

基于水中小隔板法测试炸药冲击波感度的初步尝试

何中其, 陈网桦, 彭金华, 刘荣海, 王慧君, 姜炜

(南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 按照《炸药试验方法》(GJB 772A—97)要求,对炸药进行冲击波感度测试时,危险品用量较大,对被测试样有无引爆的判断也存在人为因素。尝试将隔板试验与水中爆炸测试相结合,提出一种安全性高、试样消耗少、环境友好、用于高感度炸药的冲击波感度测试手段,并对测试装置、试验材料、测试系统架构、测试过程及数据处理等给出了具体的要求。通过对包括 TNT 在内的5种常用炸药进行试验,结果表明,所给出的冲击波感度测试方法实施简便,测试过程所获取的信息较为丰富、准确,感度结果与 GJB 772A 方法对比,有较好的相关性,可用于比较高感类炸药的冲击波感度。该测试技术可在一般实验室条件下开展,实用性较强。

关键词: 爆炸力学; 高感度炸药; 水中爆炸; 冲击波感度; 小隔板试验

中图分类号: O383; TJ55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2012)08-1004-05

Preliminary Experiments for Shock Sensivity Test of Explosives Based on Underwater Small Cardboard Method

HE Zhong-qi, CHEN Wang-hua, PENG Jin-hua, LIU Rong-hai, WANG Hui-jun, JIANG Wei
(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: According to the standard “Explosive Test Method”, the test for shock sensitivity of explosives is much consumptive, inconvenient, and the results are affected by personal factors easily. Combining small cardboard test with underwater explosion experiment, an underwater cardboard test method for shock sensitivity was proposed, which could be much safer, less consumptive, environment-friendly and fairly worthwhile. The underwater explosion device, components and materials, test system, operation procedure and data processing of the experiment method were also given. Five common explosives, including TNT, were tested. The results show that the new method can acquire abundant information, needs only less samples, and has better accuracy. It can be used for test of high sensitivity explosives, and can be carried out under general experiment circumstance.

Key words: mechanics of explosion; high sensitivity explosive; underwater explosion; shock sensitivity; small cardboard test

0 引言

炸药的冲击波感度用于表征炸药在冲击波作用下发生爆轰的难易程度,是衡量炸药安全性能和爆轰性能的重要指标。目前,测定炸药冲击波感度的主要手段是隔板试验法^[1]。进行冲击波感度测试

时,通过升降法调节隔板厚度,观察不同厚度下被测炸药的爆轰情况,并以被测炸药发生 50% 爆轰概率时对应的隔板厚度值来表征炸药冲击波感度的大小。实际测试中,我国的《炸药试验方法》(GJB 772A—97)、美国海军军械实验室及洛斯·阿拉莫斯国家实验室、德国化学技术试验研究所、中国工程

物理研究院等采用的冲击波感度测试装置尽管均有所差异,但测试原理相同。上述方法中,一般测试环境均为空气介质,所采用的主发炸药、被测炸药试样量也较大(几十克至几百克),都是通过观测用来放置被测炸药的验证板被击穿的情况来判断被测炸药是否产生爆轰,测试成本较高、安全保障条件要求较为严格,且测试结果存在人为判断。

随着测试技术发展,利用水中爆炸来进行炸药爆轰测试的研究日益普遍^[2-4]。炸药在水中爆炸时,采用专用的水中压力传感器可以准确测定测点处的峰值压力、压力衰减时间常数、第一次气泡脉动周期及压力-时间的动态曲线等信息,经过数值处理后可得到炸药爆炸的比冲击波能、比气泡能及总能量,这为水中爆炸测试炸药的冲击波感度提供了有力保障。孙金华等^[5]在小水池中测试了炸药的爆炸能量,并尝试了直接使用雷管作为主发炸药,对PETN、TNT等炸药进行了冲击波感度的水中小隔板试验测试。文献^[6]也对不同炸药冲击波感度的水中爆炸测试结果进行了分析,为水中爆炸小隔板试验测试炸药的冲击波感度提供了重要参考。本文将水中爆炸与炸药冲击波感度的小隔板测试法进行综合,为从事炸药安全性能和爆轰性能的研究人员提供参考。

开展水中爆炸法测试炸药冲击波感度的主要优势有:

1) 试验炸药用量可减少到10 g以下,便于实施且作业安全提高。文献^[6-7]指出,与传统测定炸药冲击波感度方法相比,水中爆炸法测试精确,试样用量大为降低,每发装药在10 g以下就可完成测试。而现行GJB 772A—97中规定的“冲击波感度卡片式隔板法”(方法605.1),规定使用的主发炸药特屈儿药量就达到了50 g,超出了我国现有安全规范中对科研院校中危险品测试间的定量要求上限(20 g),这也限制了对炸药冲击波感度的研究工作。

2) 试验判据准确,避免人为误差。水中爆炸测试时,对水下压力传感器的测试信号进行处理,得到的爆源比冲击波能、比气泡能经过修正后,可以得出爆源爆炸产生的总能量^[8-10]。该能量值一般与爆源炸药的爆热值接近,为爆热值的90%~95%。利用该测试结果,对主发炸药(雷管)的水中爆炸能量进行标定后,可以准确地判断水下被测炸药有无发生爆轰,并能够得出其爆轰的能量,避免了对被测炸药的爆轰情况进行人为判定的因素。

3) 试验装置小,操作简便,费用低。图1为文献^[6]所示的水下隔板试验装置,水中爆炸测试在内径12.5 mm、长度为76 mm的小型聚乙烯套管内即可完成。小型化的试验装置对于试验操作也提供了方便,被测炸药、隔板、主发爆源分装入套管中时,位置易于固定。试验炸药量、隔板等耗材用量也明显降低,节约了试验成本。

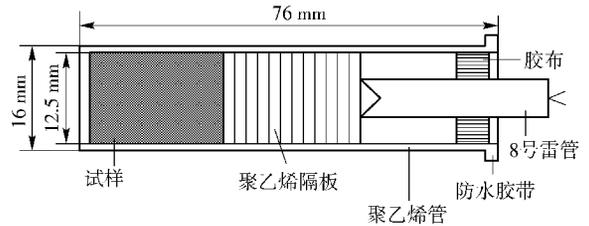


图1 水下隔板试验装置示意图

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

表1给出了水中爆炸小隔板试验与GJB772A—97所规定的冲击波感度试验的测试条件对比结果。

1 水中爆炸测试炸药冲击波感度试验方法

1.1 爆炸测试装置设计

采用图1所示的水中爆炸测试装置,测试时装置结构从上至下依次为防水处理层、雷管、隔板、被测试样,整个装置被塑料套管密封包裹。

1.2 试验材料

1) 主发爆源:8号工业雷管或军用电雷管(GB 8031—2005)。

2) 隔板材料:聚乙烯(PE)树脂(GB/T 11115—2009)制成的薄膜或板材,厚度可根据市售商品和测试实际需要确定。也可选用其他材料,但应是执行相应行业或国家标准生产的制品。

3) 套管:聚乙烯筒,外径不大于15 mm,壁厚不大于2 mm。

4) 防水包扎材料:生胶带(聚四氟乙烯),常用于冷热给水管件接口联接处的密封用品。

5) 被测试样:压制成与套管相匹配的药柱,每发药量不大于5 g,同一试样的药柱质量误差不超过0.5%,密度误差不超过0.01 g/cm³。也可根据需要采用一定密度的散装试样,并参考GJB 772A—97的装药方法。先在套管中标志出装药定量被测炸药对应密度下的高度位置,将称量好的炸药试样倒入套管;再将套管从25 mm高度垂直下落到毛毡垫上,反复墩至40次以上;再用直径大小刚好能插入套管

表 1 水中爆炸小隔板试验与 GJB 772A—97 规定的冲击波感度试验对比

Tab. 1 Comparison underwater small gap test of shock sensitivity with GJB 772A—97 method

测试条件	水中爆炸小隔板试验	GJB 772A—97 规定的冲击波感度试验	备注
炸药用量	主发炸药加被测炸药总质量在 10 g 以下即可完成测试	主发炸药为特屈儿, 50 g; 被测试样需制成 $\phi 25$ mm、高 25 mm (最低要求) 的药柱, 按密度 1.6 g/cm^3 估计质量为 19.6 g, 共计约 70 g	《小量火药、炸药及其制品危险性建筑设计安全规范》(WJ 2470—1997) 中规定“火药、炸药、起爆药、烟火药、推进剂及其制品的性能测定、分析实验室和院校的配方、合成实验室, 各测试间使用的药量不应大于 20 g”
测试结果判断	由水下压力传感器的测试信号进行处理后得出, 结果判断准确	由专业人员现场目测验证板的凹痕及破坏情况, 存在人为误差	
试验操作性	装置小、组件少, 易于组装、定位和起爆	装置较大, 组件包括雷管及雷管座、主发药柱、隔板、被测炸药药柱、试样壳体 ($\phi 25$ mm 以上的钢管)、见证板 (100 mm \times 100 mm \times 6 mm) 等, 组装和定位操作较困难	
试验安全及防护要求	作业相对安全, 外场防护要求较低	试验药量大, 一般应在静爆场或爆炸堡中进行, 安全及防护要求高	
爆炸试验危害及环境破坏情况	爆炸冲击波及破片等完全约束于爆炸水池中, 不会对外场造成破坏及毁伤; 水池水经过滤后可长时间重复使用; 试验产生的废物易于回收和利用	爆炸产生的冲击波、破片等能对周围结构、人员造成毁伤; 试验消耗及“三废”量较大; 试验废弃物回收不便; 环境污染较大	

的玻璃棒从上至下将试样推压至标记位置, 玻璃棒的头部应平整、光滑, 以免粘附出试样。试样质量、密度误差与压装药柱要求相同。

1.3 测试系统架构

测试系统由圆柱形爆炸水池 (不小于 $\phi 2.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$)、水中压力传感器、信号调理仪、数据采集系统等组成, 见图 2。本文所用爆炸水池尺寸为 $\phi 3.0 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$ 。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 $1.67 \sim 1.72 \text{ m}$ 。其中, 水中压力传感器建议采用 PCB 138A 系列, 其谐振频率大于 1000 kHz , 上升沿小于 $1.5 \mu\text{s}$, 低频响应频率 (—

5%) 为 2.5 Hz , 线性度小于 $2.0\% \text{ FS}$ 。

1.4 试验过程与数据处理

1.4.1 爆炸水池测试系统的标定

测试系统的标定工作是开展炸药冲击波感度水中爆炸法测试的前提。炸药在水中爆炸时, 如前所述, 其能量输出分为冲击波能和气泡能量两部分, 且两部分之和, 即总能量接近炸药的爆热值。由于一般使用的爆炸水池尺寸有限, 测出炸药输出能量会受到边界效应影响, 必须对这两部分能量及总能量的计算过程进行标定试验。典型的爆炸水池测试系统标定过程参见文献[2]。

标定工作结束时, 应得到如下结果: 爆炸水池测试信号的处理方法、前述两部分能量及总能量的计算公式、没有被测试样时 (即空白试验) 雷管在爆炸测试装置中爆炸输出的能量均值 (包括冲击波能、气泡能及总能量)、被测炸药在爆炸测试装置中无隔板被雷管引爆后的爆炸输出能量均值。

1.4.2 试验程序

试验程序参考 GJB 772A—97 的方法。首先, 根据试样的爆炸性能, 估计试样 50% 爆轰所需要的隔板厚度及测试时调整厚度的步长。以估计的初始隔板厚度值进行预备试验, 并最终确定合适的步长。然后, 按照 GJB/Z 377A 以恒定步长进行试验, 自出现第一对以恒定步长的相邻相反结果算起, 有效试

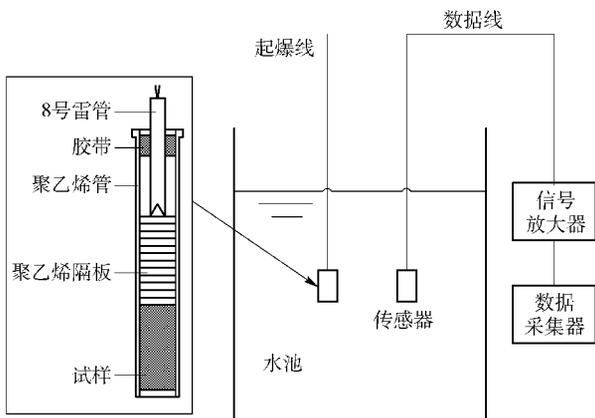


图 2 爆炸水池中测定炸药冲击波感度的测试系统示意图

Fig. 2 Sketch figure for underwater shock sensitivity test

验应不小于 20 次,而且每发试样的测试结果波动变化,也必须全部满足升降法的要求。

爆炸测试过程与一般水中爆炸试验相同。

1.4.3 每发试验中被测试样是否发生爆轰的判定

选用水中爆炸测试得出的总能量作为判定依据。判定过程如文献[6]所述,根据每次测试计算结果,计算得到每发试验的总能量。若水中爆炸释放爆(即空白试验)后的输出总能量的 50% 时,判定该次试验被测炸药被引爆,反之未被引爆。

判定依据也可根据试验情况进行适当调整,但

在同一类试验中应当固定判据。

1.4.4 试验数据处理和结果表述

处理过程及结果表述参照 GJB 772A—97 的相应内容,在此不作叙述。

2 水中爆炸测试冲击波敏感度实测

表 2 为利用本文水中爆炸隔板试验法测得的 5 种炸药的冲击波敏感度值与 GJB 772A—97 测试方法比较结果。图 3 给出了进行水中爆炸测试炸药的冲击波敏感度试验时,TNT 试样被引爆与未被引爆的典型冲击波压力时程曲线。

表 2 炸药冲击波感度的水中爆炸隔板试验结果与 GJB 772A—97 测试结果对比

Tab. 2 Results of 5 explosives by underwater small gap test of shock sensitivity and GJB 772A—97 method test

炸药名称	GJB 772A—97 方法 ¹		本文所述的测试方法			备注
	装药密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	50% 起爆概率隔板 厚度/mm	装药密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	50% 起爆概率 隔板厚度/mm	标准差/mm	
TNT	1.01	57.6	0.86	6.90	0.271	冲击波敏感度均为最低
钝化黑索今	0.96	58.8	0.86	7.30	0.582	
8701	0.95	67.6	0.91	11.65	1.773	
RDX	1.08	83.8	1.02	12.42	0.473	
PETN	0.87	95.2	0.94	>16.8		冲击波敏感度均为最高

注:1 按 GJB 772A—97 方法进行冲击波敏感度试验时,主发药采用钝化黑索今(GB/T 629—1997),质量 50 g、密度 $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$;卡片材料为有机玻璃隔板(GB 7134—86);其他与规定要求均相同。

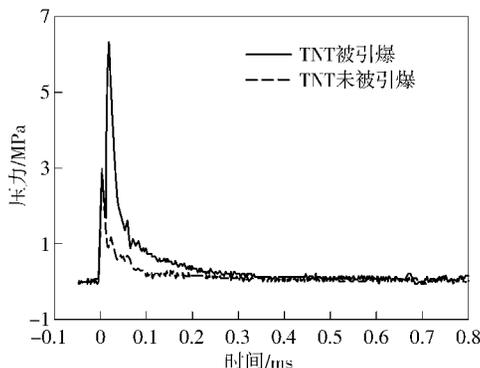


图 3 TNT 被引爆与未被引爆的典型水中冲击波压力信号

Fig. 3 Pressure-time curves of TNT initialized and not initialized in test

通过将本文提出的水中爆炸隔板法与 GJB 772A—97 的冲击波敏感度测试方法对比,发现 5 种被测炸药的冲击波敏感度所对应的 50% 起爆概率隔板厚度,其大小排序一致;两种测试手段所得到的隔板厚度值,其整体的线性相关系数为 0.9。说明用本文所述方法的测试结果可信、有效。

3 结论

1) 对现有炸药冲击波敏感度测试方法的应用情况进行了分析,将隔板试验与水中爆炸测试相结合,提出“雷管 + 聚乙烯片 + 炸药”的水中爆炸冲击波敏感度测试法,可用于较为敏感的炸药试样(与工业级 RDX 相当或更高)敏感度测试与比较。该测试方法操作简便、危险品消耗量少、安全性高且试验过程环境友好。对敏感度试验过程中的测试装置、试验材料、测试系统架构、试验过程及数据处理等提出了具体的要求。

2) 通过对包括 TNT 在内的 5 种常用炸药进行试验,测试结果与 GJB 772A—97 的冲击波敏感度测试方法对比,发现 5 种被测炸药的冲击波敏感度所对应的冲击波敏感度大小排序一致,两种测试方法得到的试样 50% 起爆概率所对应的隔板厚度值,其相关性较好,测试结果有效。水中爆炸冲击波敏感度试验过程所获取的信息量较为充分、准确,并且在一般实验室条件下均可开展,实用性较强。

3) 由于水中爆炸小隔板测试方法采用了雷管作为主发爆源, 目前还无法排除雷管底部射流侵彻隔板后引起被测试样起爆的可能, 尤其对于炸药感度较低、50% 起爆概率对应的隔板厚度较小的情况。同时由于雷管爆源所输出的冲击波平面性不足、曲率偏小等不足存在, 该冲击波感度测试方法并不适用于钝感炸药(无雷管感度)及爆轰临界直径偏大的炸药试样。

参考文献 (References)

- [1] 张世杰. 炸药的冲击波感度测定——隔板试验法[J]. 煤矿爆破, 1994, (3): 22 - 25.
ZHANG Shi-jie. Measurement of shock sensitivity on explosives; card gap test[J]. Mining Blasting, 1994, (3): 22 - 25. (in Chinese)
- [2] 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.
SU Hua. Investigation on properties of single event fuel air explosive(SEFAE) and their components[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- [3] 颜世龙. 集中药包与条形药包水下爆炸能量测试[J]. 爆破器材, 2003, 32(5): 23 - 27.
YAN Shi-long. Measurement of the explosion energy of the centralized charge and the linear charge underwater[J]. Explosive Materials, 2003, 32(5): 23 - 27. (in Chinese)
- [4] 胡毅亭, 贾宪政, 饶国宁, 等. 水下爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(2): 134 - 140.
HU Yi-ting, JIA Xian-zheng, RAO Guo-ning, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave and bubble pulse[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 134 - 140. (in Chinese)
- [5] 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[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[J]. Journal of Huainan Mining Institute, 1994, 14(2): 50 - 54. (in Chinese)
- [6] 王慧君, 陈网桦, 何中其, 等. 用水下卡片间隙试验法测定炸药冲击波感度[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(5): 481 - 485.
WANG Hui-jun, CHEN Wang-hua, HE Zhong-qi, et al. Shock sensitivity measurement of explosives by an underwater card gap test method[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5): 481 - 485. (in Chinese)
- [7] 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, Tadao Yoshida, Kenji Aoki, et al. Impact and shock sensitivity tests[J]. Explosive Materials, 1996, 25(6): 5 - 7. (in Chinese)
- [8] Cole R H. Underwater explosions[M]. New York: Princeton University Press, 1948.
- [9] Bjarnhalt G, Holmberg R. Explosive expansion work in underwater detonations[C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Detonation. Coronado: Office of Naval Research, 1976: 540 - 550.
- [10] 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 - 52.
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 - 52. (in Chinese)