

舷侧板架结构抗撞性能试验及仿真

莫晓健¹, 杨磊², 李春通³

(1. 上海振华重工(集团)股份有限公司 长兴分公司, 上海 201913; 2. 上海应用技术大学 智能技术学部, 上海 201418; 3. 上海交通大学, a. 海洋工程国家重点实验室; b. 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: [目的]为研究高强钢舷侧板架结构的抗撞性能, 设计并开展了舷侧板架在抛物面形冲头作用下的静力破坏试验。[方法]通过试验记录, 分析冲头作用于板架强构件下的变形损伤过程和失效模式。对舷侧板架结构破坏试验进行数值仿真分析。数值仿真结果在加载力-位移曲线、外板裂纹形状、裂纹产生位置、结构破坏模式等方面与试验有较好的一致性。在此基础上, 研究撞击位置不同时, 强构件对结构破坏的影响。[结果]研究表明, 随着撞击位置偏离强构件增大, 结构抗撞性能呈现先快速下降然后缓慢上升再快速下降的变化趋势。[结论]研究成果可为提升船舶结构抗撞性能设计提供参考。

关键词: 船舶碰撞; 舷侧板架; 失效模式; 高强钢

中图分类号: U663 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.06.05

Experimental and Simulation of the Crashworthiness of Side Shell Stiffened Panels

MO Xiaojian¹, YANG Lei², LI Chuntong³

(1. Shanghai Zhenhua Heavy Industry (Group) Co., Ltd., Changxing Branch, Shanghai 201913, China; 2. Faculty of Intelligence Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, a. State Key Laboratory of Ocean Engineering; b. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: [Purpose] To study the crashworthiness of high-strength steel side shell stiffened panels, static load failure experiment is designed and carried out on the side shell stiffened panels under the action of parabolic punch. [Method] Deformation and damage process and failure mode of the punch acting on the strong components of the stiffened panels is analyzed through experimental records. Perform numerical simulation analysis on the failure experiment of the side shell stiffened panels. The numerical simulation results show good consistency with the experimental results in terms of loading force displacement curve, outer plate crack shape, crack generation location, and structural failure mode. On this basis, the influence of strong components on the structural failure is studied under different impact locations. [Result] The research results indicate that as the offset of the impact position from the strong component increases, the structural anti-collision performance shows a trend of rapid decline followed by slow rise and then rapid decline. [Conclusion] The research results can provide reference for improving the crashworthiness design of ship structures.

Key words: ship collision; side shell stiffened panel; failure mode; high-strength steel

0 引言

目前, 国际贸易总量中超过三分之二的货物运输通过海运实现的。船舶作为海运重要的工具, 在航行过程中易受多变的海洋环境、人为误操作等多

重因素影响, 难免发生碰撞事故, 可能造成船体破坏, 引发巨大损失。船舶碰撞结构安全问题受到众多学者的关注。

船舶碰撞的研究方法主要有试验法、简化解析

收稿日期: 2025-06-20; 修回日期: 2025-08-22

作者简介: 莫晓健(1975—), 男, 高级工程师。研究方向: 结构力学。

法、数值仿真法。试验法是一种较为可靠的研究方法,但由于实船试验成本非常昂贵,通常采用船体构件(如板、加筋板、板架等结构)或者缩尺模型开展试验。简化解析法通常需要针对特定结构进行相应简化计算,适用性较差。数值仿真法可以模拟复杂的模型、边界条件,材料非线性、几何非线性、接触非线性等问题,因而被广泛应用于船舶碰撞研究。实际应用时,通常结合这几种方法进行研究。

刘元丹等^[1]开展船舶加筋板结构缩尺模型的耐撞性试验,研究双壳船舷侧内壳和外壳结构的碰撞损伤特性。崔濛等^[2]基于帽型加筋结构耐撞性能试验,研究了不同加筋尺寸和不同加筋数量的帽型构件在楔形撞头与球形撞头加载下的损伤失效规律。彭正梁等^[3]针对高强钢舷侧板架开展碰撞试验和数值仿真对比研究,结果表明数值模型可较好地捕捉结构的变形和失效模式。张敏等^[4]提出了船体加筋板结构在球鼻艏撞击下的耐撞性解析预报方法,并通过模型试验进行了验证。文献[5-7]采用了试验与简化解析、数值仿真相结合的研究方法。

船舶碰撞试验研究主要集中在板、加筋板等构件上,碰撞区域通常为骨材,而作用于T型材等强构件的相关试验研究较少。本文针对某实船舷侧板架被船首垂直撞击的场景,且撞击位置位于板架强构件处,设计并开展了板架静力破坏试验。随后,基于试验结果开展数值仿真分析,重点研究高强钢舷侧板架结构的抗撞性能。

1 试验方案

1.1 试验总体方案

当两船发生碰撞时,撞击位置可能为舷侧纵行、强肋骨等强构件。因此本文研究基于船首垂直撞击舷侧的场景,撞击位置为中部舱段的舷侧强构件处,见图1。本文参考的实船长76.4 m,型宽11.4 m,型深4.7 m。为了更好地研究实船结构的抗撞性能,结合试验条件,舷侧板架结构试验模型最终采用与实船近似原型比例设计。

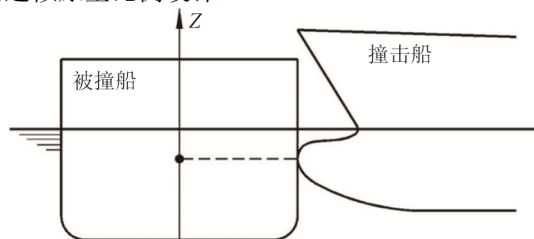


图1 船首垂直撞击舷侧的场景

Fig. 1 Scene of Bow Vertically Colliding with Side of Ship

本文采用准静态加载方式,研究碰撞过程中舷侧板架结构变形、损伤特征及破坏模式,进一步探

究舷侧板架抗撞性能。试验总体方案见图2。板架模型通过工装固定在地基上,液压缸倒装安装在反力架的横梁上,液压缸伸缩杆下端装配力传感器,冲头经法兰与力传感器相连,液压缸筒壁上安装有拉线式位移传感器。试验中,力传感器可以实时捕捉冲头上的作用力,位移传感器同步记录冲头下压位移。图中为液压缸完全缩回状态,冲头下端距离板架模型上表面为70 mm。

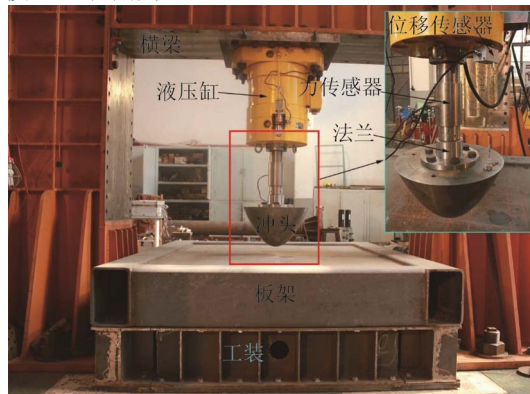


图2 板架静力破坏试验方案

Fig. 2 Static Failure Experiment Plan for Stiffened Panels

1.2 试验冲头及板架模型

试验设计时需要充分考虑冲头尺寸与形状、板架结构及强度、液压缸行程等参数。本文冲头参考了TABRI等^[8]采用抛物面形状,冲头高度为288 mm,冲头上表面开有6个M24的安装螺孔和4个M20的吊环按照螺孔,具体尺寸见图3。

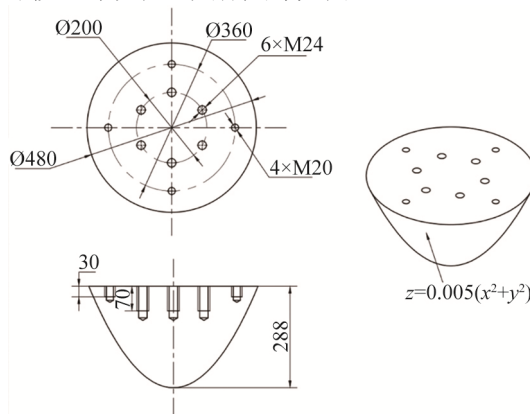


图3 试验冲头尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Dimensions of Punch for Experiment (Unit: mm)

本文试验板架模型设计时在反映船舶舷侧板架结构特点的基础上进行了适当简化,见图4。试验板架模型由外板、1根T型材、5根骨材、矩形外框、肘板等组成。其中,外板厚度为4 mm,尺寸为 $2.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$; T型材置于板架中间,尺寸为 $\perp \frac{6 \times 160}{8 \times 60}$ (单位: mm); 骨材采用扁钢,尺寸为 $4\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,

间距为380 mm；矩形外框由4根截面为200 mm×300 mm×12 mm的矩形管组成，用于模拟板架周边的边界。板架焊接完成后，再焊接矩形外框，骨材与外框连接处焊接有4 mm×100 mm×100 mm的肘板，

外框四角处焊接10 mm×100 mm×100 mm的肘板,矩形外框开设间距200 mm的螺纹孔,用于与试验工装实现装配连接。

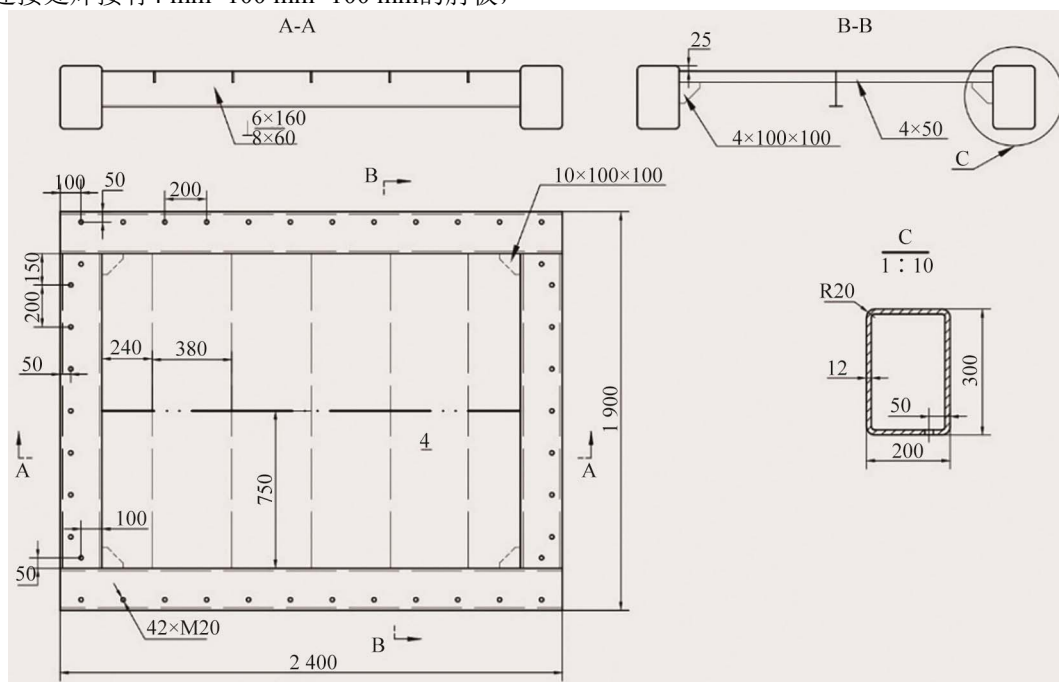


图4 试验板架尺寸(单位: mm)

Fig. 4 Dimensions of Stiffened Panel of Experiment (Unit: mm)

本文试验板架模型使用的钢材为高强度低合金钢,材料拉伸试验及指数模型拟合结果见图5。该钢材的弹性模量为202 GPa,泊松比为0.3,屈服应力为477 MPa,初始颈缩应变为0.176。试验结果表明该钢材在轧制方向和垂直轧制方向的力学性能差异很小,故可视为各向同性硬化材料。

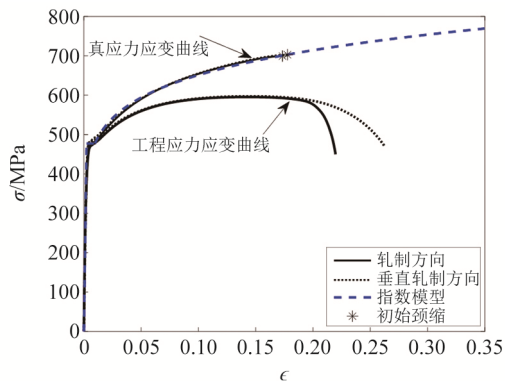


图5 材料拉伸试验及指数模型拟合

Fig. 5 Material Tensile Experiments and Power Law Fitting

根据材料拉伸试验数据, 本文试验所用材料可用式(1)表示, 该式的3个分段分别表达材料的线弹性阶段、屈服阶段及塑性阶段, 其中屈服阶段用

平台段表示,塑性阶段采用等向硬化指数模型表示。

$$\sigma = \begin{cases} E\bar{\varepsilon} & \sigma < \sigma_s \\ \sigma_s & \bar{\varepsilon} < \bar{\varepsilon}_h \\ K\bar{\varepsilon}^n & \bar{\varepsilon} \geq \bar{\varepsilon}_h \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量, 取202 GPa; σ_s 为屈服应力, 取477 MPa; K 为强度系数, 取884 MPa; $\bar{\varepsilon}$ 为等效应变; $\bar{\varepsilon}_h$ 为材料硬化开始时的等效应变, 取0.009 7; n 为硬化指数, 取0.133。

2 试验过程及试验结果

按照试验方案,将液压缸、力传感器、连接法兰、冲头及位移传感器等部件依次安装于反力架横梁下方;工装与试验地基采用固定连接,试验板架整体安装于工装之上。由于模型加工误差,在试验板架与工装装配后,冲头中心与试验板架中心线存在偏移,偏移量为9 mm。试验开始前,缓慢移动冲头,当冲头顶部与板架上表面接触并产生1 kN接触力时,完成所有传感器数据清零标定。试验开始后,液压缸以准静态方式缓慢加载,加载速度为10 kN/min,持续加载直至板架破坏。

试验过程中的加载力和冲头位移曲线见图6。外板破裂之前,加载力-位移曲线呈2段近似线性变化:在210 kN(对应位移为12.2 mm)以前,曲线斜率较

大, 随后曲线斜率减小; 当加载力达到589 kN时, 加载力出现骤降, 并伴随外板破裂的声音, 冲头以较快的速度达到液压缸最大位移200 mm (减去初始距离70 mm, 冲头对板架模型的有效作用位移为130 mm)。板架的破坏载荷为589 kN, 破坏位移为93.8 mm。加载力-位移曲线呈2段近似线性变化的原因可能是加载过程中, 板架结构开始为整体弹性变形, 随着载荷增大局部结构发生塑性变形失效, 而引起板架结构整体刚度下降。

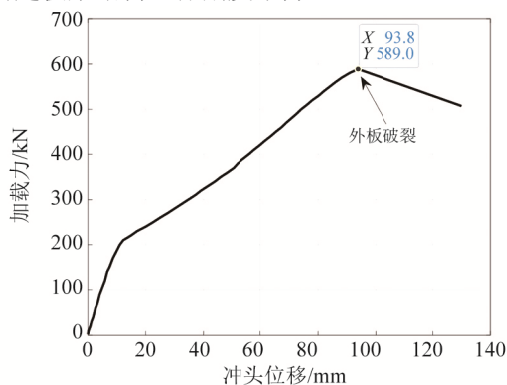


图6 板架破坏试验的加载力-位移曲线

Fig. 6 Loading Force Displacement Curve of Stiffened Panels Failure Experiment

试验完成后, 板架的变形破坏情况见图7和图8。由图7可知, 外板沿平行于T型材方向发生破裂, 裂纹位置距板架中轴线横向偏移10 mm, 裂纹长度为304 mm; 外板裂纹走向几乎与焊缝平行, 外板断裂位置可能与加载偏移、焊接影响等有关。

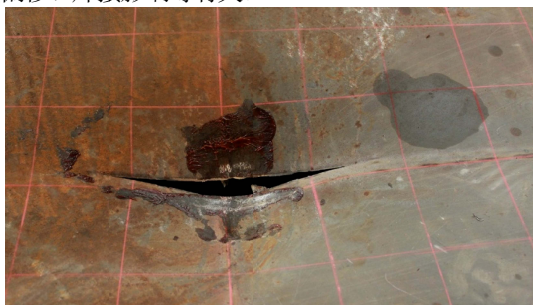


图7 板架结构破坏情况 (正面)

Fig. 7 Fracture Situation of Stiffened Panels (Front Side)



图8 板架结构破坏情况 (背面)

Fig. 8 Fracture Situation of Stiffened Panels (Back Side)

由图8可知, 板架的T型材整体发生了向下弯曲, 腹板出现侧倾和扭曲变形, T型材面板也出现了扭曲; 中间位置的骨材在T型材两侧对称位置处发生了明显的扭曲 (右上方圆圈标记处); 中间位置的骨材在与T型材腹板连接处发生了断裂 (左上方圆圈标记处); 骨材与肘板连接处发生了轻微的扭曲 (下方圆圈标记处)。

3 数值仿真分析

3.1 数值仿真模型

本文采用非线性有限元软件ABAQUS开展数值仿真分析。根据试验场景, 建立数值仿真模型, 见图9。

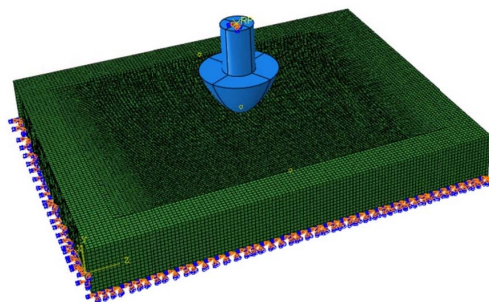


图9 板架破坏试验数值仿真模型

Fig. 9 Simulation Model of Stiffened Panels Failure Experiment

具体建模设置如下:

1) 网格模型。板架各构件均采用板壳单元进行网格划分。为兼顾计算精度与效率, 中间变形较大区域, 采用网格尺寸为5 mm, 远离大变形区域网格尺寸为20 mm, 两者之间采用四边形单元和三角形单元实现平滑过渡, 整体模型网格总数10.2万余个。

2) 边界条件。试验工装的结构强度和刚度都较大, 在试验加载过程中其变形量可忽略不计, 故采用固支的边界条件模拟工装。

3) 冲头模型。本试验所用冲头为实心结构, 且表面经硬化处理, 其自身变形可忽略, 因此在数值仿真模型中可简化为刚体。

4) 接触算法。冲头与板架之间的接触问题采用通用接触算法, 由于试验过程中采用牛油进行润滑处理, 摩擦系数设置为0.05。

5) 加载方式。采用给冲头施加位移的加载方式。

6) 材料模型。材料的力学参数和失效判定准则保障船舶碰撞数值模拟准确度的核心要素。材料的力学参数, 如弹性模量、屈服应力等可以由材料拉伸试验获得。基于图5的材料拉伸试验数据, 本文试验所用材料可采用各向同性硬化本构模型进行模拟。钢材拉伸过程中易产生局部颈缩现象, 颈缩区域会出现应变集中, 而拉伸试验测量的应变是标距

范围内的平均应变, 因此材料真实的失效应变不能通过拉伸试验直接获得。对于船舶碰撞问题, 常用的材料失效准则包括: 恒定等效塑性应变准则、赖斯-特雷西-科克罗夫特-莱瑟姆 (Rice-Tracey & Cockcroft-Latham, RTCL) 准则^[9]、白-维尔茨博-霍尔兹沃思 (Bai-Wierzbicki-Holdsworth, BWH) 准则等^[10]。其中, 恒定应变准则形式简单、易于实现, 被广泛应用于船舶碰撞数值仿真研究中, 但其对网格尺寸比较敏感, 在使用时需要失效应变进行校验。本文采用ALSOS等^[11]提出的失效应变见式(2), 该公式亦被多篇相关研究文献^[2,12]采纳应用。

$$\varepsilon_{cr}(l_e) = \varepsilon_r + (\varepsilon_n - \varepsilon_r) \frac{t}{l_e} \quad (2)$$

式中: ε_{cr} 为不同网格尺寸的失效应变; ε_r 为平均应变; ε_n 为网格尺寸与板厚相同时的失效应变, 由单轴拉伸试验数值校验获得; t 为板厚; l_e 为网格尺寸。

本文中 ε_r 取初始颈缩应变 0.176, 经单轴拉伸试验数值校验 $\varepsilon_n = 0.324$, 碰撞区域网格尺寸为 5 mm, 板厚 4 mm, 因此本文模型中网格失效应变为 0.294。

7) 焊缝简化模型。焊接会增加板与筋之间的材料, 同时也会对焊缝周围的材料性能产生复杂的影响。板架模型中角焊缝焊脚高度为 4 mm, 采用LIU等^[13]的焊缝等效处理方法, 外板与T型材腹板角焊缝处的单元等效厚度分别为 5 mm 和 7 mm, 外板与骨材角焊缝处的单元等效厚度均为 5 mm, 见图10。

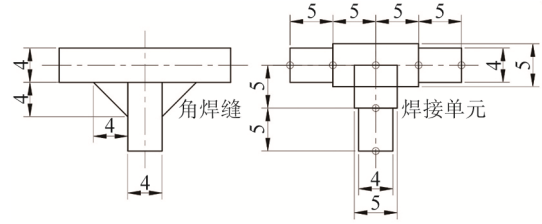


图10 板与筋相交处的焊缝简化模型 (单位: mm)

Fig. 10 Simplified Model of Weld Seam at Intersection of Plate and Stiffener (Unit: mm)

3.2 数值仿真与试验结果对比

在冲头位移 130 mm 的作用下, 板架破坏试验仿真结果见图11和图12。

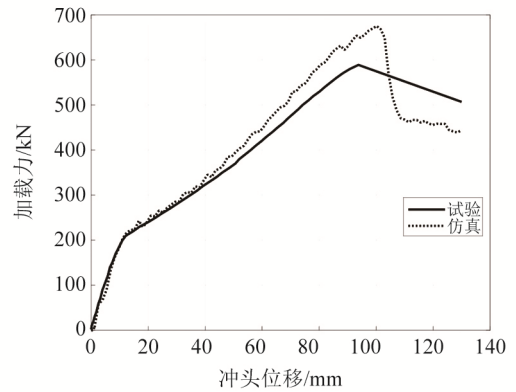


图11 加载力-位移曲线的仿真与试验对比

Fig. 11 Simulation and Experimental Comparison of Load-Displacement Curve

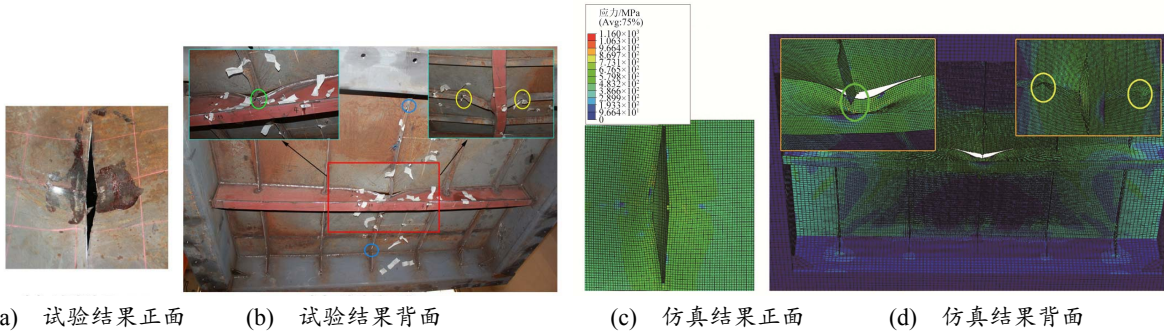


图12 板架破坏情况的仿真与试验对比

Fig. 12 Simulation and Experimental Comparison of Fracture Situation of Stiffened Panels

由图 11 可知, 加载力-位移的数值仿真曲线与试验曲线变化趋势一致, 在板架破坏之前也呈现 2 段近似线性的结果。数值仿真得到板架极限破坏载荷为 675 kN、破坏位移为 100.2 mm, 与试验结果相比, 误差分别为 14.6% 和 6.8%。仿真结果与试验结果存在偏差的主要原因可归结: 数值仿真模型未考虑焊接引起的结构变形、焊接热影响区材料性能局部减弱、板材的真实厚度偏差等因素的影响; 上述因素均会导致板架结构在强度和刚度上的折减, 进而造成仿真与试验结果的差异。

由图12可知, 板架破坏试验仿真结果同样在外板产生沿T型材方向的直裂纹, 裂纹长度为325 mm, 与试验误差为6.9%。右上角圆圈标记处为骨材在T型材对称位置发生明显的扭曲变形, 左上角圆圈标记处为中间骨材在与T型材腹板连接处发生了断裂, 这些仿真结果与试验结果一致。

板架变形损伤全过程的等效塑性应变 (Equivalent Plastic Strain, PEEQ) 仿真结果见图13: ①冲头作用点附近发生塑性变形; ②塑性变形扩展到骨材底部; ③T型材面板开始发生塑性变形; ④

骨材开始断裂；⑤外板开始破裂；⑥板架最终破坏结果。结合图11和图13分析，板架在破坏之前，其加载力-位移曲线呈现2段近似线性的现象；加载力-位移曲线斜率变化发生在加载力210 kN左右，此时

板架模型中间骨材塑性变形扩展到底部，见图13(b)。此后板架整体抗变形能力降低，进而导致加载力-位移曲线斜率持续降低。

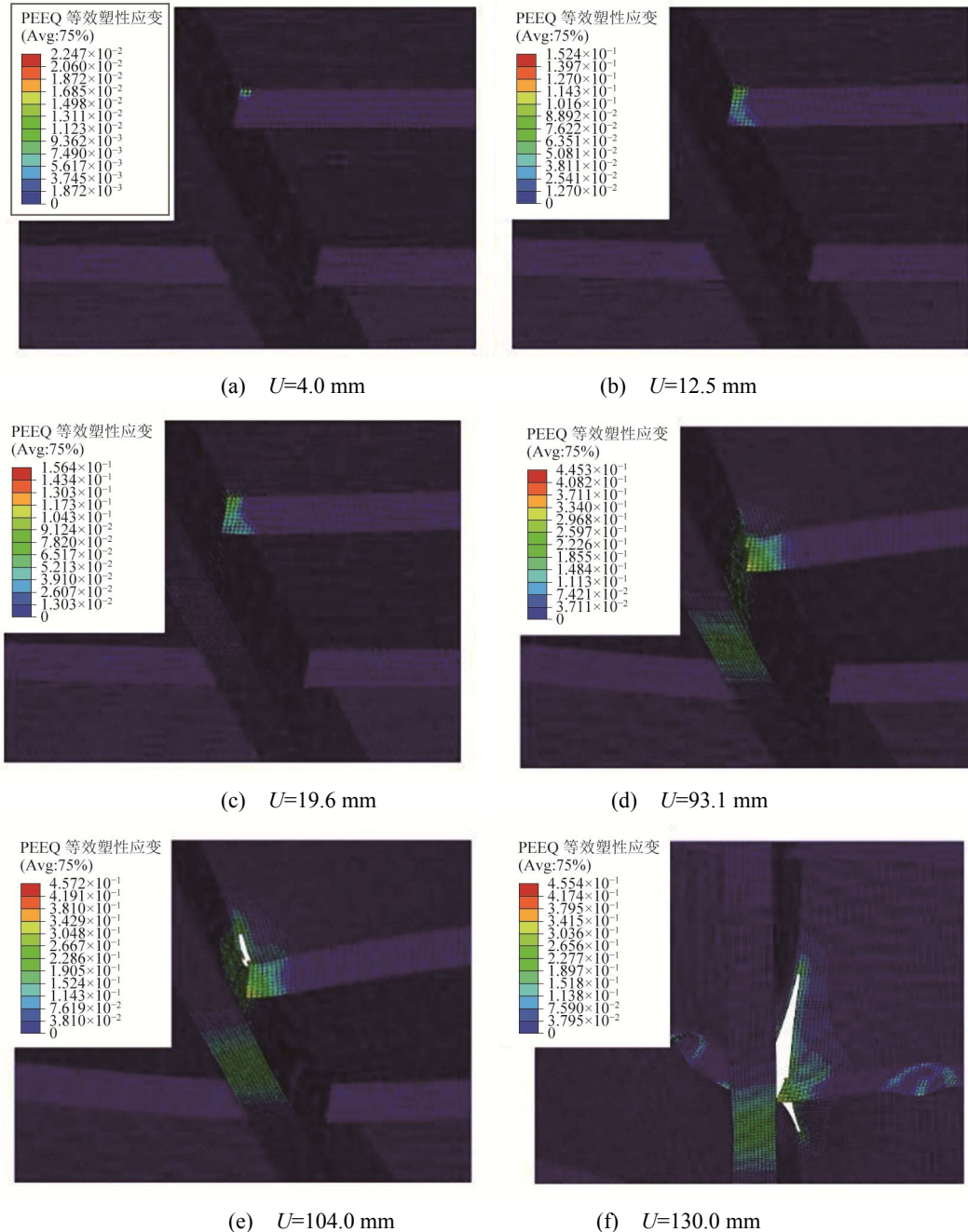


图 13 板架变形损伤过程仿真

Fig. 13 Simulation of Deformation and Damage Process of Stiffened Panels

综上所述，板架静力破坏试验的数字仿真结果与试验结果在多方面具有较好的一致性，具体包括外板裂纹形状、裂纹长度、裂纹位置以及板架极限破坏载荷、板架破坏载荷对应冲头位移等关键指标。仿真结果与试验结果存在一定偏差，其主要原因可

能是由于数值仿真模型未考虑焊接引起的结构变形、焊接热影响区材料性能局部减弱、板材的真实厚度偏差等因素的综合影响。

3.3 强构件对结构破坏的影响分析

船舶碰撞过程中，撞击恰好发生在舷侧强构件

处的概率较低，实际撞击位置在强构件附近的可能性较大。因此，本文针对撞击位置偏离舷侧强构件的场景，研究了舷侧强构件对结构抗撞性能的影响。以冲头沿垂直于T型材方向（X方向）的偏移量为控制变量，进行了一系列数值仿真，偏移量变化为0~200 mm。由图14可知，冲头底端往上130 mm的横截面圆半径为161.24 mm。显然，随着冲头偏移T型材的距离增大，强构件对结构破坏的影响总体呈减小的趋势，因此在偏移量<100 mm，每间隔10 mm做一次仿真；偏移量在100 mm~200 mm，每间隔20 mm做一次仿真。

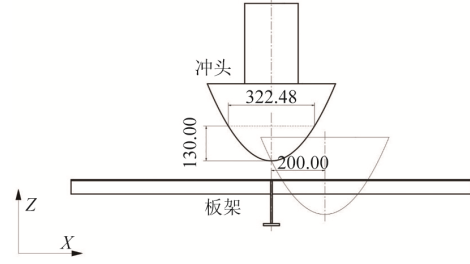


图 14 冲头偏移示意（单位：mm）

Fig. 14 Diagram of Punch Offset (Unit: mm)

上述系列数值仿真结果的外板破坏模式见图15。

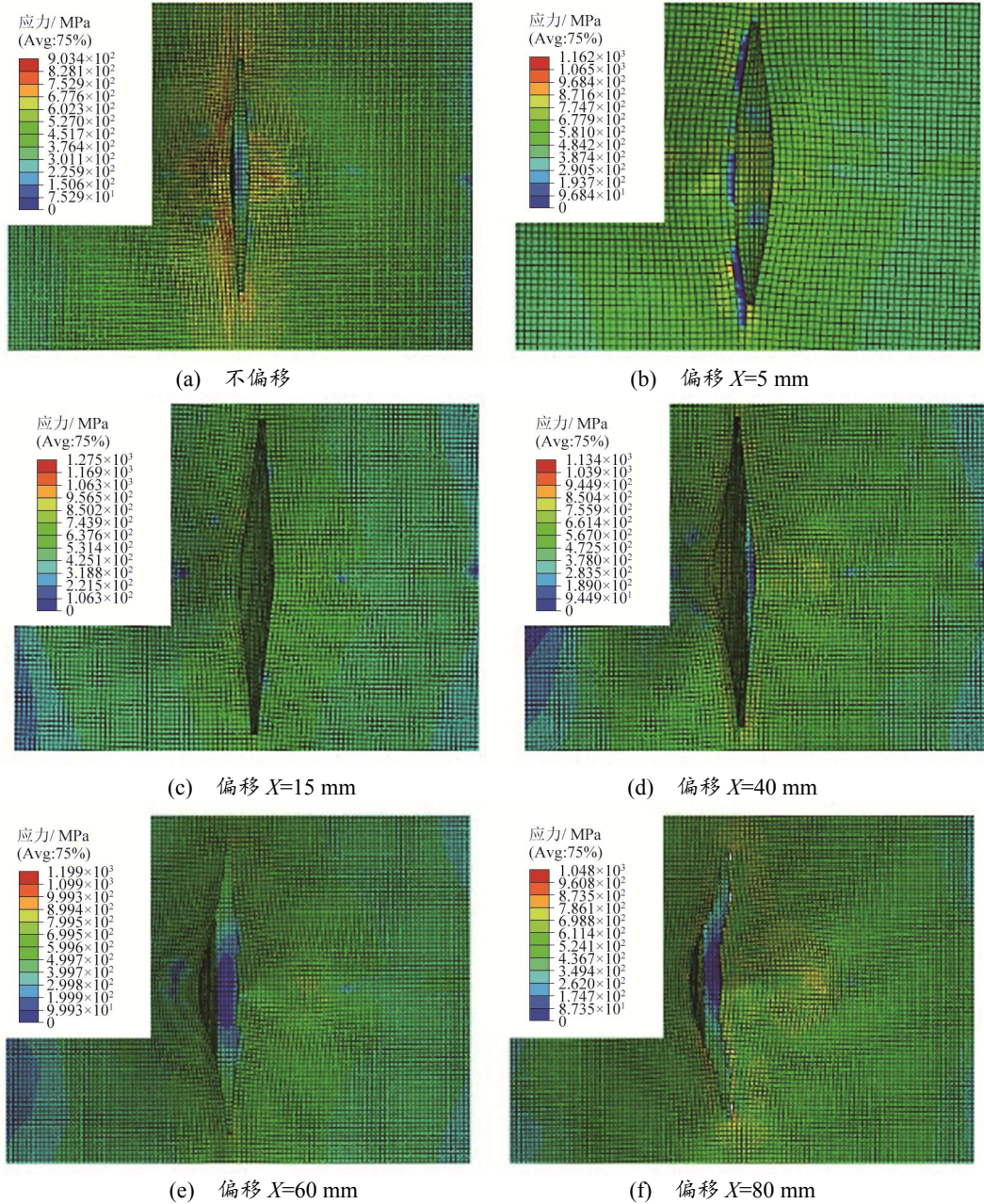


图 15 冲头不同偏移下的外板破坏模式

Fig. 15 Fracture Modes of Outer Plate Under Different Offsets of the Punch

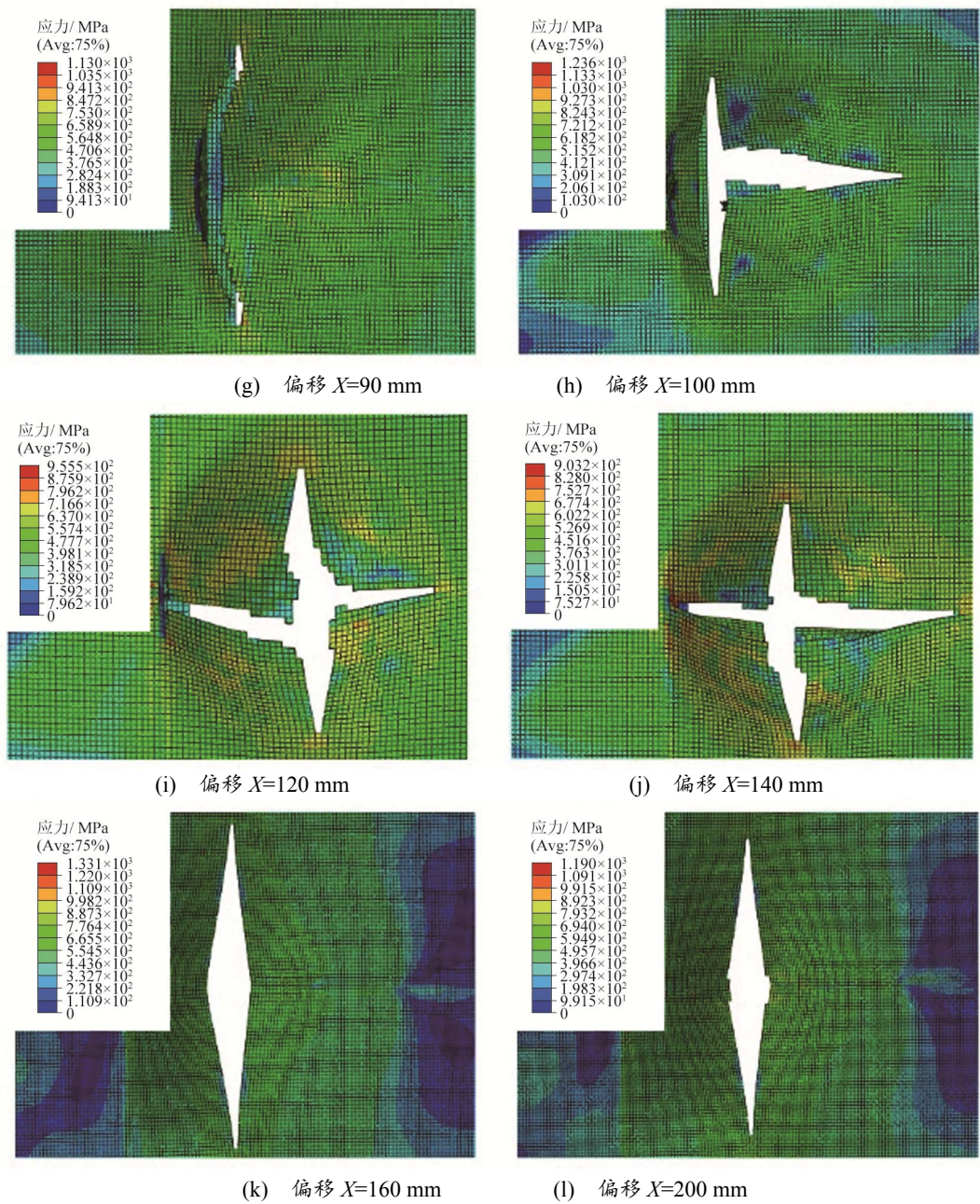


图 15 冲头不同偏移下的外板破坏模式（续）

Fig. 15 Fracture Modes of Outer Plate Under Different Offsets of the Punch (Continued)

结构破坏模式见表 1。

表 1 冲头不同偏移下的结构破坏模式

Tab. 1 Structural Failure Modes Under Different Offsets of the Punch

偏移量 X/mm	裂纹类型	裂纹扩展方式	T 型材破坏模式	中间骨材破坏模式
0	直裂纹	中间向两端	侧倾较小, 腹板折叠严重	两侧断裂, 两侧扭曲
5	直裂纹	中间向两端	侧倾较小, 腹板折叠严重	两侧断裂, 两侧扭曲
9	直裂纹	中间向两端	侧倾较大, 腹板折叠严重	一侧断裂, 两侧扭曲
15	直裂纹	中间向两端	侧倾较大, 腹板折叠严重	一侧断裂, 两侧扭曲
20	直裂纹	中间向两端	侧倾较大, 腹板折叠严重	一侧断裂, 两侧扭曲
30	直裂纹	中间向两端	侧倾较大, 腹板折叠严重	一侧断裂, 两侧扭曲

表 1 冲头不同偏移下的结构破坏模式（续）

Tab. 1 Structural Failure Modes Under Different Offsets of the Punch (Continued)

偏移量 X/mm	裂纹类型	裂纹扩展方式	T 型材破坏模式	中间骨材破坏模式
40	直裂纹	中间向两端	侧倾较大，腹板折叠严重	一侧断裂，两侧扭曲
50	直裂纹	中间向两端	侧倾较大，腹板折叠严重	一侧断裂，两侧扭曲
60	直裂纹	中间向两端	侧倾较大，腹板折叠	一侧断裂，两侧扭曲
70	微弯裂纹	中间向两端	侧倾小，腹板折叠	一侧断裂，两侧扭曲
80	微弯裂纹	中间向两端	侧倾小，腹板折叠小	一侧断裂，两侧扭曲
90	弯裂纹	中间向两端	侧倾小，腹板折叠小	一侧断裂，两侧扭曲
100	T 裂纹	先竖后横	变形小，侧倾很小	一侧断裂，单侧扭曲
120	花裂纹	先竖后横	变形小，几乎不侧倾	一侧断裂，单侧扭曲
140	花裂纹	先横后竖	变形小，几乎不侧倾	一侧断裂，单侧扭曲
160	直裂纹	中间向两端	变形小，几乎不侧倾	一侧断裂，单侧两处扭曲
180	直裂纹	中间向两端	变形很小	一侧断裂，单侧两处扭曲
200	直裂纹	中间向两端	变形很小	一侧断裂，单侧两处扭曲

结合图15和表1可知：当偏移量较小时，T型材侧倾较小但折叠严重，外板产生纵向裂纹；当偏移量在9 mm~60 mm时，T型材侧倾较大且发生折叠，外板主要产生纵向裂纹；当偏移量在70 mm~90 mm时，T型材侧倾较小，腹板折叠较小，外板在T型材附近产生纵向裂纹，裂纹逐渐向冲头偏移侧弯曲；当偏移量在100 mm~140 mm时，T型材变形小且几乎不侧倾，外板裂纹形式变化较大，有T形裂纹、花形裂纹，骨材扭曲发生位置从T型材两侧变为冲头偏移侧；当偏移量在160 mm~200 mm时，T型材变形很小，外板裂纹为直裂纹，骨材在直裂纹两侧产生扭曲，但均位于冲头偏移侧。

冲头不同偏移下的最大加载力及其对应位移见图16。由图16可知，随着撞击点远离T型材，板架结构最大加载力及其对应的冲头位移变化大体分为3个阶段：第1阶段（撞击点偏移量0~40 mm），最大加载力及其对应的冲头位移均快速下降，分别下降至撞击点未偏移时的71.2%和79.1%；第2阶段（撞击点偏移量50 mm~120 mm），最大加载力缓慢增大而最大加载力对应的冲头位移增大较为明显，分别增加至撞击点未偏移时的82.9%和97.5%；第3阶段（撞击点偏移量140 mm~200 mm），最大加载力及其对应的冲头位移均快速下降。总之，随着撞击点远离T型材，T型材对结构抗变形能力影响总体呈现为先快速下降然后缓慢上升再快速下降的变化趋势。

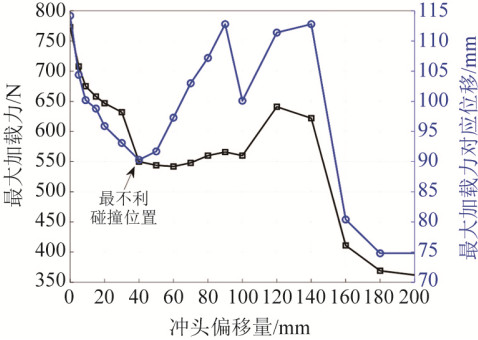


图 16 冲头不同偏移下的最大加载力及其对应位移
Fig. 16 Maximum Loading Force and Corresponding Displacement Under Different Punch Offsets

从T型材变形失效模式角度分析：撞击点偏离较小时（ $<5\text{ mm}$ ），T型材为主要承载构件之一，失效模式主要为小侧倾、腹板严重折叠，结构抗变形能力较强。随着撞击点偏移量增大（9 mm~60 mm），T型材侧倾增大，腹板折叠程度减小，结构抗变形能力降低。当撞击点偏移继续增大（70 mm~120 mm），T型材侧倾减小、折叠进一步减小，承载以弯曲变形为主，外板筋膜拉伸变形增大，外板裂纹形式变化较大，结构整体抗变形能力增强。随着撞击点偏移继续增大（140 mm~200 mm），T型材变形很小，结构整体抗力下降。图16中在冲头偏移量为100 mm时，最大加载力对应的位移明显小于附近的数据点，主要是在该场景下，外板裂纹为T形裂纹与其他场景明显不同。

4 结论

本文针对典型舷侧板架结构抗撞性能研究,采用高强钢制造了接近实船构件尺寸的舷侧板架模型,并开展了板架静力破坏试验和数值仿真分析,用以研究板架结构在冲头准静态加载作用下的变形损伤过程和失效模式。随后,开展了强构件对结构破坏的影响分析,得到以下3个结论:

1) 当载荷作用于T型材结构附近时,结构破坏前的载荷位移曲线呈线2段近似线性变化,初始阶段结构抗力较大,曲线斜率较大;当骨材塑性变形扩展到底部时,结构抗力减小,曲线斜率减小。

2) 数值仿真得到的板架结构损伤变形、破坏模式及加载力-位移曲线与试验结果一致。外板在沿平行T型材方向产生破裂,T型材主要发生侧倾和折叠失效;骨材在T型材对称位置产生扭曲,且在与T型材连接位置产生断裂。

3) 随着撞击点远离T型材,T型材对结构整体抗变形能力的约束效应总体呈现先快速下降然后缓慢上升再快速下降的变化趋势。对应的T型材的失效模式由腹板折叠,逐步过渡为腹板大幅侧倾,最终转变为腹板小幅侧倾且整体变形弱化。T型材不同失效模式影响着外板裂纹形式和扩展模式。

参考文献:

- [1] 刘元丹,刘敬喜,肖曙明,等.双壳船内壳和外壳结构耐撞性能的分析 and 比较[J].中国造船,2012,53(3): 121-128.
LIU Y D, LIU J X, XIAO S M, et al. Comparison of Crashworthiness of Inside Shell with That of Outside One for Double-Hull Structures[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(3): 121-128.
- [2] 崔濛,刘敬喜,龚榆峰,等.帽型加筋结构耐撞性能试验与仿真研究[C]//中国造船工程学会船舶力学学术委员会全体会议.2014.
CUI M, LIU J X, GONG Y F, et al. An Experimental and Numerical Study on the Resistance to Penetration of Hat-Type Stiffened Plates[C]//The Plenary Session of the Ship Mechanics Academic Committee of the Chinese Society of Shipbuilding Engineers. 2014.
- [3] 彭正梁,杨磊,费宝祥.高强钢船体板架落锤冲击试验及数值仿真[J].中国舰船研究,2018,13(增刊 1): 100-105.
PENG Z L, YANG L, FEI B X. Drop Weight Impact Test and Numerical Simulation of High-Strength Steel Hull Grillage[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(Suppl. 1): 100-105.
- [4] 张敏,赵延杰,王海坤,等.船体加筋板耐撞性解析预报方法研究[J].振动与冲击,2021,40(21): 25-30.
ZHANG M, ZHAO Y J, WANG H K, et al. Analytical Prediction Method for Crashworthiness of Ship Stiffened Panels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(21): 25-30.
- [5] 姚鹏,田阿利,刘昆,等.SPS夹层结构落锤冲击试验研究[J].振动与冲击,2021,40(20): 296-301.
YAO P, TIAN A L, LIU K, et al. An Experimental Study on Drop Weight Impact of an SPS Structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 296-301.
- [6] 由遥巍,张新宇.船舶加筋板结构撞击试验的相似性分析[J].材料开发与应用,2022,37(4): 34-40.
YOU Y W, ZHANG X Y. Similarity Study on Impact Response of Stiffened Plate[J]. Development and Application of Materials, 2022, 37(4): 34-40.
- [7] 卢安格,王子棠,孔祥韶,等.船舶结构碰撞试验及简化数值计算方法[J].中国舰船研究,2024,19(2): 128-139.
LU A G, WANG Z T, KONG X S, et al. Ship Structure Collision Experiments and Simplified Numerical Calculation Method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(2): 128-139.
- [8] TABRI K, MÄÄTTÄNEN J, RANTA J. Model-Scale Experiments of Symmetric Ship Collisions[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2008, 13(1): 71-84.
- [9] TÖRNQVIST R. Design of Crashworthy Ship Structures[D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2003.
- [10] ALSOS H S, HOPPERSTAD O S, TÖRNQVIST R, et al. Analytical and Numerical Analysis of Sheet Metal Instability Using a Stress Based Criterion[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(7/8): 2042-2055.
- [11] ALSOS H S, AMDAHL J, HOPPERSTAD O S. On the Resistance to Penetration of Stiffened Plates, Part II: Numerical Analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(7): 875-887.
- [12] 张敏.双壳船体结构的耐撞性预报方法研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
ZHANG M. Research on Crashworthiness Assessment Method of Double-Hull Ship Structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [13] LIU B, GUEDES SOARES C. Experimental and Numerical Analysis of the Crushing Behaviour of Stiffened Web Girders[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 88: 22-38.