

文章编号: 1006-9941(2014)05-0684-04

## 温压炸药爆炸能量输出的实验研究

卢勇<sup>1</sup>, 王伯良<sup>1</sup>, 何中其<sup>1</sup>, 李席<sup>1</sup>, 刘波<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 山西淮海机电有限公司, 山西 长治 046012)

**摘要:** 为了指导温压炸药配方设计, 研究温压炸药能量输出与组分及实验气氛关系, 采用水下爆炸的方法, 通过冲击波能、气泡能和总能量分析其能量输出特性。结果表明: 在实验条件下, 冲击波能和总能量在铝粉含量为 40% 时最大, 分别为 338.27 kJ 和 2549.84 kJ。气泡能在铝粉含量为 50% 时最大, 为 16.08 kJ·g<sup>-1</sup>。含氧量是影响温压炸药能量输出的重要因素。

**关键词:** 爆炸力学; 温压炸药; 水下爆炸; 冲击波能; 气泡能

**中图分类号:** TJ55; O389; TD235.37

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.020

### 1 引言

温压炸药中一般添加铝粉等高能添加剂以增强燃烧和爆炸效应, 同时还添加部分高能炸药以增强其起爆性能, 因此药剂兼具高爆炸药、含铝炸药和燃料空气炸药的特点, 其能量输出分为三个阶段: 第一阶段是高能炸药内分子化合物的反应; 第二阶段是第一阶段的爆轰产物与铝粉燃烧反应; 第三阶段是炸药中可燃元素与氧气的快速燃烧反应<sup>[1]</sup>。

以往对温压炸药的评估多集中在爆炸输出及毁伤效应方面。如 Schaefer<sup>[2]</sup> 进行了半封闭空间和坑道内温压炸药的冲击波超压和冲量性能研究; 陈昊等<sup>[3]</sup> 通过两个相互连接的密闭和半密闭房间, 测试了在有限空间内距炸点不同距离处的超压; 姬建荣等<sup>[4]</sup> 采用小型爆炸容器研究 TNT/Al 炸药后燃烧反应的准静态压力。这些研究集中在温压炸药的应用性能, 且测量参数与常规炸药一致, 无法反映温压炸药的爆炸特性, 不能有效地指导温压炸药的配方设计。

美国 Nammo Talley 公司基于量热法原理建立了能够反映温压炸药爆炸能量测量的装置和方法, 但实验药量小, 小药量装药条件下温压炸药无法实现完全爆轰, 对温压炸药的爆炸能量有一定影响<sup>[5]</sup>。裴明敬等<sup>[6]</sup> 通过氧弹量热计测试含铝温压炸药在氧气、空气和氩

气环境中的燃烧热值, 但无法分析温压炸药爆轰时能量。为揭示温压炸药能量与其组分及试验气氛之间关系, 本研究采用文献[7]的实验装置, 在密闭条件下, 通过水下爆炸的试验方法, 以冲击波能、气泡能和总能量为参数分析其影响规律。

### 2 实验部分

#### 2.1 实验条件

试验主要对温压炸药及 TNT 进行研究。温压炸药组分见表 1, 装药均为圆柱形压装药, 直径 40 mm, 重 170 g, TNT 密度为 1.54 g·cm<sup>-3</sup>。为保证起爆的可靠性, 每发主装药均用直径为 40 mm、药量为 30 g 的 8701 炸药作为传爆药柱, 用 8 号电雷管起爆; 并以 8 号雷管起爆 8701 传爆药柱作为空白试验, 扣除对主装药能量输出的影响。共进行四个系列的试验, 每个系列进行两次平行试验。

表 1 温压炸药组分

Table 1 Component of thermobaric explosive

No.	Al content /%	RDX content /%	additive content /%	density /g·cm <sup>-3</sup>
1#	20	74	6	1369
2#	30	64	6	1.82
3#	40	54	6	1.88
4#	50	44	6	1.95
5#	60	34	6	1.95

#### 2.2 实验装置

采用文献[7]中装置, 如图 1 所示。该装置均采用

收稿日期: 2013-09-06; 修回日期: 2013-11-06

作者简介: 卢勇(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸理论及其应用研究。e-mail: 1029887318@qq.com

通信联系人: 王伯良(1964-), 男, 教授, 主要从事爆炸理论及其应用研究。e-mail: boliangwang@163.com

20#钢无缝焊接而成,容积为 6.024 L。进行水下爆炸测试时,被测炸药试样被置于该试验装置的内层圆筒形容器中并做好防水处理,在内、外层容器形成的封闭空腔内充填一定压力的气体。其中 Ar 不参与后燃反应,对炸药的能量输出没有影响;空气中含有氧气,能够支持炸药的后燃反应,但空气中氧气含量有限,故采用纯氧气氛进行试验,考察氧气含量对炸药能量输出的影响程度。

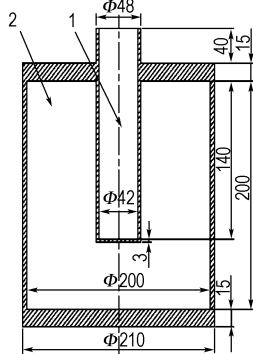


图 1 试验装置尺寸<sup>[1]</sup>(单位: mm)

1—内层容器, 2—外层容器

Fig.1 Dimensional sketch of the test device<sup>[1]</sup>(unit: mm)

1—inner container, 2—outer container

试验在  $\Phi 8\text{ m} \times 8\text{ m}$  的刚性水池中进行,水池池壁与池底材质均为钢板。试验装置和传感器布放在水面下 4.25 m 处,试验装置距池壁水平距离为 4 m,传感器距离试验装置 2 m,试验布置如图 2 所示。测试时,使用 PCB138 系列的 ICP 压电水下传感器、PCB482A16 型信号调理仪、国产纵横公司 JV5200 数据采集仪记录压力时程曲线,采用 Jovian 软件进行信号采集、存储和处理。

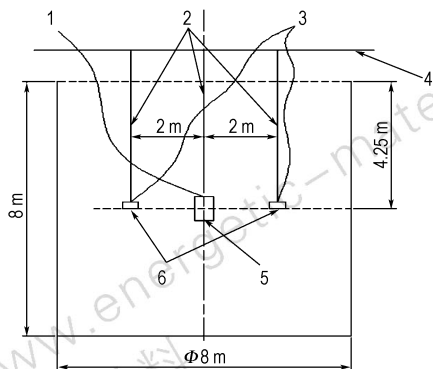


图 2 试验布置示意图

1—起爆电缆, 2—承重绳索, 3—传输电缆, 4—试验支架, 5—实验装置, 6—传感器

Fig.2 Sketch of experimental arrangement

1—ignition cable, 2—load rope, 3—transmission cable, 4—experimental holder, 5—test device, 6—sensors

### 3 计算公式修正

#### 3.1 冲击波能的计算

考虑传感器几何形状对测量波形的影响,将水下爆炸爆源比冲击波能计算公式乘以系数  $K_e$  进行修正,得出水中测点处比冲击波能修正后的计算公式为<sup>[8]</sup>:

$$e_s = K_e \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w W} \int_0^\tau p^2(t) dt$$

式中,  $K_e$  与压力传感器传感头的直径、冲击波的衰减时间常数和水中音速有关,  $K_e = 1 + 0.29\gamma + 0.016\gamma^2$ ,  $\gamma = \frac{d}{C_w \cdot \theta}$ ,  $d$  为传感器传感头直径, mm, 本试验中为 6.35 mm;  $R$  为爆心至测点的距离, m;  $W$  为装药质量, kg;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 本文取  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_w$  为水中音速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 取  $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $p(t)$  为测点处  $t$  时刻冲击波压力, Pa;  $\tau$  为积分上限(由于冲击波压力时程曲线衰减较慢, 本文取  $5.17\theta$ , 此时冲击波压力已降至峰值压力的 5% 以下);  $\theta$  为水中冲击波的衰减时间常数, 取压力从峰值  $p_m$  首次衰减到  $p_m/e$  所需的时间间隔,  $\mu\text{s}$ 。

#### 3.2 气泡能的计算

有限水域水下爆炸存在边界效应, 气泡脉动周期与药量之间关系稍偏离 Willis 公式, 因此实际有限水域水下爆炸爆源的比气泡能  $e_b$  的计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$e_b = \frac{1}{8C^3 K_1^2} [\sqrt{1+4CT_b} - 1]^3$$

式中,  $C, K_1$  为与给定水池给定装药位置有关的常数,  $K_1 = 1.135\rho_w^{1/5}/\rho_{hi}^{5/6}$ , 在本实验条件下, 实测并以最小二乘法计算得到  $C = 0.4147 \text{ s}^{-1}$ 。  $T_b$  为将实测气泡脉动周期  $t$  修正到同一大气压下的总流体静压  $p_{hi}$  下的气泡脉动周期, 修正公式为:

$$T_b = t_b \left( \frac{p_{hi}}{p_h} \right)^{5/6} = t_b \left( \frac{p_i + p_h}{p_0 + p_h} \right)^{5/6}$$

式中,  $p_{hi}$  为装药深度处的总流体静压, Pa;  $p_i$  为测试时水面实测大气压, Pa;  $p_0$  为水面标准大气压, 取  $101325 \text{ Pa}$ ;  $p_h$  为装药深度处的静水压力, Pa。

### 4 结果与讨论

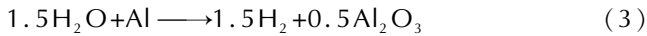
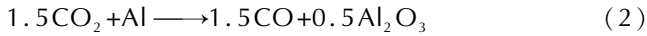
#### 4.1 气氛对温压炸药能量输出的影响

为考察气氛对温压炸药爆炸能量输出的影响, 分别在 Ar、Air 和  $\text{O}_2$  气氛下 (2.7 MPa) 对 3# 温压炸药进行试验, 并与 TNT 进行对比, 结果见表 2。

RDX 的氧平衡为 -0.216, 其氧含量不足以氧化可燃元素, 但可使产物完全气化, 属于第二类炸药, 按改进的 (M-L) 法写出第一阶段爆炸反应方程式<sup>[10]</sup>:



第二阶段反应方程式:



在前两阶段反应过程中, 生成了  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  等可燃气体, 并且还有铝粉尚未参与反应, 该部分继续与氧气发生快速燃烧反应, 假定最终生成物为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 则在 Air 气氛中氧气含量有 1.09 mol 不足, 在  $\text{O}_2$  气氛中氧气含量有 4.19 mol 过量。

表 2 气氛对能量输出的影响

Table 2 The effect of atmosphere on the energy output

composition	atmosphere	shock wave energy /kJ	bubble energy /kJ	total energy /kJ · g <sup>-1</sup>	decay time constant $\theta/\mu\text{s}$
3 <sup>#</sup> TNT	$\text{O}_2$	338.27	2477.69	16.08	36.9
		101.75	1638.89	9.13	31.1
3 <sup>#</sup>	Air	91.90	1321.24	7.70	33.6
3 <sup>#</sup> TNT	Ar	64.65	867.15	5.21	32.5
		53.49	604.17	3.74	31.1

由表 2 可知, 3<sup>#</sup>温压炸药冲击波能、气泡能及总能量随气氛的变化情况均为  $E_{\text{O}_2} > E_{\text{Air}} > E_{\text{Ar}}$ , 表明 RDX 的快速爆轰产物不足以完全氧化铝粉, 剩余的铝粉继续与氧进行快速反应, 因此冲击波能、气泡能及总能量都提高了; 而在纯氧氛围中, 较空气中氧气含量更充足, 可促进后燃反应的进行, 提高了能量输出。TNT 的冲击波能、气泡能及总能量随气氛的变化情况均为  $E_{\text{O}_2} > E_{\text{Ar}}$ , TNT 的氧平衡是 -0.74, 为严重负氧平衡炸药, 产物中有固体碳生成, 在密闭空间爆轰能量释放分为两个阶段, 即爆轰和后燃过程<sup>[11]</sup>, 因此在  $\text{O}_2$  气氛中其能量输出更高。3<sup>#</sup>温压炸药比 TNT 的能量释放要高得多, 说明含有金属粉的温压炸药后燃效应更为强烈, 释能效更高。

#### 4.2 组分对温压炸药能量输出的影响

为考察铝含量对温压炸药爆炸能量输出的影响, 在  $\text{O}_2$  气氛下 (2.7 MPa) 对 5 种不同铝粉含量的温压炸药进行试验, 结果见表 3。

该系列的各组试验中氧气均过量。由表 3 可见, 随着铝粉含量增加, 冲击波能、气泡能和总能量的总体趋势是先增大后减小 (2<sup>#</sup>冲击波能较 1<sup>#</sup>略小可能由于衰减时间常数选取所致), 表明温压炸药中铝粉的加入量有一最佳值。

冲击波能在铝含量为 40% 时 (3<sup>#</sup>) 达到最大值。当铝粉含量增加到一定程度后, 随着 RDX 含量的持续减少, 将引起混合炸药总能量和铝粉氧化反应热效应

的持续下降, 从而降低冲击波的能量水平。继续提高铝粉含量时, 由于铝粉与爆炸产物及氧气的反应时间加长, 释放的能量已不足以供给冲击波波头, 这时水中冲击波能量便逐渐减少。

表 3 组分对能量输出的影响

Table 3 Effect of components on the energy output

composition	shock wave energy /kJ	bubble energy /kJ	total energy /kJ · g <sup>-1</sup>	decay time constant $\theta/\mu\text{s}$
1 <sup>#</sup>	117.05	1846.63	10.37	31.1
2 <sup>#</sup>	108.84	1887.33	10.50	26.5
3 <sup>#</sup>	338.27	2477.693	16.08	36.9
4 <sup>#</sup>	93.53	2549.84	13.07	23.7
5 <sup>#</sup>	56.84	2262.64	11.29	23.3

气泡能在铝含量为 50% 时 (4<sup>#</sup>) 达到最大值。气泡脉动时, 先脉动到最大直径, 然后被周围水介质压缩至比初始脉动直径还要小的气泡, 尔后再继续向增大直径方向脉动。在气泡受压缩时, 爆轰产物及气氛也受到压缩, 从而提高铝粉的反应比例, 反应释放的能量可以全部供给气泡, 增大气泡能<sup>[12]</sup>。在铝粉含量不高时, 随着铝粉含量增加, RDX 含量的持续减少, 反应产物中固体产物逐渐增加, 气体产物逐渐减少, 致使气泡能不再增加。当铝粉含量由 40% (3<sup>#</sup>) 增加到 50% (4<sup>#</sup>) 时, 气泡能增大已不明显。

总能量在铝含量为 40% 时 (3<sup>#</sup>) 达到最大值。表明铝含量小于 40% 时, 增加铝的含量会增加爆热; 当铝含量大于 40% 时, 由于多余的铝粉作为惰性吸热物质存在, 反而使总能量降低。

#### 4.3 供氧量对温压炸药能量输出的影响

为考察供氧量对温压炸药爆炸能量输出的影响, 分别在 3 种不同  $\text{O}_2$  压力下对 4<sup>#</sup>温压炸药进行试验, 结果见表 4。

表 4 供氧量对能量输出的影响

Table 4 Effect of oxygen content on the energy output

composition	atmosphere pressure /MPa	shock wave energy /kJ	bubble energy /kJ	total energy /kJ · g <sup>-1</sup>	decay time constant $\theta/\mu\text{s}$
4 <sup>#</sup>	1.2	70.27	1916.54	10.01	23.3
4 <sup>#</sup>	2.7	93.53	2549.84	13.07	23.7
4 <sup>#</sup>	5.1	130.26	2755.59	14.44	27.6

在该系列试验中, 1.2 MPa 气氛压力下  $\text{O}_2$  含量不足, 2.7 MPa 和 5.1 MPa 气氛压力下  $\text{O}_2$  含量均过

量。表4数据表明,充足的氧气能够有效地提高冲击波能、气泡能和总能量。但在O<sub>2</sub>过量的情况下,比较2.7 MPa和5.1 MPa气氛压力下的试验数据发现,气泡能和总能量增大不明显,冲击波能却提高了40%,说明O<sub>2</sub>含量的增加提高了后燃反应的速度,缩短了反应时间,使更多能量传递给了冲击波波头,因此冲击波能增大更明显。衰减时间常数由23.7 μs增大到27.6 μs,表明O<sub>2</sub>浓度的增加促进了后燃反应的快速进行,有利于减缓冲击波的衰减。

## 5 结 论

通过4个系列的水下爆炸试验,考察了5种不同配方温压炸药的爆炸能量输出特性,分析比较了冲击波能、气泡能和总能量随气氛种类、温压炸药配方及气氛压力的变化情况,并与TNT进行了对比,得出以下结论:

(1) 冲击波能、气泡能和总能量均随着铝粉含量的增加先增大后减小,冲击波能在含铝量为40%时最大,气泡能在含铝量为50%时最大,总能量在含铝量为40%时最大;在2.7 MPa的O<sub>2</sub>气氛中,含铝量为40%的温压炸药的冲击波能、气泡能、总能量分别是TNT的3.32,1.51,1.76倍。

(2) 气氛中O<sub>2</sub>量增加,有利于后燃反应进行;O<sub>2</sub>含量越高,后燃反应越快,冲击波衰减越慢,冲击波能增加越大。

### 参考文献:

- [1] 李秀丽. 基于燃烧和爆炸效应的温压药剂相关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
LI Xiu-li. Study on correlative technique of thermobaric explosive based on combustion and explosion effect[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [2] Schaefer A R. Development and evaluation of new high blast

- explosives[C] // 36 th ernational Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2005.
- [3] 陈昊, 陶钢, 蒲元. 温压药在有限空间内爆炸冲击波的实验研究及数值模拟[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 41-45.  
CHEN Hao, TAO Gang, PU Yuan. Experiment study and numerical simulation of shock wave generated by thermobaric column exploding in limited space[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2009, 32(5): 41-45.
- [4] 姬建荣, 苏健军, 王胜强. 小型爆炸容器中TNT/Al炸药的后燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 46-49.  
JI Jian-rong, SU Jian-jun, WANG Sheng-qiang. After-burning performances of TNT/Al explosive in small explosion vessel[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(3): 46-49.
- [5] Davis R, Hall S D, Knowlton G D. Detonation calorimeter: application and operation for thermobaric explosive characterization and evaluation[C] // 40 th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2009.
- [6] 裴明敬, 胡华权, 张景森, 等. 含铝温压炸药及其爆炸效能研究[J]. 中国工程科学, 2008, 11(4): 67-75.  
PEI Ming-jing, HU Hua-quan, ZHANG Jing-sen, et al. Study on efficiency of aluminized thermobaric explosive[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2013, 36(2): 9-12.
- [7] 曹威, 何中其, 陈网桦, 等. 水下爆炸法测量含铝炸药后燃效应[J]. 含能材料, 2012, 20(2): 229-233.  
CAO Wei, HE Zhong-qi, CHEN Wang-hua, et al. Measurement of afterburning effect of aluminized explosives by underwater explosion method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(2): 229-233.
- [9] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosive expansion waves in underwater detonation[C] // Proceedings of the 6th International Symposium on Detonation. San Diego, California, 1976: 540-550.
- [10] 惠君明, 陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1988.  
HUI Jun-ming, CHEN Tian-yun. Explosives theory [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1988.
- [11] 金朋刚, 郭炜, 王建灵, 等. 密闭条件下TNT的爆炸压力特性[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 39-41.  
JIN Peng-gang, GUO Wei, WANG Jian-ling, et al. Explosion pressure characteristics of TNT under closed condition [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 36(3): 39-41.
- [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.  
SUN Ye-bin, HUI Jun-ming, CAO Xin-mao. Military mixed explosives[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995.

## Experimental Research on Energy Output of Thermobaric Explosive

LU Yong<sup>1</sup>, WANG Bo-liang<sup>1</sup>, HE Zhong-qi<sup>1</sup>, LI Xi<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Shanxi Huaihai Machinery and Electrical Co. Ltd., Changzhi 046012, China)

**Abstract:** To guide the formulation design of thermobaric explosive(TBE) and study the relationship between TBE energy output, TBE component and experimental atmosphere, the energy output characteristics of TBE were analyzed via the shock wave energy, bubble energy and total energy, using an underwater explosion test method. Results show that under the experimental conditions, the shock wave energy and total energy of TBE with the aluminum powder content of 40% are maximum, their values are 338.27, 2549.84 kJ, respectively. The bubble energy of TBE with the aluminum powder content of 50% is maximum, its value is 16.08 kJ · g<sup>-1</sup>. The oxygen content is an important factor affecting the energy output of TBE.

**Key words:** explosion mechanics; thermobaric explosive; underwater explosion; shock wave energy; bubble energy

**CLC number:** TJ55; O389; TD235.37 **Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.020