

文章编号: 1001-1455(2010)06-0588-05

气/固/液三相混合物燃烧转爆轰过程实验研究*

蒋丽^{1,2}, 白春华¹, 刘庆明¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国民航管理干部学院, 北京 100102)

摘要: 利用多相燃烧爆炸实验系统, 通过高压喷粉/喷雾以及高能点火等过程, 对化学当量比条件下 3 种典型燃料空气炸药, 即硝基甲烷/铝粉/空气、硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气三相混合物的燃烧转爆轰过程进行了实验研究, 同时根据实验结果对比了 3 种三相混合物的燃爆性能。得到了三相悬浮混合物燃烧转爆轰过程的宏观规律以及三相混合物燃爆性能随质量浓度变化的规律。

关键词: 爆炸力学; 燃爆性能; 燃烧转爆轰; 气/固/液三相混合物; 燃料空气炸药

中图分类号: O381; TJ41 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

1 引言

20 世纪 50 年代末 60 年代初, 美国就开始了对于爆炸场压力高、冲量大、杀伤威力强的燃料空气炸药 (fuel air explosive, 简称 FAE) 的研究。FAE 武器主要工作原理是 FAE 燃料经过抛撒, 与周围空气迅速混合, 形成均匀的多相混合云雾, 在适当的能量激励下发生爆轰, 利用产生的爆轰波、冲击波、地震波、辐射热等效应对目标进行毁伤。经过不断的摸索, 学者们一致认为: FAE 燃料主要由液态燃料 (如硝基甲烷、硝酸异丙酯、乙醚、环氧丙烷、环氧乙烷等)、固态燃料 (如铝粉、镁粉等) 以及敏化剂组成。

随着研究的不断深入, 进一步提高 FAE 武器的性能成为研究的热点。F. Sauer 等^[1]、R. T. Sedgwick 等^[2]、惠君明等^[3-5]、张陶等^[6-7]、王文京^[8]、熊祖钊等^[9] 对爆炸场超压分布进行了理论计算和实验研究、对爆炸威力进行了评估。本文中利用大型水平多相燃烧转爆轰系统, 在当量比条件下, 对 3 种典型 FAE 燃料 (硝基甲烷/铝粉/空气、硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气) 的燃烧转爆轰过程进行实验研究。并在气/固两相^[10-17]、气/液两相^[18-22] 混合物燃烧转爆轰过程研究的基础上, 对气/固/液三相混合物的燃烧转爆轰过程进行分析, 揭示气/固/液三相混合云雾燃烧转爆轰的内在规律, 同时分析不同种类三相混合物燃爆性能之间的差异。

2 实验系统介绍

实验系统主要包括水平多相燃烧爆炸管、喷雾/喷粉系统、点火系统、测试系统、控制系统等。水平多相燃烧爆炸管内径为 0.2 m, 总长 28 m, 中间用法兰盘连接。在管道两侧以 0.7 m 的间距均匀装有 40 套喷粉/喷雾扬尘系统。在管道上方均匀布置有测试孔, 间距为 0.7 m。整条实验管道的一端由法兰盘密封, 另一端与体积为 13 m³ 的泄压罐相连, 全部管道安放在组合支架上。喷粉、喷雾系统能够确保在水平燃烧爆炸管内形成均匀弥散、悬浮时间达到秒级的混合云雾; 点火过程为 DX 高能点火, 发火电压约 2 kV, 单次储能 40 J; 测试系统由 Kistler 压电式传感器、适配器、数据采集系统组成, 用于测试气/固/液三相混合云雾在燃烧转爆轰过程中的瞬态压力; 控制系统用于控制喷射系统的开启、点火。实验系统的详细介绍见文献^[23]。

* 收稿日期: 2009-08-18; 修回日期: 2009-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(10772032)

作者简介: 蒋丽(1977—), 女, 博士, 讲师。

3 实验结果及分析

利用上述实验装置进行当量比条件下的硝基甲烷/铝粉/空气、硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气三相混合物燃烧转爆轰过程的研究。实验用铝粉为片状,盖水面积 $0.7 \text{ m}^2/\text{g}$,活性铝质量分数不小于 82%,粒度分布为当筛网孔径为 $45 \mu\text{m}$ 时,筛上料(质量分数)不大于 0.5%,筛网孔径为 $56 \mu\text{m}$ 时,筛上料(质量分数)不大于 0.3%。硝基甲烷、硝酸异丙酯、乙醚均是从市场购买的分析纯。当量比条件下硝基甲烷/铝粉/空气、硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气中可燃液体的质量浓度分别为 458、324、162 g/m^3 ,铝粉的质量浓度为 473 g/m^3 。

3.1 当量比条件下硝基甲烷/铝粉/空气三相混合物燃烧转爆轰过程

在实验过程中,喷雾、喷粉压力均为 0.8 MPa,点火延迟为 380 ms,点火条件为电火花引燃管道左端 2.1 m 范围内浓度为 391 g/m^3 的环氧丙烷/空气两相云雾,用环氧丙烷/空气两相混合云雾燃烧产生的平面波引燃硝基甲烷/铝粉/空气三相悬浮混合物。布置在水平燃烧爆炸管内壁面不同点处的压力传感器一共 15 个,距管道左端分别为 2.45、3.85、5.25、6.65、8.05、9.45、10.85、12.25、13.65、17.15、19.25、21.35、23.45、25.55 和 27.65 m,用来测试三相混合物燃烧转爆轰过程中的瞬态压力。

表 1 为上述条件下,当量比浓度的硝基甲烷/铝粉/空气三相混合云雾燃烧转爆轰过程实验测试结果,表中 x 为压力传感器距管道左端距离、 p_{\max} 为峰值超压、 t 为引导冲击波到达时间、 v_i 为平均速度、 $v_i = (x_{i+1} - x_i)/(t_{i+1} - t_i)$, i 表示实验序号。表 1 揭示了硝基甲烷/铝粉/空气三相悬浮云雾燃烧转爆轰 (DDT) 的宏观过程。

表 1 当量比条件下硝基甲烷/铝粉/空气三相混合物爆轰参数实验结果

Table 1 Experimental results of DDT process in stoichiometric nitromethane/aluminum powder/air mixture

序号	x/m	p_{\max}/MPa	t/ms	$v_i/(\text{km}/\text{s})$	序号	x/m	p_{\max}/MPa	t/ms	$v_i/(\text{km}/\text{s})$
1	2.45	0.09	74.11	0.14	9	13.65	2.93	93.42	1.67
2	3.85	0.17	84.32	0.46	10	17.15	3.02	95.51	1.34
3	5.25	0.35	87.36	0.99	11	19.25	3.43	97.08	1.94
4	6.65	0.85	88.77	1.08	12	21.35	3.85	98.16	1.59
5	8.05	1.32	90.07	1.35	13	23.45	3.14	99.48	1.65
6	9.45	1.65	91.10	2.13	14	25.55	2.98	100.75	1.80
7	10.85	1.12	91.76	1.77	15	27.65	2.83	101.92	
8	12.25	1.76	92.55	1.62					

当电火花点燃环氧丙烷云雾时,火花周围的云雾颗粒处于高温状态,云雾颗粒表面发生剥离、破碎、雾化,随后发生蒸发、扩散,以气相反应的形式进行燃烧,点火过程得以维持自动传播。起初,燃烧速度非常低。随着燃烧产物的膨胀,在燃烧阵面前产生一个压缩波,因此形成了前驱压缩波阵面和火焰阵面两波三区结构。由于是电火花点火,火焰以及前驱的压缩波都是以球面的形式向外传播的。当碰到管壁时,管壁使前驱压缩波运动受阻,管壁附近处流场湍流强度骤然增大,且在此出现回流区,并使得火焰面发生变形,以反射波的形式快速经过点火头下端未燃区域,并最终以前驱压缩波的形式向硝基甲烷/铝粉/空气三相悬浮云雾区域流动。

当环氧丙烷燃烧产生的前驱压缩平面波进入硝基甲烷/铝粉/空气三相悬浮混合物区域时,就会形成一个衰减的透射波。透射波过后,就会压缩周围的硝基甲烷雾滴以及片状铝粉颗粒,使得硝基甲烷雾滴进一步雾化后蒸发,铝粉表面熔化、蒸发、汽化,最终导致硝基甲烷/铝粉/空气三相混合物以气相的形式进行燃烧。燃烧产物膨胀压缩周围介质形成了压缩波,且与化学反应互相耦合,使得压缩波不断增强。因此,在距离点火端 2.45~6.65 m 之间,由于压缩波的形成,压力有所上升,但上升速度缓慢,在 6.65 m 处,压力仅为 0.85 MPa;当压缩波传播到 8.05 m 处时,压力突跃到 1.32 MPa,压缩波在此处得到了增强;直到 9.45 m 处,压力为 1.65 MPa,此刻速度达到 1.35 km/s,反应压缩过程结束,进入过渡

过程。此后,燃烧过程由缓慢的反应压缩阶段进入过渡过程,燃烧速度突然从 1.35 km/s 增加到 2.13 km/s,燃烧产物迅速膨胀导致反应区内压力从 1.65 MPa 降低到 1.12 MPa,过渡过程结束。随后进入快速的反应冲击阶段,由于化学反应与冲击波耦合加剧,导致反应速率加快,燃烧管内压力逐渐升高,直到在测点 21.35 m 处,测试所得的超压峰值达到最大值 3.85 MPa,爆轰波速度也达到了 1.94 km/s,过压爆轰状态出现。随后,爆轰波速度逐渐趋于稳定,火焰阵面追赶上了爆轰波阵面,自持稳定的爆轰过程得以实现。

从表 1 可以看出,爆炸峰值超压在 21.35 m(长径比 $L/D=107$)处达到最大值 3.85 MPa,具有明显的爆轰特征。

同时,在相同的实验条件下,还分别进行了当量比条件下硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气三相混合物燃爆实验,实验结果一致表明,气/固/液三相混合物燃烧转爆轰的宏观过程主要包括反应压缩过程、过渡过程、反应冲击过程以及爆轰过程。

3.2 不同三相混合物燃爆性能对比

为了对比不同 FAE 燃料的燃爆性能,将上述 3 种实验结果进行分析。图 1、2 分别为 3 种三相混合物在燃爆过程中,爆轰超压峰值、爆轰波速度沿管长的分布。

从图 1 可以看出,3 种三相混合物的燃爆过程均经历了反应压缩过程、过渡过程、反应冲击过程以及爆轰过程。从爆轰成长过程来看,硝基甲烷/铝粉/空气、硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气分别在 21.35 m ($L/D = 106.75$)处、19.25 m ($L/D = 96.25$)处、17.15 m ($L/D=85.75$)处达到了爆轰状态。

从图 2 可以看出,与硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气三相混合物相比,硝基甲烷/铝粉/空气三相混合物爆轰波速度在过压爆轰趋于稳定后,震荡较大,主要是由于硝基甲烷/铝粉/空气三相混合物还未达到稳定爆轰状态,而硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气三相混合物均已达到稳定爆轰状态。原因可能是,在标准状态下,硝基甲烷闪点较高(35℃),饱和蒸汽压较低(3.71 kPa),粘度较高(648 g/s),而硝酸异丙酯、乙醚的闪点相对较高(分别为 12℃、-45℃),饱和蒸汽压也相对较高,粘度较低。所以在相同的喷雾条件下,硝酸异丙酯、乙醚相较硝基甲烷来说,易于在管道内形成均匀稳定的悬浮混合云雾,闪点较低也易于发生燃烧爆炸,易于达到稳定爆轰。实验用的水平管道长 28 m,管径 200 mm,因此直到管内 27.65 m(长径比 $L/D=138.25$)处,硝基甲烷/铝粉/空气混合物爆轰波速度较硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气混合物,波动比较大,尚未达到稳定爆轰状态。

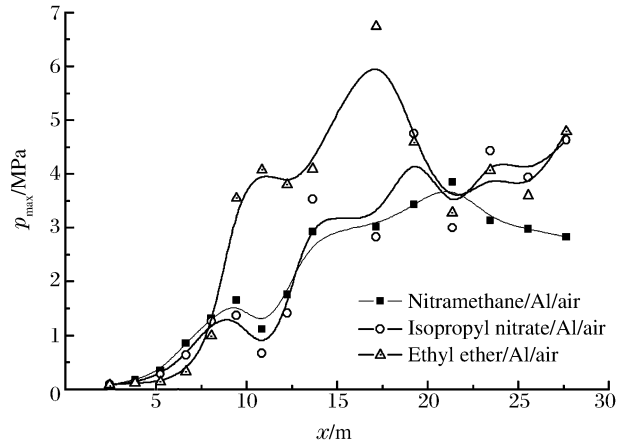


图 1 3 种三相混合物燃爆过程中爆轰超压峰值沿管长的分布
Fig. 1 Maximum overpressure peak with propagation distance during the DDT process in 3 stoichiometric gas/solid/liquid mixtures

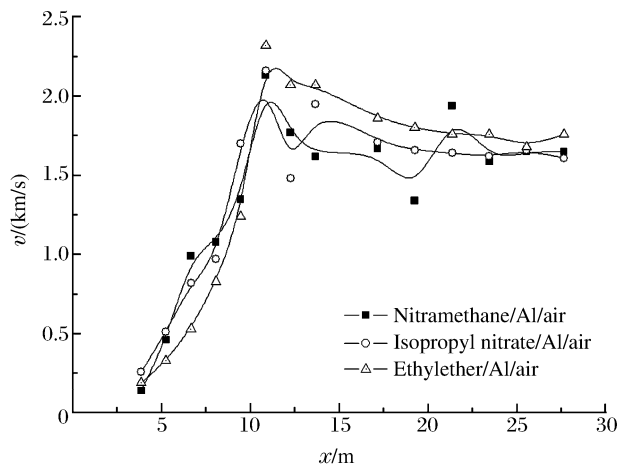


图 2 3 种三相混合物燃爆过程中爆轰波速度沿管长的分布
Fig. 2 Wave velocity with distance during the DDT process in 3 stoichiometric gas/solid/liquid mixtures

硝基甲烷/铝粉/空气、硝酸异丙酯/铝粉/空气、乙醚/铝粉/空气三相混合物的质量浓度分别为465、399、318 g/m³,对应的稳定爆轰波速度分别为1.63、1.68、1.75 km/s,由此可以看出,随着三相混合物质量浓度的减小,稳定爆轰波速度增大。

4 结 论

(1)大型水平管道三相混合物 DDT 的宏观过程主要包括反应压缩过程、过渡过程、反应冲击过程以及爆轰过程。(2)大型水平管道三相混合物燃爆实验中,混合物质量浓度越小,稳定爆轰波速度越大。

参考文献:

- [1] Sauer F, Stubbs T. Application of FAE technology to the design of nuclear air-blast simulation experiments[R]. AD-A047385, 1977.
- [2] Sedgwick R T, Krata H R. Fuel air explosives: A parametric investigation[R]. AD-A159 177, 1976.
- [3] 惠君明,刘荣海,葛桂兰.提高FAE威力的研究(I)——高能燃料的选择[J].南京理工大学学报,1995,19(5):472-476.
HUI Jun-ming, LIU Rong-hai, GE Gui-lan. 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.
- [4] 惠君明,张正才.提高FAE威力的研究(II)——云雾起爆与爆轰的讨论[J].南京理工大学学报,1995,19(6):493-496.
HUI Jun-ming, ZHANG Zheng-cai. Study on increasing the power of FAE(II)—The discussion of cloud initiation and detonation[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1995,19(6):493-496.
- [5] 惠君明,刘荣海,彭金华,等.燃料空气炸药威力的评价方法[J].含能材料,1996,4(3):123-128.
HUI Jun-ming, LIU Rong-hai, PENG Jin-hua, et al. An evaluation method of FAE power[J]. Energetic Materials, 1996,4(3):123-128.
- [6] 张陶,惠君明,杨东来,等.云雾爆炸场超压的威力研究[J].弹道学报,2003,15(3):33-37.
ZHANG Tao, HUI Jun-ming, YANG Dong-lai, et al. Power investigation of overpressure on the FAE blast field[J]. Journal of Ballistics, 2003,15(3):33-37.
- [7] 张陶,惠君明,解立峰,等.FAE爆炸场超压与威力的实验研究[J].爆炸与冲击,2004,24(2):176-181.
ZHANG Tao, HUI Jun-ming, XIE Li-feng, et al. Experimental research on the overpressure and power in the FAE blast field[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):176-181.
- [8] 王文京.燃料空气炸药能量输出的讨论[J].兵工学报火化工分册,1995(2):47-49.
WANG Wen-jing. Discussion of FAE power[J]. Journal of China Ordnance, 1995(2):47-49.
- [9] 熊祖钊,白春华,张奇,等.FAE武器威力评价方法探讨[J].爆破,2001,18(2):83-86.
XIONG Zu-zhao, BAI Chun-hua, ZHANG QI, et al. Study on the evaluation methods of FAE-weapon strength[J]. Blasting, 2001,18(2):83-86.
- [10] Friedman R, Macek A. Ignition and combustion of aluminum particles in hot ambient gases[J]. Combustion and Flame, 1962,6:9219.
- [11] Borisov A A, Khasatnov B A, Veyssiere B, et al. On detonation of aluminum dust in air and oxygen[J]. Soviet Journal of Chemical Physics, 1992,10(2):369-402.
- [12] 浦以康,胡山,李可意.粉尘火焰加速现象的实验研究[J].爆炸与冲击,1995,15(2):97-106.
PU Yi-kang, HU Shan, LI Ke-yi. Experimental studies on the Phenomena of dust flame acceleration[J]. Explosion and Shock Waves, 1995,15(2):97-106.
- [13] Lee D, Sichel M. The chapman-jouguet condition structure of detonations in dust-oxidizer mixtures[C]//Dynamics of Explosion, Vol. 106, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA. New York, 1986:501-521.
- [14] Zhang F, Murray S B, Gerrard K B. Aluminum particles-air detonation at elevated pressures[J]. Shock Waves, 2006,15:313-324.
- [15] 洪滔,秦承森.爆轰波管中铝粉尘爆轰的数值模拟[J].爆炸与冲击,2004,24(3):97-106.

- HONG Tao, QIN Cheng-sen. Numerical simulation of dust detonation of aluminum powder in explosive tubes[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004,24(3):97-106.
- [16] 刘庆明,范宝春,陈志华,等. 铝粉湍流火焰诱导激波现象的实验研究[J]. *实验力学*,1997,12(3):376-382.
LIU Qing-ming, FAN Bao-chun, CHEN Zhi-hua, et al. Experimental study on the shock wave induced by turbulent flame in aluminum dust-air mixture[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1997,12(3):376-382.
- [17] LIU Qing-ming, LI Xiao-dong, BAI Chun-hua. Deflagration to detonation transition in aluminum dust-air mixture under weakignition condition[J]. *Combustion and Flame*, 2009(156):914-921.
- [18] Dabora E K, Ragland K W, Nicholls J A. Drop size effects in spray detonations[C]//12th Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh: Academic Press, 1969:19-26.
- [19] 范宝春,姚海霞,陈志华,等. 气云爆轰[J]. *气动实验与测量控制*,1996,10(2):9-16.
FAN Bao-chun, YAO Hai-xia, CHEN Zhi-hua, et al. Spray detonation[J]. *Aerodynamic Experiment and Measurement & Control*, 1996,10(2):9-16.
- [20] 姚干兵,解立峰,刘家骢. 液体碳氢燃料云雾爆轰特性的实验研究[J]. *爆炸与冲击*,2006,26(6):543-549.
YAO Gan-bing, XIE Li-feng, LIU Jia-cong. Experimental study on detonation characteristics of liquid fuel-air mixtures[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006,26(6):543-549.
- [21] 宋述忠,彭金华,陈网桦,等. 硝酸异丙酯与空气混合物的爆轰性能研究[J]. *爆破器材*,2002,31(1):4-6.
SONG Shu-zhong, PENG Jin-hua, CHEN Wang-hua, et al. Study on ignition and detonation properties of nitric ether-air mixture[J]. *Explosive Materials*, 2002,31(1):4-6.
- [22] 解立峰,刘家骢,果宏. 三种燃料-空气混合物爆轰的直接引爆实验研究[J]. *弹道学报*,2002,14(3):5-9.
XIE Li-feng, LIU Jia-cong, GUO Hong. Experimental study on the direct initiation of detonation in several fuel-air mixtures[J]. *Journal of Ballistics*, 2002,14(3):5-9.
- [23] 李小东. 固体燃料-空气混合物爆炸过程研究[D]. 北京:北京理工大学,2007.

Experimental study on DDT process in 3-phase suspensions of gas/solid particle/liquid mist mixture*

JIANG Li^{1,2}, BAI Chun-hua¹, LIU Qing-ming¹

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

2. *Civil Aviation Management Institute of China, Beijing 100102, China*)

Abstract: The deflagration to detonation transition (DDT) processes in stoichiometric three-phase fuel/air explosives, which include nitromethane/aluminum powder/air, isopropyl nitrate/aluminum powder/air and ethyl ether/aluminum powder/air, were studied experimentally by using the multi-phase combustion and detonation experimental system. And the combustion and detonation performances of different 3-phase mixtures were analyzed. The general regulation of the 3-phase mixture DDT was obtained. The results show that the combustion and detonation performances of the 3-phase mixture vary with the mass concentration.

Key words: mechanics of explosion; combustion and detonation performance; deflagration to detonation transition; gas/solid/liquid 3-phase mixture; fuel air explosive

* Received 18 August 2009; Revised 4 November 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10772032)

Corresponding author: JIANG Li, jiangli3199@163.com