文章编号：1001-1455(2014)03-0379-06

铝纤维对黑索今水下爆炸性能的影响*

林谋金，马宏昊，沈兆武，焦 龙
（中国科学技术大学近代力学系，安徽 合肥 230027）

摘要：将铝纤维添加到 RDX 中得到新型非理想炸药，并与 RDX 进行水下爆炸对比实验，得到 2 种炸药在不同位置的压力时程曲线，经过分析计算得到两者水下爆炸的冲击波压力峰值、冲量、冲击波能、气泡脉动周期以及气泡能。结果表明：距离药柱相同位置处，铝纤维炸药的压力峰值低于 RDX，铝纤维炸药的冲击波冲量高于 RDX，其差值受离药柱的距离影响不大。与 RDX 相比，铝纤维炸药的比冲击波能降低了 2%～5.2%，比气泡能提高了 9.4%～23.36%，总能量平均提高了 3.5%。铝纤维炸药比气泡能与总能量的比值为 55%～60%，高于 RDX 的 50%～53%，其总能量与爆热比值为 74%～84%，低于 RDX 的 89%～95%。

关键词：爆炸力学；冲量；水下爆炸；铝纤维炸药；比冲击波能；比气泡能
中图分类号：O381 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

含铝炸药是一种典型的非理想炸药，炸药的组分、尺寸、约束条件、铝粉形状和尺寸以及铝含量等对含铝炸药的爆炸性能影响显著。陈朗等[1]对铝粉直径从几十纳米到几十微米的含铝炸药进行了小尺寸装药条件下炸药加速金属板实验，结果表明在相同条件下铝粉尺寸大小对含铝炸药爆轰性能有明显影响。丁刚毅等[2]通过圆筒实验和数值模拟标定了含铝炸药的爆轰产物 JWL 状态方程，并认为铝粉在爆轰区内可能参加了反应，在爆轰区外继续反应，使含铝炸药具备较强的驱动做功能力。W. M. Howard 等[3]基于 WK 理论，通过对不同铝粉尺寸以及不同铝粉含量的含铝炸药进行实验，发展了含铝炸药的动态反应速率模型。R. H. Guiruis 等[4]认为含铝炸药是非理想炸药，爆轰时在 C-J 面外释放出大量的能量。如果炸药尺寸太小或约束条件不好，非理想组分铝将不会完全反应，甚至在特殊情况下根本不反应。廖学燕等[5]通过空中爆炸实验，研究铝纤维对爆炸能量输出的影响，结果表明铝纤维提高了基体炸药的爆热，同时增强了基体炸药的力学性能。

金属铝通常以粒状或片状的粉末形式加入到炸药中，以提高含铝炸药的爆炸威力，但加入铝粉同时也提高了含铝炸药的机械感度。本文中将铝纤维添加到 RDX 中，得到新型非理想炸药，并与 RDX 进行水下爆炸对比实验，得到 2 种炸药在不同位置的压力时程曲线，经过分析计算，进一步得到 2 种炸药在不同位置的冲击波压力峰值、冲量、冲击波能、气泡脉动周期和气泡能，并研究铝纤维对炸药能量输出的影响。

1 药柱制备与实验设备

研究表明，铝含量（质量）为 20%时，RDX/Al 含铝炸药的比冲击波能达到最大值[6-8]，据此设计了 2 种质量配比的炸药：配方 1，黑索金/石蜡/铝纤维＝95/5/0；配方 2，黑索金/石蜡/铝纤维＝76/4/20。将 10 g 炸药压制成长径比相等的圆柱形药柱，其中，铝纤维是由熔喷法制成的，其直径为 50～90 μm。

实验中采用的水下爆炸塔直径 D 为 5 m，水深 H 为 5 m，测试装置包括泰克示波器（TEK DSO8064A）、恒流源（482A22）、水下压力传感器（PCB，ICP W138A25），传感器的敏感元件为电气石，其直径为 4 mm，通过落锤实验标定的压力传感器灵敏度系数为 30 mV/MPa，其置信度为 95%。为了满足冲击波和气泡脉动的测试要求，将药柱和传感器置于水面下方 2 m 处，如图 1 所示。为了全面对比

* **收稿日期**：2012-10-17；**修回日期**：2012-12-22
基金项目：国家自然科学基金重点项目(51134012)；国家自然科学基金面上项目(51174183)
作者简介：林谋金(1985—)，男，博士研究生。

研究以 RDX 为基的铝纤维炸药与 RDX 的爆轰性能的差异，分别在距离药柱的距离 R 为 0.7、0.9、1.2、1.5 m 处安放传感器，这样可测得 4 个不同位置处的压力时程曲线。一次实验中安装 2 个不同位置的传感器，同等条件下重复测试 3 次，共得到了 24 组实验数据。正式实验前，可将 2 个传感器放置在距离药包相同距离的位置上，通过压力峰值、冲击波冲量与比气泡能等水下爆炸参数相互标定 2 个传感器是否一致。

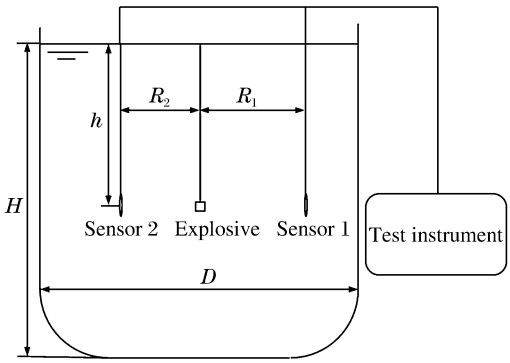


图 1 水下爆炸实验示意图

Fig. 1 Assembly experimental system of underwater explosion

2 实验结果及分析

炸药在水下爆炸的能量分为冲击波能和气泡能 2 部分：炸药在水介质中瞬时爆轰转变为高温高压爆轰产物，炸药能量转变为爆轰产物的内能并高速向外膨胀，一部分能量压用于缩水介质形成水中冲击波，剩余能量以气泡的形式向外膨胀并形成气泡脉动，因此炸药水下做功能力可通过水下爆炸实验数据计算出的冲击波能和气泡能进行评价[9]。实验中得到 R =0.7 m 时的一组压力时程曲线，如图 2 所示。

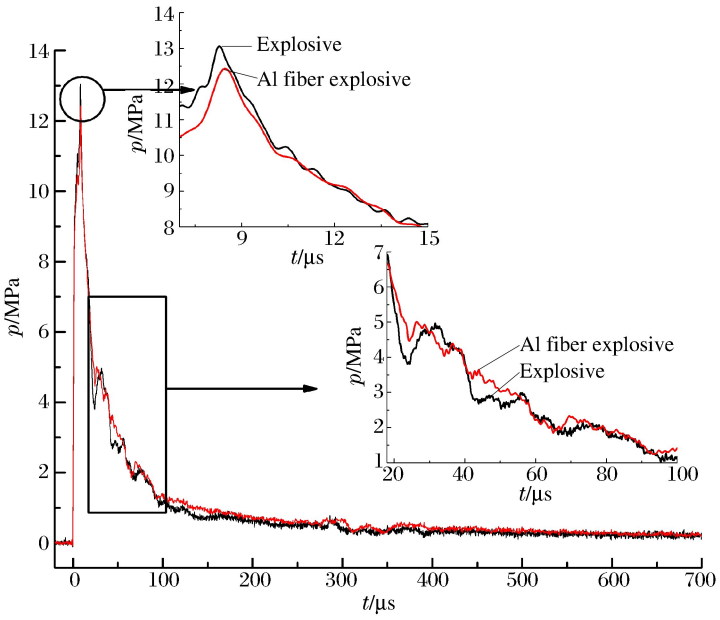


图 2 2 种炸药压力时程曲线

Fig. 2 Pressure-time curves of two different types of explosive

由图 2 可得，铝纤维炸药的压力峰值 p_m 低于 RDX，说明铝纤维在破碎前不参与反应，并且铝纤维在破碎时要消耗掉一部分能量。在压力时程曲线衰减阶段，铝纤维炸药压力值要高于 RDX，说明铝纤维参与后期反应，能够延缓压力衰减。实验中得到铝纤维炸药与 RDX 在不同位置的冲击波压力峰值，如图 3 所示。

由图 3 可知，根据经验公式计算 RDX 在不同位置的压力峰值几乎落在实验数据的拟合曲线上，说明实验得到的数据可靠有效。在相同距离下，铝纤维炸药的压力峰值 p_m 低于 RDX 的，且两者的差值不随 R/R_0 增大而明显变化。其中 R_0 为药柱半径，R 为药柱离传感器的距离，R/R_0 为量纲一距离。

炸药在水中爆炸时冲击波压力峰值与距离的关系可用函数描述为[10]

$$p_m = A\left(\frac{R}{R_0}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中：p_m 为冲击波压力峰值，A、α 为待拟合系数。

由图 3 可知拟合效果较好，说明铝纤维炸药压力峰值与距离的关系可用式(1)描述。对于 RDX，拟合系数的结果为：A = 1 269.34 MPa，α = −1.080 46；对于铝纤维炸药，A = 1 241.8 MPa，α = −1.091 42。

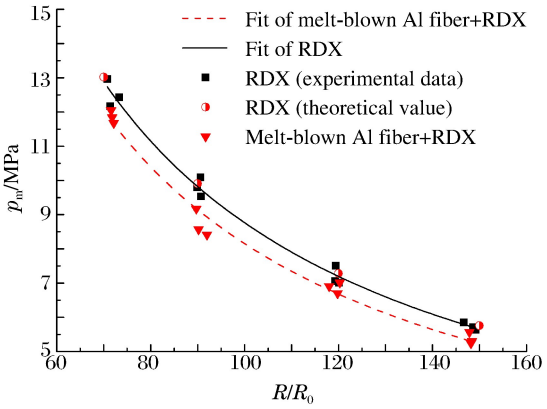


图 3 2 种炸药压力-R/R_0 曲线

Fig. 3 Pressure-R/R_0 curves of two different types of explosive

3 炸药爆轰参数计算

3.1 冲击波冲量

水下爆炸冲击波冲量计算公式为[11]

$$i = \int_0^{6.7\theta} \Delta p(t)\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中：i 为冲击波冲量，$\Delta p(t)$ 为距爆压中心 R 处冲击波压力随时间变化的函数，θ 为衰减时间常数。由式(2)计算得到铝纤维炸药与 RDX 在水中不同位置的冲击波冲量如图 4 所示。

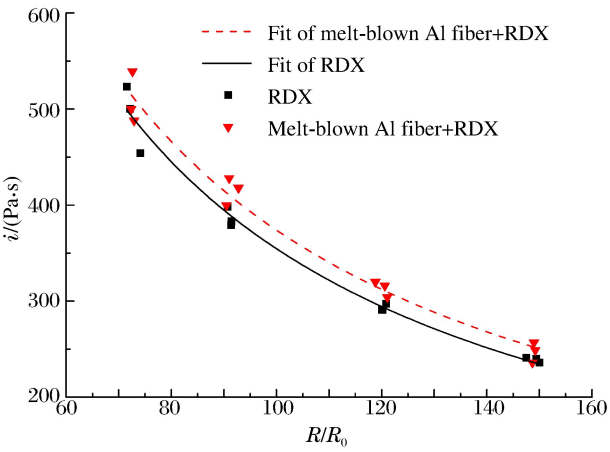


图 4 2 种炸药冲击波冲量-R/R_0 曲线

Fig. 4 Impulse-R/R_0 curves of two different types of explosive

由图 4 可得，铝纤维炸药与 RDX 的冲击波冲量随着距离 R 增大而减小，在相同位置下，铝纤维炸药的冲击波冲量高于 RDX 的冲击波冲量，其差值随距离变化不明显。炸药在水中爆炸时冲击波冲量与距离的关系可用函数描述为

$$i = a(R/R_0)^b \tag{3}$$

式中：a、b 为待拟合系数。由图 4 可知式(3)对冲量与距离关系的拟合效果较好，对于 RDX，拟合系数的结果为：a = 38 780 Pa·s，b = −1.019 43；对于铝纤维炸药，拟合系数的结果为：a = 35 430 Pa·s，b = −0.988 28。

3.2 比冲击波能、比气泡能、总能量

水下爆炸比冲击波能的计算公式为[11]

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w c_w}\int_0^{6.7\theta} \Delta p(t)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：E_s 为比冲击波能，W 为药量，ρ_w 为水的密度，c_w 为水的声速。

水下爆炸比气泡能计算公式为[11]

$$E_b = (\sqrt{1+4CT_b}-1)^3/8C^3k_1^3W \tag{5}$$

$$k_1 = 1.135\rho_w^{1/2}/P_h^{5/6} \tag{6}$$

式中：E_b 为比气泡能，T_b 是气泡第 1 次脉动周期，P_h 是测点处流体总静水压，C 是实验条件的校正系数，通过不同质量(6～10 g)的 RDX 在同等条件下进行实验，确定 C 值为 −0.919 5 s^{-1}。

炸药总能量计算公式为[11]

$$E = K_f(\mu E_s + E_b) \tag{7}$$

$$\mu = 1 + 1.332\,8\times10^{-1}p_{CJ} - 6.577\,5\times10^{-3}p_{CJ}^2 + 1.259\,4\times10^{-4}p_{CJ}^3 \tag{8}$$

$$p_{CJ} = \rho_0 D^2/4 \tag{9}$$

式中：E 为总能量，μ 为冲击波损失系数，K_f 为炸药的形状参数，对于球形取 1.00，对于非球形取 1.02～1.10；ρ_0 为药柱的密度，D 为炸药的爆速，p_{CJ} 为 C-J 压力，式(8)中 p_{CJ} 单位为 GPa。式(9)适用于单质炸药 p_{CJ} 的计算。计算传统含铝炸药 p_{CJ} 的经验公式为[12]

$$p_{CJ}=\beta\rho_{e,w}D^2/4 \tag{10}$$

本文中假定式(10)也适用于铝纤维炸药。式中：β为装药密度与最大理论密度的比值，即$\beta=\rho_0/\rho_T$，ρ_T 为药柱的最大理论密度，对于铝含量为 20% 的含铝炸药，$\rho_T=1.938\ \mathrm{g/cm^3}$，$\rho_{e,w}$ 为除去金属铝后的基体炸药密度。

结合式(4)～(10)计算可得水中爆炸实验中铝纤维炸药与 RDX 的比冲击波能 E_s、冲击波损失系数 μ、比气泡能 E_b 和总能量 E，见表 1。其中，铝纤维炸药的爆速由实验测得 $D_{AF}=7\ 612.32$ m/s，RDX 的爆速为 $D_{RDX}=7\ 986$ m/s，其由文献[12]插值获得。

表 1 2 种炸药水下爆炸能量输出的相关参数

Table 1 Energy output parameters of two different explosives in underwater explosion

炸药	R/R_0	T_b/ms	E_s/(MJ·kg^{-1})	μ	E_b/(MJ·kg^{-1})	E/(MJ·kg^{-1})	(E_b/E)/%	Q_v[12]/(MJ·kg^{-1})	(E/Q_v)/%
铝纤维炸药	70	59.640	1.089	2.055	2.791	5.029	55.50	6.443	78.06
	90	62.617	1.054	2.054	3.252	5.418	60.03	6.443	84.09
	120	62.617	1.033	2.054	3.253	5.374	60.52	6.443	83.41
	150	59.640	0.985	2.055	2.776	4.799	57.84	6.443	74.48
RDX	70	58.040	1.169	2.209	2.551	5.135	49.69	5.378	95.47
	90	58.653	1.102	2.202	2.636	5.062	52.07	5.378	94.13
	120	58.653	1.044	2.202	2.629	4.929	53.34	5.378	91.64
	150	58.040	1.027	2.209	2.548	4.817	52.91	5.378	89.56

注：表中数值为实验平均值。

从表 1 可以得到，不同距离处计算得到的比冲击波能对总能量影响不大。池家春等[13]认为，μ 值不仅与炸药爆压 p_{CJ} 相关，还与测点距离 R 相关，所以运用 Bjarnholt 得到的 μ-p_{CJ} 关系式要满足 $R/R_0=60$，此时实验条件才与 Bjarnholt 的实验条件相当。本文中在 $R/R_0=70$、90、120、150 条件下计算比冲击波能，结果表明，比冲击波能随距离的变化较小，另外张远平等[14]的实验数据也显示比冲击波能随距离的变化较小，因此可以认为运用 Bjarnholt 得到的 μ-p_{CJ} 关系式不需要严格满足 $R/R_0=60$ 条件。与 RDX 相比，铝纤维炸药的比冲击波能降低了 2%～5.2%，比气泡能提高了 9.4%～23.36%，总能量平均提高了 3.5%。RDX 的比气泡能与总能量比值为 50%～53%，铝纤维炸药的比气泡能与总能量比值为 55%～60%，说明铝纤维的加入主要是在提高比气泡能基础上提高总能量。RDX 的总能量与爆热比值(89%～95%)接近于理论值(100%)，说明通过水下爆炸评估铝纤维炸药能量是可行的。铝纤维炸药的总能量与爆热比值为 74%～84%，说明熔喷法制成的铝纤维参与反应不完全。由使用熔喷铝纤维的铝纤维炸药空中爆炸实验可知，爆炸罐中遗留有铝纤维碎屑，如图 5 所示，说明熔喷铝纤维参与反应不完全，原因可能是铝纤维直径较大(50～90 μm)，另外，由熔喷法在高温下制成的铝纤维表面 Al_2O_3 层较厚，造成 Al_2O_3 含量较高，也会导致铝纤维炸药水下爆炸能量未达到铝粉炸药的爆炸能量。



图 5 空中爆炸后遗留的铝纤维碎屑

Fig. 5 Al fiber debris after air explosion

4 结　论

(1)由于铝纤维炸药中铝纤维在破碎前不参与反应，并且铝纤维在破碎时要消耗掉一部分能量，因此其压力峰值 p_m 低于 RDX。由于铝纤维参与后期二次反应，能够延缓压力衰减，因此铝纤维炸药在压力衰减阶段的压力值要高于 RDX。

(2)与 RDX 相比，铝纤维炸药的比冲击波能降低了 2%～5.2%，但比气泡能提高了 9.4%～23.36%，说明铝纤维的加入主要是在提高比气泡能基础上提高总能量。在离药柱相同距离处，铝纤维炸药的冲击波冲量高于 RDX 的冲击波冲量。

(3)RDX 的总能量与爆热比值(89%～95%)接近理论值(100%)，说明通过水下爆炸评估炸药能量是可行的。铝纤维炸药的总能量与爆热比值为 74%～84%，另外爆炸罐在铝纤维炸药空中爆炸实验后遗留有铝纤维碎屑，说明熔喷铝纤维参与反应程度不完全，主要原因可能是铝纤维直径较大以及铝纤维由熔喷法(高温下)制成造成其表面 Al_2O_3 层较厚，导致铝纤维活性下降。

参考文献：

[1] 陈朗，张寿齐，赵玉华. 不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力的研究[J]. 爆炸与冲击，1999，19(3)：58-63.
Chen Lang, Zhang Shou-qi, Zhao Yu-hua. Study of the metal acceleration capacities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of different diameter[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3): 58-63.

[2] 丁刚毅，徐更光. 含铝炸药二维冲击起爆的爆轰数值模拟[J]. 兵工学报，1994(4)：25-29.
Ding Gang-yi, Xu Geng-guang. 2-dimensional modelling of detonation in explosives containing aluminium[J]. Acta Armamentarii, 1994(4): 25-29.

[3] Howard W M, Fried L E, Souers P C. Modeling of non-ideal aluminized explosives[C]// 11th American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Snowbird, UT, 1999: 388-392.

[4] Guirguis R H, Miller P J. Time-dependent equations of state for aluminized underwater explosives[C]// Proceedings of 10th Symposium on Detonation. Boston, USA, 1993: 126-132.

[5] 廖学燕，沈兆武，姚保学. 含铝纤维复合炸药的能量输出和力学性能[J]. 爆炸与冲击，2010，30(4)：424-428.
Liao Xue-yan, Shen Zhao-wu, Yao Bao-xue. Energy output and mechanical strength of aluminum fiber reinforced composite explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(4): 424-428.

[6] 廖学燕. 铝纤维复合炸药研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2010：67-68.

[7] 陆明. 炸药的分子与配方设计[M]. 北京：兵器工业出版社，2004：258-259.

[8] 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)：30-32.
Zhou Lin, Xu Geng-guang. Configuration of underwater energy output for aluminized explosive mixtures[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(1): 30-32.

[9] 封雪松，赵省向，刁小强. 含硼金属炸药水下能量的实验研究[J]. 火炸药学报，2009，32(5)：21-24.
Feng Xue-song, Zhao Sheng-xiang, Diao Xiao-qiang. Experimental research of underwater energy of explosive containing boron metal[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(5): 21-24.

[10] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬，译. 北京：科学出版社，2011：608-609.

[11] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosives expansion works in underwater detonations[C]// Proceedings of 6th Symposium (International) on Detonation. San Diego, 1976: 540-550.

[12] 孙业斌，惠君明，曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京：兵器工业出版社，1995：338-339.

[13] 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.
Chi Jia-chun, Ma Bing. Underwater explosion wave by a spherical charge of composition B-3[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(3): 199-204.

[14] 张远平，池家春，龚晏青. 含铝炸药水下爆炸性能的实验研究[J]. 高压物理学报，2010，24(4)：316-320.
Zhang Yuan-ping, Chi Jia-chun, Gong Yan-qing. Experimental study on underwater explosion performance of aluminized explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(4): 316-320.

Effect of aluminum fiber on underwater detonation performance of RDX*

Lin Mou-jin, Ma Hong-hao, Shen Zhao-wu, Jiao Long
(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei*, 230027, *Anhui*, *China*)

Abstract: A new non-ideal explosive was obtained by adding aluminum fiber to RDX. Pressure-time curves were measured in different regions by underwater explosion experiments of aluminum fiber explosive and RDX. Peak pressure, impulse, shock wave energy, bubble impulsion period and bubble energy were obtained by analyzing the curves. The peak pressure of the new explosive is lower than that of RDX in same regions. The shock wave impulse becomes lager and the distance does not much affect the difference. Compared with RDX, the specific shock wave energy of the new explosive decreases by 2%～5.2%, the specific bubble energy rises by 9.4%～23.36%, the specific explosion energy increases averagely by 3.5%. The specific bubble energy is 55%～60% of explosion energy, which is higher than the ratio 50%～53% of RDX. The specific explosion energy is 74%～84% of explosion heat, which is lower than the ratio 89%～95% of RDX.

Key words: mechanics of explosion; impulse; underwater detonation; aluminum fiber explosive; specific shock wave energy; specific bubble energy

---

* Received 17 October 2012; Revised 12 December 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51134012, 51174183)
Corresponding author: Ma Hong-hao, hhma@ustc.edu.cn

(责任编辑 曾月蓉)