

doi: 10.7690/bgzdh.2018.01.023

2 种非 TNT 基熔铸炸药水下爆炸特性

朱英中¹, 江涛¹, 万力伦¹, 周霖²

(1. 重庆红宇精密工业有限责任公司, 重庆 402760; 2. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081)

摘要: 为选择水下炸药中的主炸药, 分析 RDX 与 HMX 在水下爆炸的能量输出特性差异, 分别以 RDX 和 HMX 为主炸药, 制备了 2 种非 TNT 基熔铸炸药 R-RDX 与 R-HMX, 并在直径为 85 m 的水池中进行水下爆炸试验, 测试水下爆炸压力及脉动周期, 计算冲击波能及气泡能。试验结果表明: 在 4~6 m 范围内, R-RDX 炸药的冲击波能为 1.18 MJ/kg, 气泡能为 4.00 MJ/kg; R-HMX 炸药的冲击波能为 1.19 MJ/kg, 气泡能为 4.01 MJ/kg; 对于非 TNT 基熔铸炸药, HMX 作为主炸药同 RDX 相比, 在水下爆炸时并无能量优势。

关键词: RDX; HMX; 水下试验; 爆炸特性

中图分类号: TJ414 **文献标志码:** A

Underwater Explosion Characteristics of Two Non TNT Melt-cast Explosives

Zhu Yingzhong¹, Jiang Tao¹, Wan Lilun¹, Zhou Lin²

(1. Chongqing Hongyu Precision Industry Co., Ltd., Chongqing 402760, China;

2. School of Mechanical & Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to choose a main explosive of underwater explosives, analyze the underwater explosion energy output characteristics of RDX and HMX. Separately use RDX and HMX as main explosives, produce R-RDX and R-HMX which are both non TNT melt-cast explosives. Underwater experiment was taken in a diameter of 85 m pool, the underwater explosion pressure and the pulse cycle was measured and shock wave and bubble energy was calculated. Result show that, within 4-6m, the shock wave and bubble energy of RDX based explosive was 1.18 MJ/kg and 4.00 MJ/kg, and HMX based explosive was 1.19 MJ/kg and 4.01 MJ/kg. Compared with RDX, HMX has no energy advantage in underwater explosion in non TNT melt-cast explosive.

Keywords: RDX; HMX; underwater test; explosion characteristics

0 引言

黑索今 (RDX) 与奥克托今 (HMX) 是当今使用最为广泛的 2 种高能炸药。RDX 的密度为 1.816 g/cm³, 爆速为 8 850 m/s, 爆压为 33.8 GPa, 采用铅铸扩孔法表征的威力值为 475 mL; HMX 的密度为 1.902 g/cm³, 爆速为 9 140 m/s, 爆压为 39.3 GPa, 采用铅铸扩孔法表征的威力值为 486 mL^[1-2]。从这些指标来看, HMX 具有显著的能量优势; 因此, 在追求高能量输出的混合炸药中, 通常选择 HMX 作为配方中的猛炸药组分。为了研究在非 TNT 基熔铸炸药中, HMX 相对于 RDX 在水下爆炸能量输出方面是否同样具有优势, 笔者分别以 RDX 和 HMX 为主炸药, 设计了 2 种非 TNT 基熔铸含铝炸药, 对比研究二者在水下爆炸能量输出方面的差异。周霖等^[3]对 RS211 等几种炸药水下爆炸特性进行了测试与分析, 饶国宁等^[4]对 TNT、钝化黑索金及含铝炸药的水下爆炸能量输出特性, 但对非 TNT 基熔铸炸药的水下爆炸特性鲜有报道, 研究非 TNT 熔铸炸药

水下爆炸特性可为相关水中兵器用炸药设计提供试验依据。

1 试验方法及条件

1.1 样品制备

笔者分别以 RDX、HMX 为主炸药制备了 2 种熔铸含铝炸药 R-RDX 与 R-HMX, 其组分体系为非 TNT 基熔铸载体、主炸药和铝粉, 主炸药含量均为 40%, 其他组分及含量均相同。采用熔铸工艺制备成直径为 $\phi 100$ mm, 体积相同的药柱, 样品情况见表 1 所示。

表 1 试验样品参数

序号	炸药类型	质量/g	密度/(g/cm ³)	炸深/m	药柱形状
1	TNT	1 014	1.58	6	球形装药
2	TNT	1 009	1.58	6	球形装药
3	R-RDX 炸药	1 440	1.76	6	柱形装药
4	R-RDX 炸药	1 440	1.76	6	柱形装药
5	R-HMX 炸药	1 445	1.81	6	柱形装药
6	R-HMX 炸药	1 435	1.81	6	柱形装药

1.2 试验方法及场地布置

水下爆炸试验在直径为 85 m, 水深为 12 m 的

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2017-11-19

作者简介: 朱英中(1987—), 男, 安徽人, 工学硕士, 工程师, 从事含能材料研制及性能研究。

水池中进行, 试验时将试验药包装配好起爆系统后置于水面下一定深度, 现场标定采用球形 TNT 药包对测量系统进行标定, 得到冲击波能及气泡能的修正系数, 然后测试 R-RDX 装药及 R-HMX 装药水下爆炸性能。测试采用 PCB 公司 W138A25 型水下激波传感器, 最大测量压力 172 MPa, 线性不大于 2%, 谐振频率不小于 1 MHz, 上升时间不大于 1.5 μs, 传感器布置见图 1 所示。

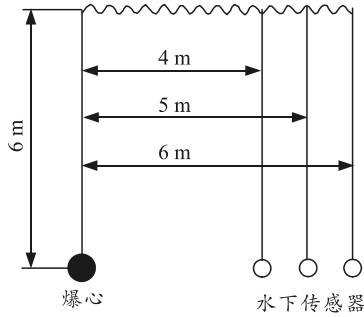


图 1 水下爆炸测试布置

1.3 能量计算

冲击波载荷峰值压力高, 持续时间短; 气泡载荷峰值压力低, 但持续时间长。水下爆炸法通常是将炸药及水下压力传感器放置于水面下一定深度, 炸药爆炸后通过传感器获得压力时程曲线及气泡脉动周期。利用冲击波压力时程曲线计算冲击波能, 由气泡脉动周期计算气泡能^[5]。

冲击波能可由下式求得:

$$e_s = K_1 \frac{4\pi R^2}{\omega \rho c} \int_0^{\theta} p^2(t) dt \quad (1)$$

气泡能由下式得出:

$$e_b = K_2 \frac{T^3}{\omega} \quad (2)$$

炸药水下爆炸总能量由下式得出:

$$e_t = e_s + e_b \quad (3)$$

式中: e_s 为被测炸药的冲击波能, J/kg; K_1 为冲击波能修正系数; ω 为被测炸药的质量; R 为被测炸药到测点的距离, m; ρ 为水的密度, 1 000 g/cm³; c 为水中声速, 1 450 m/s; $p(t)$ 为 t 时刻冲击波压力, Pa; e_b 为被测炸药的气泡能, J/kg; K_2 为气泡能修正系数; T 为被测炸药测量得到的气泡周期, ms。

关于修正系数: $K_1 = e_{s1} / e_{s0}$; $K_2 = \frac{1.99 \times 10^6 \omega_{TNT}}{T_{TNT}^3}$ 。

其中: $e_{s0} = 1.04 \times 10^6 \left(\frac{\omega_{TNT}}{R_{TNT}} \right)^{0.05}$; e_{s0} 为标定炸药

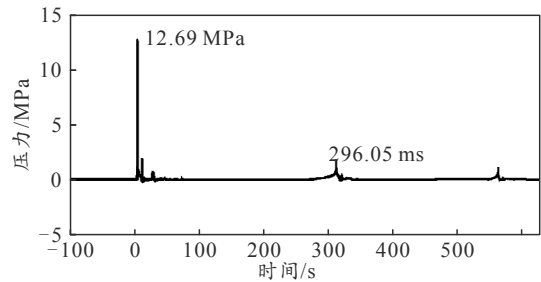
TNT 在该试验水池中多次试验拟合得到的冲击波能计算值, J/kg; e_{s1} 为标定炸药 TNT 现场测量得到

的比冲击波能, J/kg; ω_{TNT} 为标定炸药 TNT 的质量, kg; R_{TNT} 为标定炸药 TNT 到测点的距离, m; T_{TNT} 为标定炸药 TNT 测量得到的气泡周期, ms。

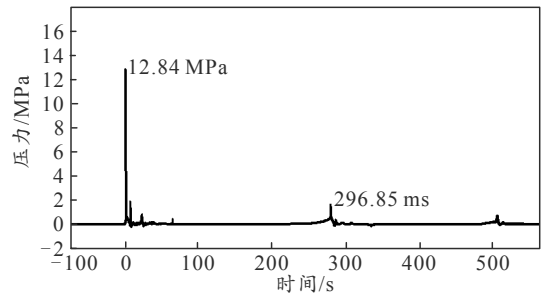
2 试验结果及分析

2.1 冲击波压力时程曲线

R-RDX 炸药装药两发平行试验的压力时程曲线如图 2。两发平行试验中, 冲击波超压的绝对偏差值为 0.15 MPa, 相对标准偏差为 0.83%, 气泡脉动周期的绝对偏差值为 0.8 ms, 相对标准偏差为 0.19%, 由图 1 可知: 试验平行性较好, 数据具有一致性, 数据相对偏差均小于测试系统误差(5%)。

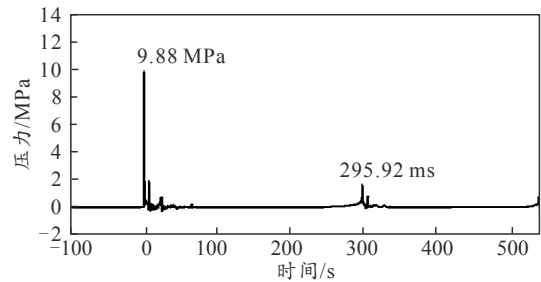


(a) 第一发试验

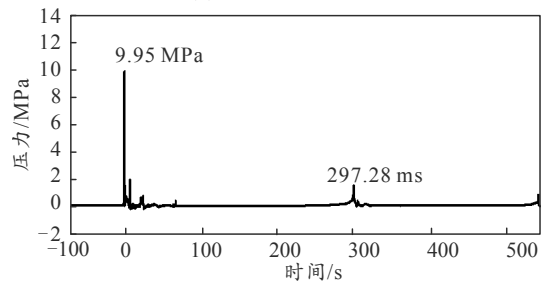


(b) 第二发试验

图 2 R-RDX 炸药两发平行试验的压力时程曲线



(a) R-RDX 炸药



(b) R-HMX 炸药

图 3 2 种炸药 5 m 处的压力时程曲线

图 3 为 R-RDX 炸药与 R-HMX 炸药 5 m 处的压力时程曲线, 其装药量分别为 1 440、1 445 g, 装药量相差 0.35%, 两发装药药量可认为相同。

图 3 表明: 在 5 m 处, R-RDX 装药冲击波超压峰值为 9.88 MPa, R-HMX 装药冲击波超压峰值为 9.95 MPa, 相差 0.07 MPa, R-HMX 装药较 R-RDX 装药, 冲击波超压峰值高出 0.7%, 脉动周期高出

0.46%, 与平行试验时的偏差相当。

2.2 冲击波能及气泡能

评价炸药水下爆炸威力的主要指标有冲击波超压等压力参数以及冲击波能、气泡能等能量参数^[6]。根据试验获得的各测点处的冲击波压力时程曲线, 即可获得比冲击波能、比气泡能和总能量, 结果如表 2。

表 2 水下爆炸试验结果

序号	炸药	r/m	$\Delta p/\text{MPa}$	T/ms	$e_s/(\text{MJ/kg})$	$e_b/(\text{MJ/kg})$	$e_t/(\text{MJ/kg})$
1	TNT	4	11.00	200.14	0.98	1.99	2.97
		5	8.54	200.18	0.96	1.99	2.95
		6	6.95	200.17	0.94	1.99	2.93
2	TNT	4	11.00	200.15	0.96	1.99	2.95
		5	8.53	200.18	0.96	1.99	2.95
		6	6.94	200.17	0.96	1.99	2.95
3	R-RDX 炸药	4	12.69	296.05	1.17	3.98	5.15
		5	9.88	295.92	1.19	3.98	5.17
		6	7.92	296.98	1.17	3.98	5.15
4	R-RDX 炸药	4	12.84	296.85	1.19	4.02	5.21
		5	10.00	296.75	1.19	4.01	5.20
		6	7.90	296.80	1.15	4.01	5.16
5	R-HMX 炸药	4	12.84	297.40	1.19	4.02	5.21
		5	9.95	297.30	1.20	4.01	5.21
		6	7.94	297.30	1.17	4.01	5.18
6	R-HMX 炸药	4	12.67	296.10	1.19	4.01	5.20
		5	10.01	296.00	1.20	4.01	5.21
		6	8.00	296.00	1.17	4.01	5.18

表 2 给出了 TNT、R-RDX 炸药、R-HMX 炸药平行试验的结果, 由 TNT 的测试结果, 计算得到修正系数 $K_1=1.00$, $K_2=0.25$ 。从表中数据来看, 测试结果一致性较好。待测炸药在水介质中爆炸时, 在未接触边界以前, 爆炸冲击波阵面以球面向外扩展, 随着机械能的持续耗散、球面面积的增大和来自爆炸中心的稀疏波的传入, 爆炸冲击波超压持续降低, 这与空气中爆炸冲击波超压衰减有相似之处^[7]。为了方便比较 R-RDX 炸药与 R-HMX 炸药水下爆炸能量差异, 对表 2 中的数据进行处理, 在 4~6 m 的测试范围内, 冲击波及气泡能基本维持不变, 且平行试验结果一致。表 3 中给出的能量数据为 4~6 m 内数据的平均值, 并给出了相对标准偏差。

表 3 水下爆炸能量比较能量

炸药	冲击波能/ (MJ/kg)	气泡能/ (MJ/kg)	总能量/ (MJ/kg)	相对标准 偏差/%
TNT	0.96	1.99	2.95	0.43
R-RDX 炸药	1.18	4.00	5.17	0.50
R-HMX 炸药	1.19	4.01	5.20	0.28

由表 3 可知, R-RDX 炸药的冲击波能及气泡能分别为 1.18、4.00 MJ/kg, R-HMX 炸药的冲击波能及气泡能分别为 1.19、4.01 MJ/kg, 两者的冲击波能及气泡能基本相同。HMX 是以高爆压爆速为特

点的高能炸药, 爆热爆速均高于 RDX, 空气中单位爆炸能量也高于 RDX, 而在水下爆炸, R-HMX 炸药在能量指标上已无优势, 其主要原因在于: 1) 水下爆炸时, HMX 这类高爆压炸药的初始冲击波能量损失较大。已有研究表明^[8], 冲击波能量损失系数仅与炸药的爆压存在单调递增关系。RDX 炸药水下爆炸冲击波能量损失系数为 2.84, 而 HMX 炸药能量损失系数为 3.72, 这就导致了 R-HMX 炸药冲击波总能量虽然增加了, 但能够实现有效毁伤效用的能量并未得到提高。2) 铝氧比决定了气泡能的大小^[3], 由于笔者设计的 R-RDX 炸药与 R-HMX 炸药中含铝量均相同, 2 种炸药的铝氧比也相同; 因此, 两者的气泡能是一致的。

研究结果表明: 在设计水下炸药时, 常规空气中的高威力单质炸药并不一定适合作为水下炸药中的主炸药, 由于 RDX 在安全性及成本方面比 HMX 更具优势; 因此, RDX 比 HMX 更适合作为水下炸药中的主炸药。目前, 美国 PBXN-111 及英国 CPX-20 等水下炸药仍采用 RDX 和 TNT 为主炸药也旁证了这一结论。从测试结果来看: 文中的 R-RDX 炸药和 R-HMX 炸药的气泡能均已达到 TNT 气泡能的 2 倍以上, 但是提高水下炸药的冲击

波能比较困难，爆轰压力过高或过低都不利于冲击波能的提高。

3 结论

通过比较 2 种非 TNT 基熔铸炸药水下爆炸性能，可得出如下结论：

1) 2 种非 TNT 基熔铸炸药的冲击波能及气泡能均显著高于 TNT，R-RDX 炸药的冲击波能为 1.18 MJ/kg，气泡能为 4.00 MJ/kg，R-HMX 炸药的冲击波能为 1.19 MJ/kg，气泡能为 4.01 MJ/kg。

2) 水下爆炸试验结果表明：相对于 R-RDX 炸药，R-HMX 炸药在水下爆炸的主要参数上并无优势，即常规的空气中高威力炸药并非意味着水下爆炸能量高。RDX 比 HMX 更适合作为水下炸药中的主炸药。

(上接第 84 页)

[2] 胡双启, 曹雄, 赵学严. 凹球形传爆药装药结构研究[J]. 华北工学院学报, 2001, 22(4): 301-303.

[3] 牛余雷, 王晓峰, 余然. 双元双层复合装药水中爆炸能量输出特性[J]. 含能材料, 2009, 17(4): 415-419.

[4] 肖绍清, 王文杰, 曹桂祥, 等. 炮孔复合装药结构对混凝土作用的数值模拟[J]. 工程爆破, 2003, 9(3): 19-24.

参考文献:

[1] 舒远杰, 霍冀川. 炸药学概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 63-175.

[2] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 202-218.

[3] 周霖, 徐少辉, 徐更光. 炸药水下爆炸能量输出特性研究[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 235-238.

[4] 饶国宁, 陈网华, 胡毅亭, 等. 不同炸药水下能量输出特性的实验研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(1): 9-11.

[5] 濮赞泉, 李文彬, 郑宇. 柱形破片冲击带壳装药起爆判据研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(2): 62-65.

[6] 李澎. 非理想炸药水下爆炸能量输出结构研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006: 3-7.

[7] 周俊祥, 于国辉, 李澎, 等. RDX/Al 含铝炸药水下爆炸实验研究[J]. 爆破, 2005, 22(2): 4-6.

[8] 牟金磊, 朱锡, 李海涛, 等. 炸药水下爆炸能量输出特性试验研究[J]. 高压物理学报, 2010, 24(2): 88-92.

[5] 肖绍清, 王文杰, 曹桂祥, 等. 炮孔复合装药结构对混凝土作用的数值模拟[J]. 工程爆破, 2003, 9(3): 19-24.

[6] 曹涛, 顾文彬, 刘建青, 等. 曲率半径对环形聚能装药侵彻深度的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2017(2): 61-64.

[7] 罗同杰, 张保良. 仿形钻削与干冰喷射复合倒空弹丸装药自动生产线[J]. 兵工自动化, 2016, 35(2): 90-92.