DOI: 10.11883/bzycj-2017-0127
文章编号: 1001-1455(2018)06-1372-06

不同装药战斗部壳体对水中兵器的爆炸威力*

程素秋,陈高杰,高 鑫,王树乐
(中国人民解放军 91439 部队,辽宁 大连 116041)

摘要: 通过对裸炸药和带壳战斗部在无限水域中水下爆炸的实验研究,对比分析了炸药的冲击波峰值压力、比冲击波能、比气泡能、总比能量及相对比总能量等爆炸特性参数。结果表明:不同装药爆炸后峰值压力从大到小分别是热塑梯黑铝、熔梯黑铝、复合 PBX、TNT,其他对比参数从大到小分别是复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT;带壳战斗部爆炸后比冲击波能、比气泡能、总比能量相对裸炸药均有不同程度的下降,其中总比能量分别比裸炸药减少 25%、21%、15%和 15%;战斗部壳体对水中兵器爆炸的比冲击波能、比气泡能及总比能量的影响较为显著。因此,研究水中兵器爆炸威力必须考虑战斗部壳体因素,不能简化。研究成果对于战斗部水下爆炸威力考核有一定的借鉴意义。

关键词: 水下爆炸 ;战斗部; 壳体;爆炸威力
中图分类号: O382.1 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

炸药在水下爆炸时,会产生冲击波和气泡脉动压力波,二者作用时间和频率不同,但均会对目标产生毁伤作用。而水中兵器的炸药是填装在金属壳体内,壳体的材料、厚度等特性参数对兵器爆炸威力是有影响的,研究战斗部壳体对其水下爆炸威力十分必要。

项大林等[1]对小当量柱形含铝炸药在厚 6mm 的钢壳或硬铝壳装药下进行了水下爆炸实验与数值模拟研究。盛振新等[2]运用数值模拟计算了不同壳体厚度的冲击波压力峰值,得到带壳装药水下爆炸峰值压力的拟合公式。梁斌等[3]对不同壳体装药在空气和混凝土靶中的爆炸效应进行了数值模拟及实验研究。张奇等[4]研究了战斗部壳体壁厚及壁厚半径比对爆炸空气冲击波传播特性的影响。师华强等[5]研究了水下爆炸冲击波的近场特性。K. Takashi 等[6]对装药在不同的厚度、金属以及药量条件下,采用实验的方法开展了水下爆炸的特性研究,发现了壳体对爆炸效果的加强作用。D. A. Jones 等[7]分别对 6、12 mm 钢壳约束下 10 kg 柱形 H6 炸药进行了实验与数值模拟研究,佐证了文献[6]的结论。程素秋等[8-9]对舱段模型在水下非接触爆炸下的动态响应进行了数值模拟及实验研究。孙华等[10]分析了 PBX 的主要性能特点及其装药技术在水中兵器战斗部上的应用。

本文中对相同成份的裸炸药和高强度铝壳战斗部水下爆炸进行对比实验,发现铝壳的存在使装药水下爆炸的比冲击波能、比气泡能及总比能量均有下降,而且不同的炸药下降的幅度不同。如果进一步研究不同材料的壳体(如钢、复合材料等)和裸炸药爆炸威力的差别,对现役兵器战斗部的爆炸威力的考核更具价值。

1 实验方法

爆炸实验是在某海域的实验码头进行的,实验选用复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝和 TNT 等 4 种装药,裸炸药实验中炸药形状是圆柱形,具体装药参数如表 1 所示。通过 10 个 PCB138A 型压力传感器及采集设备测量不同炸点的水中冲击波压力。实验时,吊车把测试电缆、压力传感器、被测炸药等组成的测量装置阵架吊放入水,测量系统完成信号的采集、存储、计算等工作。每次实验时的起爆方式、药包入水深度和实验水域深度基本相同(实验是在自然环境中,由于潮汐和海流等客观因素无法做到完全

* **收稿日期**: 2017-04-20; **修回日期**: 2017-06-26
第一作者: 程素秋(1968—),女,硕士,高级工程师,csq4028@sina.com。

一样）。实验水域、传感器布置如图 1 所示。每种装药分别做 3 次实验，每次实验均设 10 个测点，测点距药包分别为 3、4、…、12 m，药包入水深度 10 m，实验海域深 20 m 左右，实验场景见图 2。

表 1 炸药性能参数

Table 1 Detonation parameters of explosives

炸药	装药密度/(g·cm^{-3})	爆速/(m·s^{-1})	爆热/(kJ·kg^{-1})	药包质量/kg
复合 PBX	1.82	5 500	8 210	3.0
熔梯黑铝	1.84	7 200	7 400	3.0
热塑梯黑铝	1.70	7 500	5 750	3.0
TNT	1.50	6 900	3 530	3.0

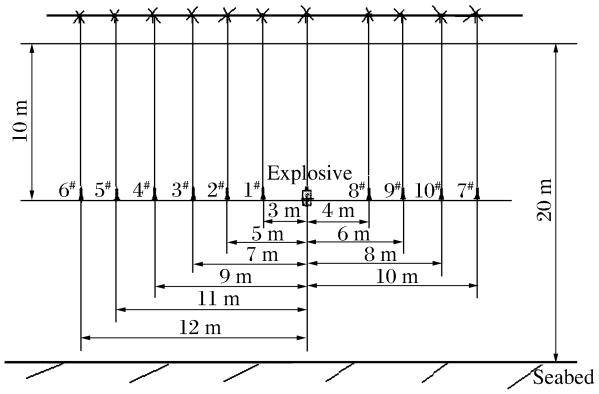


图 1 水下爆炸实验布置图（1#～10#：传感器）

Fig. 1 Underwater explosion test diagram (1#～10#: sensor)



图 2 裸炸药海上实爆实验场景

Fig. 2 Unconfined explosive test on the sea

带壳战斗部实验时，要保证与裸炸药实验具有相同的冲击因子才能进行爆炸威力对比，因而入水深度和实验水深要远大于裸炸药实验。实验选取 7 个测点，传感器悬吊于固定在尼龙缆绳上的浮球下方，缆绳的一端固定在靶船船舷，另一端系在悬吊炸药包的浮筒上，第一个传感器到炸药包的距离为 16 m，传感器之间的间隔为 4 m。所用的测量设备和传感器与裸炸药完全相同，实验工况对比见表 2。

表 2 爆炸实验工况

Table 2 Explosion experiment cases

炸药	裸炸药实验（药包重 3.0 kg）				带壳战斗部实验（装药 200 kg））			
	TNT 当量	入水深度/m	炸点距离/m	冲击因子	TNT 当量	入水深度/m	炸点距离/m	冲击因子
复合 PBX	6.00	10	3～12	0.20～0.82	260	25	16～40	0.40～1.01
熔梯黑铝	5.52	10	3～12	0.20～0.78	320	25	16～40	0.45～1.12
热塑梯黑铝	4.80	10	3～12	0.18～0.73	320	25	16～40	0.45～1.12
TNT	3.00	10	3～12	0.14～0.58	200	25	16～40	0.35～0.88

2　无限水域中小当量炸药（无壳）的水下爆炸特性

炸药在水下爆炸时放出的能量分为两部分，一部分以冲击波的形式放出，称为冲击波能；另一部分存在于爆炸产生的气泡中，称为气泡能。通过水下相同深度、不同距离处的自由场压力传感器，来测量炸药爆炸后冲击波压力随时间变化的压力时程和气泡脉动周期，数据分析处理后得到炸药水中爆炸的总能量。根据炸药水下爆炸的实验数据，找到不同测点处的峰值压力 p_m 与距离因子 $Z=R/\sqrt[3]{W}$ 的对应关系，可以得出不同炸药冲击波超压的衰减规律，如图 3 所示。把不同测点处的峰值压力 p_m 数据与距离因子 $Z=R/\sqrt[3]{W}$ 数据进行拟合，可以得出不同炸药冲击波衰减规律，从而得到冲击波能：

$$p_{\mathrm{m}}=A\left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{b}=AZ^{-b} \tag{1}$$

$$E_{\mathrm{s}}=\frac{4\pi R^{2}}{\rho_{0}c_{0}}\int_{0}^{t}p_{\mathrm{m}}^{2}(t)\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中：p_{m} 为峰值压力，W 为炸药质量，R 为爆炸距离，E_{s} 为冲击波能，ρ_0 为海水密度，c_0 为海水中声速。

由冲击波能除以炸药的质量可以得到比冲击波能 e_{s}。各种炸药的比冲击波能与距离因子的对应关系如图 4 所示。

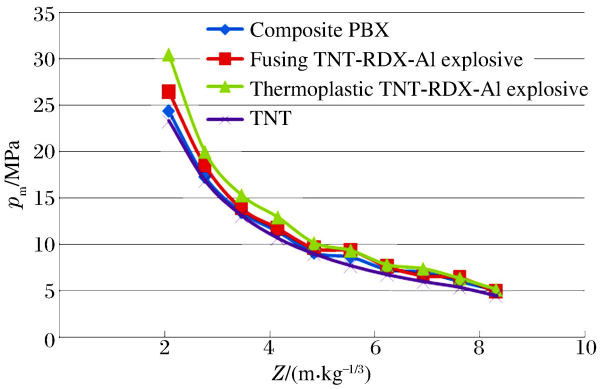


图 3 不同炸药峰值压力随距离因子的衰减

Fig. 3 Peak pressure attenuation varied with distance factor for different explosives

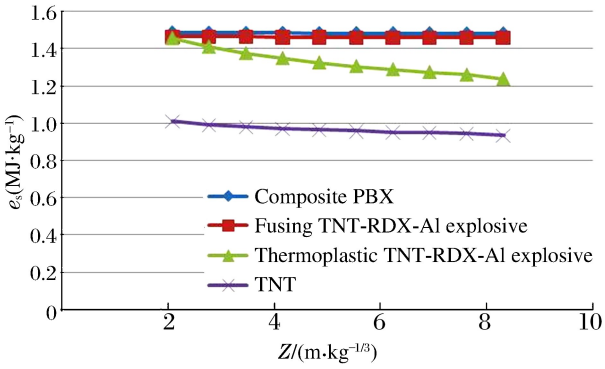


图 4 不同炸药比冲击波能随距离因子的变化

Fig. 4 Specific shock wave energy varied with distance factor for different explosives

从图 3 中可以看出，不同炸药的水中冲击波峰值压力随距离因子的增加而衰减的规律符合库尔理论，冲击波峰值压力从大到小的顺序为热塑梯黑铝、熔梯黑铝、复合 PBX、TNT，但个别测点有重合现象；图 4 中不同炸药的比冲击波能从大到小的顺序为复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT，但复合 PBX、熔梯黑铝和热塑梯黑铝炸药的比冲击波能远大于传统 TNT 炸药的比冲击波能，而热塑梯黑铝炸药的比冲击波能在距离因子小于 4 m/kg$^{1/3}$ 时与复合 PBX、熔梯黑铝相差较小，在距离因子大于 4 m/kg$^{1/3}$ 时，远低于复合 PBX、熔梯黑铝。由此可知，新型装药（复合 PBX、熔梯黑铝）的比冲击波能不仅远大于传统装药，其数值也较稳定，几乎不随距离因子的变化而变化。

比气泡能定义为单位质量的气泡能；不同炸药比气泡能与 TNT 比气泡能的比值为相对比气泡能。不同测点的炸药总能量为该点的冲击波能与气泡能之和，为使结果更科学，仍然按比能量进行计算，定义总比能量为该点的比冲击波能与比气泡能之和。不同炸药在不同测点的总比能量与该点的 TNT 总比能量相除，得到相对比总能量，即为不同炸药能量的综合评价。

根据实验测量的气泡脉动周期 T，按下式计算炸药的气泡能：

$$E_{\mathrm{b}}=0.684\,2p_{\mathrm{m}}^{5/2}\rho_{0}^{-3/2}T^{3} \tag{3}$$

表 3 中列出了 4 种裸炸药在海上实爆实验得到的比冲击波能、比气泡能、总比能量和相对比总能量。从表中可以看出，不同炸药的总比能量和相对比总能量的顺序由高到低分别是复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT。

表 3 4 种炸药的平均比冲击波能、平均比气泡能、总比能量及相对比总能量

Table 3 Energy comparison of four kinds of explosives

炸药	比冲击波能/(MJ·kg^{-1})	比气泡能/(MJ·kg^{-1})	总比能量/(MJ·kg^{-1})	相对比总能量
复合 PBX	1.484	4.568	6.052	2.029
熔梯黑铝	1.462	4.322	5.784	1.939
热塑梯黑铝	1.330	3.173	4.503	1.509
TNT	0.965	2.018	2.983	1.000

通过以上分析得到：

（1）不同炸药水中爆炸的比冲击波能递减顺序是：复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT；但热塑梯黑铝的比冲击波能随距离因子的增加而明显衰减，其他 3 种炸药的比冲击波能变化较小。

（2）不同炸药水中爆炸的比气泡能的递减顺序是：复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT；

（3）不同炸药的相对比总能量递减顺序是：复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT，其比值近似为：2.03∶1.94∶1.51∶1。

3　无限水域中带壳体战斗部的水下爆炸特性

实验方法和工况设置如第 1 节中所述。使用的测量设备与传感器和裸炸药实验完全相同，唯一不同的是裸炸药实验在近岸海水中，而战斗部实验是在深海水中。冲击波在海水中的平均传播速度按海水中声速计算，取 $c_0=1\ 530$ m/s。在计算炸药包爆炸后不同测点的冲击波能时，海水的密度按 1 000 kg/m^3 计算。战斗部海上实爆实验场景如图 5 所示，4 种装药战斗部的冲击波峰值、比冲击波能与爆炸距离的对应关系如图 6～7 所示。

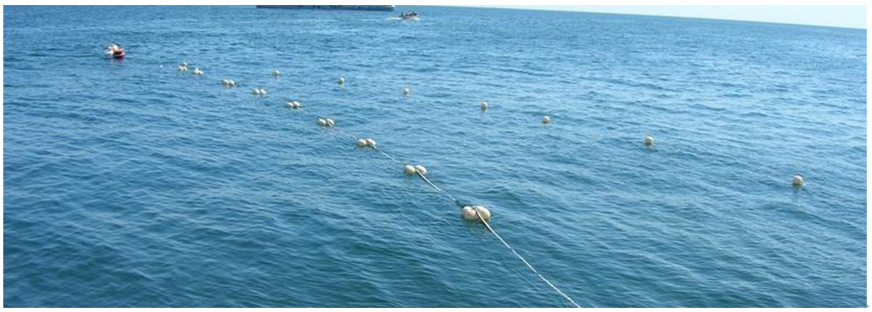


图 5　战斗部海上实爆实验场景

Fig. 5　Warhead on the sea explosion test

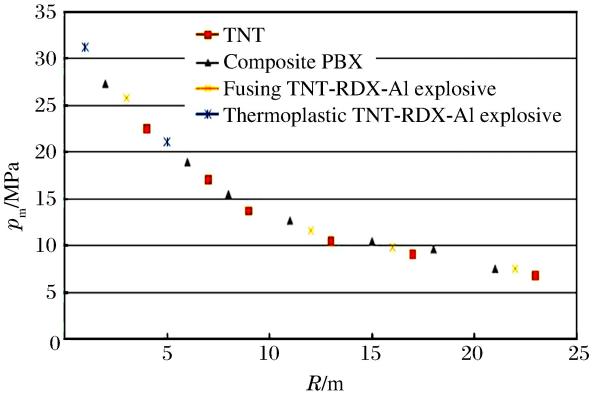


图 6　不同战斗部峰值压力随爆炸距离的衰减

Fig. 6　Peak pressure attenuation varied with explosion distance of different warheads

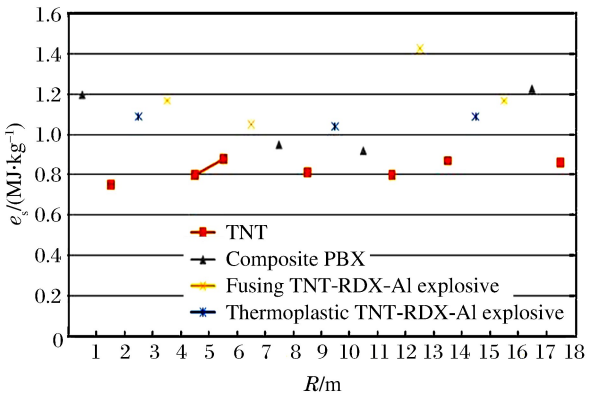


图 7　不同战斗部比冲击波能随爆炸距离的变化

Fig. 7　Specific shock wave energy varied with explosion distance of different warheads

从图 6 中可以看出，不同战斗部的水中冲击波峰值压力随爆炸距离的增加而衰减的规律符合库尔理论，冲击波峰值压力从大到小的顺序为热塑梯黑铝、复合 PBX、熔梯黑铝、TNT，这与裸炸药略有不同；而图 7 中因数据点较少，没有做拟合曲线，从现有的数据发现，不同战斗部比冲击波能从大到小的顺序为熔梯黑铝、热塑梯黑铝、复合 PBX、TNT，但中间二者相差不大，与裸炸药也不同。

做与裸炸药实验数据同样的分析，得到 4 种战斗部装药海上实爆实验的比冲击波能、比气泡能、总比能量和相对比总能量，详见表 4。与表 3 对比，各项参数都有不同程度的下降，这些能量大多用于壳

体的加热、爆炸和燃烧,可见战斗部壳体对于水中兵器爆炸威力的影响还是较大的。除比冲击波能从大到小的排序与裸炸药不同,其他参数从大到小排序与裸炸药基本相同。

表 4 4 种战斗部的平均比冲击波能、平均比气泡能、总比能量及相对比总能量

Table 4 Energy comparison of four kinds of warheads

战斗部	比冲击波能/(MJ·kg^{-1})	比气泡能/(MJ·kg^{-1})	总比能量/(MJ·kg^{-1})	相对比总能量
复合 PBX	1.03	3.53	4.56	1.80
熔梯黑铝	1.21	3.35	4.56	1.80
热塑梯黑铝	1.07	2.76	3.83	1.51
TNT	0.82	1.72	2.54	1.00

通过以上分析,可得到如下结论:

(1) 4 种带壳战斗部的冲击波峰值压力随爆炸距离增加而衰减的规律均符合库尔公式,只是指数和系数不同,峰值压力从大到小分别是热塑梯黑铝、复合 PBX、熔梯黑铝、TNT,热塑梯黑铝的峰值压力最大但衰减较快且一直连续下降,与裸炸药的实验结果一致;

(2) 4 种带壳战斗部熔梯黑铝、热塑梯黑铝、复合 PBX、TNT 战斗部的平均比冲击波能,分别比裸炸药的平均比冲击波能低了 17%、20%、31%和 15%,除了实验环境的不同(裸炸药在浅水、战斗部在深水),测试系统、压力传感器都一样,因而认为这些消耗的能量大部分用于壳体爆炸、燃烧;

(3) 4 种带壳战斗部复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT 的平均比气泡能分别比裸炸药的平均比气泡能减少 23%、22%、13%和 15%;

(4) 4 种带壳战斗部复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT 的总比能量分别比裸炸药的总比能量减少 25%、21%、15%和 15%;其相对比总能量递减顺序是复合 PBX=熔梯黑铝(二者并列)、热塑梯黑铝、TNT,与 TNT 的相对比值近似为:1.80∶1.80∶1.51∶1。

4 结 论

通过无限水域中对 4 种裸炸药与带壳战斗部水下爆炸特性的实验研究,可以得到:

(1)冲击波峰值压力随对比距离(或爆炸距离)增加而衰减的规律均符合库尔公式,只是指数和系数不同;裸炸药峰值压力从大到小是热塑梯黑铝、熔梯黑铝、复合 PBX、TNT,而带壳战斗部峰值压力则是热塑梯黑铝、复合 PBX、熔梯黑铝、TNT,但热塑梯黑铝的冲击波压力衰减较快且一直连续下降;

(2)不同装药战斗部的壳体对其水下爆炸威力的影响是较为显著的。实爆实验中复合 PBX、熔梯黑铝、热塑梯黑铝、TNT 的的总比能量分别比裸炸药的总比能量减少 25%、21%、15%和 15%;这些消耗的能量大多用于战斗部壳体的爆炸、燃烧。

因此,考核水中兵器水下爆炸时的爆炸威力时,战斗部壳体因素必须考虑,不能简化。

参考文献:

[1] 项大林,荣吉利,李健,等.金属壳体装药水下爆炸的冲击波特性[J].爆炸与冲击,2012,32(1):67-72.
XIANG Dalin, RONG Jili, LI Jian, et al. Shock wave features of underwater explosion of explosives with metal shell[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(1):67-72.

[2] 盛振新,刘荣忠,郭锐.壳体厚度和爆炸深度对水下爆炸冲击波的影响[J].火炸药学报,2011,34(3):45-47.
SHENG Zhenxin, LIU Rongzhong, GUO Rui. Effect of shell thickness and explosion depth on underwater explosive shock wave[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011,34(3):45-47.

[3] 梁斌,卢永刚,杨世全,等.不同壳体装药爆炸威力的数值模拟及试验研究[J].火炸药学报,2008,31(1):6-11.
LIANG Bin, LU Yonggang, YANG Shiquan, et al. Numerical simulation and experiment investigation of blast effect of explosive charge with different shell materials[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008,31(1):6-11.

[4] 张奇，覃彬，孙庆云，等. 战斗部壳体厚度对爆炸空气冲击波的影响[J]. 弹道学报，2008，20(2)：17-19.
ZHANG Qi，QIN Bin，SUN Qingyun，et al. Influence of thickness of warhead shell upon explosive shock wave[J]. Journal of Ballistics，2008，20(2)：17-19.

[5] 师华强，宗智，贾敬蓓. 水下爆炸冲击波的近场特性[J]. 爆炸与冲击，2009，29(2)：125-130.
SHI Huaqiang，ZONG Zhi，Jia Jingbei. Short-range characters of underwater blast waves[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(2)：125-130.

[6] TAKASHI K，MURATA K，TORII A，et al. Enhancement of underwater shock wave by metal confinement[C]// Proceedings of 12th International Detonation Symposium. San Diego，2002：466-474.

[7] JONES D A，NORTHEAST E D. Effects of case thickness on the performance of underwatermines：ADA293941[R]. 1995.

[8] 程素秋，樊宝顺，薛飞，等. 水下非接触爆炸作用下舱段模型的动态响应[J]. 爆炸与冲击，2008，28(4)：360-366.
CHENG Suqiu，FAN Baoshun，XUE Fei，et al. Measure of dynamic responses of a cabin model subjected to non-contact underwater explosions[J]. Explosion and Shock Waves，2008，28(4)：360-366.

[9] 程素秋，王永亮，刘旭，等. 远场非接触爆炸作用下舱段模型动态响应的数值模拟[J]. 船舶工程，2009，31(1)：60-63.
CHENG Suqiu，WANG Yongliang，LIU Xu，et al. Dynamic responses simulation of a cabin model subjected to far field noncontact underwater explosions[J]. Ship Engineering，2009，31(1)：60-63.

[10] 孙华，郭志军. PBX 炸药技术特性及在水中兵器上的应用[J]. 装备学院学报，2009，20(3)：108-111.
SUN Hua，GUO Zhijun. Characteristics of PBX dynamite and its application in undersea weaponry[J]. Journal of Equipment Academy，2009，20(3)：108-111.

Estimation of underwater explosive energy for different charge warhead shells

CHENG Suqiu，CHEN Gaojie，GAO Xin，WANG Shule
(91439 *Unit of PLA*，*Dalian* 116041，*Liaoning*，*China*)

Abstract：With the experimental study of underwater explosion for confined and unconfined in free field water，the characteristic parameters of explosion，such as the peak pressure of shock wave，the specific shock wave energy，the specific bubble energy，the total specific energy and the relative total energy of the explosives were compared and analyzed. The results showed that the peak pressure are，different for thermoplastic TNT-RDX-Al explosive，fusing TNT-RDX-Al explosive，composite PBX and TNT，Other parameters are，composite PBX，thermoplastic TNT-RDX-Al explosive，fusing TNT-RDX-Al explosive，TNT，The specific shock wave energy，the specific bubble energy，the total specific energy of warhead with shell decreased compared to warhead without shell. The total specific energy decreased 25%，21%，15% and 15%. It is obvious that shell is important for underwater explosion effects. Therefore，the influence of shell must be considered and can't be simplified for energy effects of underwater weapons.

Keywords：underwater explosion；warhead；shell；explosive energy

（责任编辑　曾月蓉）