

DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202203020

复合装药密闭空间爆炸能量释放特性

阚润哲¹, 聂建新¹, 刘正¹, 郭学永¹, 焦清介¹, 朱英中², 刘攀²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

摘要: 为研究不同装药结构 HMX 基含铝炸药在密闭空间内的爆炸特性, 开展了复合装药结构和均一装药结构样品在密闭空间爆炸的实验研究, 建立了具有测温和测压功能的密闭爆炸实验装置, 获得了复合装药结构样品密闭空间爆炸压力和温度数据, 并与相同化学组成的均一装药结构进行了对比。结果表明, 具有复合装药结构样品密闭空间爆炸冲击波峰值压力和准静态压力比相同化学组成的均一装药结构分别提高了 12.7% 和 8.0%。通过外层高爆速炸药、内层高铝氧比炸药的内外层复合装药结构能够提高装药密闭空间的爆炸能量输出; 与均一装药结构密闭空间爆炸峰值温度 745℃ 相比, 复合装药结构峰值温度下降 124℃, 为 621℃, 但具有内外层复合装药结构样品在密闭空间中能够维持长时间 600℃ 左右的高温环境。

关键词: 爆炸力学; 复合装药; 含铝炸药; 密闭空间爆炸; 准静态压力; 瞬态温度

中图分类号: TJ55; O38

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2022)03-0377-06

Energy Release Characteristics of Composite Charge in Confined Space Explosion

KAN Run-zhe¹, NIE Jian-xin¹, LIU Zheng¹, GUO Xue-yong¹, JIAO Qing-jie¹, ZHU Ying-zhong², LIU Pan²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Chongqing Hongyu Precision Industry Co. Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In order to research the explosion characteristics of HMX-based aluminized explosives with different charge structures in confined space, experiments on the confined explosion of samples with composite charge structures and uniform charge structures were carried out. A closed explosion experimental device with temperature and pressure measurement was established. The explosion pressure and temperature of the sample with composite charge structure were compared with the same sample having the uniform charge structure. The result shows that the peak pressure and quasi-static pressure of the explosion shock wave of the sample with composite charge structure are 12.7% and 8.0% higher than those with the uniform charge structure, respectively. The explosion energy release in confined space can be improved through the composite charge structure, which consists of the outer layer with high detonation velocity explosive and the inner layer with high aluminum/oxygen ratio explosive. The peak explosion temperature of composite charge structure is 621℃, which decreases by 124℃ compared with the uniform charge structure of 745℃, but the samples with composite charge structure can maintain a high temperature around 600℃ in confined space for a long period.

Keywords: explosion mechanics; composite explosive charge; aluminized explosives; confined space explosion; quasi-static pressure; transient temperature

引言

随着现代战争的不断发展和精确制导武器的广泛运用, 出于防护与反侦察等需求, 许多国家将重要军事设施转移到地下等具有坚固防御能力的

建筑内。对于这一类具有典型舱室结构的目标, 例如舰船舱室、地下堡垒等, 密闭空间爆炸是最常见也是最为重要的毁伤手段^[1-3]。研究有效打击密闭空间军事目标的高能炸药成为提高战斗部毁伤能力的重要方向和主要趋势, 与研制新型单质炸药和

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(No. 22175026)

作者简介: 阚润哲(1993-)男, 博士研究生。E-mail: krz1221@163.com

通信作者: 聂建新(1977-)男, 博导, 副研究员。E-mail: niejx@bit.edu.cn

引用本文: 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.

KAN Run-zhe, NIE Jian-xin, LIU Zheng, et al. Energy Release Characteristics of Composite Charge in Confined Space Explosion[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants(Huozhayao Xuebao), 2022, 45(3): 377-382.

高能燃料相比,利用现有炸药和金属燃料进行合理的拓扑结构设计,是实现武器高效毁伤^[4]和安全性^[5]要求的重要途径之一。

二元复合装药是指采用两种炸药通过内外嵌套、上下叠加等方式进行组合的一种装药方法,可以有效提高装药的爆炸毁伤性能。Spencer^[6]和 Kuhns^[7]分析了二元装药的爆轰特性发现,采用二元装药能够明显提高炸药爆轰性能。Manfred^[8]分析了二元装药的爆轰特性,为装药设计提供了理论依据。Kato 等^[9]利用高密度炸药和高爆速炸药组成的复合装药结构,使复合装药爆速和压强明显提高。Trzeciński 等^[10]和 Maiz 等^[11]对内外层结构含铝装药爆炸特性的实验表明,两种装药结构中铝粉的反应机制不同,复合装药促进了铝粉的燃烧,增强了冲击波超压。Hong 等^[12]对复合装药的冲击波传播进行了数值模拟,发现复合装药的冲击波波形和压力分布有着明显改变,内外层同时起爆时超压分布面积最大。英国 QinetiQ 公司提出了一种多层环形复合装药结构^[13],在密闭爆炸室内对两种不同模式的复合装药结构的研究表明,不同起始阶段的能量输出存在差异。

国内对于复合装药的研究开展相对较晚,但成果丰富。张先锋等^[14]研究发现复合装药中内层装药会形成明显的超压爆轰现象,实际爆轰压力远大于 C-J 爆轰压力,对于提高炸药装药的能量利用率具有很大的优势。牛余雷等^[15-16]对复合装药空中爆炸和水中爆炸特性研究表明,复合装药空中爆炸冲击波峰值超压、炸药爆炸的火球直径和持续时间大幅增加,水中爆炸总能量也得到了提高。周涛等^[17]开展了内层高爆速炸药和外层低爆速炸药的含铝装药的圆筒实验,研究表明复合炸药的爆速相

比均一装药略微降低,但由于其爆轰波具有明显的内聚效应,提高了内层装药的能量释放率。李梅等^[18]测试了几种典型高能炸药的均一装药和内外层装药的冲击波超压,提出内外层复合装药的冲量更大,更有利于提高战斗部的径向输出威力。

综上所述,尽管目前对复合装药的能量释放参数已有较多研究,但多集中在空中爆炸能量释放特性研究方面,缺乏对密闭空间环境这类重点毁伤目标的研究。此外,在复合装药的研究中多以冲击波超压进行评价,缺乏对其他参数尤其是瞬态温度的测试,而温度是密闭空间重要的毁伤元之一。因此本研究利用自研的密闭爆炸实验装置对 HMX 基复合装药密闭空间爆炸冲击波和瞬态温度进行了测试,并与相同化学组成的均一装药结构进行了对比,研究了复合装药密闭空间爆炸能量释放特性。

1 密闭爆炸实验

1.1 实验样品

实验样品的两种装药结构分别为二元同轴内外层复合装药结构及其混合均一装药结构。复合装药结构样品采用内层压装成型、外层浇注成型的工艺制备。均一装药结构样品则为浇注成型方式。两种装药样品配方(质量分数)为: HMX 66.7%; AP 4.3%; Al 20%; 成型载体 9%。其中,复合装药内外层质量比为 1:2,两种样品实验药量均为 200 g。两种装药结构实验样品配方及参数如表 1 所示,实验样品如图 1 所示。为了保证样品充分起爆,每个实验样品配备 40 g JH-14 药柱扩爆药,并采用 11 g 钝化 RDX 药柱起爆。

表 1 实验样品成分及参数

Table 1 Composition and parameters of experimental samples

sample		w / %				diameter / mm	n(Al) / n(O)	v / (m · s ⁻¹)
		HMX	AP	Al	forming carrier			
composite charge	outer	80	0	10	10	50	0.17	8309
	inner	40	13	40	7			
uniform charge		66.7	4.3	20	9	50	0.38	8073

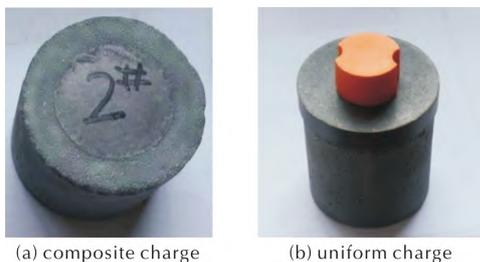


图 1 实验样品

Fig. 1 The experiment samples

1.2 密闭爆炸实验装置

实验用密闭空间爆炸实验装置为自制立方体结构,能更好地模拟实际的房屋和舱室结构,其主体结构尺寸为 1.3 m × 1.3 m × 1.3 m,容积 2200 L,可以进行 1 kg 当量 TNT 爆炸实验,具备准静态压力和瞬态温度测试能力,密闭空间爆炸实验装置如图 2 所示。实验时,样品从上端起爆系统垂直吊入装置中心,通过布置在管道中的压力传感器和安装

在壁面的瞬态温度传感器采集爆炸产生的准静态压力和温度数据。实验前通过真空泵向装置内壁注气,对装置气密性进行检测。

实验用压力传感器为美国 PCB 公司 113B26 压力传感器,传感器量程为 3450 MPa,灵敏度为 1451 mV/MPa,所有压力传感器均通过传感器基座安装在导管中。通过美国 PCB 公司 482C 系列 4 通道信号适调仪对传感器信号进行处理并使用德国 HBM 公司 gen7t 28 通道高速数据采集系统对压力数据进行收集,数据采集系统的采样频率 100 MB/s。瞬态温度的采集使用美国 NANMAC E6 型高耐压侵蚀型快速响应热电偶,该型热电偶响应时间可达 50 μ s,最大耐压 172 MPa,测温范围 0 ~ 2350 $^{\circ}$ C,可采集密闭爆炸装置内瞬态温度变化。瞬态温度数据收集设备使用领邦众泰 ESC 型数据采集/信号调理系统。实验时温度和压力传感器布置如图 2 所示。

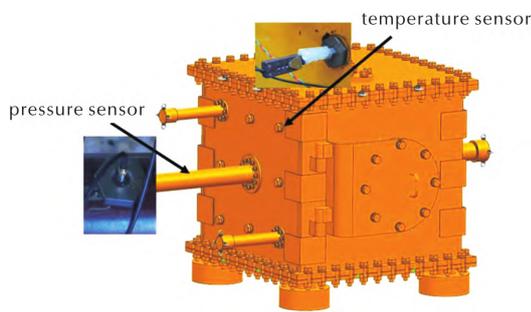


图 2 传感器布置图

Fig. 2 Diagram of the sensor arrangement

2 结果与讨论

2.1 典型压力时程曲线分析

图 3 为自研密闭空间爆炸实验装置中炸药爆炸典型压力时程曲线。对图 3 分析可知,在 0 ~ 100 ms 压力数据采集时间内没有出现压力的快速下降,能够较好地维持准静态压力,满足实验测试要求。此外,由压力时程曲线可以看出含铝炸药密闭空间准静态压力的变化可大致分为典型的 3 个阶段:

第一阶段为初始冲击波及其反射阶段。表现为冲击波在密闭爆炸装置内的不断反射,导致压力曲线大幅震荡,该阶段持续时间为 20 ~ 30 ms。

第二阶段为压力持续阶段。表现为压力的稳定和非线性下降^[19],该阶段持续时间很长,约 70 ~ 80 ms。

第三阶段为压力衰减阶段。表现为密闭体系降温导致压力的衰减过程^[20],其开始于第二阶段

结束。

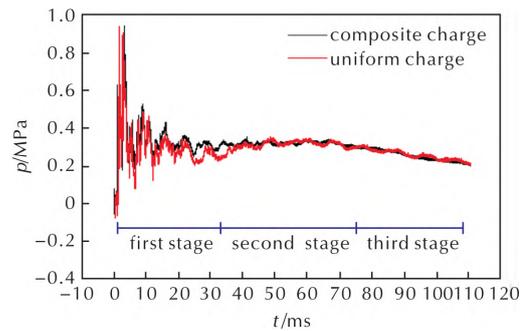


图 3 密闭爆炸实验典型压力—时程曲线

Fig. 3 Typical $p-t$ history curve of explosion experiment in confined space

2.2 冲击波峰值压力分析

图 4 和表 2 分别为两种炸药在密闭空间内爆炸后由压力传感器采集到的压力—时程曲线和两组平行实验冲击波峰值压力数据处理结果。

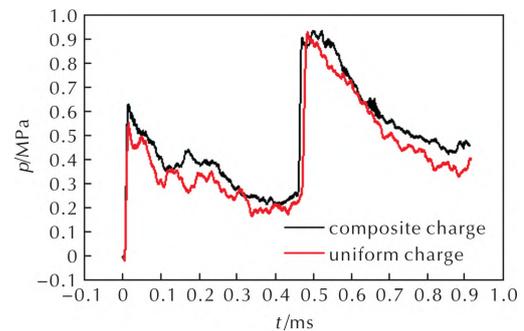


图 4 冲击波压力—时程曲线

Fig. 4 The $p-t$ history curve of shock wave

表 2 冲击波峰值压力实验结果

Table 3 Result of peak pressure of shock wave

charge structure	pressure peak/MPa			$\varphi / \%$
	1	2	average	
composite charge	0.63	0.61	0.62	3.17
uniform charge	0.56	0.54	0.55	3.57

由表 2 可知,复合装药平均冲击波峰值压力为 0.62 MPa,而均一装药结构为 0.55 MPa,两组实验所获得的峰值压力误差均在 5% 以内,具有较好的一致性,通过复合装药结构可提高冲击波峰值压力。此外,在密闭空间内冲击波第二个峰值压力为 0.92 MPa,较初始冲击波峰值压力提高 0.3 MPa,表明密闭空间爆炸产生的冲击波经过反射和叠加后得到了增强,之后逐渐趋于稳定,图 3 中典型压力时程曲线可以明显观察到这一现象。

2.3 准静态压力分析

2.3.1 数据处理方法

准静态压力是由于爆炸产生的高温高压气体

向外扩张膨胀受到密闭空间约束形成的相对稳定的压力。关于准静态压力数据的处理尚没有统一和标准的方法,目前国内外准静态压力处理方法中,一种是定义处理后的压力峰值为准静态压力^[21-22],另一种是取用一定时间段内的平均压力表示准静态压力^[23-24],且对于准静态压力时间范围的选取尚存争议。

如图 3 所示,由于冲击波在密闭空间内不断产生反射叠加效应,初始阶段的压力峰值呈增长趋势,但是随着时间的增加,压力幅值和波动减弱,压力在密闭空间内分布均匀,形成了一个压力幅值比反射冲击载荷峰值小很多的压力,通过选取一段时间内压力平均值作为准静态压力的方法,更具有参考意义。因此,基于上述分析和实验所获得的压力时程曲线数据,本研究选取 5~20 ms 内的压力平均值作为最终的准静态压力,一方面更好地体现了准静态压力的作用结果,另一方面避免了前期压力震荡和后期压力衰减对准静态压力结果的影响。

利用相邻平均法对压力曲线进行滤波处理,图 5 为经过处理后的压力—时程曲线。由图 5 可以看出,经相邻平均法降噪处理后的曲线在不改变密闭空间内爆炸压力时程曲线特征的基础上,能够更加直观和精确地判断准静态压力的大小。

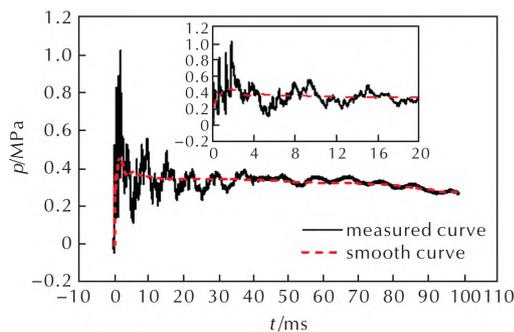


图 5 压力—时程曲线处理结果及对比

Fig. 5 $p-t$ history curve processing results and comparison

2.3.2 准静态压力计算与分析

依据上节所述数据处理方法对两种样品的压力曲线进行处理,选取计算区间内压力数据并获得其平均值作为准静态压力。为了避免实验测试系统不确定度以及实验过程中的操作误差等因素对测试结果的影响,对每种装药结构进行了两次密闭空间爆炸实验,通过实验误差判断实验结果的可靠性,并取两次实验平均值作为准静态压力。准静态压力实验结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,不同样品两次实验的准静态压力误差分别 2.56% 和 3.61%,实验结果具有较好

的重复性,也证明了准静态压力处理方法的精确性。

表 3 准静态压力实验结果

Table 3 Experimental results of quasi-static pressure

charge structure	quasi-static pressure/MPa			φ /%
	1	2	average	
composite charge	345.27	336.65	340.96	2.56
uniform charge	321.23	310.03	315.63	3.61

为了进一步讨论炸药装药结构对准静态压力的影响,对两种装药结构炸药密闭空间爆炸形成的准静态压力—时程曲线进行平滑处理,并对比其准静态压力大小,如图 6 所示。

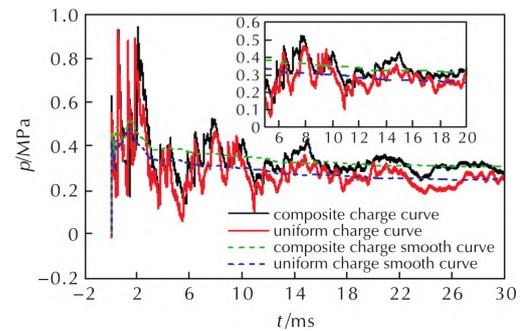


图 6 准静态压力—时程曲线及处理结果

Fig. 6 $p-t$ history curve of quasi-static pressure and processing results

由图 6 和表 3 可知,复合装药和均一装药样品密闭空间内爆炸形成的准静态压力分别为 340.96 MPa 和 315.63 MPa,复合装药结构样品准静态压力提高了 8%,具有更高的准静态压力。其原因是:内外层复合装药利用其内外层装药爆速的不同,使内层装药产生超压爆轰,外层装药爆轰后,部分爆轰产物侧向运动,产生了径向汇聚作用,增强了对内层装药的约束。在外层装药的约束下,高温高压爆轰环境持续时间提高,使得参加反应的铝粉增加,铝粉燃烧更充分,从而提高了复合装药的能量输出,使得其准静态压力增大。

2.4 密闭空间爆炸温度分析

本研究使用瞬态温度传感器对两种装药结构炸药密闭空间爆炸温度变化进行采集和分析,结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,与均一装药结构的峰值温度 745℃ 相比,复合装药的峰值温度为 621℃,低于均一装药结构,但是复合装药结构能够维持在此之后的长时间 600℃ 左右的高温环境,这是均一装药所无法达到的。导致这一现象的原因是:复合装药具有内外层结构,外层高爆速炸药首先爆轰,为内层高铝氧比炸药提供了高温环境,并抑制爆轰产物的膨胀,促进了铝粉吸热过程,使得峰值温度较低。但此后,由于外层装药的径向汇聚

作用,使得铝粉与周围爆轰产物存在较好的反应,释放的热量使得爆炸场的温度升高,因此其温度能够维持较高的水平。

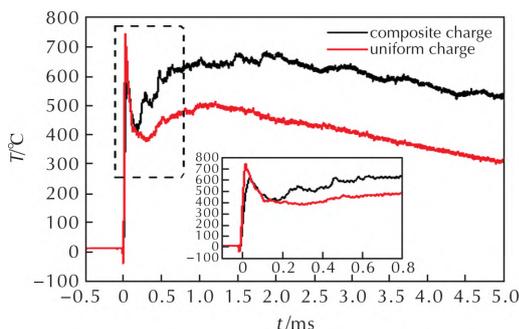


图7 密闭空间爆炸瞬态温度—时程曲线

Fig. 7 $T-t$ history curve of confined space explosion

根据铝粒子气化燃烧方程^[25]如式(1)和式(2)对密闭空间爆炸温度变化趋势进一步分析:

$$W_c = 1 - \left(1 - \frac{\Omega \sqrt{3mkT} e^{-E_v/RT}}{\pi r^3 \rho x} t \right)^3 \quad (1)$$

$$\dot{W}_c = \Omega \frac{3 \sqrt{3mkT} e^{-E_v/RT}}{\pi r^3 \rho x} (1 - W_c)^{2/3} \quad (2)$$

式中: W_c 为铝粒子的燃烧率; \dot{W}_c 为铝粒子的燃烧速率; m 为每个铝原子的质量; k 为波尔兹曼常数; Ω 为产物扩散系数; r 为原子半径; E_v 为铝的气化焓; ρ 为球状铝颗粒的密度; x 为铝颗粒的直径; t 为铝颗粒的气化时间。

根据公式(1)和(2)可知,当铝颗粒的密度和粒径不变时,铝粒子的燃烧率和燃烧速率取决于铝粒子的燃烧温度,复合装药结构由于外层高爆速炸药抑制了内层爆轰产物的膨胀,为铝粉与爆轰产物的燃烧提供了长时间的高温高压环境,使得铝粉燃烧速率提高,燃烧率增加,密闭空间内部温度得以维持较高的水平。

3 结论

(1) 在相同化学组成下,复合装药冲击波峰值压力为 0.62 MPa,比均一装药冲击波峰值压力 0.55 MPa 提高了 12.7%,表明通过复合装药结构可提高冲击波峰值压力。

(2) 相同化学组成的复合装药和均一装药样品密闭空间内爆炸形成的准静态压力分别为 340.96 MPa 和 315.63 MPa,不同样品两次实验的准静态压力误差分别 2.56% 和 3.61%。复合装药结构样品准静态压力比均一装药结构样品提高了 8%。采用外层高爆速炸药、内层高铝氧比炸药的内外层复合装药结构能够提高装药能量输出。

(3) 与均一装药结构的峰值温度 745°C 相比,具有内外层复合装药结构的样品密闭空间爆炸峰值温度下降 124°C,为 621°C。在此之后,复合结构外层装药形成的径向汇聚作用促进了铝粉的燃烧,使得复合装药结构样品能够维持长时间 600°C 左右的高温环境。

参考文献:

- [1] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90: 46-60.
- [2] FILLER W S. Post-detonation pressure and thermal studies of solid high explosives in a closed chamber[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1957, 6(1): 648-657.
- [3] GRASWALD M, ROTTENKOLBER E. Experimental and numerical modeling progress on flexible warhead technologies providing scalable damage area footprints[C] // *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics*. Freiburg [s. n.], 2013, 10(4): 22-26.
- [4] VITTORIA M, BURGESS W. Sympathetic detonation testing of a dual explosive warhead concept for large diameter warheads[C] // *Insensitive Munitions Technology Symposium*. Williamsburg: NSWC, 1994.
- [5] NOUGUEZ B. Dual formulation warheads: a mature technology[C] // *Processing of Insensitive Munitions Technology Symposium*. Williamsburg: NSWC, 1996.
- [6] SPENCER A F, CORLEY J D. Blast and fragmentation enhancing explosive: US, 5996501 [P]. 1999.
- [7] KUHN L D, WILSON L T. Penetrating dual-mode warhead: US, 6135028 [P]. 2000.
- [8] HELD M. Detonation behavior of adjacent high explosive charges with different detonation velocities[C] // *Thirteenth International Detonation Symposium*. Norfolk, VA: Office of Naval Research, 2006.
- [9] KATO H, MURATA K, HAMADA T, et al. Overdriven detonation in high density explosives containing tungsten powder[J]. *Science & Technology of Energetic Materials*, 2006.
- [10] TRZCIŃSKI 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.
- [11] MAIZ L, TRZCIŃSKI W A, SZALA M, et al. Investigation of confined explosions of composite and layered charges[C] // *Proceedings of the 19th Seminar on New*

- Trends in Research of Energetic Materials. Pardubice [s. n.], 2016: 122.
- [12] 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) : 11.
- [13] REYNOLDS M , HUNTINGTON-THRESHER W . Development of tuneable effects warheads [J]. *Defence Technology* , 2016 (3) : 8.
- [14] 张先锋,丁建宝,赵晓宁. 夹层聚能装药作用过程的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击* , 2009 , 29 (6) : 617-624.
ZHANG Xian-feng , DING Jian-bao , ZHAO Xiao-ning. Numerical simulation of double layer shaped charge [J]. *Explosion and Shock Waves* , 2009 , 29 (6) : 617-624.
- [15] 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 (4) : 45-49.
NIU Yu-lei , WANG Xiao-feng , FENG Xiao-jun. Characteristics of air explosion output for dual explosive charge [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao)* , 2009 , 32 (4) : 45-49.
- [16] 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 (4) : 415-419.
NIU Yu-lei , WANG Xiao-feng , YU Ran. Characteristic of energy output of underwater explosion for dual explosive charge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* , 2009 , 17 (4) : 415-419.
- [17] 周涛,程淑杰,王辉,等. DNTF 基含铝炸药含铝装药的驱动特性 [J]. *火炸药学报* , 2015 , 38 (5) : 46-50.
ZHOU Tao , CHENG Shu-jie , WANG Hui , et al. Research on driving characteristic for compound charge of DNTF-based aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao)* , 2015 , 38 (5) : 46-50.
- [18] 李梅,蒋建伟,王昕. 复合装药空气中爆炸冲击波传播特性 [J]. *爆炸与冲击* , 2018 , 38 (2) : 367-372.
LI Mei , JIANG Jian-wei , WANG Xin. Shock wave propagation characteristic of double layer charge explosion in the air [J]. *Explosion and Shock Waves* , 2018 , 38 (2) : 367-372.
- [19] TRZCIŃSKI W , PASZULA J. Confined explosions of high explosives [J]. *Journal of Technical Physics* , 2000 , 41 (4) : 453-470.
- [20] AMES R G , DROTAR J T , SILBER J , et al. Quantitative distinction between detonation and afterburn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions [C] // Thirteenth International Detonation Symposium. Norfolk , VA: Office of Naval Research , 2006.
- [21] DUAN X , GUO X , JIAO Q , et al. Effects of Al/O on pressure properties of confined explosion from aluminized explosives [J]. *Defence Technology* , 2017 , 13 (6) : 428-433.
- [22] 陈坤,肖伟,韩志伟,等. 铝粉粒径对 HMX 基温压炸药在密闭空间爆炸参数的影响 [J]. *火炸药学报* , 2020 , 43 (3) : 298-302.
CHEN Kun , XIAO Wei , HAN Zhi-wei , et al. Effect of aluminum particle size on the explosion parameters of HMX-based thermobaric explosives in confined space [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao)* , 2020 , 43 (3) : 298-302.
- [23] AMES R G , DROTAR J T , SILBER J , et al. Quantitative distinction between detonation and afterburn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions [C] // Thirteenth International Detonation Symposium. Norfolk , VA: Office of naval research , 2006.
- [24] LEE R J , NEWMAN K E , BOHL D G , et al. Combine initial air blast and quasi-static overpressure assessment for pressed aluminized explosives [C] // Thirteenth International Detonation Symposium. Norfolk , VA: Office of Naval Research , 2006: 245-252.
- [25] NIE J X , KAN R Z , JIAO Q J , et al. Studies on aluminum powder combustion in detonation environment [J]. *Chinese Physics B* , 2022 , 31 (4) : 044703.