文章编号：1000-5773(2011)04-0359-06

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*

陈 默，白春华，刘庆明

（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，对环氧丙烷-空气两相流云雾及环氧丙烷-铝粉-空气三相流云雾的爆燃转爆轰(DDT)过程进行了实验研究。对弱点火条件下多相混和物 DDT 过程的不同阶段特征进行了分析，对比研究了不同浓度时混和物的燃爆情况。结果表明：浓度为 513 g/m^3 的环氧丙烷-空气混和物及浓度为 237 和 643 g/m^3 的环氧丙烷-铝粉-空气混和物均能在管道中完成爆燃向爆轰的转变，进入自持爆轰阶段，其胞格尺寸分别为 0.28 和 0.50 m。

关键词：爆燃转爆轰；弱点火；环氧丙烷；铝；自持

中图分类号：O382.1 **文献标识码**：A

1 引 言

随着人们对气相混合物研究的不断深入，对气-固、气-液两相混和物的研究也已广泛开展。Borisov[1]、Zhang[2-4]等人利用不同内径、不同长度的水平管道开展了铝粉-空气燃烧转爆轰(Deflagration to Detonation Transition，DDT)实验，观察到了螺旋爆轰状态。惠君明等人[5]通过综合比较几种燃料的特性，得出了含铝混合炸药具有更好能量性能的结论。Mogi 等人[6]利用爆轰管对二甲基乙醚的爆炸及爆轰特性进行了实验研究，成功观察到 DDT 现象，获得了与实验结果一致的爆轰特性理论值，得到二甲基乙醚的爆轰浓度为 5.5%～9.0%。徐晓峰等人[7]在激波管中对环氧丙烷(Propylene Oxide，PO)-空气混和物爆轰波胞格结构的影响因素进行了分析，认为爆轰波胞格尺寸受初始温度的影响不大，胞格尺寸随初始压力降低而增大，在相对压力为负压的条件下得到了清晰的爆轰波胞格结构，起爆能的增大可以导致更加复杂的爆轰波次胞格结构出现。刘庆明等人[8]对硝基甲烷-铝粉-空气混和物的 DDT 过程进行了研究，并将多相爆轰划分为 5 个阶段：缓慢的反应压缩阶段、压力波加速及冲击波形成阶段、冲击反应过渡阶段、冲击反应-过爆轰阶段、爆轰阶段。

本研究针对环氧丙烷-空气混合物和环氧丙烷-铝粉-空气混合物的 DDT 过程进行实验研究，分析不同组分对多相流在长直水平管道中 DDT 过程的影响。

2 实验系统

实验采用北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室的水平多相 DDT 实验系统，如图 1 所示。

* **收稿日期**：2010-03-22；**修回日期**：2010-05-06

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基金(ZDKT08-2-6，YBKT09-1)

作者简介：陈 默(1981－)，女，博士，主要从事多相混和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，主要从事工业生产过程安全、燃料空气炸药等方面研究.
E-mail：qmliu@bit.edu.cn

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。系统包括：水平三相燃烧爆炸管、泄爆罐、喷粉扬尘系统、控制系统、点火系统、测试系统及其它设备。实验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。在水平燃烧爆炸管内壁面不同点处安装 17 个压力传感器，距管道左端分别为：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 和 29.61 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，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[8-9]，具有一定的可靠性。

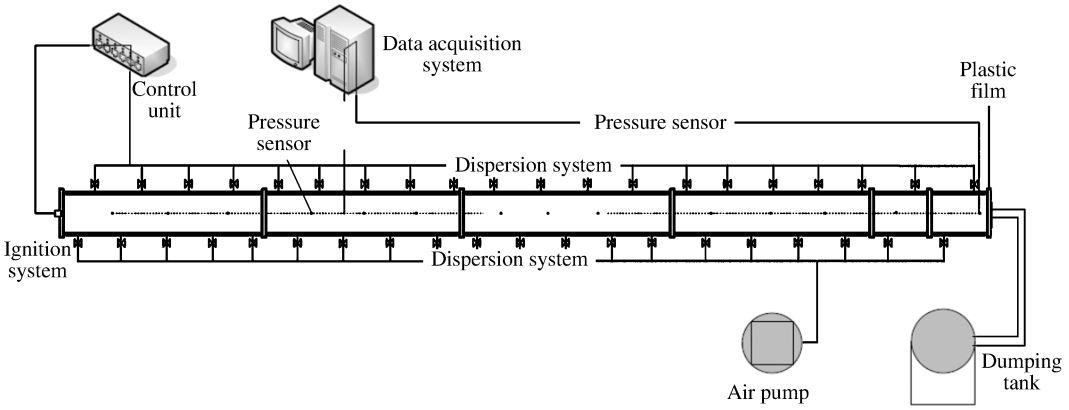


图 1 多相燃烧爆炸系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-phase combustion system

实验用铝粉为片状，粒径为 50～200 μm，盖水面积为 0.7 m^2/g，活性铝不小于 82%，其扫描电镜(Scanning Eelectron Microscope，SEM)图像如图 2 所示。环氧丙烷为分析纯。

实验全部采用 40 J 电火花在管道起始端对铝粉-空气混和物进行点火。喷粉系统的喷粉压力为 0.8 MPa，管内混和物的初始压力为 0.14 MPa。环氧丙烷-空气混和物的点火延迟时间为 430 ms，环氧丙烷-铝粉-空气混和物的点火延迟时间为 400 ms。初始温度为 293 K。

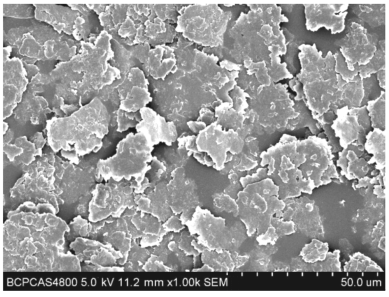


图 2 铝粉扫描电镜图像

Fig. 2 SEM image of the flake aluminum

3 环氧丙烷-空气混和物的 DDT 过程

环氧丙烷液雾通过喷雾系统进入管道内，经历 430 ms 的点火延迟后，环氧丙烷-空气两相悬浮流被 40 J 电火花点燃。随着距离的不断增长，压力波逐渐形成并放大，浓度为 513 g/m^3 的环氧丙烷-空气混和物在管道内各测点的压力变化如图 3 所示，爆速随距离的变化关系如图 4 所示，不同浓度时爆压随距离的变化关系见图 5。

3.1 DDT 过程分析

从图 4 和图 5 可以看出：环氧丙烷-空气混和物能够被 40 J 的电火花点燃，火焰随管道距离的增加不断加速；由于火焰加速、湍流、化学反应速率等因素的共同作用，在 4.45 m 处压缩波形成，并随管道距离的增大不断加强；10.85 m 处形成冲击波，波速从 199 m/s 增加至 1 035 m/s，爆压从 0.62 MPa 增加

至 1.43 MPa;至 12.25 m 处,爆速和爆压均稳定上扬;在 13.65 m 处,速度产生阶跃,达到 2 040 m/s,爆压增至 4.57 MPa,到达过爆轰状态;而后进入爆轰阶段,爆速维持在 1 760～1 977 m/s,爆压略有降低,继而反弹,其平均值维持稳定,爆轰波能够自持,这种振荡与爆轰管内的湍流及多相爆轰的复杂结构有关。

在自持爆轰阶段,传播的是多相爆轰波,其内部横波、入射波、马赫波相互作用,使爆轰波具有胞格结构特征。压力传感器测到的压力也反映出这种胞格结构特征,即压力波后出现明显的周期性压力脉动,周期约为 0.15 ms。在自持爆轰阶段,环氧丙烷-铝粉混和物的爆速在 1 760～1 977 m/s 范围内小幅波动,爆速的平均值为 1 869 m/s,因此爆轰波的胞格尺寸约为 0.28 m。

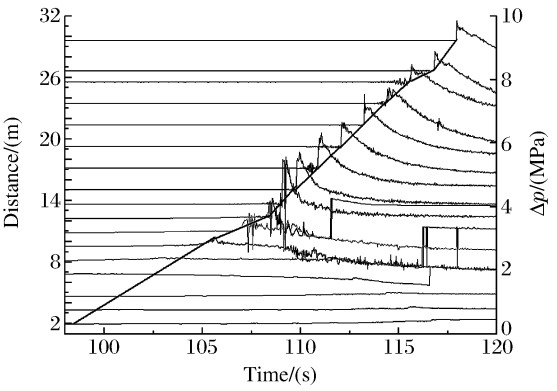


图 3　浓度为 513 g/m³ 的环氧丙烷-空气混合物 DDT 过程中管内各测点压力随时间的变化及压力波轨迹

Fig. 3　Pressure histories and pressure wave trajectory during DDT process of epoxypropane-air mixture (513 g/m³)

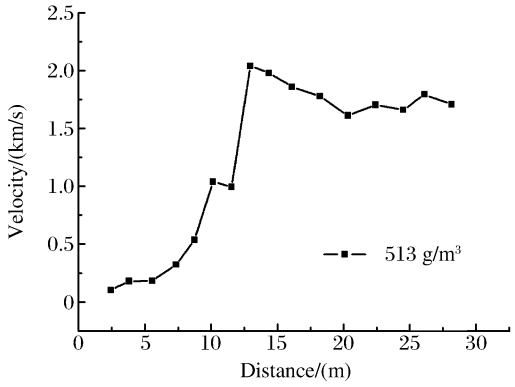


图 4　环氧丙烷-空气混合物的爆轰波速度随传播距离的变化关系

Fig. 4　Variation of detonation velocity with propagation distance for epoxypropane-air mixture

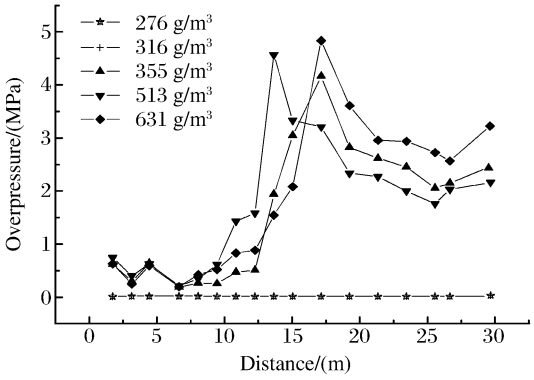


图 5　环氧丙烷-空气混合物的峰值超压随传播距离的变化关系

Fig. 5　Distribution of maximum overpressure along the tube for epoxypropane-air mixture

3.2　浓度对 DDT 过程的影响

从图 5 还可以看出:40 J 电火花未能点燃浓度为 276 和 316 g/m³ 的环氧丙烷-空气两相云雾;其它 3 种浓度(355、513、631 g/m³)的环氧丙烷-空气两相云雾均能够在到达过压爆轰后进入爆轰状态,并且均能够自持,进入过压爆轰状态的位置距点火端分别为 17.15、13.65 和 17.15 m。在爆轰阶段,浓度为 631 g/m³ 的环氧丙烷的峰值超压最高,浓度为 355 g/m³ 的次之,浓度为 513 g/m³ 的最低。因此,环氧丙烷-空气混合物爆轰的最优浓度为 631 g/m³,临界浓度为 316 g/m³。

实验得到的不同浓度的环氧丙烷-空气混和物爆轰波速度与 C-J 理论值基本一致,如图 6 所示。

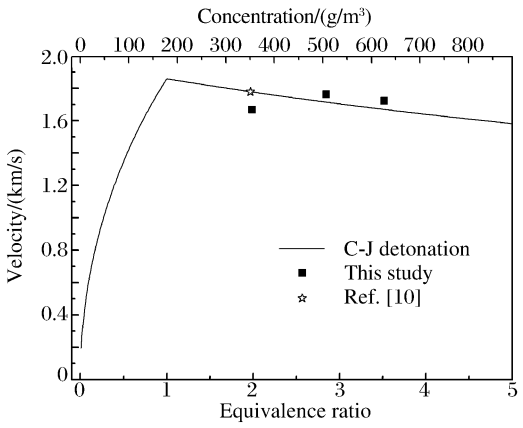


图 6　环氧丙烷-空气混合物的实验爆速和理论爆速

Fig. 6　Experimental and theoretical detonation velocities of epoxypropane-air mixture

多相混和物爆轰是非理想爆轰,其爆速应该略低于 C-J 理论爆速。由于实验中液雾沉降和管壁吸收导致实际参与反应的混和物浓度降低,因此实验爆速略高于理论爆速。

4 环氧丙烷-铝粉-空气混和物的 DDT 过程

当电火花点燃环氧丙烷-铝粉-空气三相混和物时,火花周围云雾颗粒的气-固-液界面处于高温状态,云雾及颗粒表面发生熔化、蒸发和扩散,点火过程得以自持。图 7 为环氧丙烷-铝粉-空气混和物(环氧丙烷浓度为 237 g/m^3,铝粉浓度为 643 g/m^3)的爆轰波速度随管道距离的变化关系。图 8 给出了不同浓度混和物的峰值超压随管道距离的变化关系。

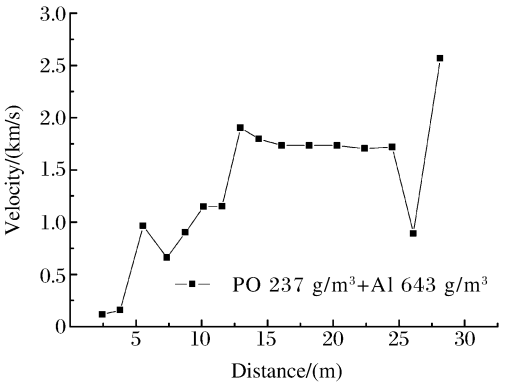


图 7 环氧丙烷-铝粉-空气混合物的爆轰波速度随传播距离的变化关系

Fig. 7 Variation of detonation velocity with propagation distance for epoxypropane-aluminum-air mixture

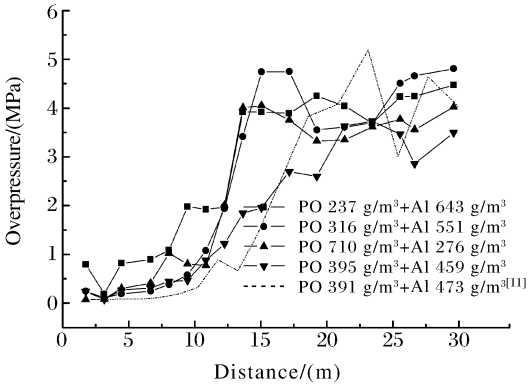


图 8 环氧丙烷-铝粉-空气混合物的峰值超压随传播距离的变化关系

Fig. 8 Distribution of maximum overpressure along the tube for epoxypropane-aluminum-air mixture

4.1 DDT 过程分析

由图 7 和图 8 可以看出:点火开始时,燃烧速度非常低,而后由于燃烧产物的膨胀,在 4.45 m 处,燃烧阵面前产生压缩波,反应压缩过程开始;在 6.65 m 处,压缩波形成引导冲击波,速度上升到 964 m/s,爆压上升到 0.89 MPa,直至 12.25 m 处,爆速和爆压均稳定上扬;在 13.65 m 处,爆速和爆压分别突跃至 2 354 m/s 和 3.92 MPa,测得的压力波呈现出陡峭尖峰形状,为典型的爆轰波信号,反应到达过压爆轰状态;进入爆轰状态后,爆轰波的峰值超压在 3.69～4.47 MPa 范围内振荡,平均值维持稳定,爆轰波能够自持。

环氧丙烷-铝粉-空气混和物的 DDT 过程经历了 1.75～4.45 m 的反应压缩阶段,在此阶段内,爆速及爆压变化缓慢。在 4.45 m 处产生压缩波,进入了爆速小幅上扬的压缩反应向冲击反应的过渡阶段。6.65 m 处,冲击波形成,进入冲击反应过渡阶段,此阶段与压缩反应阶段的区别在于,混合云雾的燃烧已经由点火引发过渡到由冲击波诱导,能量释放和流体高速运动是此阶段的主要影响因素。随着爆速和爆压的稳定上扬,从 12.25 m 处开始,爆速和爆压产生突跃,进入冲击反应向过压爆轰的过渡阶段,至 13.65 m 处,完成 DDT 过程。随后,峰值超压开始小幅振荡,这是由多相混和物爆轰状态的复杂性导致的,主要影响因素有湍流、螺旋爆轰、胞格结构等。压力波后出现明显的周期性压力脉动,脉动周期约为 0.28 ms,这是入射波压力、横波压力、马赫波压力交替出现的结果。爆速在 1 703～2 067 m/s 内维持稳定,均值为 1 796 m/s,因此环氧丙烷-铝粉-空气混和物的爆轰波胞格尺寸 λ 约为 0.5 m。

4.2 浓度对 DDT 过程的影响

图 8 为 4 种不同浓度的环氧丙烷-铝粉-空气混和物 DDT 过程中峰值超压随管道距离的变化曲线。对于这 4 种配比,除了第 4 种配比(环氧丙烷浓度为 395 g/m^3,铝粉浓度为 459 g/m^3)外,其它均能经历爆燃向爆轰的转变,进入爆轰阶段,并能够自持。3 种配比的最大峰值超压分别为 4.47、4.70 和

4.00 MPa,没有显著差异。第 4 种配比的 DDT 过程明显比其它 3 种配比的 DDT 过程长,在测试范围内未完成 DDT 过程。

图 8 还给出了蒋丽等人[10]对环氧丙烷-铝粉混合物(环氧丙烷浓度为 391 g/m^3,铝粉浓度为 473 g/m^3)DDT 过程的实验结果,其点火条件和初始压力与本实验相同,可以看出其 DDT 过程中的超压变化趋势与本实验结果一致。

环氧丙烷-铝粉-空气三相悬浮流云雾在水平长直管道内的 DDT 过程是由液、固组分共同作用的。在其爆轰范围内,更改固液组分比所带来的峰值超压变化不明显,但会导致 DDT 距离的明显变化。

对多相混和物而言,在长直水平管道中反应受管道内的湍流、液雾挥发、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的不断震荡。表 1 给出了环氧丙烷-铝粉两相混合物和环氧丙烷-铝粉-空气三相混和物 DDT 过程的研究结果比较,其中 x 为位置,D 为波速,p 为超压。

表 1　不同混和物 DDT 过程的比较

Table 1　DDT processes of two different mixture clouds

DDT stage	Epoxypropane mist-air			Epoxypropane mist-Al dust-air		
	x/(m)	D/(m/s)	p/(MPa)	x/(m)	D/(m/s)	p/(MPa)
Slow reaction compression stage	[1.75,4.45]	[100,199]	[0.74,0.62]	[1.75,4.45]	[116,157]	[0.79,0.82]
Pressure wave speed-up and shock-wave formation stage	(4.45,10.85]	(199,1035]	(0.62,1.43]	(4.45,6.65]	(157,964]	(0.82,0.89]
Transition stage from shock wave reaction to critical shock	(10.85,12.25]	(1035,1419]	(1.43,1.59]	(6.65,12.25]	(964,1147]	(0.89,1.96]
Transition stage from critical shock to overdriven detonation	(12.25,13.65]	(1419,2040]	(1.59,4.57]	(12.25,13.65]	(1147,1902]	(1.96,3.92]
Transition course	>13.65	(1760,1977]	(1.79,3.30]	>13.68	(1703,2067]	(3.69,4.47]
Detonation state	Self-sustain			Self-sustain		

5　结　论

环氧丙烷-空气混和物以及环氧丙烷-铝粉-空气混和物均能在 32.4 m 的长直水平管道中经历缓慢的反应压缩阶段、压力波加速及冲击波形成阶段、冲击反应过渡阶段、冲击反应向过压爆轰过渡阶段、爆轰阶段,并且爆轰能够自持。浓度为 513 g/m^3 的环氧丙烷-空气混和物和浓度分别为 237 和 643 g/m^3 的环氧丙烷-铝粉-空气混和物均能在管道中完成爆燃向爆轰的转变,进入自持爆轰阶段,其胞格尺寸分别为 0.28 和 0.50 m。

References:

[1] Borisov A A, Khasainov B A, Veyssiere B. On Detonation of Aluminum Dust in Air and Oxygen [J]. Sov J Chem Phys, 1992, 10(2): 369-402.

[2] Zhang F, Grönig H. Transition to Detonation in Corn Starch Dust-Oxygen and -Air Mixtures [J]. Combust Flame, 1991, 86(1-2): 21-32.

[3] Zhang F, Grönig H. Two-Headed Detonation in Reactive Particle-Oxidizing Gas Flow [J]. Phys Fluids A, 1992, 4(10): 2308-2315.

[4] Zhang F, Grönig H. Spin Detonation in Reactive Particles-Oxidizing Gas Flow [J]. Phys Fluids A, 1991, 3(8): 1983-1990.

[5] Hui J M, Liu R H, Ge G L. Study on Increasing the Power of FAE (Ⅰ)—Selection of High Energy Fuels [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1995, 19(5): 472-476. (in Chinese)
惠君明,刘荣海,葛桂兰. 提高 FAE 威力的研究(Ⅰ)——高能量燃料的选择 [J]. 南京理工大学学报, 1995, 19(5):

472-476.

[6] Mogi T, Horiguchia S. Explosion and Detonation Characteristics of Dimethyl Ether [J]. J Hazard Mater, 2009, 164(1): 114-119.

[7] Xu X F, Xie L F, Peng J H, et al. Study on the Detonation Cellular Structure of Propylene Epoxide-Air [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 158-162. (in Chinese)
徐晓峰, 解立峰, 彭金华, 等. 环氧丙烷-空气混合物爆轰波胞格结构的研究 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 158-162.

[8] Liu Q M, Bai C H, Jiang L, et al. Deflagration-to-Detonation Transition in Nitromethane Mmist/Aluminum Dust/Air Mixtures [J]. Combust Flame, 2010, 157(1): 106-117.

[9] 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.

[10] Jiang L, Bai C H, Liu Q M. Experimental Study on DDT Process in 3-Phase Suspensions of Gas/Solid Particle/Liquid Mist Mixture [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(2): 588-592. (in Chinese)
蒋 丽, 白春华, 刘庆明. 气/固/液三相混合物燃烧转爆轰过程实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(2): 588-592.

Experimental Research of Deflagration to Detonation Transition of Epoxypropane-Aluminum-Air Mixtures in Large-Scale Tube

CHEN Mo, BAI Chun-Hua, LIU Qing-Ming

(*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 experiments of epoxypropane-air mixture and epoxypropane-aluminum-air mixture are carried out by a large-scale tube (32.4 m long and 0.199 inner diameter). The processes of DDT in multi-phase clouds are analyzed, and the mixtures with different concentrations are compared. The self-sustained detonation waves are formed in the epoxypropane-air mixture with epoxypropane concentration of 513 g/m^3 and epoxypropane-aluminum-air mixture with epoxypropane and aluminum concentrations of 237 and 643 g/m^3, and moreover the cell size of the detonation are 0.28 and 0.5 m, respectively.

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