

# 新型激波聚焦脉冲爆震模型连续起爆探究

张颂睿, 曾 昊, 何立明, 胡 煜, 原昱巍

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 针对俄罗斯 Levin 等人提出的 2-Stage PDE 模型中射流径向入射导致连续爆震工作无法顺利完成的问题, 计算模型基于 Fluent 软件进行了仿真实验, 通过改变环形射流入射方向的手段实现有效且快速地填充。在模型结构上, 通过采用高频低能耗火花塞预点火、渐缩通道、环形窄缝和环形弯面, 强化形成环形爆震波入射, 并经衍射后实现激波聚焦起爆。凹面腔结构实现了循环时间为 9.1 ms, 填充时间为 7.6 ms, 工作频率为 109 Hz 快速有效填充和高频起爆。

**关键词** 爆震发动机; 激波聚焦; 爆震波; 凹面腔

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.007

**中图分类号** V231.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0042-07

## A Study of Continuous Initiation for a New Shockwave Focus Pulse Detonation Model

ZHANG Songrui, ZENG Hao, HE Liming, HU Yu, YUAN Yuwei

(Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract** Aimed at the problem that continuous detonation caused by the jet radial incidence focusing structure fails to successfully complete in the detonation model of 2-Stage PDE proposed by Levin et al, an efficient and rapid filling by changing the incident direction of annular jet is made based on the simulation conducted by FLUENT software. Through the use of high frequency and low energy consumption spark plug pre ignition, tapered channel, annular narrow slot and annular curved surface, the annular detonation wave incidence is enhanced, and the shockwave focusing initiation can be realized in the concave cavity after diffraction. The result shows that the single cycle time of the concave cavity structure is 9.1 ms, the filling time is 7.6 ms, and the working frequency is 109 Hz.

**Key words** detonation engine; shockwave focusing; detonation wave; concave cavity

爆震燃烧是一种更高效的能量转换方式, 基于爆震燃烧的热力循环过程具有更高的热效率<sup>[1-2]</sup>。此外, 采用爆震燃烧的动力装置还具有结构简单、工作范围宽、推质比高, 耗油率低等潜在优点<sup>[3-4]</sup>。为提高脉冲爆震发动机的工作频率, 俄罗斯科研人员提出了两级脉冲爆震发动机(2-stage pulse deto-

nation engine, 2-stage PDE)的概念<sup>[5]</sup>。激波聚焦起爆的两级脉冲爆震发动机是一种利用超声速射流在凹面腔内产生激波汇聚, 起爆可燃混合气, 形成爆震燃烧的一种新概念发动机, 是爆震发动机的一种。

国内外学者相继对 2-stage PDE 进行了大量研

**收稿日期:** 2020-12-30

**作者简介:** 张颂睿(1997—), 男, 山东昌邑人, 硕士生, 研究方向为航空发动机。E-mail: zhangsongrui\_kg@163.com

**引用格式:** 张颂睿, 曾昊, 何立明, 等. 新型激波聚焦脉冲爆震模型连续起爆探究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(6): 42-48. ZHANG Songrui, ZENG Hao, HE Liming, et al. A Study of Continuous Initiation for a New Shockwave Focus Pulse Detonation Model [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 42-48.

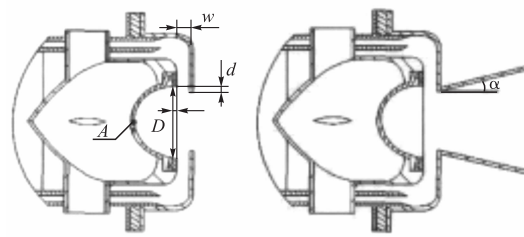
究,并取得了一定研究成果。美国的 GE 研究中心的 Leyva 等在 2003 年对基于冷态条件下 2 维凹面腔内超声速射流对撞进行试验和数值模拟,通过分析在不同射流喷管入口宽度和凹面腔出口宽度条件下的试验和数值模拟结果,发现射流掺混现象以及声学共振现象,但是没有观测到激波聚焦,凹面腔底部的压力脉动幅值也很小<sup>[6]</sup>;日本的 Taki 和 Fujiwara 等通过数值模拟研究了环形超声速射流聚心碰撞诱导激波聚焦起爆爆震的过程,发现每 2 次聚焦会产生 1 次爆震,爆震频率稳定在 5 Hz,与凹面腔内温度相关<sup>[7]</sup>。国内科研人员也对 2-stage PDE 相关技术进行大量研究。西北工业大学的陈星谷等采用二维数值模拟了预爆管不同排布对预爆管起爆主爆管混气的影响<sup>[8]</sup>;曾昊、荣康等开展凹面腔、尾喷管、射流喷管结构参数以及射流参数对激波聚焦及起爆爆震影响规律的研究<sup>[9-13]</sup>;南京航空航天大学的张义宁等研究了爆震波从预爆管向主爆管传播特性<sup>[14-15]</sup>。但是到目前为止,成功连续起爆的 2-stage PDE 经验依旧比较少,相关数据与仿真结果依旧不足,缺乏数据资料和仿真结果,对于下一步优化和改良 2-stage PDE 结构缺乏数据支撑。本文通过对已有试验结构的改进结构进行数值仿真,试图为激波聚焦爆震起爆方式寻找新的思路。

### 1 计算模型

本文计算模型是基于文献<sup>[16]</sup>所使用的已有的试验装置的改进,原有试验装置如图 1 所示,该结构用煤油作为燃料,气流在进入凹面腔前分为两股。第一股气流与燃料过渡富油预混并燃烧,起到裂解煤油作用,从内管流至凹面腔前;第二股气流在内外管道之间在进入凹面腔前与第一股气流掺混。两股气流在凹面腔前掺混并在凹面腔内射出并对撞产生强激波,而后利用凹面腔结构反射聚焦,产生爆震起爆点,引发爆震(如图 2 和图 3 所示)。



(a) 试验装置



(b) 剖面图

图 1 试验设备<sup>[14]</sup>

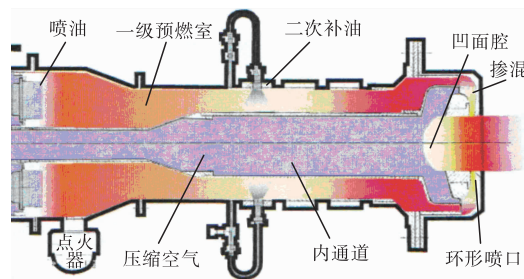


图 2 两级 PDE 结构示意图

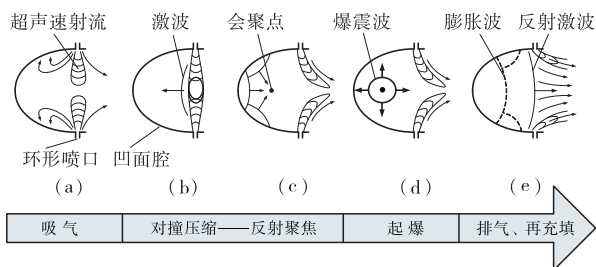


图 3 环形射流在凹面腔内碰撞产生激波会聚爆震的过程

该结构在经过实验和数值模拟研究后<sup>[16-17]</sup>,暴露出一些问题,凹面腔的射流入口同时兼具混合气体填充和形成激波作用,在多循环工作中很难同时完成这两种功能,原因是:一是只要环形射流入射通道出口有压差(尽管很小),就会形成入射射流,从而形成气幕封闭了凹面腔底部废气的排出,这样在凹面腔近壁面附近燃料不能有效填充和掺混均匀,影响下一循环起爆;二是凹面腔底部被封闭的未及泄出的带有余压气体阻止了环形射流出口有效压差的形成,很难形成足够强度的激波及其聚焦起爆。

针对这些问题,本文进行了模型改造,结构如图 4 和图 5 所示。

1)为保证快速有效填充,环形射流出口由聚心对向布局改为沿凹面腔切向射入,期望燃料混合气体能“挤出”上一循环的废弃物,达到完全填充凹面腔的目的;

2)点火方式由之前纯依靠高强度射流形成激波聚焦点火,改为在环形射流通道入口处使用耗能较小的微弱火花点火,再依靠渐缩通道、狭窄环缝和弯面通道相继加速爆震波的形成,期望利用在环形通道出口形成爆震波,形成爆震波向凹面腔内的传播,或者经衍射爆震解耦后形成足够强度的激波再经聚

焦点火起爆震波。

3)采用高频火花点火时序配合大流量快速填充以形成高频爆震循环工作。

本文将图4和图5所示的三维模型取轴向剖面,简化为二维平面模型,且忽略了实际设计模型的安装间隙。计算采用FLUENT Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型,PISO算法,非平衡壁面函数法的近壁面处理,导入chemkin  $H_2/air$  9项19步反应机理。

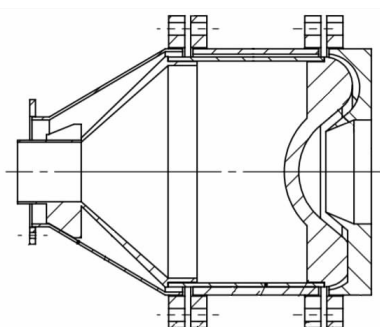
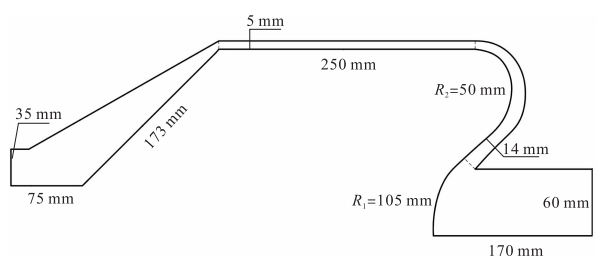
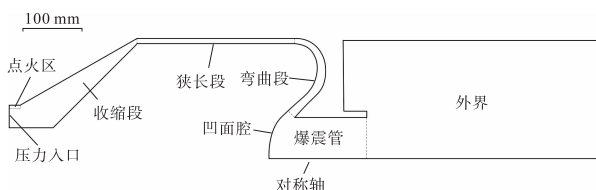


图4 物理模型



(a) 模型尺寸



(b) 模型区域

图5 计算模型

算法验证方面,利用文献[18] $H_2/air$  化学恰当比( $H_2$ 质量分数2.83%, $O_2$ 质量分数22.65%)在直径10 mm,未封闭开口端爆震管试验数据,与本文所用算法在相同网格尺寸条件下计算所得爆震数据进行对比,可得数据表1。其速度和压力误差分别为1.06%和3.22%,证明本文计算方法可靠。

表1 爆震波参数结果对比

参数	计算值	实验值
速度/(m/s)	2 849	2 819
压力/MPa	1.958	1.897

$H_2/air$  预混气体由压力进口进入,首先对计算区域进行填充。填充完成后,在进口处进行点火,火焰进入凹面腔前传播并形成爆震转换,若爆震波在凹面腔内无法自持,则利用爆震波解耦后产生的强

激波在凹面腔内聚焦起爆点火。整体工作过程可分为填充过程,点火、燃烧传播过程(缓燃转爆震,DDT)过程,凹面腔聚焦与推力产生过程,废气排出与再填充过程。本次以化学恰当比时对以上过程仿真情况进行讨论。

## 2 计算结果及分析

### 2.1 填充过程

填充过程为试验准备阶段,理论上不算做工作过程的一部分。但同时,填充过程是该试验件在非热态条件下废气排出(再填充)过程的简化和冷状态形式,也作为再填充结果的比较标准。

填充过程首先在进口处通入空气,并保证流场稳定,再在进口处前喷入燃料,使进口保持预定的混合气浓度并使混合气在出口处浓度达到可保证起爆浓度。该过程计时从喷入混合气开始,到出口 $H_2$ 浓度可接受为止。填充过程总体持续时间为10 ms,过程结束时出口处氢气浓度如图6与图7所示。

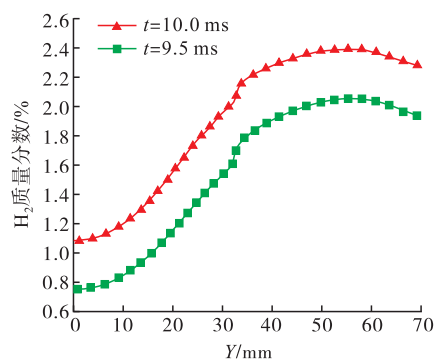


图6 爆震管出口截面 $H_2$ 质量分数

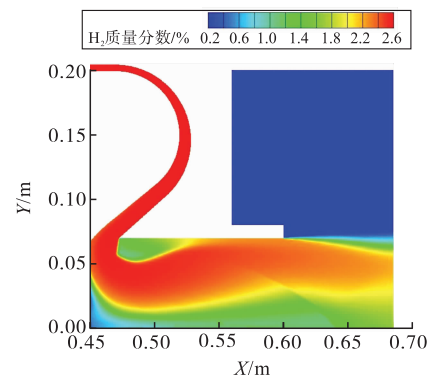


图7 填充过程结束时刻 $H_2$ 分布

在流场稳定时,可观察到试验腔体内各部分流场情况。其中,收缩段由于空间较大,出口较小,压力很高,填充过程缓慢,约占总填充时间一半左右(稳态压力见图8)。而在凹面腔及试验喷口处,由于出口较大,且出口后压力较小,致使该段气流速度很大,压力较小,填充速度很快。

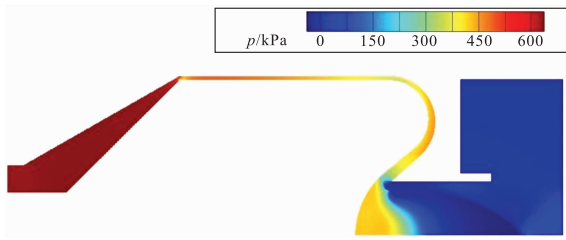


图 8 稳态压力场

### 2.2 燃烧传播(DDT)过程

当爆震管出口组分以达到起爆要求后进行点火,点火温度为 1 300 K,此时时间为  $t=10.00$  ms。点火后,火焰向四周传播,其中沿气流方向发展较快,并持续贴收缩段上部壁面向前传播。由于点火位置在收缩段上壁面,因此火焰在被进口来流吹向后的过程中,壁面附近气体黏性作用对燃烧波传播产生明显干扰效果,近壁面湍流火焰面被拉长。

在  $t=10.20$  ms 时刻,当火焰传播至收缩段上壁面约 37 mm 处时,由于点火产生的压力波传播到该位置,进一步刺激已有的近壁面火焰向爆震转换,进而产生明显压力温度跃升,并快速向前传播,完成 DDT 过程(见图 9~11)。

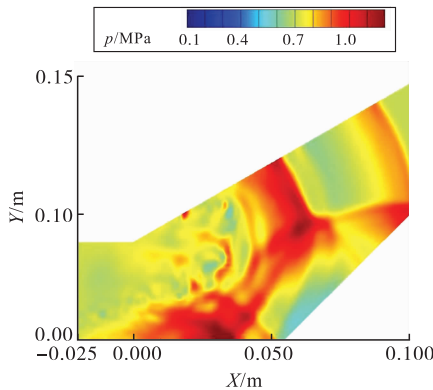


图 9  $t=10.20$  ms 时收缩段压力云图

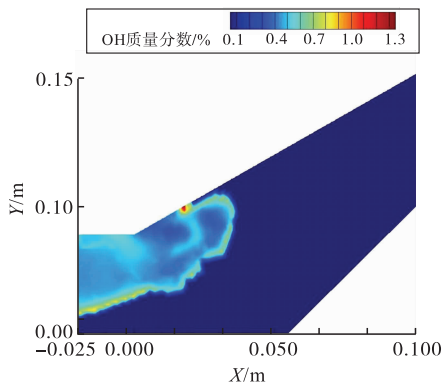


图 10  $t=10.20$  ms 时收缩段 OH 浓度云图

观察收缩段结构,上壁面在入口处附近由于管径增加,产生较厚的低速区未被进口来流吹除,为火焰相对低速稳定创造了条件,且再填充过程中该区域填充结果较好,压力较高,适合火焰转换。但由于

收缩段较为封闭,爆震产生并向前传播后仍有较强压力波系在内部反射前传,最终留存一定压力。

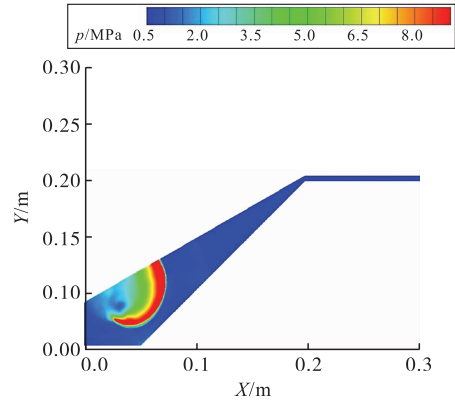


图 11  $t=10.23$  ms 时收缩段压力云图

在爆震波向前传播中并未发生爆震解耦现象,至弯管段出口处温度与压力基本保持稳定(见图 12、13)。

在化学恰当比情况下,爆震过程在收缩段内已经发生,狭长段和弯曲段对爆震传播无明显促进作用。爆震波在狭长段和收缩段传播耗时约 0.2 ms。

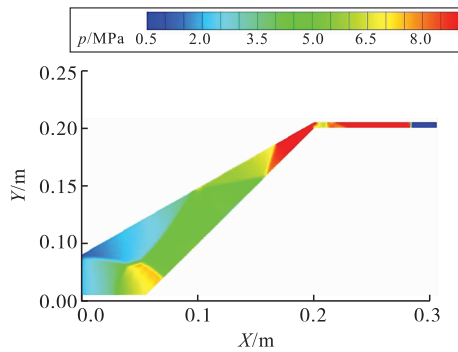


图 12  $t=10.34$  ms 时收缩段压力云图

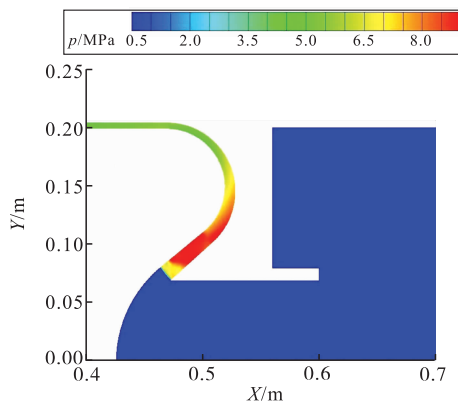


图 13  $t=10.50$  ms 时弯管段压力云图

### 2.3 凹面腔聚焦过程

凹面腔内由于结构与尺寸等原因在填充过程中会存在两处较为明显的涡流,分别驻留在凹面腔底部和管壁底侧弯曲段出口旁边(见图 14)。在填充过程结束时,两处涡内,  $H_2$  浓度明显低于周边区域,

也明显低于设计点(图7)。但若要选择在这两处涡内完成填充,将耗费大量时间,并浪费一部分燃料。为缩短单次工作时间,使工作频率最大化,选择在出口H<sub>2</sub>浓度可接受时进行点火。

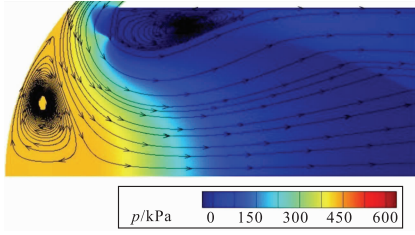


图14 填充过程结束时凹面腔内流线图

当爆震波从弯管段进入凹面腔,可观察到爆震波在H<sub>2</sub>浓度高,即非涡流区域未发生解耦且持续发展,并且在轴线碰撞聚焦,随后汇聚的爆震波沿轴线向后传播并不断增强,最终从出口排出,见图15至图17。而在凹面腔底部驻涡区域由于燃料浓度过低,爆震无法维持,遂衰减为强激波(可于图16凹面腔底部观察到明显的分离激波与火焰),并且沿凹面腔持续汇聚,最终与在凹面腔底部中心轴线聚焦的另一部分爆震波聚焦,形成一个高压区。之后该高压区扩散发展,一部分与弯管段出口加速膨胀气体相撞,形成激波,该激波沿凹面腔传回弯管段,造成爆震反传。

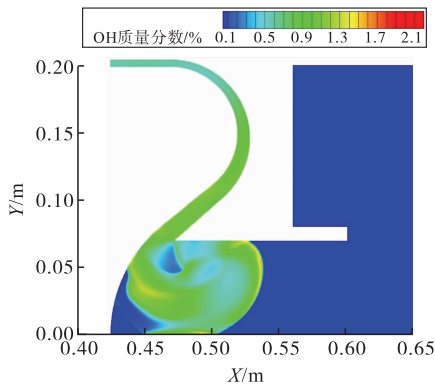


图15 爆震波碰撞时OH组分云图

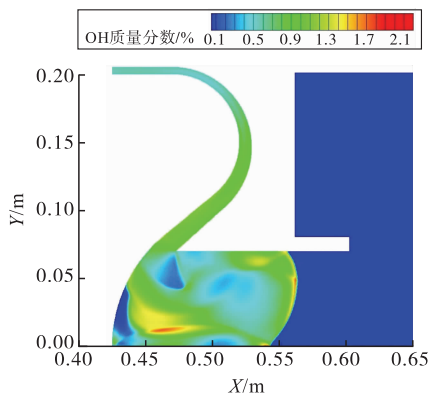


图16 爆震波轴向传播时OH组分云图

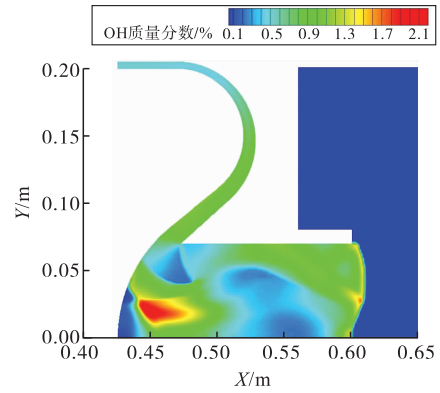


图17 爆震波排出时OH组分云图

此过程证明在爆震管入口处以爆震直接传入方式点燃可以保证在燃料浓度合适的爆震管后部区域持续爆震不解耦,并最终从出口传出。证明了在前部设置爆震诱导结构的作用,但同时也说明凹面腔内在填充过程中产生的涡导致的填充效率低下问题会导致凹面腔无法发挥激波聚焦功能,导致凹面腔结构功能失效。

### 2.4 废气排出与再填充过程

废气排出过程与填充过程类似,但其中区别的是当填充过程完成并点火后,燃料将由于爆震产生的反压而停止注入。经过设计,此时注入一定量不可燃空气隔绝新鲜混合气与废气,防止火焰前传或停驻在进口附近。

因此,再次冲入混合气前需要预先冲入部分空气,本次数值模拟废气排出过程开始时刻记为 $t = 11.5$  ms。根据流场温度确定低温不可燃气体通入时长,确定可燃混合气充入时空气基本充满收缩段( $t = 13.5$  ms,此时温度场见图18)。当再次填充至爆震管出口浓度与第一次填充过程结束时基本一致时结束( $t = 19.1$  ms,此时可燃气体浓度场见图19),再填充过程总时长7.6 ms。

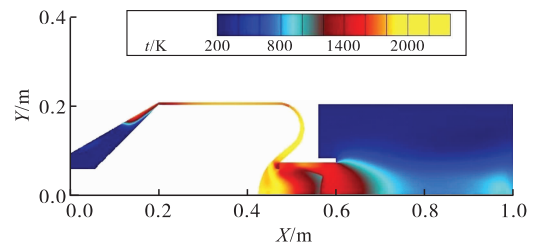


图18 混合气充入时刻温度云图

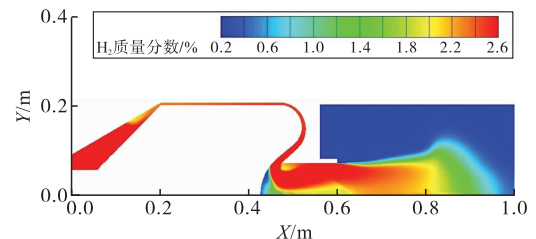


图19 再填充结束时刻H<sub>2</sub>浓度云图

总体而言,本模型由于并非使用设计燃料煤油进行仿真,缓燃转爆震过程(DDT)发生较早,考虑取消了传统2级PDE中煤油预燃裂解过程,本次仿真中预爆震结构在实际液体燃料预混气体点火时可能DDT时刻更加偏后。爆震波在爆震管内的传播证明凹面腔结构在填充过程中产生的涡会影响爆震波在爆震管内传播。

最后,该次数值仿真单次循环时间为9.1 ms(从点火开始),填充时间(取废气排出与再填充过程)为7.6 ms,占总时间83.5%。假设每次循环时间均为9.1 ms,则该结构在使用 $H_2$ 作为燃料,化学恰当比条件下工作频率109 Hz。

### 3 计算模型分析

假设当火焰在收缩段,狭长段和弯曲段内传播并发生DDT过程后,在到达爆震管处已经为爆震波,在进入爆震管则存在3种可能:①爆震波继续传播,小管引爆大管过程实现;②爆震解耦,但解耦激波聚焦,产生起爆点,重新爆震,小管引爆大管过程实现;③爆震解耦,解耦激波聚焦,但能量不足,无法起爆,小管引爆大管过程未实现。

本次仿真中,凹面腔结构仅在情况②时发挥作用,然而,爆震解耦后继续向前传播的激波增压比下降明显,凹面腔结构所采用的模型在爆震波进入爆震管时基本无过渡,压力波在爆震管中传播约束少,解耦后激波增压效果更差。但凹面腔底部无足够可燃气体,其需要向燃料丰富的爆震管前方传播。以已产生爆震的上节算例为例,图21、图22、图23显示了主爆震管入口压力,凹面腔底部压力,凹面腔前非涡流区压力在爆震波传入后随时间变化曲线,可看出即使凹面腔底部最大压力达到440 Mpa(由于沿凹面腔聚焦激波与非沿凹面腔对撞激波再次相撞导致),其高压区向外扩散后到其附近可燃气体充足区最大压力也只达到8.6 Mpa(由于轴向气体加速膨胀,导致压力较小)。

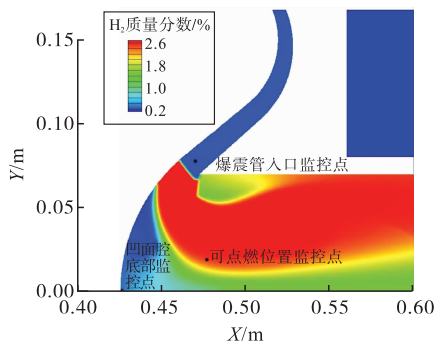


图20 监控点位置示意图

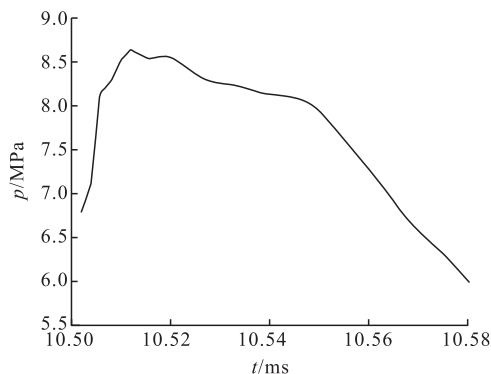


图21 爆震管进口压力曲线

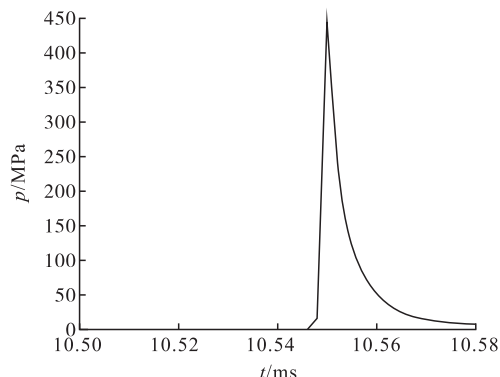


图22 凹面腔底部压力曲线

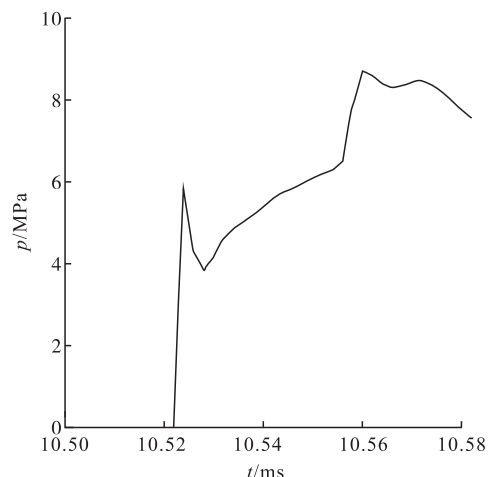


图23 可点燃处压力曲线

当爆震波进入凹面腔后解耦,解耦激波自行聚焦时,首先由于激波强度弱于爆震波,聚焦产生高压压力相对较小;同时,又由于凹面腔内涡流,凹面腔底部无可燃气体,聚焦产生高压区需要向轴向前方传播压力波以点燃混合气,但该压力波在传播过程中迅速减弱,该压力波将无法点燃可燃混合气。而且,爆震解耦后滞后的燃烧由于涡流区位于凹面腔和侧壁面而无法依靠壁面黏性影响燃烧湍流重新起爆。因此,可推断该凹面腔结构爆震管在爆震解耦后基本无法再次产生DDT过程使爆震复燃。

### 4 结论

本文针对切向入射的激波聚焦脉冲爆震发动机

试验进行了数值仿真,探究了预爆震结构内爆震波的产生,主爆震管内爆震波聚焦传播以及全过程的燃料/空气混合气填充问题,特别就凹面腔结构和圆弧椎体式激波聚焦结构进行了讨论,得出了以下结论:

1)凹面腔模型在  $H_2$  燃料化学恰当比条件下可在进入爆震管前起爆,并在爆震管内聚焦并向前传播,单次循环时间为 9.1 ms,填充时间为 7.6 ms,占总时间 83.5%,工作频率 109 Hz;

2)在燃烧传导到爆震室前设置收缩段、狭长段、弯曲段确实可以诱导爆震波产生,并且可以保证到爆震室前爆震波的正常传播;

3)凹面腔结构内会在填充过程中于凹面腔底部产生涡流,导致凹面腔底部无法快速填充,影响爆震传播过程,未观察到其对 DDT 过程产生正面作用。

### 参考文献

- [1] KENTFELD J A C. Fundamentals of Idealized Air-breathing Pulse-Detonation Engines [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(1): 77-83.
- [2] KHOKHLOV A M, ORAN S. Numerical Simulation of Deflagration-to-Detonation Transition: The Role of Shock-Flame Interactions in Turbulent Flames [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 11(7): 323-339.
- [3] ROY G D, FROLOV S M, BORISOV A A, et al. Pulsed Detonation Propulsion: Challenges, Current Status, and Future Perspective [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(6): 545-672.
- [4] ABRAMOWICZ W, WIERZBICKI T. Axial Crushing of Foam-Filled Columns [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1988, 30(3): 263-271.
- [5] SEITZBERGER M, BAMMERSTORFER F G, DE-GISCHER H P, et al. Crushing of Axially Compressed Stell Tubes Filled with Aluminum Foam [J]. *Acta Mechanica*, 1997, 125(1): 93-105.
- [6] LEYAVA I A, TANGIRALA V, DEAN A J. Investigation of Unsteady Flow Field in a 2-Stage PDE Resonator [Z]. AIAA-2003-0715.
- [7] TAKI S, FUJIWARA T. A Numerical Study of Detonation Resonator [C]//In *Application of Detonation to Propulsion*. Mosco: Torus Press, 2004: 257-261.
- [8] 陈星谷,王治武,郑龙席. 预爆管布置方式对起爆特性影响的数值模拟研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2013, 31(5): 737-741.
- [9] 荣康. 环形向心射流诱导激波聚焦与起爆爆震的实验及数值模拟研究 [D]. 西安: 空军工程大学, 2011: 24-33.
- [10] 张强,何立明,陈鑫,等. 两级脉冲爆震发动机的理想热力循环及性能分析 [J]. *推进技术*, 2012, 33(4): 499-504.
- [11] 曾昊,何立明,吴春华,等. 不同形式扩张喷管对两级 PDE 性能的影响 [J]. *推进技术*, 2013, 29(8): 1139-1146.
- [12] 曾昊. 两级脉冲爆震发动机的实验研究与数值模拟 [D]. 西安: 空军工程大学, 2011: 35-41.
- [13] 荣康,何立明,张建邦,等. 喷口导流环结构对激波聚焦起爆的影响分析 [J]. *推进技术*, 2012, 33(2): 299-305.
- [14] 张义宁,韩启祥,陈伟,等. 预爆管爆震波衍射特性数值研究 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25(2): 251-257.
- [15] 张义宁,唐豪,王家骅,等. 预爆管式脉冲爆震原型机试验研究 [J]. *航空学报*, 2009, 30(3): 391-396.
- [16] 蔡晓东,梁剑寒,林志勇,等. 基于自适应网格加密的超声速可燃气体射流起爆详细反应数值模拟 [J]. *航空动力学报*, 2014, 29(10): 2385-2392.
- [17] 赵坤,何立明,曾昊,等. 2 级脉冲爆震发动机中超声速射流对撞诱导激波聚焦试验研究 [J]. *航空发动机*, 2019, 45(2): 55-58.
- [18] KUO K K. 燃烧原理 [M]. 陈义良,张孝春,孙慈,等译. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991: 161-163.

(编辑: 姚树峰)