文章编号：1000-5773(2012)04-0426-07

铝粉-空气混合物爆燃转爆轰过程及爆轰波结构*

陈　默[1,2]，白春华[2]，刘庆明[2]

（1.中国石油安全环保技术研究院，北京　100083；
2.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081）

摘要：在长为32.4 m、内径为0.199 m的大型长直水平管道中，对铝粉-空气两相流的燃烧转爆轰(DDT)过程及爆轰波结构进行了实验研究。对铝粉-空气混合物弱点火条件下DDT过程不同阶段的特征进行了分析，实验结果显示混合物经历了缓慢反应压缩阶段、压缩波加速冲击波形成阶段、冲击反应过渡阶段、冲击反应向过压爆轰过渡阶段和爆轰阶段，得到了混合物各阶段的DDT参数，由此进一步分析了DDT浓度的上、下限。在1.4 m爆轰测试段的4个截面的环向上各均匀安装8个传感器，对爆轰波结果进行测试，并对铝粉-空气混合物爆轰波的单头结构进行了分析。

关键词：燃烧转爆轰；弱点火；铝粉；自持；爆轰波
中图分类号：O382.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

随着气相混合物研究的不断深入，对气-固两相混合物的研究也已经广泛开展。法国的Veyssiere利用内径为69 mm、长度为6 m的垂直爆轰管对玉米淀粉-氧气的爆燃进行了实验研究[1-2]。而后，他们采用放置于爆轰管顶端的氢氧混合物进行强点火起爆，在实验中观察到了爆轰现象，并且爆速低于CJ爆速30%[3]。此外，Veyssiere[4]还从气体组分、颗粒直径、质量浓度上实验研究了悬浮铝粉颗粒与氢气-空气混合物的爆轰性能，发现爆轰均具有双峰波形。Zhang等人[5-7]利用不同内径、不同长度的水平管道进行了铝粉-空气燃烧转爆轰(Deflagration to Detonation Transition，DDT)实验，观察到了螺旋爆轰状态，深入分析了爆轰波结构，获得了稳定自持的爆轰状态，通过分析瞬态压力曲线，认为：非均相粉尘爆轰的DDT过程包括两个阶段：反应压缩阶段和反应冲击阶段。刘庆明等人[8]对硝基甲烷-铝粉-空气混合物的DDT过程进行了研究，并将多相爆轰划分为5个阶段，即：缓慢的反应压缩阶段、压缩波加速冲击波形成阶段、冲击反应过渡阶段、冲击反应-过爆轰阶段、爆轰阶段。

本研究针对铝粉-空气混合物的DDT过程进行实验研究，分析两相流在长直水平管道中DDT过程的具体参数以及铝粉-空气混合物的爆轰波结构。

2　实验系统

实验采用的水平多相燃烧爆炸实验系统主要包括：水平多相燃烧爆炸管、泄爆罐、喷粉扬尘系统、控

* **收稿日期**：2010-10-18；**修回日期**：2011-06-31
基金项目：国家自然科学基金(10772032)；爆炸科学与技术国家重点实验室自主课题(ZDKT08-2-6，YBKT09-1)
作者简介：陈　默(1981－)，女，博士，主要从事多相混合物爆燃转爆轰过程及爆轰状态研究.
E-mail：chen3955175@gmail.com
通讯作者：刘庆明(1963－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事多相云雾燃烧爆炸与爆轰理论与应用研究.
E-mail：qmliu@bit.edu.cn

制系统、点火系统、测试系统以及其它设备,如图 1 所示。

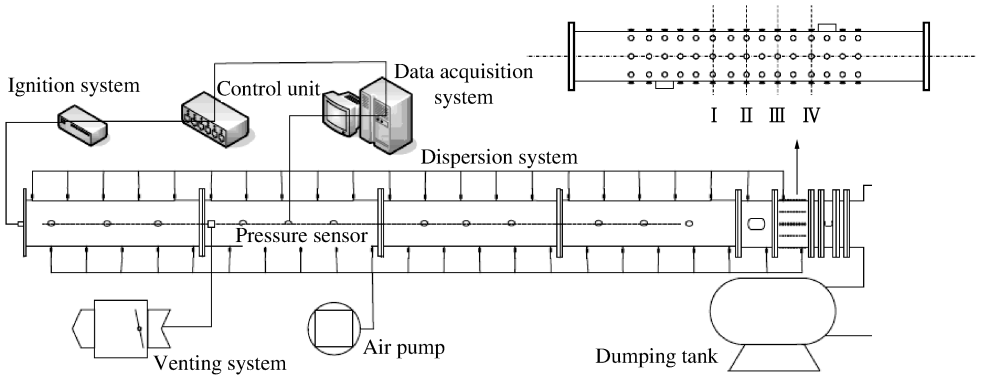


图 1　多相燃烧爆炸系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of multi-phase combustion system

水平多相燃烧爆炸管内径为 0.199 m,总长为 32.4 m,长径比 L/D 为 163。爆炸管道一端以法兰盘密封,另一端与体积为 13 m^3 的泄爆罐相连。在管道上方以 0.7 m 的间距均匀布置测试孔。在爆炸管内壁面共布置 17 个压力传感器,分别距爆炸管左端 1.75、3.15、4.55、6.65、8.05、9.45、10.85、12.25、13.65、15.05、17.15、19.25、21.35、23.45、25.55、26.95、29.61 m。在远离点火端的爆轰测试段(长 1.4 m)上,共有 15 个截面 118 个测试孔。在爆轰测试段上取 4 个截面,每个截面的环向均匀布置 8 个传感器,用于测试混合物的爆轰波结构。4 个截面距点火端的距离分别为 29.96、30.10、30.24、30.38 m。压力测试系统由 Kistler 压电式传感器、适配器及数据采集系统组成。喷粉扬尘系统由电磁阀、高压气室、手动阀门、半球形喷头组成,喷头与粉室相连,粉室经电磁阀与高压气室、手动阀门相连,最后手动阀门与空压机连接。测试系统由传感器、适配器和数据采集系统组成。喷粉系统、点火系统、测试系统均由控制系统进行控制。整套实验系统已经成功应用于相关研究[9-11],具有一定的可靠性。

实验用铝粉为片状,粒径为 50～100 μm,比表面积为 0.7 m^2/g,活性铝不小于 82%。喷粉系统的喷粉压力为 0.8 MPa,管内混合物的初始压力为 0.14 MPa,初始温度为 293 K。实验全部采用 40 J 电火花在管道起始端对铝粉-空气混合物进行点火。经过多次实验测定,在既保证混合物在管内已经比较均匀的分散,又有一定的湍流残存强度来维持铝粉悬浮状态的基础上,确定点火延迟时间为 370 ms。实验均进行 3 次,实验结果取平均值。

3　铝粉-空气混合物 DDT 过程

为了研究片状铝粉-空气混合物的燃爆特性,对其在长直管道中的 DDT 过程进行了研究。铝粉颗粒在管道内分散并与空气混合后,利用 40 J 电火花进行弱点火,形成压力波,压力波随传播距离增加而不断增强。当铝粉浓度为 505 g/m^3 时,不同测点处的压力演化曲线以及压力波成长轨迹如图 2 所示。通过分析压力波形,可以得到爆轰波超压曲线和速度曲线,如图 3 所示。不同铝粉浓度时,铝粉-空气混合物在管道内 DDT 过程的峰值超压和波速变化如图 4、图 5 所示。

3.1　DDT 过程分析

由图 2、图 3 可以看出,在此实验条件下,当铝粉浓度为 505 g/m^3 时,铝粉颗粒-空气混合物能够被 40 J 的电火花点燃,并且由于化学反应速率、湍流等因素的存在,火焰随管道距离的增长不断加强。燃烧波在传播过程中为压缩其前方混合物于 4.55 m 处产生压缩波,化学反应释放的能量不断加强压缩波;6.65 m 处,形成冲击波,波速为 420 m/s,爆压为 0.33 MPa,波速和爆压快速增长;至 12.25 m 处,波速为 1 025 m/s,爆压为 2.08 MPa;12.25 m 后,爆速和爆压产生阶跃;在 13.65 m 处,爆速突跃至 1 588 m/s,爆压增至 4.8 MPa,达到过爆轰状态;而后进入爆轰阶段,爆压略有降低,回弹至 5.17 MPa,

此振荡与爆轰管内的湍流及多相爆轰的复杂结构有关，而爆速维持在 1 513～1 895 m/s，均值为 1 622 m/s，略低于 CJ 理论爆速 1805 m/s，这是由于多相爆轰属于非定常爆轰，而 CJ 理论是基于理想爆轰状态，所以实验爆速低于理论爆速。

从图 2、图 3 还可以观察到多相爆轰的 5 个阶段，即：缓慢反应压缩阶段、压缩波加速冲击波形成阶段、冲击反应过渡阶段、冲击反应-过爆轰阶段、爆轰阶段。在缓慢反应压缩阶段，爆压和爆速均很低，此时压缩波形成并加速，使燃烧产物不断膨胀，并使压缩波追赶上湍流火焰。在压缩波加速冲击波形成阶段，压缩波的继续加速以及燃烧诱导压缩波、湍流、火焰加速的正反馈共同作用下，湍流诱导的燃烧速率快速增强，从缓慢的压缩阶段进入到爆速、爆压均快速上升的冲击波形成阶段。在冲击反应过渡阶段，超压随距离的变化不断振荡。在冲击反应向过爆轰过渡阶段，爆压和爆速均产生突跃。在爆轰阶段，铝粉-空气混合物表现出的典型特征为爆压随距离变化不断振荡，这与多相混合物爆轰的复杂性有关，尤其是在圆形管道中，湍流、管壁、胞格等多种因素的存在，共同导致了这种特性。

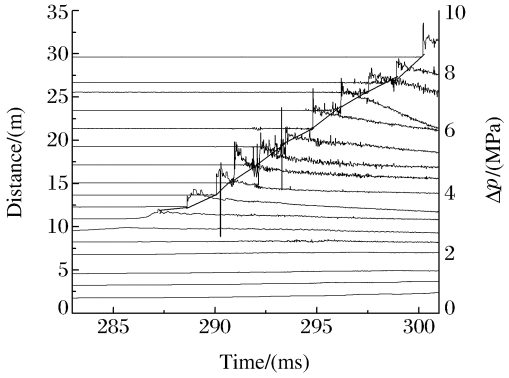


图 2 铝粉浓度为 505 g/m³ 时铝粉-空气混合物 DDT 过程中管内各测点压力随时间的变化

Fig. 2 Pressure histories during DDT process of aluminum-air mixture with aluminum concentration of 505 g/m³

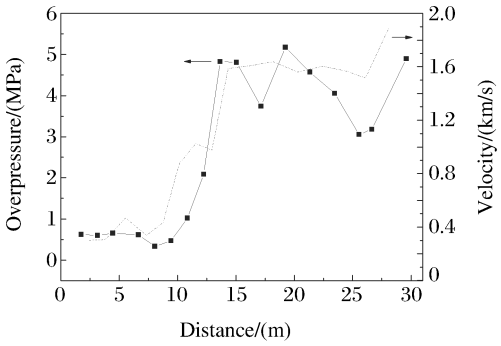


图 3 铝粉浓度为 505 g/m³ 时铝粉-空气混合物的峰值超压和爆速随管道距离的变化

Fig. 3 Variations of maximum overpressure and detonation velocity with propagation distance for aluminum-air mixture with aluminum concentration of 505 g/m³

3.2 浓度对 DDT 过程的影响

从图 4 和图 5 中的实验结果可以看出：当铝粉浓度为 184 g/m³ 时，铝粉-空气混合物未被引燃；铝

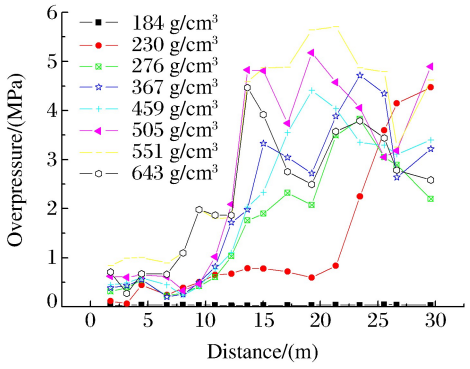


图 4 不同浓度时铝粉-空气混合物峰值超压随管道距离的变化

Fig. 4 Variations of maximum overpressure with propagation distance for aluminum-air mixture at different aluminum concentrations

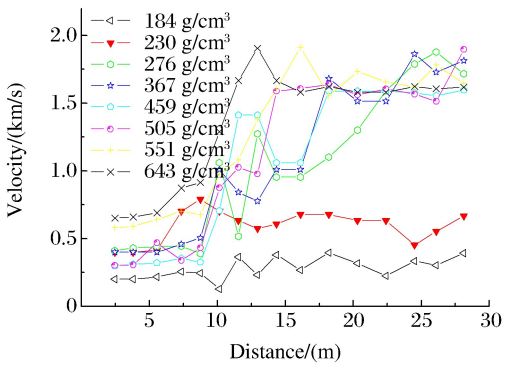


图 5 不同浓度时铝粉-空气混合物爆速随管道距离的变化

Fig. 5 Variations of detonation velocity with propagation distance for aluminum-air mixture at different aluminum concentrations

粉浓度为 230 g/m^3 时,爆速稳定,爆压稳定持续上扬,为爆燃状态;铝粉浓度为 276 g/m^3 时,从实测波形来看,在水平管道末端混合物刚好进入爆轰阶段,DDT 的成长过程跨越了整个管道长度,在测点范围外爆轰波能否自持以及是否稳定均未可见;浓度为 367、459、505、551、643 g/m^3 时,均能够在水平管道内完成爆燃向爆轰的转变,并且能够自持。

从上述实验结果可以看出,铝粉爆炸时存在最优浓度。对于本实验条件:铝粉-空气混合物爆轰的最优浓度为 551 g/m^3,其爆速和爆压的最大值分别为 1780 m/s 和 5.7 MPa;最低临界浓度为276 g/m^3,相应的爆速和爆压最大值分别为 1876 m/s 和 3.8 MPa。随着铝粉浓度增高,铝粉-空气混合物的爆速不断增加,完成 DDT 的距离不断变小;当铝粉浓度增高到最优浓度后,继续增加铝粉浓度,爆速降低。这是由于:当铝粉浓度较小时,混合物中相对氧气含量较高,即使铝粉完全燃烧,其总放热量也较少,因此峰值超压和爆速较小;在富氧情况下,随着铝粉浓度增加,参加燃烧的粉尘量增多,因而峰值超压和爆速随着铝粉浓度的增加而增大;当铝粉浓度达到最优浓度后,继续增加铝粉浓度时,混合物中的相对氧气含量较低,铝粉颗粒因供氧不足而不能完全燃烧,导致峰值超压和爆速开始缓慢下降。

4　铝粉-空气混合物爆轰波结构

通过对冲击波阵面以及圆周布置的传感器记录下来的波形振动频率进行分析,得出爆轰波结构。图 6～图 9 为铝粉浓度为 276 g/m^3 时 4 个截面(截面Ⅰ～截面Ⅳ)记录的铝粉-空气混合物爆轰波沿管壁圆周的瞬态压力曲线。

图 6、图 9 分别为距点火端 29.96 m 和 30.38 m 处管壁圆周布置的 8 个传感器记录的爆轰波。从图 6 中 1# 波形上可以清晰地看到单独的横波波头,图 9 中的 5# 波形也为横波波头,由此可以推断,铝粉浓度为 276 g/m^3 的铝粉-空气混合物的爆轰波为单头螺旋爆轰。从图 9 中的 5# 压力波形可看到,波峰是尖峭陡然上升的。这是由螺旋爆轰波阵面中三波点对撞产生的,即横波波头带来的波形陡然上升。

日本的 Takai[11] 实验研究了初始压力为 13.3 kPa 时 30%($2H_2+O_2$)与 70%Ar 混合气体的爆轰胞

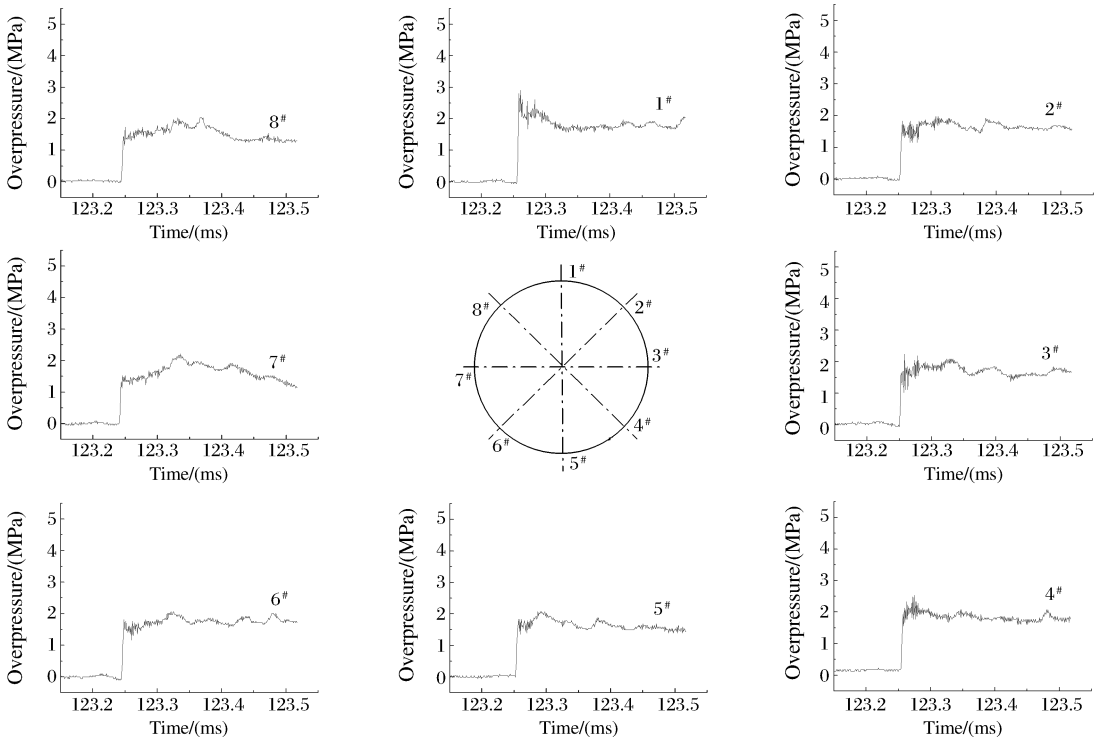


图 6　铝粉浓度为 276 g/m^3 时铝粉-空气混合物的压力瞬态变化曲线(截面Ⅰ,距点火端 29.96 m)

Fig. 6　Transient pressure curves of section Ⅰ at 29.96 m from the ignition end for the aluminum-air mixture with aluminum concentration of 276 g/m^3

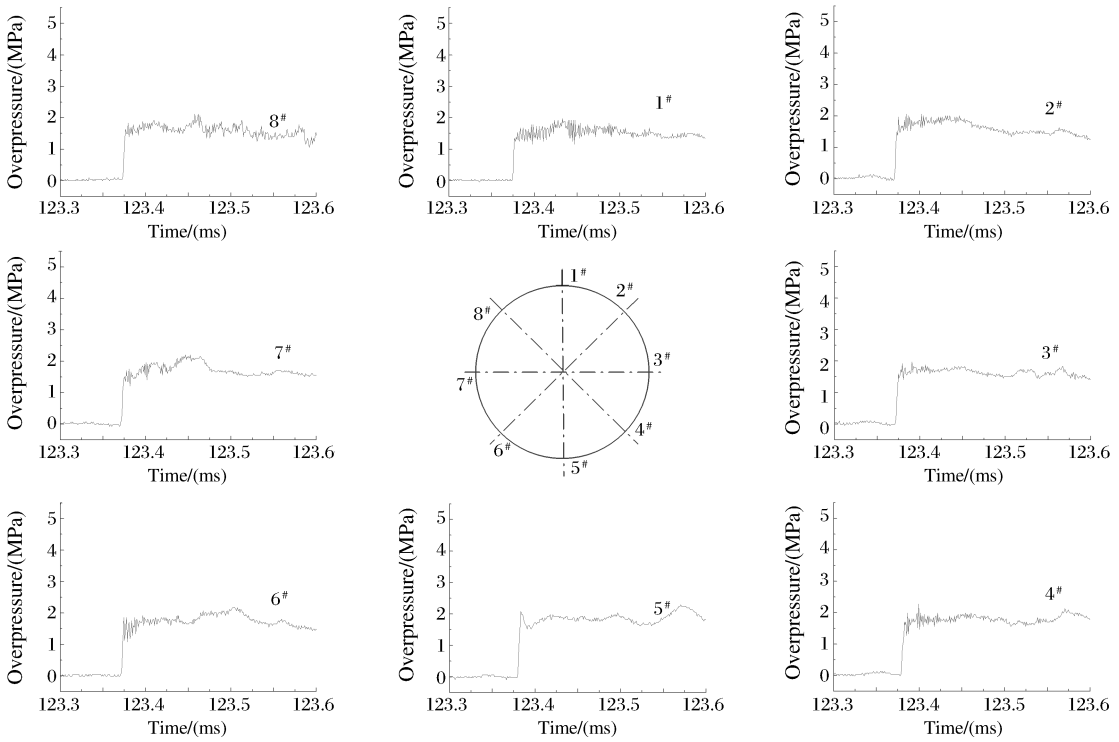


图 7 铝粉浓度为 276 g/m³ 时铝粉-空气混合物的压力瞬态变化曲线(截面Ⅱ,距点火端 30.10 m)

Fig. 7 Transient pressure curves of section Ⅱ at 30.10 m from the ignition end for the aluminum-air mixture with aluminum concentration of 276 g/m³

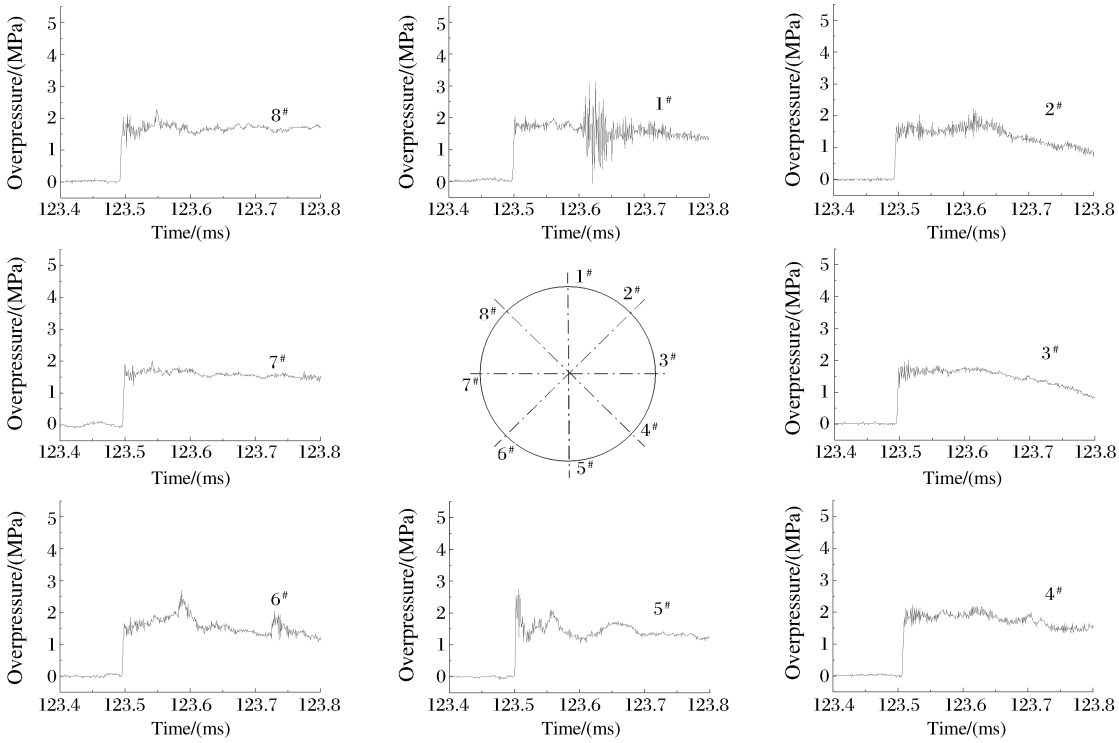


图 8 铝粉浓度为 276 g/m³ 时铝粉-空气混合物的压力瞬态变化曲线(截面Ⅲ,距点火端 30.24 m)

Fig. 8 Transient pressure curves of section Ⅲ at 30.24 m from the ignition end for the aluminum-air mixture with aluminum concentration of 276 g/m³

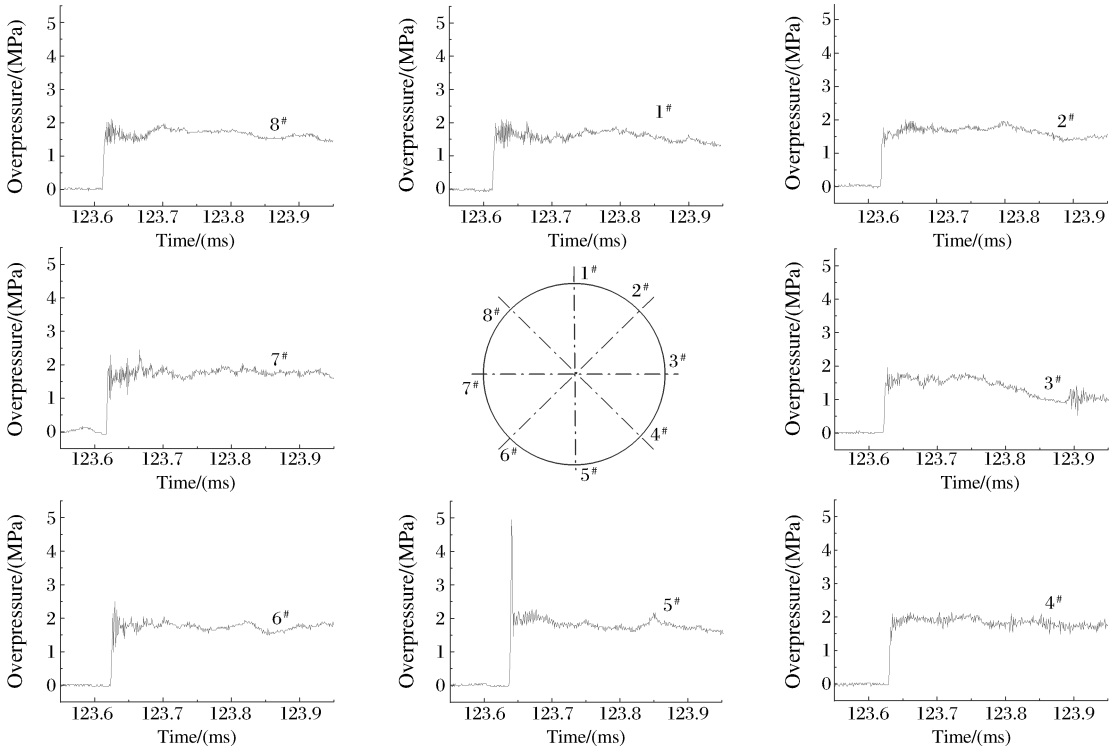


图 9　铝粉浓度为 276 g/m³ 时铝粉-空气混合物的压力瞬态变化曲线(截面Ⅳ,距点火端 30.38 m)

Fig. 9　Transient pressure curves of section Ⅳ at 30.38 m from the ignition end for the aluminum-air mixture with aluminum concentration of 276 g/m³

格。他们发现,三波点对撞之后,波速达 CJ 值的 1.5 倍,然后迅速下降,但不久又回升;在约 $L/5$ 处出现一个小高峰后又持续下降;接近末端时,速度又回升。此后,没有其他人观察到这种现象,但是局部达到最大值的现象却符合 Barthel[12-13] 提出的胞格结构引爆理论。这种横波带来的超压值突跃可解释为:碰撞后,在很高的压力和温度下发生吸热过程,波速下降;但是当压力和温度开始下降后,又开始发生放热反应,超压上升到一个峰值。

分析图 6～图 9 可知,截面Ⅰ中 1# 波形为横波波头,截面Ⅳ中 5# 波形为横波波头,截面Ⅱ、截面Ⅲ中波形变化不明显,但仍能根据波形变化判断出 5# 位置为波头。由此可以推断出单头螺旋爆轰波在圆管内的瞬时结构,见图 10 。爆轰波到达截面Ⅰ时,波头在圆管的正上方,当爆轰波到达截面Ⅳ时,波头位置已经运动到圆管的正下方。截面Ⅰ到截面Ⅳ之间的距离为 0.42 m,因此铝粉浓度为 276 g/m³ 的铝粉-空气混合物的胞格尺寸 λ 约为 0.48 m。

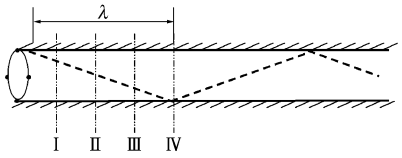


图 10　铝粉浓度为 276 g/m³ 时铝粉-空气混合物的单头螺旋爆轰波在圆形管道内的瞬时结构

Fig. 10　Instantaneous structure of single-head spinning detonation in the round tube for the aluminum-air mixture with aluminum concentration of 276 g/m³

5　结　论

对两相混合物而言,在长直水平管道中的反应受管道内的湍流、固体颗粒燃烧等诸多因素的影响。在爆轰阶段,爆轰波的螺旋特性及胞格结构导致峰值超压不断振荡。当铝粉浓度为 184 g/m³ 时,铝粉-空气混合物未被引燃;铝粉浓度为 230 g/m³ 时,在水平管道末端铝粉-空气混合物刚好进入爆轰阶段;铝粉浓度为 276、367、459、505、551 及 643 g/m³ 时,均能够在此水平管道内完成爆燃向爆轰的转变,并且能够自持。铝粉-空气混合物爆轰的最优铝粉浓度为 551 g/m³,最低临界浓度为 276 g/m³。在铝粉-空气混合物中观察到单头模式的爆轰,其胞格尺寸约为 0.48 m。

References:

[1] Veyssiere B. Structure of the detonations in gaseous mixtures containing aluminium particles in suspension [J]. Prog Astronaut Aeronaut, 1986, 106: 522-544.

[2] Peraldi O, Veyssiere B. Experimental study of the detonations in starch particles suspensions with O_2/N_2, H_2/O_2 and C_2H_4/O_2 mixtures [J]. Prog Astronaut Aeronaut, 1986, 106: 490-504.

[3] Veyssiere B, Manson N. Sur l'existence d'un second front de détonation des mélanges biphasiques hydrogène-oxygène-azote-particules d'dluminium [J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 1982, 295(2): 335-338.

[4] Veyssiere B. Double-front detonations in gas-solid particles mixtures [J]. Prog Astronaut Aeronaut, 1985, 94: 264-276.

[5] Zhang F, Grönig H. Transition to detonation in corn starch dust-oxygen and -air mixtures [J]. Combust Flame, 1991, 86: 21-32.

[6] Zhang F, Grönig H. Two-headed detonation in reactive particle-oxidizing gas flow [J]. Phys Fluids A, 1992, 4(10): 2308-2315.

[7] Zhang F, Grönig H. Spin detonation in reactive particles-oxidizing gas flow [J]. Phys Fluids A, 1991, 3(8): 1983-1990.

[8] Liu Q M, Bai C H, Jiang L, et al. Deflagration-to-detonation transition in nitromethane mist/aluminum dust/air mixtures [J]. Combust Flame, 2010, 157(1): 106-117.

[9] Chen M, Bai C H, Liu Q M. Experimental research of deflagration to detonation transition of epoxypropane-aluminum-air mixtures in large-scale tube [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(4): 359-364. (in Chinese)
陈 默, 白春华, 刘庆明. 大型水平管道中环氧丙烷-铝粉-空气混和物爆燃转爆轰的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2011, 25(4): 359-364.

[10] Liu Q M, Li X D, Bai C H. Deflagration to detonation transition in aluminum dust-air mixture under weak ignition condition [J]. Combust Flame, 2009, 156(4): 914-921.

[11] Takai R, Yoneda K, Hikita T. Study of detonation wave structure [A]//Proceedings of the 15th International Symposium on Combustion [C]. Pittsburgh, US, 1975: 69-78.

[12] Barthel H O. Reaction zone-shock front coupling in detonations [J]. Phys Fluids, 1972, 15(1): 43-50.

[13] Barthel H O. Predicted spacings in hydrogen-oxygen-argon detonations [J]. Phys Fluids, 1974, 17(8): 1547-1554.

Deflagration to Detonation Transition and Detonation Wave Structure of Aluminum-Air Mixture

CHEN Mo[1,2], BAI Chun-Hua[2], LIU Qing-Ming[2]

(1. *CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology, Beijing* 100083, *China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Motivated by the current interest in the mechanism of the deflagration to detonation transition (DDT), the DDT process and detonation wave structure of aluminum-air mixture are investigated experimentally by a large scale tube with length of 32.4 m and inner diameter of 0.199 m. The overall DDT process can be divided into slow reaction compression stage, pressure wave speed-up and shock wave formation stage, transfer from shock reaction to critical shock reaction, transfer from critical shock to overdriven detonation, and detonation stage. The optimal concentrations of mixtures in this experimental tube are obtained, and the critical concentration of DDT is also studied. Eight pressure gauges are well-distributed at each periphery of four certain sections in the 1.4 m long detonation testing tube for detonation wave testing. According to the test results, the detonation wave structure of aluminum-air mixture is analyzed, which shows single head mode.

Key words: deflagration to detonation transition; weak ignition; aluminum; self-sustained; detonation wave