

炸药能量测试的水下爆炸方法

赵琳, 李兵, 闫吉杰, 郑长贇

(海军 91439 部队, 大连 116041)

摘要: 炸药爆炸能量测量技术是炸药研制和爆炸实践的重要研究课题。文章阐释了一种用水下爆炸方法测试炸药能量的技术, 给出了水下爆炸测量过程、主要爆炸参数的确定和爆炸测量数据的处理方法及测量误差的理论估计, 同时给出了实际测试结果。

关键词: 爆炸能量测量; 水下爆炸; 冲击波; 气泡波; 时间常数; 传感器; 采样

中图分类号: TB52 **文献标识码:** A

A method of the blast energy measurement by underwater explosion

ZHAO Ling, LI Bing, YAN Ji-jie, ZHENG Chang-yun

(91439 Navy Force, Dalian 116041, China)

Abstract: Blast energy measurement is an important subject in explosion researches and engineering applications. In this article, a method of blast energy measurement by underwater explosion is described. The procedure of blast energy measurement in underwater explosion, primary measurement parameters, blast data acquisition and processing, and error estimation are given. A measurement result is shown to explain this technique.

Key words: blast energy measurement; explode underwater; blast; air bubble blast; time constant; sensor; sampling

1 引言

炸药的爆炸能量无疑是工程爆破、兵器装药结构设计的主要根据之一, 国内测定炸药的爆炸能量一直采用铅柱法、白炮法等古典方法。用这些方法精确测定炸药的爆炸能量很难。国外从 70 年代末起相继开展了用水下爆炸方法测定炸药能量的研究工作, 陆续取得了许多成果, 并使这种方法趋于标准化。用水下爆炸方法不仅可以测定炸药能量, 而且这种方法还能够对炸药的爆炸能量分配关系加以确定。用水下爆炸方法测试炸药的爆炸能量有着其他方法不可替代的优势。根据有关单位的要求, 我们参照国外方法, 用水下爆炸方法实际测试了 14 类 34 种工业炸药的爆炸能量, 同时也测试了 TNT 炸药的爆炸能量做为对照。

2 水下爆炸测试过程

这项工作我们实际上是在海岸爆炸试验室进行

的, 这里的水域满足水下爆炸自由场条件。测量示意图见图 1。

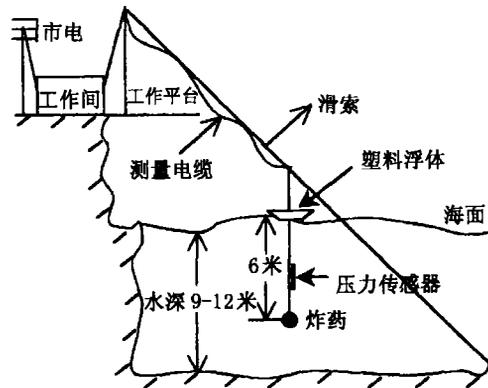


图 1 测量示意图

测试时, 卷扬机把测试电缆、压力传感器、被测炸药沿滑索送到预定的水下, 炸药爆炸时产生的零时信号启动测量系统工作, 完成信号的记录、存贮、计算、打印、绘图等工作, 方便快捷地测出压力波形、冲击波峰值、二次脉动周期、爆炸中心至测点的距离等测试结果。

3 主要试验参数的确定

3.1 药包的尺寸和重量

收稿日期:2001-10-20; 修回日期:2002-03-14

作者简介:赵琳(1949-), 男, 辽宁大连人, 高级工程师, 主要从事水下爆炸试验与研究。

药包几何形状的选择应能保证爆炸压力呈球面传播,炸药量的确定应有利于提高测量精度。重量过小,虽然便于实施,却不易排除炸药本身的离散性;重量过大,既定的海区又不满足自由场条件。参照国外的推荐标准,全部参试炸药都用 $\phi 200\text{mm}$ 的塑料球封装,各类炸药依品种不同重量在4kg左右,每一药球的确切重量用天平计量。

3.2 炸药入水深度

试验要求考虑炸药的冲击能和气泡能,则炸药的入水深度就不是任意的。一般地,水下爆炸时产生的气团的最大半径受炸药重量 W 和入水深度 H 的制约,对于铸装TNT炸药,下述关系式成立,

$$R_{\max} = 4.46 \left(\frac{W}{H + 10.3} \right)^{1/3}$$

即在 $H > R_{\max}$ 时气团不溢出水面,可以形成气泡压力波。综合考虑试验海区的水深、潮汐变化、炸药重量诸因素,选定炸药入水深度为6m是合适的。

又由于静水压力 P_0 对气泡波能量的影响是 $5/2$ 次方的关系,因而保证炸药入水深度的精度是非常重要的,为此在悬挂炸药的悬链上距药球中心6m处设一塑料浮体,使其随海浪自由起伏,以平衡海浪对炸药入水深度的影响。

3.3 爆炸压力波的抽样周期

因爆炸压力波是一宽带信号,其高频分量可达几百kHz,为提高测量精度,采样周期的设定是至关重要的。根据Cole理论^[1],水下爆炸冲击波、冲击波时间常数、冲击波峰值分别由下式确定:

$$P(t) = P_m e^{-t/\theta}; \quad P_m = K \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha;$$

$$\theta = W^{1/3} \cdot \frac{1}{k} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{\beta\alpha};$$

所有参试炸药的威力均小于TNT,若以密度为 1.52g/cm^3 、重量为1kg的TNT炸药考虑问题,则上述式子又可具体表示为:

$$P_m = 533 \left(\frac{1}{R} \right)^{1.13}; \quad \theta = 0.092 \left(\frac{1}{R} \right)^{-0.22};$$

那么因采集速度不同引起抽样最大值与压力峰值间的最大可能相对误差即为:

$$\epsilon_p = \frac{P_m - P(t)}{P_m} = 1 - e^{-t/\theta}$$

不同采样周期下的误差对照见表1,由表1可以看出,在我们提出的试验条件下,冲击波宽度 θ 在 $200\mu\text{s} \sim 500\mu\text{s}$ 之间,当采样周期 T_f 分别为 $1\mu\text{s}$ 、 $2\mu\text{s}$ 、 $4\mu\text{s}$ 、 $8\mu\text{s}$ 时,因抽样周期引起的误差全部在4%以下,考虑到测量数据统计的需要和设备的性能,我

声学技术

们在进行炸药能量测试中选定采样周期为 $2\mu\text{s}$ (共两路输入)。

表1 不同采样周期下的误差对照表

$\frac{\epsilon}{T_f}$	θ	$10\mu\text{s}$	$100\mu\text{s}$	$200\mu\text{s}$	$500\mu\text{s}$	1ms	2ms
$1\mu\text{s}$		10%	1%	0.5%	0.2%	0.05%	0.0025%
$2\mu\text{s}$		18%	2%	1%	0.4%	0.2%	0.1%
$4\mu\text{s}$		34%	4%	2%	0.8%	0.4%	0.2%
$8\mu\text{s}$		55%	8%	4%	1.6%	0.8%	0.4%
$10\mu\text{s}$		63%	10%	4.9%	2%	1%	0.5%

3.4 放炮量的确定

根据我们多年从事水下爆炸测量的试验,任何炸药的单次爆炸结果总是受爆轰条件、物理场的非均匀性影响,因此从统计的观点考虑,每一种炸药至少取3炮以上有效数据。

4 测试技术

4.1 水下爆炸信号的测量过程

水下爆炸压力全波形如图2所示。

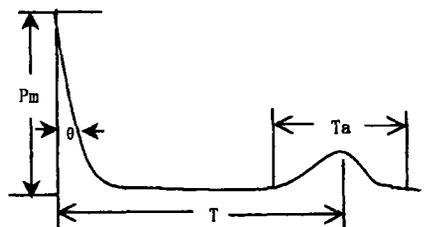


图2 水下爆炸压力波形

根据计算,重4kg左右、入水深度为6m的各类待测炸药,在距离爆炸中心2m处,冲击波宽度 $\theta < 0.5\text{ms}$ 、气泡波周期 $0.2\text{s} < T < 0.5\text{s}$ 、气泡波持续周期 $100\text{ms} > T_a > 50\text{ms}$,并且变化缓慢,因此对气泡波的采集可以放慢,以减少数据量。

实际上,我们对每一次爆炸,冲击波采样周期为 $2\mu\text{s}$,共采集10ms,可以把冲击波全部采到;然后延迟160ms对气泡波用 0.1ms 的采样周期进行采集。这些抽样点反映了爆炸压力在时域上的伸展特性。

4.2 测压传感器的标定

因测压传感器的测压线性范围,实际上有一定离散性,又由于传感器对水温变化比较敏感,因此我们在测量前专门进行了标定。我们考虑:第一,待测炸药在本试验设定的条件下,其爆炸压力的估值范围在 $100\text{atm} \sim 300\text{atm}$ 之间,因此我们对传感器的标定也选在这个压力范围内,以减小传感器的线性

误差;第二,国内外对 TNT 炸药研究得比较充分,并且这种炸药爆炸情况比较稳定,选用 1kg 球形铸装炸药做压力标定的爆源是合适的;第三,标定的数据仍应以统计处理为原则。

根据这些考虑,我们标定了试验所用的传感器灵敏度 K_{θ} 。

4.3 测量系统标定

考虑到测量系统各通道间的传递差异,我们对系统的传递函数进行了校准,校准的方法是:在测量系统的输入端连续送入一组可度量的校准电压,统计其输出的数字量。从全部的校准结果看,测量系统的输入与输出不成线性关系,且难以用一数学模型来拟合,故我们把全部校准数据列成表格,经过插值处理存入计算机,在以后数据处理时用程序调用。

5 炸药能量的数据处理方法

5.1 炸药水下爆炸能量的数学模型

根据印度 P. V. Satyavratana^[2]和瑞典 P. A. Persson^[3]等人的研究,炸药水下爆炸能量分别由冲击能 E_s 和气泡能 E_b 两部分组成,其分别为:

$$E_s = \frac{4\pi R^2 \cdot K}{W \cdot \rho_0 \cdot c_0} \int_0^t P^2(t) dt, \text{ 单位为焦耳/kg}$$

式中: W 为参试炸药重量,单位为 kg;

c_0 为水中声速,单位为 m/s;

ρ_0 为海水密度,单位为 kg/m³;

R 为测点至爆炸中心距离,单位为 m;

K 为能量衰减系数,实测结果在爆炸近区取 $K \approx 1$;

$P(t)$ 为爆炸压力波,单位为 Pa(帕斯卡);

T 为冲击波持续时间,是指 5~7 倍的冲击波时间常数为 θ 。

$$E_b = \frac{0.675 P_0^{5/2}}{W \cdot \rho_0^{3/2}} \cdot T^3, \text{ 单位为焦耳/kg;}$$

式中: P_0 为海水静压力,单位为 Pa(帕斯卡);

T 为气泡第一次振荡周期,单位为 s;

其余参数的意义同冲击能。

由这两个式子可见,进行能量计算,首先必须根据实际测量的情况给出 c_0 、 ρ_0 、 R 、 P_0 、 θ 、 T 等中间变量值。

5.2 中间变量的处理

(1) 水中声速 c_0

由水文气象台每天适时测定。

(2) 海水密度 ρ_0

测得了海水盐度 D ,实际上就确定了海水密度 ρ_0 ,有: $\rho_0 = 1032 \text{ kg/m}^3$ 。

(3) 爆炸中心处的海水静压力 P_0

炸药入水深度 H 为 6m,由公式 $P_0 = (1 + H/h) \times 10.013 \times 10^5$ 确切地换算为 161981.6 Pa。这里 $h = 10.01621578 \text{ m}$,即水深每增加 h ,则增加一个大气压。

(4) 积分时间 t

取冲击波能量的积分时间 t 为 7θ ,冲击波时间常数 θ 是指冲击波由其最大值衰减至其 $1/e$ 时所持续的时间。由于测量中用快速采样的方法记录了冲击波的波形,就可以很方便地检索出冲击波的最大值点及最大值的 $1/e$ 所对应的点,由这两点就可以准确地确定 θ 。

(5) 气泡波周期 T

同样地,我们可以由所测的爆炸压力全波形准确地检索出冲击波起始点和气泡波最大值点,这两点间的时间差即对应了气泡波的周期 T 。

(6) 爆炸中心至测点的距离 R

我们测定了冲击波由爆炸中心到测点的传播时间 t ,由公式 $R = c_0 K t$ 即可求得所需要的距离 R 。但是实际上冲击波速度对声速的修正系数 K 值与水下爆炸压力 P 间有一一对应的关系,我们通过实际爆炸测量建立了这种对应关系,并且直接将 K - P 关系列成表格存入计算机备用。显然,由所测得的爆炸压力波形可检索出冲击波峰值 P_m ,再由 K - P 表中即可查到 K 值,进而就确定了 R 值。

(7) 采样信号的压力换算

测量系统记录下来的是数字形式,时间间隔为 $2\mu\text{s}$ 的爆炸信号的抽样结果,在进行能量计算前,必须把这些数字量换算成相应的压力值方可参与运算。具体换算方法如下:

首先对抽样数值进行野值剔除,然后提取每个抽样点的机器码 A ,由系统标定结果表(见“测量系统标定”一书)中检索出与 A 对应的电压 V ,据公式 $P = V \cdot C / K_{\theta}$,即可换算出每组数码所对应的抽样压力值。此式中 C 为电容值,在测量时对输入信号起衰减作用。这里压力 P 的单位取为 Pa。

5.3 爆炸能量的计算

由前面提到的数学模型和所讨论的中间变量的处理方法,我们实际上已经解决了爆炸能量的计算。整个计算过程包括中间变量的处理,全部纳入数据处理程序。

表 2 爆炸能量实测值与理论值对照表

项目 结果 爆炸编号	实测 距离 /m	冲击能/(焦耳/kg)			气泡能/(焦耳/kg)			总能量/(焦耳/kg)		
		实测值	理论值	相对 误差 ϵ_s	实测值	理论值	相对 误差 ϵ_b	实测值	理论值	相对 误差 ϵ_E
88-10-31-01	2.778	984283	988204	-0.4%	2007124	1990000	0.9%	2991407	2978204	0.4%
88-10-31-02	2.719	1002900	989265	1.4%	1940800	1990000	-2.5%	2943700	2979265	-1.2%
88-10-31-04	2.743	1089577	988831	10.2%	2095040	1990000	5.3%	3184617	2978831	6.9%
88-11-01-01	2.698	942473	989649	-4.8%	1960467	1990000	-1.5%	2903265	2979649	-2.6%
88-11-01-02	2.8	1017914	987814	3%	1940467	1990000	-2.5%	2958381	2977814	-0.7%
88-11-01-03	2.766	1124336	988419	13.7%	1979126	1990000	-0.5%	3103462	2978418	4.2%
88-11-05-01	2	1066737	1004574	6.2%	2067536	1990000	3.9%	3134273	2994574	4.7%
88-11-05-02	2	1091613	1004574	8.7%	2072751	1990000	4.2%	3164364	2994574	5.7%
88-11-05-03	1.939	1075580	1006131	6.9%	2084343	1990000	4.7%	3159923	2996131	5.5%
88-11-05-04	1.896	1011597	1007259	0.4%	2074973	1990000	4.3%	3086570	2997259	3%
88-11-05-06	1.976	1121114	1005180	10.6%	1828936	1990000	-8.1%	2941050	2995180	-1.8%
88-11-12-03	2.001	1048305	1004549	4.4%	1992967	1990000	0.15%	3041272	2994549	1.6%
统计结果		$\Sigma 12567429$	$\Sigma 11964448$	5%	$\Sigma 24044855$	$\Sigma 23880000$	0.7%	$\Sigma 36612284$	$\Sigma 35844448$	2.1%

6 水下爆炸方法对炸药能量的测试结果

我们用水下爆炸方法实际测试了 14 类 34 种炸药的爆炸能量,同时也测试了 TNT 炸药的爆炸能量。工业炸药的测试结果从略,这里不予讨论。

密度为 1.52g/cm^3 的铸装 TNT 炸药的冲击能和气泡能分别为^[4]:

$$E_s = 1.04 \times 10^6 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{0.05} \text{ 焦耳/kg}$$

$$E_b = 1.99 \times 10^6 \text{ 焦耳/kg}$$

上式中冲击能的积分时间为 6.7θ 。

在所见到的国外资料中,一般都把这种 TNT 炸药做为其它炸药能量测试的参照标准。

下面就把我们实际测量的结果与在相同条件下用上述两个公式计算的理论值做一比较:

从表 2 可以看到,在实测的 12 炮中,测量的冲击能与理论能量相对误差最大的那一炮为 13.7%;

测得的气泡能与理论能量相对误差最大那一炮为 -8.1%;而 12 炮统计的结果表明,冲击能实测值与理论值相对误差为 5%,气泡能实测值与理论值相对误差为 0.7%,实测的总能量与理论计算的总能量的相对误差为 2.1%。考虑到在数据处理中我们选择的冲击能积分时间为 7θ ,而 Cole 公式的积分时间为 6.7θ 这一事实,那么我们实测的结果与理论值将更吻合。

从这个测试结果看,我们有理由认为,其它炸药的测试结果也是可信的。

7 测量误差的理论估计

从前面的讨论知道,影响测量误差的因素很多。这里,我们再根据对 TNT 炸药的实际测量情况,综合考虑影响测量结果的诸因素的最大可能误差,应用误差理论进一步对测试误差做一评估。

首先,由冲击能 $E_s = \frac{4\pi R^2 \cdot K}{W \cdot \rho_0 \cdot c_0} \int_0^t P^2(t) dt$ 得:

$$\frac{\partial E_s}{E_s} = \sqrt{4 \left(\frac{\partial R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_0}{\rho_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{W} \right)^2 + \left(\frac{\partial c_0}{c_0} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial \alpha}{\alpha} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial C}{C} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial K_\theta}{K_\theta} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial V_i}{\Sigma V_i} \right)^2}$$

(下转第 82 页)

表 1 两种发射方式的声场特性比较

发射方式	声压峰值 /Mpa	声轴方向		焦平面上沿椭圆焦域的短轴方向/mm		焦平面上沿椭圆焦域的长轴方向/mm	
		-3db 宽度/mm	焦距 /mm	-3db 宽度/mm	一级旁瓣 /dB	-3db 宽度/mm	一级旁瓣 /dB
图 2 中整个球面换能器发射	207.2	6.0	140.0	0.90	-12.9	0.90	-12.9
图 3 中六片换能器中只有相对的两片发射	63.08	6.0	139.9	1.30	-25.4	2.0	-12.3
图 4 中单个换能器发射	207.2	6.0	140.0	0.90	-12.9	0.90	-12.9

量非常有利。但是采用这种聚焦方式的缺点是：在同等情况下，用两个换能器聚焦，比整个凹球面聚焦的声压峰值小 2/3，则声强幅值将减少 8/9。也就是说在健康组织所受辐射量减少的同时，病变组织所受的辐照量也减少了，这就不能达到我们所要求的聚焦效果。

若采用图 4 所示的发射方式，如果 3 个发射换能器的几何尺寸与图 2 完全相同，那么 3 个换能器单独发射时的声场分布与图 2 完全相同，但是采用图 4 中 3 个换能器轮流发射的优点就在于在同样发射声压下，要对聚焦点获得相同的辐照量，图 4 中的每个换能器只需花费单换能器系统所用发射时间的 1/3，这对健康组织而言，就意味着它们的受辐照时间减少了 2/3，那么同等条件下健康组织所受辐照量明显减小。

因此采用图 4 所示的多换能器轮流发射是一种行之有效的办法。但实际应用中，若所用的换能器太多，则工艺上使它们共焦点比较难，因此一般采用 3~4 个换能器组成换能器组。

参考文献

- [1] 冯若. 从国际声学会议看高强度聚焦超声治疗学的兴起[J]. 中国超声影像学杂志, 1999, 15(3): 239.
- [2] 杨悦, 孙福成, 萧翔麟, 钱盛友. 腔内高强度聚焦超声肿瘤治疗的实验研究[J]. 声学技术, 1999, 18(2): 70-73.
- [3] 伍烽, 陈文直, 白晋等. 高强度聚焦超声治疗原发性肝癌的初步临床研究. 中国超声影像学杂志, 1999, 8(4): 213-216.
- [4] 霍彦明. 高强度超声聚焦技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学博士论文, 2000.
- [5] Ocheltree KB, Frizzel LA. Sound field calculation for rectangular sources[J]. IEEE Transaction on UFFC, 1989, 36(2): 242.

(上接第 75 页)

由气泡能 $E_b = \frac{0.675 P_0^{5/2}}{W \cdot \rho_0^{3/2}} \cdot T^3$, 得:

$$\frac{\partial E_b}{E_b} = \sqrt{9 \left(\frac{\partial T}{T}\right)^2 + \frac{25}{2} \left(\frac{\partial P_0}{P_0}\right)^2 + \frac{9}{4} \left(\frac{\partial \rho_0}{\rho_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{W}\right)^2}$$

根据实际测量情况, 我们设定:

测距误差 $\sigma R/R$ 为 0.03m/2.751m, 得 0.01;

海水密度误差 $\sigma \rho_0/\rho_0$ 为 2, 得 0.002;

炸药重量误差 $\sigma W/W$ 为 0.015kg/1kg, 得 0.015;

声速误差 $\sigma c_0/c_0$ 为 2m/1500m, 得 0.0013;

测试通道修正误差 $\sigma \alpha/\alpha$ 为 $0.03 \times 10^4/2.97 \times 10^4$, 得 0.01;

电容测量误差 $\sigma C/C$ 为 200pF/3200pF, 得 0.009;

气泡周期误差 $\sigma T/T$ 为 0.2ms/210ms, 得 0.001;

炸药入水处静压误差 $\sigma P_0/P_0$ 为 0.015atm/1.6atm, 得 0.009;

传感器灵敏度误差为 $\sigma K_\theta/K_\theta$ 为 5/100, 得 0.05;

那么, 所测得的冲击能量最大可能误差即为: $\partial E_s/E_s = 10.7\%$;

气泡能最大可能误差为: $\partial E_b/E_b = 2.7\%$;

而测试的总能量最大可能误差为:

$$\frac{\partial E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\partial E_s}{E_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_b}{E_b}\right)^2} \approx 11\%$$

8 结 论

由以上分析讨论证明, 我们所采用的这组用水下爆炸方法测定炸药能量的技术是成功的, 它在水下爆炸能量测试中具有普遍意义, 可以作为一项实用技术。

参考文献:

- [1] R·H·Cole. 水下爆炸[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [2] P·V·Satyavratana 等. 水下测试的若干问题(陈正衡译). 工业炸药测试新技术[R]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982. 82-83.
- [3] P·A·Persson. 关于国际炸药测试方法标准化研究组织第八届会议的正式报道(孙姣花译). 工业炸药测试新技术[R]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982. 7-9.
- [4] G·Bjarnholt. 关于水下爆炸试验测量方法标准和数据计算标准的建议(陈正衡译). 工业炸药测试新技术[R]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.