文章编号:1000-8608(2024)02-0194-10

舰船水下抗爆 U 型夹层板结构改进及参数优化设计

王秀勇¹, 李 楷^{*1}, 苑志江², 蒋晓刚², 谢保军²

(1.大连理工大学 船舶工程学院,辽宁 大连 116024;2.海军大连舰艇学院 航海系,辽宁 大连 116018)

摘要:设计相应的防护结构来降低水下爆炸冲击荷载对舰船的损伤对于提高舰船生命力具 有重要意义.以U型夹层板为研究对象,对传统U型夹层板结构进行改进,提出了3种改进 的U型夹层板结构.采用有限元软件LS-DYNA中任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法分析水下 爆炸冲击荷载作用下3种改进夹层板的位移、速度与加速度响应和吸能效应,并与原始U型 夹层板对比找到综合性能相对最优的改进夹层板.最后通过正交试验对性能最优的夹层板进 行优化,分析夹层板设计参数对抗爆性能影响的主次顺序及最优的尺寸组合.分析表明:改进 的U-X型夹层板上面板位移相比U型夹层板下降了15.7%,速度下降了34.5%,芯层吸能 提高了25.2%,在改进夹层板中综合性能最优;U-X型夹层板最优的尺寸组合及设计参数为 芯层厚度1.5mm、芯层高度100mm、下面板厚度3.0mm、上面板厚度3.5mm.经验证,尺寸 优化后U-X型夹层板质量降低了6.3%,抗爆性能也得到了显著提高.

关键词: 夹层板改进;水下爆炸;防护性能;参数优化设计 **中图分类号:**U661.43 **文献标识码:**A **doi**:10.7511/dllgxb202402010

0 引 言

近年来水下兵器向着更加智能化的方向发展,舰船受到水下爆炸冲击的概率越来越大,水下爆炸不仅会对船体结构造成严重的损害,而且会对船体内部的设备和人员造成损伤.所以为了增强舰船的抗爆能力,提高舰船的安全性能,需要设计具有良好性能的抗爆防护结构.在舰船防护结构的设计中,对现有的防护结构进行改进设计也是一种高效可靠的方法,可以通过改变防护结构的材料或者对部分结构引入新的设计形式,在不影响防护结构强度的同时尽可能地提高防护结构的吸能能力和减轻结构质量,以期在保证舰船防护结构具有良好可靠性和优良抗爆性能两方面找到完美的平衡^[1].

夹层板结构不仅具有质量轻、建造成本低、强 度高等特点,而且在抗疲劳、振动及冲击方面也具 有其独特的优势,目前已经被广泛应用于航空、航 天、船舶等领域[2].姚熊亮等[3]设计了一种应用于 船体舷侧的 Y 型夹层板结构,并利用有限元软件 进行了数值模拟,仿真结果表明 Y 型夹层板结构 可以提高船舶的抗爆抗冲击性能. 宋娜等[4]利用 U型夹层板对船舶上层建筑前端壁结构进行轻量 化设计,并进行了有限元仿真分析,结果表明 U 型夹层板可以提高舱室内部人员与设备的安全 性,具有良好的抗爆性能. 王自力等^[5]对 V 型夹 层板进行了抗冲击防护性能试验,结果表明 V 型 夹层板具有良好的防护性能. Ren 等^[6] 通过试验 研究了夹层板的抗冲击性能,分析了夹层板厚度、 芯层厚度和装药量对夹层板结构响应的影响. Xue 等^[7]利用有限元软件对比分析了相同质量的 金字塔点阵夹层板、蜂窝夹层板和 U 型夹层板的 抗冲击性能,结果表明金字塔点阵夹层板抗冲击 性能相对较差, Xia 等^[8]设计了一种管芯夹层板, 通过试验研究了近距离爆炸和接触爆炸工况下夹 层板的抗爆性能,试验表明管芯夹层板具有良好

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-12-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509033);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT19JC51).

作者简介:王秀勇(1997—),男,硕士生,E-mail:1875389238@qq.com;李 楷*(1984—),男,博士,副教授,硕士生导师,E-mail: likai@dlut.edu.cn.

的抗爆性能. Cheng 等^[9] 通过试验研究了 U 型夹 层板在低速冲击下的动态响应,并与有限元预测 结果进行了比较,研究表明 U 型夹层板的横向抗 冲击性能优于纵向性能. Tian 等^[10]设计了一种复 合材料夹层板结构,以提高船舶的耐撞性,与传统 的加筋板相比,所设计复合材料夹层板结构的吸 能性能显著提高.

现有的研究表明,夹层板具有良好的抗爆防 护性能,在众多基本的夹层板结构中,U型和 V型 夹层板结构的强度较高,抗冲击性能较好^[11-12].本 文以传统 U型夹层板为基础,提出 U-X型、 U-K型、U-W型3种改进的夹层板结构,通过数 值仿真验证3种改进夹层板抗爆性能,并对抗爆 性能最优的改进夹层板进行优化,为舰船的抗爆 防护结构设计提供参考.

改进夹层板结构单元设计及算法 验证

1.1 改进夹层板结构单元设计方案

芯层结构作为夹层板的主要吸能部件,其结构形式和尺寸对吸能效果有很大影响,所以对芯层结构的形式和尺寸进行改进优化,可以有效提高夹层板的整体吸能能力,增强夹层板的抗冲击性能.本文参考文献[13]中U型夹层板的结构形式,按照等质量原则对U型夹层板进行改进,夹层板的质量控制在100 kg 左右,共确定了U-X型、U-W型、U-K型3种改进夹层板,芯层单元结构形式如图1所示.



1.2 ALE 算法验证

近场水下爆炸冲击荷载对夹层板所产生的冲击作用是一个极其复杂的流固耦合问题.对于此类问题,经常采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法来进行求解,该算法结合了拉格朗日方法和欧拉方法的优点,可以很好地解决流固耦合过程中结构大变形和材料高速流动的问题,所以本文采用ALE算法来进行数值模拟.

为了验证 ALE 算法的可靠性,对文献[5]中 夹层板的抗爆防护试验进行数值模拟.该试验中 夹层板的长度为1140 mm,其余结构尺寸如图 2 所示,选取爆距为1m、炸药当量为1kg的试验 工况进行数值模拟,在该工况下试验测得夹层板 下面板的最大变形量为50 mm.





根据试验工况,夹层板上面板四周均设置为 刚性固定边界.为了提高计算精度,对夹层板和流 场进行网格划分,夹层板采用四边形网格,网格划 分均匀,网格尺寸为 10 mm;流场采用六面体网 格划分并在夹层板周围与炸药起爆中心区域进行 局部加密,同时为了保证网格尺寸的合理性,夹层 板周围与炸药起爆中心区域的均匀网格尺寸在 20~60 mm 进行变化,同时对中心区域以外的网 格进行渐变,最大网格尺寸控制在加密网格尺寸 的3倍左右.表1表示了网格尺寸和下面板中心 位移之间的关系,当中心区域的网格尺寸分别为 20 mm和30 mm 时计算结果与文献[5]中试验值 接近,相对误差较小.因此为了保证计算的可靠度 和效率,进行后续计算时在夹层板周围与炸药起 爆中心区域的均匀网格均采用30 mm,中心区域 以外的网格进行渐变.

表 1 网格尺寸和下面板中心位移之间的关系 Tab. 1 Relationship between grid size and center

编 网 村 号	网格尺寸/	寸/ 下面板中心位移/mm	相对	计算	
	mm	试验值	模拟值	误差/%	时间/h
1	20	50.0	48.9	-2.2	6.0
2	30	50.0	48.3	-3.4	4.8
3	40	50.0	42.1	-15.8	3.3
4	50	50.0	39.5	-21.0	1.5
5	60	50.0	37.3	-25.4	0.9

图 3 和图 4 分别显示了夹层板整体变形对比 图和局部变形对比图,从图中可见,ALE 算法的 数值模拟结果与试验结果基本一致,夹层板的变 形特征基本吻合,可以认为本文数值模拟方法能





(a) 试验结果图
 (b) 数值模拟结果图
 图 3 整体变形对比图
 Fig. 3 Comparison diagram of overall deformation



(a) 试验结果图

(b) 数值模拟结果图

图 4 局部变形对比图

Fig. 4 Comparison diagram of local deformation

够准确地研究夹层板在水下爆炸中的动态响应.

2 夹层板抗爆性能数值模拟模型

2.1 材料模型及状态方程

夹层板材料为低碳钢,密度为 7.85 g/cm³, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 失效塑性变 形为 0.3, 采用双线性弹塑性模型模拟^[14-15], 在 LS-DYNA 中使用材料关键字 * MAT_ KINEMATIC_PLASTIC 进行定义. 材料应变率 用 Cowper-Symonds 模型来考虑:

$$\sigma_{y} = \sigma_{0} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{1/p} \right]$$
(1)

式中: ϵ 为等效塑性应变率; σ_y 为对应 ϵ 的应力; σ_0 为准静态情况下的应力;D、P 为常数,低碳钢取 D=40.5, P=5.

水介质采用空材料模型,在LS-DYNA中分 别使用关键字 * MAT_NULL 和 * EOS_ GRUNEISEN 来定义材料和状态方程.其中 GRUNEISEN 方程为

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha_0}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha_0 \mu) E_0$$

$$(2)$$

式中:p为压力, μ 为泊松比, ρ_0 为绝对零度时材 料密度,c=1 484 m/s, $S_1=1$.979, $S_2=S_3=0$, GRUNEISEN 常数 $\gamma_0=0$.11, $\alpha_0=3$,能量密度 $E_0=3$.07×10⁵ J/m³.

空气同样采用空材料模型,使用关键字 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 描述其状态方程:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0$$
(3)

式中: $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0$. 4, $E_0 = 2.525 \times 10^5 \text{ J/m}^3$.

炸药材料通过关键字 * MAT_HIGH_ EXPLOSIVE_BURN 来定义,状态方程通过 * EOS_JWL 定义,其中JWL 方程为

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{w E_0}{V_0}$$
(4)

式中: v = 6 898 m/s, A = 371. 2 GPa, B = 3.23 GPa, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$, w = 0.30, $E_0 = 7.0 \times 10^9$ J/m³, $V_0 = 1$.

2.2 有限元模型

在 Hypermesh 中对几何模型进行网格划分, 夹层板的网格单元尺寸均为 10 mm,夹层板的四 周均设置为刚性固定边界.在 LS-DYNA 中采用 ALE 算法,通过定义关键字*CONSTRAINED_ LAGRANGE_IN_SOLID 模拟夹层板与流体之 间的流固耦合作用.对于夹层板内部通过关键 字*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 设置自接触,夹层板的芯层结构与上下面板之间 通过关键字*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK 进行连 接,该连接方式能够保证面板与芯层在受到外界 冲击时具有相同的运动状态,符合实际情况.夹层 板有限元模型如图 5 所示.



在LS-DYNA 中建立了水域、空气域和炸药 3 种物质的仿真分析模型,其中水域模型的尺寸 为4m×4m×2m,空气域的尺寸为4m×4m× 0.5m,球形炸药的当量为0.25kg,炸药中心点 距夹层板下面板0.5m,流场与炸药位置如图6 所示.为了保证水下爆炸计算的可靠度与效率,



图 6 流场与炸药位置(单位:m) Fig.6 Flow field and explosive location (unit:m)

在夹层板周围与炸药起爆中心区域的均匀网格均 采用 30 mm,中心区域以外的网格进行渐变.为 模拟无限流场,整个流域设置为无反射的边界条 件^[14].流场有限元模型如图 7 所示.



图 7 流场有限元模型 Fig. 7 Flow field finite element model

3 夹层板抗爆防护性能分析

3.1 位移分析

图 8 给出了 U 型夹层板最终位移云图. 从图 中可以看出,近场水下爆炸荷载作用下的夹层板 结构呈现整体上凸变形,位移的变化特征表现为 从药包中心即爆心所对应的结构中部向四周减 小,其余 3 种改进夹层板的变形特征与 U 型夹层 板相似.图9给出了U型夹层板在爆炸荷载作用 下的动态响应过程,可以看出,在 t=0.39 ms 时 冲击波就已经到达夹层板下面板,板中出现了显 著的应力波并使下面板产生了一定的上凸变形. t=0.59 ms时,应力波向结构径向传播,上面板 中心区域也开始上凸变形,由于下面板和芯层结 构的压皱变形吸收了部分能量,上面板变形较小. t=2.5 ms 时应力波继续传播,下面板继续产生 变形,挤压芯层结构和上面板,直至在 t=12 ms 左右达到最大位移,4种夹层板的动态响应过程 基本一致.



图 8 U型夹层板最终位移云图 Fig. 8 Cloud chart of final displacement of U-type sandwich panel



- 图 9 U型夹层板在爆炸荷载作用下的 动态响应过程
- Fig. 9 Dynamic response process of U-type sandwich panel under explosion load

夹层板应用于船体结构时,舰载设备和人员 一般位于上面板,夹层板上面板的动态响应对舰 载设备和人员的安全至关重要,所以对夹层板抗 爆防护性能评估主要考察上面板的冲击响应.各 夹层板上面板中心点位移时程曲线如图 10 所示, 4 种夹层板上面板中心点位移先是迅速上升,经 过振荡衰减之后稳定在某一值附近.从图中可以 看到,U型夹层板上面板中心点最大位移为 46.0 mm.U-X型夹层板最大位移为 38.8 mm, 与原始 U型夹层板相比减小了 15.7%,效果最 好;U-W型夹层板最大位移为 40.5 mm,与原始 U型夹层板相比减小了 12.0%,效果较好;U-K 型夹层板最大位移为 45.1 mm,与原始 U型夹层 板相比减小了 2.0%.通过上述分析可知,U-X型





夹层板的位移响应最小,说明改进的芯层结构能够有效地起到缓冲作用.

3.2 速度与加速度响应分析

图 11 和图 12 分别为各夹层板上面板中心点 的速度和加速度响应时程曲线.从图 11 中可以看 到各夹层板速度变化趋势相似.炸药爆炸的瞬间 会产生剧烈的冲击荷载,冲击波在极短的时间内 作用到夹层板上,夹层板上面板中心点速度迅速 达到最大值,然后有一定的波动.一段时间后,爆 炸冲击荷载逐渐变弱,夹层板上面板中心点的速 度逐渐变小,最后在惯性作用下,上面板中心点速 度在零值附近上下波动.U型夹层板的速度峰值 为 28.4 m/s,改进后的 U-X、U-W、U-K 型夹层板 的速度峰值分别为 18.6、22.3、17.8 m/s,均小于 原始 U型夹层板的,其中 U-X 型和 U-K 型夹层



图 11 速度响应时程曲线

Fig. 11 Velocity response time-history curves



Fig. 12 Acceleration response time-history curves

板的速度峰值较小,与原始 U 型夹层板相比分别 减小了 34.5%和 37.3%.从图 12 中可以看出,各 夹层板的加速度曲线在 0~2.5 ms 内发生剧烈波 动,2.5 ms 之后各夹层板加速度曲线在零值附近 仍有一定的小范围波动,原始 U 型夹层板的加速 度峰值为 137.7 km/s²,改进后的夹层板加速度 峰值均有明显的改善,其中 U-X 型夹层板的加速 度峰值最小,为 74.2 km/s².通过以上数据分析 可知,改进的夹层板在速度和加速度响应方面有 着较大的改善,其中 U-X 型夹层板的加速度响应 最小,表明改进后的夹层板芯层结构具有更好的 抗爆抗冲击性能.

3.3 吸能效应分析

图 13 给出了夹层板芯层吸能曲线,各夹层板 吸能曲线趋势基本一致.在近场水下爆炸冲击波 作用下夹层板芯层结构的吸能过程大致可以分为 3 个阶段.第1阶段,冲击波传递到夹层板并在其 中迅速传播,使得芯层的吸能急剧增加;第2阶 段,在爆炸冲击波的持续作用下芯层结构强度变 弱,吸能虽然仍在增加但吸收速率降低;第3阶 段,吸能达到最大值,然后小幅下降至稳定值.从 图中可以看出,改进后的3种夹层板芯层结构的 吸能能力均强于原始U型夹层板,其中U-X型夹 层板芯层结构吸能效果最好.图14给出了夹层板 各部分的吸能占比。从图中可以看出,3种改进 夹层板上面板的吸能占比均有所降低,由原始的 28%降到了12%以下,3种改进夹层板芯层结构



图 13 夹层板芯层吸能曲线





Fig. 14 Energy absorption ratio of each part of sandwich panel

也有所提升,U-X型夹层板较原始U型夹层板的 总吸能提高了25.2%,U-W型夹层板提高了 16.8%,U-K型夹层板提高了23.4%,见表2.通 过以上数据分析可知,改进夹层板芯层结构的吸 能能力均有所提升,其中U-X型夹层板芯层结构 吸能效果最好,可以有效地降低爆炸冲击荷载对 上面板的损伤.

表 2 夹层板动态响应

Ta	b. 2	Dynami	c response	of sand	lwich	panel
----	------	--------	------------	---------	-------	-------

夹层板 类型	最终位移/ mm	速度峰值/ (m・s ⁻¹)	加速度峰值/ (km・s ⁻²)	总吸能/J
U 型	46.0	28.4	137.7	45 300
U-X 型	38.8	18.6	74.2	56 720
U-W 型	40.5	22.3	79.3	52 920
U-K 型	45.1	17.8	89.1	55 921

3.4 防护性能比较分析

将4种夹层板上面板中心点的最终位移、速 度峰值、加速度峰值与夹层板的总吸能汇总于 表 2. 可见,改进后夹层板的最终位移、速度峰值、 加速度峰值均小于原始 U 型夹层板的,总吸能均 大于原始 U 型夹层板的,说明改进后夹层板的抗 爆抗冲击性能较原始 U 型夹层板有所提升.通过 对各指标的综合对比,发现 U-X 型夹层板综合抗 爆性能最好.

4 U-X型夹层板水下抗爆性能优化 分析

正交试验设计简称正交设计,是一种高效、快速、经济的试验设计方法,目前已经在各行各业得到了广泛的应用^[16].根据正交试验,可以从众多的试验工况中选取少数代表性强的试验,通过对部分试验的分析,求得最优或者较优的一组方案. 本文利用正交试验设计对 U-X 型夹层板的结构参数进行优化,进一步提高 U-X 型夹层板的抗爆 性能.

4.1 优化目标

在近场水下爆炸冲击荷载作用下,较强爆炸冲击波不仅会使船体结构遭到破坏,还会影响船体内部人员和设备的安全.因此,在对夹层板进行优化之前,需要制定一个合理的抗爆性能评估指标.本文将 U-X 型夹层板的位移、速度、加速度、质量及吸能这 5 个参数的隶属度通过线性加权得到评估夹层板抗爆防护性能的综合指标 F:

 $F = \alpha f_d + \beta f_v + \gamma f_a + \lambda f_m + \zeta(-f_\eta)$ (5) 式中: f_d 为上面板位移隶属度, f_v 为上面板速度 隶属度, f_a 为上面板加速度隶属度, f_m 与 $-f_\eta$ 分 别为夹层板质量和吸能隶属度, 隶属度的计算方 法如下:

指标隶属度= 指标值-指标最小值
指标最大值-指标最小值
(6)
$$\alpha,\beta,\gamma,\lambda,\zeta$$
分别为各隶属度的权重系数,优化设计
时可以依据各参数的重要程度来确定权重系数的
取值.首先,夹层板是一种轻型结构,应用在舰船
上时可以减轻船体质量,增强舰船抗冲击性能,因
此夹层板的质量是一个重要参数,其权重系数 λ
应最大;其次,舰船防护结构与船上人员和设备直
接接触,夹层板的位移直接影响船上人员和设备
的安全,因此夹层板的位移也是一个比较重要的
参数,所以位移权重系数 α 应该较大;此外,在水
下爆炸荷载作用下夹层板的吸能也是防护性能中

比较重要指标,夹层板吸收的能量越多,防护效果 越好.综合各变量的重要程度,给出各指标的权重 系数为 α =0.300, β =0.075, γ =0.075, ζ =0.150, λ =0.400.计算出夹层板的整体抗爆防护性能指 标越小,夹层板的抗爆性能越好.

4.2 正交试验方案设计

本文选取 U-X 型夹层板的芯层高度、芯层厚度、上面板厚度、下面板厚度4个因素,每个因素取4个水平,选用 L₁₆(4⁵)型正交表进行正交试验,其他结构参数保持不变,试验中各因素的水平选择见表3,正交试验方案见表4(因素 E 为空白因素).

表 3 因素水平表 Tab. 3 Factor level table

	因素						
水平	A 芯层高 度/mm	B芯层厚 度/mm	C上面板厚 度/mm	D下面板厚 度/mm			
1	70	1.5	2.5	2.5			
2	80	2.0	3.0	3.0			
3	90	2.5	3.5	3.5			
4	100	3.0	4.0	4.0			

表4 正交试验方案

Tab. 4 Orthogonal test protocol

试验			水平			抗爆防护
编号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	因素 E	性能指标 F _i
1	1	1	1	1	1	${F}_1$
2	1	2	2	2	2	${F}_2$
3	1	3	3	3	3	F_3
4	1	4	4	4	4	${F}_4$
5	2	1	2	3	4	${F}_5$
6	2	2	1	4	3	${F}_{6}$
7	2	3	4	1	2	F_7
8	2	4	3	2	1	${F}_8$
9	3	1	3	4	2	${F}_9$
10	3	2	4	3	1	${F}_{10}$
11	3	3	1	2	4	F_{11}
12	3	4	2	1	3	${F}_{12}$
13	4	1	4	2	3	F_{13}
14	4	2	3	1	4	F_{14}
15	4	3	2	4	1	${F}_{15}$
16	4	4	1	3	2	F_{16}

4.3 正交试验结果分析

根据表 4 中的试验方案,利用 LS-DYNA 对 16 种试验进行仿真分析,分析工况与边界条件保 持不变,计算结果见表 5. 本文采用极差分析法对 16 种仿真结果进行分析,通过对比 4 个因素所对 应的极差大小来评价各因素对夹层板抗爆性能的 影响程度,极差越大对应因素的影响也越大. 正交 试验极差分析结果见表 6,其中 E 行为空行,该行 中不放置任何因素,其主要作用是检验各因素之 间是否存在交互作用;K_i表示在同一因素下水平 为*i*的抗爆防护性能指标的和;k_i = K_i/水平数, 同一因素下 k_i的最小值所对应的水平为该因素 的最优水平;极差 R 等于同一行中 k_i的最大值与 最小值之差.

由极差分析可知, $R_{\rm B} > R_{\rm A} > R_{\rm D} > R_{\rm C}$,即U-X 型夹层板的4个设计参数对抗爆防护性能影响的 主次顺序为芯层厚度、芯层高度、下面板厚度、上 面板厚度.U-X型夹层板最优的尺寸组合为芯层 厚度1.5 mm、芯层高度100 mm、下面板厚度 3.0 mm、上面板厚度3.5 mm.表6中空行的极差 最小,说明选取的4个因素之间无交互作用.

表 5 U-X 型夹层板正交试验结果

Tab. 5 Orthogonal test results of U-X-type sandwich panel

试验 编号	位移/ mm	速度/ (m・s ⁻¹)	加速度/ (km•s ⁻²)	夹层板 吸能/J	夹层板 质量/kg	抗爆防护性 能指标 F _i
1	64.7	21.7	51.2	61 930	79.8	0.230
2	46.8	18.9	88.1	60 300	101.1	0.272
3	39.1	19.9	82.0	52 840	122.5	0.402
4	28.9	20.3	93.8	45 460	143.8	0.537
5	44.5	22.7	71.2	62 380	92.9	0.190
6	42.9	22.5	81.9	64 060	106.8	0.268
7	37.2	18.1	82.1	50 350	120.8	0.380
8	30.7	18.2	87.4	55 380	134.7	0.384
9	32.7	18.5	69.1	60 900	102.1	0.123
10	29.1	14.8	64.9	55 220	116.6	0.189
11	40.1	20.6	83.8	50 860	115.3	0.391
12	31.0	18.5	85.0	46 240	129.7	0.428
13	30.3	15.7	60.0	61 960	99.7	0.038
14	37.2	17.2	80.3	58 520	106.8	0.215
15	30.2	17.2	90.8	46 450	129.6	0.417
16	27.4	23.0	93.6	52 430	136.6	0.448

表 6 正交试验极差分析结果 Tab. 6 Range analysis results of orthogonal test

变量	K_1	K_2	K_3	K_4	k_1	k_2	k_3	k_4	R
因素 A	1.442	1.223	1.131	1.120	0.360	0.306	0.283	0.280	0.080
因素 B	0.582	0.944	1.591	1.798	0.146	0.236	0.398	0.450	0.304
因素 C	1.338	1.308	1.125	1.145	0.334	0.327	0.281	0.286	0.053
因素 D	1.254	1.086	1.230	1.346	0.314	0.271	0.308	0.337	0.066
因素 E	1.221	1.223	1.136	1.334	0.305	0.306	0.284	0.334	0.050

4.4 优化结果验证

已经通过正交试验分析得到了 U-X 型夹层 板最优的尺寸组合.接下来建立相应的有限元模 型进行水下爆炸数值模拟,计算结果见表 7.优化

表7 正交试验验证 Tab.7 Orthogonal test verification

			0			
U-X 型 夹层板	位移/ mm	速度/ (m・s ⁻¹)	加速度/ (km・s ⁻²)	夹层板 吸能/ J	夹层板 质量/ kg	抗爆 防护性 能指标
优化前	38.8	18.6	74.2	56 720	102.2	0.215
优化后	32.3	15.1	66.1	63 450	95.8	0.017

后的 U-X 型夹层板抗爆防护性能指标为 0.017, 小于优化前夹层板的,说明优化后的夹层板水下 抗爆性能较原夹层板有所提高;优化后夹层板的 质量比原夹层板降低了 6.3%,满足了夹层板轻 量化的需求.

5 结 论

(1)3种改进夹层板与原始 U 型夹层板的变 形特征相似,分析表明:夹层板在受到水下爆炸冲 击时,上面板和下面板发生上凸变形,夹层板的中 部区域变形最大;芯层结构产生压皱屈曲并吸收 202

大部分能量,使得上面板受到的爆炸冲击荷载减小;芯层结构对提高夹层板吸能效率,减小变形和 冲击起到关键作用.

(2)3种改进夹层板的抗爆防护性能均有所 提高,经过综合比较,U-X型夹层板抗爆防护性 能最好,经过计算,U-X型夹层板上面板位移相 比U型夹层板下降了15.7%,速度下降了 34.5%,芯层吸能提高了25.2%,在改进夹层板 中综合性能最优.

(3)U-X型夹层板的4个设计参数对抗爆防 护性能影响的主次顺序为芯层厚度、芯层高度、下 面板厚度、上面板厚度;U-X型夹层板最优的尺 寸组合为芯层厚度1.5 mm、芯层高度100 mm、 下面板厚度3.0 mm、上面板厚度3.5 mm. 经验 证,优化后U-X型夹层板质量比原夹层板降低了 6.3%,水下抗爆性能较原夹层板也有明显提高.

(4)改进夹层板不仅具有质量轻和吸能效果 好等优点,而且制造工艺简单,通过激光切割技 术、冲压成型技术和焊接可实现夹层板的制造,在 舰船防护结构应用方面有着良好的前景,改进夹 层板的可应用性较高.

参考文献:

- [1] 黄 超. 近场非接触水下爆炸舰船新型防护结构抗爆性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
 HUANG Chao. Research on blast-resistance of new type ship defensive structure under proximity uncontact underwater explosion loading [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [2] 吴 敌,吴广明. U型折叠式夹层板抗水下非接触 爆炸性能数值计算研究 [J]. 船舶与海洋工程, 2016, 32(1): 29-35.

WU Di, WU Guangming. Numerical simulation analysis on the protective performance of U-shape folded sandwich panel subjected to underwater noncontact explosion [J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 32(1): 29-35. (in Chinese)

[3] 姚熊亮,侯明亮,李 青,等.Y型舷侧结构抗冲 击性能数值仿真实验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学 报,2006,27(6):796-801.
YAO Xiongliang, HOU Mingliang, LI Qing, et al.
Numerical simulation research on counter impingement capability of Y-shape shipboard structure [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(6): 796-801. (in Chinese) [4] 宋 娜,张可成,赵辰水,等.采用 U 型夹层板的 船舶上层建筑设计及抗爆性能分析 [J].造船技术, 2019, 351(5): 20-24.
 SONG Na, ZHANG Kecheng, ZHAO Chenshui,

et al. Superstructure design and explosion proof performance analysis based on U-typed-core sandwich panels [J]. Marine Technology, 2019, 351(5): 20-24. (in Chinese)

[5] 王自力,胡宗文,张延昌,等.折叠式夹层板水下爆炸试验研究[J].中国造船,2014,55(3):74-83.

WANG Zili, HU Zongwen, ZHANG Yanchang, et al. Experiment research of folded sandwich panels subjected to underwater explosion [J].
Shipbuilding of China, 2014, 55(3): 74-83. (in Chinese)

- [6] REN Lijie, MA Honghao, SHEN Zhaowu, et al. Blast resistance of water-backed metallic sandwich panels subjected to underwater explosion [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 129: 1-11.
- [7] XUE Zhenyu, HUTCHINSON J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(10): 1283-1305.
- [8] XIA Zhicheng, WANG Xihao, FAN Hualin, et al. Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 97: 10-28.
- [9] CHENG Yuqin, LIU Kun, LI Yao, et al. Experimental and numerical simulation of dynamic response of U-type corrugated sandwich panels under low-velocity impact [J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110492.
- [10] TIAN Ali, YAO Peng, ZOU Jinhao, et al. Crashworthiness optimization method for sandwich plate structure under impact loading [J]. Ocean Engineering, 2022, 250: 110870.
- [11] 王 哲,赵辰水,刘 昆.V型折叠式夹层板改进 设计及抗冲击性能数值分析 [J].船海工程,2017, 46(4):98-101.

WANG Zhe, ZHAO Chenshui, LIU Kun. Numerical analysis on shock resistance performance and improved design of V-type corrugated core sandwich panel [J]. Ship and Ocean Engineering, 2017, 46(4): 98-101. (in Chinese)

[12] KUJALA P, KLANAC A. Steel sandwich panels in marine applications [J]. Brodogradnja, 2005,

56(4): 305-314.

- [13] 柯 力,张延昌,刘 昆,等. 基于铝质夹层板的上层建筑轻量化设计 [J]. 船舶, 2019, 30(5): 25-36.
 KE Li, ZHANG Yanchang, LIU Kun, *et al.*Lightweight design of superstructure based on aluminum sandwich panel [J]. Ship and Boat, 2019, 30(5): 25-36. (in Chinese)
- [14] 邱伟健,刘 昆,张馨予,等.基于 BP-SSA 算法的 夹层板结构抗爆性能优化方法 [J]. 舰船科学技术, 2022,44(7):25-30.
 QIU Weijian, LIU Kun, ZHANG Xinyu, *et al*. Anti-explosion performance optimization method of sandwich panel structure based on BP-SSA algorithm [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(7):25-30. (in Chinese)
- [15] 丁生宝,李 楷,苑志江,等.改进组合夹层板的水下抗爆性能分析 [J].大连理工大学学报,2024,64(1):48-56.
 DING Shengbao, LI Kai, YUAN Zhijiang, et al. Analysis of underwater blast resistance of improved combined sandwich panels [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2024, 64(1):48-56. (in Chinese)
- [16] ABLAT M A, QATTAWI A, JAMAN M S, et al. An experimental and analytical model for force prediction in sheet metal forming process using perforated sheet and origami principles [C]// 48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48. Cincinnati: Elsevier, 2020.

Structure improvement and parameter optimization design of ship U-type sandwich panels for underwater blast resistance

WANG Xiuyong¹, LI Kai^{*1}, YUAN Zhijiang², JIANG Xiaogang², XIE Baojun²

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: It is of great significance to design corresponding protective structures to reduce the damage of ships caused by underwater explosion shock load and improve the vitality of ships. Taking the U-type sandwich panel as the research object, the traditional U-type sandwich panel structure is improved, three improved U-type sandwich panel structures are proposed, and the arbitrary Lagrangian-Euler (ALE) algorithm in the finite element software LS-DYNA is used to analyze the displacement, velocity and acceleration responses and energy absorption effect of the three improved sandwich panels under the underwater explosion shock load. Compared with the original U-type sandwich panel, the improved sandwich panel with the best comprehensive performance is found. Finally, the sandwich panel with the best performance is optimized by orthogonal test, and the priority order of the impact of the design parameters of the sandwich panel on the blast resistance performance and the optimal size combination are analyzed. The analysis shows that the displacement of the upper panel of the improved U-X-type sandwich panel is 15.7% lower than that of the U-type sandwich panel, the velocity is 34.5% lower, and the energy absorption of the core layer is 25.2%higher. The comprehensive performance of the improved U-X-type sandwich panel is the best. The optimal size combination and design parameters of U-X-type sandwich panel are as follows: the thickness of core layer is 1.5 mm, the height of core layer is 100 mm, the thickness of lower panel is 3.0 mm and the thickness of upper panel is 3.5 mm. It is verified that the mass of U-X-type sandwich panel is reduced by 6.3% after the optimization of size, and the blast resistance performance is also significantly improved.

Key words: sandwich panel improvement; underwater explosion; protective performance; parameter optimization design