

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0260

阻燃介质在炸药驱动燃料分散中的应用*

王永旭¹, 解立峰¹, 贾晓亮², 张莹², 李斌¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 辽宁锦华机电有限公司, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 为解决燃料空气炸药中的燃料在中心分散炸药爆炸驱动抛撒过程中易发生的窜火问题, 结合中心分散炸药结构设计, 引入以超细干粉灭火剂为主体的阻燃介质, 采用高速录像和红外热成像仪研究了中心分散药外部填充阻燃介质的情况下, 对中心分散药爆炸火球产生的高温及火焰的抑制情况。试验结果表明, 中心分散药爆炸火球的最高温度为 1355.4 °C, 温度超过 150 °C 的持续时间为 264.8 ms。外部填充阻燃介质后, 中心分散药爆炸产生的火焰基本消失, 火球最高温度下降 90% 以上, 火球表面温度分布不超过 100 °C。同时进行了验证试验, 采用填充阻燃介质的中心分散药抛撒 1 kg 的乙醚和铝粉的混合燃料, 分散药与燃料的质量比超过 4% 时, 云雾仍未发生窜火。表明填充阻燃介质可以有效防止燃料在爆炸抛撒过程中发生窜火的问题。

关键词: 燃料空气炸药; 分散药; 窜火; 阻燃介质

中图分类号: O383; TJ55

国标学科代码: 1303599

文献标志码: A

Application of flame retardant medium in fuel dispersion driven by explosive

WANG Yongxu¹, XIE Lifeng¹, JIA Xiaoliang², ZHANG Ying², LI Bin¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Liaoning Jinhua Electromechanical Company Limited, Huludao 125000, Liaoning, China)

Abstract: To solve the premature-combustion problem of FAE fuel during the dispersal process by explosive, fire retardant medium with superfine ABC powder as the main component was introduced along with the structural design of central dispersed explosive. High-speed camera and infrared thermal imager were used to study the temperature and flame generated by the dispersed explosive. The experimental results show that the maximum temperature of the dispersed explosive fireball was 1355.4 °C, and the duration of the temperature exceeding 150 °C was 264.8 ms. The flame generated by the dispersed explosive almost completely disappears after the introduction of the flame retardant medium. The maximum temperature of the fireball decreases by more than 90%, and the surface temperature of the fireball does not exceed 100 °C. At the same time, the verification experiment was carried out. The mixture fuel of 1 kg ether and aluminum powder was dispersed by the dispersed explosive filled with flame retardant medium. When the mass ratio of dispersed explosive to fuel was more than 4%, the premature-combustion was restrained successfully. It shows that filling the flame retardant medium can effectively prevent the premature-combustion in the fuel dispersion process.

Keywords: fuel air explosive; dispersed explosive; premature-combustion; flame retardant medium

燃料空气炸药(fuel air explosive, FAE), 作为一种不同于普通炸药的爆炸能源, 是以高挥发性的可燃液体、高能金属粉与空气以一定的比例混合形成的一种可爆炸性混合物^[1]。FAE 发生的是体积爆轰, 其作用范围大、持续时间长、总冲量大^[2-4]。由于燃料空气炸药不同的毁伤模式及不容小觑的威力, 学者对 FAE 的出现普遍重视, 成为了国内外研究的热点^[5-6]。

* 收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-11-04

第一作者: 王永旭(1992—), 男, 博士研究生, wangyongxu216@163.com

通信作者: 解立峰(1962—), 男, 博士, 教授, xielifeng319@sina.com

FAE 云雾的形成方法主要是通过中心分散装药爆炸驱动燃料分散,最终形成燃料云雾,抛撒对象为低沸点液体或高能金属粉^[7-9]。燃料爆炸抛撒形成的云雾的尺寸及浓度分布很大程度上决定了FAE的毁伤范围和爆轰性能。关于爆炸抛撒,主要研究燃料抛撒的过程以及形成云雾的机理,主要关注云雾的形状、尺寸和扩散速度等特征参数,抛撒装置参数如壳体材质、结构和比药量等对云雾状态影响^[10-12]。由于燃料本身的特性,燃料容易被中心分散药爆炸产生的高温产物引燃,发生云雾窜火。为了防止发生窜火,Sedgwick^[13]、Aley^[14]采用了在中心分散药两端填充木塞、橡胶及钢片等方法。肖绍清^[15-16]发明了T形装药结构和复合中心分散药,可以有效抑制云雾窜火。但是采用这些方法仍不能完全抑制爆炸抛撒过程中的云雾窜火问题。

ABC超细干粉灭火剂具有突出的灭火效率,因其巨大的比表面积,灭火效率是普通干粉灭火剂效能的6~10倍^[17]。同时ABC超细干粉灭火剂的粒径小,流动性好,有良好抗复燃性、弥散性和电绝缘性。鉴于ABC超细干粉灭火剂具有良好的灭火性能,为了解决燃料在爆炸抛撒过程中的窜火问题,本文中提出在中心分散药外部填充以ABC超细干粉灭火剂为主体的阻燃介质。通过高速录像和红外热成像仪观察阻燃介质对爆炸瞬间产生的高温及火球的抑制情况。

1 试验

1.1 试验布置

中心装药结构如图1所示,中心分散药为TNT炸药,质量7.85 g,尺寸 $\varnothing 20\text{ mm}\times 17\text{ mm}$,试验使用6个。把中心分散药外部填充的阻燃介质分为3个部分:在分散药上部的称为顶部阻燃介质,与分散药齐平的称为侧面阻燃介质,分散药下面的称为底部阻燃介质。内壳和外壳均为PVC材料,长度为200 mm,利用不同直径的中心管内壳改变阻燃介质的侧面厚度。底部阻燃介质与雷管齐平。外壳为模拟云爆弹体的壳体,内外壳体中间不添加燃料。在底部用8#雷管起爆中心分散药,通过高速录像和红外热成像仪观测中心分散装药爆炸后阻燃介质对爆炸火球温度及火焰的抑制情况,通过改变侧面和顶部阻燃介质厚度,研究阻燃介质对爆炸火球温度及火焰的抑制效果,得到阻燃介质的最佳用量。

1.2 试验设备

采用高速录像和红外热成像仪记录整个试验过程,高速相机的型号为Fastcam Mini UX100,拍摄速度为 $2\ 000\text{ s}^{-1}$,像素 $1\ 280\times 1\ 024$;红外热成像仪型号为ROTRIC A615,拍摄速度为 30 s^{-1} ,像素 640×480 。试验布置如图2所示,中心管悬挂在空中高度为1 m,在底部起爆中心分散药。高速录像仪和红外热成像仪布置在距离爆心25 m处。

2 试验结果与分析

2.1 侧面阻燃介质对火球的抑制效果

中心分散药放置在中心管中间,试验时先做空白试验,不填充任何阻燃介质。然后进行侧面阻燃介

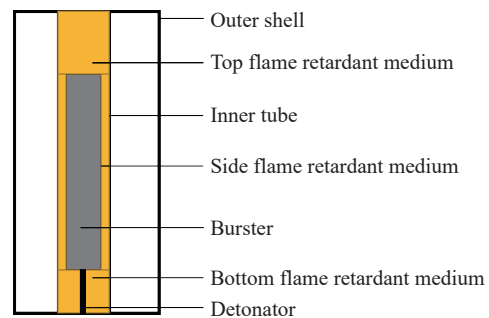


图1 中心管结构示意图

Fig. 1 Central tube structure diagram

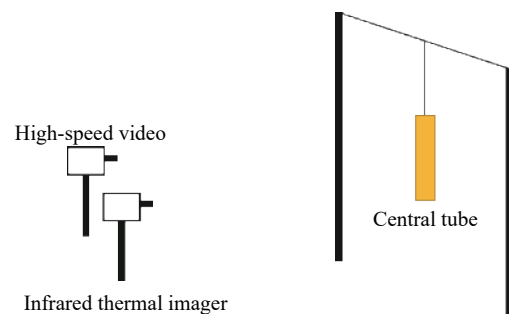


图2 试验示意图

Fig. 2 Experimental diagram

质厚度为 9 mm 的试验, 底部阻燃介质与雷管齐平, 顶部装满阻燃介质。通过高速录像和红外热成像观察中心分散药爆炸场温度和火焰情况, 根据试验结果采用升降法进行下一步试验, 得到最佳的侧面阻燃介质厚度。侧面阻燃介质的填充厚度通过内管直径改变。试验内管直径和阻燃介质侧面厚度如表 1 所示。

表 1 内管直径和侧面阻燃介质厚度

Table 1 Inner tube diameter and side flame retardant medium thickness

内管直径/mm	20	23	26	30	38
阻燃介质厚度/mm	0	1.5	3.0	5.0	9.0

通过高速录像, 可以观测到中心分散药的整个爆炸过程, 无阻燃介质和侧面阻燃介质厚度为 5 mm 的分散药爆炸过程对比如图 3 所示。从图 3 中可以看出: 在未填充阻燃介质的情况下, 中心药在被雷管起爆后, 产生巨大火球; 填充阻燃介质后, 火球基本消失。说明填充阻燃介质对抑制中心分散药爆炸的火焰有非常好的效果。图 4 给出了起爆后 2 ms, 在填充不同侧面厚度阻燃介质的情况下, 中心分散药爆炸的高速图片。随着厚度的增加, 爆炸产生的火球逐渐减小。在厚度为 5.0 mm 时, 火焰完全消失, 在下端也没有看见火光出现, 说明阻燃介质完全将爆炸产生的火焰抑制。

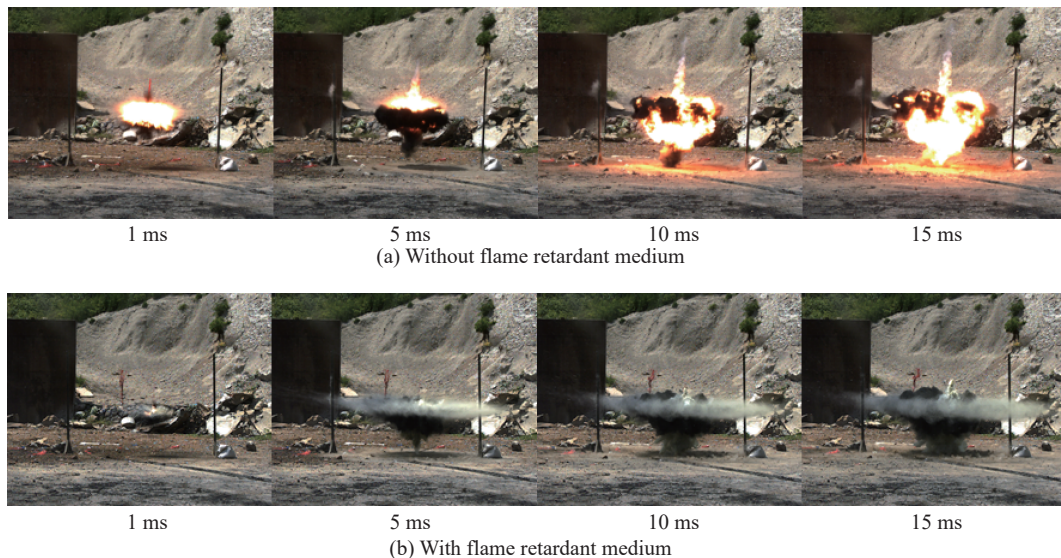


图 3 不同填充条件下的高速图像对比

Fig. 3 High-speed video pictures under different filling conditions

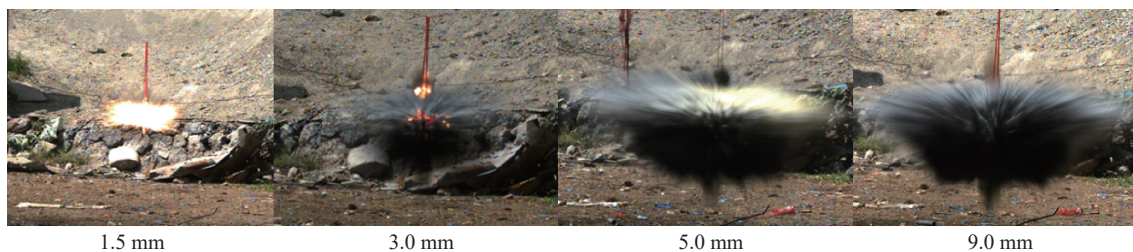


图 4 不同侧面阻燃介质厚度下的高速图片

Fig. 4 High-speed pictures for different side flame retardant medium thicknesses

通过高速录像可以观察阻燃介质对中心分散药爆炸火焰的抑制情况; 通过红外热成像仪, 则可以观察阻燃介质对中心分散药爆炸火球温度的抑制情况。对未填充阻燃介质、填充 3.0 mm 阻燃介质的中心分散药爆炸产生的火球表面温度进行分析, 不同时刻的红外图片如图 5 所示。

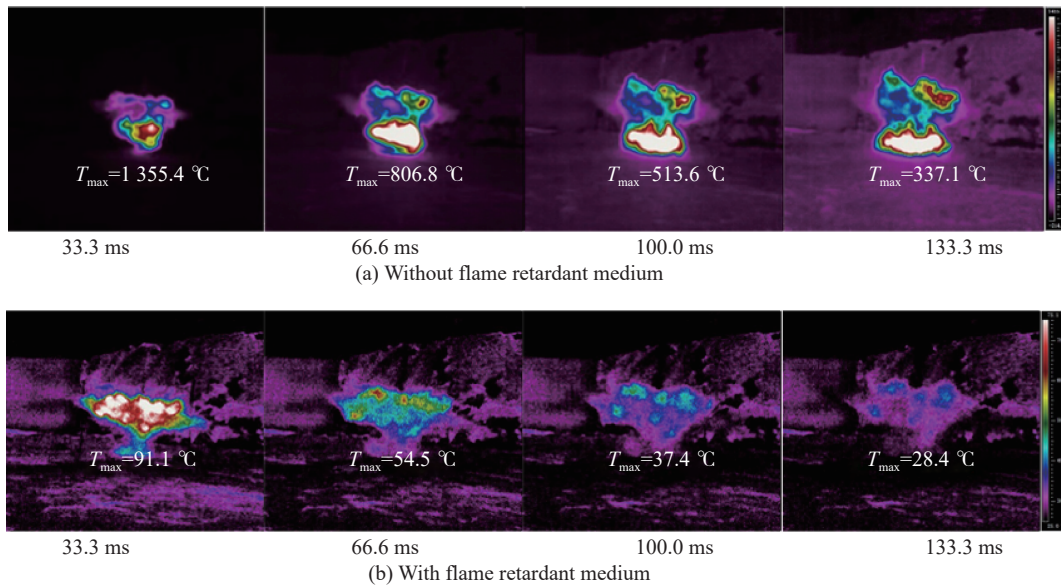


图 5 不同时刻的红外图片

Fig. 5 Infrared pictures at different moments

中心分散药爆炸后, 填充不同厚度的侧面阻燃介质的情况下, 火球表面最高温度随时间变化关系曲线如图 6 所示, 火球表面温度测试结果如表 2 所示。在未填充阻燃介质时, 中心分散药爆炸火球产生的最高温度为 1 355.4 °C, 添加阻燃介质后温度降低 90% 以上。对于 FAE, 常用的液体燃料有环氧丙烷、石油醚和乙醚等, 其燃点在 150~300 °C 之间, 温度高于 150 °C 时, 就可能将燃料点燃。所以将火球表面最高温度大于 150 °C 的时间称为高温持续时间。从表 2 中可以看出, 当添加阻燃介质后, 最高温度为 124.1 °C, 这表明阻燃介质对中心分散药爆炸场的温度有良好的抑制作用。对 33 ms 时火球表面的温度进行分析, 其表面温度分布如图 7 所示。

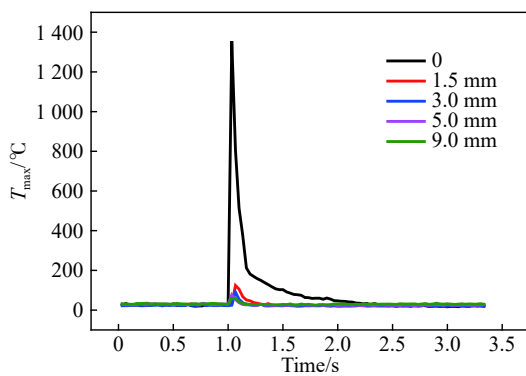


图 6 火球表面最高温度随时间的变化曲线

Fig. 6 The highest surface temperature of the fireball vs. time

表 2 火球表面温度测试结果

Table 2 Fireball surface temperature test results

序号	阻燃介质厚度/ mm	最高温度/ °C	高温持续时间/ms (大于 150 °C)
1	0	1 355.4	264.8
2	1.5	124.1	0
3	3.0	91.1	0
4	5.0	77.2	0
5	9.0	59.9	0

从图 7 可以看出, 无阻燃介质时, 整个火球表面温度都超过 200 °C, 最高温度在 1 500 °C 以上, 前面提到常用液体燃料的燃点在 150~300 °C 之间, 在这个温度下燃料容易被点燃发生窜火。而有阻燃介质时, 火球表面温度分布不超过 100 °C, 阻燃介质对中心分散药爆炸产生的温度抑制明显。通过高速录像和红外热成像的结果可知, 通过填充阻燃介质, 可以有效抑制中心分散药爆炸产生的高温和火球, 从而可以有效防止燃料在爆炸抛撒过程中发生窜火。

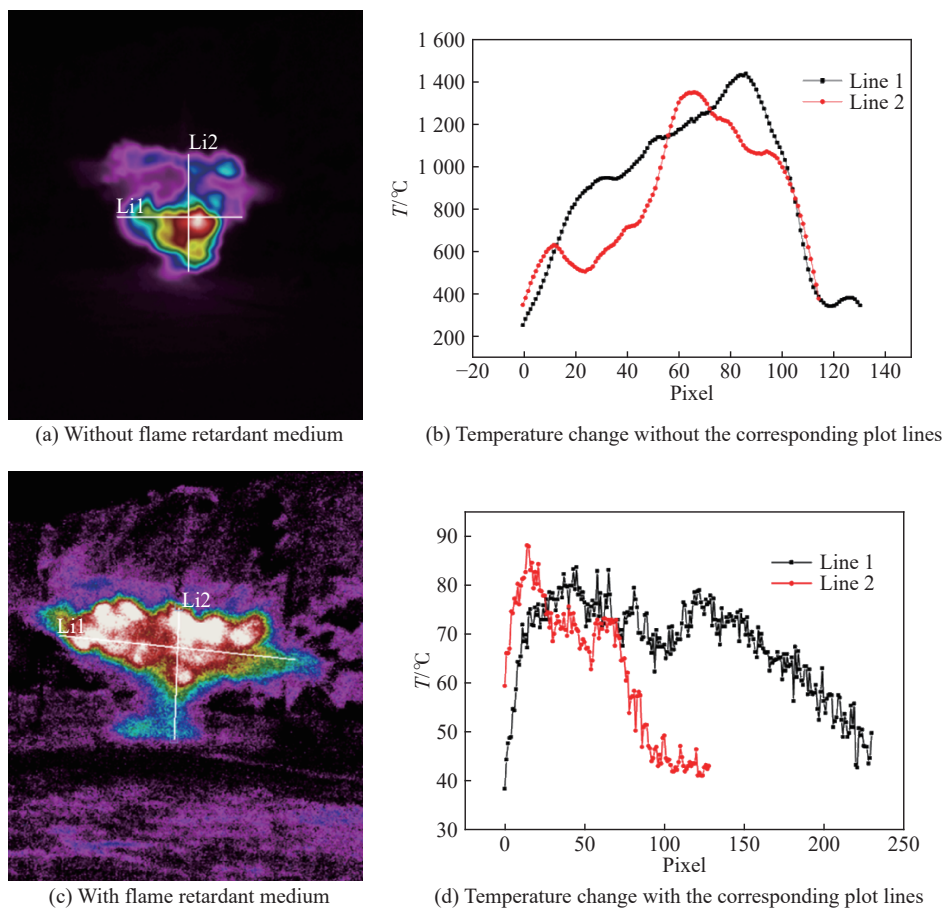


图 7 火球表面温度及其对应直线温度变化曲线

Fig. 7 Surface temperature distribution and temperature change with the corresponding plot lines

2.2 顶部阻燃介质对火球的抑制效果

在确定侧面最佳厚度为 5.0 mm 后, 改变顶部阻燃介质厚度, 寻找最佳的阻燃介质用量。图 8 给出了起爆后 2 ms, 不同顶部阻燃介质厚度情况下中心分散药爆炸时的高速图片。从图 8 中可以明显看出, 在侧面阻燃介质(5.0 mm)存在的情况下, 爆炸火球得到了较好的抑制, 随着阻燃介质厚度的增大, 完全看不到爆炸产生的火球。图 9 给出了顶部阻燃介质不同厚度情况下爆炸火球表面温度随时间的变化关系曲线及对应爆炸火球产生的最高温度, 从图 9 可以看出, 火球表面最高温度随着厚度增大而降低, 0~20 mm 前降低幅度较快, 20 mm 以后降幅变缓。认为 20 mm 是最佳的顶部阻燃介质厚度。当侧面阻燃介质的厚度为 5.0 mm, 顶部阻燃介质的厚度为 20 mm 时, 火球表面的最高温度为 79.2 °C, 低于 150 °C, 以环氧丙烷、石油醚和乙醚等体为液相组分的燃料在爆炸抛撒过程中不会发生窜火现象。

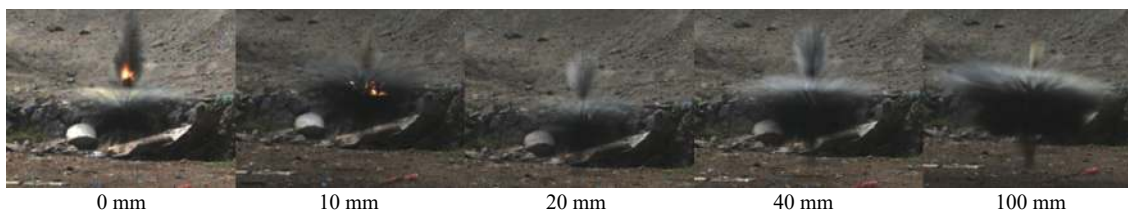


图 8 不同顶部阻燃介质厚度的高速图片

Fig. 8 High-speed pictures for different top flame retardant medium thicknesses

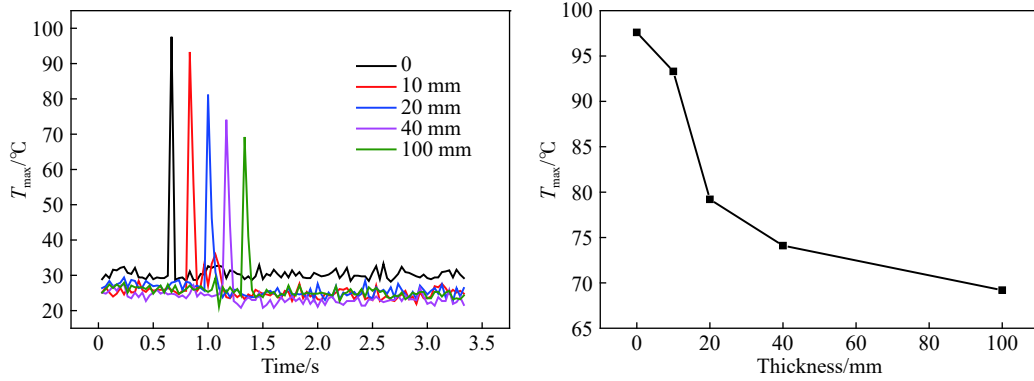


图 9 火球最高温度随时间的变化曲线及对应的最高温度

Fig. 9 The highest temperature of the fireball vs. time and the corresponding maximum temperature

2.3 验证试验

为了验证阻燃介质对中心分散药的温度场抑制作用,设计了验证试验。壳体为 $\varnothing 90 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的 PVC 筒体,中心管内径为 30 mm。其结构如图 10 所示。中心分散药和上面试验质量一致,按照上述最佳试验结果,在中心管中侧面填充 5.0 mm 厚的阻燃介质,顶部填充 20 mm 厚阻燃介质。壳体内装填的燃料为乙醚和铝粉组成的固液混合物,质量为 1 kg。中心分散药与装填燃料质量的比值(简称比药量)为 4.7%。分别在未填充阻燃介质和填充阻燃介质的情况下进行燃料抛撒试验,利用高速录像记录整个过程,试验结果如图 11 所示。

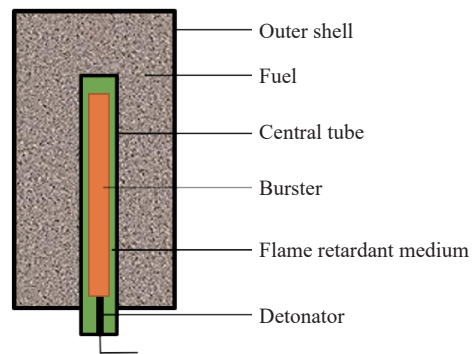


图 10 燃料抛撒结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of fuel dispersal structure

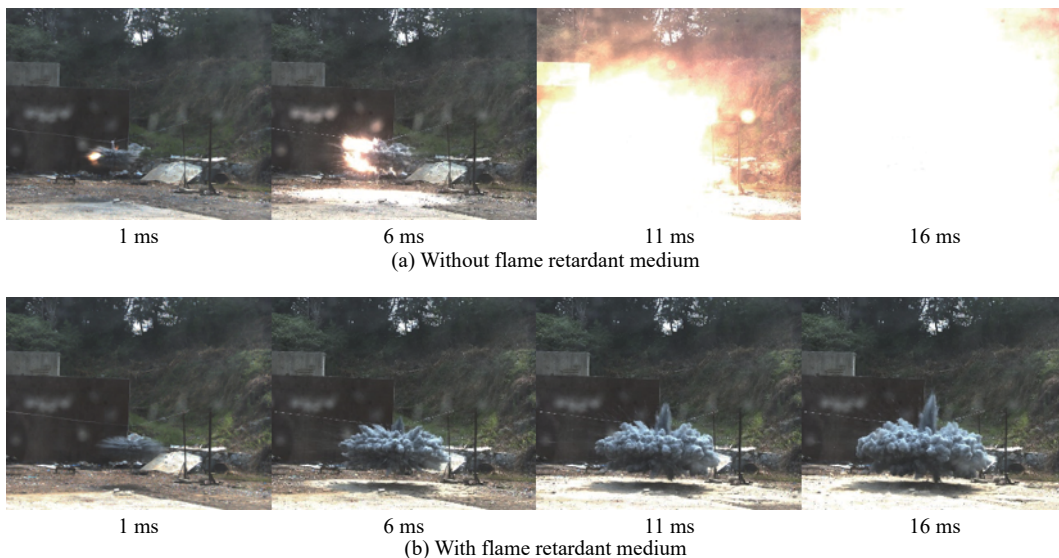


图 11 验证试验高速图片

Fig. 11 High-speed pictures in verification experiment

从图 11 可以看出,在未填充阻燃介质的情况下,FAE 燃料被中心分散药的爆炸火球引燃,发生窜火。对于上述中心分散药装药结构,当比药量为 1.1%~1.5% 时,云雾的窜火率为 100%。比药量不大于

0.98% 时, 窜火率高达 50%^[15]。这极大限制了 FAE 的发展, 因为在更大的燃料填充质量情况下, 需要更高的驱动能量才能将燃料抛撒到合适的云雾尺寸。中心分散药质量与抛撒燃料质量的比值决定了驱动能量的大小。比药量值越高(但同时会增加云雾发生窜火的风险), 驱动能量越大, 形成的云雾尺寸也就越大。在本次试验中比药量超过 4%, 但云雾仍未发生窜火(重复 3 次), 说明在中心分散药外部填充阻燃介质是一种防止云雾窜火非常有效的办法, 同时可以有效提高 FAE 的驱动能量。

2.4 机理分析

云雾发生窜火现象需要满足两个必要条件: 一是燃料与空气形成的混合物在爆炸极限范围内; 二是爆炸性混合物内存在点火源。当燃料分散至可燃浓度范围时, 中心分散药爆炸产生的高温产物作为火源将燃料点燃发生自持燃烧乃至爆燃, 从而发生云雾窜火现象。白春华等^[1]提出了云雾窜火模型, 如图 12 所示。起爆中心分散药后, 爆炸冲击波会推动燃料向外运动, 在云雾中间会形成一个空腔, 里面主要是爆轰产物。云雾区与爆轰产物区存在一个“公共区”。此

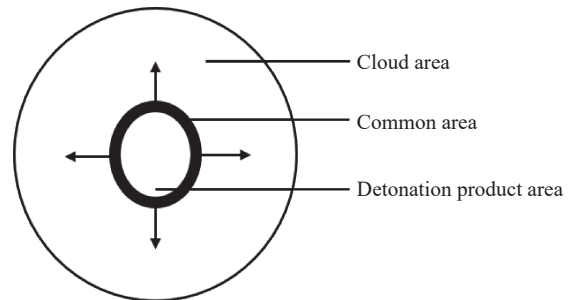
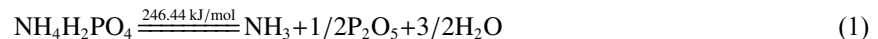


图 12 云雾窜火模型^[1]

Fig. 12 Cloud premature-combustion model^[1]

“公共区”由分散药爆轰产物、空气和燃料组成, 窜火主要发生在该区域内, 然后向云雾区发展。对于燃料空气炸药来说, 爆炸抛撒的目的就是形成可燃、可爆的云雾浓度。因此, 只有抑制中心分散药爆炸产生的高温和火球, 使其低于燃料云雾的最小点火能量, 才能防止燃料在抛撒过程中发生窜火。

阻燃介质的主体为 ABC 超细干粉灭火剂。当在中心分散药外部填充阻燃介质后, ABC 超细干粉灭火剂的物理、化学双重灭火机理能有效防止云雾窜火。在物理上, 灭火剂位于中心分散药和燃料之间, 超细干粉灭火剂的粒径小, 流动性好, 可以有效隔绝爆轰产物与燃料接触, 同时也可以阻断燃烧所需的氧气; 在化学方面, ABC 干粉灭火剂的主要灭火组分为磷酸二氢铵 ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的吸热分解化学式为:



$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末在 200~400 °C 时快速分解形成氨气 (NH_3) 和磷酸 (H_3PO_4), 超过 400 °C 时, H_3PO_4 进一步分解成偏磷酸 (HPO_3) 和水 (H_2O), 最后生成五氧化二磷 (P_2O_5)^[18]。爆炸火球的最高温度超过 1 000 °C, 在此高温的作用下, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉末会迅速分解吸收了大量的热量, 使爆炸火球的温度迅速降低, 爆轰产物的温度低于燃料的最小点火温度。同时灭火剂与火焰反应产生的大量玻璃状物质存在于“公共区”内形成一层隔离层, 进一步确保燃料不会被引燃。

3 结 论

为了解决燃料在分散过程中的窜火问题, 以中心分散药为研究对象, 引入以干粉灭火剂为主体的阻燃介质, 开展了阻燃介质阻燃效果模拟试验及实际燃料装药效果验证试验, 得到结论如下: (1) 对于 FAE 的中心分散装药, 在填充阻燃介质的情况下, 可以有效抑制爆炸产生的高温和火焰, 从而降低云雾发生窜火的风险; (2) 在阻燃介质侧面厚度为 5.0 mm, 顶部厚度为 20 mm 时, 中心分散药与燃料的质量比超过 4%, 乙醚-铝粉燃料在抛撒过程中不发生窜火。

参考文献:

- [1] 白春华, 梁慧敏, 李建平, 等. 云雾爆轰 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
 - [2] 饶国宁, 周莉, 宋述忠, 等. 云爆药剂爆炸超压测试及威力评价 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 579-585. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0245.
- RAO G N, ZHOU L, SONG S Z, et al. Explosion overpressure measurement and power evaluation of FAE [J]. *Explosion and*

- Shock Waves*, 2018, 38(3): 579–585. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0245.
- [3] 王晔, 白春华, 李建平. 动态云雾形成及爆轰场特性 [J]. *含能材料*, 2017, 25(6): 466–471. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.004.
WANG Y, BAI C H, LI J P. Formation and blasting field characteristics of moving cloud detonation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(6): 466–471. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.06.004.
- [4] 刘庆明, 白春华, 李建平. 多相燃料空气炸药爆炸压力场研究 [J]. *实验力学*, 2008, 23(4): 360–370.
LIU Q M, BAI C H, LI J P. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(4): 360–370.
- [5] LIU G, HOU F, CAO B, et al. Experimental study of fuel-air explosive [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, 44(2): 213–217. DOI: 10.1007/s10573-008-0028-7.
- [6] LI Y, SONG Z, LI Y. 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. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2010.04.004.
- [7] 史远通, 张奇. 爆炸驱动燃料抛撒的非理想化特征 [J]. *含能材料*, 2015, 23(4): 330–335. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.004.
SHI Y T, ZHANG Q. Non-ideal characteristics of fuel dispersal driven by explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(4): 330–335. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.004.
- [8] 吴德义, 杨基明. 强冲击波作用下液体抛撒的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(1): 91–95.
WU D Y, YANG J M. Experimental investigation on liquid dispersal induced by explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 91–95.
- [9] APPARAO A, RAO C R, TEWARI S P. Studies on formation of unconfined detonable vapor cloud using explosive means [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 254-255(6): 214–220. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.02.056.
- [10] 方伟, 赵省向, 李文祥, 等. 爆炸抛撒过程中 FAE 云雾的运动特性 [J]. *含能材料*, 2015, 23(11): 1061–1066. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.005.
FANG W, ZHAO S X, LI W X, et al. Movement characteristics of fuel-air explosive (FAE) clouds in the explosion dispersal process [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(11): 1061–1066. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.005.
- [11] 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): 161.16–164.
GUO X Y, HUI J M. Influence of equipment parameters on FAE cloud status [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2002, 10(4): 161.16–164.
- [12] 丁珏, 刘家聪. 液体燃料爆炸抛撒和云雾形成全过程的数值研究 [J]. *火炸药学报*, 2001, 24(1): 20–23. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2001.01.007.
DING J, LIU J C. Numerical study on the whole process of explosive dispersal for forming liquid air cloud [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001, 24(1): 20–23. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2001.01.007.
- [13] SEDGWICK R T. Fuel air explosives: A parametric investigation; AD-A159177[R]. 1979.
- [14] ALEY M H. Surface-launched FAE mine field clearance round: USP4, 273, 048 [P]. 1981.
- [15] 肖绍清. 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2006.02.004.
XIAO S Q. Study on control cloud of twice-detonating FAE by T-type charge of burster [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2006, 29(2): 10–14. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2006.02.004.
- [16] 肖绍清. 复合分散药的性能及对 FAE 燃料分散的影响 [J]. *含能材料*, 2006, 14(4): 244–247; 256. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2006.04.002.
XIAO S Q. Controlling fuel dispersion of FAE by combination burster [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2006, 14(4): 244–247; 256. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2006.04.002.
- [17] 徐晓楠. 气溶胶灭火剂的研究及发展现状 [J]. *消防技术与产品信息*, 2002, 9(9): 26–30. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2002.09.010.
XU X N. Research and development status of aerosol fire extinguishing agent [J]. *Fire Technique and Products Information*, 2002, 9(9): 26–30. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2002.09.010.
- [18] YANG M, CHEN X, WANG Y, et al. Comparative evaluation of thermal decomposition behavior and thermal stability of powdered ammonium nitrate under different atmosphere conditions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 33: 10–19. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.063.

(责任编辑 王易难)