

文章编号: 1001-1455(2004)02-0133-07

水面舰艇舷侧防雷舱结构模型抗爆试验研究*

朱 锡¹, 张振华¹, 刘润泉¹, 朱云翔²

(1. 海军工程大学船舶与海洋工程系, 湖北武汉 430033;

2. 中国人民解放军驻 708 所军代表室, 上海 200020)

摘要: 对水面舰艇防雷舱结构模型进行水下抗爆能力系列试验, 探讨了有无水中防御结构的利弊及防护效果。系统研究了舰艇舷侧防御结构在水下爆炸载荷作用下的破坏机理, 并对防雷舱进行水下抗爆设计。经过一系列的模型试验, 证明设计水下舷侧防雷舱结构能够大大减小水下接触爆炸对舰体的破坏作用, 防止重要舱室进水, 从而使结构的水下抗爆能力得到有效提高。

关键词: 爆炸力学; 舷侧防护; 水面舰艇; 水下爆炸; 抗爆

中图分类号: O383.

国标学科代码: 130*3599

文献标志码: A

1 引言

舰艇不仅要有较强的作战能力, 同时要有相应的生存能力, 特别是在遭到敌方攻击条件下的生存能力。舰艇设置防护结构的目的是, 为了有效地抵御各种战术武器的攻击, 保证舰艇在受到各种武器攻击条件下所产生的破损或毁伤程度被控制在允许的状态和范围内, 从而提高舰艇的生存能力和作战能力。

水下舷侧防雷舱结构是舰艇装甲防护结构的重点, 二次大战期间海军强国曾对其作过系列研究^[1~2], 由于保密方面的原因, 该方面文献极少, 笔者^[3]曾对这方面进行了探讨。防雷舱结构的防御对象是鱼雷和水雷的局部接触和近距离非接触爆炸。防雷舱结构是提高大型舰艇生存能力, 特别是受水下攻击时的不沉性所必须的。设在水下的弹药舱、动力舱则是防雷舱的主要防护对象。

本文中, 根据舰艇舷侧防御结构的相关报道, 分别研究了在防雷舱中设置膨胀舱、液舱, 并对防御纵壁进行适当加强等防护形式对防雷舱防护能力的影响, 结果证明上述方法能够有效减小水下接触爆炸对舰体的破坏作用, 从而使结构的水下抗爆能力得到有效地提高。

2 防雷舱结构的设计思想

在第二次世界大战中, 水面舰艇舷侧水下防护结构的设计水平有了长足的进步。水下舷侧一般设有 3~5 道防雷隔舱, 隔舱可以是空舱, 也可以是液舱, 主要的防御对象为鱼雷的接触爆炸。图 1 为美英日各国舰艇的典型防雷舱结构。其设计思想是舷侧防雷舱的第一层为空舱, 给接触爆炸时的外板提供变形的空间, 从而迅速衰减水爆冲击波压力, 因而称为膨胀舱; 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, 因而称为吸收舱; 第三层舱室又为空舱, 以再次阻隔冲击波对内层防御主纵舱壁的破坏作用。防雷舱第一空舱的距离与要防的鱼雷或水雷的装药量有关, 一般认为每 100 kg 的装药需要 1 m 的空舱距离, 具体多大, 需要综合考虑。防护纵舱壁的设置纵深一般认为要 4~5 m, 防护纵隔壁的厚度为 35~50 mm, 材料为高强度, 高韧性的特种装甲钢。

上述防雷舱结构设计思想虽经第二次世界大战验证及其以后的研究所认同, 但我国在舷侧防雷舱结构设计方面没有任何研究和设计经验。我们对水面舰艇舷侧防雷舱结构进行了系列模型研究。该研究在对防雷舱结构的设计思想作出定量试验研究的同时, 对防雷舱结构在水下接触爆炸作用下的破坏

* 收稿日期: 2003-05-07; 修回日期: 2003-07-15

作者简介: 朱 锡(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

机理有了进一步的认识。对今后进行防雷舱结构设计以及设计计算方法研究提供了初步的技术储备。

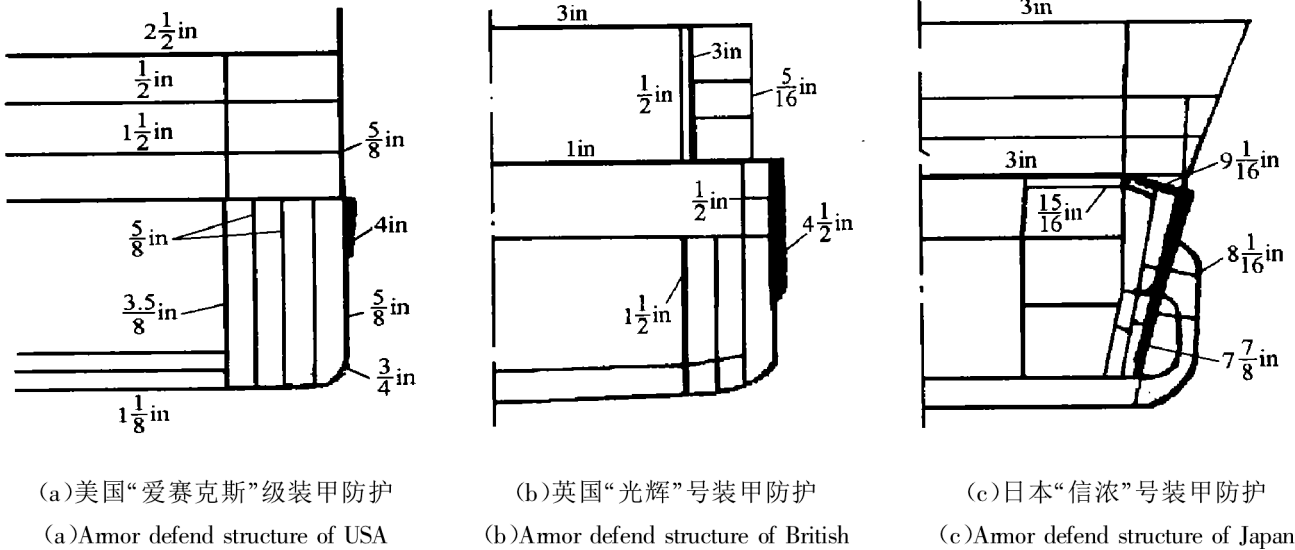


图 1 典型防雷舱结构剖面图

Fig. 1 Representative armor defend structure of cabin near shipboard

除了防雷舱纵深设计基本思想以外,还应注意防护结构的整体协调性。如对于较厚的装甲防护壁,要考虑结构相互支撑的匹配(如图 2)。当防雷舱防护纵隔壁受爆炸载荷作用时,是由下层甲板和内底板作为其支撑结构,虽然下甲板和内底直接承受水下爆炸的载荷较小,但若有效支撑防护纵壁,下甲板和内底板及其附近的结构必须予以加强,并与防护纵壁的强度相匹配。

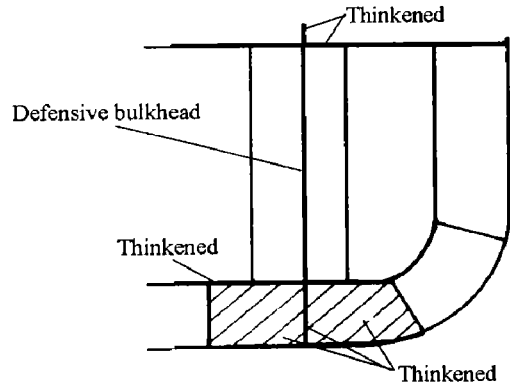


图 2 与装甲防护壁相互支撑的结构应加强
Fig. 2 Strengthen of structure supported with armor defend wall

3 试验设计与实施

3.1 模型设计

共设计了三种模型,对其进行了试验研究,这三种模型分别是:(1)无防雷舱防护结构,舷侧仅设有一层空舱,防御纵壁为普通纵舱壁;(2)防雷舱中设置膨胀舱(第一层空舱)、液舱及第二层空舱,防御纵壁为普通纵舱壁;(3)防雷舱中设置膨胀舱(第一层空舱),液舱及第二层空舱,并对防御纵壁结构进行加强。以下详细介绍各模型的结构设计。

3.1.1 模型 1

试验模型根据某舰结构按几何相似原理进行设计,模型材料为普通碳钢。模型 1 具体尺寸如图 3 所示,模型全长 1500 mm,高 710 mm,宽 567 mm。图 3(a)为防雷舱的横剖面图,图 3(b)为俯视图。图 3(a)中最右边为外板,外板内为一空舱,空舱后为防御纵壁,防

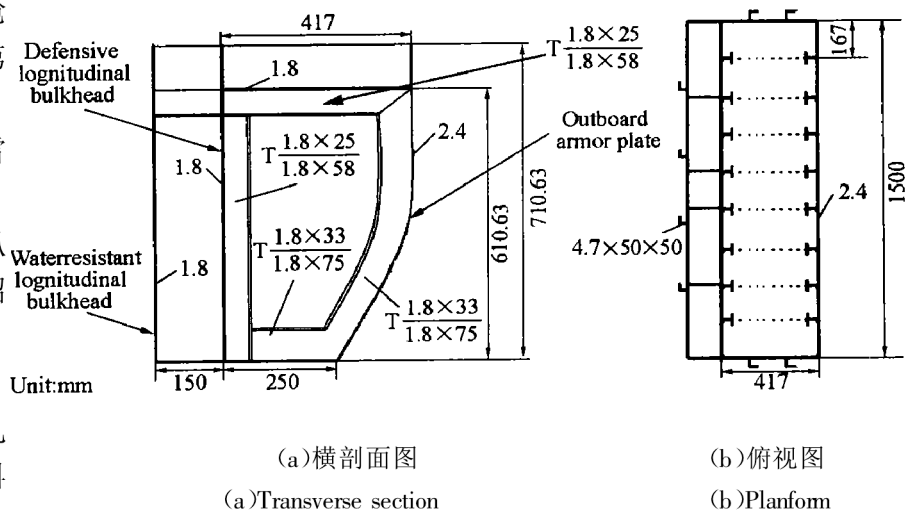


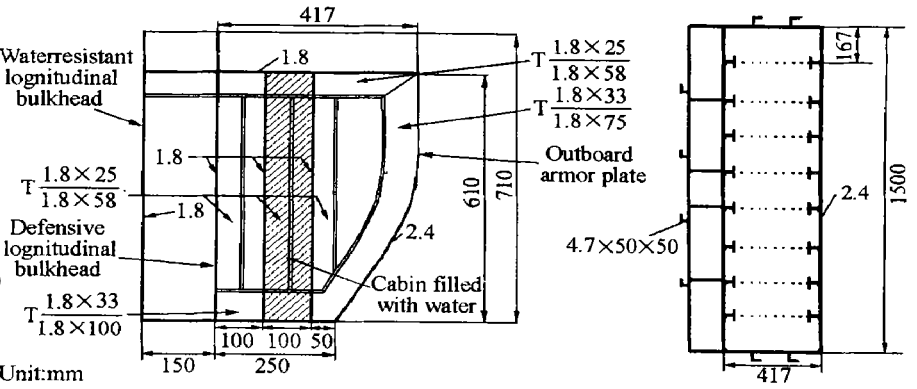
图 3 模型 1 结构设计
Fig. 3 Design of model 1

雷舱的横剖面图,图 3(b)为俯视图。图 3(a)中最右边为外板,外板内为一空舱,空舱后为防御纵壁,防

御纵壁后为防水纵壁。空舱壁上铺有肋骨，肋骨尺寸如图 3(b)所示，肋距为 167 mm。

3.1.2 模型 2

模型 2 在模型 1 的基础上加入了一个水舱，该水舱位于外板和防御纵壁之间，水舱宽 100 mm，两边分别距外板和防御纵壁 200 mm 和 100 mm。对船底板上的肋骨进行加强。将腹板由原来的 75 mm 加强为 100 mm。同时将模型顶部甲板延伸至防水纵舱壁(图 4(a))，并将甲板上的横梁补齐(图 4(b))。水舱上部设有两个注水管和通气管，通过注水管将水舱注满水。



(a)横剖面图 (b)俯视图
(a) Transverse section (b) Planform

图 4 模型 2 结构图

Fig. 4 Design of mode 2

3.1.3 模型 3

在模型 3 中我们对防御纵壁和顶板进行材料和结构加强，将板厚增加到 4 mm，材料改为屈服强度为 390 MPa 的低合金船用钢。其他结构和试验布置与模型 2 相同。如图 5 所示。

3.2 试验实施

试验在海军工程大学爆炸实验筒内进行，用动滑轮将模型吊起，模型下部用定位铁丝和定位铁板定位，使模型处于水平状态，吃水为 0.55 m。目前典型鱼雷装药约为 300 kg 高爆炸药，约 500 kg TNT 当量。为了模拟实艇在 500 kg 炸药接触爆炸下的破坏情况，按几何缩比的实验药量应为 289 g，实取药量为 300 g。炸药用胶布粘附于外板上，置于水下 0.3 m 处。之后，在实验筒内注水，使模型浸入到设计水线处。引爆炸药，观察破损情况。试验布置如图 6 和图 7 所示。

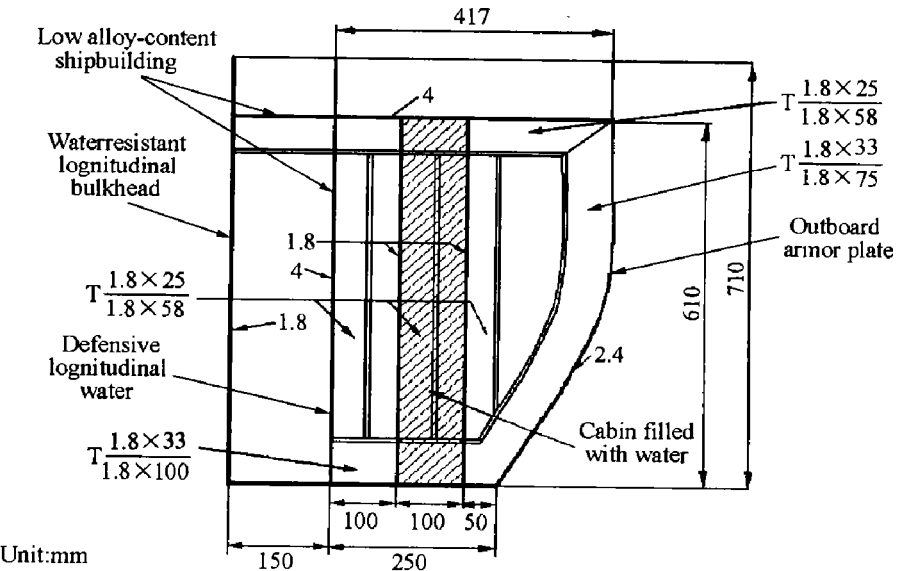


图 5 模型 3 结构图

Fig. 5 Design of mode 3

4 试验结果及分析

4.1 模型 1

模型 1 的破损情况如图 8 所示。图 8(a)为迎爆面破损情况，图 8(b)为背爆面破损情况，图 8(c)为俯视破损情况，图 8(d)为从爆炸筒中收集的破片。

由图 8(a)可见，外板严重破损，并呈花瓣形破

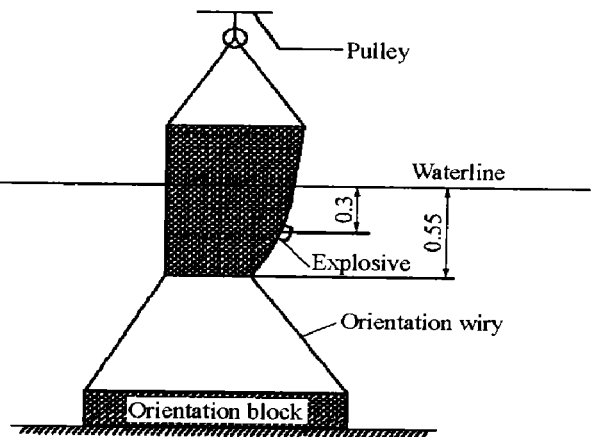


图 6 试验设计布置图

Fig. 6 Design of experiment

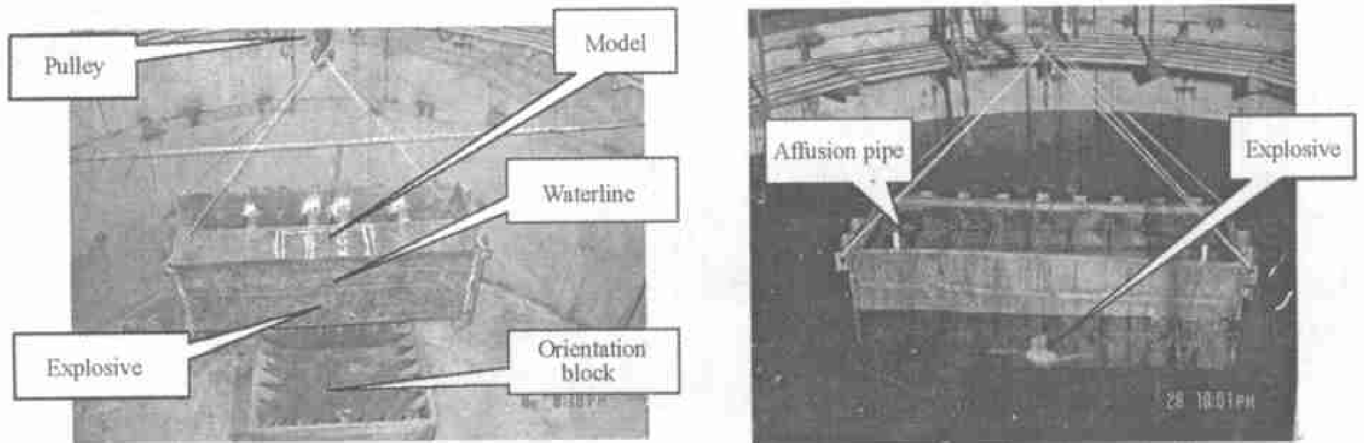


图7 试验实施

Fig.7 Experiment implement

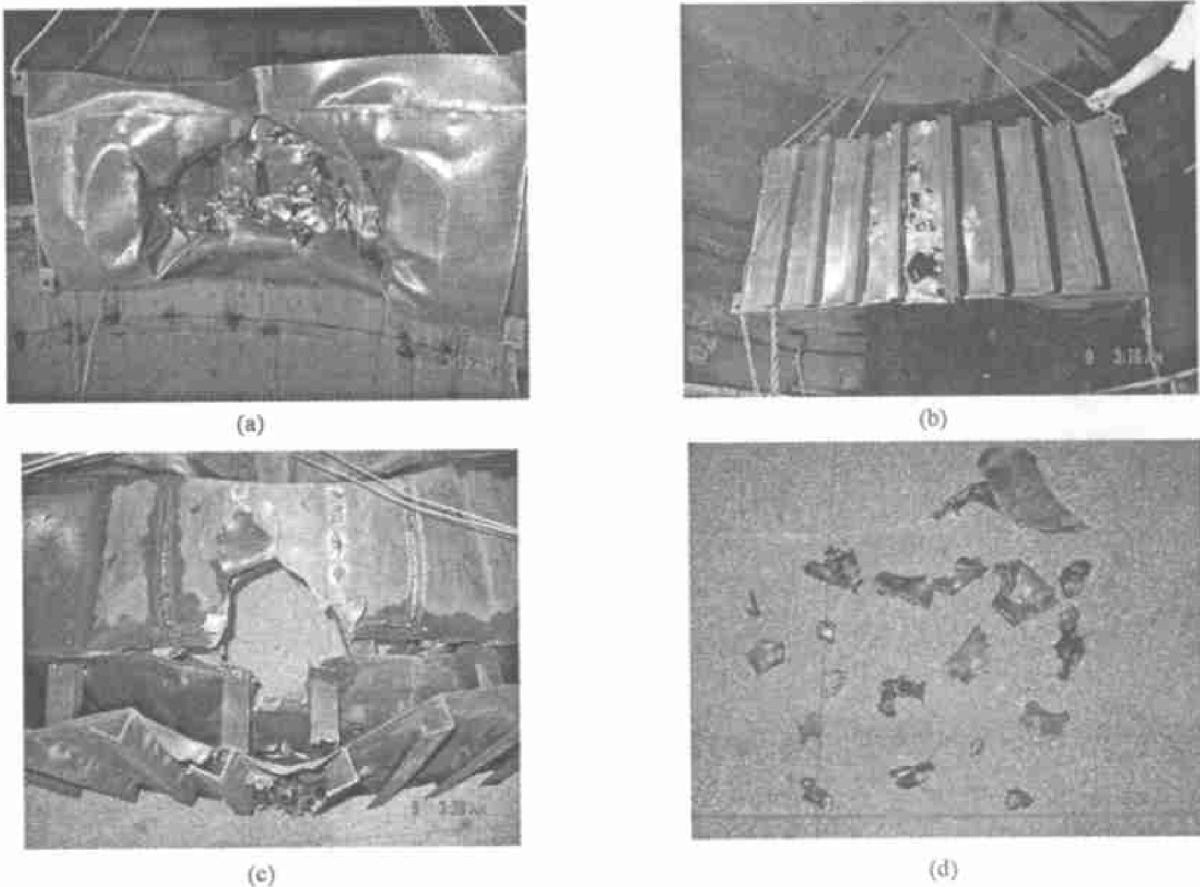


图8 模型1 破损情况

Fig.8 Damage of model 1

裂,各瓣破裂板块向内翻转。由于舷侧空舱内没有防御结构,裂瓣已伸入防御纵壁内部。由图8(b)模型背爆面的破损情况可见,防水纵壁已破损,且上面有许多被锐利碎片射穿的穿孔。穿孔最大半径接近一个肋距。可见所有纵壁均被碎片射穿,多处出现较大孔口,由图8(c)可见上部甲板有较大破口,防御纵壁和防水纵壁有很大的塑性变形并有贯穿破口。同时在爆炸筒内找到了许多碎片。

该次实验结果表明,当炸药在外板处爆炸时,爆轰波首先破坏船体的外板,将船体的外板撕开一个大口,使船体结构发生破坏。之后水中爆炸产生的气浪进入舰内,虽然防御纵壁和外板之间的空间使得爆炸产生的气浪得以膨胀而减弱压力,但仍有足够的冲击能量使防御纵壁和上部甲板产生塑性大变形并破裂。同时外板破坏时产生大量的锐利碎片高速飞向防御纵壁和防水纵壁,使之发生穿孔。而且碎片速度之高足以射穿最外层的防水纵壁。

因此在没有对舷侧舱壁进行防御设计时,在鱼雷接触爆炸作用下,舰体舷部附近结构均会遭到严重破坏,导致内部舱室大量进水,从而可能造成舰艇丧失机动性,甚至整舰沉没。

4.2 模型 2

鉴于模型 1 中外板的花瓣状破裂板块向内翻转的程度相当大,以至于板块的前沿已达到防御纵壁,对防水纵壁构成危险,故除了设置液舱吸收破片以外,对船底板上的肋骨和甲板进行了适当加强。接触爆炸之后,破口情况如图 9 所示。从图 9 中可见,防水纵壁没有破裂,也没有象模型 1 中被碎片打穿的破口,说明碎片没有打到防水纵壁上。但外板、液舱纵壁和防御纵壁均已破裂,且破口的大小越来越小。观察破口情况,防御纵壁和液舱内壁并没有被碎片打穿的迹象,破口的产生主要是因为结构塑性大变形导致。同时在模型底板上发现了许多碎片,而在爆炸筒里发现的碎片则很少。

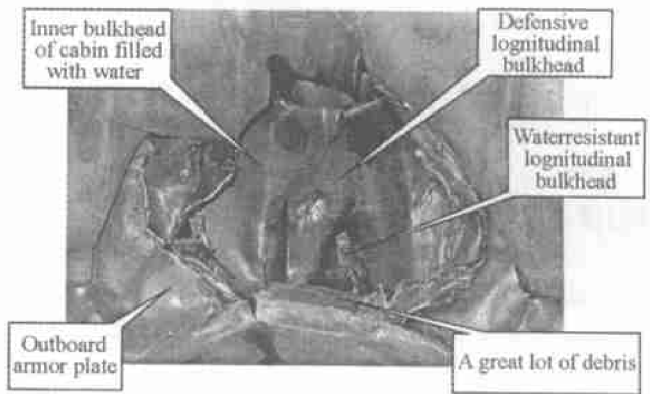


图 9 模型 2 破口情况

Fig. 9 Crevasse of model 2

图 10 显示了模型 2 受损后,背爆面和顶部的变形情况。可以看到顶部和背部虽有少量变形,但结构基本完好。模型 2 的试验结果证实了前面的设计思想。首先,设置的水舱吸收了外板破裂时产生的大量碎片,从而使其没有足够的能量穿透液舱内壁和防御纵壁。该次实验中防御纵壁和液舱内壁的破坏实际上是由于水压力冲击而造成的。其次,由于对模型底部和顶部的结构加强使得破损的范围仅限于装药附近,而没有向外延伸。



图 10 模型 2 顶部和背部情况

Fig. 10 Top and back of model 2 after explosion

4.3 模型 3

从模型 2 试验中看到,虽然防御纵壁的破口很小,但仍然没有完全达到设计的目的。在模型 3 中对防御纵壁和顶板进行材料加强,将其换成屈服强度为 390 MPa 的低合金船用钢,并将板厚加强到 4 mm。其他结构和试验布置与模型 2 相同。试验结果如图 11 和图 12 所示。

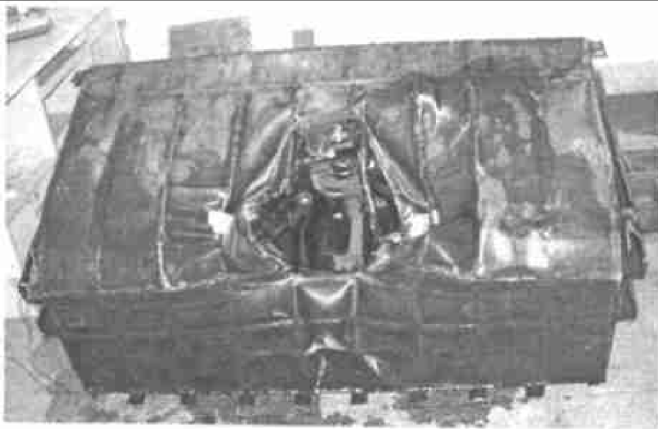


图 11 模型 3 整体破损情况

Fig. 11 General damage of model 3

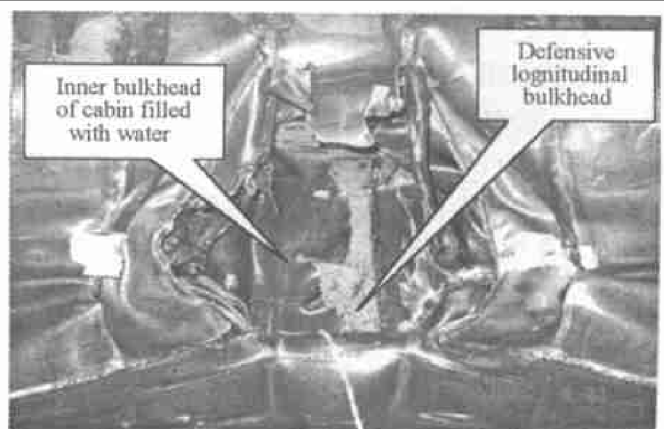


图 12 模型 3 破口情况

Fig. 12 Crevasse of model 3

图 11 为模型 3 整体破损情况,可以看到损伤范围被控制在局部范围之内。图 12 为破口情况,外板和液舱纵壁均已破裂,但由 4 mm 的低合金船用钢构成的防御纵壁并没有破裂,只发生了少量的塑性变形,从而达到了保护内部机舱等重要舱室的作用。同时在液舱底部也发现了大量碎片。因此,模型 3 可

以达到防雷舱的设计目的。

5 讨论及结论

(1) 经过一系列的模型试验,系统研究了水面舰艇舷侧结构在水下接触爆炸载荷作用下的破损机理。证实了装药在舷侧水下接触爆炸时,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,从外板撕裂下来的小块碎片随爆轰产物迅速向内部飞散,速度之高足以穿透内层多道纵舱壁。爆轰产物破坏外板和液舱后,大量高速海水会涌入船体,所产生的冲击压力继续对内层舱壁作用,使之产生塑性大变形,以致断裂破坏。

(2) 在没有对舷侧舱壁进行防御设计时,在鱼雷接触爆炸作用下,舰体舷部附近结构均会遭到严重破坏,导致内部舱室大量进水,从而可能造成舰艇丧失机动性,甚至整舰沉没。将本文的试验数据换算到实船可推断,通常装药的鱼雷在舷侧接触爆炸,可以使普通大中型舰艇的船体结构产生纵深为 5 m 以上的破口,所产生的破片可以射穿距外板 6~8 m 的多层纵壁。

(3) 在防雷舱中设置液舱对吸收爆炸破片是十分有效的,试验结果证明,100 mm 宽的水舱能够有效吸收接触爆炸作用下外板破裂时产生的大量高速碎片,从而使其没有足够的动能穿透液舱内壁和防御纵壁。模型 2 和模型 3 的试验结果都发现,防雷舱底部滞留了大量的破片,且在爆炸试验筒中没有发现破片,说明液舱几乎吸收了爆炸产生的所有破片。有关防雷舱中液舱的设计方法,可以根据破片在液体中的速度衰减规律,以及破片残余动能的穿透能力进行确定,具体方法将另文研究。

(4) 虽然膨胀舱和液舱能够在很大程度上降低接触爆炸的破坏作用,但是在大量的高速海水的冲击压力下防御纵壁会发生较大的塑性变形以致破裂。所以在结构设计时,仍然需要对防御纵壁进行适当的材料和结构加强,以确保内部重要舱室不进水。该问题的定量研究比较复杂,但可以将其转化为确定爆炸破口的纵深问题,通过分析影响破口纵深的因素,可假设

$$H = F(G, \bar{q}, T_i, c_1, c_2)$$

式中: H 为破口纵深; G 为接触爆炸的炸药 TNT 当量; \bar{q} 为与防雷舱各层纵壁(从外板到防护纵壁)相当的厚度; T_i 为各层纵壁距爆炸点的距离; c_1 为膨胀舱宽, c_2 为液舱宽。具体函数形式将由实验进一步确定。

(5) 由试验结果可知,三个试验模型在相同爆炸载荷条件下,其外板的破口大小是不同的,随着防雷舱整体结构的增强(模型 1 最弱,模型 3 最强),外板破口越来越小。朱锡等^[4]和刘润泉等^[5]研究了单层板架结构在水下接触爆炸作用下的破口计算公式,即

$$L_p = 0.063 \sqrt{G} / (\sqrt[3]{h} \bar{I}^{0.153})$$

式中: L_p 为破孔或破损长轴的长度, G 为装药的 TNT 当量, h 为板架结构相当板厚(m), \bar{I} 为加强筋相对刚度。该公式对于本文的多层结构的破口计算不完全适用,但在试验的基础上,考虑多层结构等效厚度的加权影响,可给出相应的计算公式,具体工作将另文研究。

(6) 实验研究证明,按照如下几点设计防雷舱结构,能够有效提高水面舰艇舷侧抗水下爆炸破坏的能力:1) 在舰艇外板内应设一个空舱,供水下爆炸后产生的气浪膨胀,有效的缓冲爆轰产物的冲击压力;2) 在空舱之后设置装满液体的液舱,能够吸收外板炸坏产生的碎片和弹片,防止飞片击破内层防护纵壁;3) 在吸收舱之后设置一空舱,起到隔断冲击波的作用,降低对防御纵壁的破坏作用;4) 在进行防雷舱设计时,应适当加强防御纵壁,以起到保护防水纵壁和舱内设备的目的;5) 下甲板和内底板及其附近的结构应该予以加强,并与防护纵壁的强度相匹配,从而达到更有效的支撑防御纵壁的目的。根据以上的设计思想,能够有效地将破损范围限制在局部区域,从而达到保护全舰战斗能力的目的。

参考文献:

[1] 吉田隆. 二次世界大战初期日本海军舰船在炸弹攻击下的损伤实例分析[J] \ \ 黄骏德,译. 船の科学, 1990, 43(5):

70—81.

- [2] 松本喜太郎. 二次世界大战中日本万吨级军舰对抗水中爆炸的防御结构[J]. 韩上谷, 译. 船の科学, 1975, 28(10): 77—94.
- [3] 朱锡. 水面舰艇结构[M]. 大连: 海事大学出版社, 2000.
- [4] 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 Ru-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.
- [5] 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.

Experimental study on the explosion resistance of cabin near shipboard of surface warship subjected to underwater contact explosion

ZHU Xi^{1*}, ZHANG Zhen-hua¹, LIU Run-quan¹, ZHU Yun-xiang²

(1. *Naval University of Engineering, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;*

2. Military Deputy Office in 708 Institute of China Ship Heavy Industry, Shanghai 200020, China)

Abstract: An experiment was carried out to study the failure of cabin near shipboard of surface warship subjected to underwater blast loading without special consideration paid to explosion resistance. The result proved that the warship would be badly damaged on ship side in such condition. The failure mechanism of shipboard subjected to underwater blast is studied and several schemes are presented. A series of experiments is carried out to validate these designs. It is proved that the final scheme could improve the survivability of surface warship subjected to underwater blast greatly.

Key words: mechanics of explosion; ship side defend; surface warship; underwater blast; blast resistance

* Corresponding author: ZHU Xi

E-mail address: zhuxizhuzhixu@21cn.com;

Telephone: 027-83443120