基于鱼雷爆炸毁伤考核的靶标仿真设计

刘文思*, 田恒斗, 程素秋

中国人民解放军91439部队, 大连 116041

*联系人, E-mail: liuwensi1985@126.com

收稿日期: 2020-09-25; 接受日期: 2020-11-24; 网络出版日期: 2021-10-21

全军毁伤效能评估能力建设重点项目(2021)资助

摘要 用于鱼雷爆炸毁伤考核的靶标设计目前没有标准规范可供参考, 只能参照舰船毁伤评估现有方法, 对毁伤考核靶标进行设计. 首先从原理上分析水面舰船毁伤等级划分依据, 明确毁伤考核靶标的设计应参照舰船结构的不同破口、塑性变形等损伤失效情况, 同时指出考核靶标设计过程中借鉴现行舰船毁伤等级标准存在的问题; 通过仿真计算解决该难点, 结果表明水下爆炸载荷与典型水面舰船存在复杂耦合作用, 鱼雷爆炸毁伤效能不仅与爆炸载荷对船体的做功能力相关, 还与载荷的作用模式、能量的输出结构相关, 不同工况下毁伤模式、能量输出结构存在较大差异, 应根据计算结果所预报的对应工况下的毁伤模式、能量的输出结构开展水下爆炸靶标结构的设计; 针对鱼雷爆炸毁伤特点提出水下爆炸靶标结构优化设计方法, 同时通过仿真计算对靶标设计毁伤的等效性进行了验证, 仿真对比显示依据该方法设计靶标能够有效评判鱼雷对实船爆炸毁伤效果, 给出实战条件下鱼雷爆炸毁伤靶标设计流程, 为鱼雷爆炸毁伤评估靶标设计提供技术支撑, 该方法同时能为鱼雷爆炸毁伤试验考核提供仿真预报.

关键词 水下爆炸, 靶标设计, 毁伤考核, 鱼雷, 流固耦合

PACS: 43.30.Lz, 52.57.Bc, 91.30.pd, 89.20.Dd, 47.11.-j

1 引言

海上靶标是各国海军测试武器性能、检验战斗力的重要装备. 靶标设计主要依据打靶训练的科目、目的需求而定, 如测试水中兵器的精确性、爆炸对舰船目标的毁伤效能和作战性能, 检验舰艇作战人员武器操控能力和战斗训练水平等^[1-3].

鱼雷水下近场爆炸对舰船实船毁伤试验费用高昂, 对舰船局部结构毁伤严重^[4-11], 水面舰艇的毁伤效能考核项目难以开展, 水下近场爆炸下实船毁伤试验考核鉴定长期处于缺失状态, 现有技术一般采用简单

靶标替代实船来考核水中兵器对舰船结构破坏, 对水中兵器爆炸威力及效果能够起到一定的演示验证功能, 然而简单靶标结构与实船结构之间存在巨大差异, 鱼雷对两者毁伤效果之间的对应关系缺少评判依据, 因此急需开展能适用于鱼雷爆炸毁伤考核的靶标设计方法的研究.

2 现行舰船毁伤等级分析

鱼雷爆炸毁伤考核的靶标设计方法目前尚没有标

引用格式: 刘文思, 田恒斗, 程素秋. 基于鱼雷爆炸毁伤考核的靶标仿真设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 124607

Liu W S, Tian H D, Cheng S Q. Targeted design method based on torpedo explosion damage assessment (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 124607, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0361](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0361)

准规范可参照, 行业内一般采用结构爆炸毁伤力学学科中对水面舰船结构的局部破损毁伤等级划分方法进行鱼雷毁伤能力评估. 下面从现有水面舰船结构的毁伤评估方法作为切入点, 根据炸药当量、炸点与舰船之间的位置关系, 将水下爆炸分为接触爆炸、近场爆炸、远场非接触爆炸, 对不同工况条件下舰船毁伤等级划分依据进行分析, 为爆炸毁伤考核的靶标设计提供依据.

2.1 近场或接触爆炸作用下靶标结构的局部破损毁伤等级

水面舰船结构局部破损抗毁伤能力可通过相对破口抗力参数来表征^[2].

相对破口抗力 $\bar{D}$ 可表示为

$$\bar{D} = D_0 / D_m \quad (1)$$

式中, D_0 为舰船的设计特征破口直径, D_m 为舰船在近场或接触爆炸载荷作用下所产生的破口最大直径.

根据水面舰船在近场或接触爆炸下的相对破口抗力参数 $\bar{D}$ 的定义式(1)可知, 该参数反映了近场或接触爆炸对结构产生的破口直径相对舰船的设计特征破口直径的比值. 根据舰艇通用规范及舰船结构毁伤力学中关于水面舰艇不沉性的规定, 确定近场或接触爆炸载荷作用下, 水面舰船结构完全毁伤的阈值取为0.5, 相应得出结构部分毁伤和基本完好的阈值如表1^[2].

2.2 中远场非接触爆炸作用下舰船结构的局部破损毁伤等级

可参考现行水面舰船标准规范, 将舰船结构的非接触水下爆炸冲击损伤等级划分为四级.

一级: 主船体损伤, 主船体强力构件的变形大于短边跨距的5%, 壳板出现永久变形, 但不影响水密性, A级设备损坏, 人员伤亡, 完全丧失战斗力.

二级: 主船体安全, 主船体强力构件的变形小于短边跨距的1%, A级设备大部分损坏, 大部分武器系统无法操作使用, 部分人员受伤, 基本丧失战斗力.

三级: 船体结构安全, A级设备有部分损坏, 大部分武器仍能操作发射使用, 人员有轻伤, 基本保持战斗力.

四级: 全舰的船体结构、A级设备和人员安全, 完全保持战斗力, 但B级或C级设备可出现损坏.

表 1 大中型水面舰艇结构相对破口抗力阈值及其结构完好性等级^[2]

Table 1 The damage resistance and structural integrity of ship structure [2]

结构抗毁伤的完好性等级		相对抗破损破口抗力 $\bar{D}$ 的阈值
结构基本完好		$\bar{D} > 20$
结构部分毁伤	轻度毁伤	$10 < \bar{D} \leq 20$
	中度毁伤	$1.0 < \bar{D} \leq 10$
	重度毁伤	$0.5 < \bar{D} \leq 1.0$
结构完全毁伤		$\bar{D} < 0.5$

通过对接触爆炸、近场爆炸、远场非接触爆炸作用下舰船结构的毁伤等级划分标准进行梳理分析, 可知不同工况下鱼雷水下爆炸对船体平台的毁伤等级主要由破口大小、塑性变形范围等损伤情况决定, 因此毁伤考核靶标的设计应参照舰船结构的毁伤等级, 即根据不同破口、塑性变形等损伤失效情况, 在明确水下爆炸可能造成的毁伤区域的基础上, 有针对性地对考核靶标的主尺度、结构进行选择 and 设计. 但由于近场爆炸所产生的复杂载荷及其与船体的流固耦合作用, 不同工况可能对应多种毁伤模式, 这些毁伤模式和所造成的具体毁伤效果在设计之初显然是未知的, 这给使用舰船毁伤等级进行靶标设计造成了困难.

3 水下爆炸载荷与水面舰船复杂耦合作用模式及能量输出结构

通过构建与实战条件贴近的数值仿真模型, 可以实现鱼雷在水下不同爆距处爆炸所产生载荷与水面舰船复杂耦合作用, 可为毁伤考核试验提供前期预报的同时, 明确水下爆炸可能造成的毁伤模式和能量输出结构, 为考核靶标的主尺度、结构设计提供重要参考.

选取某型鱼雷爆炸对全尺寸舰船的毁伤过程进行仿真计算, 在相同TNT当量、不同爆距工况下对比分析全尺寸舰船的破口形状、区域大小及最大塑性应变参量, 研究不同工况下水下爆炸载荷与典型水面舰船耦合作用模式、爆炸能量输出结构之间存在的差异.

3.1 仿真模型建立

对某舰船全尺寸建模, 如图1所示, 利用LS-DYNA

图 1 (网络版彩图)模拟工况

Figure 1 (Color online) Simulation condition.

显式动力学分析程序进行仿真计算^[12-15], 计算时长3 s. 主尺度总长153 m, 宽17 m, 型深10 m, 空气场初始压力设置为一个大气压, 水域初始压力设置考虑重力影响, 压力随深度线性变化. 空气、水体采用Euler单元, 船体采用Lagrange单元, 两者通过流固耦合方式来处理相互作用. 具体材料参数及状态方程见参考文献[16].

3.2 水下爆炸载荷与水面舰船复杂耦合作用模式

选取舰船结构中典型强力结构横舱壁为代表, 分别计算鱼雷位于横舱壁结构外底板正下方, 爆距 $D=0$,

2, 4 m时, 全尺寸舰船的局部毁伤程度, 下面对3种工况的仿真计算结果进行对比分析.

(1) 舰船整体应力及气泡脉动和水射流云图

图2显示了三种工况下舰船整体应力、气泡脉动及溃灭形成水射流云图. 工况1部分爆轰产物形成后直接由外板破口处进入空舱, 因此气泡膨胀的最大半径、气泡收缩后期形成的环形气泡规模要小于工况2和3, 且工况1在气泡溃灭形成的水射流直接进入舰船内部; 工况2和3则随着爆距的增加, 舰船结构与爆轰产物形成的气泡的耦合作用减弱, 且爆轰产物没有溢出损失, 因此气泡膨胀得更加充分, 气泡收缩后期形成的环形气泡更加明显, 气泡中心溃灭形成的自下而上的水射流作用于舰船外板形成二次毁伤.

(2) 局部破口形式、塑性应变云图

对破口及塑性应变大于0.1区域仿真计算结果以图3显示并分析.

工况1属于接触爆炸, 主要毁伤模式为相邻两个舱室的大开口破损. 爆轰波直接作用于船底外板, 剪切应力作用下形成对船底外板的冲塞破口, 外板可观察到

图 2 (网络版彩图)三种工况下舰船整体应力、气泡(左)及水射流(右)与结构作用云图. (a) 爆距0 m; (b) 爆距2 m; (c) 爆距4 m

Figure 2 (Color online) Ship stress, structure action with bubble (left) and water jet (right) under three conditions. Blast distance of 0 m (a); 2 m (b); 4 m (c).

图 3 (网络版彩图)三种工况下局部破口形式、塑性应变云图. (a) 爆距0 m; (b) 爆距2 m; (c) 爆距4 m
Figure 3 (Color online) Local hole and plastic strain under three conditions. Blast distance of 0 m (a); 2 m; (b); 4 m (c).

花瓣状开裂、翻转. 工况1是三种工况中唯一造成大开口撕裂最为明显的工况, 但塑性区域最小, 说明接触爆炸毁伤模式主要是局部毁伤, 对局部毁伤作用明显但作用区域有限.

工况2和3属于近场爆炸, 主要毁伤模式为三个邻近舱室的大面积塑性应变. 第一阶段冲击波及爆轰产物形成的气泡快速作用于船底外板, 形成局部塑性应变, 第二阶段水射流的作用进一步扩大了塑性应变范围. 在一定爆距内, 随爆距增加船体塑性应变区域有扩大的趋势.

(3) 不同工况下能量输出结构差异

鱼雷近场不同爆距下对舰船的作用展现出了不同的能量输出结构, 这与舰船最终的毁伤模式密切相关, 见图4. 工况1 (爆距0 m)下初始冲击波能最大, 气泡能最小, 最终作用于舰船的总能量最高, 对舰船局部破坏效果最为明显; 工况2 (爆距2 m)下最终作用于舰船的总能量与工况1几乎相同, 但能量输出结构不同, 可分为初始冲击波阶段(约为 6×10^7 J)和 $t=1$ s时水射流阶段(约为 4×10^7 J), 两阶段作用于舰船的能量相当, 与工况1相比虽然未造成明显破口, 但产生的塑性应变区域明显大于0 m工况, 说明随爆距增加鱼雷对舰船毁伤模式由局部毁伤向总体毁伤逐渐转变; 工况3 (爆距4 m)下初始冲击波阶段(约为 3×10^7 J)和 $t=1$ s时水射流阶段(约为 6×10^7 J), 说明此时鱼雷对舰船的能量输出已转变为

图 4 (网络版彩图)三种工况下鱼雷作用于舰船的总能量曲线

Figure 4 (Color online) The total energy curve applied to the ship under three conditions.

以第二阶段的水射流载荷作用为主.

可见鱼雷爆炸毁伤效能不仅与爆炸载荷对船体的做功能力相关, 还与载荷的作用模式、能量的输出结构密切相关, 因此对于不同工况下的鱼雷爆炸毁伤必须具体计算, 根据计算结果所预报的对应工况下的毁伤模式、能量的输出结构开展水下爆炸靶标结构的设计.

4 水下爆炸靶标结构优化设计方法及毁伤等效性验证

选取某型鱼雷爆炸对全尺寸舰船及设计舱段靶标的毁伤程度进行仿真计算, 对比分析全尺寸舰船及设计舱段靶标的外底板和内底板的破口形状、区域大小, 及最大塑性应变参量, 用以验证舱段靶标设计方案的合理性.

4.1 水下爆炸靶标结构优化设计方法

根据船舶原理母型船设计法^[17-19], 采用截取原型目标舰船若干个水密舱段作为靶标, 考虑到鱼雷爆炸的局部毁伤特性, 截取长度综合考虑破口大小、塑性应变等毁伤参数. 通过数值计算母船体与典型舱段模型的破口大小、塑性应变等毁伤参数, 评估水面典型舱段模型尺寸规模对毁伤计算结果的影响, 优化标准靶设计方案, 节约实船爆炸试验费用.

提出以下实战条件下水中兵器爆炸毁伤靶标设计流程.

对于不同目标舰船, 甚至是同一目标舰船不同局

部结构, 同一水中兵器在相同工况下造成的毁伤情况, 如局部破口大小、塑性应变区域都有可能具有较大差异. 因此, 在毁伤靶标设计时应依据实际舰船结构、兵器 TNT 当量、爆距等参数进行建模, 通过对真实工况的仿真计算, 明确在此工况下水中兵器对目标舰船的毁伤模式、能量输出结构, 判断对舰船目标属于平台级毁伤还是设备及人员级毁伤, 据此选取毁伤评判标准, 分类进行靶标设计. 如平台级毁伤应重点考虑局部破口、塑性应变的测量, 整体毁伤应重点考虑设备及人员毁伤、典型设备(动力、作战指挥室、弹药舱)安装部位加速度、应力等, 实战条件下水中兵器爆炸毁伤靶标设计流程如图 5 所示.

4.2 毁伤等效性仿真计算验证

选取位于舰船结构中部区域的典型强力结构横舱壁为代表, 分别计算鱼雷位于横舱壁结构外底板正下方, 爆距 $D=0, 2, 4$ m 时, 全尺寸舰船及设计舱段靶的局部毁伤程度, 如图 6 所示, 下面对 3 种工况的仿真计算结果进行对比分析.

将工况 1 下鱼雷在横舱壁处爆炸时全尺寸舰船和设计舱段靶的结构最大塑性应变值、最大应力值随时间变化情况绘制成曲线如图 7 所示.

工况 1 下的全尺寸舰船和设计舱段靶的结构破口区域大小仿真计算结果见表 2.

可见全尺寸舰船和设计舱段靶在横舱壁处最大塑性应变值、最大应力值在不同时刻偏差值很小, 随时间变化趋势基本一致; 全尺寸舰船和设计舱段靶在外底板及内底板上的破口形状相同、破口区域面积偏差值较小, 外底板偏差值为 -5.77% 、内底板偏差值为 15.63% ; 同时, 两者在塑性应变云图分布上也展现出了高度的相似性.

将工况 2 下鱼雷在横舱壁处爆炸时全尺寸舰船和设计舱段靶的结构最大塑性应变值、最大应力值随时间变化情况绘制成曲线如图 8 所示.

工况 2 下的全尺寸舰船和设计舱段靶的结构塑性变形区域大小仿真计算结果见表 2.

可见全尺寸舰船和设计舱段靶在横舱壁处最大塑性应变值、最大应力值在不同时刻偏差值很小, 随时间变化趋势基本一致; 全尺寸舰船和设计舱段靶在外底板上均未造成破口, 因此外底板偏差值为 0, 内底板上的破口形状相同, 但破口区域面积偏差值较大, 内底板偏差值为 -74.31% . 分析原因认为是在此工况下造成的内底破口长宽值均较小, 与有限单元尺度 0.5 m 量级接近, 失效单元个体的数量微小变化就会导致相对

图 5 实战条件下水中兵器爆炸毁伤靶标设计流程

Figure 5 Design process of explosive target of underwater weapon.

表 2 工况 1 下的破口区域及工况 2 和 3 下的塑性变形区域大小仿真计算结果

Table 2 Simulation results of the fracture area size under condition 1 and the plastic deformation region under conditions 2 and 3

工况	毁伤位置	爆距 D (m)	全尺寸舰船			设计舱段靶			偏差值 (%)
			长度 (m)	宽度 (m)	破口区域 (m^2)	长度 (m)	宽度 (m)	破口/塑性变形区域 (m^2)	
1	外底板	0	6.79	3.27	22.20	6.86	3.05	20.92	-5.77
	内底板		7.04	3.00	21.12	7.40	3.30	24.42	15.63
2	外底板	2	8.64	5.41	46.74	8.87	5.36	47.54	1.71
	内底板		9.57	4.50	43.07	9.35	4.48	41.89	-2.73
3	外底板	4	23.59	6.68	157.58	19.63	7.54	148.01	-6.07
	内底板		18.47	6.78	125.23	17.75	6.48	115.02	-8.15

图 6 (网络版彩图)三种工况下设计舱段靶外底及内底的破口形状、区域,塑性应变云图分布对比. (a) 爆距0 m; (b) 爆距2 m; (c) 爆距4 m

Figure 6 (Color online) Design compartment target local hole and plastic strain under three conditions. Blast distance of 0 m (a); 2 m (b); 4 m (c).

图 7 (网络版彩图)爆距 $D=0$ m时,全尺寸舰船和设计舱段靶最大塑性应变、最大应力时程曲线

Figure 7 (Color online) Time history curves of maximum plastic strain and maximum stress for full-size ship and design cabin target at blast distance of 0 m.

偏差较大. 这也表明工况2下全尺寸舰船和设计舱段靶的主要毁伤模式已经由破口开裂转变为塑性变形, 两者在外底板上的塑性变形区域偏差值为1.71%, 内底板上的塑性变形区域偏差值为-2.73%. 两者在塑性应变云图分布上则展现出了较为一致的相似性.

将工况3下鱼雷在横舱壁处爆炸时全尺寸舰船和设计舱段靶的结构最大塑性应变值、最大应力值随时

间变化情况绘制成曲线如图9所示.

工况3下的全尺寸舰船和设计舱段靶的结构塑性变形区域大小仿真计算结果见表2.

可见全尺寸舰船和设计舱段靶在横舱壁处最大塑性应变值、最大应力值在不同时刻偏差值很小, 随时间变化趋势基本一致. 在 $t=1.0$ s左右发生水射流载荷作用模式明显体现在最大塑性应变时程曲线上, 反映出设计舱段靶能够考核复杂载荷对舰船结构的联合毁伤作用; 全尺寸舰船和设计舱段靶在外底板及内底板上均未造成破口, 表明工况3下全尺寸舰船和设计舱段靶的主要毁伤模式为塑性变形; 两者在外底板塑性应变偏差值-6.07%, 在外底板塑性应变偏差值-8.15%, 云图分布上较为一致.

图 8 (网络版彩图)爆距 $D=2$ m时,全尺寸舰船和设计舱段靶最大塑性应变、最大应力时程曲线

Figure 8 (Color online) Time history curves of maximum plastic strain and maximum stress for full-size ship and design cabin target at blast distance of 2 m.

图 9 (网络版彩图)爆距 $D=4$ m时,全尺寸舰船和设计舱段靶最大塑性应变、最大应力时程曲线

Figure 9 (Color online) Time history curves of maximum plastic strain and maximum stress for full-size ship and design cabin target at blast distance of 4 m.

通过三种工况下全尺寸舰船和设计舱段靶毁伤等效性的仿真计算, 对比分析了全尺寸舰船和设计舱段靶外底及内底的破口形状、区域, 塑性应变云图分布, 验证了强力结构处设计舱段靶具有较好的毁伤等效性, 仿真计算结果表明其保真度大于85%, 需要指出的是随着鱼雷与设计舱段靶之间的爆距增加, 三种工况下的毁伤参数偏差值逐渐增大; 仿真结果显示工况2为临界工况, 该工况下主要毁伤模式已经由破口开裂转变为塑性变形, 此时破口较小, 以破口为考核参数则偏差值较大, 建议以主要毁伤模式塑性变形为考核参数, 全尺寸舰船和设计舱段靶外底及内底的塑性应变仿真结果偏差值在5%之内, 毁伤等效性较好.

5 结论

(1) 对接触爆炸、近场爆炸、远场非接触爆炸作用下舰船结构的毁伤等级划分标准进行梳理分析, 明确不同工况下鱼雷水下爆炸对船体平台的毁伤等级主要由破口大小、塑性变形范围等损伤情况决定的, 毁伤考核靶标的设计应参照舰船结构的不同破口、塑性变形等损伤失效情况, 解决了考核靶标的主尺度、结构选择和设计依据.

(2) 选取某型鱼雷爆炸对全尺寸舰船的毁伤过程进行仿真计算, 通过构建与实战条件贴近的数值仿真模型, 实现了鱼雷在水下不同爆距处爆炸所产生载荷与水面舰船复杂耦合作用, 指出不同工况下水下爆炸载荷对水面舰船毁伤模式、爆炸能量输出结构之间存在差异. 鱼雷爆炸毁伤效能不仅与爆炸载荷对船体的做功能力相关, 还与载荷的作用模式、能量的输出结构相关. 对于不同工况下的鱼雷爆炸毁伤必须具体计算, 根据计算结果所预报的对应工况下的毁伤模式、能量的输出结构开展水下爆炸靶标结构的设计.

(3) 根据船舶原理母型船设计法, 考虑到鱼雷爆炸的局部毁伤特性, 通过数值计算母船体与典型舱段模型的破口大小、塑性应变等毁伤参数, 评估水面典型舱段模型尺寸规模对毁伤计算结果的影响, 提出基于鱼雷爆炸毁伤考核的靶标设计方法, 优化靶标结构设计, 仿真对比显示依据该方法设计靶标能够有效评判鱼雷对实船爆炸毁伤效果, 节约实船爆炸试验费用, 为鱼雷武器爆炸毁伤考核提供技术参考.

(4) 给出实战条件下水中兵器爆炸毁伤靶标设计流程, 为鱼雷爆炸毁伤评估靶标设计提供技术支撑, 该方法同时能为鱼雷爆炸毁伤试验考核提供仿真预报.

参考文献

- Huang J X, He Q, Dong L. The development of US Navy seaborne target systems (in Chinese). *Ship Sci Tech*, 2017, 39: 155–157 [黄金星, 何琦, 董琳. 美国海军靶船发展研究. *舰船科学技术*, 2017, 39: 155–157]
- Zhu X, Zhang Z H, Mei Z Y. *Damage Mechanics of Ship Structure* (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2013 [朱锡, 张振华, 梅志远. *舰船结构毁伤力学*. 北京: 国防工业出版社, 2013]
- Cole R H. *Underwater Explosions*. New Jersey: Princeton University Press, 1948
- Keil A H. *The Response of Ships to Underwater Explosions*. Technical Report. Department of the Navy David Taylor Model Basin, 1961
- Zhang Z, Wang Y, Zhao H, et al. An experimental study on the dynamic response of a hull girder subjected to near field underwater explosion. *Mar Struct*, 2015, 44: 43–60
- Zhang Z H, Wang Y. “Blade effect” on the overall damage of hull girder caused by near field undex shock wave (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 48: 43–60 [张振华, 汪玉. 近距水爆冲击波对船体梁总体毁伤的“刀锋效应”. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 48: 43–60]
- Jin J, Zhu X, Hou H L, et al. Review of dynamic response and damage mechanism of ship structure subjected to underwater explosion load (in Chinese). *J Unmanned Undersea Syst*, 2017, 25: 396–403 [金健, 朱锡, 侯海亮, 等. 水下爆炸载荷下舰船响应与毁伤研究综述. *水下无人系统学报*, 2017, 25: 396–403]
- Jiang Z T, Li Y, Pang X J, et al. Dynamic response of hull plates subjected to near field underwater explosion bubble jet load (in Chinese). *J Vib Shock*, 2018, 37: 214–219 [姜忠涛, 李烨, 庞学佳, 等. 近场水下爆炸气泡射流载荷冲击船体外板的动响应分析. *振动与冲击*, 2018, 37: 214–219]
- Li H T, Zhang Z H, Mu J L, et al. Hydro-elastic-plastic dynamic response of a ship hull girder subjected to underwater explosion (in Chinese). *Eng Mech*, 2019, 36: 238–247 [李海涛, 张振华, 牟金磊, 等. 水下爆炸作用下弹塑性船体梁整体运动模型及损伤特性. *工程力学*, 2019, 36:

238–247]

- 10 Zhang N, Zong Z. Hydro-elastic-plastic dynamic response of a ship hull girder subjected to an underwater bubble. *Mar Struct*, 2012, 29: 177–197
- 11 Zhang A M, Yao X L, Li J. The interaction of an underwater explosion bubble and an elastic-plastic structure. *Appl Ocean Res*, 2008, 30: 159–171
- 12 Wu L J, Hou H L, Zhu X, et al. Numerical simulation on inside load characteristics of broadside cabin of defensive structure subjected to underwater contact explosion (in Chinese). *Acta Armam*, 2017, 38: 143–150 [吴林杰, 侯海量, 朱锡, 等. 水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱的内压载荷特性仿真研究. *兵工学报*, 2017, 38: 143–150]
- 13 Liu W S, Zhu Q, Xu H. Impact analysis of ship watertight door under the action of airborne explosion research (in Chinese). *Ship Sci Technol*, 2020, 42: 51–54 [刘文思, 朱倩, 徐华. 空中爆炸载荷作用下舰船水密门抗冲击分析. *舰船科学技术*, 2020, 42: 51–54]
- 14 Li Z, Liu Y, Huang F L, et al. Investigation of specific impulse under contact explosion and close-in explosion conditions using numerical method (in Chinese). *Trans Beijing Inst Technol*, 2020, 40: 143–148 [李臻, 刘彦, 黄风雷, 等. 接触爆炸和近距离爆炸比冲量数值仿真研究. *北京理工大学学报*, 2020, 40: 143–148]
- 15 Liang H Z, Zhang Q M, Yang L. Numerical Investigation of jet characteristics of deep water explosion bubbles near a rigid boundary (in Chinese). *Acta Armam*, 2017, 38: 130–135 [梁浩哲, 张庆明, 杨莉. 刚性壁面附近深水爆炸气泡射流特性数值模拟. *兵工学报*, 2017, 38: 130–135]
- 16 Liu W S, Wu L J, Hou D W, et al. Study on local damage of different structures of ships by torpedo near field explosion (in Chinese). *J Ordnance Equip Eng*, 2019, 40: 9–12 [刘文思, 吴林杰, 侯代文, 等. 鱼雷近场爆炸对舰船不同结构的局部毁伤研究. *兵器装备工程学报*, 2019, 40: 9–12]
- 17 Sheng Z B, Liu Y Z. *Ship Theory* (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003 [盛振邦, 刘应中. 船舶原理. 上海: 上海交通大学出版社, 2003]
- 18 Jin X D, Zhao D Y. *Ship Vibration* (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000 [金咸定, 赵德友. 船体振动学. 上海: 上海交通大学出版社, 2000]
- 19 Zhao Y P. Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates. *Archive Appl Mech (Ingenieur Archiv)*, 1998, 68: 524–538

Targeted design method based on torpedo explosion damage assessment

LIU WenSi^{*}, TIAN HengDou & CHENG SuQiu

Unit 91439 of China PLA, Dalian 116041, China

There is no standard specification for targeted design based on the torpedo explosion damage assessment. Existing methods are currently based on ship damage assessments. We analyze the basis for the classification of damage levels of surface ships, which clarified that the design of the damage assessment target should refer to the damage and failure conditions of the ship structure such as different breaks and plastic deformation, and point out the problems around drawing on the current ship damage rating standards in the process of assessing target design. In this work, these issues are resolved through simulation, and the results show that there is complex coupling between underwater explosion loads and typical surface ships. Torpedo explosion damage efficiency is not only related to the physical work of the explosive load on the hull but also to the mode of action of the load and the energy output structure. The damage mode and energy output structure are quite different under different working conditions. The design of the underwater explosion target structure should be carried out based on the damage mode and energy output structure under the corresponding working conditions predicted by the calculation results. According to the characteristics of torpedo explosion damage, an optimized design method for the underwater explosion target structure is proposed. The equivalence of target design damage is verified through simulation. The simulation comparison shows that the design of the target, based on this method, can effectively evaluate the damage of the actual ship by the torpedo. The design process for the torpedo explosion damage target under actual combat conditions is given to provide technical support to the torpedo explosion damage evaluation target design. This method can also provide simulation prediction for torpedo explosion damage test assessments.

underwater explosion, target design, damage assessment, torpedo, fluid structure interaction

PACS: 43.30.Lz, 52.57.Bc, 91.30.pd, 89.20.Dd, 47.11.-j

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0361](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0361)