

文章编号: 1003-1480(2024)02-0070-06

不同装药形态铝粉对装药爆炸能量释放特性的影响研究

张学瑞, 周涛

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 为探究不同装药形态铝粉对装药爆炸能量释放特性的影响, 设计并制备了一种外层含铝炸药内层高能炸药的复合装药, 通过静爆试验获取了试样爆炸场压力和温度等特征参数, 并拍摄试样爆炸火球的演变过程。试验结果表明: 相对于常规高能炸药和铝粉均匀分布的含铝炸药, 外层含铝炸药内层高能炸药的复合装药有利于增大火球半径, 延长火球持续时间; 其近场超压峰值略低, 在中远距离处冲击波效应得到增强, 但因为铝粉后燃反应速率相对较低, 增益不明显; 通过改变装药结构、改变铝粉分布状态可以调控爆炸能量释放, 但外层含铝炸药并没有发生粉尘爆炸, 主要以燃烧的形式释能。

关键词: 复合装药; 铝粉; 冲击波超压; 爆炸温度; 爆炸火球

中图分类号: TJ55; TQ560.7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.02.013

Research on the Influence of Aluminum Powder with Different Charge Structure on the Energy Release Characteristics of Explosive Charge

ZHANG Xue-ru, ZHOU Tao

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: In order to investigate the influence of aluminum powder with different charge structure on the energy release characteristics of explosive charge, a type of composite charge of aluminized explosive in outer layer and high-energy explosive in inner layer was designed and prepared, the characteristic parameters such as the explosion pressure and temperature of the composite charge were obtained by static explosion test, and the evolution process of the explosive fireballs were photographed. The results show that compared to high-energy explosive and aluminized explosive with uniformly distributed aluminum powder, composite charge of aluminized explosive in outer layer and high-energy explosive in inner layer is beneficial to increase the radius of the explosive fireball and extend the length of time. And the overpressure peak value in the near field is slightly lower, while the shock wave effect in the middle and far field is enhanced simultaneously, but the enhancement effect is not significant because the post combustion reaction rate of aluminum is relatively low. It is feasible to regulate the release of explosive energy by changing the charge structure and aluminum powder distribution, but the outer layer aluminum containing explosive did not experience dust explosion and it mainly releases energy through combustion.

Key words: Composite charge; Aluminum powder; Shock wave overpressure; Explosion temperature; Explosion fireball

复合装药是指使用两种炸药采用内外同轴结构形式的一种装药方法^[1]。在战斗部装药中, 常常将钝

收稿日期: 2023-10-14

作者简介: 张学瑞(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事爆破战斗部装药技术研究。

通讯作者: 周涛(1979-), 男, 研究员, 主要从事爆炸力学及战斗部设计研究。

基金项目: 国防科技卓越青年科学基金(J-K-ZQ-2101)。

引用本文: 张学瑞, 周涛. 不同装药形态铝粉对装药爆炸能量释放特性的影响研究[J]. 火工品, 2024(2): 70-75.

感炸药和高能炸药组成复合结构使用,这样的结构既保证了装药具有足够的能量输出,又在一定程度上保证了整体装药结构具有一定的安全性^[2],并且,复合装药通过改变装药结构能够实现复合装药爆炸能量释放调控。国内外学者对此开展了大量研究。Arthur等^[3]、尹俊婷等^[4]研究了复合装药的爆轰性能和破片成型性能,将外层高爆速炸药、内层高爆热炸药的同轴复合装药应用于杀爆战斗部中,研究表明通过调整复合装药组分配比,可以得到破片与冲击波超压综合毁伤能量最佳匹配,提高杀爆战斗部综合毁伤效能。牛余雷等^[1,5]研究了复合装药在不同介质中的爆炸冲击波超压变化规律,结果表明,复合装药结构可使两部分装药之间产生能量耦合,从而提高装药的能量输出。阚润哲^[6]对比研究了复合装药与单一装药在密闭空间内的爆炸特性,结果表明,复合装药具有更高的峰值超压,密闭空间高温环境持续时间更长。Trzciski等^[7]对含铝复合装药爆炸特性进行研究,发现其能够促进铝粉的燃烧,有利于增强冲击波超压。Hong等^[8]对复合装药的冲击波传播进行了数值模拟,复合装药的冲击波波形和压力分布与单一装药有明显差异,内外层同时起爆时超压分布面积最大。

现有研究主要偏重于复合装药冲击波感度和爆炸作用效果方面,而对于通过装药材料与结构调节能量输出时空分布特性的研究还较少。本文设计了一种内外同轴复合装药,内层为高能炸药,外层为含铝炸药,通过静爆试验同步获取了复合装药爆炸超压、温度等特征参数,并利用高速摄像机记录了爆炸火球的演变过程。对复合结构与单一装药静爆试验结果进行了分析,探究不同混合状态铝粉对装药爆炸能量释放特性的影响,以期为该复合结构的优化设计提供参考。

1 试验

1.1 试验样品

复合装药内层装药为 A-IX-I,密度为 $1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,采用柱形装药。外层材料为黑索今基含铝炸药,铝粉含量为 50%,密度为 $1.96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。装药结构如图 1 所示,含铝炸药嵌套在 A-IX-I 药柱外侧,装药一端中心

装有雷管座,利用雷管采用上端面中心起爆方式。



图 1 装药结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of charge structure

为探究铝粉对复合装药能量释放特性的影响,以及铝粉在装药中不同空间分布对能量释放特性的影响,制备了 4 组装药。除 1 组复合装药以外,还制备了 TNT、A-IX-I 和 A-IX-II 各 1 组单一装药,其中 TNT 炸药作为参考,A-IX-I 为不含铝的常规高能炸药,主要组分为 RDX; A-IX-II 炸药含铝量为 20%,密度为 $1.77 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;复合装药整体铝粉含量约为 20%,与 A-IX-II 炸药一致。各组装药质量均为 856g。

1.2 试验装置与布局

试验地点为室外靶场,装药竖直放置在木质弹架上,弹架平台距离地面高度为 1.5 m。静爆试验共 4 发,每发试验需要架设 1 路高速摄影仪,测试 6 路冲击波超压,测试 3 路爆炸温度。选择 6 个测试点布置自由场超压传感器,每个测试点布置 2 个传感器,其爆心距分别为 0.85, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m,并且其高度与装药中心保持一致;选择 3 个测试点布置温度传感器,其爆心距分别为 1.0, 1.2, 1.5 m,其高度与装药中心一致;在爆心另一侧树立标杆,标杆的间距为 1.0 m,共 4 根,用于观测火球半径;在垂直于标杆布置走向的方向上布置高速摄影仪,高速摄影仪的拍摄帧率为 25 000 帧/s,用于拍摄爆炸火球的演变过程。详细装置布局如图 2 所示。

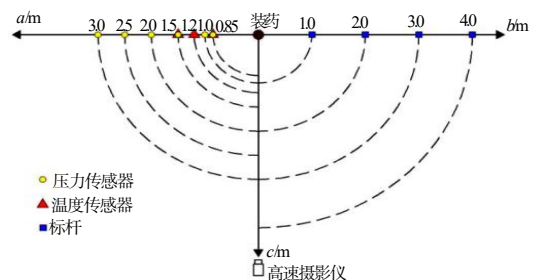


图 2 试验装置布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of test device layout

2 结果与分析

Miller P J 将含铝炸药释能过程分为两个部分^[9]：首先，高能炸药组分发生 CJ 爆轰反应，此时仅有少量铝粉参与；之后，CJ 爆轰产物与大部分铝粉发生后燃反应。复合装药本质上是改变了铝粉参与反应的时机，内层装药 A-IX-I 率先爆轰，为外层含铝炸药创造良好的反应环境，并且，铝粉集中分布于外层结构中，碎化飞散后固体颗粒浓度更高，有利于提高反应速率。因此，对复合装药的能量输出特性研究与分析可以借鉴含铝炸药。

2.1 压力与冲量

0.85, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m 测点处的超压时程曲线如图 3 所示。

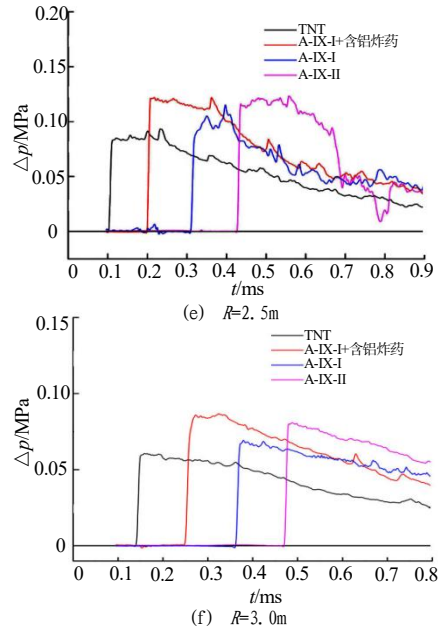
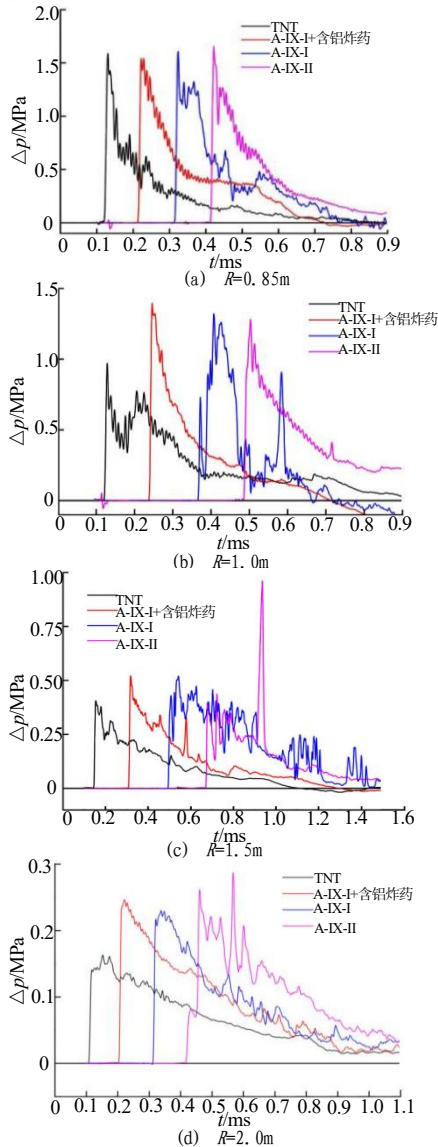


图 3 超压—时程曲线

Fig.3 Overpressure vs time history curve

利用 Origin 软件处理试验信号，为便于对比，将部分曲线进行了适当平移。由图 3 可见，0.85 m 处复合结构装药峰值超压相对于单一装药低 0.05 ~ 0.11 MPa。因为复合装药外层结构为含铝炸药，相对于单一装药其超压峰值势必会有所降低^[10]。在 1.0 m 处复合结构的冲击波峰值超压开始高于单一装药，TNT 峰值超压衰减速度最快，复合结构相对于 TNT 高 0.42 MPa，相对于 A-IX-I 和 A-IX-II 分别高 0.07 MPa 和 0.11 MPa。1.0 m 之后，复合装药的峰值超压基本高于其他单一装药。研究表明内层高能炸药、外层含铝炸药的结构形式能够延缓冲击波超压的衰减速率，有利于延长正压区的持续时间，增大有效毁伤区域。

根据图 3 得到装药爆炸冲击波首峰超压值以及冲量，如表 1 所示。

表 1 不同装药在不同测点的超压峰值及冲量

Tab.1 Overpressure peak and specific impulse of different charges at different measuring points

R /m	Δp /MPa				I (Pas)			
	TNT	A-IX-I+ 含铝 炸药	A-IX-I	A-IX-II	TNT	A-IX-I + 含铝 炸药	A-IX-I	A-IX-II
0.85	1.59	1.54	1.61	1.65	21360	22457	22495	21783
1.0	0.97	1.39	1.32	1.28	17232	15555	13803	21909
1.5	0.41	0.52	0.52	0.44	10996	12552	20019	13109
2.0	0.16	0.25	0.23	0.29	70.12	91.22	72.26	75.92
2.5	0.09	0.12	0.12	0.12	50.55	67.19	38.98	63.64
3.0	0.06	0.09	0.07	0.08	28.64	36.33	32.81	40.88

装药爆炸冲击波超压峰值随传播距离的变化如

图4所示。由图4可见,因为复合装药外层含铝炸药爆速爆压均较低,所以爆炸近场超压峰值低于单一装药。含铝炸药的后燃反应分为2个阶段:首先,铝粉与爆轰产物发生无氧反应,此阶段反应迅速,在几微秒之内完成;当与空气接触混合后会发生有氧反应,反应持续时间能够达到几百微秒,铝粉的后燃反应能够提供大量能量。其中,无氧反应阶段释放的能量有利于延缓冲击波的衰减,爆轰产物和铝粉在与空气接触之后,由于稀疏波的影响,有氧燃烧对冲击波的增益并不明显^[11],燃烧释能主要以热能的形式释放。因此,冲击波在1.0m之后,复合装药超压峰值高于TNT和A-IX-I单一装药,中远场的冲击波效应增强。

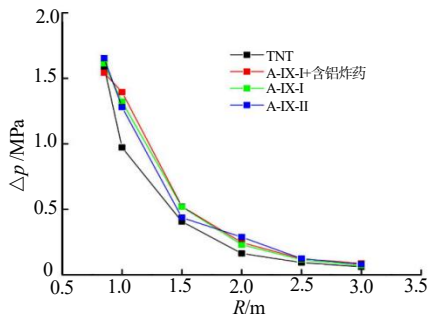


图4 超压峰值随传播距离的变化曲线
Fig.4 Variation curve of overpressure peak value with propagation distance

A-IX-II 炸药为含铝炸药,复合装药与之相比,优势并不明显。分析其原因,复合装药中铝粉相对于RDX的爆轰反应具有一定的延迟,爆轰反应之后铝粉与爆轰产物一起向外飞散并发生无氧燃烧反应,当与空气中的氧气混合之后发生有氧燃烧反应,但其反应速率较慢。反应产生的能量能够延缓冲击波的衰减,但这种影响难以产生质变,所以复合装药与单一装药在中远场的冲击波超压峰值差距不大。

冲击波冲量随传播距离的变化如图5所示。

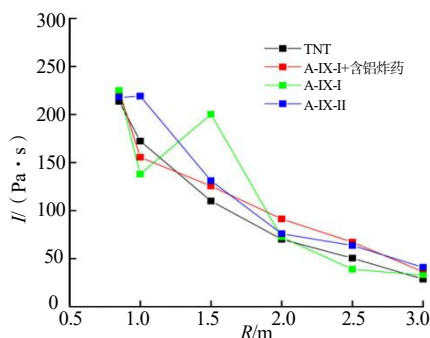


图5 冲量随传播距离的变化曲线
Fig.5 Variation curve of specific impulse value with propagation distance

由图5可见,在0.85m处4组试样冲量接近,均在220 Pa·s左右。随着传爆距离增大,TNT相对于其他试样下降速度更快,1.5m之后降为0.85m处的51%。复合装药冲量下降速度最慢,在2.0m和2.5m处略高于A-IX-II装药,而冲击波超压峰值却恰恰相反,这说明复合装药形态有利于延缓压力下降速率,能够延长正压作用时间,从而使冲击波冲量在中远场获得提高。

2.2 温度

利用温度传感器获得的不同测点的峰值温度如图6所示。由图6可见,在1.0m处复合装药相对于单一装药的爆炸峰值温度明显更高,分别是A-IX-I的2.17倍和TNT的1.66倍,在1.2m和1.5m处也具有一定的优势,表明复合装药有利于提高爆炸场温度。

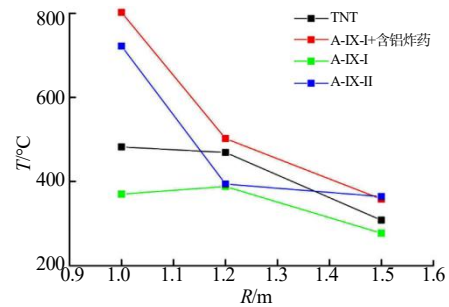


图6 爆炸峰值温度随传播距离的变化曲线
Fig.6 Curve of explosion peak temperature with propagation distance

A-IX-II 装药与复合装药含铝量相当,但在1.0m和1.2m处其爆炸温度峰值比复合装药低80~106°C,这是因为复合装药中铝粉集中分布在装药外层中,使得铝粉的反应浓度更高,有利于提高后燃反应的反应速率和反应度。高能炸药发生爆轰反应之后绝大多数能量用来做机械功,部分以热能形式释放,铝粉后燃反应能够提供大量热能,从而提高爆炸场的温度,而复合装药能够进一步发挥铝粉后燃的优势,因此具有比铝粉均匀分布的含铝炸药更高的爆炸温度。

2.3 爆炸火球

静爆试验爆炸火球的演变过程如图7所示。由图7可见,TNT和A-IX-I单一装药爆炸火球轮廓呈现中间大、两端小的形状,这是由于一端中心起爆的起爆方式和侧向稀疏波的影响而导致^[12]。随着体积膨胀,火球在接触到地面时会进行反弹。火球亮度开始时较为明亮,然后在1ms内由明亮转为晦暗,并伴随有大

量的黑烟产生，火球轮廓逐渐模糊。

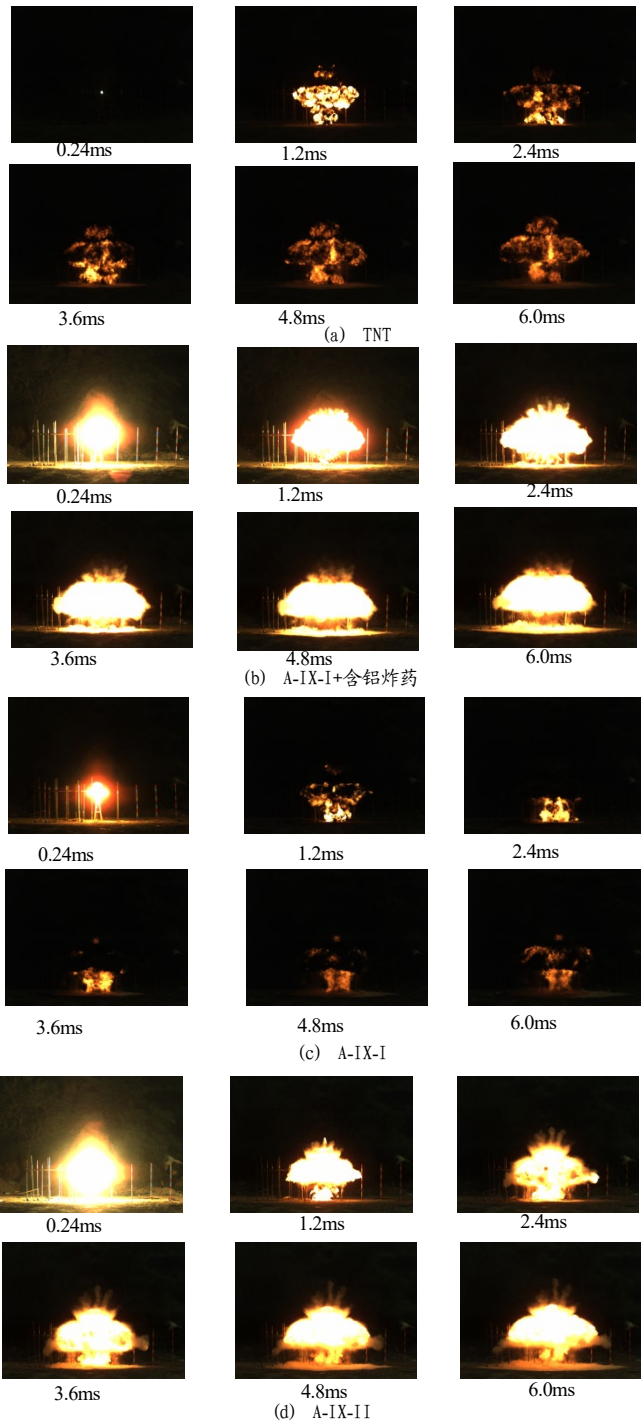


图7 爆炸火球演变过程

Fig.7 Evolution process of explosive fireball

复合装药的火球效应与 TNT 和 A-IX-I 装药存在显著差异。复合装药的爆炸火球整体轮廓近似为椭圆形，这是因为侧向冲击波效应被增强，爆轰产物飞散速度更快，其火球最大半径明显大于 TNT 和 A-IX-I 装药，而且火球亮度始终非常明亮。因为外层装药中的铝粉在炸药爆轰之后会发生后燃反应，与爆轰产物

和空气混合后的燃烧反应会产生大量的能量，这些能量使得爆炸火球的光热效应增强，持续时间更长。A-IX-II 装药爆炸火球与复合装药近似，其火球效应明显强于 TNT 和 A-IX-I 单一装药。

通过观察设立的标杆获得爆炸火球的最大半径，通过高速摄影图像帧率和帧数获得爆炸火球的持续时间，详细数据如表 2 所示。

表2 爆炸火球最大半径和持续时间

Tab.2 Maximum radius and duration of explosive fireball

序号	类型	最大半径/m	持续时间/ms
1	TNT	2.46	-
3	A-IX-I+含铝炸药	2.57	81.28
4	A-IX-I	2.15	51.84
5	A-IX-II	2.52	75.88

由表 2 可见，复合装药的火球最大半径和持续时间明显大于单一装药。由此来看，复合装药对于爆炸火球的增益是十分显著的，复合装药的火球半径对比单一装药增长了 0.05~0.42m，持续时间约为 TNT 和 A-IX-I 单一装药的 1.66 倍。对比 A-IX-II 装药，复合装药爆炸火球的各项数据均略高于前者，这是因为复合装药改变了铝粉参与反应的时机，后燃反应中铝粉的反应度更高。

火球外边缘最大半径随时间的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可见，火球半径在起爆后 1ms 内增长速度较快，随后 4 组试样逐渐产生差异，单一装药外边缘逐渐熄灭，使得火球半径均有不同程度的缩小，复合装药依旧有增长的趋势。尽管复合装药半径增长速度不是最快的，但增长持续时间更长，5ms 左右半径才略有降低。复合装药铝粉集中在外层，使得火球外边缘在一段时间内能够始终燃烧释能，因而火球半径稳定增长，最大半径大于单一装药。

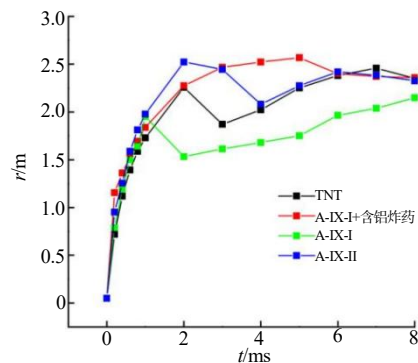


图8 爆炸火球半径随时间的变化曲线

Fig.8 Variation curve of explosive fireball radius with time

综上所述，复合装药中大部分铝粉通过燃烧释放

能量,爆炸场温度得到明显提升,热毁伤效应提高,但是对冲击波贡献较小,既改变铝粉的分布状态在一定程度上有利于其充分反应,但是无法使外层含铝炸药发生粉尘爆炸。粉尘爆炸主要受5方面因素影响,分别是可燃粉尘、氧化物、点火能量、密闭空间和粉尘云团^[13]。试验中非密闭空间环境和较低的粉尘浓度是无法发生粉尘爆炸的主要原因。此外,根据爆轰形成的条件,外层含铝炸药还存在反应速率较慢和气体产物少的问题。解决上述问题是未来复合装药优化的主要方向,可以考虑在外层含铝炸药配方中加入能够产生气相的添加剂,增大粉尘云团浓度和气体产量,以提高反应速率。

3 结论

为探究不同混合状态铝粉对装药爆炸能量释放特性的影响,设计了一种外层含铝炸药内层高能炸药的复合装药,通过分析静爆试验数据获得了复合装药的释能规律,结果表明:

(1) 复合装药对于冲击波效应的增益有限。复合装药爆炸后近场冲击波超压峰值会明显低于单一装药,但是其冲击波超压的衰减速率亦低于单一装药,这使其远场超压高于其他装药。在1.0m处,相对于TNT、A-IX-I和A-IX-II分别高出0.42,0.07,0.11 MPa。4组试验冲量比较接近,但是复合装药在2.0m和2.5m处略有优势。

(2) 复合装药有利于增强爆炸火球效应,在1.0m复合装药爆炸峰值温度分别是A-IX-I的2.17倍和TNT的1.66倍;与铝粉含量相当的A-IX-II相比,内层高爆速炸药、外层含铝炸药的结构形式有利于爆轰产物的膨胀飞散,铝粉反应速率更快,爆炸场温度更高。并且复合装药爆炸的火球最大半径显著大于其他装药,增长了0.05~0.42m。

(3) 复合装药设计的初衷是希望通过非均匀分布的铝粉发生二次反应增强毁伤威力,但从结果来看,铝粉未发生粉尘爆炸,以燃烧反应为主,反应速率较低,对冲击波的贡献较小,根据爆轰形成的条件,需要解决其反应速率较慢和气体产物少等问题。

参考文献:

- [1] 牛余雷,王晓峰,余然.二元复合炸药装药水下爆炸能量输出特性[J].含能材料,2009,17(04):415-419.
- [2] Nouguez B. Dual formulation warheads: A mature technology [C]// Processing of Insensitive Munitions Technology Seminar. Williamsburg, 1996.
- [3] Arthur Spencer, John Corley. Blast and fragmentation enhancing explosive: US, 5996501[P]. 1999-12-07.
- [4] 尹俊婷,蔚红建,栗宝华,等.金属加速炸药/高爆热炸药复合装药爆炸特性研究[J].火工品,2015(3):33-37.
- [5] 牛余雷,王晓峰,冯晓军.二元炸药装药空中爆炸的输出特性[J].火炸药学报,2009,32(04):45-49.
- [6] 阚润哲,聂建新,刘正,等.复合装药密闭空间爆炸能量释放特性[J].火炸药学报,2022,45(3):377-382.
- [7] TRZCIN'SKI W A, BARCZ K, PASZULA J, et al. Investigation of blast performance and solid residues for layered thermobaric charges[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(1):40-50.
- [8] HONG X W, LI W B, CHENG W, et al. Numerical simulation of the blast wave of a multilayer composite charge [J]. Defence Technology,2020,16(1):96-106.
- [9] Miller P J.A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in non-ideal explosives [J]. Mrs Online Proceedings Library Archive, 1995(418):413-420.
- [10] 冯晓军,黄亚峰,徐洪涛.AI粉对含铝炸药爆轰性能的影响[J].火工品,2012(1):38-41.
- [11] 张先锋,赵晓宁.夹层装药的超压爆轰研究综述[J].含能材料,2011,19(03):352-360.
- [12] 李凌峰,王辉,韩秀凤,等.AI/PTFE与炸药组合装药的爆炸释能特性[J].火炸药学报,2023,46(01):69-75.
- [13] Zhang S A, Zhang L G. Effect of non-vacuum storage condition on the minimum explosible concentration of aluminum dust[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2019,10(3):219-222.