

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.001

硼含量对含铝炸药水下爆炸能量的影响^{*}

陈 愿^① 陈 相^② 蒋 伟^② 吴德俊^① 刘大斌^① 徐 森^{①③} 潘 峰^③

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②上海出入境检验检疫局(上海,200135)

③国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 将铝硼混合添加到含铝炸药(配方体系为 Al/B/AP/RDX/wax)中,采用水下爆炸法,研究硼含量对含铝炸药水下爆炸能量的影响。结果表明,水下爆炸中,随着硼含量的增加,炸药的冲击波能降低,气泡能先增加、后逐渐减小;当硼质量分数为 10% 时,炸药水下爆炸总能量达到最大值 5.942 MJ/kg,比含铝样品提高 5%,其中气泡能为 4.999 MJ/kg,比含铝样品提高 7%,是 TNT 的 2.2 倍。在含铝炸药中添加少量的硼粉,可以提高炸药的水下爆炸能量水平。

[关键词] 硼;含铝炸药;水下爆炸;冲击波能;气泡能

[分类号] TJ55

引言

能量是衡量炸药作功能力的重要参数,对炸药能量的评价,可以通过爆热和水下爆炸法实现^[1]。爆热作为炸药的一个重要的爆轰参数,它代表了炸药所具有的化学潜能,是炸药能量示性数中重要的参量之一^[2]。用爆热来测量炸药的能量已经标准化。20 世纪 70 年代,国外研究机构开始采用水下爆炸法来测量炸药的能量^[3-4];近年来,国内也有学者开始水下爆炸方面的研究^[5-8],水下爆炸法已经成为评价炸药威力的有效技术手段。

温压炸药的毁伤作用主要体现在冲击波的超压作用、高温场的燃烧和热作用。改进炸药的能量最重要、最常用的方法是向炸药中添加金属粉末,这些粉末在加热状态下点燃并释放大量能量,大大增强了炸药的热效应。目前,研究最多的是铝粉,研究结果表明,铝粉可以有效地提高炸药的能量;铝粉含量不同、尺寸不同,都会对炸药的爆轰性能产生影响。关于硼粉和其他金属粉在炸药中混合使用的研究报道相对较少。王浩等^[9]对 DNTF 基含硼和含铝炸药的水下能量进行了研究;黄亚峰等^[10]研究指出,硼粉含量(质量分数)为 8%~20% 时,混合炸药的爆热与硼粉含量之间存在线性关系,硼粉能够提高混合炸药的爆热;封雪松等^[11]研究了含硼炸药的水下能量,当硼粉和铝粉混合使用时,可提高硼粉氧化效

率和炸药水下总能量;但由以上文献得出的结论中,均没有考虑在炸药配方中添加高氯酸铵(AP)作为供氧剂的情况。为此,本文以 RDX 为主体炸药,AP 为供氧剂,通过水下爆炸试验方法研究硼含量对含铝炸药水下爆炸能量的影响,确定炸药水下爆炸能量最大时硼的添加量。

1 试验原理

炸药在水中爆轰时,生成气态爆轰产物,并形成非常高的压力,压力以冲击波的形式在水中向四周传播。在距离爆心某一测点处,冲击波到达时,压力在极短时间内达到峰值,然后以近似指数形式衰减,压力和时间关系可由下式表示^[12]:

$$p(t) = p_m \cdot \exp(-t/\theta) \quad (1)$$

式中: $p(t)$ 是随时间变化的冲击波压力,MPa; p_m 是冲击波峰值压力,MPa; θ 定义为时间衰减常数,为冲击波从峰值压力 p_m 衰减到 p_m/e 时所经历的时间。

冲击波离开后,爆轰产物在水中以气泡的形式继续膨胀,推动周围的水沿径向向外流动。气泡内的压力随着膨胀不断下降,当下降到周围的静压力时,在水流的惯性运动下,气泡继续膨胀,达到最大半径。此时,由于气泡内的压力低于周围介质的平衡压力,周围水便开始反向运动,气泡不断收缩,压力逐渐增加,受聚合水流惯性运动,内部压力高于周围的平衡压力,直到能阻止气泡的压力而达到新的

* 收稿日期:2015-05-26

作者简介:陈愿(1985~),男,博士研究生,主要从事炸药性能与配方设计。E-mail:cheny_85@163.com

通信作者:徐森(1981~),男,博士,主要从事爆炸品性能测试分析。E-mail:xusen2015@163.com

平衡,气泡脉动的第一次循环结束。随后,开始下一次膨胀和压缩的脉动过程。

水下爆炸能量可以通过分别计算冲击波能和气泡能来确定。

1.1 冲击波能

冲击波在水中传播时,会有部分能量被耗散掉,并且压力越高,能量损耗得越快,直到衰减成声波。耗散掉的能量无法对结构产生破坏作用,剩余的能量称为有效冲击波能。单位质量炸药产生的有效冲击波能可以表示成^[12]:

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{w\rho_0 c_0} \int_0^{6.7\theta} p^2(t) dt。$$
 (2)

式中: E_s 为有效冲击波能,J/kg; R 为离爆心的距离,m; w 为炸药的装药量,kg; ρ_0 为水的密度,kg/m³; c_0 为水中的音速,m/s。

1.2 气泡能

气泡能的计算相对比较简单,可以测量气泡的第一次气泡脉动周期,通过式(3)计算^[13]:

$$E_b = \frac{0.675 p_0^{5/2}}{w\rho_0^{3/2}} \cdot T^3;$$
 (3)

式中: T 为气泡第一次振荡周期,s。

1.3 总能量

忽略样品在爆轰后的各种其他能量损失,余下的能量称为有效总能量^[14]。有效总能量可按式(4)进行计算:

$$E_u = E_s + E_b。$$
 (4)

2 试验样品与仪器

2.1 试验样品

试验用含铝炸药配方为 Al/B/AP/RDX/wax。称取 160 g 造型粉,模压成尺寸约为 $\varnothing 50$ mm \times 50 mm 的圆柱体药柱,以 10 g 钝化 RDX($\varnothing 20$ mm \times 20 mm)作为传爆药柱,采用 8#工业雷管进行起爆。固定炸药配方中铝硼混合物的质量分数不变,调整混合物中硼的添加量,样品组分、尺寸及密度见表 1。

表 1 样品组分、尺寸及密度

Tab.1 Boron content, dimension and densities of the samples

样品	组分(质量分数)/%					h / mm	ρ / (g · cm ⁻³)
	B	Al	AP	RDX	wax		
A&B-1	17.5	17.5	20	36	9	48.4	1.68
A&B-2	14.0	21.0	20	36	9	46.7	1.75
A&B-3	10.5	24.5	20	36	9	45.9	1.78
A&B-4	7.0	28.0	20	36	9	45.0	1.81
A&B-5	3.5	31.5	20	36	9	44.4	1.83
Al	0	35.0	20	36	9	44.0	1.85
TNT	—	—	—	—	—	53.9	1.51

2.2 测试系统

试验在 8.0 m \times 8.0 m 水池中进行,样品和传感器入水深度为 4.0 m,传感器距离爆心的水平距离为 3.0 m,试验布置见图 1。

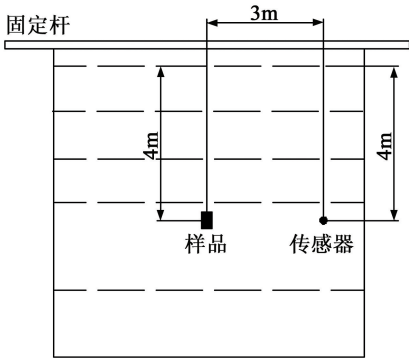


图 1 水下爆炸布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the underwater explosion

3 试验结果与分析

对每组样品平行测试 2 次,取平均值(表 2),样品冲击波超压衰减情况和气泡脉动周期如图 2 和图 3 所示。

由表 2 中的测试结果可知,将铝硼混合物添加到含铝温压炸药中,随着硼含量降低,水下爆炸的冲

表 2 水下爆炸试验结果

Tab.2 Test results of the underwater explosion

样品	p_m /MPa	$\theta/\mu s$	T/ms	$E_s/(MJ \cdot kg^{-1})$	$E_b/(MJ \cdot kg^{-1})$	$E_u/(MJ \cdot kg^{-1})$	E_b/E_u
A&B-1	6.572	64.3	151.9	0.792	3.463	4.255	81.4
A&B-2	7.095	62.4	157.0	0.843	3.822	4.665	81.9
A&B-3	6.993	62.3	163.2	0.930	4.297	5.227	82.2
A&B-4	7.160	70.9	165.6	0.921	4.485	5.406	83.0
A&B-5	7.004	82.3	171.7	0.943	4.999	5.942	84.1
Al	7.285	68.5	168.0	0.983	4.682	5.665	82.6
TNT	7.153	61.6	132.1	0.915	2.274	3.189	71.3

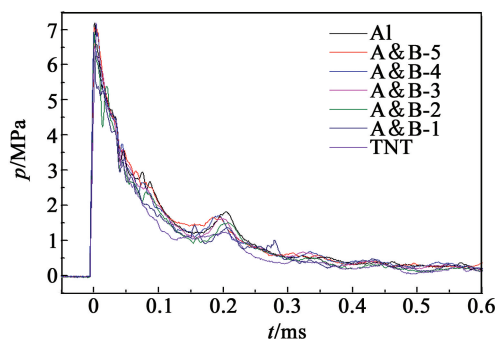


图2 冲击波时间历程曲线

Fig. 2 Time histories of shock wave

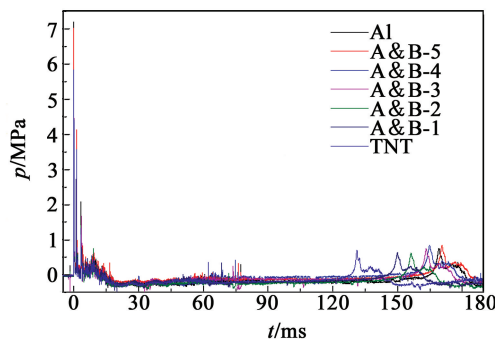


图3 3.0 m 处样品第一次气泡脉动周期

Fig. 3 The first bubble period of explosive charges at 3.0 m

击波能和气泡能呈现增大的趋势。当混合物中硼的质量分数降到 10% 时 (A&B-5), 样品的气泡能达到最大值 4.999 MJ/kg, 是同等质量 TNT 样品气泡能的 2.20 倍; 此时, 有效总能量也达到最大, 为 5.942 MJ/kg, 比含纯铝样品提高 5%。随后, 硼质量分数降为 0 (含铝样品) 时, 样品的冲击波能继续增加, 气泡能和有效总能量有所降低。含铝炸药中气泡能所占的比例高于 TNT, 超过 80%。结果表明, 铝硼混合物中, 硼的质量分数应控制在 10% 时为优。

结合 Finger 等人^[15] 对含铝炸药爆轰时所描述的过程, 同样可以对本试验中样品发生反应时的过程进行描述, 主要包括: 1) RDX 的冲击起爆和反应; 2) 炸药分解产生的热使 AP 分解和反应; 3) 加热铝 (硼) 使其达到灼热并生成少量的低级氧化物; 4) 爆轰产物的扩散与混合; 5) 铝 (硼) 与 RDX 爆轰产物以及来自 AP 过剩氧的二次反应; 6) 氧化物的转化及传热。

由以上的分析可知, 样品爆炸反应过程的第一步是单质炸药和其他活性组分的爆炸反应, 第二步是铝粉、硼粉参与反应。在含铝炸药中, 相对炸药组分而言, 铝粉是惰性的, 不能与炸药直接发生反应, 要在炸药爆轰反应造成的高温、高压条件下, 与炸药的爆轰反应产物再进行反应。因此, 铝粉较不易反

应, 且需要吸热和消耗一部分能量, 从而降低爆轰波的能量。相对铝而言, 硼更为惰性, 硼的含量越高, 发生反应时吸收的能量越多。因此, 向含铝炸药中添加硼粉, 会引起冲击波能的减小。同时, 由于铝 (硼) 粉的反应进行得较为缓慢, 此阶段放出的能量, 为爆轰产物在水中的膨胀提供了能量来源, 延长了气泡的脉动周期, 有利于提高水下爆炸的气泡能。硼粉对总能量的贡献主要体现在气泡能上。

硼粉比铝粉具有更大的热力学潜能, 其燃烧热值约为铝粉的 2 倍, 但在温压炸药体系中, 添加较多的硼粉, 其具有的能量并不能迅速且完全地释放出来。铝硼混合物中, 硼的熔点为 2 076 °C^[16], 而铝的熔点 (660 °C) 低于硼粉, 在爆轰过程中容易气化和氧化, 氧化热值较高, 氧化释放的热量有助于提高硼的氧化效率, 从而提高水下爆炸的总能量。

从图 2 和图 3 中冲击波压力和时间关系可知, 铝硼混合物中硼质量分数为 10% (A&B-5) 时, 样品的冲击波压力衰减最慢, 气泡脉动周期时间最长。同时由图 3 还可知, 样品质量相同时, 含铝炸药样品的气泡脉动周期比 TNT 长。这是由于含铝 (硼) 炸药能量释放特性与 TNT 的差异, 对炸药水下爆炸冲击波特性参数产生了影响。

4 结论

研究硼含量对某一配方体系为 Al/B/AP/RDX/wax 含铝炸药爆炸能量的影响, 采用水下爆炸方法对样品的爆炸能量进行评估, 可以得到以下结论:

1) 在含铝炸药中添加高燃烧热值的硼粉, 对总能量的贡献主要体现在气泡能上, 含铝炸药的气泡脉动周期比同等质量的 TNT 长, 气泡能在有效总能量中的比例超过 80%。

2) 铝硼混合物中, 硼质量分数为 10% 时, 水下爆炸气泡能和总能量达到最大。与含铝样品相比, 总能量提高 5%; 气泡能提高 7%。

3) 在 RDX、AP 混合炸药中, 铝粉和少量的硼粉混合使用, 可以促进硼的氧化反应, 提高水下爆炸的总能量。

参 考 文 献

- [1] 徐森, 张兴明, 潘峰, 等. 工业炸药能量测试方法的分析[J]. 爆破器材, 2013, 42(1): 18-21.
XU S, ZHANG X M, PAN F, et al. Analysis on the energy testing methods of industrial explosives [J]. Explosive Materials, 2013, 42(1): 18-21.
- [2] 李玲霞, 丁茂元, 白伟利, 等. Al/KClO₄ 点火药爆热测定的影响因素[J]. 火工品, 2012(6): 40-43.
LI L X, DING M Y, BAI W L, et al. Study on factors influencing on explosion heat test of Al/KClO₄ ignition

- powder [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(6):40-43.
- [3] BJARNHOLT G, HOLMBERG R. Explosive expansion works in underwater detonations [C]//*Proceedings of 6th Symposium on Detonation*. San Diego, 1976.
- [4] KATSUME T. Precisely measure explosive energy using explosive underwater method [J]. *Kogyo Kayaku*, 1981, 42(4):239-246.
- [5] 苏华, 陈网桦, 吴涛, 等. 炸药水下爆炸冲击波参数的修正 [J]. *火炸药学报*, 2004, 27(3):46-48.
- SU H, CHEN W H, WU T, et al. Amendment of shock wave parameters of underwater explosion [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(3):46-48.
- [6] 周俊祥, 于国辉, 李澎, 等. RDX/Al 含铝炸药水下爆炸实验研究 [J]. *爆破*, 2005, 22(2):4-6.
- ZHOU J X, YU G H, LI P, et al. Experimental study of the aluminized explosive RDX/Al explosion underwater [J]. *Blasting*, 2005, 22(2):4-6.
- [7] 朱锡, 牟金磊, 洪江波, 等. 水下爆炸气泡脉动特性的试验研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, 28(4):365-368.
- ZHU X, MU J L, HONG J B, et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosions [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(4):365-368.
- [8] 饶国宁, 陈网桦, 胡毅亨, 等. 不同炸药水下能量输出特性的实验研究 [J]. *爆破器材*, 2007, 36(1):9-11.
- RAO G N, CHEN W H, HU Y T, et al. Experimental study on underwater energy output characteristics of different explosives [J]. *Explosive Materials*, 2007, 36(1):9-11.
- [9] 王浩, 王亲会, 金大勇, 等. DNTF 基含硼和含铝炸药的水下能量 [J]. *火炸药学报*, 2007, 30(6):38-40.
- WANG H, WANG Q H, JIN D Y, et al. Underwater energy of DNTF based boron-contained and aluminum-contained explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(6):38-40.
- [10] 黄亚峰, 王晓峰, 冯晓军. 黑索今基含硼炸药的爆热性能 [J]. *含能材料*, 2011, 19(4):363-365.
- HUANG Y F, WANG X F, FENG X J. Detonation heat of boron-contained explosive based on RDX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011, 19(4):363-365.
- [11] 封雪松, 赵省向, 刁小强, 等. 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 X S, ZHAO S X, DIAO X Q, et al. Experimental research on underwater energy of explosive containing boron/metal [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5):21-24.
- [12] COLE R H. *Underwater explosion* [M]. New York: Princeton University Press, 1965.
- [13] 赵琳, 李兵, 闫吉杰, 等. 炸药能量测试的水下爆炸方法 [J]. *声学技术*, 2003, 22(2):72-75.
- ZHAO L, LI B, YAN J J, et al. A method of the blast energy measurement by underwater explosion [J]. *Technical Acoustics*, 2003, 22(2):72-75.
- [14] ARONS A B, YENNIE D R. Energy partition in underwater explosion phenomena [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1948, 20:519-536.
- [15] FINGER M, HORNIG H C, LEE E L, et al. Metal acceleration by composite explosives [R]. Livermore: California University Lawrence Radiation Lab., 1970.
- [16] SPEIGHT J G. *Lange's handbook of chemistry* [M]. New York: McGraw-Hill, 2005.

Influence of Boron Content on Underwater Explosion Energy of Aluminized Explosive

CHEN Yuan^①, CHEN Xiang^②, JIANG Wei^②, WU Dejun^①, LIU Dabin^①, XU Sen^{①③}, PAN Feng^③

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau (Shanghai, 200135)

③ National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Mixture of aluminum and boron was added to RDX-based explosives with the formulation of Al/B/AP/RDX/Binder, and underwater explosion were performed to study the influences of boron content in the mixture on the detonation energy of the explosives. The test results indicate that the shock wave energies decrease with the increase of boron content in underwater explosion, while the bubble energies increase firstly and then decrease. When the mass fraction of boron is 10%, the total energy of the explosive reaches a maximum of 5.942 MJ/kg, which is 5% higher than the aluminized explosive. The bubble energy is 4.999 MJ/kg, which is 2.2 times of that of TNT, and 7% higher than that of the aluminized sample. Adding some boron powders to Al-B mixture can improve the underwater detonation energy of the aluminized explosive.

[KEY WORDS] boron; aluminized explosive; underwater explosion; shock wave energy; bubble energy