

消焰剂在云雾分散装药中的应用* □

潘建^{1,2}, 郁锐^{1,2}, 冯雪磊^{1,2}, 周明学^{1,2}, 庞春旭^{1,2}, 王永旭³

- (1. 陆空基信息感知与控制全国重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065
3. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为解决云爆战斗部的云爆药剂在中心分散装药爆轰驱动抛撒过程中易发生的蹿火问题, 结合中心分散装药结构设计, 炸药选用压装钝化黑索金(RDX)+不同比例消焰剂(如 NaCl 等), 采用高速录像和红外成像仪研究了 RDX 中添加不同比例 NaCl 后爆炸火球产生的高温及火焰的抑制情况。试验结果表明: 随着 NaCl 含量的增加, 分散装药的爆速、爆热和爆炸火球温度均不断降低; 在相同装药质量前提下, 当 NaCl 含量增加至 10%时, 爆速降低 4.1%, 爆热降低 8.4%, 火球最高温度降低 30.7%、200℃以上的高温持续时间缩短 70.9%; 同时开展了验证试验, 采用装填 5%NaCl 中心分散装药的云爆药剂, 云雾分散未发生蹿火现象。表明云爆弹中的分散装药通过添加 NaCl 消焰剂可以有效防止云雾在爆炸抛撒中发生蹿火的问题。

关键词: 消焰剂; 分散装药; 蹿火; 云爆战斗部

中图分类号: O383; TJ55

国标学科代码: 1303599

文献标识码: A

Application of flame inhibitor in aerosol-dispersed explosive charges

PAN Jian^{1,2}, YU Rui^{1,2}, FENG Xuelei^{1,2}, ZHOU Mingxue^{1,2}, PANG Chunxu^{1,2}, WANG Yongxu³

(1. National Key Laboratory of Land and Air Based Information Perception and Control, Xi'an 710065 Shaanxi, China;

2. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065 Shaanxi, China;

3. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: To address the flame jetting problem occurring during the detonation-driven dispersal of the fuel-air explosive (FAE) mixture by the central dispersion charge in an FAE warhead, this study combines charge structural design with the incorporation of flame suppressants. The selected explosive was pressed passivated RDX, with varying mass fractions of sodium chloride (NaCl) as a suppressant, to form the dispersion charge. A comprehensive experimental investigation was carried out to evaluate the inhibition of high temperature and flame in the post-detonation fireball, as well as the corresponding detonation performance. High-speed video imaging and calibrated infrared thermography were used to capture the temporal and spatial evolution of the explosion fireball, enabling quantification of peak temperature and the duration of elevated temperature. In parallel, an explosive detonation velocity measurement technique employing ionization probes positioned at multiple axial locations along the cylindrical charge was adopted to systematically study the detonation velocity variation at different positions within the charge body after adding different NaCl proportions, and the relevant variation patterns were derived. The

*收稿日期: 2026-04-21; 修回日期: 2026-06-17

第一作者: 潘建(1987-), 男, 博士, 高级工程师. E-mail: panjian0903@163.com

通信作者: 冯雪磊(1991-), 男, 博士, 高级工程师. E-mail: fengxuelei2025@163.com

experimental results demonstrate a clear monotonic trend: with increasing NaCl content, the detonation velocity, heat of detonation, and fireball temperature all decrease monotonically. In particular, for a fixed total charge mass, when the NaCl content was increased to 10% by weight, the detonation velocity decreased by 4.1%, the heat of detonation dropped by 8.4%, the maximum fireball temperature was reduced by 30.7%, and the duration for which the fireball temperature exceeded 200°C was shortened by 70.9% compared with the pure RDX baseline. The multi-point detonation velocity measurements further revealed that the detonation wave remained steady along the charge axis, and the velocity reduction was uniform, indicating that NaCl does not disrupt the detonation propagation stability. To validate the practical efficacy, full-scale verification tests were conducted using a FAE mixture integrated with a central dispersion charge containing 5% NaCl. This indicates that adding NaCl as a flame suppressant to the dispersion charge in FAE munitions can effectively prevent flashback during the explosive dispersal of the fuel-air cloud.

Keywords: flame inhibitor, dispersed charge, flame jetting, cloud explosion warhead

1 引信

云爆战斗部区别于常规传统弹药,其装填高能云爆药剂,在使用时先将装有云爆药剂的弹体投掷或发射到目标上空,在中心分散装药的作用下把云爆药剂抛撒到周围空气中,燃料迅速扩散并与空气混合形成爆炸性云雾,然后给与一定强度的外界能量激发,使云雾发生爆轰。在云雾区内可形成大范围均匀的冲击波超压平台,而在中、远场冲击波衰减较慢,持续时间长,有效毁伤区域大,能量利用率高^[1-3]。由于其体爆轰的优势及面杀伤的特点,可对打击区域内的目标形成“全覆盖、无死角”式的毁伤,主要毁伤密闭或半密闭内的目标。由于云团的流散性,云爆战斗部抛撒形成的燃料空气炸药云团可避免复杂地形的干扰,直接覆盖于目标上方或内部,可对复杂地形目标形成高效毁伤^[4-5]。

云爆战斗部云团成形的能量来源于中心分散装药,也是云爆战斗部性能发挥的核心关键部件之一,如果设计不合理,可能导致云爆药剂分散过大或是过小,也可能导致云团在分散过程中发生窜火^[6],从而影响爆轰威力。贾承志等人^[7-8]通过仿真手段分析了云团窜火机理,得出中心装药量对云爆装置的窜火影响明显,主要发生在起爆初期阶段。Apparao 等人^[9]研究了中心装药种类对爆炸抛撒的影响,发现装药类型对窜火影响较大,与钝化黑索金和 TNT 相比,硝化棉作为中心分散药时更加安全。肖绍清^[10]设计了出直径不同的两种药柱间隔装填的 T 型分散装药结构,有效控制了云团分散形态和遏制云雾窜火现象。赵志国等人^[11]同样采用 T 型间隔装药代替柱形装药,降低起爆端药量,控制爆轰波径向传播,解决了百公斤级云爆战斗部静爆试验窜火问题。王永旭等人^[12]通过在中心装药周围添加超细干粉灭火剂为主体的阻燃介质,改变侧面和顶部的阻燃介质厚度,发现中心分散药爆炸产生的火焰基本消失。当比药量为 4% 时,乙醚-铝粉燃料在抛撒过程中不发生窜火。

为解决云爆药剂在中心装药分散过程中的窜火问题,本文以某云爆战斗部中心分散装药为研究对象,探索在钝化黑索金(RDX)药柱中添加消焰剂(如 NaCl 等)^[13]后对云雾窜火的影响,通过高速录像和红外成像仪研究了添加不同比例 NaCl 的钝化 RDX 药柱爆速、爆热和爆炸火焰的变化规律,并开展了某云爆战斗部云雾分散对比验证试验,为中心分散装药结构设计和防窜火设计等提供参考和数据支撑。

2 云雾窜火机理分析

白春华等人^[14]对云雾窜火机理和模型做了相关研究,研究发现,云雾窜火现象发生在二次引爆之前,燃料在分散过程中部分或全部燃烧,窜火位置大多发生在云雾的顶部或底部。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内时,中心分散装药爆炸产生的高温产物作为点火源将

燃料点燃发生自持燃烧乃至爆燃，从而发生云雾蹿火。云雾蹿火模型如图 1 所示，起爆中心分散装药后，云爆药剂向外运动，在云雾中部会形成一个空腔，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“公共区”由分散药爆轰产物、空气和燃料组成，蹿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，如果能抑制中心分散药爆炸产生的高温和火球，使其低于云雾的最小点火能量，可有效防止燃料在抛撒过程中发生蹿火。

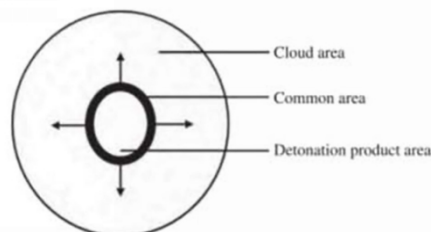


图 1 云雾蹿火模型^[14]

Fig.1 Cloud premature-combustion model^[14]

消焰剂 (NaCl) 在炸药产生爆炸反应的过程中要吸收热量，致使炸药的爆热降低，炸药的爆炸能量也随之降低，瓦斯燃烧试验证明^[13]：大多数碱金属、碱土金属的盐类及某些重金属的有机盐都是有效的消焰剂。比较常用的 NaCl 等消焰剂，是一类热容量大的物质，在炸药爆炸的一瞬间，在高温作用下食盐熔化、气化，吸收一部分爆热，降低爆温。张锦等人^[15]利用铁板加热试验测试了煤矿许用炸药中添加消焰剂后热分解特性，得到了含 NaCl 的炸药不易燃烧的结论。刘锋等人^[16]利用改进的铁板试验测试了 NaCl、KCl 两种消焰剂对煤矿许用乳化炸药热稳定性的影响。实验结果表明，含 NaCl 的乳化炸药的热稳定性优于含 KCl 的煤矿许用乳化炸药。国内学者^[17-19]还研究了含有 NaCl 的复合配方消焰剂配方对乳化炸药的影响，均得出了可以提高炸药爆热和爆温的结论。因此，在钝化 RDX 药柱添加适当比例的 NaCl，在不影响爆轰传播稳定性和驱动能力的前提下降低中心分散装药的爆温和火球，是防止云雾蹿火的有效措施之一。

3 试验

3.1 试验样品准备

将不同比例的 NaCl 作为消焰剂，与钝化黑索金 (RDX) 混合均匀后压制成药柱，药柱尺寸为 $\Phi 30\text{mm} \times 50\text{mm}$ ，具体参数如表 1 所示。选用 1000 倍的扫描电子显微镜 (NanoStation) 在 7.5mm 的工作距离上获得了 NaCl 与 RDX 混合后的情况，如图 2 所示，通过电镜照片可以看出，两者混合较均匀；RDX 颗粒周边布满 NaCl 颗粒。

表 1 不同比例 NaCl 与钝化 RDX 混合情况

Table 1 Various mass ratios of NaCl and desensitized RDX mixture preparations

No.	NaCl 含量	密度/(g·cm ⁻³)	尺寸/mm
1	0%		
2	5%	1.60	$\Phi 30 \times 50$
3	7%		
4	10%		

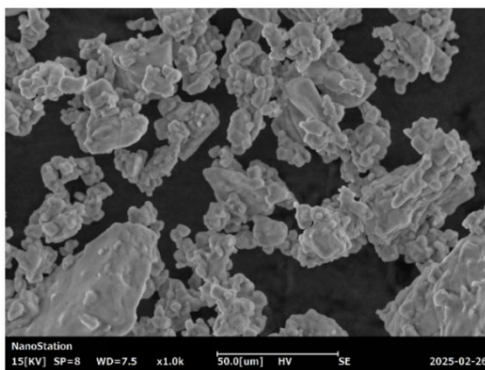


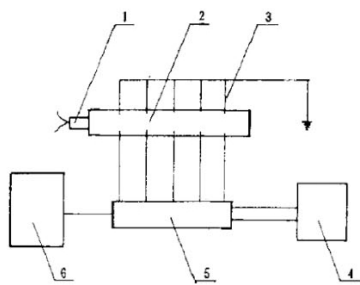
图2 钝化 RDX+5%NaCl 混合后的电镜照片 (1000 倍)

Fig.2 SEM Image of RDX with 5%NaCl(×1000)

3.2 不同含量 NaCl 的钝化 RDX 药柱爆速测试

3.2.1 试验设备

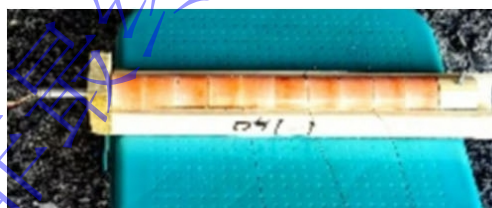
根据 GJB772.304-91 固体炸药爆速测定电测法和 GB/T 13228-2015 工业炸药爆速测定方法, 采用精度为 1ns 的爆速测量仪、直径 0.07mm 的电探针和 8#电雷管, 爆速测试原理和现场布设如图 3 所示。



1-雷管;2-被测试药柱;3-测针;4-直流稳压器
5-信号网络;6-测试仪

(a)爆速测试原理图

(a) Schematic of Detonation Velocity Measurement



(b)爆速测试现场布设图

(b) Test Setup of Detonation Velocity Measurement

图3 爆速测试原理和现场布设

Fig.3 Detonation Velocity Measurement and Test Setup

3.2.2 试验结果及分析

整个药柱由 5 节 $\Phi 30\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的药柱拼接而成, 每次测试可以得到四个爆速数据。试验时先做对比试验, 对比试验采用相同尺寸和相同质量的 RDX 药柱 (不含 NaCl), 通过对比试验和不同含量 NaCl 的 RDX 药柱爆速试验数据如表 2 所示。

表 2 不同含量 NaCl 的钝化 RDX 药柱爆速测试结果

Table 2 Detonation Velocity Results for RDX Charges with Varying Mass Percentages of NaCl

No.	被测试药柱	爆速/(m/s)				平均值/(m/s)
1	RDX+0%NaCl	8169	8192	8198	8209	8192.0
2	RDX+5%NaCl	7935	7991	8003	8080	8002.3
3	RDX+7%NaCl	7827	7865	7888	7978	7889.5
4	RDX+10%NaCl	7831	7844	7850	7897	7855.5

图 4 给出了不同含量 NaCl 的钝化 RDX 药柱爆速测试曲线, 结合表 2 的测试数据可以看出:

(1) 对比试验中, 钝化 RDX 药柱在不同位置的爆速均大于 8100m/s, 爆速平均值达到 8192.0m/s;

(2) 同一被测药柱中, 随着测点距雷管距离变大, 爆速在不断增长; (3) 随着钝化 RDX 药柱中 NaCl 含量的增加, 相同位置处爆速值也不断下降; (4) 当 NaCl 含量增加到 7% 以上时, 药柱不同位置处的爆速均降至 8000m/s 以下。试验结果表明, 添加 NaCl 可影响中心装药的爆速, NaCl 含量越多影响效果越明显。

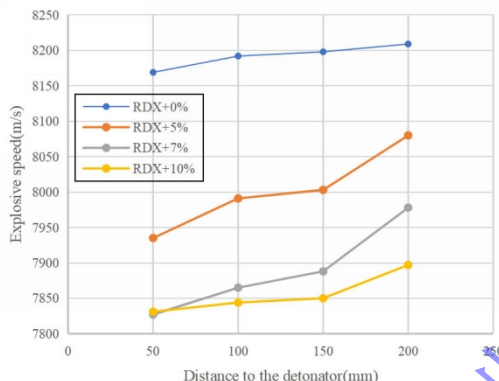


图 4 不同含量 NaCl 的钝化 RDX 药柱爆速测试曲线

Fig.4 Detonation Velocity Profiles for RDX Charges with Varying Mass Percentages of NaCl

3.3 不同含量 NaCl 的钝化 RDX 药柱爆热和火球温度测试

3.3.1 试验设备

根据 GJB772A-97 炸药试验方法中的爆热绝热法测定被测药柱爆热值, 采用高速录像和红外成像仪记录整个药柱爆轰过程, 高速相机的型号为 Fasteam MiniUX100, 拍摄速度为 2000s⁻¹, 像素 1280x1024; 红外热成像仪型号为 ROTRIC A615, 拍摄速度为 30s⁻¹, 像素 640x480。火球温度测试试验布置如图 5 所示, 药柱悬挂在控制高度为 1m, 药柱顶部插入 8#电雷管, 高速录像仪和红外热成像仪布置在距离爆心 20m 处。

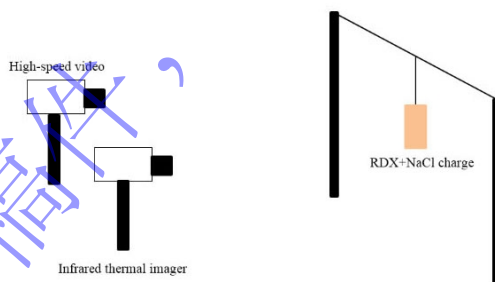


图 5 药柱温度测试试验布设示意图

Fig5 Diagram of Thermal Profiling Test Setup for Explosive Charges

3.3.2 试验结果及分析

(1) 爆热测试

选用 1 节 $\Phi 30\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的药柱作为爆热测试, 试验时先做对比试验, 对比试验采用相同尺寸和相同质量的 RDX 药柱 (不含 NaCl), 测试结果如表 3 所示。通过表 3 中的测试结果可以得出:

(1) 对比试验中, 钝化 RDX 药柱的爆热值为 4908.3kJ/kg; (2) 随着钝化 RDX 药柱中 NaCl 含量的增加, 爆热值也不断下降。试验结果表明, 添加 NaCl 可影响中心装药的爆热, NaCl 含量越多影响效果越明显。

表 3 不同含量 NaCl 的 RDX 药柱爆热测试结果

Table3 Heat Measurements for RDX Charges with Varying Mass Percentages of NaCl

爆 炸 与 冲 击
Explosion and Shock Waves

No.	被测试药柱	爆热值/(kJ/kg)	密度/(g·cm ⁻³)
1	RDX+0%NaCl	4908.3	1.60
2	RDX+5%NaCl	4680.9	
3	RDX+7%NaCl	4610.4	
4	RDX+10%NaCl	4495.3	

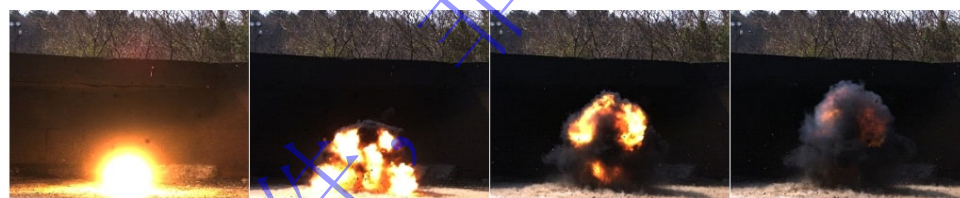
(2) 药柱爆轰火球表面温度测试

通过高速录像，可以观测到整个药柱的爆轰过程，对比试验和不同 NaCl 含量的钝化 RDX 药柱的爆轰过程如图 6 所示。从图 6 中可以看出：（1）对比试验中，药柱起爆后产生巨大火球，在 60ms 时火球顶部表面仍有明显亮光；（2）当钝化 RDX 内增加 5%NaCl 以上时起爆瞬间火球明显，随时间增大火球逐渐消失；（3）当钝化 RDX 内增加 5%或 7%NaCl 时，起爆 60ms 时火球没有明显亮光并基本消失；（4）当钝化 RDX 内增加 10%NaCl 时，起爆 40ms 时火球全部消失。试验结果表明，添加 NaCl 对抑制中心装药爆轰火焰具有良好效果，NaCl 含量越多抑制效果有明显。



1ms 10ms 40ms 60ms

(a)RDX+0%NaCl



1ms 10ms 40ms 60ms

(b)RDX+5%NaCl



1ms 10ms 40ms 60ms

(c)RDX+7%NaCl



1ms 10ms 40ms 60ms
(d)RDX+10%NaCl

图 6 不同 NaCl 含量的钝化 RDX 药柱的高速图像对比

Fig6 Comparative Imaging Analysis of RDX Charges with Varying Mass Percentages of NaCl

通过高速录像可以观察 NaCl 含量对钝化 RDX 药柱爆炸火焰的抑制情况，通过红外热成像仪则可以观察 NaCl 含量对钝化 RDX 药柱爆炸火球表面温度的影响情况。图 7 给出了对比试验和不同 NaCl 含量的钝化 RDX 药柱的爆轰火球表面最高温度，并统计了 200℃ 以上温度的持续时间，如表 4 所示。通过红外成像和统计结果表明：（1）对比试验中，药柱爆炸火球表面最高温度为 1483.0℃，爆轰 200℃ 以上温度持续 819ms；（2）随着钝化 RDX 药柱中 NaCl 含量的增加，爆炸火球表面最高温度也不断下降，爆炸后 200℃ 以上持续时间不断减少；（3）当钝化 RDX 内增加 10%NaCl 时，爆炸火球表面最高温度为 1027.6℃，爆炸后 200℃ 以上持续时间降为 238ms。试验结果表明，添加 NaCl 对抑制中心装药爆轰火球表面温度和持续时间均具有良好效果，NaCl 含量越多抑制效果有明显。

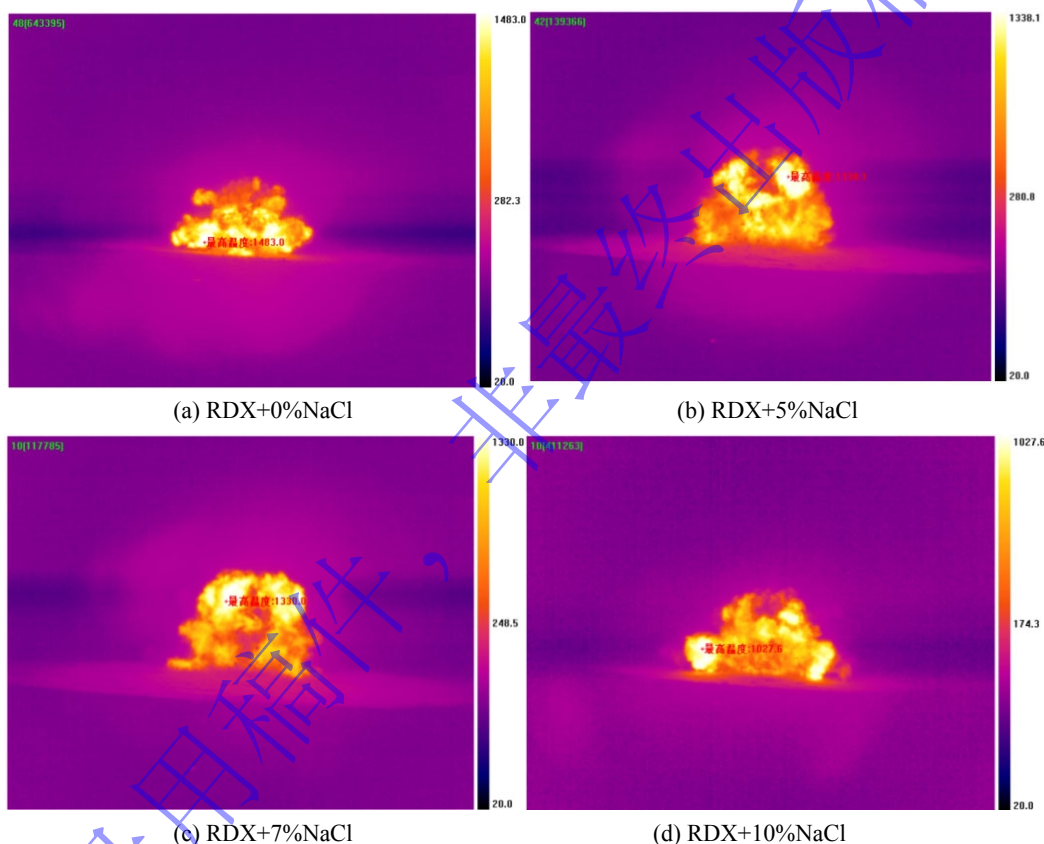


图 7 不同 NaCl 含量的钝化 RDX 药柱爆轰火球表面最高温度

Fig7 Peak Temperature of RDX Charges with Varying Mass Percentages of NaCl

表 4 不同含量 NaCl 的 RDX 药柱爆轰火球测试结果

Table4 Detonation Fireball Test Results for RDX Charges with Varying Mass Percentages of (NaCl)

No.	被测试药柱	火球表面最高温度/℃	爆轰火球 200℃ 以上持续时间(ms)
1	RDX+0%NaCl	1483.0	819
2	RDX+5%NaCl	1338.1	531
3	RDX+7%NaCl	1330.0	485
4	RDX+10%NaCl	1027.6	238

3.4 验证试验

为了验证消焰剂 (NaCl) 在中心分散装药中的影响情况, 开展了云爆战斗部的验证和应用试验。采用 5mm 厚的铝壳体, 中心管内径为 110mm, 其结构如图 8 所示。为保证爆轰传播稳定性, 验证试验的中心分散装药采用钝化 RDX+5%NaCl, 对比试验采用钝化 RDX 药柱, 中心装药的总质量和结构均保持一致。壳体内装填液固型云爆药剂, 中心分散装药与装填燃料的质量比值为 0.9%。利用高速录像记录状态两种中心分散装药情况下燃料的抛撒试验, 试验结果如图 8 所示。

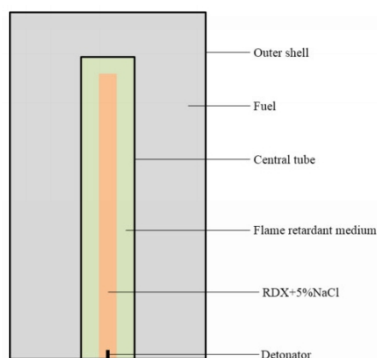


图 8 燃料抛撒结构示意图

Fig8 Schematic of Fuel Dispersion Structure

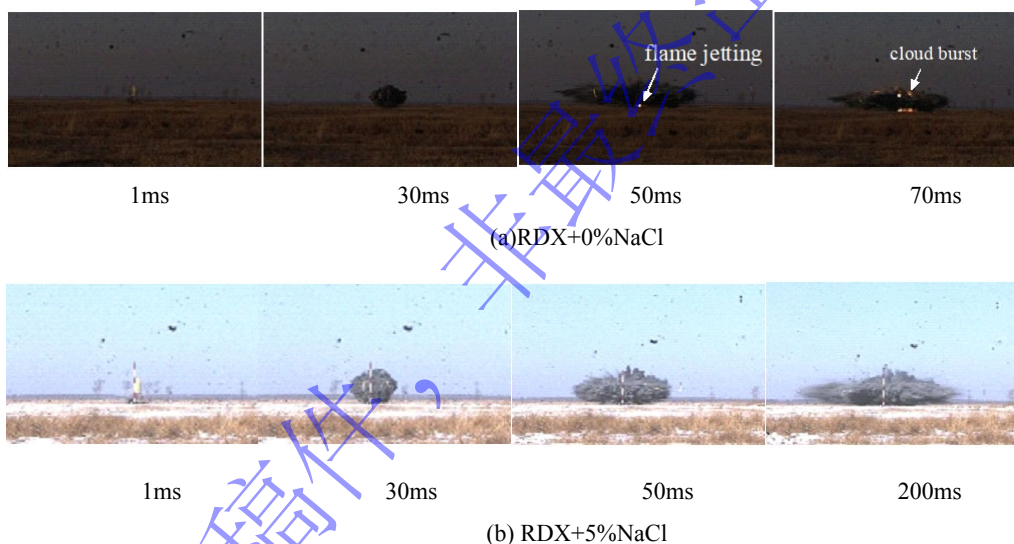


图 9 验证试验高摄像像图片

Fig9 High-Speed Imaging Frames from Verification Tests

通过图 9 中的高速试验结果可以看出: (1)在未添加 NaCl 中的对比试验中, 燃料在分散到 50ms 时云团底部出现了火光, 随之导致整个云团发生蹿火现象; 相同条件下, 起爆分散 200ms 后云团正常分散, 未发生蹿火。试验结果表明, 相同结构条件下添加适当比例的 NaCl 是一种防止云雾蹿火行之有效的办法, 同时并不妨碍中心装药的驱动能力。

4 结论

为解决云爆药剂在分散过程中的蹿火问题, 以中心分散装药为研究对象, 在钝化 RDX 中添加了不同比例的 NaCl, 开展了不同比例的 NaCl 对钝化 RDX 的爆速、爆热和爆温等相关测试试验和验证试验, 得到以下结论: (1)钝化 RDX 药柱中添加 NaCl 可降低爆轰后的爆速、爆热和爆轰火球温度; (2)随着钝化 RDX 中 NaCl 含量增多, 爆轰抑制效果越明显; (3)钝化 RDX+5%在适当中心分散装药结构下, 能够可靠分散云团并不发生蹿火。

参考文献

- [1] 饶国宁,周莉,宋述忠等. 云爆药剂爆轰超压测试及威力评价[J]. 爆炸与冲击, 2018,38(3):579-585.
RAO G N, ZHOU L, SONG, S Z, et al. Explosion overpressure measurement and power evaluation of FAE[J]. Explosive and Shock Waves, 2018,38(3):579-585.
- [2] 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.
WANG,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.
- [3] 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 multi-phase fuel air explosive[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008,23(4):360-370.
- [4] 陈嘉琛,张奇,马秋菊,等.固体与液体混合燃料抛撒过程数值模拟[J]. 兵工学报,2014,35(7):972-976.
CHEN J T, ZHANG Q, MA Q J, et al. Numerical simulation of dispersal process of solid-liquid mixed fuel[J]. Acta Armamentarii, 2014,35(7):972-976.
- [5] 许化珍,彭朝晖,李向东. 云爆弹杀伤效能研究[J]. 火箭与制导学报,2011,31(03):114-116.
XU H Z, PENG Z H, LI X D. The Research on Damage Efficiency of FAE[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011,31(03):114-116.
- [6] 郭彦懿,白春华,张奇. FAE 燃料炸药抛散窜火失效的实验研究[J]. 火炸药学报,2001,32(3):37-38.
DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.2001.03.013.
GUO Y Y, BAI C H, ZHANG Q. Experimental study on the failure of forming fuel air cloud[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001,32(3):37-38.DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.2001.03.013.
- [7] 贾承志,张奇. 云爆燃料分散过程窜火机理的数值模拟[J]. 含能材料,2020,28(3):248-254.
JIA C Z, ZHANG Q. Numerical Simulation on the Mechanism of Premature-combustion in the Process of FAE Fuel Dispersion[J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2020,28(3):248-254.
- [8] 史远通, 张奇. 爆炸驱动燃料抛散的非理想化特征[J]. 含能材料, 2015,23(4):330-335.
SHI Y T, ZHANG Q. Non-ideal Characteristics of Fuel Dispersal Driven by Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2015,23(4):330-335.
- [9] Apparao A, Rao C R, Tewari S P. Studies on formation of in-confined detonate vapor cloud using explosive means[J]. Journal of Hazardous Materials,2013,254-255.
- [10] 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:10.14077/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 & Propellants,2006,29(2):10-14.DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.2006.02.004.
- [11] 赵志国,李建,赵海平,等.某二次起爆型云爆战斗部防窜火技术研究[J].火箭与制导学报,2021,41(5):123-128.
DOI:10.15892/j.cnki.djzdx.2021.05.024.
ZHAO Z G, LI J, ZHAO H P, et al. The study of the technology of premature combustion from a twice-detonating FAE warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021,41(5):123-128.
DOI:10.15892/j.cnki.djzdx.2021.05.024.
- [12] 王永旭, 解立峰, 贾晓亮, 等. 阻燃介质在炸药驱动燃料分散中的应用[J]. 爆炸与冲击,2020,40(4):51-58.
WANG Y X, JIE L F, JIA X L, et al. Application of flame retardant medium in fuel dispersion driven by explosive[J]. Explosive and Shock Waves, 2020,40(4):51-58.
- [13] 刘伟. 高效消焰剂型安全高威力水胶炸药爆炸性能及破岩机制研究[D]. 安徽理工大学, 2021:25-27.

- LIU W. Study on the explosion performance and rock-breaking mechanism of high-efficiency flame-extinguishing safe high-power water-gel explosives [D]. Anhui University of Science and Technology, 2021:25-27.
- [14] 白春华, 张奇, 梁慧敏等. 云雾爆轰[M]. 北京:科学出版社,2012:145-155.
- [15] 张锦,张旭. 铁板实验法研究消焰剂对煤矿许用炸药热分解特性的影响[J]. 煤矿爆破,2012,01(96):18-21.
ZHANG J. ZHANG X. Study on the Influence of Flame-cooling Agent on the Characteristic of Thermal Decomposition of Permitted Explosive for Coal Mine Using Iron-plate Experiment[J]. Coal Mine Blasting,2012,01(96):18-21.
- [16] 刘锋,朱帅. 消焰剂对煤矿许用乳化炸药热稳定性的影响[J]. 火工品,2019,01:43-45.
LIU F, ZHU S. Influence of Flame Inhibitor on the Thermal Stability of Coalmine Permitted Emulsion Explosive[J]. Initiators & Pyrotechnics,2019,01:43-45.
- [17] 孙玉华. 消焰剂对提高煤矿乳化炸药安全性的研究[J]. 煤矿爆破,2011,4(95):15-18.
SUN Y H. Study on the Flame Inhibitors Used to Improve the Safety of Coalmine Permissible Emulsion Explosive[J]. Coal Mine Blasting,2011,4(95):15-18.
- [18] 杜明燃,梁琳娜,黄亮亮等. NaCl 和 KCl 复配三级煤矿许用乳化炸药研究[J]. 工程爆破,2019,25(5):68-86.
DU M R, LIANG L N, HUANG L L, et al. Research on the class three coal mine permissible emulsion explosive inhibited by a mixture of NaCl and KCl[J]. Engineering Blasting, 2019,25(5):68-86.
- [19] 陈友民. 二、三级煤矿许用乳化炸药消焰剂加入方式探讨[J]. 爆破器材,2010,39(4):10-12.
CHEN Y M. Discussion on the addition of flame-depressant in the Class two and three permissible emulsion explosive[J]. Explosive Materials, 2010,39(4):10-12.