流体障碍物对爆震燃烧起爆性能影响的实验研究*

王永佳,范 玮,李舒欣,张 扬,何建男,张启斌

(西北工业大学 动力与能源学院,陕西西安 710072)

摘 要:为研究流体障碍物对于缓燃火焰向爆震波转变特性的影响,用乙烯和40%的富氧空气作为 燃料和氧化剂,在6mm方形爆震管中进行了爆震燃烧实验。将带流体障碍物的爆震管与常规光滑爆震 管起爆性能进行了对比,并首次提出了用热态流体障碍物加速起爆的方法。实验结果表明,在恰当的喷 射孔径下,流体障碍物能够有效地加速爆震波的起始。对于6mm方形爆震管,通入1mm直径的冷态和 热态流体障碍物均能够明显地加速起爆,分别使起爆距离缩短24%和15%;2mm热态流体障碍物没有明 显的加速起爆作用,而2mm冷态流体障碍物甚至阻碍了火焰的传播。在相同的射流尺寸下,相比于传 统的冷态流体障碍物,热态流体障碍物有更好的爆震加速起始增益效果。

关键词: 冷态流体障碍物; 热态流体障碍物; 起爆距离; 喷射孔径 中图分类号: V437 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2017) 03-0646-07 DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2017. 03. 021

Experimental Study for Effects of Fluidic Obstacles on Detonation Initiation Performance

WANG Yong-jia, FAN Wei, LI Shu-xin, ZHANG Yang, HE Jian-nan, ZHANG Qi-bin

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To investigate the impact of the fluidic obstacles on the deflagration to detonation transition (DDT) process, experiments were conducted in a 6mm square tube, using ethylene and 40% oxygen enriched air as fuel and oxidant, respectively. The detonation performance of the tube with fluidic obstacles was compared with that of the smooth tube, and the method of accelerating detonation using hot fluidic obstacles was first proposed. The results show that fluidic obstacles can effectively accelerate detonation initiation at proper jet diameter. For the 6mm square tube, injecting 1mm diameter non-reacting/hot gas fluidic obstacle can both remarkably accelerate detonation initiation, shortening 15% and 24% DDT distance, respectively. However, the 2mm diameter hot fluidic obstacle almost has no positive effect, even the 2mm non-reacting fluidic obstacles impedes the flame propagation. Therefore, the hot fluidic obstacles enhance detonation better than the conventional non-reacting fluidic obstacles at the same jet diameter.

Key words: Non-reacting fluidic obstacles; Hot fluidic obstacles; Detonation transition distance; Injection diameter

1 引 言

燃烧是推进系统十分重要的过程,它通过化学 反应将燃料的化学能转化为工质的热能,再转变为 动能,产生推力。自然界有两种类型的燃烧波:缓燃 波和爆震波¹¹。缓燃波通常以相对低的速度向未燃 混合物传播,会使燃气的比体积增加,压力略有下 降,可近似认为是等压过程。爆震波能产生极高的

基金项目: 国家自然科学基金 (51176158; 91441201; 51376151); 教育部博士点基金 (20126102110029); 西北工业大学博士论文创新基金 (CX201504)。 作者简介: 王永佳, 男, 博士生, 研究领域为爆震燃烧及推进技术。E-mail: yongjia09@126.com

^{*} 收稿日期: 2016-07-25;修订日期: 2016-10-12。

燃气压力(15~55倍大气压)及燃气温度(大于 2800K),且以几千米每秒的速度向未燃混合物传播。爆震波可以描述成具有化学反应的强激波,其 燃烧过程接近于等容燃烧过程^[2]。

根据传统的 CJ 理论,沿 Hugoniot 曲线 CJ 爆震点 是熵增的最小点,这意味着以爆震燃烧为基础的推 进系统在热循环效率上将非常有优势[3]。在很短的 距离和时间内获得连续、稳定的爆震波是当前爆震 波推进应用研究中的一个技术难点[4]。通常在爆震 燃烧室内获得爆震波的方法有3种:(1)用高能量点 火源(高能电弧放电、激光、爆炸波等)直接起爆燃料 混合物^[5];(2)两级起爆方法,即先在装满容易起爆的 可燃混气的小管内形成爆震波,然后用小管内的爆 震波去点燃大管内的相对较难起爆的可燃混气以形 成爆震波^[6];(3)采用低能量点火源点燃爆震管内的 可燃混气,通过缓燃向爆震转变(Deflagration to Detonation Transition, DDT)的方式形成爆震波^[7]。高能量 点火系统一般都很复杂且笨重,不利于在发动机上 的实际应用,两级起爆方法会带来燃料供应系统及 发动机结构的复杂性。因此大多数研究者都将眼光 转向了通过DDT的方式在爆震管内形成爆震波的 方法。

传统的 DDT 增强装置依靠各种形式的障碍物, 如孔板、螺旋等,来增强燃烧的湍流度,加速 DDT 过 程^[8,9]。Matsukov等^[10]采用孔板形式的障碍物加速火 焰传播,采用纹影拍摄了 H₂在空气以及氧气等混合 物中的传播过程,研究表明,由于障碍物的存在,爆 震管流通面积发生变化,火焰锋面面积随管内流通 面积的变化而变化,增加了火焰传播的湍流度,进而 提高了火焰的传播速度。Shchelkin螺旋的加速机理 与孔板相似,均能够通过增加火焰的湍流度来加速 火焰^[11]。然而燃烧室中的障碍物会对气流流动形成 很大的流阻,增大发动机的总压损失,进而降低发动 机的推力及推进效率。使用几种典型的 DDT 增强障 碍物,推力损失可达10%~35%^[12]。为兼顾快速起爆 性能和发动机的推进效率,Knox等^[13,14]提出了流体 障碍物技术。爆震管的DDT段不再添加固体障碍 物,而是通过壁面狭缝或孔,向流场中喷射氮气,对 流场形成扰动增大湍流度,进而加速爆震波起始,缩 短DDT距离。他们的研究表明,在DDT段喷射氮气 能够有效缩短DDT距离,相比于具有同样起爆性能 的固体障碍物,流体障碍物的总压损失能够降低一 半以上。但对于不可燃气体稀释流场产生的不利影 响以及流体喷射装置造成的系统复杂化,并没有 评估。

本文在 6mm 方形爆震管实验台上,开展爆震管 中喷射氮气对于爆震波起始影响的研究,对火焰加 速过程中的火焰形态、火焰锋面传播速度进行分析, 并与常规的光滑爆震管的起爆性能进行对比。此外 针对常规喷射不可燃气体的冷态障碍物技术的弊 端,提出热态流体障碍物技术,同样对其起爆性能进 行验证。流体障碍物加速起爆验证实验在喷射孔径 1mm和2mm两种几何尺寸下开展。

2 实验系统及方案设计

2.1 实验系统及测量方法

本文开展的实验在乙烯-富氧空气(氧气体积分数占40%)气相爆震实验台上完成,系统示意图如图 1所示。系统主要由燃料和氧化剂气瓶组、节流装 置、减压装置、电磁阀和6mm方形爆震管组成。燃料 和氧化剂经过电磁阀控制进入爆震管头部进行混 合,通过电磁阀的开合控制实现间歇式供给,运用火 花塞来控制点火。同样,作为冷态喷射流体来加速 起爆的氮气也通过电磁阀控制其工作相位及工作时 长。氮气首先统一供给到喷射腔中,再从三个喷射 孔中喷出。实验中乙烯和氧气反应的初始条件为 室温 25℃,大气压为0.101MPa,可爆混合物当量比 为1.0。



Fig. 1 Schematic of the experiment system

*p*₁~*p*₄为爆震管上的4个压力测点,用来实时监 测爆震管内的压力变化,为了简化实验件结构,压力 传感器 p1~p3 安装座与喷射流体的喷射孔共用。压 力测量采用动态响应特性良好的压电式压力传感器 (PCB112A02SN),传感器的信号经过信号放大处理 后,输入高速采集仪中(DEWETRON 3020),采样频 率为200kHz。此外,为清晰地观察火焰的传播,用高 速摄像机(Phantom 7.0)进行了拍摄。实验中测量爆 震波速度的方法有两种:(一)用相邻压力传感器的 距离除以相邻压力峰值的时间间隔;(二)通过高速 摄影在某一采样率下测出相邻两帧的火焰锋面距 离,再除以对应时间间隔,计算火焰速度,两种方法 可以互为参照。第一种方法的误差主要取决于传感 器的灵敏度(约50.7pC/MPa)和数据采集系统的采样 频率(200kHz)。由于传感器和采集系统的精度已经 相对较高,所以可认为测得的速度值误差较小。第 二种方法的误差取决于高速摄影机在某一采样频率 下的像素分辨率和测量尺寸时产生的误差。由于爆 震管上安装的压力传感器数量有限,只能反映火焰 锋面较长距离(80mm)内的平均速度,而高速摄影图 像可反映火焰锋面逐渐加速的过程。因此用压力传 感器所测速度对高速摄影所得的速度进行检验和校 对后,将重点对高速摄影图像进行分析,对其火焰加 速起爆的过程进行详细分析。

为详细描述实验件结构,爆震管及射流装置实物图如图2所示。首先对爆震管进行说明,如图2(a) 中爆震管的端视图所示。钢结构底板和盖板通过螺 栓紧固,中间夹有用作观察视窗的有机玻璃板,在底板上铣有方形爆震槽道。图2(b)为爆震管及射流装置的正视图。在爆震管的中轴线上布有燃料/氧化剂进气口、火花塞及4个压力测点,点火处距离进气孔50mm, *p*₁测点距离点火处80mm,压力传感器间距均为80mm。*p*₁~*p*₃除作为压力传感器安装座外,兼具喷射孔的作用。在射流装置的中轴线上布有射流入口及射流腔,通过中轴线位置的高精度加工保证射流腔与*p*₁~*p*₃射流孔正对。将射流装置紧固在爆震管上,如图2(c)所示。喷射氮气从射流入口供给,沿喷射腔流动,并从*p*₁~*p*₃位置处喷射形成冷态流体障碍物,氮气喷射压力为0.3MPa,喷射孔径为1mm, 2mm。

2.2 实验原理

流体障碍物技术工作原理示意图如图3所示,类 似于固体障碍物,射流能够增大爆震管中流场的湍 流度,增大火焰锋面面积,从而加速DDT过程。

在爆震室中喷射冷态不可燃气体加速火焰传播 的同时,气体的吸热以及稀释作用对火焰的传播造 成不利影响,喷射气体的供给也使系统更加复杂。 为此,本文首次提出用微小尺度热射流加速爆震波 起始的方法,工作原理如图4所示。向爆震管中填充 新鲜的可爆混气,可爆混气从喷射孔中向热射流腔 中填充,直至实现满填充,见图4(a);爆震管中的火 花塞点燃新鲜混气,开始发生燃烧反应,见图4(b); 爆震管中的火焰向开口端传播,经第一个射流孔点 燃射流腔中的混气,两个腔室的火焰同时向后传播,



(a) End view of the detonation tube



(b) Internal structure of the detonation tube and the jet device



(c) Connection between detonation tube and the jet device







见图 4(c);相较于爆震管,射流腔的尺度较小,其 DDT距离较短,火焰加速更快^[15,16],因此射流腔中的 火焰先于爆震管中的火焰到达下一射流孔,并在开 孔处喷射形成局部热射流,以此增大爆震管中的湍 流度,提高爆震管中的火焰速度提升,见图 4(d);在 继续向后传播的过程中,由于射流腔中的火焰能够 先一步实现爆震,两个腔室中的火焰传播速度差值 将进一步增大,后面射流孔处能够形成更大尺度的 湍流,继续对爆震管中的燃烧形成扰流,加速DDT 过 程,见图 4(e);爆震管内完成 DDT 过程,爆震波向开 口端稳定传播,见图 4(f);最后阶段与常规 PDRE 一 致,完成已燃气体的排气和隔离气体的吹除过程,见 图 4(g)和 4(h);一个循环完成,进入下一循环,开始 填充新鲜混气准备燃烧。



Fig. 4 Graphical representation of hot jet fluidic obstacle

本文将利用微小尺度热射流来加速爆震波起始的方法简称为热态流体障碍物技术。在热态流体障碍物加速起爆的验证实验中,封闭图2(c)中的射流 入口,系统即可按照图4完成工作循环。

3 实验结果分析

3.1 光管内的爆震波起始

利用 NASA CEA^[17]程序计算可得爆震管中可爆 混合物当量比为 1.0 时,理论 CJ爆震压力为 2.6MPa, 爆震波传播速度为 2089.4m/s, CJ 理论值可作为实验 中是否成功获得爆震波的判据。实验中测得的爆震 管内的压力波形图如图 5 所示。4 个压力测点 $p_1 ~ p_4$ 的峰值压力分别为 2.04MPa, 1.62MPa, 3.87MPa 和 5.05MPa。 p_1 和 p_2 之间的平均速度为 1230.8m/s, p_2 和 p_3 之间的平均速度为 1333.3m/s, p_3 和 p_4 之间的 平均速度为2222.2m/s。 p₃测点之后,燃烧波的压力 以及火焰锋面的传播速度均达到了CJ理论值,因此 可以判断爆震波在 p₃测点附近形成。下面与高速摄 影仪拍摄的图像进行对照,光滑管内的DDT过程如 图6所示。



Fig. 5 Pressure profiles in the detonation tube

高速摄影仪采样率设置为 50kHz,曝光时间为 20µs。图 6 中横坐标表示爆震管某处与火花塞的间 隔距离,纵坐标表示火焰向开口端传播过程中的不 同时刻。通过火焰相邻时间间隔的位移,可以得出 火焰锋面的传播速度,如图 7 所示,火花塞位置为横 坐标原点。



Fig. 6 DDT formation in the smooth detonation tube



Fig. 7 Velocity of flame tip along the smooth detonation tube

结合图 6 和图 7 可以看出,火焰加速经历 3 个阶段:(1)火焰近似于"指尖形"(Finger flame)^[15],火焰

锋面面积较大,有利于强化化学反应,火焰锋面传 播速度从初始的几十米每秒的湍流火焰速度逐渐 加速到千米每秒量级;(2)当火焰锋面传播速度达 到某一临界值后,迅速加速,缓燃火焰迅速转变为 过驱爆震状态(对应于爆震波的起始位置),火焰锋 面明显变大、变亮,对应于 p₃测点位置;(3)过驱爆 震波逐渐衰减,火焰锋面发展为平面(Planner flame),形成稳定传播的爆震波,传播速度逐渐趋近 于爆震波 CJ理论传播速度。从图7中可以看出,起 爆位置为横坐标 234mm 处,对应于 p₃测点附近,与 压力传感器测量结果一致,因此后文中主要根据火 焰图像来判断不同工况下的爆震波起始位置并进 行对比。

3.2 冷态流体障碍物对爆震波起始的影响

喷射 2mm 氮气后,火焰传播过程及火焰锋面的 传播速度分别如图8和图9所示。从图8可以看出, 在 2mm 氮气射流作用下,爆震管内火焰形态呈如下 特点:(1)开始阶段,火焰同样近似于"指尖形",由于 湍流增强作用,化学反应面积增大,火焰传播速度逐 渐增大。(2)在之后的传播过程中,随着时间推移,爆 震管内氮气填充量越来越多,未燃区域内的可爆混 合物浓度越来越低,喷射氮气对可爆混合物的稀释 作用和对燃烧的吸热作用越来越明显,燃烧强度逐 渐减弱以致不足以维持火焰加速传播,火焰颜色逐 渐变暗。从图9中爆震管内火焰锋面传播速度的发 展来看,在2mm氮气射流作用下,火焰锋面传播速度 先单调递增而后在二分之一CJ爆震速度处振荡。在 单调递增阶段,火焰锋面传播速度能够很快加速到 千米每秒量级,对应的爆震管长度约为90mm,从图7 可以看出,在无喷射气体的爆震管内,点火后加速到 千米每秒量级所需行程为110mm,由此可见,气体喷 射确实能够强化湍流,加速火焰传播。在振荡阶段, 由于可爆混合物的填充浓度逐渐减小,燃烧产生能 量的不足,缓燃火焰锋面的传播速度将始终在二分 之一 CJ 爆震速度处震荡,缓燃波未能成功转化为 爆震波。



Fig. 8 DDT formation in the detonation tube with 2mm N₂ jet

从上述关于 2mm 冷态流体障碍物的研究中可以 看出,冷态流体障碍物一方面能够强化湍流,加大燃 烧强度;另一方面却会稀释未燃混气,使燃烧放热的 强度不足以支持火焰加速。很明显,2mm 冷态流体 障碍物实验中第二方面的因素占据了主导地位,导 致最终未能形成稳定发展的爆震波。因此尝试1mm 喷射孔来喷射氮气,减小气体喷射量,检验其起爆性 能。高速摄影拍摄的单个循环的火焰传播过程如图 10所示。



Fig. 9 Velocity of flame tip along the detonation tube with $2mm N_2$ jet



Fig. 10 DDT formation in the detonation tube with 1mm N_2 jet

在减小了氮气喷射孔径后,冷却气流对燃烧强度的削弱作用有了明显的改善:(1)从火焰锋面之后的火焰颜色来看,呈现大面积的亮白色反应区域,锋面后强度足够的化学反应能够支持火焰锋面持续加速;(2)计算火焰锋面的传播速度可得,火焰锋面传播至198mm处达到CJ爆震速度。与光管234mm长的起爆距离相比,1mm的冷态流体障碍物有效缩短了DDT距离。

3.3 热态流体障碍物对爆震波起始的影响

分别开展 2mm 和 1mm 几何尺寸下的热态流体障碍物加速起爆的验证实验,得到了火焰传播的图像。由于两种工况下的火焰传播情形类似,在此只针对 2mm 热态流体障碍物作用下的 DDT 火焰加速过程进行分析,如图 11 所示。在火焰传播过程中,火焰锋面始终为亮白色,表明燃烧强度足够,解决了冷态

流体障碍物加速 DDT工作过程中燃烧强度遭受削弱 的问题。图 11 中, *ι*=540μs 时刻,6mm爆震管中的火 焰已经完全传出管口,但在第一个射流孔处(*p*₁位 置)传出了小股火焰,表明在 2mm射流腔内确实实现 了反应混合物的填充并发生了燃烧,这也是热态流 体障碍物能够正常工作的前提。在 2mm和 1mm几何 尺寸下的热态流体障碍物实验中,火焰均成功起爆, 起爆距离分别为 233mm和 178mm。



Fig. 11 DDT formation in the detonation tube with 2mm hot jet

3.4 不同工况下起爆性能的对比

对实验中五种不同工况下的起爆距离进行汇 总,如表1所示,可以看出,流体障碍物技术能够有效 加速起爆,缩短DDT距离。值得注意的是,喷射孔径 一定要恰当,一方面,在冷态流体障碍物实验中,过 大的喷射孔径会直接导致缓燃波无法成功起爆;另 一方面,在热态流体障碍物实验中,虽然过多地喷射 流体并不会削弱爆震室中的能量,但类似于固体障 碍物的阻塞比概念,过大的喷射孔径(如6mm爆震 管径下2mm的喷射孔径)喷射流量过大,会最终形 成过大的阻塞比,起爆距离并不能明显缩短,反而可 能造成较大的流阻损失。此外,热态流体障碍物的 起爆性能要明显优于冷态流体障碍物,可以杜绝喷 射气体对爆震管中火焰能量的削弱作用,实现更短 距的起爆。

Table 1 DDT distance of all the experiments

	No jet	$2mm\;N_2\;jet$	1mm N2 jet	2mm hot jet	1mm hot jet
DDT distance/mm	234		198	233	178
Non-dimensional DDT distance	1		0.85	1.00	0.76

4 结 论

本文针对带有冷态流体障碍物和热态流体障碍物的爆震管,与不含流体障碍物的光滑爆震管进行 了起爆性能的对比实验,得出以下结论:

(1)总体而言,流体障碍物技术能够有效地缩短 DDT距离,但喷射气流的孔径必须谨慎选择。

(2)对于6mm方形爆震管,2mm热态流体障碍物 没有明显的加速起爆作用,而2mm冷态流体障碍物 会稀释爆震管中的新鲜未反应混合物,最终无法成 功起爆。

(3)对于6mm方形爆震管,1mm热态流体障碍物和1mm冷态流体障碍物都能够明显地加速起爆,分别缩短了DDT距离的24%和15%。

(4)相比于传统的冷态流体障碍物技术,热态流体障碍物能够在几乎不增加系统复杂度的前提下更 有效地加速起爆,实现微小尺度爆震与常规尺度爆 震的结合应用,值得后续探索。

由于流体障碍物对于爆震转变的影响因素很 多,采用一些无量纲化的相似参数分析射流对爆震 转变的影响,将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] 严传俊,范 玮.脉冲爆震发动机原理及关键技术[M].西安:西北工业大学出版社,2005.
- [2] Fickott W, Davis W. Detonation [M]. Berkeley: University of California Press, 1979.
- [3] Wolanski P. Detonative Propulsion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34: 125-158.
- [4] Fan W, Yan C J. Experimental Investigation on Two-Phase Pulse Detonation Engine [J]. Combustion and Flame, 2003, 133(4): 441-450.
- [5] 李 强.脉冲爆震火箭发动机模型实验研究及工作 过程仿真[D].西安:西北工业大学,2007.
- [6] Frolov S M. Fast Deflagration to Detonation Transition
 [J]. Russian Journal of Physical Chemical, 2008, (27): 442-455.
- [7] Chapin D M. A Study of Deflagration to Detonation Transition in a Pulsed Detonation Engine [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [8] Lee J H S. The Detonation Phenomenon [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [9] Brophy C M, Dvorak W T, Dausen D F, et al. Detonation Initiation Improvements Using Swept-Ramp Obsta-

cles[R]. AIAA 2010-1336.

- [10] Matsukov I, Kuznetsov M, Alekseev V, et al. Photographic Study of Unstable Turbulent Flames in Obstructed Channel[C]. Heidelberg: Proceedings of the 17th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 1999.
- [11] Paxson D, Schauer F. Performance Impact of Deflagration to Detonation Transition Enhancing Obstacles [R]. AIAA 2000-502.
- [12] Hoke J L, Bradley R P, Schauer F R. Impact of DDT Mechanism, Combustion Wave Speed, Temperature, and Charge Quality on Pulsed-Detonation-Engine Performance[R]. AIAA 2005-1342.
- [13] Knox B W. The Fluidic Obstacle Technique- an Approach for Enhancing Deflagration to Detonation Transition in Pulse Detonation Engines[D]. Buffalo: State University of New York, 2011.
- [14] Knox B W, Forliti D J, Stevens C A, et al. A Compari-

son of Fluidic and Physical Obstacles for Deflagrationto-Detonation Transition[R]. *AIAA* 2011-587.

- [15] 何建男,范 玮,肖 强,等. 六毫米内径管道中的 单次爆震实验研究[J]. 推进技术, 2014, 35(12): 1722-1728. (HE Jian-nan, FAN Wei, XIAO Qiang, et al. Experimental Research on Single-Cycle Detonation in Tubes with an Inner Diameter of 6 Millimeters
 [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(12): 1722-1728.)
- [16] Wu M H, Wang C Y. Reaction Propagation Modes in Millimeter- Scale Tubes for Ethylene/Oxygen Mixtures
 [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33 (2): 2287-2293.
- [17] McBride B J, Gordon S. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, II: User Manual and Program Description
 [R]. NASA RP-1311, 1996.

(编辑:朱立影)