

文章编号: 1006-9941(2003)04-0182-05

炸药的水下爆炸冲击波性能

俞统昌, 王晓峰, 王建灵

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 介绍了炸药水下爆炸过程的特点及水下冲击波性能测试方法。研究了水下爆炸冲击波性能和炸药的爆速、爆压的关系及几种炸药的冲击波超压峰值与药量及距离的关系, 提供了几种炸药的水中冲击波能的测试结果。

关键词: 爆炸力学; 水下爆炸; 冲击波超压; 冲击波能

中图分类号: O347.5; O38

文献标识码: A

1 引言

炸药在水下爆炸时, 其能量释放的特点及对目标的毁伤机理与陆地、空中爆炸有很大区别。衡量水中兵器用炸药的能量不能局限于高爆速、高爆压的传统概念。我们在“九五”期间开展了水中兵器用炸药及水下爆炸能量评估技术的研究, 制定了试验方法。进行了大量千克级水下爆炸试验, 研究了影响炸药水下爆炸能量的多种因素。测定了一系列炸药的水下爆炸能, 对开展水中兵器用高能炸药的研究起到了很好的促进作用。

2 水下爆炸过程及水下爆炸能量的计算

炸药装药在水下爆炸时, 瞬间变成高温高压的爆轰产物, 压迫周围的水产生水中冲击波迅速向周围传播。与此同时, 爆轰产物迅速向外膨胀, 推动周围的水向外运动, 并形成气泡。当膨胀到压力等于静水压后, 因为惯性作用而继续向外膨胀直至最大体积, 此时气泡内部的压力约为静水压的 $1/5 \sim 1/10$, 而后由于外界压力的作用使气泡收缩, 同样由于惯性的作用, 在气泡内压力达到静水压时仍继续收缩, 直到最小体积时又开始膨胀, 同时产生一个压力波, 如此反复膨胀, 收缩, 形成气泡脉动, 在脉动过程中, 气泡逐渐上升, 最后脱离水面。

炸药爆炸时放出的能量, 一部分随冲击波传出, 称为冲击波能(E_s); 一部分存在于产物气泡中, 称为气

泡能(E_b); 冲击波在传播时压缩周围的水, 一部分能量以热的形式散逸到水中, 称为热损失能(E_r)。

炸药放出的总能量为这三部分能量之和, 即

$$E_{\text{tot}} = E_s + E_b + E_r \quad (1)$$

E_{tot} 为炸药的总能量, 可用爆轰量热弹实验求得。

在距离爆心为 R 的测点处冲击波能按式(2)计算

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w} \quad (2)$$

式中: R 为测点距装药中心的距离, m; ρ_w 为水的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_w 为水中声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $p(t)$ 为冲击波传到测点处时的压力, Pa。

积分时积分上限一般取 6.7θ , θ 为冲击波衰减时间常数, 指冲击波压力由峰值 p_m 下降至 p_m/e 所需的时间(s)。e 为自然对数的底, $e = 2.718$ 。

气泡能可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。

$$E_b = 4/3\pi r_{\text{max}}^3 p_0 \quad (3)$$

式中: r_{max} 为第一次气泡膨胀到最大值时的半径, m; p_0 为试样处的静水压, Pa。

根据非压缩流体的运动方程, 在无限水域中, 爆炸气体第一次膨胀的最大半径可以按式(4)计算。

$$r_{\text{max}} = 0.546 \cdot 6p_0^{0.5} \rho_w^{-0.5} t_b \quad (4)$$

式中: t_b 为第一次气泡脉动的周期, s。

将式(4)代入式(3)即得

$$E_b = 0.684 p_0^{2.5} \rho_w^{-1.5} t_b^3 \quad (5)$$

冲击波传播过程损失的能量 E_r 无法直接测量, 一般认为热损失能与冲击波的强度有关, 炸药的爆速、爆压高, 冲击波的强度大, 热损失能也大。

收稿日期: 2002-10-08; 修回日期: 2003-06-30

作者简介: 俞统昌(1938-), 男, 研究员, 主要从事爆炸理论及测试技术研究工作。

3 试验

3.1 传感器

我们采用的传感器是笔型水下爆炸冲击波传感器,该传感器为体积敏感型传感器,安装时不需将传感器正对爆心,传感器本身带有微型放大器,其输出信号可经电缆传送相当远(几百米)而无显著信号衰减和噪声干扰,得到的冲击波 $p \sim t$ 曲线和气泡脉动压力曲线光滑、平整。

3.2 试验水池

大部分试验均在大水池中进行,水池为圆台形,用 16 mm 的钢板焊接而成,水池上径 10.5 m,下径 10 m,深 7.5 m。少量试验在实验室级的小水池中进行,小水池为圆柱形,直径 3.2 m,深 2.7 m,由 8 mm 厚钢板焊接而成。实验证明,大水池最大药量可到 1 kg TNT 当量,小水池最大药量可到 35 g TNT 当量,在这样的药量条件下可视为无限水域^[1]。

3.3 数据采集与处理系统

在进行水下爆炸测量时,既要测量冲击波的压力、时间历程又要测量气泡脉动时间,前者持续时间不超过 1 ms,后者则为数百毫秒,冲击波峰压与气泡脉动压力波的幅值也相差十倍左右,为此数据采集采用并行工作同步触发的高速采集和低速采集两套系统,用高速采集系统记录冲击波的压力—时间历程,用低速采集系统测定气泡脉动周期,高速采集的速率为 20 M_{sps} ,低速采集的速率为 50 k_{sps} 。

4 试验结果

4.1 水下爆炸冲击波性能与炸药爆速、爆压的关系

RDX 和 HMX 是目前常用的两种高能炸药,RDX 的理论密度为 $1.816 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,当密度为 $1.765 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时爆速为 $8\,661 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,爆轰压为 $(32.6 \pm 0.2) \text{ GPa}$ 。HMX 的理论密度为 $1.905 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,当其密度为 $1.877 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时爆速为 $9\,010 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,爆轰压力为 39 GPa ^[2],HMX 的爆速、爆压比 RDX 高得多,对于地面和空中爆炸特别是聚能破甲、杀伤战斗部等兵器,用 HMX 代替 RDX 可以大幅度提高武器的威力。为了提高水下爆炸的威力国外有人试图采用 HMX 代替 RDX。例如 A. K. Sharma 和 S. S. Dhadwal 曾报导^[3]采用 HMX 代替 RDX 可使接近爆炸点附近的冲击波能量提高 10%~20%,但也有资料^[4]认为,对于高爆轰压的炸药如 PBX9404 在 10 倍装药半径就有 48% 的能量被损耗了,而在同样情况下,对于低密度为 $(0.4125 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 的

Pentolite 只有 6% 的能量被消耗于水的加热,因而低密度炸药的冲击波冲量和能量反而较高。

为了探索采用 HMX 代替 RDX 提高炸药水下爆炸能量的可行性,我们进行了一系列含 RDX 和 HMX 的混合炸药水下爆炸冲击波超压峰值及冲击波能的测定,试样直径 50 mm、质量(m) 250 g,试样入水深度为 4 m(水深 7 m),传感器距试样(R)为 2 m 和 3 m(对比距离 $\bar{R} = R/w^{1/3}$ 分别为 3.17, 4.76 $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$) 试验结果见表 1。

表 1 几种含 RDX 及 HMX 的混合炸药的水中冲击波性能

Table 1 Underwater shockwave performance of RDX and HMX composite

炸药组分	测距 R/m	冲击波超压峰值 p_m/MPa	比冲能 $e_s/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
TNT/RDX/Al/Wax	2	17.852	1.467
(19/61/17/3)	3	10.594	1.459
TNT/HMX/Al/Wax	2	17.721	1.502
(19/63/16/2)	3	10.627	1.433
TNT/RDX/Al/Wax	2	18.057	1.484
(19/53/25/3)	2	17.384	1.425
TNT/HMX/Al/Wax	2	17.384	1.425
(20/52/25/3)	2	14.904	1.111
EA/RDX	2	14.904	1.111
(70/30)	3	10.447	1.262
EA/HMX	2	14.801	1.119
(70/30)	3	10.332	1.289
EA/RDX/Al	2	17.647	1.439
(50/30/20)	3	10.381	1.387
EA/HMX/Al	2	16.884	1.288
(50/30/20)	3	9.446	1.009

由表 1 的数据可以看出,用 HMX 取代 RDX,组份相同或相近的配方,冲击波超压峰值均有不同程度的降低,冲击波能也相近或有所降低,说明对于离爆源中等距离处用 HMX 取代 RDX 并不能起到增加水下爆炸冲击波性能的作用。

为进一步探讨在中等距离处含 HMX 混合炸药的水下爆炸冲击波性能低的原因,我们选择了两种爆轰压相差较大的炸药进行对比试验。一种是 JO-9159,这是国内目前应用的爆轰压最高的一种塑料粘结炸药,爆速为 $8\,862 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,爆轰压为 $(36.8 \pm 0.2) \text{ GPa}$;另一种是 TNT,其爆速为 $6\,928 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,爆轰压力为 $(19.1 \pm 0.1) \text{ GPa}$ ^[2]。试验在小水池中进行,试样质量 25 g,入水深度 1 m(水深 2.4 m),传感器距试样 1 m(对比距离 $3.42 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$),试验结果见表 2。

表2 TNT和JO-9159的水中冲击波性能

Table 2 Underwater shockwave performance of TNT and JO-9159

炸药名称	炸药组分	冲击波超压峰值 p_m /MPa		比冲能 e_s /MJ·kg ⁻¹	
		平均值	标准差	平均值	标准差
梯恩梯	TNT	13.241	0.171	1.083	0.047
JO-9159	HMX/粘结剂/钝感剂(95/4.3/0.7)	11.880	0.216	0.780	0.037

由表2的结果看出尽管JO-9159的爆速比TNT高28%，爆轰压比TNT高90%，但其水中冲击波传播一段距离后，其超压峰值和冲击波能都小于TNT，说明对于水中兵器除直接接触爆炸外，炸药的爆速和爆压都应适中，不宜太高。

4.2 几种水中兵器用炸药的冲击波超压峰值与药量及距离的关系

水中爆炸冲击波在传播过程中，其超压峰值随传播距离的增加而迅速衰减，根据相似原理，对于几何尺寸相差不大的装药(如球形或短粗圆柱形)，其超压峰值与距离及药量的关系如式(6)所示。

$$p_m = K \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (6)$$

对于不同的炸药，K、α有不同的数值。对于注装TNT、国内外测得的K、α值见表3。

表3 注装TNT的K、α值
Table 3 K、α values of cast TNT

序号	K	α	来源
1	52.3	1.13	R. H. Cole ^[5]
2	52.4	1.13	NSWC ^[6]
3	52.5	1.19	中科院力学所
4	52.646	1.1024	海军某部

我们实验测定了几种水中兵器用炸药的水下爆炸冲击波超压峰值与距离及药量的关系，得到的结果见表4及图1~4。

表4 几种水中兵器用炸药的K、α值
Table 4 K、α values of four explosives used in underwater ordnance

序号	炸药名称	炸药组分	K	α
1	梯恩梯	TNT	51.370	1.137
2	RHT-1	RDX/TNT(60/40)	32.036	1.048
3	RHT-2	RDX/TNT(50/50)	31.473	1.043
4	RIT-1	PETN/TNT(50/50)	32.269	1.073

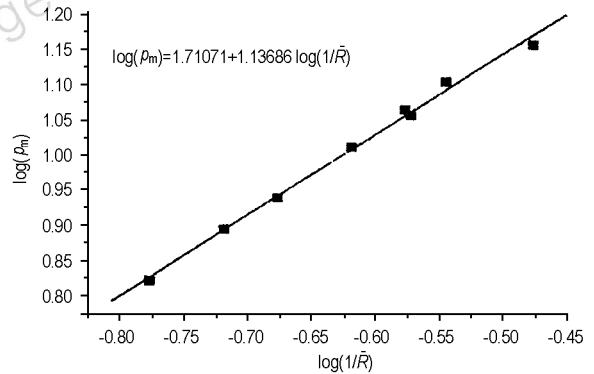


图1 TNT水下爆炸冲击波超压与对比距离的关系

Fig. 1 Relationship of $\Delta p_m \sim \bar{R}$ of underwater explosion for TNT

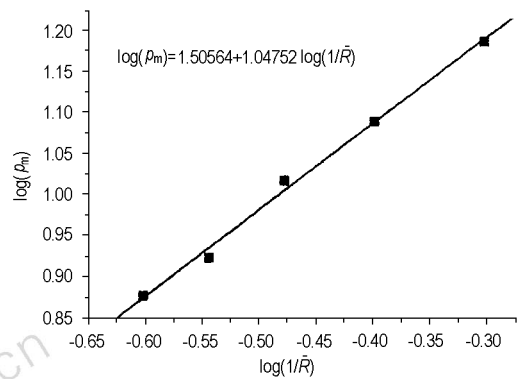


图2 RHT-1水下爆炸冲击波超压与对比距离的关系

Fig. 2 Relationship of $\Delta p_m \sim \bar{R}$ of underwater explosion for RHT-1

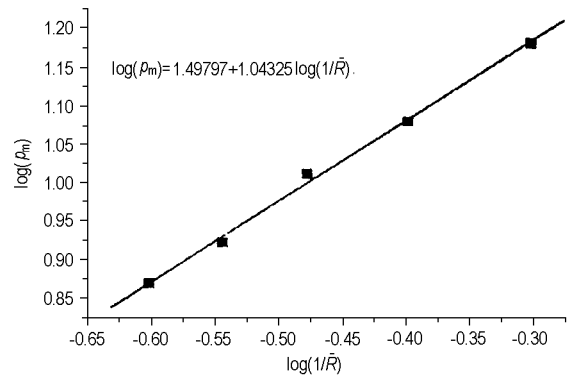


图3 RHT-2水下爆炸冲击波超压与对比距离的关系

Fig. 3 Relationship of $\Delta p_m \sim \bar{R}$ of underwater explosion for RHT-2

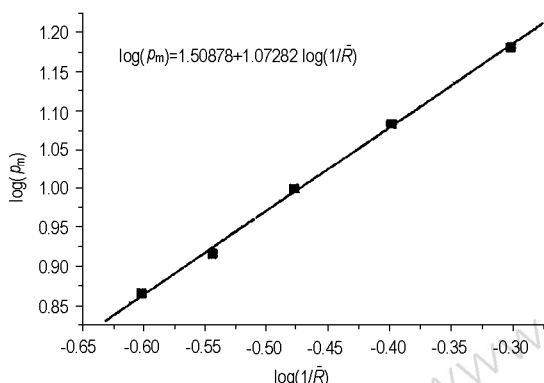


图4 RIT-1 水下爆炸冲击波超压与对比距离的关系

Fig. 4 Relationship of $\Delta p_m \sim \bar{R}$ of underwater explosion for RIT-1

由表4及图1~4可以看出,几种炸药水下爆炸时

的 $\lg p_m$ 和 $\lg \frac{1}{R}$ 之间存在着良好的线性关系,我们测得的 TNT 的 K, α 值和 R. H. Cole 和 NSWC 测得的结果符合得较好。

4.3 几种炸药的水下爆炸冲击波能

炸药的水下爆炸是一种十分复杂而且人们尚未完全掌握的现象,试验结果强烈地依赖于试验条件,尽管人们试图定量地用能量的绝对值来表征试验结果,并对影响试验结果的因素进行了研究,但很多问题还没有完全搞清楚。因而除测量能量绝对值外,人们还采用在同一试验条件下被试炸药与参比炸药能量或能流密度的比值来衡量炸药的能量。

作为参比炸药一般采用 TNT 或 RIT-1。

表5列出了几种水中兵器用炸药的比冲能及相对能流密度,并列出了文献值以供比较。

表5 常用炸药的冲击波能

Table 5 Shockwave performance of several explosives

炸药名称	炸药组分	冲击波能/ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		能流密度* / $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$	相对能流密度	
		本文	文献值		本文	文献值
注装梯恩梯	TNT	0.988	0.984 ^[5]	5.949	1.00	
RHT-1	RDX/TNT(60/40)	1.120	1.045 ^[6]	-	-	-
RHT-2	RDX/TNT(50/50)	1.105	-	-	-	-
RIT-1	PETN/TNT(50/50)	1.077	1.157 ^[5]	6.398	1.08	1.09 ^[7]
HBX-1	RDX/TNT/Al/蜡(40/38/17/5)	1.240	-	7.378	1.24	1.26 ^[7]
H-6	RDX/TNT/Al/蜡(45/30/20/5)	1.249	-	7.518	1.37	1.37 ^[7]
RS-211	RDX/TNT/Al/钝感剂(60/19/17/4)	1.467	1.44	-	-	-

* 能流密度系指测点处单位面积上的冲击波能,试验条件为药量 0.3 kg,传感器与装药间的距离为 2 m。

5 结论

1) 采用本文介绍的测试系统可以准确测定炸药水下爆炸的冲击波性能。

2) 除近距离爆炸外,水中兵器用炸药的爆速、爆压应适中,不宜太高。

3) 测定了几种水中兵器用炸药的水下爆炸冲击波超压峰值及能量,对于合理选用炸药有一定意义。

致谢: 参加本工作的还有唐桂芳、张亦安、赵省向等。

参考文献:

[1] 俞统昌,王建灵,王晓峰. 炸药水下爆炸能量测试技术研究[A]. 国防军工计量学术交流会议论文集[C], 2001.

[2] 董海山,周芬芬主编. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社,1989.

[3] Sharma A K, Dhadwal S S. Fast neutron activation analysis and performance enhancement by HMX over RDX in underwater aluminized explosives[A]. The International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnice[C]. 1996.

[4] Encyclopedia of Explosives and Related Items vol. 10, P. U71.

[5] Cole R H. 水下爆炸[M]. 北京: 国防工业出版社, 1960.

[6] 唐斌,池家春. 水中爆炸法评价炸药能量可行性研究[J]. 爆轰波与冲击波,1998. 2.

[7] AD/A 056694[Z]. 1979.

Underwater Shockwave Performance of Explosives

Yü Tong-chang, WANG Xiao-feng, WANG Jian-ling
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The characteristics of explosive's underwater explosion and the measure method of underwater shockwave performance are introduced. The relationship of underwater shockwave performance with the velocity and pressure of detonation, as well as the relationship of the shockwave peak pressure with the charge and the distance to measure point, have been deeply studied. The measured results of the underwater shock energies of several explosives are presented.

Key words: explosion mechanics; underwater explosion; shockwave peak pressure; shockwave energy



欢迎订阅 2004 年

《化学推进剂与高分子材料》

《化学推进剂与高分子材料》是由黎明化工研究院主办,中国聚氨酯工业协会、全国化学推进剂信息站协办的国内外公开发行的化工科技期刊,《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊,《万方数据-数字化期刊群》全文收录期刊,《中国核心期刊(遴选)数据库》来源期刊,《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊。

本刊主要报道聚氨酯、胶粘剂、涂料、工程塑料等高分子材料,推进剂原材料以及无机化工、精细化工等相应专业研究论文、专论与综述、生产实践经验总结与革新成果、新产品和新知识介绍、国内外科技简讯及市场动态等。

本刊内容新颖、信息量大、印刷质量好,在全国化工系统中有一定影响。在 1993,1996,2002 年化工期刊评比中连获优秀期刊奖。

本刊为双月刊。国内刊号为 CN 41 - 1354/TQ,国际刊号为 ISSN 1672 - 2191,广告经营许可证号为 4103004000006。采用国际标准大 16 开,由专业印刷厂精心承作。彩色封面印刷,设计装潢精美,正文内容及插页广告均用铜版纸。内地:每期定价 8 元,全年定价 48 元;港澳台:50 美元/年(400 港元/年);国外:60 美元/年。皆含邮资。本刊自办发行,同时又参加了全国非邮发报刊联合发行,以方便单位和个人订阅。热诚欢迎订阅者随时来电来函索取订单,也可直接寄款编辑部订阅。

**内容丰富
印刷精美**

**设计精良
发行广泛**

真诚欢迎您订阅、投稿以及发布广告!

本刊地址:河南洛阳市邙岭路 5 号
邮政编码:471001
联系电话:0379 - 2306792 转 338 或 381 刘素琴 王喜荣
传真:0379 - 2306792 转 381 或 2307056

户名:黎明化工研究院
开户行:工行洛阳分行金谷园分理处
帐号:1705 124 0090 2105 0468
E-mail:lminfo2000@yahoo.com.cn