交流驱动低温等离子体点火触发爆震可行性研究*

郑殿峰[1]，张义宁[2]，郑日恒[2]，宫继双[2]

（1. 北京大学 工学院，北京 100871；2. 北京动力机械研究所 高超声速冲压发动机技术重点实验室，北京 100074）

摘 要：为了克服交流驱动介质阻挡放电产生连续低温等离子体应用于脉冲爆震发动机点火的困难，通过频率控制，成功设计了按一定频率周期性地产生低温等离子体，放电参数可调，单次放电时间为0.1~1000ms，频率为0.1~100Hz。等离子体点火器采用同轴电极结构，单次放电时间0.5ms，实现了可燃混气点火，成功触发爆震，这些结果表明采用交流驱动低温等离子体点火触发爆震是可行的。

关键词：低温等离子体；频率控制；点火；爆震波

中图分类号：V235.22 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-4055（2014）08-1146-07

DOI：10.13675/j. cnki. tjjs. 2014. 08. 019

Investigation on Feasibility of Ignition and Detonation Trigger by Low Temperature Plasma Based on AC Drive

ZHENG Dian-feng[1]，ZHANG Yi-ning[2]，ZHENG Ri-heng[2]，GONG Ji-shuang[2]

（1. College of Engineering of Peking University，Beijing，100871；
2. Science and Technology on Scramjet Laboratory，Beijing Power Machinery Institute，Beijing 100074，China）

Abstract：In order to overcome the difficulty on initiation of combustion by continuous dielectric barrier discharge（DBD）based on AC drive in detonation tube，a plasma ignition device were designed successfully by frequency controlling，which can produce low temperature plasma periodically. The discharge parameter is adjustable. The single discharge time ranges from 0.1ms to 1000ms，and the variation of frequency is from 0.1Hz to 100Hz. The combustible mixture can be ignited and the detonation waves were observed in tube with single discharge time 0.5ms，by fixing a coaxial-type electrode into plasma ignition device. The research demonstrate that it is feasible to initiate detonation by low temperature plasma based on AC drive.

Key words：Low temperature plasma；Frequency controlling；Ignition；Detonation wave

1 引 言

脉冲爆震发动机（Pulse Detonation Engine 简称PDE）由进气道、阀门、爆震管、尾喷管、点火系统和控制系统组成，是一种利用周期性爆震波产生推力的动力装置。基于目前研究成果还没有达到理想预期及工程应用程度，因此，需要深入开展PDE关键技术研究，其中点火方式是关键技术之一。通常触发爆震的方法有：直接触发、激波聚焦、预爆管、DDT（Deflagration to Detonation Transition，简称DDT）过程，DDT就是燃烧由缓燃波发展成爆震波的距离和时间。为了提高PDE工作频率和改善动力性能，必须缩短DDT的距离和时间。DDT过程主要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。直接触发爆震需要高能量的点火起爆装置[1]，文献[2,3]表明DDT距离取决于点火能量、点火位置、混合物油气比等。当点火能量大于0.5J时，DDT距离与点火能量无关，火花塞的能量不

* **收稿日期**：2013-07-11；**修订日期**：2013-10-23。
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51176001）；高超声速冲压发动机技术重点实验室开放基金资助项目（20110101008）。
作者简介：郑殿峰（1966—），男，博士，研究领域为工业燃烧。E-mail：zhengdf00@mails.tinghua.edu.cn

足以将碳氢燃料和空气混合物直接触发成爆震波，通常采用火花塞点火实现DDT过程。文献[4,5]用火花塞高能（1J）点火，可缩短DDT的距离，爆震波的峰值压力增大，当点火能量50mJ和4J时，提高火花塞点火能量，点火-起爆时间减小。文献[6,7]研究了扰流器、激波聚焦反射对缩短DDT的影响，但增加了PDE流动损失。

点火的关键是产生初始自由基。火花塞点火主要是在点火瞬间，放电电弧直接击穿可燃混气，通过升高局部小区域的燃气温度，实现点燃混气的过程。而热等离子体点火主要是高压气体介质在流经高压电弧放电区时，生成一个高温等离子体活化中心，其摄氏温度可达几千度，由该高温热等离子体射流点燃可燃混气。虽然热等离子体点火技术具有一定的优势和发展潜力[8]，但存在点火作用空间小，消耗能量大，点火效率低，点火电极易腐蚀，系统设备复杂等缺陷。

交流驱动介质阻挡放电是产生低温等离子的主要方式，能够在一定的压力下产生作用体积大、能量密度高的低温等离子体，且由于电极间绝缘介质的存在，避免了局部放电或弧光放电。当电极间电场强度足够高时，气体被击穿，电极间出现大量的流注放电，产生各种活性粒子、中性粒子、离子、电子等低温等离子态活性物质，当可燃气体通过放电通道时，就会被点燃。国外[9,10]利用连续交流驱动的低温等离子体实现大体积点火，火焰充满放电通道，极大地缩短了着火延迟时间和改善着火极限。清华大学采用连续交流驱动的冷等离子体，实现以甲烷、乙烯、汽油为燃料的放电空间点火。

交流驱动低温等离子体点火与火花塞点火不同之处在于：(1)电源不同：火花塞电源的电压几百到几千伏，电流几百到上千安培；低温等离子体电源频率为10~50kHz，电压10~40kV，电流几十毫安。(2)放电型式不同：火花塞放电电极间隙小，没有阻挡介质，电弧能量高、温度高；低温等离子体采用介质阻挡放电，产生大体积的辉光或流注放电。(3)燃烧化学反应机理不同：火花塞靠强电弧击穿可燃混气，产生局部高温而着火；低温等离子体放电区域温度低，混气没达到着火温度，靠产生的活性粒子多点点燃可燃混气。(4)触发爆震过程不同：火花塞点火由小的火焰微团逐步发展成爆震波；低温等离子体在PDE头部大体积点火，起始火焰迅速充满爆震管。

低温等离子体点火和燃烧强化是等离子体技术的一种新的应用途径[11,12]，其具有实现稀薄混合气可靠、高效点火和快速燃烧的潜力，该技术已经引起世界各国的广泛关注。对于连续交流驱动的低温等离子体用于PDE点火起爆研究，国内外是空白，而对于纳秒脉冲放电点火起爆的应用，国外处于起步阶段，国内是空白。为了产生能够维持高应变率的强火焰核，需要比火花塞点火更大的体积。文献[13,14]使用纳秒脉冲电源实现PDE大体积点火及协调工作，但纳秒脉冲电源的应用前景受电源研制水平的限制，关键技术是电源开关。

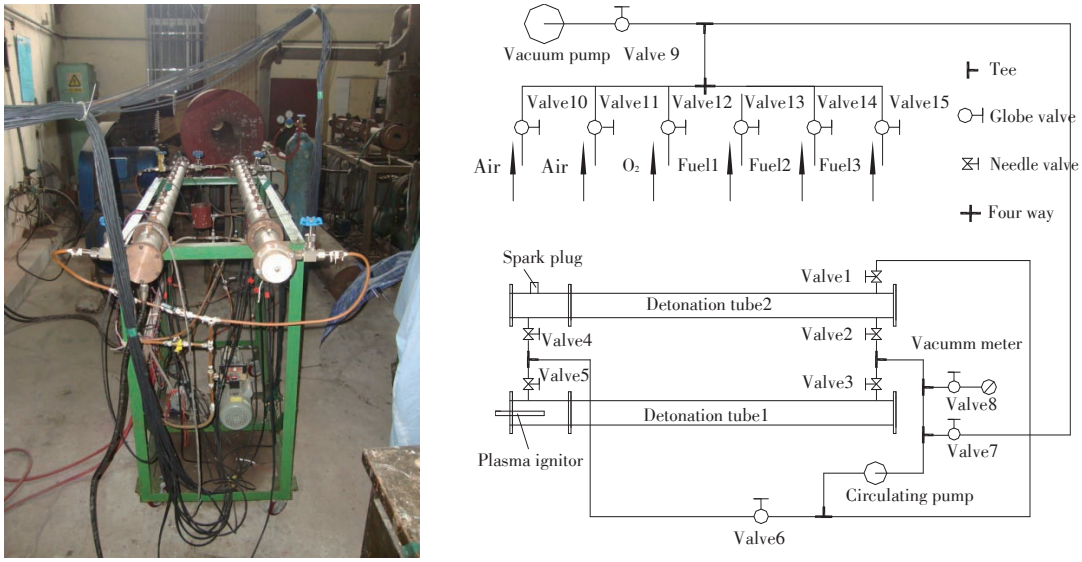
现有的交流驱动低温等离子体电源，是通过手动方式逐步调节电压，实施放电，不能满足PDE点火起爆和测试DDT过程的要求。因而，必须将连续交流驱动产生低温等离子体的放电型式，改制成按一定频率周期性产生低温等离子体的放电型式，从而满足PDE频率点火的要求，克服火花塞点火和热等离子体射流点火体积小的缺陷，缩短DDT的距离和时间，提高PDE性能和工作频率。

2　实验设备和方法

单次气体燃料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。阀10接口为压缩空气，用以检查系统气密性，阀11，阀12接口为可爆混气配制时分别填充空气和纯氧，阀13，阀14，阀15接口为填充不同的气体燃料。抽真空流程：打开阀门3，5，6，7，8，9，关闭所有其余阀门，用真空泵抽空气，由真空表确定真空度，关闭阀9，再关闭真空泵电源。燃料填充流程：打开燃料阀门，由真空表核准填充燃料的分压力，关闭燃料阀门，再打开阀门11，填充剩余空气至常压。燃料和氧化剂循环流程是：关闭阀门7，8，开启循环泵，至混气混合均匀，再关闭循环泵。点火起爆流程：关闭阀门3，5，在触发等离子体电源放电的同时，压力传感器和离子探针同时采集数据。

爆震管1结构如图2所示，管长1.5m，内径60mm，爆震管1内安装44%堵塞比的圆环型扰流片，片数9，间距60mm，第一片扰流片距爆震管头部230mm。爆震管1上安装12对压力传感器和离子探针安装座，第一对距爆震管头部140mm，安装间距120mm。爆震管1头部安装低温等离子体点火器，点火器中心截面距爆震管头部60mm。

控制与采集系统如图3所示，低温等离子体电源



(a) Photograph of experimental setup (b) Schematic of experimental setup

Fig. 1 Experimental system

交流电中心频率30kHz,输出电压0~40kV,通过同步控制器,实现等离子体电源的单次放电时间为0.2,0.3,0.4,0.5ms,频率0.1~100Hz,在触发等离子体点火器放电点火的同时,采集压力波峰值和火焰传播速度。数据采集系统采为NI公司开发的NIPXI~1042Q采集系统,该系统共有16个并行通道,每个通道频响为2.5MHz;采用PCB高频压力传感器(113A22,频响500 kHz)测量峰值压力,自行设计离子探针测量火焰传播速度,文献[15]给出压力传感器和离子探针的性能参数和工作特性,第一对压力传感器和离子探针距爆震管头部270mm,向下游依次间隔120mm。示波器型号为DPO2024。

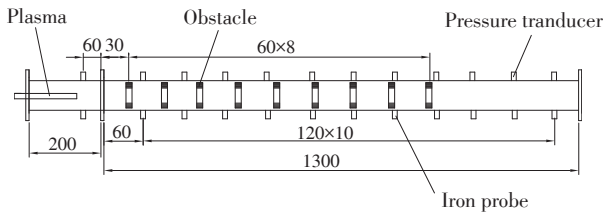


Fig. 2 Sketch map of detonation tube 1(mm)

点火器采用同轴结构,电极间采用陶瓷阻挡介质,放电间隙为4mm,高压电极安装在爆震管头部中心处,低压电极与爆震管连接。低压电极内表面光滑,目的是产生均匀的流注放电。

低温等离子体点火器安装在爆震管1头部,爆震管1出口用膜片密封。先开启真空泵,将系统抽至一定的真空,填充气体燃料分压力份额,再填充剩余空气。开启循环泵,使混气均匀。关闭相应的阀门,在触发低温等离子体电源同时,采集系统采集数据。

3 实验结果与讨论

3.1 低温等离子体放电特性

图4为低温等离子体连续放电形貌,放电空间出现无数流注放电通道,产生很多自由基,放电电压变化,放电空间流注颜色变化,并噪音变化。当离子发生器按一定频率放电时,每次放电发出声音,但看不到流注放电通道,说明每次放电消耗的能量很小。图5为采用非介质阻挡放电,放电空间仅存一道弧光,此时失去产生等离子体的功效。

图6为连续交流驱动的放电波形,黄色波形为电压,蓝色波形为电流。在垂直方向,每个小格电压值为5kV,电流为200mA,电压峰-峰值电压为17.6 kV和20.2 kV,水平方向每个小格时间为20μs。在电压上升或下降时,存在电流下降或上升,电压上升时的放电电流密度和幅值小于下降时的电流密度和幅值,但无论电压的上升还是下降,都存在大量的流注放电脉冲。逐步施加电压,当气体介质击穿后,电压增加幅度有限,但脉冲电流幅度增加较大,说明对于特定电极结构和气体条件,产生流注放电的电压存在下限阀值。

图7为周期性放电频率25Hz放电的电压和电流波形,图7(a)水平方向每个小格时间为10ms,共4个小格,每次放电周期为40ms,电压峰-峰值25kV。图

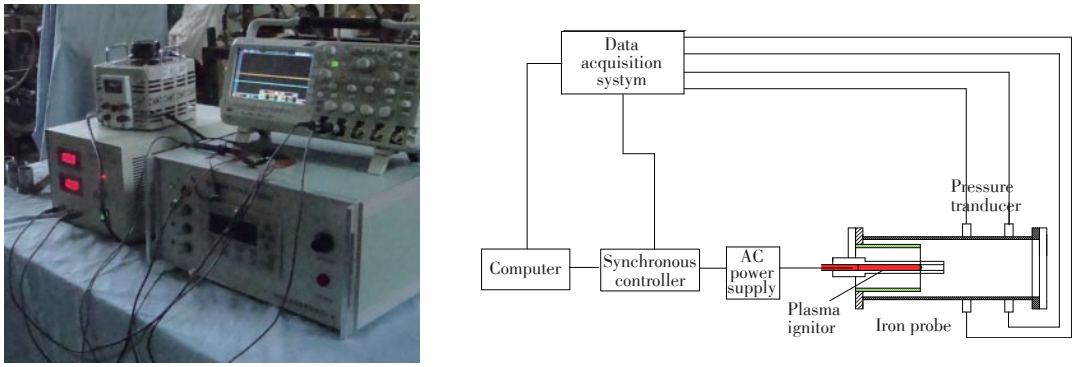


Fig. 3　Control and data acquisition system

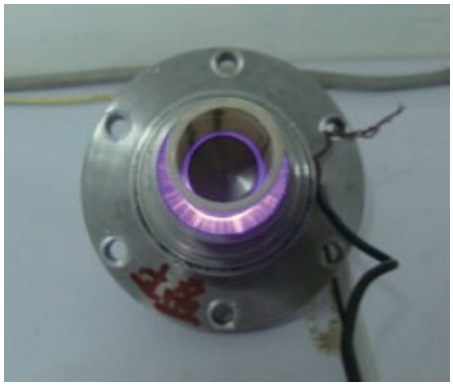


Fig. 4　Characteristic of cold plasmas obtained by continuous discharge

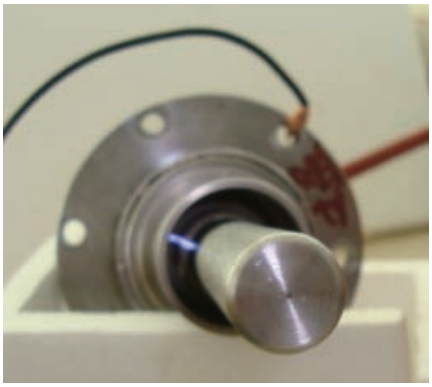
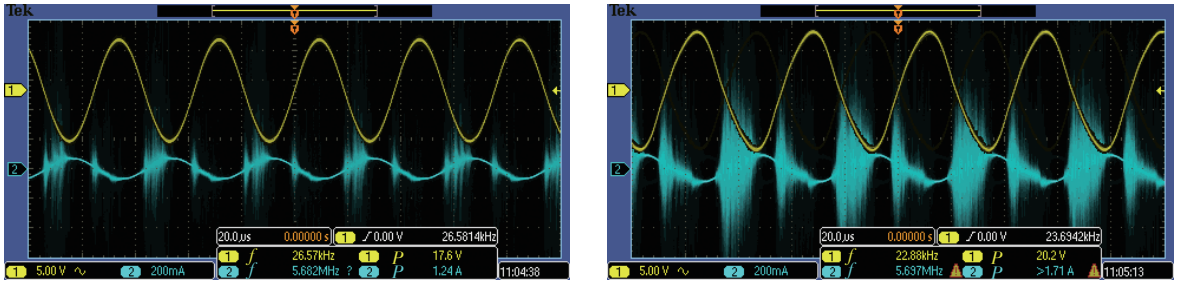
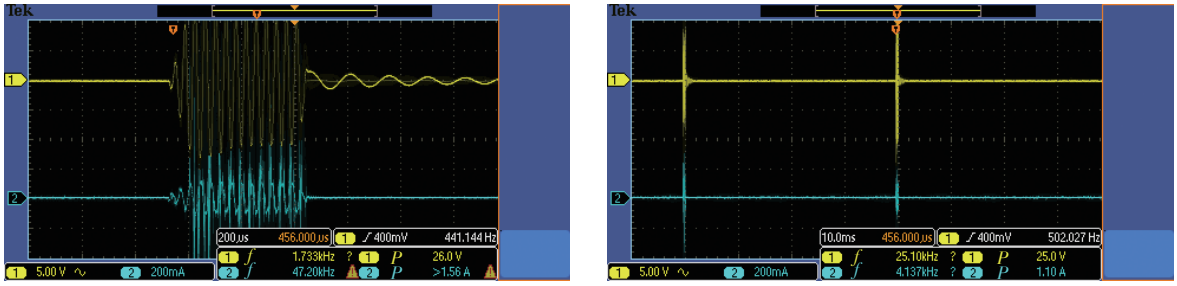


Fig. 5 Characteristic of arc discharge



(a)　　(b)

Fig. 6　Wave shape of discharge drived by continuous alternating current



(a)　　(b)

Fig. 7　Discharge current or voltage waveform *f*=25Hz

7(b)为每次放电的电压和电流放大波形，共13个放电波形，单次放电时间0.5ms。图8为周期性放电频率100Hz放电波形，图8(a)水平方向每个小格时间为4ms，每次放电周期为10ms，电压峰-峰值25.4kV，图8(b)为每次放电的放大波形，共13个放电波形，单次放电时间0.5ms。这说明对连续交流驱动产生低温等离子体实施频率控制是成功的。

3.2 低温等离子体点火起爆

气相单次爆震实验，乙炔为燃料，空气为氧化剂，放电间隙4mm，余气系数0.3~1.4，常压。

图9为测得的爆震管内压力波和火焰信号时间比较曲线。不同余气系数下，从触发点火信号时刻开始，相同位置的压力传感器和离子探针所采集到的压力波和火焰信号的时间基本相同，即认为压力波的传播速度和火焰的传播速度相同。由于爆震燃烧是激波后面紧跟燃烧波，贫燃时火焰会滞后于激波，从而判断实验所测得的数据是可信的。

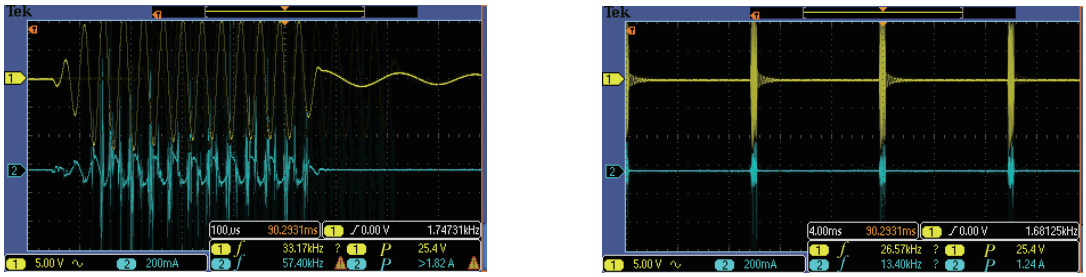
图10为火焰传播时间和速度比较曲线。图10(a)为离子探针测得的火焰传播时间，余气系数为0.6，0.8，1.0时，火焰传出爆震管所用时间很短，余气系数为0.4，1.2，1.4时，火焰传出爆震管的时间增加一倍，这是由于偏离恰当油气比的混气，化学反应速度降低，火焰传播时间增加。不同余气系数下火焰传播时间见表一，第一个离子探针测得火焰信号时间，远大于火焰在1~8离子探针之间的传播时间，说明起始火焰的形成和发展对DDT距离和时间有重要影响，低温等离子体点火是在放电空间大体积点火，火焰迅速发展，具有“爆炸”扩展的能力。

Table 1 Flame front arrival time of ion probe 1st and 8th

α	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
t_{I1st}	13.61	5.01	3.21	2.83	2.64	5.64	6.60
t_{8th}	17.27	6.21	4.04	3.70	3.40	7.83	9.00
$\Delta t = t_{8th} - t_{I1st}$	3.66	1.20	0.83	0.87	0.76	2.19	2.40

图10(b)为离子探针测得的火焰传播速度曲线，不同余气系数下，火焰传播速度差别较大，靠近当量比火焰传播速度大，偏离当量比火焰传播速度小。在$L\leqslant0.51$m，火焰传播速度小于850m/s，没有产生波震波的，在$L\geqslant0.63$m，余气系数为0.6，0.8，1.0的乙炔混气产生了爆震波，火焰传播速度大于1500m/s，其它混气比不能产生爆震波。

图11为不同余气系数下压力波曲线，从图可知：余气系数为0.6，0.8，1.0时，测到的压力波时间短，等离子体点火能够产生爆震波，余气系数为1.2时，测到的压力波时间长，不能产生爆震波；在L=0.39m处，压力波发展过程缓慢，没有快速上升沿，没有产生爆震波，在L=0.63m，0.99m，1.23m处，压力波发展迅速，有快速上述沿，当压力大于1.5MPa时，认为产生了爆震波。在L=0.63m处，爆震波峰值压力很高，原因是：在爆震室内，初始形成的爆震波属于过度驱动爆震



(a) (b)

Fig. 8 Discharge current or voltage waveform *f*=100Hz

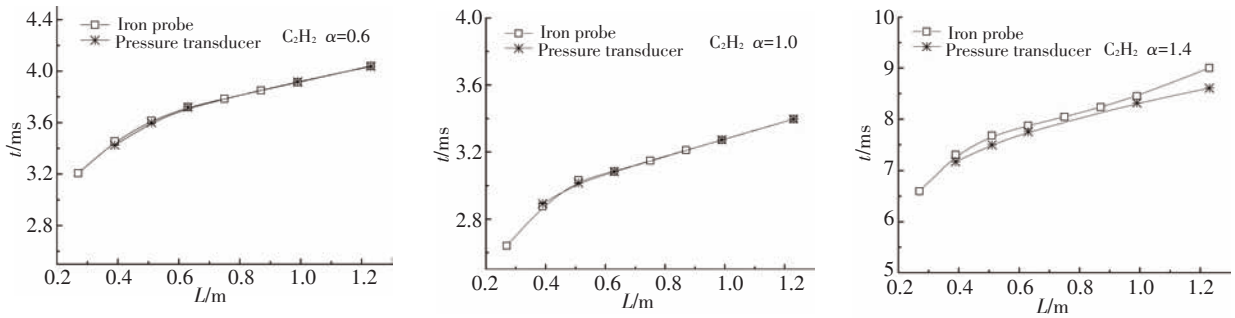


Fig. 9 Comparison curve on arrival time of pressure wave and flame wave

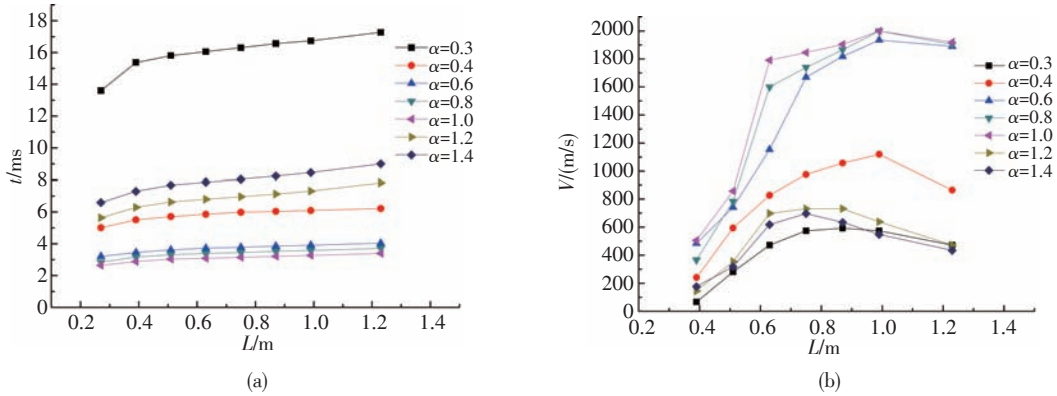


Fig. 10　Flame propagation time and velocity along detonation tube

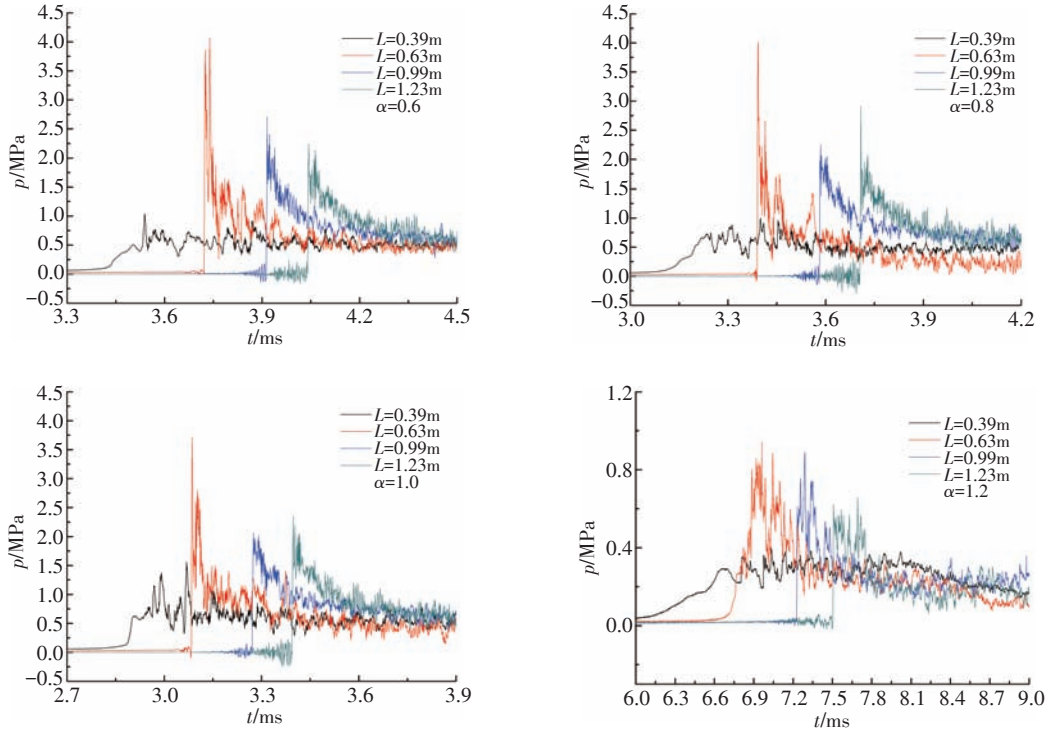


Fig. 11　History time of pressure at different position

波，随着过度驱动爆震波向稳定的C-J爆震的过渡，压力峰值有所回落，随后压力传感器测得的峰值不能严格的相等，原因是爆震室内存在不规则的反射波系，这些波系在不同传感器位置的随机性作用，导致所测得的峰值压力有一定的起伏，但基本上保持在C-J爆震峰值压力附近，再结合图10余气系数为0.6，0.8，1.0时的火焰传播速度，足以证明爆震室内成功触发了爆震燃烧。

综上所述，频控交流驱动低温等离子体能够满足PDE点火的要求，验证了其点火起爆的可行性。

4　结　论

连续交流驱动产生低温等离子体是最成熟的技术，通过频率控制，能够满足PDE点火起爆的要求，对PDE点火方式改进及DDT过程的缩短有重要意义。通过这一研究，可以得出以下结论：

(1)在国内外首次将连续交流驱动产生低温等离子体方式，设计为按一定频率周期性产生低温等离子体，其放电宽度和频率调节范围宽，放电时间0.1~1000ms，频率0.1~100Hz。

(2)低温等离子体点火器采用同轴电极结构,能够产生周期性低温等离子体。

(3)单次放电时间0.5ms,交流驱动的低温等离子能够点燃混气范围宽,并成功触发爆震。

参考文献:

[1] Radulescu M I, Sharpe G J, Lee J H S. The Ignition Mechanism in Irregular Structure Gaseous Detonations [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30: 1859-1867.

[2] Sinibaldi J O, Brophy C M, Robinson J P. Ignition Effects on Deflagration-to-Detonation Transition in Gaseous Mixtures [R]. *AIAA* 2000-3590.

[3] Kaneshige M, Shepherd J E. Detonation Database [R]. *GALCIT Technical Report* FM97-8.

[4] 范 玮,严传俊,张 群,等. 点火能量等因素对脉冲爆震室压的影响实验 [J]. 推进技术, 2002, 23(3), 198-201.(FAN Wei , YAN Chuan-jun , ZHANG Qun, et al. Experimental Investigation of the Effects of Ignition Energy on Pressures in a Pulse Detonation Combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*. 2002, 23(3), 198-201.)

[5] 王治武,严传俊,范 玮,等. 点火能量对脉冲爆震发动机性能的影响 [J]. 推进技术, 2009, 30(2), 224-228.(WANG Zhi-wu, YAN Chuan-jun , FAN Wei, et al. Experiment on the Effects of Ignition Energy in Pulse Detonation Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(2), 224-228.)

[6] Kasahara J, Takazawa K, Arai T. Experimental Study of Impulse and Heat Transfer on Pulse Detonation Engines [R]. *AIAA* 2002-4071.

[7] Witt B de, Ciccarrelli G. Shock Reflection Detonation Initiation Studies for Pulse Detonation Engines [R]. *AIAA* 2004-3747.

[8] 宋文艳,刘伟雄,贺 伟,等. 超声速燃烧室等离子体点火试验研究 [J]. 实验流体力学, 2006, 20(4):20-24.

[9] Bozhenkov S, Starikovskaia S, Sechenov V, et al. Combustible Mixtures Ignition in a Wide Pressure Range. Nanosecond High- Voltage Discharge Ignition [R]. *AIAA* 2003-0876.

[10] Anikin N, Kukaev E, Starikovskaia S, et al. Ignition of Hydrogen- Air and Methane- Air Mixtures at Low Temperatures by Nanosecond High Voltage Discharge [R]. *AIAA* 2004-0833.

[11] Sy Stange, Yongho Kim, Vincent Ferreri, et al. Flame Images Indicating Combustion Enhancement by Dielectric Barrier Discharges [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2005, 33(2): 316-317.

[12] Rosocha L A, Coates D M, Platts D, et al. Plasma- Enhanced Combustion of Propane Using a Silent Discharge [J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(5): 2950-2956.

[13] 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.

[14] Brophy C. Initiation Improvements for Hydrocarbon/Air Mixtures in Pulse Detonation Applications [R]. *AIAA* 2009-1611.

[15] 韩启祥,王家骅,王维来. 测量爆燃到爆震转捩距离的离子探针技术研究 [J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 97-100.

(编辑:梅 瑛)