

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.003

# 低温等离子体点火乙炔/空气爆震特性试验

郑殿峰

(北京大学 航空航天系, 100871 北京)

**摘要:** 为研究交流驱动低温等离子体点火触发爆震特性,在长 1.5 m、内径 60 mm 的爆震管上,以乙炔为燃料,空气为氧化剂,按分压法配气,通过循环,使爆震管内混气混合均匀,进行气相单次爆震实验.采用交流驱动低温等离子体点火,单次放电时间 0.5 ms,放电能量约为 0.2 J.在点火的同时,用压力传感器和离子探针同时采集爆震管内的压力波和火焰传播特性.实验表明:交流驱动低温等离子体实现了乙炔/空气点火起爆过程,余气系数 0.6 及 1.0 混气产生很强的爆震波,余气系数下降,混气压力下降,爆震波传播速度和峰值压力下降,DDT 距离和时间增加;余气系数 1.4 混气不能产生爆震波.

**关键词:** 脉冲爆震发动机;低温等离子体;交流驱动;乙炔,点火;爆震

中图分类号: V235

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)11-0015-07

## Experimental research on detonation combustion of acetylene/air mixture igniting by low-temperature plasma

ZHENG Dianfeng

(Dept. of Aeronautics and Astronautics, Peking University, 100871 Beijing, China)

**Abstract:** In order to obtain the characterization of AC driven low-temperature plasma initiating the detonation combustion, single-trial detonation has been ignited by low-temperature plasma using acetylene as fuel and the air as oxidant in a 1.5 m long detonation tube and with 60 mm inner diameter. The air and acetylene were filled in the tube according to Dalton law of additive pressure. The air and acetylene would be mixed uniformly by circulating pump. The discharge time of the AC driven low-temperature plasma igniter was 0.5 ms and the energy was 0.2 J once. Meanwhile, propagation characteristics of flame and pressure wave were measured by ion probes and pressure sensors. The experimental results indicated that low-temperature plasma ignited detonation combustion successfully in the mixture when the excess air coefficients were 1.0 and 0.6; the peak pressure values of detonation waves reduced as the initial pressure and the excess air coefficient went down, meanwhile the DDT (Deflagration to Detonation Transition) time and distance increased. Detonation waves cannot be generated in the detonation tube when the excess air coefficient was 1.4.

**Keywords:** pulse detonation engine; low-temperature plasma; AC driven; acetylene; ignition; detonation

脉冲爆震发动机(pulse detonation engine 简称 PDE)是一种利用周期性爆震波来产生推力的动力装置<sup>[1]</sup>.为了提高 PDE 工作频率和改善动力性能,必须缩短缓燃向爆震转捩(deflagration to detonation transition,简称 DDT)的距离和时间.DDT 主要是通过弱小的点火能量产生缓燃波,最终通过激波和火焰的相互作用发展成爆震波.

PDE 点火方式主要有火花塞、热射流、低温等离子体等,文献[2-3]采用火花塞点火实现 DDT 过程,

DDT 距离取决于点火能量、点火位置、油气比等.文献[4]采用乙炔为燃料,空气为氧化剂,用火花塞点火,研究爆震管内的 DDT 过程.文献[5-6]采用乙炔和空气热射流点火,可有效缩短 DDT 距离,并证明其比火花塞具有明显优势.为发展 PDE 先进的点火技术,国外采用纳秒脉冲放电低温等离子体点火起爆技术,目的是进一步缩短 DDT 距离和时间,提高爆震频率,增加有效推力.文献[7-8]使用纳秒脉冲电源电压 80 kV、脉宽 50 ns,实现了大体积点火,显著地缩短点火延迟时间.文献[9]使用脉冲放电点火效率可达 60%,比火花塞点火效率(5%)高一个数量级.文献[10]使用脉冲放电,实现了乙烯/空气在气流速度 100 m/s,及汽油/空气气流速度 55 m/s 时的成功点

收稿日期: 2014-09-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助(51176001).

作者简介: 郑殿峰(1966—),男,高级工程师.

通信作者: 郑殿峰, nddb@126.com.

火.文献[11-12]将纳秒脉冲放电点火,实现乙烯与 470 K 空气为工质的 PDE 协调工作,频率为 80 Hz.交流驱动低温等离子体主要用于常规点火和助燃方面,文献[13]采用交流驱动介质阻挡放电产生低温等离子体,对丙烷燃料点火助燃,提高了火焰稳定性,降低贫油极限.文献[14]使用交流驱动低温等离子体,提高甲烷火焰传播速度 50%.文献[15]采用直流电源驱动,以氩气为工作介质,研究了等离子体点火器的射流特性.文献[16]采用交流驱动低温等离子体,使低热值气体燃料可靠点火和稳定燃烧.文献[17]采用 CE/SE 数值方法,研究等离子体射流点火对爆震特性的影响.

产生低温等离子体主要有纳秒脉冲放电和交流驱动介质阻挡放电两种方式,其能产生体积大,能量密度高的低温等离子体活性物质,点火效率高.本文通过建立气体燃料点火起爆实验系统,对交流驱动低温等离子体进行放电频率和时间控制,在爆震管头部瞬时产生低温等离子体,点燃放电区可燃混气,再由放电区火焰点燃爆震管头部的混气,从而完成点火起爆过程.在点火的同时,用压力传感器和离子探针同时测量激波和火焰的传播速度,再改变混气的压力和余气系数进行实验.

## 1 实验设备和方法

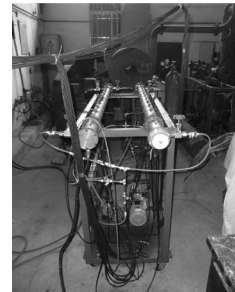
### 1.1 实验系统

单次点火起爆实验系统如图 1 所示,包括爆震管 1、充气与循环系统、点火系统等,爆震管 1 头部安装低温等离子体点火器,爆震管出口用法兰将塑料薄膜压紧.阀 10 接口为压缩空气,用以检查系统气密性,及吹除系统废气.阀 11、阀 12 接口为填充空气和纯氧,阀 13、14、15 接口为填充不同的气体燃料.抽真空流程:打开阀门 3、6、7、8、9,关闭其余所有阀门,用真空泵抽出系统空气,由真空表确定真空度,关闭阀 9,再关闭真空泵电源.乙炔填充流程:打开乙炔进口阀门 15,乙炔经过阀门 7、3 进入爆震管 1,由真空表核准填充乙炔份额的分压力,关闭乙炔阀门 14,再打开阀门 11,向实验系统填充空气至常压.乙炔和空气循环流程是:打开阀门 3、6、5,关闭其余阀门,开启循环泵,混气的循环路径为循环泵—阀 6—阀 5—爆震管 1—阀 3—循环泵.经过循环 5~8 min 后,可燃混气混合均匀,关闭循环泵.点火起爆流程:关闭阀门 3、5,通过同步控制器,触发低温等离子体电源点火的同时,压力传感器和离子探针同时采集数据.

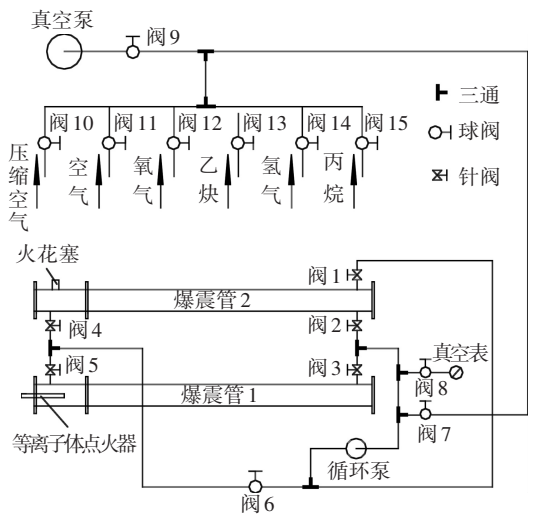
### 1.2 爆震管结构

爆震管 1 结构如图 2 所示.爆震管长 1.5 m,内

径 60 mm,头部安装低温等离子体点火器.爆震管内安装 44% 堵塞比的圆环型扰流片,片数 9,间距 60 mm.第一片扰流片距爆震管头部封闭端 230 mm,最后一个扰流片距爆震管头部间距 0.71 m.在爆震管 1 上下同一截面,对应安装 12 对压力传感器和离子探针安装座,第一对距爆震管头部顶端 140 mm,安装间距 120 mm.



(a) 试验系统照片



(b) 试验系统结构示意图

图 1 实验系统

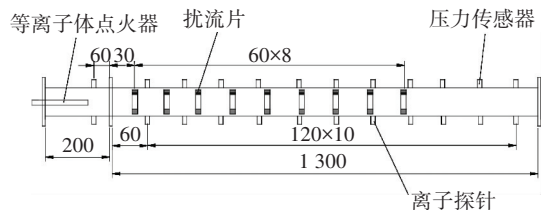


图 2 爆震管 1 结构 (mm)

### 1.3 电源与数据采集系统

低温等离子体电源及频率控制器如图 3 所示.低温等离子体电源交流电正弦波频率 30 kHz,输出电压 0~40 kV.通过频率控制器,实现低温等离子体点火器单次放电时间为 0.5 ms,单次放电能量 0.2 J 左右.数据采集系统为 NI 公司开发的 NIPXI-1042Q 采集系统,共有 16 个并行通道,每个通道频响为 2.5 MHz;PCB 高频压力传感器 (113A22, 频响 500 kHz) 测量峰值压力,离子探针测量火焰传播速度.



图 3 低温等离子体电源和控制器照片

#### 1.4 低温等离子体点火器结构

圆环形点火器如图 4 所示. 高压电极直径 20 mm, 安装在爆震管头部封闭端中心处, 高压电极外侧为刚玉管, 刚玉管外径 25 mm. 圆环形低压电极与爆震管头部封闭端连接, 内径 33 mm, 其上开 24 个直径 4 mm 的圆孔, 放电区长度 40 mm, 放电间隙 4 mm.

#### 1.5 实验工况

以乙炔为燃料, 空气为氧化剂, 燃料混气的余气系数为 0.6、1.0、1.4, 混气压力分别为 0.1、0.08、0.06、0.04 MPa. 9 个离子探针距爆震管封闭端距离分别为 0.27、0.39、0.51、0.63、0.75、0.87、0.99、1.11、1.23 m, 5 个压力传感器距爆震管封闭端距离分别为 0.27、0.51、0.75、0.99、1.23 m.

表 1 不同工况下乙炔/空气混合气 C-J 爆震波的峰值压力和传播速度

起始温度/K	起始压力/MPa	余气系数					
		0.6		1.0		1.4	
		$V_{C-J}/(m \cdot s^{-1})$	$P_{C-J}/MPa$	$V_{C-J}/(m \cdot s^{-1})$	$P_{C-J}/MPa$	$V_{C-J}/(m \cdot s^{-1})$	$P_{C-J}/MPa$
300	0.10	2 000.24	2.057 9	1 868.38	1.818 4	1 754.99	1.612 5
	0.08	1 995.34	1.638 1	1 863.26	1.446 6	1 751.71	1.285 1
	0.06	1 988.82	1.220 4	1 856.59	1.077 0	1 747.34	0.95 9
	0.04	1 979.23	0.805 6	1 847.07	0.710 5	1 740.95	0.634 6

图 5 为从点火时刻起, 所有离子探针测到的火焰信号传播时间, 只给出部分图形,  $P$  为混气压力,  $a$  为余气系数. 从图可知: ①在不同压力和余气系数下, 低温等离子体成功点火起爆乙炔和空气混气, 爆震管上不同位置的离子探针都测到了火焰传播信号, 说明火焰从爆震管头部点火区, 迅速传出爆震管; ②在相同的混气压力下, 对余气系数 0.6 及 1.0 乙炔燃料混气, 离子探针测到的火焰信号很强, 燃烧剧烈, 而余气系数 1.4 乙炔燃料混气, 离子探针测到的火焰信号比较弱, 燃烧缓慢. 离子探针的电压值越接近于零, 说明燃烧离子浓度越高, 燃烧剧烈, 电压值偏离零值并快速上升, 说明燃烧离子浓度相对低, 燃烧缓慢; ③余气系数 0.6 可燃混气, 火焰传播速度快, DDT 距离和时间短. 实验得出, 余气系数 0.6 比 1.0 混气火焰传播速度快, 爆震性能好, 与表 1 结果



图 4 圆环形等离子体点火器

## 2 实验结果

### 2.1 离子探针测量火焰传播速度

低温等离子体点火后, 火焰从爆震管封闭端, 经过由缓燃向爆震的转捩过程, 向出口迅速传播. 火焰前锋由激波后紧跟燃烧波组成, 当火焰前锋经过离子探针时, 离子探针导通, 即可判断火焰的发展进程, 由高频压力传感器测量火焰前锋激波压力, 即爆震波峰值压力或缓燃波压力. 表 1 是根据 Gaseq 软件, 计算出不同状态下乙炔/空气爆震波速度  $V_{C-J}$  和峰值压力  $P_{C-J}$ , 这是根据计算得到的理想状态数据, 但试验中爆震管内设置扰流器, 实验条件与理想状态有差别.

相吻合, 主要是因为乙炔和空气的富燃料混气中, 与贫燃料混气相比, 提高了燃料分子浓度, 使氧分子与乙炔分子发生有效碰撞的机会大幅度提高, 从而使化学反应速度加快, 提高爆震特性; ④混气压力下降, 离子探针测得的火焰传播时间增加, 主要是混气压力下降, 燃料浓度减小, 化学反应速度降低的缘故.

图 6 为不同压力和余气系数下的火焰传播速度, 火焰传播速度为相邻两个离子探针间距除以火焰穿过两个离子探针时间差, 即为相邻两个离子探针间距的平均速度<sup>[18]</sup>, 从图可知: ①余气系数 0.6, 混气压力 0.10~0.04 MPa, 爆震管内火焰传播速度接近 2 km/s (见表 1), 认为产生了爆震波. 混气压力 0.10、0.08、0.06、0.04 MPa, DDT 距离分别约为 0.69、0.81、0.81、1.17 m. 余气系数 1.0, 混气压力

0.1~0.06 MPa 时,火焰传播速度大于 1 868 m/s (见表 1),认为产生了爆震波,混气压力 0.10、0.08、0.06 MPa,DDT 距离分别约为 1.05、1.12、1.12 m,混气压力 0.04 MPa 时没有产生爆震波.余气系数 1.4,火焰传播速度小于 1 754 m/s(见表 1),不同压力混气没有产生爆震波.可见,余气系数由 0.6 到 1.0,DDT 距离增加,产生爆震波的混气压力升高,余气系数 1.4 不能产生爆震波;② 混气压力 0.1、0.08、0.06 MPa,火焰传播速度差别很小,说明可燃混气压

力高于某一压力,燃烧化学反应迅速,当低于某一压力,燃烧化学反应缓慢,这一压力可能在 0.05 MPa 左右;③产生爆震波的速度曲线上升后,平直发展,没产生爆震波的速度曲线先上升,后下降.这主要是由于离子探针装在爆震管中心轴向位置,火焰传出扰流片后(最后一块距爆震管头部 0.71 m),通道面积扩张,火焰传播速度会下降,最高速度点在 0.8 m 左右,而混气压力高,余气系数 0.6,爆震燃烧剧烈,爆震管面积的扩张对火焰传播速度的影响不大.

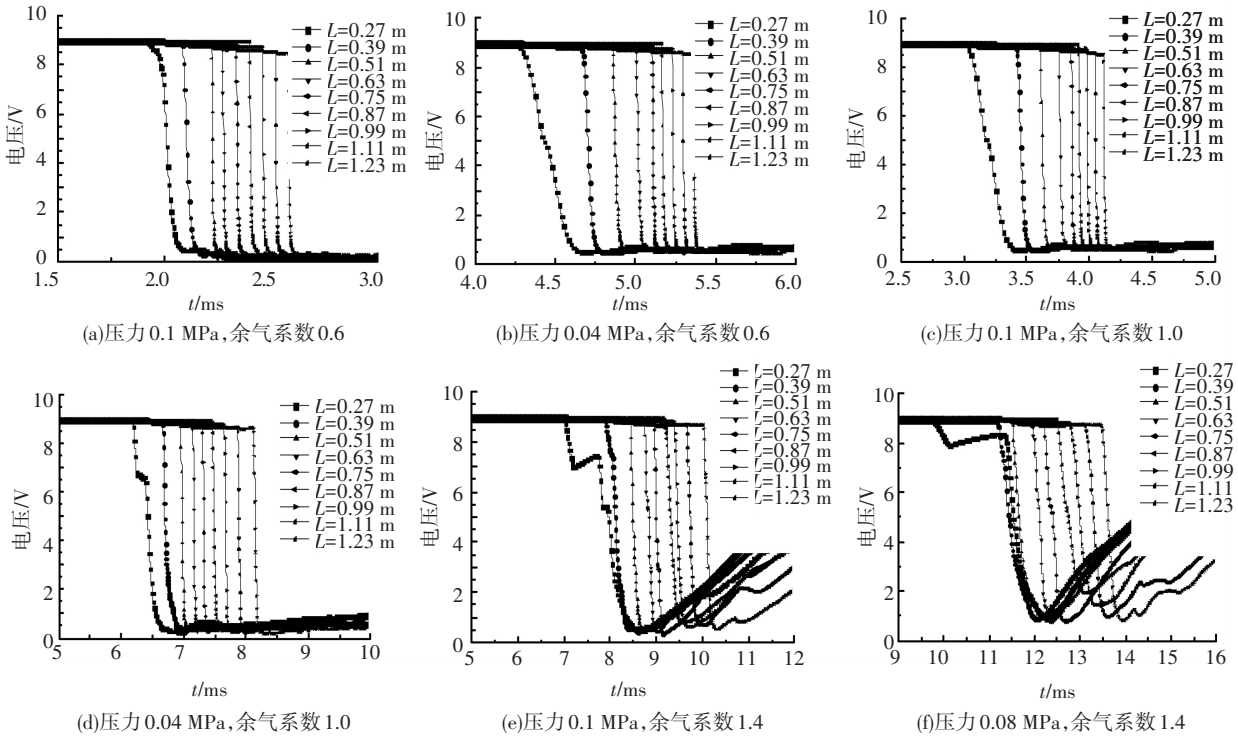


图 5 爆震管上不同位置离子探针信号时序图

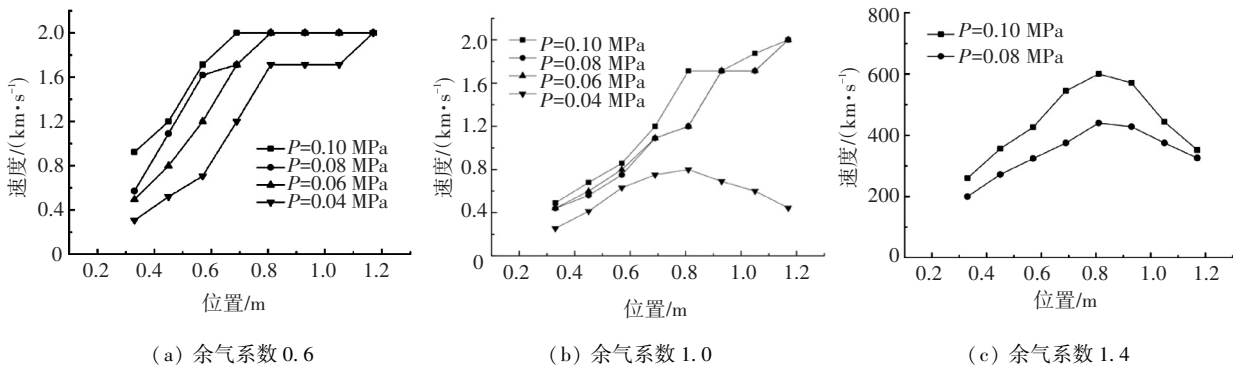


图 6 火焰传播速度

图 7 是不同位置的离子探针测到的火焰传播时间,从图可知:①同一余气系数下,混气压力的下降,火焰传播时间增加.同一压力下,余气系数下降,火焰传播时间增加,特别是余气系数 1.4 的燃料混气,火焰传播时间大幅度增加;②余气系数 0.6 和 1.0,混气压力 0.1、0.08、0.06 MPa,离子探针测到的火

焰传播时间比较接近,混气压力 0.04 MPa,火焰传播时间增加一倍以上;③火焰到达第一个离子探针所用的时间,占火焰在爆震管内传播的大部分时间,初始火焰发展较慢,从第一个离子探针到火焰传出爆震管,所用的时间很短,说明初始火焰的形成和发展对爆震波的形成具有重要作用.

### 2.2 压力传感器测量爆震波峰值压力

图 8 为余气系数 0.6, 压力传感器测到的压力波曲线, 由表 1 的  $P_{C-J}$  判断是否产生爆震波. 从图可知: ①混气压力 0.1、0.08、0.06、0.04 MPa, 爆震波峰值压力分别为 5.08、4.22、2.21、1.84 MPa, 大于表 1 相应的  $P_{C-J}$ , 认为不同压力混气产生了爆震波. 根据图 8, 计算压力传感器 0.75 m 和 0.99 m 之间的激波速度, 混气压力 0.1、0.08、0.06、0.04 MPa, 激波速度分别为 2 000、2 000、1 935、1 846 m/s, 与表 1 的  $V_{C-J}$  基本耦合, 认为产生了 C-J 爆震波; ②混气压力的下降, 爆震波峰值压力下降, 混气压力对爆震波峰值压力有很大影响; ③混气压力大于

0.06 MPa, DDT 距离小于 0.51 m, DDT 时间小于 3 ms, 比用表 1 的  $V_{C-J}$  判断的 DDT 距离小, 这时激波和火焰还没有耦合. 第一个压力传感器测到的压力小于 1.16 MPa, 说明在距爆震管头部 0.27 m 处, 还没有产生爆震波; ④混气压力下降, 压力传感器测到的爆震波峰值压力的时间增加. 混气压力从 0.1 MPa 下降到 0.06 MPa, 第五个压力传感器测得的爆震波峰值时间从 2.58 ms 增加到 3.43 ms, 而混气压力从 0.06 MPa 下降到 0.04 MPa, 测到的压力波峰值从 3.43 ms 增加到 5.36 ms. 可见, 混气压力低于一定值后, 火焰传播速度迅速下降.

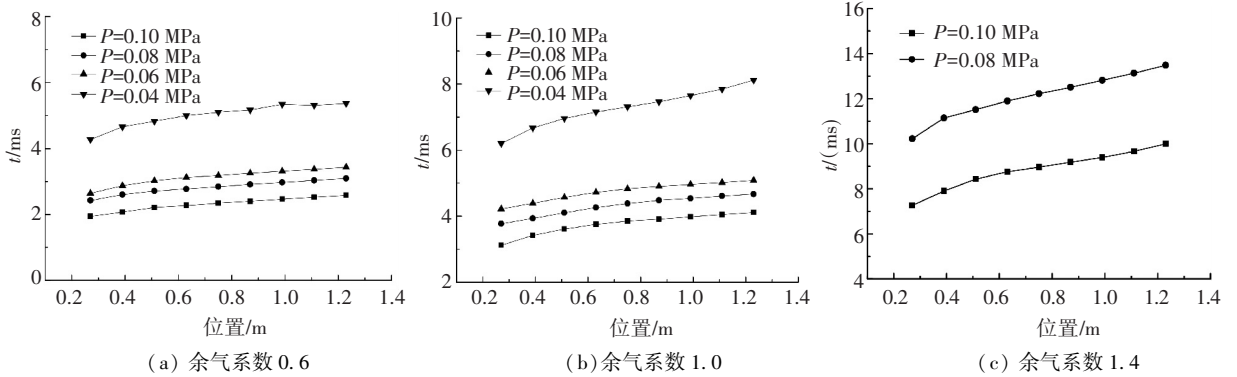


图 7 火焰传播时间

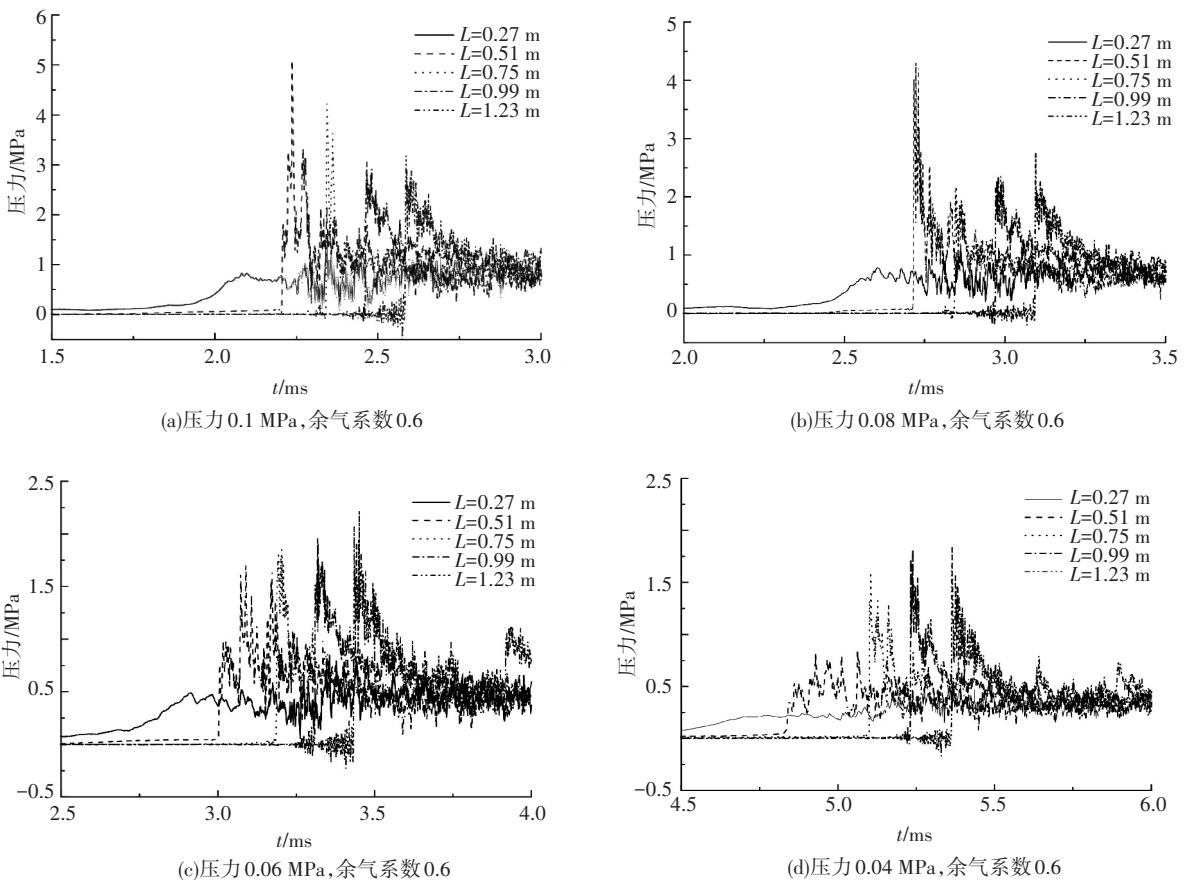


图 8 不同起始压力下余气系数 0.6 时爆震波峰值压力

图 9 为余气系数 1.0 的压力波曲线,从图可知:  
 ①与余气系数 0.6 相比,所测得的爆震波峰值压力下降,混气压力 0.1、0.08、0.06 MPa,爆震波峰值压力分别为 3.78、3.45、2.35 MPa,大于表 1 相应的  $P_{C-J}$ ,认为不同压力混气产生了爆震波.根据图 9,计算压力传感器 0.99 m 和 1.23 m 之间的激波速度,混气压力 0.1、0.08、0.06 MPa,激波速度分别为 1 832、1 818、1 791 m/s,与表 1 的  $V_{C-J}$  基本耦合,认为产生了 C-J 爆震波.而混气压力 0.04 MPa,压力

波峰值 0.62 MPa,小于表 1 对应的  $P_{C-J}$  压力,没有产生爆震波;  
 ②第一和第二个压力传感器测得的压力波峰值小,没有产生爆震波;  
 ③余气系数从 0.6 下降到 1.0,压力传感器所测到的爆震波(压力波)峰值压力时间增加.

图 10 为余气系数 1.4 的压力波曲线,从图可知:  
 ①不同混气压力下,测到的压力波峰值小于表 1 对应的  $P_{C-J}$  压力,没有产生爆震波;  
 ②混气压力下降,压力波峰值下降,传播时间增加.

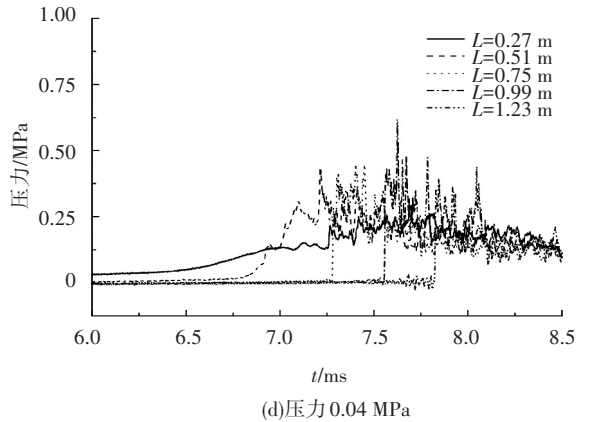
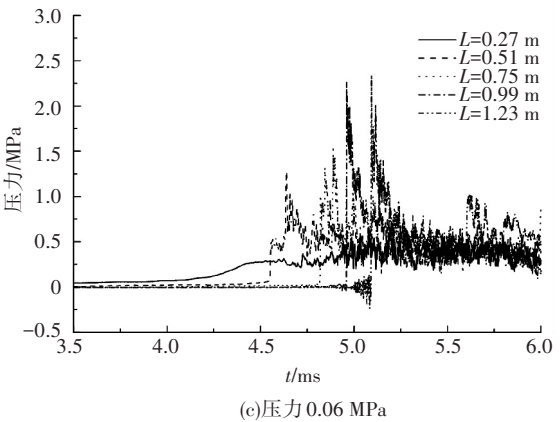
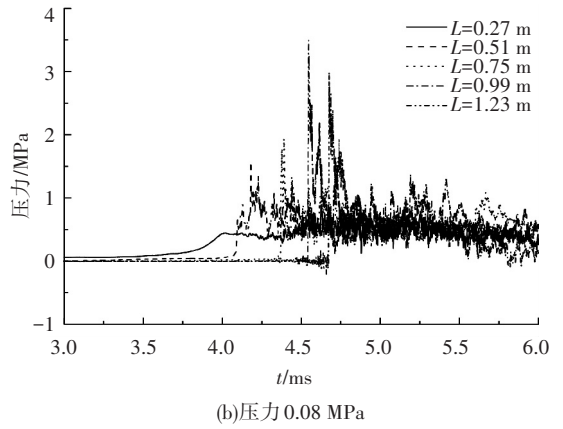
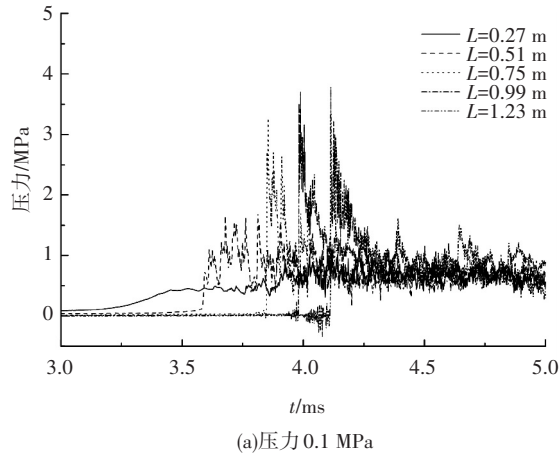


图 9 不同起始压力下余气系数 1.0 时爆震波峰值压力

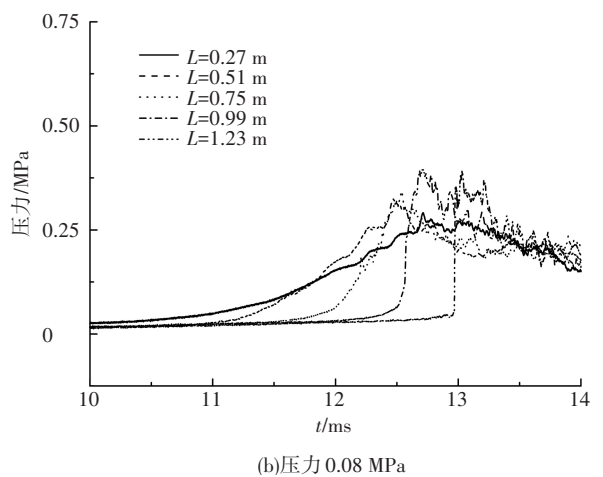
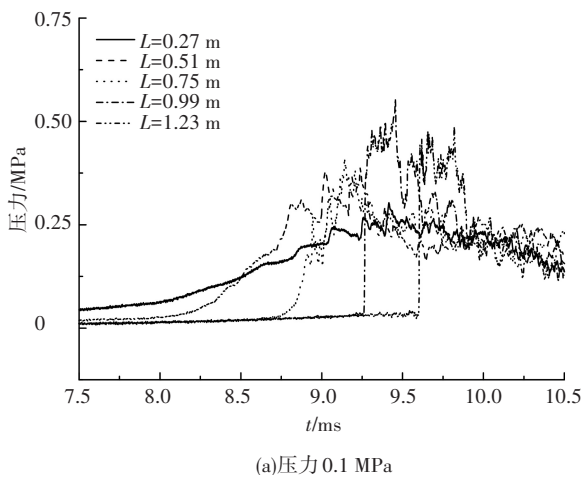


图 10 不同起始压力下余气系数 1.4 时爆震波峰值压力

### 3 结 论

通过对连续交流驱动低温等离子体实施频率控制, 单次放电时间 0.5 ms, 采用圆环型同轴低温等离子体点火器, 安装在爆震管头部, 对乙炔/空气的可燃混气进行单次点火爆震实验, 得出以下结论:

1) 频控交流驱动低温等离子体以大体积点火方式, 成功实现乙炔/空气点火起爆过程.

2) 余气系数 0.6 及 1.0 的乙炔和空气混气能够产生很强的爆震波, 余气系数 1.4 的乙炔和空气混气不能产生爆震波. 余气系数下降, 爆震波传播速度和峰值压力下降.

3) 混气压力下降, 爆震波传播速度和峰值压力下降, DDT 距离和时间增加, 压力降到 0.06 MPa 以下, 火焰传播速度迅速下降, 无法产生爆震波.

### 参考文献

- [1] KAILASANATH K. Research on pulse detonation combustion systems—a status report[J]. AIAA Paper, 2009, 631: 2009.
- [2] SINIBALDI J O, BROPHY C M, ROBINSON L T J P. Ignition effects on deflagration-to-detonation transition distance in gaseous mixtures [C]//36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston VA: AIAA, 2000; AIAA 2000-3590.
- [3] KANESHIGE M, SHEPHERD J E. Detonation database [R]. Pasadena: California Institute of Technology, 1997.
- [4] 张彭岗, 何小民, 李建中, 等. 爆震管内波与火焰相互作用机理的试验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1617-1621.
- [5] 于军力, 秦亚欣, 高歌. 射流点火对爆震管中缓燃转爆震影响的实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1043-1047.
- [6] SHIMADA H, KENMOKU Y, SATO H, et al. A new ignition system for pulse detonation engine[J]. Reston VA: AIAA, 2004; AIAA 308.
- [7] WANG F, LIU J B, SINIBALDI J, et al. Transient plasma ignition of quiescent and flowing air/fuel mixtures [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 844-849.
- [8] WANG F, KUTHI A, GUNDERSEN M. Technology for transient plasma ignition for pulse detonation engines [C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston VA: AIAA, 2005; AIAA 2005.
- [9] LIU J, WANG F, LEE L, et al. Effect of discharge energy and cavity geometry on flame ignition by transient plasma [J]. AIAA Paper, 2004, 1011: 5-8.
- [10] Jr HACKARD C N. Ignition characteristics for transient plasma ignition of ethylene/air and JP-10/air mixtures in a Pulse detonation engine [R]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2007.
- [11] BROPHY C. Initiation Improvements for Hydrocarbon/Air Mixtures in Pulse Detonation Applications [C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston VA: AIAA, 2009; AIAA 2009-1611.
- [12] BROPHY C M, DVORAK W T, DAUSEN D F, et al. Detonation initiation improvements using swept-ramp obstacles [C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston VA: AIAA, 2010; 10.2514/6.2010-1336.
- [13] ROSOCHA L A, KIM Y, ANDERSON G K, et al. Combustion enhancement using silent electrical discharges [J]. International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 2007, 1(1): 8-13.
- [14] KIM W, MUNGAL M G, CAPPELLI M A. Flame stabilization using a plasma discharge in a lifted jet flame [C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston VA: AIAA, 2005; AIAA-2005-931.
- [15] 王峰, 何立明, 曹闹昌, 等. 直流电源驱动的等离子体点火器的点火特性 [J]. 高电压技术, 2010; 36(10): 2537-2541.
- [16] 胡宏斌, 徐纲, 房爱兵, 等. 非平衡等离子体助燃低热值气体燃料 [J]. 工程热物理学报, 2010; 31(9): 1603-1606.
- [17] 彭振, 翁春生. 等离子体点火对燃烧转爆轰影响的数值计算 [J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(1): 84-89.
- [18] 何小民, 张彭岗, 王家骅. 爆震管内爆燃到爆震转捩过程的实验研究 [J]. 推进技术, 2005, 26(3): 252-255.

(编辑 张宏)