

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0067

底部近距离爆炸下舱段模型毁伤试验研究*

伍星星, 汪俊, 刘建湖, 刘国振, 王海坤
(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 底部近距离爆炸可对水面舰船造成致命性打击, 为探究其破坏机理, 本文中开展了底部近距离爆炸下舱段模型的毁伤试验, 获取了舱段模型破损区域试验数据、非破损区域的冲击环境数据。同时借助舷侧近距离爆炸试验结果、底部中远场爆炸试验结果, 综合对比可发现: (1) 底部近距离爆炸下, 舱段模型会呈现整体隆起变形、爆心区域撕裂并伴有较大凹陷变形、舷侧外板大面积屈曲失稳等典型特征; (2) 相比舷侧爆炸方位, 底部爆炸对舱段模型具有很强的综合毁伤效果, 底部爆炸相对舷侧爆炸对舱段模型的综合毁伤效果可提高40%以上; (3) 在冲击环境方面, 底部近距离爆炸下非破损区域测点中高频段的冲击谱曲线变化趋势基本与中远场爆炸一致, 但在低频阶段, 底部近距离爆炸下的谱位移要远高于中远场爆炸工况。

关键词: 底部爆炸; 破坏模式; 毁伤效应; 冲击环境

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Damaging characteristics of a cabin model under close-in underwater explosion from bottom attacking

WU Xingxing, WANG Jun, LIU Jianhu, LIU Guozhen, WANG Haikun
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: Experiment of cabin model subjected to close-in underwater explosion from bottom attacking was investigated to explore the damage failure model of warship, The demolishing region datas of cabin model together with shock environment information were obtained. Furthermore, by contrasting the experimental results from the case of close-in underwater explosion from ship broadside attacking and far-mild field shock environment trial. It is concluded that: (1) the typical failure of cabin model mainly contains the whole deformation, tearing in the middle along with local dish on both sides; (2) the bottom attacking method has more destruction ability in contrast to the ship broadside attacking way, it is found more than 40% damage effect can be increased according to the experimental results; (3) the variation tendency of measuring point shock spectra between close-in and far-mild field bottom underwater explosion at middle and high frequency level, Unfortunately, for the low frequency level the values of close-in underwater explosion are greater than the latter.

Keywords: bottom underwater explosion; failure model; damage effect; shock environment

水面舰船在遭受鱼雷、水雷攻击后的损伤破坏响应一直是舰船领域工作者较为关注的问题, 近年来, 随着试验技术、理论分析、仿真计算水平的不断向前推进, 水面舰船的水下爆炸研究已从中远场爆炸开始转向近场爆炸研究。刘建湖^[1]采用激光干涉测速仪 (velocity interferometer system for any reflector, VISAR) 和同时分幅扫描超高速光电摄影测量技术, 测量了近场接触爆炸范围内 (6倍药包半径以内) 冲击波的传播及其衰减规律, 建立了近场接触爆炸范围内水下爆炸计算模型; 周章涛等^[2]结合试验和数值结果, 分析了水下近距爆炸范围内冲击波传播、空化闭合及再加载效应, 揭示了近距爆炸下水下流固耦

* 收稿日期: 2020-03-17; 修回日期: 2020-06-10

基金项目: 国防基础科研重点项目 (B0820132045); 国家重点安全基础研究 (613279)

第一作者: 伍星星 (1989—), 男, 硕士, 工程师, xingxingwupy@163.com

合机理;在结构毁伤效应方面,研究对象基本为简单板及加筋板结构,朱锡等^[3]开展了典型板架模型在近距离及接触爆炸作用下破口毁伤试验研究,指出结构形式及加筋对板架的破坏具有一定的影响,同时对水下接触爆炸下的破口长度公式进行了改进;Nurick等^[4]采用试验方法,对固支薄板在接触爆炸下的响应进行研究,发现了板的冲塞、凹陷、开裂和花瓣翻转现象,并发现在薄板的冲塞阶段产生了一个半径与炸药和薄板接触半径基本相同的圆形破口;Wierzbicki等^[5]对接触爆炸下固支圆板的花瓣开裂过程进行了理论分析和试验研究,考虑了应变率效应,基于能量原理得到了破口半径的计算方法;Rajendran等^[6]得到了水下接触爆炸载荷下空背圆板的破口半径公式。也有学者^[7-10]对含水双层底在近距离爆炸下的响应进行了研究,通过开展试验与数值研究,获取了含水双层底结构近距离爆炸下毁伤过程及典型破坏模式。此外,吴庭翱等^[11]对水下接触爆炸下多舱防护结构的舷侧外板结构(背空板)、液舱结构及夹芯结构的响应现状进行了进展研究,对现阶段接触爆炸下的主要研究成果进行了归纳总结;姚熊亮等^[12]围绕水下爆炸气泡及其对结构毁伤研究,从试验研究、理论研究、数值研究等方面进行了总结,指出近场爆炸下气泡对结构的毁伤特性研究较少,气泡射流载荷的形成对舰船的破坏规律、气泡在不完整边界下形成的腔吸现象等亟需研究。现阶段关于水下近距离爆炸下结构的研究基本集中在简单结构方面,对于大尺度舱段模型在近距离爆炸下的毁伤响应鲜有报道,尤其是底部方位爆炸。基于此,本文中主要对底部近距离爆炸下舱段模型毁伤进行试验研究。

1 试验模型

1.1 试验模型

试验模型为典型的水面舰船舱段模型,长度为15 m,宽度为3 m,高度为3.8 m,吃水1 m,模型主要分为5个舱段。其中中间舱段为试验舱,长度为3 m,两端依次为过渡舱、附加舱,中间试验段横剖面如图1所示,模型内部结构如图2所示。在垂向方向,模型中间试验段主要包含含水双层底、甲板、上层建筑等典型结构。试验段双层底高度为0.18 m,双层底结构板厚均为3 mm,舷侧外板板厚为3 mm,舷侧强肋骨、肋骨、纵桁采用T形加筋。加筋尺寸主要有两类:一类面板厚度为4 mm,长度为40 mm,腹板厚度为2 mm,长度为100 mm;另一类面板厚度为2 mm,长度为40 mm,腹板厚度为2 mm,长度为20 mm。各层甲板、上层建筑甲板厚度为2.5~3.5 mm,同样采用T形加筋进行加强。试验过程中为避免焊接加工工艺对试验结果带来影响,模型中试验段破坏区域板厚保证大于3 mm。舱段模型总质量为14.2 t,排水量为37.8 t,双层底满载水量约9.5 t,两端附加舱段舱室通过注水配载14.1 t。

模型采用Q345B钢加工,Q345B钢是一种应变率效应明显的低碳钢,静态屈服强度为358 MPa,抗拉强度为539 MPa,断后延伸率为34%,断面收缩率为71.9%,不同应变率下Q345B钢应力应变曲线如图3所示。

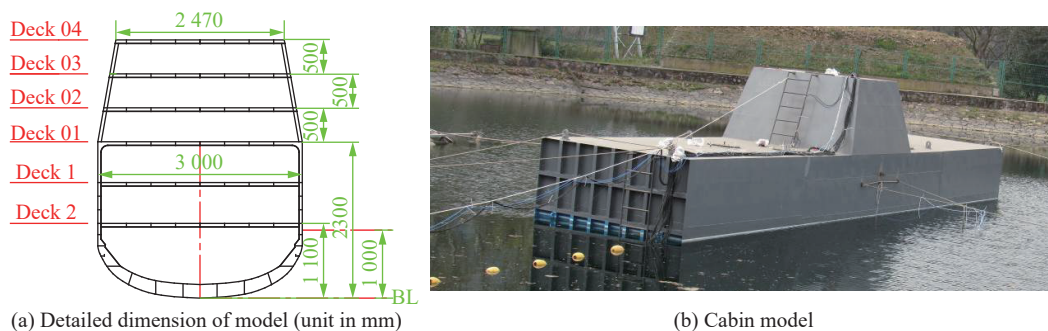


图1 模型结构示意图

Fig. 1 The whole structure of the cabin model

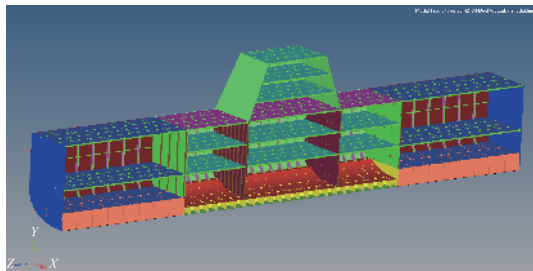


图 2 模型内部结构示意图

Fig. 2 The inner structure of the cabin model

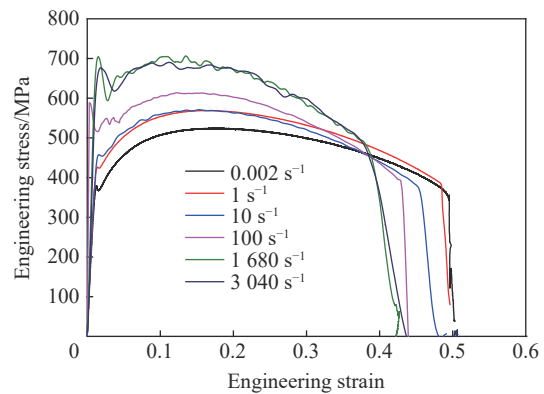


图 3 Q345B 钢不同应变率下的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of Q345B at different strain rates

1.2 测点布置

为探究近场爆炸下舱段模型的冲击环境分布规律, 本次试验中布置了加速度、中频振子等测点, 测点分布如图 4 所示。其中加速度测点 12 个, 中频振子测点 4 个, 基本布置在甲板、舱壁等强力构件支撑处。加速度测点采用符号 A 或 AG 表示, A 表示测点位于甲板, AG 表示测点位于舱壁, 测点符号后第 1 个数字表示测点所在甲板位置, 第 2 个数字表示该测点位于该层甲板第几测点。中频振子数据主要用以验证加速度测点精度, 采用符号 M 表示, 符号后数字与加速度测点表示一致。试验中加速度传感器、放大器采样频率为 50 kHz, 所有测试仪器均在计量有效期内, 所有测点均布置在船舯部位。

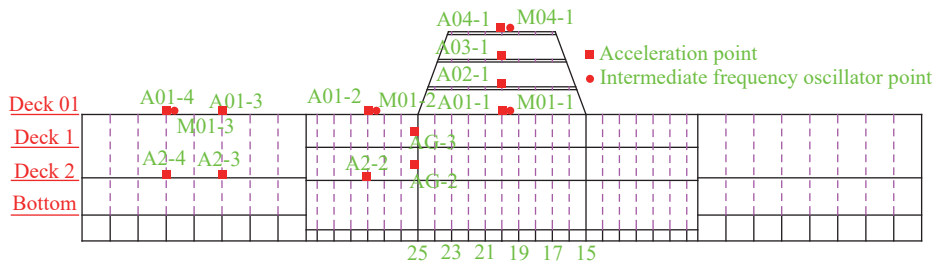


图 4 舱段模型中加速度、中频振子测点布置示意图

Fig. 4 Layout of measuring points for acceleration, intermediate frequency oscillator

1.3 试验工况

试验主要用于探索底部近场爆炸下舱段模型的毁伤特性, 试验工况如表 1 所示。试验主要分为两类: 一类为底部近场爆炸试验; 另一类为对比试验, 主要用于进一步说明底部爆炸对舱段模型的毁伤特性。通过开展试验工况 2~3 中远场底部爆炸冲击环境试验, 借以说明底部近场爆炸下舱段模型的冲击环境分布规律; 通过开展试验工况 4 中的近场舷侧爆炸试验, 进一步突出底部近场爆炸下的毁伤特性。此外尤需说明的是, 工况 1、工况 4 都会对模型形成较大的影响, 因此 1.1 节中试验模型共加工 2 个, 分

表 1 试验工况表

Table 1 Experimental cases

工况	爆炸方位	药量/kg	爆距/m	爆点位置	备注
1	底部	2.0	0.18	垂向水线下方 1.18 m, 横向位于船舯	主要试验
2	底部	1.0	6.66	垂向水线下方 7.66 m, 横向位于船舯	冲击环境对比试验(冲击因子 0.15、0.25)
3	底部	1.0	4.00	垂向水线下方 5.0 m, 横向位于船舯	
4	舷侧	2.8	0.18	垂向水线下方 0.44 m, 横向距离舷侧 0.125 m	毁伤对比试验

别用于试验工况1和试验工况4。工况1和工况4中药包的布置位置如图5所示。

2 底部近距离爆炸试验结果分析

2.1 舱段模型结构破损情况分析

底部近距离爆炸后,舱段模型的整体毁伤效果如图6所示。试验后,舱段模型试验段毁伤较为严重,从外部毁伤来看,双层底结构在强冲击波作用下,正对爆心区域发生大范围撕裂,同时产生较为明显的凹陷变形,弧度类似于抛物线形,凹陷区域的终止位置大体位于试验段横舱壁位置处。位于水线与甲板01之间的舷侧外板及其舷侧肋骨发生较为明显的褶皱变形,表明爆炸过程中舷侧外板板格及舷侧外板加筋发生了大范围的失稳屈曲。这主要是由于底部爆炸下,试验段舷侧区域在冲击波及后续爆轰产物加载过程中基本处于受压状态,受压状态下板格及加筋易产生屈曲失稳。与此同时,模型整体发生较为明显的整体隆起变形。采用两端牵线法进行测量,其中水线位置(图中白线位置)处最大隆起变形为29.0 cm,位于船舳区域,模型试验段该位置平均隆起高度为22.5 cm,过渡段平均隆起高度为16.5 cm。在甲板01位置,最大隆起高度为32.0 cm,位于船舳区域,模型试验段该位置平均隆起高度为30.5 cm,过渡段平均隆起高度为25.5 cm。从舱段模型毁伤试验结果来看,在纵向方向,变形毁伤区域基本集中在试验段横舱壁之间;在垂向方向,变形毁伤区域基本集中在甲板02下方,甲板01上方区域仍存在较为明显塑性变形;在横向方向,左舷、右舷方向变形毁伤基本呈对称关系。

底部爆炸下舱段模型的破口区域如图7所示,外板破口大体呈菱形,破口纵向(船长)长度为78 cm,同时横向(船宽)方向破口外延形成一条长裂缝,裂缝一端沿着与横隔板相交处撕裂,另一端沿着板格1/3位置撕裂。内底板的破坏模式更为复杂,爆心附近的板格发生撕裂,部分完全脱离内底板飞向甲板2,部分多边撕裂,向上隆起,同时内底板在船舳方向撕裂,形成长裂缝,裂缝止于舷侧强肋骨。此外,虽然外板产生破口,但外板整体基本保持完整,并未形成大质量破片。

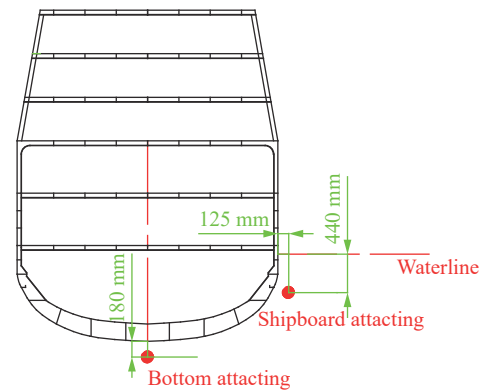


图5 药包布置位置

Fig. 5 The charge positions



图6 底部近距离爆炸后舱段模型整体毁伤结果

Fig. 6 The damage result of the cabin model after bottom close-in underwater explosion

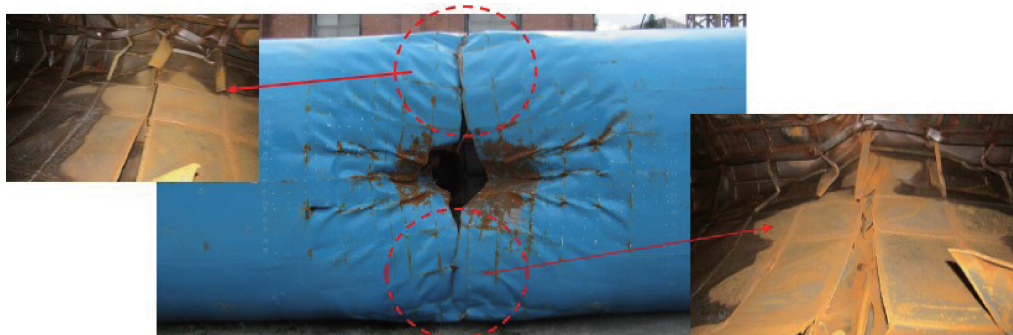


图7 底部破口形状结果

Fig. 7 The shape of the bottom crevasse

内底具体变形破坏见图 8 所示。在爆心正对附近区域, 内底板整体隆起变形较大, 同时板格在与肋板交接位置基本发生撕裂, 其中有 2 块板格四边发生完全撕裂, 形成大质量破片撞击内底板上方甲板 (甲板 2), 有 3 块板格三边完全撕裂; 远离爆心一定距离处, 板格中间区域形成褶皱, 发生屈曲失稳变形; 但当进一步靠近舷侧、横舱壁位置时, 在强边界作用下, 板格变形破坏程度进一步加强, 当靠近横舱壁时, 板格与板格、横舱壁间存在局部撕裂, 在靠近舷侧区域时, 尤其是舷侧与横舱壁交接位置处, 板格完全屈曲破坏, 发生较为明显的极度凹凸不平扭转变形, 同时与之相连的舷侧强肋骨发生失稳, 部分还与板格产生撕裂。



图 8 内底板破坏变形结果

Fig. 8 The damage results of inner bottom plates

考虑到药包距离内底板为 0.38 m, 药包质量为 2 kg, 冲击波首先需作用于船体外板, 底部爆炸形成的冲击波难以对内底板板格直接撕裂形成大质量破片, 因此试验中板格破片的形成很大可能是底部爆炸形成的水射流作用引起的。

甲板 2 位于双层底上方, 是破坏最为严重的一层甲板, 具体毁伤破坏见图 9 所示。甲板 2 整体向上隆起变形, 最大隆起变形为 36 cm, 位于舱室正中心。甲板 2 下方加筋破坏较为严重, 部分加筋扭曲撕裂, 部分加筋屈曲, 部分还存在被破片二次击穿, 部分与横舱壁连接加筋出现局部撕裂, 加筋的破坏导致加筋对甲板 2 的支撑作用减弱, 从而引起甲板 2 局部区域失稳, 导致甲板 2 在隆起变形变心过程中甲板板格呈现局部的凹凸不平。



(a) Vertical view

(b) Upward view

图 9 甲板 2 毁伤破坏结果

Fig. 9 The damage results diagram of deck 2

甲板 1 整体向上隆起变形, 其中中间隆起变形高度最大, 局部甲板板格存在明显的屈曲失稳, 在与横舱壁交接处 (靠近爆心侧) 形成较为明显的塑性铰, 与之相连的舱壁存在局部失稳, 加筋出现屈曲变形, 类似现象同样存在舷侧外板及其加筋区域。同时甲板位置存在两处较为明显的破片击穿痕迹, 具体结果如图 10 所示。



图10 甲板1毁伤破坏结果
Fig. 10 The damage results of deck 1

2.2 底部近距离爆炸冲击环境结果分析

本节主要对底部爆炸下舱段模型非破损区域的冲击环境进行分析,依据获取的加速度时程曲线,通过进行零漂处理,再积分获取测点的速度、位移时程曲线,典型测点加速度曲线如图11所示,其中图11(a)~11(c)为加速度测点时程曲线,图11(d)为中频阵子时程曲线。从图中可以看出,测点加速度曲线为高频振荡曲线,其中舱壁位移由于处在压缩状态,且承担着上下甲板间力的传递作用,因此高频信号最为丰富,中频振子由于本身自带高频滤波作用,因此时程曲线较为光滑。此外,还可看出,测点位置还存在明显的二次加载作用,如图11(a)~(b)红框所示,二次加载的载荷可由结构的撕裂毁伤抖动、破口处涌进水流的碰撞、未知因素引起的高速水流撞击等,表明底部近距离爆炸下冲击载荷成分及结构破损机理十分复杂。

对于加速度峰值,可发现,在纵向(船长)方向,越靠近船艏位置(爆心正对位置),加速度峰值越大;在垂向方向(船高),加速度峰值先降低后升高。

对测点加速度进行分析,得到测点冲击谱,同时利用同一位置测点中频阵子数据进行验证,对比结果如图12所示。结果表明,由测点加速度计算得到的冲击谱值与中频振子加速度峰值(绿色圈点)吻合较好。这说明本实验中加速度测量结果可信度较高。

图13所示为测点冲击谱变化规律示意图,各测点冲击谱在低频段表现明显的等位移性质、中频段表现等速度性质、高频段表现等加速度性质,对于船艏部位测点,出现较为明显的双峰特性。对比垂向方向各测点冲击谱可以看出,各测点谱位移、谱速度、谱加速度相差不大;对比横向方向各测点冲击谱可以看出,越靠近船艏位置(爆心位置),谱位移、谱速度、谱加速度值越大。

3 进一步探讨

3.1 底部近距离爆炸冲击环境特性分析

将底部近距离爆炸、底部中远场爆炸下舱段模型的冲击环境数据进行对比,从而可以进一步获取底部近距离爆炸下冲击环境变化规律及特性。图14所示为同一测点在不同爆炸工况下的冲击谱曲线示意图,其中蓝色表示的是底部近距离爆炸工况(工况1);红线表示的是工况2试验数据;绿色表示的是工况3试验数据。综合对比可发现:在中高频段,底部近距离爆炸下测点的冲击谱曲线变化趋势基本与中远场爆炸一致;而在低频阶段,底部近距离爆炸下的谱位移要远高于中远场爆炸工况。主要原因如下:

(1)底部近距离爆炸下,舱段模型结构吸收的冲击能量较多,模型产生明显的刚体位移及整体弯曲变形,导致低频阶段测点的谱位移相较中远场工况大;

(2)虽然底部近距离爆炸可对爆心附近结构造成局部撕裂破坏,但爆炸冲击能量在向船体其他部位

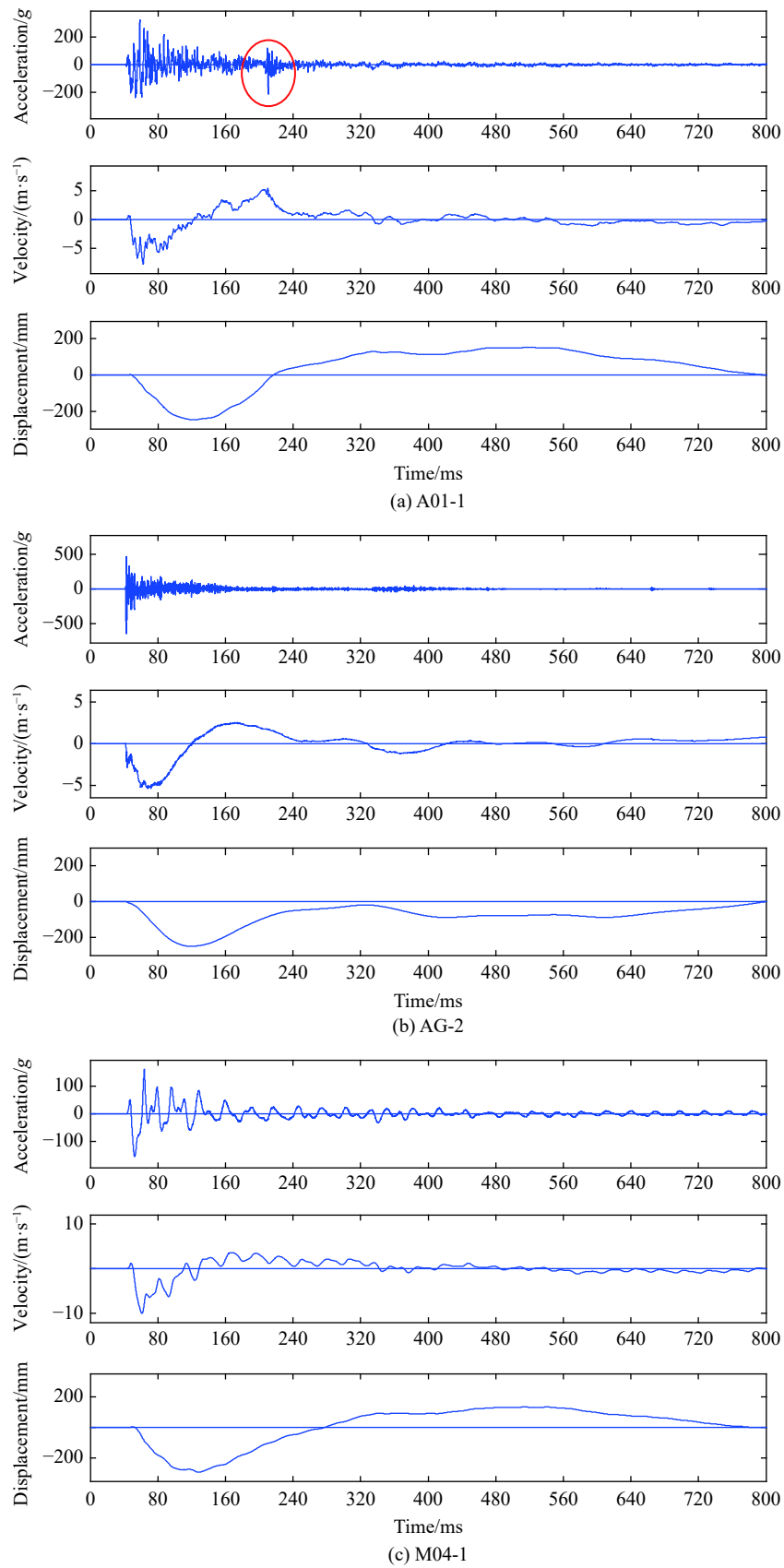


图 11 典型测点加速度、速度、位移曲线

Fig. 11 The acceleration, velocity, displacement history time curves of typical points

传递时,模型各层甲板对爆炸冲击的高频信号仍具有很强的率波作用,因此试验中各测点在不同试验工况下的中高频段的冲击谱值仍基本一致。

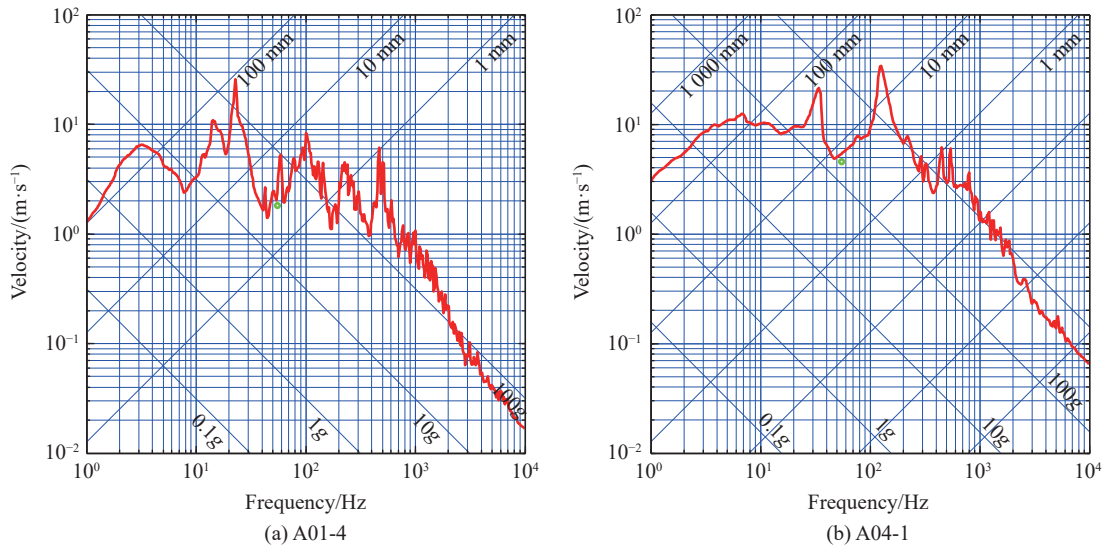


图 12 中频振子修正下的测点冲击谱

Fig. 12 The diagram of shock spectrum with intermediate frequency oscillator correcting

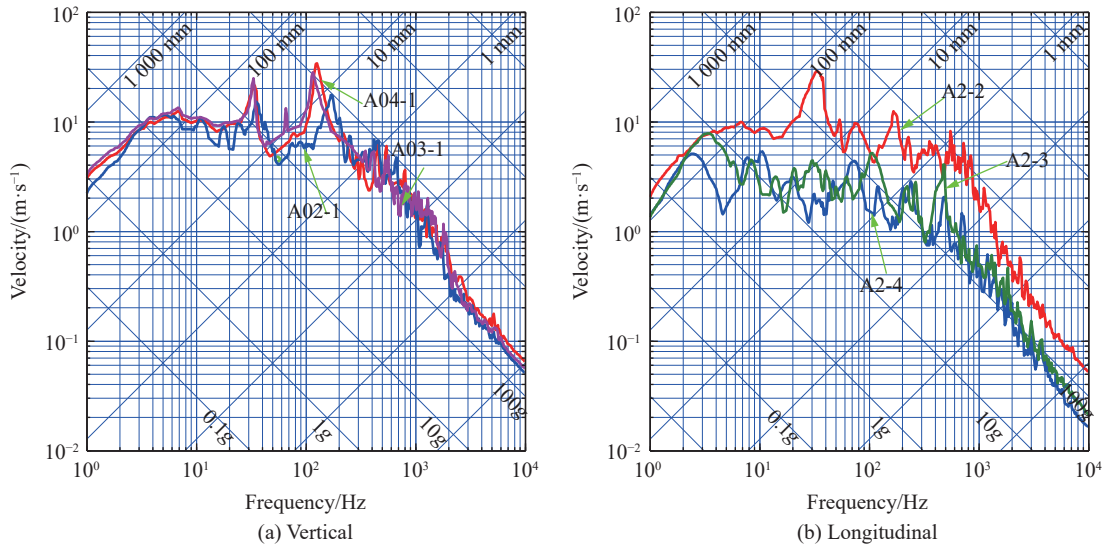


图 13 典型测点处冲击谱变化规律

Fig. 13 The diagram of typical point shock spectrum tendency

3.2 底部近距离爆炸特有毁伤模式分析

本节主要对比近距离底部爆炸(工况 1)、舷侧爆炸下试验结果(工况 4),以此获取底部近距离爆炸下典型破坏模式。图 15 所示为舷侧爆炸后舱段模型变形毁伤示意图,在爆心正对区域产生一长条形破口,长 202 cm,宽 67 cm,基本呈对称状态。模型变形撕裂区域纵向方向基本位于试验段横舱壁之间,并在横舱壁处形成较为明显的塑性铰边界;垂向方向模型变形撕裂向下最长延伸至内底下方第二道纵隔板位置,向上最长延伸至甲板 2 上方 16 cm 处,破口区域基本集中在内底与甲板 2 之间,甲板 2~甲板 01 下方舷侧部分板格发生了局部较为明显的塑性变形,上层建筑基本未变形。结合 2.1 节分析,综合对比可发现近距离底部爆炸下舱段模型的特有毁伤模式主要如下:

- (1) 由爆炸冲击力、重力耦合作用引起的模型整体隆起变形;
- (2) 爆心正对区域模型的撕裂, 并伴有局部凹陷大变形;
- (3) 舷侧外板的大范围屈曲失稳, 形成多条褶皱。

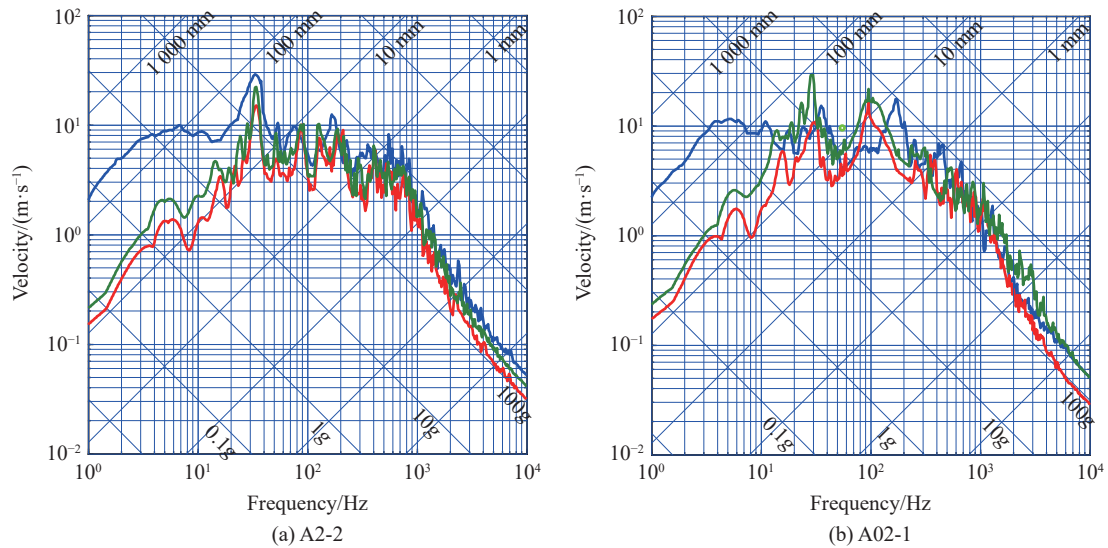


图 14 测点冲击谱

Fig. 14 Shock spectra at typical measuring points



图 15 舷侧近距离爆炸下舱段模型毁伤结果

Fig. 15 The cabin model damage after shipboard close-in underwater explosion

3.3 底部近距离爆炸破坏毁伤效能分析

依据前文中的试验结果, 从毁伤效能的角度来综合对比底部近距离爆炸、舷侧近距离爆炸对舱段模型的毁伤效果。2 种攻击方式下, 舱段模型均出现撕裂破口区域、塑性大变形区域、屈曲失稳区域等, 单纯比较某一破坏模式难以真实反映舱段模型的综合毁伤效果。基于此, 为综合考虑各种破坏模式影响, 主要采用计算剩余强度的方式来比较底部近距离爆炸、舷侧爆炸对舱段模型的综合毁伤效果。

本节分析主要通过数值模拟, 计算模型主要包括底部爆炸后舱段计算模型、舷侧爆炸后舱段计算模型, 剩余强度的计算主要通过 Abaqus 显示动力学分析软件, 在舱段模型两端施加角速度, 并提取两端反弯矩作用力, 弯矩时程曲线的峰值即视为模型的剩余强度。由于试验后舱段模型毁伤较为严重, 各种变形毁伤模式错综复杂, 完整再建毁伤后的舱段模型基本难以实现。基于此, 需进行简化, 简化原则主要如下:

- (1) 对于模型中间破口区域, 相应位置板和加筋应删除; 出现两边及以上边界撕裂的内底板板格, 则将破损区域单元全部删除。对于舷侧外板、内底板大裂缝, 则将裂缝处单元删除。

(2)模型中间区域双层底整体变形、甲板变形应模拟,考虑到变形较为复杂,建立相应几何模型再进行网格划分难度较大,本文中采用多分析步进行实现,先采用第一分析步进行初始变形施加,通过在变形区域(舷侧外板、甲板)施加压力载荷,使其破坏模式、破坏量值与试验相当,第二步再进行极限强度分析。

底部爆炸、舷侧爆炸后舱段模型的剩余强度计算结果如图16所示,中拱状态下底部爆炸后模型、舷侧爆炸后模型的剩余极限强度分别为3.88、8.81 MN·m,中垂状态下底部爆炸后模型、舷侧爆炸后模型的剩余极限强度分别为4.78、6.23 MN·m。综合对比可看出,本次试验中,同样爆距下,2.0 kg TNT药量底部爆炸对舱段模型的综合毁伤效果要大于2.8 kg TNT药量舷侧爆炸。相比而言,在此爆炸爆距下,底部爆炸对舱段模型的综合毁伤效果相对舷侧爆炸可提高40%以上。底部爆炸之所以具有很强的毁伤效能,其机理主要在于:

(1)底部爆炸时能充分利用气泡能量,一方面底部爆炸时舱段模型所受浮力与气泡 Bjerknes 力同方向,另一方面底部爆炸时气泡容易产生射流,而舷侧方位爆炸时,气泡容易浮出水面而发生溃灭,气泡难以得到有效利用;

(2)模型底部结构相对平整,而舷侧通常具有一定的曲率,底部爆炸时结构的吸能效率相较而言更高,因此底部爆炸时综合毁伤效果较大。

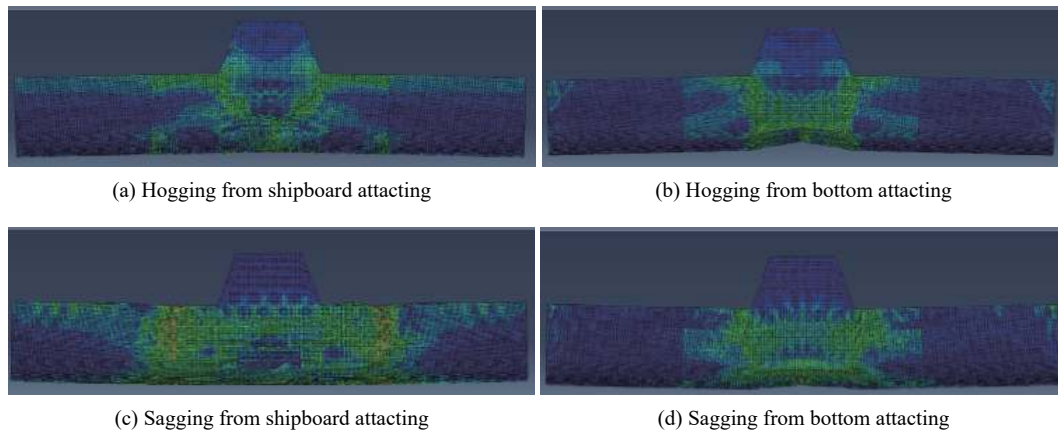


图16 舷侧爆炸、底部爆炸后剩余强度对比

Fig. 16 Residual ultimate strength contrasting between broadside and bottom explosions

4 结论

通过开展底部近距离爆炸下舱段模型毁伤试验,获取了舱段模型结构破损区域试验数据、非破损区域的冲击环境试验数据,通过与底部中远场爆炸试验、舷侧近距离爆炸试验结果对比,得出以下结论:

(1)在冲击环境方面,底部近距离爆炸下非破损区域测点中高频段的冲击谱曲线变化趋势基本与中远场爆炸一致,但在低频阶段,底部近距离爆炸下的谱位移要远高于中远场爆炸工况;

(2)底部近距离爆炸下舱段模型的特有毁伤模式主要包括由爆炸冲击力、重力耦合作用引起的模型整体隆起变形、爆心正对区域模型的撕裂,并伴有局部凹陷大变形、舷侧外板的大范围屈曲失稳,形成多条褶皱等3个基本特点;

(3)相比舷侧方位爆炸,底部爆炸由于能充分利用气泡能量和模型结构特性,对舱段模型具有更强的毁伤效果;

(4)底部近距离爆炸下载荷特性十分复杂,气泡与破损边界的相互耦合机理还尚待研究。

参考文献:

- [1] 刘建湖. 水下接触爆炸载荷与结构相互作用研究 [C] // 第十二届全国爆炸力学学术会议. 桐乡, 2018.

- [2] 周章涛,刘建湖,裴红波,等.水下近距和接触爆炸流固耦合作用机理及加载效应研究[J].*兵工学报*,2017,38(1):95-104. DOI: 1000-1093(2017)S1-0136-10.
ZHOU Z T, LIU J H, PEI H B, et al. Fluid structure interaction mechanism and loading effect in close in and contact underwater explosions [J]. *Acta Armamentari*, 2017, 38(1): 95-104. DOI: 1000-1093(2017)S1-0136-10.
- [3] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2003.01.007.
ZHU X, BAI X F, HUANG R B, et al. Crevasse experiment research of plate membrane in vessels subjected to underwater contact explosion [J]. *Ship Building of China*, 2003, 44(1): 46-52. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2003.01.007.
- [4] NURICK G N, SHAVE G C. The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads: an experimental study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(1): 99-116. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00018-2.
- [5] WIERZBICKI T. Petalling of plates under explosive and impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(9/10): 935-954. DOI: org/10.1016/S0734-743X(99)00028-7.
- [6] RAJENDRAN R, NARASIMHAN K. Damage prediction of clamped circular plates subjected to contact underwater explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(4): 373-386. DOI: 10.1016/S0734-743X(00)00051-8.
- [7] YU Z L, HU Z Q, AMDAHL J, et al. Investigation on structural performance predictions of double-bottom tankers during shoalgrounding accidents [J]. *Marine Structures*, 2013, 33: 188-213. DOI: 10.1016/j.marstruc.2013.06.003.
- [8] 陈娟,吴国民.船底双层板架结构水下近场爆炸试验[J].*中国舰船研究*,2019,14(S1):143-150. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01571.
CHEN J, WU G M. Underwater near-field explosion experiment of double-wall bottom grillage [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(S1): 143-150. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01571.
- [9] 王超,岳永威,王免钧.水面舰船双层结构水下抗爆特性数值模拟[J].*中国舰船研究*,2013,8(1):39-46. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2013.01.007.
WANG C, YUE Y W, WANG H J. Numerical simulation on anti-shock performance of double structure of surface warship subjected to underwater contact explosion [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(1): 39-46. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2013.01.007.
- [10] 杨棣,姚熊亮,张玮,等.水下近场及接触爆炸作用下双层底结构损伤试验研究[J].*振动与冲击*,2015,34(5):161-186. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.02.028.
YANG L, YAO X L, ZHANG W, et al. Experimental on double bottom's structural damage under water near-field and contact explosions [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(5): 161-186. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.02.028.
- [11] 吴庭翱,张弩,侯海量,等.水下接触爆炸下多舱防护结构载荷特性及动响应研究进展[J].*中国舰船研究*,2018,13(3):1-12. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01051.
WU T A, ZHANG N, HOU H L, et al. Research progress on load characteristics and dynamic response of multicamerate defense structure subjected to contact underwater explosion [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(3): 1-12. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01051.
- [12] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.01.006.
YAO X L, LIU W T, ZHANG A M, et al. Review of the research on underwater explosion bubbles an the corresponding structural damaging [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(1): 36-45. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.01.006.

(责任编辑 王易难)