

文章编号: 1001-1455(2008)05-0476-05

# 防护模型在接触爆炸作用下的破坏\*

徐定海<sup>1</sup>, 盖京波<sup>1</sup>, 王 善<sup>1</sup>, 唐 平<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 根据大型舰船的多层防护结构, 制作了具有多层隔舱的模型, 在外层板中心分别进行了 3 种药量的接触爆炸。通过分析破口的形状、破坏程度来研究舰船多层防护的作用。通过试验得出, 多层防护的空舱对爆轰产物和爆炸冲击波具有良好的膨胀衰减作用, 液舱则对粒子流、爆轰产物和冲击波的衰减作用明显。舰船的多层防护体系对减小爆炸冲击的损伤具有重要作用。

**关键词:** 爆炸力学; 防护模型; 接触爆炸; 防护结构

**中图分类号:** O383.3; U663

**国标学科代码:** 130 · 3520

**文献标志码:** A

## 1 引 言

水下接触爆炸载荷作用下, 舰体水下部分会产生破口, 正确计算破口的形状和尺寸是研究舰艇遭受攻击后的破损、不沉性、剩余稳定性的基础<sup>[1-5]</sup>。由于水下爆炸和舰船动态响应的复杂性, 对舰船水下爆炸动响应的认识主要来自试验现象和试验数据的分析。朱锡等<sup>[6]</sup>、刘润全等<sup>[7]</sup>对加筋方板在水下接触爆炸作用下的破坏进行了试验, 对破口长度估算公式进行了修正。吴有生等<sup>[8]</sup>试验了在 1 kg TNT 炸药在不同距离处爆炸作用下平板中心的位移, 根据能量原理得出了破口的估计值。但这些试验都是针对单层板结构, 大型舰船在关键部位都有装甲和隔舱等防护措施来提高整个舰船的生命力。为了研究接触爆炸对多层防护体系的破坏情况, 本文中开展防护模型在接触爆炸作用下的破坏试验, 研究模型的破口形状、尺寸及破口周围的变形情况以及爆炸冲击波在结构中的传递规律。探讨模型结构典型部位的冲击响应情况, 为理论分析提供依据。

## 2 试验方法

试验件数量为 3 个, 按不同的药量 20、200、400 g 共进行 3 次试验, 设计了如图 1 所示的试验防护模型。试验模型的靶板材料均为 4 mm 厚的 Q235, 板与板之间的连接方式采用焊接, 形成 3 个舱室, 其中 2 个空舱, 1 个液舱, 液舱中的液体为水。

试验中使用 24-1-3D 雷管, 1 个模型实施 1 次爆炸, 每个装药药柱均使用 PENT 炸药圆片作为传爆药柱。第 1 和第 2 个模型使用多片压制成型的 TNT/RDX 装药, 第 3 个模型使用整体铸装成型的 TNT/RDX 装药, 炸药安装在每个模型试件第 1 层靶板的中心位置, 如图 2 所示; 模型的测点布置如图 3 所示。

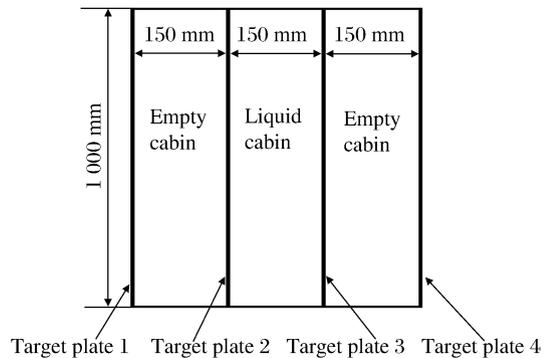


图 1 防护模型示意图

Fig. 1 Sketch of a defense model

\* 收稿日期: 2007-03-30; 修回日期: 2007-08-21

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金项目(10276013);  
哈尔滨工程大学基础研究基金项目(002020260719)

作者简介: 徐定海(1963—), 男, 高级工程师。

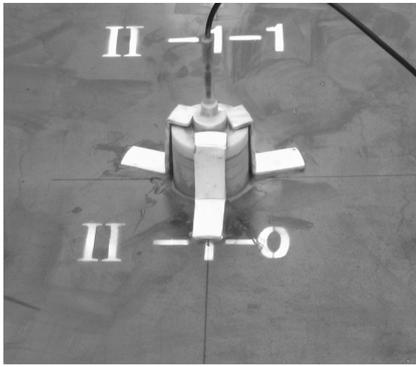


图 2 炸药的安装方式

Fig. 2 Arrangement of explosive

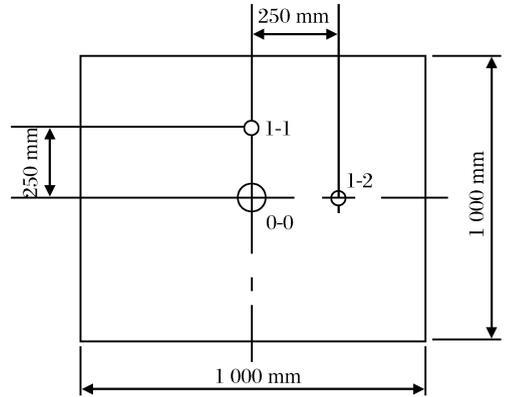


图 3 试验测点布置图

Fig. 3 Layout of the measuring points

压力测试系统由 1 台同步机控制，它输出的 1 路信号触发高压起爆台，由起爆台输出的脉冲高压起爆装药中的雷管；同步机的另 3 路信号分别触发 3 台示波器，用来记录压力计所产生的经电荷积分器转换的电压信号。压电薄膜传感器采集的电压信号经转换得到冲击波的压力。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 破口情况

试件 1 试验后形成的破口见图 4。第 1 层靶板中心形成 1 个不规则的“菱形”，横向（水平方向）宽度为 550 mm，纵向（垂直方向）的宽度为 340 mm，靶板向背面凸起后撕裂。第 2 层靶板的中心处形成了 1 个直径为 34 mm 的圆形穿孔，孔径略小于炸药柱直径（36 mm），其余部分无明显变化。这是由于第 1 层靶板与药柱直接接触的部分在炸药爆轰结束后，受高强度爆炸冲击波及高速运动的高温高压爆炸产物的共同作用，已变成流体状态的高速铁粒子高速冲击第 2 层靶板，使第 2 层靶板中间形成圆形孔；由于受液舱中水的阻滞，当达到第 3 层靶板时，其能量已基本耗尽，该高速铁粒子对第 3 层靶板的冲击在第 3 层靶板中只形成了 1 个很小的塑性变形区，没有大的整体塑性变形。

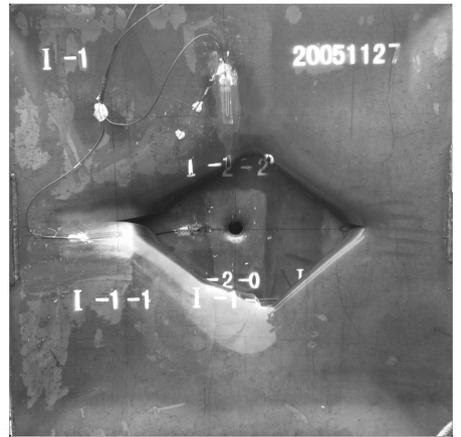


图 4 模型 1 的破口

Fig. 4 Crevasse of the model 1

试件 2 试验后形成的破口如图 5 所示。在第 1 层靶板的中心形成了 1 个不规则的圆形孔，孔径约为 240 mm，靶板撕裂后向后卷起形成 10 多个花瓣，最大突起高度为 280 mm。破口周围正面有明显的爆炸产物冲刷的迹象。第 2 层靶板的中心形成了 1 个直径为 65 mm 的圆形穿孔，该层靶板的 2 个测点（2-0、2-1）的压力计均遭到破坏。第 2 层的破坏形成周边锯齿形的中间圆环是由于第 1 层靶板所形成的花瓣对第 2 层的冲击造成的。第 2 层靶板在液舱一侧的中心位置有 1 个小凹坑，板的其余部分未出现明显变化。

试件 3 试验后形成的破口如图 6 所示。第 1 层靶板中间出现不规则花瓣式圆形破口，破坏直径约为 200 mm。第 2 层靶板的中间形成周边带有花瓣的不规则椭圆形孔，其横向长轴长约为 410 mm，纵向短轴长约为 320 mm。整个靶板略显向内凹陷，该层靶板测点处（3-2-0）的压力计已破坏。第 2 层靶板整体稍向液舱方向凹陷。中心未形成较大的规则孔洞，只留下一向空舱方向的凹痕。

由于药量较大，冲击波虽经空舱的衰减及对爆炸产物的稀疏，仍有足够的能量使第 2 层靶板形成较大的破口。另外，由于稀疏波对爆炸产物的稀疏作用，使爆炸产物的体积膨胀，从而对第 2 层的作用范围变大，因此，第 2 层靶板形成的破口尺寸比第 1 层的略大。

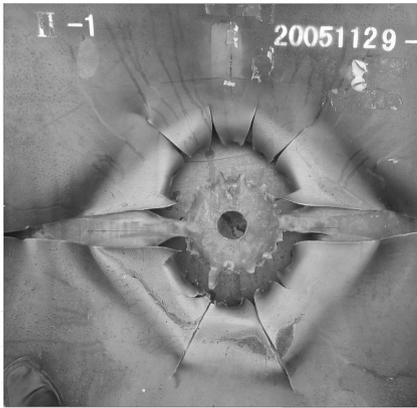


图5 模型2的破口

Fig. 5 Crevasse of the model 2

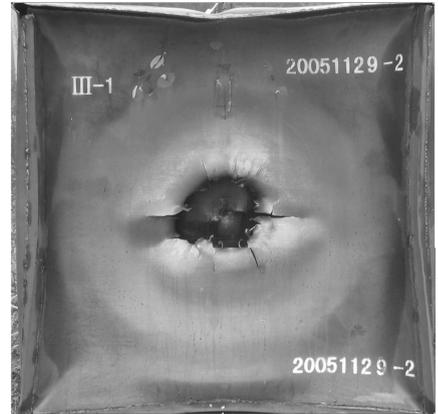


图6 模型3的破口

Fig. 6 Crevasse of the model 3

通过对3个试件破坏情况的综合分析可知:炸药爆轰结束后,与炸药直接接触部分的靶板,在强冲击波的作用下,形成高速运动的铁粒子流,空舱对该铁粒子流影响很小。高速铁粒子流继续撞击第2层靶板,使第2层靶板受撞击部分同样形成液态高速铁粒子流。由于液舱中水的阻滞作用,使铁粒子的速度大大降低,难以对第4层靶板形成破坏作用,只能对第3层靶板产生局部破坏。在各层出现破口后,主要由于爆炸产物高温高压及高速运动的作用,使破口尺寸扩大并出现花瓣;爆炸产物因稀疏波作用而膨胀,对以后各层靶板的作用范围扩大,从而使后续靶板的破口尺寸逐次变大。

### 3.2 各测点的压力

从试验中发现,3个试件第1层靶板各测点都有2个冲击波的峰值压力,如图7~9所示。其原因是,当炸药爆轰完成后,在与炸药接触的局部靶板受到高强度冲击波冲击的同时,冲击作用引发了在板平面内传播的冲击波。由于这一冲击波在板中传播的速度较快,被压力计首先测到,但这一冲击波较弱。另外,由于爆炸产物在水中的膨胀,从而产生了水中冲击波,水中冲击波传播速度较慢,后被压力计测到,这一冲击波强度较大,使靶板造成破坏。

在其他层靶板的测点压力波形出现振荡,如图10~12所示。开始较短距离内,空舱中粒子流速度高于冲击波速度,形成第2层靶板上各测点的第1个峰值压力,正冲击波也产生峰值压力。炸药爆轰产物的运动速度略低于粒子流和冲击波的速度,同样会产生压力峰值。同时,由于板中冲击波的传播及冲击波在各介质中的反复透射、折射,使得第2层靶板及以后各层靶板测点处的压力波形出现反复振荡。

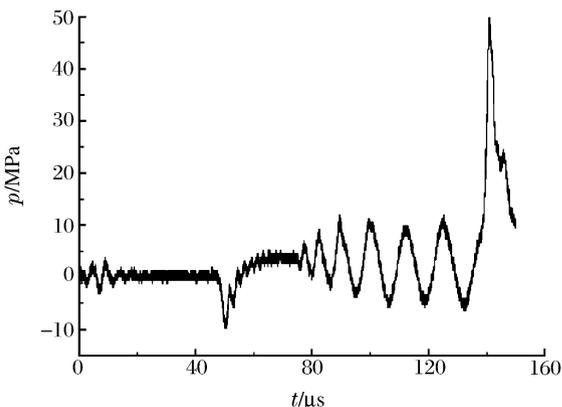


图7 模型1第1层板测点1-1处的压力曲线

Fig. 7 Pressure curve of the 1-1 point of the first plate in the model 1

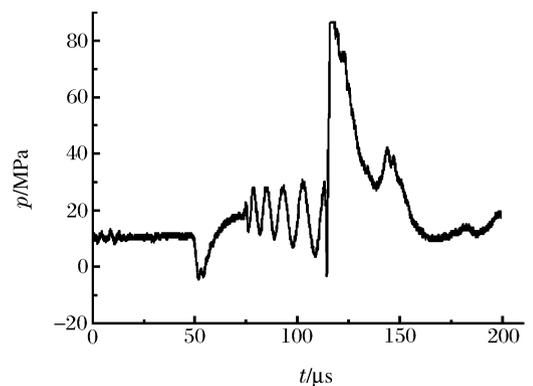


图8 模型2第1层板测点1-1处的压力曲线

Fig. 8 Pressure curve of the 1-1 point of the first plate in the model 2

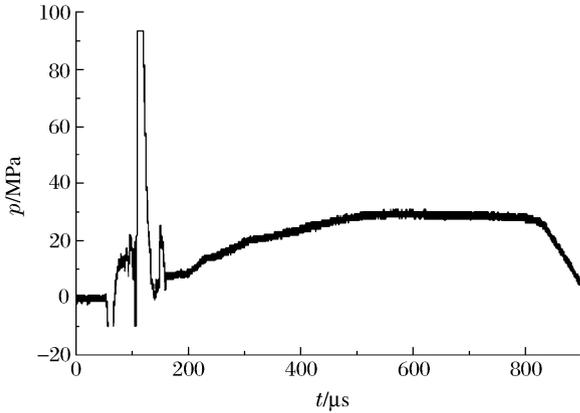


图 9 模型 3 第 1 层板测点 1-1 处的压力曲线

Fig. 9 Pressure curve of the 1-1 point of the first plate in the model 3

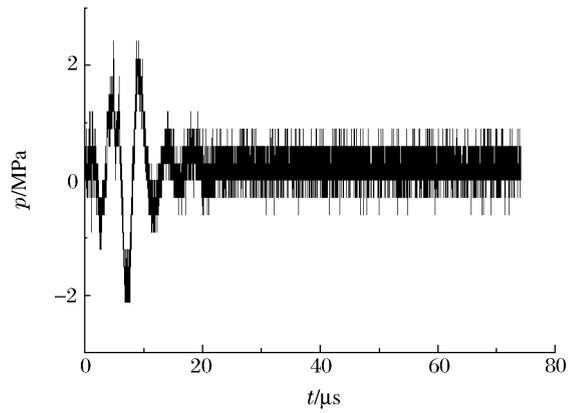


图 10 模型 1 第 2 层板测点 1-2 处的压力曲线

Fig. 10 Pressure curve of the 1-2 point of the second plate in the model 1

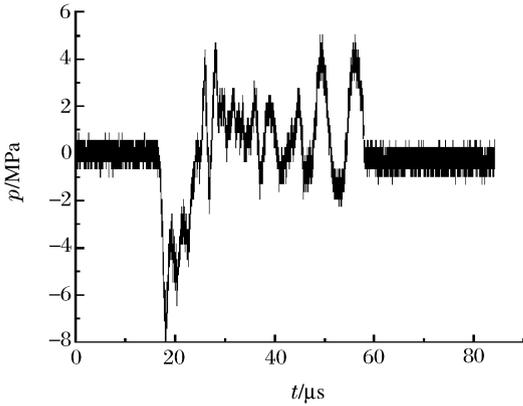


图 11 模型 2 第 2 层板测点 1-2 处的压力曲线

Fig. 11 Pressure curve of the 1-2 point of the second plate in the model 2

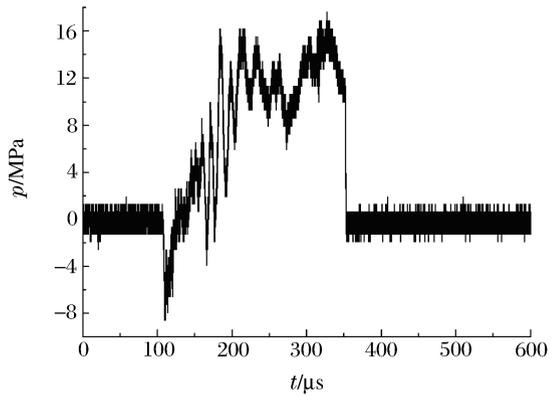


图 12 模型 3 第 2 层板测点 1-2 处的压力曲线

Fig. 12 Pressure curve of the 1-2 point of the second plate in the model 3

### 3.3 各舱的作用

对于试件 1 而言,20 g 装药使第 1 层靶板遭到了较大的破坏。但对于第 2 层靶板,除中间冲击 1 个圆孔外,靶板其余部分完好无损,表明第 1 层空舱对冲击波有很强的衰减作用和对爆炸气体有很强的吸纳作用。但空舱对粒子流的防护能力较差。试件 1 和试件 2 的第 2 层靶板被破片击穿就说明这一点。

从试件 3 试验后情况可以看出,冲击波及爆炸产物的气体对第 1 层和第 2 层靶板的冲击很大,但第 3 层靶板的破坏处,这种冲击作用不明显。液舱既能对粒子流起到很好的阻滞作用,又能对冲击波起到很好的衰减作用,对爆炸气体起到阻滞作用。

### 4 结论

装药在防护结构外水下接触爆炸时,爆炸首先产生高温高压气体并迅速向外膨胀,爆轰产物在瞬间破坏外板的同时,爆轰产物迅速向内部飞散。多层防护的空舱对爆轰产物和爆炸冲击波具有良好的膨胀衰减作用,有效地缓冲爆轰产物的冲击压力。装满液体的液舱,能够吸收外板炸坏产生的粒子流和爆轰产物;在液舱后的空舱,起到隔断冲击波的作用,降低对防御纵壁的破坏作用。

通过试验得出,接触爆炸对多层防护结果的局部破坏(产生破口)具有明显的效果。试验模型所采用的结构形式对接触爆炸具有很好的阻隔防护作用,亦即具有很强的抗爆能力。这既为舰船的抗爆设计提供了试验依据,也为武器战斗部设计提出了新的课题。

## 参考文献:

- [1] 吉田隆. 旧海军舰船の爆弾被害损伤例について[J]. 船の科学, 1990, 43(5):69-73.
- [2] Stoffel M, Schmidt R, Weichert D. Shock wave-loaded plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001(38):7659-7680.
- [3] Olson M D, Nurick G N, Fagnan J R. Deformation and rupture of blast loaded square plates predictions and experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993(23):279-291.
- [4] Houlstonhe R, Slater J E, Pegg N, et al. On analysis of structural response of ship panels subjected to air blast loading[J]. Computers and Structures, 1985, 21(1):273-289.
- [5] Rudrapatna N S, Vaziri R, Olson M D. Deformation and failure of blast-loaded stiffened plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(5):457-474.
- [6] 朱锡, 白雪飞, 黄若波, 等. 船体板架在水下接触爆炸作用下的破口试验[J]. 中国造船, 2003, 44(1):46-52.  
ZHU Xi, BAI Xue-fei, HUANG Ruo-bo, et al. Crevasse experiment research of plate membrane in vessels subjected to underwater contact explosion[J]. Shipbuilding of China, 2003, 44(1):46-52.
- [7] 刘润泉, 白雪飞, 朱锡. 舰船单元结构模型水下接触爆炸破口试验研究[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(5):41-46.  
LIU Run-quan, BAI Xue-fei, ZHU Xi. Breach experiment research of vessel element structure models subjected to underwater contact explosion[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(5):41-46.
- [8] 吴有生, 彭兴宁, 赵本立. 爆炸载荷作用下舰船板架的变形与破损[J]. 中国造船, 1995, 36(4):55-61.  
WU You-sheng, PENG Xing-ning, ZHAO Ben-li. Plastic deformation and damage of naval panels subjected to explosion loading[J]. Shipbuilding of China, 1995, 36(4):55-61.

## Deformation and failure of layered defense models subjected to contact explosive load

XU Ding-hai<sup>1</sup>, GAI Jing-bo<sup>1\*</sup>, WANG Shan<sup>1</sup>, TANG Ping<sup>2</sup>

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. Institute of Structure Mechanics, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** Three layered defense models were designed based on the multiplayer defense structure of a warship. Contact explosion experiments with three different masses of explosive were carried out three times in the centers of the outside plates. The defense effects of multiplayer structures were explored by analyzing the dimension and shape of crevasses. Experimental results show: (1) the vacant cabin of the multiplayer defense structure has great importance to expand and decompress the effect of detonation products and shock wave; (2) liquid cabin can alleviate the damage of fragments, detonation products and shock wave. The multiplayer defense structure has great importance to diminish the damage of contact explosion.

**Key words:** mechanics of explosion; defense model; contact explosion; defense structure

\* Corresponding author: GAI Jing-bo

E-mail address: gaijingbo@hrbeu.edu.cn

Telephone: 86-451-82589025