

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.05.008

不同起爆方式对水下炸药能量输出影响的实验研究*

刘燕 雷勇涛 童宗保 江自生 刘智华 李文娜
江南工业集团有限公司(湖南湘潭,411207)

[摘要] 为了研究不同起爆方式对大当量水下战斗部装药爆炸能量输出的影响,在大型水域开展了20 kg级装药战斗部水下静爆实验,测试了不同起爆方式下水中爆炸的能量输出。结果表明:改变起爆方式,可使装药在爆炸近场的水中爆炸能量(冲击波超压、冲击波能和总能量)输出有较大的变化。其中,端面起爆方式下,水下爆炸近场 $R=6$ m处的冲击波超压、冲击波能和总能量可达到理想球形爆轰的97.3%、81.2%和93.5%。可见,在装药形状基本不变的条件下,改变起爆方式即可实现战斗部结构优化,达到最大能量输出。但起爆方式对炸药的冲击波超压和能量输出的影响存在区域效应,当 $R/r=12.00$ 时,端面起爆与理想球形爆轰产生的冲击波超压相当;当 $R/r=16.77$ 时,不同起爆方式下炸药的冲击波能、气泡能和总能量相差不大,起爆方式对炸药能量输出的影响几乎可以忽略。

[关键词] 起爆方式;水下爆炸;爆炸威力

[分类号] TJ510; TQ560.7

Experimental Study on Effects of Different Detonation Methods on Energy Output of Explosives in Underwater Explosion

LIU Yan, LEI Yongtao, TONG Zongbao, JIANG Zisheng, LIU Zhihua, LI Wenna
Jiangnan Industry Group Co., Ltd. (Hu'nan Xiangtan, 411207)

[ABSTRACT] In order to study the effect of different detonation methods on energy output of a large-equivalence underwater warhead, a 20 kg-level charge warhead underwater static explosion experiment was conducted in a large water area. The variation law of energy output in underwater explosions under different detonation methods was studied. Results indicate that changing the detonation method can cause significant changes in the output of explosive energy of the charge, such as shock wave overpressure, shock wave energy, and total energy, in the water near the explosion field. Under the end detonation method, the shock wave overpressure, shock wave energy, and total energy at the near-field $R=6$ m of underwater explosion can reach 97.3%, 81.2%, and 93.5% of the ideal spherical detonation, respectively. It can be seen that changing the detonation method can optimize the structure of the warhead and achieve maximum output energy, while keeping the shape of the charge basically unchanged. However, there is a regional effect on the impact of detonation methods on shock wave overpressure and energy output of explosives. When $R/r=12.00$, the shock wave overpressure generated by end detonation is equivalent to that generated by an ideal spherical detonation. When $R/r=16.77$, the difference in shock wave energy, bubble energy, and total energy of explosives under different detonation methods is not significant, and the influence of detonation methods on the energy output of explosives can be almost ignored.

[KEYWORDS] detonation method; underwater explosion; explosive power

0 引言

水中爆炸会同时产生冲击波效应和独特的气泡脉动效应,与空气中爆炸相比,作用机理存在着本质

差别。受总体结构限制,水中兵器采用的爆破型战斗部一般采用中心管起爆的方式。中心管爆破型战斗部爆炸的能量输出与理想球形爆轰的能量输出差别较大,特别是对于长径比较大的战斗部结构而言,有效载荷浪费更明显。为了提高水中兵器战斗部的

* 收稿日期:2024-04-07

第一作者:刘燕(1983—),女,硕士,高级工程师,研究方向为战斗部设计。E-mail:191696345@qq.com

通信作者:童宗保(1988—),男,高级工程师,研究方向为战斗部设计。E-mail:635402381@qq.com

毁伤威力,目前研发的主要趋势是增加战斗部装药量、采用新型高能炸药、采用定向/聚能技术和串联/随进装药技术、同步爆炸网络技术以及采用垂直命中接触爆炸技术等^[1-2]。

在总体设计的限定条件下,现役战斗部不可能无限地增加装药量。为提高战斗部对高防护目标的毁伤能力,可改变战斗部的起爆方式,控制水中爆炸场的能量作用及输出结构,使战斗部在水下爆炸时,爆炸能量向目标方向集中。目前,已经有学者研究了不同起爆方式对炸药水下爆炸的影响^[3-6]。关于大装药量战斗部采用不同起爆方式时水下远场爆炸能量输出的影响还鲜有报道。

为了使研究更贴近实际应用,选用20 kg级PBX类炸药装药的实验战斗部,对在不同起爆方式下不同距离处的冲击波超压和水下输出能量进行了对比分析。对提高水中兵器毁伤威力具有积极的指导意义。

1 实验

1.1 实验布置

采集系统:986A0151 Genesis Tower 高速数据采集系统,德国HBM公司。压力传感器:PCB138系列水下爆炸压力传感器。

实验在湖上开展。在岸基两侧固定布放钢丝绳。实验战斗部和压力传感器悬吊在钢丝绳上,并悬布于水下一定深度处。采集与实验战斗部同等水深、不同距离处的压力-时间曲线。

水深15 m,以实验战斗部为中心,对称布置压力传感器。距爆点6、8、10、12 m和14 m的位置处布设水下压力传感器。实验现场布置如图1所示,1#~10#代表传感器标号。

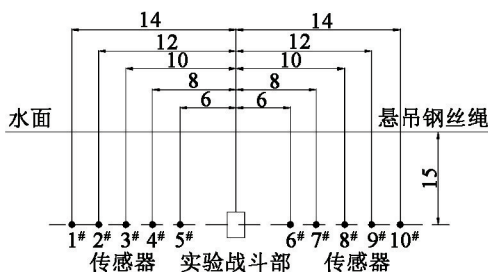


图1 实验现场布置示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of on-site layout for the test (Unit: m)

1.2 实验工况

共包含4种实验工况,分别为长径比为1的单

点起爆方式(I)和长径比为3的中心管起爆(II)、射流起爆(III)、端面起爆(IV)。均装填一种PBX浇注炸药,柱形装药,装药量为20 kg左右。实验战斗部如图2所示;4种工况如表1所示。其中,长径比为1的单点起爆实验战斗部作为标准用于实验结果对比。



图2 战斗部实物

Fig.2 Warhead used in the test

表1 实验工况

Tab.1 Test conditions

工况	长径比	起爆方式	发数	备注
I	1	单点起爆	2	标准实验战斗部
II	3	中心管起爆	2	
III	3	射流起爆	2	
IV	3	端面起爆	2	

均采用200 m长的导爆管雷管起爆,起爆雷管为8#雷管。在水深约50 m、宽度接近300 m的自由水域完成实验,水流速度0.026~0.115 m/s,无来往船只,水面基本无风浪。

2 结果与分析

2.1 标准实验战斗部

根据采集到的有效数据,典型的冲击波超压曲线和气泡脉冲曲线如图3所示。

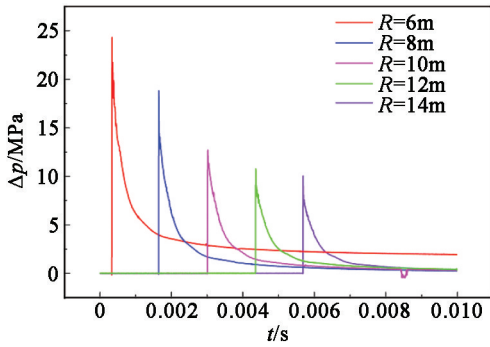
根据水中爆炸的几何相似律,球形装药中心起爆时,超压的变化规律为^[7-8]:

$$\Delta p = k \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

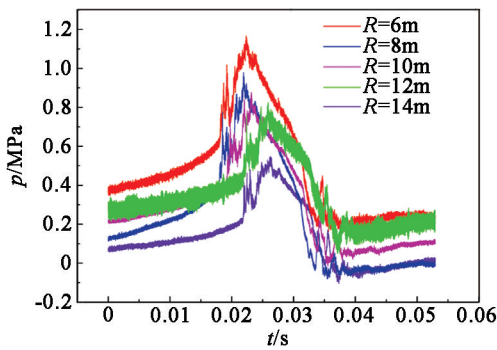
式中: Δp 为水下冲击波超压; k 为与实验条件相关的常数; W 为装药质量; R 为距爆点的距离; α 为与装药类型相关的常数。

工况I为PBX标准实验战斗部的实验数据(平均值)。根据多组实测数据,反推式(1)中本次实验

的 $k = 84.859 0$ 、 $a = 1.360 3$ ，拟合度达到 $0.995 7$ 。其中， $C = \sqrt[3]{W}/R$ ，说明 PBX 标准实验战斗部的能量输出接近球形爆轰，拟合曲线如图 4 所示。



(a) 冲击波超压曲线



(b) 气泡脉冲曲线

图 3 典型测试曲线

Fig. 3 Typical test curves

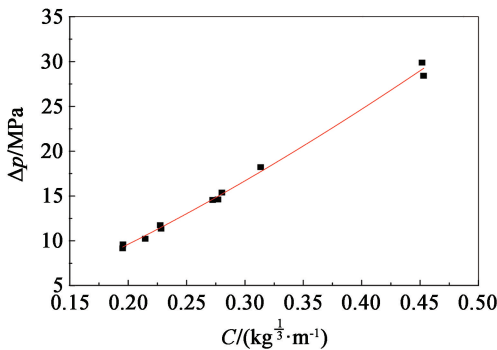


图 4 PBX 标准实验战斗部数据拟合曲线

Fig. 4 Data fitting curve of PBX standard test warhead

2.2 冲击波超压

根据采集系统的数据，绘制 4 种工况条件下的 Δp 与 R 的关系曲线，如图 5 所示。

由图 5 分析可知：工况 I，即标准实验战斗部，在水下爆炸产生的冲击波超压最高；其次是工况 IV；最低的是工况 II 和 III。

在爆炸近场，与标准实验战斗部的冲击波超压最为接近的是工况 IV，即端面起爆的方式。采用端面起爆的实验战斗部，在 $R = 6$ m 处，冲击波超压达

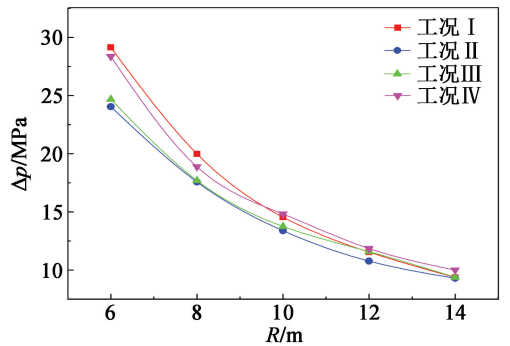


图 5 不同距离处的冲击波超压

Fig. 5 Shock wave overpressure at different distances

到理想球形爆轰的 97.3%。分析原因可能是：在端面起爆方式下，传爆序列中传爆药柱与主装药的接触面积大，使得主装药能在短时间内完成爆轰；而工况 II 和工况 III，由于起爆方式影响，径向损失较大，发展到稳定爆轰的距离和时间较长，在爆炸近场冲击波超压偏低。

另外，在 $R = 10 \sim 14$ m 处，工况 IV 的冲击波超压略大于工况 I。可能是由于端面起爆时，主装药能在相对较短时间内形成稳定爆轰，生成的爆轰产物相对较多。在较远距离处，水下炸药中的铝粉与爆轰产物发生反应，释放能量相对较多，对冲击波的补充相对明显。

炸药水下爆炸产生的冲击波在传播过程中保持着较快的衰减速率。在较远距离处，不同起爆方式下实验战斗部爆炸产生的冲击波超压趋近相等。如对于工况 IV，当 $R/r = 12.00$ (r 为装药半径)，即 $R = 10$ m 时，与标准实验战斗部爆炸产生的冲击波超压相当。对于工况 II 和工况 III 而言，在 $R = 14, 12$ m 时，与标准实验战斗部的冲击波超压相当。说明不同起爆方式对炸药水中爆炸冲击波压力的影响在一定距离后消失，存在一定的区域效应。此区域之外，可能对应了炸药水中爆炸冲击波的球形化。

2.3 能量

炸药在水中爆炸时释放出多种可测量的量，如：利用传感器可测到测点处的峰值压力 p_m 、气泡波第一次的脉动周期、压力指数衰减的时间常数 θ 及 $p \sim t$ 曲线等。再通过数值积分和计算，可得到被测炸药的冲击波能 E 及气泡能 E_b ，进而计算得到总能量 E_{tot} 。

$$E_{tot} = E + E_b \tag{2}$$

根据文献[8-9]，炸药水下爆炸的冲击波能：

$$\begin{cases} E = K_1 \frac{4\pi R^2}{W\rho_w c_w} \int_0^{6.7\theta} p^2(t) dt; \\ p(t) = p_m e^{-t/\theta}. \end{cases} \tag{3}$$

式中: p_m 为水中冲击波初始压力的峰值; θ 为冲击波的指数衰减时间常数, p_m 衰减到 p_m/e 所需的时间, $e=2.718$; ρ_w 为水的密度; c_w 为水中声速; K_1 为比例系数,由TNT标定的平均数值计算得出。

气泡能用炸药在水下爆炸时,爆炸生成的气体产物克服静水压第一次膨胀、达到最大值时所做的功来度量。

$$E_b = 0.6839K_2 \frac{p_h^{5/2}}{\rho_w^{3/2}} \times \frac{T^3}{W} \quad (4)$$

式中: p_h 为装药深处的静水压力; T 为第一次气泡脉动的周期; K_2 为比例系数,由TNT标定的平均数值计算得出。

不同起爆方式下的水下爆炸能量的计算结果见表2。

表2 不同方案的水下爆炸能量参数

Tab.2 Energy parameters of underwater explosion in different schemes

		MJ/kg		
R/m	工况	\bar{E}	\bar{E}_b	\bar{E}_{tot}
6	I	3.085	4.065	7.150
	II	2.242	4.200	6.445
	III	2.107	4.181	6.289
	IV	2.505	4.181	6.686
14	I	2.280	4.065	6.345
	II	2.020	4.200	6.223
	III	1.860	4.187	6.047
	IV	2.036	4.181	6.218

由表2可以看出,在爆炸近区,起爆方式对实验战斗部水下能量输出的影响主要以冲击波能为主,对气泡能的影响不大。与起爆方式对冲击波超压的影响结果一致,工况I标准实验战斗部的水下爆炸输出能量最大,工况IV次之,工况II和III最小。工况IV,即采用端面起爆的实验战斗部在距离爆点6m处冲击波能和总能量可达到理想球形爆轰的81.2%、93.5%。

不同起爆方式对炸药水下能量输出的影响随着距离的增加逐渐减弱。当 $R/r=16.77$,即距离爆点 $R=14$ m处,不同起爆方式下实验战斗部的冲击波能、气泡能和总能量相差不大。

3 结论

针对长径比较大的爆轰型战斗部进行了水下静爆实验研究,得出了以下结论:

1)在装药形状基本不变的条件下,改变起爆方

式即可实现战斗部结构优化,达到最大能量输出。对于爆轰型长径比较大的装药结构而言,采用端面起爆的方式较适宜。在爆炸近场 $R=6$ m处,炸药的冲击波超压、冲击波能和总能量可达到理想球形爆轰的97.3%、81.2%和93.5%。

2)起爆方式仅在近场一定距离内对炸药的冲击波超压有影响,存在一定的区域效应。对于采用端面起爆的装药结构,当 $R/r=12.00$ 时,与理想球形爆轰产生的冲击波超压相当。

3)不同起爆方式对炸药水下爆炸能量输出的影响随着距离的增加而减弱。对于长径比为3的柱形装药战斗部,当 $R/r=16.77$ 时,不同起爆方式下炸药的冲击波能、气泡能和总能量相差不大,起爆方式对炸药能量输出的影响几乎可以忽略。不同起爆方式对水下炸药爆炸能量输出的影响有待在理论和实验上做进一步研究。

参考文献

- [1] 王团盟, 哈海荣, 鲁海玲, 等. 爆炸网络输出同步性对水中兵器聚能战斗部毁伤威力的影响[J]. 鱼雷技术, 2021, 29(2): 230-237.
WANG T M, HA H R, LU H L, et al. Effect of explosion network output synchronization on the damage power of shaped charge warhead of underwater weapon [J]. Torpedo Technology, 2021, 29(2): 230-237.
- [2] 胡宏伟, 宋浦. 水中兵器爆炸威力增强技术的发展思考[J]. 含能材料, 2021, 29(7): 581-583.
- [3] 鲁忠宝, 黎勤, 哈海荣. 不同能量输出结构战斗部水下爆炸毁伤威力试验研究[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(1): 71-77.
LU Z B, LI Q, HA H R. Experimental study on underwater explosion damage power of warhead with different energy output configuration [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2019, 27(1): 71-77.
- [4] 宋浦, 肖川, 梁安定, 等. 不同起爆方式对TNT水中爆炸作用的影响[J]. 火炸药学报, 2008, 31(2): 75-77.
SONG P, XIAO C, LIANG A D, et al. Effect of different initiating modes on TNT underwater explosion [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(2): 75-77.
- [5] 李金河, 赵继波, 谭多望, 等. 不同起爆方式对含铝炸药水中爆炸近场冲击波压力的影响[J]. 高压物理学报, 2012, 26(3): 289-293.
LI J H, ZHAO J B, TAN D W, et al. Effect on the near field shock wave pressure of underwater explosion of alu-

minized explosive at different initiation modes [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(3): 289-293.

[6] 郭涛, 冯彬, 李裕春, 等. 不同起爆方式对水下深孔爆破危害效应影响的数值模拟[J]. 爆破器材, 2012, 41(1): 29-31.

GUO T, FENG B, LI Y C, et al. Numerical simulation of harmful effect of underwater deep-hole blasting with different ignition mode [J]. Explosive Materials, 2012, 41(1): 29-31.

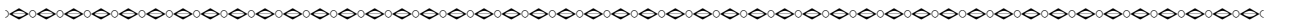
[7] SWIADAK M M. Explosion effects and properties. Part

II. Explosion effects in water; NSWC/WOLTR76-116 [R]. Silver Spring, MD, US: Naval Surface Weapons Center, 1978.

[8] 工业炸药测试新技术;国际炸药测试方法标准化研究组织第八届会议论文集[C]. 陈正衡, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.

[9] 赵琳, 李兵, 闫吉杰, 等. 炸药能量测试的水下爆炸方法[J]. 声学技术, 2003, 22(2): 72-75, 82.

ZHAO L, LI B, YAN J J, et al. A method of the blast energy measurement by underwater explosion [J]. Technical Acoustics, 2003, 22(2): 72-75, 82.



(上接第 49 页)

rials [J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(13): 12219-12230.

[13] KHASAINOV B, COMET M, VEYSSIERE B, et al. Comparison of performance of fast-reacting nanothermites and primary explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(7): 754-772.

[14] ZHANG W, MA X J, SHEN R Q, et al. Progress on laser-linduced decomposition of explosives investigated by spectroscopic methods [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2014, 49(7): 550-563.

[15] GLAVIER L, NICOLLET A, JOUOT F, et al. Nanothermite/RDX-based miniature device for impact ignition of high explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(3): 308-317.

[16] KIM S B, KIM K J, CHO M H, et al. Micro- and nanoscale energetic materials as effective heat energy sources for enhanced gas generators [J]. ACS applied

materials & interfaces, 2016, 8(14): 9405-9412.

[17] ZHANG Z H, SHEN Y, WANG C A, et al. An excellent synergy between CL-20 and nanothermites in flaming and propelling with high specific impulse and superior safety to electrostatic discharge [J]. Combustion and Flame, 2022, 240: 112024.

[18] WU T, SEVELY F, JULIEN B, et al. New coordination complexes-based gas-generating energetic composites [J]. Combustion and Flame, 2020, 219: 478-487.

[19] PRADÈRE C, SUHARD S, VENDIER L, et al. Heterometallic Werner complexes as energetic materials [J]. Dalton Transactions, 2008(20): 2725-2731.

[20] BISWAS P, XU F Y, GHILDIYAL P, et al. In-situ thermochemical shock-induced stress at the metal/oxide interface enhances reactivity of aluminum nanoparticles [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(23): 26782-26790.