

初始压力和狭缝高度对狭缝内 起爆距离影响的实验

张彭岗, 潘振华, 朱跃进, 王 谦

(江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 为获得狭缝内爆轰波起爆距离(DID)的变化规律, 分别在宽度为10 mm, 高度为1.0, 2.2, 2.9, 4.0 mm, 长度为1220 mm的狭缝爆轰管内对不同初始压力下(5~45 kPa)化学当量比的乙烯/氧气混气进行单次爆轰性能实验研究。根据烟迹法、高速摄影图片判定起爆位置, 得到初始压力和狭缝高度对爆轰波起爆距离的影响规律。结果表明:①在初始压力为10~20 kPa时, 起爆距离随着狭缝高度增加逐渐缩短;②在初始压力为25~40 kPa时, 起爆狭缝距离随着狭缝高度变大先降低后增加, 在初始压力为45 kPa时, 起爆距离随着狭缝高度增加而变长;③综合初始压力和狭缝高度的影响, 初步得到起爆距离随初始压力和狭缝高度等参数变化的量纲归一化经验公式。

关 键 词: 微燃烧; 微爆轰; 狭缝; 起爆距离; 初始压力

中图分类号: V231.22

文献标志码: A

Experiment on effect of initial pressure and narrow gap height on detonation initiation distance in narrow gap

ZHANG Peng-gang, PAN Zhen-hua, ZHU Yue-jin, WANG Qian

(School of Energy and Power Engineering,
Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: Single detonation in stoichiometric ethylene/oxygen mixtures was experimentally studied at initial pressure (5—45 kPa) to achieve change rule of detonation initiation distance (DID) of detonation wave in narrow gap. The narrow gap detonation tube was formed by the cross-section with width of 10 mm, height of 1.0, 2.2, 2.9, 4.0 mm, and length of 1220 mm. Detonation initiation position was decided by soot records and high-speed digital imaging. Effect law of initial pressure and narrow gap height on detonation initiation distance was achieved. The results indicate that: (1) detonation initiation distance is reduced with the increase of narrow gap height at initial pressure of 10—20 kPa; (2) detonation initiation distance initially decreases with increase of narrow gap height and then increases at initial pressure of 25—40 kPa, and increases at initial pressure of 45 kPa with the increase of narrow gap height; (3) compositing the influence of initial pressure and the narrow gap height, non-dimensional empirical formula for detonation initiation distance varying with initial pressure and narrow gap height is achieved.

Key words: micro-combustion; micro-detonation; narrow gap; initiation distance; initial pressure

收稿日期: 2014-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(51306073, 11402102); 江苏省自然科学基金(BK20130510); 江苏省博士后基金(1301050C)

作者简介: 张彭岗(1974—), 男, 陕西泾阳人, 讲师, 博士, 主要从事爆轰学领域研究。

通讯作者: 潘振华(1981—), 男, 江苏丹阳人, 讲师, 博士, 主要从事爆轰学领域研究。E-mail: zhenpan@ujs.edu.cn

爆轰波起爆距离(DID)是爆燃向爆轰转捩(deflagration to detonation transition, DDT)研究中重要的参数之一. 宏观尺度爆轰管内的研究表明:DDT 过程具有动态性、随机性和不稳定性,起爆距离受到点火能量及位置、混气初始条件、管径尺寸及燃料种类等诸多参数的影响^[1-3]. 而随着通道尺寸的急剧减小,微通道特定的结构尺寸本身能够加速火焰的传播,使微爆轰的转捩机理有别于常规 DDT 过程.

近年来,国内外一些学者陆续开展了微爆轰的研究. 国外的相关研究主要分为以下几类:首先是利用数值模拟或实验的方法获得微通道内 DDT 过程中火焰传播机理. Norton 等^[4]在 100 μm 左右尺度内模拟了火焰的传播,结果表明进口的热损失和和壁面的径向热损失是控制火焰传播的关键因素. Ivanov 等^[5]研究了 H_2/O_2 混气在 0.5~10 mm 不同管道宽度内传播时管道宽度对火焰传播和 DDT 过程的影响. 研究表明:在转捩为爆轰前,火焰的加速完全由火焰前沿的流动特征所控制. 由于黏性对微小空间火焰传播的影响很大, Akkerman 等^[6]研究了两端开口的绝热圆管内黏性对火焰传播的影响. 结果证实:当火焰产生的热膨胀超过由火焰外形决定的某一临界值时影响火焰加速. 文献^[7]研究了微通道过渡到微圆管时火焰传播和 DDT 过程,表明微通道几何形状和点火方式的改变提高了火焰的初始速度,促进了 DDT 的形成. Wu 等^[8-9]分别在毫米量级光滑微细玻璃管和微米尺度狭缝内中观察到 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2$ 混气爆轰波形成时火焰传播过程. 其次,由于微通道尺寸接近于爆轰波传播的临界尺寸,因此有学者研究了微通道内的爆轰极限现象. Nobuyuki 等^[10]模拟了低压条件下 H_2/air 混气驰振爆轰的特征. Wu 等^[11]研究了微通道尺寸改变时接近传播极限的爆轰波变化过程. 最后,在微通道中,壁面黏性和热损失对爆轰波速度有显著的影响,会导致爆轰波速度出现一定程度上的亏损, Ishii 等^[12]在 0.8~3 mm 宽的狭缝中研究了 $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ 混气爆轰波的速度亏损. 国内对于微爆轰燃烧的研究则较少^[13-14].

目前国内外对微爆轰形成与传播过程获得了一定的研究成果,但在狭缝内爆轰波起爆距离方面的实验数据还很欠缺. 本文采用 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2$ 混气为实验对象,在毫米量级高度的狭缝内利用烟迹法和高速摄影图片,深入系统地研究初始压力和

狭缝高度等参数对起爆距离的影响规律. 本文的研究对微爆轰动力装置的研制及脉冲爆轰发动机预爆管的改进具有一定的指导意义.

1 实验设备及研究参数

实验系统(如图 1)包括狭缝爆轰管、气源及充气系统、点火系统、光学测量系统等. 爆轰管长度 $L=1220\text{ mm}$, 宽度 $W=10\text{ mm}$, 用不同厚度的垫片来实现狭缝高度可调性,如图 1 中 A-A 截面所示分别为狭缝高度 $H=1.0, 2.2, 2.9, 4.0\text{ mm}$. 在爆轰管的一侧安装表面熏制好烟膜的铝板,用于记录爆轰波运行轨迹. 爆轰管另一侧为 6 mm 厚的聚碳酸酯板(透光性好,耐压 10 MPa 以上),以达到爆轰管整体可视化要求. 铝板、垫片和聚碳酸酯板的表面都非常光滑,经过精加工后考虑到安装误差,狭缝的高度和宽度误差约为 $\pm 0.02\text{ mm}$. 实验测试气体为 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2$ 混气,以化学当量比在预混罐中混合. 为保证混气均匀充分混合,将混气静置 24 h 后进行实验. 实验中混气初始压力 $p_0=5\sim 45\text{ kPa}$. 爆轰管刚性端设置充气-点火组件,出口端用厚 0.1 mm 左右的铝膜片密封. 点火系统由自制的点火器组成,充气-点火组件如图 1 中 B-B 截面所示,由点火探针与进气嘴组成,圆形点火空腔的直径为 2 mm,长度为 5 mm. 空腔出口和狭缝入口相接,实验中空腔内混气形成热射流,从而引燃狭缝内的混气.

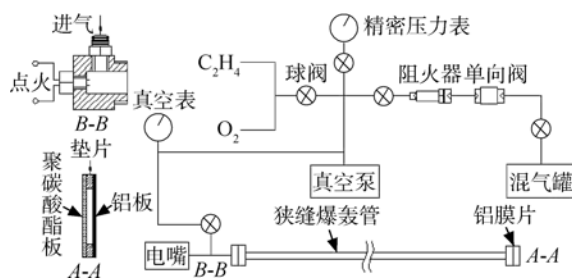


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

光学测量系统由 OLYMPUS i-SPEED 高速摄像机和其他辅助设备组成,拍摄区域为整个爆轰管长度,火焰显示区域长为 1170 mm,拍摄速度为 7.5 万帧/s,以高速摄影图片中在特定时间内火焰锋面的移动距离来计算火焰平均传播速度. 高速摄像机的触发信号与点火信号同步,即按下点火按钮的同时开始工作或记录数据.

2 研究结果及分析

2.1 爆轰波起爆距离和混气可爆范围的确定

本文中爆轰波起爆距离 L_{did} 可通过以下实验结果得出:①高速摄影图片中点火端到火焰发生急剧加速位置的距离;②烟迹图中点火端到过驱爆轰轨迹线位置之间的距离,从本文实验结果来看,这两个距离符合良好.如图2所示,在 $p_0 = 10$ kPa, $H = 4$ mm 时爆轰管高速摄影图片及过爆区域胞格图,则该状态下 L_{did} 为 465~478 mm.

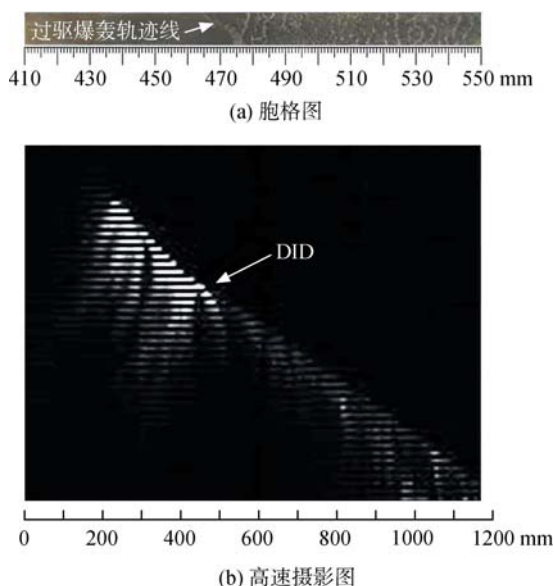


图2 爆轰波起爆距离图

Fig. 2 DID distance of detonation wave

从高速摄影图片和烟迹图分别得到火焰传播速度与爆轰波阵面三波点的运行轨迹,综合判断不同初始条件时混气的可爆范围(图3所示).图3中曲线1左侧为无爆轰区域,曲线2右侧为稳定爆轰波产生的区域,中间部分为不稳定爆轰区

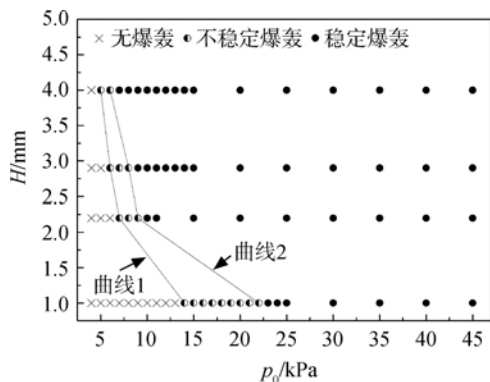


图3 可爆范围确定图

Fig. 3 Diagram of detonability range

域.从图中可以看出,随着狭缝高度的减小,稳定爆轰所对应的初始压力越大,不稳定爆轰区域明显变宽.由于不稳定爆轰波速度振荡较大,从高速摄影图中很难确定出火焰加速的具体位置,因此本文主要讨论稳定爆轰波区域内的起爆距离变化规律.

2.2 $p_0 = 10 \sim 20$ kPa 时狭缝高度对起爆距离的影响

本文中充气-点火组件出口与狭缝的入口直接相连,空腔出口直径为 2 mm 不变,而狭缝入口在 $H = 1.0$ mm 时出现横截面相对变小,其余 3 种狭缝高度下横截面变大的情况.本实验中混气的初始压力都为低压,且空腔的长度只有 5 mm,这种因热射流火焰传播速度和横截面变化而引起对起爆距离的影响可以忽略.

图4为 $p_0 = 10 \sim 20$ kPa 时起爆距离随狭缝高度变化规律.由于狭缝高度为 1 mm 的狭缝内爆轰波在此压力范围内处于无爆轰和不稳定爆轰区域,因此图4中不包括此管道尺寸的变化规律.从图4可知:当初始压力为 10~20 kPa 时,起爆距离随着狭缝高度的增加而缩短,当狭缝高度从 2.2 mm 增加到 2.9 mm 的时,起爆距离降低最为明显.而从 2.9 mm 增加到 4.0 mm 过程中变化不大,此时起爆距离相当.另外,从图4中可知:对某一固定狭缝高度的爆轰管而言,随着初始压力的增大,起爆距离在逐渐减小.如 $H = 2.2$ mm 时,初始压力从 10 kPa 增加到 20 kPa 过程中,起爆距离相应地从 675~681 mm 减小到 329~338 mm.

以图4中 $p_0 = 15$ kPa 的曲线为典型过程进

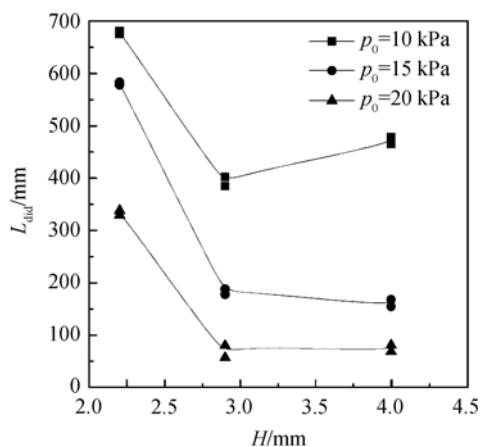
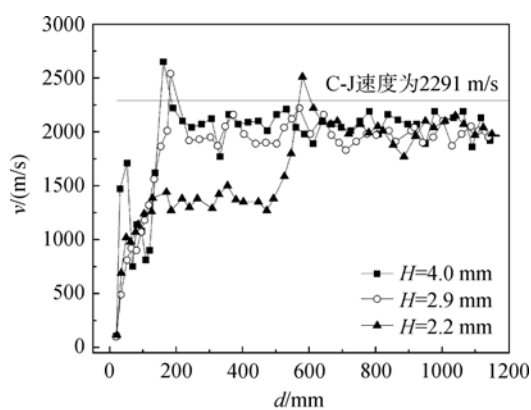


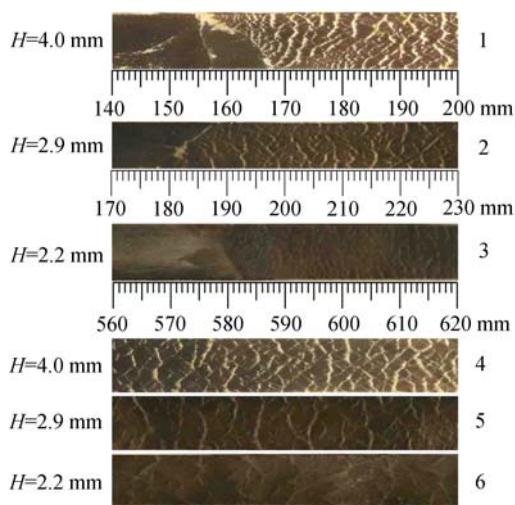
图4 $p_0 = 10 \sim 20$ kPa 时狭缝高度对起爆距离的影响

Fig. 4 Effect of different narrow gap heights on DID at $p_0 = 10 \sim 20$ kPa

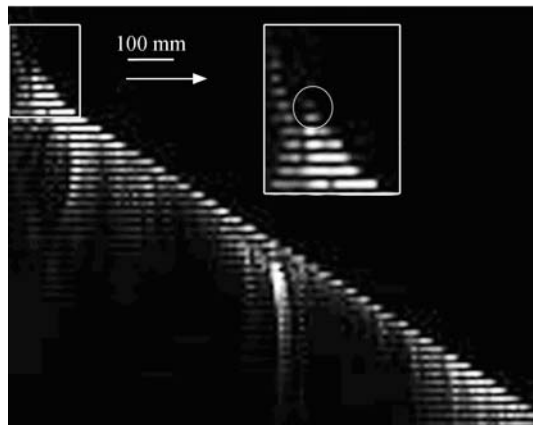
行分析,图5为该曲线3种狭缝高度下的火焰速度(v)及胞格图(图5(a)中横坐标 d 为距离点火端的尺寸),图6为该曲线中狭缝高度 $H=4.0$ mm时的高速摄影图.如图5(a)所示,3种狭缝高度下火焰进入到狭缝的初始速度均为100 m/s左右,高于 C_2H_4/O_2 混气的湍流火焰速度(10~50 m/s)^[8],但3种狭缝高度下初始湍流火焰速度均在不同的距离内呈现出不同的变化模式.其中 $H=4.0$ mm的管道中火焰速度变化表现为振荡剧烈,经过约50 mm的距离从100 m/s左右急剧上升到1710 m/s后下降到750 m/s,然后在约50~120 mm距离内火焰速度稳定在1000 m/s左右.当距离狭缝入口约90 mm的位置处形成另一火焰面(如图6中椭圆圈内所示)时,由于湍流火焰面和自燃点火焰面重合后能量进一步增大形成过爆,过驱爆轰波速度为2650 m/s,明显高于



(a) 火焰速度图



(b) 胞格图

图5 $p_0=15$ kPa 三种狭缝高度下火焰速度及胞格图Fig. 5 Flame velocity and cell of three narrow gap heights at $p_0=15$ kPa图6 $p_0=15$ kPa, $H=4.0$ mm 高速摄影图Fig. 6 High-speed images at $p_0=15$ kPa, $H=4.0$ mm

Chapman-Jouguet(C-J)速度2291 m/s.如图5(b)中1所示,在距离狭缝入口155~168 mm之间形成弧形过爆轨迹线,对应图6在距狭缝入口170 mm的火焰面为过爆位置. $H=2.9$ mm时管道内火焰速度在约50 mm距离内从100 m/s左右上升到810 m/s,随后爆燃波速度没有自持也没有振荡,再经过约130 mm的距离内一直持续加速,直到距离狭缝入口处178~188 mm的位置出现过爆(如图5(b)中2所示的过驱爆轰波轨迹线),此时过驱爆轰波速度为2540 m/s. $H=2.2$ mm时管道内火焰经过约50 mm的距离速度从100 m/s加速到1020 m/s,再经过约170 mm的距离略微上升到1300 m/s左右后相对稳定地持续了近400 mm的距离,持续时间约280 μ s.当自持传播的爆燃波能量积累到一定程度,如图5(b)中3所示,在距离狭缝入口578~583 mm之间的位置形成过驱爆轰波轨迹线,过驱爆轰波速度为2510 m/s.3种狭缝高度的管内过爆后都衰减为稳定爆轰,速度稳定在2000 m/s左右.

综上,火焰在10~20 kPa范围时由于狭缝高度的不同,表现为不同的加速过程:①不同狭缝高度管道在较短的距离内,速度均为100 m/s左右的湍流火焰都加速到爆燃波.原因可能为点火后宽度约为2 mm热射流向狭缝内膨胀、扩散和传播,火焰锋面形成的弱压缩波不断向前推进,扫过未燃混气会提高当地的温度和压力.火焰锋面压缩并诱导未燃混气流动使更多的燃气进入到火焰面从而提高燃烧速率.这些因素之间的相互作用呈现出正反馈的机理^[15]使火焰燃烧速度急剧上升.如 $H=4.0$ mm管道混气量相对较多,火焰燃烧能量较大而利于加速,在最短的距离和时间内速度上升最快.相应地图5(b)中1和4中显示起

爆及稳定段胞格线最清晰,亦表明 $H=4.0\text{ mm}$ 时管内燃烧能量大;②爆燃波转捩为爆轰波时,不同狭缝高度管内表现为不同的加速过程. 主要是火焰加速的同时高度方向上壁面边界层开始形成和发展,边界层负位移效应的存在使火焰速度衰减^[16]. 随着高度的增加,边界层对火焰加速的影响逐渐减小. 因此在边界层的作用下,不同高度内爆燃波速度开始发生分歧. 其中 $H=4.0\text{ mm}$ 时混气量相对最多,火焰燃烧释放能量最大,火焰速度急剧上升和边界层之间的相互作用使火焰速度振荡剧烈. 振荡加剧诱导激波的能量,当湍流火焰面和诱导激波之间局部的未燃混气达到自燃点时,形成如图6中的又一火焰面. 对于 $H=2.2\text{ mm}$,火焰燃烧释放能量最小,边界层负位移效应影响增大,使得爆燃波速度相对保持稳定,故爆燃波在小管道内比爆轰波更容易自持^[17]. 而 $H=2.9\text{ mm}$ 时爆燃波速度介于振荡和自持之间处于持续加速状态.

2.3 $p_0=25\sim 45\text{ kPa}$ 时狭缝高度对起爆距离的影响

与 $p_0=10\sim 20\text{ kPa}$ 相比,随着初始压力的升高,起爆距离急剧缩短. 如图7所示,起爆距离大部分位于 100 mm 内. 为更清晰地反应出起爆距离变化的规律性,图7中每个数据点取每种状态下起爆距离的平均值,如 $H=1.0\text{ mm}$, $p_0=25\text{ kPa}$ 时起爆距离为 $92\sim 102\text{ mm}$,取平均值为 97 mm . 由图7与图4对比可知:首先随着初始压力的升高, $H=1.0\text{ mm}$ 的爆轰管内出现爆轰波. 其次在 $p_0=25\text{ kPa}$ 时起爆距离随狭缝高度的增大先降低后升高,这种变化趋势一直持续到压力为 40 kPa ,只是随着初始压力的增高,先降低后升高

的趋势越来越不明显,即对应的曲线越来越平缓. 最后当压力升高到 45 kPa 时,起爆距离随狭缝高度的增加而增加.

以图7中 $p_0=25\text{ kPa}$ 的曲线为典型过程进行分析. 该曲线从 $H=1.0\text{ mm}$ 增大到 $H=2.2\text{ mm}$ 的过程中起爆距离随狭缝高度的增加而降低,原因可能为:由于壁面无滑移壁面带来边界层的发展,随着狭缝高度的变化,壁面边界层对火焰发展的影响程度也在发生变化,尤其是狭缝高度越小边界层负位移效应^[16]对火焰的影响越大. 因此 $H=1.0\text{ mm}$ 的管内火焰速度增幅相对最缓慢,DDT时间和距离增加. 当狭缝高度从 2.9 mm 增加到 4.0 mm 的过程中,起爆距离随狭缝高度的增加而增加. 主要是狭缝高度增加后边界层对火焰变化的影响减弱,正反馈机理主导火焰的加速. 而狭缝高度增大后管道的当量直径变大,爆轰波形成过程中压缩波越不易汇聚形成激波,压力波和火焰正反馈相互作用强度减弱,不利于爆轰波形成而起爆距离增大,这类似于宏观尺度的DDT变化规律^[1-2]. 在初始压力 $p_0=25\sim 40\text{ kPa}$ 范围内时,随着初始压力的增大,火焰燃烧速率急剧增加,火焰加速的正反馈机理影响增强,相比之下边界层的负位移效应影响减弱,起爆距离随狭缝高度先减小后增大的趋势越来越不明显,对应图7中的曲线越来越平缓.

当初始压力进一步增大到 45 kPa 时,起爆距离随狭缝高度的增大而变长,这同样类似于宏观尺度DDT的变化规律. 也可能的原因是: $H=1.0\text{ mm}$ 时狭缝高度最小,当火焰阵面驱动未燃混气运动时遭遇边界层的摩擦阻力会形成壅塞流^[16]. 湍流火焰面压缩诱导激波后的未燃混气时,未燃混气容易达到自燃点而形成爆轰中心,使起爆距离缩短.

综上所述,起爆距离随初始压力变化比较明显,尤其是初始压力增大时,不同狭缝高度时起爆距离都明显缩短,彼此之间的差距愈小,对应曲线就会愈平缓. 图7中 $p_0=45\text{ kPa}$ 的曲线虽然随狭缝高度呈上升趋势,可以想象当初始压力进一步增大后,对应曲线上升的幅度会越来越小,最终可能成为平行于横坐标的直线.

2.4 起爆距离随初始压力和狭缝高度变化的经验公式

从2.2节及2.3节分析可知,起爆距离与初始压力和狭缝高度等参数密切相关,表现在不同初始压力时,狭缝高度变化对起爆距离的影响呈

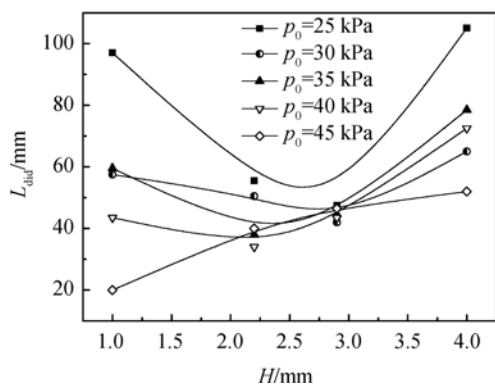


图7 $p_0=25\sim 45\text{ kPa}$ 时狭缝高度对起爆距离的影响
Fig. 7 Effect of different narrow gap heights on DID at $p_0=25\sim 45\text{ kPa}$

现出不同的变化规律.为进一步揭示起爆距离变化的内在规律,图8将相关参数进行量纲归一化,其中横坐标为环境压力 p_{atm} 与初始压力 p_0 的比值,纵坐标为起爆距离 L_{did} 与狭缝横截面当量直径 d_e 之比.图8表明随着狭缝高度的增加,拟合直线的斜率变小.本文经过对实验结果进行线性拟合得出经验公式为

$$L_{\text{did}}/d_e = \alpha p_{\text{atm}}/p_0 + c$$

式中 α 和 c 均为常数,其中 $\alpha=8\sim 28$, $c=-65\sim -15$.

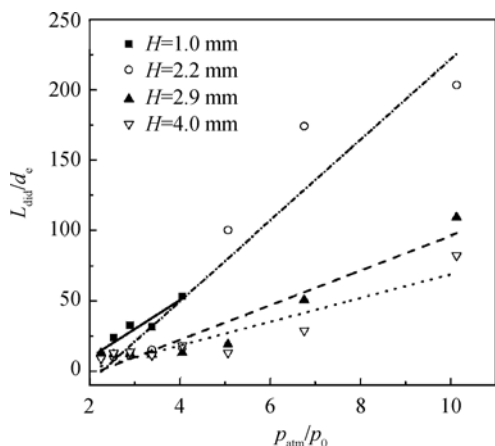


图8 起爆距离经验公式

Fig. 8 DID of empirical formula

文献[18]在3种高度的狭缝中采用 H_2/O_2 混气为研究对象,对实验结果拟合出类似的经验公式为 $L_{\text{did}}/d_e = \alpha p_{\text{atm}}/p_0$,其中 $\alpha=30\sim 70$.对于化学当量比的 H_2/O_2 混气,当 $H=1.0, 2.0, 5.0$ mm时, α 值分别为50,40,40.表1对文献[18]和本文拟合公式中的系数 α 值进行对比.从表1可知虽然混气比例相同,而燃料不同导致 α 值差异较大.原因可能是:①燃料不同,火焰燃烧释放的能量和火焰速度相差较大,导致正反馈机理和边

表1 不同狭缝高度下比例系数 α 值

Table 1 Value of α with different narrow gap height

H/mm	α	
	文献[18]	本文结果
1.0	50	20
2.0	40	
2.2		28
2.9		12
4.0		8
5.0	40	

界层之间相互作用对火焰加速的影响不同,起爆距离随狭缝高度和初始压力等参数变化差异较大;②文献[18]在每种狭缝高度下只用两个数据点进行拟合,导致的误差可能较大,而本文在每种狭缝高度下拟合的数据点为5~8个.将来可采用 H_2/O_2 混气进一步对本文和文献[18]的有关结论进行对比研究.

3 结 论

1) 在较低的初始压力 $p_0=10\sim 20$ kPa 情况下,由于火焰的低燃烧速率和边界层的综合影响,火焰传播以及和压力波相互作用时具有微尺度通道内火焰加速及 DDT 特征,爆轰波起爆距离随着狭缝高度增加而缩短.

2) 在 $p_0=25\sim 40$ kPa 时,起爆距离随着狭缝高度增加先缩短后变长,但随着初始压力的升高,这种变化趋势逐渐减弱.当 $p_0=45$ kPa 时,起爆距离随狭缝高度增加而增加.

3) 在本实验条件下获得起爆距离的经验公式, L_{did}/d_e 随 p_{atm}/p_0 呈线性变化,比例系数 α 的范围约为8~28.

参考文献:

- [1] Kuznetsov M, Alekseev V, Matsukov I, et al. DDT in a smooth tube filled with a hydrogen-oxygen mixture[J]. Shock Waves, 2005, 14(3): 205-215.
- [2] Silvestrini M, Genova B, Parisi G, et al. Flame acceleration and DDT run-up distance for smooth and obstacles filled tubes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21(6): 555-562.
- [3] Robert B, Detlef A, Rainer G, et al. Effect of ignition position on the run-up distance to DDT for hydrogen-air explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(2): 194-199.
- [4] Norton D G, Vlachos D G. Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(21): 4871-4882.
- [5] Ivanov M F, Kiverin A D, Liberman M A. Hydrogen-oxygen flame acceleration and transition to detonation in channels with no-slip walls for a detailed chemical reaction model[J]. Physical Review E, 2011, 83(5): 056313. 1-056313. 16.
- [6] Akkerman V, Chung K L, Bychkov V, et al. Analysis of flame acceleration induced by wall friction in open tubes[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(5): 053606. 1-053606. 14.
- [7] Kagan L, Sivashinsky G. On the transition from deflagration to detonation in narrow tubes[J]. Flow Turbulence Combustion, 2010, 84(3): 423-437.

- [8] 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.
- [9] Wu M H, Kuo W C. Accelerative expansion and DDT of stoichiometric ethylene/oxygen flame rings in micro-gaps[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2017-2024.
- [10] Nobuyuki T, Youhi M, Hayashi A K. Two-dimensional numerical simulation on galloping detonation in a narrow channel[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 1999-2007.
- [11] Wu M H, Kuo W C. Transmission of near-limit detonation wave through a planar sudden expansion in a narrow channel[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(11): 3414-3422.
- [12] Ishii K, Itoh K, Tsuboi T. A study on velocity deficits of detonation wave in narrow gaps[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2789-2794.
- [13] 靳乐, 范玮, 严传俊, 等. 毫米量级微管内单次爆震[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(4): 338-343.
JIN Le, FAN Wei, YAN Chuanjun, et al. Single-cycle detonation in millimeter-scale tube[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, 18(4): 338-343. (in Chinese)
- [14] 张超, 唐豪, 李明, 等. 当量比和间隙尺寸对爆震波传播过程的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1948-1957.
ZHANG Chao, TANG Hao, LI Ming, et al. Effects of equivalence ratio and gap size on the propagation behavior of detonations[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9): 1948-1957. (in Chinese)
- [15] 张彭岗, 何小民, 张靖周. 不同端面密封条件下缓燃-爆震转捩特性试验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1): 32-37.
ZHANG Penggang, HE Xiaomin, ZHANG Jingzhou. Experimental study on characteristic of deflagration to detonation transition in different close end[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 32-37. (in Chinese)
- [16] Fay J A. Two-dimensional gaseous detonations: velocity deficit[J]. Physics of Fluids, 1959, 2(3): 283-290.
- [17] Bykov V, Goldfarb I, Gol'dshtein V, et al. Effects of hydraulic resistance and heat losses on detonability and flammability limits[J]. Combustion Theory and Modelling, 2004, 8(2): 413-424.
- [18] Nagai K, Okabe T, Kim K, et al. A study on DDT processes in a narrow channel[C]//Proceeding of the 26th International Symposium on Shock Waves. Goettingen, Germany: Springer, 2009: 203-208.

(编辑: 陈 越)