DOI: 10.11883/bzycj-2017-0167
文章编号: 1001-1455(2018)06-1435-06

气相爆轰波近失效状态的传播模式*

颜秉健[1],张 博[1,2],高 远[3],吕树光[1]
(1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237;
2. 上海交通大学航空航天学院, 上海 200240;
3. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia University, United States)

摘要: 选用五种碳氢混合气体,采用高压电火花起爆的方法,利用光纤探针测量爆轰波在管道内的传播速度,研究临近失效状态时爆轰波在管道内的传播模式。实验是在自行研制的爆轰管道中进行的,其包括驱动段及内径分别为 1.5、3.2、12.7 mm 三种规格的测试段。实验结果再次验证了爆轰波在管道内传播时可以有六种不同的传播模式:稳态爆轰、快速波动爆轰、结巴式爆轰、驰振爆轰、低速爆轰和爆轰失效。其中 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$、$C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 两种组分混合气体(具有较低活化能),在爆轰波传播过程中只有稳态、快速波动和失效三种模式;而 $C_3H_8+5O_2$、$C_2H_2+5N_2O$ 和 CH_4+2O_2 三种组分混合气体(具有较高活化能)在传播过程中出现六种不同模式。上述结果表明,除气体组分、初始压力等因素外,混合气体的活化能可能对爆轰波在管道内的传播状态也有影响。

关键词: 爆轰波;传播模式;速度波动;活化能
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

爆轰波是一种以超音速传播并伴随有化学反应的冲击波。爆轰波通过其前导冲击波压缩可燃气体实现自燃点火,并借助燃烧释放的化学能实现自持传播[1]。先前的研究主要分析了不同可燃气体种类、燃料配比、初始压力对爆轰波传播规律的影响,并发现当远离爆轰极限时,爆轰波在管道内稳定传播;当临近爆轰极限时,爆轰波稳定性减弱,传播过程变得非常复杂,并伴随一系列非稳定现象[2-3]。Moen 等[4]、Lee 等[5]、Kitano 等[6]、Campbell 等[7-9]研究表明,在临近极限附近出现螺旋爆轰现象,Manson 等[10]对 C_3H_8-O_2 混合气体爆轰波的研究发现,某些条件下爆轰波速度将出现较大波动,并周期性地失效与再起爆,即驰振爆轰(galloping detonation)。Edwards 等[11]、Haloua 等[12]、Moen 等[13]在实验中证实了驰振爆轰的存在。除驰振爆轰之外,Manzhalei[14]采用微小管道研究时发现在一定压力下存在低速爆轰,并以约 $0.6v_{CJ}$ 的速度在管道内稳定传播。目前对于爆轰波的不稳定传播模式的产生机理尚不明确,需要通过开展进一步的研究进行深入分析。

本文中采用具有 5 种不同活化能的碳氢混合气体,利用光纤探针和烟迹法对爆轰波在管道内传播时的速度波动进行分析,进一步探究临近极限状况下爆轰波的复杂传播模式和气体活化能之间的关系。

1 实验装置

实验装置主要由爆轰管、点火系统、数据采集系统及充、配气系统构成,如图 1 所示。爆轰管道由驱动段和测试段组成。驱动段为长度 1300 mm、内径 65 mm 的钢管,在起爆端位置设置一长度为 200 mm的 Shchelkin 螺旋,以增加对爆炸波的扰动从而形成稳态爆轰。测试段为透明的聚碳酸酯管。测试段规格有 3 种:(1)内径 1.5 mm、长 2.438m;(2)内径 3.2 mm、长 2.438 m;(3)内径 12.7 mm、长 4.118 m。

* **收稿日期**: 2017-05-11; **修回日期**: 2017-08-31。 "第十一届全国爆炸力学学术会议"推荐论文。
基金项目: 国家自然科学基金项目(11772199,11402092);
北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(KFJJ17-15 M)
第一作者: 颜秉健(1994—),男,硕士研究生; **通信作者**: 张 博,zhangb@live.cn。

采用 PCB 压力传感器(型号:113B24,响应频率:500 kHz,量程:0～6.9 MPa,输出电压:0～5 V)测量驱动段内爆轰波到达时间,用以计算在驱动段内是否形成并达到稳态的爆轰波。采用光学探针测试系统[5]测量测试段内爆轰波到达各测点的时间,从而计算出爆轰波在相邻测点间的传播速度,图 2 为实验中所获得的典型光学探针输出信号。通过 CEA[15]程序计算预混气体在各初始条件下爆轰波的理论爆轰 CJ 速度。

采用分压法配置预混气体,并静置 24 h 使气体充分混合。实验前,首先用真空泵对管路抽真空至 0 Pa,充气时同时通过驱动段初始端阀 1 及测试段末端阀 9 的阀门向管路充入混合气体,并通过电子压力表控制进气量以达到预定的初始压力。采用高压电火花点火,点火能量约 32 J。选用五种不同组分的混合气体,分别为 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$(Ⅰ)、$C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$(Ⅱ)、$C_2H_2+5N_2O$(Ⅲ)、$C_3H_8+5O_2$(Ⅳ)、CH_4+2O_2(Ⅴ)。

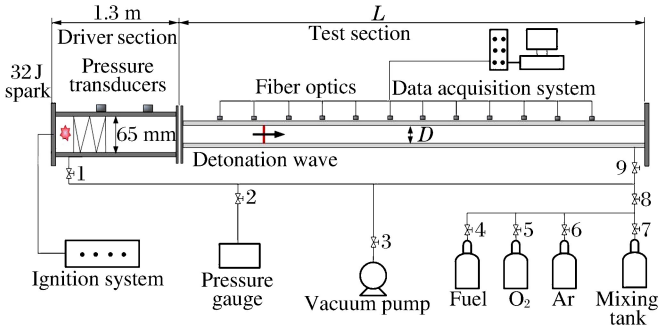


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 A schematic of experimental apparatus

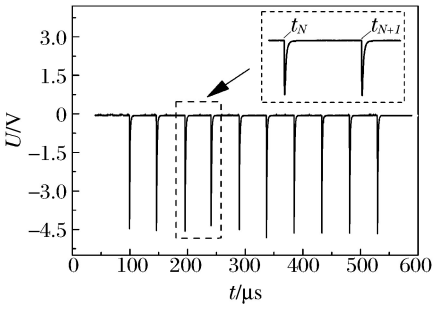


图 2 光学探针输出信号

Fig. 2 Sample signal of optical detectors

2 实验结果及讨论

对于给定的预混气体和管道,实验中通过逐渐降低预混气在管道内的初始压力来获得爆轰极限的临界压力。图 3 所示为 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 气体初始压力远大于其所对应的临界压力时,爆轰波在管道内的传播情况。图 3 中横坐标为爆轰波在测试段管道内的传播距离,纵坐标为相邻测点间所测爆轰波速度与理论爆轰波速度的比值。由图 3 可知,在该初始条件下,爆轰波在管道内传播时其速度波动很小,并以稳定速度传播,且平均速度接近于理论 CJ 速度,这种传播模式的爆轰波称为稳态爆轰。

图 4 为 $C_3H_8+5O_2$ 气体在初始压力为 4.5 kPa 时,爆轰波在管道内传播情况。图 4 表明爆轰波在管道内传播时出现局部速度波动,但仍能够以平均速度 $0.9v_{CJ}$ 在管道内传播,且局部速度波动的振幅及频率具有随机性,此种传播模式爆轰称为快速波动爆轰。对于快速波动模式,速度分布离散度变大,表明其速度波动增加。

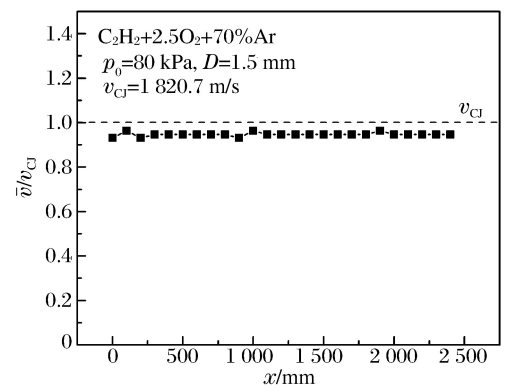


图 3 稳态爆轰下的速度情况图

Fig. 3 Velocity histories of stable detonation

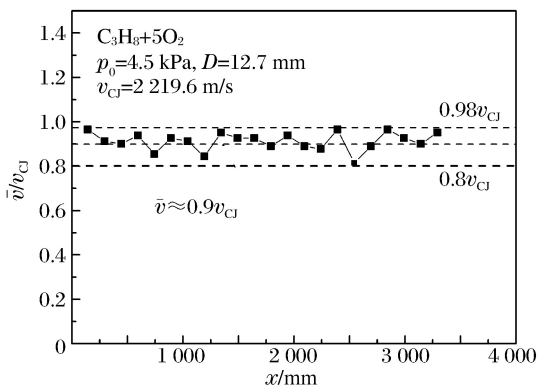


图 4 快速波动爆轰状态下的速度情况图

Fig. 4 Velocity histories of rapid fluctuation detonation

图 5 为 CH_4+2O_2 气体在初始压力为 12 kPa 时，爆轰波在管道内传播情况。爆轰波在进入到测试段管道时，以接近理论 CJ 爆轰速度的速度在管道内传播，在传播一段距离后，爆轰速度突然降低至 $0.87v_{CJ}$ 左右，并以此速度在管道内传播约 0.5 m（约 40 倍管道直径）后，速度又突然增加至 v_{CJ}，再传播一段距离后（约 0.5 m），又降至 $0.87v_{CJ}$ 左右，爆轰波在管道内以此种模式周期地传播至管道末端。此种传播模式称之为“结巴式”爆轰。从速度直方图可以看出，在 $0.87v_{CJ}$ 及 v_{CJ} 附近形成两个波峰，即爆轰波速度集中在 $0.87v_{CJ}$ 和 v_{CJ} 之间。

图 6 为 $C_3H_8+5O_2$ 气体在初始压力为 3 kPa 时，爆轰波在管道内的传播状况。由图 6 可知，在此初始压力下爆轰波速度波动较大，并可分为三个阶段：(1)CJ 爆轰阶段（$0.8v_{CJ}\leqslant v\leqslant v_{CJ}$）；(2)低速阶段（$0.4v_{CJ}\leqslant v<0.8v_{CJ}$）；(3)过载阶段（$v>v_{CJ}$），此种传播模式称为“驰振”爆轰。在 CJ 爆轰阶段，爆轰波在管道内传播时速度缓慢降低，传播至 750 mm 时，爆轰波进入低速传播阶段，此时爆轰波速度急剧降低至 $0.4v_{CJ}$ 左右，并以此速度在管道内传播约 1 000 mm 的距离（约 80 倍管道直径）。在 2 600 mm 处，爆轰波速度突然增加至 $1.4v_{CJ}$ 左右，此时爆轰波发生过载现象，由于过载时爆轰波（$v\approx1.4v_{CJ}$）不能自持稳定传播，故当爆轰波经历过载阶段后速度随之降低，并逐渐达到 CJ 爆轰状态（$v\approx v_{CJ}$），随后形成下一个驰振爆轰周期。驰振爆轰模式同样存在两个波峰且低速区占据较大比例，表明在低速爆轰阶段，爆轰波在管道内传播较长的距离。

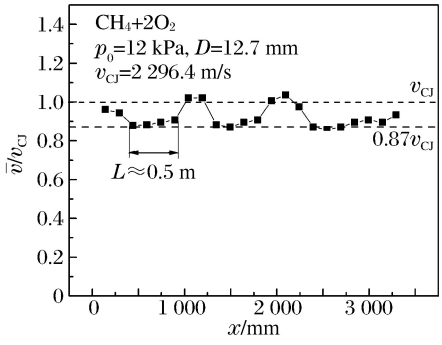


图 5 结巴式爆轰状态下的速度情况

Fig. 5 Velocity histories of stuttering detonation

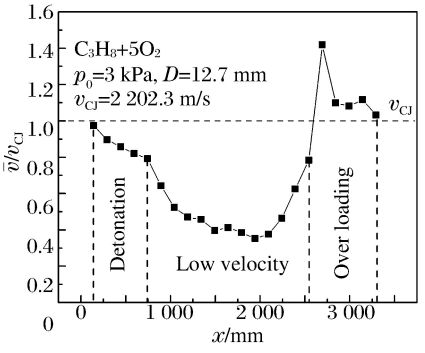


图 6 驰振爆轰状态下的速度情况

Fig. 6 Velocity histories of galloping detonation

图 7 为 $C_2H_2+5N_2O$ 气体在初始压力为 8 kPa 时，爆轰波在管道内的传播状况。当爆轰波进入管道并传播一段距离后，其速度迅速降至 $0.52v_{CJ}$ 左右，并以此速度稳定传播至管道末端，如图 7 所示，此种传播模式称为低速爆轰。从图中也可以看出，爆轰波速度主要落于 $0.52v_{CJ}$ 左右。

图 8 所示为 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 气体初始压力小于其所对应的临界压力时，爆轰波在管道内传播情况。在此压力下爆轰波在进入到管道并传播一段距离后，其速度会突然衰减并降低至 $0.3v_{CJ}$ 以下并形成爆燃波直至爆燃波彻底失效，此种传播模式称为失效模式。

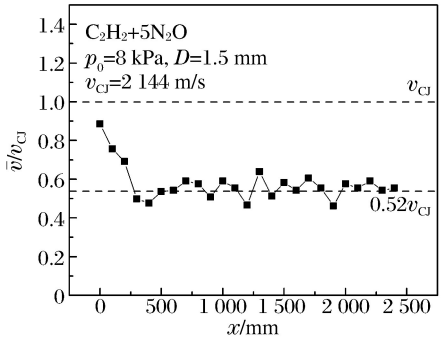


图 7 低速爆轰状态下的速度情况

Fig. 7 Velocity histories of low-velocity detonation

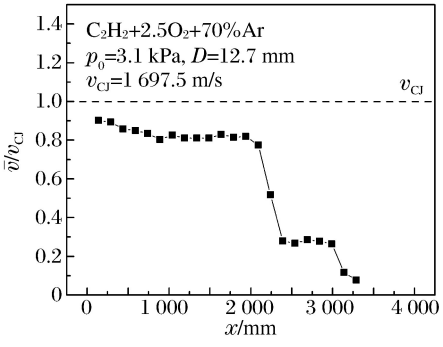


图 8 爆轰失效状态下的速度情况

Fig. 8 Velocity histories of detonation failure

通过对所有组分气体在不同管道内爆轰波速度波动的总结得出，共存在六种不同传播模式，分别为：模式 1(稳态爆轰)，速度在 v_{CJ} 附近；模式 2(快速波动爆轰)，模式 3(结巴式爆轰)，速度均在 $0.8v_{CJ}$～v_{CJ} 之间；模式 4(驰振爆轰)，速度在 $0.4v_{CJ}$～$1.4v_{CJ}$；模式 5(低速爆轰)，速度在 $0.5v_{CJ\text{的}}$；模式 6(爆轰失效状态)，速度小于 $0.5v_{CJ}$。

对于给定的气体，随着初始压力的降低，爆轰波将从稳态传播模式向速度波动较大的非稳态传播模式转变，且在某些特定的压力下，将交替出现多种传播模式，如图 9 所示，当爆轰波进入管道后，以快速波动模式在管道内传播，在传播至约 600 mm 处时，出现驰振爆轰模式，随后爆轰波又恢复至快速波动模式继续在管道内传播。从图 9 可以看出，爆轰波速度在 $0.9v_{CJ}$ 处形成波峰，表明存在快速波动模式，同时在 $1.3v_{CJ}$ 处爆轰波速度发生过载，表明存在驰振爆轰现象。根据不同传播模式下速度的波动范围，对采用的碳氢混合物爆轰波传播模式进行分类，如表 1 所示。

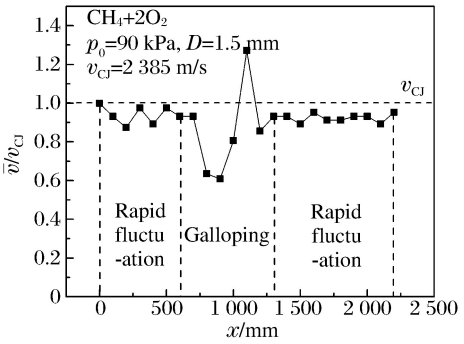


图 9 爆轰状态下的速度情况

Fig. 9 Velocity histories of detonation

表 1 不同管径和初始压力下五种碳氢混合物爆轰传播模式分类

Table 1 The various evlution modes of the five tested mixtures in different diameter tubes and initial pressures

p_0/kPa	$C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$			$C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$			$C_2H_2+5N_2O$			$C_3H_8+5O_2$			CH_4+2O_2		
	1.5	3.2	12.7	1.5	3.2	12.7	1.5	3.2	12.7	1.5	3.2	12.7	1.5	3.2	12.7
98													2,4		
84				1									2		
80	1			1									4		
60	1	1		1	1		1			1			4	2	
57				6											
55	1	1		6	1		1			1				2	
50	1	1			1		1			1			4,5	2	
40	1	1			1		1	1		1	1		4,5	4	1
36	1	1			1		1	1		1			4,5		1
34					1		1	1		2			4,5		1
32					1		1	1		2	1		4,5	4	1
30	2	1	1		1	1	2	1	1	2	1	1	6	4	1
29					1		2			2,4					
28	2	2	1		6	1	2	1	1	2,4	1	1	6	4	1
26	2	2				1	2,4	1	1	2,4	1	1		5	1
24		2				1	2,4	1	1	4	1	1		5	1
22	2	2	1			1	4	1	1	4	1	1		5	1
20	2	2	1			1	4	1	1		1	1		5	2
18	6	2	1			1	4	1	1			1		5	2
16		2	1			1	4	2	1	4	2	1		5	2
15			1					2		6	2				3
14		2	1			1	4	2	1			1		5	3
12		2	1			1	4	2	1		4	1			3
10		2	1				5	4	1		4	1		5	4
8		6	1				5	4	2		4	1		6	4
6		6	2				6	4	2		4	2		6	4
4.5									2			3			
4			2					5	2		5	3,4			4
3								6	4		6	4			6
2			6						4		6	4			6
1									6			6			

注：表中管径的单位为 mm。

由表 1 可以看出，对于活化能较低的高浓度氩气(70%和 85%)稀释后的 $C_2H_2+2.5O_2$ 混合气(Ⅰ，Ⅱ)，随着初始压力的降低，两种气体爆轰波在管道内稳定传播，只出现稳态(模式 1)，快速波动(模式 2)及失效(模式 6)三种传播模式，并没有出现较大速度波动模式，如结巴式(模式 3)及驰振式爆轰(模式 4)模式等。对于活化能较高的 $C_2H_2+5N_2O$(Ⅲ)、$C_3H_8+5O_2$(Ⅳ)和 CH_4+2O_2(Ⅴ)三种气体，爆轰波传播过程非常不稳定。随着初始压力的逐渐降低，爆轰波速度波动逐渐增大。对于结巴式爆轰，仅存在于Ⅳ、Ⅴ两类气体爆轰波在内径为 12.7 mm 管道内传播的过程中，且对应的压力范围很小，而对于Ⅲ种气体，则未发现结巴式爆轰。Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类气体爆轰波在不同内径管道内传播时均观察到驰振爆轰现象。在相同管道内出现驰振爆轰时，Ⅴ类混合气体所对应的临界压力远大于Ⅲ、Ⅳ两类混合气体出现驰振爆轰的临界压力，说明Ⅴ类混合气体非常不稳定。通过比较三种不同混合气体在不同内径管道内出现驰振爆轰的压力区间可以得出，随着管径的逐渐增大，驰振爆轰所出现的压力区间逐渐减小，如Ⅴ类混合气体在内径为 1.5 mm 管道内所对应的驰振爆轰压力区间为 84～32 kPa，而在内径为 12.7 mm 管道中传播时压力区间范围减小至 10～4 kPa。对于小内径(1.5 、3.2 mm)管道，在爆轰波失效之前均出现低速爆轰模式，但其压力区间很小，而在内径为 12.7 mm 管道内却未发现低速爆轰模式，说明低速爆轰模式依赖于管道内径尺寸。

3　结　论

(1)临近极限状态下，爆轰波在管道内传播的速度波动逐渐增大，会呈现六种不同的传播模式：稳态、快速波动、结巴式、驰振式、低速以及失效模式。对于特定组分气体，在某些特定压力下，交替出现多种传播模式。

(2)对于活化能较低的混合气体，如 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 和 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$，在其传播过程中速度波动较小，只存在稳态、快速及失效模式；而对于活化能较高的 $C_2H_2+5N_2O$、$C_3H_8+5O_2$ 和 CH_4+2O_2 三种混合气，在其传播过程中速度存在较大波动，且随着初始压力的逐渐降低，依次出现六种传播模式。

(3)管道尺寸能影响爆轰在管道中的传播模式的形成及演变，CH_4+2O_2 混合气体的非稳定性远大于 $C_3H_8+5O_2$ 和 $C_2H_2+5N_2O$ 两种气体，且出现驰振爆轰的压力区间随着管径的增加而逐渐减小。

参考文献：

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

[2] LEE J J, DUPRE G, KNYSTAUTAS R, et al. Doppler interferometry study of unstable detonations[J]. Shock Waves, 1995,5:175-181.

[3] CAMARGO A, NG H D, CHAO J, et al. Propagation of near-limit gaseous detonations in small diameter tubes [J]. Shock Waves, 2010,20(6):499-508.

[4] MOEN I O, SULMISTRAS A, THOMAS G, et al. The influence of cellular regularity on the behaviors of gaseous detonations[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1985,106:220-243.

[5] LEE J H S, JESUTHASAN A, NG H D. Near limit behavior of the detonation velocity[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013,34(2):1957-1963.

[6] KITANO S, FUKAO M, SUSA A, et al. Spinning detonation and velocity deficit in small diameter tubes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009,32(2):2355-2362.

[7] CAMPBELL C, WOODHEAD D W. The ignition of gases by an explosion wave. Part Ⅰ. Carbon monoxide and hydrogen mixtures[J]. Journal of the Chemical Society, 1926,129(129):3010-3021.

[8] CAMPBELL C, WOODHEAD D W. Striated photographic records of explosion waves[J]. Journal of the Chemical Society, 1927:1572-1578.

[9] CAMPBELL C, FINCH A C. Striated photographic records of explosion waves. Part Ⅱ. An explanation of the Striœ[J]. Journal of the Chemical Society, 1928:2094-2106.

[10] MANSON N, BROCHET C, BROSSARD J, et al. Vibratory phenomena and instability of self-sustained detonations in gases[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1965,10:461-469.

[11] EDWARDS D H, HOOPER G, MORGAN J M. A study of unstable detonations using a microwave interferometer[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1974,7(2):242-247.

[12] HALOUA F, BROULLETTE M, LIENHART V, et al. Characteristics of unstable detonations near extinction limits[J]. Combustion and Flame, 2000,122(4):422-438.

[13] MOEN I O, DOATO M, KNYSTAUTUS R, et al. The influence of confinement on the propagation of detonations near the detonability limits[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1981,18(1):1615-1622.

[14] MANZHALEI V I. Detonation regimes of gases in capillaries[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1999,28(3):296-302.

[15] MCBRIDE B J, GORDON S. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications[R]. User's Manual and Program Description NASA Report, 1996,19(4):443.

Investigation of the propagation modes for gaseous detonation at near-limit condition

YAN Bingjian[1], ZHANG Bo[1,2], GAO Yuan[3], LYU Shuguang[1]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai* 200237, *China*;
2. *School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*;
3. *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia University, United States*)

Abstract: In this paper, five kinds of hydrocarbon gaseous mixture were selected as working medium. By using high voltage spark ignition method and optical fiber probe, the propagation velocity of detonation wave in pipeline was measured near failure state condition. Experiments were conducted based on a self-made detonation pipeline, which includes a drive section and three different test sections with 1.5-mm, 3.2-mm and 12.7-mm inner diameter, respectively. Experimental results reverified that there are six different propagation modes, which are steady detonation, rapid fluctuation detonation, stuttering detonation, galloping detonation, low velocity detonation and detonation failure, respectively for pipeline detonation. Among them, gaseous mixtures $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ and $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ (both have low activation energy), have only three propagating modes, i.e. steady, rapid fluctuation and failure modes; while for other three gaseous mixtures $C_3H_8+5O_2$, $C_2H_2+5N_2O$ and CH_4+2O_2 (with higher activation energy), there are six different propagating modes. The results show that besides gas composition and initial pressure, the activation energy of gaseous mixture may also affect the propagation state of detonation wave in pipeline.

Keywords: detonation wave; propagation mode; velocity fluctuation; activation energy

(责任编辑 曾月蓉)