

文章编号: 1000-8055(2008)09-1654-06

爆震管同一截面处压力测量试验

张彭岗, 何小民, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为得到爆震管内同一截面上压力波的分布特性, 在 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$ 方爆震管内, 用乙炔(C_2H_2)和空气混合物进行了单爆震研究. 在距离封闭端 $1\,400$ 、 $1\,600\text{ mm}$ 两个截面的不同位置处分别安装 4 个高频响压力传感器测得压力值. 实验在光滑爆震管和安装扰流器的爆震管内分别进行, 结果表明: ①同一截面的压力波大小并不一样, 安装扰流器的爆震管内得到充分发展的爆震波, 且爆震波不是一个平面波; ②壁面处压力波的压力大于爆震管道中间压力.

关 键 词: 燃烧; 爆震; 压力测量; 试验

中图分类号: V231.22

文献标识码: A

Experiment of measure pressure in the same section of detonation tube

ZHANG Peng-gang, HE Xiao-min, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to gain the distribution characteristic of pressure in same section of detonation tube, a series of single detonation experiments were conducted to study acetylene-air mixtures in square detonation tube. Four pressure transducers were installed respectively in different positions of two sections to measure the pressure value. The experiment was performed respectively in tube with/without obstacles. The results indicate that the size of pressure wave in same section is different and the detonation wave is not a plane wave. The pressure in tube wall is higher than that in tube center.

Key words: combustion; detonation; measure pressure; experiment

众所周知, 爆震波具有复杂的三维结构, 涉及到入射激波、反射激波、横波和边界层等之间的相互作用, 它们的相互作用形成三波点, 三波点的运动轨迹形成胞格. 由于爆震波传播速度非常快和目前试验手段的限制, 国内外还无法得到详细的三维爆震波的试验数据, 通常利用烟迹法、平面激光荧光诱导法 (Planar laser induced fluorescence, PLIF)、纹影仪或高速摄影 (Image charge coupled device, ICCD) 等方法来获得爆震波二维的图像. 文献[1-2]在 $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-17Ar}$ 的混合物中

利用纹影和 PLIF 法得到了爆震波前沿的图像, 结果如图 1 所示, 激波和火焰区虽耦合在一起, 爆震波的前沿却是个凹凸不平的曲面. 文献[3]的研究表明: 根据爆震波前沿所发出的三波点轨迹与流动区域或壁面所呈角度的不同, 在矩形管道内至少存在两种结构的爆震波: 直角结构和斜角结构. 不论哪种结构内, 三波点的轨迹彼此平行或随时间相互作用. 文献[4]在横截面为 $27\text{ mm} \times 27\text{ mm}$ 的方爆震管中利用纹影法和高速摄影得到二维爆震波图像, 并利用三维矩形模式爆震波分析

收稿日期: 2007-08-27; 修订日期: 2007-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(50506012)

作者简介: 张彭岗(1974-), 男, 陕西泾阳人, 博士生, 主要从事燃烧领域及脉冲爆震发动机研究.

了试验结果. 分析表明:在矩形管道中,三维结构爆震波的胞格结构分为两种:八面体和四面体. 爆震波在八面体中是以球面传播,在四面体中以圆柱面传播,而在整个爆震管内的空间由这两种结构交替组合而成. 数值模拟主要侧重于模拟两维的爆震波胞格结构^[5-8],而三维爆震波的数值模拟进行的比较少,文献[9]在矩形区域内对气体爆震波的三维结构进行了数值模拟,对 ZND 模型的侧面给与弱扰动作为初始条件. 研究结果表明:矩形管道内出现了直角和斜角两种爆震波的结构,与实验中相符. 如图 2 所示,整个计算区域内出现了胞格单元的交替结构,但在流动区域的边界层内没有出现了高速的压力波.

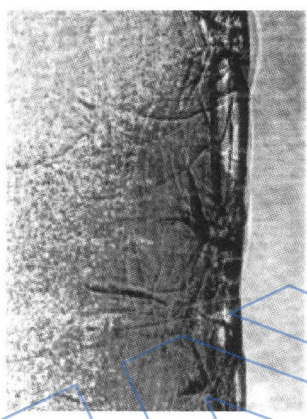


图 1 $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-17Ar}$ 的混合物中爆震波前沿的纹影和 PLIF 图
Fig. 1 Simultaneous schlieren and PLIF images behind detonation fronts in stoichiometric hydrogen-oxygen

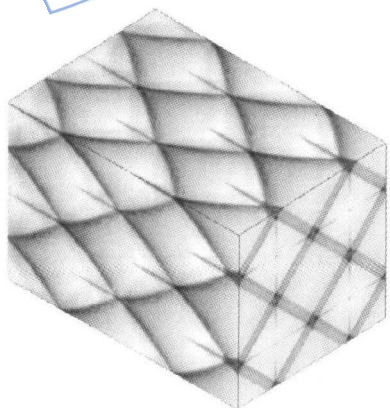


图 2 最大压力梯度轨迹
Fig. 2 Maximum pressure gradient history

试验研究和数值模拟给出了爆震波结构的初步特征,关于爆震波结构细节方面的情况还不是很清楚. 既然爆震波由胞格组成,而胞格是各种压

力波相互作用的结果,那么爆震波前沿的前导激波面上压力场究竟是如何分布的. 了解爆震波前沿的压力场分布,有助于理解爆震波的结构. 本文在爆震管两个截面上的不同位置分别设置了 4 个高频响压力传感器,通过分析爆震波可能的结构和激波系的发展情况,来获得同一截面上爆震波的压力分布特性.

1 实验设备、研究参数

1.1 实验设备

实验系统(如图 3)包括气源、爆震管、充气与循环系统、点火系统和测量系统等. 爆震管尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$,刚性封闭端密封,出口端为厚 0.5 mm 的膜片. 试验前用真空泵将爆震管抽成真空,分别充入空气和乙炔,通过真空表的读数(分压力)来确定流量. 用循环泵使乙炔和空气达到均匀混合状态,然后点火起爆. 自主开发计算机数据采集系统,采集卡为 NI 公司的 6135 型高频数据卡,采样通道 16 个,采样频率为 2.5 MHz . 压力信号通过放大后经转化器输入计算机并显示. 在距离封闭端面 $1\,400\text{ mm}$ 和 $1\,600\text{ mm}$ 位置处分别安装 4 个 PCB 压力传感器(M113A26,频响 500 kHz),从距离封闭端面 $500\sim1\,700\text{ mm}$ 位置处按间距 200 mm 安装 7 个自行研制的离子探针^[10],离子探针用于测量火焰传播速度和传播方向.

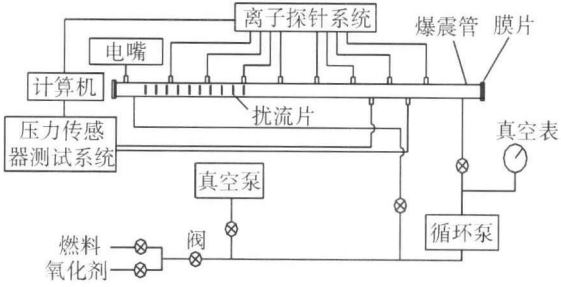


图 3 试验系统图
Fig. 3 Experimental system

在管道内安装‘回’型扰流器,以强化燃烧,促进爆震形成. 扰流片的堵塞比为 0.4 ,起始位置距刚性封闭端 180 mm ,扰流片间距为 60 mm ,片数为 10 片. 扰流片的阻塞比为扰流片面积与爆震管通道截面积之比. 在爆震管一侧壁面处安装一个 PCB 压力传感器,传感器受力面距离爆震管内壁面为 0 mm ,在另一侧安装 3 个 PCB 压力传感器,3 个传感器分别安装在如图 4 所示的不同长度的

套管内,套管的端面距离爆震管内壁面分别为 10,20,30 mm. 安装时传感器的受力面均与套管端面平齐,保证传感器所测压力为各自位置处真实爆震波的压力值. 变换套管的安装顺序,可以得到 6 种不同的套管安装组合,如图 5 所示. 各组合中,右壁面上的传感器位于壁面正中,而下壁面的 3 个套管间距都为 15 mm,且第二个套管在壁面正中. 如在组合 1 中,右侧壁面正中安装测量壁面压力的传感器,而下壁面则从左向右依次安装 30,20,10 mm 的传感器套管,即传感器自左至右分别测量距爆震管内壁面 30,20,10 mm 处的压力,且其中 20 mm 的套管出口端居于管道正中. 每次试验中 1 400,1 600 mm 两个截面位置处为相同的套管组合.

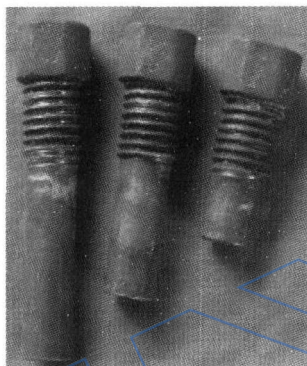


图 4 套管实物图
Fig. 4 Photo of sleeves

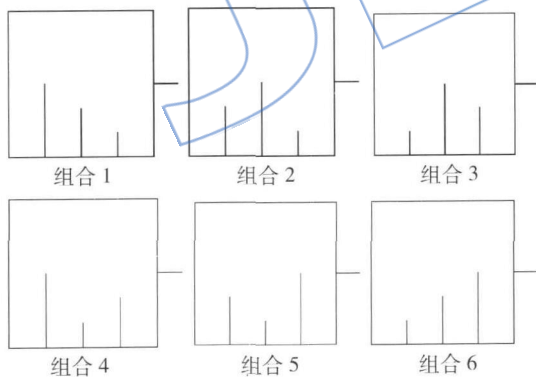


图 5 套管安装顺序示意图
Fig. 5 Sequence of sleeve installation

套管安装位置垂直于爆震波的传播方向,因此压力传感器测量的压力值为爆震波来流的静压值. 最初为了降低套管对流场的影响,将压力传感器的受力面与爆震管内壁面平齐,只将套管伸入管道,这样虽然会缩小套管的直径,降低套管对流场的影响,但是由于套管存在通道效应,同一截面不同位置的套管测量得出相同的压力值,这显然

是不合理的. 因此为了客观反映爆震波前导激波面的压力值,只有通过套管将压力传感器的受力面直接送入管道中. 这样套管直径虽然增大一点,增加了对流场的影响,但是测量的压力值还是相对真实的.

1.2 研究参数

- 1) 爆震管内气体参数:常温 $T=293\text{ K}$,常压 $p=0.1\text{ MPa}$;
- 2) 燃料:乙炔,爆震管内余气系数 $\alpha=0.8$;
- 3) 点火位置距刚性封闭端 60 mm;
- 4) 扰流器参数:阻塞比为 0.4,片数 $n=10$,间距 $\delta=60\text{ mm}$,起始位置距刚性封闭端为 180 mm.

2 研究结果及讨论

试验在光滑爆震管和安装扰流片的爆震管内分别进行,光滑爆震管内的试验结果可以定性地了解爆震波在初始发展过程中火焰和压力波的变化情况,有助于理解稳定爆震波在同一截面上压力分布特性. 图 6 和图 7 为安装扰流片时爆震管火焰速度及同截面处典型压力测量结果.

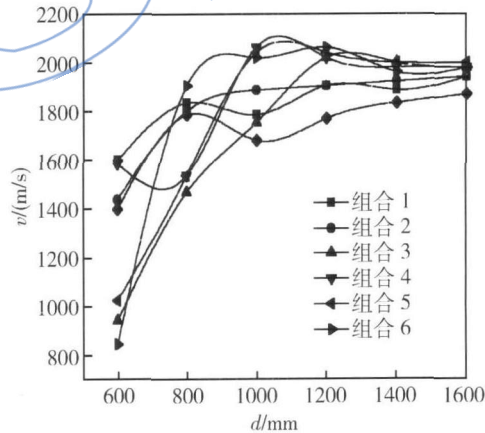


图 6 爆震管内火焰速度图
Fig. 6 Flame velocity in the detonation tube

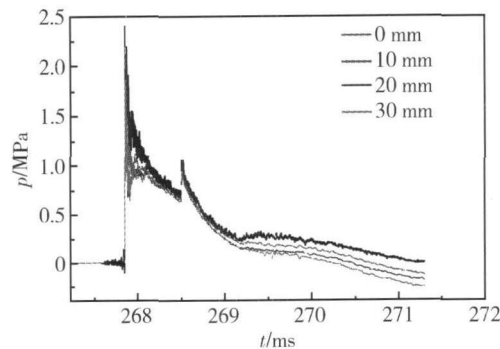


图 7 组合 1 时 1 600 mm 处压力曲线图
Fig. 7 History of pressure at 1 600 mm

图 6 是安装绕流片时爆震管内的火焰速度图,各曲线分别表示不同压力传感器套管组合下的火焰速度.如曲线组合 1 表示套管按图 5 中组合 1 的安装顺序安装时测得的火焰速度曲线.由图可知:距离爆震管端面 1 400 mm 以后火焰速度大小都在 1 900 m/s 左右,且速度稳定.图 7 测量的压力为 2 MPa 左右.理论上在混气初温 298 K,初压 0.1 MPa 时,乙炔-空气混合物的爆震波速度 $V_D = 1\ 863\text{ m/s}$, $p_{c1} = 1.91\text{ MPa}$,试验所得结果(初始温度 293 K)与 C-J 波值基本一致,在确定爆震管内可以得到充分发展爆震波的条件,进行了试验.因此在 1 400 mm 位置后爆震管内产生了稳定的爆震波,故试验中安装扰流片时同截面所测压力值均为稳定爆震波的压力大小.

2.1 同截面不同位置处压力测量结果分析

图 8 为不同套管组合下测得的同截面爆震波压力分布图.其中横坐标 L 表示为压力传感器受力面到爆震管内壁面的距离.图 8(a)和(b)是无扰流片时爆震管内同截面上压力分布图,图 8(c)和(d)是安装扰流片时爆震管内同截面上压力分布图.

从图 8 可以看出:

1) 对于图 8(a)和(b),爆震管内压力小于 1.5 MPa,没有产生爆震波,但燃烧波前沿是复杂的曲面波.在光滑爆震管内火焰初始发展过程中,壁面边界层内的火焰速度为层流速度,在管道中心处火焰的速度为湍流速度,这样的速度梯度存在使火焰面发生皱褶增加燃烧速率.当充分发展的层流火焰发展为湍流火焰时,壁面剪切层内小尺度湍流诱导的火焰前沿使火焰在壁面处燃烧,而沿管道中心的燃烧强度降低,由于 Taylor 不稳定性机理使火焰面凹陷不平^[11].随着火焰面继续向下游的移动,在爆震管同一截面上,凹凸的燃烧峰面发出的弱压缩波强度也是不均匀的.另外,从刚性封闭端反射回来的弱压缩波不断给火焰面以扰动,增加燃烧速率,但同时弱压缩波通过火焰面被火焰面膨胀放大,难以叠加形成激波.因此,火焰峰面本身发出强度不一的弱压缩波与穿过火焰面时被火焰面膨胀放大的反射弱压缩波相互作用和叠加,呈现为曲面波.

同样,对于图 8(c)和(d),同一截面内各位置处

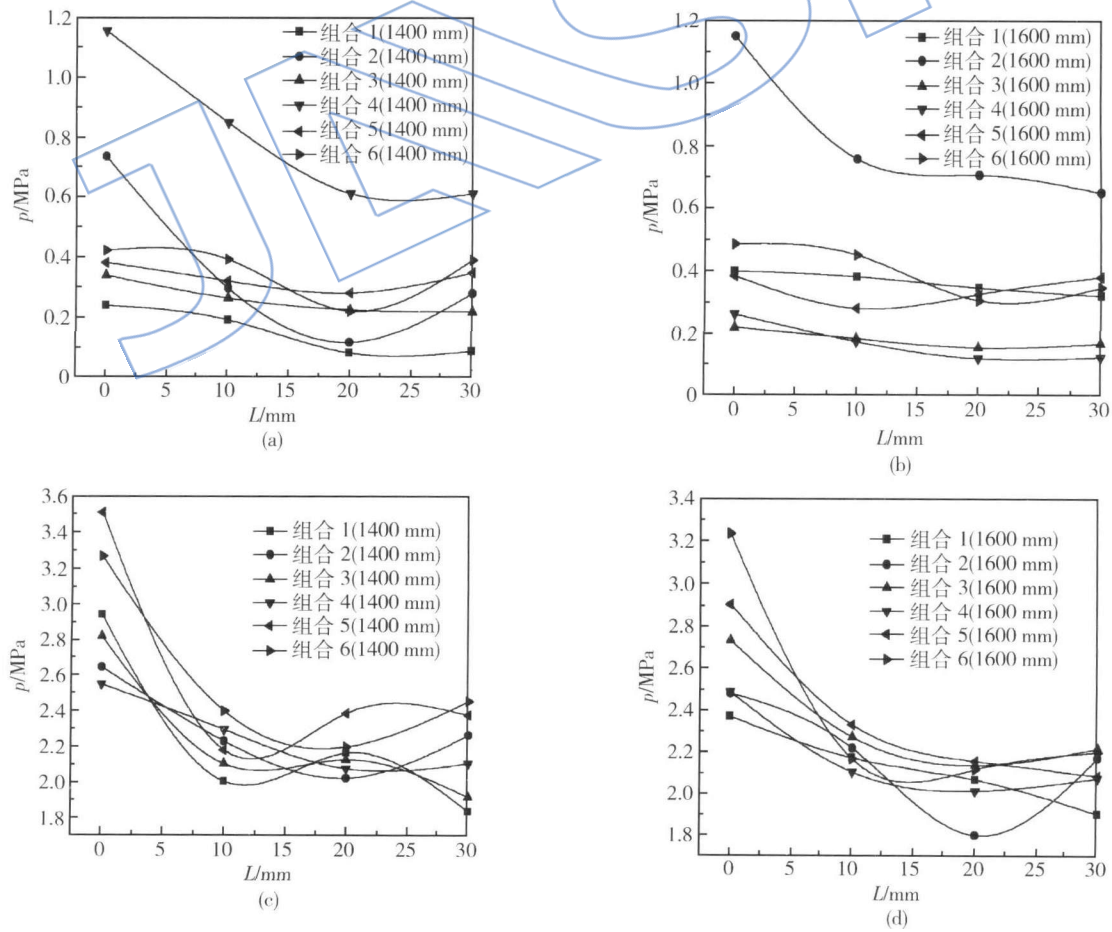


图 8 同截面内压力分布图

Fig.8 Pressure distribution in same section

的稳定爆震波压力值并不相等.这说明爆震波不是平面波,也是一个曲面波.对于单一的爆震波胞格来说,气相爆震波的前导冲击波是一个胞状的冲击波阵面,它由多个间隔排列的马赫杆和入射冲击波组成.横波总是与马赫杆和入射冲击波形成马赫结构并相交于三波点.前导冲击波阵面的各区域不断交替表现为入射冲击波和马赫杆,这种交替的过程是通过相邻三波点的对撞实现的,三波点是胞格的起点.入射波和马赫杆的形状都是曲面,且在同一胞格内各曲面压力大小不同.爆震波结构由大量的胞格组成,故爆震波的形状是由许多曲面组合而成的复杂曲面,且不同曲面的压力不同,而同一横截面上的不同点属于不同曲面,这就导致了同一横截面上各点的压力互不相同.

2) 同一截面内管壁处的燃烧波压力均高于管道中间压力.文献[4]中用试验验证矩形管道内爆震波的八面体和四面体假说是正确的,因此假设本文试验的爆震波在八面体中以球面传播,在四面体中以柱面传播,这样在整个爆震管中爆震波可以看作各自分别交叉作用又独立发展的球面波和柱面波组成.那么,将单个的三维胞格单元作为研究对象,当球形或柱面形的爆震波表面沿爆震管运动时,从主流区射向壁面的激波,在边界层粘性作用的影响下,使激波在边界层中不断地衰减,波前气流马赫数下降,速度减为亚声速.当激波到壁面处时,气流速度接近零,压力升高,所以壁面处传感器测得的压力等于滞止压力,会大于管中间气流的压力.同理,在光滑爆震管内,壁面处传感器测得的压力也为滞止压力,会大于其余传感器所测压力.

2.2 不同截面相同位置处压力波相对值 结果分析

为进一步了解稳定爆震波沿着爆震管传播时,在不同截面上相同位置上的变化情况,求出各组合中两个截面上相同位置处压力的相对变化值.压力相对值是指同一次试验中在 1 600 mm 截面上测到的压力值与 1 400 mm 截面上同一位置的传感器(如都为 20 mm 套管内的传感器)测到的压力值的大小的比值.其中图 9(a)是无扰流片时爆震管内不同截面压力相对值分布图,图 9(b)是安装扰流片时爆震管内不同截面上压力相对值分布图.

从图 9 可知:各点的相对值存在一定的差异,这表明在燃烧波传播过程中,燃烧波在各点不是均匀发展的,且压力波在爆震管传播过程中,不同截

面的同一位置处压力变化呈现出随机性.对比图 9(a)和(b),光滑爆震管内压力波的相对值变化比较大,相对值变化范围为 0.3~6 左右.说明光滑爆震管内没有形成稳定的爆震波时,压力波很不稳定.从图 9(b)中可以看出,稳定爆震波的压力相对值变化不大,较光滑管道内压力波而言具有相对的稳定性,但还是存在一定的差异,变化范围在 0.75~1.2 左右.爆震波的相对值表明:爆震波的表面上各位置处存在着不同的压力梯度、温度梯度,这种梯度的变化导致了爆震波表面的不均匀性,使爆震波在同一截面上各点的发展不同.在爆震波前沿表面上,构成爆震波的三波点的三道激波相互作用,由于切向速度差而产生切向力,在爆震波传递过程中引起爆震波表面的扰动,形成 Kelvin-Helmholtz 不稳定^[12].虽然横波对爆震波的传播机理不起主导作用^[1],但是当横波垂直地扫过爆震波前沿时,进一步对爆震波表面的密度梯度产生扰动,形成 Richtmyer-Meshkov 不稳定.这些不稳定都使爆震波在传播过程中表面产生扭曲,压力发生变化,压力相对值的差异进一步说明了爆震波不是一个平面波,而是复杂的三维结构.

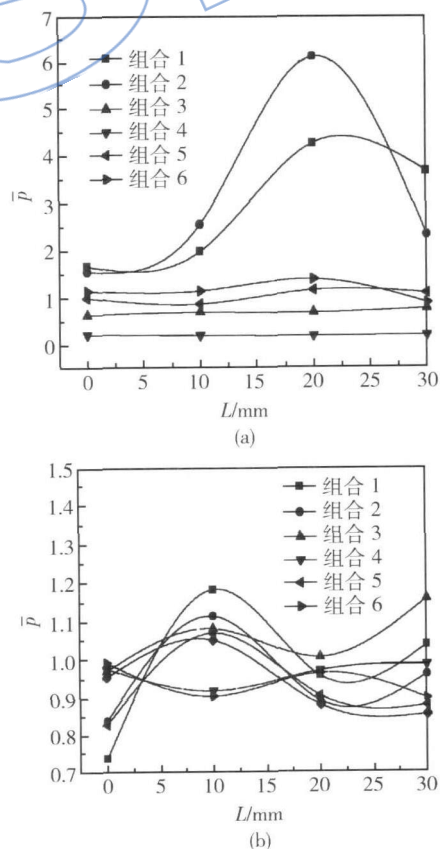


图 9 不同截面压力相对值分布图

Fig. 9 Relative value of pressure distribution in different section

3 结 论

本文在 60 mm × 60 mm × 2 000 mm 方爆震管内,选择了获得稳定爆震波的两个距离封闭端分别为 1 400, 1 600 mm 的截面,通过在这两个截面上分别设置的 4 个高频响压力传感器来测量爆震波压力大小的分布情况,研究获得如下结论:

1) 稳定爆震波的前导激波表面上压力大小分布并不一样,爆震波不是一个平面波;

2) 爆震管壁面处的压力要大于管道中间的压力分布。

参考文献:

- [1] Shepherd J E, Pintgen F, Austin J M, et al. The structure of the detonation front in gases[R]. AIAA 2002-0773.
- [2] Pintgen F, Eckett C A, Austin J M, et al. Direct observations of reaction zone structure in propagating detonations[J]. Combustion and Flame, 2003, 133: 211-229.
- [3] Hanana M, Lefebvre M H, Van Tiggelen P J. Pressure profiles in detonation cells with rectangular and diagonal structures[J]. Shock Waves, 2001, 11: 77-88.
- [4] Takai R, Yoneda K, Hikita T. Study of detonation wave structure[R]. Fifteenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1974: 69-78.
- [5] Oran E S, Weber J W, Stefaniw E I, et al. Numerical study of a two-dimensional H_2-O_2-Ar detonation using a detailed chemical reaction model [J]. Combustion and Flame, 1998, 113: 147-163.
- [6] Jeong Y C, Ma Fuhua, Vigor Y. Numerical simulation of cellular structure of two-dimensional detonation waves [R]. AIAA 2005-1174.
- [7] Vadim N G, Daniel D, Elaine S O. Formation and evolution of two-dimensional cellular detonations [J]. Combustion and Flame, 1999, 116: 154-165.
- [8] Khokhlov A M, Austin J M, Pintgen F, et al. Numerical study of the detonation wave structure in ethylene-oxygen mixtures[R]. AIAA 2004-792.
- [9] Vincent D, Miltiadis V P. Computational study of three-dimensional gaseous detonation structures[J]. Combustion and Flame, 2006, 144: 821-837.
- [10] 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.
HAN Qixiang, WANG Jiahua, WANG Weilai. Investigation of the ion-probe technology for measuring the DDT distance[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 97-100. (in Chinese)
- [11] Lee J H S, Mosn T. The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosions [R]. Progress Energy Combustion Science, 1980: 359-389.
- [12] Matei I R, Chung K L, Gary J S. Structure of unstable gaseous detonation waves[J]. Physics of Fluids, 2005, 17: 091105-1.