

径向内侧侧向膨胀对环形通道内爆震波传播的影响

苏晓宇¹, 徐子阳¹, 曹力文¹, 王可^{1,2}, 范玮¹

(1. 西北工业大学动力与能源学院, 西安 710129; 2. 陕西省航空动力系统热科学重点实验室, 西安 710129)

摘要: 针对爆震波在无内壁约束环形通道内的传播过程, 采用乙烯、氧气和氮气预混气, 开展了环形通道内径(r_i)、预混气氮气稀释比对爆震波传播特性影响的数值模拟研究, 获得了不同因素对爆震波传播特性的影响。结果表明, 环形通道内径减小, 预混气氮气稀释比升高, 均会使爆震波传播稳定性下降。在环形通道内稳定传播时, 爆震波会在外壁面处形成马赫反射或规则反射两种反射模式。爆震波能否在半封闭环形通道内稳定传播主要决定于环形通道内径 r_i 和平均胞格尺寸 λ_a 的比值。当无量纲内径 $r_i/\lambda_a > 17.5$ 时, 爆震波在环形通道维持稳定传播; 当 $9.5 < r_i/\lambda_a \leq 17.5$ 时, 为弱不稳定模态; 当 $r_i/\lambda_a \leq 9.5$ 时, 爆震波存在严重解耦现象, 内壁面处法向传播速度小于理论 C-J 速度的 60%, 为强不稳定模态。

关键词: 侧向膨胀; 传播模态; 临界条件; 胞格尺寸

中图分类号: V231.2⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)06-0626-08

Propagation Characteristics of Detonation Waves in Curved Channels Influenced by Lateral Expansion on the Inner Side

Su Xiaoyu¹, Xu Ziyang¹, Cao Liwen¹, Wang Ke^{1,2}, Fan Wei¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Thermal Sciences in Aeroengine System, Xi'an 710129, China)

Abstract: In order to clarify the impact of channel curvature and dilution ratio on the propagation in a curved channel considering the lateral expansion on the inner side, this numerical study has been conducted utilizing a mixture of ethylene, oxygen, and nitrogen. The results indicate that either the decrease in channel curvature or the increase in dilution ratio will result in propagation instability. When the detonation wave propagates stably, two reflection modes, i.e., Mach reflection and regular reflection, are obtained near the outer wall. Whether the detonation wave propagates stably in the semi-confined curved channel mainly depends on the ratio of the inner radius (r_i) to the average cell width λ_a . When the non-dimensional inner radius exceeds 17.5, i.e., $r_i/\lambda_a > 17.5$, the detonation wave maintains stable propagation. When $9.5 < r_i/\lambda_a \leq 17.5$, the detonation wave propagates in the weakly unstable mode. When $r_i/\lambda_a \leq 9.5$, severe decoupling of the detonation wave occurs, and the normal velocity near the inner wall is smaller than 60% of the C-J velocity, representing the highly unstable propagation mode.

Keywords: lateral expansion; propagation mode; critical condition; cell width

收稿日期: 2025-01-14.

作者简介: 苏晓宇(2001—), 女, 硕士研究生, sxy0907@mail.nwpu.edu.cn.

通信作者: 王可, 男, 博士, 教授, wangk@nwpu.edu.cn.

近年来, 旋转爆震燃烧室 (rotating detonation combustion, RDC) 作为一种可行爆震燃烧应用形式受到了广泛关注^[1-3]. 旋转爆震燃烧室通常采用环形、盘形、空筒形等多种结构. 在实际应用中, 不同结构 RDC 中旋转爆震波均在有一定曲率非完全受限通道中传播. 对于盘形燃烧室, 爆震波沿一定曲率通道传播, 径向缺少固体壁面约束导致侧向膨胀发生, 引起爆震波峰值压力下降, 激波和化学反应区极易解耦, 造成爆震波传播不稳定甚至熄灭^[4].

爆震波在具有一定曲率的环形通道中稳定传播时, 爆震波波面并非直管中的近似平面结构, 而是呈特定弯曲型面. Kudo 等^[5]采用不同内侧半径(r_i)的方形截面环形通道对爆震波传播特性开展了研究, 发现在初始压力较高、弯管内径较大条件下, 旋转爆震波更稳定, 得到爆震波稳定传播临界条件是 $r_i = 14\lambda \sim 40\lambda$ (胞格尺寸). 然而, Kudo 等忽略了爆震波法向速度沿波面存在内侧低、外侧高的分布差异. 在此研究基础上, Nakayama 等^[6]考虑了爆震波法向速度随径向位置的变化, 采用多种反应物开展了实验研究, 对爆震波稳定传播时的波面形状进行了重构, 得出爆震波在环形通道中稳定传播的临界条件为 $r_i \geq 23\lambda$, 结论与反应物种类无关, 具有普适性, 为不同混合物条件下爆震波波面形状重构提供了依据. 对于爆震波在环形通道中的传播模式, Yuan 等^[7]采用 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$ 混气开展了数值模拟, 将爆震波传播模式分为不稳定、过渡和稳定 3 种模式, 模式转换的临界条件分别为 $r_i/\lambda = 13.7$ 和 $r_i/\lambda = 22.3$. 在此基础上, 袁雪强等^[8]以马赫干变化为判断依据, 将爆震波传播模式细分为马赫干增长型不稳定传播模式、马赫干平稳型不稳定传播模式、马赫干衰减型不稳定传播模式等 9 种传播模式, 但并未给出不同模式之间转变的临界条件. 曹力文等^[9-10]关注马赫干变化情况, 采用 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 混气开展了研究, 数值模拟获得爆震波稳定传播条件为 $r_i/\lambda > 14$, 实验得到爆震波在封闭环形通道内稳定传播的临界条件是 $r_i = 18.6\lambda \sim 24.2\lambda$. Shi 等^[11]将环形通道径向高度(h)纳入考虑, 进一步获得强不稳定、弱不稳定、稳定模式的临界条件分别为 $h = 0.375r_{in} - 0.5\lambda$ 和 $h = 0.375r_{in} + 0.5\lambda$. 史浩宁等^[12]还考虑了爆震燃烧室可能存在新鲜混气填充不均匀的问题, 定义填充不完全间隙(i), 在固定环形通道内径和通道高度条件下将爆震波传播模式分为稳定、弱不稳定、强不稳定和缓燃 4 种模式, 模式转换的临界条件分别为 $i = h - 2.0\lambda$ 、 $i = h - 1.0\lambda$ 和 $i = h - 0.6\lambda$.

上述研究针对封闭环形通道, 未考虑侧向膨胀影响. 爆震波在环形通道内传播时, 若与波面垂直的方

向缺少壁面约束, 爆震波和高温高压产物将发生侧向膨胀, 造成爆震波峰值压力和传播速度亏损, 严重时引起爆震波熄灭. 1963 年, Dabora^[13]采用可变形薄膜壁面模拟侧向膨胀的形成条件, 使用纹影捕获流场结构, 得到爆震波速度亏损超过 8% ~ 10% 时会发生解耦. 刘世杰等^[14]采用 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 7\text{Ar}$ 混气对侧向膨胀的爆震波传播特性开展了数值模拟, 膨胀区填充氩气, 也得到了相似结果, 但未得出临界条件. Wang 等^[15]采用 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 研究了侧向膨胀条件下稀释比、当量比和预混气高度对传播速度、峰值压力和传播模式的影响, 发现稀释比越小、当量比越接近 1、预混气高度越高, 爆震波抵御侧向膨胀的能力越强, 得到爆震波稳定传播的临界高度 $h \geq 3\lambda$. 此外, Rudy 等^[16-17]采用 H_2 /空气预混气, 对比研究了等截面直管中单侧膨胀与双侧膨胀影响下爆震波传播特性. 结果表明, 单侧膨胀时, 爆震波稳定传播要求预混气高度(h)满足 $h \geq 3.6\lambda$. 双侧膨胀时, 稳定传播要求预混气高度 $h \geq 5.5\lambda$, 可见侧向膨胀导致爆震波稳定传播能力明显下降.

综上所述, 现有研究获得了不同条件下的爆震波传播特性和临界条件, 但大部分仅关注了通道曲率或侧向膨胀的单一影响, 与盘形旋转爆震燃烧室真实工作状态不符. 因此, 针对常用的盘形旋转爆震燃烧室, 对比有、无径向内侧侧向膨胀情况下受曲率影响的爆震波传播特性, 揭示旋转爆震波稳定传播临界条件, 对 RDC 设计和工作过程调控具有重要意义.

1 数值模拟方法及验证

1.1 数值模拟方法

忽略爆震波的轴向差异, 可将爆震波在环形通道中的三维传播问题简化为二维问题. 计算过程忽略黏性和壁面传热影响, 采用压力出口边界条件, 出口压力为环境压力 101 kPa. 结合开源 CFD 平台 OpenFOAM 中的 rhoReactingFoam 和 rhoCentralFoam^[18]两种求解器, 通量离散格式采用 Kurganov 二阶中心差分方法^[19], 时间离散格式采用瞬态二阶 Crank-Nicolson 方法^[20], 针对多步复杂反应机理和胞格求解进行优化, 发展了 rhoDetFoam 求解器, 可较为精确地求解无黏条件下的爆震波传播过程.

图 1 为半封闭环形通道二维计算模型示意. 红色区域为 3 个半圆形高温高压起爆点 (3 000 K、2 MPa), 点火起爆, 爆震波在直管稳定后传入环形通道. 黄色区域为预混气填充区, 初始充满 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混气. 灰色区域为 20 mm 高的径向侧向膨胀区, 填

充介质为 N_2 , 模拟径向内侧侧向膨胀. 为了便于描述, 将预混气填充区与径向侧向膨胀区域之间分界线的半径称为通道内径 r_1 .

半封闭环形通道内侧无固体壁面约束, 爆震波传播发生径向向内侧向膨胀, 波面形状变化如图 2 所示. 受径向侧向膨胀影响, 预混气填充区域与径向侧向膨胀区分界线处 (P_1 位置), 爆震波法向速度方向与分界线存在夹角, 须与其他径向位置进行相同处理后才能得到法向速度.

当爆震波在半封闭环形通道内维持稳定波面形状传播时, 波面上任意处角速度相等且为定值 ω , 以

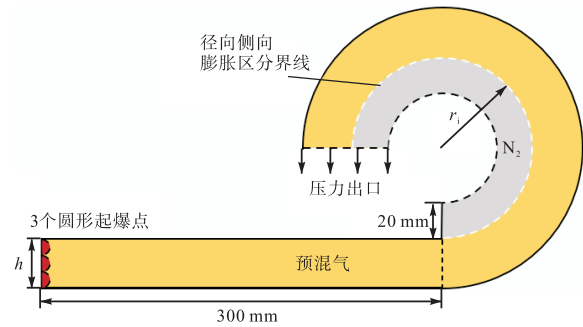


图 1 半封闭环形通道二维计算物理模型
Fig.1 2D physical model of the semi-confined curved channel

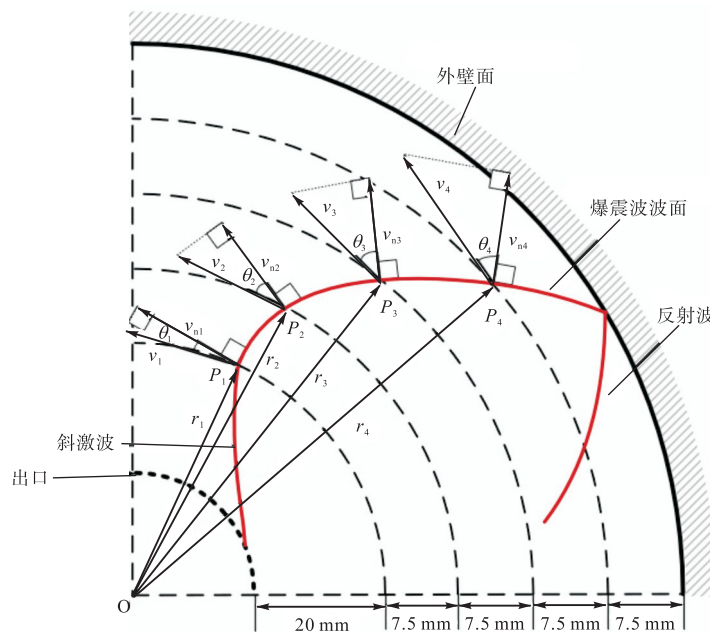


图 2 内侧径向侧向膨胀时不同位置处的爆震波速度示意
Fig.2 Diagram of the wave velocity for the lateral expansion on the inner side

波面上 3 个不同径向位置 P_1 、 P_2 、 P_3 为例. P_m ($m=1, 2, 3$) 处爆震波切向速度分别为 v_m , 法向速度为 v_{nm} , 对应半径为 r_m , 切向速度与法向速度的夹角为 θ_m . 获得爆震波切向速度 v_m 与夹角 θ_m 后, 可通过计算得到不同径向位置处爆震波法向速度, 通过分析不同径向位置处法向速度, 可得到不同条件下爆震波法向速度的变化规律.

$$v_m = \omega r_m \quad (1)$$

$$v_{nm} = v_m \cos \theta_m \quad (2)$$

1.2 化学反应机理选取

为确定合适的化学反应机理, 采用 $300 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的二维直管作为物理模型, 在温度 $T_0 = 300 \text{ K}$ 、初始压力 $p_0 = 101 \text{ kPa}$ 、 $C_2H_4 : N_2 : O_2$ 摩尔比为 $1 : 3 : 3$ 条件下, 对比了 6 组分 2 步反应机理^[21]、6 组分 3 步反应机理^[22]、10 组分 10 步反应机理^[23]、12 组分 22 步反应机理^[24] 共 4 种化学反应机理. 爆震波传播

过程中, 入射激波、横波和马赫干碰撞形成的三波点在爆震波波面上不断移动, 导致固定监测点测得的爆震波峰值压力并无实际参考意义. 因此, 重点关注爆震波速度参数变化, 以选择合适的化学反应机理.

采用 0.200 mm 网格尺寸, 对 4 种化学反应机理进行数值计算, 爆震波沿程速度如图 3 所示, 虚线为理论 C-J 速度值 (2110.4 m/s). 结果表明, 10 组分 10 步反应机理计算得到的速度误差最小, 为 1.84% . 因此, 选择 10 组分 10 步反应机理开展后续数值模拟.

1.3 网格无关性验证

捕捉爆震波胞格结构对数值模拟中网格精度要求较高, 一般采用 $0.020 \sim 0.800 \text{ mm}$ 的网格尺寸才能计算得到爆震波波面精细结构与三波点运动轨迹. 采用 10 组分 10 步反应机理, 在 $300 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的二维直管中不同网格尺寸下 (0.300 mm 、 0.200 mm 、 0.133 mm 、 0.089 mm) 计算得到的爆震波

沿程速度如图 4 所示. 可以看出, 不同网格尺寸下爆震波沿程速度与理论值的平均误差变化均小于 2%, 说明上述网格尺寸下爆震波传播速度对网格尺寸的敏感性较低.

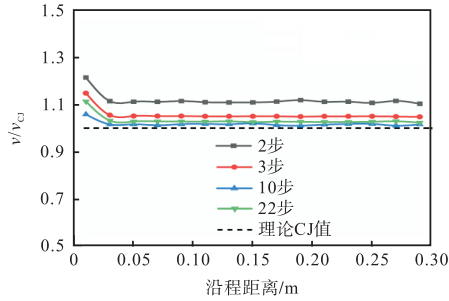


图 3 不同化学反应机理下爆震波沿程速度

Fig.3 Velocity of the detonation wave obtained utilizing different chemical reaction mechanisms

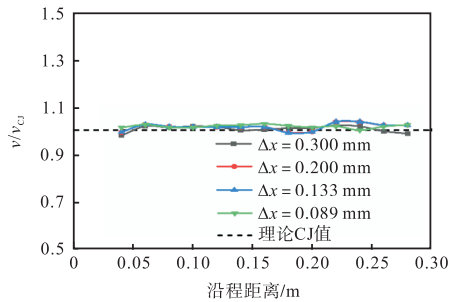


图 4 不同网格尺寸下无量纲爆震波沿程速度

Fig.4 Dimensionless velocity of the detonation wave obtained under different grid sizes

通过记录不同位置随时间累计的最大压力, 可以得到通道内三波点的运动轨迹, 从而得到爆震波胞格分布. 图 5 为 4 种网格尺寸下计算得到的爆震波数值胞格, 网格尺寸越小计算精度越高, 可得到更清晰数值胞格. 其中, 网格尺寸为 0.300 mm 时, 数值胞格尺寸与实验值差异较大. 当网格尺寸小于 0.200 mm 时, 数值胞格几乎没有差异, 平均胞格尺寸为 3.33 mm, 接近对应工况下实验获得的胞格尺寸. 因此, 综合计算资源与计算精度考虑, 选定网格尺寸为 0.200 mm 进行后续数值计算.

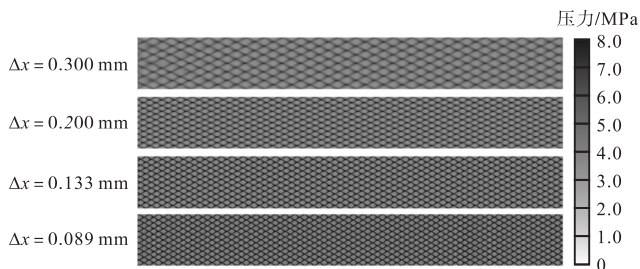


图 5 不同网格尺寸下的爆震波数值胞格

Fig.5 Numerical cell structures obtained under different grid sizes

1.4 实验验证

为准确反映胞格尺寸受预混气氮气稀释比 β 的影响, 基于上文选取的 10 组分 10 步化学反应机理, 网格尺寸为 0.200 mm, 在常温常压情况下, 采用化学恰当比的乙烯/氧气/氮气混合物, 将不同稀释比条件下数值计算得到的胞格尺寸与实验测得的胞格尺寸进行对比, 如图 6 所示. 稀释比升高导致化学反应活性降低, 胞格尺寸增大, 数值计算得到的胞格尺寸与实验结果变化趋势相同, 且尺寸吻合较好.

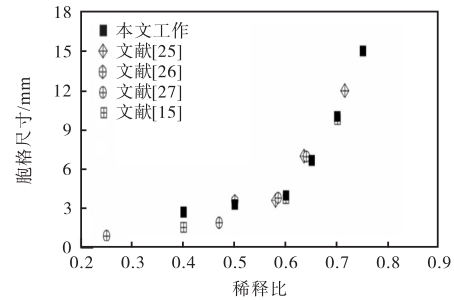


图 6 不同稀释比下的数值胞格尺寸与实验结果对比

Fig.6 Comparison of the numerical cell sizes with experimental results under different dilution ratios

2 结果与分析

维持初始温度 $T_0 = 300\text{ K}$ 、初始压力 $p_0 = 101\text{ kPa}$ 、当量比 $\varphi = 1$ 不变, 改变通道径向侧向膨胀区分界线处半径 (r_1 为 25 mm、45 mm、65 mm、85 mm, 位置如图 1 所示, 简单起见, 下文统称为内径) 和稀释比 (β 为 0.50、0.65、0.75, 定义见式 (3)) 开展了数值模拟, 研究了通道曲率和稀释比对半封闭环形通道内爆震波传播特性的影响.

$$\beta = \frac{V_{N_2}}{V_{N_2} + V_{O_2}} \quad (3)$$

式中: V_{N_2} 为氧化剂中氮气的体积, V_{O_2} 为氧化剂中氧气的体积.

当通道曲率和稀释比改变时, 爆震波在环形通道内以不同模式传播. 根据爆震波在环形通道内传播时内表面附近法向速度亏损大小, 将传播模式分为稳定爆震模式、弱不稳定模式和强不稳定模式. 当法向速度亏损不超过 20% 时, 认为爆震波在环形通道内稳定传播, 为稳定爆震模式. 当法向速度降低至 C-J 速度的 60% ~ 80% 时, 爆震波传播为弱不稳定模式. 当法向速度降至理论值 60% 以下时, 定义此时爆震波处于强不稳定模式.

2.1 通道曲率对爆震波传播特性的影响

固定 $T_0 = 300\text{ K}$ 、 $p_0 = 101\text{ kPa}$ 、 $\varphi = 1$ 、 $\beta = 0.50$ 不变, 改变内径 r_1 为 25 mm、45 mm、65 mm、85 mm 开

展数值模拟,下面将对不同传播模态时爆震波流场特征和法向速度变化展开分析.

通道内径为 85 mm 和 65 mm 时,半封闭环形通道内爆震波传播特性类似,因此仅对通道内径 $r_i = 65$ mm 的情况展开分析. 图 7 为 $r_i = 65$ mm 时爆震波不同径向位置处法向速度沿程变化,可见在不同径向位置处爆震波法向速度均在理论 C-J 速度的 80% 以上,为稳定爆震模态.

$r_i = 65$ mm 时爆震波稳定进入环形通道一段时间后,入射楔角小于马赫反射向规则反射转变的临界楔角,在外壁面形成如图 8(a) 所示的马赫反射结构. 如

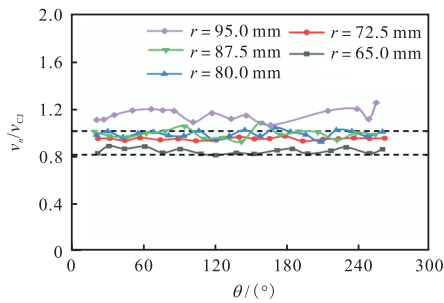


图 7 稳定模态下的爆震波无量纲法向速度沿程变化 ($r_i = 65$ mm)

Fig.7 Variation of the dimensionless normal velocity with the circumferential position under the stable detonation mode ($r_i = 65$ mm)

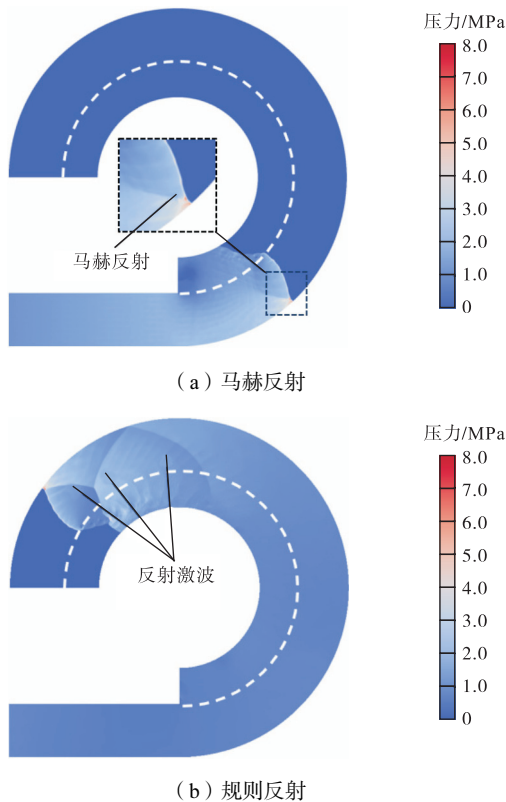


图 8 爆震波马赫反射向规则反射的转变

Fig.8 The transition from Mach reflection to regular reflection of detonation wave

图 8(b) 所示,爆震波入射楔角大于马赫反射向规则反射转变的临界楔角后,在外壁面处形成规则反射,无明显马赫干结构.

图 9 为 $r_i = 45$ mm 时爆震波不同径向位置处法向速度沿程变化,爆震波在半封闭环形通道约 90° 和 180° 位置附近出现两次局部轻微解耦再起爆,表明径向侧向膨胀使爆震波传播稳定性下降,此时爆震波法向速度亏损小于 40%,爆震波以弱不稳定模态传播.

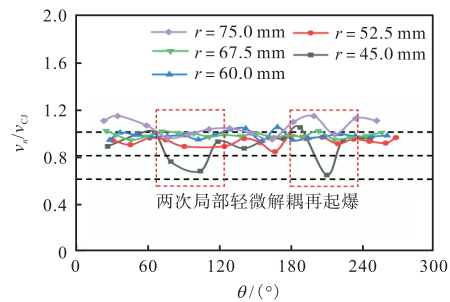


图 9 弱不稳定模态下的爆震波无量纲法向速度沿程变化 ($r_i = 45$ mm)

Fig.9 Variation of the dimensionless normal velocity with the circumferential position under the weakly unstable detonation mode ($r_i = 45$ mm)

以爆震波在约 90° 位置出现的局部轻微解耦再起爆为例,爆震波解耦后出现波面褶皱,产生局部热点,引发横向爆震,如图 10 所示. 此时弯管曲率增大,爆震波波面弯曲程度降低,爆震波与反射激波之间的夹角减小,导致前导激波与外壁面形成的入射楔角小于临界楔角,无规则反射现象发生.

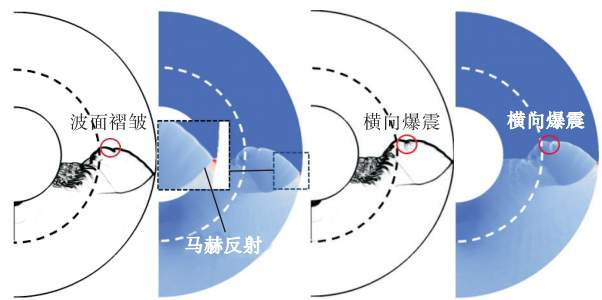


图 10 爆震波解耦再起爆过程 ($r_i = 45$ mm)

Fig.10 Detonation wave decoupling re-initiation process ($r_i = 45$ mm)

当 $r_i = 25$ mm 时,爆震波不同径向位置处法向速度沿程变化如图 11 所示. 此时爆震波内侧法向速度始终处于较低水平,仅在半封闭环形通道内约 90° 处解耦后出现一次再起爆过程,爆震波速度最小降至理论 C-J 速度的 25.9%,此时爆震波为强不稳定模态. 如图 12 所示,传播过程中整个波面几乎已全部

解耦, 仅有外壁面附近小部分区域前导激波与化学反应区仍未分离。

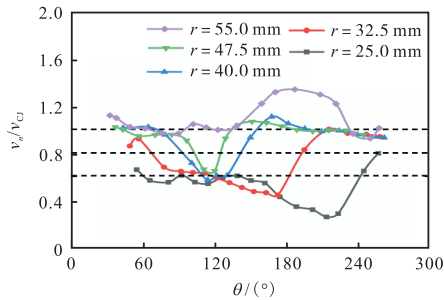


图 11 强不稳定模态爆震波法向速度沿程变化 ($r_i = 25$ mm)

Fig.11 Variation of the dimensionless normal velocity with the circumferential position under the strongly unstable detonation mode ($r_i = 25$ mm)

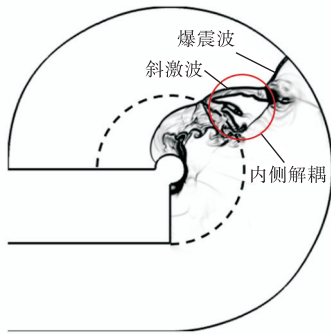


图 12 爆震波内侧解耦情形下的数值纹影结果 ($r_i = 25$ mm)

Fig.12 Numerical schlieren diagram obtained for decoupling of the detonation wave near the inner side ($r_i = 25$ mm)

2.2 稀释比对爆震波传播特性的影响

稀释比影响预混气化学反应活性, 进而影响爆震波传播特性. 固定 $r_i = 65$ mm、 $\varphi = 1$ 、 $T_0 = 300$ K、 $p_0 = 101$ kPa 不变, 改变稀释比 (0.50、0.65、0.75) 进行数值模拟, 研究了稀释比对半封闭环形通道中爆震波传播特性的影响. 稀释比为 $\beta = 0.50$ 时, 爆震波在半封闭环形通道内传播均为稳定模态, 已在前文进行了分析, 不再赘述。

图 13 为稀释比 $\beta = 0.65$ 时, 爆震波不同径向位置处法向速度的沿程变化, 可见爆震波速度亏损均不超过 40%, 均为弱不稳定模态。

如图 14 所示, 半封闭环形通道内, 爆震波传播受径向侧向膨胀影响, 马赫反射三波点轨迹与填充气体分界线之间仅有横波向内侧传播, 轨迹呈稀疏扇状结构. 此时, 爆震波依靠外壁面产生的横波传播至解耦区域使其恢复, 未见由高温高压点引起的重新起爆现象, 爆震波法向速度波动程度小。

图 15 为稀释比 $\beta = 0.75$ 时, 爆震波不同径向位置处法向速度的沿程变化, 爆震波法向速度多次降至理论 C-J 速度 60% 以下, 为强不稳定模态. 与 $\beta = 0.65$ 相比, 爆震波法向速度波动更为剧烈, 解耦加剧。

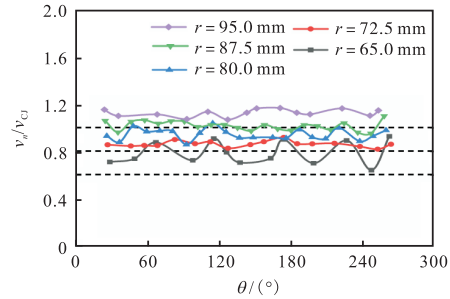


图 13 稀释比为 0.65 时爆震波法向速度的沿程变化

Fig.13 Variation of the dimensionless normal velocity with the circumferential position at a dilution ratio of 0.65

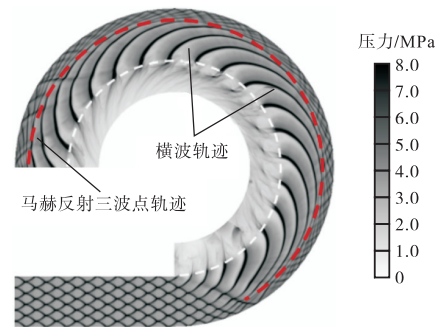


图 14 稀释比 0.65 时的数值胞格

Fig.14 Numerical cell structure obtained at a dilution ratio of 0.65

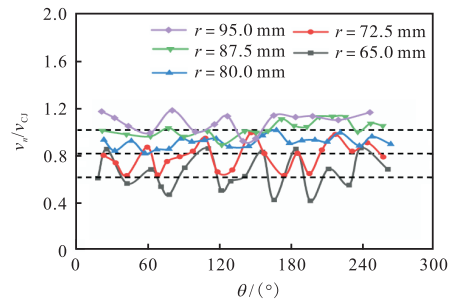


图 15 稀释比为 0.75 时爆震波法向速度的沿程变化

Fig.15 Variation of the dimensionless normal velocity with the circumferential position at a dilution ratio of 0.75

对应工况下的胞格分布如图 16 所示, 稀释比增大, 化学反应活性降低, 在直管内稳定传播的平均胞格尺寸增加, 约为 15 mm. 在半封闭环形通道中, 径向侧向膨胀作用影响整个预混气填充区, 胞格结构已完全消失, 仅有外壁面不断产生横波向内侧传播的痕迹, 外壁面对爆震波的反射增强作用已无法抵御径向侧向膨胀带来的影响。

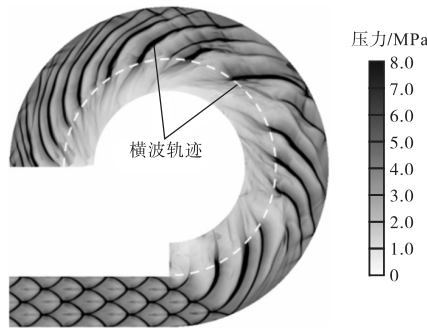


图 16 稀释比 0.75 时的数值胞格

Fig.16 Numerical cell structure obtained at a dilution ratio of 0.75

2.3 爆震波传播模式分布

爆震波能否在环形通道内稳定传播取决于通道内径 r_i 和平均胞格尺寸 λ 的比值. 爆震波在半封闭环形通道内爆震波传播模式分布如图 17 所示. 在不同内径条件下, 通过改变稀释比调节爆震波胞格尺寸, 综合分析对应的传播模式, 得到爆震波传播模式转变的临界条件.

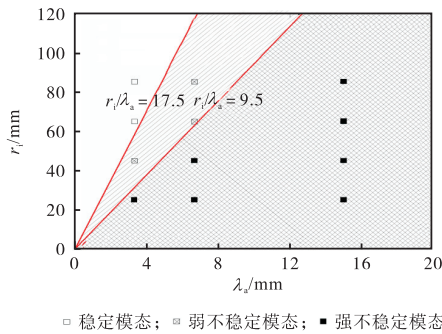


图 17 半封闭环形通道内的爆震波传播模式分布

Fig.17 Distribution of the propagation mode of the detonation wave in a semi-confined curved channel

爆震波能否在半封闭环形通道内稳定传播均取决于环形通道内径 r_i 和平均胞格尺寸 λ_a 的比值. 半封闭环形通道内, 爆震波传播受径向内侧侧向膨胀影响, 当无量纲内径 $r_i/\lambda_a > 17.5$ 时, 爆震波以稳定模式传播; 当 $9.5 < r_i/\lambda_a \leq 17.5$ 时, 转变为弱不稳定模式; 当 $r_i/\lambda_a \leq 9.5$ 时, 为强不稳定模式.

需要指出目前网格尺寸较大, 在环形通道外壁面附近, 可能无法针对较强爆震波的胞格尺寸进行细致捕捉, 受限于计算资源, 暂未采取更小的网格尺寸开展深入研究. 同时, 本文设置工况较少, 所得结论具有一定局限性.

3 结论

采用化学恰当比 $C_2H_4/O_2/N_2$ 混合物, 研究了爆

震波在半封闭环形通道中不同内径 (25 mm、45 mm、65 mm、85 mm) 和稀释比 (0.50、0.65、0.75) 条件下的传播过程. 通过分析爆震波传播过程流场结构与胞格分布, 获得了通道曲率和稀释比对爆震波传播特性的影响规律, 具体结论如下:

(1) 通道内径减小, 内壁面衍射效应增强, 更难抵御径向内侧侧向膨胀的影响, 导致爆震波传播稳定性下降.

(2) 稀释比提高, 预混气化学反应活性下降, 爆震波峰值压力降低, 横波数量减少, 平均胞格尺寸增大, 前导激波与化学反应区更易受衍射效应影响而解耦.

(3) 半封闭环形通道内, 当无量纲内径 $r_i/\lambda_a > 17.5$ 时, 爆震波为稳定爆震模式. 当 $9.5 < r_i/\lambda_a \leq 17.5$ 时, 爆震波传播转变为弱不稳定模式. 当 $r_i/\lambda_a \leq 9.5$ 时, 爆震波为强不稳定模式.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Rankin B A, Kaemming T A, Theuerkauf S W, et al. Overview of performance, application, and analysis of rotating detonation engine technologies[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(1): 131-143.
- [3] Kailasanath K. The rotating-detonation-wave engine concept: A brief status report[C] //49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Kissimmee, Florida, 2011, AIAA 2011-0580.
- [4] Nakayama H, Moriya T, Kasahara J, et al. Stable detonation wave propagation in rectangular-cross-section curved channels[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(1): 859-869.
- [5] Kudo Y, Nagura Y, Kasahara J, et al. Oblique detonation waves stabilized in rectangular-cross-section bent tubes[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33: 2319-2326.
- [6] Nakayama H, Moriya T, Kasahara J, et al. Front shock behavior of stable detonation waves propagating through rectangular cross-section curved channels[C] // 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Kissimmee, Florida, 2012, AIAA 2012-0618.
- [7] Yuan X, Zhou J, Lin Z, et al. Adaptive simulations of detonation propagation in 90-degree bent tubes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(40):

- 18259-18272.
- [8] 袁雪强, 蒋露欣, 张多, 等. 爆震波通过环形通道传播模式试验研究[J]. 火箭推进, 2021, 47(6): 101-110.
Yuan Xueqiang, Jiang Luxin, Zhang Duo, et al. Experimental study on propagation mode of detonation wave in annular channels[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2021, 47(6): 101-110(in Chinese).
- [9] 曹力文, 王可, 徐子阳, 等. 弯曲通道内的爆震波传播特性实验研究[J]. 航空学报, 2024, 45(24): 179-191.
Cao Liwen, Wang Ke, Xu Ziyang, et al. Experimental study on propagation characteristics of stable detonation waves in curved channels[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(24): 179-191(in Chinese).
- [10] 曹力文, 徐子阳, 王可, 等. 环形通道内爆震波传播特性数值模拟研究[J]. 推进技术, 2025, 46(9): 182-191.
Cao Liwen, Xu Ziyang, Wang Ke, et al. Numerical study on propagation characteristics of detonation waves in an annular channel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2025, 46(9): 182-191(in Chinese).
- [11] Shi H, Wang K, Xiao Q, et al. Influence of the radial geometric dimensions on the propagation characteristics of detonation waves in an annular channel[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(12): 127124.
- [12] 史浩宁, 王可, 焦中天, 等. 填充不均匀对环形通道内爆震波传播特性的影响数值研究[J]. 推进技术, 2025, 46(8): 106-118.
Shi Haoning, Wang Ke, Jiao Zhongtian, et al. Numerical study on impact of non-uniform filling on propagation characteristics of detonation waves in annular channel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2025, 46(8): 106-118(in Chinese).
- [13] Dabora E K. The Influence of a Compressible Boundary on the Propagation of Gaseous Detonations[D]. Michigan: The University of Michigan, 1963.
- [14] 刘世杰, 覃慧, 林志勇, 等. 连续旋转爆震波细致结构及自持机理[J]. 推进技术, 2011, 32(3): 431-436.
Liu Shijie, Qin Hui, Lin Zhiyong, et al. Detailed structure and propagating mechanism research on continuous rotating detonation wave [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(3): 431-436(in Chinese).
- [15] Wang Z, Wang K, Zhao M, et al. Experimental investigation on the propagation characteristics of detonations in a semi-confined straight channel[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 123: 110329.
- [16] Rudy W, Dziubanii K, Zbikowski M, et al. Experimental determination of critical conditions for hydrogen-air detonation propagation in partially confined geometry[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7366-7373.
- [17] Rudy W, Kuznetsov M, Porowski R, et al. Critical conditions of hydrogen-air detonation in partially confined geometry[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 1965-1972.
- [18] Christopher J G, Henry G W. Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a colocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows[J]. *Numerical Methods in Fluids*, 2010, 63(1): 1-21.
- [19] Kurganov A, Tadmor E. New High-resolution central schemes for non-linear conservation laws and convection-diffusion equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 160: 241-282.
- [20] 傅德薰, 马延文. 计算流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
Fu Dexun, Ma Yanwen. *Computational Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002(in Chinese).
- [21] Franzelli B, Riber E, Sanjosé M, et al. A two-step chemical scheme for kerosene-air premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7): 1364-1373.
- [22] Franzelli B, Riber E, Gicquel L Y M, et al. Large eddy simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(2): 621-637.
- [23] Singh D J, Jachimowski C J. Quasi-Global reaction model for ethylene combustion[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(1): 213-216.
- [24] Westbrook C K, Dryer F L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 1981, 27(1-2): 31-43.
- [25] Kaneshige M J. Gaseous Detonation Initiation and Stabilization by Hypervelocity Projectiles[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1999.
- [26] Kaneshige M, Shepherd J E. Detonation Database[R]. Pasadena, CA, USA: California Institute of Technology, 1997.
- [27] Moen I O, Donato M, Knystautas R, et al. The influence of confinement on the propagation of detonations near the detonability limits[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1981, 18(1): 1615-1622.