C₂H₄/CH₄/H₂混合气旋转爆轰波传播特性数值 模拟研究^{*}

吴敏宣1, 白桥栋1, 翁春生1, 孟豪龙1, 韩家祥1, 张世健1, 王研艳2

南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏南京 210094;
 南京工业职业技术大学 电气工程学院, 江苏南京 210023)

摘 要:为了研究煤油裂解气旋转爆轰的传播特性,以C₂H₄/CH₄/H₂混合气为替代燃料,空气为氧 化剂,利用基于OpenFOAM的计算程序rhoReactingCentralFoam开展了该混合气的二维旋转爆轰过程数值 模拟研究。研究了进气压力、当量比和混合气组分比例对旋转爆轰波传播特性的影响,探究了旋转爆轰 波在传播过程中模态转变的机理。结果表明:在不同计算条件下旋转爆轰波呈现四种传播模态:单波模 态、双波对撞模态、单/双波混合模态以及三波模态。双波对撞时,爆轰波稳定传播,爆轰波波头高度 保持一致;在三波模态中,旋转爆轰波的传播方向发生改变。爆轰波模态转变的本质是增大进气压力和 当量比后,在爆轰产物与新鲜预混可燃气的接触面上形成利于发生化学反应的环境条件,接触面上发生 爆燃产生新的激波,高温高压的激波与新鲜预混可燃气碰撞,进一步提高化学反应速率,获得足够的能 量逐渐增强为爆轰波,促进了爆燃转爆轰过程。

关键词: 旋转爆轰; 多组分气体; 进气压力; 当量比; 模态转变机理 中图分类号: V231.2⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 11-210712-12 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210712

Numerical Simulation of Rotating Detonation Wave Propagation Characteristics of C₂H₄/CH₄/H₂Mixture

 $WU\ Min-xuan^1,\ BAI\ Qiao-dong^1,\ WENG\ Chun-sheng^1,\ MENG\ Hao-long^1,\ HAN\ Jia-xiang^1,$

ZHANG Shi-jian¹, WANG Yan-yan²

(1. National Key Lab of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;2. School of Electrical Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to study the propagation characteristics of rotating detonation of kerosene cracked gas, using $C_2H_4/CH_4/H_2$ mixture as alternative fuel and air as oxidant, a numerical simulation study of the two-dimensional rotating detonation process of the mixture was carried out using a calculation program rhoReactingCentral-Foam based on OpenFOAM. The effects of the total inlet pressure, the equivalent ratio and fuel mixing ratio on the propagation characteristics of the rotating detonation wave and the mechanism of the mode transition of the rotating detonation wave during the propagation process are studied. The results show that the detonation wave presents four propagation modes under different calculation conditions: single-wave mode, double-wave collision mode, single/double-wave mixed mode, and three-wave mode. When double waves collide, the detonation wave

^{*} 收稿日期: 2021-10-12; 修订日期: 2021-12-13。

基金项目: 国防预研基金 (HTKJ2020KL011004-2); 江苏高校"青蓝工程"。

作者简介:吴敏宣,硕士生,研究领域为爆轰推进技术。

通讯作者:白桥栋,博士,副研究员,研究领域为爆轰推进技术。

引用格式: 吴敏宣, 白桥栋, 翁春生, 等. C₂H₄/CH₄/H₂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):
 210712. (WU Min-xuan, BAI Qiao-dong, WENG Chun-sheng, et al. Numerical Simulation of Rotating Detonation Wave Propagation Characteristics of C₂H₄/CH₄/H, Mixture[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(11):210712.)

propagates steadily, and the height of the detonation wave head remains the same. In the three-wave mode, the propagation direction of the rotating detonation wave changes. The essence of the mode transformation of detonation wave is that after increasing the inlet pressure and equivalent ratio, the environmental conditions conducive to chemical reaction are formed on the interface between detonation products and fresh premixed combustible gas, and a new shock wave occurs on the contact surface. High temperature and high pressure shock wave collides with fresh premixed combustible gas, which further increases the chemical reaction rate, and the shock wave obtains enough energy to gradually enhance to detonation wave, which promotes the process of deflagration to detonation.

Key words: Rotating detonation; Multi-component gas; Inlet pressure; Equivalence ratio; Modal transformation mechanism

1 引 言

连续旋转爆轰发动机(Continue Rotating Detonation Engine, CRDE)是利用爆轰波在燃烧室内一端连 续旋转传播,高温高压的爆轰产物从另一端排出并 产生推力的新概念发动机。CRDE具有热循环效率 高、结构紧凑、推重比大以及自增压等优点^[1]。与吸 气式或火箭式发动机相结合,成为新型的组合发动 机,可用于高速远程导弹、无人机、高超声速飞行器 等领域,应用前景广阔。

在CRDE的工程研究中,通常使用液态煤油为燃 料,由于常温下煤油燃料在旋转爆轰环形燃烧室内 雾化与掺混效果差,点火起爆困难。研究者们通过 在推进剂中掺氢、掺氧或者加热空气的方式来降低 煤油的起爆难度;除此之外,通过将煤油裂解成易爆 小分子气体物质后进入 CRDE 燃烧室,能降低 CRDE 的起爆难度。Bykovskii等^[2-4]对一氧化碳和氢气的混 合气、甲烷、氢气以及煤油等不同燃料在旋转爆轰燃 烧室内的起爆特性进行了大量实验研究,在不同燃 烧室尺寸、不同氧化剂和喷注方式下获得连续旋转 爆轰存在的极限,研究还发现所有添加氢气的气体 混合物都能实现连续旋转爆轰。Kindracki^[5]对液体 煤油和空气混合物的起爆以及旋转爆轰传播进行实 验研究,结果表明,液体煤油和空气在常温下不能形 成旋转爆轰波,加入少量氢气后能实现稳定传播的 旋转爆轰波。程关兵等[6]开展了常温常压下氢气/丙 烷和空气混合气体爆轰性能的实验研究。实验中观 察到自持爆轰波,随着丙烷比例增加,爆轰速度减 小,而爆轰压力和胞格尺寸增加。Frolov等^[7]针对氢/ 液态丙烷/空气三元混合物进行连续爆轰实验,实现 了液态丙烷的连续旋转爆轰过程,主要原因是添加 氢气后提高了燃料的反应活性。此外,还有学者以 氢气/乙烯/乙炔的混合气[8-10]作为燃料,通过改变空

气喷注环缝的宽度、质量流量、混合气的组分比例 等,研究了旋转爆轰波的起爆、稳定传播和熄火过 程,确定了混合气旋转爆轰的稳定工作范围和基本 特性。Wang等^[11]研究了中空燃烧室内甲烷/乙烯和 空气的混合物旋转爆轰特性,高速摄影和压力轨迹 都表明三波模态比五波模态具有更高的爆轰波速 度。Yang等^[12]采用预燃裂解煤油和富氧空气为推进 剂,研究通道宽度对旋转爆轰波特性的影响,结果表 明多波模态更容易出现在较窄的通道和较高的氧含 量情况下。

数值模拟方面, Wang等^[13]对煤油/空气旋转爆轰 发动机进行二维数值模拟, 研究了总压和当量比对 CRDE运行特性的影响。对于多组分燃料旋转爆轰 的研究, Fomin等^[14]对 CH₄/H₂/Air混合气的旋转爆轰 结构进行数值计算, 结果表明, 爆轰参数和主胞格尺 寸与实验数据吻合良好。Sato等^[15]利用 UMdetFoam 对 C₂H₄/H₂/Air和 CH₄/H₂/Air混合气的旋转爆轰进行 二维数值模拟, 研究进气压力、进气温度和背压对旋 转爆轰流场的影响。发现乙烯起爆受氢气的影响不 明显, 甲烷混合物的起爆结构则发生较大变化。 王 丹等^[16]建立部分裂解煤油化学反应模型, 开展燃烧 室内的点火起爆过程仿真分析, 结果表明, 燃料组分 对形成稳定爆轰波所需时间有影响。

目前对以煤油裂解气或混合气为燃料的旋转爆 轰的实验研究主要针对爆轰波的起爆、传播稳定性 进行了分析,实验结果显示煤油裂解气旋转爆轰传 播过程中存在多波传播、传播模态转变等现象,由于 实验测试手段有限,难以显示旋转爆轰内部流场详 细结构,关于混合气旋转爆轰波传播模态的转变机 制有待进一步深入研究。采用裂解方法生成煤油裂 解气作为CRDE的燃料能降低点火起爆难度;此外, 基于旋转爆轰的组合发动机也能采用煤油裂解气作 为燃料,对煤油裂解气燃料旋转爆轰传播特性的机 理研究具有重要意义。本文以C₂H₄/CH₄/H₂混合气作 为煤油裂解气的替代燃料,利用基于OpenFOAM的 计算程序开展该混合气的二维旋转爆轰传播过程数 值模拟研究,分析进气压力、当量比和混合气组分比 例对旋转爆轰波传播特性的影响。

2 物理模型及数值方法

2.1 物理模型

CRDE一般采用环形燃烧室,为了简化计算,忽 略燃烧室的径向厚度,将其沿任意一条母线展开获 得二维矩形计算模型,如图1所示。计算区域长 250mm,宽100mm,下方为燃料和氧化剂的入口边 界,上方为爆轰燃烧产物的出口边界,由于燃烧室 内流场沿圆周方向是连续的,为了使计算网格也 具备连续的特性,网格左右两端设置周期性边界 条件,从而模拟旋转爆轰波在周向连续传播的 过程。



2.2 计算方法

使用 rhoReactingCentralFoam 求解器进行二维旋转爆轰过程数值模拟,该求解器是在开源软件 Open-FOAM 7.0 的框架内基于可压缩流求解器 rhoCentral-Foam 和反应流求解器 ReactingFoam 开发而成^[17-18],研究人员使用该求解器对氢气和乙烯旋转爆轰波的传播特性进行数值模拟,其准确性得到验证^[19-20]。二维可压缩反应流控制方程表达式为

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

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

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

$$\frac{\partial \left(\rho Y_{m}\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho u Y_{m}\right) = \dot{\omega}_{m} \qquad (4)$$
$$m = (1, \dots, N)$$

式中变量 ρ ,u,E, Y_m 和T分别代表密度、速度矢量、总能量、第m种组分的质量分数、温度。 $\dot{\omega}_m$ 和 $\dot{\omega}_r$ 分别是组分守恒方程和能量方程中与化学反应有关的源

项,分别代表了物质的生成消耗速率以及燃烧的热释放速率;p是由理想气体状态方程计算的压强。

方程(1)~(4)通过有限体积法离散最大 Courant 数设置为0.1,时间步长约为10⁻⁹s,采用 Kurganov^[21]的 二阶 Godunov型中心迎风格式对对流项进行离散。 化学反应采用多组分模型,使用乙烯、甲烷、氢气与 空气的两步化学反应^[22-23]机理,采用欧拉隐式方法求 解。该机理包含八种组分(C₂H₄, CH₄, H₂, O₂, CO, CO₂, N₂, H₂O),由四个反应组成:C₂H₄和 CH₄分别氧化 成CO和H₂O,CO与CO₂反应平衡以及H₂氧化成H₂O。 表1列出了各反应的活化能和反应指数。表中A是 指前因子,*Ea*是反应活化能,*R*是气体常数。

Table 1 Chemical reaction group

| Reaction formula | Rate exponent | A | Ea/R |
|-------------------------------------|---------------|------------------------|---------------------|
| $C_2H_4+2O_2 \rightarrow 2CO+2H_2O$ | 0.1,1.65 | 1.3×10^{10} | 1.5×10^{4} |
| $CH_4+1.5O_2 \rightarrow CO+2H_2O$ | 0.9,1.10 | 2.0×10^{12} | 1.7×10^{4} |
| $CO+0.5O_2 \leftrightarrow CO_2$ | 1.0,0.25 | $1.0 \times 10^{15.6}$ | 2.0×10^4 |
| $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$ | 1.0,1.00 | 1.4×10^{13} | 1.3×10^{4} |

2.3 初始条件和边界条件

初始条件:在计算域左下角 0 ≤ x ≤ 0.04m,0 ≤ y ≤ 0.02m 设置温度为 2500K,压力 3MPa 的高温高压 点火区。在 0.04m ≤ x ≤ 0.15m,0 ≤ y ≤ 0.02m 填充温 度为 800K,压力为 0.6MPa 的预混气,预混气由乙烯、 甲烷、氢气和空气按照一定质量分数的比例混合而 成,其余部分填充空气。

边界条件:入口为填充边界,填充总压为*p*₀,总温 为*T*₀,边界临近处的计算压力为*p*,填充边界分三种 情况:

(1)当*p*≥*p*₀时,此时预混燃料不能进入燃烧室,按照固壁边界处理;

(2)当 $p_{er} 时,按照亚声速条件填充,此时边$ 界参数为

$$p_{i} = p, T_{i} = T_{0} \left(\frac{p}{p_{0}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$
 (5)

$$u_{y} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} RT_{0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{0}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \right]$$
(6)

$$p_{\rm cr} = p_0 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \tag{7}$$

(3)当*p*<*p*_c时,按照声速条件填充,此时边界条件参数为

$$p_{i} = p_{cr}, T_{i} = T_{0} \left(\frac{p_{cr}}{p_{0}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$
 (8)

式中*p_i*,*T_i*,*u_y*为燃烧室入口边界上的压力、温度以及 轴向速度;*p_{er}*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: 当出口速度为超声速时,出口边界根据一阶外推得 到;当出口速度为亚声速时,出口压力等于环境 压力。

2.4 计算方法及网格独立性验证

本文采用的计算方法和化学反应模型在一维爆 轰管中进行了验证。验证模型中爆轰管长为1m,管 内填充的混合气及比例为C₂H₄:CH₄:H₂=2:1:4,填充 压力为0.1MPa,温度为300K。左侧边界设置为壁面, 右侧边界设置为开放边界,在左侧边界附近设置一 个温度为2700K,压力为3MPa的高温高压点火区。 设置了0.2mm,0.3mm和0.5mm的网格尺寸进行计 算。表2显示了在不同网格尺寸计算下的爆轰速度 与CEA软件计算的理论C-J值之间的比较。对于网 格独立性的验证,在二维矩形计算模型中,设置进气 总压为0.5MPa,总温为800K。图2给出三种网格的 计算结果,可以看出,三种网格尺寸均能有效的捕捉 爆轰波的强间断面,考虑到精度,本文的计算模型均 使用0.2mm的网格。

 Table 2
 Comparison of calculated and theoretical C-J value

| Grid size/mm | Fuel | Wave speed/ $(m \cdot s^{-1})$ | Relative error/% |
|--------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| C–J | $C_2H_4/CH_4/H_2$ | 1874.0 | - |
| 0.2 | $C_2H_4/CH_4/H_2$ | 1886.9 | 0.70 |
| 0.3 | $\mathrm{C_2H_4/CH_4/H_2}$ | 1893.9 | 1.06 |
| 0.5 | $\mathrm{C_2H_4/CH_4/H_2}$ | 1904.7 | 1.63 |



Fig. 2 Inlet pressure curve under different grid size

3 计算结果分析

3.1 不同工况下混合气旋转爆轰波传播特性

为了研究混合气旋转爆轰波在不同传播模态下 的传播特性,通过改变进气压力和当量比,获得了不 同传播模态的旋转爆轰波,具体工况及计算得到的 旋转爆轰波参数如表3所示。工况1~5中,进气总压 保持0.6MPa,改变当量比,燃烧室内旋转爆轰呈现单 波模态、单/双波混合模态和双波模态。当量比低于1 时,旋转爆轰波以单波模态传播,当量比增加到1.2 时,燃烧室内爆轰波以单/双波混合模态传播。继续 增加当量比,燃烧室爆轰波开始以双波模态传播。 显然,随着当量比的增加,燃烧室内的旋转爆轰波数 目也增加。工况 6~8,当量比保持为1,随着进气压力 的增大,燃烧室内最多出现三个爆轰波。工况3条件 下旋转爆轰波以单波模态传播。图3是在监测点x= 11mm, y=1mm处的压力和温度曲线。从起爆到计算 结束一共经历了20个周期,通过爆轰波稳定传播时 瞬时速度的平均值计算爆轰波速度,瞬时速度由两 个足够短的相邻瞬间内的传播距离决定,爆轰波速 度维持在1795.7m/s左右,CEA软件计算的理论值为 1842m/s,速度亏损为2.5%,从压力曲线图可以看出, 爆轰波在前期压力峰值上下波动,经过一段时间的

| Table 3 | Results | under | different | working | conditions |
|---------|-----------|-------|-----------|---------|-------------|
| | 110001100 | | | | contartions |

| Case | Total pressure/MPa | Equivalence ratio | Wave speed/($m \cdot s^{-1}$) | Wave pressure/MPa | Propagation mode |
|------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|------------------|
| 1 | 0.6 | 0.6 | 1562.5 | 3.7 | Single wave |
| 2 | 0.6 | 0.8 | 1681.7 | 4.0 | Single wave |
| 3 | 0.6 | 1.0 | 1795.9 | 4.3 | Single wave |
| 4 | 0.6 | 1.2 | 1825.8 | 4.5 | Hybrid waves |
| 5 | 0.6 | 1.4 | 1739.5 | 4.4 | Double waves |
| 6 | 0.8 | 1.0 | 1653.4 | 5.5 | Double waves |
| 7 | 1.0 | 1.0 | 1644.7 | 6.2 | Double waves |
| 8 | 1.2 | 1.0 | 1612.9 | 7.5 | Three waves |

自我调节过程,大约从1.7ms开始保持稳定单波模态 传播,压力峰值保持在4.3MPa左右,温度峰值约为 3200K,二者达到峰值的时间几乎相同,保持高度耦 合,这也显示了旋转爆轰波的自持传播的特性。



Fig. 3 Time curves of pressure and temperature at *x*=11mm on inlet boundary

由于煤油裂解气的裂解率对爆轰波传播特性有 重要影响,裂解率不同,燃料的组分比例也不同。 因此,除了研究进气总压和当量比外,本文还研究 了不同燃料组分比例对旋转爆轰传播模态的影响。 计算了四种不同质量分数比例的预混燃料,如表4 所示,工况9~12当量比均为1,除了燃料组分比例 不同,进气压力和温度等条件均相同。本文计算中 混合气设置的比例与实验中煤油裂解气的真实成分 接近^[9-10]。

由表4可知,不同燃料组分比例对爆轰波传播速 度以及传播模态有一定的影响。在计算过程中,工 况9一直保持单波传播模态,且爆轰波传播过程很稳 定。对于工况10,乙烯的含量降低,而氢气占比变 高,预混燃料的活性高于工况9,旋转爆轰波传播过 程中表现出双波对撞模态,虽然工况11和12中氢气 占比降低,但是乙烯含量升高,因此爆轰波也是双波 对撞模态。从表中看出,工况10~12中双波对撞的爆 轰波速度亏损接近10%,其传播速度明显低于工况9 中单爆轰波的传播速度,这主要是因为双波对撞模 态下每个爆轰波前积累的新鲜预混可燃气低于单波 模态下的爆轰波前的可燃气。

3.2 混合气旋转爆轰波模态转变过程

在不同计算条件下,混合气旋转爆轰波呈现四 种传播模态:单波模态、双波对撞模态、单/双波混合 模态以及三波模态,下面具体分析混合气旋转爆轰 传播模态转变的过程。

图 4(a)是工况 6 在监测点 x=70mm, y=1mm 处的 压力曲线变化,爆轰波起爆后处于单波模态,爆轰波 的峰值压力有轻微的波动,大约经历了 2.2ms 的传播 调节过程后,爆轰波传播一周所需的时间减小一半, 燃烧室内形成了稳定的双波对撞模态,从图 4(b)的 质量流量曲线变化也可以看出,刚开始质量流量保 持小幅度的波动,大约从 2.2ms 开始,燃烧室出口质 量流量突然增大,此时进入燃烧室的可燃气增多,导 致旋转爆轰波的模态转变。爆轰波在燃烧室内以双 波对撞模态传播了 13 个周期并保持稳定,在爆轰波 稳定传播时,其峰值压力基本不变,保持在 5.5MPa 左右。

相同进气条件下,即进气压力为0.8MPa,温度为800K时进行纯乙烯旋转爆轰的计算,发现在1.74ms时,燃烧室开始出现双波,与多组分气体的旋转爆轰



Fig. 4 Pressure and mass flow curve in case 6

| Case | Fuel mixing ratio C ₂ H ₄ :CH ₄ :H ₂ | Wave speed/($m \cdot s^{-1}$) | Relative error/% | Propagation mode |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|
| 9 | 2.0:1:4 | 1795.9 | 2.5 | Single wave |
| 10 | 1.8:1:4 | 1689.0 | 8.3 | Double waves |
| 11 | 2.2:1:4 | 1669.0 | 9.4 | Double waves |
| 12 | 3.4:2:4 | 1662.2 | 9.8 | Double waves |

Table 4 Detonation wave parameters of different fuel mixing ratios

相比,提前了0.5ms左右,在双波对撞时,乙烯旋转爆 轰波的峰值压力为6.6MPa,比多组分气体旋转爆轰 峰值压力高1.1MPa。通过CEA软件计算,乙烯旋转 爆轰波的理论速度值为1828m/s,多组分气体的爆轰 波理论速度为1848m/s,而在实际计算中,不管是单 波模态还是双波对撞模态,两种气体燃料的爆轰波 传播速度都相差无几,单波模态时,爆轰波传播速度 维持在1785m/s左右,双波模态时,爆轰波传播速度 为1655m/s。虽然多组分气体含有活性高的氢气,但 其含量低,而且还含有活性低于乙烯的甲烷,因此, 两种燃料的活性相差不大。Wang等^[24]在对乙烯/空 气非预混旋转爆轰进行试验研究,结果表明:在燃料 和空气的质量流量分别为35.5g/s,546g/s,当量比为 0.96时,获得稳定的旋转爆轰波单波传播模态,并且 爆轰波的波速为1653m/s,与CEA软件计算的理论值 相比,爆轰波速度亏损仅为8.8%。虽然本文采用的 二维预混模型与实际工程应用中的三维非预混模型 有差异,但二维模型结果中爆轰波的参数与实验吻 合,这对探索模态转变机理有一定参考价值。

图 5 为稳定双波对撞模态形成过程的温度和压 力云图,在2.23ms时,燃烧室内只有一个沿 x轴正方 向传播的强爆轰波,在2.24ms时,燃烧室出现一个沿 着x轴反方向传播的微弱激波;图6为激波在不同时 刻的压力等值线云图,该微弱激波产生于x=0.21m附 近,如图 6(a)箭头所示。图 7 是组分 Y_m 变化曲线图; 从图7(a)可以看出,此处C₂H₄,CH₄,H₂等三组分燃料 的质量分数突然下降,而燃烧产物CO和CO,质量分 数瞬间上升;此时,温度由800K瞬间上升到2700K, 压力从 0.8MPa 上升到 1.5MPa(见图 8), 形成一个高 温高压燃烧产物区,该区域由于接触到供入的新鲜 预混合燃气,进一步提高燃烧化学反应速率,热释放 率也瞬间增大,如图9所示,从而导致局部发生爆炸, 产生新的激波。由于激波前有足够的新鲜预混可燃 气,在2.27ms时,激波诱导成与正向传播的爆轰波相 同强度的爆轰波,二者的爆轰波高度保持一致,大约 为23mm。马壮^[25]通过实验发现旋转爆轰波相邻压 力尖峰之间出现一个较小的尖峰,经过2~3个周期 的调整,较小压力峰值迅速升高,说明燃烧室出现的 激波逐渐增强并与燃烧耦合形成新的爆轰波。在高 速摄影图像中也发现了激波,且其亮度梯度逐渐明 显。葛高杨等^[26]通过实验发现在双波对撞周期内, 第一个压力峰值远低于第二个压力峰值,原因为第 一个压力尖峰是由爆轰波解耦后的透射激波引起 的。Xia等^[27]通过数值模拟也发现该现象。本文数

值模拟结果与相关文献的结论表明,激波的出现在 旋转爆轰传播模态转变中有重要作用。

由以上分析可知,旋转爆轰波模态转变需要经 历以下过程:热点的产生,燃烧室内新鲜预混气的进 入,新的爆轰波波头的形成以及强化到爆轰波。在 2.3ms时,两个方向相反的强爆轰波发生对撞,对撞后 的透射激波衰减,沿着原来的方向继续传播,此时燃 烧产物区压力高于燃料供给压力,新鲜可燃气无法 供入,到2.31ms时,新鲜混合可燃气开始逐渐填充燃 烧产物区,如图5中虚线框所示,在0.11m和0.17m 处,可燃混气发生提前燃烧被消耗,这两处的温度和 压力都瞬间升高,但是此时新鲜预混可燃气较少,虽 然化学反应释放的热量瞬间升高,由于此时新鲜预 混可燃气较少,相比于强爆轰波释放的热量几乎可 以忽略,如图9所示。经过一段距离的传播,由于激 波波阵面头部有足够的新鲜预混可燃气,透射激波 逐渐增强诱导成为新的爆轰波,在2.35ms时,爆轰波 的高度达到22.8mm,与对撞前的爆轰波高度大体一 致,可见对撞后的爆轰波能保持稳定传播,之后两个 爆轰波再次发生对撞,最终燃烧室内旋转爆轰波以 这种周期性的双波对撞模态稳定持续传播。

图 10 是工况 8 进气压力为 1.2 MPa, 当量比为 1 时 双波对撞转三波模态的温度和压力云图。在2.73ms 时,燃烧室内有两个方向相反的强爆轰波,在2.87ms 时,燃烧室内产生一道新的沿x轴正方向传播的弱激 波,在2.89ms时,两个传播方向相反的爆轰波发生对 撞,进而形成透射激波,新形成的弱激波由于新鲜可 燃气的不断喷入而增强,在2.91ms时,该激波与前方 的透射激波发生对撞,通过图11的压力等值线图可 以看出,在对撞处的左侧压力升高,图中箭头所示为 激波。从图12可以很明显的看出,在x=0.11m附近的 区域温度、压力和热释放率都突然升高,高温高压区 域提高反应速度,导致局部爆炸,产生了一个微弱的 激波,直到2.92ms,温度云图上出现明显的局部热点, 如图 10 中箭头所示; 而在 2.93ms 时, 燃烧室内存在一 个沿 x 轴正反方向的爆轰波和两个反方向的爆轰波, 这与2.87ms时爆轰波传播方向相反,说明爆轰波传 播过程不稳定,爆轰波的方向发生改变。分析原因 主要为:(1)在2.85ms时两个弱爆轰波相距较近,并 且二者之间积累的新鲜可燃预混气较少,距离过短时 发生对撞现象无法形成爆轰波,这种现象的发生极易 出现随机性,从而影响爆轰波的传播方向;(2)模态改 变的瞬态阶段涉及新的爆轰波的形成,在燃料反应 活性强、空气中氧含量大幅增加、反应物质量流量大



(f) *t*=2.35ms Fig. 5 Formation process of stable two-wave collision mode

等情况下可能伴随着新形成的爆轰波方向的相位 反转。

3.3 模态转变机理分析

不同的进气压力、当量比和燃料组分比例工况 下,CRDE燃烧室内会出现不同的旋转爆轰波传播模 态。进气压力越高,当量比越大,燃料活性越强,产 生的爆轰波数目越多,越容易触发模态转变。下面 将详细分析旋转爆轰波模态转变的内在机理。

图 13 是不同进气压力下的平均质量流量曲线变 化,提高进气压力,燃料的质量流量几乎呈线性增 加。在工况6中,燃烧室出口截面平均质量流量大约 为600g·s⁻¹,质量流量增加,燃烧室内产生的爆轰波







Fig. 7 Species mass fraction curves at the inlet of combustion chamber in case 6











(h) *t*=3.13ms Fig. 10 Formation process of the double-wave collision to the three-wave mode

也增加。图 14 是工况 6 中激波转变为爆轰波过程中 温度、压力、热释放率和化学组分变化图,该爆轰波 是从燃烧室 x=0.21m 附近开始逐渐向 x 轴反方向传播 而形成。在 2.2ms 时,燃烧室只有一个爆轰波,此时 记录的是爆轰产物的各参数,如图 14(d)所示,各组 分燃料的质量分数为0,主要存在大量的二氧化碳, 在 2.23ms时,乙烯、甲烷和氢气的质量分数增加,说 明有新鲜预混可燃气进入燃烧室,爆轰产物由于接 触到低温的新鲜预混可燃气,温度下降至 1400K,压 力和化学反应热释放率变化不大,在 2.24ms,爆轰产 物与新鲜预混可燃气的接触面上发生化学反应,可 能发生爆燃转爆轰(Deflagration to Detonation, DDT),





Fig. 12 Curves of temperature, pressure, heat release rate and species mass fraction at the inlet of combustion chamber in case 8 at *t*=2.91ms

该过程释放出大量的热量,温度和压力都升高,化学 反应中间产物一氧化碳也集中在此区域,此刻已经 形成新的激波,激波继续沿着 x 轴反方向传播,与燃 烧室头部的新鲜气体区域发生碰撞,逐渐形成弱爆 轰波,直到 2.26ms,爆轰波的压力和化学反应热释放 率达到峰值, 弱爆轰波已形成强爆轰波, 此时燃烧室 存在两个强度几乎相同的爆轰波, 沿着相反的方向 发生碰撞, 即双波对撞模态。图 15 是工况 6 中激波 增强为爆轰波过程中经过 x=0.2m 处的密度曲线, 在 2.23ms, 此处为低温新鲜预混合燃气, 其密度为 2.99kg/m³, 在 2.24ms时, x=0.21m 处产生新的激波, 到 2.25ms时, 激波传播到 x=0.2m 处形成弱爆轰波, 此处为 高温高压区, 因此密度下降为 1kg/m³, 当爆轰波沿着 x 轴反方向传播时, x=0.2m 便处于燃烧产物区, 因此其密 度逐渐增大。同理, 其它模态转变过程也是如此。



Fig. 13 Curve of average mass flow change with intake pressure

通过数值计算的结果及分析,本文中多组分混 合气旋转爆轰波传播模态发生转变的原因是:(1)进 气压力增大,导致质量流率增大,进入燃烧室的新鲜 预混可燃气增多;(2)当量比增大使得燃料反应活性 增强,更容易促使新鲜气体发生化学反应。而进入 燃烧室可燃气增多、燃料反应活性增强会促使爆轰 产物与新鲜预混可燃气接触面上发生化学反应,导 致新的激波的产生,高温高压的激波与新鲜预混可 燃气碰撞进一步提高化学反应速率,释放大量的热 量,激波获得足够的能量,在新鲜预混可燃气的不断 供应下,随着时间不断增强为爆轰波,从而发生模态 转变。模态发生转变需要两个条件:一是产生新的 激波;二是激波前有足够的新鲜预混可燃气。



Fig. 14 Curves of temperature, pressure, heat release rate and species mass fraction during the formation of new detonation wave



Fig. 15 Density curve of the new detonation wave passing x=0.2m during the formation process

4 结 论

本文对以 C₂H₄/CH₄/H₂ 混合气为燃料的连续旋转 爆轰进行二维数值模拟研究,获得了四种不同的传 播模态,分析了不同模态的旋转爆轰波的传播特性 以及模态转变的机理,得出以下主要结论:

(1)进气总压保持 0.6MPa,当量比从 0.6 增加到1.4,爆轰波首先以单波模态传播,当量比大于 1 时开始出现单/双波混合模态和双波对撞模态。当量比保

持为1,进气压力从0.6MPa升高到1.2MPa,从0.8MPa 开始出现双波对撞,随着进气总压的增大,质量流量 增大,最多出现三波模态。燃料组分对爆轰波的传 播模态也有一定的影响,混合气中乙烯和氢气的含 量增大,会出现双波模态。

(2)双波对撞时,爆轰波稳定传播,爆轰波波头 高度保持一致;三波模态时,旋转爆轰波的传播方向 发生改变,传播过程不稳定。两个弱爆轰波相距较 近时发生对撞现象可能无法继续形成爆轰波,因此 这种现象的发生极易出现随机性,从而影响爆轰波 的传播方向。

(3)爆轰波模态转变的原因:进气压力增大,导 致质量流率增大,当量比增大使得混合气反应活性增 强,在爆轰产物与新鲜预混可燃气的接触面上发生化 学反应,产生新的激波,随着新鲜预混可燃气不断进 入燃烧室,激波逐渐增强为爆轰波,此时爆轰波的温 度、压力和化学反应热释放率几乎同步达到最大值。 **致**谢:感谢国防预研基金和江苏高校"青蓝工程"的 资助。

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.

- Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F, et al. Effect of Combustor Geometry on Continuous Spin Detonation in Syngas-Air Mixtures [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2015, 51(6): 688-699.
- [3] Bykovskii F A, Zhdan S A. Continuous Spin Detonation of Poorly Detonable Fuel-Air Mixtures in Annular Combustors[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 899(4).
- Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous Detonation of Methane/Hydrogen-Air Mixtures in an Annular Cylindrical Combustor [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2018, 54(4): 472-481.
- [5] Kindracki J. Experimental Research on Rotating Detonation in Liquid Fuel-Gaseous Air Mixture [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 43: 445-453.
- [6] 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.
- Frolov S M, Aksenov V S, Ivanov V S, et al. Continuous Detonation Combustion of Ternary "Hydrogen-Liquid Propane-Air" Mixture in Annular Combustor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (26) ; 16808-16820.
- [8] Zhou S B, Ma H, Zhou C S, 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.
- [9] Zhou S B, Ma H, Chen S H, et al. Experimental Investigation on Propagation Characteristics of Rotating Detonation Wave with a Hydrogen-Ethylene-Acetylene Fuel
 [J]. Acta Astronautica, 2019, 157: 310-320.
- [10] Zhong Y P, 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.
- [11] Wang Y, Le J. A Rotating Detonation Engine Using Methane-Ethylene Mixture and Air[J]. Acta Astronautica, 2021, 188: 25-35.
- [12] Yang X, Wu Y, Zhong Y, et al. Investigation of Rotating Detonation Fueled by Pre-Combustion Cracked Kerosene under Different Channel Widths [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2021, 235(9): 1023-1035.
- [13] Wang F, Weng C S, Wu Y W, et al. Effects of Total Pressures and Equivalence Ratios on Kerosene/Air Rotating Detonation Engines Using a Paralleling CE/SE Method [J]. Defence Technology, 2020, DOI: 10.1016/j. dt.2020.09.015.
- [14] Fomin PA, Trotsyuk AV, Vasil'EvAA. Reduced Deto-

nation Kinetics and Detonation Structure in One- and Multi-Fuel Gaseous Mixtures [J]. *Journal of Physics:* Conference Series, 2017, 894(1): 12100.

- [15] Sato T, Voelkel S, Raman V. Analysis of Detonation Structures with Hydrocarbon Fuels for Application Towards Rotating Detonation Engines [C]. Cincinnati: AIAA Propulsion and Energy Forum, 2018.
- [16] 王 丹,周晨初,陈宏玉,等.部分裂解煤油的旋转爆 震发动机数值模拟[J].火箭推进,2020,46(6):52-59.
- [17] Greenshields C J, Weller H G, Gasparini J M, et al. Implementation of Semi-Discrete, Non-Staggered Central Schemes in a Collated, Polyhedral, Finite Volume Framework, for High-Speed Viscous Flows. [J] International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2020, 63: 1-21.
- [18] Jasak H. Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows [D]. London: Imperial College, 1996.
- [19] Zhao M, Li J, Teo C J, et al. Effects of Variable Total Pressures on Instability and Extinction of Rotating Detonation Combustion [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2020, 104(1): 261-290.
- [20] Meng H L, Weng C S, Xiao Q, et al. NE. Numerical Analysis on Evolution Process of Multiple Rotating Detonation Waves with Ethylene-Oxygen-Nitrogen Mixture
 [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2021, DOI: 10.1177/09544100211030153.
- [21] Tadmor K A. New High-Resolution Central Schemes for Nonlinear Conservation Laws and Convection-Diffusion Equations[J]. Journal of Computational Physics, 2000, 160(1): 241-282.
- [22] 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.
- [23] 牛宝柱.遗传算法在反应动力学机理简化中的应用研 究[D].合肥:中国科学技术大学,2009.
- [24] Wang Y H, Le J, Wang C, et al. A Non-Premixed Rotating Detonation Engine Using Ethylene and Air[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 749-757.
- [25] 马 壮. 连续爆轰发动机起爆、湮灭、再起爆机理的实验研究[D]. 北京:北京大学, 2021.
- [26] 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.
- [27] Xia Z J, Luan M Y, Liu X, et al. Numerical Simulation of Wave Mode Transition in Rotating Detonation Engine with OpenFOAM [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(38): 19989-19995.