文章编号:1000-5773(2011)03-0261-07

导弹动爆对模拟船舱毁伤效果试验研究*

杜红棉[1,2],王 燕[1,2],祖 静[1,2],徐 鹏[1,2],马游春[1,2,3]

(1.中北大学电子测试技术重点实验室,山西太原 030051;
2.中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西太原 030051;
3.北京航空航天大学光电技术研究所,北京 100191)

摘要:设计了基于火箭橇的导弹动爆试验,介绍了模拟船舱的结构尺寸、测试点的布设情况及测试仪器性能。通过获取的断线、光、压力、加速度信号得出如下结论:测试方法有效;冲击波在舱室内传播不均匀,导弹运动方向反射冲击波很大,反方向较小,两者比例可达 3.5∶1,舱室的角隅部位冲击波压力高于壁面正反射压力;导弹穿甲时舱壁的冲击振动高达 10 000g,且穿甲舱壁的冲击远大于其它舱壁,被破片击中会加大舱壁的振动幅值。

关键词:火箭橇;动爆;模拟船舱;冲击波;冲击振动
中图分类号:O384 **文献标识码**:A

1 引 言

目前舱内或建筑物内的毁伤威力评估方法主要以数值模拟、仿真分析为主。通过建立二维计算模型,可仿真出运动装药爆炸产生的冲击波的空间分布特征及超压时间曲线[1];或通过数值模拟与经验公式计算结果的对比,来证明建立的有限元模型的可行性[2]。流固耦合方法用于数值模拟舰艇舱室在爆炸荷载下的动态响应过程[3],采用通用有限元程序 ABAQUS 对圆柱壳在深水爆炸冲击波作用下的动态响应进行数值模拟[4],通过仿真加局部特征结构实验验证的方式研究结构的响应[5-7]。文献[8]得到了导弹在舱外爆炸时舱内的部分参数。而导弹在舰艇舱室内部爆炸具有许多不确定性因素,与爆炸位置、加筋布置、舱壁强度、流固耦合方法等有密切的关系,因此船舱模拟动爆试验是分析舱内爆炸冲击波传播特性与研究其对舱壁结构破坏程度的有效方法。

2 运动弹药爆炸的理论分析

2.1 弹丸穿甲后的速度

弹丸穿甲后的速度与钢甲的厚度、弹速、弹着角等参数有关,穿过钢甲后的剩余速度 v_r 可由如下公式计算[9]

$$v_r = \sqrt{\frac{v_c^2 - v_b^2}{1 + \dfrac{\pi D^2 b\gamma}{4G\cos\alpha}}} \tag{1}$$

* **收稿日期**:2010-07-20;**修回日期**:2010-11-29
基金项目:武器装备预研项目(9140c 1204050609)
作者简介:杜红棉(1977—),女,博士研究生,讲师,主要从事爆炸与冲击动态存储测试研究.
E-mail:duhongmian@nuc.edu.cn
通讯作者:马游春(1977—),男,博士研究生,讲师,主要从事动态存储测试及光纤光栅传感应用研究.
E-mail:mayouchun@nuc.edu.cn

$$v_b = K\frac{D^{5/6}b^{2/3}}{G^{1/2}\cos\alpha} \tag{2}$$

式中：v_c为弹丸侵彻钢甲前的速度，v_b为弹丸侵彻钢甲的临界穿透速度，D 为弹径，b 为钢甲厚度，γ 为装甲比重，G 为弹重，α 为弹着角，K 为取决于钢甲性质、厚度及弹丸结构和性质的系数。

2.2 运动装药爆炸冲击波特性

运动装药的动能最终转化成其它形式的能量释放出来，包括破片速度、冲击波等方式，所以运动装药的爆炸冲击波要比静止的大，有时在运动方向上空气冲击波初始超压要比静止时高 1 倍多，在较远距离处，超压高出约 35%～40%。如果是在室内爆炸，高马赫数的冲击波遇刚性壁面反射，峰值越大，反射后超压增长的比例越大。运动装药在空中爆炸时形成的冲击波最大超压可由下式计算[10]

$$p_x = \left(1+\frac{1+k}{2}\frac{u_0}{D_s}\right)^2 p_{x0} \tag{3}$$

式中：p_{x0}为静止装药爆炸式空气冲击波初始超压，k 为未扰动空气的等熵指数，u_0 为装药的运动速度，D_s为静止装药爆炸冲击波的最大速度，即爆速。

3 动爆试验及结果

为评估导弹对船舱的毁伤效果，设计了 11 m×5.7 m 的模拟船舱，内分两舱室，主舱宽 9 m。运用火箭橇发射导弹，导弹以 30°的弹着角从厚 18 mm 的前壁穿甲后引爆，其穿甲过程如图 1 所示。另外前壁加大竖肋(10 mm×100 mm)，其它壁厚 10 mm，加小竖肋(5 mm×30 mm)在距靶舱前壁 17 m 处火箭橇上设断线信号，作为系统触发信号即测试系统零时刻。参照 GJB 763.4—89 和 GJB 4058—2000[11-12]在靶舱内布设了光、压力、振动测点，测量穿甲时间、动爆冲击波特性和舱壁的结构响应。

3.1 试验设计

在模拟船舱主舱的四壁各布设了压力和振动测点，两测点尽量靠近。文献[3]中的仿真结果显示，角隅部位冲击波压力较大，并且考虑到迎弹方位为船舱毁伤最为严重的部位，所以测点设在弹飞行的反方向的角隅部位。总共布设 6 个压力测点、4 个振动测点，1 个光敏测点，测点布局如图 2 所示。

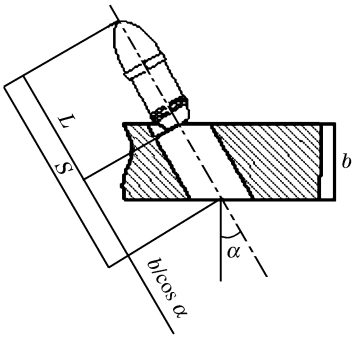


图 1 穿甲过程示意图

Fig. 1 Schematic of penetration process

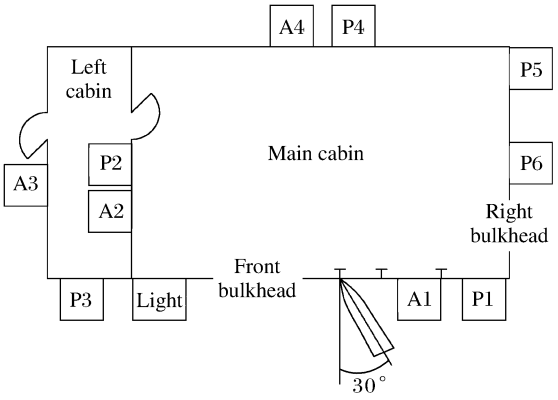


图 2 试验现场布置图

Fig. 2 Layout of testing points

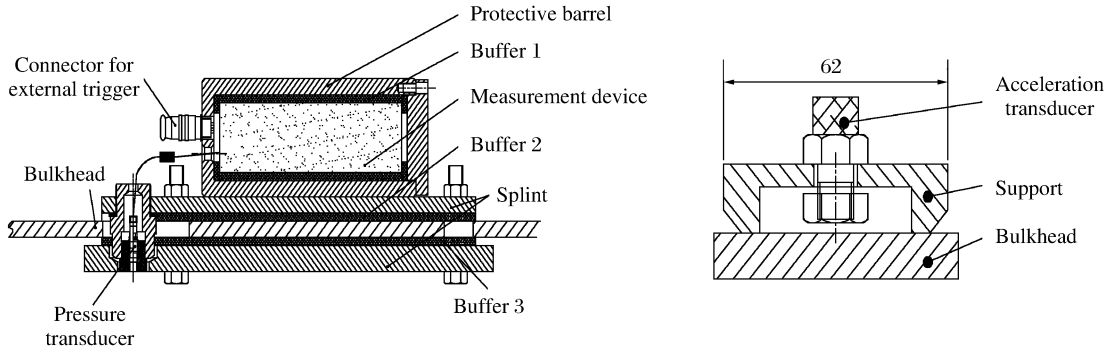
3.2 测试设备

测试设备由超压测试装置、冲击振动加速度测试装置、光敏记录装置和触发箱 4 部分组成，光敏记录装置以光敏管作为敏感元件记录光的变换过程，包括弹穿甲和爆炸发出的光。触发箱将导弹过火箭橇的断线信号作为输入信号，经光电隔离后，控制所有测试装置触发，此刻为零时刻。光敏记录装置的时间分辨率为 1 μs，压力和加速度测试装置的指标见表 1，电路模块采用真空灌封技术，装置与保护筒间、保护筒外、保护筒与舱壁间等处采用多级缓冲，其安装结构见图 3(a)，加速度装置固连于舱壁的支架上，如图 3(b)所示。

表 1　测试装置性能指标统计表

Table 1　Statistical table of the performance index of testing setups

Signal type	Sensor	Sample rate /(MHz)	Overpressure, Acceleration	Bandpass /(kHz)	Recording time/(s)	Calibration device
Overpressure	PCB113	1	3.4～34 MPa	1～100	4	Shock tube
Acceleration	988(204)	0.5	100 000g	1～35	250	Hopkinton



(a) Pressure measurement device　　(b) Acceleration sensor

图 3　测试装置安装结构

Fig. 3　Installation structure of testing setup

3.3　试验结果

动爆试验过后靶舱被分成若干块飞出,前壁连带舱底、左舱左壁、主舱左壁分别飞落在距原址 40 m 处的左侧,安装于前壁的 4 套测试装置未脱落,左壁的 3 套测试装置散落在靶舱壁板的下面。右壁飞落在距原址 60 m 处右侧,右壁与后壁连接处撕裂,5# 压力测点散落在右壁落地的后方。后壁落入原址右后方的水塘,未打捞出来,造成 4# 的压力和振动测试装置丢失。爆炸后靶舱及测试装置的现场见图 4,回收数据统计见表 2。

表 2　测试数据统计表

Table 2　Statistical table of tested data

No.	Device	Tested points	Pressure, Time, Acceleration	Remark
1	Pressure No. 1	Front bulkhead	2.74 MPa	Fourth peak
2	Acceleration No. 1	Front bulkhead	10 585g	Penetration
3	Pressure No. 2	Left bulkhead	6.94 MPa	First peak
4	Acceleration No. 2	Left bulkhead	2 606g	Penetration
			29 880g	Blasting
5	Pressure No. 3	Front bulkhead	3.06MPa	Fourth peak
6	Acceleration No. 3	Left bulkhead of	3 936g	Penetration
		left cabin	46 980g	Blasting
7	Pressure No. 5	Right bulkhead	9.45 MPa	First peak
	Photosensitive for time measurement	Front bulkhead	21.72 ms	Time between trigger point and blasting



(a) Right wall of simulated cabin



(b) Bottom wall of simulated cabin



(c) Pressure measurement device No. 3



(d) Pressure measurement device No. 5

图 4 爆炸后的靶舱及测试装置

Fig. 4 Collected target cabin and measurement device

4 数据分析

由超压曲线、冲击加速度曲线和光敏曲线可估算爆炸点的位置,以分析动爆冲击波和舱壁的结构响应特性。

4.1 爆炸点的确定

由光敏信号测试结果可以得出断线到穿甲的时间间隔为 21.63 ms,断线位置距着靶点的距离为 17.33 m,因此穿甲前的弹速为 $v_c=s/t=17.33/(21.63\times10^{-3})=802.3$ m/s。

将导弹参数代入(1)式和(2)式后,求得穿甲后的弹速为 $v_r=773$ m/s,其中 $K=2\,400$,引信作用时间为 4 ms,导弹穿甲后的行程为 3.092 m,导弹爆炸点的位置如图 5 所示。

4.2 冲击波特性

动爆冲击波在舱室内传播是不对称的,靶舱前壁变形明显小于其它舱壁,导弹飞行方向的舱壁受损最为严重,4 条压力曲线如图 6 所示,穿甲后的弹速为 773 m/s,由公式(3)计算出最大冲击波超压与静爆冲击波超压的比为 $p_x/p_{x0}=1.34$,冲击波遇舱壁反射后将会增强,比例远超此值。这是因为反射超压 p_r 与入射超压 p_i 为非线性关系 $p_r:p_i=[2(4Ma^2-1)/(Ma^2+5)]:1$,静爆超压值越高,其马赫数($Ma$)就越高,反射超压增长的倍数就越大。5# 压力测点距爆心的距离比 1# 压力测点远 1.07 m,两测点所处位置都在舱室的角隅部位,但压力峰值的比为 9.45∶2.72=3.5∶1。2# 测点距爆心最近,冲击波到达最早,但压力峰值却小于角隅部位的 5# 测点,这一点与文献[3]的仿真结果不一致。角隅部位超压是多个壁面反射超压汇聚的结果,并在第一峰后出现 2 次汇聚。

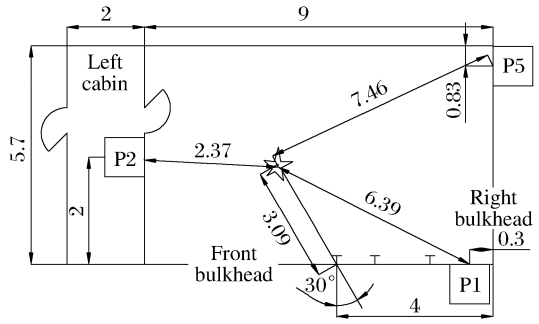


图 5　导弹爆炸位置图

Fig. 5　Explosion point of missile

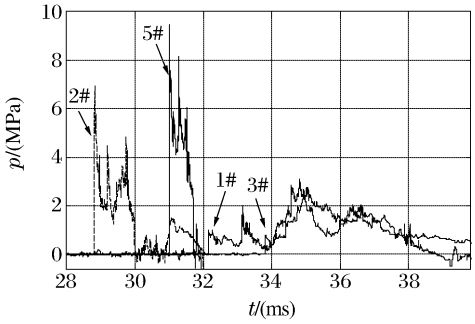


图 6　超压曲线

Fig. 6　Overpressure curve

4.3　结构响应特性

靶舱各舱壁的冲击加速度分为两阶段。第一阶段为导弹穿甲引起的舱壁振动,起点与光敏起点基本相同,此阶段前壁的 1# 振动测点的最大加速度为 105 859g。第二阶段为爆炸冲击波和破片作用引起的振动,冲击波到达时间和振动突然加大时间一致。虽然 2# 测点的冲击波压力远高于 3# 测点,但 3# 测点附近多处位置被破片击中,使其冲击达到 46 980g,比 2# 测点高出 17 100g。图 7 为光敏和 3 个测点的冲击振动曲线。由格尼(Gurney)方程和导弹参数计算出的破片初速为 1243 m/s,如此高速的多个破片的撞击必然会加大对舱壁的冲击。

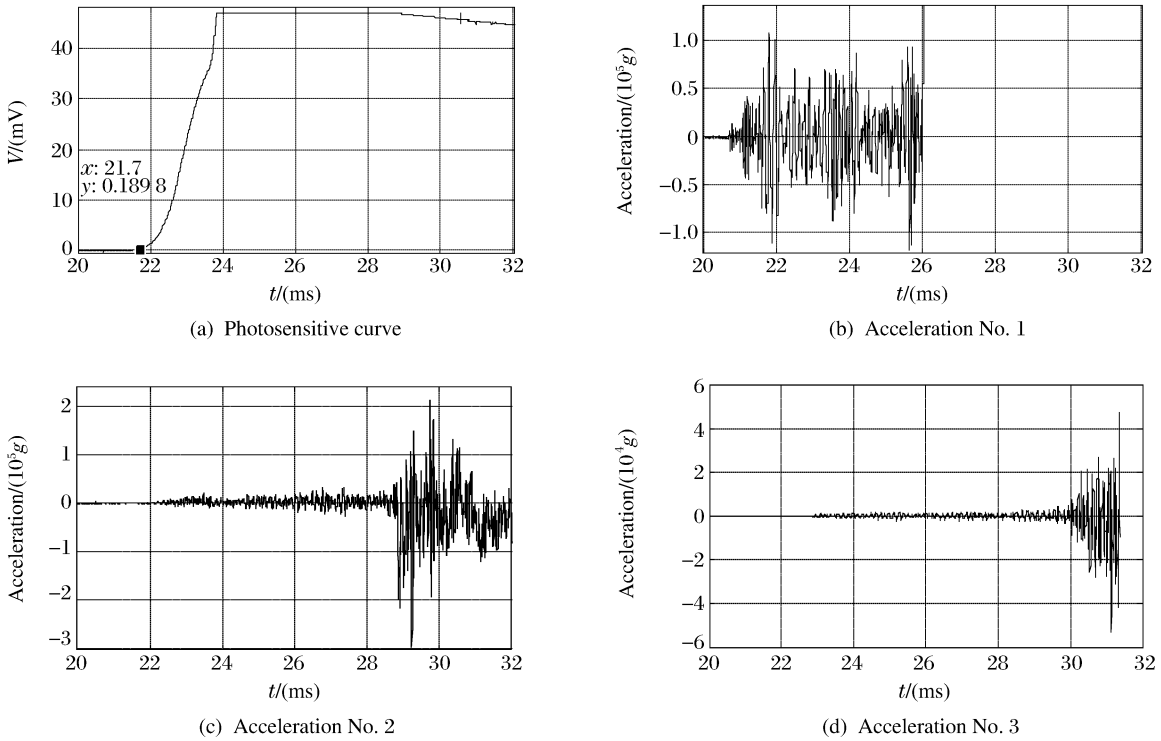


图 7　光敏和多点冲击振动曲线

Fig. 7　Photosensitive and multipoint vibration curve

5 结 论

在对模拟船舱的火箭撬动爆试验所获得的超压、冲击加速度及光敏数据分析的基础上，可得出如下结论：

(1) 所设计的测试方法有效，可作为毁伤效果评估的依据。

(2) 导弹在舱室内的动爆冲击波传播不均匀，导弹在运动方向的反射冲击波很大，反方向较小，两者比例可达 3.5∶1；舱室的角隅部位的冲击波压力高于壁面正反射压力。

(3) 穿甲舱壁的冲击振动远大于其它舱壁，被破片击中的舱壁会加大冲击振动幅值。

References:

[1] Zhang G Y, Zhou X, Huang Y Z, et al. Study of Analysis Method of the Shock-Wave Characteristic of Moving Explosive [A]//CSTM. The 4th National Symposium on Computable Explosion Force [C]. Hefei, 1990: 282-287. (in Chinese)
张光莹，周 旭，黄咏政，等. 动爆冲击波特性分析方法研究 [A]//中国力学学会. 第四届全国计算爆炸力学会议论文集 [C]. 合肥，1990：282-287.

[2] Zhu W L, Huang X M, Dong S Q. Numerical Simulation of Damage Effect for Explosion in Building [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance [J]. 2009, 29(5): 139-141. (in Chinese)
余文力，黄显明，董三强. 建筑物内爆炸毁伤效应的数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报，2009，29(5)：139-141.

[3] Zhu J F, Wang W L, Zeng L. Modeling and Simulation of Damage Effect of Ship Cabin Subject to Internal Explosion [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7066-7068. (in Chinese)
朱建方，王伟力，曾 亮. 舰艇舱室内爆毁伤的建模与仿真分析 [J]. 系统仿真学报，2009，21(22)：7066-7068.

[4] Jia X Z, Hu Y T, Dong M R, et al. Numerical Study on Influencing Factors of Dynamic Response of Cylindrical Shell Subjected to Deep Water Blast Wave [J]. Chinese Journal of High Pressure Physic, 2008, 22(2): 208-214. (in Chinese)
贾宪振，胡毅亭，董明荣，等. 深水爆炸冲击波作用下圆柱壳动态响应影响因素的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报，2008，22(2)：208-214.

[5] Hou H L, Zhu X, Mei Z Y. Study on the Blast Load and Failure Mode of Ship Structure Subject to Internal Explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2): 151-158. (in Chinese)
侯海量，朱 锡，梅志远. 舱内爆炸载荷及舱室板架结构的失效模式分析 [J]. 爆炸与冲击，2007，27(2)：151-158.

[6] Gong M. Research on Dynamic Characteristics and Damage Effect of Multi-Layer Frame Structure under Blasting Shock [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
龚 敏. 爆炸冲击作用下多层框架结构的动力特性与毁伤效应研究 [D]. 武汉：武汉理工大学，2007.

[7] Yuen S C K, Nurick G N. Experimental and Numerical Studies on the Response of Quadrangular Stiffened Plates (Part Ⅰ): Subjected to Uniform Blast Load [J]. Int J Impact Eng, 2005, 31: 55-83.

[8] Zhang Y, Xiong J J, Jiao X Q. Research on Measurement Technology of Ship Damage Effect Attacked by Missile [D]. Taiyuan: North University of China, 2008. (in Chinese)
张 燕，熊继军，焦新泉. 导弹攻击舰船毁伤效果测试技术研究 [D]. 太原：中北大学，2008.

[9] Fuze Design Drafting Group. Fuze Design Manual [M]. Beijing: National Defense Press, 1978: 53-326. (in Chinese)
引信设计手册编写组. 引信设计手册 [M]. 北京：国防工业出版社，1978：53-326.

[10] Sun Y B. Explosion Function and Charge Design [M]. Beijing: National Defense Press, 1987: 217-218. (in Chinese)
孙业斌. 爆炸作用与装药设计 [M]. 北京：国防工业出版社，1987：217-218.

[11] Huang S F, Zhana Z A. GJB 763.4—89 Limits and Methods of Ship Noise and Vibration Acceleration Measurement of Ship Equipment [S]. Beijing: Commission on Science, Technology, and Industry for National Defense, 1989. (in Chinese)
黄书富，张增安. GJB 763.4—89 舰船噪声限值和测量方法舰船设备结构振动加速度测量 [S]. 北京：国防科学技

术工业委员会,1989.

[12] Ma J Z,Zhu X M,Jiang Y,et al. GJB 4058—2000 Ship Equipment Noise and Vibration Measurement [S]. Beijing: Commission on Science, Technology,and Industry for National Defense,2000. (in Chinese)
马建忠,朱显明,蒋　宜,等. GJB 4058—2000 舰船设备噪声、振动测量方法 [S]. 北京:国防科学技术工业委员会,2000.

Experimental Study on Damage Effect of Simulated Ship Cabin Subjected to Missile Dynamic Explosion

DU Hong-Mian[1,2], WANG Yan[1,2], ZU Jing[1,2],
XU Peng[1,2], MA You-Chun[1,2,3]

(1. *National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*;
2. *Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*;
3. *Institute of Opt-electronics, Beihang University, Beijing* 100191, *China*)

Abstract: An experiment of missile dynamic explosion carried by rocket sled was performed. The structure size of simulated cabin, layout of testing points and properties of used instruments were introduced. According to broken lines, acquired light, pressure and acceleration signals, three conclusions were made as follows: First, the designed testing method is effective; Second, the transmission of shock wave in cabin is uneven, while the reflection shock wave on the missile moving direction is about 3.5 times of the other side; The shock wave pressure on the cube corner of cabin is higher than normal reflection pressure on the wall; Finally, the impact vibration on the penetrating bulkhead is about 10 000g, which is much higher than other points; The vibration amplitude of bulkhead will increases as hit by shell fragments.

Key words: rocket sled; dynamic explosion; simulated cabin; shock wave; impact vibration