

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.01.005

# 工业炸药能量测试方法的分析<sup>\*</sup>

徐 森<sup>①</sup> 张兴明<sup>①</sup> 潘 峰<sup>①</sup> 张建新<sup>②</sup>

① 南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

② 国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了研究不同能量测试方法对工业炸药能量测试结果的影响,分别采用爆热、铅墙法和水下爆炸法测量了几种典型工业炸药样品的能量。结果表明:3 种测试方法都能用于评价炸药的能水平,其中爆热和 水下爆炸法能直接得到样品的能量值,水下爆炸法适用于大量样品 的能量测试要求。水下爆炸试验结果表明,参比 TNT 药柱的总能量为 3.410mJ/kg,粉状乳化炸药的总能量为 3.758mJ/kg,1 号和 2 号岩石乳化炸药的总能量分别为 3.411mJ/kg 和 3.182mJ/kg,二级和三级煤矿许用乳化炸药的总能量分别为 3.021mJ/kg 和 2.947mJ/kg,这 5 种工业炸药的 TNT 当量分别为 1.10、1.00、0.933、0.886 和 0.864。水下爆炸测得的 5 种工业炸药能量为爆热测量值的 76.1%~78.8%。

[关键词] 爆炸力学 水下爆炸 冲击波超压 气泡脉动

[分类号] TJ55 O382

## 引言

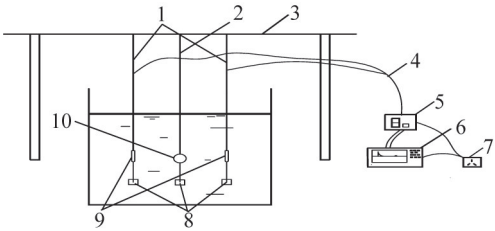
能量是衡量炸药作功能力的重要参数。军用炸药的能通常采用爆热来测量,国内工业炸药的作功能力通常采用铅墙法来测量。由于爆热和铅墙法试验药量较小,仅为几十克级(爆热药量通常为 20~50g,铅墙法为 10g),且铅墙法测量结果受铅墙制造工艺的影响较大,仅能得到能量的间接表征值(扩孔值)。随着工业炸药临界直径的增加,爆热和铅墙法已不能满足大临界直径工业炸药的能测试要求,国外研究机构普遍采用水下爆炸法来测量工业炸药的能,与铅墙法相比,水下爆炸具有试验药量大,试验条件稳定可控,结果重复性好等优点。水下爆炸法是通过测量炸药在水下爆炸时的冲击波参数和气泡脉动周期,根据水下爆炸的经典理论,计算得到炸药的冲击波能和气泡能<sup>[1-2]</sup>。由于冲击波能和气泡能的理论计算公式是基于无限水域导出的,而大量水下爆炸试验都是在有限水域中进行,导致边界效应对水下爆炸试验结果具有较大影响。确定合适的试验条件,对试验结果进行修正,使试验条件接近无限水域,是屏蔽边界效应的有效方法<sup>[3-4]</sup>,王建灵<sup>[5]</sup>等人研究了试样入水深度对水下爆炸结果的影响,确定了合适的试样入水深度;苏华<sup>[6]</sup>等人针对传感器几何尺寸的影响对冲击波能的计算方法进行了修正;饶国宁<sup>[7]</sup>等人对小水池中测量炸药的输出能受到的边界效应的影响进行了修正。本文

同时采用铅墙法、爆热和 水下爆炸法<sup>[8-9]</sup>研究了几种典型工业炸药的能水平,比较分析这 3 种测试方法试验结果,探讨工业炸药能评价方法的适用性。

## 1 试验

### 1.1 试验装置

爆炸水池的直径和深度都为 8m,池壁和底部由钢板焊接而成,并固定在钢筋混凝土底座上,压力传感器为 PCB W138A10。试验测试装置示意图见图 1。



1 - 安装传感器用钢丝绳;2 - 吊试样用钢丝绳;3 - 钢架;  
4 - 信号传输线;5 - 信号放大器;6 - 数据采集仪;7 - 电源;  
8 - 重锤;9 - 传感器;10 - 炸药试样;

图 1 水中爆炸测试示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of underwater explosion testing system

### 1.2 试验样品和试验条件

试验样品为不同配方的典型制式工业炸药,见表 1。将 2 只制式药卷(药卷规格:直径为 32mm,长度为 200mm,药量为 200g)对半切断后装入纸壳容

<sup>\*</sup> 收稿日期:2012-10-29

作者简介:徐森(1981~),男,博士。研究方向:爆炸品性能测试分析。E-mail:xusen\_345@sohu.com

器内,并用胶带进行固定和防水处理。

表 1 试验样品  
Tab. 1 Test samples

序号	样品名称	药量/g
1	三级煤矿许用乳化炸药	400
2	二级煤矿许用乳化炸药	400
3	2 号岩石乳化炸药	400
4	1 号岩石乳化炸药	400
5	粉状乳化炸药	400

选用压装 TNT 药柱作为水下爆炸试验的参比,药柱长径比 1 : 1,药量为 160g,压药密度为 1.56 g/cm<sup>3</sup>;爆热试验用的样品质量为 30g,爆热参比采用 TNT 理论爆热<sup>[10]</sup>,为 4.552 mJ/kg;铅墙试验的参比样品为粉状 TNT 压装而成的药柱,药量为 10g,压药密度为 1.0g/cm<sup>3</sup>。

水下爆炸试验的条件:爆炸深度为 0.5H(H 为水池深度),测量距爆心 3m 处的冲击波参数和气泡脉动周期,计算样品能量。所有试验均平行测定 2 次有效数据。

2 结果及讨论

水下爆炸试验中的典型冲击波超压和气泡脉动周期的测试曲线见图 2 和图 3,样品的试验结果见表 2,表 2 中所有试验结果均为 2 次有效试验的平均值。

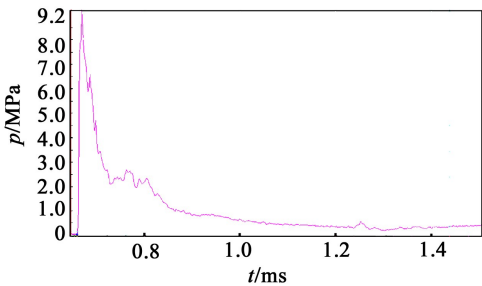


图 2 冲击波超压测试曲线

Fig. 2 Test curve of shockwave overpressure

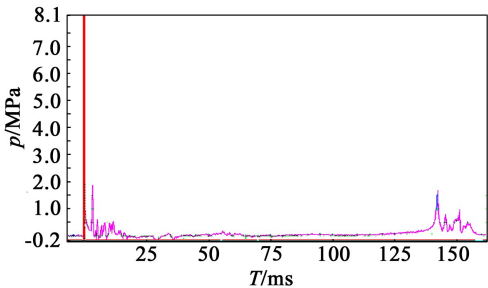


图 3 气泡脉动周期测试图谱

Fig. 3 Test curve of Bubble pulsating cycle

根据水下爆炸的冲击波能计算公式和样品冲击波超压衰减曲线,由表 2 的数据可知,5 种工业炸药的冲击波能都比 TNT 低。粉状乳化炸药的冲击波能和气泡能是 5 种工业炸药中最高的,其气泡能高于 TNT,达到 3.105mJ/kg,粉状乳化炸药的总能量为 3.758mJ/kg,TNT 总能量为 3.41mJ/kg,粉状乳化炸药的 TNT 当量达到 1.10;煤矿许用乳化炸药的总能量相对较低,其中三级和二级煤矿许用乳化炸药的总能量分别为 2.947mJ/kg 和 3.021mJ/kg;2 号和 1 号岩石乳化炸药的总能量分别为 3.182mJ/kg 和 3.411mJ/kg。在水下爆炸试验中,试验结果与样品药量密切相关(试验药量越大,能量测量值越高)。在本文的试验过程中,工业炸药的药量为 400g,而 TNT 药柱为 160g,会使工业炸药的 TNT 当量略高,但样品能量的变化趋势是一致的。

由表 2 中样品总能量与爆热的比值可知,TNT 药柱和试验样品水下爆炸测得的总能量约为爆热的 75% 左右,这主要是因为表 2 中的 TNT 爆热为理论爆热,而本文的压装 TNT 药柱密度为 1.56g/cm<sup>3</sup>,同时炸药在水下爆炸后,爆轰产物会压缩和加热周围介质(水),从而损耗部分能量,使测得的总能量低于爆热。

由表 2 的铅墙扩孔值可知,TNT 的扩孔为 290mL(WJ/T9030 给出的 TNT 标准扩孔范围:285 mL ± 10 mL),比粉状乳化炸药的扩孔值小

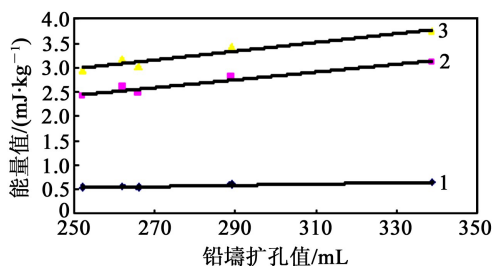
表 2 样品的试验结果

Tab. 2 An experimental summary for the five samples by different testing methods

序号	铅墙扩孔/ mL	爆热 $Q$ / (mJ · kg <sup>-1</sup> )	冲击波超压/ MPa	冲击波能 $E_s$ / (mJ · kg <sup>-1</sup> )	气泡周期/ ms	气泡能 $E_b$ / (mJ · kg <sup>-1</sup> )	总能量 $E$ / (mJ · kg <sup>-1</sup> )	$E/Q$	TNT 当量
1	252	3.822	8.96	0.540	184.96	2.407	2.947	0.771	0.864
2	266	3.885	9.49	0.540	184.29	2.481	3.021	0.778	0.886
3	262	4.080	10.16	0.575	190.41	2.607	3.182	0.780	0.933
4	289	4.483	8.93	0.613	188.93	2.798	3.411	0.761	1.000
5	339	4.767	8.87	0.653	197.96	3.105	3.758	0.788	1.100
TNT	290	4.552	7.13	0.802	137.62	2.608	3.410	0.749	1.000

14.45%,这是因为铅墙试验的 TNT 压装密度较低,仅为  $1.0 \text{ g/cm}^3$ ,而粉状乳化炸药的制式药卷密度约  $0.9 \text{ g/cm}^3$ ,而在进行铅墙试验时,需要将粉状乳化炸药密度压到  $1.0 \text{ g/cm}^3$ ,从而导致粉状乳化炸药的扩孔值比 TNT 大。

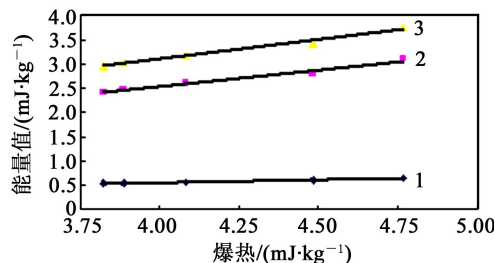
对表 2 中铅墙扩孔、爆热和水下爆炸试验的结果进行处理,结果分别见图 4 和图 5。



1 - 冲击波能;2 - 气泡能;3 - 总能量

图 4 水下爆炸与铅墙试验结果的关系

Fig. 4 The relationship between underwater explosion and lead blocks tests



1 - 冲击波能;2 - 气泡能;3 - 总能量

图 5 水下爆炸与爆热试验结果的关系

Fig. 5 The relationship between underwater explosion and explosion heat tests

由图 4 可知,随着样品铅墙扩孔值的增加,水下爆炸法测得的总能量也相应变大;由图 5 可知,随着样品爆热的增加,水下爆炸法测得的样品总能量也相应变大。结果表明,水下爆炸法与铅墙法和爆热的试验结果变化趋势基本一致,即这 3 种方法在工业炸药能量测试方面具有良好的一致性。

### 3 结论

1) 3 种能量测试方法都能用于评价工业炸药的能级水平,其中爆热和 underwater 爆炸法能直接得到样品的能量值;

2) 参比 TNT 药柱的总能量为  $3.41 \text{ MJ/kg}$ 。5 种工业炸药中,粉状乳化炸药的总能量最高,为  $3.758 \text{ MJ/kg}$ ,TNT 当量达到 1.10;1 号和 2 号岩石乳化炸药的 TNT 当量分别为 1.00 和 0.933;煤矿许用乳化炸药的能级最低,三级和二级煤矿许用乳化炸药的 TNT 当量分别为 0.864 和 0.886。

3) 水下爆炸测得的工业炸药总能量为爆热值的 76.1% ~ 78.8% ;

### 参 考 文 献

- [1] 牟金磊,朱锡,李海涛,等. 炸药水下爆炸能量输出特性试验研究[J]. 高压物理学报,2010,24(2):88-92. Mu Jinlei, Zhu Xi, Li Haitao, et al. Experimental research on underwater explosion energy output of explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010,24(2):88-92.
- [2] 李澎. 非理想炸药水下爆炸能量输出结构研究[D]. 北京:北京理工大学,2006. Li Peng. Study on energy output characteristic of non-ideal explosives[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2006.
- [3] 史锐,徐更光,刘德润,等. 炸药爆炸能量的水中测试与分析[J]. 火炸药学报,2008,31(4):1-5. Shi Rui, Xu Gengguang, LIU Derun, et al. Underwater test and analysis for explosion energy of explosives[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(4):1-5.
- [4] 李健,荣吉利,项大林. 装药量及水深对水下爆炸气泡动态特性的影响[J]. 爆炸与冲击,2010,30(4):342-348. Li Jian, Rong Jili, Xiang Dalin. Effects of charge mass and water depth on dynamic behaviors of an underwater explosion bubble [J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(4):342-348.
- [5] 王建灵,赵东奎,郭炜,等. 水下爆炸能量测试中炸药入水深度的确定[J]. 火炸药学报,2002,25(2):30-31,44. Wang Jianling, Zhao Dongkui, Guo Wei, et al. Determination of the reasonable depth of explosives in water to measure underwater explosive energy [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2002,25(2):30-31,44.
- [6] 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):46-48,52. Su Hua, Chen Wanghua, Wu Tao, et al. Amendment of shock wave parameters of underwater explosion [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2004,27(3):46-48,52.
- [7] 饶国宁,陈网桦,胡毅亭,等. 不同炸药水下能量输出特性的试验研究[J]. 爆破器材,2007,36(1):9-11. Rao Guoning, Chen Wanghua, Hu Yiting, et al. Experimental study on underwater energy output characteristics of different explosives [J]. Explosive Materials, 2007,36(1):9-11.
- [8] Cole R H. Underwater explosions[M]. US: Peinceton University Press, 1948.

- [9] 李澎,徐更光. 水下爆炸冲击波传播的近似计算[J]. 火炸药学报,2006,29(4):21-24.  
Li Peng, Xu Gengguang. Approximate Calculation of Underwater Explosion Shock Wave Propagation[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006,29(4):21-

24.

- [10] 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 Yebin, Hui Junming, Cao Xinmao. Military mixed explosive[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995.

## Analysis on the Energy Testing Methods of Industrial Explosives

XU Sen<sup>①</sup>, ZHANG Xingming<sup>①</sup>, PAN Feng<sup>①</sup>, ZHANG Jianxin<sup>②</sup>

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

②National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] The energies of five typical industrial explosives are measured by blasting heat device, lead blocks and underwater explosion test systems to study the differences brought by using different testing methods. The results show that all the three testing methods can be used to effectively evaluate the energy level of industrial explosives, energy values can be directly generated by detonation heat or underwater methods, and the underwater explosion method can meet with the requirement for a large load test. Underwater explosion test results show that the energy of reference TNT charge is 3.410 mJ/kg, while the energies of powdery emulsion explosive, 1<sup>#</sup> and 2<sup>#</sup> rock explosives, and level 2 and level 3 permissible explosives are 3.758 mJ/kg, 3.411mJ/kg, 3.182mJ/kg, 3.021mJ/kg and 2.947mJ/kg, respectively. The TNT equivalences of these five samples are 1.10, 1.00, 0.933, 0.886 and 0.864. The energy values of the samples measured by underwater explosion are 76.1%-78.8% of these by detonation heat.

[KEY WORDS] explosion mechanics, underwater explosion, shock overpressure, bubble pulsation

## 文 摘

### 1 从含有废发射药的灌注凝胶制备炸药

《爆破器材》2001,30(3),6~9(中文)

研究了从含有废发射药的灌注凝胶来制造炸药,其制法是将聚合物、交联剂和氧化剂溶液的混合物倒入发射药的空穴中。这种炸药具有高密度、高爆速和抗水性等特点。

### 2 炸药用氧化剂的生产

俄国专利 RU2149860,2000 年 5 月 27 日(俄文)

本发明有关于混合炸药的制备工艺,主要有关于矿用和建筑业用的简单炸药和含水炸药中的氧化剂。碱金属和(或)碱土金属硅酸铝用硝酸处理生成硝酸铝和游离硝酸,与  $\text{NH}_3$  反应得出  $\text{Al}(\text{OH})_3$  和含有  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、 $\text{KNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  的溶液。大多数  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (75%~95%) 被分离出来,剩余的 5%~25% 被用作炸药氧化剂的附加物。生成高效络合氧化剂适用于各种简单炸药和含水炸药的生产。用  $\text{Al}(\text{OH})_3$  改进的氧化剂会增加油的保留

能力和稠化能力,这会使生产的抗水炸药具有安定的爆炸特性。使用低价的原料、完善加工过程以及在生产含水炸药时消除了溶液的全部蒸发,保证氧化剂的成本降低了 20%~40%。

### 3 硝酸铵吸湿性的研究

《火炸药学报》2001,24(3),22~25(中文)

介绍了硝酸铵的吸湿机理、硝酸铵防吸湿的方法以及吸湿性鉴定和包覆效应。对防止硝酸铵吸湿的各种方法作了重点分析。

### 4 地下矿用新型粒状炸药

Gorn. Zh. (采矿杂志)2001,(7),8A~12A(俄文)

讨论了在应用地点就地生产粒状炸药,讨论是以不同类型粒状炸药的风动装药的安全性和经济效率为基础的,机械化的 A6 和 A3 粒状炸药就地生产的大规模工业试验表明这些炸药的粉尘发射强度和静电积累的可能性均低于 AC-8 粒状炸药,而且它们的成本降低了 40%~60%。

钟一鹏译自美国《化学文摘》

Vol. 135, No. 26(2001)