

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.04.006

## 推进剂当量比对 RDC 出口流动特性的影响

闫 畅, 韩启祥

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

**摘要:** 为了研究不同当量比下燃烧室出口压力和温度等特性, 利用多孔喷注的旋转爆震燃烧室模型, 以乙炔为燃料, 空气为氧化剂, 对压力和温度分布均匀性、增压比以及喷射压力比等指标进行了分析。研究表明, 保持质量流率不变, 随着当量比的增大, 燃烧室内燃烧工况从贫燃逐渐变为富燃, 出口压力及温度的均匀性会先变好后变差, 增压比先增大后减小。当量比为 1 时, 燃烧室内为双波传播状态, 出口压力和温度均匀性最好, 此时 CV 值最小为 0.57, 1-CU 值最小为 0.52, 畸变指数最小为 2.936, OTDF 值最小为 0.36, 增压比最大为 1.13, 但当量比对燃烧室增压比的提升效果有限。

**关键词:** 旋转爆震燃烧室; 传播模式; 出口均匀性; 增压特性

**中图分类号:** V231.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)04-0614-08

## Effect of Propellant Equivalent Ratios on RDC Outlet Flow Characteristics

YAN Chang, HAN Qixiang

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

**Abstract:** In order to study the characteristics of the combustion chamber outlet pressure and temperature at different equivalence ratios, adopting the rotating detonation combustor (RDC) model with multi-hole injection, acetylene as the fuel and air as the oxidizer, pressure and temperature distribution uniformity, pressure ratio, injection pressure ratio and so on are analyzed. The results show that keeping the mass flow rate constant, with the increase of the equivalent ratio, the combustion conditions of RDC gradually change from lean fuel to rich fuel, the uniformity of outlet pressure and temperature will first become better and then worse, and the pressure ratio first increases and then decreases. When the equivalent ratio value is 1, the combustion chamber is a double-wave propagation mode. And uniformity of the outlet pressure and temperature is the best, the minimum CV and 1-CU value is 0.57 and 0.52, the minimum distortion coefficient and OTDF value is 2.936 and 0.36, and the maximum pressure ratio value is 1.13. However, the equivalent ratio has a limited effect on the pressure ratio enhancement.

**Key words:** rotating detonation combustor (RDC); propagation mode; outlet uniformity; pressure-gain performance

爆震燃烧接近等容燃烧, 是一种激波与火焰耦合并以超声速传播的燃烧模式, 可以在减小熵增的同时提高总压。旋转爆震发动机作为一种高性能的动力装置逐渐进入大众视野。在旋转爆震燃烧室 (Rotating detonation combustor, RDC) 内, 只需起爆一次, 爆震波的持续旋转可连续产生推力。将

RDC 与涡轮组合可减少压气机和涡轮级数, 简化发动机结构, 高比冲的推进性能和涡轮转子做功也使其极具竞争力。但两者结合在具备优势的同时也面临着很多问题。RDC 出口的非定常、非均匀流动与下游涡轮的匹配, 不稳定的流动特性会导致涡轮转速不稳定, 在降低效率的同时, 还有可能使

**收稿日期:** 2022-11-10; **修订日期:** 2023-03-22

**通信作者:** 韩启祥, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hqx205@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 闫畅, 韩启祥. 推进剂当量比对 RDC 出口流动特性的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(4): 614-621. YAN Chang, HAN Qixiang. Effect of propellant equivalent ratios on RDC outlet flow characteristics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 614-621.

涡轮负载不平衡,从而引发强度不足等问题。因此,需要对RDC出口的流动特性进行研究,减少上述问题的发生。

在燃烧室几何尺寸不变的条件下,RDC出口流动特性与来流工况(如质量流率、当量比等)、旋转爆震波(Rotating detonation wave, RDW)传播模式等因素有关。Bykovskii等<sup>[1-3]</sup>利用不同燃料(如丙酮、煤油)、不同的流量及当量比,在不同尺寸的燃烧室内开展实验,实现了连续爆震。爆震波的传播特性对燃烧室出口流场有决定性影响。不同的来流参数会使RDW具有不同的传播模式,而不同的传播模式与燃烧室内的燃烧不稳定性有密切联系。当RDW与燃料喷注过程相互作用时,RDC内的流场更加复杂,从而使得出口流场也变得更加复杂。Suchocki等<sup>[4]</sup>利用H<sub>2</sub>和富氧空气开展了旋转爆震实验,发现在当量比一定时,随着空气质量流量的增加,爆震波传播模式的演变过程为稳定单波-不稳定混合单/双波-稳定双波。刘世杰等<sup>[5-6]</sup>通过数值模拟及实验,对连续旋转爆震燃烧室中不同传播模式下的流场结构及爆震波传播过程做了系统研究,获得了不同流量及当量比下爆震波的传播模式。王超等<sup>[7]</sup>通过实验在保持空气流量不变的条件下,改变H<sub>2</sub>/空气当量比,得到了3种爆震波传播模式,并对其特性进行了分析。孙健<sup>[8]</sup>通过数值模拟,分析了燃烧室物理构型以及不同的工况条件对旋转爆震波传播模式的影响。此外,李帅<sup>[9]</sup>开展了不同条件下的旋转爆震燃烧室出口流场的不均匀性数值研究,对燃烧室出口流场特性进行了分析。马元等<sup>[10]</sup>采用离散相模型对恰当量比空气-辛烷反应物的两相旋转爆震波进行了二维数值研究,建立了RDC出口总压、总温均匀性评价指标,分析了空气喷注总温和燃料喷注均匀性对非预混、非均匀喷注条件下旋转爆震波出口流场均匀性的影响。

目前,大量文献都集中于研究RDW的流场及特性,而针对燃烧室进口(集气腔)、爆震波、燃烧室出口流场特性三者之间关联性的研究甚少。本文将针对不同当量比条件下燃烧室进口(集气腔)、爆震波、燃烧室出口流场之间的关系进行研究。此外,大多数二维旋转爆震燃烧室模型为矩形计算域,并通过UDF来控制进口,从而达到模拟拉瓦尔喷孔的目的,但是该模型无法模拟出喷注条件改变,爆震波传播模式也发生改变的<sup>[11]</sup>,所以具有一定的局限性。因此,本文采用多孔喷注二维模型,以乙炔为燃料,空气为氧化剂,开展不同工况下旋转爆震波流场的数值研究,分析当量比对燃烧室出口流动特性的影响。

## 1 物理模型及数值方法

### 1.1 物理模型

本文采用带喷孔的二维旋转爆震燃烧室模型如图1所示,燃烧室周向长度为300 mm,轴向长度为100 mm,其中预混气集气腔高度为20 mm,喷孔结构高度为10 mm,宽度为2 mm,孔数为50。通过设置喷孔,不但可以模拟出旋转爆震流场结构,也可以对旋转爆震波与燃料喷注过程的相互作用进行研究,类似的结构在文献<sup>[12-13]</sup>使用过。此外,在计算过程中将预混气集气腔及喷孔设置为非反应区。在实际的旋转爆震实验中,燃料与氧化剂是分开喷注的,混合和燃烧均在燃烧室中进行,因此非反应区的设置存在一定的合理性,且在文献<sup>[14-15]</sup>中也采用过类似的设置。

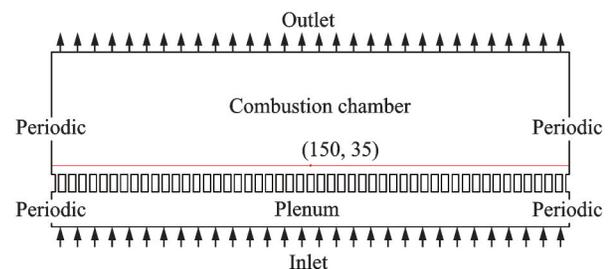


图1 多孔喷注旋转爆震燃烧室模型  
Fig.1 Multi-hole injection RDC model

### 1.2 数值方法

通过Fluent开展模拟研究,基于密度基求解器,求解非稳态欧拉控制方程;无黏矢量通量设置为Roe-FDS格式;空间对流项离散化先采用二阶迎风格式进行离散,待稳定后采用三阶MUSCL格式;时间离散项采用二阶隐式格式;忽略热传导、黏性和扩散等输运效应。采用单步化学反应机理,反应速率常数由Arrhenius公式计算

$$k_{i,r} = A_r T^{b_r} \exp(-E_r/RT) \quad (1)$$

式中: $k_{i,r}$ 为反应速率常数, $A_r$ 为指前因子, $R$ 为通用气体常数, $T$ 为绝对温度, $E_r$ 为活化能, $b_r$ 为温度指数;其数值见表1。

表1 Arrhenius公式中的常数

Table 1 Constants in Arrhenius formula			
$A_r$	$b_r$	$E_r/(J \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1})$	$R/(J \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1})$
3.655e10	0	1.256e8	8.314

### 1.3 边界条件与研究工况

采用质量流率入口条件,工质为乙炔/空气预混气,通过改变当量比从而模拟出不同条件下旋转爆震燃烧室流场变化。燃烧室出口边界分为两种情况:当气体速度为超声速时,上游流场不会受到下游流场的影响,出口边界上的所有变量通过流场内部外推可以获得;当气体速度为亚声速时,压力

为给定的反压,其余变量由流场内部外推获得。左右边界为周期性边界,可以交换数据,以此来维持爆震波的连续旋转传播。

模拟初场设置如图2所示,非反应区中填充恰当量比的乙炔/空气预混气,为了快速形成单向传播的爆震波,反应区中设置了长为200 mm,宽为20 mm的预混气填充区域,并在起始位置设置了10 mm的正方形高温高压点火区域,点火区域压力为2 MPa,温度为2 000 K,并给定初始速度2 000 m/s( $x$ 轴正向),有利于单向爆震波的形成。

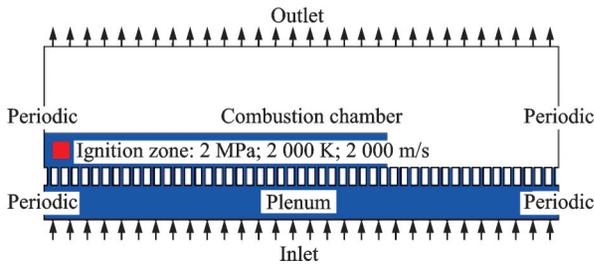


图2 初场设置示意图

Fig.2 Initial field setting

保持质量流率不变,改变预混气当量比,通过二维数值模拟开展乙炔/空气预混气旋转爆震传播特性研究,并分析推进剂当量比对RDC出口流场特性的影响,计算工况如表2所示。

表2 计算工况

Table 2 Simulated conditions				
工况	当量比	质量流率/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	乙炔质量 分数	氧气质量 分数
1	0.7	50	0.05	0.220
2	1.0	50	0.07	0.216
3	1.3	50	0.09	0.211
4	1.5	50	0.10	0.209

1.4 数值及网格无关性验证

首先采用矩形燃烧室模型进行数值验证,工况条件为当量比为1的乙炔/空气预混气、进口质量流量为50  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$  (二维模型 $Z$ 方向长度被假定为1 m,因此质量流率的单位为 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ )、总温300 K以及出口背压为0.1 MPa。

爆震波稳定传播时,温度云图如图3(a)所示,图3(b)为Bykovskii实验<sup>[3]</sup>结果,虽然两者的爆震波个数不同,但可以发现两者的流场结构相似。其中A为横向传播的爆震波;B为斜激波;C为前后两个循环的爆震产物形成的接触断面,即滑移线;D为阻塞断面;E为新鲜预混气。故本文的计算方法可以模拟出爆震波的流场结构。

采用与图3(a)相同的数值方法以及相同的工况条件,对多孔喷注的燃烧室模型进行模拟验证,温度云图如图4所示。通过对图3(a)和图4(a)的

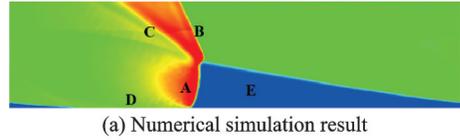


图3 数值与实验结果对比

Fig.3 Comparison of simulation and experimental results

对比可以看出,在相同工况条件下,两种模型所对应的传播模态不同,从而也验证了多孔喷注模型可以模拟爆震波传播模态的变化。另外,图4(a)的爆震波结构与图3(b)结果一致,进一步验证了计算方法的可靠性。由于波前预混气的不稳定性,使得爆震波高度在17~22 mm范围内波动,在爆震波高度范围内设置监测点(150, 35),如图5所示,可以看出爆震波稳定传播后的峰值总压约为3.5 MPa。爆震波的传播速度在不同传播周期内存在波动,其平均传播速度为1 807 m/s,且由于是双波传播,速度低于该条件下的C-J速度(1 899 m/s),约为C-J速度的95.16%,相对误差为-4.84%,单波的平均传播频率为5.946 kHz。由于双波模态的爆震波强度略低于单波模态,故该模拟结果具有可靠性。

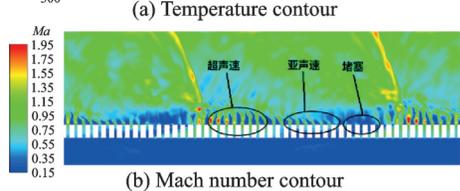
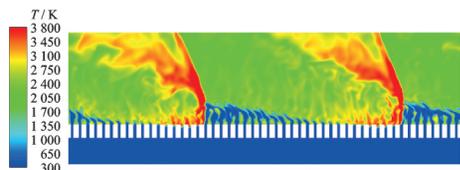


图4 多孔喷注时温度及马赫数云图

Fig.4 Temperature and Mach number contours of multi-hole injection

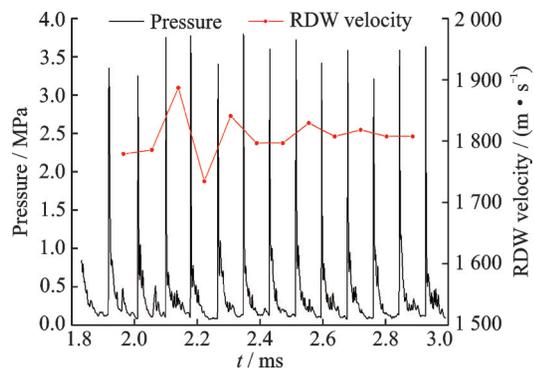


图5 监测点(150, 35)处的压力曲线及爆震波速度

Fig.5 Pressure curve and RDW velocity at monitoring point (150, 35)

Tang 等<sup>[16]</sup>在进行一维爆震波数值验证时采用了 7 种网格尺寸,发现网格尺寸在 0.25~1 mm 时对爆震波的 C-J 压力、传播速度等特征的影响较小。对计算区域进行结构网格划分,网格尺寸分别为 0.2、0.4 和 0.6 mm,并对 3 种网格进行验证。图 6 为 3 种网格下爆震波稳定传播时的温度云图。可以看出,当网格尺寸为 0.2 和 0.4 mm 时,所得到的旋转爆震波流场基本相似;当网格尺寸为 0.6 mm 时,斜激波与滑移线失真,无法捕捉到较为精细的爆震波结构。

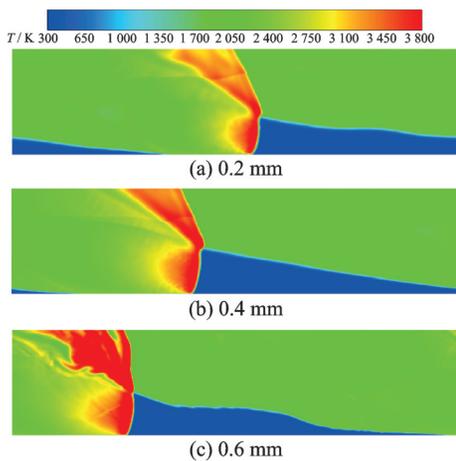


图 6 不同网格尺寸下的温度云图

Fig.6 Temperature contours under different mesh sizes

对燃烧室进口附近  $Y=5$  mm 处的压力数据以及燃烧室出口压力数据进行提取分析,结果如图 7 所示。图 7(a)中,网格尺寸为 0.6 mm 时所对应的爆震波峰值压力明显低于另外两种网格尺寸;网格

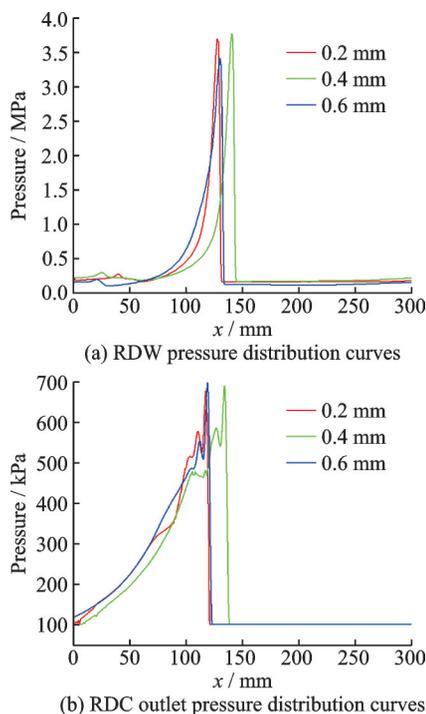


图 7 不同网格尺寸下的压力分布曲线

Fig.7 Pressure distribution curves under different mesh sizes

尺寸为 0.2 和 0.4 mm 时所对应的峰值压力基本相同,曲线形状也较吻合。从图 7(b)可以发现 3 种网格尺寸所得到的结果相近。因此,本文拟采用 0.4 mm 的网格尺寸进行后续的模拟计算。

## 2 结果与分析

将质量流率控制为  $50 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ,将当量比分别设置为 0.7、1.0、1.3 和 1.5,不同当量比条件下某时刻爆震波稳定传播时的温度云图如图 8 所示。从图 8(a)中发现,当量比为 0.7 时,燃烧室内为富氧燃烧,新鲜预混气区内未发生明显的预燃放热现象。相同喷注条件下,爆震波的压力和温度均较低,强度较弱,爆震波对喷孔出口处的堵塞作用相对较弱,大量新鲜混气进入燃烧室,使得爆震波高度约维持在 28 mm;图 8(b)中,当量比为 1.0 时,燃烧室内的燃烧更加充分,反应完全,燃料预燃放热更加明显,爆震波经过多次的诱发与熄灭后,燃烧室内爆震波波头数变成双波,爆震波高度缩小,约为 20 mm;图 8(c)和图 8(d)中,燃烧室内爆震波均为单波模态,爆震波瞬时温度相对更高,对喷孔出口的新鲜混气堵塞作用增强,使得两种当量比下的爆震波高度分别为 29 和 30 mm。表 3 为不同当量比下爆震波参数。当爆震波稳定传播时,进口平均喷注总压变化不大,爆震波瞬时峰值压力和峰值温度随着当量比增大而增大。

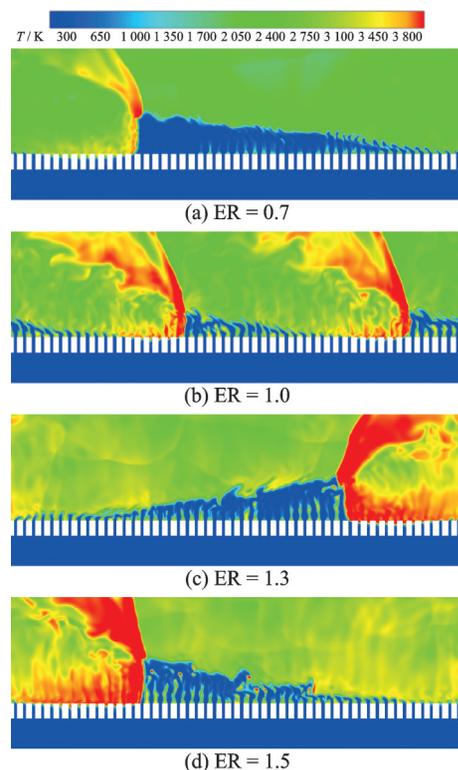


图 8 不同当量比条件下温度云图

Fig.8 Temperature contours under different equivalence ratio (ER) conditions

表3 不同当量比下爆震波参数

Table 3 RDW parameters under different equivalence ratio conditions

当量比 ER	传播 模态	平均喷注 总压/kPa	峰值 压力/MPa	峰值 温度/K	爆震波 高度/mm
0.7	单波	453.39	2.16	3 417.36	28
1.0	双波	487.92	2.43	4 594.92	20
1.3	单波	400.38	2.54	4 723.22	29
1.5	单波	418.76	2.80	4 953.04	30

## 2.1 出口压力分布特性

为了衡量旋转爆震燃烧室出口压力分布特性,采用无量纲参数进行定量分析,即相对标准偏差CV、克里斯琴森均匀系数CU<sup>[11]</sup>以及燃烧室出口总压畸变指数 $\beta$

$$CV = \frac{S}{\bar{p}_{out\_total,t}} \times 100\% \quad (2)$$

$$CU = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |p_{i,t} - \bar{p}_{out\_total,t}|}{\sum_{i=1}^N p_{i,t}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{p_{out\_max} - p_{out\_min}}{p_{out\_ave}} \quad (4)$$

式中:CV用来衡量均值显著不同的总体离散性,也可用来比较流场均匀性的改善程度,CV值越小,则出口截面上的压力分布越均匀;CU为基于平均偏差的统计量,能够直接反映出口参数与平均值的偏差程度<sup>[11]</sup>,CU值越大,表明出口截面的压力分布均匀性越好。为了方便分析,下文采用1-CU值进行阐述。类比进气道稳态畸变指数的定义,燃烧室出口总压畸变指数 $\beta$ 的定义为出口最大总压与最小总压的差值再除以平均总压,用于表征燃烧室出口截面上气流的不均匀性程度。式(2~4)中其他参数的定义如下

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (p_{i,t} - \bar{p}_{out\_total,t})^2} \quad (5)$$

$$\bar{p}_{out\_total,t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{i,t} \quad (6)$$

$$p_{out\_ave} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^T \bar{p}_{out\_total,t} \quad (7)$$

式中:S为标准偏差;N为燃烧室出口节点总数; $p_{i,t}$ 为某瞬时刻第*i*个节点处的质量加权平均总压; $\bar{p}_{out\_total,t}$ 为某瞬时刻出口截面的质量加权平均总压。 $p_{out\_max}$ 和 $p_{out\_min}$ 分别为燃烧室出口截面质量加权最大总压和最小总压, $p_{out\_ave}$ 为一段时间内燃烧室出口总压脉动均值,即爆震波稳定传播时燃烧室出口平均总压的时均值。畸变指数越小,出口流场

越均匀,出口气流品质越高。

图9给出了爆震波稳定传播后不同当量比下燃烧室出口总压分布曲线。由图可知,随着当量比的增大,燃烧室出口压力分布范围越大,经过时均化处理后发现,出口最大总压会随着当量比的增大而增大。当量比越接近1,燃烧室内的化学反应越充分,出口流场也越均匀。图10为不同当量比下燃烧室出口截面CV及1-CU值,由图可知,随着当量比的增大,CV值和1-CU值均呈现先减小后增大的变化趋势。从0.7增加至1.0时,CV值从0.85减小至0.57,减小了0.28,1-CU值从0.68减小至0.52,减少了0.16;随着当量比从1.0增加至1.5时,CV值增大至0.71,增加了0.15,1-CU值增加至0.6,增加了0.08。两种均匀性指标均表示随着当量比的增大,燃烧室出口压力分布均匀性先变好后变差,当量比为1时,燃烧室出口总压分布最均匀。

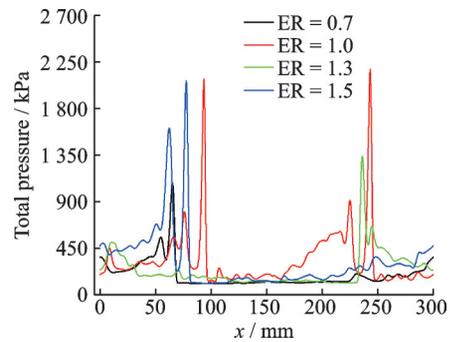


图9 燃烧室出口总压分布曲线

Fig.9 Total pressure distribution curves of RDC outlet

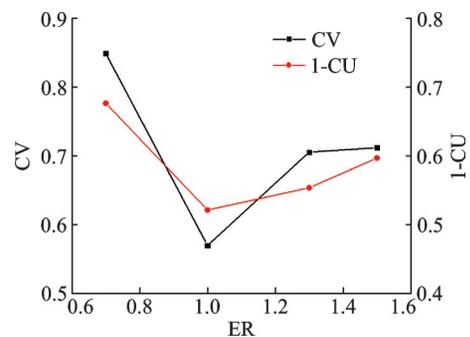
图10 燃烧室出口截面CV值与1-CU值随当量比的变化  
Fig.10 Variation of CV value and 1-CU value of RDC outlet with equivalence ratio

表4给出了不同当量比下燃烧室出口总压参数。可以看出,燃烧室出口总压畸变指数的变化趋势与均匀性指标相同,随着当量比的增大,出口总压畸变指数先减小后增大。此外,经过对比可以发现,当量比分别为0.7、1.0和1.3时,总压畸变指数大小相近;当量比为1.5时,畸变指数最大,而畸变指数越大,燃烧室出口流场越不均匀。

表 4 不同当量比下出口总压参数

Table 4 Total pressure parameters of RDC outlet under different equivalence ratios

当量比 ER	出口最大 总压/kPa	出口最小 总压/kPa	出口平均 总压/kPa	出口总压 畸变指数
0.7	1 090.24	109.79	320.05	3.063
1.0	1 180.92	124.87	359.64	2.936
1.3	1 263.21	114.72	370.26	3.102
1.5	2 617.68	114.40	475.32	5.267

2.2 增压比及喷射压力比

旋转爆震燃烧室增压比  $\pi$  为出口平均总压与喷射总压的比值,即

$$\pi = \frac{p_{out\_ave}}{p_0} \quad (8)$$

式中  $p_0$  为燃烧室入口喷射总压。根据文献[4]中对空气喷射压力比的概念,引入预混气喷射压力比 PR,其为燃烧室入口喷射总压与燃烧室平均总压的比值,即

$$PR = \frac{p_0}{p_{RDC}} \quad (9)$$

$$\bar{p}_{RDC\_total,t} = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M p_{i,j,t} \quad (10)$$

$$p_{RDC} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{t=1}^T \bar{p}_{RDC\_total,t} \quad (11)$$

式中:  $p_{RDC}$  为爆震波稳定后一段时间内 RDC 平均总压的时均值;  $p_{i,j,t}$  为某时刻 RDC 内某节点处质量加权总压;  $\bar{p}_{RDC\_total,t}$  为某时刻 RDC 质量加权平均总压。旋转爆震燃烧室增压比  $\pi$  与喷射压力比 PR 的乘积也可反映燃烧室出口总压与燃烧室平均总压之间的关系。

图 11 为 RDC 进口平均总压、燃烧室平均总压及出口平均总压随当量比的变化曲线。由图可知,由于爆震波的存在,使得整个燃烧室内的压力较高,通过对燃烧室整体的质量加权平均后,进口喷射总压、燃烧室平均总压及出口平均总压均随当量比的增大而增大。当量比从 0.7 增加至 1.3 时,3 种总压的变化幅度较小,这与畸变指数的变化趋势相符合。图 12 为增压比和喷射压力比随当量比的变化趋势,由图可知,增压比随着当量比的逐渐增大呈现先增大后减小的变化趋势,其中当量比为 1 时,出口平均总压与喷射总压的差值最大,增压比最大,为 1.13。另外可以发现,当量比对燃烧室的增压比影响有限,尽管 RDW 的压力和温度均有所增大,但是出口平均总压的增长幅度依然较小。此外,当量比越接近 1,乙炔的化学反应越充分,燃烧室平均总压较接近,变化幅度较小;当量比为 1.5

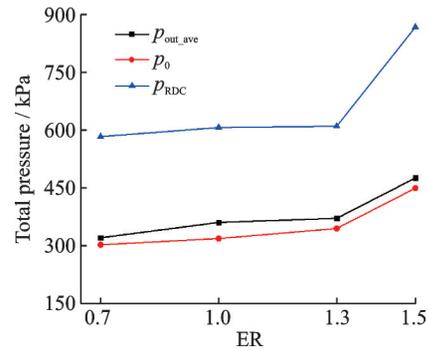


图 11 进口平均总压、燃烧室平均总压及出口平均总压随当量比的变化

Fig.11 Variation of average total pressure at inlet, RDC and outlet with equivalent ratio

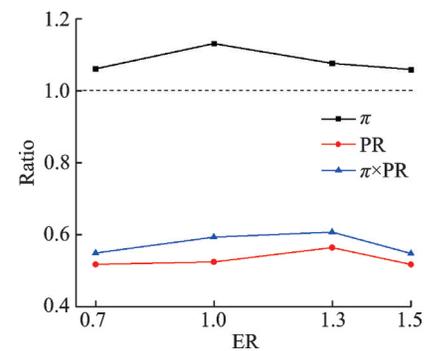


图 12 增压比与喷射压力比随当量比的变化

Fig.12 Variation of  $\pi$  and PR with equivalent ratio

时,燃烧室内存在大量未参与化学反应的乙炔,此时剩余的乙炔会发生分解反应进行放热,使得燃烧室平均总压迅速增大,相应的喷射压力比变小,其最小值为 0.517。

2.3 出口温度分布特性

燃烧室出口温度分布系数(Outlet temperature distribution factor, OTDF)常被用来表征燃烧室出口温度分布均匀性,是衡量燃烧室出口温度分布好坏的重要标志,其定义为

$$OTDF = \frac{T_{out\_max} - T_{out\_ave}}{T_{out\_ave} - T_{in\_ave}} \quad (12)$$

式中:  $T_{out\_max}$  和  $T_{out\_ave}$  分别为燃烧室出口截面最高温度和平均温度,  $T_{in\_ave}$  为燃烧室入口平均温度。

图 13 和图 14 分别给出了燃烧室出口总温分布曲线以及出口温度分布系数、最大总温以及平均总温随当量比的变化曲线。可以发现,随着当量比增大,OTDF 遵循先减小后增大的规律,而出口最大总温和平均总温均逐渐增大,当量比为 1 时,OTDF 数值最小,为 0.36,燃烧室出口温度分布均匀性最好。究其原因,当量比越接近 1 时,燃烧室内反应越充分,出口流场越均匀,总温均匀性更好;而当量比过高或过低时,燃烧室内会出现富燃或富氧的情况,导致出口流场出现畸变,出口温度分布

系数偏大,总温的均匀性变差。另外,随着当量比的持续增大,出口最大总温和平均总温不会一直增大,过高的当量比会导致燃烧不完全,使得燃料剩余,这也将会大幅影响爆震燃烧的温度。

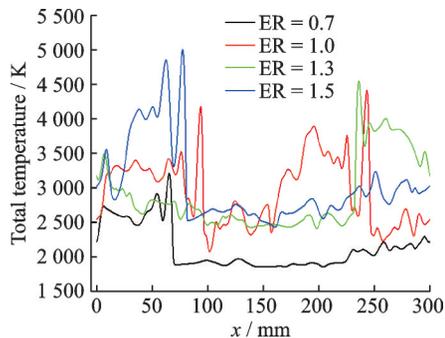


图13 不同当量比下燃烧室出口总温分布曲线

Fig.13 Total temperature distribution curves of RDC outlet under different equivalence ratios

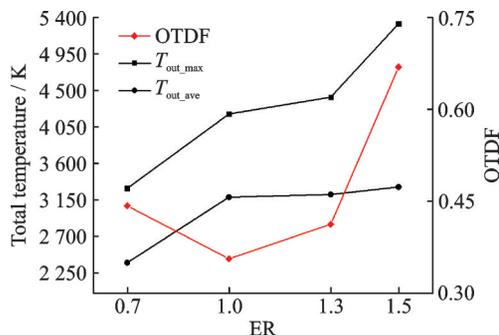


图14 OTDF、出口最大总温及平均总温随当量比的变化  
Fig.14 Variation of OTDF, maximum total outlet temperature and average total temperature with equivalent ratio

### 3 结 论

采用均匀性评价指标 CV、CU、燃烧室出口总压畸变指数  $\beta$ 、增压比  $\pi$ 、喷射压力比 PR 以及出口温度分布系数 OTDF 等无量纲参数,对不同当量比下旋转爆震燃烧室出口的总压、总温等特性进行分析,并得出以下结论:

(1)随着当量比的增大,燃烧室出口压力和温度的均匀性先变好后变差,畸变指数与出口温度分布系数均先减小后增大。当量比为 1 时,燃烧室出口压力和温度均匀性最好,此时 CV 值最小为 0.57, 1-CU 值最小为 0.52, 畸变指数最小为 2.936, OTDF 值最小为 0.36。

(2)随着当量比的逐渐增大,燃烧室增压比呈现先增大后减小的变化趋势,当量比为 1 时,增压比最大为 1.13,且当量比对燃烧室增压比具有一定的提升效果,但提升效果有限。

(3)当量比越大,燃烧室内的化学反应越不充分,由于乙炔的分解放热,会使燃烧室平均总压激

增,喷射压力比变小。当量比为 1.5 时,喷射压力比为 0.517。

### 参考文献:

- [1] BYKOVSKII F A, ZHDAN S A, VEDERNIKOV E F. Continuous spin detonation in annular combustors [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, 41(4): 449-459.
- [2] BYKOVSKII F A, ZHDAN S A, VEDERNIKOV E F. Continuous spin detonation of fuel-air mixtures [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2006, 42(4): 463-471.
- [3] BYKOVSKII F A, ZHDAN S A, VEDERNIKOV E F. Continuous spin detonations[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(6): 1204-1216.
- [4] SUCHOCKI J A, YU S T J, HOKE J L. Rotating detonation engine operation: AIAA 2012-0119[R]. [S.l.]: AIAA, 2012.
- [5] 刘世杰.连续旋转爆震波结构、传播模式及自持机理研究[D].长沙:国防科学技术大学,2012.  
LIU Shijie. Research on structure, propagation mode and self-sustaining mechanism of continuous rotating detonation wave[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [6] 刘世杰,刘卫东,林志勇,等.连续旋转爆震波传播过程研究(I):同向传播模式[J].推进技术,2014,35(1): 138-144.  
LIU Shijie, LIU Weidong, LIN Zhiyong, et al. Research on propagation process of continuous rotational detonation wave ( I ): The-same-direction propagation mode[J]. *Propulsion Technology*, 2014, 35(1): 138-144.
- [7] 王超,刘卫东,刘世杰,等.连续旋转爆震波传播模式试验[J].国防科技大学学报,2015,37(4): 121-127.  
WANG Chao, LIU Weidong, LIU Shijie, et al. Continuous rotational detonation wave propagation mode test[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(4): 121-127.
- [8] 孙健.旋转爆震发动机燃烧过程及推进性能研究[D].长沙:国防科技大学,2019.  
SUN Jian. Research on combustion process and propulsion performance of rotary detonation engine[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [9] 李帅.旋转爆震燃烧室工作特性及其与涡轮匹配性研究[D].南京:南京理工大学,2018.  
LI Shuai. Study on working characteristics of rotary detonation combustor and its matching with turbine [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.

- [10] 马元,邹刚,孔光明,等.两相旋转爆震发动机出口流场均匀性数值研究[J].兵器装备工程学报,2021,42(1): 194-200.  
MA Yuan, ZOU Gang, KONG Guangming, et al. Numerical study on flow field uniformity of outlet flow field of two-phase rotary detonation engine[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(1): 194-200.
- [11] 马虎,封锋,武晓松,等.压力条件对旋转爆震发动机的影响[J].弹道学报,2012, 24(4): 94-98.  
MA Hu, FENG Feng, WU Xiaosong, et al. Influence of pressure conditions on rotary detonation engine [J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(4): 94-98.
- [12] SCHWER D A, KAILASANATH K. Feedback into mixture plenums in rotating detonation engines: AIAA 2012-0617[R]. [S.l.]: AIAA, 2012.
- [13] SCHWER D A, KAILASANATH K. On reducing feedback pressure in rotating detonation engines: AIAA 2013-1178[R]. [S.l.]: AIAA, 2013.
- [14] DUBROVSKII A V, IVANOV V S, ZANGIEV A E, et al. Three-dimensional numerical simulation of the characteristics of a ramjet power plant with a continuous-detonation combustor in supersonic flight[J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2016, 10(3): 469-482.
- [15] GAILLARD T, DAVIDENKO D, DUPOIRIEUX F. Numerical simulation of a rotating detonation with a realistic injector designed for separate supply of gaseous hydrogen and oxygen[J]. Acta Astronautica, 2017, 141: 64-78.
- [16] TANG X, WANG J, SHAO Y. Three-dimensional numerical investigations of the rotating detonation engine with a hollow combustor[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(4): 997-1008.

(编辑:夏道家)