



非预混 $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ 混合气旋转爆轰数值模拟研究

李 航,白桥栋*,王进平,韩家祥,刘喆勇,王茂杰

(南京理工大学 瞬态物理全国重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要:针对固体贫氧推进剂富燃燃气(主要成分为 CH_4 、 CO 、 H_2)在旋转爆轰发动机中的应用背景,开展了 $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ 混合气在非预混进气条件下的旋转爆轰传播特性二维数值模拟研究,旨在揭示当量比和燃料组分比例对爆轰波稳定性、传播模态及流场结构的影响机制。基于 OpenFOAM 平台,利用 rhoReactingCentralFoam 求解器开展二维模拟,采用简化化学反应机理,系统分析了当量比(0.88~1.33)和 CO 质量分数(45%~88.7%)对旋转爆轰波传播稳定性、流场结构及组分分布的影响。结果表明:在 $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ 摩尔比为 1:2.5:5.38 时,所有当量比工况下均能形成单波稳定传播,随当量比增加平均传播速度由 1 702 m/s 升至 1 769 m/s,峰值压力相应提高;当量比大于 1 时, CH_4 和 H_2 在反应区近乎完全消耗,而 CO 残留量显著增加;当量比越接近化学计量比,爆轰波自我调节时间越短,稳定性越优。在固定当量比与 CH_4/H_2 摩尔比条件下, CO 质量分数增加会引起爆轰波平均速度下降、速度亏损增大,稳定性降低; CO 质量分数达 88.7%时,流场中出现寄生燃烧,诱发了多波与紊乱模态,破坏爆轰波的稳定自持传播。

关键词:旋转爆轰;发动机;固体燃料;当量比;寄生燃烧

中图分类号:V231.22 文献标志码:A 文章编号:1004-499X(2026)03-0059-11

Numerical Simulation Study of Rotating Detonation in Non-Premixed $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ Mixtures

LI Hang, BAI Qiaodong*, WANG Jinping, HAN Jiaxiang, LIU Zhuyong, WANG Maojie

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To address the application of lean-burn gases (primarily composed of CH_4 , CO , and H_2) from solid oxygen-deficient propellants in rotating detonation engines, the two-dimensional numerical simulation was conducted to study the propagation characteristics of $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ mixtures under non-premixed inlet conditions. The aim was to elucidate the influence mechanisms of equivalence ratio and fuel composition on detonation wave stability, propagation modes, and flow field structures. Using the OpenFOAM platform and the rhoReactingCentralFoam solver, the two-dimensional simulations were performed with a simplified chemical reaction mechanism. The study systematically analyzed the effects of equivalence ratio (0.88 ~ 1.33) and CO mass fraction (45% ~ 88.7%) on the propagation stability, flow field structure, and component distribution of rotating detonation waves. Results indicate that stable single-wave propagation occurs across all equivalence ratio conditions at a $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ molar ratio of 1:2.5:5.38. The average propagation velocity increases from 1 702 m/s to 1 769 m/s with rising equivalence ratio, accompanied by corresponding peak pressure increases. When the equivalence ratio exceeds 1, CH_4 and H_2 are nearly

completely consumed in the reaction zone, while residual CO content significantly increases. The closer the equivalence ratio approaches the stoichiometric ratio, the shorter the self-regulation time of the detonation wave and the better its stability. Under fixed equivalence ratio and CH_4/H_2 molar ratio, increasing CO mass fraction causes the decrease of the detonation wave average velocity, increases velocity loss, and reduces stability. When the CO mass fraction reaches 88.7%, parasitic combustion occurs in the flow field, inducing multiple waves and turbulent modes that disrupt the stable self-sustained propagation of the detonation wave.

Key words: rotating detonation; engine; solid fuel; nequivalence ratio; parasitic combustion

旋转爆轰发动机是一种利用爆轰燃烧,使爆轰波在环形燃烧室内连续旋转传播而产生推力的一种新型发动机^[1-2]。旋转爆轰发动机只需要初始起爆一次,旋转爆轰波(rotating detonation wave, RDW)便可持续地传播下去。RDW 传播方向与进气、排气方向独立,爆轰波被封闭在燃烧室内旋转传播,避免了爆轰波喷出管外而造成的巨大能量损失。旋转爆轰发动机还具有结构简单紧凑、工作范围宽等优点,在航空、航天以及舰船动力推进领域均有广泛的应用前景。

针对旋转爆轰的研究使用了多种燃料,气体燃料有氢气^[3-4]、乙烯^[5-6]等,液体燃料有煤油^[7-8]、汽油^[9-10]等。对于固体燃料的研究较少,主要是煤粉^[11-12]。固体燃料相对于气体和液体燃料而言,有其独特优势:部分固体燃料的能量密度更高,稳定性更好,环境适应性更强,便于存储运输。采用固体贫氧推进剂^[13]是旋转爆轰发动机的一个新兴研究方向。该发动机借鉴了固体火箭发动机^[14]的结构,利用贫氧推进剂一次燃烧后形成的富燃燃气作为燃料。富燃燃气组分主要包含 CH_4 、CO、 H_2 等,因此研究多组分混合气的爆轰特性有助于了解固体推进剂作为燃料的旋转爆轰发动机的工作过程。

为了研究混合气各组分比例变化对爆轰的影响,程关兵等^[15]以氢气/丙烷混合气为燃料,以空气为氧化剂进行了实验研究,发现增加混合气中丙烷的占比,会使得爆轰速度减小,但爆轰压力和胞格尺寸增加。ZHONG 等^[16]研究了 3 种不同混合比例下, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ 混合气燃料旋转爆轰的稳定工作范围和基本特性。结果表明,混合气中 C_2H_2 和 H_2 含量的增加会扩大稳定工作区间,爆轰波的速度也会增加。由于 CH_4 的化学性质稳定,且在较低温度下,碳氢化合物燃料和空气的混合速度较慢,因此室温下的 $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4$ /空气混合物较难起爆。WANG

等^[17]采用摩尔比为 9:16 的 $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4$ 混合气作为燃料,在 280~285 K 的总温下获得稳定的爆轰波。RDW 速度取决于 RDW 高度,因为 RDW 的热损失以及燃料/空气混合时间由 RDW 高度决定。ZHAI 等^[18]也针对 CH_4 进行研究,采用不同 CH_4 含量的 $\text{CO}/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 混合气进行旋转爆轰实验,发现随着 CH_4 转化率的提高,爆轰波的速度逐渐下降,燃烧室中则出现了多波模式。ZHOU 等^[19]也利用 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ 气体燃料设计了多种工况来研究当量比对旋转爆轰波传播的影响。当量比接近于化学计量比时,爆轰波表现出相对稳定的传播特性。

本文将采用 $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ 混合气作为该固体燃料富燃燃气的替代燃料,对混合气的旋转爆轰传播特性进行数值模拟。进气方式采用更符合实际过程的非预混进气方式,通过分析当量比、燃料组分比例对爆轰波传播稳定性、模态转变等的影响,以期加深对该固体燃料富燃燃气旋转爆轰的认识,为利用该固体燃料的旋转爆轰发动机的发展提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 计算方法

使用 OpenFOAM 软件中可压缩流求解器 rhoReactingCentralFoam 进行二维旋转爆轰数值模拟。二维可压缩反应流控制方程表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho \mathbf{u})) + \nabla p = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho E)) + \nabla \cdot (\mathbf{u}p) = \dot{\omega}_m \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho Y_m)) = \dot{\omega}_T \quad (4)$$

式中: ρ , $\mathbf{u}$, E , p 分别为密度、速度矢量、总能量以及

理想气体状态方程计算的压强; $\dot{\omega}_m, \dot{\omega}_T, Y_m$ 分别为第 m 种组分的生成消耗速率、化学反应热释放速率和第 m 种组分的质量分数。化学反应采用多组分模型,使用 CH_4 的两步化学反应机理, CO 、 H_2 的一步化学反应机理^[20]。表 1 列出了各反应的活化能和反应指数。表中, A 为指前因子, E_a 为反应活化能, R 为气体常数。

表 1 化学反应及相关参数

Table 1 Chemical reactions and related parameters

反应方程	反应指数	A	$\frac{E_a}{R}/\text{K}$
$\text{CH}_4 + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.9	2.0×10^{12}	1.7×10^4
	1.10		
$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$	1.0	3.9×10^{15}	2.0×10^4
	0.25		
$\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	1.0	1.4×10^{13}	1.3×10^4
	1.00		

1.2 物理模型

将旋转爆轰环形燃烧室沿母线展开,简化模型为二维矩形计算域,如图 1 所示。矩形计算区域长 274 mm,宽 100 mm。氧化剂与燃料采用非预混的喷注方式。空气作为氧化剂从环形燃烧室下方入口处的喷嘴进入燃烧室。混合气作为燃料,从环形燃烧室入口平面上方分布的一系列喷嘴进入燃烧室。燃料喷嘴高 10 mm,宽 2 mm,相邻的喷注结构之间间隔 2 mm。在燃料喷嘴上方,设置一系列监测点。空气和混合气在此处进行掺混。燃烧室上方是出口边界。燃烧室左右两端设置为周期性边界条件。

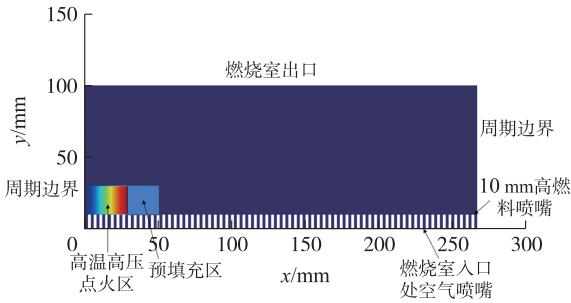


图 1 二维环形燃烧室内计算域

Fig. 1 Computational domain of two-dimensional annular combustor

1.3 初始条件和边界条件

在 $0 \leq x \leq 30$ mm, $10 \leq y \leq 30$ mm 区域内,设置温度 300~2 500 K 线性变化以及压力 0.1~2.8 MPa 线性变化的高温高压点火区。在 $30 \leq x \leq 50$ mm, $10 \leq y \leq 30$ mm 区域,设置对应燃料和空气按当量比为 1 混合的预填充区域。计算域入口为填充边界,

填充边界分 3 种情况:

①当 $p \geq p_0$ 时,此时来流气体无法进入燃烧室,入口按固壁边界处理;

②当 $p_{cr} < p < p_0$ 时,按照亚声速条件填充,此时边界参数为

$$p_i = p, T_i = T_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (5)$$

$$p_{cr} = p_0 \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (6)$$

③当 $p \leq p_{cr}$ 时,按照声速条件填充,此时边界条件参数为

$$p_i = p_{cr}, T_i = T_0 \left(\frac{p_{cr}}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (7)$$

式中: p_0 为填充总压, T_0 为总温, p 为入口边界临近处的计算压力, p_i 为燃烧室入口边界上的压力, T_i 为入口边界上的温度, p_{cr} 为声速填充条件下的临界压力, γ 为混合气体的比热比。出口使用无反射自由边界条件,分为两种情况:①当出口速度为超声速时,出口边界根据一阶外推得到;②当出口速度为亚声速时,出口压力等于环境压力。

1.4 网格独立性验证

为了验证网格尺寸对旋转爆轰数值模拟结果的影响,采用上述燃烧室模型,分别以 0.2 mm, 0.33 mm, 0.5 mm 的网格尺寸进行计算。燃料喷注压力为 0.5 MPa, 喷注温度为 800 K; 空气喷注压力为 0.6 MPa, 喷注温度为 300 K。在该喷注条件下,燃料和空气平均质量流量分别为 100.4 g/s, 701.2 g/s, 当量比为 1.22。选择位于 $x = 55$ mm, $y = 11$ mm 处监测点的数据进行比较。图 2 为计算模型中 3 种网格下监测点压力随时间变化的曲线。可以看出, 3 种网格尺寸得到的结果具有一致性。综合考虑计算准确性与计算成本,本文使用 0.33 mm 的网格。

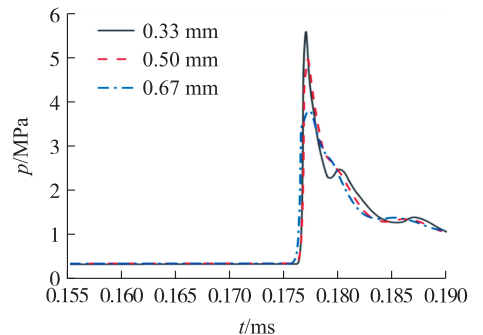
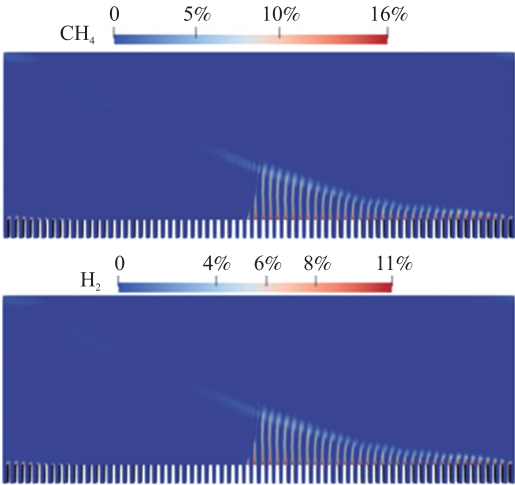


图 2 不同网格尺寸的压力随时间变化曲线

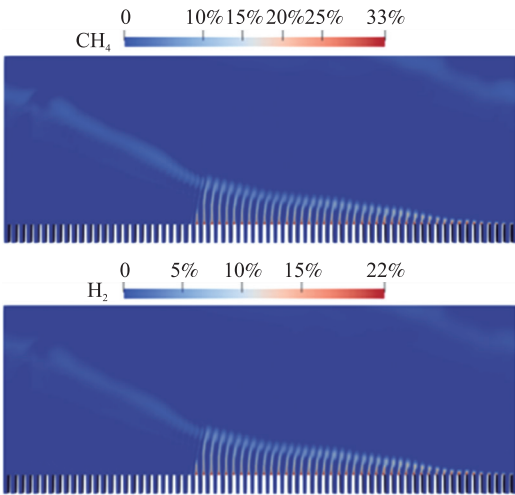
Fig. 2 Pressure-time curves for different grid sizes

2 结果与分析

在非预混的条件下,针对 5 种不同的气体组分比例进行计算。计算得到的旋转爆轰的数据如表 2 所示。工况 a1~a5 中 $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ 混合气摩尔比固定为 1:2.5:5.38,CO 质量分数 $Y_{\text{CO}} = 72.3\%$,相应的当量比从 0.88 增加至 1.33。工况 b1、c1、d1、e1 中混合气中 CH_4/H_2 摩尔比固定为 1:5.38; Y_{CO} 分别为 45.0%,60.0%,84.5%和 88.7%。所有工况中,燃料的进气温度均为 800 K,空气的进气温度均为 300 K。保持空气进气压力 p_a 不变,改变燃料进气压力 p_f ,从而改变当量比 ϕ 。分析不同当量比下,混合气 RDW 传播特性的区别。对比当量比相同且混合气比例不同的工况,研究在相同当量比下,不同气体组分比例对混合气旋转爆轰的影响。



(a) 工况a1



(b) 工况b1

表 2 不同工况的计算结果						
Table 2 Calculation results for different operating conditions						
工况	p_a/MPa	p_f/MPa	$m_a/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_f/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$	ϕ	传播模态
a1	0.6	0.44	726.2	75.2	0.88	单波
a2	0.6	0.46	720.3	82.9	0.98	单波
a3	0.6	0.48	709.3	91.5	1.10	单波
a4	0.6	0.50	701.2	100.4	1.22	单波
a5	0.6	0.52	686.8	106.9	1.33	单波
b1	0.6	0.44	730.8	55.4	1.10	单波
c1	0.6	0.47	720.8	70.8	1.11	单波
d1	0.6	0.50	679.6	128.4	1.11	单波
e1	0.6	0.505	677.3	151.8	1.11	单波到紊乱

2.1 燃烧室内燃料组分与 O_2 分布

图 3 为不同工况下,RDW 稳定后各燃料组分与 O_2 质量分数云图。

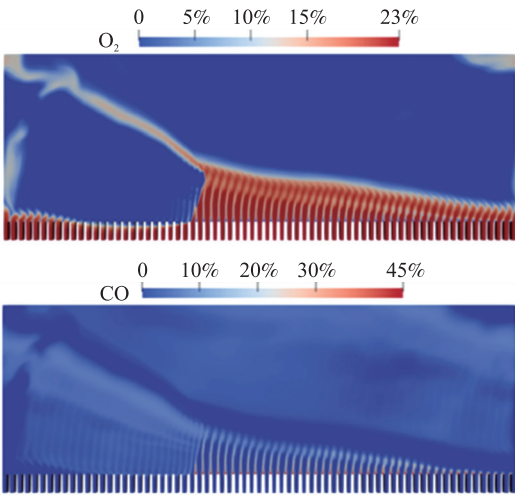
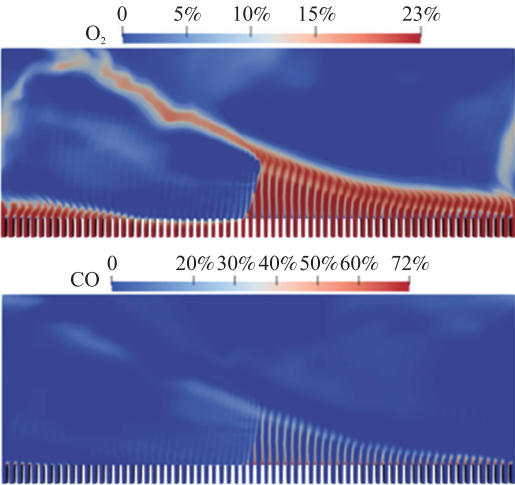


图 3 不同工况下燃料组分与 O_2 质量分数云图

Fig. 3 Contour maps of fuel components and O_2 mass fraction under different operating conditions

图3(a)是工况 a1 下,当量比为 0.88 时, RDW 稳定后各组分质量分数分布云图。在混合气与空气爆轰反应的主要区域内, CH_4 与 H_2 在爆轰反应中几乎被完全消耗,仅残留富余的 O_2 与极少 CO 。在该区域上方有少量 CH_4 和 H_2 残留。在 RDW 还未经过的填充区存在 3 种燃料气体与 O_2 ,而在爆轰反压导致进气阻滞的边界区域主要存在 O_2 。图3(b)是工况 b1 下,当量比为 1.1 时, RDW 稳定后燃料组分与 O_2 质量分数分布云图。与工况 a1 最大的区别是在爆轰反应主要发生区,氧气被消耗殆尽, CO 则大量的残留,而 CH_4 和 H_2 在该区域上方的残留量也明显增加。在其余区域,各气体分布与工况 a1 相似。

选取工况 b1 中 RDW 稳定传播的时刻,燃烧室内 $y=20\text{ mm}$ 所在直线的的数据。图4为 $y=20\text{ mm}$ 处,各组分在燃烧室内质量分数的折线图。RDW 此刻正处在 $x=100\text{ mm}$ 附近,在 $100\text{ mm} \leq x \leq 200\text{ mm}$ 之间,4 种气体均维持一定的质量分数。这是由于 RDW 还未到达该区域,混合气与氧气在此区域内还未参与爆轰反应。在 $10\text{ mm} \leq x \leq 100\text{ mm}$ 之间, CH_4 、 O_2 和 H_2 的质量分数几乎为 0。而 CO 质量分数与 $100\text{ mm} \leq x \leq 200\text{ mm}$ 之间相比虽然也大幅下降,但仍然维持在 3% 左右。这是由于爆轰波反应区的时间尺度极短,在这个极短的时间内 H_2 和 CH_4 凭借其高反应速率率先被消耗殆尽。而 O_2 浓度的下降,以及反应区后膨胀波导致的温度下降,使得部分来不及参与反应的 CO 被残留下来。综合图3(b)与图4,说明了在当量比为 1.1,燃料有所富余的条件下,混合气中的 H_2 与 CH_4 在爆轰反应中几乎可以被完全消耗,而 CO 只能被部分消耗。这说明改变混合气中 CO 的质量分数,会对爆轰波反应区产生较大影响,残留的 CO 过多也会导致爆轰波的稳定性下降。在 $10\text{ mm} \leq x \leq 200\text{ mm}$ 之外的其余部位则是两个区域的边界区域。由于燃料喷注口的位置比空气喷注口更接近 RDW,因此 RDW 的反压对燃料进气的影响更大。因此,在该区域 O_2 质量分数能由 0 逐渐上升至 20%,而混合气中的 3 种组分气体质量分数在该区域内也几乎为 0,仅在远离 RDW 的区域有小幅增加。

由于在不同的当量比下,混合气中的 CH_4 与 H_2 在爆轰反应中被几乎完全消耗。因此对于工况 a1~a5,在爆轰反应主要发生区 CH_4 与 H_2 的质量分数都几乎为 0。仅在燃料填充区中,由于当量比的变

化, H_2 、 CH_4 在其和 O_2 掺混处的质量分数有所改变。随着当量比的增加,爆轰反应主要发生区中的 O_2 质量分数逐渐下降。在当量比从 0.88 增加到 1.10 后,该区域中的 O_2 就被富余的燃料消耗殆尽。

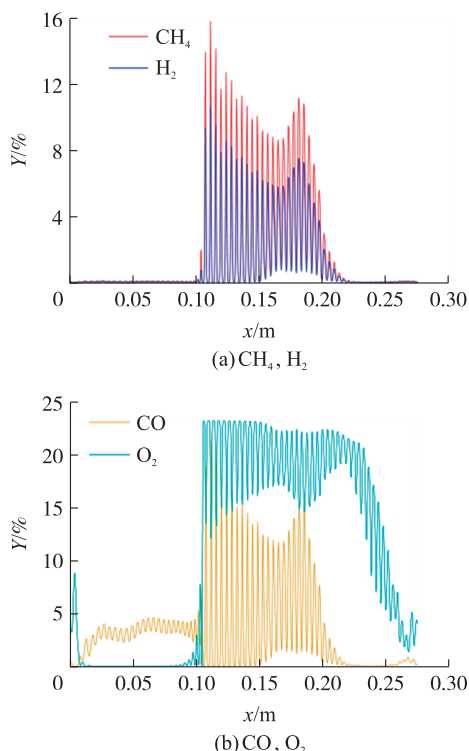


图4 工况 b1 各组分质量分数折线图

Fig. 4 Mass fraction breakdown chart for operating condition b1

图5为不同当量比下 CO 的质量分数分布云图。在不同的工况下,流场内的 CO 分布形态大致相同。在爆轰波反应区,随着当量比增加,燃烧室中 CO 的含量相应增加,由于燃料中可爆性更高的 CH_4 和 H_2 更快参与反应,因此消耗 CO 的质量明显下降,故而在爆轰波反应区 CO 质量分数随着当量比增加而显著增加。

在不同当量比下,寻找 RDW 稳定传播的时刻,选取在燃烧室的出口处 $y=95\text{ mm}$ 所在直线的的数据,得到不同工况下燃烧室出口处各组分平均质量分数变化图,以印证流场云图所得结论。图6为不同当量比下燃烧室出口处各组分质量分数变化图。由于当量比增加导致混合气中 H_2 和 CH_4 的质量增加,二者质量分数相应小幅增长,但其整体数值较小,与上述所得结论一致。当量比增加至 1 以上后,由于高活性的 H_2 被率先消耗,削弱了 CO 的反应过程,因此 CO 的质量分数逐渐上升,而其反应生成的 CO_2 的质量分数相应下降。

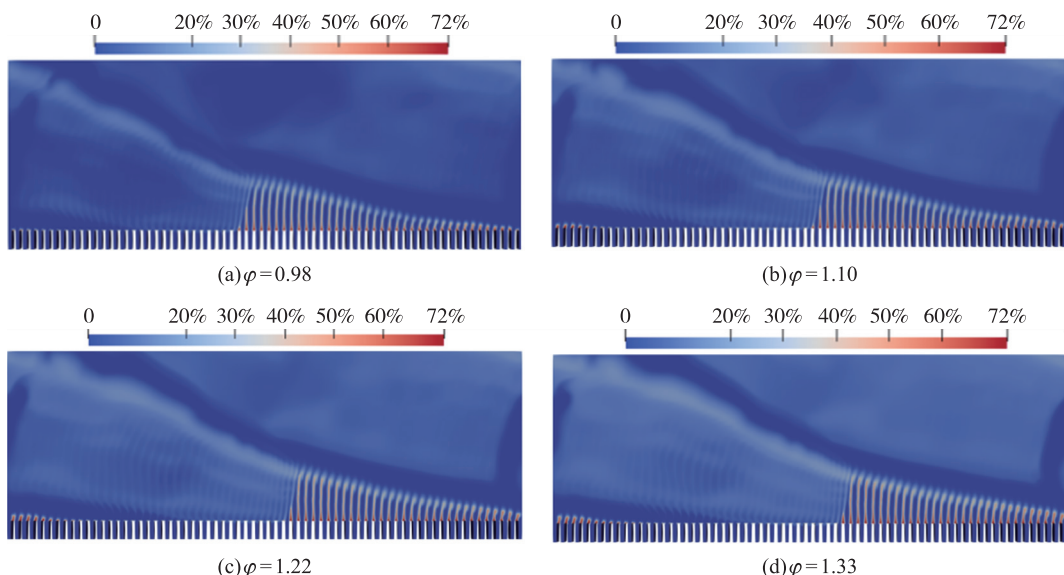


图5 不同当量比下CO分布云图

Fig. 5 CO distribution contour maps at different equivalent ratios

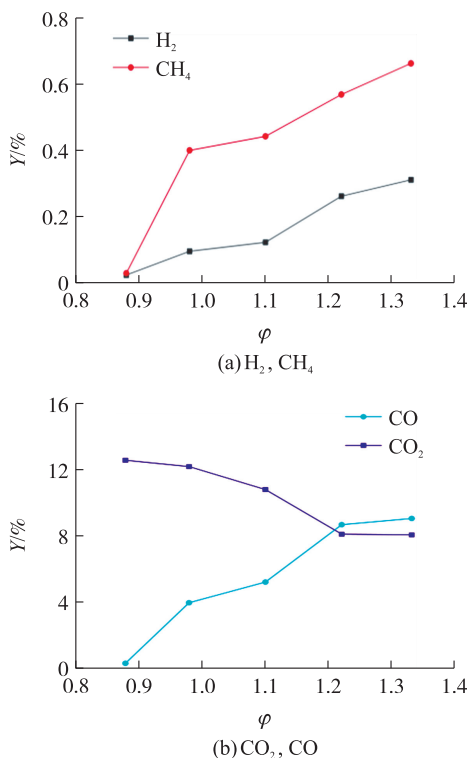


图6 不同当量比下燃烧室出口处各组分平均质量分数图

Fig. 6 Average mass fraction of each component at combustion chamber outlet at different equivalent ratios

对于工况 b1、c1、d1、e1,爆轰反应主要发生区中的 H_2 、 CH_4 也能被消耗殆尽。因此,在不同 CO 质量分数 Y_{CO} 下, RDW 稳定传播时, H_2 、 CH_4 分布情况与工况 b1 几乎一致。而由于混合气组分的变化, H_2 和 CH_4 的质量分数在燃料填充区中有所改变。

图7是工况 b1、c1、d1、e1 在 RDW 稳定传播时,流场内 CO 组分分布图。在不同的工况下,流场内的 CO 分布形态也没有明显变化。在爆轰反应主要发生区中, CO 质量分数随着混合气中的 CO 质量分数增加而小幅增加。在当量比不变时,由于 H_2 和 CH_4 均能被完全消耗,因此理论上在不同气体组分比例下,残留的 CO 质量不随气体组分变化。但 CO 质量分数的增加导致混合气的活性下降,未参与爆轰反应的 CO 增加,因此使得更多的 CO 被残留在燃烧室内。综合图5与图7,当量比或混合气中 CO 质量分数的增加都会导致爆轰波反应区内残留的 CO 增加,这降低了燃料的利用率,使得爆轰波的稳定性下降。

在不同 CO 质量分数下,在 RDW 稳定传播的时刻,同样选取燃烧室出口处 $y=95\text{ mm}$ 所在直线的数据,得到燃烧室出口处各组分平均质量分数变化图,如图8所示。由图8可知,随着 Y_{CO} 增加,在固定当量比不变的前提下,燃料中的 H_2 和 CH_4 质量分数相应减小,在更大的燃烧室入口质量流量下,这两者在出口燃气中的占比也更低。在不同工况下,出口处 CO 与 CO_2 质量分数随 Y_{CO} 增加而单调增加,这一方面说明提高 Y_{CO} 使得混合气中的 CO 质量增加,更多的 CO 参与反应,从而产生了更多的 CO_2 ; 同时也证明了上述未参与反应的 CO 增加的结论。 H_2 和 CH_4 的质量分数随 Y_{CO} 增加而减小,都保持了极低的质量分数,这也证明了混合气中 H_2 和 CH_4 能几乎被完全消耗。

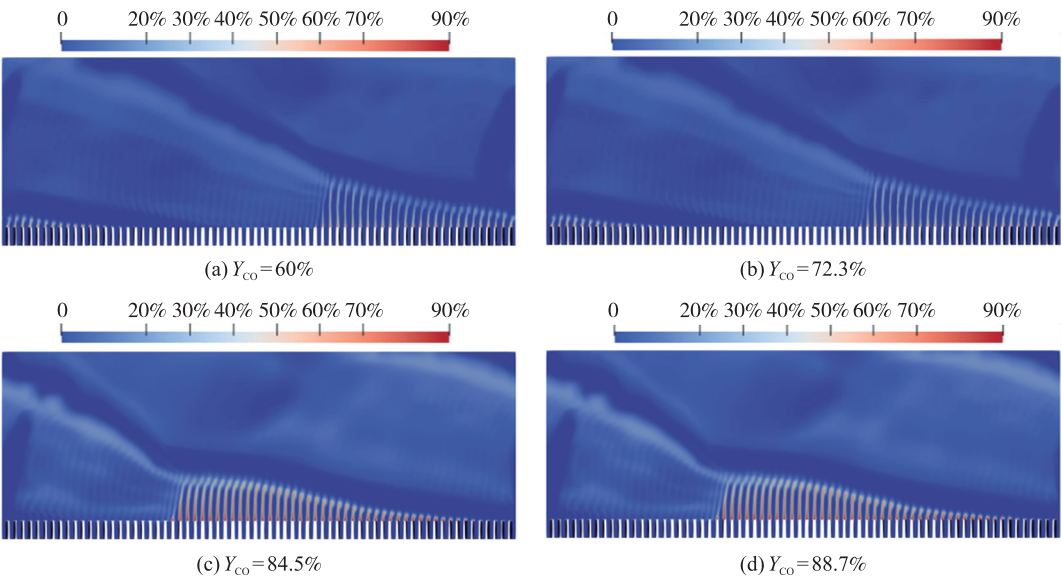


图 7 不同 CO 质量分数下 CO 分布云图

Fig. 7 CO distribution contour maps at different CO mass fractions

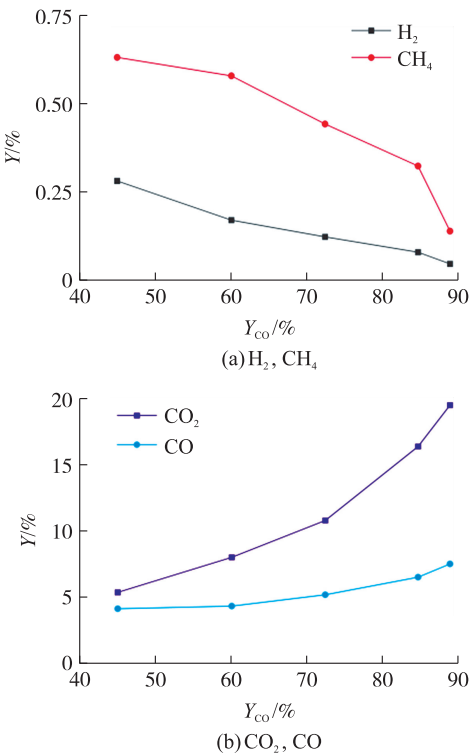


图 8 不同 CO 质量分数下燃烧室出口处
各组分平均质量分数图

Fig. 8 Average mass fraction of each component
at the combustion chamber outlet at different
CO concentrations

2.2 非理想燃烧与旋转爆轰紊流传播模态转换过程分析

CHACON 等^[21]通过羟基自由基(OH^{*})化学发

光观测非理想燃烧,并且定义了旋转爆轰发动机实验中存在的 2 种非理想燃烧现象:寄生燃烧和共生燃烧。寄生燃烧发生在相对于 RDW 的上游区域,对 RDW 有直接的负面影响,比如使 RDW 波速降低,产生高压区域影响燃料进气等。这是因为寄生燃料消耗了燃料,而产生的能量并没有在 RDW 后为 RDW 提供能量。寄生燃烧也可以泛指任何对理想爆轰产生负面影响的、消耗了支撑 RDW 能量的一切非爆轰燃烧。共生燃烧发生在相对于 RDW 的下游区域,是混合物或放热泄漏的结果。虽然共生燃烧是新鲜燃料的亏损,但在 RDW 后释放的能量不会直接影响 RDW,因为它不会影响 RDW 的速度或者压力。

图 9 是工况 e1 下,在 $x=0.031\text{ m}$ 、 $y=0.011\text{ m}$ 监测点处的压力随时间的变化曲线。RDW 以稳定单波的形式在燃烧室传播了 14 个周期。但在 2.6 ms 之后,监测点处的峰值压力突然增大,RDW 开始变得不稳定。图 10 为紊流模态转换过程的压力云图。 $t=2.60\text{ ms}$ 时,RDW 以稳定的单波模态在燃烧室内传播。 $t=2.60\sim 2.70\text{ ms}$ 时,RDW 的压力有明显的下降。这是由于在高 CO 质量分数下,混合气整体的化学反应速率下降,燃料的利用率下降,进而导致爆轰波的压力降低。爆轰波压力的降低又进一步削弱了混合气的反应速率,形成一个恶性循环。 $t=2.70\text{ ms}$ 时,燃烧室内出现了

寄生燃烧现象。在 RDW 未到达的燃料填充区内,新鲜可燃反应物与燃烧室内爆轰燃烧产物接触。由于燃烧产物温度较高,新鲜可燃反应物和燃烧产物的界面之间产生接触燃烧,形成了一个新的高温高压区。新产生的燃烧波和压力下降的原 RDW 发生碰撞,进而在流场内引发了一系列连锁反应,燃烧室内的 RDW 因此无法保持单一模态稳定传播。降低混合气中的 CO 质量分数,可以提高对燃料的利用率,减少 CO 残留,增加 RDW 的稳定性,降低寄生燃烧的出现概率。

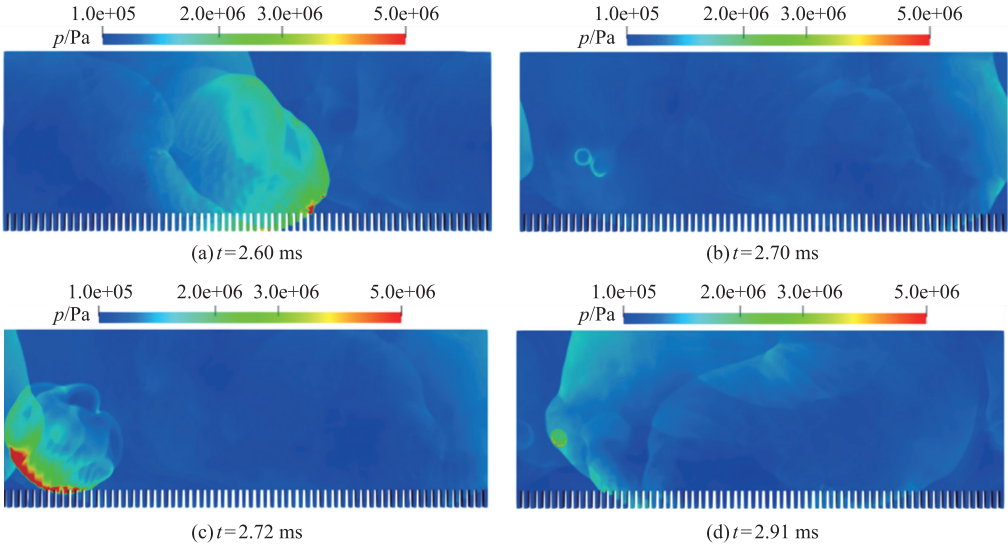


图 10 紊乱模式转换过程的压力云图

Fig. 10 Pressure contour map of disordered modal transition process

2.3 旋转爆轰稳定传播特性分析

在 $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ 混合气摩尔比为 1 : 2.5 : 5.38 时,即工况 a1 ~ a5,当量比在 0.88 ~ 1.33 区间内,RDW 均能成功起爆,且能在燃烧室内稳定自持地传播,传播模态均为单波。图 11 是在工况 a2 下,在 $x=0.055\text{ m}$ 、 $y=0.011\text{ m}$ 监测点处的压力和瞬时传播速度随时间的变化曲线。

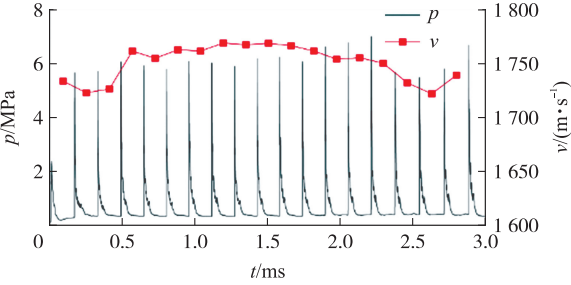


图 11 工况 a2 压力和瞬时传播速度变化曲线图

Fig. 11 Variation curve diagram of pressure and instantaneous propagation velocity for operating condition a2

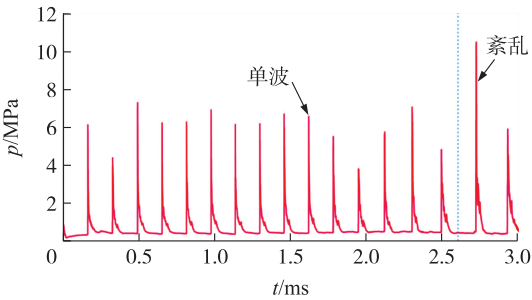


图 9 工况 e1 监测点压力随时间的变化曲线图

Fig. 9 Pressure variation curve over time at monitoring point for operating condition e1

RDW 以单波的形式传播了 19 个周期,共 3.0 ms。在前 3 个传播周期的自我调节后,RDW 稳定传播了 11 个周期,峰值压力稳定在 5.80 ~ 6.76 MPa 之间,传播速度在 1 759.6 ~ 1 768.2 m/s 之间。在最后 5 个传播周期内,RDW 稳定性有所下降,但峰值压力和传播速度波动幅度不大。

图 12 是在不同当量比下 RDW 平均峰值压力 (p_{ave}) 和平均传播速度 (v_{ave}) 曲线。在当量比为 0.88 时,RDW 的平均峰值压力为 5.81 MPa,平均传播速度为 1 702.8 m/s。当量比增加到 1.22 时,RDW 平均峰值压力和平均传播速度都有所增加,平均峰值压力达到 6.78 MPa,平均传播速度为 1 768.5 m/s。这是因为在氧化剂质量几乎不变时,增加当量比,使燃料的质量流量增加,更多的新鲜燃料参与反应,有足够的能量释放来维持 RDW 的传播,增加了 RDW 传播速度,提高了平均峰值压力。当量比继续增加到 1.33 时,RDW 平均传播速度变化很小,而平均峰

值压力则有所下降。这主要是因为在高当量比下,氧化剂几乎被完全消耗,继续增加当量比不能显著增加燃烧产生的热量。此外,高当量比下产生的高压产物会影响燃料和氧化剂的质量流量,因此 RDW 的强度没有明显提高。

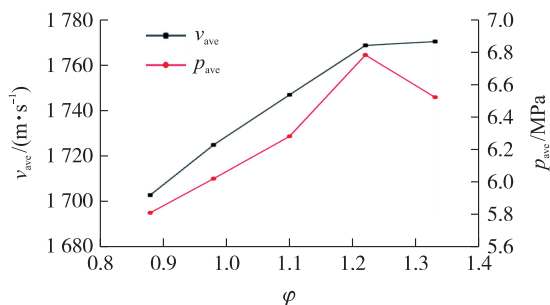


图 12 RDW 平均峰值压力和平均传播速度变化曲线图

Fig. 12 Variation curve diagram of RDW average peak pressure and average propagation velocity

图 13 是在相同当量比下, RDW 平均速度和 C-J 速度 ($v_{\text{C-J}}$) 随 CO 质量分数变化曲线。增加 CO 质量分数会导致 RDW 理论 C-J 速度和实际 RDW 平均速度的下降。这是因为消耗相同质量的 O_2 , H_2 比 CO 能提供更多的能量。因此,混合气的掺氢比越高,燃料产生爆轰时释放的能量越大。在维持空气进气压强不变且当量比不变的情况下,随着 CO 质量分数的增加,混合气中 H_2 质量分数下降,导致燃烧提供给爆轰的能量减少,因而 RDW 的理论 C-J 速度和实际 RDW 平均速度降低。CO 质量分数的增加也导致未参与爆轰反应的 CO 质量增加,这也使得实际 RDW 平均速度降低。

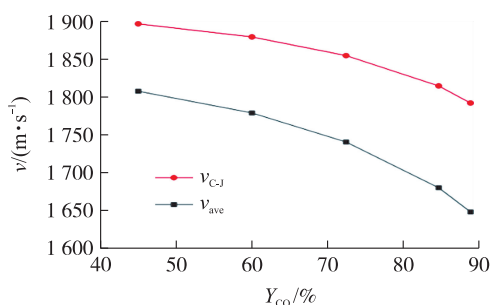


图 13 v_{ave} 和 $v_{\text{C-J}}$ 随 CO 质量分数变化曲线图

Fig. 13 v_{ave} and $v_{\text{C-J}}$ variation curves with CO mass fraction

图 14 是 RDW 速度亏损 Δv 随 CO 质量分数的变化曲线。燃料和空气的非预混喷注导致气体掺混不够均匀;混合气在 RDW 经过前的提前燃烧是造成速度亏损的主要原因。整体的速度亏损维持在

4.5%~8%之间。这是因为除了工况 e1 后期的模式紊乱, RDW 的传播模式均为单波,流场中不存在模式转换,因此整体亏损未超过 10%。而 CO 质量分数的提高使得速度亏损增加。这主要是因为,随着 CO 质量分数增加,燃烧后残留的 CO 质量增加,燃料的利用率下降,因此 RDW 速度亏损也越来越大。

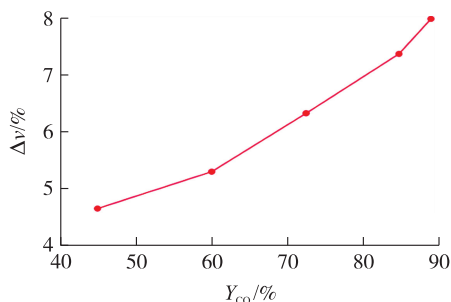


图 14 RDW 速度亏损随 CO 质量分数变化曲线图

Fig. 14 Curves of RDW velocity loss versus CO mass fraction

为定量分析 RDW 的稳定性,分别计算不同当量比以及不同 CO 质量分数下 RDW 传播速度和峰值压力的相对标准差 S_v 、 S_p ,计算公式为

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{\text{ave}})^2 / (n - 1)}{v_{\text{ave}}}} \quad (8)$$

$$S_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - p_{\text{ave}})^2 / (n - 1)}{p_{\text{ave}}}} \quad (9)$$

式中: v_i 为 RDW 一个周期内的瞬时速度, v_{ave} 为瞬时速度的平均值, p_i 为 RDW 经过监测点时的峰值压力, p_{ave} 为峰值压力的平均值, n 为 RDW 稳定后在燃烧室内的传播周期数。计算结果如图 15 所示。

如图 15(a) 所示,当量比由 0.88 增加到 1.1 时, RDW 传播速度的相对标准差由 2.87% 缓慢下降到 2.71%。当量比增加到 1.22 后,传播速度的相对标准差显著下降到 1.98% 附近。随着当量比增加, RDW 传播速度的相对标准差整体呈下降趋势,这是由于当量比增加使得 RDW 更加稳定,速度波动幅度相对减小。继续增加当量比至 1.33, RDW 传播速度的相对标准有所上升,这是因为过高的当量比导致 RDW 内残留了更多 CO,影响了 RDW 的稳定性。当量比由 0.88 增加到 1.33 时,峰值压力的相对标准差由 4.6% 增加到 12.7%,这是由于当量比增大时, RDW 强度增强、峰值压力增加的同时,峰值压力波动幅度也增加,因此压力相对标准差增加。

如图 15(b) 所示,混合气中 CO 质量分数由 45% 增加到 84.5% 时,传播速度的相对标准差由 1.7% 增加到 3.26%。进一步提高 CO 质量分数至 88.7% 后,传播速度的相对标准差迅速增加到 5.25%。这是因为提高混合气中 CO 质量分数的同时 H_2 的质量分数会下降,这二者都会让燃料活性下降,从而导致 RDW 的稳定性下降。而峰值压力的相对标准差随着 CO 质量分数增加,先下降后上升。在 CO 质量分数为 72.3% 时,峰值压力的相对标准差达到最低值 5.8%。这是由于在 CO 质量分数较低时,气体活性较强,RDW 的峰值压力较高,使得相对标准差较高。而在 CO 质量分数过高时,RDW 的强度虽然降低,但稳定性也有所下降,在燃烧室内的压力波动较大,也会导致相对标准差增加。

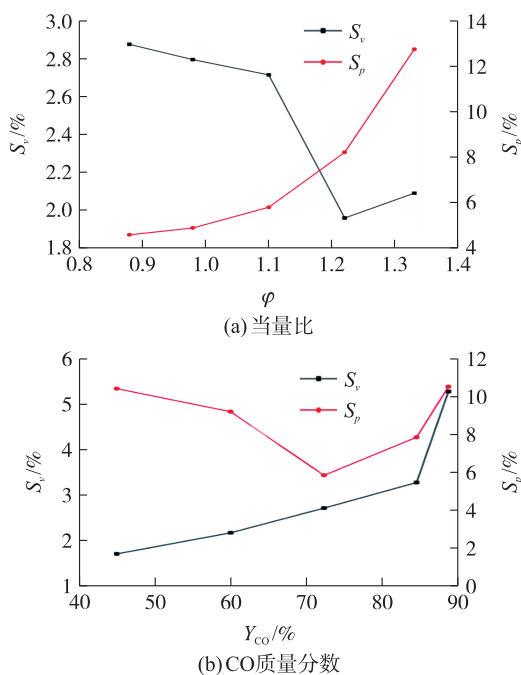


图 15 S_v 和 S_p 变化曲线图

Fig. 15 S_v and S_p variation curve diagram

将从点火到形成稳定 RDW 的自我调节时间定义为 Δt_f , 图 16 分别给出了不同当量比和不同 CO 质量分数下的 Δt_f 变化曲线。由图 16(a) 所示, Δt_f 随当量比增大呈现先减小后增大的趋势, 在当量比为 0.98 时, Δt_f 达到最小值 0.573 ms。这是因为当量比在 1 附近时, 化学反应最快, 释放热量最大, 诱导期最短, 此时维持爆轰波传播的胞格尺寸最小, 且最易起爆及稳定传播。当量比偏离 1 时, 化学反应速率下降, 诱导期变长。这导致胞格尺寸显著增大。爆轰波的不稳定性增强, 结构更粗糙。当当量比趋

近于贫燃极限或富燃极限时, 反应速率极慢, 诱导期很长, 胞格尺寸变得非常大。爆轰波变得极其不稳定, 自持传播相对比较困难。

由图 16(b) 所示, 在当量比为 1.1 时, 随着 CO 质量分数增加, Δt_f 也明显增加。这与 LIU 等^[22] 实验结果相吻合。在当量比较低的情况下, 增加 H_2 的含量能够提升化学反应速率。而 CO 质量分数的增加, 减少了混合气中 H_2 的占比, 从而导致了 Δt_f 的增加。综合图 15 与图 16 可知, 在混合气中降低 CO 质量分数、保持当量比在 1 附近, 都可以使爆轰波的稳定性提高。

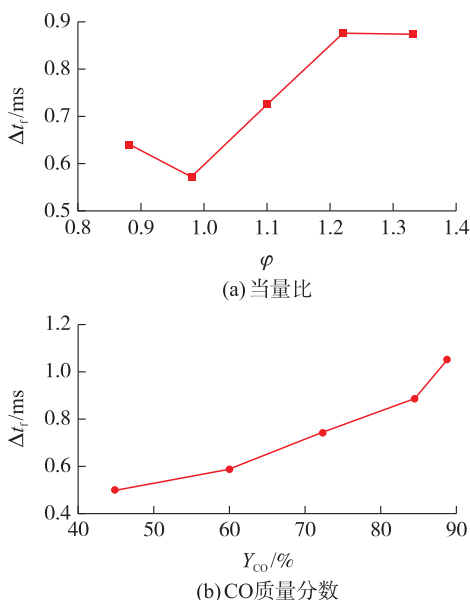


图 16 Δt_f 变化曲线图

Fig. 16 Δt_f variation curve diagram

3 结束语

本文针对 $CH_4/CO/H_2$ 混合气旋转爆轰波传播特性开展了二维数值模拟。主要分析了不同当量比和不同气体组分比例对燃烧室内流场组分分布特征以及旋转爆轰波传播特性的影响。主要结论如下:

①当量比由 0.88 增加到 1.33 时, CH_4 和 H_2 在爆轰反应中几乎能被完全消耗。而在当量比大于 1 时, 在爆轰反应区域, CO 会大量残留。保持当量比为 1.1, 增加 CO 质量分数, 也会使得反应区域残留的 CO 增加。

②在 $CH_4/CO/H_2$ 混合气摩尔比 1:2.5:5.38 时, 通过改变燃料的进气压力来控制当量比。当量比由 0.88 增加到 1.33 时, RDW 均能成功起爆, 并在燃烧室内以单波稳定自持地传播。RDW 的平均传播速度在 1 702 ~ 1 769 m/s 之间, 平均峰值压力在

5.81~6.78 MPa 之间。随着当量比增加, RDW 变得更加稳定。爆轰的自我调节时间随当量比增加, 先减小后增加, 在当量比为 0.98 时达到最小值。

③维持当量比为 1.1, 保持 CH_4 和 H_2 的摩尔比为 1:5.38 不变, 通过改变 CO 在混合气中的质量分数来改变气体组分。CO 质量分数从 45% 增加至 88.7% 时, RDW 的平均速度由 1 807 m/s 下降至 1 649 m/s, RDW 理论 C-J 速度由 1 896 m/s 下降至 1 792 m/s。RDW 的速度亏损以及自我调节时间则随着 CO 质量分数增加而增加。RDW 的稳定性随着 CO 质量分数增加而下降。在 CO 质量分数为 88.7% 时, 燃烧内出现了寄生燃烧现象。寄生燃烧产生的燃烧波与原 RDW 碰撞, 在流场内引发了一系列连锁反应, 因此燃烧室内的 RDW 无法保持单一模态稳定传播。

参考文献

- [1] 王健平, 周蕊, 武丹. 连续旋转爆轰发动机的研究进展[J]. 实验流体力学, 2015, 29(4): 12-25.
WANG Jianping, ZHOU Rui, WU Dan. Progress of continuously rotating detonation engine research[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(4): 12-25. (in Chinese)
- [2] LU F K, BRAUN E M. Rotating detonation wave propulsion; experimental challenges, modeling, and engine concepts [J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(5): 1125-1142.
- [3] ZHAO M, ZHANG H. Origin and chaotic propagation of multiple rotating detonation waves in hydrogen/air mixtures [J]. Fuel, 2020, 275: 117986.
- [4] 康朝辉, 翁春生, 武郁文, 等. 推进剂质量流量对三维非预混氢氧旋转爆轰波传播模态的影响[J]. 弹道学报, 2023, 35(3): 78-88, 110.
KANG Chaohui, WENG Chunsheng, WU Yuwen. Effect of propellant mass flow on propagation mode of three-dimensional non-premixed hydrogen oxygen rotating detonation wave [J]. Journal of Ballistics, 2023, 35(3): 78-88, 110. (in Chinese)
- [5] LIU S J, PENG H Y, LIU W D, et al. Effects of cavity depth on the ethylene-air continuous rotating detonation [J]. Acta Astronautica, 2020, 166: 1-10.
- [6] SATO T, RAMAN V. Detonation structure in ethylene/air-based non-premixed rotating detonation engine [J]. Journal of Propulsion and Power, 2020, 36(5): 752-762.
- [7] 刘国秋, 蔡承霖, 孙宇航, 等. 基于弯型预爆管的煤油燃料旋转爆轰发动机起爆实验研究[J]. 弹道学报, 2024, 36(1): 26-34, 56.
LIU Guoqiu, CAI Chenglin, SUN Yuhang, et al. Experimental study on initiation characteristics of kerosene rotating detonation engine based on curved pre-detonation tube [J]. Journal of Ballistics, 2024, 36(1): 26-34, 56. (in Chinese)
- [8] MENG H, ZHENG Q, WENG C, et al. Propagation mode analysis of rotating detonation waves fueled by liquid kerosene [J]. Acta Astronautica, 2021, 187: 248-258.
- [9] LI X, LI J, QIN Q, et al. Experimental study on detonation characteristics of liquid kerosene/air rotating detonation engine [J]. Acta Astronautica, 2024, 215: 124-134.
- [10] 葛高杨, 马元, 侯世卓, 等. 当量比对汽油燃料两相旋转爆轰发动机工作特性影响实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(11): 24-35.
GE Gaoyang, MA Yuan, HOU Shizhuo, et al. Experimental study on the effect of equivalent ratio on working characteristics of gasoline fuel two-phase rotating detonation engine [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(11): 24-35. (in Chinese)
- [11] 祝文超. 基于煤粉-空气的气固两相旋转爆轰发动机的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
ZHU Wenchao. Numerical simulation of gas-solid two phase rotating detonation engines based on coal and air [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023. (in Chinese)
- [12] ZHU W, WANG Y. Effect of hydrogen flow rate and particle diameter on coal-hydrogen-air rotating detonation engines [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(2): 1328-1342.
- [13] WU W, WANG Y, HAN W, et al. Experimental research on solid fuel pre-combustion rotating detonation engine [J]. Acta Astronautica, 2023, 205: 258-266.
- [14] LV Z, XIA Z, LIU B, et al. Preliminary experimental study on solid-fuel rocket scramjet combustor [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2017, 2(18): 106-112.
- [15] 程关兵, 李俊仙, 李书明, 等. 氢气/丙烷/空气预混气体爆轰性能的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(2): 249-254.
CHENG Guanbing, LI Junxian, LI Shuming, et al. An experimental study on detonation characteristics of binary fuels hydrogen/propane-air mixtures [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(2): 249-254. (in Chinese)
- [16] ZHONG Y, JIN D, WU Y, et al. Investigation of rotating detonation wave fueled by "ethylene-acetylene-hydrogen" mixture [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(31): 14787-14797.
- [17] WANG Y, LE J. A rotating detonation engine using methane-ethylene mixture and air [J]. Acta Astronautica, 2021, 188: 25-35.
- [18] ZHAI D W, ZHAO N B, JIN S, et al. Numerical study on the characteristics of rotating detonation wave with multicomponent mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(76): 29786-29797.
- [19] ZHOU S, MA H, ZHOU C, et al. Experimental research on the propagation process of rotating detonation wave with a gaseous hydrocarbon mixture fuel [J]. Acta Astronautica, 2021, 179: 1-10.
- [20] 吴敏宣, 白桥栋, 翁春生, 等. $\text{C}_2\text{H}_4/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 混合气旋转爆轰波传播特性数值模拟研究[J]. 推进技术, 2022, 43(11): 303-314.
WU Minxuan, BAI Qiaodong, WENG Chunsheng, et al. Numerical simulation of rotating detonation wave propagation characteristics of $\text{C}_2\text{H}_4/\text{CH}_4/\text{H}_2$ mixture [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(11): 303-314. (in Chinese)
- [21] CHACON F. Non-ideal phenomena in rotating detonation combustors [M]. Ann Arbor, MI: University of Michigan, 2020.
- [22] LIU Z, YANG J, BAI Q, et al. The effect of CO content on $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2$ rotating detonation wave propagation characteristics [J]. Physics of Fluids, 2024, 36(8): 085169.