

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.02.018

来流总温对液态煤油旋转爆震影响的数值模拟

王嘉瞳¹, 李夏飞², 秦琼瑶², 金武²

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 为了实现煤油/富氧空气旋转爆震燃烧室稳定工作并探索来流总温对流场及爆震燃烧特性的影响, 设计了一种液态煤油/富氧空气旋转爆震燃烧室结构, 采用欧拉-拉格朗日算法开展了旋转爆震燃烧室的冷热态数值模拟。结果表明, 随着来流总温的提升, 在温度及停留时间的共同作用下, 燃油雾化掺混效果并非是来流总温越高越好, 而是在 1 150 K 下最优, 燃油蒸发率达 99.2%, 掺混均匀度为 50.3%。来流总温超过 650 K 的条件下均可以实现稳定的旋转爆震工作模式。来流总温的变化对于爆震波的传播模态有着显著的影响, 来流总温越大, 越有利于液态煤油/富氧空气旋转爆震燃烧室内多波模态的形成。随着爆震波波头数目的增加, 单个波头的压力、波速及爆震波高度随之下降, 而整体爆震波的稳定性得到了明显的提升。

关键词: 煤油; 旋转爆震燃烧室; 雾化掺混; 爆震波稳定性

中图分类号: V231

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)02-0350-08

Numerical Simulation of Influence of Inlet Total Temperature on Rotational Detonation in Liquid Kerosene

WANG Jiatong¹, LI Xiafei², QIN Qiongyao², JIN Wu²

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to realize the stable operation of the kerosene/oxygen-enriched air rotating detonation combustion, the influence of total inlet temperature on the flowfield and combustion characteristics was explored. In this paper, a liquid kerosene/oxygen-enriched air rotating detonation combustor is designed. The non-reacting and reacting flowfield is simulated with the Euler-Lagrange algorithm. Results show that with the increase of the total inlet temperature, the fuel atomization and mixing effect shows a parabolic trend. At 1 150 K, the fuel evaporation rate is the highest (99.2%), and the blending uniformity is 50.3%. Under the condition that the total inlet temperature exceeds 650 K, a stable rotating detonation wave can be achieved. The total inlet temperature has a significant impact on the propagation mode of the detonation wave. The total inlet temperature is beneficial for the formation of the multi-wave mode of detonation. With the increase of the number of detonation wave, the pressure, wave velocity and detonation wave height of a single wave decrease, and the stability of the overall detonation wave is significantly improved.

Key words: kerosene; rotating detonation combustion; atomization and mixing; detonation wave stability

旋转爆震发动机 (Rotating detonation engine, RDE) 是一种爆震燃烧模式 (效率近似于等容燃烧) 的新型推进系统, 具有整体质量小、燃烧效率高、构型简单、熵增小等显著优势。RDE 主要采用

基金项目: 国家自然科学基金 (52276118)。

收稿日期: 2023-08-04; **修订日期:** 2023-11-24

通信作者: 金武, 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: wjin83@nuaa.edu.cn。

引用格式: 王嘉瞳, 李夏飞, 秦琼瑶, 等. 来流总温对液态煤油旋转爆震影响的数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(2): 350-357. WANG Jiatong, LI Xiafei, QIN Qiongyao, et al. Numerical simulation of influence of inlet total temperature on rotational detonation engine in liquid kerosene[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(2): 350-357.

环形燃烧室来进行旋转爆震的组织,其工作流程如图 1 所示:(1)新鲜混气流入环形旋转爆震燃烧室;(2)点火系统工作,起爆环形燃烧室;(3)稳定旋转爆震波的建立与工作;(4)燃烧产物膨胀并加速排出环形燃烧室,产生推力;(5)新鲜混气再次充填至环形燃烧室^[1-2],从而形成 RDE 的稳定工作。

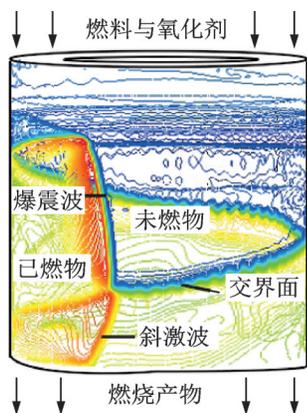


图 1 旋转爆震燃烧室工作模式图

Fig.1 Diagram of rotating detonation engine working mode

在 20 世纪 50 年代末,前苏联的拉夫连季耶夫流体力学院 Voitsekhovskii 等^[3-4]通过圆盘实验装置首次获得了旋转爆震波,并采用速度补偿拍摄技术成功捕捉并拍摄出稳定旋转爆震波的整体结构。此后各国学者均陆续开展了大量有关旋转爆震发动机的研究。通过大量的实验及数值模拟表明,均匀掺混的预混气是旋转爆震的最佳工作状态,但预混进气会导致旋转爆震燃烧室回火现象的产生,因此针对燃料氧化剂的雾化掺混特性研究显得尤为重要。Bykovskii 等^[5-7]针对煤油/氧气提出了环缝周向小孔的进气雾化掺混段方案。Wolański 等^[8-9]针对 Jet-A 液态燃料提出了高温气预蒸发处理的旋转爆震燃烧室方案,发现燃油蒸发效果越优,越有利于旋转爆震波的形成。郑权等^[10-11]采用离心喷嘴的环形阵列方式,进行了汽油/富氧组合的旋转爆震实验。在数值模拟方面,马虎等^[12]针对非预混喷注下的氢气/空气的混合过程进行了研究分析。郑榆山等^[13]针对径向进气构型结构的爆震燃烧室开展了氢气/空气旋转爆震流场的燃料掺混特性数值模拟。岳松辰等^[14]针对氢气喷注深度、空气来流环缝高度及空气来流质量流率 3 种因素对燃烧室内冷态流场及掺混特性的影响,开展了非预混喷注模式下旋转爆震燃烧室内冷态流场分布特性的研究。

现阶段大多数对于旋转爆震发动机的研究主要针对气态燃料,对于具有高能量密度的液态燃料(尤其是航空煤油)的研究较少。相较于气态燃料,

液态航空煤油更佳适用于工程领域。在不同的飞行高度下,来流总温存在明显的不同,同时来流总温决定液态燃料的蒸发掺混,是液态煤油/富氧空气旋转爆震燃烧室的关键影响参数。因此,本文提出一种液态煤油/富氧空气的旋转爆震燃烧室,通过欧拉-拉格朗日相结合的数值模拟方式开展此结构下不同来流总温对液态煤油的雾化掺混特性及旋转爆震燃烧特性的影响分析。

1 数值模拟方法

1.1 计算模型

对于液态燃料的非预混喷注的旋转爆震燃烧室而言,爆震波前来流为充分掺混雾化的新鲜混气是最佳的工作工况。针对此类状态,进行了旋转爆震燃烧室方案设计,总体规划如图 2 所示。包括燃油雾化掺混段、旋转爆震燃烧室及尾喷管 3 部分构成。旋转爆震燃烧室外径尺寸为 220 mm;燃油雾化掺混段高度为 25 mm。图中 4 个红点分别为沿径向的燃油喷注位置,燃油均是垂直于壁面进行喷出,沿周向均匀分布了 60 个 0.75 mm 的喷油小孔进行喷射。

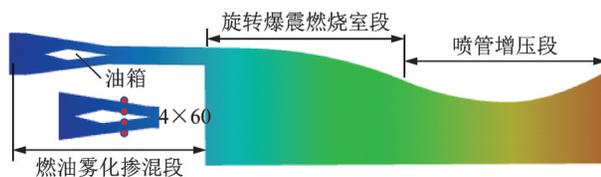


图 2 液态煤油/富氧空气旋转爆震燃烧室构型

Fig.2 Configuration of rotating detonation combustor with liquid kerosene/oxygen-enriched air

1.2 求解方法及边界条件

富氧空气采用理想气体,控制方程为三维 N-S (Navier-Stokes) 控制方程,湍流模型采用 k- ω SST 湍流模型,压力修正采用 Couple 算法,压力以及其他项均采用二阶迎风插格式^[15-17]。燃料采取航空煤油($C_{12}H_{23}$),氧化剂则采用氧气质量分数为 35% 的高温来流富氧空气。与对应实验要求相匹配,富氧空气喷注选取质量流量进口为边界条件,进口流量为 5.5 kg/s。燃油则通过拉格朗日模型进行喷注,喷嘴采用平口雾化喷嘴,燃油的喷注温度为 300 K,整体喷注当量比为 0.8;其余壁面均采用无滑移 Wall 边界条件。燃烧室出口选取压力出口作为边界条件,当燃烧室的出口外边界流动速度达到超声速时,则出口所有变量均需由外部边界上的物理量反推。当流速为亚声速时,所有出口变量则由内部区域网格点外插得出。

1.3 网格无关性验证

爆震波胞格结构的捕捉需要极为精细的网格结构,而本文研究的主要目的在于燃油雾化掺混特性及爆震波的传播过程,因此需合理地选择网格的尺度大小,在保证计算准确率的同时需避免较高的计算资源浪费。选取了2.0 mm(Grid-1)、1.0 mm(Grid-2)及0.5 mm(Grid-3)3组网格尺寸开展网格无关性验证,结果表明,1.0 mm及0.5 mm可形成相同形态稳定传播的旋转爆震波,这与Bykovskii等^[5-7]实验拍摄到的旋转爆震波典型分布特性相同,如图3所示。此外1.0 mm下测得的爆震波波速与0.5 mm仅相差5%。在综合考虑计算结果与计算量的条件下,选择1.0 mm作为后续数值模拟的网格尺度。网格总数约为800万个。

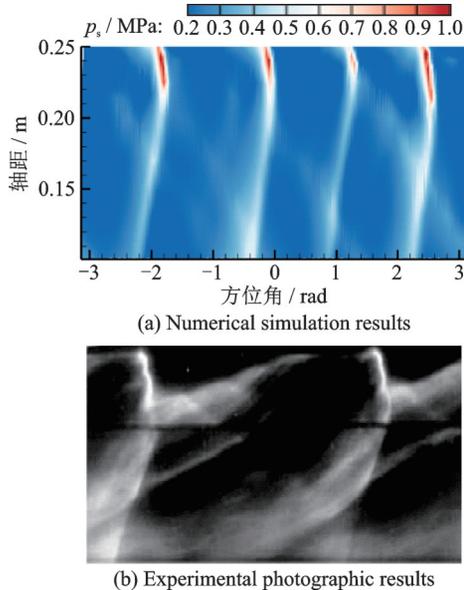


图3 网格无关性验证

Fig.3 Grid independence verification

1.4 表征参数

为了更好地表征非预混喷注下的燃油雾化掺混特性,引入诸多学者中一种常用的表征燃料氧化剂掺混质量好坏及燃料蒸发好坏的两组参数:掺混均匀度(q)及蒸发率(x)^[18]。

$$q = 1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \varphi)^2}{n-1}}}{\varphi} \quad (1)$$

$$x = \frac{m_g}{m_{\text{all}}} \quad (2)$$

式中: n 表示截面网格数, φ_i 为取样点处燃料的质量分数, φ 为所有取样点处混合燃料的质量分数平均数, m_g 表示流通截面的气态燃料质量流量, m_{all} 表

示喷入燃料总质量流量。 q 越大表示混合越均匀, x 越大,表征燃油雾化效果越好。

在热态条件下,采用爆震波传播频率、压力、爆震波高度及波速4组参数来表征旋转爆震燃烧室的爆震波特性,其计算公式为

$$F = \frac{1}{\Delta T} \quad (3)$$

式中: F 为爆震波的传播频率, ΔT 为相邻两股旋转爆震波时间差。

2 结果与讨论

2.1 旋转爆震燃烧室燃油雾化及冷态流场特性对比

图4为不同来流总温下旋转燃烧室入口处的燃料蒸发率及组分分布均匀度,可以看到,随着来流总温的不断提升,燃烧室入口处的燃油蒸发率及掺混均匀度整体不断加强,并呈现出抛物线的趋势。在来流总温850 K以下,燃油的蒸发率及掺混均匀度提升较大,而在来流总温超过850 K的条件下,燃油蒸发率及掺混均匀度相差不大,但燃油的雾化掺混效果于1 150 K的来流总温条件下最优,燃油蒸发率达99.2%,掺混均匀度达50.3%。理论上而言,温度越高,越有利于燃油的雾化蒸发,但本文得到的结果与此结论存在一定的出入,为了探索造成此结果的原因,接下来提取了不同来流总温下的子午面冷态流场图,进行进一步分析。

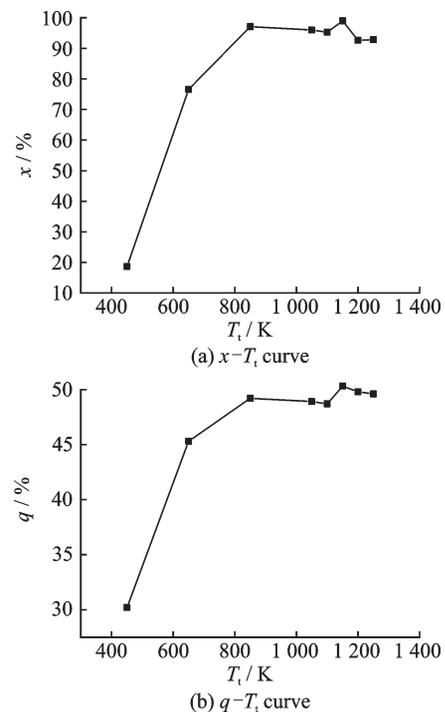


图4 冷态条件下燃烧室入口截面蒸发率及掺混均匀度
Fig.4 Comparison of evaporation rate and mixture uniformity at the combustor inlet section under cold conditions

提取了不同来流总温下旋转爆震燃烧室冷态流场,数值模拟结果得出子午面的流场分布特性如图 5 所示。在无燃烧的冷态流场内,可以看到不同来流总温下整体流场图大致相同,来流富氧空气经过压力回传抑制段开始加速同时在喉道部位达到声速而后膨胀至超声速流入燃油雾化掺混段。气流在进入燃烧室前继续保持超声速的流动状态。在经历了燃烧室的突扩段后,气流膨胀降速增压,并在燃烧室入口处形成一道斜激波(同样可以起到抑制压力回传作用)。在燃烧室内由于外壁面的高速气流与内壁面低速气流区存在速度差异,燃烧室头部沿内壁面形成了低速回流区,有利于燃烧室的点火起爆。不同的来流总温导致流场最大的不同在于雾化掺混段内及整体的流动速度,来流总温的提升导致进口富氧空气自身可压缩性加强,燃烧室入口段动量较大,在 450 K 的工况下燃烧室进口平均速度为 390 m/s 左右,当进口总温提升至 1 250 K 时,燃烧室进口平均速度已增加至 641.2 m/s。随着入口流速的增加,将会导致燃油粒子在相同距离的雾化掺混段内的停留时间大幅下降,对于燃料的雾化掺混效果而言则产生了不利的影 响。因此,燃

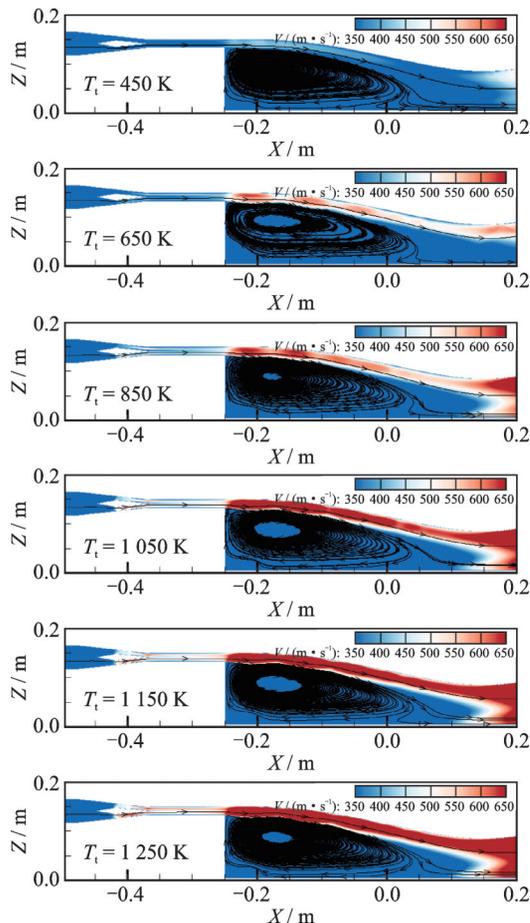


图 5 不同来流总温下燃烧室冷态流场对比图

Fig.5 Comparison of combustor cold flow fields under different total inlet temperatures

油的雾化蒸发效果并非随着来流总温的提升而呈现出单纯的增加趋势,而是在初期总温增加过程中呈现出抛物线的增加变化趋势,随着来流总温的进一步增加,在温度及停留时间的共同作用下,燃油雾化掺混效果则存在一个最佳范围,本文来流总温 1 150 K 下燃油雾化掺混特性最优。

2.2 液态燃料下旋转爆震波特性

本文的热态计算均是初始通过稳态模拟进行稳定冷态流场计算,待冷态流场稳定后通过赋予高温高压单向传播初值域进行点火起爆。因此,随着燃烧时间的不断递进,进出口的质量流量比值最终稳定在 1 左右波动。后续性能的对比如均趋于稳定后的结果来进行。

图 6 为爆震波稳定后旋转爆震燃烧室外壁压力温度分布云图。为了进一步观察旋转爆震燃烧室流场特性,将三维 $R=100$ mm 外壁温度流场切片展开,形成了如图 6 所示的矩形温度流场图。旋转爆震环形燃烧室达到了稳定的工作妆容,流场内可以观察到经典的旋转爆震波波峰分布图:爆震波(1),缓燃波(2),接触间断面(3),斜激波(4)。由于液态燃料喷注及非预混喷注的初始条件,因此形成了图内存在波动的缓燃波封面。可以看到设计的结构很好地抑制爆震波回传,同时还可满足反应物填充与爆震波稳定传播时间上的协同。此外,喷管也可完成对燃烧产物的增压效果。在此结构基础上开展了燃油雾化掺混特性的研究。

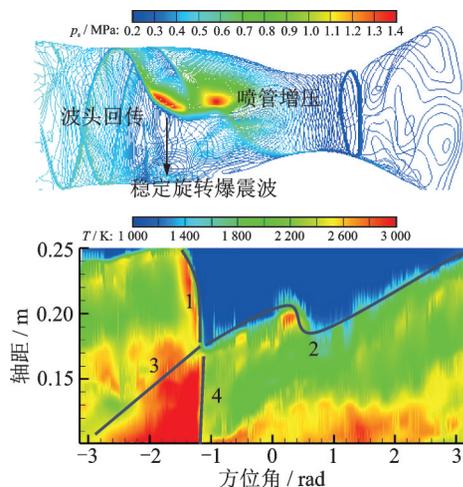


图 6 旋转爆震燃烧室外壁压力温度分布云图

Fig.6 Cloud map of outer wall pressure and temperature distribution in rotating detonation combustor

2.3 不同来流总温下旋转爆震燃烧室爆震特性对比

保持预混进气的当量比为 0.8 及来流质量流量 6.3 kg/s 不变,计算了来流总温 450、650、850、

1 050、1 100、1 150、1 200及1 250 K 8组工况,用于研究液态非预混条件下不同来流总温对于旋转爆震波爆震特性的影响。表1为不同来流总温下旋转爆震波的爆震特性。结果表明,在来流总温450 K的工况下旋转爆震燃烧室内无法形成稳定的旋转爆震波。其他7组工况下旋转爆震环形燃烧室均形成了稳定的工作模式,但旋转爆震波的工作特性呈现明显的不同。初始时仅仅捕捉了爆震波压力及爆震波传播频率两组参数进行对比,结果发现,650、850及1 050 K 3组工况的爆震波压力及传播频率相差不大,当总温提升至1 100 K及以上时,爆震波压力产生了明显的下降趋势,降低至

1 MPa以下,而爆震波传播频率则发生了明显的呈倍数级的提升,为此在后续提取了其压力及组分分布云图进行爆震波波头数目的甄别,发现频率的大幅提升则是由于爆震波波头数目的提升。650、850及1 050 K工况下爆震波均以单波形式稳定传播,1 100、1 150、1 200及1 250 K呈现出多波模式。此处爆震波传播速度的定义则为相同波头的传播速度,并非是相邻波头的传播速度,因此尽管其有一定的降低,但并非出现了如传播频率那样相差量级。为了更好地对比上述结果,接下来将其进行分类对比,即单波及多波模式下的爆震特性进行单独对比,进行进一步的探讨。

表1 不同来流总温下旋转爆震波爆震特性对比

Table 1 Comparison of rotating detonation wave detonation characteristics at different total inlet temperatures

T_i/K	450	650	850	1 050	1 100	1 150	1 200	1 250
p_{det}/MPa	F	1.45	1.41	1.36	0.92	0.96	0.91	0.74
F/Hz	F	1 979.1	1 967.73	1 963.59	5 335	7 081	5 164	9 630
$V_{det}/(m \cdot s^{-1})$	F	1 864.3	1 853.6	1 849.7	1 653	1 667	1 600	1 512
Num_{det}	F	1	1	1	3-4	4	3	6

图7为来流总温650、850及1 050 K下单波模式旋转爆震波压力及组分分布云图对比。可以看到,3组工况下爆震波均为单波模式进行传播。随着来流总温的提升,产生的爆震波能量及爆震波高度相差不大,爆震波压力处于1.4 MPa左右;爆震波高度70 mm;爆震波波速为1 800 m/s左右。3组工况下最大的不同在于爆震波与新鲜混气进入点的间距差(即图中所示的 ΔX)。随着来流总温的不断提升, ΔX 存在着明显的下降趋势,从650 K下90 mm下降至1 050 K的25 mm。由上述分析可知,旋转爆震燃烧室进口速度随着总温的增加而提升,因此会进一步缩短此距离。在1 050 K总温继续提升时,爆震波模式整体发展为多波模式,后续多波模式的产生则是由于此处 ΔX 降低,当 ΔX 降低至0时,单波模式则会引发新的波头,从而爆震燃烧室内则会形成新的稳定的多波模式波系结构。

图8为来流总温1 100、1 150及1 250 K下多波模式旋转爆震波压力及组分分布云图对比。可以观察到,随着来流总温的增加, ΔX 同样是降低的趋势,整体的爆震波波头数在不断增加,由1 100 K时不稳定3、4波头转换逐渐增长至1 250 K时稳定6波头。且随着波头数目的不断增加,爆震波的单波头压力峰值也在逐步降低,由1 100 K时0.92 MPa降低至1 250 K时0.74 MPa;单波的传播速度由1 100 K时1 653 m/s降低至1 250 K时1 512 m/s;

爆震波高度也由1 100 K时30 mm降低至1 250 K时20 mm;但爆震波面压力及高度的分布却更加均匀。此外,相较于图7单波模式结果,上述3项数值下降的幅值更为剧烈,归根结底则是由于爆震波波头数目的增加导致单波下的新鲜混气降低,从而形成的单个爆震波能量降低,随着波头数目的增加,下降的梯度更大。

图9为来流总温650、850、1 050、1 100、1 150及1 250 K时旋转爆震发动机推力特性对比。可以看到,随着来流总温的提升,在650~1 100 K区间推力提升幅度较大,而在1 100~1 250 K区间内略有提升。原因是由上述模式特性分析已知,650~1 100 K区间内旋转爆震来流反应区在不断提升,来流总温增加液滴蒸发效果增加,燃烧效率提升,则推力提升效果明显。在1 100~1 250 K区间,由于总温提升到一定值后液滴均已完全蒸发,燃烧效率提升不大,仅靠来流总温自身温度部分转换为动能作为推力的提升,因此在此区间内推力提升幅度较低,最终形成了如图9所示的推力性能变换特性。

通过以上结果及分析可以发现,进口总温的提升,其一会增加爆震波波前液态燃料的蒸发掺混均匀度;其二提升爆震波波前反应物的初始温度;其三提高了旋转爆震燃烧室进口燃料的进气动量,由此会对爆震波产生3方面的影响。波前较优的雾化掺混新鲜来流混气将会导致爆震反应过程更快

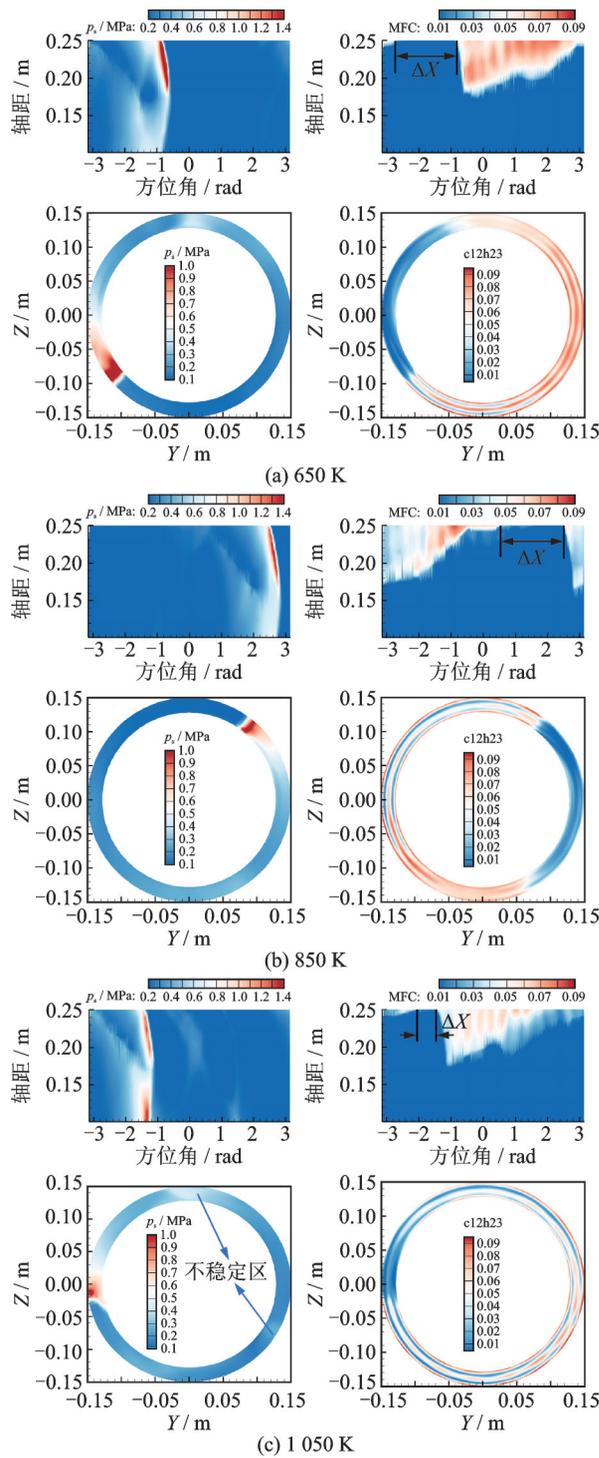


图7 来流总温 650、850 及 1 050 K 下单波模态旋转爆震波分布云图

Fig.7 Cloud maps of single-wave mode rotating detonation wave distribution at inlet total temperatures of 650, 850 and 1 050 K

进行,较低的反应区域(即爆震波高度)即可完成,且更易诱发局部热点;波前反应物初始温度的增加会使得爆震过程内保持热中性的诱导反应速率加快,爆震燃烧反应更加容易进行,对于爆震波高度的降低更为有利。此外波前反应物初始温度的增加会使得爆震波后反应物的压力峰值降低,在相同时间内反应物进入燃烧室内的区域增加,有利于爆

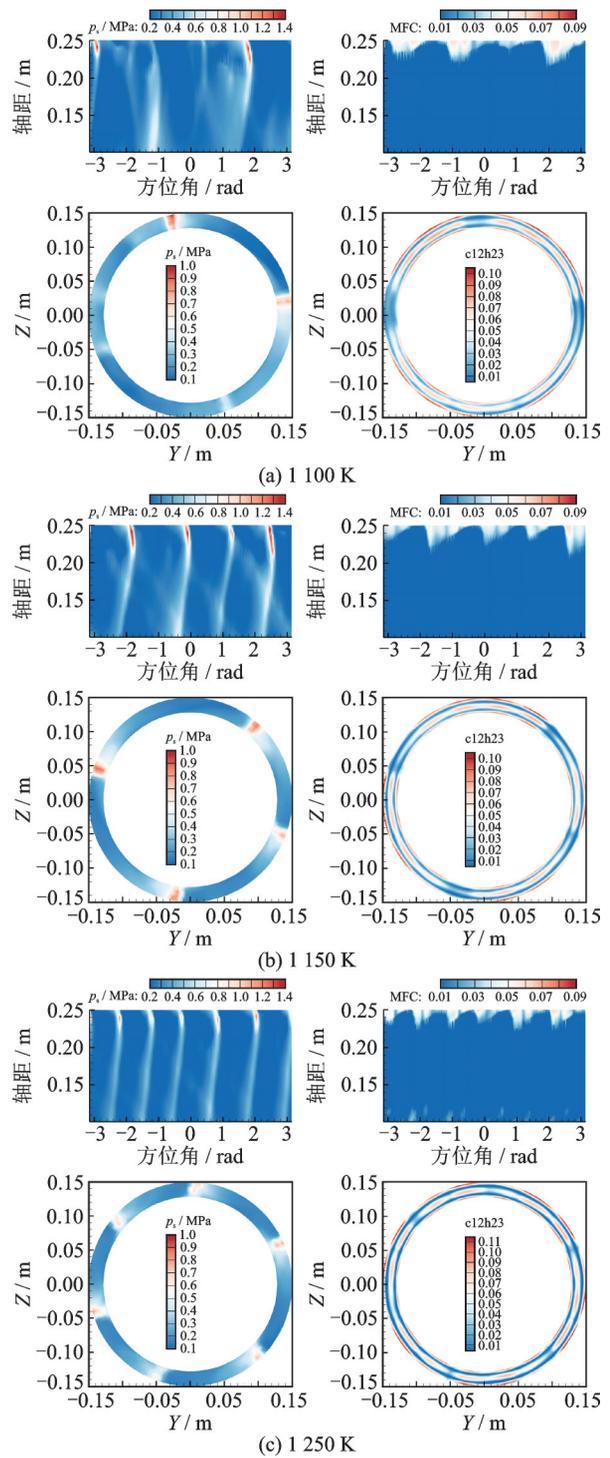


图8 来流总温 1 100、1 150 及 1 250 K 下多波模态旋转爆震波分布云图

Fig.8 Cloud maps of multi-wave mode rotating detonation wave distribution at inlet total temperatures of 1 100, 1 150 and 1 250 K

震波波头数目的增加;旋转燃烧室入口段动量的增加,在相同的燃烧室构型下,反应物会更早地进入燃烧室,有利于旋转爆震波波头数目的增加。波头数目的增加随之会导致单个波头下反应物的质量下降,因此出现了单个波头的压力及波速降低,且爆震波高度随之下降。在上述 3 方面因素的影响下,导致来流总温的变化对于爆震波的传播模态有

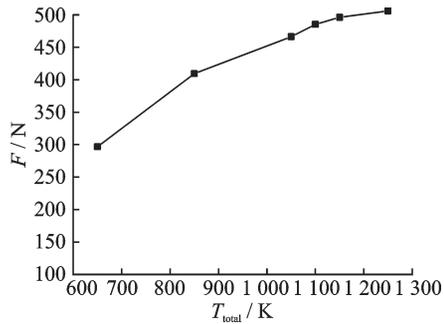


图9 不同来流总温下旋转爆震发动机推力

Fig.9 Thrust of rotating detonation engine at different total inlet temperatures

着显著的影响,来流总温越大,越有利于液态煤油/富氧空气旋转爆震燃烧室内多波模态的形成。

3 结 论

(1)设计的煤油旋转爆震燃烧室来流总温650 K及以上,含氧量35%,在当量比0.8非预混喷注条件下可实现稳定的旋转爆震波工作模式,单波模态下爆震波压力达1.4 MPa左右,爆震波波速可达1 860 m/s。

(2)随着来流总温的进一步增加,在温度及停留时间的共同作用下,燃油雾化掺混效果并非是来流总温越高越好,则是存在一个最佳值,在1 150 K下效果最佳,蒸发率达99.2%。

(3)液态煤油/富氧空气旋转爆震燃烧室内来流总温的变化对于爆震波的传播模态有着显著的影响,来流总温越大,爆震波波前液态燃料的蒸发掺混均匀度、反应物初始温度及燃烧室进气动量越高,越有利于液态煤油/富氧空气旋转爆震燃烧室内多波模态的形成。

(4)随着爆震波波头数目的增加,单个波头的压力、波速及爆震波高度随之下降,但整体爆震波的稳定性得到了明显的提升。

参考文献:

[1] 王宇辉,何修杰. 旋转爆震发动机的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(3): 325-339.
WANG Yuhui, HE Xiujie. Advances in rotating detonation engine research[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(3): 325-339.

[2] 谢峤峰,王兵,董琨. 基于连续旋转爆震的推进技术研究进展[J]. 气体物理,2020,5(1): 1-23.
XIE Qiaofeng, WANG Bing, DONG Kun. Progress in research of rotating detonation propulsion[J]. Physics of Gases, 2020, 5(1): 1-23.

[3] WOLANSKI P. Detonative propulsion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(1): 125-158.

[4] VOITSEKHOVSKII B V, MITROFANOV V V, TOPCHIAN M E. Investigation of the structure of detonation waves in gases[J]. Symposium (International) on Combustion, 1968, 12(1): 829-837.

[5] BYKOVSKII F A, VEDERNIKOV E F, POLOZOV S V, et al. Initiation of detonation in flows of fuel-air mixtures[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2007, 43(3): 345-354.

[6] BYKOVSKII F A, ZHDAN S A, VEDERNIKOV E F. Continuous spin detonation of a heterogeneous kerosene-air mixture with addition of hydrogen[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2016, 52(3): 370-372.

[7] BYKOVSKII F A, ZHDAN S A, VEDERNIKOV E F. Continuous detonation of the liquid kerosene-air mixture with addition of hydrogen or syngas[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2019, 55(5): 589-598.

[8] WOLAŃSKI P, BALICKI W, PERKOWSKI W, et al. Experimental research of liquid-fueled continuously rotating detonation chamber[J]. Shock Waves, 2021, 31(7): 807-812.

[9] WOLAŃSKI P. RDE research and development in Poland[J]. Shock Waves, 2021, 31(7): 623-636.

[10] 郑权,翁春生,白桥栋. 倾斜环缝喷孔式连续旋转爆震发动机试验[J]. 推进技术,2014,35(4): 570-576.
ZHENG Quan, WENG Chunsheng, BAI Qiaodong. Experiment on continuous rotating detonation engine with tilt slot injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(4): 570-576.

[11] 郑权,李宝星,翁春生,等. 双波对撞模态下的液态燃料旋转爆震发动机推力测试研究[J]. 兵工学报,2017(4): 58-68.
ZHENG Quan, LI Baoxing, WENG Chunsheng, et al. Thrust measurement of liquid-fueled rotating detonation engine under two-wave collision mode[J]. Acta Armamentar, 2017(4): 58-68.

[12] 马虎,武晓松. 分开喷注方式下旋转爆震发动机三维数值模拟[J]. 燃烧科学与技术,2016,22(1): 13-18.
MA Hu, WU Xiaosong. Three-dimensional numerical simulation of rotating detonation engine with separate injection[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(1): 13-18.

[13] 郑榆山,王超,王宇辉,等. 旋转爆震三维非预混混合特性及流场结构研究[J]. 推进技术,2019,40(2): 407-415.

- ZHENG Yushan, WANG Chao, WANG Yuhui, et al. Numerical study of mixing and flow field characteristics on a three-dimensional non-premixed rotating detonation[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(2): 407-415.
- [14] 岳松辰, 王强, 胡晟荣, 等. 基于混合燃料的旋转爆震发动机燃烧室冷态流场研究[J]. *固体火箭技术*, 2021, 44(5): 589-597.
- YUE Songchen, WANG Qiang, HU Shengrong, et al. Research on cold flow field of the combustor of rotating detonation engine based on blended fuels[J]. *Journal of Rocket Technology*, 2021, 44(5): 589-597.
- [15] 郑艳. 气助雾化喷嘴结构对煤油雾化影响的 CFD 研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- ZHENG Yan. CFD research on the effects of air-assisted atomizer structure on kerosene atomization[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [16] DAVIDENKO D M, EUDE Y, GOKALP I. Theoretical and numerical studies on continuous detonation wave engines: AIAA 2011-2334[R]. [S.l.]: AIAA, 2011.
- [17] HAYASHI A K, TSUBOI N, DZIEMINSKA E. Numerical study on JP-10/air detonation and rotating detonation engine[J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(12): 5078-5094.
- [18] SOSA J, BURKE R, AHMED K A, et al. Experimental evidence of H_2/O_2 propellants powered rotating detonation waves[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 214: 136-138.

(编辑:夏道家)