DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0447-06

管道内全阻塞障碍物对气相爆轰波传播特性的影响*

喻健良,张 东,闫兴清
(大连理工大学化工机械与安全学院,辽宁 大连 116024)

摘要: 建立了长 2 800 mm、内径为 50 mm 的圆管内爆轰波传播实验装置,采用光电二极管探测火焰锋面以获得爆轰波的传播速度,采用烟迹法记录爆轰波的胞格结构。通过在管道不同位置设置阻塞率为 1 的聚丙烯薄膜,研究不同初始压力下不同氩气稀释浓度的 $C_2H_2+2.5O_2+n$Ar 预混气体爆轰波在通过全阻塞障碍物前后传播速度及胞格结构的变化。结果表明,气相爆轰波在达到稳态爆轰后,在通过全阻塞薄膜障碍物的过程中会产生 2 种不同的传播形式:速度亏损和爆轰失效。气相爆轰波穿过不同区域的传播过程可以分为 3 个阶段:稳态传播阶段、速度亏损阶段或爆轰失效阶段、过驱爆轰阶段。

关键词: 爆轰波;全阻塞障碍物;速度亏损;爆轰失效
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

可燃气体爆炸一旦由爆燃转变为爆轰,爆轰波将以数千米每秒的速度传播,对生产安全带来严重威胁。宏观边界条件是影响气相爆轰波传播特性的一个重要因素,深入研究边界条件对爆轰波传播特性的影响规律,是工作环境危险评价、事故预防与控制、事故灾害演化的重要课题。

针对不同边界对爆轰波传播特性的影响目前已经开展了一些工作。J. A. Fay[1]较早对边界层影响爆轰传播进行了准确描述;J. H. S. Lee[2]开展了大量气相爆轰实验研究,涵盖了不同边界条件对气相爆轰波在管道内传播特性的探讨。近年来,相关实验研究逐渐分化为大尺度和微尺度两个方面。S. Dorofeev 等[3]实验研究了大规模受限空间内气相爆轰问题;R. K. Zipf 等[4]、E. S. Oran 等[5]测量了安装有障碍物的巨型爆轰管道中 CH_4/air 的爆轰参数,并开展了障碍物作用下天然气与空气混合物的爆燃转爆轰(deflagration-to-detonation transition,DDT)实验。虽然大尺度实验参数更接近于工程领域,对实际应用具有很强的借鉴意义,但是较耗时、耗力、耗资。针对这种情况,研究人员利用微米级狭缝作为边界条件,将爆轰问题的研究深入至火焰特征尺寸这一微小尺度。Wu Minghsun 等[6]证实,在狭窄平板狭缝中火焰依然可以加速并完成 DDT 过程。在微米级流道中,流体运动速度在相当大范围内都将呈现强制层流,故此种尺度上的实验研究对探索爆轰机理意义重大。

然而,现有爆轰波传播过程中边界条件影响的研究集中在阻塞率(r_b)小于 1 的情况[7-10],爆轰波绕过障碍物或通过粗糙壁面的机理研究也集中在绕射与反射问题上[11]。但是,由于爆轰产生的超压极高,爆轰波很有可能摧毁障碍物后再次引燃障碍物后的可燃气体继续传播。此特殊条件下爆轰波通过全阻塞障碍物前后的传播特性还属未知。另外,非稳态气体的气相爆轰波波头结构并不规则,但在加入高浓度惰性气体后,未燃气体性质与 Zel'dovich-von Neumann-Döring(ZND)模型条件十分接近,爆轰波将出现规整的波头结构。

基于此,本文中,以不同氩气稀释浓度的 $C_2H_2+2.5O_2+n$Ar 预混气体作为研究对象,通过建立圆形管道内爆轰波传播实验装置,研究在不同初始压力下稳态爆轰波通过薄膜障碍物前后传播速度及胞格结构的变化。

* **收稿日期**: 2015-09-17; **修回日期**: 2015-12-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(51574056)
第一作者: 喻健良(1963—),男,博士,教授,博士生导师, yujianliang@dlut.edu.cn。

1 实验装置

1.1 装置结构

实验装置流程如图 1 所示，由爆轰管道、充排气系统、控制与采集系统 3 部分组成。爆轰管道为内径 50 mm、壁厚 3.5 mm、总长 2 800 mm 的 B 系列无缝钢管，由一段驱动段(长 1 300 mm)和两段测试段(分别长 900、600 mm)组成，管段之间通过法兰 A、B 连接。驱动段起始端采用点火能量约为 200 J 的电点火头点火，并设置长 600 mm、螺距 50 mm 的 Shchelkin 螺旋管(阻塞率 0.43)以使点火后火焰加速，使爆燃迅速转变为爆轰。

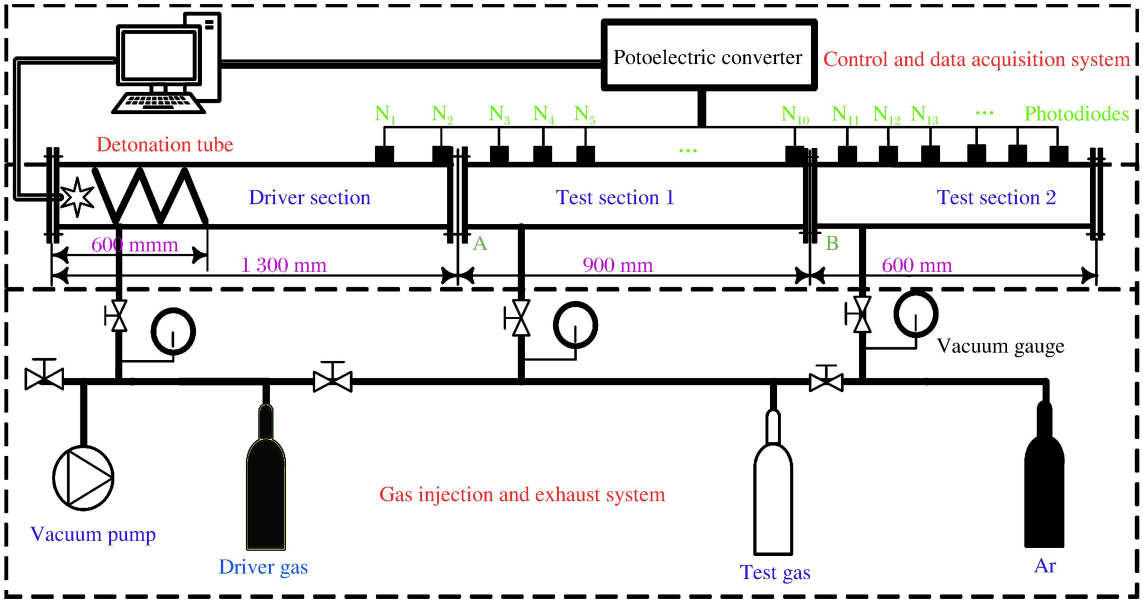

图 1 全阻塞障碍物气相爆轰实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for gaseous detonation with blocking obstacles

采用双层聚丙烯薄膜(静态破裂压力约为 33 kPa)作为全阻塞障碍物，布置于驱动段与测试段法兰 A 或两测试段法兰 B 处。需要说明的是，当在法兰 B 处安装障碍物时，为了区分驱动段与测试段，在 A 处同时安装单层薄膜，即管道被薄膜分为驱动段、测试段 1、测试段 2 等 3 个区域。

驱动段内始终采用 $C_2H_2+2.5O_2$ 预混气体作为驱动气，采用不同氩气稀释浓度的 $C_2H_2+2.5O_2+n$Ar 预混气体作为测试气体。需要说明的是，当 A 处安装障碍物时，薄膜前的驱动气体一直为驱动气不能变换。B 处安装障碍物时，驱动段内气体依然不变，但测试段 1 与测试段 2 内气体的氩气稀释浓度可变化。采用分压法配置预混气体，并充入驱动气罐和预混气罐内。实验开始前，对管路抽真空至 0.5 kPa(绝对压力)，然后向驱动段及测试段充入驱动气及预混气。每次实验结束后用氩气吹扫管道。

1.2 测试及采集方法

预混气体发生爆轰时，理论上爆轰波传播速度与化学反应区(火焰锋面)传播速度数值相等。因此，通过测量火焰锋面，即可获得爆轰波传播速度。火焰锋面的测量通过光敏二极管实现。在管道壁面距点火端 1 200 mm 至管道末端以 100 mm 间距(N_1～N_3 间距为 150 mm)布置光电二极管 N_1～N_{16}，见图 1。当爆轰波通过光电二级管时，紧随爆轰波的火焰锋面向外辐射可见光激发光电二极管，采集系统会采集到电压上升信号。通过获得相邻测点的时间，即可计算相邻测点中间位置平均化学反应区速度。

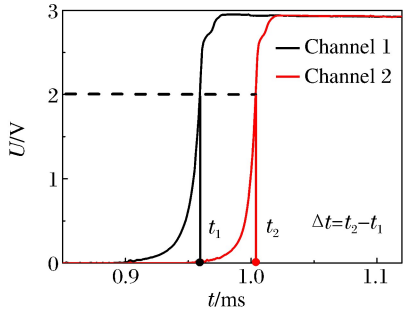

图 2 光电二极管电压上升曲线

Fig. 2 Voltage rise curves of photodiodes

实验时发现，如图 2 所示，由于火焰光的辐射，光电二极管会在火焰锋面到达该测点位置前产生微弱电压信号。随着火焰锋面的靠近，电压信号逐渐增强。因此，若采用较低电压值作为火焰锋面到达该测点的判定依据偏差较大。并且当电压信号超过 2 500 mV 时，电压信号响应逐渐迟缓。综合考虑上述因素，采用 $U=2\ 000$ mV 作为火焰锋面到达该测点的时间判据，如图 2 所示。获得火焰锋面到达相邻两侧点的时间差后，即可依据测点间距计算出爆轰波传播速度。为保证实验重复性，每组实验均重复 3 次以上。使用计算机控制点火与数据采集过程，利用 16 通道高频数据采集装置采集光电二级管的电压信号，单通道采样频率为 500 kS/s。

利用烟迹法记录爆轰波胞格结构。在管道内安装烟熏过的耐高温聚丙烯薄膜可以获得爆轰波胞格结构，见图 3（$p_0=8$ kPa，$C_2H_2+2.5O_2+80\%Ar$）。通过胞格结构，可进一步分析爆轰波 ZND 结构、胞格尺寸 λ、爆轰失效判据等问题。当爆轰失效时，烟熏薄膜上无明显胞格，仅出现横纹痕迹，见图 4。

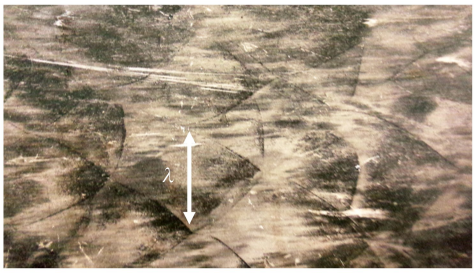

图 3 高氩气稀释浓度下稳态气体爆轰波胞格

Fig. 3 Cellular structures of stable mixtures with high argon concentration



图 4 爆轰失效条件下的烟熏薄膜

Fig. 4 Smoke film under detonation failure

2 结果分析及讨论

2.1 管道内驱动段爆轰波自持传播

管道内薄膜障碍物前预混气体实现稳定自持爆轰是本实验的基础条件。稳定自持爆轰的形成可以通过障碍物前各测点爆轰波平均速度与 C-J（Chapman-Jouguet）理论爆轰速度对比判断。当薄膜障碍物布置在 A 位置时，选取测点为 N_1、N_2；当薄膜障碍物布置在 B 位置时，选择测点为 $N_7\sim N_{10}$。表 1 为在管道内不同位置（A 或 B）布置障碍物时，不同初始压力 p_0、薄膜后不同氩气稀释浓度下障碍物前各测点爆轰波平均传播速度 v 与理论爆轰 C-J 速度 v_{CJ} 对比。

表 1 薄膜前爆轰波传播速度实验值与理论值对比

Table 1 Comparison between experimental and theoretical values of detonation velocity before films

p_0/kPa	薄膜位置	膜前气体	膜前测点	膜后气体	v/(m·s^{-1})	v_{CJ}/(m·s^{-1})	v/v_{CJ}
30	A	$C_2H_2+2.5O_2$	N_1，N_2	$C_2H_2+2.5O_2$	2 370	2 359	1.00
	B	$C_2H_2+2.5O_2$	$N_7\sim N_{10}$	$C_2H_2+2.5O_2+40\%Ar$	2 053	2 118	0.97
	B	$C_2H_2+2.5O_2$	$N_7\sim N_{10}$	$C_2H_2+2.5O_2+80\%Ar$	1 831	1 873	0.98
40	A	$C_2H_2+2.5O_2$	N_1，N_2	$C_2H_2+2.5O_2$	2 360	2 374	0.99
	B	$C_2H_2+2.5O_2$	$N_7\sim N_{10}$	$C_2H_2+2.5O_2+40\%Ar$	2 035	2 052	0.99
	B	$C_2H_2+2.5O_2$	$N_7\sim N_{10}$	$C_2H_2+2.5O_2+80\%Ar$	1 648	1 684	0.98
50	A	$C_2H_2+2.5O_2$	N_1，N_2	$C_2H_2+2.5O_2$	2 381	2 387	1.00
	B	$C_2H_2+2.5O_2$	$N_7\sim N_{10}$	$C_2H_2+2.5O_2+40\%Ar$	2 045	2 063	0.99
	B	$C_2H_2+2.5O_2$	$N_7\sim N_{10}$	$C_2H_2+2.5O_2+80\%Ar$	1 668	1 692	0.98

由表 1 可知，在不同实验参数下，无论障碍物布置在 A 或 B 处，薄膜前各测点爆轰波平均速度与 C-J 理论速度的比值在 0.97～1.00 之间。由于内径 50 mm 管道内爆轰临界压力 p_c 约为 3.0 kPa，这说明当初始压力（30～50 kPa）远高于临界压力时，爆轰波将以稳态形式传播，传播速度与 C-J 爆轰速度 v_{CJ} 基本相等。因此，本实验条件下气相爆轰波达到薄膜障碍物前为稳态传播状态。高远等[12]研究发现，即使在较低初始压力下，以快速波动式、结巴式传播的爆轰波与 v_{CJ} 的比值也在 0.80～1.00 之间。因此，绝大部分情况下管道内的一维气相爆轰速度可以利用 C-J 爆轰理论进行精准预测。

2.2 全阻塞障碍物对管道内稳态爆轰波的影响

当薄膜障碍物安装在法兰 A 处，薄膜前采用 $C_2H_2+2.5O_2$ 预混气体作为驱动气，薄膜后采用不同氩气稀释浓度的 $C_2H_2+2.5O_2+n$Ar 预混气体作为测试气体。图 5 为氩气稀释浓度为 30%下，初始压力为 50、10 kPa 时爆轰管道内不同位置爆轰波传播速度的变化。由图 5 可知，稳态自持爆轰波传播至 A 处障碍物时，传播速度急剧下降至最低值约 740 m/s，该速度显著低于当地声速，爆轰波解耦失效，随后重新加速再次达到 C-J 爆轰速度。当初始压力为 50 kPa 时，速度最低值 v_{min} 约为 1 850 m/s，爆轰波速度下降幅度不大。实验发现，连续降低初始压力或提高氩气稀释浓度，薄膜作用下爆轰波速度最小值 v_{min} 不断减小。当 v_{min} 达到某一临界值时，v_{min} 减小幅度出现显著的不连续。由此推断，当初始压力或氩气稀释浓度达到一定值时，爆轰波在薄膜后的传播形式发生了改变。

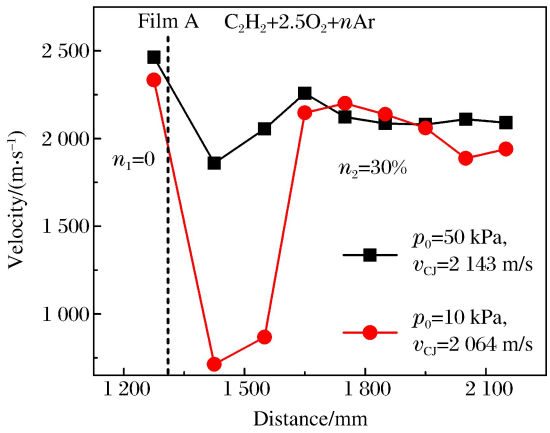

图 5 聚丙烯薄膜 A 后的爆轰波速度特性

Fig. 5 Velocity characteristics of detonation wave after polypropylene film A

在薄膜障碍物 A 后管道内壁布置烟膜，图 6、7 分别为氩气稀释浓度为 30%的条件下，初始压力为 50、10 kPa 时记录到的胞格结构。图 6 所示的胞格结构与爆轰波不稳定传播时完全不同，爆轰波胞格似乎向“气泡”转化。当爆轰波通过聚丙烯薄膜时，爆轰波的 ZND 结构遭受冲击，爆轰波胞格变得杂乱。烟膜未捕捉到爆轰失效证据，说明爆轰波以速度亏损形式传播。当初始压力为 10 kPa 时，见图 7，爆轰波穿过薄膜障碍物时，爆轰波胞格结构消失，爆轰波结构解耦并失效。在一段距离后，爆轰波再次形成。



图 6 速度亏损过程的烟熏薄膜痕迹

Fig. 6 Smoke film of velocity deficit

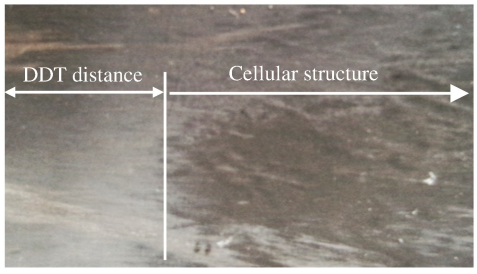

图 7 DDT 过程的烟熏薄膜

Fig. 7 Smoke film of deflagration-to-detonation transition

表 2 聚丙烯薄膜 B 后的测点 N_{10}、N_{11} 处的最小速度

Table 2 Minimum velocities of N_{10}, N_{11} after polypropylene film B

p_0/kPa	v_{min}/(m·s^{-1})				
	n(Ar)=10%	n(Ar)=20%	n(Ar)=30%	n(Ar)=40%	n(Ar)=50%
10	740	723	713	688	677
15	900	884	865	844	776
20	1 168	1 050	1 036	1 020	989
25	1 369	1 303	1 279	1 221	1 158
30	1 415	1 586	1 435	1 358	1 258
40	1 839	1 882	1 816	1 493	1 363
50	1 972	1 942	1 859	1 803	1 569

在两段测试段间法兰 B 处安装薄膜障碍物，在薄膜前后 $p_0=10\sim50$ kPa 条件下使用 $n=(0\sim50)$%氩气稀释浓度的预混气体开展实验，获得爆轰波通过障碍物后的最小速度 v_{min}，如表 2 所示。在速度最小测点附近安装烟熏薄膜并重复实验，利用获得的爆轰波胞格结构确定爆轰是否失效，并用红线

区分速度亏损与爆轰失效 2 种结果。由表 2 可知，在较高氩气稀释浓度或较低实验初始压力下，爆轰波通过薄膜障碍物后会失效。

因此，爆轰波通过全薄膜障碍物（$r_b=1$）的传播形式分为 2 种：(1)低初始压力或高氩气稀释浓度下，发生爆轰失效；(2)高初始压力或低氩气稀释浓度下，发生速度亏损。现有研究表明，爆轰波通过 $r_b<1$ 的障碍物的传播形式也分为 2 种：(1)速度下降导致爆轰失效；(2)障碍物或粗糙壁面为爆轰低速传播提供一种机制。对比 2 种结果可知，爆轰波穿过全阻塞障碍物后的传播形式与固定障碍物类似。

2.3　重新加速后的过驱爆轰阶段

爆轰波穿过障碍物后，原有的自持爆轰现象迅速衰减，传播速度下降，爆轰失效或者发生速度亏损后的低速爆轰波将在一段距离内重新达到自持爆轰，如图 5 所示。无论是经历 DDT 过程或者以速度亏损过程达成的自持爆轰都会形成一个短暂的过驱爆轰。但这 2 种情况下的传播机制并不相同。(1)对于 DDT 过程，引起过驱爆震现象相关机理基本上已经达成共识[2]：化学反应区内湍流程度显著增加，化学反应区的局部爆炸中心重新产生冲击波，通过由能量释放导致的激波放大机制，冲击波经过一个放大过程形成过驱爆震波。(2)对于速度亏损形式传播的爆轰波，其传播速度显著小于 v_{CJ}。全阻塞障碍物不能持续作用于低速爆轰，爆轰低速传播无法维持，其传播速度将在很短距离内再次达到 v_{CJ} 并形成短暂的过驱爆轰过程，如图 5 所示。

2.4　气相爆轰波在全阻塞管道内的传播过程

预混气体被点燃后，气相爆轰波在管道内全阻塞障碍物前后的传播可分为 3 个阶段，如图 8 所示。阶段 1：预混气体在驱动段迅速达到自持爆轰。爆轰波在管道内以 v_{CJ} 前进，此阶段为爆轰波的自持传播阶段。阶段 2：爆轰波在障碍物阻挡作用下速度迅速降低。根据速度降低后的行为，可分为 2 种情况：(1)爆轰波波头受到障碍物冲击但燃烧机制并未失效，爆轰以小于 v_{CJ} 的速度低速传播，为速度亏损阶段；(2)爆轰波受到冲击之后，爆轰波波头结构无法维持，爆轰波失效并将经历 DDT 过程，此阶段为爆轰失效阶段。阶段 3：无论爆轰波是否发生解耦，爆轰波在管道内再次形成稳态爆轰之前都会发生短暂的过驱爆轰，此阶段为过驱爆轰阶段。经过这 3 个阶段之后，爆轰波速度重新稳定在 v_{CJ} 附近。气相爆轰完成了从一个预混区域向另一个预混区域的传播。

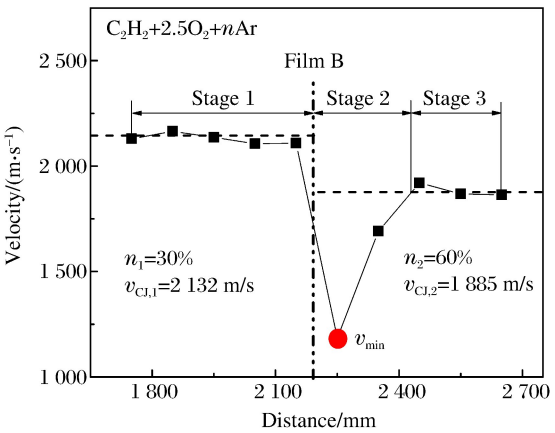

图 8　聚丙烯薄膜 B 前后的爆轰波速度特性

Fig. 8　Velocity characteristics of detonation wave near polypropylene film B

3　结　论

在圆形管道内开展了全阻塞障碍物对爆轰波传播影响的实验研究，相关结论如下：(1)在远离失效条件下，C-J 爆轰理论是计算爆轰波传播速度的理想方法；(2)爆轰波穿过全阻塞薄膜障碍物后的传播形式有爆轰失效、速度亏损 2 种，与爆轰波穿过固定障碍物传播特性类似；(3)管道内稳态气相爆轰波通过全阻塞障碍物过程可分为 3 个阶段，稳态传播阶段、速度亏损或爆轰失效阶段、过驱爆轰阶段。

若将管道的驱动段看作点火源，以速度亏损形式和爆轰失效形式形成的爆轰与爆轰起爆中的直接起爆过程和 DDT 过程非常类似。由此推断爆轰直接起爆过程中很可能存在着某些因素与爆轰波在速度亏损条件下传播相关。但是，爆轰波在此类速度亏损条件下传播的相关燃烧与传播机理问题并未解决[13]。相关问题的解决仍需研究不断深入。

参考文献：

[1]　Fay J A. Two-dimensional gaseous detonations: Velocity deficit[J]. Physics of Fluids, 1959, 2(3): 283-289.

[2] Lee J H S. The detonation phenomenon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

[3] Dorofeev S, Sidorov V, Dvoinishnikov A. Deflagration to detonation transition in large confined volume of lean hydrogen-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 1996,104(1):95-110.

[4] Zipf R K, Gamezo V N, Mohamed K M, et al. Deflagration-to-detonation transition in natural gas-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2014,161(8):2165-2176.

[5] Oran E S, Gamezo V N, Zipf R K. Large-scale experiments and absolute detonability of methane/air mixtures[J]. Combustion Science and Technology, 2015,187(1):324-341.

[6] Wu Minghsun, Kuo Weichun. Transition to detonation of an expanding flame ring in a sub-millimeter gap[J]. Combustion and Flame, 2012,159(3):1366-1368.

[7] Ciccarelli G. Explosion propagation in inert porous media[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012,370(1960):647-667.

[8] Tsuboi N, Asahara M, Eto K, et al. Numerical simulation of spinning detonation in square tube[J]. Shock Waves, 2008,18(4):329-344.

[9] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26(1):93-104.

[10] Sorin R, Zitoun R, Desbordes D. Optimization of the deflagration to detonation transition: Reduction of length and time of transition[J]. Shock Waves, 2006,15(2):137-145.

[11] 姜宗林,滕宏辉,刘云峰. 气相爆轰物理的若干研究进展[J]. 力学进展,2012,42(2):129-140.
Jiang Zonglin, Teng Honghui, Liu Yunfeng. Some research progress on gaseous detonation physics[J]. Advances in Mechanics, 2012,42(2):129-140.

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

[13] 朱雨建,杨基明,Lee J H S. 爆轰波透射孔栅形成的高速爆燃波的结构和行为[J]. 爆炸与冲击,2008,28(2):97-104.
Zhu Yujian, Yang Jiming, Lee J H S. Structure and behavior of the high-speed deflagration generated by a detonation wave passing through a perforated plate[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(2):97-104.

Influences of blocked obstacles on propagation of gaseous detonation in pipeline

Yu Jianliang, Zhang Dong, Yan Xingqing

(*School of Chemical Machinery and Security, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning, China*)

Abstract: An experimental circular pipeline with a length of 2 800 mm and a diameter of 50 mm was established to study the gaseous detonation propagation. Photodiode detectors were used to obtain the flame propagation velocity and the smoke film method to get the cellular structures. Polypropylene films with the blocking rate of 1.0 were set in the pipeline to investigate the characteristics of detonation velocity and cellular structures. Gaseous mixtures of $C_2H_2+2.5O_2$ diluted by argon in different volumes were used as experimental medium. The initial pressures varied in experiments. Results show that there are two different propagation forms after the detonation wave passes through the film obstacles, including velocity deficit and detonation failure. The propagation of gaseous detonation wave in blocked obstructions can be divided into three stages: stage of steady propagation, stage of velocity deficit or detonation failure and stage of overdriven detonation.

Keywords: detonation wave; blocking obstacles; velocity deficit; detonation failure

(责任编辑 张凌云)