

燃料抛撒初始阶段的蹿火现象

杜海文, 韩天一

西安近代化学研究所, 西安 710065

摘要 在燃料抛撒形成燃料空气炸药的过程中, 燃料可能发生点火燃烧或爆燃现象, 通称为蹿火。蹿火现象的发生, 极大地降低了燃料空气炸药能量的输出。解决蹿火问题, 对二次引爆型云爆战斗部的研制尤为重要。针对燃料抛撒初始阶段蹿火现象, 通过数值模拟和试验, 获取爆轰气体产物、燃料和空气的时空分布, 分析蹿火发生的因素。结果表明, 爆轰气体产物量是影响抛撒初始阶段蹿火发生的主要因素, 针对液固态燃料配方, 最优的比药量范围为 0.95%~1.70%。

关键词 燃料; 抛撒; 蹿火

中图分类号 TJ55

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.009

Phenomenon of fire in the initial stage of fuel dispersion

DU Haiwen, HAN Tianyi

Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract During fuel dispersion of fuel air explosive, the fuel may be ignited or deflagrated, which significantly decreases energy output of the fuel air explosive. In this paper, numerical simulation and experiments are carried out to obtain the temporal and spatial distribution of deflagration gaseous products, fuel and air to investigate factors related to fire phenomenon in the initial stage of fuel dispersion. The results show that the amount of deflagration gaseous products is the main factor influencing the fire phenomenon in the initial stage of fuel dispersion. For the liquid-solid fuel formula, the optimal fuel-to-explosive mass ratio is in the range of 0.95%~1.7%.

Keywords fuel; disperse; fire

二次引爆型云爆战斗部装填高能云爆剂, 通过抛撒装置将燃料抛撒并与环境中空气混合形成可爆轰燃料空气炸药, 在云雾起爆装置的作用下形成云雾爆轰。通过冲击波效应、热效应及缺氧效应等对中、软类目标造成毁伤, 是一种具有爆炸能量高、能量利用率高、毁伤区域大的面杀伤性武器。在燃料抛撒形成燃料空气炸药的过程中, 燃料可能发生点火燃烧或爆燃现象, 通称为蹿火^[1]。蹿火现象的发生, 极大地降低了燃料空气炸药能量的输出, 因此解决蹿火问题, 对于二次引爆型云爆战斗部的研制尤为重要。

肖邵清等^[2,3]采用分散T型装药及不耦合装填中心分散药, 以及在中心爆管内壁和分散药之间填充多孔惰性材料等新型装药方法, 基本上使燃料分散过程中的蹿火得到有效控制, 有效遏制了蹿火现象的发生。张奇等^[4]认为抛撒过程中蹿火现象的发生与中心抛撒药量有关, 中心抛撒药量越大, 越容易蹿火。

本研究采用数值仿真方法, 分析影响燃料抛撒初始阶段

蹿火的因素, 并通过试验进一步验证其正确性。

1 蹿火现象分析

燃料在抛撒过程中发生蹿火现象, 需满足3个必要条件: 还原剂(燃料)、氧化剂(空气中的氧气)和点火源。抛撒装药爆轰产生的气体产物推动燃料向外飞散, 燃料开始与空气混合, 形成一定浓度的燃料空气炸药, 此浓度燃料空气炸药具有一定的最小点火温度, 当抛撒药爆轰产生的高温气体产物(点火源)与燃料空气炸药混合且其温度大于燃料空气炸药的最小点火温度时, 燃料空气混合物被点燃, 导致蹿火。

试验结果表明, 燃料抛撒蹿火现象一般分为两类。类型一: 抛撒药作用后, 燃料开始抛撒与空气混合, 经一定时间后, 在燃料中心区域, 高温爆轰产物与云雾接触, 点燃云雾, 云雾由里向外燃烧, 抛撒过程发生蹿火, 图1所示蹿火现象即为类型一, 燃料抛撒至25 ms时在云雾中心区域发生蹿火。类型二: 抛撒药作用后的极短时间内, 燃料尚未被抛撒形成

收稿日期: 2015-05-20; 修改日期: 2015-06-14

作者简介: 杜海文, 工程师, 研究方向为爆炸力学及战斗部技术, 电子信箱: dhw199@163.com

引用格式: 杜海文, 韩天一. 燃料抛撒初始阶段的蹿火现象[J]. 科技导报, 2015,33(16): 61-64.

云雾,在燃料径向外围发生蹿火,图2所示蹿火现象即为类型二,抛撒药爆轰后0.4 ms在燃料外围及上端部发生蹿火。

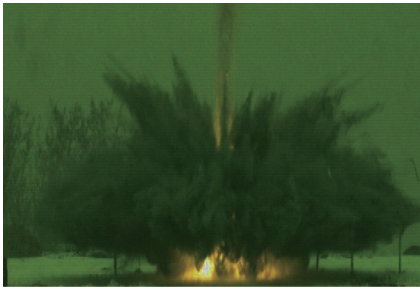
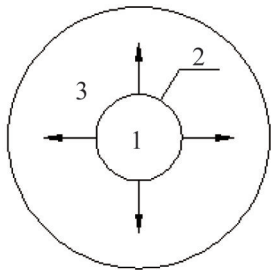


图1 燃料抛撒25 ms时蹿火情况
Fig. 1 Fire picture of fuel dispersed at 25 ms



图2 燃料抛撒0.4 ms时蹿火情况
Fig. 2 Fire picture of fuel dispersed at 0.4 ms

白春华等^[9]建立的云雾蹿火模型认为:云雾与抛撒装药爆轰产物存在一个无穷小厚度的“公共区”,“公共区”内的可燃组分全为气体,在“公共区”内高温爆轰产物点燃云雾,此刻由里向外云雾自持燃烧乃至爆燃,也就是发生“蹿火”现象,图3所示为云雾蹿火模型。此云雾蹿火模型可以解释类型一所示的蹿火现象,无法解释类型二所示的蹿火现象。



1—分散装药爆轰产物区;2—公共区;3—云雾区

图3 云雾“蹿火”模型
Fig. 3 Model of fuel fire

2 数值模拟分析

2.1 计算模型

针对类型二的燃料抛撒初始阶段蹿火现象,通过使用ANSYS/LS-DYNA软件进行建模和计算,研究抛撒装药爆轰

气体产物、燃料与空气的时空分布状态,分析其导致蹿火的主要因素。计算方法采用单层网格三维多物质流固耦合MMALE算法。

该计算模型由上下端盖、壳体、中心管、抛撒装药、燃料和空气等组成。由于本模型为轴对称结构,取模型的1/2进行三维建模,并在对称面和边界施加约束。计算模型如图4所示。

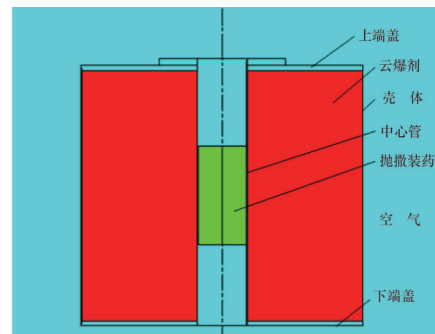


图4 计算模型
Fig. 4 Calculation model

2.2 结果讨论

中心抛撒装药爆炸后,产生的高温高压爆轰气体产物推动周围的燃料沿径向运动。在此初始阶段,将燃料环处理成一个包围爆炸气体产物的连续环^[6]。图5所示为不同时刻爆轰气体产物、燃料与空气的时空分布仿真结果。仿真结果表明,径向方向,在爆轰气体产物推动燃料向外抛撒的初始阶段,高温爆轰气体产物(点火源)与燃料(还原剂)接触,但由于还未与空气(氧化剂)接触,蹿火发生的3个必要条件不满足,不会导致燃料被点燃而引发蹿火;但如果爆轰气体产物量大,爆轰气体产物在极短的时间内,穿过燃料环,导致燃料环提前破碎,爆轰气体产物在燃料外围形成热点(点火源),燃料在随后抛撒过程中与热点、空气相遇,如果热点温度高于这一时刻燃料与空气混合物的点火温度,则燃料被点燃,引发蹿火。轴向方向,爆轰气体产物优先从样机上端结构约束薄弱处喷出,燃料在抛撒过程中沿轴向扩散,与爆轰气体产物、空气相遇,如果爆轰气体产物温度大于这一时刻燃料与空气混合物的最小点火温度,则燃料被点燃,引发蹿火。

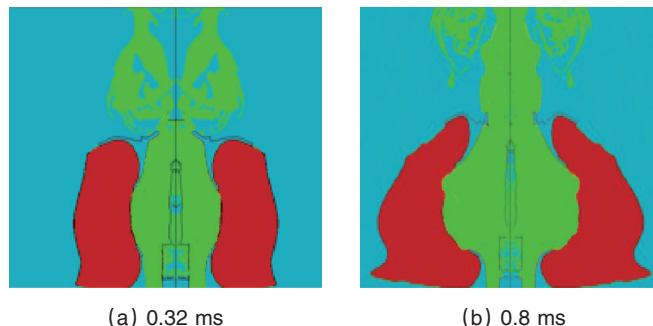


图5 不同时刻的产物分布仿真结果

Fig. 5 Simulation results of product distribution at different time

通过抛撒装药爆炸初始阶段燃料、空气和爆轰产物时空分布仿真结果可知,抛撒装药爆轰气体产物量影响抛撒初始阶段爆轰气体产物、燃料、空气的空间分布,是导致初始阶段蹿火的主要原因。

3 试验研究

在云爆战斗部设计过程中,抛撒装药爆轰气体产物量主要是由抛撒装药质量与燃料质量的比值(比药量^[7])决定。

3.1 试验样机及测试仪器

图6所示为试验样机结构示意图。为分析燃料抛撒过程,采用高速运动分析系统观测抛撒装药作用后燃料抛撒过程,记录速率为每毫秒5帧,测试布局如图7所示。为研究爆轰气体产物量对初始阶段抛撒蹿火的影响,设计不同比药量抛撒试验方案(表1)。

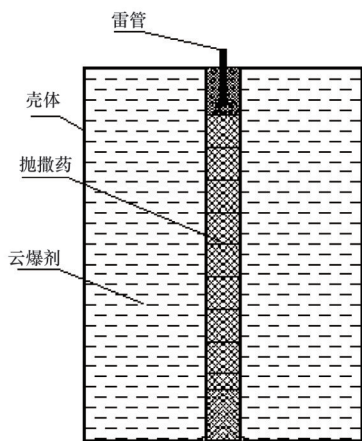


图6 样机结构示意图

Fig. 6 Structure map of the model device

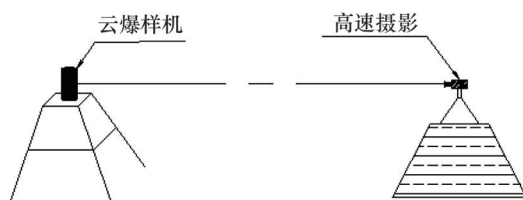


图7 测试布局

Fig. 7 Test layout

表1 不同比药量抛撒试验方案

Table 1 Experimental schemes with different fuel-to-explosive mass ratio

编号	云爆剂配方	抛撒药类型	比药量/%	爆轰气体产物量/L
1			0.95	930.0
2	铝粉+液体燃料	TNT	1.50	1468.4
3			1.70	1664.2
4			3.00	2936.8

3.2 试验结果及分析

图8所示为不同比药量样机抛撒过程分幅照片,以雷管发火为计时零点,在样机上端进行起爆。

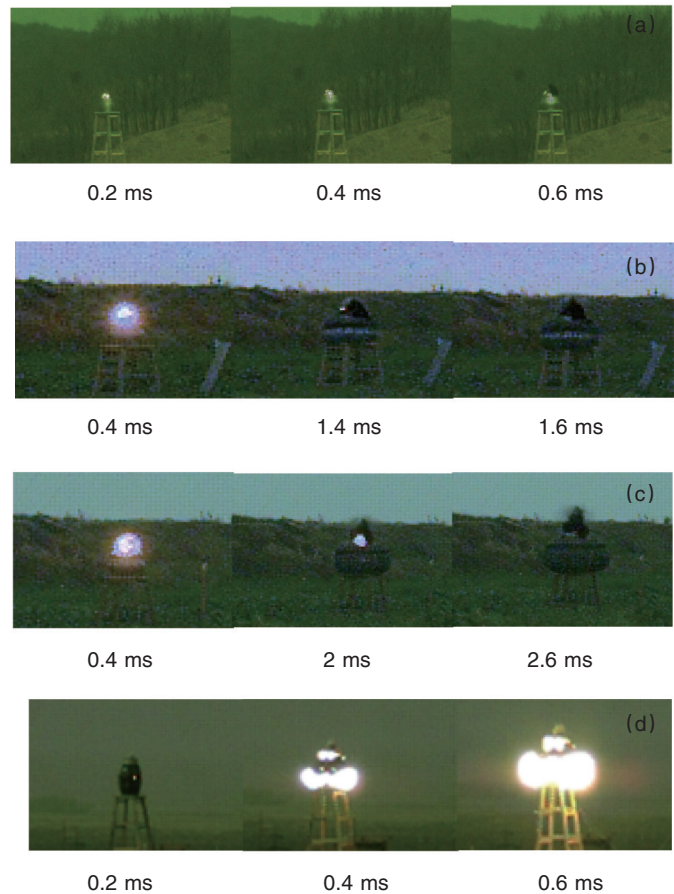


图8 比药量为0.95%(a)、1.5%(b)、1.7%(c)和3%(d)的云爆样机抛撒过程

Fig. 8 Fuel dispersion pictures under the fuel-to-explosive ratio of 0.95% (a), 1.5% (b), 1.7%(c) and 3%(d)

分析上述高速运动分析系统记录的不同比药量(0.95%~1.7%)燃料抛撒过程,雷管起爆后,在样机上端都会产生火光,火光的尺寸从小变大,最后随燃料的抛撒扩展被淹没;随着比药量增大,样机上端火光尺寸增大、火光持续时间增大;比药量为3%时,抛撒药作用0.4 ms时,在样机上端和径向位置发生蹿火。表2为不同比药量燃料抛撒试验结果。

表2 不同比药量燃料抛撒试验结果

Table 2 Experimental results of fuel dispersion under different fuel-to-explosive ratio

编号	比药量/%	样机上端火光持续时间/ms	试验结果
1	0.95	0.6	正常
2	1.50	1.6	正常
3	1.70	2.6	正常
4	3.00	—	蹿火

根据不同比药量云爆样机抛撒试验高速分幅照片,分析试验结果认为,随着比药量增大(0.95%~1.70%),其抛撒药爆轰产生的高温气体产物增多(由930 L增至1664.2 L),样机上端的火焰尺寸增大、火焰存在时间变长(由0.6 ms增至2.6 ms)。抛撒时间越长,燃料在抛撒过程中与空气混合程度越高,蹿火发生的3个条件:燃料、空气、点火源就会进一步充分,如果样机上端火焰尺寸大、存在时间长,抛撒初始阶段样机上端蹿火的几率会越大。当比药量进一步增大至3%时,抛撒药爆轰气体产物量增大(2936.8 L),大量高温气体产物在膨胀过程中,引起壳体破裂,部分高温气体产物在壳体破裂后穿过燃料,在燃料外围形成热点;燃料从破裂处喷射,开始与空气接触并混合形成燃料空气炸药,由于外围热点的存在,会点燃或引爆外围与空气接触的燃料,导致径向蹿火。

当比药量增大到某一临界值时,云团尺寸不再增加^[8]。因此云爆样机抛撒结构设计过程中,在满足抛撒云团尺寸要求的前提下,尽量选择较小的比药量,较低爆容的抛撒装药,减小抛撒装药爆轰气体产物量,可以降低云爆剂抛撒过程中蹿火的可能性。针对试验用液固型云爆剂配方,比药量选择0.95%~1.70%,在满足抛撒云团尺寸要求的同时可以实现云爆剂抛撒过程无蹿火现象发生。同时,为降低抛撒装药爆轰产物形成的热点温度,在抛撒装药外层包覆吸热材料,抛撒装药爆炸作用导致吸热材料发生化学反应,减低爆轰气体产物的温度,同时衰减抛撒装药爆轰强度,防止端部及径向蹿火的发生。

4 结论

通过数值仿真及试验研究表明,比药量是影响燃料初始阶段抛撒蹿火的主要因素。试验研究表明,针对试验用液固型云爆剂配方,比药量在0.95%~1.70%范围内,不会导致燃料在抛撒初始阶段发生蹿火。

参考文献(References)

[1] 郭彦懿,白春华,张奇. FAE燃料炸药抛撒蹿火失效的试验研究[J]. 火

炸药学报, 2001, 32(3): 37-38.

Guo Yanyi, Bai Chunhua, Zhang Qi. Experimental study on the failure of forming fuel-air cloud[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001, 32(3): 37-38.

[2] 肖邵清,白春华,李晋. FAE云雾控制因素的优化研究[J]. 火炸药学报, 1999, 22(2): 11-14

Xiao Shaoqing, Bai Chunhua, Li Jin. Study on optimization for factors controlling FAEs cloud[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999, 22(2): 11-14.

[3] 肖邵清. 分散药T型装药控制二次引爆型FAE云雾研究[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 10-14.

Xiao Shaoqing. Study on control cloud of twice-detonating FAE by T-type charge of burster[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(2): 10-14.

[4] 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, 24(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, 24(1): 17-19.

[5] 白春华,梁慧敏,李建平,等. 云雾爆轰[M]. 北京:科学出版社,2012. Bai Chunhua, Liang Huimin, Li Jianping, et al. Cloud explosion[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[6] 丁珏,刘家聪,彭金华. 液体燃料爆炸抛撒近场阶段的数值研究[J]. 爆炸与冲击波, 2000, 20(3): 215-220.

Ding Jue, Liu Jiacong, Peng Jinhua. Numerical study on the explosively dispersed liquid fuel in the nearfield[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 215-220.

[7] 惠君明,张陶,郭学. 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, 18(2): 103-108.

Hui Junming, Zhang Tao, Guo Xueyong. Experimental study on the influence of device parameters of FAE to fuel dispersion and explosive power[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 18(2): 103-108.

[8] 张奇,覃彬,白春华,等. 中心装药对FAE燃料成雾特性影响的试验分析[J]. 含能材料, 2007, 15(5): 447-450.

Zhang Qi, Qin Bin, Bai Chunhua, et al. Effect of total energy of center explosive charge on fuel dispersal characteristic feature[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(5): 447-450.

(编辑 田恬)

·学术动态·



“大众创业、万众创新背景下的科学文化国际学术研讨会”征文

为更好推进“大众创业、万众创新”相关政策措施的落实,探索大众创业、万众创新背景下的科学文化发展特点和趋势,积极推动科技事业发展,更好服务国家创新驱动发展战略,中国科协发展研究中心、中国科普研究所联合举办的“大众创业、万众创新背景下的科学文化国际学术研讨会”,将于2015年10月16日在北京召开,欢迎相关研究人员积极关注、投稿。

投稿网址:<http://210.14.121.20/kexie/website/201508001/cn/>。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/index.html>。