

文章编号: 1001-1455(2009)05-0481-05

用水下卡片间隙试验法测定炸药冲击波感度*

王慧君, 陈网桦, 何中其, 胡毅亭, 许海欧, 彭金华, 刘荣海

(南京理工大学安全工程系, 江苏 南京 210094)

摘要: 将炸药的水下爆炸能量测试方法与冲击波感度测试方法(小隔板法)相结合, 研究了一种测试炸药冲击波感度的方法——水下卡片间隙试验法, 并用该方法得到了 6 种炸药冲击波感度的相对排序(从高到低): 炸药泰安、黑索金、8701、钝化黑索金、梯恩梯、膨化硝酸铵的冲击波感度依次降低, 该试验结果与文献值、传统隔板试验结果一致, 表明水下卡片间隙试验法的测试结果是可信的, 水下卡片间隙试验法用于测定炸药冲击波感度是可行的, 在一定程度上可代替传统的隔板试验法, 此方法还可用于研究炸药装药密度对其冲击波感度的影响。

关键词: 爆炸力学; 冲击波感度; 水下爆炸; 炸药; 卡片间隙试验

中图分类号: O381; TQ560.72

国标学科代码: 130·3510

文献标志码: A

1 引言

冲击波可以在固、液、气体介质中传播。当炸药被封闭于弹药壳体或其他容器中, 或者被水、空气隔开时, 受到相邻炸药爆炸冲击波作用的时候是否会发生殉爆、传爆, 取决于该炸药的冲击波感度。因此对这一性能参数的研究在炸药生产、储运、使用等过程的安全性具有重要意义。

传统测定炸药冲击波感度的隔板试验法, 一般都以空气介质为测试环境。由于其炸药试样量大、爆炸噪声高、安全性差, 测试时存在诸多不便。而本文的水下卡片间隙试验法, 不仅可以很好地克服传统隔板试验法的缺点, 还可以方便地获得炸药的水下冲击波能和气泡能等爆炸能量特性方面的信息。

针对将水下爆炸方法用于测试炸药冲击波感度的研究很少, 其中较多的是仅提出一个构想, 或只从理论上进行了分析^[1-2], 唯一可获取的测试数据因为所用药量少(0.3 g)、易受外界因素的影响, 而使测试的规律性不理想^[3]。因此, 本文中展开的工作可在一定程度上弥补此方面的不足。

2 炸药水下爆炸试验

2.1 试样

选用试样: 单质炸药为梯恩梯(TNT)、泰安(PETN)、黑索金(RDX), 混合炸药为钝化黑索金(钝化 RDX)、8701, 工业炸药为膨化硝酸铵。形态均为粉状。

试验装置在小型间隙卡片试验法^[3]的基础上稍加以改动, 如图 1 所示, 所选用雷管为 8 瞬发纸壳雷管, 为防止铜壳雷管爆炸产生的碎片影响传感器的测试, 采用将纸壳雷管装入聚乙烯筒的方法进行试验, 聚乙烯为可燃物质, 在高温高压下不容易产生碎片, 试样量为 5.00 g, 装入容器(聚乙烯筒)后人工加压以达到接近生产、储运中的散装密度。

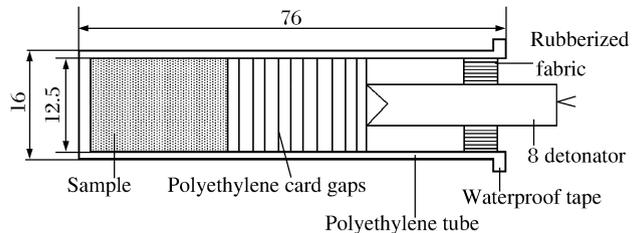


图 1 水下卡片间隙试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an underwater card gap test arrangement

* 收稿日期: 2008-06-17; 修回日期: 2008-08-04
作者简介: 王慧君(1983—), 女, 硕士研究生。

2.2 设备与装置

测试用圆柱形水池尺寸为 $\varnothing 3.0\text{ m}\times 2.7\text{ m}$,壁厚 0.01 m ,固定在减震设施上。测试仪器主要有:美国 PCB 公司生产的 138M124 型压电式电气石水下传感器、美国 PCB 公司生产的 482A416 型信号调理器、四川纵横公司生产的 JV5200 数据采集仪。

由于当装药深度为水池总深度的 $2/3$ 时,来自水面和池底的边界效应可相互抵消,因此试验中将试样放入水下 $1.67\sim 1.72\text{ m}$ 。传感器测点距爆源 0.7 m ,两者处于同一水平面,此时可认为水面和水底对冲击波能的测试结果无影响^[4]。为保证测试精度和重现性,被测药包和传感器均固定在刚性支架上。

3 试验数据的计算与分析

3.1 爆炸能量的计算

试验测得冲击波能 E_s 、气泡脉动能量 E_b 、总能量 E_t 分别按以下修正方法^[5-6]进行计算

$$E_s = K_e \frac{4\pi R^2}{\rho_w c_w} \int_0^\tau p^2(t) dt, \quad E_b = \frac{1}{8C^3 K_1^3} [\sqrt{1+4CT_b} - 1]^3, \quad E_t = K_t (\mu E_s + E_b)$$

式中: K_e 为冲击波能修正系数; R 为爆炸中心至测点的距离,m; ρ_w 为水的密度,取 $1\,000\text{ kg/m}^3$; c_w 为水中音速,取 $1\,500\text{ m/s}$; p 为测点处冲击波瞬时压力,Pa;积分上限 τ ,取 6.7θ , θ 为指数衰减时间常数; C 、 K_1 为与给定水池、给定装药位置有关的常数; T_b 修正为标准大气压下的气泡第一次脉动周期,s; K_t 为装药修正系数; μ 为冲击波衰减系数。

3.2 50%爆轰率时卡片间隙厚度的测定与计算

本试验参照升降法^[3,7]进行设计和数据处理,以求得50%爆轰率时的卡片间隙厚度值 G_{50} 。在进行卡片间隙试验前,先测试每种炸药在无卡片间隙(简称空白试验)条件下水中爆炸所释放的能量值 E (包括冲击波能、气泡能及总能量),然后取其50%作为判断卡片间隙试验中被测炸药爆轰与否的临界值。即:若被测炸药能量释放值超过空白试验能量值 E 的50%,则判定被测炸药被雷管引爆(得“+”结果),反之则未被引爆(得“-”结果)。完成有效试验后,计算被测试样50%爆轰率水平下的卡片间隙厚度值及其标准差。

4 试验结果与分析

4.1 6种炸药的水下爆炸能量

6种被测炸药空白试验的具体条件与试验结果见表1,表中 l_e 为装药长度, r_e 为装药长径比, ρ_e 为装药密度, E_s 为冲击波能、 E_b 为气泡能、 E_t 为总能量, e_s 为比冲能、 e_b 为比气泡能、 e_t 为总比能,均已减去雷管的相应能量值,且均为3次试验平均值(下同)。由于炸药的水下爆炸能量释放值通常很接近炸药的爆热值^[8],故在表2中列出各种炸药的爆热文献值用于对比、分析,表中 ρ_e 为装药密度, e_s 为比冲能, e_b 为比气泡能, Q 为爆热。

对比表1和表2中数据可发现,试验测得的TNT总能量明显较文献值小。根据文献^[13],该密度下的TNT的临界直径小于 12.5 mm ,即小于在本文试验装药条件下聚乙烯筒的内径,因此可排除熄爆的可能性。再考虑TNT与其他几种炸药性能的异同,发现只有TNT是严重负氧炸药。由于装药密度对负氧平衡炸药的影响较显著,而对正氧平衡和接近零氧平衡炸药的影响甚微^[13]。因此可认为,由于TNT是一种严重负氧炸药,装药密度对其能量释放的影响较显著,表现为密度越小,爆热值越小。为了进一步证实此点,笔者对不同装药密度下的TNT进行了测试分析,结果见表3。表3中的数据能够很充分地支持以上观点。

再对比表2与表1、表3中数据可发现,试验测得的炸药能量释放值均稍大于文献值。对于TNT和PETN,试验测得的冲击波能稍偏小,而气泡能偏大。由于雷管和被测试样是装于聚乙烯筒内,雷管引爆试样后,冲击波破坏外筒势必消耗了一定的能量,而后才被传感器检测到,导致了冲击波能偏小。而聚乙烯筒本身不是惰性材料,在高温高压下可能参与了反应,生成气体产物、放出热量,这解释了气泡

能偏大的现象。2 种能量加和后,总能量略大于爆热文献值。此推断还需进一步验证。但由于全部试验均需聚乙烯容器装药,因此采用的测试手段和修正方法是可靠的。另外,聚乙烯筒容积约 10 ml,以 5 g 装药计算,装填密度约 0.50 g/cm³,可忽略样品容器内的氧对爆热的贡献。

表 1 6 种炸药水下爆炸释放的能量

Table 1 Underwater explosion energy of six explosives

炸药名称	l_c/cm	r_c	$\rho_c/(g/cm^3)$	E_s/kJ	$e_s/(kJ/g)$	E_b/kJ	$e_b/(kJ/g)$	E_t/kJ	$e_t/(kJ/g)$
TNT	4.3	3.44	0.862	1.836	0.367	9.327	1.865	12.266	2.453
PENT	4.1	3.28	0.943	6.021	1.204	25.352	5.070	37.066	7.413
RDX	3.8	3.04	1.020	5.027	1.005	21.159	4.232	31.131	6.226
钝化 RDX	4.3	3.44	0.862	5.257	1.051	20.115	4.023	29.661	5.932
8701	4.2	3.36	0.909	5.197	1.039	22.167	4.433	31.948	6.389
膨化硝酸铵	5.2	4.16	0.725	3.839	0.768	17.034	3.407	23.349	4.670

表 2 6 种炸药爆热文献值

Table 2 Explosion heat of six explosives from references

炸药名称	$\rho_c/(g/cm^3)$	$e_s/(kJ/g)$	$e_b/(kJ/g)$	$Q/(kJ/g)$	出处
TNT	1.58	1.04	2.06	4.27	文献[9]
PETN	1.00	1.44	3.00	5.73	文献[9]
RDX				6.025	文献[10]
钝化 RDX				4.504	文献[11]
8701				5.104	文献[11]
膨化硝酸铵	0.787			4.607	文献[12]

表 3 不同装药密度的 TNT 炸药水下爆炸释放的能量

Table 3 Underwater explosion energy of TNT explosives with different densities

l_c/cm	r_c	$\rho_c/(g/cm^3)$	E_s/kJ	$e_s/(kJ/g)$	E_b/kJ	$e_b/(kJ/g)$	E_t/kJ	$e_t/(kJ/g)$
4.3	3.44	0.862	1.836	0.367	9.327	1.865	12.266	2.453
4.1	3.28	0.943	2.694	0.539	13.977	2.795	18.777	3.755
3.8	3.04	1.020	2.748	0.550	14.245	2.849	19.314	3.863
3.0	2.40	1.220	3.264	0.653	15.322	3.064	21.793	4.359

4.2 卡片间隙试验

6 种炸药的卡片间隙试验结果见表 4,表中 ρ_c 为装药密度, G_{50} 为间隙厚度, d 为步长, S 为标准差。在进行 PETN 的卡片间隙试验时,当间隙厚度为 16.80 mm 时, PETN 仍然被雷管引爆,若再增加卡片将无法放入聚乙烯筒内,故 PETN 的试验结果表示为大于 16.80 mm。

可见,在装药密度相差不大的情况下,6 种炸药的卡片间隙厚度 G_{50} 排序为:

$$G_{50}(\text{PETN}) > G_{50}(\text{RDX}) > G_{50}(8701) > G_{50}(\text{钝化 RDX}) > G_{50}(\text{TNT}) > G_{50}(\text{膨化硝酸铵})$$

故试验所得炸药 ETN、RDX、8701、钝化 RDX、TNT、膨化硝酸铵的冲击波感度依次降低。

小隔板试验^[10]中,装药密度为 1.757 g/cm³ 的 PETN 的 $G_{50} = 5.21$ mm,装药密度为 1.752 g/cm³ 的 RDX 的 $G_{50} = 0.36$ mm,装药密度为 1.00 g/cm³ 的 RDX 的 $G_{50} = 7.82$ mm,装药密度为 0.77 g/cm³ 的 TNT 的 $G_{50} = 4.11$ mm。根据密度越大、冲击波感度越小,隔板厚度越小的观点,可得炸药 PETN、RDX、TNT 的冲击波感度^[10]依次降低,试验所得结果与此相符。

表 4 6 种炸药水下卡片间隙试验结果

Table 4 Card gap test results of six explosives by the underwater explosion method

炸药名称	$\rho_c/(g/cm^3)$	G_{50}/mm	d/mm	S
膨化硝酸铵	0.725	5.75	0.50	0.226
TNT	0.862	6.90	0.60	0.271
钝化 RDX	0.862	7.30	0.50	0.582
8701	0.909	11.65	0.50	1.773
RDX	1.020	12.42	0.50	0.473
PETN	0.943	>16.80		

再分析炸药 RDX、8701、钝化 RDX 的冲击波感度依次降低的试验结果。由于 8701 和钝化 RDX 中都含有 95% 的 RDX, 8701 中还含有 3% 的活性增塑剂和 2% 的粘结剂, 钝化 RDX 中含有 5% 的钝感剂, 因此, 炸药 RDX8701、钝化 RDX 的冲击波感度依次降低的排序是合理的。

另外, 依据 GJB772A-97^[7] 进行的隔板试验也取得了相同的排序结果, 即炸药 PETN、RDX、8701、钝化 RDX、TNT、膨化硝酸铵的冲击波感度依次降低, 具体数据见表 5。

表 5 6 种炸药的 GJB 隔板试验的测试结果

Table 5 Results of six explosives by gap test of GJB

炸药名称	$\rho_e / (\text{g}/\text{cm}^3)$	G_{50} / mm	炸药名称	$\rho_e / (\text{g}/\text{cm}^3)$	G_{50} / mm
PETN	0.868	95.20	钝化 RDX	0.965	58.80
RDX	1.075	83.80	TNT	1.010	57.56
8701	0.952	67.60	膨化硝酸铵	0.767	51.90

综上所述, 采用水下卡片间隙试验法得出炸药 PETN、RDX、8701、钝化 RDX、TNT、膨化硝酸铵的冲击波感度依次降低, 这一排序结果是可靠、有效的, 说明了水下卡片间隙试验法一定程度上可代替传统隔板试验方法。

另外, 从表 4 中的标准差各值可发现, 8701 的试验标准差偏大, 可能是由于在进行有效实验时, 其爆炸释放的能量较接近 50% E , 爆轰与否的区别较小所引起的。可适当增大步长以解决此问题。

4.3 装药密度对炸药冲击波感度的影响

本文中尝试利用水下卡片间隙试验法来研究装药密度对炸药冲击波感度的影响, 试验结果见表 6。结果表明, 随着装药密度的增加, TNT 的冲击波感度减小, 这与文献[14]所得结论一致。

表 6 不同装药密度的 TNT 冲击波感度

Table 6 Shock sensitivity of TNT with different densities

$\rho_e / (\text{g}/\text{cm}^3)$	G_{50} / mm	d / mm	S
0.862	6.90	0.60	0.271
1.220	1.35	0.50	0.315

5 结 论

(1) 应用水下爆炸法, 测试得到了炸药试样水下爆炸的冲击波能和气泡能, 通过对比试验值和文献爆热值, 说明了本试验采用水下爆炸测试方法的可行性。

(2) 利用水下卡片间隙试验法, 测试得到了 6 种炸药 PETN、RDX、8701、钝化 RDX、TNT、膨化硝酸铵的冲击波感度依次降低。这与传统隔板实验的排序结果相一致, 说明了本文中水下卡片间隙试验法的测试结果是正确的, 表明了该方法在一定程度上代替传统隔板试验法的可行性。采用上述方法, 得到了与用其他方法得到的类似的规律, 即炸药的冲击波感度与其装药密度有关, 在一定范围内, 密度越大, 冲击波感度越小。由于水下爆炸法可精确获得爆炸的动、静态能量, 且安全性高、重现性好, 故采用此法研究炸药的冲击波感度具有广阔前景。

(3) 炸药的卡片间隙厚度实际上是一种条件参数, 与炸药试样的物理形态、密度等有关, 故采用此法测定炸药的冲击波感度时, 应根据评价目的、要求等来确定具体的试验条件。

参考文献:

- [1] 孙金华, 汪大立, 颜世龙, 等. 水下爆炸测试技术在爆破器材性能测试中的应用: 炸药爆炸性能的测试[J]. 淮南矿业学院学报, 1994, 14(2): 50-54.
SUN Jin-hua, WANG Da-li, YAN Shi-long, et al. The application of the measure and test technique of underwater explosion in measuring and testing the properties of detonate equipment: The measure and test in explosives' explosion properties[J]. Journal of Huainan Mining Institute, 1994, 14(2): 50-54.
- [2] 彭金华, 吉田忠雄, 青木宪治, 等. 撞击和冲击波感度试验[J]. 爆破器材, 1996, 25(6): 5-7.
PENG Jin-hua, TADA O Yoshida, KENJI Aoki, et al. Impact and shock sensitivity tests[J]. Explosive Materials, 1996, 25(6): 5-7.
- [3] 刘荣海, 吉田忠雄, 田村昌三. 利用水下爆炸法评价火炸药爆炸危险性的研究[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(2): 110-

117.

LIU Rong-hai, TADAO Yoshida, MASAMITSU Tamura. Study on evaluation of explosion hazards of propellants and explosives by underwater explosion method[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993,13(2):110-117.

- [4] 苏华. 一次引爆型FAE液固复合燃料性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2003.
- [5] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosive expansion work in underwater detonations[C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Detonation. Coronado, CA: Office of Naval Research, 1976:540-550.
- [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.
SU Hua, CHEN Wang-hua, WU Tao, et al. Amendment of shock wave parameters of underwater explosion[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004,27(3):46-48.
- [7] 炸药试验方法. 冲击波感度测定——卡片式隔板法[S]. GJB772A-97, 1997.
- [8] Bjarnholt G. 工业炸药测试新技术[M]. 陈正衡,译. 北京:煤炭工业出版社,1982.
- [9] 云主惠. 水下爆炸法测定炸药的感度[J]. *爆炸器材*,1981,15(3):37-41.
YUN Zhu-hui. Measurement explosive energy by underwater explosion method[J]. *Explosive Materials*, 1981,15(3):37-41.
- [10] 钟一鹏,胡雅达,汪宏志. 国外炸药性能手册[M]. 北京:兵器工业出版社,1990.
- [11] 九零三研究所. 高能炸药性能数据手册[M]. 合肥:九零三研究所,1982.
- [12] 周新利. 膨化硝酸铵自敏化理论及其炸药的物理性能和改性研究[D]. 南京:南京理工大学,2003.
- [13] 惠君明,陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995.
- [14] 刘德润,何得昌,周霖. 梯恩梯密度对冲击波感度的影响[J]. *北京理工大学学报*,1990,10(3):107-110.
LIU De-run, HE De-chang, ZHOU Lin. Effects of charge density on the shock sensitivity of TNT[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1990,10(3):107-110.

Shock sensitivity measurement of explosives by an underwater card gap test method

WANG Hui-jun, CHEN Wang-hua^{*}, HE Zhong-qi, HU Yi-ting,
XU Hai-ou, PENG Jin-hua, LIU Rong-hai

*(Department of Safety Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China)*

Abstract: An underwater card gap test method was proposed to measure shock sensitivity of explosives by combining the underwater explosion method and the small card gap test. The shock sensitivity of six explosives, which included PETN, RDX, 8701, Desensitized RDX, TNT, expanded ammonium nitrate explosive, was measured by the proposed underwater card gap test method. The experimental results show that the shock sensitivity of six explosives including PETN, RDX, 8701, Desensitized RDX, TNT and expanded ammonium nitrate get down successively. The results by the underwater card gap test method were compared with the results by the traditional gap test and the results from literatures. Comparison indicates that the experimental results are believable. Furthermore, effect of charge density on shock sensitivity of explosives was investigated by the underwater card gap test method.

Key words: mechanics of explosion; shock sensitivity; underwater explosion; explosive; card gap test

* Corresponding author: CHEN Wang-hua

E-mail address: chenwh_nust@163.com