比,内燃波转子没有专门的掺混结构,气流以较高速度直接进入波转子通道,这就要求混气在进气端口内完成掺混,以预混气形式进入波转子通道,而且由于波转子具有多个通道顺序工作,与其他间歇型燃烧装置如PDE不同,混气需要持续供给。

为了使波转子出口温度场满足涡轮进口温度要求,需要在波转子通道内产生对应的混气分布,而波转子通道内混气分布情况很大程度上取决于进气端口出口截面上的燃料分布,本文根据建立的试验系统,建立内燃波转子进气端口模型,如图1所示,燃料从燃料进口进入燃料总管后,沿各个进气支管进入混气端口,并与周围空气掺混后进入转子通道,其中燃料从进气支管进入混器端口的形式有多种,图1同时给出了本文所研究四种形式的示意图,途中黑色箭头表示进气端口内气流方向,红色箭头表示燃料流动方向,四种方案喷孔的总面积一样。

2.2 研究方法

采用实验与数值模拟相结合的方法,数值模拟为主,实验结果用于验证计算方法的合理性。试验系统如图2所示,压缩空气经过渡段、连接段进入进气端口,与燃料罐进入进气端口的燃料混合,形成可燃混气,废气分析仪用于测量进气端口内不同截面的燃料浓度,测量之前首先确定辅助固定装置与实验件的相对位置,探针的具体位置由辅助固定装置上的定位孔确定,定位孔共21个,即每个测量截面测量21个数据。实验系统相关部件实物照片如图2所示。

数值模拟采用商业计算流体力学软件Fluent实现,采用Gambit完成计算模型建立及网格划分,以图1中Case A为例,所建立的模型及网格划分如图3所示,网格尺寸为2mm,网格总量约为140万,模型总长为200mm,燃料进口距主流进口距离为50mm,简化

之后计算模型省去了燃料管道,为了方便分析,图中定义了几个特征面位置,其中 Z 定义为特征面距进口边界的距离。计算过程采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,流场的计算采用SIMPLE算法,方程的离散采用具有较高精度

的二阶迎风差分格式。主流进口为质量进口,空气流量为 2kg/s ,初始压力为 0.76MPa ,进气温度为 630K ,燃料进口为压力进口,进口总压为 0.3Pa ,湍流度为 10% ,温度 300K 。

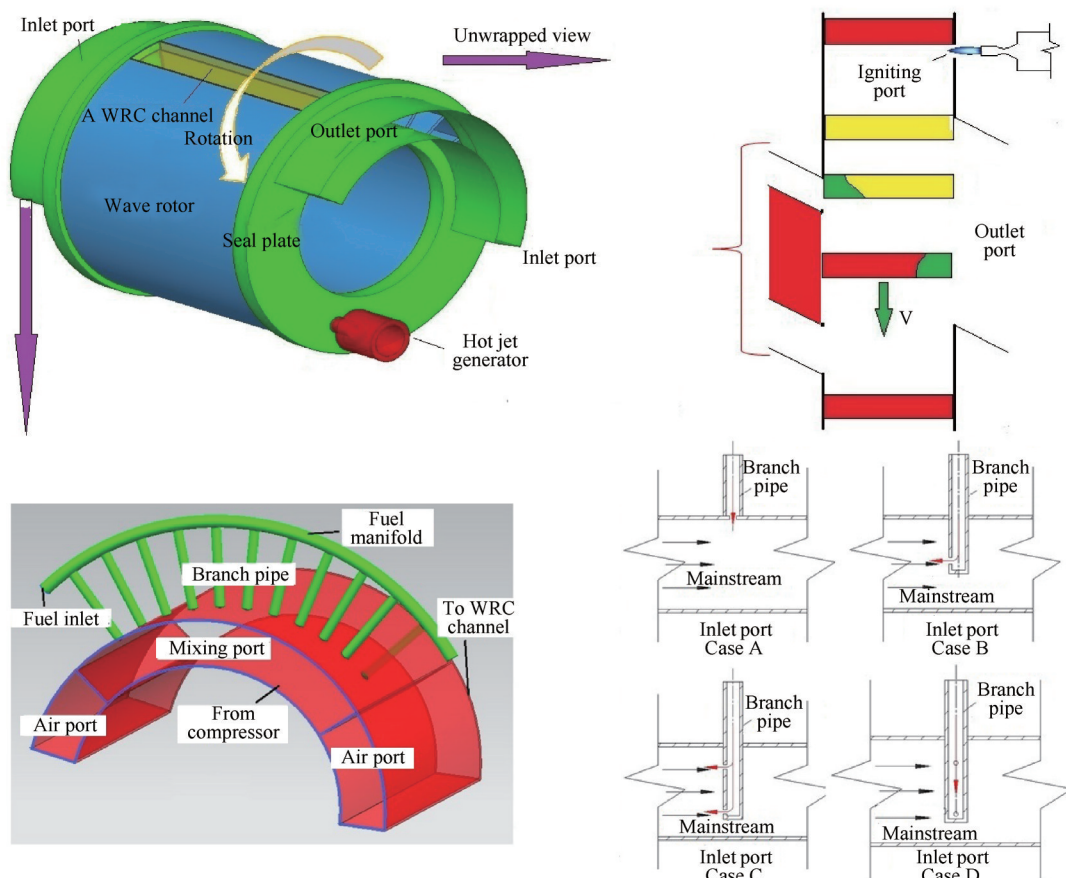
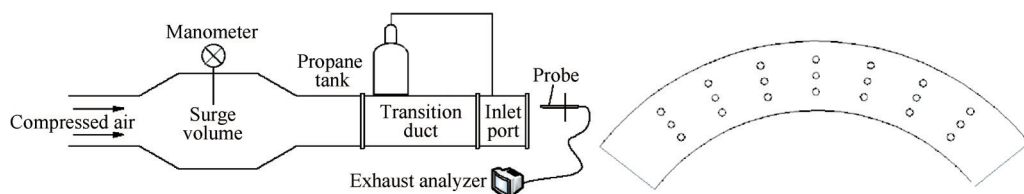
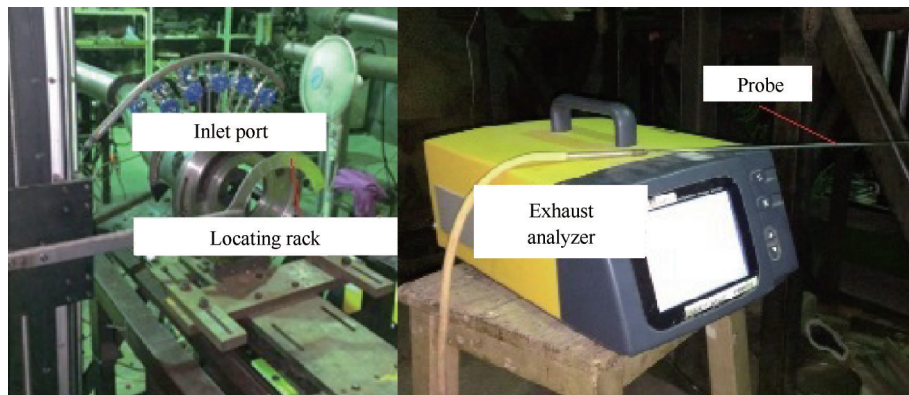


Fig. 1 Wave rotor combustor fuel injection strategies



(a) Experimental system and measure point



(b) Pictures of experiment

Fig. 2 Experimental system of fuel distribution measurement

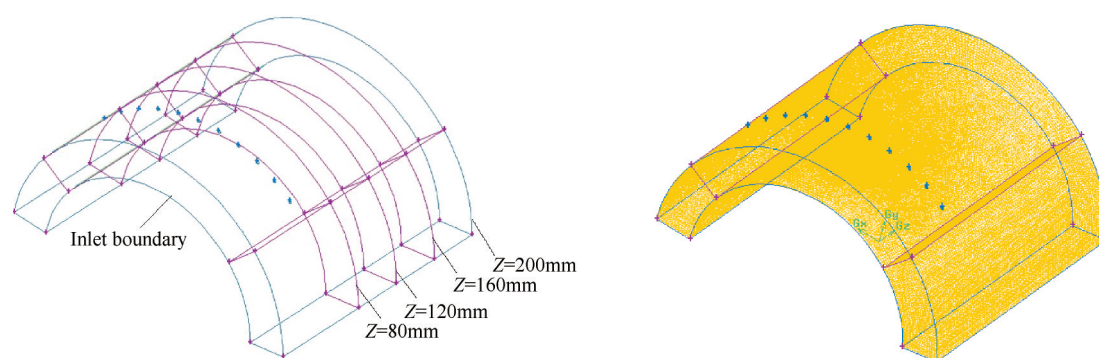


Fig. 3 Calculation model and mesh generation

3 计算结果与分析

3.1 计算方法验证

选择图1中 Case B 为验证工况,由于当前实验条件限制,低压气源压力达不到设计要求,验证实验的空气进口压力为 0.01MPa,选择丙烷为燃料,丙烷气罐减压阀后的压力设定在 0.06MPa,实验过程测量截面距进气端口出口距离分别为 0, 50, 100mm,作为计算方法验证的计算工况边界条件赋值与实验条件一致,定义测量截面上的混气分布不均匀度为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}}$$

它反应了测量截面上燃料分布的不均匀程度。式中 N 为测点数, X_i 为第 i 个测点上丙烷的浓度, μ 为所有测量值的算术平均值,图4为计算与实验所得测量截面上燃料分布不均匀度的对比,从图中可以看出,实验值与计算值十分接近,而且变化趋势一致,这验证了计算方法的合理性。

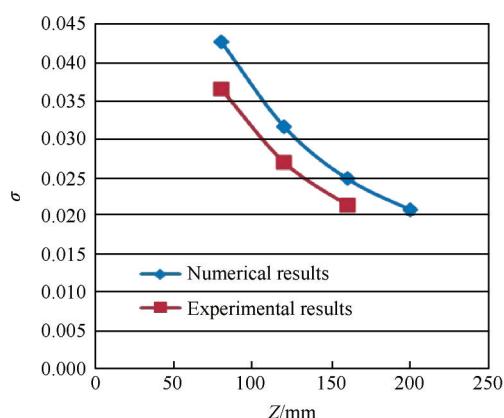


Fig. 4 Comparison of fuel distribution unevenness between numerical and experimental results

3.2 四种喷注方案掺混效果比较

图5给出了四种方案不同截面上混气分布不均匀度的变化曲线,从图中可以看出,Case A 的混气不均匀度最高,混气掺混效果最差,单孔逆喷次之,随

着喷孔数量的增加,混气掺混情况得到改善,如图中 Case C 和 Case D 两种工况,混气分布不均匀度最低,且约在 $Z=120\text{mm}$ 之后,混气分布不均匀度保持近似不变的趋势,说明这两种方案需要更短的掺混距离来达到预期的掺混效果,另外从图中还可以看出, Case C 和 Case D 两种方案的曲线非常接近,这说明在喷孔总面积一定的情况下,每个支管的喷孔数量为两个时,已经可以实现较好的掺混效果,继续增加喷孔数量并不能大幅度改善混气掺混效果。

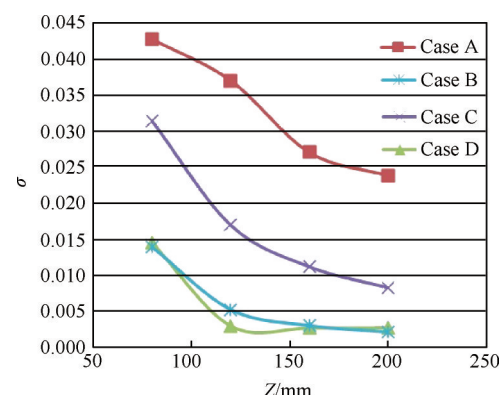


Fig. 5 Mixing result comparison of four injection strategies

从上述分析可以看出, Case C 和 Case D 两种方案均可以实现内燃波转子进气端口内混气较好的掺混,但针对涡轮机械来说,涡轮进口温度场分布并不是越均匀越好,要实现涡轮进口温度呈一定规律分布,必然要求相似的混气分布。图6给出了四种方案出口丙烷浓度分布的云图和等值线图,从图中可以看出, Case A 由于壁面射流穿透深度不够,燃料主要集中分布在进气端口外弧面附近, Case B 中燃料分布遍布整个截面,而由于喷孔位于通道中间位置,导致出口截面中间位置燃料浓度较高,其他两种方案由于喷孔数量增加,燃料在出口截面上近似均匀分布。一般情况下,要求涡轮进口温度呈中间高两端相对较低分布趋势,根据分析结果可知, Case B 可以

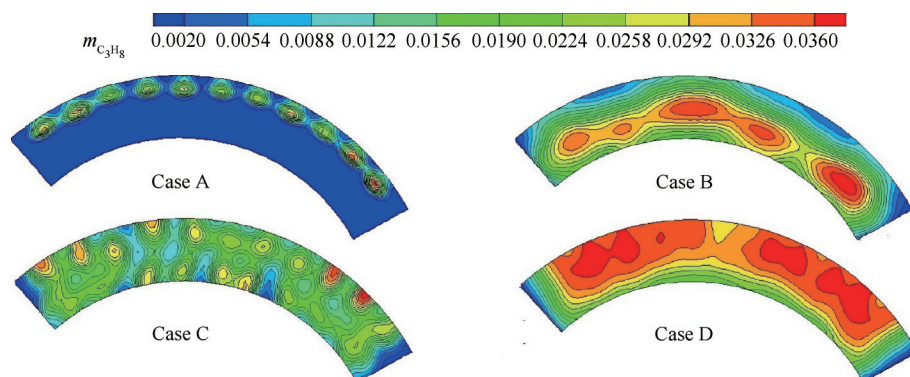


Fig. 6 Contour plots of fuel mass fraction

近似满足这种要求,图7中不同方案丙烷沿进口端口径向分布与典型涡轮进口温度分布曲线的对比可以更清楚地说明这一点,图中丙烷浓度 m_s 为用相应截面丙烷的平均浓度进行无量纲化结果,纵坐标 H 为用通道高度无量纲化之后的径向高度,由于Case A方案混气分布效果很差,直接淘汰,故图7中未参与比较。从图7可以看出,Case B浓度沿进气端口高度方向的分布与典型涡轮进口温度分布趋势十分相似,燃料浓度在无量纲通道高度 H 为0.6附近达到最大值,所以Case B被确定为所研究方案中最理想的选择,也正是因为这个原因,试验系统燃料喷注方案选择了单孔逆喷的形式。Case B外弧面浓度相对较高是因为喷孔的布置遵循了“等环面积”的原则,即喷孔两侧的圆弧面积相等。

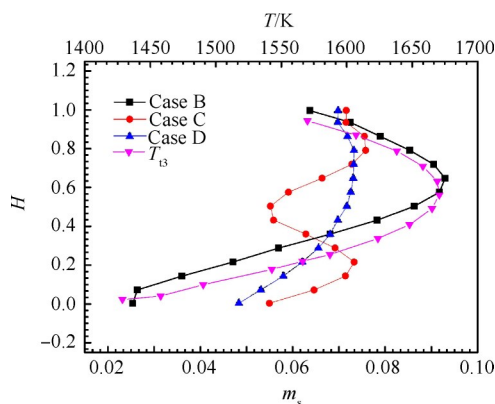


Fig. 7 Comparison of fuel distribution and turbine inlet temperature against radial height

为了更深入地了解内燃波转子燃料喷注方案对混气形成的影响,以确定的最优方案Case B为基础,在保证进气端口进出口条件不变的情况下,研究了不同供气压力对混气分布的影响,此时只考虑其掺混效果,而不考虑由供气压力改变所引起的燃料流量的变化。图8给出了改变供气压力条件下Case B不同截面上混气分布不均匀度的变化,从图中可以看

出,不管燃料进口压力如何变化,进气端口内混气分布不均匀度均沿通道轴向逐渐降低,其中供气压力为0.3MPa时,混气分布不均匀度达到最大值。这是因为,混气的掺混效果受到主流流动与喷孔射流的共同影响,供气压力较小时,主流流动特性的影响起主导作用,由于采用了逆喷的形式,随着供气压力的增加,喷孔射流速度增加,主流气流的流动影响逐渐削弱,导致混气掺混效果逐渐变差,而在供气压力大于0.3MPa时,喷孔射流逐渐主导混气掺混效果,且供气压力越高,湍流度越大,湍流掺混效果越好。

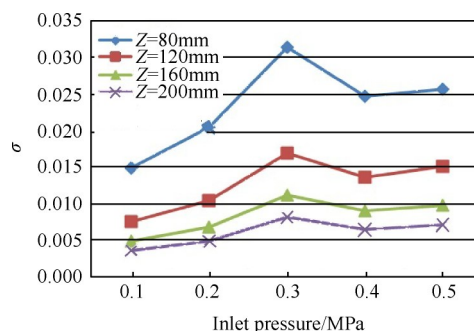


Fig. 8 Effects of injection pressure on fuel distribution

4 结 论

(1)提出了四种燃料喷注方案,定义了“混气分布不均匀度”的概念,通过数值模拟定性分析了四种喷注方案的优缺点,距进口边界150mm后,混气掺混效果趋于稳定。

(2)其中方案Case B所得到的内燃波转子进气端口出口截面上燃料的分布较符合典型涡轮进口温度的要求,燃料浓度在无量纲通道高度 H 为0.6附近达到最大值,确定为最佳方案。

(3)主流和喷孔射流共同影响混气的掺混效果,供气压力小于0.3MPa时,主流影响占主导地位,而供气压力大于0.3MPa时,混气的掺混效果受喷孔射流影响较大。

参考文献:

- [1] Elharis T M, Wijeyakulasuriya S D, Nalim M R, et al. Analysis of Deflagrative Combustion in a Wave-Rotor Constant-Volume Combustor[R]. *AIAA* 2011-583.
- [2] 巩二磊. 内燃波转子发动机非定常燃烧特性数值研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [3] Akbari P, Szpynda E. Recent Developments in Wave Rotor Combustion Technology and Future Perspectives: A Progress Review[R]. *AIAA* 2007-5055.
- [4] Akbari P, Nalim R. Analysis of Flow Processes in Detonative Wave Rotors and Pulse Detonation Engines[R]. *AIAA* 2006-1236.
- [5] Khalid S A, Banerjee A, Akbari P, et al. Two-Dimensional Numerical Modeling of Mixture Inflow in a Combustion Wave Rotor[R]. *AIAA* 2006-4125.
- [6] Nalim M R. Longitudinally Stratified Combustion in Wave Rotors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(6): 1060-1068.
- [7] Pekkan K, Nalim M R. Two-Dimensional Flow and NO_x Emissions in Deflagrative Internal Combustion Wave Rotor Configurations [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, 125(6): 720-733.
- [8] Wijeyakulasuriya S D, Nalim M R. Gas Injection Strategies in Confined Subsonic Cross-Flow for Wave Rotor Fueling[R]. *AIAA* 2008-4867.
- [9] Matsutomi Y, Meyer S E. Experimental Investigation on the Wave Rotor Constant Volume Combustor[R]. *AIAA* 2010-7043.
- [10] 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.
- [11] 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): 25-32.
- [12] 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): 352-356. (LIU Huo-xing, TAN Ling-ling, CHAN Shi-ning. Thermodynamic Analysis of Gas Turbine Engines Using Wave Rotor Combustion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(3): 352-356.)
- [13] 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研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1928-1933.
- [14] 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 Ben-lin, LI Jian-zhong, GONG Er-lei, et al. Impact of Internal Combustion Wave Rotor on Performance of Turboshift Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(5): 726-731.)
- [15] 成本林, 李建中, 温 泉, 等. 波转子对小型燃气涡轮发动机性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(4): 431-437.
- [16] 李建中, 巩二磊, 韩启祥, 等. 基于非定常燃烧具有增压功能的内燃波转子[P]. 中国专利: ZL2013200265272, 2013-05-21.

(编辑:梅 瑛)