

# 甲烷/氧气爆震波点火器爆震波形成过程

李舒欣, 胡洪波, 许红卫

(西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为了解液氧甲烷火箭发动机爆震波点火器工作特性, 采用实验方法研究了低供给压力下甲烷/氧气爆震波的形成过程, 分析了点火时序、混合比等参数对爆震波参数的影响、缓燃向爆震转变增强措施对爆震波形成过程的作用规律以及结构尺寸对弯管中爆震波参数的影响。研究表明: 1) 不同当量比下, 甲烷氧气爆震管点火器的工作状态可分为爆震、快速火焰、慢速火焰、全局淬熄和未点火等状态。阻塞比在试验涉及的 0.12 至 0.42 范围内时, 随着阻塞比的增大, 能产生爆震的当量比范围逐渐扩大; 当量比在 1.5 附近, 阻塞比的大小对是否能形成爆震影响不大。2) 弯管及管中弹簧障碍物对于压力高、速度快, 接近于爆震波的火焰表现为抑制作用; 对于压力低、传播速度慢的缓燃火焰, 则能起到增强作用。

**关键词:** 爆震波; 火焰加速; 甲烷; 液体火箭发动机

**中图分类号:** V231.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9374(2021)03-0026-09

## Research on detonation wave formation of methane/oxygen detonation wave igniter

LI Shuxin, HU Hongbo, XU Hongwei

(Science and Technology on Liquid Rocket Engines Laboratory,  
Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to understand the working characteristics of detonation wave igniter for LOX/CH<sub>4</sub> rocket engine, the detonation wave formation of methane/oxygen under low supply pressure was investigated by experiment. The effects of ignition sequence, mixing ratio and other parameters on detonation wave parameters, the effect of enhancement measures of deflagration to detonation transition on detonation wave formation, and the effect of structure size on detonation wave parameters in bent pipe were analyzed. The results show that: 1) Under different equivalent ratios, the working status of the detonation wave igniter can be divided into detonation, fast flame, slow flame, global quenching and unignited states. When the blockage ratio is in the range of 0.12 ~ 0.42, the range of equivalent ratio that can produce detonation increases with the increased blockage ratio. When the equivalent ratio is about 1.5, the blockage ratio has little effect on the formation of detonation wave. 2) U shape tubes and the spring in it have suppression effect on the flame for the detonation wave with high pressure and fast speed. In addition, for the flame

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2020-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(11602186)

作者简介: 李舒欣(1992—), 女, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机热过程。

with low pressure and slow propagation speed, it can play an enhanced role.

**Keywords:** detonation wave; flame acceleration; methane; liquid rocket engine

## 0 引言

爆震波点火技术是利用低压可燃混气产生的爆震波实现发动机点火启动的一种新型点火技术。该技术应用于液氧甲烷火箭发动机,具有可实现多次点火、降低点火系统供给压力、简化点火系统与保证点火同步性<sup>[1]</sup>等优势。

爆震波点火的过程如下:甲烷与氧气进入预燃点火室,并在预燃点火室以及爆震波导管中充分混合。随后,电火花塞打火点燃预混点火室中气体,产生缓燃火焰,缓燃火焰在爆震导管中加速,实现缓燃向爆震转变(deflagration to detonation transition, DDT)进而形成爆震波。爆震波及高温燃气传入推力室并将其引燃。

目前,对于液氧/甲烷火箭发动机的点火研究集中在火炬点火方式上<sup>[2-8]</sup>,然而火炬点火对系统供应压力的要求相对较高,使得点火系统相对复杂,这在实现多机并联同步点火时更加明显。为此,有研究者尝试利用爆震波自增压的特性,实现液体火箭发动机低供给压力下的点火。北京航空航天大学郭红杰等人 2004—2006 年搭建了氢气/氧气爆震波点火试验系统,氢气/氧气供给压力为 0.1~0.5 MPa,混合比为 1.6~9.4,在常温条件下得到了爆震波在管路中的传播特性以及爆震波点火的单管重复性能试验数据。试验结果显示爆震波点火可在较低的供气压力下获得高温高压的燃烧产物<sup>[9-11]</sup>。

纵观国内外现有研究成果,面向飞行器发动机的爆震波点火器研究还非常有限。美国 NASA 在 1996—2001 年期间组织的 X-33 飞行器项目采用了塞式发动机<sup>[12-13]</sup>,该塞式发动机中采用了液氧/液甲烷点火剂的爆震波点火方案,全尺寸样机地面低温点火试验验证了方案的可行性。

现阶段针对液氧/甲烷火箭发动机爆震波点火技术的研究较少,对甲烷/氧气缓燃转爆震过程的认识也不够清楚,但国内外在氢气/空气爆震、甲烷/空气爆震、碳氢燃料/空气爆震等方面开展了较为广泛的研究。在爆震理论研究方面,国内外学者

们对爆震波的形成给出了不同定性解释:热点理论、梯度理论和相干能量释放的激波放大理论<sup>[14-15]</sup>。为了适应空间布局的局限性,爆震波在弯管内的传播特性也受到了研究人员的关注。研究者们使用压力测量、烟迹和纹影等方法观察到爆震波在弯管壁面凹侧强度增大,在凸侧由于发散作用产生了膨胀波使得强度降低甚至发生局部淬熄,由于波阵面上横波的作用,爆震波局部淬熄后又得以重新起爆。弯管的曲率半径及管中初始压力是影响爆震波通过弯管时锋面压力、传播速度的重要因素,曲率半径越大,初始压力越高则爆震波越容易通过弯管而不熄灭<sup>[16-19]</sup>。

从国内外研究现状可知,国内外对液氧/甲烷火箭发动机爆震波点火过程的研究较少,制约了爆震波点火技术在液氧/甲烷火箭发动机中的应用。虽然国内外对爆震的研究成果较多,但其研究更多采用的是氢气/空气、氢气/氧气、甲烷/空气等介质,采用甲烷/氧气的相对较少,对甲烷/氧气燃烧转爆震过程的认识较为缺乏。因此,有必要开展甲烷/氧气爆震波点火技术的研究以推进其在液氧/甲烷火箭发动机中的应用。考虑到工程应用中对点火器低压供给、小包络的要求,本文以试验的形式,对低供给压力下的爆震现象及 DDT 增强装置和弯管这两种可能的缩减爆震波点火器包络尺寸的结构进行了研究。

## 1 低供给压力下甲烷/氧气爆震波形成过程研究

形成足够强度的甲烷/氧气爆震波是实现爆震波点火技术的首要条件。液氧/甲烷火箭发动机实际应用中,推进剂贮箱提供的压力相对较低,低压条件下甲烷/氧气爆震波形成过程及其影响因素作用规律尚不十分清楚,本节结合液氧/甲烷火箭发动机中的实际情况,对爆震波形成过程中填充压力、混合比等因素的作用进行考察。

### 1.1 试验装置与试验方法

试验所用爆震管装置如图 1 所示,分为头部、DDT 段和加长段 3 个部分。其中甲烷及氧气由头

部接入,通过同轴剪切喷嘴实现掺混,并由火花塞点燃,火焰在 DDT 段中完成缓燃转爆震的过程。DDT 段的圆管内部加装弹簧,起促进 DDT 过程的作用<sup>[20]</sup>。DDT 段后接加长段,用于测量爆震波通过时的压力数值。整个管道内径为 10 mm,尾端未设置喉部。

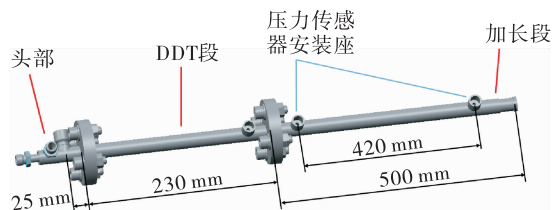


图 1 爆震管示意图

Fig. 1 Schematic of detonation tube

试验中,利用气源储箱对爆震管进行气体供应,每一路所用孔板固定不变,通过调节供气压力来调节流量。 $\text{CH}_4$ 路供气压力在 0.58 ~ 0.86 MPa 范围内, $\text{O}_2$ 路为 0.27 ~ 2.74 MPa。先后对 4 种供气时序进行了测试,每种时序详情如表 1 所示,每种时序均可实现爆震管的满填充。

表 1 点火时序

Tab. 1 Ignition sequences

单位:ms

时序	氧气阀 开启 $t_1$	甲烷阀 开启 $t_2$	甲烷阀 关闭 $t_3$	氧气阀 关闭 $t_4$	火花塞 通电 $t_5$	火花塞 断电 $t_6$
1	0	0	3	3	3	3.3
2	0	0	2	2	3	3.3
3	0	0	2	2	2	2.3
4	0	0	4	4	4	4.3

爆震波波速是试验中获取的重要数据,其计算方法为两脉动压力传感器座间的距离除以爆震波传播通过两个传感器测点所需的时间,即

$$v = \Delta x / \Delta t \quad (1)$$

式中: $v$  为爆震波传播速度; $\Delta x$  为相邻两传感器距离; $\Delta t$  为多次测量得到的爆震波锋面时间差的平均值。爆震波传播速度  $v$  的误差分析方法参见文献[21]。计算可知,当理论爆震波波速为 2 389.2 m/s 时,试验用装置及测量系统测量结果为  $(2\,389.2 \pm 93.64)$  m/s,可认为测量误差对是否产生爆震的判定不产生影响,在可以接受的范围内。

## 1.2 甲烷/氧气爆震波形成过程

试验测试了不同点火时序(表 1)下当量比在 0.47 至 7.05 范围内的一系列工况。记安装在加长段上游的脉动压力传感器为 1<sup>#</sup>,下游为 2<sup>#</sup>,则测得的典型脉动压力曲线如图 2 所示,该图显示了氧气孔板前压力 0.86 MPa、甲烷孔板前压力 0.59 MPa、当量比为 1.54 时加长段中测得的压力曲线。当爆震波经过压力测点时,压力曲线出现一个陡峭的峰值,1<sup>#</sup>测点测得的峰值压力为 2.02 MPa,2<sup>#</sup>测点测得峰值压力为 2.428 MPa。随后曲线缓缓下降,此阶段压力变化符合 Taylor 波的变化规律。当爆震波从下游管口传出后,膨胀波开始向上游反传,测点压力值不断降低,直至环境压力。记录 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>脉动压力传感器捕捉到爆震波峰值压力的时刻,即可由式(1)计算得到爆震波在加长段中的传播速度。计算得到爆震波传播速度为 2 625.0 m/s,与 CEA 计算得到的 CJ 速度 2 591.1 m/s 相比略高,这一差别可认为由测量误差造成。

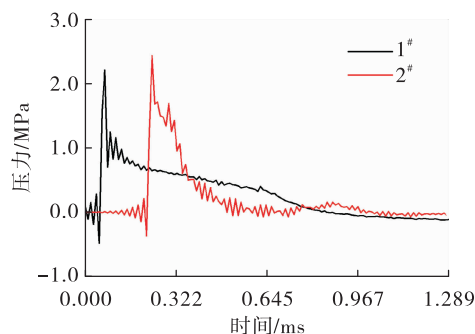


图 2 压力-时间曲线

Fig. 2 Pressure-time traces

## 1.3 当量比对爆震波特性的影响

通过上述测量方法,试验共获得 38 个数据点,各工况下的爆震波速度如图 3 所示,图中黑实线和虚线分别表示由 CEA 计算得到的 CJ 爆震速度和燃气中的声速。从中可以看出按照当量比的大小不同,其对爆震波形成及爆震波参数的影响可分为 4 个区域。

1) 当量比较小 ( $< 0.75$ ) 时,管中点火成功率不高。

2) 当量比在 0.75 ~ 1.12 范围时,火焰传播速度得到一定的提升,但未加速至产生爆震波的情况。火焰被加速至约 70% ~ 100% 燃气声速。

3) 当量比在 1.4 ~ 3.4 范围内时,试验测得的爆震波速度与 CJ 速度相当。然而并非该当量比范围内的所有工况均能形成爆震,分析认为能否形成爆震与多种因素相关,如管中的湍流强度等,仅有适合的当量比不足以保证爆震的形成。

4) 当量比上升至 4.2 后,出现起爆困难。

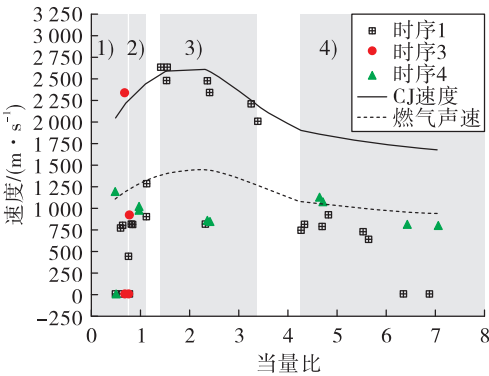


图 3 不同点火时序下测得的压力波传播速度

Fig. 3 Pressure wave velocities under different ignition sequences

1.4 时序对爆震波形成的影响

试验中涉及到的 4 种时序皆为氧气和甲烷气同时开启同时关闭,时序 2 中在氧气、甲烷供气停止后间隔 1s 再使火花塞放电,在时序 1、3、4 中均为供气停止后火花塞立即放电,区别在于填充时间长度不同。

图 3 中展示了不同时序下的点火情况,从图中可见,包含了 1 s 间隔的时序 2 无法点燃管中气体,原因在于在停止供气的 1 s 内,可燃气向管道下游流动,爆震管头部没有气体补充,使得头部可燃气体压力过低,混气浓度低,难以点燃。采用时序 4 时未形成爆震可能由于工况安排较少及试验中的误差造成,为进一步探明原因需增加试验次数,并综合考虑分析管中的湍流状态。

2 甲烷/氧气短距起爆研究

小型化是爆震波点火器工程化过程中所必须解决的一环。通常会在爆震管中加入各种形式的障碍物,如 Shchelkin 螺旋、孔板、斜劈等<sup>[22-26]</sup>来达到加速爆震波形成,缩短 DDT 距离,实现短距起爆的目的。本节使用弹簧在爆震管内设置 Shchelkin 螺

旋,通过试验,研究了不同几何参数的 Shchelkin 螺旋对甲烷/氧气 DDT 过程的影响,分析了 DDT 增强措施对甲烷/氧气爆震波形成过程的影响规律。

2.1 短距起爆试验装置

本节研究使用的试验装置为在第 1.1 节中使用装置的基础上,在其 DDT 段中替换不同尺寸的弹簧,即变化 Shchelkin 螺旋的几何尺寸得到。涉及弹簧的规格如表 2 所示。

表 2 弹簧规格

Tab. 2 Spring specifications

序号	丝径/mm	外径/mm	阻塞比 $D$	节距/mm
1 <sup>#</sup>	0.6	10	0.12	8
2 <sup>#</sup>	0.8	10	0.16	8
3 <sup>#</sup>	1.2	10	0.24	8
4 <sup>#</sup>	1.5	10	0.30	8
5 <sup>#</sup>	1.8	10	0.36	8
6 <sup>#</sup>	2.1	10	0.42	8

试验中向搭载不同阻塞比弹簧的爆震管及不搭载弹簧的光管通入不同当量比的甲烷/氧气气体并使用火花塞点火,通过加长段上的两个测点测得管中气体的压力及燃烧波传播速度。

2.2 结果与分析

试验中测得的压力波形可分为如下 3 类,如图 4 所示。

图 4(a)所示情形加长段 2 个压力测点测得的峰值压力超过 70% CJ 速度,且计算得到的压力波传播速度与 CJ 速度相近,可认为此时管中产生了爆震波;图 4(b)中 2 个压力测点获得的峰值压力较低,约为 CJ 压力的 20% ~ 40%,该种现象称为快速火焰(fast flame)<sup>[27]</sup>,是一种火焰传播速度被提升,但无法发展成爆震的情况;图 4(c)中,1<sup>#</sup>压力测点获得的压力数值始终较为平稳,2<sup>#</sup>压力测点在火花塞放电后的一段时间后出现一次小范围波动,认为是火花塞放电脉冲造成,分析认为该种波形对应的管中现象可以有 3 种:未点燃、慢速火焰(slow flame)或发生全局淬熄。慢速火焰即管中气体点

燃后始终保持较弱的缓燃状态,燃烧波传播速度慢,火焰面前后压差小。全局淬熄指管中气体在点燃后,在与障碍物的作用中发生了全面熄灭。

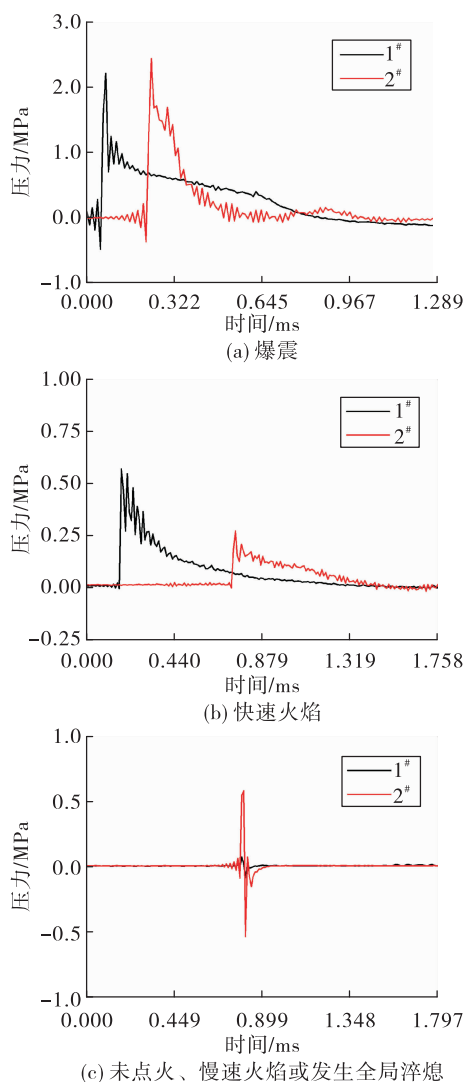


图 4 3 类压力波形

Fig. 4 Three types of pressure wave form

对搭载不同阻塞比弹簧的爆震管通入不同当量比的甲烷/氧气气体后点火,分析加长段中两个压力测点获得的压力数据,依照上述方法对管中发生的燃烧现象进行判断和分类,获得图 5。

为了表述方便,下文中将未点燃、慢速火焰及全局淬熄 3 种情况统称为“情况三”,分析图中数据点可发现以下特征:

1) 阻塞比在试验涉及的 0.12 ~ 0.42 范围内时,无论阻塞比的大小,当量比在 1.5 左右时管中均能

产生爆震。由 CEA 计算知,该工况下 CJ 速度的峰值出现在当量比约为 1.8 时,可认为当混气当量比处于爆震波释放能量最大时,DDT 发生的可能性最大,此时阻塞比的大小对是否形成爆震影响较小。

2) 阻塞比从 0.12 向 0.42 增大的过程中,能产生爆震的当量比范围逐渐扩大。

3) 当阻塞比较小(阻塞比小于 0.3)时,快速火焰和“情况三”之间的界限不明显,即在当量比偏离化学恰当比较多时,快速火焰和“情况三”均有发生的可能。

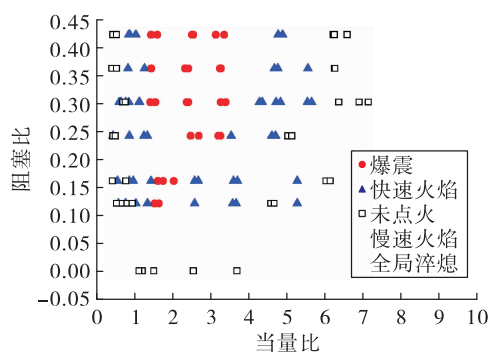


图 5 不同障碍物阻塞比 (BR) 及混气当量比下的燃烧状态

Fig. 5 Combustion modes under different block ratios (BR) and equivalence ratios

当量比决定了可燃混气的释热能力,混气的释热能力决定了火花塞放电后管中会出现何种燃烧现象,释热能力越强则发生 DDT 过程的可能性越大,当释热能力过小时,在障碍物的影响下,则有熄灭的可能。障碍物对火焰的作用包含了促进和抑制两个方面,选取合适的阻塞比及当量比将更有益于爆震的形成。本节中得到的结论主要着眼于阻塞比与当量比共同作用于燃烧波时期间的关系,试验中使用了不透明的不锈钢管故不便于测得 DDT 距离,进一步的研究拟采用光学管并获得障碍物在缩短 DDT 距离,即缩短爆震波点火器长度方面的影响效果。

### 3 爆震管构型对甲烷/氧气爆震波参数的影响

点火器产生的热燃气包含能量越多则点火能力越强,为能产生更多的热燃气则需要在爆震管中



积累更多的可燃混气,这就使得爆震管的长度不能一味缩短。采用直管形式,相对而言整体尺寸较大,会限制爆震波点火器的使用范围。使用带有弯曲结构的异型爆震管不仅能使点火器在总装布局时的适应性,还有可能增强 DDT 过程。本节中通过试验,研究了不同曲率下甲烷/氧气爆震波的形成和发展过程,分析爆震管构型对甲烷/氧气爆震波参数的影响规律,为发展异型爆震波点火器形成相应设计准则。

### 3.1 U 型爆震管

试验所用装置如图 6 所示。试验装置分为头部、弯管、加长段 3 个部分,3 部分之间由法兰相连。其中头部与 1.1 节中介绍的相同,加长段由 1.1 节中的 DDT 段去掉弹簧充当。整个管道内径为 10 mm。弯管段由一组不同弯曲半径的弯管替换件组成,在试验中可变换弯管曲率半径,弯管内侧弯曲半径  $R$  (图 6 所示) 分别为 40、70、90 mm,弯管截面外径为 14 mm,即弯管轴线半径为 47、77 mm、97 mm。在弯管的两端设置有两个脉动压力传感器安装座(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>)。对于每种轴线半径的弯管,共制作 2 根,其中一根管中置入弹簧,另一根管内光滑。置入弹簧规格与 1.1 节中相同,为丝径 2.1 mm、外径 10 mm、节距 8 mm。加长段用于测量弯管下游爆震波峰值压力及波速,加长段尾部为 3<sup>#</sup> 压力传感器安装座。2<sup>#</sup> 与 3<sup>#</sup> 间的距离固定不变为 236 mm。

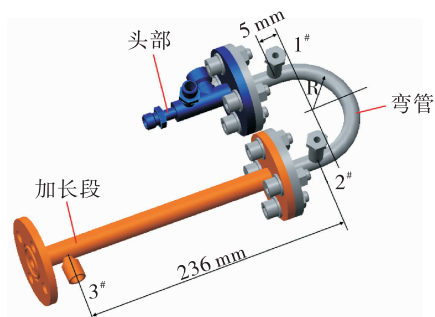


图 6 弯管几何尺寸

Fig. 6 Schematic of U shape tube

### 3.2 几种典型现象

考察试验中在 3 个测点测得的压力曲线,发现所得曲线可归为以下几种典型形式,如图 7 所示。

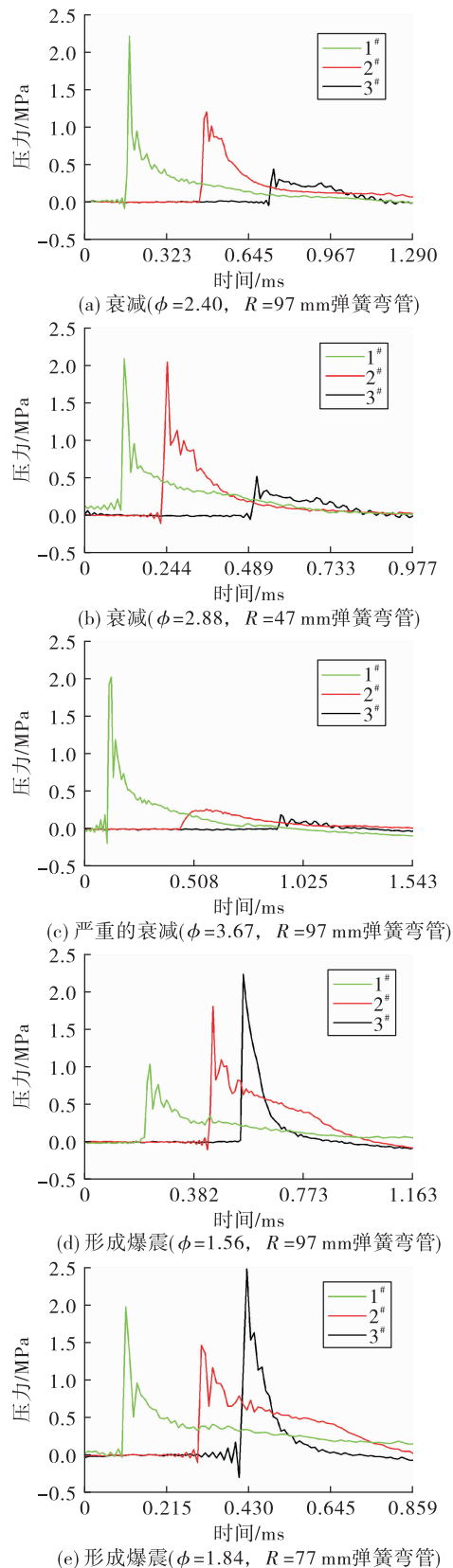


图 7 压力波形

Fig. 7 Pressure wave forms

### 3.2.1 衰减

图 7(a)、(b)、(c)中情况,点火后,燃烧波在管中传播时压力不断降低,然而压力下降的过程有所区别。在图 7(a)对应的工况中,1<sup>#</sup>压力测点处测得的峰值压力高达 2.2 MPa,传播 314 mm 到达 2<sup>#</sup>测点时峰值压力为 1.19 MPa,再传播 236 mm 到达 3<sup>#</sup>测点时峰值压力为 0.43 MPa。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>测点间的平均传播速度为 1 048.6 m/s,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>测点间的平均传播速度为 874.1 m/s。燃烧波压力在整个传播过程中压力的衰减速率较为稳定,在弯管中压力衰减至进入弯管时的一半。在该工况中 97 mm 弯曲半径的弯管及管中的弹簧对火焰传播速度的增加表现出抑制作用,且火焰在通过弯管段后,压力和传播速度均持续下降。

在图 7(b)对应的工况中,1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>测点测得的峰值压力均较高,1<sup>#</sup>处测得峰值压力 2.1 MPa,2<sup>#</sup>处测得的峰值压力为 2.0 MPa,即锋面压力可在弯管中维持。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>测点间平均火焰传播速度为 1 212.2 m/s。火焰峰值压力接近 CJ 压力(2.47 MPa),但速度与 CJ 速度(2 428 m/s)相差较大,可认为此时火焰在弯管中处于一种接近爆震的准爆震状态,在该供气条件下,47 mm 弯曲半径弹簧弯管对火焰有一定的加速作用,但还不足以促使 DDT 过程完成。火焰在传出弯管,进入直管加长段后,压力快速衰减至 0.5 MPa,加长段中的平均传播速度为 907.7 m/s,这一结果与 2.2 节中结果一致,即当  $\phi = 2.88$  时,内径 10 mm 的光滑直管对火焰的加速作用非常有限,较难出现 DDT 现象。

在图 7(c)对应的工况中,1<sup>#</sup>测点测得的压力较高,为 2.0 MPa,然而在弯管中迅速衰减至接近大气压,当火焰传播至 2<sup>#</sup>时,压力仅为 0.22 MPa。火焰传至 3<sup>#</sup>时,压力进一步衰减至 0.18 MPa。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>测点间的平均传播速度为 983.1 m/s,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>测点间的平均传播速度为 513.0 m/s,火焰传播速度持续降低。对比图 9 与图 7,图 9 中燃烧波波后压力的衰减速率远快于图 7,鉴于两工况中弯管为相同的 97 mm 弯曲半径弹簧弯管,可认为造成这一区别的原因仅在于当量比的不同,当量比过高导致管中混气释热能力不足,弯管段造成的能量耗散影响变得

更为显著。

### 3.2.2 形成爆震

图 7(d)、(e)对应的工况中爆震管中均形成了爆震波。在图 7(d)对应的工况中,火焰在从 1<sup>#</sup>到 2<sup>#</sup>再到 3<sup>#</sup>测点传播的过程中压力不断上升,传播速度越来越快。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>测点测得的峰值压力分别为 1.02 MPa、1.78 MPa、2.22 MPa,1<sup>#</sup>与 2<sup>#</sup>测点间的平均传播速度为 1 429.9 m/s,2<sup>#</sup>与 3<sup>#</sup>测点间的平均传播速度为 2 145.46 m/s,可认为在 3<sup>#</sup>处已经形成了爆震波。

在图 7(e)对应的工况中,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>测点测得的峰值压力分别为 1.95 MPa、1.44 MPa、2.45 MPa,1<sup>#</sup>与 2<sup>#</sup>测点间的平均传播速度为 1 258.9 m/s,2<sup>#</sup>与 3<sup>#</sup>测点间的平均传播速度为 1 966.7 m/s。图 7(d)与图 7(e)的不同之处在于从 1<sup>#</sup>到 2<sup>#</sup>,图 7(d)中火焰压力上升,图 7(e)中火焰压力下降,但在这两种情况下最终均能形成爆震波。

对比“火焰衰减”和“形成爆震”两种管中火焰发展的形式,可发现在发生火焰衰减的工况中,1<sup>#</sup>测点测得的峰值压力均较高,在最终能形成爆震的工况中,1<sup>#</sup>测点测得的峰值压力有高有低。分析认为弯管及管中弹簧障碍物对火焰的作用随火焰压力高低、传播速度的快慢而有所不同:对于压力高、速度快,接近于爆震波的火焰表现为抑制作用;对于压力低、传播速度慢的普通缓燃火焰,则能起到增强燃烧,促使 DDT 过程发生的作用。

### 3.3 弯曲半径对燃烧现象的影响

图 8 展示了装有弹簧的不同轴线半径的弯管中火焰传播现象与当量比的关系。总体而言,当量比在 1~2 范围内时,可通过装有弹簧的弯管形成爆震波,使爆震波点火器的包络尺寸在长度方向大大缩减。如将 1.1 节中 230 mm 的 DDT 段换为  $R = 77$  mm 的弯管,则长度减小了 153 mm。随着当量比的增加,DDT 过程逐渐变得困难,弯管对火焰的发展显现出抑制作用。对比不同轴线弯曲半径的弯管,半径较大时( $R = 97$  mm),在高当量比区域弯管对火焰发展的抑制作用十分强烈,这是由于大半径弯管的弯管段长度较大,火焰在弯管中传播的距离更长。

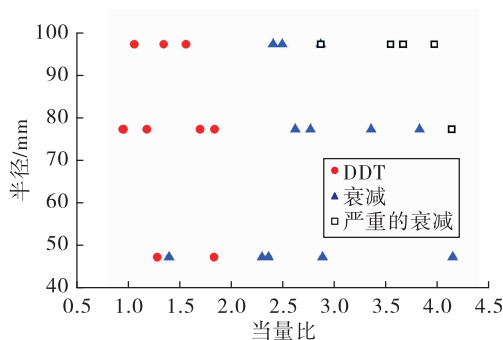


图 8 不同弯曲半径及当量比下的燃烧状态(障碍物管)

Fig. 8 Combustion status under different bending radius and equivalence ratios

### 3.4 弯管中 DDT 增强装置的作用

图 9 就相同弯曲半径下置入弹簧与否进行了对比。在两个 97 mm 弯管的对比中可以发现,比起置入弹簧,在高当量比范围时光滑管对火焰的抑制作用较弱。对于弯管形式的爆震管,障碍物形式的爆震增强装置易于表现出其抑制火焰传播方面的作用,应根据混气当量比,更为谨慎的选用障碍物形式的爆震增强装置。

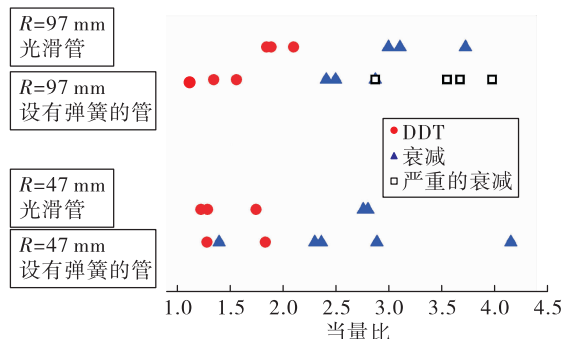


图 9 有无 DDT 增强装置下的燃烧状态

Fig. 9 Combustion status with or without DDT enhancement device

## 4 结论

1) 按照当量比的大小不同,其对爆震波形成及爆震波参数的影响结果可分为 4 个区域,依次为点火困难、缓燃、爆震、起爆困难,其中缓燃又可细分为快速火焰和慢速火焰两种状态,点火困难可分为全局淬熄和未点火两种状态。

2) 甲烷/氧气混气当量比在 1.5 附近,即混气释热能力最强时,在障碍物的作用下,DDT 发生的

可能性最大,此时阻塞比在 0.12 ~ 0.42 的范围内时,阻塞比的大小对是否能形成爆震影响不大。即设计爆震波点火器时,若取混合比在 1.5 附近时,可根据对管路流阻的设计要求在较宽的范围内选择阻塞比。当阻塞比较小(阻塞比小于 0.3)时,快速火焰和“未点燃、慢速火焰、全局淬熄”之间的界限不明显。

3) 对于压力高、速度快,近似于爆震波的火焰,弯管及管中障碍物表现为抑制作用;对于压力低、传播速度慢的普通缓燃火焰,则能增强燃烧,促使 DDT 过程发生;当量比在 1 ~ 2 范围内时,可通过装有弹簧的弯管形成爆震波,随着当量比的增加,DDT 过程逐渐变得困难,弯管对火焰的发展显现出抑制作用。在设计爆震波点火器时应根据发动机总装布局合理使用弯管结构。

### 参考文献:

- [1] LIU L C. Combustion-wave ignition for rocket engine [C]//The 1992 JANNAF Propulsion Meeting. [S. l.]: AIAA, 1992.
- [2] 焦玉立. Vinci 发动机点火系统研制状况[J]. 火箭推进, 2003, 29(1): 52-55.
- [3] 潘一力,周海清,程诚. 3 000 N 液氧/液甲烷发动机方案与试验研究[J]. 火箭推进, 2018, 44(6): 7-13.
- [4] PAN Y L, ZHOU H Q, CHENG C. Scheme and test of 3 000 N liquid oxygen and liquid methane rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(6): 7-13.
- [5] SCHNEIDER S, JOHN J, ZOECKLER J. Design, fabrication, and test of a LOX/LCH<sub>4</sub> RCS igniter at NASA[C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 08 July 2007 - 11 July 2007. Cincinnati, OH. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [6] KLEINHENZ J, SARMIENTO C, MARSHALL W. Spark ignition characteristics of a LO<sub>2</sub>/LCH<sub>4</sub> engine at altitude conditions[C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlanta, Georgia. Reston, Virginia: AIAA, 2012.
- [7] BREISACHER K. LOX/methane main engine glow plug igniter tests and modeling[R]. NASA/TM - 2009 - 215522,



- 2009.
- [7] BREISACHER K, AJMANI K. LOX / methane main engine igniter tests and modeling [C]//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 21 July 2008-23 July 2008. Hartford, CT. Reston, Virginia; AIAA, 2008.
- [8] TRUJILLO G R. Design and testing of an OX/CH<sub>4</sub> swirl torch ignition system [D]. El Paso: The University of Texas at El Paso, 2015.
- [9] 郭红杰, 梁国柱, 马彬, 等. 爆震波点火技术基本特性实验 [J]. 推进技术, 2005, 26(1): 76-79.
- [10] 郭红杰, 梁国柱, 马彬, 等. 液体火箭发动机爆震波点火技术初步研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(4): 375-380.
- [11] 郭红杰, 梁国柱, 马彬, 等. 爆震波点火器在氢氧塞式喷管的工程应用 [J]. 火箭推进, 2006, 32(6): 16-19.
- GUO H J, LIANG G Z, MA B, et al. Engineering application of detonation wave igniter on hydrogen-oxygen aerospike nozzle engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(6): 16-19.
- [12] LIOU L C. X-33 Combustion-Wave Ignition System Tested [R]. NASA, 1999.
- [13] Lockheed Martin Skunk Works Cooperative Agreement. X-33 phase II annual performance report [Z]. 1999.
- [14] ALKEMADE C T J, BLEEKRODE R, BURGER J C, et al. Bibliography on flame spectroscopy analytical applications 1800-1966 [M]. [S. l.]: Macmillan Education, 1967.
- [15] ZELDOVICH Y B, LIBROVICH V B, MAKHVILADZE G M, et al. On the development of detonation in a non-uniformly preheated gas [J]. Astronautica Acta, 1970, 15(5): 313-321.
- [16] EDWARD D H, THOMAS G O. The diffraction of detonation waves in channels with 90° bend [J]. Combustion, 1983, 3(3): 65-76.
- [17] 夏昌敬. 可燃气体爆轰波在弯曲管道中传播特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2003.
- [18] THOMAS G O, WILLIAMS R L. Detonation interaction with wedges and bends [J]. Shock Waves, 2002, 11(6): 481-492.
- [19] 王昌建, 徐胜利, 郭长铭. 气相爆轰波在半圆形弯管中传播现象的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 448-453.
- [20] FROLOV S M. Acceleration of the deflagration-to-detonation transition in gases: From Shchelkin to our days [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2012, 48(3): 258-268.
- [21] 颜腾冲, 熊姣, 范玮, 等. 爆震波速度测量的不确定度研究 [C]//中国工程热物理学会燃烧学学术会议. [S. l.]: 中国工程热物理学会, 2016.
- [22] 韩启祥, 王家骅, 王波. 预混气爆震管中爆燃到爆震转换距离的研究 [J]. 推进技术, 2003, 24(1): 63-66.
- [23] FARINACCIO R, HARRIS P, STOWE R. Turbulent Flow Effects on DDT Run-up Distance for a Pulse Detonation Engine [C]// AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2013.
- [24] HOKE J, BRADLEY R, SCHAUER F. Impact of DDT mechanism, combustion wave speed, temperature, and charge quality on pulsed-detonation-engine performance [C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia; AIAA, 2005.
- [25] 何小民, 张彭岗, 王家骅. 爆震管内爆燃到爆震转换过程的实验研究 [J]. 推进技术, 2005, 26(3): 252-255.
- [26] 张群, 闫朝, 严传俊, 等. 两相爆震波爆燃向爆震转变过程的数值模拟 [J]. 计算机仿真, 2008, 25(2): 9-12.
- [27] CICCARELLI G, DOROFEEV S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(4): 499-550.