

循环载荷作用下船体结构极限强度研究综述

赵南^{1,2}, 敖雷^{3*}, 汪高飞^{1,2}, 李傅友³, 李飞^{1,2}, 刘斌³

(1.中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2.深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082;
3.武汉理工大学 绿色智能江海直达船舶与邮轮游艇研究中心, 武汉 430063)

摘要: 首先阐述了材料在循环载荷作用下的塑性累积特性, 并重点介绍了仿真分析中常用的材料本构关系。然后从仿真和试验 2 个层面介绍了循环载荷作用下完整结构极限承载特性的研究工作, 接着分析了裂纹损伤对循环载荷中结构承载特性的影响, 阐明了裂纹在循环载荷作用下的变化规律。最后, 总结讨论了循环载荷下损伤结构剩余强度评估方法及存在的问题, 为研究人员提供一定参考。

关键词: 船体梁; 循环载荷; 极限强度; 塑性累积; 棘轮效应; 裂纹损伤; 裂纹扩展

中图分类号: U661.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)02-0062-15

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.008

Review of Ultimate Strength of Ship Hull Structures under Cyclic Loading

ZHAO Nan^{1,2}, AO Lei^{3*}, WANG Gaofei^{1,2}, LI Fuyou³, LI Fei^{1,2}, LIU Bin³

(1. China Ship Scientific Research Center, Jiangsu Wuxi 214082, China; 2. Taihu Laboratory of Deep Sea Technology Science, Jiangsu Wuxi 214082, China; 3. Green & Smart River-Sea-Going Ship, Cruise and Yacht Research Centre, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

ABSTRACT: Firstly, the plastic accumulation characteristics of materials under cyclic loading were elucidated and the commonly used material constitutive relations in simulation analysis were highlighted. Next, the research on the ultimate load-bearing characteristics of complete structures was presented from both simulation and experimental perspectives under cyclic loading. Then, the impact of crack damage on structural load-bearing characteristics under cyclic loading was analyzed and the variation patterns of cracks under such conditions were elucidated. Finally, the methods for evaluating the residual strength of damaged structures under cyclic loading and the existing issues were summarized and discussed, providing a reference for researchers.

KEY WORDS: ship hull girder; cyclic loading; ultimate strength; plastic accumulation; ratcheting effect; crack damage; crack propagation

随着现代造船技术的不断提升, 为提高远洋运输效率, 降低海上货物运输的成本, 最大化航道贸易的

经济效益, 船舶正向大型化、轻量化、功能多样化的趋势发展。随之而来的船体结构柔性增加, 为船舶结

收稿日期: 2024-11-07; 修订日期: 2024-12-12

Received: 2024-11-07; Revised: 2024-12-12

基金项目: 稳定支持项目 (WDZC70202030201); 国家自然科学基金 (52301385)

Fund: Stabilization Support Research Project (WDZC70202030201); National Natural Science Foundation of China (52301385)

引文格式: 赵南, 敖雷, 汪高飞, 等. 循环载荷作用下船体结构极限强度研究综述[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 62-76.

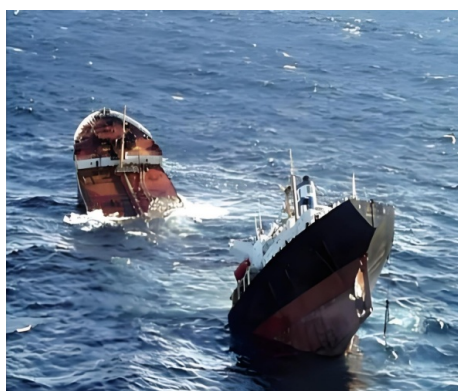
ZHAO Nan, AO Lei, WANG Gaofei, et al. Review of Ultimate Strength of Ship Hull Structures under Cyclic Loading[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 62-76.

*通信作者 (Corresponding author)

构安全性设计带来新的考验。早在 1965 年, Stavovy^[1]便提出了极限强度直接计算法, 并将其应用于船舶结构设计领域。与传统基于经典线弹性理论的船舶结构设计方法相比, 基于极限强度的设计方法更能准确地反映船舶的实际承载能力。经过近 60 余年的发展, 国内外的研究者在船体结构的极限强度问题上进行了广泛而深入的探讨, 并取得了显著的成果。求解结构极限强度的方法已经日趋成熟, 理想结构单元法、逐步崩溃法、非线性有限元法和模型试验法等, 均能够给出较为满意的计算结果。自 2006 年船体梁的极限强度评估写入 IACS 共同规范以来, 为保证船舶在营运周期内具有足够的总纵强度, 极限强度已成为船舶设计所必需的安全指标要求。

近年来, 仍有船舶由于总纵强度不足而导致断裂事故的发生。2013 年, “MOL Comfort”号集装箱船在也门外海 200 英里 (321.87 km) 处航行时, 船舶中部发生断裂并沉没。2015 年, “El Faro”号货轮

在巴哈马附近海域航行时遭遇极端天气, 导致船体断裂并最终沉没 (见图 1)。船舶结构承载性能受到自身结构特性和实际海况环境的共同影响。过去在进行船体结构极限强度评估时, 通常是在中拱或中垂状态以施加单次弯矩的方式进行。实际上, 船舶在服役期间总是遭受连续交变的循环载荷作用, 此时船体结构所能承受的极限载荷要小于单次极限强度值。大型船舶海难事故表明船体梁在复杂海况下的失效过程实际上是承受外载荷循环作用下的动态坍塌过程。Sumi 等^[2]在 “MOL Comfort” 号事故分析报告中指出, 由于塑性变形的累积, 结构的剩余承载能力会永久性地减弱。特别是在经历多次极端循环载荷后, 结构的剩余强度明显低于单次极限载荷下的瞬时破坏强度。这一观点再次强调了在结构设计和强度评估时考虑循环载荷的重要性。因此, 仅通过单次静态总纵强度分析并不能准确评估复杂交变海况下船体结构的安全性能。



a “Prestige”号油船中部折断



b “MOL Comfort”号集装箱船断裂沉没

图 1 船舶典型事故

Fig.1 Typical ship accidents: a) midsection fracture of “Prestige” oil tanker; b) fracture of “MOL Comfort” container ship

船体梁在遭受复杂载荷作用时, 局部外力可能超过构件承载能力, 导致部分构件发生屈曲, 甚至屈服而进入塑性阶段, 产生永久的塑性变形。随着循环次数的增加, 塑性变形过度积聚, 导致结构发生塌陷崩溃和突然失稳。循环载荷产生的交替变形还会在材料中不断地累积损伤, 引起结构的局部开裂, 最终导致结构整体的棘轮崩溃, 这种现象对于老龄船舶尤为明显。老龄船舶在运营过程中长期遭受周期性海浪作用, 结构会累积各种损伤, 包括细微裂纹、局部凹陷变形、腐蚀损伤等, 极大地降低了船舶构件的弯曲刚度和有效承载面积; 另一方面, 结构在交变载荷作用下塑性累积效应进一步加速裂纹等损伤的演化, 加剧了老龄船舶在运营中的风险系数, 引发灾难性的事故。2021 年, 乌克兰 “Arvin” 号老龄船舶返航途中遭受巨浪的反复砰击, 最终断成两截沉入海底。因此, 对循环载荷下含裂纹损伤船体结构的剩余极限强度进行合理评估, 对提高船舶的安全性、经济性、可靠性等都具有重要作用。

循环载荷作用下, 材料表现出显著不同于单次加载的力学特性, 直接关系到结构性能评估的准确性和可靠性。本文首先总结了循环载荷作用下的材料力学特性, 特别是材料的塑性累积效应和本构模型, 作为循环载荷下结构极限强度数值分析的基础。然后从船体板、加筋板和船体梁 3 种典型结构形式入手, 对循环载荷下完整船体结构极限强度研究工作进行了总结概述。接着考虑实际结构中初始缺陷 (即裂纹) 的影响, 总结归纳了循环载荷下含裂纹损伤结构承载特性分析的研究进展。最后对现存的主要问题和今后发展的方向做出展望。

1 循环载荷下材料的塑性累积效应

在极端波浪载荷的反复作用下, 船体结构所产生的交替塑性变形会呈现 3 种状态。第 1 种棘轮状态, 即结构因循环次数的增加, 导致塑性应变不断累积, 最终破坏; 第 2 种是塑性安定状态, 结构的塑性应变

随交变载荷不断往复;第3种是弹性安定状态,结构经一定载荷循环后塑性变形稳定,整体呈弹性变化。船体结构在循环载荷中表现出的棘轮效应使得船舶在运营过程中不断累积塑性变形,结构最终发生大变形,甚至断裂崩塌。因此,棘轮效应是3种状态中最危险的一种。另外,材料在受到循环载荷作用时还会表现出包辛格效应和循环软/硬化特性。在数值仿真分析中,基于材料的特性构建合理的循环塑性本构模型,是准确评估船体结构在循环载荷下极限强度的重要前提。因此,本文首先对循环载荷下材料塑性累积效应和本构关系的研究工作进行了总结。

1.1 包辛格效应

包辛格效应是当加载方向相反时流动应力减小的现象^[3]。这种现象是由于微观应力分布而引起的材料应力-应变特性的变化。包辛格效应对于普通钢的影响较小,但对于高强度钢则有显著影响^[4]。刘迪辉等^[5]通过薄板拉伸压缩试验获得了材料在不同预应变下的包辛格参数,发现包辛格应力参数随着预应力的增大而增大。苟建军等^[6]基于BP神经网络构建了包辛格效应预测模型,该模型具有较高的预测精度,为薄板材料包辛格效应的测定提供了一种新的方法。

1.2 循环软/硬化效应

材料特性在进入塑性阶段后的反复变形下发生改变,使得材料对变形的抵抗能力增强或减弱,这种现象被称作循环硬化或循环软化。在恒应变幅循环下,对于循环硬化材料其所受应力幅越来越高可能会引起受载构件早期断裂的危险情况^[7]。Paulina等^[8]研究发现,Q235钢在多种应变幅度与平均应变的组合条件下表现出循环硬化现象,且其循环硬化指数会随着平均应变水平的提高而增大。杨海庆等^[9]在3种应变率条件下对Q235钢开展了循环压缩实验,分析了循环载荷下卸载模量与循环次数增加的变化及其与应变率的关系,发现增加应变率可以有效减少加卸载曲线的滞后行为。Xie等^[10]通过试验分析了高温环境下316L不锈钢的循环软化硬化行为。Wang等^[11]分析了低碳钢的循环变形特性,发现材料循环硬化行为会随塑性应变范围不同发生变化。Guo等^[12]对比分析了S355钢和S690钢的循环变形,发现两者的材料循环硬化程度不同,S690钢表现出较差的循环变形特性。

1.3 棘轮效应

材料的棘轮效应是在非对称应力循环加载下塑性变形的循环积累^[13]。棘轮效应会使结构随着循环次数的增加产生过度的塑性变形,最终引发结构的崩溃和失稳。塑性应变的累积导致结构局部断裂,最终导致结构整体崩溃,这种崩溃通常称为交替塑性崩溃,也可称为棘轮崩溃^[13]。由于棘轮变形是一种二次变形累积,准确预测材料或结构的棘轮效应是非常困难

的。目前,对材料的棘轮变形主要采用大量循环拉伸试验的方法获取应力-应变滞回曲线,在此基础上进行相应的本构理论模型研究已取得较大进展。Chaboche等^[14]在室温条件下进行的316L不锈钢循环试验中发现,当应力幅度固定时,特定循环次数下的棘轮应变与平均应力之间存在非线性关联。杨显杰等^[15]通过对316L不锈钢的棘轮试验观察到,当应力幅度从高降至低时,先前施加的较大幅值应力对后续较小幅值的棘轮应变率有显著影响,导致其棘轮应变率几乎接近于0。Paul等^[16]发现,当平均应力保持不变时,应力速率不会对应力幅值与棘轮寿命的相关性造成影响。此外,学者们对新型材料包括镁铝合金、金属基复合材料等的棘轮效应也进行了深入研究^[17-19]。这类材料在循环应力条件下,会展现出高黏塑性,使其棘轮行为呈现出较为显著的时相关性,而较低的应力速率会导致棘轮应变水平的增加。

1.4 循环塑性本构模型

不同材料在延展性、黏塑性等方面表现出来的性质各不相同。为了准确模拟出材料的循环塑性特性,学者们在金属材料循环试验研究的基础上,利用弹性理论建立了一系列材料循环塑性本构模型,包含非耦合模型和耦合模型。非耦合模型既不依据一致性条件,也不遵循随动硬化法则,同时在应对界限面与屈服面相交和非比例载荷下确定塑性模量的等问题上也缺乏有效性,使其在描述材料的棘轮效应上常引发争议;耦合模型则由一致性条件来确定材料塑性模量,建立在非线性随动硬化模型基础上,使其具有应变路径的瞬间记忆效果和非线性特征。Prager^[20]首次提出了线性随动硬化模型,来描述材料在循环加载条件下的硬化效应。随后,Besseling^[21]提出了多线性随动硬化模型,这一模型通过多个线性段组合来描述单轴应力-应变关系。接着,Frederic等^[22]提出了广泛应用的非线性随动硬化模型,即AF模型。基于AF模型,Chaboche等^[23]进一步提出了黏塑性混合硬化模型。该模型在非线性随动硬化的基础上加入了各向同性硬化,较为准确地描述了材料在循环加载时的滞回特性。

混合硬化模型的通用表达式为:

$$F(\sigma, \alpha, \sigma^Y) = f(\sigma - \alpha) - \sigma^Y (\varepsilon^\beta) \quad (1)$$

式中: $f(\sigma - \alpha)$ 为考虑材料随动硬化的流动应力函数; α 为背应力; σ 为应力张量; σ^Y 为材料的各向同性硬化特性。

2 循环载荷下完整结构极限强度的数值分析研究

早期,工程上认为进行一次性过载测试时得到的结构极限承载能力已能满足安全性评估的各项要求,

与单调载荷导致的剧烈塑性破坏相比, 塑性累积所导致的船体结构变形几乎可以忽略不计。因此, 塑性累积破坏的概念虽早有提及, 但是并未在船体结构强度方面获得充分重视。随着船舶结构强度安全研究的不断深入发展, 研究者们逐渐认识到塑性累积在船体断裂引发的海难事故中对结构安全性所带来的潜在影响, 并对循环载荷作用下典型船体结构极限强度开展了大量数值分析研究。

2.1 板与加筋板结构

板件作为船体结构的关键组成部分, 其在循环载荷下发生局部失稳会进而导致整体结构发生破坏。描述复杂船体结构在循环荷载下的失效机制, 首先要研究非弹性基础构件的循环载荷变形特性。基于这个角度, 日本学者 Fukumoto 等^[24]依据一种理想弹塑性的大挠度-小应变分析方法, 对面内循环载荷下 2 种不同宽厚比的简支矩形板开展了研究, 发现翼板单元的循环特性显著影响薄壁梁在循环弯曲下的变形和能

量耗散。Yao 等^[25]对承受面内循环载荷的矩形板进行了弹塑性大挠度分析, 研究发现, 在保持应变幅值恒定不变的情况下施加极端循环载荷时, 矩形板的应力应变曲线在数次循环后趋于稳定。国内, 黄震球等^[26-27]最先对循环载荷下矩形板的非弹性大变形进行了研究, 阐明了累积塑性破坏的重要性。杨平团队^[28-35]对循环载荷下船体薄壁构件的承载特性进行了系列研究工作, 通过理论与数值仿真分析有效模拟了板和加筋板在面内循环载荷下的极限承载性能, 并建立了简化数值预报方法。吴选福^[36]对加筋板在循环载荷下的极限强度进行了数值分析, 发现起始加载方式对极限强度的影响较小。上述研究包含了单向循环载荷和双向循环载荷 2 种形式。单向循环载荷在每个周期中载荷方向始终一致, 而双向循环载荷则在周期内方向交替变化。在双向循环载荷作用下, 结构的反向载荷会抵消部分正向载荷产生的塑性变形, 但不能完全消除, 如图 2 所示。因此, 在单向循环载荷作用下, 构件累积相同塑性变形所需的循环次数通常少于双向循环载荷作用下的情况。

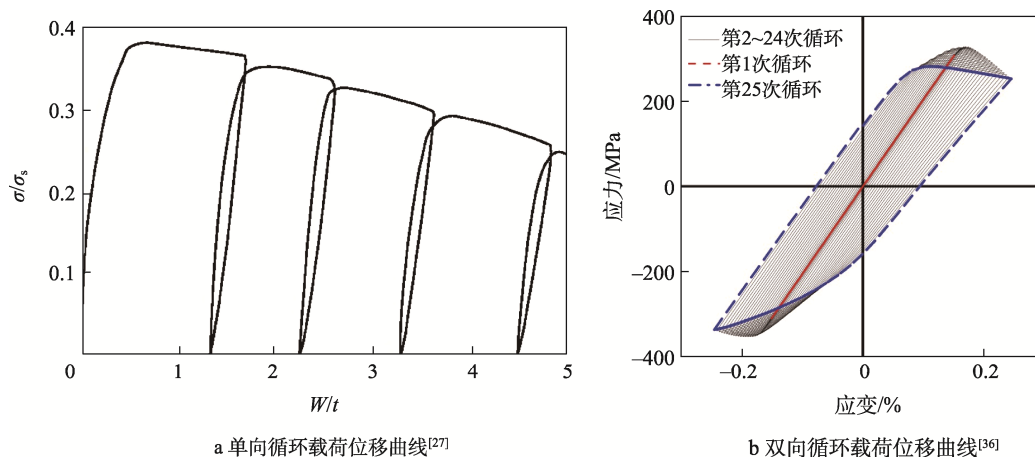


图 2 循环载荷曲线

Fig.2 Cyclic loading curve: a) unidirectional cyclic load displacement curve^[27]; b) bidirectional cyclic load displacement curve^[36]

Li 等^[37]研究了在双轴循环载荷和侧向压力联合作用下连续船体板的极限强度, 发现板长细比、横向循环压缩、侧向压力和循环次数等因素对强度特性和坍塌模式有显著影响, 但分析中他们未考虑材料的断裂失效特性。方文武^[38]对循环载荷下船体板和加筋板的断裂破坏模式进行了数值分析, 结果表明, 在塑性应变累积集中区域, 结构容易发生局部崩溃, 并伴随断裂破坏, 如图 3 和图 4 所示。吴剑国等^[39]通过将加筋板格简化为两端固支的梁-柱模型, 推导出了循环载荷作用下加筋板格极限强度理论解的计算公式。贺幸^[40]分析了在拉-压循环载荷下, 焊缝热影响区等因素对铝质加筋板极限强度的影响。

在循环载荷反复作用下, 结构的剩余强度与循环载荷的卸载点密切相关, 如图 5 所示^[42]。卸载点的应变越大, 经过循环之后极限强度下降越多。在上述板与加筋板循环承载特性研究中, 卸载点多选取在结构

达到极限状态之后, 载荷循环呈现为结构单元的后极限强度行为。在后极限状态下, 每一次载荷循环过程中, 加载曲线所对应的峰值始终与上一个循环开始进行卸载的点保持一致。因此, 在整个循环过程中, 结构的应力-应变关系滞回曲线与单调加载下的载荷-位移曲线基本重合, 失效模式也保持一致。随着载荷循环次数的增加, 板的累积塑性变形和剩余承载能力不断降低, 并最终趋于平稳状态。当卸载点选取较早, 结构承受的载荷远未达到极限值, 循环过程中塑性变形的累积量很小, 每个循环的加载路径与前一循环的卸载路径基本重合。结构极限强度分析过程中, 材料往往假设为理想弹塑性。为了准确揭示极端循环载荷作用下结构的递增塑性破坏和承载能力变化, 需要充分考虑材料滞回性能的影响。Chaboche 等^[23]提出的混合硬化材料模型, 利用屈服面的扩大和移动来表征循环载荷作用下材料的各向同性硬化和随动硬化, 较

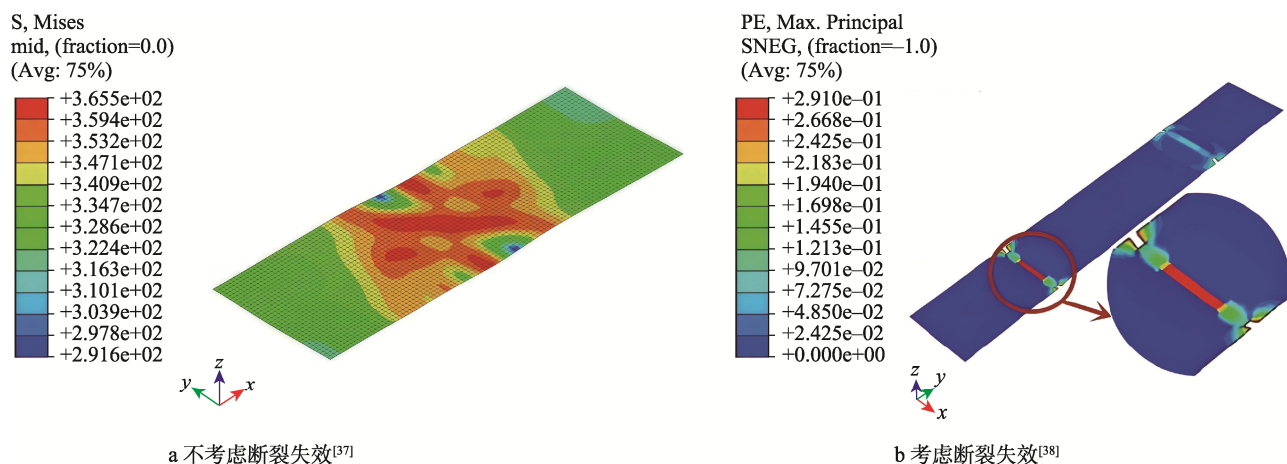


图3 船体板在循环载荷作用下的失效模式

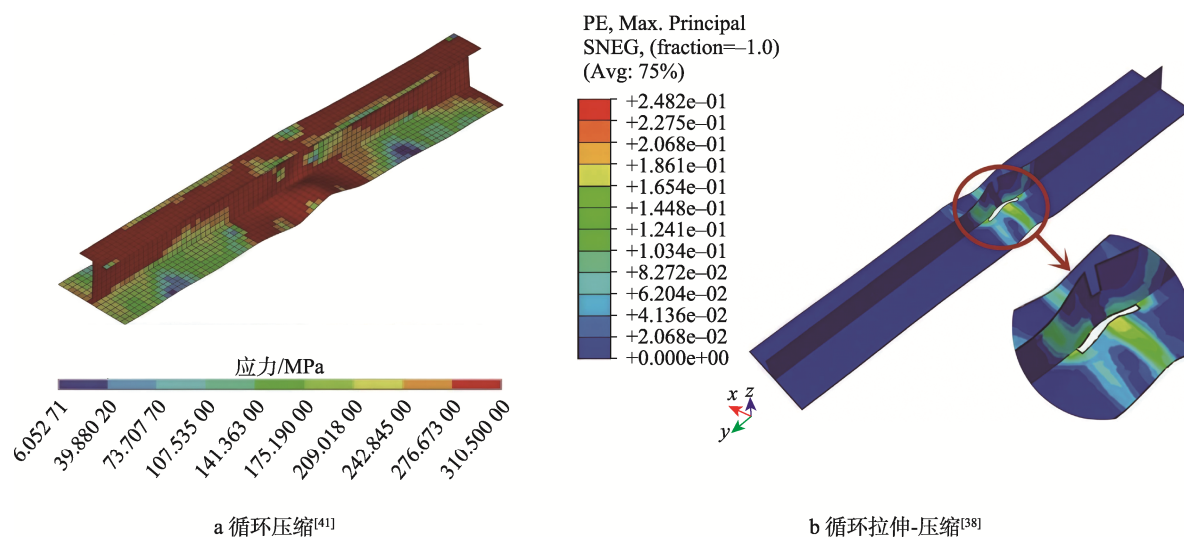
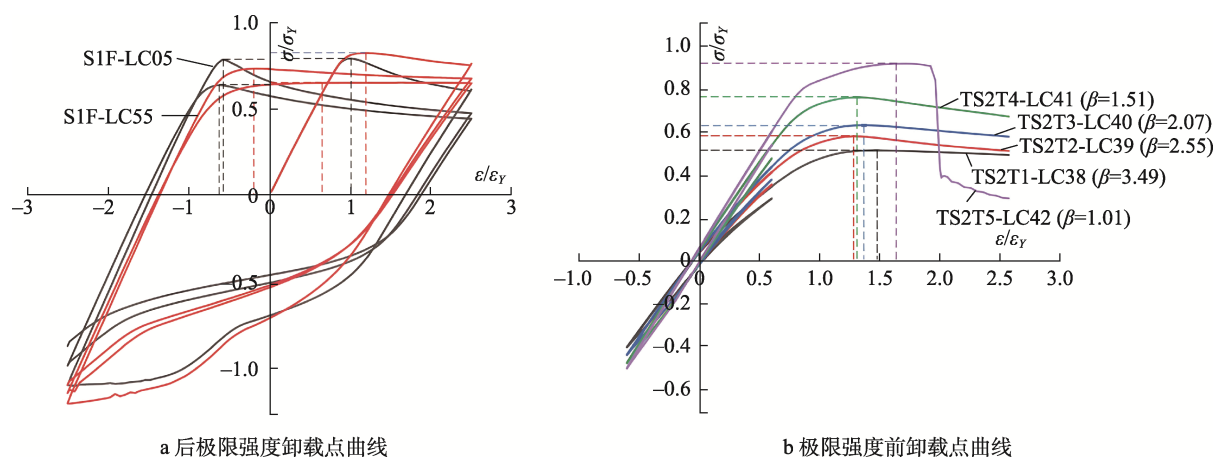
Fig.3 Failure modes of hull plates under cyclic loading: a) without fracture failure^[37], b) with fracture failure^[38]

图4 加筋板在循环载荷作用下的失效模式

Fig.4 Failure modes of stiffened plates under cyclic loading: a) cyclic compression^[41], b) cyclic stretching and compression^[38]图5 载荷位移曲线图^[42]Fig.5 Load displacement curve^[42]: a) post-ultimate strength unloading point curve; b) pre-ultimate strength unloading point curve

好地模拟了材料的棘轮效应,在循环载荷下结构的强度分析中得到广泛应用。崔虎威等^[41]利用包括循环塑性 Chaboche 材料模型在内的多个材料模型,对加筋板极限状态时的响应进行了分析,对比后发现,相

于理想弹塑性,循环塑性材料模型表现出更稳定的极限承载性能。张旭辉^[43]基于 Chaboche 材料模型,对板架结构在循环外载荷作用下的极限强度进行了数值仿真分析,发现板架结构在循环载荷作用下的失效

模式表现为塑性累积引起的应力集中和单元失效。Li 等^[44]采用 Chaboche 材料模型来模拟循环结构响应, 提出了一种用于预测板和加筋板在循环面内载荷下的载荷位移曲线分析方法。刘葳等^[45]结合 Chaboche 材料模型研究了极端循环载荷下加筋板的极限强度, 结果表明, 结构会产生棘轮效应, 并导致承载能力降低。

2.2 简化船体梁结构

船体梁在承受总纵弯曲载荷时, 结构的失效形式主要是受压缩端的非线性屈曲, 但是在涉及棘轮效应的循环极限强度时, 需要考虑结构局部断裂和整体屈曲的耦合效应。实际上, 船体结构的失效在循环载荷作用下通常源于交变塑性变形破坏(低周疲劳)与递增塑性累积破坏 2 种破坏模式的耦合作用。这种耦合的破坏模式对于船体结构相当危险, 因此对循环载荷作用下船体结构的崩溃特性进行探究时必须引起重视。目前, 已有部分研究集中于循环载荷下船体结构的塑性累积破坏, 如何分析两者的耦合机理还需进一步探索。Class^[46]和 Sumi 等^[2]对一艘集装箱船的总纵强度失效事故进行了分析, 发现中拱弯矩达到极限强度的 90% 时, 就可能导致外底板的永久屈曲变形。货物重心偏移、局部压力载荷、循环波浪载荷以及颤振

效应的叠加可能会使总体载荷超过船舶的循环剩余极限强度。Iijima 等^[47]和 Zhang 等^[48]对循环波浪载荷作用下船体梁的累积损伤情况做了一些初步研究。ISSC^[49]得出结论, 认为船体梁失效实际上是受到 1 个或多个载荷循环时的动态坍塌过程, 局部压力载荷和短时砰击引起的颤振载荷对大型集装箱船具有重要影响。任慧龙等^[50]基于递增塑性理论和梁柱理论, 研究了循环载荷对船体梁极限承载能力的影响, 指出极限强度受载荷顺序的影响较大。喻霖等^[51]对船体梁在单向和双向循环载荷下的极限承载力进行了研究。崔虎威^[52]假定了 3 种航行状态来分析循环弯曲下的船体梁, 得出循环弯曲下船体梁的总纵极限强度小于一次性崩溃, 表明循环塑性累积削弱了船体总纵强度。Hu 等^[53]分析了箱型梁结构在单向循环载荷和双向循环载荷作用下的失效模式, 其中箱型梁的极限弯矩在双向循环载荷作用下减小得更快。Liu 等^[54]通过显式动力学分析了某集装箱船舱段结构在循环总纵弯曲载荷下的失效特性, 施加的循环外载荷小于单调极限载荷, 由于塑性累积效应, 船底纵骨及开口角隅发生局部断裂, 如图 6 所示。Li 等^[55]建立一种分析船体梁循环极限承载能力的逐步崩溃法, 发现材料硬化对船体梁总体弯曲响应的影响很小, 但增加了弯曲强度。

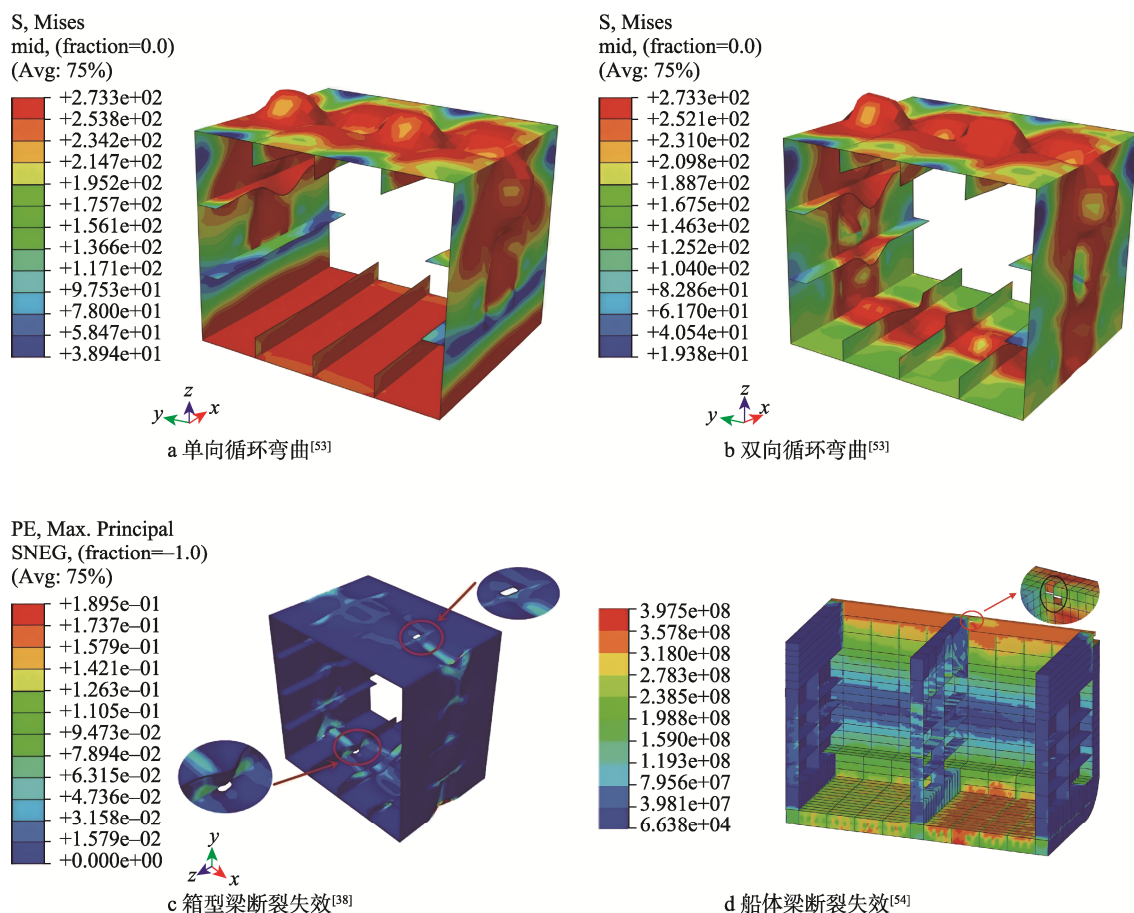


图 6 船体梁在循环载荷下的失效模式

Fig.6 Failure modes of hull girders under cyclic loading: a) unidirectional cyclic bending^[53]; b) bidirectional cyclic bending^[53]; c) box girder fracture failure^[38]; d) hull girder fracture failure^[54]

3 循环载荷作用下完整结构极限强度的试验研究

相较于数值仿真分析,模型试验是研究船体结构承载特性最为可靠的方法。通过试验能够直观地观测到船体结构在极端循环载荷作用下的失效模式,详细了解局部构件的屈曲变形特性,并对结构的极限承载性能进行准确评估。同时,所获得的试验数据为验证数值仿真等其他方法的准确性提供重要依据。

目前,针对薄板结构在循环载荷作用下的极限强度已开展了一些模型试验研究。Fukumoto 等^[56]最先通过建立方柱模型对循环轴向载荷作用下的薄板进行了非弹性循环载荷-变形试验。国内,黄震球等^[26-27]采用相似薄壁方柱模型开展了单向循环压缩极限强

度试验,为循环压缩载荷作用下薄板的剩余强度研究提供了重要试验数据。杨平等^[57]设计了系列方柱模型,进行了薄板循环压缩下的极限承载性能试验(见图7),并与有限元结果进行了对比分析。他们指出,基于一次性崩溃方法评估船体梁的极限强度可能偏于危险。以上试验实施过程中均只考虑载荷的单向循环状态,重点关注极值点后结构的后屈曲特性。Chen 等^[58]采用位移控制方法对多组加筋板开展了双向循环拉-压试验,详细讨论了循环硬化和疲劳损伤的影响。他们同样发现,加筋板的极限强度随循环次数增加逐渐趋于稳定。在有限循环次数下,疲劳损伤对加筋板极限强度的影响很小,循环硬化起主要作用。傅何琪等^[59]对扶强材试件开展了双向循环稳定性试验。他们发现,反向拉伸并不能完全消除屈曲变形,变形随循环次数增加呈上升趋势。

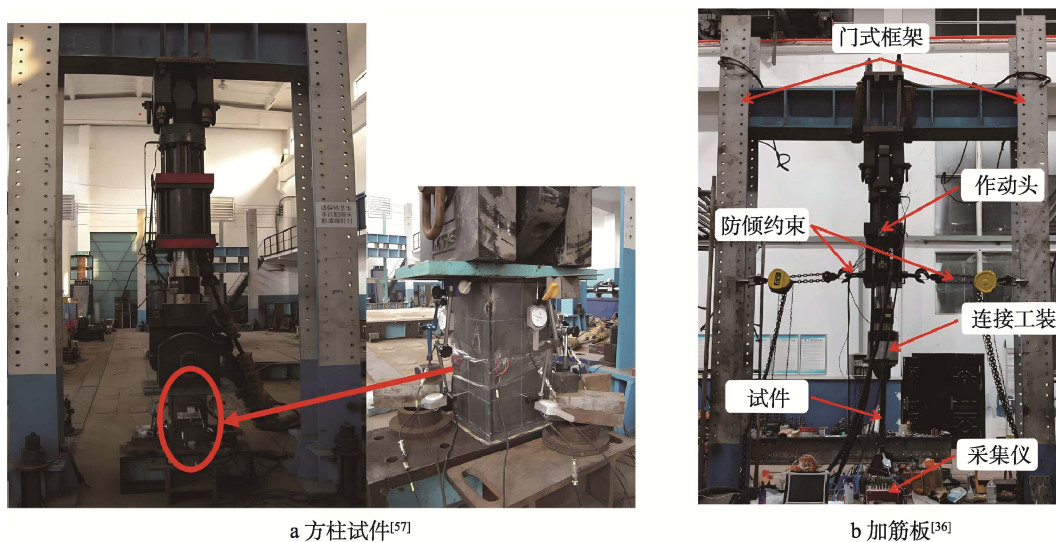


图7 循环载荷板和加筋板试验工装

Fig.7 Test fixture diagrams of plate and stiffened plate under cyclic loading: a) square column specimen^[57]; b) stiffened plate^[36]

实船结构复杂而庞大,开展实船试验需要耗费大量的资金和人力资源,且试验条件要求高、实施难度大。因此,针对船体梁的极限强度研究很少有实船试验案例,多采用简化的箱型梁或基于相似准则设计的等效缩比模型开展试验研究。Akhras 等^[60]通过翻转模型的方法对单次循环下箱型梁的崩溃特性进行了试验研究,以评估其剩余极限强度。他们发现,后极限状态下箱型梁的剩余极限强度是完好箱型梁的75%。崔虎威等^[61]采用四点弯曲方法对5组箱型梁模型开展了单/双向循环弯曲试验。他们同样通过翻转模型来实现箱型梁的双向循环弯曲加载。在双向循环弯曲试验中,尽管反向加载减少了部分塑性变形,由于材料几何非线性及内力重新分配,模型的极限强度仍明显下降。邓卉等^[62]通过四点弯曲加载模拟了大开口船体梁在单向循环弯矩作用下的破坏模式(如图8所示),发现单向循环下材料硬化效应的影响很小。相较于板和加筋板而言,箱型梁结构更为复杂,双向

循环载荷的施加手段亟需改进。采用翻转模型的方法既增加了试验操作难度,翻转过程中还可能造成结构的二次变形,影响试验结果的准确性。

4 循环载荷下含裂纹结构剩余强度研究

上述的循环载荷作用下结构剩余强度研究均是围绕完整船体结构展开,实际上,在长期的交变波浪载荷作用下,船体结构易出现裂纹损伤,因此需研究循环载荷作用下含裂纹损伤结构的失效行为特性。研究发现,由于裂纹等缺陷导致的船舶安全事故达到正常情况的2倍之多^[63]。裂纹会对结构承载造成多重不利影响,一方面,裂纹处局部结构更易出现应力集中,更易引发局部屈曲;另一方面,裂纹破坏构件连续性,结构净截面及弯曲刚度变小,承载能力显著降低。船舶运营中常见裂纹损伤如图9所示。由于裂纹种类多



图8 箱型梁模型试验工装

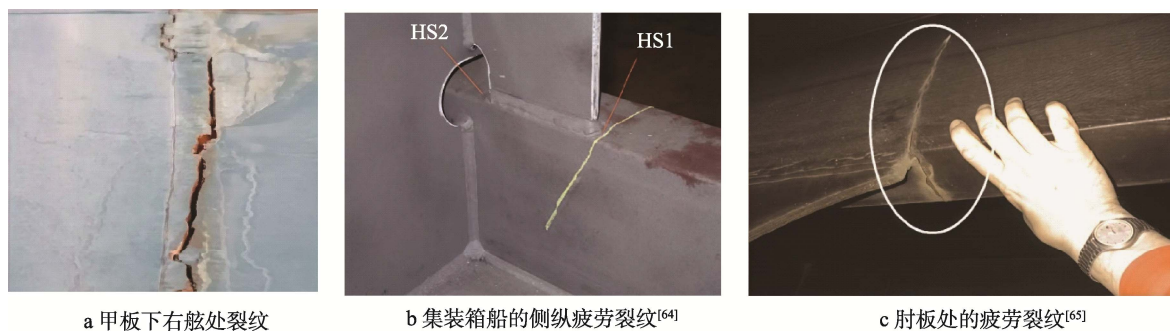
Fig.8 Test fixture diagrams of box girder models: a) stiffened box girder^[61]; b) large opening box girder^[62]

图9 船舶常见裂纹形式

Fig.9 Common crack forms of ships: a) below deck starboard crack; b) side longitudinal fatigue crack^[64]; c) fatigue crack at bracket^[65]

样、分布复杂,在真实结构中更是由多种裂纹组合而成。在进行含裂纹船舶结构强度分析之前,需要对裂纹形式进行合理的假定,以简化分析。工程实际中,认为贯穿、张开型裂纹带来的危害极为严重。因此,在单调加载过程中分析裂纹损伤影响时,通常假设裂纹贯穿板厚,在拉压载荷作用下裂纹不发生扩展和闭合现象。

由于裂纹破坏了结构的几何连续性,增加了其失效特性的求解难度。因此,含裂纹结构后屈曲与失效行为分析主要采用非线性有限元法。学者们针对含裂纹损伤船体结构的剩余极限强度分析已经开展了广泛的研究工作,并取得了大量研究成果。Xu等^[66]通过引入周期边界条件对轴压载荷下裂纹加筋板的承载能力进行了研究,考虑了结构的各向异性。Bayatfar等^[67]对轴向压缩载荷作用下带裂纹加筋板后屈曲性能进行了分析,发现当裂纹处于屈曲波峰、波谷处时,对结构承载的影响较为明显。Ao等^[68-71]对损伤加筋板和箱型梁结构的屈曲和失效特性进行了研究,分析了裂纹及加强筋刚度等对其承载能力的影响。Xia等^[72]、Yu等^[73]、Li等^[74]、Feng等^[75]运用有限元法分析了裂

纹长度、位置和角度等对加筋板承载能力的影响。Shi等^[76]对轴压作用下含裂纹加筋板承载性能进行了研究,并率先对裂纹扩展进行了判定。他们通过裂纹尖端应力强度因子对比发现,轴压下裂纹在结构崩溃失效前不会发生扩展。

上述研究都是针对单调载荷下含裂纹船体结构的剩余极限强度进行的,研究发现,裂纹长度、倾角、位置等表征参数对船体结构剩余强度具有重要影响。当裂纹出现在甲板、底板等不易被发现的内封闭区域时,损伤很难被及时检测出来。在复杂海况持续交变载荷的作用下,初始损伤形式很容易进一步演化,大大降低结构的刚度和剩余承载能力,甚至带来灾难性的事故。因此,不少研究人员逐渐开始重视含裂纹损伤船体结构在循环载荷作用下的剩余强度,并考虑裂纹在循环累积塑性变形后的动态变化影响。马丽等^[77]从不同循环载荷水平及裂纹分布位置等角度,分析了循环拉伸压缩载荷对单边和双边裂纹板极限承载能力的影响,结果表明,循环次数增多时,单边裂纹扩展更快,导致承载力下降更明显。Xia等^[78-79]、Hu等^[80]分析了低周疲劳工况下,裂纹损伤对船体板剩余

极限强度的影响。他们将确定的断裂应变值作为裂纹扩展的判据,并采用生死单元法模拟了裂纹扩展。李闯等^[81-82]研究了裂纹损伤对板和加筋板结构强度的影响,重点对裂纹长度、分布和板厚等因素的作用进行了分析。田兆哲^[83]探讨了循环压缩载荷条件下,裂纹特征参数及残余应力对含裂纹加筋板的极限承载能力的影响。他们发现,累积塑性应变的大小决定了加筋板极限强度的下降程度。冯帆^[84]、胡康等^[85]分析了裂纹对循环载荷作用下箱型梁剩余极限强度的影响,研究发现,箱型梁极限强度的降低是疲劳裂纹损伤与递

进累积塑性损伤的耦合作用所致。是否考虑裂纹扩展对含裂纹结构的失效机制具有显著影响。当不考虑裂纹扩展时,结构失效模式主要表现为局部屈曲变形,随着循环次数的增加,其极限强度的下降趋于平缓;考虑裂纹扩展后,裂纹尖端的应力集中会促使裂纹长度不断增加,并加剧局部应力集中,此时结构的剩余强度会随着循环次数增加而加速下降,如图10~12所示。

值得注意的是,裂纹在循环压缩载荷作用下的扩展现象难以观测而无法准确描述。同时,裂纹面在压缩载荷的作用下累积塑性应变主要为压缩变形,会产

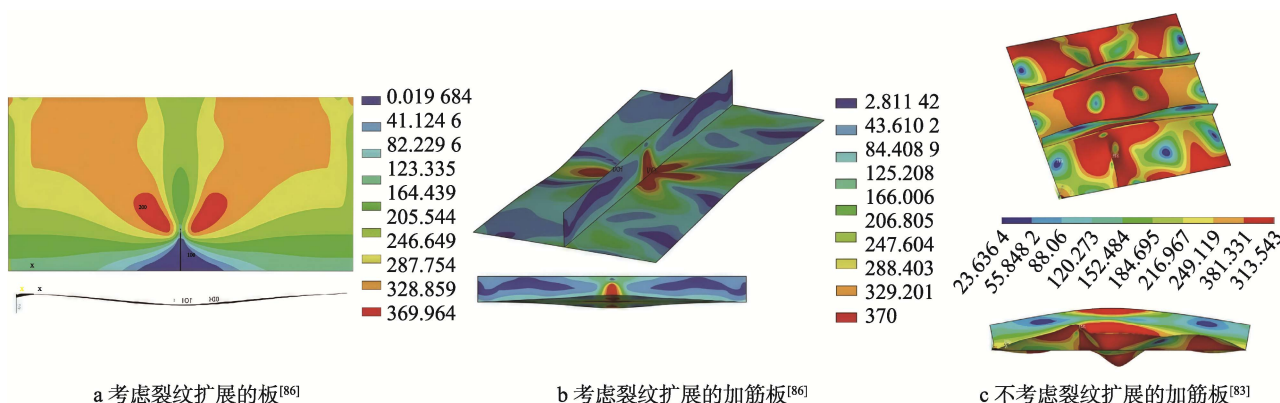


图10 含裂纹损伤板和加筋板在单向循环载荷下的失效模式

Fig.10 Failure modes of cracked damaged plate and stiffened plate under unidirectional cyclic loading: a) plate with crack propagation^[86]; b) stiffened plate with crack propagation^[86]; c) without crack propagation^[83]

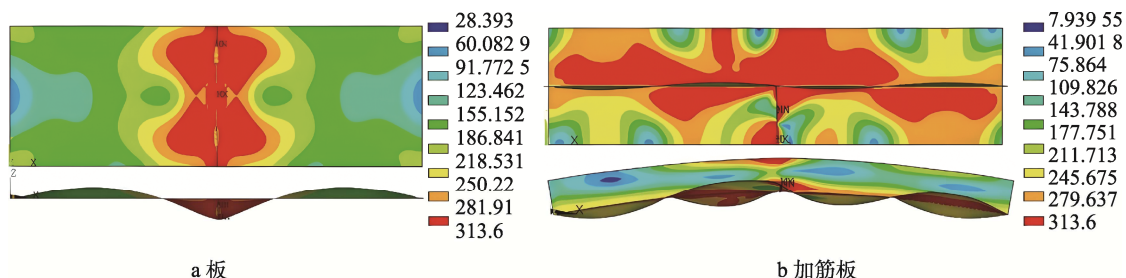


图11 含裂纹损伤板和加筋板在双向循环载荷下的失效模式^[82]

Fig.11 Failure modes of cracked damaged plate and stiffened plate under bidirectional cyclic loading^[82]: a) plate; b) stiffened plate

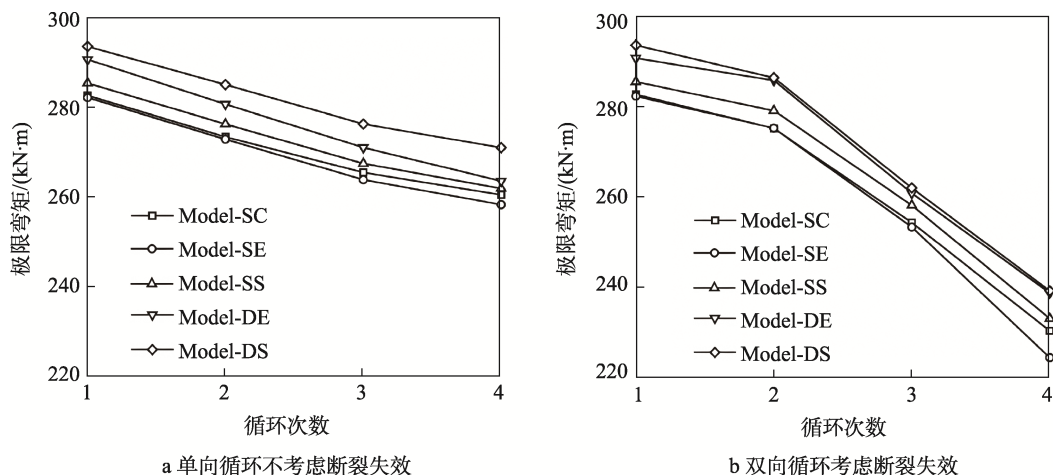


图12 极限弯矩-循环次数图^[85]

Fig.12 Limit bending moment-number of cycles^[85]: a) unidirectional cyclic without fracture failure; b) bidirectional cyclic with fracture failure

生裂纹闭合现象, 进一步增加了问题的复杂性。研究表明, 裂纹在单向循环压缩载荷作用下的扩展能力是有限而稳定的^[87]。因此, 单向循环压缩载荷作用下以拉伸临界断裂应变的方式考虑裂纹扩展得出的结果是偏小、偏保守的。

在开展含裂纹损伤结构的剩余强度试验研究时, 通常采用预置贯穿裂纹的方法引入初始损伤。目前, 针对循环载荷作用下含裂纹结构剩余强度的试验研究很少, 围绕裂纹在载荷循环过程中的扩展行为、非对称循环载荷下结构失效特性等尚需大量的试验数

据验证支撑, 而含裂纹损伤船体梁在循环载荷作用下的崩溃特性试验研究工作尚未开展。李闯^[82]、胡康等^[86]开展了含裂纹板和加筋板在轴向循环载荷下的极限承载力的试验研究, 如图 13 所示。通过数值与试验结果对比分析, 发现疲劳损伤因子、裂纹张开位移和挠度等因素均对结构的循环剩余强度有一定影响。Feng 等^[88]通过施加正弦循环载荷分析了裂纹在加筋板中的扩展行为, 试验结果表明, 带板上的裂纹扩展速率明显快于加筋腹板上的裂纹, 板与筋间的裂纹扩展具有高度相关性。



图 13 含裂纹船体板和加筋板试验工装^[82]

Fig.13 Test fixture diagrams of cracked hull plate and stiffened plate^[82]: a) hull plate; b) stiffened plate

5 结语

循环载荷作用下船体结构的极限强度, 作为确保船舶长期安全运营的关键要素之一, 正日益成为船舶工业界和学术界关注的焦点。目前, 虽然国内外学者已经对循环荷载下典型船体结构的承载特性开展了部分研究工作, 并取得了一定的成果, 但这些研究往往侧重于特定的船体结构类型或循环载荷条件, 缺乏系统性和全面性。此外, 由于船体结构的复杂性和多样性, 以及循环载荷的随机性和不确定性, 使得这一问题的研究难度极大, 尚未形成一套完整、统一的理论体系和评估方法。

船体结构在复杂交变载荷作用下的失效过程实际上是 1 个或多个载荷循环时的动态坍塌过程。随着循环次数的不断增多, 受压塑性变形会过度地持续累积, 结构逐渐难以承受这种过度的变形积累, 进而发生屈曲失效现象。循环载荷产生的交替变形时会不断累积损伤, 引起结构的疲劳断裂。因此, 仅通过单次静态载荷的结构强度分析可能会高估恶劣海况下船体结构的安全性能。在评估船舶结构的极限承载能力时, 考虑载荷的循环作用机制更为合理。本文以板格、加筋板、箱型梁等典型船体结构为研究对象, 从数值分析和试验研究 2 个方面分别对完整船体结构和含裂纹船体结构进行了综述, 总结了现有的循环载

荷分析手段, 并提出了以下几点未来的研究方向:

1) 双向及组合载荷循环作用下结构极限承载特性尚需进一步研究。在船舶的实际服役环境中, 船体结构往往不仅受到单向循环载荷的作用, 还可能遭受双向非对称循环载荷、多种载荷的联合作用等复杂情况。这些复杂循环荷载条件下的结构极限承载特性, 尚需进一步深入研究。目前, 虽然已有一些研究采用非线性有限元方法对板、加筋板、船体梁等进行数值分析, 但这些研究主要聚焦于单向循环载荷作用下的后极限强度行为。对于双向非对称循环载荷、联合载荷的耦合作用以及极限状态前卸载点对结构极限强度的影响等, 目前仍缺乏系统的研究。此外, 船体结构在循环载荷下可能产生的棘轮效应、递增塑性破坏与交变断裂的耦合失效机理等, 也是亟需开展大量研究工作的关键领域。这些研究不仅有助于更准确地评估船体结构在复杂载荷条件下的极限承载能力, 还能结构的安全设计和维护提供科学依据。

2) 循环载荷作用下含裂纹等损伤船体结构的失效机理亟需试验验证。为了深入了解和准确预报船体结构在循环载荷作用下的失效破坏模式, 试验方法具有不可替代的作用。然而, 现有的循环载荷下结构极限强度试验大多采用单向循环的方式, 并未充分考虑裂纹、腐蚀等损伤对结构极限强度的影响。实际上, 在交变循环载荷的作用下, 结构的塑性累积效应会加

速损伤的演化,从而增加船舶在运营中的风险系数。对于初始裂纹,循环载荷还可能引发裂纹的闭合效应及裂纹扩展现象。为了深入分析这些损伤在循环载荷下的演化机理,特别是非对称载荷作用下裂纹的变化规律,需要开展更为精细的试验研究。此外,对于复杂船体梁结构,采用翻转模型的方法可能引入二次变形,因此需要探索更加有效的手段来准确施加双向循环载荷,以分析其结构变形特性。这些试验验证工作将为船体结构设计提供更为可靠的数据支撑。

3) 不同材料类型结构在循环载荷作用下的变形和失效特性需要展开深入研究。随着船舶工业技术的发展,铝合金、复合材料等轻质材料在船体结构中的应用越来越广泛。这些材料在循环载荷作用下的变形和失效特性与传统的钢材存在较大差异,在循环载荷下会表现出更为显著的延展性和黏塑性特性,同时还可能受到温度等外界因素的影响。为了准确评估这些轻质材料在循环载荷作用下的变形失效特性,需要开展深入的研究工作。这些研究有助于揭示不同材料在循环载荷作用下的塑性累积特性及其与温度等外界因素的相互关系。通过对比不同材料在循环载荷作用下的性能表现,可以为船体结构的材料选择和结构设计提供更为合理的建议,从而确保船舶在复杂载荷条件下的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] STAVOVY A B. Ultimate Longitudinal Strength[J]. *Trans Rina*, 1965, 107: 411-430.
- [2] SUMI Y, FUJIKUBO M, FUJITA H, et al. Final Report of Committee on Large Container Ship Safety[R]. Japan: Committee on Large Container Ship Safety, 2015.
- [3] LEMAÎTRE J, CHABOCHE J L. *Mechanics of Solid Materials*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [4] LEE M G, BARLAT F. Modeling of Plastic Yielding, Anisotropic Flow, and the Bauschinger Effect[M]// *Comprehensive Materials Processing*. Amsterdam: Elsevier, 2014: 235-260.
- [5] 刘迪辉, 庄京彪, 李光耀. 金属薄板包辛格效应的试验研究[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(4): 542-546.
LIU D H, ZHUANG J B, LI G Y. Research on Bauschinger Effect of Sheet Metal by Experiments[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(4): 542-546.
- [6] 苟建军, 王森, 王健, 等. 基于 BP 神经网络的金属薄板包辛格效应预测[J]. *塑性工程学报*, 2022, 29(8): 152-157.
GOU J J, WANG S, WANG J, et al. Prediction of Bauschinger Effect for Metal Thin Sheet Based on BP Neural Network[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29(8): 152-157.
- [7] 赵新兵, 凌国平, 钱国栋. 材料的性能[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [8] KROLO P, GRANDIĆ D, SMOLČIĆ Ž. *Experimental and Numerical Study of Mild Steel Behaviour under Cyclic Loading with Variable Strain Ranges*[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016(1): 7863010.
- [9] 杨海庆, 张永生, 赵瑞兰. Q235 钢在循环载荷下刚度变化与应变率的相关性研究[J]. *江西建材*, 2019(6): 21-22.
YANG H Q, ZHANG Y S, ZHAO R L. Study on the Correlation between Rigidity Change and Strain Rate of Q235 Steel under Cyclic Load[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2019(6): 21-22.
- [10] XIE X F, JIANG W C, CHEN J K, et al. Cyclic Hardening/Softening Behavior of 316L Stainless Steel at Elevated Temperature Including Strain-Rate and Strain-Range Dependence: Experimental and Damage-Coupled Constitutive Modeling[J]. *International Journal of Plasticity*, 2019, 114: 196-214.
- [11] WANG C, FAN J S, XU L Y, et al. Cyclic Hardening and Softening Behavior of the Low Yield Point Steel: Implementation and Validation[J]. *Engineering Structures*, 2020, 210: 110220.
- [12] GUO Y B, HO H C, CHUNG K F, et al. Cyclic Deformation Characteristics of S355 and S690 Steels under Different Loading Protocols[J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111093.
- [13] SUN Y, SHEN S L, XIA X H, et al. A Numerical Approach for Predicting Shakedown Limit in Ratcheting Behavior of Materials[J]. *Materials & Design*, 2013, 47: 106-114.
- [14] CHABOCHE J L, NOUAILHAS D. Constitutive Modeling of Ratchetting Effects: Part I: Experimental Facts and Properties of the Classical Models[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1989, 111(4): 384-392.
- [15] 杨显杰, 高庆, 蔡力勋, 等. 316L 不锈钢的单轴棘轮效应[J]. *航空学报*, 1997, 18(4): 395-400.
YANG X J, GAO Q, CAI L X, et al. On the Ratchetting Effects of 316L Stainless Steel under Uniaxial Loading[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(4): 395-400.
- [16] PAUL S K, SIVAPRASAD S, DHAR S, et al. Cyclic Plastic Deformation and Damage in 304LN Stainless Steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(15): 4873-4882.
- [17] WU B L, SONG L H, DUAN G S, et al. Effect of Cyclic Frequency on Uniaxial Ratcheting Behavior of a Textured AZ31B Magnesium Alloy under Stress Control[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 795: 139675.
- [18] 谢东洋, 陈爱军, 董亚伟. 6061 铝合金室温与 150 ℃ 单轴棘轮行为实验研究[J]. *机械工程师*, 2020(7): 8-12.
XIE D Y, CHEN A J, DONG Y W. Experimental Study on Uniaxial Ratchetting Behavior of 6061 Aluminum Alloy

- at Room Temperature and 150 °C[J]. *Mechanical Engineer*, 2020(7): 8-12.
- [19] 成磊, 肖毅, 王杰, 等. 一种预测复合材料棘轮行为的循环塑性-损伤模型[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10): 3338-3350.
- CHENG L, XIAO Y, WANG J, et al. A Cyclic Plasticity-Damage Model for Predicting Ratcheting Behavior of Composite Materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(10): 3338-3350.
- [20] PRAGER W. A New Method of Analyzing Stresses and Strains in Work-Hardening Plastic Solids[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1956, 23(4): 493-496.
- [21] BESSELING J F. A Theory of Elastic, Plastic, and Creep Deformations of an Initially Isotropic Material Showing Anisotropic Strain-Hardening, Creep Recovery, and Secondary Creep[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1958, 25(4): 529-536.
- [22] FREDERICK C O, ARMSTRONG P J. A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect[J]. *Materials at High Temperatures*, 2007, 24(1): 1-26.
- [23] CHABOCHE J L, VAN K D, CORDIER G. Modelization of the Strain Memory Effect on the Cyclic Hardening of 316 Stainless Steel[R]. Berlin: IASMiRT, 1979.
- [24] FUKUMOTO Y, KUSAMA H. Cyclic Behaviour of Plates under In-Plane Loading[J]. *Engineering Structures*, 1985, 7(1): 56-63.
- [25] YAO T, NIKOLOV P I. Buckling/Plastic Collapse of Plates under Cyclic Loading[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1990, 190(168): 449-462.
- [26] 黄震球. 循环压缩-拉伸载荷下矩形板的极限强度[J]. *华中理工大学学报*, 1994, 22(4): 36-41.
- HUANG Z Q. Ultimate Strength of a Rectangular Plate under Cyclic Compressive and Tensile Loads[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 1994, 22(4): 36-41.
- [27] 黄震球, 陈齐树, 骆子夜, 等. 循环面内压缩载荷下方板的非弹性变形性能[J]. *华中理工大学学报*, 1996, 24(3): 39-42.
- HUANG Z Q, CHEN Q S, LUO Z Y, et al. The Inelastic Deformation Behavior of a Square Plate under Cyclic In-Plane Compressive Loading[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 1996, 24(3): 39-42.
- [28] 单成巍. 循环载荷作用下船体结构的极限强度非线性有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- SHAN C W. Nonlinear Finite Element Analysis for the Ultimate Strength of Ship Structures under Cyclic Loading[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [29] 陈晓静. 循环载荷作用下加筋板的极限强度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- CHEN X J. Research on Ultimate Strength of Stiffened Panels under Cyclic Loading[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [30] 汪丹, 杨平, 邓军林, 等. 加筋板低周疲劳寿命和累积塑性应变模型[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(6): 39-44.
- WANG D, YANG P, DENG J L, et al. The Low-Cycle Fatigue Life Model and the Accumulative Plastic Strain Model for Stiffened Plates under Cyclic Loading[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(6): 39-44.
- [31] 董琴, 杨平, 邓军林, 等. 循环载荷下考虑累积塑性影响的船体板 CTOD 理论及数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2015, 19(12): 1507-1516.
- DONG Q, YANG P, DENG J L, et al. Theoretical and Numerical Research on CTOD for Ship Plate under Cyclic Loading Considering Accumulative Plastic Strain[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(12): 1507-1516.
- [32] 崔虎威, 杨平. 面内循环压缩载荷下船体平板的剩余极限强度[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 108-112.
- CUI H W, YANG P. Residual Ultimate Strength of Ship Plates under Cyclic In-Plane Compressive Loading[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(4): 108-112.
- [33] CUI H W, YANG P. Ultimate Strength of Hull Plates under Monotonic and Cyclic Uniaxial Compression[J]. *Journal of Ship Research*, 2018, 62(3): 156-165.
- [34] CUI H W, YANG P. Ultimate Strength Assessment of Hull Girder under Cyclic Bending Based on Smith's Method[J]. *Journal of Ship Research*, 2018, 62(2): 77-88.
- [35] 崔虎威, 陈泽民, 丁启印. 循环载荷下基于弹性安定临界状态的船体板极限强度研究[J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(5): 150-156.
- CUI H W, CHEN Z M, DING Q Y. Numerical Simulation of Ultimate Strength of Hull Plate Based on Critical State of Elastic Shakedown under Cyclic Loading[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(5): 150-156.
- [36] 吴选福. 循环载荷下考虑累积塑性破坏的加筋板极限强度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- WU X F. Ultimate Strength of Stiffened Plates Considering Cumulative Plastic Failure under Cyclic Loadings[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [37] LI D Y, CHEN Z, CHEN X C. Numerical Investigation on the Ultimate Strength Behaviour and Assessment of Continuous Hull Plate under Combined Biaxial Cyclic Loads and Lateral Pressure[J]. *Marine Structures*, 2023, 89: 103408.
- [38] 方文武. 循环载荷下船体结构塑性累积与断裂特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- FANG W W. Research on Plastic Accumulation and Fracture Characteristics of Hull Structures under Cyclic Loading[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [39] 吴剑国, 余明辉, 许俊, 等. 循环载荷作用下加筋板格极限强度的理论解[J]. *浙江工业大学学报*, 2018, 46(3): 350-354.
- WU J G, YU M H, XU J, et al. Theoretical Solution for the Ultimate Strength of Stiffened Panels under Cyclic Loads[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*,

- 2018, 46(3): 350-354.
- [40] 贺幸. 循环载荷下铝质船舶加筋板极限强度影响因素研究[J]. 中国水运, 2015(1): 62-65.
- HE X. Research on the Influencing Factors of Ultimate Strength of Aluminum Ship Reinforced Plates under Cyclic Loading[J]. China Water Transport, 2015(1): 62-65.
- [41] 崔虎威, 丁启印. 轴向循环载荷下加筋板极限承载性能分析[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 204-211.
- CUI H W, DING Q Y. Analysis of Ultimate Load-Bearing Behavior of Stiffened Plate under Axial Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 204-211.
- [42] 丁启印. 循环载荷下基于弹性安定状态的船体结构极限强度研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- DING Q Y. Research on the Ultimate Strength of Hull Structures Based on Elastic Shakedown State under Cyclic Loading[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [43] 张旭辉. 极端循环载荷作用下船体结构极限强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- ZHANG X H. Study on Ultimate Strength of Ship Structure under Extreme Cyclic Loading[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [44] LI S, HU Z Q, BENSON S. An Analytical Method to Predict the Buckling and Collapse Behaviour of Plates and Stiffened Panels under Cyclic Loading[J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109627.
- [45] 刘葳, 蔡庆港, 金腾龙, 等. 极端循环载荷下加筋板失效机理与极限强度[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(8): 1275-1282.
- LIU W, CAI Q G, JIN T L, et al. Failure Mechanism and Ultimate Strength of Stiffened Plates under Extreme Cyclic Load[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(8): 1275-1282.
- [46] CLASS N K. Investigation Report on Structural Safety of Large Container Ships[R]. Japan: Nippon Kaiji Kyokai, 2014.
- [47] IJIMA K, FUJIKUBO M. Cumulative Collapse of a Ship Hull Girder under a Series of Extreme Wave Loads[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(3): 530-541.
- [48] ZHANG X M, PAIK J K, JONES N. A New Method for Assessing the Shakedown Limit State Associated with the Breakage of a Ship's Hull Girder[J]. Ships and Offshore Structures, 2016, 11(1): 92-104.
- [49] KAMINSKI M, RIGO P. ISSC 2003 Congress Program[C]// ISSC 2003: 15th International Ship and Offshore Structures Congress. Amsterdam: Elsevier, 2003.
- [50] 任慧龙, 李陈峰. 基于递增塑性破坏的船体极限强度分析研究[C]// 2007年船舶力学学术会议暨《船舶力学》创刊十周年纪念学术会议论文集. 哈尔滨: 中国造船工程学会船舶力学学术委员会, 2007.
- REN H L, LI C F. Research on the Ultimate Strength Analysis of Ship Hull Based on Incremental Plastic Failure[C]// Proceedings of the 2007 Academic Conference on Ship Mechanics and the 10th Anniversary of the Founding of "Ship Mechanics" Journal. Harbin: The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineer, 2007.
- [51] 喻霁, 杨平. 船体梁在循环载荷下的极限强度研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(7): 44-48.
- YU J, YANG P. Research on the Ultimate Strength of Hull Girder under Cyclic Bending Loads[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(7): 44-48.
- [52] 崔虎威. 循环载荷下考虑累积塑性破坏的船体结构极限强度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- CUI H W. Research on Ultimate Strength of Ship Hull Structure Considering Accumulated Plastic Collapse under Cyclic Loading[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [53] HU K, YANG P, XIA T, et al. Ultimate Strength Assessment of Cracked Stiffened Box Girders Subjected to Extreme Cyclic Bending Moments[J]. Ocean Engineering, 2022, 256: 111496.
- [54] LIU B, GUEDES SOARES C. Ultimate Strength Assessment of Ship Hull Structures Subjected to Cyclic Bending Moments[J]. Ocean Engineering, 2020, 215: 107685.
- [55] LI S, HU Z Q, BENSON S. Progressive Collapse Analysis of Ship Hull Girders Subjected to Extreme Cyclic Bending[J]. Marine Structures, 2020, 73: 102803.
- [56] FUKUMOTO Y, KUSAMA H. Local Instability Tests of Plate Elements under Cyclic Uniaxial Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(5): 1051-1067.
- [57] YANG P, CUI H W, DAI Y Z, et al. Experimental and Numerical Investigations on Ultimate Strength of Ship Plates under Longitudinal Cyclic Loads[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(9): 1100-1108.
- [58] CHEN X P, YUE J X, SONG Z J, et al. Study on Ultimate Strength for Stiffened Plates with Elasto-Plastic Damages[J]. Ocean Engineering, 2023, 279: 114531.
- [59] 傅珂琪, 邹路遥, 叶帆, 等. 循环载荷下扶强材的极限强度试验研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(10): 31-34.
- FU H Q, ZOU L Y, YE F, et al. Experimental Study on Ultimate Strength of Stiffeners under Cyclic Loading[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(10): 31-34.
- [60] AKHRAS G, GIBSON S, YANG S, et al. Ultimate Strength of a Box Girder Simulating the Hull of a Ship[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1998, 25(5): 829-843.
- [61] 崔虎威, 杨平, 周杨, 等. 循环载荷下箱型梁极限强度性能实验研究[J]. 船舶力学, 2018, 22(5): 595-602.
- CUI H W, YANG P, ZHOU Y, et al. Experimental Research on the Ultimate Strength Behavior of Box-Girders under Cyclic Bending[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(5): 595-602.
- [62] 邓卉, 甘进, 张正, 等. 循环载荷下大开口箱型梁弯曲极限强度试验研究[J]. 中国造船, 2023, 64(3): 1-12.

- DENG H, GAN J, ZHANG Z, et al. Experimental Study on Bending Ultimate Strength of Box Girder with Large Deck Opening under Cyclic Loading[J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(3): 1-12.
- [63] 杨万宇. 船舶航行事故统计与分析[J]. *中国水运*, 2021(9): 28-30.
- YANG W Y. Statistics and Analysis of Ship Navigation Accidents[J]. *China Water Transport*, 2021(9): 28-30.
- [64] FRICKE W, PAETZOLD H, RÖRUP J. Fatigue Strength of Stiffener End Connections: A Comparative Study of Bulb Flats and Angle Bars[C]// *Proceedings of the 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures PRADS 2010. Brazil: Coordination of Graduate Programs in Engineering of the Federal University of Rio de Janeiro*, 2010.
- [65] STORHAUG G. Experimental Investigation of Wave Induced Vibrations and Their Effect on the Fatigue Loading of Ships[D]. *Trondheim: Norwegian University of Science and Technology*, 2007.
- [66] XU M C, GARBATOV Y, GUEDES SOARES C. Residual Ultimate Strength Assessment of Stiffened Panels with Locked Cracks[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 85: 398-410.
- [67] BAYATFAR A, KHEDMATI M R, RIGO P. Residual Ultimate Strength of Cracked Steel Unstiffened and Stiffened Plates under Longitudinal Compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 84: 378-392.
- [68] AO L, WANG D Y. Ultimate Strength of Box Girders with Incline Cracks[C]// *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. United States: American Society of Mechanical Engineers*, 2015.
- [69] AO L, WANG D Y. Residual Torsional Strength of Cracked Stiffened Girders with a Large Deck Opening[C]// *ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. United States: American Society of Mechanical Engineers*, 2016.
- [70] AO L, WANG D Y. Ultimate Torsional Strength of Cracked Stiffened Box Girders with a Large Deck Opening[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2016, 8(4): 360-374.
- [71] AO L, WU H, WANG D Y, et al. Evaluation on the Residual Ultimate Strength of Stiffened Plates with Central Dent under Longitudinal Thrust[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 202: 107167.
- [72] XIA T, YANG P, HU K, et al. Combined Effect of Imperfections on Ultimate Strength of Cracked Plates under Uniaxial Compression[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 150: 113-123.
- [73] YU C L, CHEN Y T, YANG S, et al. Ultimate Strength Characteristic and Assessment of Cracked Stiffened Panel under Uniaxial Compression[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 152: 6-16.
- [74] LI D Y, FENG L, XIAO W. A Study on Residual Ultimate Strength of Steel Unstiffened Plate with a Crack[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 103: 102336.
- [75] FENG L, LI D Y, SHI H D, et al. A Study on the Ultimate Strength of Ship Plate with Coupled Corrosion and Crack Damage[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 200: 106950.
- [76] SHI X H, ZHANG J, GUEDES SOARES C. Numerical Assessment of Experiments on the Residual Ultimate Strength of Stiffened Plates with a Crack[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 171: 443-457.
- [77] 马丽, 杨平, 李闯, 等. 循环载荷下裂纹板的极限承载力研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2019, 43(5): 893-897.
- MA L, YANG P, LI C, et al. Study on Ultimate Bearing Capacity of Cracked Plates under Cyclic Loading[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2019, 43(5): 893-897.
- [78] XIA T, YANG P, LI C, et al. Numerical Research on Residual Ultimate Strength of Ship Hull Plates under Uniaxial Cyclic Loads[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 172: 385-395.
- [79] XIA T, YANG P, SONG Y L, et al. Ultimate Strength and Post Ultimate Strength Behaviors of Hull Plates under Extreme Longitudinal Cyclic Load[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 193: 106589.
- [80] HU K, YANG P, XIA T, et al. Numerical Investigation on the Residual Ultimate Strength of Cracked Stiffened Plates under Extreme Cyclic Loads[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 244: 110426.
- [81] 李闯, 杨平, 夏添, 等. 循环压缩载荷下裂纹板的承载力性能[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2017, 41(5): 806-810.
- LI C, YANG P, XIA T, et al. Bearing Capacity Behavior of Cracked Plates under Cyclic Compressive Loading[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2017, 41(5): 806-810.
- [82] 李闯. 循环载荷下含裂纹损伤船舶结构的承载力研究[D]. *武汉: 武汉理工大学*, 2018.
- LI C. Research on Bearing Capacity of Ship Structure with Cracking Defects under Cyclic Loads[D]. *Wuhan: Wuhan University of Technology*, 2018.
- [83] 田兆哲. 循环载荷下含裂纹缺陷的船体结构极限承载力研究[D]. *武汉: 武汉理工大学*, 2020.
- TIAN Z Z. Research on Ultimate Bearing Capacity of Ship Structures with Cracking Defects under Cyclic Loads[D]. *Wuhan: Wuhan University of Technology*, 2020.
- [84] 冯帆. 循环载荷下含裂纹船舶结构的剩余极限强度研究[D]. *武汉: 武汉理工大学*, 2020.
- FENG F. Study on Residual Ultimate Strength of Cracked Ship Structures under Cyclic Loading[D]. *Wuhan: Wuhan University of Technology*, 2020.
- [85] 胡康, 杨平, 刘清超. 极端循环载荷下船体裂纹箱型梁的极限强度[J]. *海洋工程*, 2023, 41(3): 85-95.
- HU K, YANG P, LIU Q C. Ultimate Strength of Cracked

- Box Girders under Extreme Cyclic Loads[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(3): 85-95.
- [86] 胡康, 杨平, 夏添, 等. 轴向循环载荷下裂纹板和加筋板极限强度[J]. 船舶工程, 2022, 44(3): 40-47.
- HU K, YANG P, XIA T, et al. Ultimate Strength of Cracked Plates and Stiffened Plates under Axial Cyclic Loads[J]. Ship Engineering, 2022, 44(3): 40-47.
- [87] 耿小亮, 张克实, 郭运强. 循环压缩应力作用下的疲劳裂纹扩展机制研究[J]. 机械强度, 2004, 26(2): 227-230.
- GENG X L, ZHANG K S, GUO Y Q. Crack Propagation Mechanism under far Field Cyclic Compression[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(2): 227-230.
- [88] FENG G Q, WANG Y T, GARBATOV Y, et al. Experimental and Numerical Analysis of Crack Growth in Stiffened Panels[J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 16(9): 980-992.