

文章编号: 1000-8608(2014)04-0413-05

初始压力对爆轰波在管道内传播的影响

喻健良*, 高远, 闫兴清, 高伟

(大连理工大学 化工机械学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 建立爆轰管道研究不同初始压力下爆轰波在管道内传播规律。选用 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ 气体, 采用光纤探针测量爆轰波在管道内的传播速度, 采用烟迹法记录爆轰波胞格结构。结果表明: 爆轰波在管道内传播时出现 5 种不同传播模式, 分别为稳态式、快速波动式、结巴式、驰振式与失效模式。在稳态传播模式下, 爆轰波局部速度波动很小且平均速度接近理论爆轰 CJ 速度, 并呈现多头胞格结构。随着初始压力的降低, 爆轰波局部速度波动增加且其平均速度产生衰减。在驰振式爆轰解耦处, 爆轰波胞格结构消失, 过载爆轰时, 重新形成胞格结构。进一步降低初始压力至爆轰失效时, 则无胞格结构。

关键词: 爆轰波; 初始压力; 爆轰速度; 胞格结构

中图分类号:TQ541

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb201404007

0 引言

可燃气体爆燃是工业安全生产的巨大威胁。相比可燃气体爆燃, 可燃气体爆轰能造成更为严重的事故后果, 因此如何有效抑制防治可燃气体爆轰的产生及发展一直是工业安全防灾、减灾领域研究热点。许多学者对管道内爆轰波的传播及爆炸超压进行了研究^[1-6]。初始压力在可燃气体爆轰过程中是一个重要影响参数, 研究发现在某些初始压力下爆轰波在管道内传播时将产生较大速度波动^[7-8], 爆轰波在管道内的传播将变得非常复杂并出现一系列非稳定现象^[9-13]。目前, 爆轰波在管道内传播时所出现的非稳定现象及其传播机理尚不完全清楚, 因此需要对爆轰波在管道内的传播特性进行深入研究。本文通过开展爆轰波在管道内传播试验, 研究可燃气体初始压力对爆轰波在管道内传播特性的影响, 进一步认识爆轰波的传播机理。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

试验装置见图 1, 其主要由爆轰管道、点火系统、数据采集系统及配气系统等组成。爆轰管道由

驱动段和测试段组成。驱动段为长 1 300 mm、内径 70 mm、壁厚 4.5 mm 的钢管, 在起爆端设置一长度为 200 mm 的 Shchelkin 螺旋, 以增加对爆轰波的扰动从而在驱动段内形成稳态爆轰。测试段为透明的聚碳酸酯塑料管, 管道长度为 3 500 mm、内径为 12.7 mm、壁厚为 3.2 mm。根据分压法采用混气罐配制 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ 气体, 并静置 24 h 使气体充分混合。采用光纤探针测试系统^[4] 测量测试段内爆轰波火焰信号, 采用烟迹法记录管道内爆轰波胞格结构。

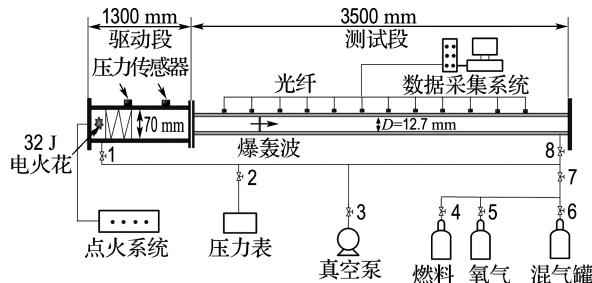


图 1 试验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

试验流程如下: 试验前将管道全封闭, 用真空泵将管道抽真空, 然后同时通过驱动段初始端阀

1 及测试段末端阀 8 向管道充入混合气体, 以使气体在管道内均匀分布, 并通过电子压力表控制进气量以达到预定的初始压力。静置 10 min 后, 控制点火系统高压放电点火, 通过数据采集系统记录各测点处的火焰信号。

1.2 试验方案

研究可燃气体初始压力 p_0 对爆轰波在管道内传播的影响规律。测试段管道上共采用 23 个光纤探针测点, 测点 1 距离测试段入口端距离为 50 mm, 相邻两测点间距离为 150 mm, 经过多次试验总结发现该距离能够较好地反映爆轰波在管道内的传播状态, 从而计算出爆轰波在管道内的实际传播速度。通过 CEA^[14] 程序计算可燃气体在各初始压力下爆轰 CJ 速度。试验中采用逐渐降低可燃气体初始压力的方法研究可燃气体初始压力对爆轰波在管道内非稳态传播的影响规律。

2 结果与讨论

2.1 初始压力对爆轰波局部速度波动的影响

图 2(a) 为可燃气体初始压力 $p_0 = 30 \text{ kPa}$ 时爆轰波在管道内传播情况, 图中横坐标为爆轰波在测试段管道内的传播距离, 纵坐标为相邻两测点间所测得的局部爆轰速度与理论爆轰 CJ 速度的比值。由图可以看出, 此时爆轰波局部速度波动很小, 且其平均速度接近理论爆轰 CJ 速度。爆轰波在管道内能够自持稳定地传播, 证明在此初始压力下, 爆轰波前导冲击波与化学反应区处于强耦合状态。爆轰波前导冲击波压缩诱导区内化学反应物, 使之在很短的时间内达到较高的温度和密度, 从而能够在很小尺度内迅速发生化学反应并释放出大量化学能量, 而所释放出的能量则反过来促进前导冲击波传播, 从而维持爆轰波继续稳定地传播, 此种传播模式称为稳态式爆轰(I)。

随着初始压力的降低 ($p_0 = 18 \text{ kPa}$), 爆轰波局部速度波动有所增加, 如图 2(b) 所示。但此时爆轰波仍能够以约 $0.97v_{\text{CJ}}$ 平均速度在管道内传播, 且局部速度波动的振幅及频率具有随机性, 此种传播模式称为快速波动式爆轰(II)。

随着初始压力进一步降低 ($p_0 = 14 \text{ kPa}$, 图 2(c)), 爆轰波在进入到测试段管道后, 以接近理论爆轰 CJ 速度在管道内传播, 在传播至距离测试段入口端约 0.3 m 处时, 爆轰波局部速度突然降低至 $0.87v_{\text{CJ}}$ 左右, 并以此速度在管道内传播约 0.5 m 距离(约 40 倍管道直径)后, 速度又突然增

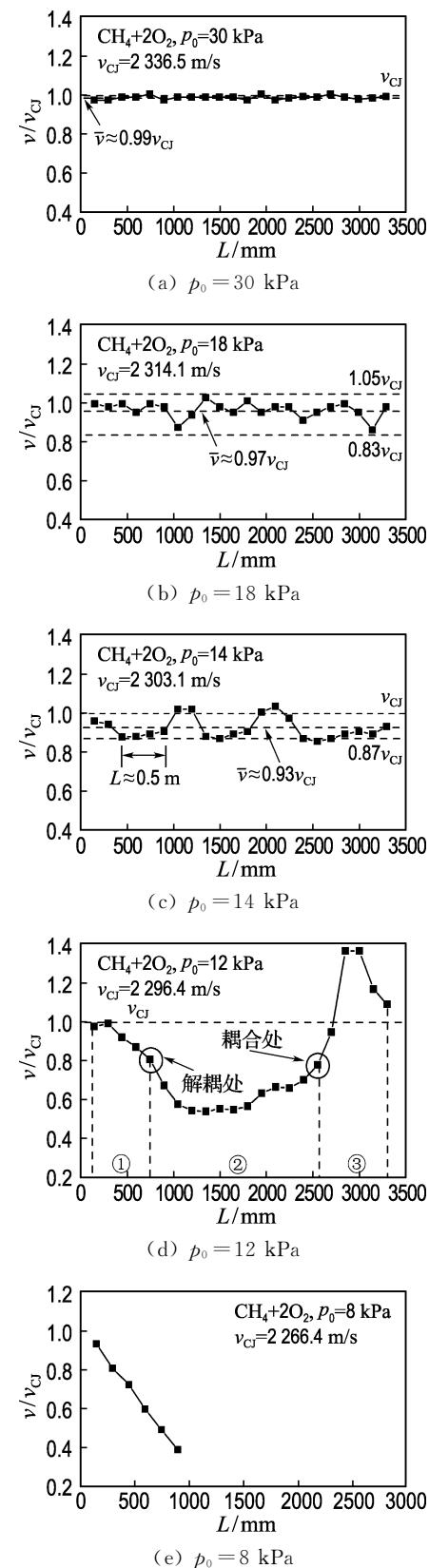


图 2 爆轰速度沿管道变化

Fig. 2 Variation of detonation velocity along the tube

加至 v_{CJ} , 待传播一段距离(约为 0.2 m), 速度又降至 $0.87v_{\text{CJ}}$ 左右。爆轰波在管道内按照此种模式

周期地传播至管道末端,此种传播模式称为结巴式爆轰(Ⅲ)。

继续降低可燃气体初始压力($p_0 = 12 \text{ kPa}$),爆轰波在进入到测试段管道后其局部速度将产生较大波动,如图 2(d)所示,并可将其速度分布分为 3 个阶段:①CJ 爆轰阶段($0.8v_{\text{CJ}} \leq v \leq v_{\text{CJ}}$);②低速阶段($0.4v_{\text{CJ}} \leq v < 0.8v_{\text{CJ}}$);③过载阶段($v > v_{\text{CJ}}$)。在 CJ 爆轰阶段,爆轰波在管道内传播时局部速度缓慢降低,爆轰波前导冲击波与爆轰波火焰面仍处于耦合状态,但前导冲击波与化学反应区火焰面之间距离在逐渐增加,且诱导区长度在逐渐加大。在传播至约 750 mm 处,爆轰波速度突然加速降低,表明此时前导冲击波与火焰面解耦,爆轰波进入低速阶段,此时爆轰波局部速度为 $0.6v_{\text{CJ}}$ 左右。然而爆轰波化学反应区内化学反应并未结束,此时火焰面与前导冲击波保持一定的距离,且以相同速度在管道内传播^[13,15],前导冲击波仍对管道内预混气体进行压缩并形成诱导区。爆轰波在管道内传播大约 2 000 mm 的距离(约为 160 倍管道直径)后,在 2 600 mm 处,前导冲击波与壁面边界层,以及冲击波与冲击波^[16-17]相互作用,使得局部诱导区内化学反应活性增强,随之产生热点,并导致热点燃烧爆炸形成局部爆炸中心。局部爆炸中心会形成强压缩波,此压缩波将导致火焰面速度迅速增加,并与火焰面一同向前追赶前导冲击波,在火焰面追赶上前导冲击波后,会造成爆轰波过载现象发生,此时爆轰波速度为 $1.4v_{\text{CJ}}$ 左右。然而由于过载阶段爆轰波并不能自持稳定地传播,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($v \approx v_{\text{CJ}}$),随后形成下一个传播周期。此种传播模式称为驰振式爆轰(Ⅳ)。

对比图 2(c)、(d)可以看出,在结巴式爆轰与驰振式爆轰传播模式下均出现速度降低现象。对于结巴式爆轰,其速度降低是由于爆轰波稳定性减弱、非稳定性增强导致爆轰波速度波动,并使得爆轰波火焰面产生周期性的速度变化而造成的,然而此时爆轰波前导冲击波与火焰面并未解耦。对于驰振式爆轰,其速度降低是由于在较低压力下,爆轰波前导冲击波与火焰面发生解耦现象造成的,在爆轰波速度加速降低阶段,爆轰波前导冲击波与火焰面完全解耦。另外通过对低速段速度可以看出,对于结巴式爆轰,速度降低时其值约为 $0.87v_{\text{CJ}}$,仍接近理论爆轰 CJ 速度;而对于驰振

式爆轰,速度降低时其低速段速度约为 $0.6v_{\text{CJ}}$,已远离理论爆轰 CJ 速度。

若进一步降低可燃气体初始压力至 $p_0 = 8 \text{ kPa}$ 以下时(图 2(e)),爆轰波在进入到测试段管道后爆轰波前导冲击波将与化学反应区快速解耦,化学反应区的化学反应速率逐渐降低,不能产生足够能量继续维持爆轰波传播,使得爆轰波速度逐渐降低至 $0.3v_{\text{CJ}}$ 以下,形成爆燃波并最终失效,此种传播模式称为失效模式(V)。

2.2 初始压力对爆轰波平均速度的影响

图 3 为爆轰波在管道内传播时其平均速度随可燃气体初始压力的变化情况。图中横坐标为可燃气体初始压力,纵坐标为对应压力下爆轰波平均速度与理论爆轰 CJ 速度的比值。在 $30 \sim 18 \text{ kPa}$ 压力区间内,爆轰波处于稳态传播模式,此时爆轰波平均速度接近理论爆轰 CJ 速度且衰减值很小。随着初始压力的降低,在 $18 \sim 14 \text{ kPa}$,爆轰波处于快速波动传播模式,爆轰波平均速度衰减变大,且衰减值随着初始压力的降低而增加。这是由于爆轰波诱导区长度与初始压力有关^[3],初始压力降低时,爆轰波诱导区长度增加,导致由边界层扩散所产生的能量损失增大,同时初始压力的降低使得爆轰波化学反应区化学反应速率变缓。上述两种综合效应导致爆轰波平均速度降低并产生衰减。在 $14 \sim 12 \text{ kPa}$ 压力区间内,爆轰波处于结巴式传播模式,在此传播模式下,爆轰波平均速度的波动显著增加且随着初始压力的降低其衰减速度加快。继续降低可燃气体初始压力,在 $12 \sim 8 \text{ kPa}$ 压力区间内,爆轰波将发生驰振式爆轰,且爆轰波速度平均值将迅速从 $0.95v_{\text{CJ}}$ 降低至 $0.6v_{\text{CJ}}$ 左右。若进一步降低可燃气体初始压力至 8 kPa 以下时,爆轰波在进入管道后将失效,此时无平均速度值。

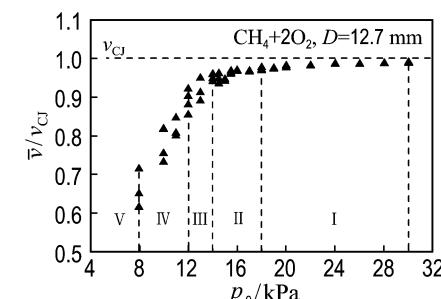


图 3 爆轰波平均速度随初始压力的变化

Fig. 3 Variation of the averaged detonation velocity with initial pressure

2.3 初始压力对爆轰波胞格结构的影响

对于稳态式、快速波动式及结巴式传播模式，爆轰波在管道内传播时其胞格结构相似。图 4 为在上述 3 种传播模式下典型的胞格结构。爆轰波由左至右在管道内传播，爆轰波胞格呈现出不规则结构，且其胞格尺寸均随着可燃气体初始压力的降低而逐渐增加。

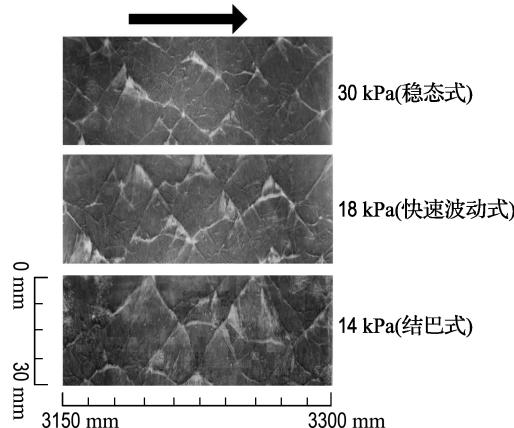


图 4 稳态式、快速波动式、结巴式爆轰时胞格结构

Fig. 4 Cellular structures of stable, rapid fluctuation, and stuttering detonations

图 5 为驰振式传播模式下，爆轰波胞格结构在管道内的演变过程。图中各段烟迹与图 2(d)中速度对应。在 CJ 爆轰阶段，爆轰波进入到测试段管道后由多头爆轰逐渐转变成单头螺旋爆轰，并以单头螺旋爆轰在管道内持续传播直至爆轰波前导冲击波与化学反应区解耦处，此时单头螺旋爆轰消失，烟迹上无爆轰胞格结构，对应于图 2(d)的低速阶段。在耦合处，爆轰波重新形成，此时爆轰波处于过载阶段，对应的胞格尺寸远小于 CJ 爆轰阶段爆

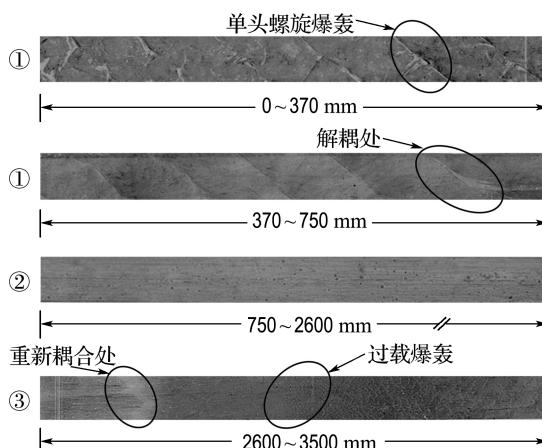


图 5 驰振式爆轰时胞格结构

Fig. 5 Cellular structure of galloping detonation

轰波胞格尺寸。然而爆轰波过载时不能自持稳定传播，导致爆轰波逐渐衰弱，对应的爆轰波胞格尺寸逐渐增加。图 6 为失效模式下爆轰波胞格变化过程。爆轰波进入到管道后出现单头螺旋爆轰，在传播一段距离后爆轰波前导冲击波与化学反应区结构解耦，爆轰波胞格结构消失直至管道末端。

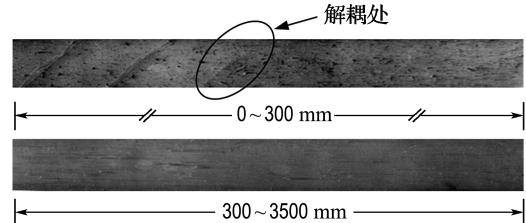


图 6 爆轰失效时胞格结构

Fig. 6 Cellular structure of detonation failure

3 结 论

(1) 可燃气体初始压力对爆轰波在管道内传播具有显著影响，随着初始压力的逐渐减小，爆轰波局部速度波动不断增加，并存在 5 种不同传播模式，分别为稳态式、快速波动式、结巴式、驰振式及失效模式。

(2) 在稳态传播模式下，爆轰波平均速度接近于理论爆轰 CJ 速度。随着初始压力的减小，爆轰波平均速度不断衰减，当爆轰波失效时，最小平均速度约为 $0.6v_{CJ}$ 。

(3) 在稳态式、快速波动式及结巴式传播模式下，爆轰波具有多头胞格结构，且胞格尺寸随着初始压力的降低而增加。在驰振式爆轰下，当前导冲击波与火焰面解耦时，爆轰波胞格结构消失，在重新耦合处，再次形成胞格结构。当爆轰失效时，烟迹无胞格结构。

参 考 文 献：

- [1] Lee J J, Dupré G, Knystautas R, et al. Doppler interferometry study of unstable detonations [J]. *Shock Waves*, 1995, **5**(3):175-181.
- [2] 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.
- [3] Moen I O, Sulmistras A, Thomas G O, et al. The influence of cellular regularity on the behavior of gaseous detonations [M] // Leyer J-C, Soloukhin R I, Bowen J R. *Progress in Astronautics and Aeronautics: Dynamics of Explosions*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1985:220-243.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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**: 3010-3021.
- [7] Campbell C, Woodhead D W. Striated photographic records of explosion-waves [J]. *Journal of the Chemical Society*, 1927; 1572-1578.
- [8] Campbell C, Finch A C. Striated photographic records of explosion waves. Part II. An explanation of the striae [J]. *Journal of the Chemical Society*, 1928; 2094-2106.
- [9] Manson N, Brochet C, Brossard J, et al. Vibratory phenomena and instability of self-sustained detonations in gases [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1963, **9**(1): 461-469.
- [10] 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.
- [11] Haloua F, Brouillet M, Lienhart V, et al. Characteristics of unstable detonations near extinction limits [J]. *Combustion and Flame*, 2000, **122**(4): 422-438.
- [12] Moen I O, Donato M, Knystautas R, et al. The influence of confinement on the propagation of detonations near the detonability limits [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1981, **18**(1): 1615-1622.
- [13] Manzalei V I. Detonation regimes of gases in capillaries [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1992, **28**(3): 296-302.
- [14] McBride B J, Gordon S. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications; II. User's manual and program description [J]. *NASA Reference Publication*, 1996, **1311**: 84-85.
- [15] Vasil'ev A A. Near-limiting regimes of gaseous detonation [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1987, **23**(3): 358-364.
- [16] Oran E S, Gamezo V N. Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion [J]. *Combustion and Flame*, 2007, **148**(1-2): 4-47.
- [17] Kagan L, Sivashinsky G. The transition from deflagration to detonation in thin channels [J]. *Combustion and Flame*, 2003, **134**(4): 389-397.

Effect of initial pressure on propagation of detonation wave in round tube

YU Jian-liang*, GAO Yuan, YAN Xing-qing, GAO Wei

(School of Chemical Machinery, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Detonation tube was built to investigate the effect of initial pressure on the propagation of detonation wave in round tube. The premixed gas of $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ was selected as experimental gas. Optical fiber probe was used to measure the local velocity of detonation wave. Smoked foils were used to register the cellular structure of detonation wave in tubes. The experimental results show that there are five distinct modes during the propagation of detonation wave in tubes, which are stable mode, rapid fluctuation mode, stuttering mode, galloping mode and failure mode. Under the mode of stable detonation, the fluctuations of the local velocity of detonation wave are generally small and the averaged velocity of detonation wave is close to the theoretical CJ value. The detonation wave has multi-headed cellular structure. With decreasing of the initial pressure, the fluctuations of the local velocity of detonation wave increase, and the averaged velocity of detonation wave decreases. For the galloping detonation, at the decoupled position, cellular structure disappears. Cellular structure forms again when overdriven detonation occurs. If the initial pressure is further decreased till the detonation failure, no cellular structure is observed.

Key words: detonation wave; initial pressure; detonation velocity; cellular structure