

## 水下接触爆炸下液舱前置型防雷舱的动响应分析\*

金 键<sup>1</sup>, 侯海量<sup>1</sup>, 陈鹏宇<sup>1</sup>, 黄晓明<sup>2</sup>, 吴林杰<sup>1</sup>, 朱 锡<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91189 部队, 江苏 连云港 222041)

**摘要:**为探讨防雷舱结构设计,采用有限元方法对同一防雷舱结构的典型模式和液舱前置模式进行数值仿真计算,通过对典型模式与实验结果的对比,验证了数值计算方法的有效性。着重分析了液舱前置对防雷舱结构动响应过程、失效模式及防护效能的影响,并分析了其形成机制。从结构破坏过程、载荷特性、吸能特性三个方面对比了两种模式的差异,探讨了两种模式防雷舱结构的防护机理,为舰船水下舷侧防护结构的工程设计提供了参考。

**关键词:**防雷舱;水下接触爆炸;液舱前置;动响应;失效模式

**中图分类号:** O344.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)03-142-06

## Dynamic responses analysis of pre-liquid cabin of multi-layered protective structure subjected to underwater contact explosions

JIN Jian<sup>1</sup>, HOU Hailiang<sup>1</sup>, CHEN Pengyu<sup>1</sup>, HUANG Xiaoming<sup>2</sup>, WU Linjie<sup>1</sup>, ZHU Xi<sup>1</sup>

(1. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. The PLA Unit 91189, Lianyungang 222041, China)

**Abstract:** In order to probe into the design of multi-layered protective structure, the finite element method was used to simulate the typical mode and the pre-liquid cabin mode of the same multi-layered protective structure, and the validity of numerical simulation method was verified by comparison of the typical mode and experimental results. The influences of the pre-liquid cabin mode on the dynamic response process, the failure mode and the protective efficiency of the multi-layered protective structure were analyzed specifically, and its forming mechanism was analyzed. The differences between the two modes were compared from the following three aspects: the structure failure process, the load characteristics and the energy absorption characteristics. Finally, the protective mechanism of multi-layered protective structure is discussed, which provides a reference for the engineering design of underwater broadside protection structure of surface vessels.

**Key words:** multi-layered protective structure; underwater contact explosion; pre-liquid cabin; dynamic responses; failure mode

为有效抵御水中武器接触爆炸的破坏作用,在水下舷侧设置具有3~4道防护隔舱的防雷舱结构(见图1)的防护措施已得到广泛认可<sup>[1-4]</sup>。其结构形式及防护机理通常表述为:第一层为空舱,给接触爆炸时的外板提供变形的空间,并迅速衰减爆炸产生的冲击波压力,因而称为膨胀空舱;第二层舱室一般为液舱,使鱼雷爆炸破片和外板破裂的二次破片在高速穿入液舱后速度迅速衰减,因而称为吸收液舱;第三层舱室又为空舱,一方面供基本防御纵壁发生大变形吸能,另一方面为基本防御纵壁损坏后形成的冲击压力作第二次缓冲,以保护防水纵壁免遭破坏。

从西方海军强国的大型舰船水下舷侧防雷舱结构的发展来看,二战末期的美国“中途岛号”和英国的“马耳他号”航空母舰均将液舱置于舷侧第一层<sup>[5]</sup>,此种形式的防雷舱结构在后续的大型舰船水下舷侧防护应用中逐渐被目前各国的大型舰船水下舷侧防雷舱的典型模式结构(即“空-液-空”模式)取代。

目前国内对液舱前置防雷舱结构在水下接触爆炸下动响应的研究仍属空白,本文采用有限元方法分析了将液舱结构前置后,防雷舱结构在水下接触爆炸下的动响应过程和破坏模式,并对比后置液舱形式在相同爆炸载荷下的不同点。

\* 收稿日期:2017-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51479204,51409253,51679246)

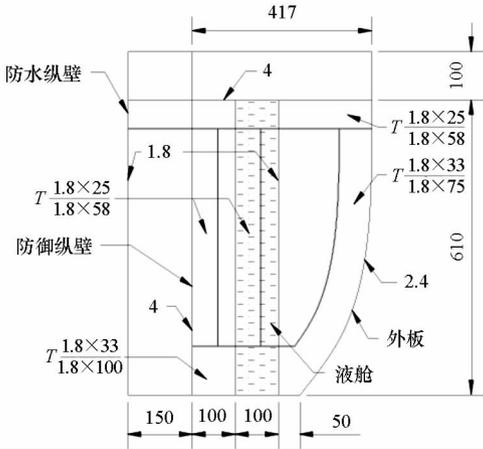
作者简介:金键(1990—),男,江苏连云港人,博士研究生,E-mail:nuejinjian@163.com;

侯海量(通信作者),男,高级工程师,博士,硕士生导师,E-mail:houlh11104@163.com

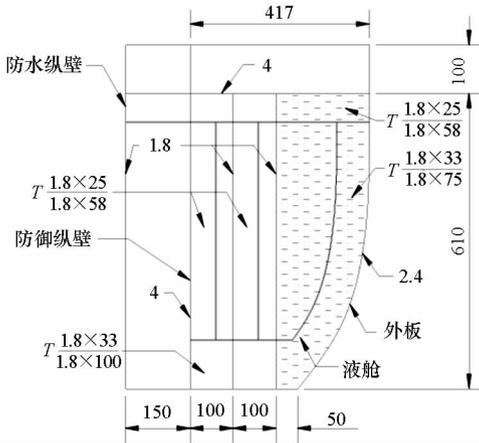
# 1 有限元分析模型

## 1.1 计算模型

采用显式动力分析有限元程序 LS-DYNA 对文献[1]中模型 3 在水下接触爆炸下的动响应进行模拟分析。结构模型尺寸如图 1 所示,包括典型模式和液舱前置模式(单位为 mm)。



(a) 典型模式  
(a) Typical model



(b) 液舱前置模式  
(b) Pre-liquid cabin model

图 1 结构模型横剖面图

Fig. 1 Transverse section of model

防雷舱结构全部采用壳单元进行建模,空气域和水域采用 Euler 网格进行建模,建模时采用 kg-mm-ms 单位制。四周边界采用固支约束以模拟文献[1]中的爆炸筒试验场景;模型中所有的结构定义为自接触以模拟破片的侵彻现象;在欧拉域内施加重力场以实现静水压力梯度,并在空气域顶部施加大气压。通过初始化命令实现以下三点:①液舱内装满水;②除液舱外的防雷舱其余空间充满空气;③水下 300 mm 深舷侧外板处放置 300 g 柱型 TNT 炸药。以典型模式为例,整体

有限元模型示意图如图 2 所示(欧拉域及结构尺寸未按实际比例显示,单位为 mm)。

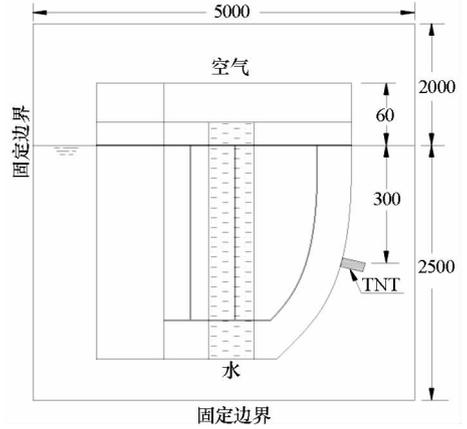


图 2 整体有限元模型示意图

Fig. 2 Schematic of finite element model

## 1.2 材料特性

防雷舱结构中的甲板和防御纵壁为低合金船用钢,其余材料均为普通船用钢,采用双线性弹塑性本构模型,材料的应变率效应由 Cowper-Symonds 模型描述,动态屈服强度  $\sigma_d$  为:

$$\sigma_d = \left( \sigma_0 + \beta \frac{EE_h}{E - E_h} \varepsilon_p \right) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/n} \right] \quad (1)$$

式中: $\sigma_0$  为静态屈服强度, $E_h$  为应变硬化模量, $\varepsilon_p$  为有效塑性应变, $\dot{\varepsilon}$  为等效塑性应变率; $D$ 、 $n$  为应变率参数;材料失效模型采用最大塑性应变失效。材料参数取自文献[6],如表 1 所示。

表 1 结构材料参数

Tab. 1 Material parameters for structure

参数	普通船用钢	低合金船用钢
$\sigma_0/\text{MPa}$	235	390
$\nu$	0.3	0.3
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7800	7800
失效应变 $\varepsilon_f$	0.28	0.28
$E/\text{GPa}$	210	210
$E_h/\text{MPa}$	250	468
$C/\text{s}^{-1}$	40.4	4600
$n$	5	0.79

对于水下接触爆炸作用下防雷舱结构的动态响应数值计算来说,涉及空气、水、炸药和船体结构钢四种物质。假设空气为理想气体,其状态方程<sup>[7]</sup>如下:

$$P = (\gamma - 1) \rho e \quad (2)$$

式中： $p$  为空气压力，设为  $1.0 \times 10^5$  Pa； $\rho$  为空气密度，初始密度设为  $1.1848 \text{ kg/m}^3$ ； $e$  为内能，设为  $2.11 \times 10^5 \text{ J/kg}$ ；而  $\gamma$  则为比热，设为 1.4。

假设水为可压缩但无黏性无旋性的流体，它的状态方程<sup>[8]</sup>采用 Mie-Gruneisen 方程，则：

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{v_0} - 1 \quad (4)$$

式中： $P$  为水的初始压力； $\mu$  为水的压缩度； $v_0$  为水的相对初始体积； $\rho_0$  为水的密度，取  $1000 \text{ kg/m}^3$ ； $c$  为  $v_s - v_p$  曲线的斜率（声速），取  $1484 \text{ m/s}$ ； $\gamma_0$  为格吕内森参数，取 0.11； $a$  为  $\gamma_0$  和  $\mu$  的一阶体积修正量，取 3； $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  分别为曲线拟合参数，取  $S_1 = 1.979$ 、 $S_2 = S_3 = 0$ 。 $E$  为水的初始体积内能，由于水几乎不可压缩，取值设为 0。

TNT 炸药采用 JWL (Johes-Wilking-Lee) 状态方程<sup>[9]</sup>：

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0}{V} \quad (5)$$

式中：炸药的初始密度为  $1630 \text{ kg/m}^3$ ， $V$  为爆轰产物体积和炸药初始体积的比值，初始值为 1； $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为特征参数。各参数取值为： $A = 371.2 \text{ GPa}$ ， $B = 3.231 \text{ GPa}$ ， $R_1 = 4.15$ ， $R_2 = 0.95$ ， $\omega = 0.3$ ； $e_0$  为单位体积内能，取  $7 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ ；TNT 炸药的爆轰压力  $P_{\text{CJ}} = 21 \text{ GPa}$ ，爆速  $D = 6930 \text{ m/s}$ 。

## 2 算法验证

为了验证该数值算法的准确性，将典型模式的数值计算结果与文献[1]中的模型 3 实验结果进行对比。

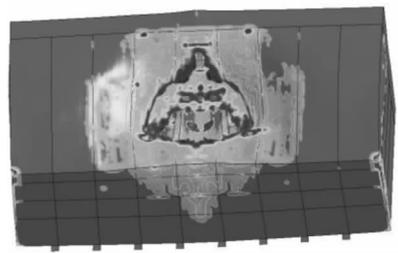
观察实验和数值仿真结构的整体破坏情况（如图 3 所示），两者的外板、液舱前壁、液舱内壁均产生破口，底板舷侧炸药下方出现翘曲，其余结构不同程度发生塑性变形。对比实验及数值仿真结果的破口情况，由于破口形状很难用某种具体形状表述，这里仅以防雷舱水平向和垂直向上的破口尺寸分别进行比较，舷侧外板和液舱外板破口大小的对比列于表 2。从表 2 可以看出，数值仿真结果的舷侧外板破口大小与实验结果较为吻合，液舱外板水平向破口尺寸误差约为 16%，垂直向误差约为 10%，而液舱内板的破口大小差距

较大，尤其是水平向，这是因为在实验工装中，液舱内板上的焊缝质量较差，导致液舱内板出现了较长的横向撕裂。总体来说，数值仿真计算结果能很好地反映实验情况。



(a) 实验结果

(a) Experimental results



(b) 数值仿真结果

(b) Numerical simulation results

图 3 典型模式的整体破坏情况

Fig. 3 Entirety destruction of typical layered defense model

表 2 破口大小对比

Tab. 2 Comparison of crevasse size m

破口位置	实验结果		数值仿真结果	
	水平向	垂直向	水平向	垂直向
舷侧外板	0.43	0.34	0.440	0.325
液舱外板	0.38	0.33	0.317	0.286
液舱内板	0.30	0.10	0.135	0.087

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 结构破坏过程

对液舱前置模式防雷舱结构在相同药量的水下接触爆炸过程进行数值仿真模拟。为观察两种模式防雷舱结构的内部破坏过程，以防雷舱结构的中横剖面为视角，选取典型时刻下结构的破坏状况（如图 4、图 5 所示）。

为了便于描述两种结构的破坏过程并避免混淆结构名称，仍以典型模式下的结构名称进行描述。通过对比两种模式的结构破坏过程，可以得到以下破坏特征：

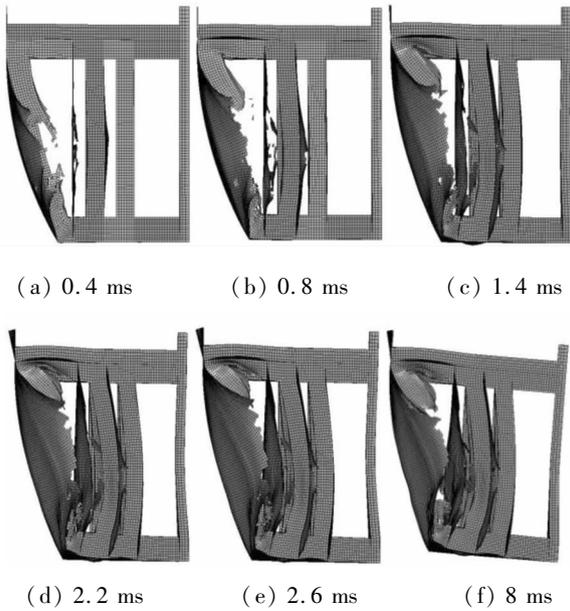


图4 典型模式结构破坏过程

Fig. 4 Destructive process of typical model

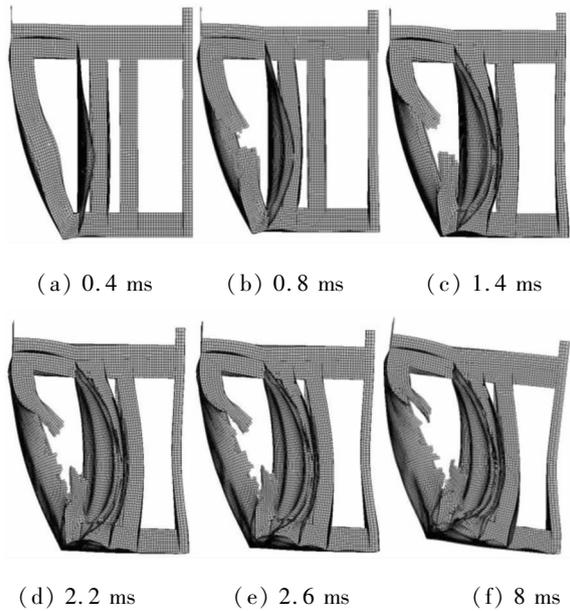


图5 液舱前置模式结构破坏过程

Fig. 5 Destructive process of pre-liquid cabin model

1)在典型模式的结构破坏过程中,由于舷侧外板遭到破坏,产生了大量的高速破片,致使液舱外板和液舱内板相继被破片侵彻而产生了破口;而液舱前置模式在整个结构破坏过程中仅产生了少量破片且并未对液舱外板产生侵彻穿透,液舱外板上破口的产生主要是由于拉伸断裂导致,长度方向上的破口尺寸远小于其高度方向,这是因为舷侧外板上的加强筋限制了破口的横向扩展,而液舱内板仅出现塑性大变形而未产生破口,最大位移为 137.4 mm。液舱内、外板的破口形式与破口尺寸如图 6 所示。

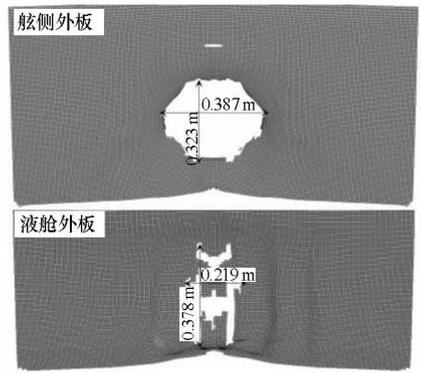


图6 板材破口形式及尺寸

Fig. 6 Crevasse mode and size of panels

2)液舱前置模式下,舷侧外板破坏后由于高压气团的膨胀,前置液舱内的水不断向内挤压,液舱外板很快出现了塑性大变形,在 0.8 ms 后继续向内挤压液舱内板上加筋结构继而使液舱内板出现塑性大变形,并在 1.4 ms 后开始挤压防御纵壁,液舱前置模式下防御纵壁的最大位移为 85.3 mm;相比之下,典型模式中的液舱外板、液舱内板和防御纵壁发生变形的时间要晚于液舱前置模式,典型模式下防御纵壁的最大位移为 60.1 mm。总体来说,典型模式下各层板的变形相较于液舱前置模式要小。

3)典型模式下,水下爆炸产生的高压气团与第一层空舱形成了较大的压差,致使爆炸区域附近舷侧外板向内发生较大位移,这也导致了其舷侧加筋和甲板加筋相互挤压而严重变形;相比液舱前置模式,破口边缘区域的外板变形较小,第一层舱内的舷侧外板加筋和甲板加筋变形较小。

4)8 ms 时,两种模式下的防雷舱整体结构都出现了一定程度的翻转,底板舷侧炸药下方均出现翘曲。

### 3.2 载荷特性分析

对于典型模式防雷舱结构,液舱外板所载荷非常复杂,但根据所载荷特性大致可分为正反射区、马赫反射区和角隅汇聚区三个部分<sup>[10]</sup>,区域划分如图 7 所示。

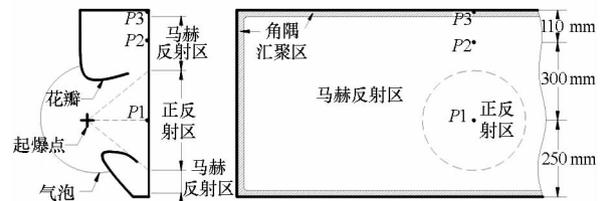


图7 液舱外壁载荷特性分区

Fig. 7 Zone of cabin wall load characteristic

正反射区的形成过程:装药爆炸后,舷侧外板迅速产生破口,爆炸冲击波直接传播至液舱外板并发生正反射,爆炸产生的高压气团会再次冲撞该区域,因此该区域内的载荷形式呈现多峰值。

马赫反射区的形成过程:当冲击波以较大入射角传播至舱壁板后,将发生马赫反射。马赫反射区内的冲击波压力相比正反射区要小,这是由于舷侧外板向内挠曲产生的花瓣的阻挡作用和马赫反射区距离爆炸点相对较远造成的。马赫反射区内的作用载荷以高压气团在舱内弥散产生的准静态压力为主。

角隅汇聚区的形成过程:爆炸产物和冲击波会在舱壁与舷侧外板之间来回反射,随后爆炸产物和冲击波以类似于平面波的形式在舷侧外板和舱壁间扩散,当传播至舱壁角落处时形成了角隅汇聚。

为获得舱壁所承载荷特性,取舱壁前欧拉单元的压力作为舱壁实际承受的压力,选取图 7 所示各分区内的典型测点 P1 ~ P3,其压力时程曲线如图 8 所示。

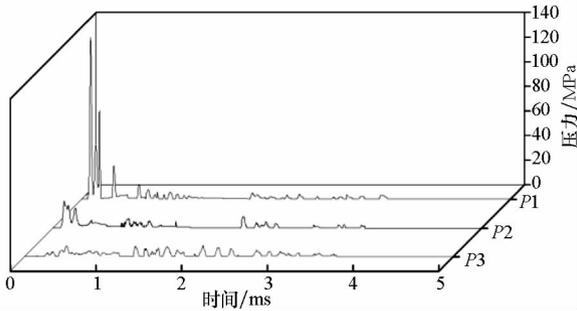


图 8 典型模式下典型测点压力时程曲线  
Fig. 8 Pressure time history of typical measure point under typical mode

液舱前置后,防雷舱结构的第一道舱壁所承受的内压载荷较典型模式有很大的区别。装药爆炸后,初始冲击波通过水介质向内传播,当冲击波作用在舱壁板上时,使其发生运动。舱壁板的运动又反射回一束稀疏波,它可把水压降低到比水的汽化压力还低,这样就引起了空化现象<sup>[11]</sup>。在一瞬间内,空化引起的一股水汽把舱壁板与水隔开。由于边界的约束,使得舱壁板的运动慢下来,然后膨胀的水又追上了舱壁板,对其形成突然且猛烈的冲击作用,对舱壁板形成二次加载。仍以图 7 所示 P1 ~ P3 点作为压力输出点,如图 9 所示。

### 3.3 吸能特性分析

炸药物质设置为紧邻舰船外板的柱形装药,理论装药量为 300 g,比内能为  $E = 7 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ 。

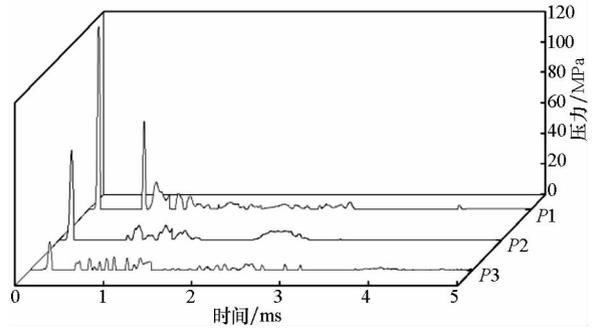


图 9 液舱前置模式下典型测点压力时程曲线  
Fig. 9 Pressure time history of typical measure point under pre-liquid cabin mode

由于有限元网格尺寸的影响,实际装药量为 301.9 g,总内能为 1296.5 kJ。

从能量观点来看,爆炸产生的总内能一部分在气泡膨胀过程中将能量逐渐传递给水,另一部分以冲击波的形式向外辐射。典型模式防雷舱在外板破损后将在爆炸气团内迅速形成稀疏波,使得向水中辐射的冲击波强度迅速减弱,从而减小了向水中辐射的冲击能,而增大了向船体内部辐射的冲击能;另一方面,爆炸产生的高压气团向船体内部扩散的阻力远小于向水中的阻力,从而使得大量爆炸产物及其能量进入船体内部(又称腔吸现象),对内部结构产生破坏。而液舱前置模式防雷舱结构由于第一层液舱的阻挡作用,高压气团不能进入防雷舱内部,结构的变形和破坏主要来自液舱横向大变形造成的挤压变形以及爆炸冲击波的破坏。

以不同舱室的总变形能为比较对象,从舷侧向内依次命名为舱室 1、舱室 2 和其余结构,两种模式下的防雷舱结构的变形能随时间变化曲线如图 10、图 11 所示。

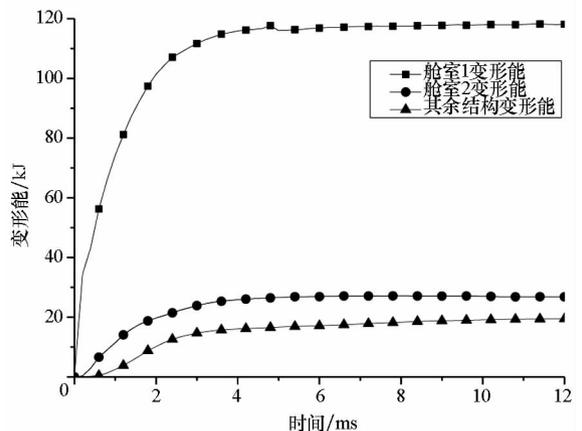


图 10 典型模式下结构变形能  
Fig. 10 Deformation energy of typical mode

结构的总吸能包括结构的变形能和结构的破坏能,在有限元数值计算过程中,结构的总破坏能

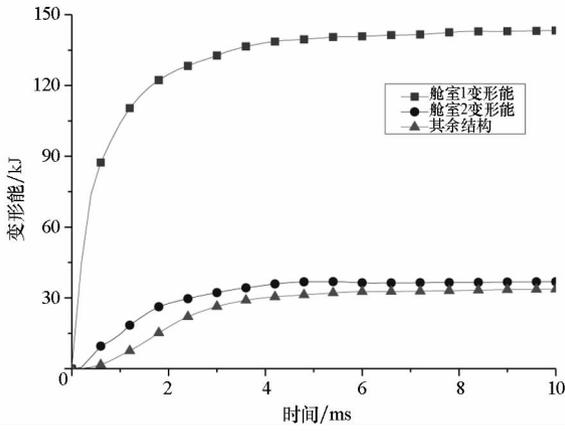


图 11 液舱前置模式下结构变形能

Fig. 11 Deformation energy of pre-liquid cabin mode

会被以删除单元的形式存储,两种模式防雷舱结构吸能情况汇总于表3。

表 3 结构吸能

Tab. 3 Energy absorption of structure kJ

结构类型	典型模式	液舱前置模式
舱室 1 变形能	118.1	143.3
舱室 2 变形能	26.8	36.8
其余结构变形能	19.5	33.7
结构总变形能	164.4	213.8
结构总破坏能	123.6	73.8
结构总吸能	288	287.6

由图 10、图 11 和表 3 可知,距离爆源最近的舱室 1 的变形能最大,液舱前置模式下的各舱室的变形能比典型模式都要大,而典型模式下的结构总破坏能要比液舱前置模式下的结构总破坏能大约 67.5%,由此可以判断:液舱前置模式的整体结构变形要比典型模式的结构变形更为严重;典型模式下产生的破片比液舱前置模式要更多。两种模式下结构的总吸能基本相当,约占爆轰总内能的 22.2%。

#### 4 结论

对防雷舱结构的典型模式和液舱前置模式在相同药量水下接触爆炸下的结构破坏过程、载荷特性和吸能特性的对比分析结果表明:

- 1) 液舱前置模式防雷舱结构的整体变形破坏程度要比典型模式更为严重;
- 2) 典型模式防雷舱结构产生的破片比液舱前置模式要多,破片对防雷舱结构的侵彻破坏更为严重;
- 3) 两种模式防雷舱结构在水下接触爆炸下的总吸能基本相同。

#### 参考文献 (References)

- [1] 朱锡,张振华,刘润泉,等. 水面舰艇舷侧防雷舱结构模型抗爆试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 133-139.  
ZHU Xi, ZHANG Zhenhua, LIU Runquan, et al. Experimental study on the explosion resistance of cabin near shipboard of surface warship subjected to underwater contact explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 133-139. (in Chinese)
- [2] 张振华,朱锡,黄玉盈,等. 水面舰艇舷侧防雷舱结构水下抗爆防护机理研究[J]. 船舶力学, 2006, 10(1): 113-119.  
ZHANG Zhenhua, ZHU Xi, HUANG Yuying, et al. Theoretical research on the defence of cabin near shipboard of surface warship subjected to underwater contact explosion [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(1): 113-119. (in Chinese)
- [3] 徐定海,盖京波,王善,等. 防护模型在接触爆炸作用下的破坏[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(5): 476-480.  
XU Dinghai, GAI Jingbo, WANG Shan, et al. Deformation and failure of layered defence models subjected to contact explosive load [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5): 476-480. (in Chinese)
- [4] 张伦平,张晓阳,潘建强,等. 多舱防护结构水下接触爆炸吸能研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(8): 921-929.  
ZHANG Lunping, ZHANG Xiaoyang, PAN Jianqiang, et al. Energy research about multicamerate defence structure subjected to underwater contact explosion [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(8): 921-929. (in Chinese)
- [5] 陆超. 总体设计[J]. 舰船知识, 2016, 8: 56-63.  
LU Chao. Overall design [J]. Naval and Merchant Ships, 2016, 8: 56-63. (in Chinese)
- [6] 唐廷,朱锡,侯海量,等. 大型水面舰艇防雷舱结构防护机理数值仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(2): 142-149.  
TANG Ting, ZHU Xi, HOU Hailiang, et al. Numerical simulation study on the defence mechanism of a cabin near the shipboard for large surface vessels [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(2): 142-149. (in Chinese)
- [7] 安丰江,施惠基,刘琼,等. 水下爆炸近场压力特性及其与结构的流固耦合作用[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 13-24.  
AN Fengjiang, SHI Huiji, LIU Qiong, et al. Load characteristics of near-field of underwater explosion and its fluid-structure interaction [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 13-24. (in Chinese)
- [8] 吴林杰,侯海量,朱锡,等. 水下接触下防雷舱舷侧空舱的内压载荷特性仿真研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 143-150.  
WU Linjie, HOU Hailiang, ZHU Xi, et al. Numerical simulation on inside load characteristics of broadside cabin of defensive structure subjected to underwater contact explosion [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(1): 143-150. (in Chinese)
- [9] 陈鹏宇,侯海量,吴林杰,等. 水下舷侧多层防护隔舱接触爆炸载荷特性分析[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 283-290.  
CHEN Pengyu, HOU Hailiang, WU Linjie, et al. The analysis of the damage load of the underwater explosion with contact on multi-layered defend cabins [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(2): 283-290. (in Chinese)
- [10] 孙业斌. 爆炸作用与装药设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987: 332-333.  
SUN Yebin. Explosive action and charge design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1987: 332-333. (in Chinese)