DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0719-08

水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱的内压载荷特性*

吴林杰[1],侯海量[1],朱 锡[1],陈鹏宇[1],田万平[2]
(1.海军工程大学舰船工程系,湖北 武汉 430033;
2.海军工程大学训练部,湖北 武汉 430033)

摘要:采用模型实验方法,研究了近自由面水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱的内压载荷特性。根据实验模型的破坏结果和压力测试结果,分析了水下爆炸产物与防雷舱舷侧空舱的相互作用过程以及水下爆炸产物的压力变化规律。研究表明:防雷舱舷侧空舱的载荷可分为冲击波载荷、准静态压力载荷和负压载荷 3 种,防雷舱舷侧空舱的破坏主要由冲击波载荷和准静态压力载荷造成,并且准静态压力载荷的比冲量是冲击波载荷的数倍,而负压载荷对防雷舱舷侧空舱破坏的影响可忽略不计。

关键词:水下爆炸;舷侧空舱;防护结构;载荷特性
中图分类号:O383.3 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在现代海战中,大型舰船遭受鱼雷、水雷等武器的近场或接触爆炸破坏后,其生命力将受到严重威胁,因此往往在大型舰船水下舷侧部位设计防雷舱结构。在水下武器的近场或接触爆炸下,船体结构在前期爆炸冲击波的作用下产生破口,形成不完整边界,致使水下爆炸气泡处于复杂的流场环境——既有自由液面,又有产生初始破口的船体结构,此外气泡还受反射冲击波的作用[1]。气泡在自由液面、不完整边界以及反射冲击波的作用下将产生“腔吸现象”、反射流、对射流等强非线性力学特征,因此水下爆炸气泡与船体结构的相互作用问题成为近年来的研究热点和难点。目前,国内外的相关研究主要集中在水下近场爆炸作用下简单规则结构的破坏形式上[2-6],而对于水下爆炸气泡与具有初始破口船体结构的相互作用问题,相关报道则十分少见。由于水下接触爆炸载荷与防雷舱结构的相互作用问题非常复杂,尽管国内学者在防雷舱结构研究中取得了一些成果[7-11],为防雷舱结构设计提供了参考,但是对水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱内的压力载荷特性仍未获得清晰的认识。鉴于采用数值和理论方法研究此问题十分困难,本文中采用实验方法开展研究,旨在进一步揭示水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱内的压力载荷特性。

1 实验模型

参考文献[9],结合实验场地(爆炸筒)条件,按照 12.5∶1 的缩比,设计如图 1 所示的实验模型,其组成构件从左至右依次为:固定压条、外板、密封圈、舷侧空舱框架、密封圈、液舱前板、密封圈、液舱框架、密封圈、液舱后板、密封圈、水密舱框架、密封圈、封闭盖板。

实验模型采用 Q235 钢制作。固定压条、空舱框架(包括舷侧空舱框架和水密舱框架)、液舱框架和封闭盖板的尺寸如图 2 所示。外板、液舱前板和液舱后板长 1 360 mm,宽 960 mm,厚度分别为 1.40、0.94 和 2.68 mm。密封圈厚 4 mm,其正视图同图 2(a),采用橡胶制作。在空舱框架顶部开 3 个螺孔(见图 2(b)),用以安装 PCB 压电传感器,传感器型号为 102B03,量程为 69 MPa。安装传感器时,其测压端面与空舱框架侧板内表面平齐。液舱内注入 80%的水(见图 2(c))。

* **收稿日期**:2015-12-10;**修回日期**:2016-05-03
基金项目:国家自然科学基金项目(51479204)
第一作者:吴林杰(1987—),男,博士研究生;**通信作者**:侯海量,hou9611104@163.com。

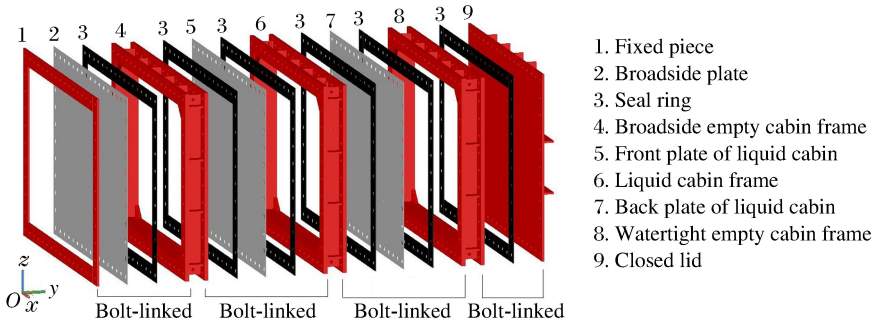

图 1 实验模型

Fig. 1 Experimental model

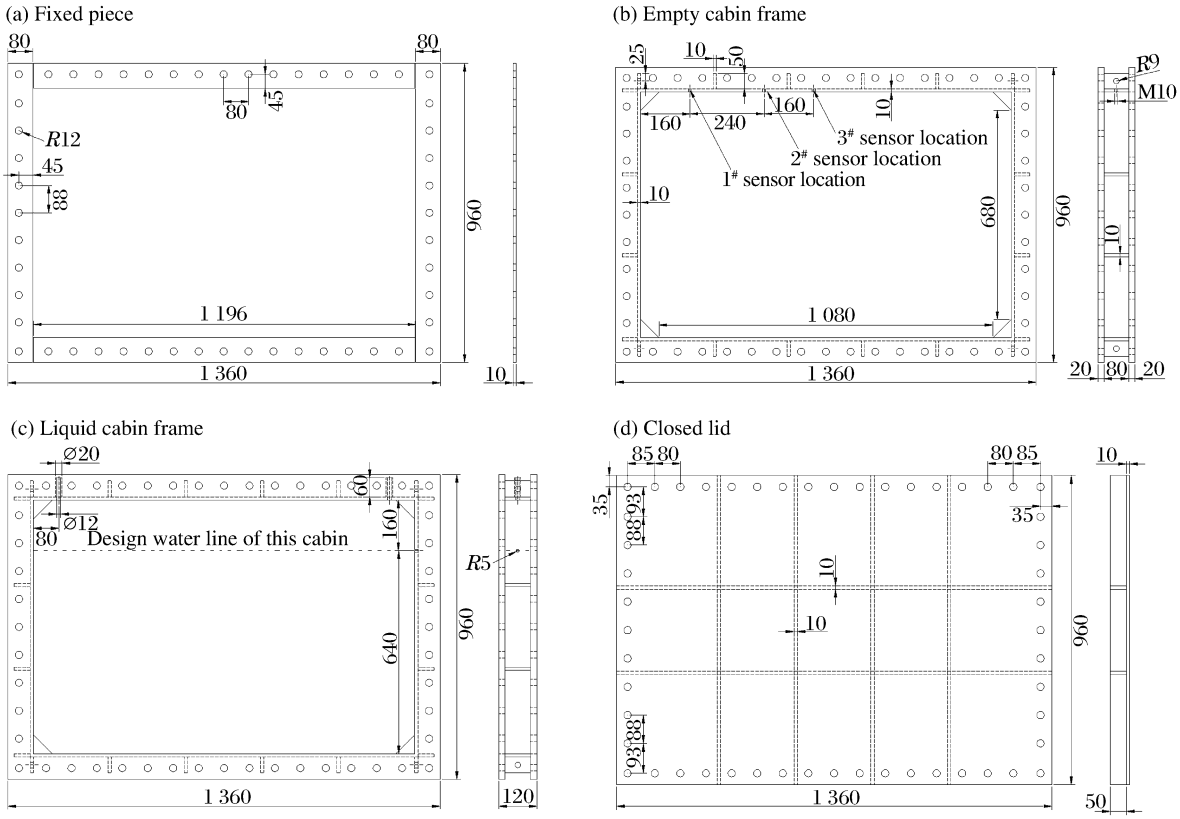

图 2 实验模型工装件设计图(单位:mm)

Fig. 2 Design drawings of experimental model components (unit: mm)

为保证空舱和液舱的水密性,必须拧紧螺栓,从而使密封圈被压薄,因此空舱和液舱的实际内部空间尺寸约为 1 200 mm×800 mm×126 mm。

2 实验实施

由于此项实验需要耗费较多的人力和物力,故仅进行了两次实验,即 55 和 110 g 装药(TNT)在水下 0.32 m 深处的外板正中心接触爆炸。

实验在直径为 5 m 的爆炸筒内进行。预先在外板、液舱前板和液舱后板上绘制间距为 5 cm 的白色正交网格线,按图 1 装配实验模型,并安装压力传感器;然后,吊起实验模型,将其 8 角用钢索固定,使外板中心距爆炸筒底约 1.68 m、距爆炸筒壁约 2.50 m,同时将模型顶部调至水平;接着,通过液舱框架顶部的注水管向液舱内注水,当水从液舱框架侧壁小螺孔(见图 2(c)中的侧视图)流出时,停止注水,并用

螺丝将该螺孔堵住，此时液舱刚好注入 80% 的水；将圆柱形 TNT 装药套上气球（避免药柱被水浸湿）并固定在外板中心处；随后，向爆炸筒内注水，使水面在外板中心上方约 0.32 m 处，此时实验准备完毕，如图 3 所示；最后，所有实验人员撤出爆炸筒，紧闭爆炸筒门，起爆炸药，并采集压力测试数据。

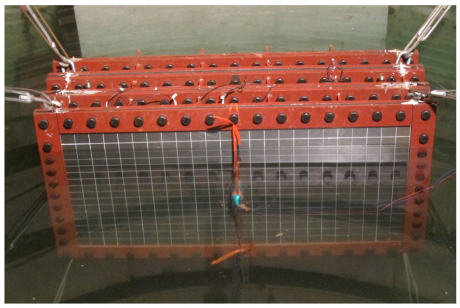

图 3 实验模型实物

Fig. 3 Actual experimental model

3 实验结果

在仅改变药量的条件下，先后进行了两次实验。第 1 次实验采用 55 g 药量，第 2 次实验采用 110 g 药量。

3.1 模型破坏结果

在 55 和 110 g 药量近水面接触爆炸下，实验模型的破坏情况分别如图 4、图 5 所示，外板、液舱前板和液舱后板的破坏情况分别如图 6、图 7 所示，在爆炸筒底、舷侧空舱内和液舱内搜集到的破片如图 8、图 9 所示。



图 4 55 g 装药近水面接触爆炸下模型的破坏

Fig. 4 Experimental model damaged by underwater contact explosion of 55 g charge



图 5 110 g 装药近水面接触爆炸下模型的破坏

Fig. 5 Experimental model damaged by underwater contact explosion of 110 g charge

由图 4 和图 5 可见，在 55 和 110 g 装药近水面接触爆炸下，实验模型的外板和液舱前板均产生了花瓣形大破口，在爆炸筒底均有一个内径约等于药柱直径、外径约 16 cm、厚度约 0.94 mm 的圆环状大破片，推断其来源于液舱前板。

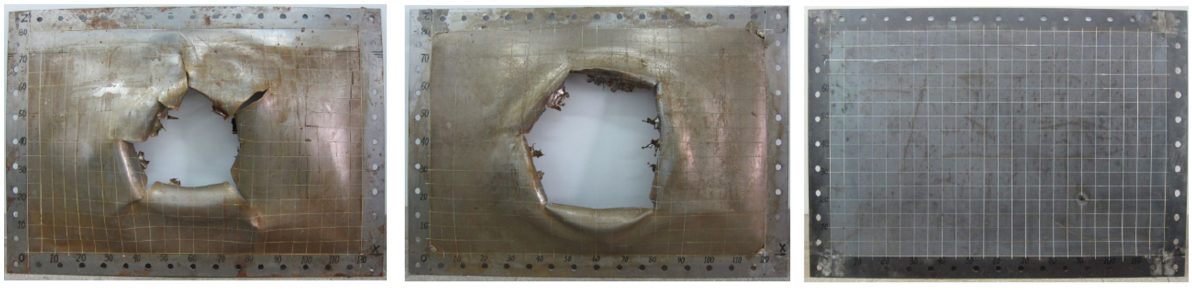

图 6 55 g 装药近水面接触爆炸下钢板的破坏

Fig. 6 Steel plates damaged by underwater contact explosion of 55 g charge

观察图 6 和图 7，从整体上看，实验模型的外板和液舱前板在破口以外的区域向外凸起，花瓣向里翻转，且花瓣尖端出现反向折弯现象。液舱后板没有破口，而是发生向里的凹陷大变形。液舱后板的中心挠度最大，且其下部的挠度比上部大。在 55 和 110 g 药量下液舱后板的最大挠度分别约为 26 和 54 mm。

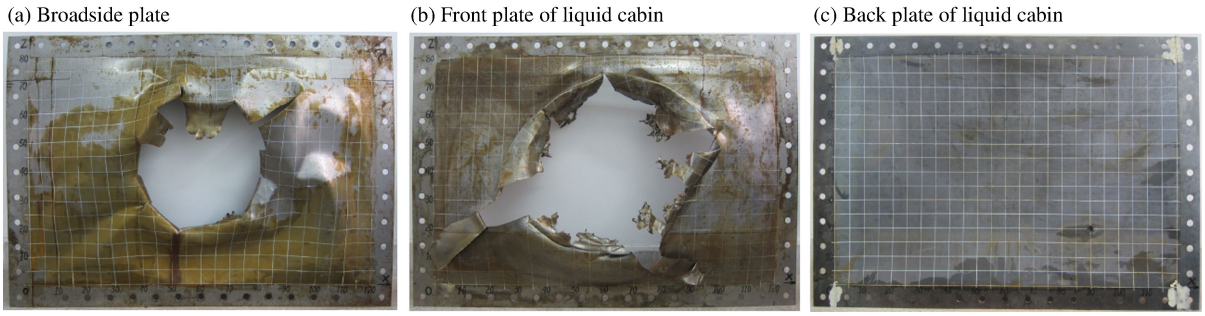

图 7 110 g 装药近水面接触爆炸下钢板的破坏

Fig. 7 Steel plates damaged by underwater contact explosion of 110 g charge



图 8 55 g 装药近水面接触爆炸下形成的破片

Fig. 8 Fragments formed in underwater contact explosion of 55 g charge



图 9 110 g 装药近水面接触爆炸下形成的破片

Fig. 9 Fragments formed in underwater contact explosion of 110 g charge

陈海龙等[12]提出了破口半径 R_b 与破损半径 R_d 的概念(如图 10 所示),用以区分破口尺寸和破损范围,本文中沿用这两个概念。由图 6 可知,在 55 g 药量下:外板的破口半径和破损半径分别约为 18.5 和 29.0 cm;液舱前板的破口半径与破损半径近似相同,约为 28.0 cm。由图 7 可知,在 110 g 药量下:外板的破口半径和破损半径分别约为 22.5 和 33.5 cm;液舱前板的破口半径和破损半径也近似相同,约为 42.0 cm。

对爆炸筒底、舷侧空舱内和液舱内搜集的破片质量进行统计,结果列于表 1,其中 w 为装药质量。

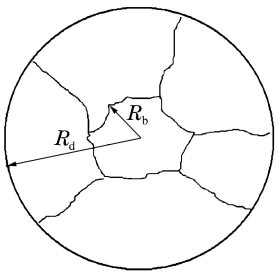

图 10 破口半径 R_b 与破损半径 R_d 的概念

Fig. 10 Concept of damaged radius R_b and crevasse radius R_d

表 1 破片质量

Table 1 Mass of fragments

w/g	不同位置搜集的破片质量/g				破片总质量/g
	爆炸筒底		舷侧空舱内	液舱内	
	圆环状大破片	其余小破片			
55	150.7	41.2	44.9	50.0	286.8
110	117.6	23.4	169.8	135.2	446.0

3.2 压力测试结果

采用DHDAS动态信号采集分析系统采集压力信号，采样率为1 MHz。实验后3#传感器被破片击中而损坏，只有1#和2#传感器测得压力数据。图11和图12分别显示了55和110 g药量下1#和2#传感器所测压力曲线。

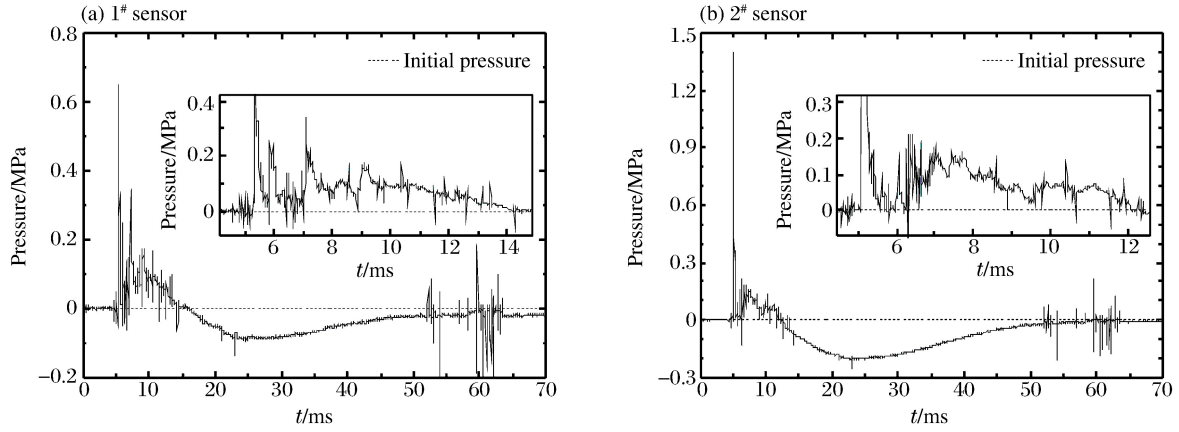

图 11 55 g 装药近水面接触爆炸下两个传感器测得的压力曲线

Fig. 11 Pressure curves measured by two sensors in underwater contact explosion of 55 g charge

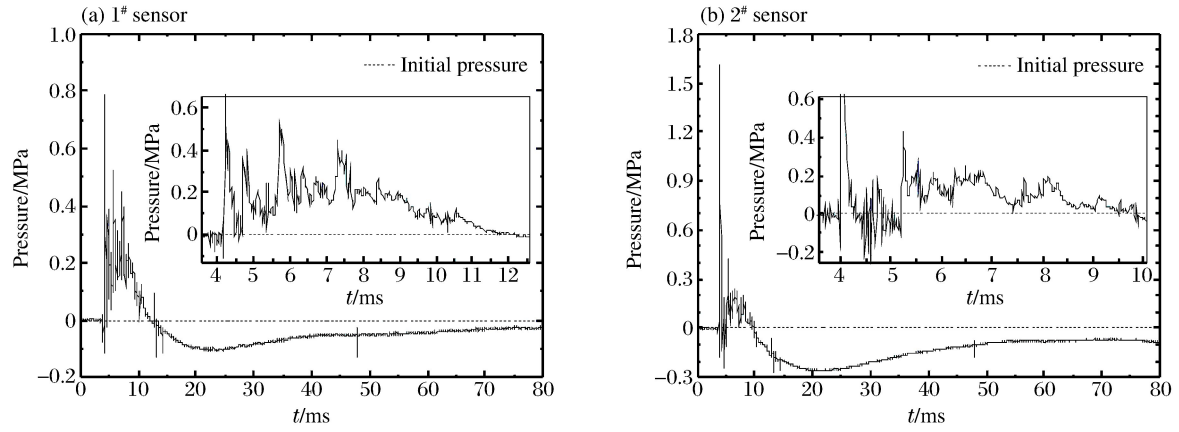

图 12 110 g 装药近水面接触爆炸下两个传感器测得的压力曲线

Fig. 12 Pressure curves measured by two sensors in underwater contact explosion of 110 g charge

4 舷侧空舱的载荷特性

张婧等[7]从仿真和实验两方面对水下接触爆炸下防雷舱结构的破坏进行了研究。与张婧等[7]的研究相比，本文中的实验对象也是三舱防护模型，与张婧等实验的最大区别在于：他们将实验模型沉入较深的水中，以确保炸药爆炸后在水中产生的超压不发生泄漏；而本课题组将实验模型的小部分露出水

面，炸药爆炸后在水中产生的超压将在自由水面发生泄漏，从而考虑了自由水面对水下爆炸气泡与实验模型的影响。从工程角度上看，本实验工况更符合水面舰船遭受鱼雷攻击的实际情况。

在本实验中，当 55 或 110 g 装药在水下 0.32 m 处爆炸时，其装药比例沉深 $h/w^{1/3}$（h 为装药在水下的深度，单位 m；w 为装药质量，单位 kg）均小于 1，由装药比例沉深与气泡脉动次数的关系[13]可知，55 或 110 g 装药在水下 0.32 m 处爆炸所产生的气泡脉动次数均不足 1 次。换言之，55 或 110 g 装药在水下 0.32 m 处爆炸时，爆炸产物气体会喷出水面而不会形成完整的气泡脉动。然而，在张婧等[7]的实验中，当 200 或 400 g 装药在大于 2.50 m 的水深处爆炸时，其装药比例沉深均大于 4，炸药爆炸产生的气泡脉动次数在 3 次以上，从而导致其实验结果与本研究存在差别。

在张婧等[7]的研究中，200 g 装药下实验模型的外板和液舱前板的破口如图 13 所示。可见，在液舱前板破口范围内有一块尚未完全脱落的圆环形大破片。据此可知：本实验中在爆炸筒底发现的圆环形大破片（见图 8(a)和图 9(a)）确实来自液舱前板，其中间圆孔是由产生于外板的圆形冲塞破片高速撞击而形成，其四周边缘则是由外板开裂形成花瓣的尖端高速撞击而“剪切”形成；图 6(b)和图 7(b)所示的液舱前板破口主要是由外板开裂形成的花瓣“刨挖”而形成。

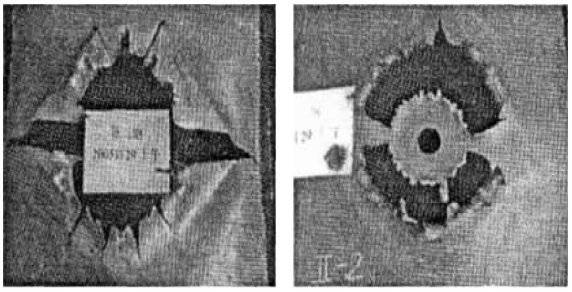

图 13 文献[7]中 200 g 装药水下爆炸下钢板的破口

Fig. 13 Crevasse of steel plates damaged by underwater explosion of 200 g charge from Ref. [7]

综合分析本文中实验模型的破坏结果和压力测试结果可知，当 55 或 110 g 装药在水下 0.32 m 处与实验模型接触爆炸时，在水下爆炸气泡与实验模型的相互作用过程中，水下爆炸气泡的运动和舷侧空舱内的压力变化可分为 3 个阶段：冲击波载荷阶段、准静态压力载荷阶段、负压载荷阶段，如表 2 所示。

表 2 压力曲线的 3 个阶段

Table 2 Three phases of pressure curve

w/g	传感器编号	冲击波载荷阶段			准静态压力载荷阶段			负压载荷阶段起始时刻/ms
		起止时刻/ms	超压峰值/MPa	比冲量/(Pa·s)	起止时刻/ms	超压峰值/MPa	比冲量/(Pa·s)	
55	1#	5.2—5.8	0.647	85.2	5.8—14.2	0.345	624.2	14.2
	2#	5.1—5.6	1.399	136.7	5.6—12.4	0.213	460.3	12.4
110	1#	4.2—4.6	0.788	95.6	4.6—12.2	0.527	1 125.1	12.2
	2#	4.0—4.3	1.611	113.7	4.3—9.8	0.432	505.4	9.8

第 1 阶段：外板在水下接触爆炸瞬间发生冲塞破坏，冲塞破片向舷侧空舱内高速运动，爆炸产物气体一边向舷侧空舱涌入，一边在水中形成半球状气泡；舷侧空舱内原有的空气受到压缩，舷侧空舱各壁面先后受到冲击波载荷作用。由图 11 和图 12 可见，此阶段舷侧空舱内的压力呈现出峰值很大、时间很短的冲击波特性，故称此阶段为冲击波载荷阶段。

第 2 阶段：在图 11 和图 12 的局部放大图中可见若干个反射波，并且在此阶段舷侧空舱内的压力呈现出峰值较小、时间较长的准静态压力特性，表明冲击波在舷侧空舱内不断地反射而使舷侧空舱内的压力逐渐趋于均匀；与此同时，水中的气泡逐渐膨胀，气泡内部压力逐渐减小，当舷侧空舱内部压力比外部气体压力高时，气体就会向舷侧空舱外侧逸出，从而使舷侧空舱内、外的气压差减小，并导致外板逐渐向外鼓起（见图 6(a)和图 7(a)）；当水中气泡膨胀到某一时刻时，舷侧空舱内的气体超压减小至零，之后进入第 3 阶段。由于在此阶段舷侧空舱内的气体压力呈现出准静态压力特性，故将此阶段称为准静态压力载荷阶段。

第 3 阶段：当舷侧空舱内的气体超压减小至零之后，由于惯性水会继续向外运动，水中气泡将“过度”膨胀，使气泡内部压力小于周围水的静压力；舷侧空舱内的气体继续向外逸出，使舷侧空舱内的超压峰值变为负值，故将此阶段称为负压载荷阶段。由外板的冲塞破片和开裂花瓣撞击形成的大质量圆环形大破片和少量小破片正是在这一阶段随着逸出的气流运动到舷侧空舱外侧，并最终掉落在爆炸筒底。尽管舷侧空舱内的超压为负值，但是舷侧空舱内的气体向外逸出，表明外板内侧压力比外侧压力大，此压差推动外板向外凸起。舷侧空舱内的超压为负值之后，液舱前板内侧的水压力明显比外侧的气体压力大，此压差推动液舱前板向外凸起。气泡膨胀到某一时刻，其顶部将与水面上的空气相连通，若此时气泡内部压力低于大气压力，则水面上的空气将流向气泡内部。随后，与水面上空气相连通的气泡逐渐坍塌，被推开的水逐渐回流并填充空穴。由于外板在爆炸冲击波作用下产生破口，爆炸产物气体向舷侧空舱涌入，导致水中气泡的膨胀速度与自由场水下爆炸相比减小，因而水向外流动的惯性将减小，从而推断气泡膨胀的最大半径也会减小。舷侧空舱内形成负压载荷的根本原因是水中气泡的“过度”膨胀，由于气泡膨胀历时较长，因此负压载荷阶段相比准静态压力载荷阶段持续的时间要长得多。

由以上分析可知，防雷舱舷侧空舱的破坏主要是由冲击波载荷和准静态压力载荷造成，并且由表 2 可见准静态压力载荷的比冲量是冲击波载荷的数倍，而负压载荷对防雷舱舷侧空舱的影响可以忽略。

5　结　论

采用模型实验的方法，研究了近自由面水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱的内压载荷特性。根据实验模型的破坏结果和压力测试结果，分析了水下爆炸产物与防雷舱舷侧空舱的相互作用过程以及水下爆炸产物的压力变化规律。研究表明：在近自由面水下接触爆炸下，防雷舱舷侧空舱的内压载荷可分为冲击波载荷、准静态压力载荷和负压载荷 3 种，防雷舱舷侧空舱的破坏主要由冲击波载荷和准静态压力载荷造成，并且准静态压力载荷的比冲量是冲击波载荷的数倍，而负压载荷对防雷舱舷侧空舱的影响可忽略不计。

参考文献：

[1] 姚熊亮，刘文韬，张阿漫，等. 水下爆炸气泡及其对结构毁伤研究综述[J]. 中国舰船研究，2016，11(1)：36-45.
Yao Xiongliang，Liu Wentao，Zhang Aman，et al. Review of the research on underwater explosion bubbles and the corresponding structural damage[J]. Chinese Journal of Ship Research，2016，11(1)：36-45.

[2] Klaseboer E，Hung K C，Wang C，et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure[J]. Journal of Fluid Mechanics，2005，537：387-413.

[3] Dadvand A，Dawoodian M，Khoo B C，et al. Spark-generated bubble collapse near or inside a circular aperture and the ensuing vortex ring and droplet formation[J]. Acta Mechanica Sinica，2013，29(5)：657-666.

[4] 刘云龙，张阿漫，王诗平，等. 基于边界元法的近平板圆孔气泡动力学行为研究[J]. 物理学报，2013，62(14)：144703.
Liu Yunlong，Zhang Aman，Wang Shiping，et al. Study on bubble dynamics near plate with hole based on boundary element method[J]. Acta Physica Sinica，2013，62(14)：144703.

[5] 刘云龙，汪玉，张阿漫. 有倾角的竖直壁面附近气泡与自由面相互作用研究[J]. 物理学报，2013，62(21)：214703.
Liu Yunlong，Wang Yu，Zhang Aman. Interaction between bubble and free surface near vertical wall with inclination[J]. Acta Physica Sinica，2013，62(21)：214703.

[6] 李健，潘力，林贤坤，等. 近自由面水下爆炸气泡与结构相互作用数值计算研究[J]. 振动与冲击，2015，34(18)：13-18.
Li Jian，Pan Li，Lin Xiankun，et al. Numerical study on interaction between bubble and structure near free surface in underwater explosion[J]. Journal of Vibration and Shock，2015，34(18)：13-18.

[7] 张婧，施兴华，王善，等. 水下接触爆炸载荷作用下舰船防护结构的仿真和实验研究[J]. 船舶力学，2008，12(4)：649-656.
Zhang Jing，Shi Xinghua，Wang Shan，et al. Numerical simulation and experiment research of defensive structure

subjected to underwater contact explosions[J]. Journal of Ship Mechanics, 2008,12(4):649-656.

[8] 陈卫东,王飞,陈浩.舰船舷侧结构水下抗爆试验和机理研究[J].中国造船,2009,50(3):65-73.
Chen Weidong, Wang Fei, Chen Hao. Research on blast resistance mechanism of warship broadside defensive structure subjected to underwater contact explosion[J]. Shipbuilding of China, 2009,50(3):65-73.

[9] 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.

[10] 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 defense mechanism of a cabin near the shipboard for large surface vessels[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012,33(2):142-149.

[11] 侯海量,张成亮,朱锡.水下舷侧防雷舱结构防护效能评估方法研究[J].中国舰船研究,2013,8(3):22-26.
Hou Hailiang, Zhang Chengliang, Zhu Xi. Evaluation methods of the performance of multi-layered blast protection blisters subjected to underwater contact explosions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013,8(3):22-26.

[12] 陈海龙,周姝,孙丰,等.水下接触爆炸对舰船壳板的毁伤试验效果估算方法评估[J].舰船科学技术,2013,35(10):33-37.
Chen Hailong, Zhou Shu, Sun Feng, et al. Estimation on estimation method of warship shell experimental damage subjected to underwater contact explosion[J]. Ship Science and Technology, 2013,35(10):33-37.

[13] 叶双序.爆炸作用基础[M].南京:解放军理工大学出版社,2011.

Internal load characteristics of broadside cabin of defensive structure subjected to underwater contact explosion

Wu Linjie[1], Hou Hailiang[1], Zhu Xi[1], Chen Pengyu[1], Tian Wanping[2]

(1. *Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *Hubei*, *China*;
2. *Administrative Office of Training, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *Hubei*, *China*)

Abstract: By carrying out model experiments, we investigated the internal load characteristics of the broadside cabin of the defensive structure subjected to underwater contact explosion near the free surface. According to the damage of the experimental models and the pressure profile measured by sensors, we described the interaction between underwater explosion products and the broadside cabin of the defensive structure, and analyzed the pressure change of gas in the broadside cabin of the structure. The results show that the gas pressure in the broadside cabin of the structure can be divided into the shock wave phase, the quasi-static pressure phase and the negative pressure phase, and the broadside cabin is damaged mostly by the shock wave and quasi-static pressure. In addition the specific-impulse of the quasi-static pressure is several times bigger than that of the shock wave, and the effect of the negative pressure on the damage of the broadside cabin is negligible.

Keywords: underwater explosion; broadside cabin; defensive structure; load characteristics

(责任编辑 王 影)