

爆震波通过环形通道传播模式试验研究

袁雪强, 蒋露欣, 张 多, 刘世杰

(国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点试验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 旋转爆震发动机环形燃烧室的设计是影响发动机性能的关键因素, 研究爆震波通过环形通道的传播过程能够为燃烧室设计提供有力指导。为了对这一传播过程及其传播模式进行系统研究, 采用流场阴影观测方法, 对爆震波通过环形通道的传播现象进行试验观测, 并结合通道内外壁面的影响对其传播模式进行详细划分, 依次分析各传播模式的形成机制及速度特性。研究表明, 爆震波的传播模式可按照波面是否发生解耦划分为不稳定传播模式和稳定传播模式, 根据马赫干的变化情况又可细分为马赫干增长型、平稳型和衰减型; 爆震波在不稳定传播模式下会出现明显的速度亏损, 而在稳定传播模式下速度较为平稳; 外壁面附近波面呈现一定的过驱度, 且过驱度随马赫干的衰减而增大; 随着初始压力的增大, 爆震波实现稳定传播的能力增强, 且使马赫干呈现增长-平稳-衰减的转换趋势, 而壁面曲率半径与通道宽度比的增大会使马赫干呈现衰减-平稳-增长的变化规律。

关键词: 旋转爆震发动机; 环形通道; 传播模式; 试验研究; 波系结构; 速度分布

中图分类号: V439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2021)06-0101-10

Experimental study on propagation mode of detonation wave in annular channel

YUAN Xueqiang, JIANG Luxin, ZHANG Duo, LIU Shijie

(Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: The design of the annular combustion chamber is a key factor affecting the performance of a rotating detonation engine. Studying the propagation process of the detonation wave through the annular channel can provide a powerful guide for the design of the combustion chamber. In order to systematically study this propagation process and its propagation mode, the flow field shadow observation method is used to experimentally observe the propagation of detonation wave through the annular channel, and the propagation mode is divided in detail based on the influence of the inner and outer walls of the channel. The formation mechanism and velocity characteristics of each propagation mode are analyzed. The research results indicate that the propagation mode of detonation wave can be divided into unstable and stable propagation modes according to whether the wave front is decoupled. While considering the change of the Mach-stem, the propagation mode can be subdivided into Mach-stem growing type, steady type and deca-

收稿日期: 2021-01-02; 修回日期: 2021-08-13

基金项目: 国家级重点实验室基金项目(6142704200101)

作者简介: 袁雪强(1991—), 男, 博士, 讲师, 研究领域为爆震燃烧及其推进技术。

ying type. In the unstable propagation mode, the wave velocity experiences obvious attenuation while the velocity is relatively steady in the stable propagation mode, the detonation wave front near the outer wall is overdriven, and the overdriven degree increases with the attenuation of the Mach-stem. With the increase of the initial pressure, the ability of the detonation wave in realizing stable propagation is enhanced, and the Mach-stem shows a growing-steady-decaying transition trend, while the increase of the ratio of the wall curvature radius to the channel width makes the Mach-stem present a decaying-steady-growing transition law.

Keywords: rotating detonation engine; annular channel; propagation mode; experimental study; wave structure; velocity distribution

0 引言

爆震燃烧作为一种近似于等容燃烧的燃烧形式,具有能量释放速率快、热力循环效率高等优点,因此以爆震燃烧为动力的爆震发动机在高超声速推进领域中有很好的应用前景^[1-2]。其中,旋转爆震发动机(rotating detonation engine, RDE)是爆震波以旋转形式传播为特点的动力装置^[3-6],这种发动机的燃烧室通常采用环形通道结构,爆震波在环形燃烧室内沿周向旋转传播,形成的高温气体产物通过尾喷管排出从而产生推力。旋转爆震发动机具有结构简单、质量轻等优势,并利用爆震波传播速度快的特点,可通过一次点火使发动机的工作频率达到数千赫兹,从而形成近乎连续的推力,因此是目前最有可能实现工程化应用的爆震发动机形式。对于旋转爆震发动机而言,环形燃烧室径向尺寸的改变会显著影响爆震波的传播模态、传播频率以及波头高度等参数,是影响其推力性能的关键因素之一。为了深入探究径向尺寸对爆震波传播的影响机制,可将爆震波沿周向的旋转传播近似看作静止气体爆震波在环形通道内的传播过程,通过研究环形通道内爆震波的传播过程,可为旋转爆震发动机环形燃烧室的设计提供有力指导。

目前有关爆震波通过环形通道传播过程的研究表明,受到内外壁面的共同影响,爆震波在环形通道内表现出多种不同的传播模式。Thomas 等最早通过试验发现了爆震波能够在环形通道中稳定地传播,但同时也可能形成爆震波解耦和再起爆交替产生的不稳定传播^[7]。Lee 等的仿真研究发现,当通道的曲率半径小于某个临界值时,爆震波表现为类似于单头螺旋爆震的不稳定传播模式,而当曲

率半径大于该临界值时,爆震波能够保持原有的横波结构稳定地传播^[8]。Kudo 等通过试验观测将爆震波的传播模式按照波面是否发生解耦划分为不稳定传播和稳定传播模式,并在对试验结果进行统计后得到了两种传播模式发生转换的内壁面临界曲率半径^[9]。Nakayama 等则基于 Kudo 的研究成果,研究将爆震波的传播模式细分为不稳定传播模式、过渡传播模式和稳定传播模式,并统计得到了 3 种模式之间发生相互转换的内壁面临界曲率半径分别为 14λ 和 23λ , 其中 λ 为爆震胞格宽度^[10-12]。Pan 等使用螺旋扁平方管对环形通道中爆震波的传播实现了更为全面的观测,所得结果与 Nakayama 的研究相似,同时还得到了形成爆震的极限曲率半径在 2.6λ 到 4.8λ 之间^[13-14]。Sugiyama 等和 Yuan 等分别使用两步反应和详细反应模型对不同曲率半径与通道宽度比的环形通道下爆震波的传播过程进行了仿真,并运用曲面爆震理论探讨了传播模式之间转换的临界条件^[15-16]。Short 等和 Xia 等则在研究发现了多种新的传播模式,包括爆震波部分解耦后又恢复稳定的不稳定传播模式以及曲面爆震波与马赫干共同存在的稳定传播模式^[17-18]。

从目前的相关研究来看,现有对环形通道内爆震波的传播模式的划分方式较为简单,其本质上只考虑了内壁面的爆震波衍射是否会使爆震波面发生解耦,无法全面体现爆震波受环形通道内外壁面影响下的传播特性,因此需建立更为详细的划分方法。基于上述问题,本文对爆震波通过环形通道的传播现象进行了试验观测及分析,对环形通道内爆震波的传播模式进行了更为系统详细的划分,并依次分析了各传播模式的形成机制、波系结构及速度特性,获得了各参数对传播模式分布的影响规律,

所得结果可为环形燃烧室设计提供参考。

1 试验系统及观测方法

本文的试验系统如图 1 所示。该系统主要由点火装置、爆震管和供气系统 3 部分组成,其基本的工作过程为通过供气系统对爆震管内的气体进行抽吸,并充入试验用的预混气,而后通过点火装置点燃预混气,点燃后的气体在爆震管中发展为爆震波,并在试验段中通过观测设备进行观测,最后从爆震管出口排出。

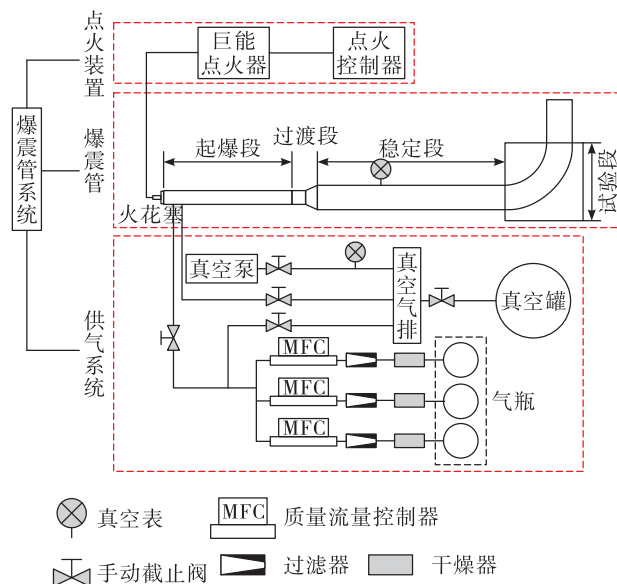


图 1 弯曲爆震管试验系统组成示意图

Fig. 1 Schematic of curved detonation tube experiment system

弯曲爆震管结构如图 2 所示。整个爆震管可分为起爆段、过渡段、稳定段、试验段和出口段,起爆段采用内径为 20 mm 的圆形直管,其前端安装点火用的火花塞,后端连接过渡段,两侧分别开孔并与进气和排气的管道相连。为了增加流场中的扰动,加速实现爆燃向爆震转变的过程,在起爆段内安装了一段长度为 400 mm 的螺旋状金属扰流丝。过渡段为扩张角较小的平滑扩张构型,以确保爆震波在传入稳定段的过程中不发生熄灭。稳定段由截面尺寸为 156 mm × 20 mm,长度为 800 mm 的两段方形直管连接而成,用于使爆震波在进入试验段之前得到充分发展并实现稳定传播,其中靠近试验段的部分内部可安装长条插块,以改变爆震波进入试验

段时的通道高度。试验段为内部可以安装插块的方形箱体结构,通过更换内部的插块来改变通道构型,其框架尺寸为 280 mm × 280 mm × 82 mm,左侧和顶部分别与稳定段和出口段相连。插块通过螺丝固定,再通过观测玻璃盖板进行密封。玻璃盖板内部安装石英玻璃,从而实现对流场的观测和拍摄。由于观测区域的限制,试验段中的环形通道只有 90°。试验采用的气体为 298 K 温度下体积比为 $H_2:O_2:Ar=2:1:2$ 的预混气。试验初始压力 p_0 分别设置为 30 kPa、40 kPa 和 50 kPa,通道宽度 d 分别设置为 20 mm、40 mm 和 60 mm,内壁面的曲率半径 R_0 设置为 20 ~ 100 mm,间隔为 20 mm。出口段尾部使用 PVC 膜进行密封,爆震波形成后可通过破坏 PVC 膜排出,以减少反射波系对观测的影响。

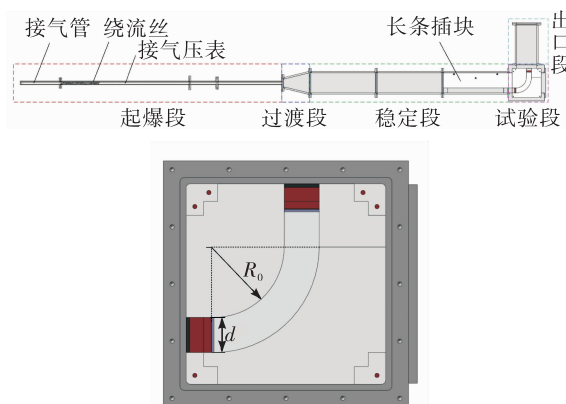


图 2 弯曲爆震管和试验段结构剖视图

Fig. 2 Sectional view of curved detonation tube and experimental section

激光阴影技术是本文试验的主要观测手段,其测量光路如图 3 所示。由于阴影反映的是流场密度的二阶梯度,因此使用阴影技术能够捕捉到流场中变化最为剧烈的爆震波波面信息。本试验中光源是由最大输出功率为 100 mW 的半导体激光器发出的波长为 532 nm 的连续激光,拍摄爆震波传播过程使用的高速相机为 Photron Fastcam SA-X2 高速数字摄影仪,并通过电脑端的操作软件实现控制、图像处理与数据存储。本文试验采用外部触发的拍摄模式,拍摄的图像分辨率为 256 × 256,拍摄速度为 21 600 fps。另外,试验中还在相机镜头前安装了只能通过 532 nm 激光的滤光片,以过滤燃烧产生的强烈火光。

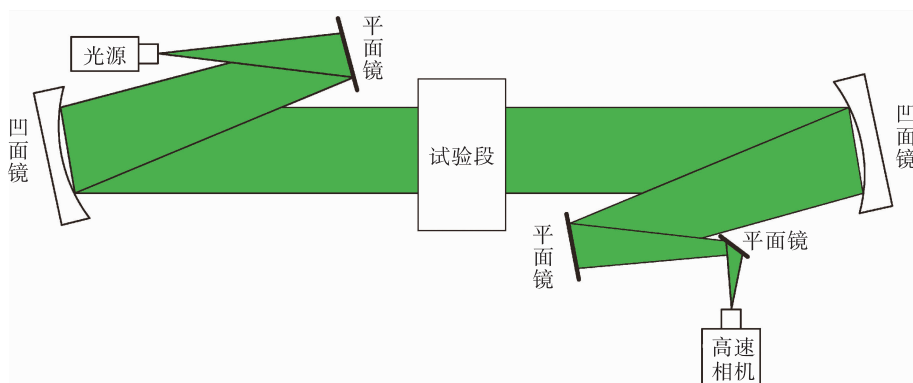


图3 激光阴影原理示意图

Fig. 3 Schematic of laser shadowgraph technique

2 结果与分析

过去的研究中,爆震波的传播模式一般按照波面是否发生解耦划分为不稳定传播模式和稳定传播模式^[9,11]。不稳定传播模式表现为传播过程中爆震波面发生解耦,对应的胞格图上出现爆震胞格消失的区域,如图4(a)、(b)所示,而稳定模式则表现为爆震波在传播过程中能始终保持波面耦合,对应胞格图中无胞格消失的区域,如图4(c)、(d)所示。事实上,从环形通道内外壁面对爆震波的影响机制

来看,爆震波在环形通道内能否稳定传播主要取决于内壁面的衍射是否会使爆震波发生解耦,因此这样的划分方法忽略了外壁面附近马赫干的发展对爆震波传播的影响。为了更为深入地研究爆震波在环形通道内的传播模式及其特性,根据马赫干的变化情况将现有的两种传播模式又细分为马赫干增长型、马赫干平稳型和马赫干衰减型,由此可得共计6种传播模式。下面对这6种传播模式的形成机制、波面结构以及速度分布情况进行详细的分析说明。

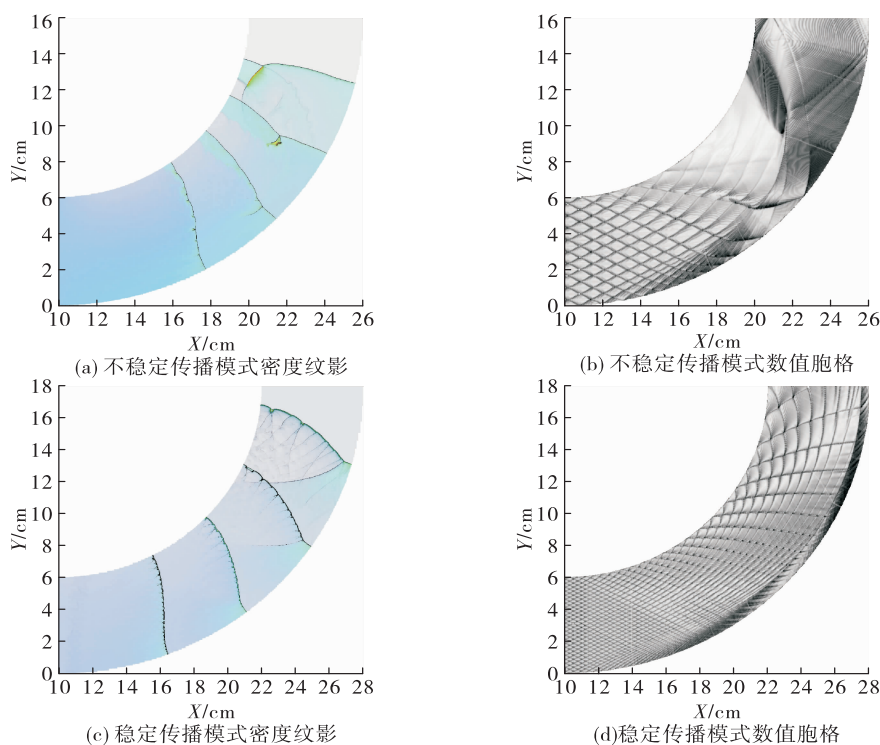


图4 现有研究中的两种传播模式下的密度纹影和数值胞格图对比

Fig. 4 Comparison of density schlieren and numerical soot foil for the two propagation modes in previous study

2.1 不稳定传播模式

2.1.1 马赫干增长型不稳定传播模式

马赫干增长型不稳定传播模式(IMUP)不同时刻的密度阴影如图 5 所示,对应工况为 $p_0 = 30 \text{ kPa}$, $d = 40 \text{ mm}$, $R_0 = 40 \text{ mm}$ 。从图中可以看出,这种传播模式的形成机制为内壁面附近的爆震波面因衍射而发生解耦,而外壁面处形成的马赫反射三波点与解耦波面发生接触,由于马赫干后方区域经外壁面的压缩温度和压力均较高,因此能够点燃解耦区域内的预混气并形成局部起爆,起爆产生的能量会加速反射三波点向内壁面的传播,最终导致了马赫干高度的迅速增长。该传播模式的结构特点是爆震波面上横波结构基本消失,但存在一个主导的马赫反射三波点结构在内外壁面之间来回碰撞反射,且内壁面附近的爆震波面始终存在解耦区域。

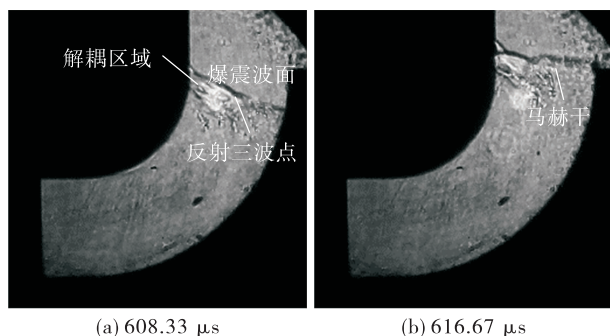


图 5 马赫干增长型不稳定传播模式(IMUP) 密度阴影图
Fig. 5 Density shadowgraph of increasing Mach-stem unstable propagation (IMUP) mode

2.1.2 马赫干平稳型不稳定传播模式

马赫干平稳型不稳定传播模式(SMUP)的密度阴影如图 6 所示,对应工况为 $p_0 = 40 \text{ kPa}$, $d = 40 \text{ mm}$, $R_0 = 40 \text{ mm}$ 。相较于 IMUP 模式,这种传播模式的初始压力 p_0 更高,所以内壁面附近的衍射爆震波能够自发形成再起爆,但还无法实现稳定的传播,因此波面上存在着有限的解耦区域。另外较高的初始压力还导致爆震波诱导区和反应区长度的缩短,从而使马赫干高度增长缓慢^[19],这就延长了马赫反射三波点到达内壁面的运动距离,因此解耦区域与外壁面附近的马赫反射三波点并未发生接触,无法形成局部起爆以促使马赫干的增长,而当

外壁面相对于爆震波面的夹角处于一定范围内时就可以形成高度基本不变的马赫干。这种传播模式的结构特点为内壁面附近衍射爆震波的再起爆与外壁面附近马赫干的传播相互独立,互不影响。

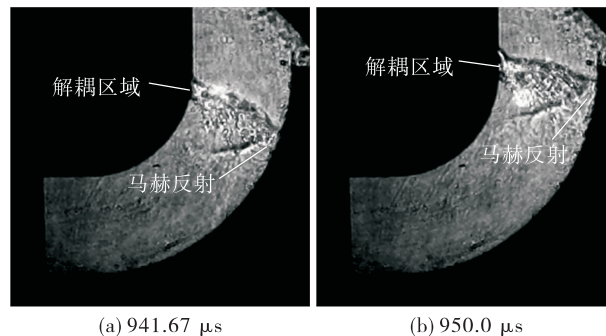


图 6 马赫干平稳型不稳定传播模式(SMUP) 密度阴影图
Fig. 6 Density shadowgraph of steady Mach-stem unstable propagation (SMUP) mode

2.1.3 马赫干衰减型不稳定传播模式

马赫干衰减型不稳定传播模式(DMUP)的试验结果如图 7 所示,对应工况为 $p_0 = 40 \text{ kPa}$, $d = 60 \text{ mm}$, $R_0 = 20 \text{ mm}$ 。该传播模式的形成机理与 SMUP 模式相似,较高的 p_0 使内壁面附近衍射爆震波能自发形成再起爆,但无法实现稳定传播,导致波面存在解耦区,而由于 R_0/d 相比 SMUP 模式有所减小,因此不仅导致解耦区域与马赫反射三波点无接触,还相应增大了外壁面相对于衍射波面的夹角,从而使马赫干高度随着传播而逐渐发生衰减。最终马赫干会完全消失,意味着马赫反射向规则反射发生了转化。这种传播模式的结构特点为发展稳定后的爆震波面不存在马赫干,外壁面处的反射为规则反射。

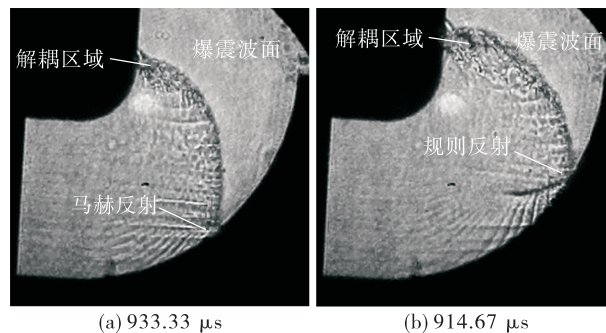


图 7 马赫干衰减型不稳定传播模式(DMUP) 密度阴影图
Fig. 7 Density shadowgraph of decreasing Mach-stem unstable propagation (DMUP) mode

2.2 稳定传播模式

2.2.1 马赫干增长型稳定传播模式

图 8 所示为马赫干增长型稳定传播模式 (IMSP) 的密度阴影图, 对应工况为 $p_0 = 30 \text{ kPa}$, $d = 20 \text{ mm}$, $R_0 = 80 \text{ mm}$ 。该传播模式的形成机制分为两种情况: ①如果内壁面无法达到衍射爆震波稳定传播的条件, 则衍射爆震波仍能够维持一段距离的耦合状态之后才发生解耦, 而由于 R_0/d 较大, 马赫反射三波点到达内壁面的运动距离较短。因此, 反射三波点可在衍射爆震波解耦之前通过波面上的运动到达内壁面, 从而保持爆震波不发生解耦地稳定传播。②如果衍射爆震波本身就能够无解耦地稳定传播, 那么只需保证反射三波点能够通过运动到达内壁面即可实现马赫干增长型的稳定传播。在这种传播模式中, 爆震波面实质上是在内外壁面来回碰撞的马赫干, 由于马赫干的弯曲程度较小, 且这种传播模式多出现在通道宽度较小而曲率半径较大的工况中, 因此波面形态基本为垂直于内外壁面的平面。

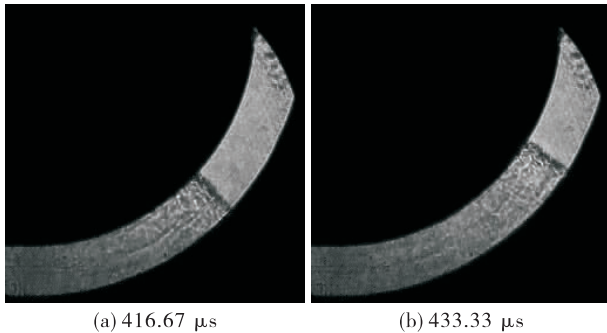


图 8 马赫干增长型稳定传播模式 (IMSP) 密度阴影图

Fig. 8 Density shadowgraph of increasing Mach-stem stable propagation (IMSP) mode

2.2.2 马赫干平稳型稳定传播模式

图 9 所示为马赫干平稳型稳定传播模式 (SMSP) 的密度阴影, 对应工况为 $p_0 = 40 \text{ kPa}$, $d = 40 \text{ mm}$, $R_0 = 80 \text{ mm}$ 。相较于 SMUP 模式, 该传播模式下初始压力 p_0 更高, 因此衍射爆震波能够在内壁面附近实现无解耦的稳定传播, 而较小的 R_0/d 能使外壁面附近形成高度基本不变的马赫干。在这种传播模式下, 稳定后的爆震波面表现为曲面爆震波

与马赫干组合的结构, 且这种结构在之后的传播过程中基本保持恒定。

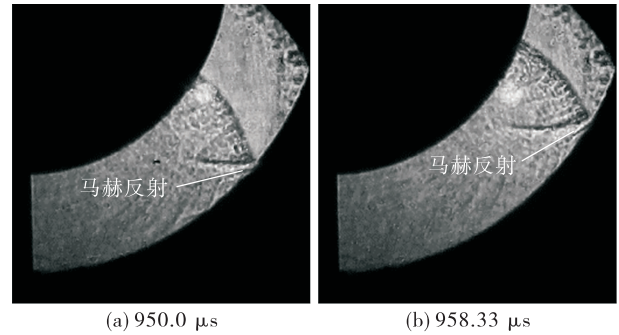


图 9 马赫干平稳型稳定传播模式 (SMSP) 密度阴影图

Fig. 9 Density shadowgraph of steady Mach-stem stable propagation (SMSP) mode

2.2.3 马赫干衰减型稳定传播模式

图 10 所示为马赫干衰减型稳定传播模式 (DMSP) 的试验拍摄结果, 对应工况为 $p_0 = 50 \text{ kPa}$, $d = 40 \text{ mm}$, $R_0 = 40 \text{ mm}$ 。该传播模式的形成机制与 SMSP 模式基本相同, 足够高的初始压力 p_0 使内壁面附近的衍射爆震波能够实现稳定传播, 而 R_0/d 比 SMSP 模式进一步减小, 从而使波面与外壁面的夹角进一步增大, 导致马赫干高度逐渐衰减, 最终马赫反射会向规则反射转化, 从而使马赫干完全消失。这种模式的结构特点为稳定后的爆震波仅由平滑过渡的弯曲波面构成, 且该曲面结构在之后传播过程中基本保持恒定, 外壁面处可见明显的规则反射结构。

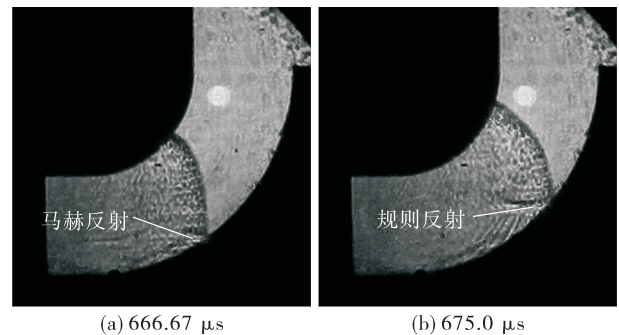


图 10 马赫干衰减型稳定传播模式 (DMSP) 密度阴影图

Fig. 10 Density shadowgraph of decreasing Mach-stem stable propagation (DMSP) mode

2.3 爆震波传播速度分布规律

通过对密度阴影中爆震波位置的提取,得到了各种传播模式下爆震波在内外壁面的传播速度随壁面中心夹角 θ_w 的分布情况,如图 11 所示。图中各传播模式分别对应于 2.1 节和 2.2 节中的各试验工况,其中 D_n 为爆震波面在壁面位置的传播速度, D_{CJ} 为该工况下的 CJ 爆震理论传播速度。从内壁面的传播速度来看,在不稳定传播模式下内壁面的传播速度发生了明显的衰减,各工况下的 D_n/D_{CJ} 均下降到了 0.5 左右,这表明爆震波解耦所造成的速度亏损非常严重。此外,在 DMUP 模式下观测到传播速度下降后上升的情况,推测可能为再起爆形成的局部爆震在内壁面的碰撞使爆震波面重新耦合在一起,由此引发了短暂的速度跃升,这一现象在过去的研究中也有报道^[16, 20]。相比之下,稳定传播模式由于内壁面附近波面无解耦,因此其速度分布要稳定许多, D_n/D_{CJ} 基本保持在 0.8 ~ 1 之间,仍有一定的速度亏损,这是由于内壁面附近爆震波面发生弯曲所导致的。

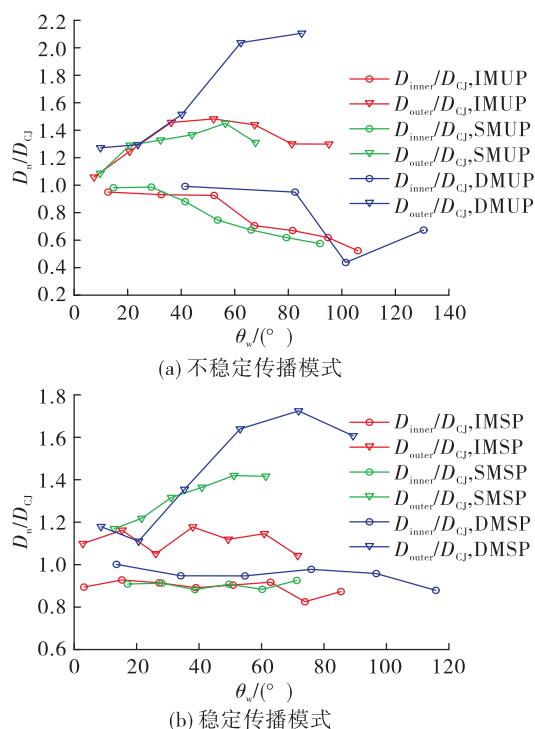


图 11 各传播模式下的爆震波传播速度分布

Fig. 11 Propagation velocity evolution of detonation wave for different propagation modes

对于外壁面的传播速度,从图中可以很明显地看到,不论在何种传播模式下,外壁面附近爆震波的传播速度均大于内壁面,且大于 D_{CJ} ,处于过驱状态。这是由于外壁面在垂直于放射三波点方向上的速度与 D_{CJ} 相当,由速度分解可知垂直于波面方向上的速度仅为爆震波传播速度的一个分量,如图 12 所示,假设马赫干为平直波面且垂直于外壁面,则外壁面出的波面传播速度与反射三波点处速度相等,因此在外壁面上测得的传播速度会大于 D_{CJ} 。另外,不稳定模式和稳定模式在外壁面的速度分布上没有明显的差异,其过驱度随马赫干的衰减而呈上升的趋势,尤其是在马赫干衰减型的传播模式下,由于马赫反射向规则反射发生了转换,其过驱度显著高于其他模式,达到 2.0 左右。此外还能发现,同一波面在内外壁面的速度相位差也与马赫干的变化有关,且也随着马赫干的衰减而增大,速度相位差主要由衍射而发生弯曲的爆震波面在内外壁面的位置不同引起,而马赫干的衰减会使弯曲波面的长度增加,从而导致了速度相位差的增大。

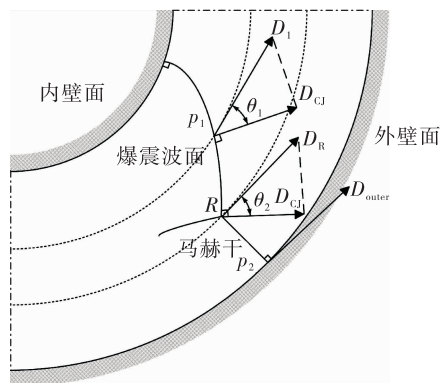


图 12 环形通道内爆震波面速度分布示意图

Fig. 12 Schematic of detonation wave front velocity distribution in the annular channel

以上的分析表明,所有的不稳定传播模式均会在内壁面出现速度骤减和跃升的剧烈振荡,且还伴随着爆震波解耦和再起爆等不稳定燃烧现象,如果旋转爆震发动机环形燃烧室内的爆震燃烧出现这样的不稳定传播模式,不仅会严重影响爆震发动机

的推力性能,还有可能导致燃烧室结构的烧蚀与损坏。相比之下,稳定传播模式中内外壁面的速度分布均较为平稳,能够实现较为固定的旋转传播频率,且燃料的燃烧也更为充分,因此在对环形燃烧室的尺寸参数进行设计时,应当尽量避免燃烧室内出现不稳定传播,确保爆震波在稳定传播模式下平稳地旋转传播。此外,爆震波面较大的速度相位差可能导致瞬时推力沿径向发生偏移,而较大过驱度所形成的高温高压则可能导致燃烧室壁面发生烧蚀。

综合来看,IMSP 模式下内外壁面的传播速度均较为平稳,且均接近 D_{CJ} ,速度相位差也很小,是环形燃烧室内爆震波较为理想的传播模式。

2.4 爆震波传播模式变化规律

通过对所有试验数据的统计,可得爆震波在不同 p_0 、 d 和 R_0 条件下的传播模式分布如图 13 所示,从其分布中可以得到爆震波传播模式的变化规律。

首先对于不稳定传播模式与稳定传播模式之间的转换,这主要由内壁面附近爆震波面是否发生解耦决定,因此初始压力 p_0 的增大提高了爆震波的强度,从而防止其在衍射过程中发生解耦,因此稳定传播模式的分布范围扩大,这与过去的研

究是相符的^[9,11]。而随着曲率半径 R_0 的增大,传播模式也会从不稳定向稳定转变,这是由于内壁面附近衍射波的稀疏效应随 R_0 的增大而减弱,从而降低了爆震解耦的发生。但通道宽度 d 的改变似乎对不稳定模式与稳定模式之间的转换没有显著的影响,这一现象可通过曲面爆震理论进行有效解释^[21]。

对于马赫干的变化类型,则主要由外壁面附近的爆震波马赫反射过程所决定。当 p_0 增大时,马赫干会呈现增长-平稳-衰减的转换趋势,这是由于 p_0 的增大会缩短爆震波诱导区和反应区的长度,从而加剧马赫干的衰减^[19]。 R_0 的增大能够增大反射时马赫干的绝对高度,而通道宽度 d 的减小则能够缩短反射三波点到达内壁面的距离,因此 R_0/d 的增大会使马赫干呈现衰减-平稳-增长的转换趋势。

最后,基于 2.1 节和 2.2 节中对爆震波各种传播模式形成机制的分析,可形成图 14 所示的各传播模式工况范围的判别流程,通过该流程就能够对不同工况下环形通道内爆震波的传播模式进行判别,从而获得每种传播模式的工况分布范围,如果可以从理论上确定流程中每个物理过程发生的临界条件,则可以对环形通道中爆震波的传播模式进行有效的预测,这将在今后开展进一步的深入研究。

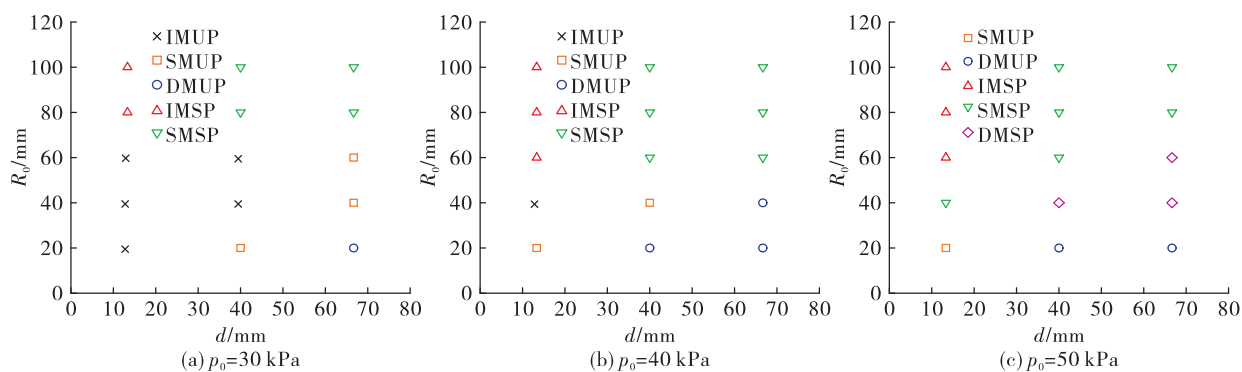


图 13 所有试验工况下爆震波传播模式分布

Fig. 13 Distribution of detonation propagation modes for all experiment cases

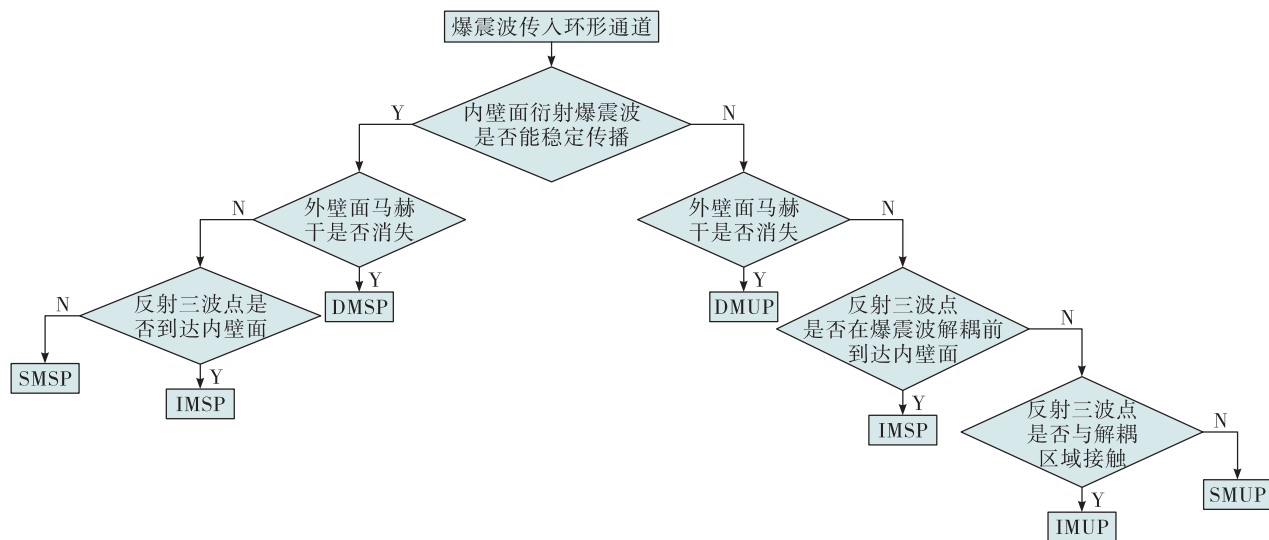


图14 环形通道内爆震波传播模式判别流程图

Fig. 14 Flowchart for distinguishing different propagation modes of detonation wave in annular channel

3 结论

本文对爆震波通过环形通道的传播现象进行了试验研究。根据爆震波受内外壁面的影响机制对其传播模式进行了详细的划分,并依次分析了各传播模式的形成机制、结构及速度特性,获得了传播模式分布随参数的变化规律,主要结论如下:

1) 爆震波传播模式按照波面是否发生解耦可划分为不稳定传播模式和稳定传播模式,其中不稳定传播模式下内壁面附近的爆震波会发生解耦,从而导致内壁面附近爆震波速度出现亏损和振荡,相比之下,稳定传播模式中爆震波不会发生解耦,因此在内外壁面附近的速度分布均更加平稳。

2) 根据马赫干的变化情况可将传播模式细分为马赫干增长型、平稳型和衰减型。外壁面附近波面的过驱度随马赫干的衰减呈现上升的趋势,尤其在马赫干衰减型的传播模式下,爆震波会在外壁面形成规则反射,导致外壁面附近波面过驱度远高于其他模式,同时内外壁面速度相位差也随马赫干的衰减而增大。

3) 随着初始压力和壁面曲率半径的增大,爆震波实现稳定传播的能力得到增强,但其稳定传播能力与通道宽度无关。此外,初始压力的增大使马赫干呈现增长-平稳-衰减的转换趋势,而壁面曲率半径与通道宽度比的增大会缩短马赫反射三波点到

达内壁面的运动距离,使马赫干呈现衰减-平稳-增长的变化规律。

参考文献:

- [1] 李自然,林志勇,韩旭. 超声速斜爆震发动机起爆过程研究综述[J]. 火箭推进, 2013, 39(3): 1-8.
LI Z R, LIN Z Y, HAN X. Investigation for initiation process of supersonic oblique detonation engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(3): 1-8.
- [2] 邱华,何有权,门凯. 流体喷管的脉冲爆震发动机出口过膨胀优化数值研究[J]. 火箭推进, 2021, 47(1): 29-35.
QIU H, HE Y Q, MEN K. Numerical study on overexpansion optimization of pulse detonation engine with fluidic nozzle[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(1): 29-35.
- [3] LIU S J, LIN Z Y, LIU W D, et al. Experimental and three-dimensional numerical investigations on H_2 /air continuous rotating detonation wave[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2013, 227(2): 326-341.
- [4] FROLOV S M, AKSENOV V S, IVANOV V S, et al. Large-scale hydrogen-air continuous detonation combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(3): 1616-1623.
- [5] LIU Y, ZHOU W J, YANG Y J, et al. Numerical study on

- the instabilities in H_2 -air rotating detonation engines [J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30(4): 046106.
- [6] LIU S J, HUANG S Y, PENG H Y, et al. Characteristics of methane-air continuous rotating detonation wave in hollow chambers with different diameters [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 183: 1-10.
- [7] THOMAS G O, WILLIAMS R L. Detonation interaction with wedges and bends [J]. *Shock Waves*, 2002, 11(6): 481-492.
- [8] LEE S H, CHO D R, CHOI J Y. Effect of curvature on the detonation wave propagation characteristics in annular channels [C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2008.
- [9] 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(2): 2319-2326.
- [10] 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. Reston, Virginia: AIAA, 2012.
- [11] NAKAYAMA H, MORIYA T, KASAHARA J, et al. Stable detonation wave propagation in rectangular-cross-section curved channels [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(2): 859-869.
- [12] NAKAYAMA H, KASAHARA J, MATSUO A, et al. Front shock behavior of stable curved detonation waves in rectangular-cross-section curved channels [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 1939-1947.
- [13] PAN Z H, CHEN K P, QI J, et al. The propagation characteristics of curved detonation wave: Experiments in helical channels [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3585-3592.
- [14] PAN Z H, QI J, PAN J F, et al. Fabrication of a helical detonation channel: Effect of initial pressure on the detonation propagation modes of ethylene/oxygen mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 192: 1-9.
- [15] SUGIYAMA Y, NAKAYAMA Y, MATSUO A, et al. Numerical investigations on detonation propagation in a two-dimensional curved channel [J]. *Combustion Science and Technology*, 2014, 186(10/11): 1662-1679.
- [16] YUAN X Q, ZHOU J, LIN Z Y, et al. Adaptive simulations of detonation propagation in 90-degree bent tubes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(40): 18259-18272.
- [17] SHORT M, CHIQUETE C, QUIRK J J. Propagation of a stable gaseous detonation in a circular arc configuration [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3593-3600.
- [18] XIA Z J, MA H, ZHUO C F, et al. Propagation process of H_2 /air rotating detonation wave and influence factors in plane-radial structure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(9): 4609-4622.
- [19] YUAN X Q, ZHOU J, MI X C, et al. Numerical study of cellular detonation wave reflection over a cylindrical concave wedge [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 202: 179-194.
- [20] LI J, REN H L, NING J G. Numerical application of additive Runge-Kutta methods on detonation interaction with pipe bends [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(21): 9016-9027.
- [21] YUAN X Q, ZHOU J, LIU S J, et al. Diffraction of cellular detonation wave over a cylindrical convex wall [J]. *Acta Astronautica*, 2020, 169: 94-107.