文章编号:1000-5773(2011)06-0514-05

氢氧爆轰波在激波管中的成长机制研究*

王　建,段吉员,赵继波,文尚刚,谭多望

(中国工程物理研究院流体物理研究所,冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室,四川绵阳　621900)

摘要:针对气相爆轰波成长机制研究,采用压力传感器和高速摄影技术,测试了氢氧混合气体在点火后的火焰波、前驱冲击波以及爆轰波的成长变化过程,计算了冲击波过程参数和气体状态参数,分析了火焰加速机制。实验结果表明,APX-RS 型高速摄影系统可用于拍摄气相爆轰波的成长历程;氢氧爆轰波的产生是由于湍流火焰和冲击波的相互正反馈作用,导致反应区内多处发生局部爆炸,爆炸波与冲击波相互耦合,最终成长为定常爆轰波。

关键词:爆炸力学;气相爆轰波;燃烧转爆轰;氢氧混合气体;高速摄影
中图分类号:O382.1　　**文献标识码**:A

1　引　言

通常情况下,可燃气体混合物以燃烧形式开始反应,因此气相爆轰波的成长将经历从点火、燃烧到爆轰的 3 个阶段。其中,最重要的是爆燃转爆轰过程(Deflagration to Detonation Transition,简称 DDT)。经典的 SWACER(Shock Amplification by Coherent Energy Release)机理描述气相爆轰波的成长历程为激波与燃气化学反应释放的热量耦合,使得激波强度增强并最终导致爆轰。由于是湍流及多波系的相互作用,使得上述过程在时空尺度上都呈现一定的随机性。因此,对于可燃气体爆轰波成长过程的研究,一直没有获得一种通用性的火焰速度与冲击波参数之间的关系式。然而,研究爆轰波的成长机制,总结它的发展规律,对深入认识气相爆轰机理、解决爆轰推进技术的点火起爆与爆轰性能等问题具有重要的意义。

对气相爆轰波产生机制的研究已有很长的一段时间,相关的实验研究包括 Lee 等人[1]从湍流燃烧角度研究了氢气-空气混合气体 DDT 过程。Brown、Thomas 等人[2-4]研究了乙烯-氧气-氮气和丙烷-氧气-氮气混合气体的 DDT 过程,通过局部强湍流燃烧实现对 DDT 过程的"控制",并采用气体动力学分析了产物粒子的运动,认为不同的物理化学过程可能导致爆轰。Card 等人[5]研究了初温、初压的升高对乙烯-空气、氢气-空气混合气体 DDT 过程的影响。Li 等人[6]对 DDT 距离判定的不确定度进行分析,认为采用压力曲线判读 DDT 距离更合适。Christoph[7]在聚碳酸酯管中研究了丙烷-空气的 DDT 过程,提出用火焰发光强度作为爆轰发生的判据。Sorin、Medvedev 等人[8-9]研究了点火能量、点火方式、设置障碍物对缩短氢氧 DDT 时间和距离的影响。年伟民等人[10]采用声学吸收壁研究了气相爆轰波的衰减机制以及二次起爆过程,实验结果表明,当混合气体(H_2-O_2-Ar)的初始压力小于某一临界值 p_c 时,爆轰波发生显著的衰减现象,胞格逐渐消失,爆速下降到稳定爆速的约 0.5 倍。朱雨建等人[11]对乙炔-氧气及乙炔-氧气-氩这两类可燃混合气体的高速爆燃波及其向爆轰的转变过程进行实验研究,结果表明,两种气体中的 DDT 机制具有明显的差异,前者燃烧波面在较低初压条件下为层流结构,而较高初压下为湍流结构;而后者在不同初压条件下燃烧波面均为层流结构。分析认为,前驱冲击波压缩效应对纯氧乙炔气体的高速爆燃和 DDT 贡献较小,DDT 过程中湍流输运占主导地位;而经氩气稀释后的混合气体缺乏

* **收稿日期**:2010-09-17;**修回日期**:2011-03-17
作者简介:王　建(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事爆轰物理基础研究. E-mail:wj345jay@sina.com

自行衍生剧烈湍流燃烧的能力,因而前驱冲击波的压缩和外界扰动对其 DDT 过程起着主导作用。

本研究借鉴 Christoph 等人高速摄影的实验方法,以预混的氢氧混合气体为对象,结合压电传感器和高速数字相机,研究前驱冲击波和火焰发展的细观过程,为深入认识气相爆轰波的成长机制提供实验依据。

2　实验装置和测试系统

实验装置包括激波管、同步点火装置、混气装置以及光电测试系统,如图 1 所示。激波管内径 50 mm,总长度 3.0 m,其中有机玻璃管用于高速摄影,拍摄混合气体爆轰过程中火焰和前驱冲击波的变化情况。实验气体为 1∶1 摩尔比的氢氧混合气体,初始压力为 0.1 MPa。点火能量约为 0.82 J。

实验利用安装在管壁不同位置的 5 只石英压力传感器(量程为 10 MPa、精度为 0.05%)记录爆燃波或爆轰波的到达时间与压力值。采用 APX-RS 型高速摄影数字相机记录冲击波和火焰的发展过程,相机幅频设置为 10 000 幅/秒,记录间隔为 100 μs。同时,为获得更清晰的波阵面图像,高速相机设定 1 μs的电子快门,尽可能实现对冲击波流场的时空冻结。

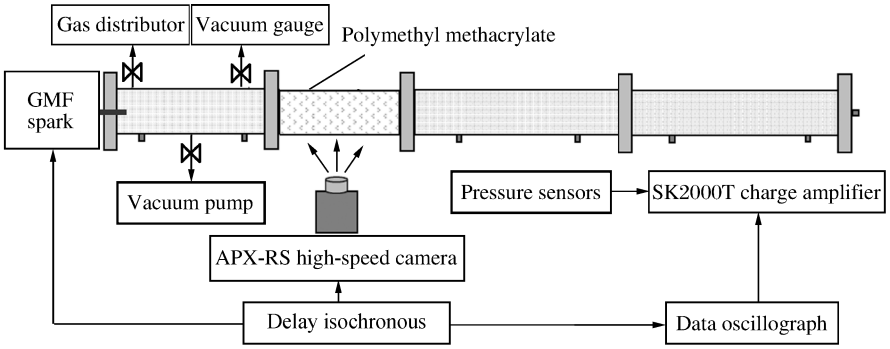


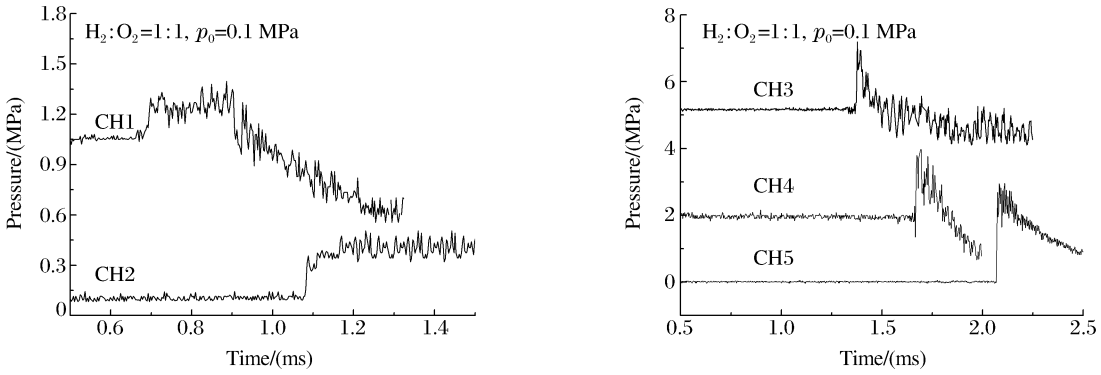
图 1　气相爆轰实验示意图

Fig. 1　Schematic diagram of gaseous detonation experiment

3　实验结果分析与讨论

3.1　压力测试结果

图 2 为管壁 5 只传感器(CH1～CH5)对应的压力时间曲线。CH1～CH5 到点火端的距离依次为 0.20、0.45、1.50、2.50、3.00 m,测得的压力峰值依次是 0.245、0.283、1.99、2.06、2.17 MPa。

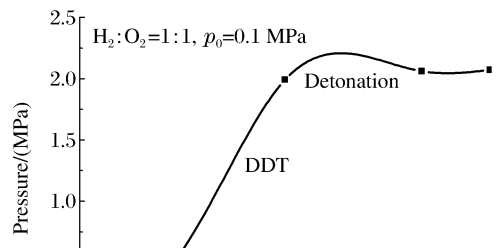


(a) Pressure-time curves for CH1 and CH2　　(b) Pressure-time curves for CH3, CH4 and CH5

图 2　波阵面压力曲线

Fig. 2　Pressure-time curves

从图 2 可以看出,CH1 和 CH2 的压力缓慢上



升，具有明显的燃烧波或爆燃波特性，而 CH3、CH4 和 CH5 的压力峰值是突跃上升，体现了爆轰波的阶跃特性。上述表明，预混氢氧气体点火后，在 CH1 和 CH2 位置处于预混燃烧状态，并且，0.25 MPa 左右的波阵面压力持续了较长的时间。这是由于在燃烧初期，火焰加速机制以冲击压缩未燃气体为主，并且此时冲击强度有限，冲击压缩作用不明显，火焰加速缓慢，导致前驱冲击波波阵面后的状态参数变化不大。从 CH2 到 CH3 的某处，氢氧混合气体完成了从爆燃到爆轰的转变，波阵面参数已出现突跃。CH3 位置处的氢氧混合气体已经处于爆轰状态，波阵面的压力和波速都有数量级的突跃。利用压力传感器可以粗略地得到氢氧混合气体爆轰波成长所经历的燃烧、DDT 和爆轰 3 个阶段，如图 3 所示。然而，压力信号仅能从宏观上分析 DDT 的变化过程，对爆轰波的成长细节仍不清楚。

3.2 高速摄影测试结果

图 4 为采用高速数字相机拍摄到的氢氧混合气体在点火阶段前驱冲击波和火焰加速的变化情况。从图 4 可以看出，实验气体在点火后快速形成了较分散的火焰(0.2ms)和燃烧波(0.3～0.5ms)。此

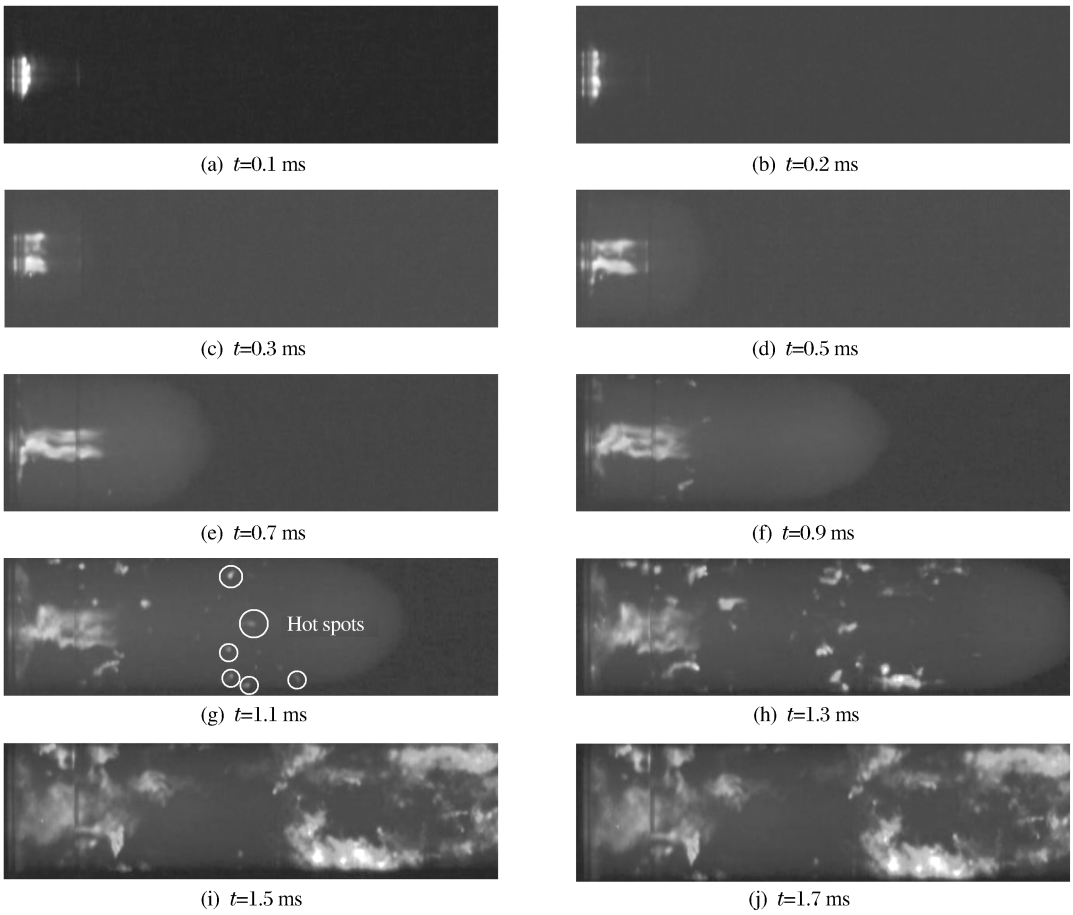


图 4 点火阶段火焰与前驱冲击波变化情况

Fig. 4 Transformation of flame and shock in the ignition phase

时的燃烧波强度较弱，火焰加速缓慢。随着火焰与波阵面压缩正反馈作用的增强，燃烧波强度迅速提高，在 1.1 ms 时，形成速度为 370 m/s 的前驱冲击波。并且前驱冲击波的压缩作用在未燃气体中形成大量“自着火点”如(图 4(g))中的圆圈所标示。此后，混合气体自身的不稳定性使得出现局部湍流燃烧(图 4(h))，湍流火焰的作用加剧(图 4(i))，进一步强化了前驱冲击波，当前驱冲击波增强到某一临界强度时，混合气体的化学反应不再平缓进行，反应区内会突然发生局部爆炸，形成以局部爆炸点为中心向四周传播的波阵面，它追赶上前驱冲击波并相互作用，最终成长为定常爆轰波。

3.3 爆轰波成长机制分析

图 4 表明,点火阶段即早期的火焰加速阶段,燃烧波压缩加热未燃气体使其温度和压力升高,为火焰加速的主要机制,这种正反馈作用使得燃烧波强度增加。在 1.1 ms 时刻,形成前驱冲击波,冲击压缩的强度增加使得出现了如图 4(g)中的多处"自着火点"。由于"自着火点"的成长和火焰自身的不稳定性引起火焰褶皱,形成了极其扭曲变形的火焰阵面(图 4(i)),此时,湍流火焰加速机制和前驱冲击波与火焰正反馈机制共同作用于未燃气体。湍流和前驱冲击波作用使得火焰燃烧速度进一步增加,燃速的增加导致反应能量释放速率增加,因此,前驱冲击波强度和湍流程度相应增加。当前驱冲击波强度积累到临界条件时,冲击压缩使得未燃氢氧气体初始温度和初始压力突跃上升,此时混合气体的化学反应不再平缓进行,反应区内会突然发生局部爆炸,形成以局部爆炸点为中心向四周传播的波阵面,它追赶上前驱冲击波并相互作用,最终成长为定常爆轰波。

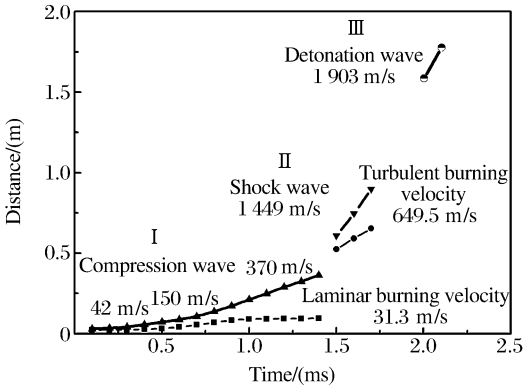


图 5　氢氧爆轰波的成长历程

Fig. 5　Shock, flame, and detonation front trajectories for hydrogen-oxygen mixture

此外,利用冲击波理论[12]计算得到氢氧混合气体爆轰波的成长历程,如图 5 所示。图 5 反映了氢氧爆轰波的成长机制:火焰和燃烧波或弱前驱冲击波(Ⅰ)相互作用,出现"自着火点",火焰加速发展为湍流火焰,进一步相互作用出现强前驱冲击波(Ⅱ),强前驱冲击波的冲击作用使得出现局部爆炸,局部爆炸最终发展为爆轰(Ⅲ)。

4　结　论

针对气相爆轰波成长机制研究,采用压力传感器和高速摄影技术,测试了氢氧混合气体在点火后的火焰波、前驱冲击波以及爆轰波的成长变化过程并分析了火焰加速机制。在本研究实验条件下,得到的主要结论是:

(1) 结合 APX-RS 型高速摄影系统和同步控制系统,在消除燃烧爆炸过程中大量自发光的干扰后,成功地对气相爆轰波成长过程进行了光学显示;

(2) 实验结果表明:氢氧混合气体爆轰波成长是由燃烧波、前驱冲击波与火焰的正反馈机制与火焰湍流加速机制共同作用,经历缓慢燃烧－"自着火点"出现－湍流燃烧－临界前驱冲击波形成－局部爆炸－定常爆轰波的几个成长阶段。

References:

[1] Lee J H S, Knystautas R, Freiman A. High Speed Turbulent Deflagrations and Transition to Detonation in H_2-Air Mixtures [J]. Combust Flame, 1984, 56(2): 227-239.

[2] Brown C J, Thomas G O. Experimental Studies of Shock-Induced Ignition and Transition to Detonation in Ethylene and Propane Mixtures [J]. Combust Flame, 1999, 117(4): 861-870.

[3] Thomas G O, Bambrey R J, Brown C. Experimental Observations of Flame Acceleration and Transition to Detonation Following Shock-Flame Interaction Combust [J]. Combustion Theory and Modelling, 2001, 5(4): 573-594.

[4] Thomas G O, Bambrey R J. Some Observations of the Controlled Generation and Onset of Detonation [J]. Shock Waves, 2002, 12(1): 13-21.

[5] Card J, Rival D, Ciccarelli G. DDT in Fuel-Air Mixtures at Elevated Temperatures and Pressures [J]. Shock Waves, 2005, 14(3): 167-173.

[6] Li J, Lai W H, Chung K, et al. Uncertainty Analysis of Deflagration-to-Detonation Run-up Distance [J]. Shock Waves, 2005, 14(5-6): 413-420.

[7] Kersten C, Förster H. Investigation of Deflagrations and Detonations in Pipes and Flame Arresters by High-Speed Framing [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(1): 43-50.

[8] Medvedev S P, Khomik S V, Olivier H, et al. Hydrogen Detonation and Fast Deflagration Triggered by a Turbulent Jet of Combustion Products [J]. Shock Waves, 2005, 14(3): 193-203.

[9] 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.

[10] Nian W M, Zhou K Y, Wang H L, et al. The Re-intension Process of Gaseous Detonation Downstream of the Acoustic Absorbing Walled Section [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(1): 37-43. (in Chinese)
年伟民, 周凯元, 王汉良, 等. 气体爆轰波在声学吸收壁下游的再加强过程 [J]. 实验力学, 2005, 20(1): 37-43.

[11] Zhu Y J, Yang J M, Lee J H S. High-Speed Deflagration and It's Transition to Detonation in Two Different Gaseous Mixtures [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(2): 110-117. (in Chinese)
朱雨建, 杨基明, Lee J H S. 两种不同气体中的高速爆燃波及其向爆轰的转变 [J]. 实验力学, 2008, 23(2): 110-117.

[12] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

Study on the Development Mechanism of Detonation Wave for the Hydrogen-Oxygen Mixture in a Shock Tube

WANG Jian, DUAN Ji-Yuan, ZHAO Ji-Bo, WEN Shang-Gang, TAN Duo-Wang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: This paper mainly focuses on the experimental investigation of the gaseous detonation wave build-up mechanism for hydrogen-oxygen mixture in shock tube. Five pressure sensors were used to record the pressures and a high-speed camera was used to capture velocities of flame, shock, or detonation wave. The high-speed camera records the transformation of flame, shock in the ignition phase and the attenuation of detonation wave. The experimental results show that the diagnostic system can effectively measure the DDT. The images of flame propagation show that the flame front is curving and dispersive. It is found that the interaction of shock and turbulent flame is a dominant factor for the onset of explosion. In the smooth tube, experiments indicate that the intensity of shock wave continually increases due to the acceleration of flame. The local explosion occurs in the reaction zone when the intensity of shock wave arrives at a critical pressure p_c when some hot spots form in the local explosion centers. At that time, an unsteady detonation wave is formed immediately, and after a period of the propagation or attenuation process, it eventually evolves into a steady detonation wave.

Key words: mechanics of explosion; gaseous detonation wave; deflagration to detonation transition; hydrogen-oxygen mixture; high-speed camera