文章编号：1000-5773(2012)05-0577-06

TATB基炸药水中爆炸能量测试技术*

汪　斌，张远平，王彦平

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳　621900）

摘要：在用水中爆炸法测量以TATB为基的TBL炸药能量的研究中，设计了2种具有高爆压和大质量的扩爆药柱。通过2类扩爆药柱的能量测试实验得到的扩爆药柱能量与理论结果相同，TBL炸药的能量为TNT炸药能量的70%左右；炸药的爆压越高，冲击波能量随爆炸距离的衰减越快。

关键词：水中爆炸；冲击波能；气泡能

中图分类号：TJ055；O382　　**文献标识码**：A

1　引　言

随着对炸药安全性问题重视程度的不断提高，采用高能钝感炸药作为常规武器战斗部的主装药已经成为趋势。TATB炸药的机械感度和热感度低，通常被称为“木头”炸药。在理论密度条件下，TATB炸药的爆轰能量与B炸药接近，不仅在战斗部主装药中逐渐显示出优势，而且在安全爆炸序列（安全传爆药、雷管）的研制中也具有重要意义[1]。采用合理的TATB配方炸药，在降低装药成本的同时，保持炸药的高能钝感特性，对战斗部用炸药的发展具有重要意义。由于TATB炸药的起爆临界直径较大、炸药反应区较宽、反应时间长，在测量炸药能量常用的爆热弹法中使用的炸药量较少（10 g量级），导致钝感炸药爆轰不充分、能量释放不完全，因此难以准确测量TATB炸药的能量，无法对其做功能力进行准确评估。

水中爆炸法是利用水对炸药边界的约束，使被测炸药的爆轰过程更充分，从而提高高能钝感炸药和含铝炸药能量测试的准确性，因此在含铝炸药及其它高能钝感炸药的能量测试中得到了广泛应用[2-5]。水中爆炸法中使用的炸药为千克级，可以使用比临界直径大得多的药量，并且可以同时测得炸药的冲击波能和气泡能，克服了爆热弹法只能测得总能量的缺点，从而为根据不同战斗部的毁伤模式选择不同能量结构的炸药提供依据。因此，水中爆炸法是测量以TATB为基的高能钝感炸药爆炸能量较为理想的方法。

通常情况下，武器战斗部使用的高能炸药需要一定的起爆能量才能完全起爆，当扩爆药的输出能量低于主装药的起爆阈值时，主装药不能完全起爆，无法体现主装药的爆炸性能。炸药的起爆阈值与扩爆药柱爆压及扩爆药压力作用时间成正比。不同炸药的起爆阈值不同，如B炸药、压装TNT、PBX-9404和TATB的起爆阈值分别为4.2、5、3.95和8.64 GPa。由此可见，TATB炸药属于非常钝感的低感度炸药，起爆阈值较高，需要很高的起爆能量才能将其完全起爆[6]。

本研究利用不同起爆能力的扩爆药柱，对新研制的以TATB为基的TBL炸药进行水中爆炸能量测试实验。在利用水中爆炸法测量炸药能量时，为避免起爆药能量过大对被测炸药能量的计算造成影响，通常起爆药的药量均不超过被测炸药总药量的5%。目前常用的高能炸药，如RS211、B炸药等，由于需要的起爆能量较低，采用一般的扩爆药柱即可以使其达到爆轰。考虑到钝感高能TBL炸药需要较高的起爆能量，为避免实验过程中TBL炸药的拐角效应对测试结果造成影响，选用两类高爆压的扩爆药柱，同时增加扩爆药的尺寸和质量。通过两类扩爆药柱的对比实验，来验证被测炸药在水中爆炸过程中是否达到完全爆轰，为被测炸药的能量计算提供更准确的实验数据。

* **收稿日期**：2011-01-21；**修回日期**：2011-06-02

作者简介：汪　斌（1980—），男，助理研究员，主要从事水中爆炸研究. E-mail：wbin98221@163.com

2 实验设计

2.1 炸药样品

采用水中爆炸法测量炸药能量时，通常采用中心起爆或端面起爆，这两种起爆方式对扩爆药的药量以及爆压等没有明显要求。TBL 炸药完全爆轰需要的起爆能量较高，为了提高扩爆药的起爆能力，使 TATB 炸药充分起爆，并验证扩爆药对 TBL 炸药的起爆能力，采用 2 种圆柱形扩爆药柱：一种为 JH-9005 扩爆药，尺寸为∅80 mm×40 mm，质量占 TBL 炸药质量的 7.1%；另一种是 JO-9159 扩爆药，尺寸为∅100 mm×50 mm，质量为 0.437 kg。图 1示出了两种扩爆药实验装置。



(a) JH-9005 (b) JO-9159

图 1 不同扩爆药 TBL 炸药实验装置

Fig. 1 Different booster detonated TBL

共进行了 5 种炸药的能量测试实验。表 1列出了 5 种炸药的实验参数，其中 p_b 为扩爆药的爆轰压力。表 1 中 TNT 炸药主要用于传感器灵敏度标定和作为被测炸药能量对比的基准；对 JH-9005 和 JO-9159扩爆药进行了单独的水中爆炸能量测试实验，在 TBL 炸药能量测试结果中，对扩爆药的能量进行准确扣除，其中在 JH-9005 扩爆药单独实验中，采用 2 个扩爆药柱。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Main explosive+booster explosive	Total weight/(kg)	Dimension/(mm×mm)	p_b/(GPa)	Number of experiment
TNT+JH-9005	3.01+0.215	∅133×133	32.6	2
TBL+JH-9005	3.15+0.215	∅128×128	32.6	2
TBL+JO-9159	3.15+0.437	∅128×128	36.8	2
JH-9005 (×2)	0.430	∅80×40	32.6	1
JO-9159	0.437	∅100×50	36.8	1

2.2 测试方法

图 2 为爆炸实验布置示意图。实验在 8 kg TNT 当量爆炸水池中进行，水池上口径为 48 m，下口径为 32 m，水深 23 m。将炸药安装在水池正中 12 m 深处，在此水深条件下，8 kg TNT 当量炸药爆炸后，所测量的冲击波和气泡脉动相关参数不受水自由面、水底和水池壁的影响。使用 8 个压力传感器及一个配套的八通道讯号适调仪，测量炸药水中爆炸冲击波和气泡压力的时程，压力传感器敏感元件的入水深度与炸药包质心的入水深度相同。图 2 中，传感器 1#、2#、3# 和 4# 到炸药柱质心的水平距离分别为 3.0、5.0、7.0 和 9.0 m，用于记录炸药水中爆炸冲击波的压力时程；压力传感器 5#、6#、7# 和 8# 到炸药柱质心的水平距离分别为 11.0、13.0、

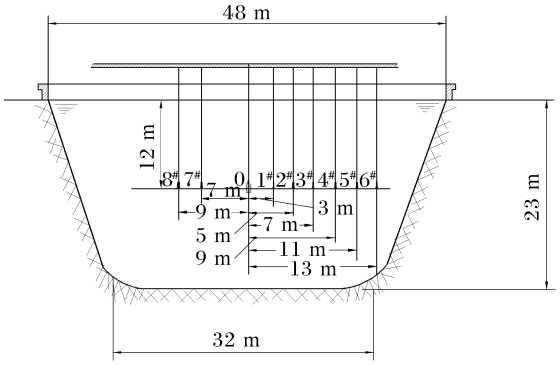


图 2 实验水池

Fig. 2 Experimental pound

7.0 和 9.0 m,用于记录爆炸波的压力时程和气泡脉动周期。实验装置和传感器均用钢丝绳挂于定位横梁上,置于水中。由于传感器的灵敏度随水深、气压、电缆长度以及存放时间等会发生一定的变化,因此在正式实验之前,采用标准 TNT 药包对测试用传感器的灵敏度进行标定修正,修正后整个测试系统保持不变,使实验状态与标定状态一致,以获得较真实的实验结果。

实验测试由一台同步脉冲发生器主控,同时输出多路电压讯号,其中一路触发高压脉冲发生器,脉冲发生器输出一路高压脉冲,用于起爆炸药包中的雷管;另外使用 2 路电压触发 2 台数字示波器,记录冲击波压力时程的示波器其采样率取为 $10^7\ \mathrm{s}^{-1}$,记录冲击波和气泡脉动压力时程的采样率取 $2\times10^6\ \mathrm{s}^{-1}$。

3 实验结果及分析

3.1 冲击波及气泡脉动周期测试结果

炸药爆炸产生的压力作用于测试点处的传感器,得到电压时程曲线。由各测点的电压除以测试系统的动态灵敏度 S_v,得到测点处的压力,峰值压力 p_m 可以根据峰值电压 U_max 进行计算,即

$$p_\mathrm{m}=U_\mathrm{max}/S_\mathrm{v} \tag{1}$$

图 3 为冲击波压力测量曲线,其中 R 表示测点到炸药的距离。由图 3 可以看出,TBL 炸药水中爆炸冲击波在传播过程中,随着距离的增大,峰值压力呈下降趋势,但是下降的幅度逐渐减小,同一位置处的压力呈指数规律下降;由完整的水中爆炸时程曲线(图 3(b))可以得到气泡脉动周期 T_b。另外,由图 3 还可以看出,没有明显的水池壁反射冲击波信号,可以认为实验结果不受边界条件的影响。

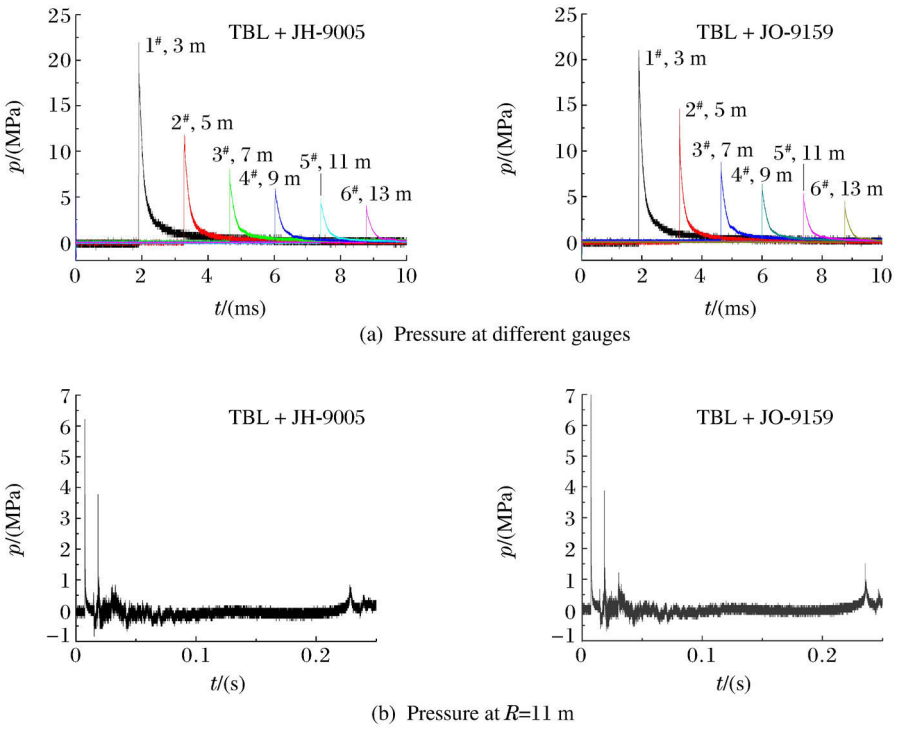


图 3 压力测试结果

Fig. 3 Experimental results of pressure

3.2 冲击波能

采用水中爆炸法测量炸药能量时,冲击波能 E_s 可表示为

$$E_\mathrm{s}=\frac{4\pi R^2}{\rho_0 c_0}\int_{t_\mathrm{a}}^{\tau}[p(t)]^2\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中:ρ_0、c_0 为水的密度和声速,一般取 $\rho_0=1\,000\ \mathrm{kg/m^3}$,$c_0=1\,460\ \mathrm{m/s}$;$p(t)$ 为冲击波压力;t_a 为冲击波的到达时间,τ 为积分计算时间,时程为 $t_\mathrm{a}+6.7\theta$,θ 为时间常数。

在计算 TNT 和 TBL 炸药的冲击波能时，减去了 JH-9005 和 JO-9159 扩爆药的冲击波能。用 E_s 除以被测炸药的质量可得到被测炸药在相同位置处的质量冲击波能 e_s。图 4 为不同距离处被测炸药的质量冲击波能。

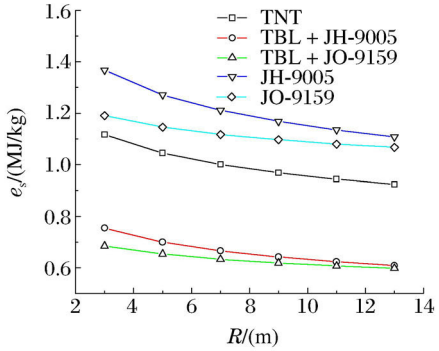


图 4 不同距离处被测炸药的质量冲击波能

Fig. 4 Mass shock wave energy of tested explosive at different distance

从图 4 中可以看出，JH-9005 炸药在近距离处的质量冲击波能较高，起爆 TBL 炸药近场的质量冲击波能也较高。从理论上来说，JO-9159 炸药的爆压为 36.8 GPa，JH-9005 炸药为 32.6 GPa，说明高强度冲击波在水中传播时衰减更快，由于爆轰持续时间较短，在压力比较高的条件下，近场能量衰减更快，与池家春等人[7]、赵继波等人[8]的冲击波近场研究结论一致。随着冲击波传播距离的增加，两种起爆方式下，TBL 炸药水中爆炸冲击波能量在相同距离处趋于一致。

3.3 气泡能

根据实验得到的气泡脉动周期 T_b，可计算爆生气体的气泡能 E_b

$$E_b = 0.6839 p_H^{5/2} \rho_0^{-3/2} T_b^3 \tag{3}$$

式中：p_H 为炸药柱中心处的压强，为炸药柱所受静水压强和大气压之和。由计算得到的气泡能除以炸药柱的质量得到质量气泡能 e_b，不同炸药柱的质量气泡能与 TNT 炸药的质量气泡能的比值为相对气泡能 e_{bx}。e_{bx} 能更直观地给出被测炸药与标准 TNT 炸药的能量对比。表 2 给出了每种炸药的气泡脉动周期 T_b、气泡能 E_b、单位质量气泡能 e_b 和相对气泡能 e_{bx}。

表 2 气泡能数据

Table 2 Experimental data of bubble energy

Explosive	T_b/(ms)	E_b/(MJ)	e_b/(MJ/kg)	e_{bx}
TNT+JH-9005	241.5	6.025	2.004	1.000
TBL+JH-9005	220.8	4.482	1.414	0.709
TBL+JO-9159	228.5	4.551	1.437	0.717
JH-9005	124.7	0.8847	2.068	1.032
JO-9159	125.3	0.9029	2.066	1.031

3.4 总能量

测点处的总能量 E 为测点处的冲击波能 E_s 与气泡能 E_b 之和。单位质量某种炸药的总能量除以单位质量 TNT 炸药的总能量得到该炸药的相对能量 e_x，e_x 是对炸药柱能量的综合评价。

实验测得 TBL 炸药的相对总能量为 TNT 炸药的 0.7 左右，JH-9005 和 JO-9159 的相对总能量不到 TNT 炸药的 1.1 倍，与常用的爆热弹法测量得到的爆热存在一定的差异。由于炸药水中爆炸产生的初始冲击波能在水介质中传播过程中存在粘性耗散和热耗散等因素，因此水中爆炸法测量的冲击波能并非炸药的初始冲击波能量，需要利用冲击波衰减因子进行修正。常用的冲击波能量衰减因子的修正公式为[9-10]

$$\begin{cases} e_{s0} = L e_s \\ L = 1.6 + 0.03 p_{CJ} \end{cases} \tag{4}$$

式中：e_{s0} 为初始冲击波能量，L 为衰减系数，p_{CJ} 为炸药的 CJ 压力。表 3 给出了各炸药的单位质量能量和相对总能量的实验测量结果和修正结果，其中：e 为实验测得的炸药质量能量，e_0 为修正后的炸药总质量能量，e_a 为文献[1]中给出的炸药的实际质量爆热。表 3 中，TBL_1 和 TBL_2 分别代表由 JH-9005 和

JO-9159 起爆的 TBL 炸药。由表 3 中可以看出,修正后得到的初始冲击波能与测量得到的气泡能之和与已有的结果基本一致,说明炸药达到完全爆轰,实验测试方法和数据处理方法真实。由于缺乏 TBL 炸药的相关爆压数据,因而未能对 TBL 炸药的总能量进行精确计算,但根据已有的测试结果分析可知,TBL 炸药的总能量低于 TNT 炸药。初步认为,造成 TBL 炸药能量偏低的原因可能是,在 TBL 炸药中加入了较多的铝粉(约 10%)、石蜡以及其它未参与反应的成分,导致其爆热迅速降低,因此在含能材料设计中,需要对炸药组分进行精确分析,提高高能钝感炸药的能量,使其能够在常规武器战斗部装药中得到广泛应用,提高武器的安全性。

表 3　被测炸药质量能量和相对总能量

Table 3　Mass energy and relative energy of the explosives

Explosive	e_s/(MJ/kg)	e_b/(MJ/kg)	e/(MJ/kg)	e_x	e_{s0}/(MJ/kg)	e_0/(MJ/kg)	e_a/(MJ/kg)
TNT	1.00	2.004	3.004	1.000	2.173	4.18	4.20
TBL_1	0.67	1.421	2.091	0.696	—	—	—
TBL_2	0.63	1.437	2.067	0.688	—	—	—
JH-9005	1.21	2.068	3.278	1.091	3.120	5.19	5.31
JO-9159	1.16	2.066	3.226	1.074	3.140	5.20	5.23

4　结　论

(1) JH-9005 和 JO-9159 炸药能量测试结果与已有数据相同,说明利用水中爆炸法进行爆炸能量测试实验是可行的,采用的数据分析方法正确。

(2) 采用大质量、高爆压的扩爆药作为高能钝感炸药的起爆方式,能够有效避免拐角效应,使被测炸药的能量释放更充分。

(3) 在炸药爆炸近区,冲击波峰值压力越高,冲击波能衰减速度越快;在爆炸远区,随着冲击波峰值压力的降低,不同炸药的冲击波能衰减趋势趋于一致。

(4) 用水中爆炸法测量得到的 TBL 炸药的能量约为 TNT 炸药能量的 70%。

References:

[1] Dong H S, Zhou F F. High Energy Explosive and Correlative Physical Properties [M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性 [M]. 北京:科学出版社,1989.

[2] Li J H, Zhao J B. Underwater shock wave performances of explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2): 172-176. (in Chinese)
李金河,赵继波. 炸药水中爆炸的冲击波性能 [J]. 爆炸与冲击,2009,29(2):172-176.

[3] Sternberg H M. Underwater detonation of pentolite cylinders [J]. Phys Fluids, 1987, 30(3): 7612769.

[4] Bjarnholt G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test [J]. Propell Explos Pyrot, 1980, 5(2-3): 67-74.

[5] Bocksteiner G. Evaluation of underwater explosive performance of PBXW-115 (AUST), ADA315885 [R]. Melbourne, Vic: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1996.

[6] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)
孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京:国防工业出版社,2000.

[7] Chi J C, Ma B. Underwater explosion wave by a spherical charge of composition B-3 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(3): 199-204. (in Chinese)
池家春,马　冰. TNT/RDX(40/60)炸药球水中爆炸波研究 [J]. 高压物理学报,1999,13(3):199-204.

[8] Zhao J B, Tan D W. Axial pressure damping of cylindrical TNT charges in the near underwater explosion field [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 539-543. (in Chinese)
赵继波, 谭多望. TNT 药柱水中爆炸近场压力轴向衰减规律 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 539-543.

[9] Swisdak M M Jr. Explosion effects and properties. Part II. Explosion effects in water, ADA056694 [R]. Maryland: Naval Surface Weapons Center, 1978.

[10] Cole P. Underwater Explosion [M]. Translated by Luo Y J, Han R Z, Guan X, et al. Beijing: National Defense Industry Press, 1965. (in Chinese)
库尔 P. 水中爆炸 [M]. 罗耀杰, 韩润泽, 官 信, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1965.

Experimental Technique of Underwater Energy on TATB-based Explosive

WANG Bin, ZHANG Yuan-Ping, WANG Yan-Ping

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The booster of explosive which has large mass and can produce high detonation pressure was used in the underwater explosion experiments to accurately measuring the energy of TBL, a kind of inertia high energy explosive based on TATB. The result shows that the energy of booster from the underwater explosion experiment is consist with the theoretical result. TBL contains 70% of TNT energy. The energy of shock waves attenuates faster with the increase of explosion pressure.

Key words: underwater explosion; shock energy; bubble energy