**文章编号:**1000-8608(2024)01-0048-09

# 改进的组合夹层板水下抗爆性能分析

丁生宝1,李 楷\*1,苑志江2,蒋晓刚2,陆丛红1

(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:夹层板因其优异的抗冲击性能广泛应用于舰船防爆防撞领域.为了探究不同芯层结构夹层板水下抗爆性能,基于当前性能优异的 V 型夹层板进行适当改进,利用 LS-DYNA 软件对当前的 V 型夹层板和改进结构的防护性能进行分析,对变形模式、速度和加速度模式以及吸能效应进行数值模拟对比分析.经过综合分析与比较,发现改进的 V-X 型夹层板各方面性能都要优于传统的 V 型夹层板.然后分析了结构参数对改进夹层板结构抗爆性能的影响,结果表明:V-X 型夹层板的面板厚度、芯层厚度对上下面板的塑性位移有较大影响,面板和芯层厚度越大,上下面板产生的位移越小,但是吸能效率逐渐降低.面板-芯层的夹角小于 40°时,对夹层板的防护性能较好;芯层高度也会对结构整体的抗爆性能产生影响,经过综合比较,芯层高度为 70 mm 时,其抗爆性能较好.研究工作可为新型舰船的结构设计提供借鉴.

关键词:防护结构;水下爆炸;抗爆;数值模拟 中图分类号:U661.43 文献标识码:A doi:10.7511/dllgxb202401006

#### 0 引 言

近年来水下武器的迅速发展,对水面舰船的 威胁日益升高,舰船在水面航行时遭受新式武器 打击的方式逐渐多样化.为提高舰船的自我防护 能力和安全性,在设计建造时必须对舰船的结构 采取防护抗爆设计,减小舰船遭受水下爆炸时产 生的破坏,提高舰船的抗爆抗冲击性能.因此,对 舰船的结构设计提出了更高的要求,开展新型防 护结构研究具有重要意义.传统的防护结构设计 大多数通过增加原始结构的重量来提高结构的防 护性能,这种方式会对结构的吸能效率和成本等 方面产生巨大的影响,并不适用于当前舰船结构 对防护性能的要求<sup>[1]</sup>.

目前,随着激光焊接技术的发展,夹层板作为 一种轻型结构在各个工业领域得到了广泛的运 用<sup>[2]</sup>,在船舶领域也受到了大量学者的青睐.张延 昌等<sup>[3]</sup>对 V型夹层板做了横向吸能探究,利用 Dytran软件对不同折叠式夹层板的抗爆性能进 行了数值分析,并进行了实际的水下爆炸试验,分 析了夹层板对水下爆炸的防护性能. 王自力等[4] 通过试验的形式,对实际舰船结构中折叠式夹层 板进行了分析,探究夹层板板架结构在舰船实际 遭受冲击时的动态响应. 吴敌等<sup>[5]</sup>研究了水下非 接触爆炸对 U 型折叠式夹层板的防爆性能,通过 对比分析证明其性能优于传统的加筋板. Tilbrook等<sup>[6]</sup>对Y型夹层结构的压皱变形进行了 试验分析,结果与仿真数值比较具有高度的一致 性. Ren 等[7]利用水下爆炸试验对水背金属夹层 板变形模式进行了探究,通过试验和仿真的结果 比较,认为在相同条件下,水背夹层板比气背夹层 板具有更好的抗变形和抗损伤能力. Dharmasena 等[8]运用试验装置对多种夹芯形式的夹层板开展 研究,分析了各种夹芯形式夹层板的抗冲击性能. Sriram 等<sup>[9]</sup>研究了爆炸荷载下泡沫铝夹层板的 失效模式,总结出冲击波的峰值变化规律,分析了 泡沫铝夹层板的抗冲击性能.

以上研究表明夹层板结构能够有效提升抗冲 击性能,有必要进一步探索夹层板结构的不同形

**收稿日期**: 2022-12-11; 修回日期: 2023-11-06.

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:丁生宝(1996—),男,硕士生,E-mail:550204467@qq.com;李 楷\*(1984—),男,博士,副教授,硕士生导师,E-mail: likai@dlut.edu.cn.

式对抗冲击性能的影响.本文基于前期的文献研 究与实际的模拟计算,提出 V-X 型、V-Z 型、V-T 型3种改进组合形式的夹层板结构,通过数值模 拟分析,对这些结构的抗爆性能进行验证.同时研 究夹层板在水下爆炸冲击荷载下结构的损伤变形 及其防护性能,分析结构参数对夹层板性能的影 响,为舰船的防护结构设计提供参考.

### 1 夹层板结构数值模拟模型

传统的 V 型夹层板由上下面板及中间的芯 层部分组成,这种夹层板的强度较高,抗冲击性能 较好.因此,考虑在性能较优的 V 型夹层板的基 础上,设计几种新型的芯层结构,并与 V 型夹层 板进行对比,评估改进夹层板的抗爆抗冲击性能.

#### 1.1 数值模拟模型建立

夹层板一般由薄板整体折叠而成,可以使用 当前较为成熟的压制技术实现芯层的制造.本文 对文献[3-4]中 V型夹层板进行改进,依据等质 量原则进行概念设计,其中基本的 V型夹层板质 量控制在 100 kg 左右,改进的夹层板增加了折板 设计,能够保证夹层板具有一定的横向强度,经过 计算,共提出 3 种性能较优的夹层板(V-X型、 V-Z型、V-T型),其基本截面尺寸和结构形式如 表 1 和图 1 所示.



#### 1.2 计算模型

夹层板结构均采用 Belytschko-Tsay 壳单元 进行模拟,面板和芯层结构单元尺寸均为20 mm, 芯层的斜边设置3或4个单元,夹层板的四周均设 置为刚性固定边界,芯层与上下面板之间通过关 键字\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_ TO\_SURFACE 实现接触设置,芯层与面板的连 接处采用共节点的方式进行处理,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. 计算的欧拉域大小为4 m×4 m×5 m,如 图 2所示.采用1 kg 当量的球型 TNT 炸药,1 m 爆距,冲击因子为1 的水下非接触爆炸工况对夹 层板进行计算.为了保证计算效率,在夹层板附近 局部加密流域,流域模型共包含 30×10<sup>4</sup> 个六面 体单元,夹层板水平漂浮在水域中.同时在欧拉域 边界设置非反射边界条件.对于流域,建立夹层板 迎爆面与流域耦合.计算时长为 20 ms,在整个爆 炸过程中,仅考虑冲击波对夹层板的压皱变形.



图 2 流域有限元模型 Fig. 2 Finite element model of flow domain

# 2 数值模拟材料参数及模型验证

#### 2.1 结构材料参数与爆轰物状态方程

夹层板材料采用低碳钢,密度为7850 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为210 GPa,泊松比为0.3,失效塑性变 形为0.3,采用 Cowper-Symonds 本构模型描述 受应变率影响的材料在动态荷载作用下的应力-应变关系,公式<sup>[10]</sup>如下:

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

式中: $\epsilon$ 为等效塑性应变率; $\sigma_y$ 为对应 $\epsilon$ 的应力值;  $\sigma_0$ 为准静态情况下的应力值;D、P为常数,低碳 钢 D=40.5,P=5.

炸药材料为 TNT,利用材料库中 8 号材料 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 来 模 拟 炸 药的属性,用 JWL 状态方程来模拟爆炸产物,爆 轰物状态方程<sup>[11]</sup>如下:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) e^{-R_1 \frac{\rho_0}{\rho}} + B \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) e^{-R_2 \frac{\rho_0}{\rho}} + \frac{\omega \rho}{\rho_0} E_{\mathrm{m}0}$$
(2)

式中:p为爆炸压力; $\rho$ 为炸药密度; $\rho_0$ 为爆轰开始时的炸药密度; $E_{m0}$ 为初始热力学能;参数 A、B、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$ 为炸药相关参数,与炸药的种类有关. 表 2列出了炸药材料及状态方程参数.其他介质的参数主要来自文献[12].

表 2 炸药材料及状态方程参数 Tab. 2 Explosive materials and parameters of

equation of state

<i>ρ</i> /(kg	• m <sup>-3</sup> )	冲击波	传播速度	$s^{-1}$ )	₱ <sub>cj</sub>	/GPa	
1 6	330		6 900	)			19
A/GPa	$B/\mathrm{GPa}$	$R_1$	$R_2$	ω	$E_0/G$	θPa	${V}_0$
371	3.23	4.15	0.95	0.3	7.1	7	1.0

#### 2.2 水下爆炸数值模拟方法验证

为了验证数值方法的正确性,参照文献[4]中 夹层板在炸药作用下的试验模型,建立了有限元 数值模型,该夹层板上下面板之间的高度为 120 mm,下面板尺寸为1140 mm×1040 mm,上 面板尺寸为1080 mm×1040 mm,面板及芯层的 厚度均为4mm. 文献[4]中选取了冲击因子为1 与 0.67 两种工况进行了夹层板水下爆炸试验,这 两种工况下试验效果较好,因此,选取这两种情况 进行数值模拟验证.欧拉域采用六面体网格模拟, 整体大小为5m×5m×8m.使用小炸药当量时 可忽略自由面的影响,因此将水域视为无限场域, 并且对所有自由面设置无反射边界条件,拉格朗 日结构和欧拉域采用通用耦合方法模拟. 欧拉域 网格尺寸对结果的影响较大,因此对试验中冲击 因子为1的工况进行网格灵敏度分析.夹层板整 体网格尺寸为 20 mm,在其他条件相同时,以夹 层板为中心附近各个方向 1.5 m 处为均匀网格, 为了保证计算效率,在1.5 m 处以外的网格采用 均匀网格的2倍尺寸.对于均匀网格,尺寸从30~ 80 mm 进行变化.可以看出,随着网格尺寸加大, 夹层板下面板中心的位移逐渐变小直到维持在一 定水平,当网格尺寸在 40 mm 时计算结果与文 献[4]中测量值接近.图3表示网格尺寸d和下面 板中心位移 u 之间的关系,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 1.5 m以内的网格尺寸均采用 40 mm,距离结构 较远处,网格尺寸进行渐变.



图 3 网格尺寸与夹层板下面板中心位移关系

Fig. 3 Relationship between grid size and center displacement of lower panel of the sandwich panel

表 3 列出了两种冲击因子下采用 40 mm 网格尺寸时试验值(下面板中心位移)和模拟值的结

表	3	夹层	板	下	面	板	中	心	变	形	结	果
	-	/ - /- !	10 -			107 -			~		. –	

Tab. 3 Deformation results of the center of the lower panel of the sandwich panel

编号	冲击因子 φ	试验值/mm	模拟值/mm	相对误差/%
1	1	50.0	48.2	-3.6
2	0.67	20.0	19.6	-2.0

果,两者存在一定的误差,误差在±5%以内.

如图 4 所示,数值模拟中夹层板表现出较大的塑性变形,由于边界条件的限制,夹层板边缘板格的变形大于中间板格的,符合文献[4]中观察到的现象.图 5 为试验结果图.根据上述结果,可以认为本文有限元模拟方法能够准确地反映夹层板在水下爆炸中的动态响应.



图 4 模型模拟结果验证 Fig. 4 Validation of model simulation results



图 5 文献[4]中试验结果 Fig. 5 Experimental results in the Ref. [4]

## 3 改进夹层板抗冲击性能数值模拟 结果分析

#### 3.1 变形损伤模式

图 6 为 V 型夹层板某一时刻速度矢量图,可 见爆炸产生的冲击对夹层板中心范围产生较大幅 度振动,速度依次向外扩散然后缩减,中心处速度 较大.其余 3 种结构的速度矢量与 V 型结构变化 效果相似.各种夹层板最终塑性变形如图 7 所示, 各夹层板的最大位移均发生在下面板中心处.可 以清楚地看到水下爆炸产生的冲击波首先作用于 下面板,然后经过芯层传递给上面板,V 型夹层板 的下面板发生了较大的变形,结构整体呈现局部 上凸的趋势,上面板由于芯层的缓冲作用,变形相



图 6 V型夹层板速度矢量图

Fig. 6 Speed vector diagram of V-type sandwich panel





对缓和,局部变形较小,与文献[13-14]中现象相同.随着冲击波的传播,荷载由结构向四周传递, 几种结构的变形模式相同.改进后的结构除了 V-T型局部变形较传统的 V型夹层板要大,其余两种变形都有明显的改善,说明改进的曲折结构能 有效起到缓冲作用.当夹层板应用于船体结构时, 船上的设备主要通过连接装置安装于上面板,因 此上面板的位移很大程度上反映了结构的安全性 能.各种夹层板上面板中心位移时程曲线如图 8 所示,可以看到,V型夹层板中心最大位移为 66.1 mm,V-X型中心最大位移为 56.6 mm,V-Z 型中心最大位移为 63.0 mm,V-T型中心位移最 大,为 72.1 mm,可能是 T型加强结构在传递荷 载时产生的瞬时振动较大所致.其中 V-X型夹层 板产生的位移较 V型减小了 14.4%左右,效果较 好.所有结构在爆炸产生冲击波的 10 ms 内均达 到了最大位移,随后结构发生弹性振动,位移始终 处于同一水平.



Fig. 8 Time course curves of upper panel center displacement on the sandwich panel

#### 3.2 加速度与速度响应

图 9 和图 10 分别为夹层板上面板中心的速 度和加速度时程曲线.夹层板的速度和加速度在 冲击波瞬时作用下达到峰值,然后减小到反方向 的最大值,几种夹层板的运动变化趋势相似,但是 峰值有明显的变化.由图 9 可知,V型夹层板的速 度峰值为 27.1 m/s,改进的 V-X、V-Z、V-T 型夹 层板的速度峰值分别为 19.5、19.2、20.1 m/s,平 均减小了 28% 左右, 有着明显的缓和趋势. 加速 度曲线在 0~6 ms 内有着剧烈的波动,由图 10 可 知,V型夹层板的最大加速度为100.3 km/s<sup>2</sup>,改 进的 V-X、V-Z、V-T 型夹层板的加速度峰值分别 为 97.5、107.0、87.8 km/s<sup>2</sup>,改进的夹层板除了 V-Z 型加速度峰值相比原始 V 型稍微偏大,其余 两种加速度均小于原始夹层板.在冲击波作用过 后,加速度曲线有小范围的波动,在低频振荡中徘 徊.由于夹层板与流体的耦合作用,夹层板的运动 趋势随着自由液面的振荡逐渐衰减.通过以上比 较分析,可以看到改进的夹层板在速度和加速度 响应方面优于传统的夹层板,对减小上面板遭受 到的外界冲击有着积极作用.



图 9 夹层板速度时程曲线

Fig. 9 Time course curves of speed of the sandwich panel



sandwich panel

#### 3.3 结构吸能模式

爆炸产生的冲击波作用于夹层板上,炸药产 生的能量转换为动能,再转化为夹层板的塑性变 形能.由于冲击波持续时间短,夹层板吸收能量在 6 ms 左右达到最大值而后趋于稳定. 在夹层板中 通过各部位吸能情况可以看出,下面板和芯层是 主要的吸能构件,占整个夹层板总吸能的 70%以 上. 原始的 V 型夹层板上面板吸能占总吸能的 28%,芯层的吸能占总吸能的 29.6%,两者吸能 程度相当.图 11 为夹层板各部位吸能曲线,可以 看到改进的3种夹层板芯层的吸能能力均强于原 始夹层板.改进后的3种夹层板通过芯层的折板 缓冲设计,有效减小了上面板的变形,上面板的吸 能占比均有所降低,由原始的28%降到了10%~ 20%.同时,芯层的吸能占比提高了10%左右,特 别是 V-Z 型夹层板,中部芯层的吸能效果最优, 吸能效率提高了 70.5%. V-X 和 V-T 型两种形式 夹层板的吸能效果相当,分别提升了 42.6% 和 39.5%.改进的结构总吸能也有所提升,V-X 型总 吸能提高了 16.7%,V-Z 型提高了 19.5%,V-T 型提高了 14.4%.



图 11 夹层板各部位吸能曲线

Fig. 11 Energy absorption curves of each part of the sandwich panel

通过表 4 统计的夹层板吸能数据可以看到, 这里引入比吸能(结构吸能与质量的比值)作为结 构吸能评价因子.通过对比分析可见,改进的夹层 板比吸能均比原始 V 型夹层板效果好,V-X 型提 升了 20.9%,这充分证明了改进的夹层板能够有 效减少爆炸对上面板的损伤,可以减小对上面板 安放设备的冲击影响.

	1 ab. 4 St	ructural ener	gy absorptio	on
种类	上面板吸能/ kJ	下面板吸能/ kJ	芯层吸能/ kJ	比吸能/ (kJ・kg <sup>-1</sup> )
V 型	12.20	18.50	12.90	0.43
V-X 型	10.90	21.60	18.40	0.52
V-Z 型	6.10	24.00	22.00	0.53
V-T 型	10.40	21.50	18.00	0.51

表 4 结构吸能 Fab. 4 Structural energy absorption

#### 3.4 综合分析比较

通过以上数据分析可知,在吸能方面,3种改进的夹层板效果相当,但是在上面板位移和产生的加速度方面,V-T型夹层板产生的损伤变形最大,V-Z型夹层板产生的加速度峰值也稍微偏大,这两种相比原始的夹层板均有一定的缺陷,通过综合比较,只有 V-X型夹层板在各方面的性能都优于传统的 V型夹层板.这同时也反映了夹层板结构参数对整个夹层板的抗爆性能有一定的影响.接下来将对 V-X型夹层板的结构参数进行详细分析.

# 4 结构参数对改进夹层板结构抗爆 性能的影响分析

为探究改进的 V-X 型夹层板结构参数对抗 爆性能的影响规律,保持其他条件不变,将面板厚 度、芯层厚度、面板-芯层夹角以及芯层高度作为 变量,进行了与上述工况相同的计算.评价参数选 取上下面板位移、速度、加速度以及比吸能作为结 构的抗冲击响应评估.下列表格中"/"前为上面板 响应参数,后为下面板响应参数.

#### 4.1 面板厚度对结构性能影响

改变上下面板厚度 t<sub>2</sub>,分别计算了面板厚度 为 2、3、4、5 mm 工况下的响应. 计算结果汇总于 表 5,图 12 为结构的吸能占比 e. 可以看出,面板 厚度增加的同时,上下面板的位移呈阶梯式下降, 这是由于面板厚度增加使得结构刚度提升,从而 减小了结构的弯曲变形. 同时,下面板的速度和加 速度逐渐下降,但是,面板厚度的增加,使得结构 总体质量增加,比吸能呈现较大幅度的减小,整体 结构吸能效率变低.因此,增加面板厚度能有效减 少结构的塑性位移,减缓结构的运动幅度,但是吸 能效率过低.

表 5 不同面板厚度下计算结果

	Tab. 5	Calculation	results	of	different	panel	thicknesses
--	--------	-------------	---------	----	-----------	-------	-------------

面板厚度/ mm	面板位移/ mm	速度/ (m・s <sup>-1</sup> )	加速度/ (km・s <sup>-2</sup> )	比吸能/ (kJ•kg <sup>-1</sup> )
2	56.6/76.4	19.5/27.4	97.5/183.0	0.52
3	40.7/53.9	18.9/25.5	76.9/175.0	0.50
4	31.0/38.7	20.6/23.9	113.0/168.0	0.40
5	24.8/30.2	17.2/21.1	85.2/161.0	0.31



图 12 不同面板厚度下夹层板各部分吸能占比

Fig. 12 Energy absorption ratios of each part of sandwich panel with different panel thicknesses

#### 4.2 芯层厚度对结构性能影响

改变芯层厚度 t1,保持其他参数不变,分别计

算了芯层厚度为 3、4、5、6 mm 时夹层板的工况响 应情况. 计算结果汇总于表 6,图 13 为结构的吸 能占比.可以观察到,上下面板的位移均呈下降趋 势,和面板厚度增加的情形类似,这是由于芯层厚 度增加的同时其压皱变形减小,上下面板的速度、 加速度峰值先减小后增大再减小,总体呈现下降 的趋势.吸能方面,随着芯层厚度增加,结构总体 质量增加,刚度亦增加,结构变形减小,从而导致 比吸能逐渐降低.芯层的吸能占比小幅度增加后 维持在一定的水平范围内,在这期间,由于上面板 的变形逐渐减小,上面板的吸能也逐渐减少,能量 主要由芯层和下面板吸收.当芯层厚度大于等于 4 mm 时,结构的塑性位移变化较小,速度和加速 度开始增大然后减小,说明存在较优的芯层厚度 (4 mm)使得夹层板速度和加速度取得最小值.因 此,增加芯层厚度能明显改善夹层板的变形,但是 吸能效率也会相应降低.

表 6 不同芯层厚度下计算结果 Tab. 6 Calculation results of different core thicknesses

芯层厚度/ mm	面板位移/ mm	速度/ (m•s <sup>-1</sup> )	加速度/ (km・s <sup>-2</sup> )	比吸能/ (kJ・kg <sup>-1</sup> )
3	56.6/76.4	19.5/27.4	97.5/183.0	0.52
4	50.3/60.5	19.3/26.0	65.7/133.0	0.39
5	43.9/49.6	20.2/26.6	126.0/286.0	0.31
6	37.7/44.1	17.8/26.2	108.0/254.0	0.25





#### 4.3 面板-芯层夹角对结构性能影响

改变面板-芯层夹角 α,保持其他参数不变,计 算了夹角分别为 27°、40°、50°、60°时夹层板的工况 响应情况.计算结果汇总于表 7,图 14 为结构的 吸能占比.夹角的改变对结构的塑性位移有一定 的改善,但是超过 40°后对上下面板的位移影响不 是很大,最后维持在 60 mm 上下浮动.在速度和 加速度方面,下面板的峰值变化幅度较小,上面板 的加速度峰值浮动较大.在吸能方面,夹角的增加 使得芯层的吸能逐渐降低,上面板吸能程度相当, 有小范围的数值波动,夹角的改变对整体结构的 吸能影响较小,比吸能数值接近.综上,夹角的改 变对夹层板的影响较小,从运动冲量方面考虑,当 夹角小于 40°时,其防爆性能较优.

表7 不同面板-芯层夹角下计算结果

Tab. 7 Calculation results of different panel-core clamping angles

面板-芯层 夹角/(°)	面板位移/ mm	速度/ (m・s <sup>-1</sup> )	加速度/ (km・s <sup>-2</sup> )	比吸能/ (kJ•kg <sup>-1</sup> )
27	56.6/76.4	19.5/27.4	97.5/183.0	0.52
40	53.9/57.6	29.6/30.6	202.0/244.0	0.42
50	60.5/62.4	24.1/30.1	136.0/189.0	0.45
60	60.8/61.6	23.2/23.8	153.0/232.0	0.44



图 14 不同面板-芯层夹角下夹层板各部分 吸能占比

Fig. 14 Energy absorption ratios of each part of sandwich panel with different panel-core clamping angles

#### 4.4 芯层高度对结构性能影响

计算了芯层高度分别为 50、60、70、80 mm 时 夹层板的工况响应情况. 计算结果汇总于表 8, 图 15为结构的吸能占比. 通过夹层板塑性变形过 程以及数据分析可以看出,随着芯层高度的增加, 上下面板的塑性变形均有所减小,这是由于芯层 高度增加导致夹层板弯曲刚度增加,对夹层板整 体变形有利,使得冲击波传递至上面板的荷载降 低,有效缓和了上面板的塑性变形. 在吸能方面, 由于夹层板高度增加,相应地吸能水平有所提高, 下面板的吸能水平维持在一定范围内. 在两者的 相互结合下,上面板的吸能逐渐减少,可有效保护 上面板. 但是不同高度的夹层板整体比吸能水平相 同. 在速度和加速度方面,芯层高度对下面板的影 响较大,上面板的峰值维持在一定水平范围内,综 合比较,当芯层高度等于 70 mm 时,夹层板的防 爆效果较好.

表 8 不同芯层高度下计算结果 Tab. 8 Calculation results of different core heights

芯层高度/ mm	面板位移/ mm	速度/ (m・s <sup>-1</sup> )	加速度/ (km•s <sup>-2</sup> )	比吸能/ (kJ•kg <sup>-1</sup> )
50	56.6/76.4	19.5/27.4	97.5/183.0	0.52
60	45.2/64.5	19.8/26.8	85.1/179.0	0.46
70	40.2/65.8	21.6/30.7	62.6/161.0	0.46
80	39.9/68.9	20.3/37.9	64.1/209.0	0.46



图 15 不同芯层高度下夹层板各部分吸能占比 Fig. 15 Energy absorption ratios of each part of sandwich panel with different core heights

#### 5 结 论

(1)在近场水下爆炸下,改进的 V 型夹层板 和原始结构变形一致,夹层板受到爆炸产生的冲 击波作用发生弯曲变形,下面板产生较大塑性变 形,由于芯层折板的横向强度较大,结构局部产生 压皱屈曲;同时爆炸产生的能量主要由下面板和 芯层吸收,上面板仅发生小幅度的变形.

(2)改进的 V-X 型夹层板综合性能最优,V-Z 与 V-T 型夹层板在变形模式和加速度响应等方 面较原始夹层板有不足.经过计算,V-X 型夹层板 的上面板位移较原始夹层板减小了 14.4%,速度 下降了 28.0%,总吸能提高了 16.7%,比吸能提 升了 20.9%,可以看出改进的 V-X 型夹层板抗爆 性能有明显提升,在保留原始结构强度的同时,吸 能能力也得到了较大的改善.

(3)对 V-X 型夹层板各项结构参数分析后可 以看出,面板和芯层厚度对夹层板的结构强度和 吸能有较大影响,厚度越大,结构变形越小,但是 吸能效率会降低;面板-芯层的夹角小于 40°时其 防爆性能可以维持一定水平,夹角大于 40°后结构 性能变弱;芯层高度增加对结构的吸能影响较小, 但能明显改善结构的变形.

(4)改进的夹层板增加了芯层结构的多样性, 在不增加结构毁伤变形的情况下 V-X 型夹层板 的抗爆能力有显著提高,应用于舰船结构时,可以 通过增加自身的吸能来缓冲水下爆炸冲击波对舰 船的作用力,减少对舰船结构内部的冲击,改善冲 击环境,提高舰船内部人员和设备的防护能力.因 此,改进的 V-X 型夹层板能为新型舰船的设计提 供指导,具有较高的实用性.

### 参考文献:

Chinese)

 [1] 王自力,张延昌,顾金兰.基于夹层板抗水下爆炸 舰船底部结构设计[J].舰船科学技术,2010, 31(1):22-27.

WANG Zili, ZHANG Yanchang, GU Jinlan. Antishock double bottom structure design of warship based on sandwich panel [J]. Ship Science and Technology, 2010, 31(1): 22-27. (in Chinese)

- [2] KUJALA P, KLANAC A. Steel sandwich panels in marine applications [J]. Brodogradnja, 2005, 56(4): 305-314.
- [3] 张延昌,俞鞠梅,张世联,等.V型折叠式夹层板横向压皱吸能特性研究[J].振动与冲击,2014, 33(1):113-118.
  ZHANG Yanchang,YU Jumei,ZHANG Shilian, et al. Energy absorption of V-type corrugated cores sandwich panels under lateral crushing [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(1):113-118. (in
- [4] 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]. Ship Building of China, 2014, 55(3): 74-83. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] TILBROOK M T, RADFORD D D, DESHPANDE V S, et al. Dynamic crushing of sandwich panels with prismatic lattice cores [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(18/19): 6101-6123.

- [7] REN Lijie, MA Honghao, SHEN Zhaowu, et al.
   Blast response of water-backed metallic sandwich panels subject to underwater explosion Experimental and numerical investigations [J].
   Composite Structures, 2019, 209: 79-92.
- [8] DHARMASENA K P, QUEHEILLALT D T, WADLEY H N G. Dynamic compression of metallic sandwich structures during planar impulsive loading in water [J]. European Journal of Mechanics A: Solids, 2010, 29(1): 56-67.
- [9] SRIRAM R, VAIDYA U K, KIM J-E. Blast impact response of aluminum foam sandwich composites [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(13): 4023-4039.
- [10] LIU Kun, WANG Zili, TANG Wenyong, et al. Experimental and numerical analysis of laterally impacted stiffened plates considering the effect of strain rate [J]. Ocean Engineering, 2015, 99: 44-54.
- [11] ZHU Feng, ZHAO Longmao, LU Guoxing, et al. A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(5): 687-699.

- [12] 孙 波. 水下爆炸水冢对浮体运动性能影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
  SUN Bo. Study on the motion performance of floating body caused by water spike in underwater explosion field [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [13] 张延昌,周 红,王 果,等. U型折叠式夹层板 防护性能数值仿真分析 [J]. 船舶力学,2013, 17(10):1191-1201.
  ZHANG Yanchang, ZHOU Hong, WANG Guo, et al. Numerical simulation analysis on protective performance of U-type corrugated cores sandwich panel [J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(10):1191-1201. (in Chinese)
- [14] 张爱锋,姚苗苗,甄春博.改进 V 型夹层板近场水 下爆炸抗冲击性能研究 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(4):13-17.
  ZHANG Aifeng, YAO Miaomiao, ZHEN Chunbo.
  Research on impact resistance of improved V-type sandwich panels in near-field underwater explosion [J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(4):13-17. (in Chinese)

# Analysis of underwater blast resistance performance of improved combined sandwich panels

DING Shengbao<sup>1</sup>, LI Kai<sup>\*1</sup>, YUAN Zhijiang<sup>2</sup>, JIANG Xiaogang<sup>2</sup>, LU Conghong<sup>1</sup>

(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: Sandwich panels are widely used in ship explosion-proof and anti-collision fields for their excellent impact resistance. In order to investigate the underwater blast resistance performance of sandwich panels with different core structures, based on the current V-type sandwich panels with excellent performance and appropriate improvements, the protection performance of the current Vtype sandwich panels and the improved structure are analyzed by LS-DYNA software. Numerical simulation analysis is conducted to compare the deformation mode, velocity, acceleration mode and energy absorption effect. After comprehensive analysis and comparison, it is found that the improved V-X-type sandwich panel has better performance than the traditional V-type sandwich panel in all aspects. Then the influence of structural parameters on the blast resistance performance of the improved sandwich panel structure is analyzed, and the results show that the panel thickness and core thickness of the V-X-type sandwich panel have a greater influence on the plastic displacement of the upper and lower panels, and the larger the panel and core thicknesses, the smaller the displacement of the upper and lower panels, but the energy absorption efficiency gradually decreases. When panel-core clamping angle is less than 40°, the protection performance for the sandwich panel is better; the core height also has an impact on the overall blast resistance of the structure, and after a comprehensive comparison, at 70 mm of the core height, its blast resistance performance is better. The research work can provide reference for the structural design of new ships.

Key words: protective structure; underwater explosion; blast resistance; numerical simulation