

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.06.006

# 水胶炸药不同交联时间水下爆炸能量的研究<sup>\*</sup>

张阳光<sup>①②</sup>  
①煤炭科学研究总院(北京,100013)  
②中煤科工集团淮北爆破技术研究院有限公司(安徽淮北,235000)

[摘 要] 为了研究化学发泡剂对水胶炸药水下爆炸能量的影响,制备了交联时间分别为0.5、1.0、3.0、24.0、72.0 h和168.0 h的水胶炸药;在相同的试验条件下,采用水下爆炸法分别测试不同交联时间下水胶炸药水下爆炸的比冲击波能、比气泡能以及总能量,并与2<sup>#</sup>岩石乳化炸药水下爆炸总能量进行对比。结果表明,化学发泡剂对水胶炸药水下爆炸能量有较大的影响,在一定的交联时间范围内,随着交联时间的延长,水胶炸药的水下爆炸能量持续增加,当交联时间为72.0 h左右时,水胶炸药的水下爆炸能量达到最大;此后,若再延长交联时间,水胶炸药的水下爆炸能量呈下降趋势。交联时间为1.0 h时,水胶炸药的水下爆炸总能量与2<sup>#</sup>岩石乳化炸药的水下爆炸总能量相当。

[关键词] 水胶炸药;水下爆炸;交联时间;冲击波能;气泡能

[分类号] TD235.2<sup>+</sup>1; TQ560.7

## Research on Underwater Explosion Energy of Water Gel Explosive under Different Duration of Crosslinking

ZHANG Yangguang<sup>①②</sup>  
① China Coal Research Institute (Beijing, 100013)  
② Huaibei Blasting Technology Research Institute Co., Ltd., CCTEC (Anhui Huaibei, 235000)

[ABSTRACT] Water gel explosives were prepared at various crosslinking time of 0.5, 1.0, 3.0, 24.0, 72.0 h and 168.0 h to study the influence of chemical foaming agent on its underwater explosion energy. Their shock wave energy, bubble energy, as well as the total energy were tested under the same experimental conditions. The total underwater explosion energy was compared to that of 2<sup>#</sup> rock emulsion explosive. Results show that chemical foaming agent has a great influence on underwater explosion energy of water gel explosive. The underwater explosion energy of water gel explosive increases with the extension of crosslinking time, reaches to the maximum value at about 72.0 h, and then declines. At the crosslinking time of 1.0 h, the underwater explosion energy of water gel explosive is equivalent to that of 2<sup>#</sup> rock emulsion explosive.

[KEYWORDS] water gel explosive; underwater explosion; crosslinking time; shock wave energy; bubbles energy

## 引言

水胶炸药是一种以胶凝剂稠化的无机氧化性盐类水溶液为连续相,以燃料及敏化剂(水溶性较好的硝酸一甲胺)为分散相,通过交联剂形成网状结构的凝胶炸药。能量是衡量炸药做功能力的重要参数,在水胶炸药的制备过程中加入发泡剂,可以调节水胶炸药的密度及爆轰感度,从而改善水胶炸药的

爆炸能量。

一般情况下,军用炸药能量的大小用爆热值的大小来表示,工业炸药的做功能力用铅墙扩充值的大小来表示。不管采用爆热还是铅墙法来衡量炸药的能量或者做功能力都不准确,因为这两种方法在试验过程中所需要的药量较小。而且用铅墙法试验得到的结果并不能直接反映炸药的能量,它是用铅墙的孔径扩充值来间接地表征炸药的能量;此外,试验获得的铅墙扩充值大小会受到铅墙制造工艺的影

<sup>\*</sup> 收稿日期:2020-04-26  
第一作者:张阳光(1992-),男,硕士研究生,主要从事爆炸安全技术研究。E-mail:1241516310@qq.com

响,试验结果的准确性较差。随着工业炸药的快速发展,炸药能够达到稳定爆轰的最小直径大大降低,采用爆热和铅墙法来测量炸药能量的大小已经不能够满足较高精度的要求,故较发达国家的科研机构为了获得较高精度的炸药能量而采用水下爆炸法。

水下爆炸法与爆热和铅墙法相比具有很多优势,比如试验药量大、结果重复性好等<sup>[1]</sup>。牟金磊等<sup>[2]</sup>进行了 TNT 炸药的水下爆炸试验,研究了水下冲击波能随水下冲击波传播距离变化的衰减规律。周霖等<sup>[3]</sup>研究了不同类型军用水下武器所使用的炸药在水下爆炸时的能量输出特性,给出了提高炸药水下爆炸能量的方法,并建立了炸药水中爆炸冲击波能、气泡能、冲击波超压的计算方法。汪泉等<sup>[4]</sup>采用水下爆炸法测试了既定配方的乳化炸药的水下爆炸参数,并将它的水下爆炸参数与粉状 TNT 炸药、煤矿许用炸药的水下爆炸参数进行对比。目前,关于水胶炸药水下爆炸能量的研究报道较少。

本文中,通过水下爆炸测试系统,测量水胶炸药在不同交联时间下水下爆炸的比冲击波能、比气泡能和总能量,并将不同交联时间下的水胶炸药水下爆炸总能量与 2# 岩石乳化炸药的水下爆炸总能量对比。通过控制交联时间来控制水胶炸药水下爆炸的总能量,提高水胶炸药的威力,为现场混装水胶炸药的应用提供参考。

# 1 试验

## 1.1 水下爆炸参数计算原理

球形装药在水下爆轰时,炸药能量转变成爆轰产物的内能,并以极大的速度向外压缩水介质,从而形成了冲击波,此过程消耗了一部分能量;爆轰产物利用剩下的一部分能量以气泡的形式向外膨胀,气泡内部的压力与周围静水压此消彼长,不断地产生气泡脉动。水下爆炸能量可由比冲击波能、比气泡能和总能量等确定<sup>[5]</sup>。

水下爆炸总能量公式<sup>[6]</sup>

$$E_t = K_f(\mu E_s + E_b); \tag{1}$$

$$\mu = 1 + 1.332\,8 \times 10^{-2} p_{C-J} - 6.577\,5 \times 10^{-5} p_{C-J}^2 + 1.259\,5 \times 10^{-7} p_{C-J}^3; \tag{2}$$

$$p_{C-J} = \frac{1}{4} \rho_0 D^2. \tag{3}$$

式中: $E_t$  为炸药水下爆炸总能量, kJ/kg;  $K_f$  为相应装药形状的校正因子,取 1;  $\mu$  为冲击波损失系数;  $E_s$  为测点处的比冲击波能, mJ/kg;  $E_b$  为测点处的比气泡能, mJ/kg;  $\rho_0$  为炸药密度, kg/m<sup>3</sup>;  $D$  为炸药爆速,

m/s。

## 1.2 样品和仪器

试验所用的水胶炸药的配方如表 1 所示。田菁粉与化学发泡剂为外加比例。乳化炸药采用淮南舜泰化工有限责任公司生产的 2# 岩石乳化炸药。

表 1 水胶炸药的配方(质量分数)

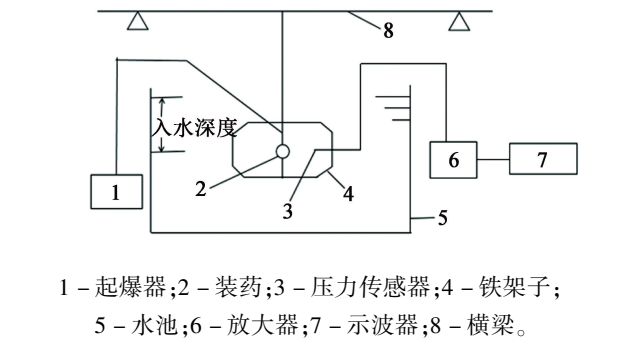
Tab. 1 Formula of water gel explosive (mass fraction) %

AN	MMAN	氯化铵	氯化钾	H <sub>2</sub> O
40.0	33.0	4.0	2.0	8.0
硝酸钠	田菁粉	化学发泡剂(亚硝酸钠 + 交联剂)		
13.0	0.9	0.4		

试验仪器包括压电压力传感器、放大器、示波器和电缆线等,其中,传感器为北京理工大学研制的 HZP2 型笔杆形自由场压电压力传感器。受测药包是一个质量为 15 g 的水胶炸药球形药包,在制作好的球形药包上插入一发 8# 工业雷管,插入深度约 15 mm。爆炸水池深 3.6 m、宽 5.5 m、壁厚 8 mm。

## 1.3 测试系统

水下爆炸能量测试系统的试验装置如图 1 所示。整个测试系统包括测量系统、爆炸水池和受测药包 3 部分<sup>[7]</sup>。试验时,通过水池上方横梁上的传动装置,把固定好药包和传感器的铁架子移动到水池中央,并缓缓下落至水深 2/3 处,即距离池底约 2.4 m 处,这样可以消除水池边界效应以及水池底部的影响<sup>[8-10]</sup>。使用起爆器起爆球形药包上的 8# 工业雷管,由雷管释放的能量引爆球形药包,球形药包爆炸后释放的能量会引起静水压力的变化,此时固定在铁架子上的压电压力传感器会捕捉到压力信号,并把压力信号通过放大器传递给示波器。经放大器放大之后的压力信号被示波器接收后由显示屏显示出来,显示屏上压力信号的大小便可表示水胶炸药水下爆炸能量的高低。需要注意的是,在固定球形药包和压力传感器的时候,要用钢尺测量其与



1 - 起爆器; 2 - 装药; 3 - 压力传感器; 4 - 铁架子; 5 - 水池; 6 - 放大器; 7 - 示波器; 8 - 横梁。  
图 1 水下爆炸能量测试系统  
Fig. 1 Underwater explosion energy test system

铁架子底部的距离,确保球形药包中心和压力传感器在同一水平高度上,且水平距离为 0.5 m。

2 试验结果与分析

2.1 爆速

不同交联时间下水胶炸药的爆速试验均进行 3 次,取 3 次试验结果的平均值表示此交联时间下水胶炸药的爆速,如表 2 所示。

由表 2 可以看出,水胶炸药的爆速随交联时间的增加呈先增加、后减小的趋势。当交联时间为 1.0 h 时,水胶炸药的爆速达到最大,为 4 688 m/s,与 2<sup>#</sup>岩石乳化炸药的爆速相当。

2.2 冲击波峰值压力

不同交联时间下水胶炸药的水下爆炸试验均进行 3 次,取 3 次试验结果的平均值表示此交联时间下水胶炸药的水下爆炸参数。表 3 为不同交联时间下水胶炸药水下爆炸产生的冲击波峰值压力大小。

由表 3 可以看出,水胶炸药水下爆炸的冲击波峰值压力随交联时间的增加呈先增加、后减小的趋势。当交联时间为 72.0 h 时,水胶炸药水下爆炸的冲击波峰值压力达到最大,为 29.38 MPa,与 2<sup>#</sup>岩石

乳化炸药的水下爆炸冲击波峰值压力相同。

2.3 水下爆炸能量

不同交联时间下水胶炸药的水下爆炸试验均进行 3 次,取 3 次试验结果的平均值表示此交联时间下水胶炸药水下爆炸的参数。将试验获得的数据代入公式,便可得到不同交联时间下水胶炸药的水下爆炸能量参数。表 4 为药包中心距离压电压力传感器距离为 0.5 m 时,不同交联时间下水胶炸药的水下爆炸能量参数。表 4 中, $V_m$  表示放大器输出端电压峰值; $p_m$  表示水下爆炸冲击波峰值压力; $t_b$  表示气泡脉动周期。

药包中心距离压电压力传感器为 0.5 m 时,水胶炸药水下爆炸能量参数随交联时间的变化趋势如图 2 所示。

由图 2 可以看出, $E_s$ 、 $E_b$  和  $E_t$  随着交联时间延长整体呈现出先增加、后减小的趋势。交联时间为 0.5 h 到 24.0 h, $E_s$  呈线性增长,增长速度较快;交联时间从 24.0 h 到 72.0 h, $E_s$  虽然随着交联时间的增加持续增大,但增长速度较慢;交联时间为 72.0 h 时, $E_s$  达到最大 1.97 mJ/kg;超过 72.0 h, $E_s$  随着交联时间的增加而迅速减小。 $E_b$  在交联时间为 0.5 ~ 3.0 h 时,随着交联时间的延长迅速增加;从 3.0 h

表 2 不同交联时间下水胶炸药的爆速

Tab.2 Detonation velocity of water gel explosive with different crosslinking times							m/s
爆炸参数	水胶炸药						2 <sup>#</sup> 岩石乳化炸药
	0.5 h	1.0 h	3.0 h	24.0 h	72.0 h	168.0 h	
爆速	4 196	4 688	4 438	4 348	3 896	3 636	4 651

表 3 不同交联时间下水胶炸药水下爆炸的冲击波峰值压力

Tab.3 Peak pressure of shock wave in underwater explosion of water gel explosive with different crosslinking times							MPa
爆炸参数	水胶炸药						2 <sup>#</sup> 岩石乳化炸药
	0.5 h	1.0 h	3.0 h	24.0 h	72.0 h	168.0 h	
冲击波峰值压力	23.11	24.76	26.30	26.38	29.38	14.94	29.38

表 4 不同交联时间下水下爆炸测试数据

Tab.4 Test data of underwater explosion with different crosslinking times									
炸药	药量/ g	距离/ m	$V_m$ / mV	$p_m$ / MPa	$t_b$ / ms	$E_s$ / (mJ · kg <sup>-1</sup> )	$E_b$ / (mJ · kg <sup>-1</sup> )	$E_t$ / (mJ · kg <sup>-1</sup> )	
水 胶 炸 药	0.5 h	15	0.5	2 140	23.11	53.87	1.31	6.13	8.30
	1.0 h	15	0.5	2 280	24.76	54.04	1.52	6.56	8.94
	3.0 h	15	0.5	2 435	26.30	55.32	1.69	7.08	9.83
	24.0 h	15	0.5	2 415	26.38	55.06	1.91	7.34	10.47
	72.0 h	15	0.5	2 720	29.38	56.73	1.97	7.56	10.53
	168.0 h	15	0.5	1 800	14.94	55.40	1.60	7.40	9.72
2 <sup>#</sup> 岩石乳化炸药	15	0.5	2 720	29.38	58.39	1.64	6.08	9.14	

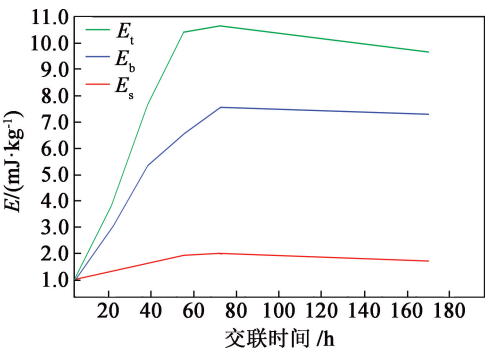


图2 水胶炸药水下爆炸能量参数随交联时间的变化趋势

Fig. 2 Variation trend of underwater explosion energy parameters of water gel explosive with crosslinking time

延长至 72.0 h 时,  $E_b$  继续增大, 但增加的速率减小; 交联时间为 72.0 h 时,  $E_b$  也达到最大 7.56 mJ/kg; 交联时间超过 72.0 h,  $E_b$  也随着交联时间的增加而减小, 但减小的速率较  $E_s$  小。  $E_t$  在交联时间从 0.5 h 增加到 24.0 h 时迅速增大; 至 10.47 mJ/kg 之后便增加缓慢; 交联时间到 72.0 h 时,  $E_t$  到达最大值 10.53 mJ/kg; 超过 72.0 h 后,  $E_t$  开始下降。

2#岩石乳化炸药的水下爆炸  $E_t$  为 9.14 mJ/kg, 与交联时间 1.0 h 时的水胶炸药水下爆炸能量相当。但随着交联时间的延长, 水胶炸药的水下爆炸  $E_t$  均比 2#岩石乳化炸药高。

2.4 结果分析

当交联时间在 0.5 ~ 72.0 h 时, 水胶炸药的  $E_s$ 、 $E_b$  和  $E_t$  等水下爆炸能量参数随着交联时间的增加而增加。原因在于, 水胶炸药交联时间较短, 内部产生的气泡就相对较少, 利于提高水胶炸药爆轰感度的有效热点就更少了。但随着交联时间的增加, 水胶炸药内部气泡的数量随之增加, 产生的有效热点增多, 有利于水胶炸药的爆轰。当交联时间为 72.0 h 时, 水胶炸药的水下爆炸能量达到最大。

水胶炸药的交联时间在 72.0 ~ 168.0 h, 其水下爆炸能量呈现出下降的趋势。原因在于, 水胶炸药的黏度较低, 内部的微小气泡会逐渐增大或聚集增大而成为无效热点, 导致有效热点的数量降低, 影响水胶炸药的爆轰效果。所以导致水胶炸药的水下爆炸能量降低。

3 结论

1) 化学发泡剂作为密度调节剂对水胶炸药的水下爆炸能量具有很大的影响。交联时间为 0.5 ~

72.0 h 时, 水胶炸药的水下爆炸总能量会随着交联时间的延长而持续增大; 当交联时间为 72.0 h 时, 水下爆炸总能量达到最大; 之后, 水胶炸药水下爆炸总能量随交联时间的增加呈下降趋势。在交联时间较长的情况下, 水胶炸药的水下爆炸总能量比 2#岩石乳化炸药的水下爆炸总能量高。

2) 交联时间为 1.0 h 时, 水胶炸药的爆速值达到最大 4 688 m/s, 与 2#岩石乳化炸药的爆速值相当。交联时间为 168.0 h 时, 水胶炸药的爆速依然可以维持在 3 600 m/s 以上。

3) 对于化学发泡型水胶炸药, 仅仅进行了交联时间在 168.0 h 以内的爆速和水下爆炸能量试验。今后需对化学发泡型水胶炸药储存更长时间以后的爆炸性能进一步测试。

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] 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 J L, ZHU X, LI H T, et al. Experimental research on underwater explosion energy output of explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(2): 88-92.

[3] 周霖, 徐少辉, 徐更光. 炸药水下爆炸能量输出特性研究[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 235-238.  
ZHOU L, XU S H, XU G G. Research on energy output characteristics for underwater explosion of explosive [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2): 235-238.

[4] 汪泉, 徐定博, 张显丕. 乳化炸药水下爆炸能量输出特性的实验研究[J]. 山东工业技术, 2016(23): 297-298.

[5] 龚悦, 汪旭光, 何杰, 等. 玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量的影响研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(5): 443-447.  
GONG Y, WANG X G, HE J, et al. Influence of glass microspheres content on underwater explosion energy of emulsion explosives [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(5): 443-447.

[6] 张立. 爆破器材性能与爆炸效应测试[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006: 259-266.

[7] 张虎, 谢兴华, 郭子如, 等. 铝粉含量对乳化炸药性能



- YU C, LI M, LI Q, et al. Mechanical property of novel energetic material TKX-50[J]. Chemistry & Bioengineering, 2019, 36 (8): 49-53.
  - [5] 葛忠学, 毕富强. 高能不敏感含能材料:HATO[J]. 含能材料, 2014, 22(4): 434-435.  
GE Z X, BI F Q. High-energy insensitive energetic materials:HATO [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22 (4): 434-435.
  - [6] 许诚, 张敏, 赵娟, 等. 重结晶工艺对 1,1'-二羟基-5,5'-联四唑二羟胺盐热性能和机械感度的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(5): 409-412.  
XU C, ZHANG M, ZHAO J, et al. Influence of recrystallization process on the thermal properties and mechanical sensitivity of dihydroxylam-monium 5, 5'-bistetrazole-1,1'-diolate (HATO) [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25 (5): 409-412.
  - [7] 彭泓静, 黄开书, 万力伦, 等. 高氮含能化合物 TKX-50 侵入安全性试验研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(12): 89-96.  
PENG H J, HUANG K S, WAN L L, et al. Experiment research on security of TKX-50 energetic compound high content nitrogen during penetration [J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37 (12): 89-96.
  - [8] 郝彩丽, 赵子祯, 曹端林, 等. TKX-50 的合成工艺研究[J]. 山西化工, 2016, 36(2): 25-28.  
HAO C L, ZHAO Z Z, CAO D L, et al. Synthesis techniques research of TKX-50 [J]. Shanxi Chemical Industry, 2016, 36 (2): 25-28.
  - [9] 梁华琼, 韩超, 雍炼, 等. 高聚物黏结炸药的压制成型性[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 44-48.  
LIANG H Q, HAN C, YONG L, et al. Pressing mechanism of polymer-bonded explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(4): 44-48.
  - [10] 罗运军, 葛震. 含能黏合剂合成研究新进展[J]. 火炸药学报, 2011, 34(2): 1-5.  
LUO Y J, GE Z. New research progress in the synthesis of energetic binders [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34 (2): 1-5.
  - [11] 毕家林, 王士民, 韩春, 等. 氟橡胶的并用改性研究进展[J]. 弹性体, 2014, 24(5): 81-84.  
BI J L, WANG S M, HAN C, et al. Research on blending modification of fluoroelastomers [J]. China Elastomerics, 2014, 24 (5): 81-84.