

文章编号: 1007-7294(2025)12-1919-11

循环载荷下箱型梁考虑塑性累积特性的极限强度

潘 晋^{1,2}, 张得功², 宋召军^{1,2}, 许仁杰³

(1. 高性能船舶技术教育部重点实验室(武汉理工大学), 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 3. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘要: 为探究箱型梁在循环中垂和中拱载荷作用下的累积塑性递增特征, 研究箱型梁在递增塑性破坏下的极限强度衰减规律, 本文在可替换试样极限弯矩试验设计基础上, 创新性地设计了一种不间断循环弯矩加载的极限弯矩试验装置, 开展了多种工况下的箱型梁四点弯曲极限强度试验。结合数值仿真, 分析了循环载荷作用下箱型梁的累积塑性临界点、塑性累积变形以及中性轴高度变化的特征, 研究了恒幅或变幅的转角载荷对箱型梁极限强度衰减的影响, 从而确定了遭遇随机极端波浪载荷的船舶极限承载能力评估范围, 以确保船舶在恶劣海况下航行的安全性与可靠性。

关键词: 箱型梁; 极限强度; 累积塑性; 模型试验

中图分类号: U668.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.12.009

Ultimate strength of box girder considering plastic accumulation characteristics under cyclic loading

PAN Jin^{1,2}, ZHANG De-gong², SONG Zhao-jun^{1,2}, XU Ren-jie³

(1. Key Laboratory of High Performance Ship Technology (Wuhan University of Technology), Ministry of Education, Wuhan 430063, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: In order to explore the plastic accumulation characteristics of box girders under cyclic hogging and sagging bending moment loads and to study the attenuation law of ultimate strength of box girders based on incremental plastic failure, this paper creatively designed a test device for continuous cyclic bending moment loading, and carried out a series of four-point bending ultimate strength tests on box girders under different loading conditions based on replaceable box girder specimen. Combined with numerical simulation, this study analyzed the variation characteristics of cumulative plasticity critical point, cumulative plastic deformation and neutral axis height of box girders under cyclic loading, and then the influence of constant and variable amplitudes of rotation angle loads on the ultimate strength attenuation of box girders was evaluated. After these investigations, the fluctuating range for the ultimate bearing capacity of ships encountering random extreme waves bending loads was determined to ensure the safety and reliability of ships sailing in severe sea conditions.

Key words: box girder; ultimate strength; plastic accumulation; model test

收稿日期: 2025-05-23

作者简介: 潘 晋 (1978-), 女, 博士, 副教授;

宋召军 (1986-), 男, 博士, 副研究员, 通讯作者, E-mail: szj21950@163.com。

0 引言

随着船舶向大型化、高速化、轻量化方向发展,船舶结构安全问题日益突出,而船舶总纵强度是船舶安全性和结构安全性的基础指标。因此,为确保船舶结构安全,需准确评估船体梁总纵极限强度。当前国际船级社协会共同规范(IACS HCSR)中,对船体梁极限强度评估采用的是一次性极值压溃方法^[1],实际上,船体梁在经历多次极端循环载荷作用后可能产生累积塑性变形,导致极限承载力不足进而发生崩溃破坏。与一次性压溃评估方法相比,考虑船舶在循环波浪载荷作用下产生累积塑性变形,并以此评估船体梁极限强度,可能更为合理。目前,一次性极值压溃的评估方法已较为成熟,但其评估结果可能超过恶劣海况下航行船舶的实际总纵极限强度而偏于危险。因此,当前有必要开展循环载荷下考虑塑性累积影响的船体梁极限强度研究。

在极限强度评估方法中,试验法可直观反映船体结构的力学响应特性,包括外载荷作用下从局部屈曲到整体崩溃的渐进破坏过程。对于单次加载下的极限弯矩试验,许多学者开展了相关研究,其中,王佳颖等^[2]开展了甲板设置纵向箱型梁形式的舱段中垂极限强度试验;Garbatov等^[3]开展了考虑海水腐蚀的箱型梁中垂极限强度试验;王崇磊^[4]为研究超大型集装箱船(ULCS)的总纵弯曲极限强度特性,开展了ULCS中拱极限强度模型试验;Xu等^[5]通过试验研究了浅吃水的内陆200 TEU集装箱双体船在中垂极限状态下的破坏模式;Shi等^[6]通过箱型梁模型试验研究了大型上层结构对游轮总纵强度的影响。然而,单次加载下极限强度试验可能高估恶劣海况航行的船舶实际极限强度,因此有必要开展循环加载下的极限强度试验。Fukumoto等^[7]开展了循环弯曲载荷作用下的薄壁箱型梁模型试验,但其试验模型未考虑加强筋的影响;黄震球等^[8]开展了循环弯矩作用下箱型梁极限强度试验研究;Deng等^[9]开展了循环载荷下大开口箱型梁弯曲极限强度试验。然而上述两种加载所施加的载荷均为单向的多次加载,并不是中垂和中拱连续加载。崔虎威^[10]开展了极端循环载荷作用下系列箱型梁的极限承载性能试验,实施了双向循环加载,但加载过程中需不断翻转试验模型以模拟中垂和中拱状态,无法保证加载的连续性。

本文通过创新性的极限强度试验装置设计,并选择合理的载荷幅值,实现了对箱型梁模型中垂和中拱的连续加载。同时,结合有限元仿真方法,阐述了恶劣海况下箱型梁遭受极端循环载荷加载的累积塑性递增特征,并探究了考虑累积塑性破坏的箱型梁极限强度变化规律,从而更准确地评估极端循环载荷下船体结构的极限承载能力。

1 箱型梁循环加载试验设计

1.1 可替换循环弯矩试验试样设计

箱型梁极限弯矩试验基于三点弯曲或四点弯曲试验原理,将试样分为试验段和支撑结构的延长段。试验段与延长段的连接方式分为一体式与分体式设计。如图1(a)所示为一体式的设计,其思路为试验段与延长段采用相同的材料与剖面结构形式,两者连为一体,其优点在于可实现全跨长的弯矩连续性,试验段与延长段交界处结构连续无应力集中,从而避免试验段端部结构产生屈曲或屈服破坏,使屈曲变形尽可能集中在跨中横剖面附近,以达到预期试验目的。然而,这种方法不能重复使用延长段,且加工时间长、试验成本高^[10]。如图1(b)所示为分体式的设计,其思路为试验段与延长段分别进行设计与加工,并通过螺栓连接试验段与延长段的端面横隔板,以实现弯曲过程中两者的载荷传递。试验段与延长段的材料与横剖面结构形式可根据试验需要选择是否相同。分体式设计的优点在于试验段可卸下替换,且延长段可重复利用从而缩短试验周期,并降低成本。然而,这种分体设计其试验段端部结构不连续引起的应力集中,增加了试验段屈曲发生位置的不确定性,有可能出现端部边缘先于跨中发生屈曲变形。

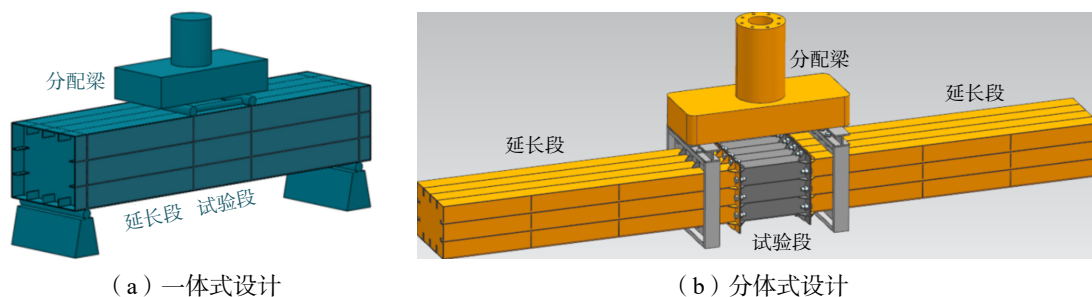


图 1 极限弯矩试验设计方法

Fig.1 Different structures designed for ultimate bending moment test

本文采用的试验工装与模型装配细节如图 2 所示,其中延长段需具备足够的弯曲强度和刚度,以确保在极限弯矩试验中不先于试验段发生屈曲。延长段与试验段各设置足够厚度的端面横隔板,并通过高强度螺栓固定。同时在相邻螺孔间焊接三角形肘板,以减少横隔板变形,从而将延长段的弯矩载荷均匀施加到试验段试样中,并假定试验段两侧端面为刚性面。

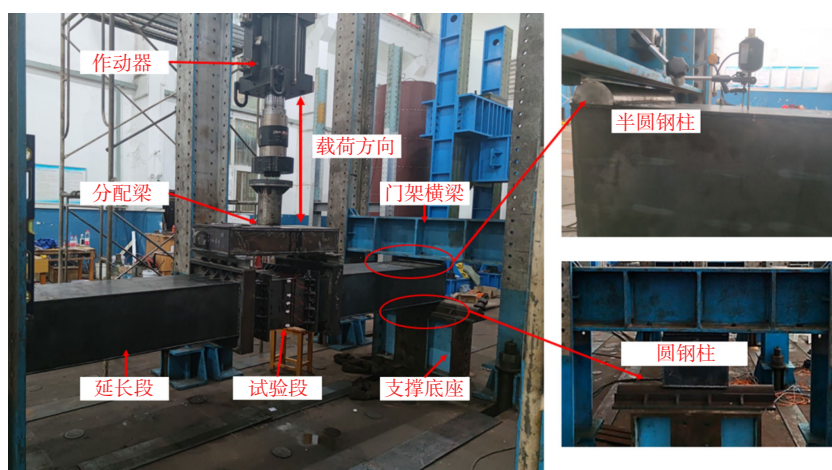


图 2 箱型梁试验装配图

Fig.2 Experimental assembly of box girder

1.2 不间断循环弯矩加载试验装置设计

目前,循环载荷作用下的箱型梁极限强度试验均采用单向循环加载,仅能模拟连续的中垂或中拱弯曲的影响^[7-9]。双向循环加载试验中需不断翻转试验模型,难以保证加载的连续性,且增加了试验难度与风险^[10]。如图 2 和图 3 所示,本文通过合理的工装设计,开发了一套不间断循环弯矩加载装置,该装置不仅实现了试验段的可更换性,还保证了中垂和中拱加载的连续性。

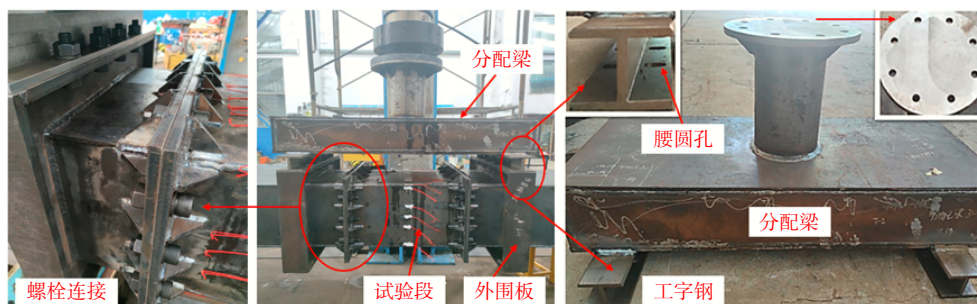


图 3 工装与模型装配图

Fig.3 Fixture and specimen assembling

不间断循环弯矩加载试验的主要工装包括作动器接头、纵向分配梁、定制工字钢与外围板。作动器接头为作动器与分配梁的连接工装,用于将作动器的轴向拉压运动传递给分配梁;分配梁是实现中垂和中拱循环加载的关键构件,用于将作动器的拉压载荷近似均匀分配到延长段上,从而在试验段形成纯弯曲加载载荷;工字钢上端面板与分配梁焊接,下端面板开腰圆孔,并与外围板外缘面板通过螺栓连接。该螺栓可在腰圆孔长度范围内滑移,从而实现箱型梁弯曲变形中甲板端部拉压位移自由运动,以实现试验段纯中垂和中拱弯矩加载。外围板内缘与延长段焊接,外缘面板也开腰圆孔,以增大箱型梁中垂和中拱弯曲转角载荷的幅值。同时,在延长段两侧通过横梁与底座限制其竖向运动,并通过与半圆柱梁接触实现端部的简支边界条件。通过上述工装设计,作动器的连续轴向拉压载荷通过分配梁传递给工字钢,并引起延长段的连续竖向上下运动。螺栓应处于拧紧且无滑移状态。若预加载中出现螺栓松动,可将螺栓与工装点焊固定,以确保载荷在拉伸与压缩状态转换时的顺利传递。此时,通过螺栓预紧力,可实现试验段在较小误差范围内的中垂和中拱弯矩连续加载。

2 循环载荷下箱型梁极限强度试验

2.1 模型与工况

试验中设计了4个具有相同横剖面的加筋箱型梁模型,其横截面形式及相关尺寸如图4所示。箱型梁模型长度为480 mm,横截面主尺度为480 mm×360 mm,板厚均为4 mm,板格长宽比为4:1,T型材加强筋尺寸为50 mm×20 mm×4 mm。试验模型采用EH36钢制成,通过材料标准拉伸试验测得的材料属性如图5所示:弹性模量为 2.15×10^5 MPa,屈服强度为368 MPa,抗拉强度为556 MPa。

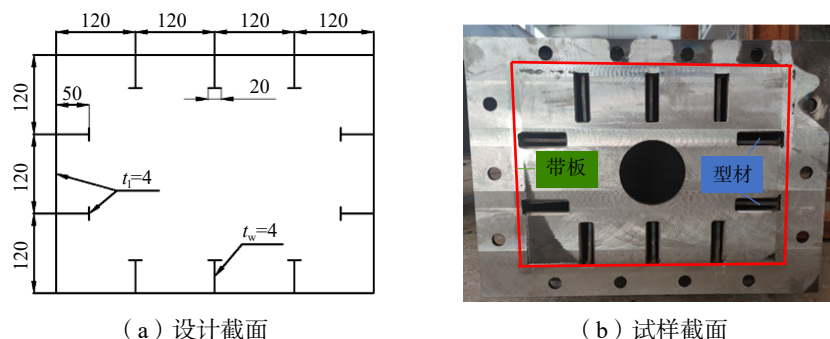


图4 加筋箱型梁截面形式

Fig.4 Section form of stiffened box girder

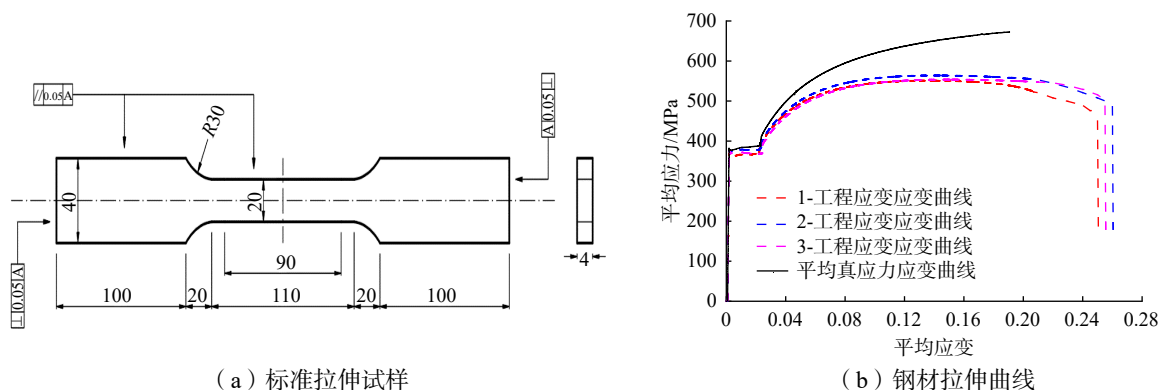


图5 钢材材料力学属性

Fig.5 Mechanical properties of steel

极限强度试验通常采用载荷和位移控制方式加载。刚度变化小时可采用载荷加载,而刚度变化大时则采用位移加载。在船体结构屈曲之前,两种方式均可使用,然而,屈曲崩溃后船体结构承载能力快

速下降且位移急剧增加,可能导致设备发生故障或损坏。因此,为了避免切换加载控制方式的影响,试验全过程均采用位移控制开展箱型梁极限强度试验。当循环弯矩载荷的曲率幅值接近或超过船体梁极限崩溃曲率时,载荷幅值越大,极限强度随循环次数增加的衰减越明显^[10]。如表 1 所示,极限强度工况中共设计了 3 种试验工况,其余工况通过有限元法进行计算分析。其中,单次加载的中垂压溃用于确定箱型梁极限弯矩对应的极限状态曲率值 $1.0\varphi_u$ 的试验值。为了研究屈曲崩溃前箱型梁受循环载荷的影响,试验设计了曲率幅值为 $0.9\varphi_u$ 的中垂和中拱交替循环弯曲载荷。同时,为讨论屈曲崩溃后累积塑性对船体梁极限强度影响,并减少循环载荷加载次数,试验中设计曲率幅值为 $1.2\varphi_u$ 的循环弯矩,此时箱型梁模型可发生屈曲崩溃且出现明显的塑性变形。

表 1 箱型梁极限强度工况
Tab.1 Test cases of ultimate strength of box girder

工况	研究方法	转角载荷加载方式	中垂和中拱循环载荷特征
工况1	试验/数值	单次中垂加载	单调递增转角载荷
工况2	试验/数值	12次 $1.2\varphi_u$	恒幅转角循环载荷(崩溃后 $1.2\varphi_u$)
工况3	试验/数值	$0.9\varphi_u\sim1.2\varphi_u$ 各3次,增量 $0.1\varphi_u$	递增转角循环载荷(崩溃前 $0.9\varphi_u$ 到崩溃后 $1.2\varphi_u$)
工况4	数值	12次 $0.9\varphi_u$	恒幅转角循环载荷(崩溃前 $0.9\varphi_u$)
工况5	数值	12次 $1.0\varphi_u$	恒幅转角循环载荷(极限状态 $1.0\varphi_u$)
工况6	数值	12次 $1.1\varphi_u$	恒幅转角循环载荷(崩溃后 $1.1\varphi_u$)
工况7	数值	$1.2\varphi_u\sim0.9\varphi_u$ 各3次,减量 $0.1\varphi_u$	递减转角循环载荷(崩溃后 $1.2\varphi_u$ 到崩溃前 $0.9\varphi_u$)
工况8	数值	$1.0\varphi_u\sim1.1\varphi_u\sim0.9\varphi_u\sim1.2\varphi_u$,各3次	随机幅值转角循环载荷1
工况9	数值	$1.0\varphi_u\sim1.2\varphi_u\sim0.9\varphi_u\sim1.1\varphi_u$,各3次	随机幅值转角循环载荷2

注: φ_u 是箱型梁在首次弯曲载荷下的极限崩溃状态曲率,不同尺寸箱型梁的极限崩溃状态曲率不同,对应 φ_u 取值不同。

2.2 试验过程

在试验进行之前,我们采用非线性有限元软件 ANSYS LS-DYNA 对箱型梁模型的极限弯矩进行了预估,并以 25% 和 50% 的预估载荷进行预加载,以降低焊接残余应力与安装间隙的影响。通过 MTS 加载系统设置位移控制和力保护,逐步增加垂向拉压位移,待达到预设位移幅值后停止加载。随后,作动器缓慢反向卸载直至载荷为零,并进入下一个循环。MTS 加载系统通过力传感器与位移传感器实时记录作动器输出的作用力与位移,并换算得到箱型梁极限强度试验的弯矩-曲率曲线。继续加载直至达到设定循环次数,或者箱型梁的极限承载力衰减趋于稳定(建议相邻极限强度衰减比例不超过 1%)时即停止加载。

3 箱型梁极限强度数值计算

3.1 有限元模型

根据图 4 所示的箱型梁几何尺寸,采用 Belytschko-Wong-Chiang 公式的缩减积分单元 Shell 163,建立板材与型材有限元模型如图 6 所示。考虑到弹塑性材料特性和大变形,从 LS-DYNA 材料库中选择“MAT_PLASTIC_KINEMATIC”(随动强化塑性材料本构模型),以模拟材料理想化的包辛格效应,并描述循环弯曲过程中塑性应变的累积。箱型梁模型采用四边形划分网格,网格尺寸需平衡求解精度与计算时间,具体划分情况如下:纵向加强筋之间的局部板格划分为 12 个单元,T 型材腹板和翼板的单元数分别

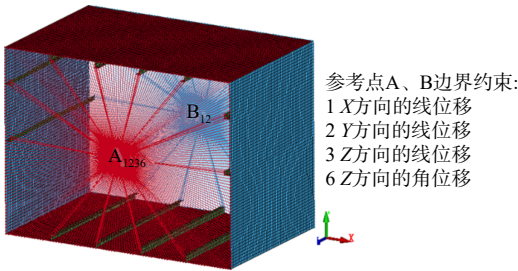


图 6 箱型梁有限元模型
Fig.6 Finite element model of box girder

设置为6和2,单元的长宽比约为1^[11]。为避免出现静态隐式计算的收敛性问题,采用基于中心差分法的动态显式准静态方法计算循环载荷作用下箱型梁的极限弯矩。

3.2 边界条件与载荷

船体梁横向构件通常设计具有足够的强度以防止加筋板跨肋位的整体框架失稳。因此,在船体梁逐渐失稳崩溃过程中,横剖面假定为平断面。在箱型梁模型前后端面形心位置分别建立独立参考节点,并与相应横剖面上的船体结构节点刚性连接。边界条件与载荷施加在参考节点上,如表2所示,其中 X 轴为横向, Y 轴为垂向, Z 轴为纵向方向。弯矩载荷与转角载荷在屈曲崩溃前的力学响应基本一致。然而,弯矩载荷加载时船体梁在后屈曲阶段迅速崩溃,而转角载荷加载更符合船体梁准静态崩溃过程。为了模拟试验载荷加载过程,对前后端参考节点施加大小相等、方向相反的绕横轴(X 轴)的转角载荷,使舱段发生纯弯曲屈曲破坏。壳单元与梁单元均有6个自由度,参考节点上的转角载荷会自动传递到舱段横剖面的所有节点。单调加载周期设为0.25 s,故循环载荷加载周期为1 s^[12],与船体梁自身固有频率相近,可认为船体梁处于准静态崩溃过程。

表2 模型边界条件与载荷
Tab.2 Boundary conditions and loads

位置	位移			转角		
	u_x	u_y	u_z	θ_x	θ_y	θ_z
前端面参考点	约束	约束	约束	载荷	—	约束
后端面参考点	约束	约束	—	载荷	—	—

3.3 初始缺陷

船体结构在制造过程中不可避免地会产生初始缺陷,主要是焊接过程中产生的残余应力以及几何初始变形。焊接残余应力仅略微降低结构的初始屈曲强度,并不影响结构后续的循环特性。试验过程中通过预加载释放了部分残余应力。几何变形对船体结构极限强度有显著影响,因此主要关注几何初始变形。由于箱型梁模型尺寸较大,且两侧端面焊接有密封横隔板,难以完整测量板材与型材的几何初始变形。同时,实测初始变形具有较为复杂且不规则的空间形态,不便于研究人员进行重复性验证。现有研究表明,实测初始变形与等效初始变形的极限强度差异在合理范围之内^[13],因此,可采用目前被学者广泛使用的等效初始变形公式^[12],分别如下所示

板格的初始变形

$$w_{opl} = A_0 \sin \frac{m\pi z}{a} \sin \frac{\pi x}{b} + B_0 \sin \frac{\pi z}{a} \sin \frac{\pi x}{B} \quad (1)$$

筋的梁柱型初始变形

$$w_{oc} = B_0 \sin \frac{\pi z}{a} \sin \frac{\pi x}{B} \quad (2)$$

筋的侧倾型初始变形

$$w_{os} = \frac{C_0 y}{h_w} \sin \frac{\pi z}{a} \quad (3)$$

式中: A_0 、 B_0 和 C_0 分别是每种初始变形的最大幅值,通常取值为 $A_0=0.1\beta^2 t_p$, $B_0=C_0=0.0015a$,其中, $\beta=(b/t_p)\sqrt{\sigma_y/E}$ 为板的柔度系数, a 为加筋板跨长, b 为板宽, B 为纵向强档间距, h_w 为筋腹板高度, t_p 为板厚, m 表示纵向板的屈曲半波数,通常定义为满足 $a/b \leq \sqrt{m(m+1)}$ 的最小整数。上述表达式通过APDL语言施加在有限元模型单元的相应节点上,其后继承求解的节点位移作为循环极限强度计算的几何初始变形。

4 循环载荷作用下箱型梁累积塑性特征

4.1 累积塑性临界点

图 7 为单调中垂压溃的弯矩-曲率曲线, 试验法与数值法的极限弯矩值相近, 但结构模量(线性段斜率)存在一定的差异。由于数值法得到的箱型梁弯矩-曲率曲线更平滑, 因此采用数值法结果分析循环载荷作用下箱型梁累积塑性临界点。箱型梁的弯矩-曲率曲线可分为屈曲崩溃前的线弹性段、非线性弹塑性段与屈曲崩溃后的大塑性阶段。非线性分岔点的出现是由于箱型梁局部结构进入受压状态的塑性屈曲或受拉状态的塑性屈服。因此, 在循环载荷作用下非线性分岔点以下不发生累积塑性, 而以上会发生累积塑性。非线性分岔点即为累积塑性临界点。

在曲率加载到累积塑性临界点之前, 结构变形与施加载荷呈现出较好的线性关系。当曲率超过累积塑性临界点后, 箱型梁模型逐渐发生塑性变形, 弯矩-曲率曲线的斜率逐渐减小, 结构进入屈服/屈曲阶段导致结构刚度急剧降低。箱型梁弯矩-曲率曲线中, 累积塑性临界点的

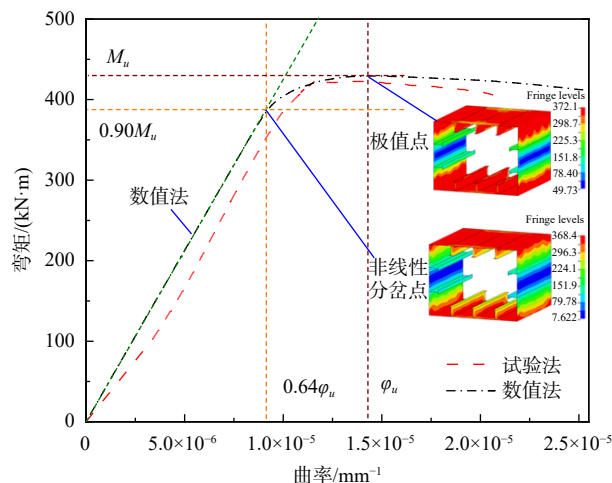


图 7 工况 1 单调中垂压溃曲线

Fig.7 Ultimate moment-curvature curve for monotonous sagging bending moment loading in Case 1

的弯矩值约为极限弯矩的 0.9 倍, 而曲率值约为极限曲率的 0.64 倍。这是由于加筋板屈曲或屈服后结构模量降低, 导致临界弯矩比值大于临界曲率比值。试验过程中, 箱型梁试验段与延长段的横隔板、分配梁工字钢与外围板的接触均采用螺栓进行连接, 不可避免地存在间隙。因此, 在试验试样与工装加工过程中, 通过铣床铣削接触平面, 确保工装间、工装与试样间的接触面的平整度, 以实现载荷的均匀传递, 并减小中垂和中拱交替载荷过程中安装间隙对位移测量误差的影响。虽然装配间隙可实现载荷的有效传递, 但略微影响箱型梁在位移加载条件下的结构件变形, 导致曲率计算存在一定的误差。因此, 有限元法与试验得到的弯矩-曲率曲线的斜率(结构刚度)会略有不同。累积塑性主要体现为材料层面的应变强化和结构层面的塑性变形累积^[14]。由于箱型梁循环载荷次数通常难以达到上百次, 材料塑性累积影响较小, 主导因素为引起结构模量降低的塑性变形累积。在实际恶劣海况航行过程中, 船舶遭受波浪波形变化和波浪弯矩联合作用。由于恶劣海况下的波浪波形周期相对较大, 船体梁的逐步崩溃可视为准静态过程。实际累积塑性临界点应介于两者之间, 且波浪波形变化可能主导船体梁的崩溃速度。由于曲率控制的累积塑性临界点易于定量控制累积塑性变形程度, 并满足波浪波形变化的主导影响, 因此一般可采用曲率对应的转角加载方式控制极限强度的衰减速度。

4.2 塑性累积变形特征

由于中垂和中拱时甲板和底板分别受压缩应力而具有最大的挠度, 而底板和甲板则因受拉伸应力而挠度幅值降低, 图 8 描绘了在一个循环载荷周期内, 箱型梁中垂极限弯矩时对应的甲板和拱极限弯矩时对应的底板两者的最大结构挠度变化曲线; 图 9 则展示了工况 2 不同循环次数的中垂极限状态时甲板的累积塑性云图。箱型梁极限弯矩试验时重点测量循环加载载荷和整体位移幅值的变化。由于箱型梁最大挠度位置不确定, 难以持续跟踪测量甲板与底板的结构最大挠度幅值变化, 因此本文仅列出有限元法中箱型梁结构最大挠度变化曲线, 未与试验对比。如工况 2 的 $1.2\phi_u$ 恒幅加载过程中, 对于对称横剖面的箱型梁, 在大幅值的中垂和中拱弯矩加载下, 箱型梁屈曲崩溃后第 1 次循环载荷的甲板与底板最大挠度差异明显, 随后挠度随循环次数的增加而缓慢增加, 并逐渐进入稳定状态。在工况 3 的 $0.9\phi_u \sim 1.2\phi_u$ 递增加载过程中, 箱型梁甲板与底板的挠度随载荷幅值的增加而增加。在工况 7 的

$1.2\varphi_u \sim 0.9\varphi_u$ 递减加载过程中, 箱型梁甲板与底板的挠度在 $1.2\varphi_u$ 作用下随循环次数依次增加, 而当载荷幅值减小时, 挠度随循环次数的增加而减小, 表明塑性变形出现了释放效应。因此, 对于循环载荷, 先中垂、后中拱的加载方式仅影响模型初始循环的挠度幅值。不影响最终挠度变化趋势与幅值。箱型梁多次循环加载的最大载荷幅值决定了甲板与底板的最终挠度大小。

4.3 中性轴高度累积变化

中垂与中拱极限状态下箱型梁的中性轴高度随循环次数的变化曲线如图 10 所示。当外载荷导致箱型梁局部加筋板结构受压屈服或受拉屈服后, 加筋板面内结构模量急剧降低, 横剖面发生应力重分布, 中性轴开始向受拉一侧移动。在工况 2 的 $1.2\varphi_u$ 恒幅加载中, 箱型梁处于崩溃后阶段, 初始加载时中性轴高度急剧变化, 随后逐渐进入稳定状态。而工况 3 的 $0.9\varphi_u \sim 1.2\varphi_u$ 递增加载过程中, $1.0\varphi_u$ 之前存在塑性累积现象, 但箱型梁尚未整体崩溃, 因此中性轴高度缓慢变化; 一旦箱型梁整体崩溃, 中性轴高度则快速变化。工况 7 的 $1.2\varphi_u \sim 0.9\varphi_u$ 递减加载过程中, 随着载荷幅值的减小, 中性轴高度的变化逐渐变缓, 出现塑性残余应力释放。箱型梁最终中性轴高度取决于多次循环加载的最大载荷幅值, 受中垂和中拱加载顺序的影响较小。

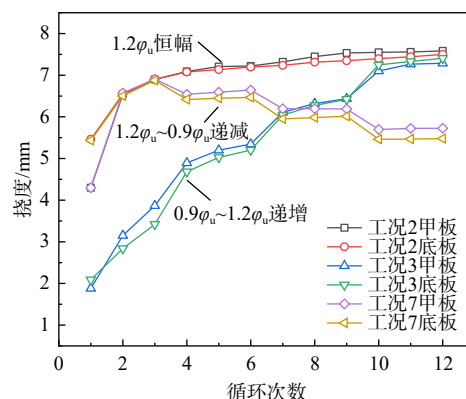


图 8 中垂极限状态甲板与中拱极限状态底板结构挠度变化曲线

Fig.8 Deflection versus cycle number curve of deck in ultimate sagging state and of bottom in ultimate hogging state

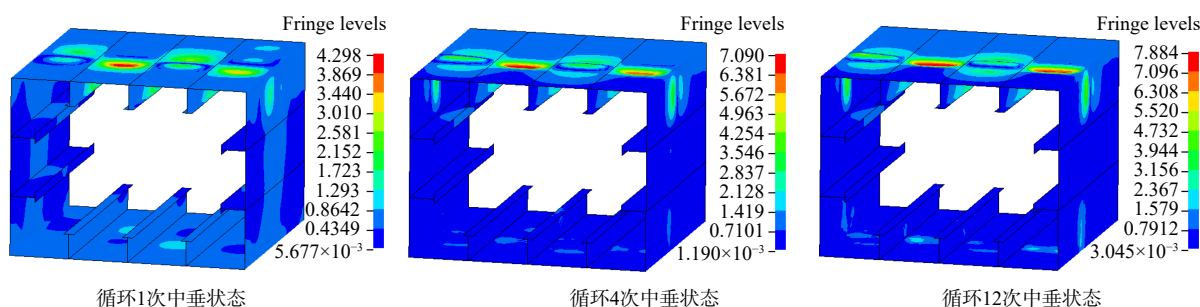


图 9 工况 2 不同循环次数的中垂状态甲板累积塑性变形

Fig.9 Cumulative plastic deformation of deck after different numbers of cycle in ultimate sagging state for Case 2

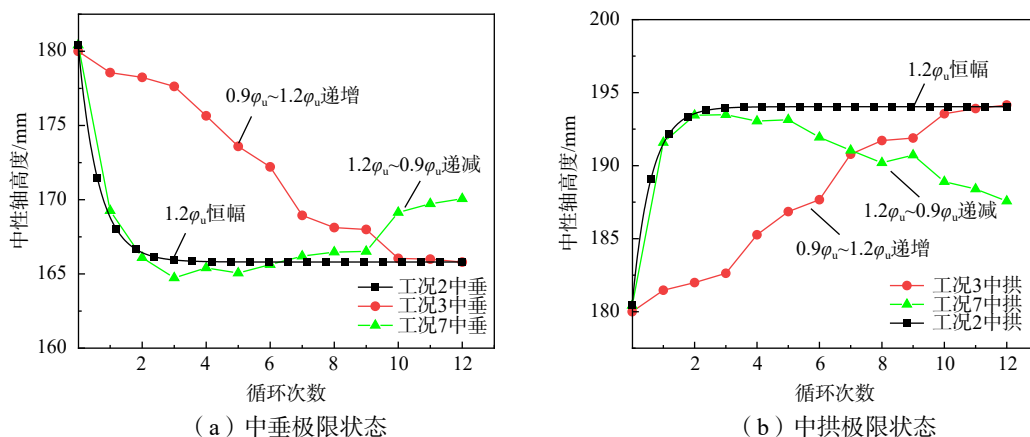


图 10 中性轴高度变化曲线

Fig.10 Curves of neutral axis height versus cycle number

Fig.12 Decay curves of ultimate bending moment

次数增加而逐渐减小。对于在恶劣海况中航行时遭遇循环弯矩载荷的实船,可不考虑中垂和中拱弯矩的随机初始加载方式对极限强度衰减的影响。

5.2 载荷加载顺序的影响

由于恶劣海况的波浪载荷加载顺序呈现随机性,难以直接应用,而统计数据往往仅给出各波浪弯矩幅值的次数或概率分布,无法反映船舶可能遭受的真实波浪历程,故本文假定了2种随机弯矩载荷,以探究加载顺序对箱型梁模型极限强度的影响。图13显示了 $0.9\varphi_u \sim 1.2\varphi_u$ 递增加载、 $1.2\varphi_u \sim 0.9\varphi_u$ 递减排载,以及载荷幅值在 $0.9\varphi_u \sim 1.2\varphi_u$ 区间的随机幅值1与随机幅值2等4种工况(分别对应表1中的工况3/7/8/9)的极限承载力随循环加载次数的衰减曲线。随机幅值1与随机幅值2工况表明,累积塑性载荷与载荷历程相关,不同加载次序导致不同的最终极限承载力。从递增加载与随机幅值1的工况可知,若最大弯矩载荷出现在最后一次加载,箱型梁的最终极限承载力衰减几乎相同,且均大于随机幅值2工况的极限承载力。同时,递减排值的极限强度衰减最显著,最终极限承载力最小。总体而言,递增与递减排值的极限强度呈现规律的逐渐衰减,且递增幅值的衰减小于递减排值。随机幅值的极限强度介于递增幅值与递减排值之间,因此递增幅值与递减排值的极限强度分别决定了随机波浪载荷的极限强度上下限。对于恶劣海况中航行的船舶,可通过统计波浪载荷的递增与递减排值排序,计算随机波浪载荷作用下船体梁极限强度的变化区间,进而开展偏于危险与保守的安全性评估。

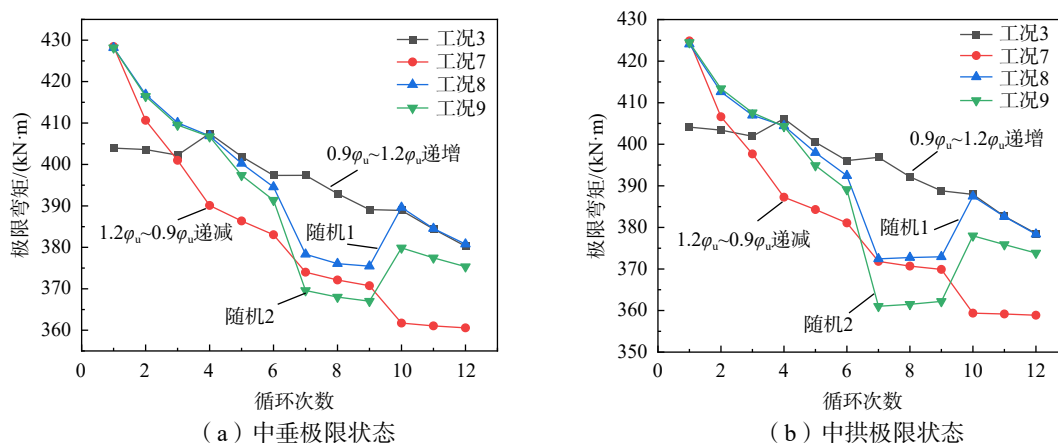


图13 极限弯矩衰减曲线

Fig.13 Decay curves of ultimate bending moment

6 结 论

本文设计了可替换试验段与不间断循环弯矩加载的极限弯矩试验装置,开展了箱型梁的一次性单调中垂压溃和循环中垂、中拱极限强度试验,并结合有限元法分析了极端循环载荷下箱型梁考虑累积塑性的极限强度衰减特性,得到如下结论:

(1) 极端循环载荷作用下,箱型梁存在不同的弯矩和曲率累积塑性临界值。当循环载荷超过该临界值后,箱型梁将发生塑性累积现象与极限承载力衰减,且通常临界弯矩比值大于临界曲率比值。在有限元或试验过程中,建议采用转角控制加载,以考虑船体梁崩溃后波浪波形变化。

(2) 初始极端循环载荷作用下箱型梁的塑性变形和中性轴高度迅速变化,而后随着循环次数的增加逐渐趋于稳定。初始中垂和中拱加载顺序不影响最终挠度变化趋势与幅值,而多次循环加载的最大载荷幅值决定最终累积塑性变形的幅值和中性轴高度。

(3) 极端载荷幅值越大,箱型梁极限强度衰减越快,也越容易进入稳定状态。船舶在恶劣海况中航

行时遭受随机波浪载荷作用,不同加载次序决定了最终的不同极限承载力。通过波浪载荷幅值递增与递减排序,可计算出随机波浪载荷作用下船体梁极限强度的上下限区间,进而开展偏于危险与保守的安全性评估。

参 考 文 献:

- [1] IACS. Common structural rules for bulk carriers and oil tankers[S]. International Association of Classification Societies (IACS), 2014.
- [2] 王佳颖, 张世联. 纵向箱型梁舱段极限强度试验研究[J]. 中国造船, 2011, 52(2): 47–54.
Wang J Y, Zhang S L. Ultimate strength experimental research for longitudinal box girders module model[J]. Shipbuilding of China, 2011, 52(2): 47–54. (in Chinese)
- [3] Garbatov Y, Saad Eldeen S, Guedes Soares C. Hull girder ultimate strength assessment based on experimental results and the dimensional theory[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 742–750.
- [4] 王崇磊. 超大型集装箱船联合载荷作用下极限强度研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
Wang C L. Study on the ultimate strength of ULCS under combined ultimate loads[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [5] Xu S X, Zhang S C, Chen J, et al. Transition corner structure optimization and ultimate bearing capacity evaluation of marine pressure cabin: Experiment and numerical analysis[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 182, Part A, 110133.
- [6] Shi G J, Gao D W. Model experiment of large superstructures' influence on hull girder ultimate strength for cruise ships[J]. Ocean Engineering, 2021, 222: 108626.
- [7] Fukumoto Y, Kusama H. Cyclic bending tests of thin walled box beams[J]. Proceedings of JSCE: Structural Engineering Earthquake Engineering, 1985, 2(1): 141–151.
- [8] 黄震球, 陈齐树, 骆子夜. 循环弯曲载荷下船体梁的极限纵强度[J]. 中国造船, 1996(3): 87–95.
Huang Z Q, Chen Q S, Luo Z Y. Ultimate longitudinal strength of ship's hull girder under cyclic bending loads[J]. Shipbuilding of China, 1996(3): 87–95. (in Chinese)
- [9] Deng H, Yuan T, Gan J, et al. Experimental and numerical investigations on the collapse behaviour of box type hull girder subjected to cyclic ultimate bending moment[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 175: 109204.
- [10] 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 accumulative plastic collapse under cyclic loading[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [11] ISSC. Report of specialist committee III. 1 ultimate strength[C]//Proceedings of the 18th International Ship and Offshore Structures Congress, Rostock, Germany, 2012.
- [12] Xu M C, Song Z J, Pan J. Study on influence of nonlinear finite element method models on ultimate bending moment for hull girder[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 119: 282–295.
- [13] Xu M C, Guedes Soares C. Comparisons of calculations with experiments on the ultimate strength of wide stiffened panels[J]. Marine Structures, 2013, 31(4): 82–101.
- [14] 芦 燕, 郝光钦, 韩庆华, 等. 不同加载路径对铸钢材料损伤累积效应的影响[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2019, 52(A02): 114–119.
Lu Y, Hao G Q, Han Q H, et al. Effect of different loading paths on damage accumulation in cast steel materials[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(A02): 114–119. (in Chinese)