

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.05.005

液固复合 FAE 云雾状态影响因素的试验研究*

李 席 王伯良 韩 早 王兴龙
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 通过野外静爆试验,采用高速摄影技术观测液固复合燃料空气炸药(FAE)云雾发展过程,研究燃料种类和比药量对液固复合燃料空气炸药云雾状态的影响。结果表明:液态燃料为 B 燃料时,云雾均匀性更好;在一定范围内,比药量只影响燃料轴向分散。实验证明:液态燃料为 B 燃料时的液固复合燃料,比药量为 2.50% 左右时,获得的云团状态最佳。

[关键词] 燃料空气炸药;爆炸抛撒;云雾状态

[分类号] TQ560

引言

二次引爆型 FAE(燃料空气炸药)是在中心抛撒炸药爆炸作用下,把燃料抛撒到周围空气中,迅速扩散,并与空气混合形成爆炸性云雾,通过二次引信引爆发生云雾爆轰,从而产生爆炸冲击波。其中燃料爆炸抛撒是燃料成为燃料空气炸药的关键阶段,因此 FAE 燃料抛撒的动力学研究具有极其重要的意义。

有关 FAE 燃料抛撒及云团形成的规律性研究,一直是国内外学者研究的热点^[1-4]。郭学永等^[5]研究了壳体材料、比药量和长径比等装置参数对燃料空气炸药云雾状态的影响,指出钢质壳体更有利于云雾的径向分散,适当的比药量可形成最优化的云雾尺寸,调节云雾内部浓度以及长径比不是云雾最终状态的決定因素。肖绍清等^[6]利用多因素二水平的正交实验方法,研究 FAE 弹体的上端板厚度(A)、侧面板预弱方式(C)、分散药上底面所填充的多孔惰性材料高度(B)对宏观固体燃料云雾形成及形状的影响,认为三因素对云雾径向截面积没有显著的影响,但 B、C 的交叉因素对云雾体积有显著的影响,在兼顾两考察指标前提下,较优条件是 A₂B₁C₁。丁钰等^[7]通过建立抛撒初期液体燃料运动、液体瞬间破碎及远场燃料云团运动的一维多相流数学物理模型,对燃料抛撒全过程进行了数值模拟。但这些研究倾向于液态和固态燃料爆炸抛撒特性。白春华等^[8]全面研究了固液混合云爆燃料状态、组分表面能、理化研究方法以及制备与装药方法,但缺乏对液固复合 FAE 燃料抛撒动力学过程方

面的研究。

本文在试验基础上,借助高速摄影技术,观测中心爆炸作用下燃料分散的全过程,主要研究燃料种类和比药量对液固复合 FAE 云雾状态的影响,以寻求获得理想云团的最优条件,为液固复合 FAE 燃料配方设计及装置优化奠定基础。

1 试验装置

野外静爆试验FAE装置(图1)由中心高能炸药、上下端盖(5 mm厚碳素钢板)、中心管(Ø30 mm 碳素钢)和塑料壳体组成。实验装置为薄壁圆筒结构,侧壁无预制凹槽。弹体长径比为2.45,装药容



图1 FAE 装置
Fig.1 Experimental apparatus of FAE

* 收稿日期: 2013-05-30
作者简介: 李席(1989~),男,硕士,主要从事爆炸理论及其应用研究。E-mail:1029887318@qq.com
通信作者: 王伯良(1964~),男,教授,主要从事爆炸理论及其应用研究。E-mail:boliangwang@163.com

积 10 L。实验时,将弹体直立放置于钢质弹架上,弹体质心距地面 1.3 m,地面平整,硬度适中,采用 8 号军用雷管起爆。

采用高速摄影技术记录燃料抛撒过程,高速摄影机型号为 Phantom V12,最大分辨率为 1280×800 像素,最大拍摄速率 1000000 帧/秒,实验时采用的拍摄速率为 2000 帧/秒,视场大小可根据现场实际情况调整,仪器安放在距爆源安全距离内。

2 液固复合 FAE 云雾影响因素

2.1 燃料种类对云雾状态的影响

液固复合燃料空气炸药实为液态烃类燃料和高能金属粉的混合态,采用高能金属粉可以得到比液态高得多的爆炸强度及体积热值。然而金属粉引爆困难、起爆能大,要求粉碎度高。同时金属粉耗氧量小,与空气形成云雾的体积(反映云团覆盖面积)比液态燃料的小,因此采用液态燃料和金属粉组成的混合燃料可以兼顾彼此。

为了分析燃料种类对燃料抛撒的影响,采用液态燃料组分不同的两种液固复合燃料,高能金属粉种类及比例均相同,液态燃料分别为 A 燃料和 B 燃料,记为 2-1 和 2-2。实验时保持其他条件不变,从高速摄影中获得了两种弹体云雾的状态参数随时间的变化,获得了 $D-t$ 曲线(图 2)、 $H-t$ 曲线(图 3)。

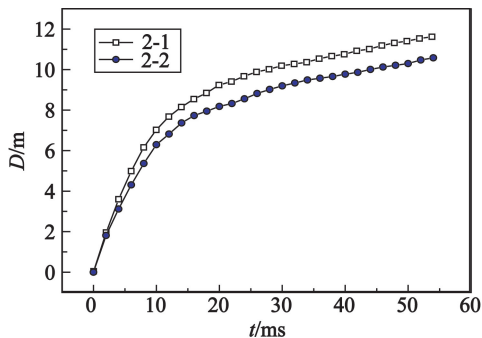


图 2 不同燃料种类时云雾直径与时间的关系

Fig. 2 Relation of cloud diameter and time for different fuels

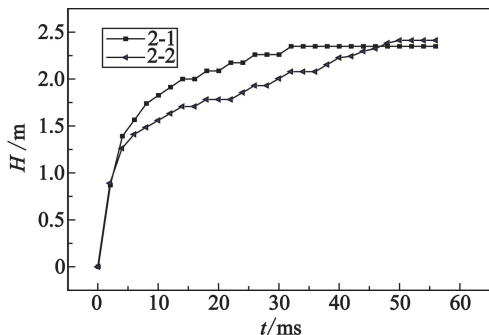


图 3 不同燃料种类时云雾高度与时间的关系

Fig. 3 Relation of cloud height and time for different fuels

实验分析可知:从燃料抛撒开始至抛撒过程结

束,2-1 燃料抛撒初速度、云雾轴向分散程度和云雾最终直径均大于 2-2,但二者的云雾最终高度基本不变。说明 A 燃料在实现远距离抛撒,形成大直径的云团方面优于 B 燃料。

图 4、图 5、图 6、图 7 分别为高速摄影记录的弹体在不同时刻的云雾图。结果发现,2-1 弹体有相当一部分燃料直接飞向弹体正下方地面和正上方空中,燃料的云团扩散速度较快,使得云雾空洞尺寸增大,云雾区燃料浓度偏低。从而影响了云雾浓度的均匀性。



图 4 2-1 弹体 4ms 时云雾图

Fig. 4 Photograph of cloud for 2-1 projectile body at 4 ms



图 5 2-2 弹体 4ms 时云雾图

Fig. 5 Photograph of cloud for 2-2 projectile body at 4 ms

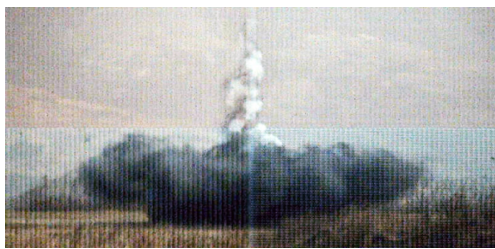


图 6 2-1 弹体临爆前云雾图

Fig. 6 Photograph of cloud for 2-1 projectile body before blast



图 7 2-2 弹体临爆前云雾图

Fig. 7 Photograph of cloud for 2-2 projectile body before blast

综合分析认为:液体燃料为 B 燃料时,云雾抛撒性较好,更容易形成扁圆柱形云团,适宜作 FAE

实验装置的燃料。

2.2 比药量对云雾状态的影响

比药量指的是中心装药质量与装填的燃料量之比,它是表征爆炸抛撒强度的物理量。惠君明等^[9]研究了比药量对液态 FAE 燃料的抛撒作用,并指出 15kg 量级的实验装置,比药量取 3% 左右最佳。文献^[10]指出,在一定范围内,液态燃料云雾最终半径与比药量无关。本研究通过液固复合燃料不同比药量时的对比试验,给出了不同时刻云雾外形尺寸变化曲线(图 8、图 9 和图 10)和 50ms 时云雾图(图 11、图 12 和图 13)。

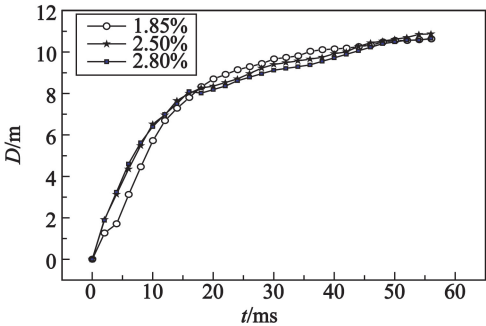


图 8 比药量不同时云雾直径随时间变化曲线
Fig. 8 Relationship between cloud diameter and time for different specific central explosive

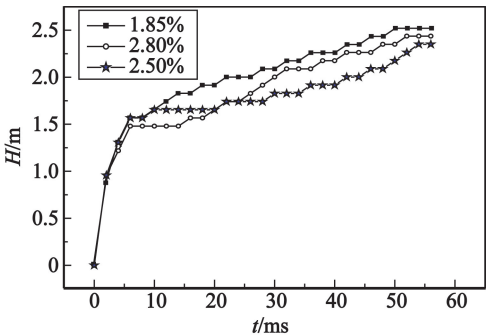


图 9 比药量不同时云雾高度随时间变化曲线
Fig. 9 Relationship between cloud height and time for different specific central explosive

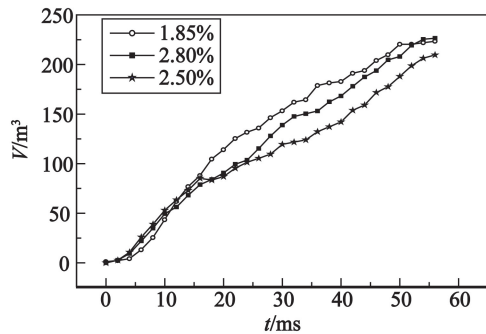


图 10 比药量不同时云雾体积随时间变化曲线
Fig. 10 Relationship between cloud volume and time for different specific central explosive



图 11 比药量为 1.85% 时云雾图
Fig. 11 High-speed photograph of cloud at specific central explosive of 1.85%



图 12 比药量为 2.50% 时云雾图
Fig. 12 High-speed photograph of cloud at specific central explosive of 2.50%



图 13 比药量为 2.80% 时云雾图
Fig. 13 High-speed photograph of cloud at specific central explosive of 2.80%

在实验范围内,相同量级、不同比药量 FAE 装置形成的最终云团外形尺寸参数差别不大,均可获得较大体积的可爆轰云团。在燃料抛撒初期,随着比药量的增加,云雾抛撒初速度显著增大,但燃料抛撒最终云雾直径基本相等。此外,从高速摄影图片可看出,比药量主要影响燃料轴向扩散,从而使燃料抛撒云雾均匀化。适当增加中心装药量,可提高燃料在垂直方向上的湍流程度,从而使燃料分散更均匀,但燃料抛撒的径向范围不再明显增大。

实验过程中发现,中心装药量较大时,使得装药工艺复杂化,同时由于密封缺陷,易发生窜火。实验结果表明,现有装置结构条件下,一定范围内,云雾最终半径与比药量无关,比药量只影响液固复合 FAE 燃料的轴向湍流程度。这与文献^[11]的研究一致。综合其他因素考虑,液态燃料为 B 燃料的液

固复合燃料,比药量为 2.50% 左右时,获得的云团状态最佳。

3 结论

采用高速摄影技术观测了液固复合 FAE 燃料抛撒过程,分析了燃料种类和比药量对液固复合燃料空气炸药燃料抛撒的影响,得出如下主要结论:

1) 不同燃料种类对比试验表明,B 燃料的云雾状态优于 A 燃料,更适合作云爆弹的燃料。

2) 在一定范围内,比药量只影响云雾的轴向分散,适当增加比药量可获得较好的云雾状态。从装置的实验效果分析,比药量取 2.50% 左右最优。

参 考 文 献

- [1] Li Yunhua, Song Zhidong, Li Yunze, et al. Theoretical analysis and numerical simulation for the spill procedure of liquid fuel of fuel air explosive with shell[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2010, 45 (7): 699-703.
- [2] 惠君明. FAE 燃料抛撒与云雾状态的控制[J]. 火炸药学报, 1999(1): 10-13.
Hui Junming. FAE fuel throw and control of cloud state [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999 (1): 10-13.
- [3] Zhang Qi, Lin Dachao, Bai Chunhua, et al. Effect of center high explosive in dispersion of fuel [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 13(2): 174-178.
- [4] 徐晓峰, 解立峰, 彭金华, 等. 碳氢燃料云雾爆轰特性的实验研究[J]. 爆破器材, 2003, 32(1): 1-4.
Xu Xiaofeng, Xie Lifeng, Peng Jinhua, et al. Experimental study on cloud detonation properties of hydrocarbon [J]. Explosive Materials, 2003, 32(1): 1-4.
- [5] 郭学永, 惠君明. 装置参数对 FAE 云雾状态的影响 [J]. 含能材料, 2002, 10(4): 161-164.

Guo Xueyong, Hui Junming. Influence of equipment parameters on FAE cloud status [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2002, 10(4): 161-164.

- [6] 肖绍清, 白春华, 李晋. FAE 云雾控制因素的优化研究 [J]. 火炸药学报. 1999(2): 10-14.
Xiao Shaoqing, Bai Chunhua, Li Jin. Study on optimization for factors controlling FAE's cloud [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999(2): 10-14.
- [7] 丁珏, 刘家骢. 液体燃料爆炸抛撒和 FAE 形成过程的数值模拟 [J]. 南京理工大学学报, 2004, 24(2): 168-171.
Ding jue, Liu Jiacong. Numerical simulation on the process of explosive dispersal for forming FAE cloud [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2004, 24(2): 168-171.
- [8] 白春华, 梁慧敏, 李建平, 等. 云雾爆轰 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 17-50.
- [9] 惠君明, 张陶, 郭学永. FAE 装置参数对燃料抛撒与爆炸威力影响的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(2): 103-108.
Hui Junming, Zhang Tao, Guo Xueyong. Experimental study on the influence of device parameters of FAE to dispersion and explosive power [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2004, 18(2): 103-108.
- [10] 秦友花. 新型燃料空气炸药及其爆炸机理的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002.
- [11] 张奇, 郭彦懿, 白春华, 等. 中心药量对燃料的抛撒作用 [J]. 火炸药学报, 2001(1): 17-19.
Zhang Qi, Guo Yanyi, Bai Chunhua, et al. Dispersal affection of center high explosive charge to fuel [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001(1): 17-19.

Experimental Study on Influencing Factors of the Cloud Status of Liquid-solid Fuel Air Explosive

LI Xi, WANG Boliang, HAN Zao, WANG Xinglong

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In field static explosive test, the cloud dispersion of liquid-solid fuel air explosive (FAE) was observed by the high-speed photography. The effects of the fuel type and specific central explosive on cloud status of liquid-solid FAE were presented. The results indicate that better cloud status could be gained by B fuel. To some extent, the fuel dispersion in the direction of axis is subjected to specific central explosive. It is concluded that the ideal cloud state of liquid-solid FAE can be obtained when fuel type is B and specific central explosive is about 2.50%.

[KEY WORDS] fuel air explosive, explosive dispersion, cloud status