

文章编号: 1000-5773(2010)04-0316-05

含铝炸药水下爆炸性能的实验研究^{*}

张远平, 池家春, 龚晏青, 王广军

(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
国防科技重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘要:对 RS211、HL-1、HL-2 这 3 种含铝炸药和 TNT 炸药进行了水下爆炸实验, 测量了 4 种炸药水下爆炸冲击波压力剖面和气泡脉动周期, 获得了 4 种炸药水下爆炸冲击波的峰值超压、冲量、能量和气泡能。实验结果表明, 在所研究的范围内, 与 TNT 炸药相比, 含铝炸药的冲击波能量有明显增加, 约为 TNT 炸药的 1.20~1.35 倍, 气泡能有显著增加, 约为 TNT 炸药的 1.50~2.30 倍, 表明在炸药中加入铝粉对于提高炸药水中爆炸威力是有益的。

关键词:含铝炸药; 水下爆炸; 峰值压力; 冲击波冲量; 冲击波能量; 气泡能
中图分类号:O384; TQ564 **文献标识码:**A

1 引 言

炸药中加入铝粉的主要目的在于增加爆炸反应热效应, 以提高炸药的爆炸威力^[1]。这类含铝炸药多用于军事弹药以及鱼雷、水雷等水中兵器中^[2]。对于含铝炸药性能的研究, 水下爆炸法是最好的方法之一^[3]。通过对不同含铝炸药水下爆炸的冲击波压力剖面和气泡脉动周期进行测量, 可以确定水下爆炸冲击波的峰值压力、冲量、冲击波能和气泡能, 进而评估炸药的总能量, 对军事弹药和水中兵器的研究都大有帮助^[4]。本研究对 3 种含铝炸药和 TNT 炸药水下爆炸的压力剖面和气泡脉动周期进行测量, 对比分析 4 种炸药的峰值超压、冲量、冲击波能和气泡能, 为水中兵器甄选炸药提供帮助。

2 实 验

实验所使用的 3 种含铝炸药是: RS211、HL-1 和 HL-2 炸药, 形状为球形, 标称质量 m 均为 3.0 kg, 其组分和有关性能如表 1 所示。为了进行对比研究, 表中同时列出了 TNT 炸药的相关参量。

表 1 含铝炸药及 TNT 炸药的组分及性能

Table 1 Composition and performance of aluminized explosives and TNT explosive

Explosive	Composition	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$D / (\text{m}/\text{s})$	$m / (\text{kg})$
TNT		1.64	6.928	3.015
RS211	RDX/TNT/Al/Desensitizing agent	1.75	7.521	3.088
HL-1	RDX/Al/AP/HTPB	1.82	5.664	2.995
HL-2	RDX/Al/AP/HTPB	1.78	5.710	2.953

对 3 种含铝炸药和 TNT 炸药进行 2 轮水中爆炸实验, 共计 8 发实验。为了减少传感器灵敏度对测试结果的影响, 实验交替进行, 即第 5 发到第 8 发实验重复第 1 发到第 4 发实验。实验测量了在不同装药条件下距爆心 3.0、5.0、7.0、9.0、11.0 和 13.0 m 处的压力时程, 计算和分析实验数据, 得出了不同距

^{*} 收稿日期: 2009-03-02; 修回日期: 2009-12-09

作者简介: 张远平(1965—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事爆轰压力测试技术研究. E-mail: zhy0002@sohu.com

离处的冲击波峰值压力、冲量和能量;测量了不同装药条件下距爆心 4.0 m 和 6.0 m 处的气泡脉动周期,计算得出不同炸药水下爆炸的气泡能。对实验数据进行比较,得出 3 种含铝炸药和 TNT 炸药的水下爆炸冲击波性能参数间的关系。

实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的爆炸水池中进行。水池直径为 48.0 m,注满水时深度为 23.0 m,炸药球安装于水池中心距水面以下 12.0 m 处。采用 PCB138A 系列传感器及配套的 PCB482A20 八通道信号适调仪进行数据采集,传感器敏感元件与炸药球的质心位于同一水平面。采用 TEK-TDS-5054 型数字示波器进行记录,实验布置如图 1 所示。图 1 中 1[#]~6[#] 传感器对应的示波器采用高采样率进行采集,只记录爆炸冲击波的压力时程,7[#]、8[#] 传感器对应的示波器采用低采样率长时间记录数据,以便同时获得爆炸冲击波压力时程和气泡脉动周期。

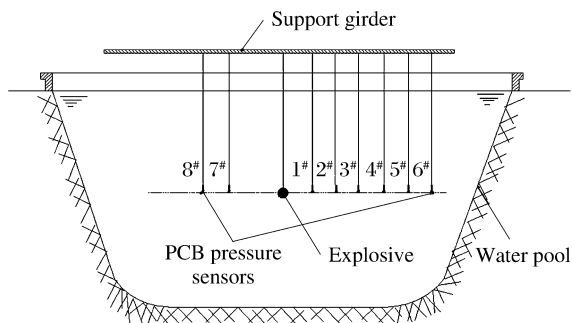


图 1 水下爆炸实验布置图

Fig. 1 Schematic of underwater explosion experiment

3 实验结果及分析

3.1 典型的实验波形

实验记录到炸药爆炸冲击波和气泡脉动产生的压力波作用于传感器后输出的压力时程,典型的实验波形如图 2 所示。本研究分 2 轮实验,每轮实验 4 发。每轮实验的第 1 发均为 TNT 炸药的水下爆炸实验,将其作为标定实验,由此得出不同测点处传感器在实验时的现场系统灵敏度。由电压时程除以传感器现场系统灵敏度即得压力时程,如图 3 所示。

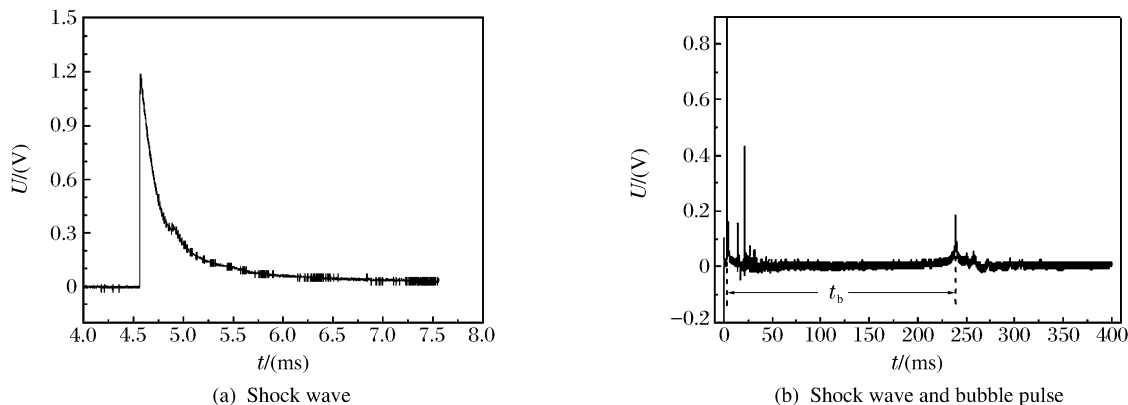


图 2 爆炸冲击波与气泡脉动输出的电压时程

Fig. 2 Voltage-time curves of explosion shock wave and bubble pulse

3.2 实验结果分析

对实验测得的冲击波压力时程和气泡脉动周期进行分析,得到爆炸冲击波的峰值压力、冲量、冲击波能和气泡能。

3.2.1 冲击波超压峰值的比较

每种炸药进行 2 发实验,得到了 8 组冲击波压力时程数据,进而获得每个测点处的峰值压力 p 。4 种炸药在不同距离处的峰值超压曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出:在距爆心相同距离处, $p_{RS211} > p_{TNT} > p_{HL-1} > p_{HL-2}$, RS211 炸药的爆炸波峰值压力最大,这是因为 RS211 炸药中含有 60.8% 的 RDX 炸药;从爆炸波压力衰减速率来看,含铝炸药比 TNT 炸药衰减得慢。

3.2.2 冲击波冲量的比较

将压力时程曲线进行积分,可得到不同距离处爆炸冲击波的冲量值,即

$$I = \int_{t_a}^{t_a+6.7\theta} p(t) dt \quad (1)$$

式中: I 为爆炸波冲量($\text{kPa} \cdot \text{s}$); t_a 为爆炸波的到达时间(ms); θ 为时间常数(ms),是指爆炸冲击波压力时程中由峰值压力 $p_{\max}$ 衰减为 $p_{\max}/e$ 的时间。不同炸药的冲量衰减曲线如图 5 所示。

由图 5 可知:在相同距离处,含铝炸药爆炸冲击波的冲量均较 TNT 炸药大,且增幅相当明显;在 3 种含铝炸药中,RS211 炸药的爆炸波冲量相对较小,其余两种比较接近,可以认为,加入铝粉能够明显增加炸药爆炸冲击波的冲量值。

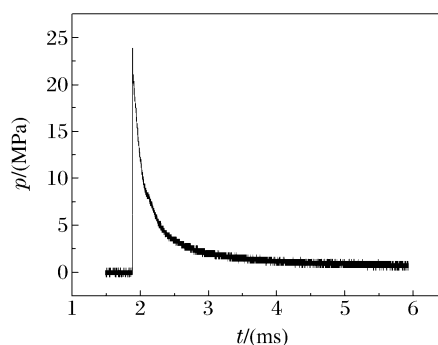


图 3 典型的冲击波压力时程曲线

Fig. 3 Typical time-course curve of shock wave pressure

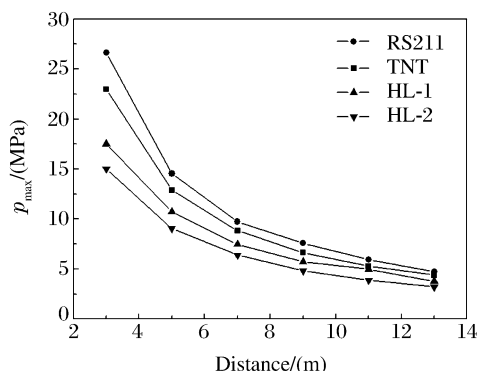


图 4 压力峰值衰减曲线

Fig. 4 Peak pressure-distance curves

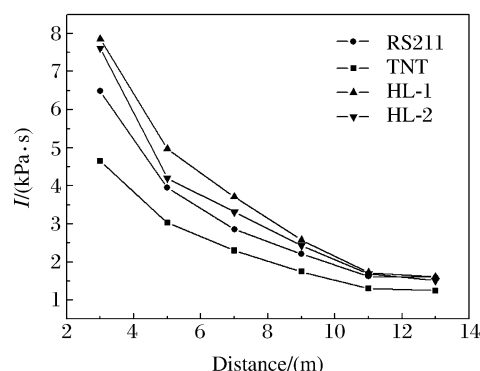


图 5 爆炸波冲量衰减曲线

Fig. 5 Blast wave impulse-distance curves

3.2.3 冲击波能量的比较

由压力时程曲线,可以求解爆炸冲击波的能量(简称冲击波能)^[5],即

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_0 c_0} \int_{t_a}^{t_a+6.7\theta} p^2(t) dt \quad (2)$$

式中: E_s 为冲击波能量(MJ); R 为测点到爆心的距离(m); ρ_0 为水的密度,取 $\rho_0 = 1.00 \text{ g/cm}^3$; c_0 为水中声速,取 $c_0 = 1460 \text{ m/s}$; t_a 为爆炸冲击波的到达时间(ms); $p(t)$ 为压力时程(MPa)。

由爆炸冲击波能量 E_s 除以炸药质量 m 可以得到单位质量炸药的冲击波能量 e_s (简称比冲击波能, MJ/kg)。实验测得不同炸药的比冲击波能-距离关系曲线,如图 6 所示。从图 6 中可以看出:3 种含铝炸药在相同距离处的比冲击波能均比 TNT 炸药大;HL-1、HL-2 炸药的比冲击波能衰减速率较小,RS211 炸药的比冲击波能衰减速率与 TNT 炸药相当。

比例距离 $Z = R/W^{1/3}$, 其中 R 为测点距爆心的距离, W 为等效 TNT 炸药药量(kg)。将 e_s 与 Z 的关系进行拟合,可得到下列关系式

$$e_{s\text{TNT}} = 1.090 Z^{-0.04178} \quad (3)$$

$$e_{s\text{RS211}} = 1.461 Z^{-0.03471} \quad (4)$$

$$e_{s\text{HL-1}} = 1.294 Z^{-0.02822} \quad (5)$$

$$e_{s\text{HL-2}} = 1.303 Z^{-0.01570} \quad (6)$$

当炸药的密度和组成不同时,(3)式~(6)式应做相应修正。将各拟合曲线与实验点同绘于图7中。从图7中可以看出,实验数据点基本在拟合曲线上,说明采用(3)式~(6)式来表示所测炸药的比冲击波能与比例距离的关系是合适的。

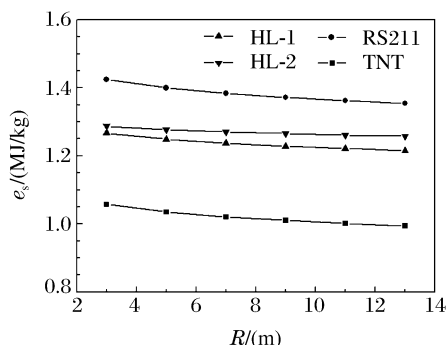


图6 比冲击波能随距离的变化曲线

Fig. 6 Curves of specific shock wave energy versus distance

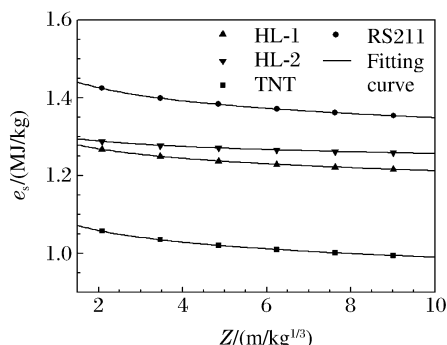


图7 比冲击波能-比例距离拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of specific shock wave energy versus scaled distance

为了进一步比较含铝炸药的比冲击波能,以TNT炸药的比冲击波能为基数进行比较,见图8。可以看出,3种含铝炸药的比冲击波能较TNT炸药均有明显的提高,增幅范围为20%~35%。

3.3 气泡能的计算分析与比较

研究表明^[6],在该几何尺寸的水池中,若设置爆深为12.0 m,气泡脉动周期与气泡能的关系遵循无限水域的爆炸条件。可通过实验测得的气泡脉动周期 T_b 计算气泡能。

$$E_b = 0.6842 p_H^{2.5} \rho_0^{-1.5} T_b^3 \quad (7)$$

式中: E_b 为气泡能(MJ); p_H 为炸药球处的压强,等于炸药球所受静水压强和当地大气压之和; ρ_0 为水的密度,取 $\rho_0 = 1.00 \text{ g/cm}^3$; T_b 为气泡脉动周期(s)。气泡能的实验结果列于表2。从表2中可以看出,随着炸药中铝粉含量的增加,气泡能呈增加趋势,与同质量TNT炸药相比,增幅范围为50%~130%。

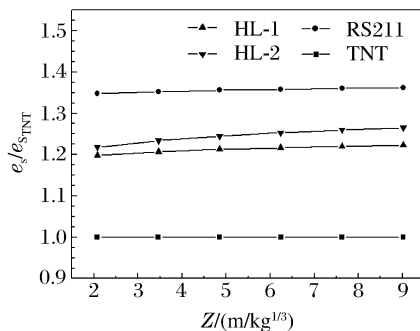


图8 含铝炸药爆炸波能量与TNT炸药的比较

Fig. 8 Comparison of blast wave energy between aluminized explosives and TNT explosive

表2 实验测得的气泡能数据

Table 2 The experimental bubble energy data

Explosive	Al content/(%)	T_b /(ms)	E_b /(MJ)	e_b /(MJ/kg)	e_b/e_{bTNT}
HL-1	26	307.62	13.5215	4.5156	2.24
HL-2	25	303.87	13.0277	4.4187	2.19
RS211	17	273.33	9.4417	3.0595	1.52
TNT	0	235.99	6.0792	2.0172	1.00

4 结 论

在所研究的范围内,可以得出如下实验结论:

(1) 在相同距离处,4种炸药的峰值压力从大到小依次为:RS211炸药、TNT炸药、HL-1炸药、HL-2炸药,表明炸药中铝粉的加入对于爆炸冲击波的峰值压力有一定影响,但程度不大;

(2) 4种炸药的冲量从大到小依次为:HL-1炸药、HL-2炸药、RS211炸药、TNT炸药,即随着铝粉

含量的增加,冲量随之增加,表明炸药中铝粉的加入对爆炸冲击波冲量有较大影响;

(3) 4 种炸药冲击波能从大到小依次为:RS211 炸药、HL-2 炸药、HL-1 炸药、TNT 炸药,表明炸药中加入铝粉对爆炸冲击波能量有明显影响,且随着铝粉含量的增加,冲击波能量最大增幅达 35%;

(4) 4 种炸药的气泡能从大到小依次为:HL-1 炸药、HL-2 炸药、RS211 炸药、TNT 炸药,表明炸药中加入铝粉对气泡能有显著影响,气泡能随着炸药中铝粉含量的增加而增加,最大增幅达 130%。

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所的冯民贤、孙永强、朱子标、杨桂红、高 宁、杨晋晏等同事在实验中的协作和帮助!

References:

- [1] Zhou L, Xu G G. Configuration of Underwater Energy Output for Aluminized Explosive Mixtures [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2003, 26(1): 30-36. (in Chinese)
周 霖, 徐更光. 含铝炸药水中爆炸能量输出结构 [J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 30-36.
- [2] 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.
- [3] Yu T C, Wang X F, Wang J L. Underwater Shockwave Performance of Explosives [J]. Energetic Materials, 2003, 11(4): 182-186. (in Chinese)
俞统昌, 王晓峰, 王建灵. 炸药的水下爆炸冲击波性能 [J]. 含能材料, 2003, 11(4): 182-186.
- [4] Guan L F, Huang H, Li S B, et al. Research on Aluminium Explosive for Underwater Applications [A]//CAEP 2003 Annual Conference [C]. Mianyang, 2003. (in Chinese)
关立锋, 黄 辉, 李尚斌, 等. 新型含铝炸药水下爆轰性能研究 [A]//中国工程物理研究院 2003 年学术年会 [C]. 绵阳, 2003.
- [5] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosive Expansion Works in Underwater Detonations [A]//Proceedings of the Sixth Symposium (International) on Detonation [C]. San Diego, 1976: 540.
- [6] Zhang Y P. Research of Evaluation Method of Underwater Detonator Energy, GF-A0093788M [R]. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 2006. (in Chinese)
张远平. 水中炸药能量评估方法研究, GF-A0093788M [R]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 2006.

Experimental Study on Underwater Explosion Performance of Aluminized Explosive

ZHANG Yuan-Ping, CHI Jia-Chun, GONG Yan-Qing, WANG Guang-Jun

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

Abstract: The blast shock wave pressure and the bubble pulse period of RS211, HL-1, HL-2 and TNT explosives were measured, and then the peak pressure, shock wave impulse, shock wave energy and bubble energy were obtained. The experimental results showed that in the studied range, the shock wave energies and the bubble energies of the three aluminized explosives were about 1.20~1.35 and 1.50~2.30 times more than TNT explosive, respectively. The analysis results indicated that the aluminum powder added to explosives can enhance underwater explosion power of the explosives.

Key words: aluminized explosive; underwater explosion; peak pressure; shock wave impulse; shock wave energy; bubble energy