DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0441-08

初始压力和狭缝宽度对毫米量级狭缝内爆轰起爆距离的影响*

张彭岗,朱跃进,潘振华,王 谦
(江苏大学能源与动力工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要: 为获得狭缝内爆轰起爆距离的影响因素,分别在高度为 1.0 mm,宽度为 10、20、30 mm 的狭缝爆轰管内,对不同初始压力下(p_0=5.0~50.0 kPa)等当量比的乙烯/氧气预混气体进行了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,分析了初始压力和狭缝宽度对爆轰起爆距离的影响。结果表明:(1)p_0=21.0~30.0 kPa 时,起爆距离随着狭缝宽度的增大而逐渐缩短;(2)p_0=35.0~42.5 kPa 时,起爆距离随着狭缝宽度的增大先缩短后增大,在 p_0=45.0~50.0 kPa 时起爆距离随着狭缝宽度的增大基本保持不变;(3)3 种狭缝宽度下,量纲一起爆距离随量纲一初始压力的变化曲线差异较大。

关键词: 爆炸力学;起爆距离;烟迹法;微爆轰;微燃烧;狭缝
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

爆轰起爆距离(detonation initiation distance,DID)是爆燃向爆轰转捩(deflagration to detonation transition,DDT)研究中的重要参数之一。对大尺度爆轰管(厘米及以上量级)的研究表明:DDT 过程具有动态性、随机性和不稳定性,DDT 距离受点火能量及位置、混气初始条件、管径尺寸及燃料种类等因素的影响[1-2]。而随着通道尺寸的急剧减小,小尺度通道(毫米及以下量级)特定的结构尺寸本身能够加速火焰的传播[3],使小尺度通道内爆轰的转捩机理有别于大尺度管道内的 DDT 过程,从而导致 2 种管道内起爆距离的变化规律有差异。

近年来,一些学者陆续对小尺度通道内的爆轰开展了研究。实验研究主要分为 2 类:一类是研究近极限条件下小尺度通道内的爆轰波传播模式和速度亏损。相关研究表明:(1)受爆轰波阵面后边界层负位移的影响[4],壁面边界条件抑制不稳定爆轰气体的胞格导致熄爆[5],这与 J. A. Fay[6] 的理论一致;(2)壁面带来的热量和动量损失导致速度亏损[7],稳定爆轰波的速度亏损与管道尺寸的变化成一定的比例[8]。远离爆轰极限时[9],爆轰波速度稳定且震荡较小;当接近极限条件时,爆轰波出现明显的速度震荡。另一类则是研究 DDT 过程。M. H. Wu 等[10]在内径为 0.5~3.0 mm 的玻璃管内得到了稳定爆轰波,研究显示常温常压下小尺度管道内起爆距离随管径的增大而增大,这类似于大尺度管道内起爆距离的变化规律。随后,M. H. Wu 等[11]在 0.26、0.12 mm 等 2 种高度的圆盘状狭缝内得到了 DDT 过程。实验表明狭缝高度越小,DDT 时间和距离越短。K. Nagai 等[12]在高 1~5 mm、宽 8 mm 的矩形狭缝内研究了 DDT 过程,建立了起爆距离随初始压力变化的线性关系式。相关数值模拟则研究小尺度通道内 DDT 过程中火焰的传播机理,主要考察壁面条件对火焰传播过程的影响。M. F. Ivanov 等[13]研究了不同宽度的管道内管道宽度对火焰传播和 DDT 过程的影响。研究表明:在爆燃转捩为爆轰前,火焰的加速完全由火焰前沿的流动特征所控制。由于壁面条件对狭小空间内火焰传播的影响很大,V. Akkerman 等[14]研究了绝热圆管壁面摩擦力对火焰传播的影响。首次证实:壁面摩擦引起火焰形变,当火焰的热膨胀率超过由火焰外形决定的临界热膨胀率时,火焰的加速受到影响。L. Kagan 等[15]研究了狭缝过渡到小圆管时火焰传播和 DDT 过程,表明强烈的壁面摩擦提高了火焰初始速度,促进了 DDT 的形

* **收稿日期**: 2015-01-09; **修回日期**: 2015-04-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(51306073,11402102);江苏省自然科学基金项目(BK20130510,BK20140524)
第一作者: 张彭岗(1974—),男,博士,讲师; **通信作者**: 朱跃进,zyjwind@163.com。

成。相对而言,目前对小尺度狭缝内爆轰的形成与传播过程已获得了一定的研究成果[16-17],但爆轰起爆距离方面的实验数据还很欠缺。

本文中,拟以乙烯/纯氧混气为实验对象,针对高度为 1.0 mm 的狭缝内的 DDT 过程,利用高速摄影图片和烟迹图,深入研究初始压力和狭缝宽度等参数对起爆距离的影响。

1 实验设备及研究参数

实验系统如图 1 所示,包括狭缝、气源及充气系统、点火系统和光学测量系统等。狭缝长度为 1 220 mm,借助 1.0 mm 厚的垫片来实现狭缝高度,如图 1(a)中 *A-A* 所示,高度 $H=1.0$ mm,宽度 $W=10,20,30$ mm。在狭缝一侧安装表面熏制好烟膜的铝板,用于记录爆轰波的运行轨迹。狭缝另一侧为 6 mm 厚的聚碳酸脂板(透光性好,耐压 10 MPa 以上),以达到狭缝整体可视化的要求。铝板、垫片和聚碳酸酯板的表面都很光滑,经过精加工后考虑到安装误差,狭缝的高度和宽度误差均约为 ±0.02 mm。实验测试气体为乙烯和氧气的预混气体,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。实验中同时对 3 个狭缝进行充气,从而保证三者的初始状态相同,混气初始压力 $p_0=5.0\sim50.0$ kPa。狭缝刚性端设置充气-点火组件,出口端用厚约 0.1 mm 的铝膜片密封。

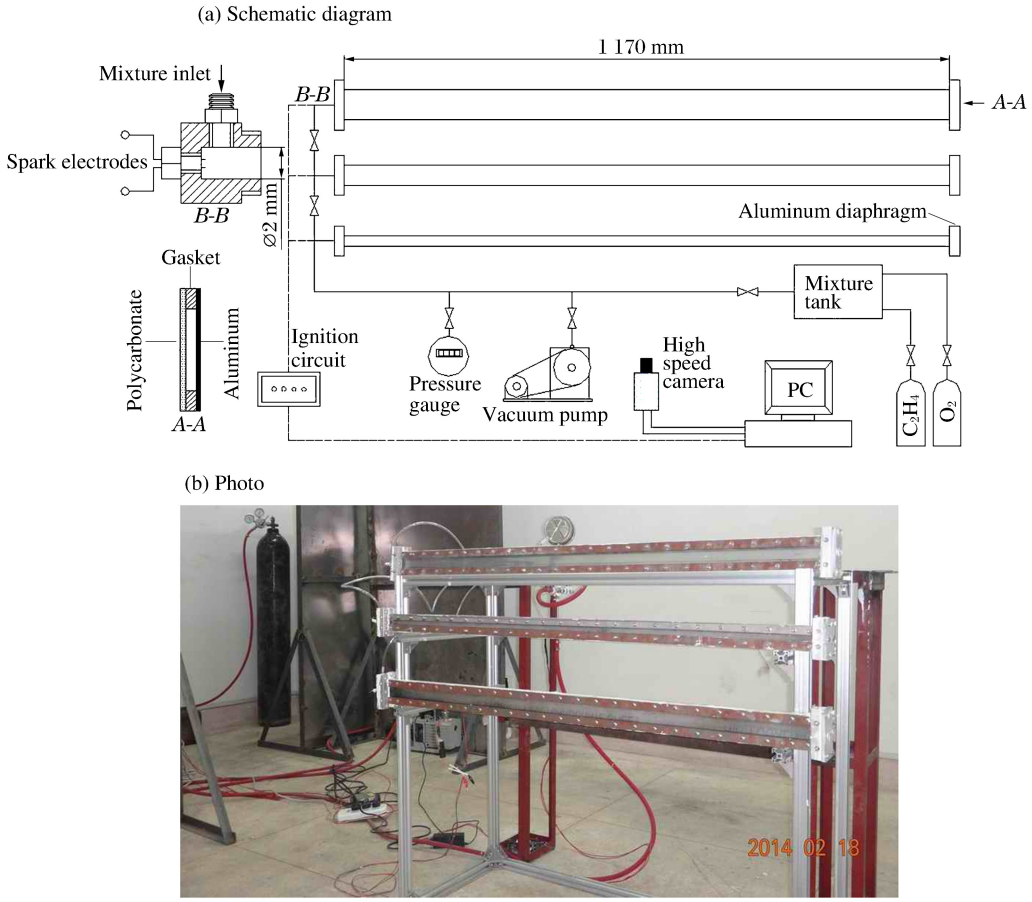

图 1 实验系统示意图及实物图

Fig. 1 Schematic diagram and photo of experimental system

初始参数的微小变化会导致爆轰特性产生很大的变化。本文实验的特点:(1)初始压力较低;(2)狭缝体积较小。这 2 个特点决定本实验系统必须具备良好的气密性。气密性调试过程中发现狭缝壁面不宜设置进气口,因此将点火和充气设置为如图 1(a)中 *B-B* 所示的充气-点火组件,由点火探针和进气嘴组成,自制的点火器电压值为 5 kV,空腔出口和狭缝入口相接,实验中圆形空腔内混气形成热射流,从

而引燃狭缝内的混气。实验中为尽可能减小射流火焰对狭缝内火焰初始速度的影响，空腔直径设为 2 mm，长度为 5 mm。这是基于 M. H. Wu 等[10]的实验进行设计的，M. H. Wu 等[10]利用电压为 3 kV 的点火器对内径为 2 mm 圆形玻璃管内常压下化学当量比的乙烯/纯氧混气进行触发，实验结果表明 DDT 距离约为 150 mm。而本文的乙烯/纯氧混气最高初始压力仅为 50.0 kPa，因此在点火空腔内产生长度为 5 mm 的热射流仍为缓燃火焰，这类似于柱状弱点火源。虽然空腔直径略大于狭缝高度，射流火焰向狭缝内传播时会遇到截面积变小，同时混气初压改变使射流火焰的速度发生变化，但本实验的柱状弱点火源火焰传播速度小，能量低，对狭缝内火焰初始速度的影响可以忽略。下一步的实验中拟将点火针直接放置在狭缝入口，以进一步减小实验误差。

光学测量系统由 OLYMPUS i-SPEED 高速摄相机和其他辅助设备组成，如图 1 所示将 3 个狭缝依次叠放，实验中通过调整高速摄影仪镜头和狭缝之间的距离，可实现对 3 个不同宽度的狭缝进行整体拍摄，拍摄速度为 7.5 万帧/秒。高速摄影仪的触发信号与点火信号同步，即按下点火按钮的同时高速摄影仪记录数据，实验中对 3 个狭缝同时进行点火和拍摄，可一次获得 3 个狭缝整体长度范围内的火焰发展过程。本文中在处理高速摄影图片时，利用软件分别截取并整合为不同宽度的高速摄影图，长度方向只截取火焰显示区域的长度，即 1 170 mm，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。

2　实验结果分析

2.1　爆轰起爆距离和混气可爆范围的确定

本实验中爆轰起爆距离 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。从实验结果来看，这 2 个距离符合良好。图 2 为 $p_0=25$ kPa，$W=10$ mm 时狭缝的高速摄影图片及过爆区域胞格图，则该状态下 $L_{DID}=92\sim102$ mm，其中高速摄影和烟迹图下的标尺 0 位置表示狭缝内火焰的初始发展位置。由于起爆距离大部分位于 100 mm 内，为更清晰地反映起爆距离变化的定性规律，对起爆距离取平均值，如图 2 中起爆距离取平均值为 97 mm。

从高速摄影图片和烟迹图分别得到火焰传播速度和爆轰波阵面三波点的运行轨迹，综合判断不同初始条件下混气的可爆范围，如图 3 所示。图 3 中曲线 1 左侧为无爆区，曲线 2 右侧为稳定爆轰区，中间部分为不稳定爆轰区。从图 3 可以看出，随着狭缝宽度的增大，稳定爆轰所对应的初始压力越高，不稳定爆轰区明显变窄。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火焰加速的具体位置，因此本文中主要讨论稳定爆轰区起爆距离的变化规律。

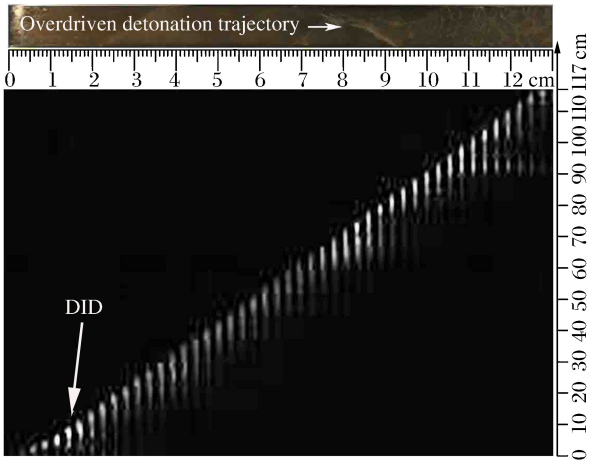

图 2　爆轰起爆距离

Fig. 2　Initiation distance of detonation wave

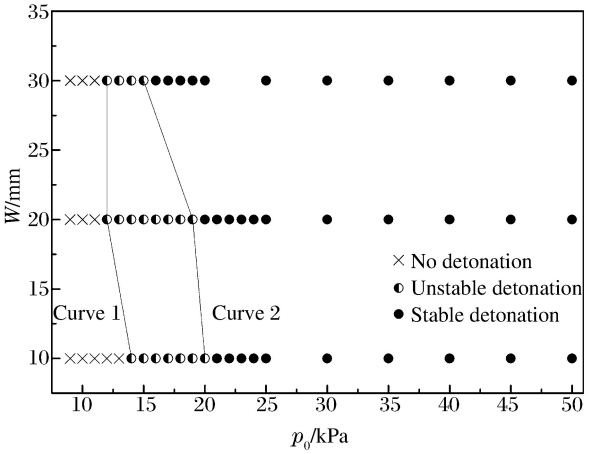

图 3　可爆范围的确定

Fig. 3　Determination of detonable range

2.2 不同初始压力下狭缝宽度对起爆距离的影响

点火后,狭缝内火焰的传播受几个因素的影响:(1)宽约 2 mm 的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,使更多的混气进入火焰面,从而提高燃烧速率。这些因素之间的相互作用,呈现的正反馈机理[18]使火焰燃烧速率急剧上升。(2)火焰压缩前沿气体流动并诱发边界层,边界层的发展对火焰传播的影响有 2 个方面。一方面使得主流区通道变窄,流量降低,此时边界层的负位移效应[6]使火焰速度衰减。另一方面,边界层内气流速度与主流速度之间存在差异,导致狭缝壁面处火焰面发生弯曲,边界层内的燃烧产物向火焰面正后方膨胀,这种效应类似于活塞推动火焰加速[19]。

2.2.1 21.0～30.0 kPa 的初始压力下狭缝宽度对起爆距离的影响

图 4 为 p_0=21.0～30.0 kPa 时起爆距离随狭缝宽度的变化规律。从图 4 可知:在某一固定初始压力下,起爆距离随着狭缝宽度的增大而缩短,且随着压力的升高,曲线的斜率逐渐降低。另外当 W=10,20 mm时,随着初始压力的升高,起爆距离逐渐缩短。相反,当 W=30 mm 时,随着初始压力的升高,起爆距离先缩短后增大。表明狭缝 DDT 过程也具有随机性,但总体上具有一定规律性。

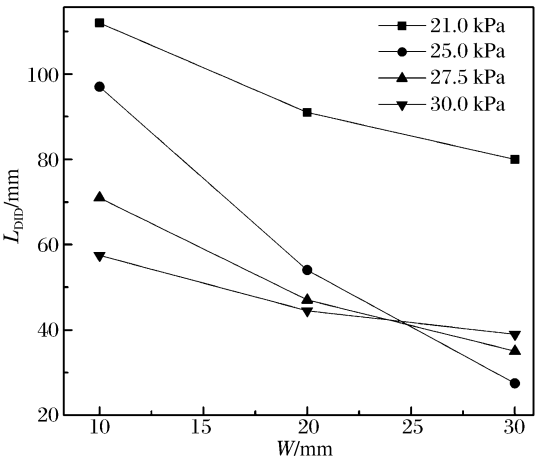

图 4 狭缝宽度对起爆距离的影响

Fig. 4 Initiation distance varying with gap width

以图 4 中 p_0=25.0 kPa 对应的曲线为例,图 5 给出了该曲线对应的火焰速度、起爆阶段胞格及高速摄影图。由图 5(a)可知,3 种宽度的狭缝内火焰初始速度均约 300 m/s,明显高于乙烯/纯氧混气的湍流火焰速度 10～50 m/s[10]。3 种宽度的狭缝内火焰速度上升都很快,但湍流火焰面的形状和发展呈现不同的变化模式,导致起爆距离产生差异。尤其 W=30 mm 时,仅传播约 30 mm,火焰速度从 340 m/s 上升到 2 760 m/s,明显高于 C-J 速度 2 326 m/s,产生过爆。原因是:(1)湍流火焰前沿混气更多,各类正反馈相互作用时间长、强度大,利于火焰加速;(2)狭缝面容比 $r_{sv}=2(W+H)/(WH)$,W=30 mm 时面容比最小,热损失最少,利于火焰加速;(3)加速的火焰使边界层变薄,负位移效应减弱,与主通道的正反馈作用相比,活塞效应影响较小,导致最短的距离内火焰速度上升最快。当侧壁面上的亮带和狭缝中间的圆弧型火焰面联成一体,表明侧壁面附近的混气达到自燃点后有可能出现爆轰中心[18]。两侧壁面的爆轰中心同时向狭缝中间扩散,与传播中的火焰面相遇后,能量急剧增加,从而形成圆弧型过驱爆轰波,如图 5(b)的胞格 1 所示,距狭缝入口 23～32 mm 处出现圆弧型过驱爆轰波轨迹线,对应在图 5(c)的高速摄影图 1 中相同的位置处具有圆弧型火焰面,且过爆直接出现在火焰传播过程中。当狭缝宽度降低到 20 mm时,正反馈相互作用的强度减弱,同时火焰散热损失增大,负位移效应增强,火焰速度升高相对缓慢,起爆距离增大,如图 5(c)的高速摄影图 2 所示,在宽度方向狭缝壁面上出现亮斑,但亮度弱于狭缝中间的火焰,表明狭缝壁面上的火焰带强度较弱,不足以形成爆轰中心。随着火焰的传播,如图 5(b)的胞格 2 所示,宽度方向狭缝壁面上火焰带发出的压缩波在横向传播和反射后留下激波运动轨迹线,反射激波扰动火焰面形成图 5(c)的高速摄影图 2 所示的椭圆圈中弧形凹陷火焰面,提高了火焰的燃烧速率,反过来火焰增强激波的能量。随着反射激波累积强度的增强,距狭缝入口 43～65 mm 处出现弧形激波轨迹线和如图 5(c)的高速摄影图 2 所示的弧形的火焰面。当弧形激波轨迹前出现细密胞格,表明出现过驱爆轰,此时过驱爆轰波速度为 2 650 m/s。当狭缝宽度进一步减小到 10 mm 时,如图 5(c)的高速摄影图 3 所示,狭缝壁面上没有出现亮点,火焰燃烧的亮斑一直处于狭缝中间。当亮斑变为白炽色时,表明出现过爆,如图 5(b)的胞格 3 所示,距狭缝入口 92～102 mm 处出现似“火焰刷”状的过爆激波轨迹线。3 种宽度的狭缝内形成过爆后都衰减为稳定爆轰,速度稳定在约 2 000 m/s。

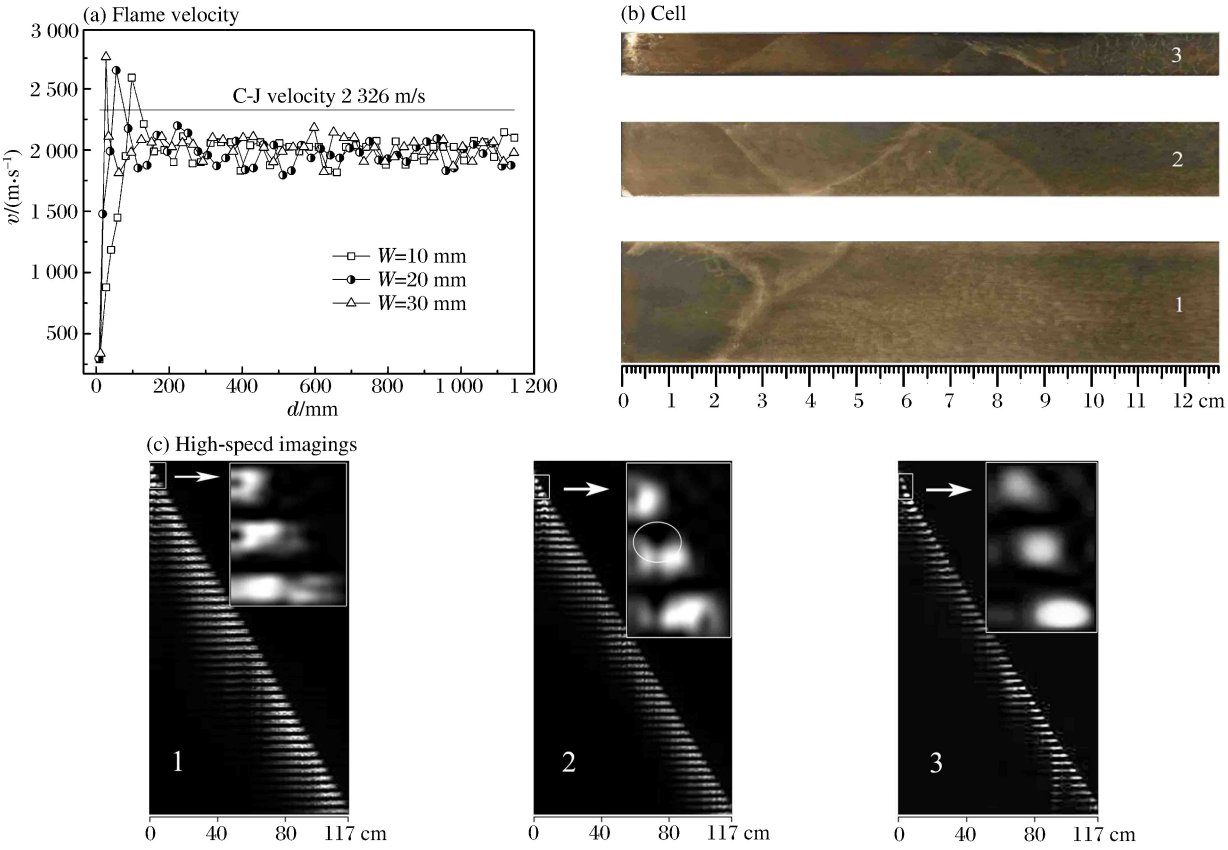

图 5　p_0＝25.0 kPa 时火焰速度、胞格及高速摄影图

Fig. 5　Flame velocity, cell and high-speed imagings at p_0＝25.0 kPa

值得注意的是，上述起爆距离的变化规律与大尺度管道内的 DDT[1-2] 过程以及 M. H. Wu 等[10] 得到的常压下毫米圆管内爆轰触发距离的变化规律均相反。初始压力为相对较低的 21.0～30.0 kPa 时，火焰燃烧的膨胀率较小，导致热量释放率较低，对火焰前沿未燃混气的压缩强度降低，正反馈机理作用减弱，而边界层负位移效应的影响变得较显著。结果表明，如果管道形状和预混气初始压力不同，毫米狭缝和毫米圆管内的火焰发展变化规律差异较大。

2.2.2　35.0～50.0 kPa 的初始压力下狭缝宽度对起爆距离的影响

初始压力升高到 35.0～50.0 kPa 后，如图 6 所示，起爆距离进一步缩短，大部分位于 60 mm 内，同时起爆距离随狭缝宽度的变化规律产生差异。对比图 6 与 4 可知：起爆距离随狭缝宽度的增大，先缩短后增大，呈“V”形变化，这种趋势一直持续到初始压力为 42.5 kPa。只是随着初始压力的升高，起爆距离随狭缝宽度的增大先缩短后增大的趋势越来越不明显，即对应的曲线越来越平缓，初始压力升高到 45.0 kPa 后，起爆距离随狭缝宽度的增大基本保持不变。

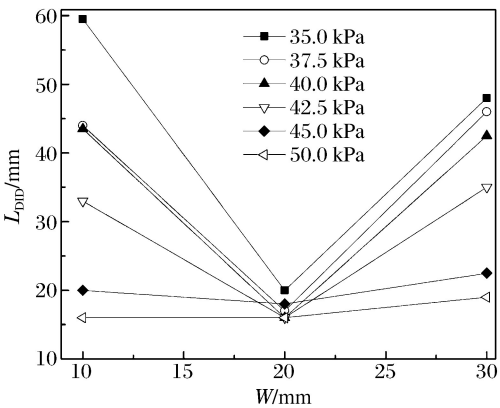

图 6　狭缝宽度对起爆距离的影响

Fig. 6　Initiation distance varying with gap width

以图 6 中 p_0＝35.0 kPa 对应的曲线为例进行分析。图 7 给出了该曲线对应的火焰速度、起爆阶段胞格及高速摄影图。从图 7(a)可知，狭缝内火焰初始速度都明显增高，其中 W＝30 mm 时火焰速度约为1 200 m/s，W＝10，20 mm 时火焰速度为 1 800～2 000 m/s。对比图 7(c)和图 5(c)可知，初始压力升高后，3 种宽度的

狭缝内火焰的亮度都明显增强，火焰初始速度及发展方式的改变导致触发距离的变化。对比图 7(b)的胞格 1、图 7(c)的高速摄影图 1 和图 5(b)的胞格 1、图 5(c)的高速摄影图可知，狭缝宽度为 30 mm 时，2 种初始压力下起爆方式基本相同，差别在于起爆的强度和距离不同，初始压力越高，起爆强度越大而边界层负位移效应越弱，导致起爆距离缩短。图 7(c)的高速摄影图 1 中火焰仍然是先在狭缝侧面形成 2 条亮带，表明侧面形成爆轰中心[18]。爆轰中心与狭缝中间的火焰面相遇后形成过驱爆轰，对应在图 7(b)的胞格 1 中的圆弧型和爆轰中心扩散形成的激波轨迹线。当 $W=20$ mm 时，起爆方式发生改变，并没有出现如图 5(b)的胞格 2 所示的激波反射线。初始压力升高后，火焰没有在狭缝宽度方向的壁面上形成爆轰中心，而过驱爆轰直接发生在火焰面推进过程中，反映在图 7(b)的胞格 2 中的圆弧形过驱爆轰轨迹线。射流火焰进入狭缝后，随着边界层的发展，火焰加速过程虽受正反馈机理、活塞效应和壁面边界层负位移效应的综合影响，但相对于 $W=30$ mm 的狭缝，$W=20$ mm 的狭缝内火焰锋面的压缩波在传播和反射过程中历时较短，正反馈相互作用强度增强，正反馈机理起主导作用，此时处于发展过程的边界层负位移效应和活塞效应影响不大。相对于 $W=10$ mm 的狭缝，$W=20$ mm 的狭缝内混气量多，燃烧释放率高。当狭缝宽度进一步降低到 10 mm 后，起爆方式和初始压力为25.0 kPa时的基本相同，差别在于起爆距离变短。最后，3 种狭缝宽度下，过驱爆轰波衰减为稳定爆轰波后，狭缝内火焰速度稳定在约 2 200 m/s，而初始压力为 25.0 kPa 时，火焰平均速度约 2 000 m/s。这也表明初始压力升高后，燃烧释放的热量增加，火焰平均传播速度加快。

当压力进一步升高到 45.0～50.0 kPa 后，起爆距离随狭缝宽度的增大而基本保持不变，这主要是压力升高后火焰加速的正反馈机理起主导作用，边界层厚度减小使边界层的影响越来越小。综上所述，起爆距离随初始压力的变化较明显，随着压力的升高，不同宽度的狭缝内起爆距离都明显缩短。且不同宽度的狭缝之间起爆距离差距会愈来愈小，对应曲线会愈平缓，最终成为平行于横坐标的直线。

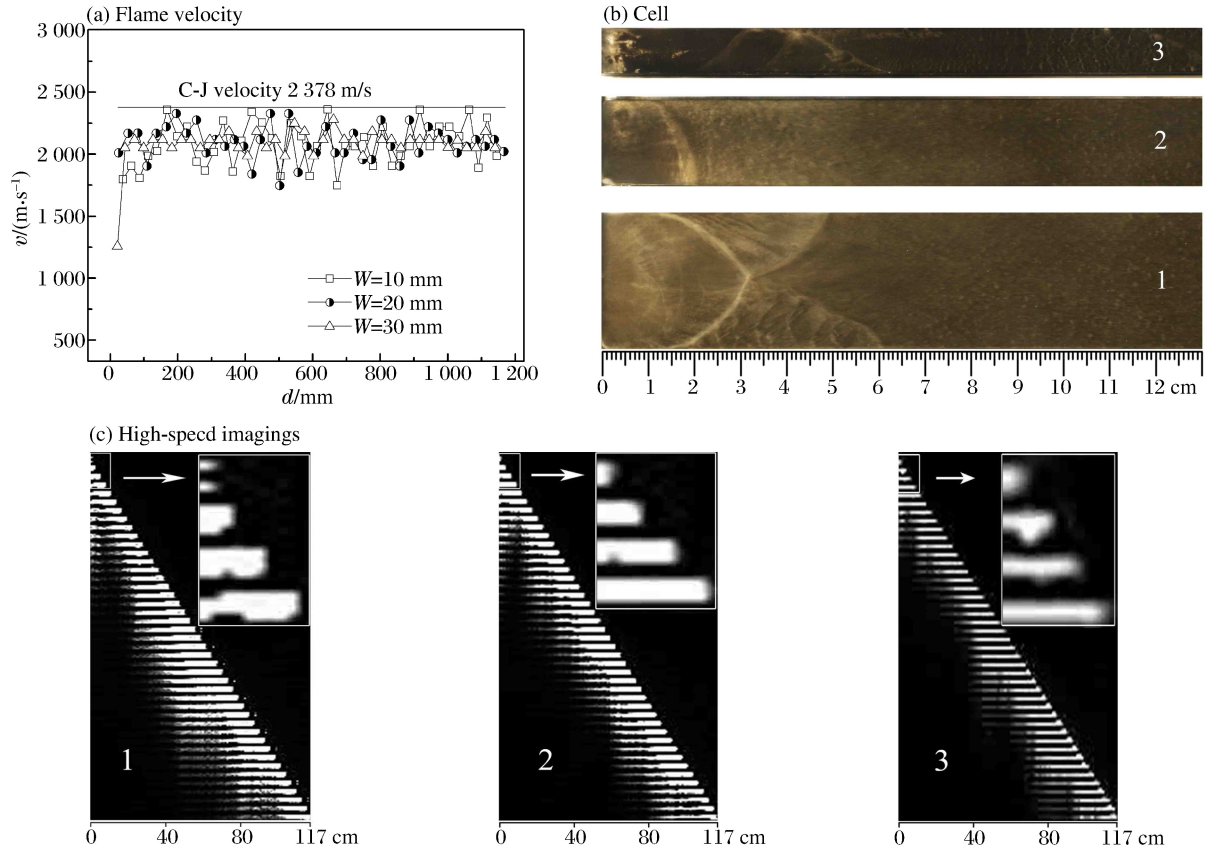

图 7 $p_0=35.0$ kPa 时火焰速度、胞格及高速摄影图

Fig. 7 Flame velocity, cell and high-speed imagings at $p_0=35.0$ kPa

2.2.3 起爆距离随初始压力的变化规律

从以上分析可知，起爆距离与初始压力和狭缝宽度等参数密切相关，表现在不同初始压力时，狭缝宽度变化对起爆距离的影响呈现出不同的变化趋势。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一化，其中横坐标为环境压力 p_{atm} 与初始压力 p_0 的比值，竖坐标为起爆距离 L_{DID} 与狭缝横截面当量直径 d_e 之比。由图 8 可知，当初始压力和宽度改变时，点火空腔的柱状弱点火源在进入空腔后扩散和膨胀后，由于正反馈机理、活塞效应及边界层负位移效应之间的影响程度发生改变，导致起爆距离变化差异较大，表现为不同初压和宽度狭缝内 L_{DID}/d_e 随 p_{atm}/p_0 分别呈不同的曲线变化方式。K. Nagai 等[12]拟合出起爆距离随初始压力变化的量纲一线性变化经验公式为：$L_{DID}/d_e=\alpha p_{atm}/p_0$，且 $\alpha\approx 30\sim 70$。对于化学当量比的 H_2/O_2 混气，当高度 $H=1.0,2.0,5.0$ mm 时，α 分别为 50、40、40。但本文的实验结果表明不同宽度狭缝内起爆距离随初始压力呈非线性变化趋势，且变化规律无法拟合成统一的公式。

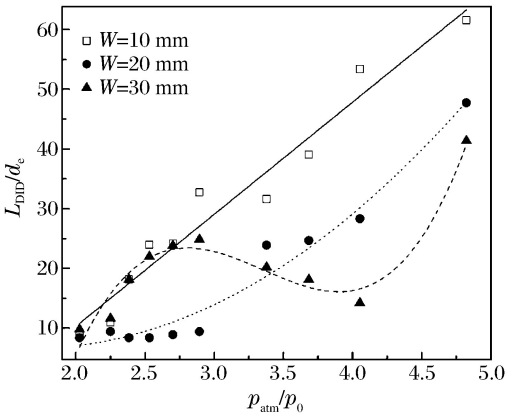

图 8 起爆距离随初始压力的变化

Fig. 8 Initiation distance varying with initial pressure

3 结　论

(1)在较低的初始压力 $p_0=21.0\sim 30.0$ kPa 时，由于火焰燃烧速率低，边界层负位移效应影响明显，火焰传播以及和压力波相互作用时具有小尺度通道内火焰加速及 DDT 特征，爆轰起爆距离随着狭缝宽度的增大而缩短。(2)当初始压力升高后，边界层的影响减弱，正反馈机理起主导作用。在 $p_0=35.0\sim 42.5$ kPa 时，起爆距离随着狭缝宽度的增大先缩短后变长，且随着压力的升高，这种变化趋势逐渐减弱，当初始压力升高至 45.0 kPa 后，起爆距离随狭缝宽度的增大而基本保持不变。在本实验条件下，宽度为 20 mm 的狭缝内起爆距离最短。(3)在本实验条件下，不同宽度的狭缝内起爆距离随初始压力的变化曲线差异较大。

参考文献：

[1] 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.

[2] Blanchard R, Arndt D, Grätz R, 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.

[3] Wu M H, Burke M P, Son S F, et al. Flame acceleration and the transition to detonation of stoichiometric ethylene/oxygen in microscale tubes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007,31(2):2429-2436.

[4] Chao J, Ng H D, Lee J H S. Detonability limits in thin annular channels[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2009,32(2):2349-2354.

[5] Camargo A, Hg H D, Chao J, et al. Propagation of near-limit gaseous detonations in small diameter tubes[J]. Shock Waves, 2010,20(6):499-508.

[6] Fay J A. Two-dimensional gaseous detonations: Velocity deficit[J]. Physics of Fluids, 1959,2(3):283-290.

[7] Kitano S, Fukao M, Susa A, et al. Spinning detonation and velocity deficit in small diameter tubes[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2009,32(2):2355-2362.

[8] Ishii K, Itoh K, Tsuboi T. A study on velocity deficits of detonation waves in narrow gaps[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2002,29(2):2789-2794.

[9] Gao Y, Lee J H S, Ng H D. Velocity fluctuation near the detonation limits[J]. Combustion and Flame, 2014,161(11):2982-2990.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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. Berlin: Springer, 2009(1):203-208.

[13] 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.

[14] Akkerman V, Law C K, Bychkov V. Analysis of flame acceleration induced by wall friction in open tubes[J]. Physics of Fluids, 2010,22(5):053606-1-053606-14.

[15] Kagan L, Sivashinsky G. On the transition from deflagration to detonation in narrow tubes[J]. Flow Turbulence Combustion, 2010,84(3):423-437.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] Ott J D, Oran E S, Anderson J D. A mechanism for flame acceleration in narrow tubes[J]. AIAA Journal, 2003, 41(7):1391-1396.

Effects of initial pressure and gap width on detonation initiation distance in a narrow gap with millimeter-scale width

Zhang Penggang, Zhu Yuejin, Pan Zhenhua, Wang Qian

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

Abstract: The detonation initiation distance for stoichiometric C_2H_4/O_2 mixture gas in a narrow gap was experimentally studied at the initial pressure of 5.0—50.0 kPa. The channels were formed by the 10, 20, 30 mm×1.0 mm cross-sections and 1 220 mm long, respectively. the initiation positions were determined by the soot records and the high-speed digital imagings. The influence of initial pressure and gap width on detonation initiation distance was analyzed. The results indicate that: (1) initiation distance decreases with the increase of gap width at the initial pressure of 21.0—30.0 kPa; (2) with the increase of gap width, initiation distance initially decreases and then increases at the initial pressure of 35.0—42.5 kPa, and remains unchanged at the initial pressure of 45.0—50.0 kPa; (3) the non-dimensional change curves between detonation initiation distance and initial pressure are different corresponding to the three different gap widths.

Key words: mechanics of explosion; initiation distance; soot records; micro-detonation; micro-combustion; narrow gap

(责任编辑 张凌云)