

文章编号: 1007-7294(2025)11-1757-11

多种损伤船体梁极限弯矩的简化计算方法研究

赵 南^{1,2}, 林楚豪³, 王仁华⁴, 赵新新³, 吴剑国³

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 深海技术太湖实验室, 江苏 无锡 214082; 3. 浙江工业大学, 杭州 310014; 4. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212100)

摘要: 为研究多种损伤模式对船体梁抗弯极限承载能力(简称极限弯矩)的影响, 本文采用非线性有限元方法, 进行了含点蚀、断裂、凹陷损伤模式及其组合的多组加筋板极限承载力的计算。获得了轴压作用下多种损伤模式组合对含带板扶强材(简称扶强材)极限强度的影响规律, 回归出了损伤扶强材的极限强度计算公式, 并构造了凹陷、断裂、点蚀损伤模式及其不同组合情况下的扶强材单元的端缩曲线。最后, 提出了组合损伤船体梁极限弯矩的逐步迭代法, 编制了计算程序。实船计算表明, 所提方法计算简便, 与有限元方法的极限弯矩计算结果的误差不超过 10%, 可应用于老旧船舶极限弯矩的评估。

关键词: 组合损伤; 加筋板; 船体梁极限弯矩; 逐步迭代法

中图分类号: U661.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.11.009

Simplified calculation methods for the ultimate strength of various damaged hull beams

ZHAO Nan^{1,2}, LIN Chu-hao³, WANG Ren-hua⁴, ZHAO Xin-xin³, WU Jian-guo³

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China; 3. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 4. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: In order to study the influence of multiple damage modes on the ultimate bearing capacity of ship beams, the nonlinear finite element method was used to calculate the ultimate bearing capacity of multiple groups of stiffened plates including pitting, fracture and sag damage modes and their combinations. The influence of multiple damage modes on the ultimate strength of the stiffened plate structure under axial compression is obtained, the ultimate strength calculation formula of the damaged stiffened plate is regressed, and the end shrinkage curves of the stiffener elements under the condition of depression, fracture and corrosion damage modes and their different combinations are constructed. The step-by-step iterative approach of the ultimate strength of the combined damaged hull beam under monotonic load is proposed, and the calculation procedures have been prepared. The actual ship calculation shows that the proposed method is simple to calculate, and the error between the proposed method and the ultimate bending moment calculation result of the finite element method is within 10%, which can be applied to the evaluation of the ultimate strength of old ships.

收稿日期: 2025-05-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3306200)

作者简介: 赵 南(1985-), 男, 博士, 研究员; 吴剑国(1963-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: wujg63@163.com。

Key words: combined damages; stiffened plates; ultimate strength of hull beams;
step-by-step iterative approach

0 引 言

船舶与海洋平台结构因长期处于海水侵蚀和海浪作用的环境中,不可避免地产生各种损伤^[1],如凹陷、断裂、腐蚀及其多种损伤的组合和积累,导致船体极限强度逐渐降低,危及船舶安全。现阶段国内外关于损伤船体极限弯矩的研究主要集中在单种损伤对极限弯矩的影响。在腐蚀损伤方面,通常可分为两种主要类型,即均匀腐蚀和点腐蚀。一般会假设板厚均匀减少,以计算含有腐蚀损伤的加筋板极限强度^[2]。然而,腐蚀的主要形式通常是点腐蚀,导致板厚度的不均匀减薄。点蚀坑会降低构件强度,使得点蚀损伤影响大于同等体积损失下的均匀腐蚀^[3],因此,点蚀损伤对船舶结构的安全性产生的影响不容忽视。Xu 等^[4]的研究发现,点蚀和均匀腐蚀导致的截面损失降低了对焊接头试件的强度,且热影响区内的点蚀导致延性显著下降,其极限强度与最小横截面的腐蚀损失率密切相关,此外,蚀坑的位置、直径和深度均会影响结构的失效模式^[5-6]。

针对凹陷损伤, Cai 等^[7]通过有限元分析,研究了凹陷长度、深度、宽度等参数对加筋板的极限强度影响。钟毅等^[8]对加筋板的纵向刚度在变形前后的变化进行了研究,发现随着变形幅值的增加,加筋板的极限强度逐渐降低。胡康等^[9]分析了初始变形、焊接残余应力以及它们的组合对船体板在纵向压力下的极限强度影响。

在断裂损伤方面, Paik 等^[10]研究了横向裂纹对钢板承载能力的影响,发现随着裂纹尺寸增大,其承载能力降低。袁园等^[11]利用有限元法对中心穿透裂纹板的极限强度进行了计算,得出了裂纹板在不同加载条件下随裂纹长度增长的衰减趋势。张婧等^[12]通过试验获得了含裂纹加筋板结构的极限压缩载荷、应力分布规律,得到相对于完整加筋板,裂纹的存在会削弱加筋板剩余承载能力,尤其对裂纹尖端的应力分布规律有较大的影响。

然而,目前大多数研究集中在单一类型的损伤(如腐蚀或断裂)对船体结构的极限承载能力的影响上。实际上,船舶常常同时存在多种损伤,仅基于单个受损部件的最大承载能力来评估船体结构的整体承载能力,可能导致对总体结构能力的高估。因此,有必要研究在多种损伤同时存在情况下的船舶结构的极限承载能力。

按照 CCS 规范,船体梁极限承载力计算的逐步迭代法是将横截面划分为三种基本单元^[13]:扶强材单元、横向加筋板单元和硬角单元。鉴于 150 m 以上的船舶主要是采用纵骨架结构,扶强材单元(含带板)占主导,加上硬角单元的应力应变关系是按理想弹塑性模型,不考虑屈曲。因此,本文进行了轴压作用下扶强材腐蚀、断裂、凹陷及其多种损伤模式组合情况下的极限承载力的计算。根据非线性有限元计算结果回归出损伤扶强材的极限强度计算公式,构造了不同组合情况下的扶强材单元的端缩曲线,提出了计算组合损伤船体梁极限弯矩的理论方法,为损伤船体结构极限弯矩的衡准研究奠定了基础。

1 损伤扶强材的极限强度计算

1.1 扶强材模型

本文采用计算效率较高的 (1/2+1/2)扶强材模型^[14],利用 ABAQUS 软件进行有限元分析^[15],模型见图 1。单元的类型选用四节点壳单元(S4R),除面板宽度为 90 mm,网格分为 45 mm×50 mm 外,其余网格尺寸均为 50 mm×50 mm。边界条件为:与横梁平行的 A1-A2 和 B1-B2 边施加对称边界, B1-B2 边上的所有节点的 X 方向位移被约束;纵向边界 A2-B2 和 A1-B1 限制 X 方向转角, A1-B1 边上所有节点的 Y 方向位移被约束; A1-A2 的所有节点在 X 方向均有相同的位移;横梁辅以边界条件代替。

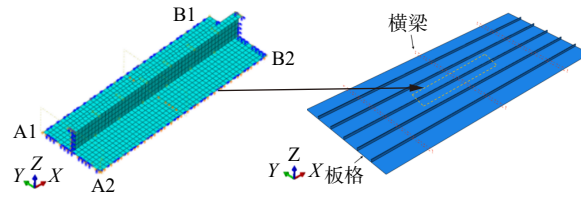


图 1 有限元模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of finite element model

本文选取了 12 个单跨单筋模型,其中包括了 2 个扁钢加筋板(F)、2 个球扁钢加筋板(HP)、4 个角钢加筋板(L)和 4 个 T 型钢加筋板(T),模型尺寸参数见表 1,泊松比为 0.3,弹性模量为 206 GPa,假定钢材的应力-应变关系为理想弹塑性。

表 1 加筋板模型尺寸参数

Tab.1 Dimensional parameters of stiffened plates

模型 编号	横梁跨度 /mm	筋间距 /mm	带板厚度 /mm	屈服强度 /MPa	腹板高 /mm	腹板厚 /mm	翼缘宽 /mm	翼缘厚 /mm
F-1	2500	850	7	315	150	7	/	/
F-2	3500	850	16	315	300	14	/	/
HP-1	2500	850	9	315	180	9	/	/
HP-2	3500	850	14	315	400	16	/	/
L-1	2500	850	9	315	200	6	90	11
L-2	3000	850	11	315	300	8	90	13
L-3	3500	850	14	315	350	9	100	14
L-4	5000	850	22	315	350	9	100	14
T-1	3000	850	9	315	310	8	100	10
T-2	4500	850	15	315	613	10	200	13
T-3	4000	850	15	315	310	8	100	10
T-4	6000	850	25	315	613	10	200	13

1.2 多模式损伤

本文引入了点蚀、凹陷、断裂等三种损伤类型。点蚀的形态受多种复杂因素影响,包括结构的服役环境、构件尺度、位置以及结构板的制造工艺。根据实船腐蚀观测的结果可知,尽管点蚀在构件表面分布不均匀,但通常呈现圆柱、圆锥或椭球状的形状,其蚀坑的最大直径在 25 mm~80 mm^[16]。然而,与其他形状的蚀坑相比,圆柱形状的蚀坑更容易在有限元模型中进行建模,而在极限强度计算方面,蚀坑形状的差异通常对最终结果影响不大^[17]。因此,圆柱形蚀坑被广泛采用。点蚀的分布、蚀坑尺寸和深度都具有复杂的随机性,其中蚀坑深度通常被视为描述点蚀演化的主要指标^[18]。

模拟加筋板随机点蚀损伤的主要步骤如下^[19-20]:首先根据实测的腐蚀数据确定点蚀损伤的特征参数,包括腐蚀体积损失率、蚀坑直径和深度的统计值,并根据加筋板的结构参数建立其几何模型;然后将几何模型的带板划分为大小均匀的几何网格,并将网格交点作为可能出现点坑的位置;随后根据蚀坑统计参数,使用 Rand 函数生成随机的蚀坑直径和深度;再次使用 Rand 函数从上述带板网格交点中随机选择交点,将其作为可能的蚀坑位置(须判断所选位置是否与已有蚀坑位置重合;若无,则该网格交点可用;若有,则须重新随机选择网格交点,并重复上述判断过程,直至找出符合要求的网格交点);随即在所确定的蚀坑位置,根据前面随机确定的蚀坑直径,建立一个圆柱面,将其与带板几何模型发生布尔运算,构造出蚀坑区域;进一步执行上述蚀坑生成步骤直至蚀坑总体积达到了预定的腐蚀体积损失率;此后定义相应于带板和加筋厚度的壳体单元,用其划分加筋板几何模型的有限元网格;最终选择前期构造

的蚀坑区域的有限元网格,根据随机生成的蚀坑深度,修改所选择的有限元网格的厚度,完成随机点蚀的模拟。本文模拟的随机点蚀中,参考了实测的蚀坑尺寸数据,确定了点蚀的尺寸参数,蚀坑直径和深度均值分别为 25 mm 和 0.5 t (t 为板件厚度),标准差分别为 1 mm 和 0.5 mm。此外,根据 IACS 规范的规定,腐蚀损伤程度不能超过规范限值,否则需要采取相应措施以保证船体板架结构的强度。因此,在模型中设置了腐蚀体积损失率(Degree of Corroded Volume Loss, DOV),具体数值如表 2 所示。

表 2 各模型腐蚀体积损失率
Tab.2 DOV of each model

模型	F-1	F-8	HP-1	HP-7	L-1	L-4	L-8	L-18	T-1	T-7	T-12	T-18
DOV (%)	6	12	6	12	6	6	12	12	6	6	12	12

凹陷特指扶强材单元在腹板高度方向发生的塑性位移,其最大值按照规范的换板要求设定为 $6a/1000$,其中 a 代表纵向扶强材的跨度。在有限元分析软件 ABAQUS 中,通过在靠近中部施加初始变形并使其沿两侧呈现三角函数形状进行扩散来模拟此情况^[14]。

对于断裂,本文不考虑裂纹扩展过程,设定为筋端部完全断裂,在有限元模型中通过删除位于加强筋与横梁交接处之间的连接单元来模拟扶强材腹板断裂^[12,14]。

将三种不同的损伤进行组合,分别组合成凹陷-断裂,凹陷-腐蚀,断裂-腐蚀,凹陷-断裂-腐蚀四种情况,以 T-1 模型为例,各种损伤的有限元模型示意图见图 2,其中(b)~(d)中的黑点是由于蚀坑区域采用了精细网格的效果,使用 ABAQUS 进行四种组合损伤扶强材极限承载能力分析。项目组还进行了多根组合损伤的扶强材的试验与有限元结果的对比,结果表明本文所述有限元仿真方法具有较高的精度,相关内容将另文详述。

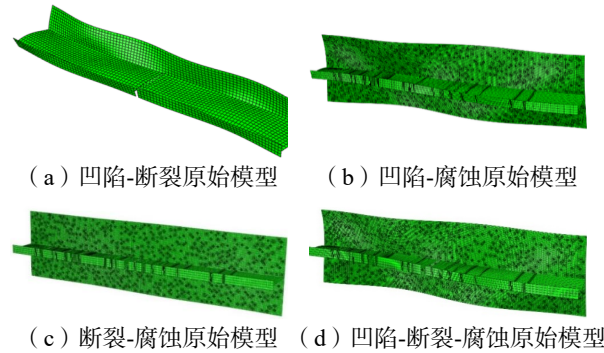
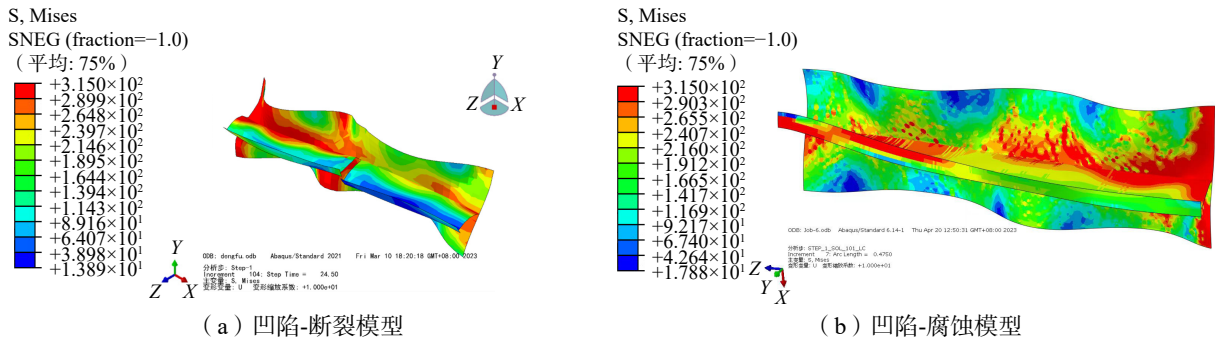


图 2 组合损失原始模型

Fig.2 Original models of Combined damage

1.3 不同损伤模式影响

使用 ABAQUS 软件对上述 12 组扶强材模型进行轴压作用下极限强度的计算。以 T-1 模型为例,得到多种损伤模式不同组合情况下,模型在极限状态下的变形和应力云图,如图 3 所示。12 组扶强材模型在不同组合损伤情况下的极限强度汇总成表 3。



(a) 凹陷-断裂模型

(b) 凹陷-腐蚀模型

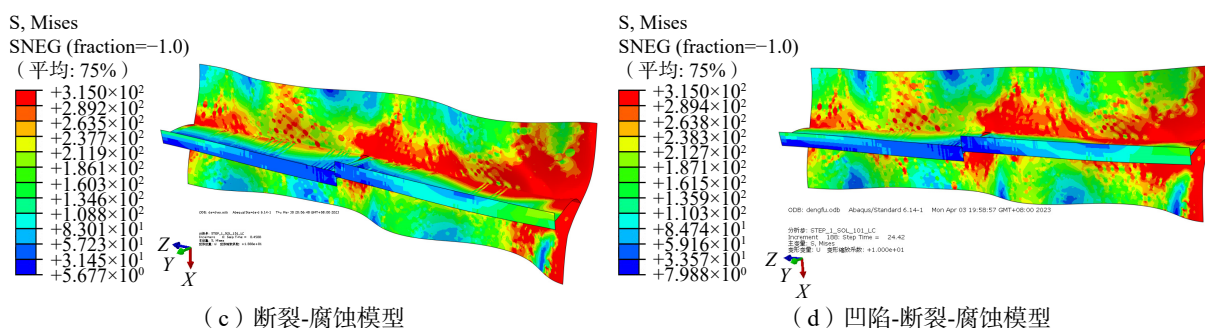


图 3 组合损伤模型变形与应力云图

Fig.3 Deformation and stress cloud diagrams of combined damage models

表 3 各种损伤模式模型极限承载能力

Tab.3 Ultimate load capacity of various damage modes

模型	β	λ	完整	凹陷-断裂	凹陷-腐蚀	断裂-腐蚀	凹陷-断裂-腐蚀
F-1	4.748	0.952	163	82	79	92	79
F-8	2.077	0.550	224	171	171	145	142
HP-1	3.693	0.591	183	138	100	108	94
HP-7	2.374	0.288	244	143	155	113	110
L-1	3.693	0.438	200	128	130	100	95
L-4	3.022	0.349	229	112	171	117	116
L-8	2.374	0.353	239	172	185	129	129
L-18	1.511	0.568	265	212	181	179	170
T-1	3.693	0.334	196	129	160	107	105
T-7	2.216	0.234	253	151	171	126	119
T-12	2.216	0.506	213	167	177	136	134
T-18	1.330	0.343	290	208	179	178	165
均值 (组合损伤/完整)			-	0.67	0.69	0.57	0.54

注： β 为板格柔度系数、 λ 为加强筋柔度系数，公式详见式（1）。

根据有限元结果得到以下结论：

(1)模型的断裂、凹陷和腐蚀均会降低扶强材的极限强度。凹陷、断裂和腐蚀三种损伤组合情况下，扶强材极限强度降低最显著，其组合损伤模型结果较完整模型结果平均下降 54%，证明了组合损伤对船体结构极限强度有显著影响。

(2)凹陷损伤对断裂-腐蚀损伤的扶强材极限强度影响较小，在断裂-腐蚀损伤模型的基础上引入凹陷损伤，其极限强度平均仅下降 3%。

(3)带板柔度系数 β 变化，对组合损伤模型极限强度退化有显著影响，随带板长细比增加，极限强度退化程度越严重。相比之下，加强筋的类型对组合损伤扶强材结构极限强度退化程度的影响不大。

2 损伤扶强材应力-应变曲线的构造

2.1 损伤扶强材极限承载力计算公式

为了计算组合损伤的船体梁极限弯矩，本文根据有限元计算结果拟合出组合损伤的扶强材单元的极限强度计算公式，再构造其损伤后的应力-应变关系，在此基础上形成适用于组合损伤的船体梁极限弯矩逐步迭代计算方法。

由于加筋板是船舶与海洋结构的主要受力单元，其带板柔度系数 β 、加强筋柔度系数 λ 是影响结构

极限强度的主要参数。而对于腐蚀加筋板而言,腐蚀体积损失率被认为是评估其剩余强度的重要参数。因此,选取板格柔度系数 β 、加强筋柔度系数 λ 、腐蚀体积损失率 DOV 作为主要影响参数,其参数定义为

$$\beta = \frac{b}{t_p} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}, \lambda = \frac{a}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}, DOV = \frac{\Delta V}{V} \times 100\% \quad (1)$$

式中: σ_y 为屈服强度; b 和 t_p 为带板的宽度和厚度; E 为弹性模量; a 为扶强材跨距, r 扶强材横截面的惯性矩半径; ΔV 为腐蚀体积; V 为完整加筋板体积。

回归出计算多模式损伤扶强材极限承载力系数,即其与完整扶强材极限承载力之间比值的公式 $f(\beta, \lambda, DOV)$, 见表4。

表4 损伤扶强材极限承载力系数拟合公式

Tab.4 Theoretical formula of damage stiffened plates

损伤	$f(\beta, \lambda, DOV)$
凹陷	$f = 0.8419\beta + 1.085\lambda - 0.1306\beta^2 - 2.113\lambda\beta + 3.625\lambda^2 + 0.2858\lambda\beta^2 + 0.6818\lambda^2\beta - 4.752\lambda^3$
断裂	$f = 0.3511\beta + 0.876\lambda - 0.06795\beta^2 - 0.04463\lambda\beta$
腐蚀	$f = -1.0421 - 0.93475\beta + 7.2705\lambda - 4.2672\lambda\beta + 4.2518\lambda^2 - 9.8608\lambda^3 - 2.3DOV$
断裂-凹陷	$f = 0.1945\beta + 1.486\lambda - 0.2142\lambda\beta - 0.02103\beta^2 - 0.4291\lambda^2$
凹陷-腐蚀	$f = -2.5705 + 1.5821\beta + 11.2582\lambda - 6.8039\lambda\beta + 6.8658\lambda^2\beta - 16.1613\lambda^3 - 0.44202DOV$
断裂-腐蚀	$f = -2.2686 + 1.3381\beta + 12.192\lambda - 6.815\lambda\beta + 7.5053\lambda^2\beta - 19.0607\lambda^3 - 2.7823DOV$
凹陷-断裂-腐蚀	$f = -0.15774 - 0.067794\beta + 6.0144\lambda - 0.027789\lambda\beta - 10.1238\lambda^2 + 5.4903\lambda^3 - 1.8494DOV$

注: β 、 λ 分别为板的柔度系数和筋的柔度系数; DOV 为腐蚀体积损失率,公式详见式(1)。

拟合公式的验证精度见表5。 R 方是决定系数,用来衡量自变量对因变量的解释程度。其取值范围是0到1,数值越高表示模型对数据的拟合程度越好;RMSE提供了预测误差的尺度,与实际数据的单位相同。较小的RMSE值表示预测与实际值之间的差异较小,表明模型表现较好。

表5 拟合公式的精度

Tab.5 Accuracy of fitting formulas

拟合精度参数	凹陷	断裂	腐蚀	凹陷-断裂	凹陷-腐蚀	断裂-腐蚀	凹陷-断裂-腐蚀
R 方	0.98	0.95	0.83	0.96	0.92	0.97	0.96
RMSE	0.023	0.044	0.032	0.049	0.019	0.008	0.009

为了检验回归公式的拟合质量,取10个同种损伤扶强材的计算结果进行公式拟合,然后再用余下的扶强材计算结果进行检验。检验结果见表6。

表6 回归公式验证

Tab.6 Validation of regression formula

损伤类型	编号	有限元(损伤/完整)	公式预测值(损伤/完整)	误差/%
凹陷	T-12	0.87	0.81	6
	T-18	0.79	0.81	2
断裂	T-12	0.84	0.84	0
	T-18	0.70	0.63	10
腐蚀	T-12	0.85	0.91	-8
	T-18	0.77	0.79	-3
凹陷-断裂	T-12	0.78	0.75	4
	T-18	0.72	0.65	10

续表 6

损伤类型	编号	有限元 (损伤/完整)	公式预测值 (损伤/完整)	误差/%
凹陷-腐蚀	T-12	0.83	0.80	4
	T-18	0.62	0.66	-7
断裂-腐蚀	T-12	0.64	0.61	4
	T-18	0.61	0.57	6
凹陷-断裂-腐蚀	T-12	0.63	0.60	4
	T-18	0.57	0.61	-7

由表 6 中的误差项可以看出, 拟合公式的预测值与有限元分析计算值相比, 误差较小, 两组数据的误差在 10% 之内, 可见回归公式精确度较高。

把受压单元损伤折减后的临界应力 σ_{ult}^c , 即回归公式所求损伤后扶强材单元的极限强度替代单元梁柱屈曲临界应力 σ_{C1} , 代入扶强材的应力-应变关系^[19], 计算单元循环加载后的应力-应变关系, 具体公式为

$$\sigma_{CR1} = \Phi \sigma_{ult}^c \frac{A_s + A_{pE}}{A_s + A_p} \quad (2)$$

式中: σ_{CR1} 为单调加载后的单元应力; Φ 为边缘函数; A_s 为加强筋的横截面面积; A_{pE} 为带板宽度为 A_s 的净剖面面积; A_p 为单元的净剖面面积; σ_{ult}^c 为损伤折减后的单元梁柱屈曲临界应力。

根据式(2)得出不同组合损伤下扶强材单元的应力-应变关系, 以 T-1 模型为例, 其组合损伤模型的应力-应变曲线见图 4。其中, 完整扶强材-CSR 曲线为依据规范^[19]得到的完整扶强材的应力-应变曲线, 理论曲线为本文回归推导出的组合损伤下扶强材的应力-应变曲线, 有限元曲线为使用 ABAQUS 分析计算组合损伤模型得到的应力-应变曲线。

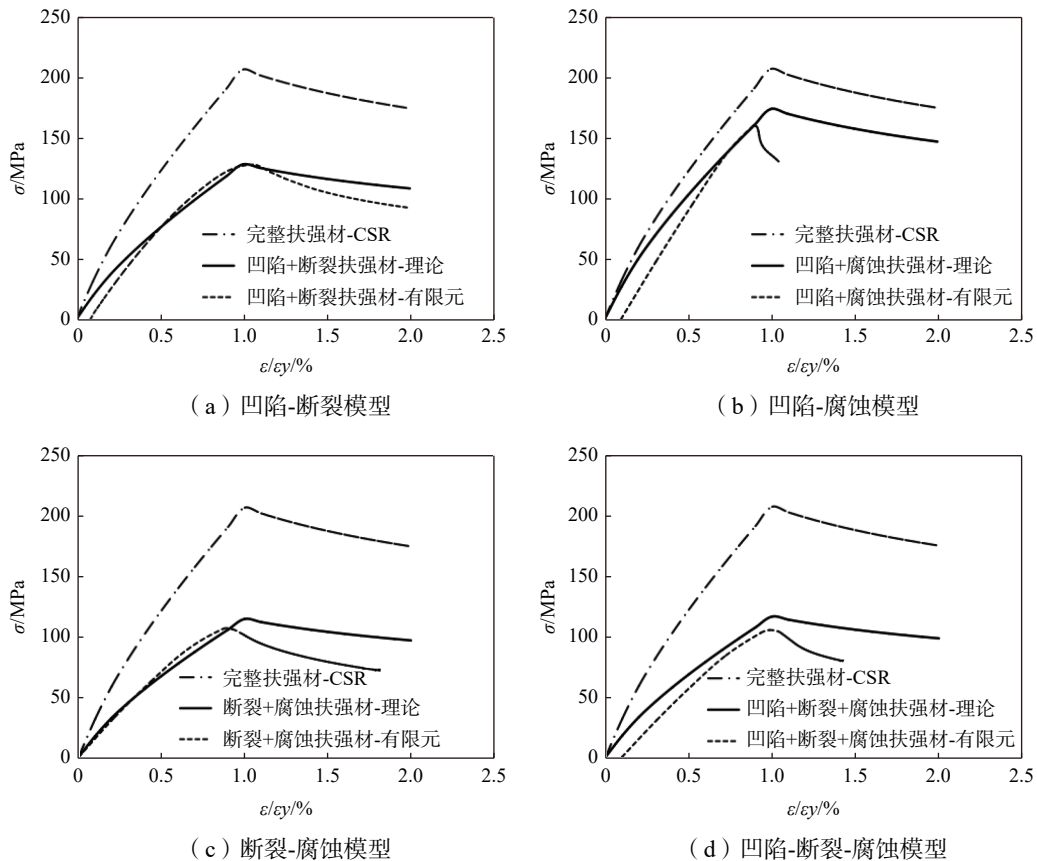


图 4 各种损伤模式模型应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of various damage models

由图 4 可得完整扶强材^[19]、损伤扶强材理论和有限元方法的端缩曲线的趋势相同。相比于完整扶强材极值, 损伤扶强材理论极值和损伤扶强材有限元极值降低了许多, 理论值与有限元值更加接近。

3 损伤船体梁极限弯矩计算的逐步迭代法

基于本文的组合损伤扶强材单元的应力-应变关系, 结合逐步迭代法, 进行多种损伤模式组合的船体梁极限弯矩计算, 并与有限元方法进行了对比。

3.1 损伤船体梁的逐步迭代法计算步骤

(1) 按照 CCS 规范^[13], 把船体梁的横截面划分为扶强材单元、横向加筋板单元和硬角单元; 按照划分单元的规则, 有序划分单元并编号;

(2) 计算在静力加载作用下船体梁横截面的形心坐标, 给船体梁设定一个微小的初始纵向弯曲曲率;

(3) 根据横截面上各单元距离形心轴的距离, 计算出各个单元此时的应变, 然后根据第 2 节构造的组合损伤单元的应力-应变关系得到此时各单元的应力, 对于受拉构件、硬角单元以及未损伤构件等的应力-应变关系, 仍沿用 CCS 的规范定义^[19], 将所有单元的应力与面积相乘即可得出船体梁此时的轴力;

(4) 由于应力-应变为非线性关系, 每一步计算中在船体梁横截面上的单元引起的应力分布会导致中和轴位置的变化。要实现截面拉压力的平衡, 需要调整其截面中和轴的位置, 才可能再次满足平衡状态; 根据新的形心轴位置对船体梁横截面上的单元进行计算, 求得截面弯矩;

(5) 当完成一次计算之后, 在之前曲率的基础上增加一个曲率增量, 返回到步骤(3)进行新一轮的计算, 如此进行循环计算, 直至计算的曲率达到要求的卸载曲率。通过多次计算得到多对数据, 每对数据即表示一个曲率 and 对应弯矩, 将这些数据在直角坐标系中汇点连线即得到船体梁的弯矩-曲率曲线, 该曲线的峰值点即为对应的船体梁极限弯矩。

3.2 实例计算

针对表 7 所示的集装箱船和散货船, 使用 ABAQUS 软件建立船舯两个强横梁之间的单跨有限元模型。该模型采用 4 节点板壳单元, 其中网格划分按照腹板和带板为板单元、翼缘为梁单元来划分。单元划分和边界条件选取等均按照规范^[19]进行, 有限元模型如图 5 所示。用已编制的船体梁极限弯矩 Visual Basic 程序, 对船体梁进行建模与计算, 具体界面如图 6 所示。

表 7 集装箱船船型参数

Tab.7 Type parameters of Container ship

船体	总长/m	型宽/m	型深/m
集装箱船	335	48.6	27.2
散货船	335	36	18.3

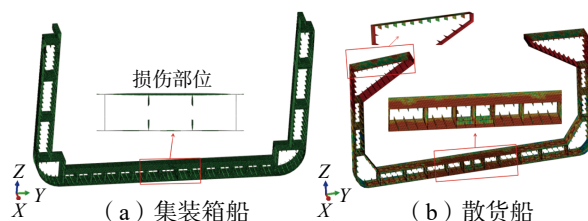


图 5 船体梁有限元模型

Fig.5 Finite element models of hull girder

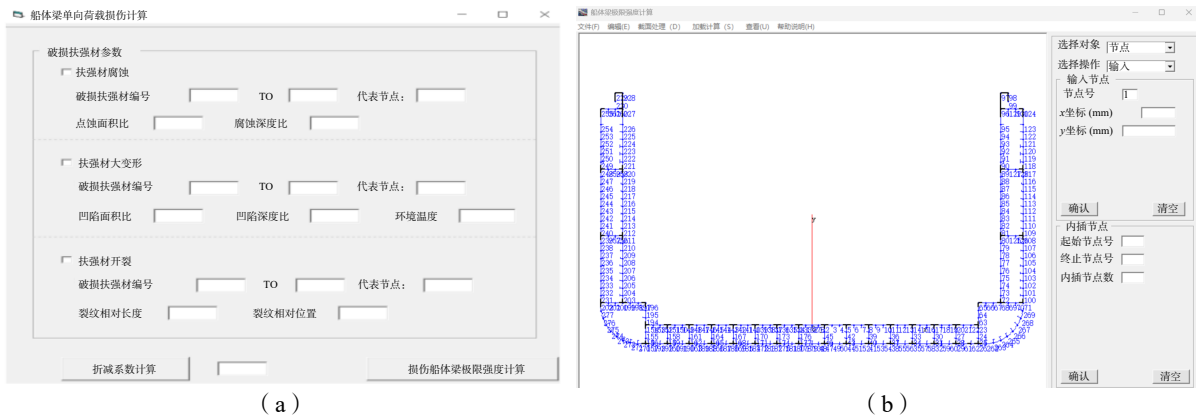


图 6 船体梁模型程序示意图

Fig.6 Schematic diagram of hull girder model program

对于集装箱船,内、外底板处分别设置了两种单一损伤凹陷扶强材单元,各占内、外底板扶强材单元总数 35.5% 的 11 个加强筋腹板断裂单元和 11 个变形量为 $6a/1000$ (a 为一跨加强筋跨长) 的凹陷单元,同时,在相同位置和数量上设置了凹陷-断裂损伤和断裂-腐蚀损伤的两种组合损伤扶强材单元,腐蚀的 DOV 为 12%,如图 5(a)所示。

对于散货船,将甲板上所有的 22 个扶强材都设为损伤单元,在内、外底板上设有占内、外底板扶强材单元总数的 46% 的 12 个损伤扶强材单元,损伤设定为凹陷-断裂损伤和断裂-腐蚀损伤两种组合损伤(损伤程度同集装箱船),如图 5(b)所示。

对船体梁进行单次静力加载,算得该荷载下的船体梁弯矩-曲率曲线。以凹陷-断裂船体梁为例,其弯矩-曲率曲线如图 7 所示。

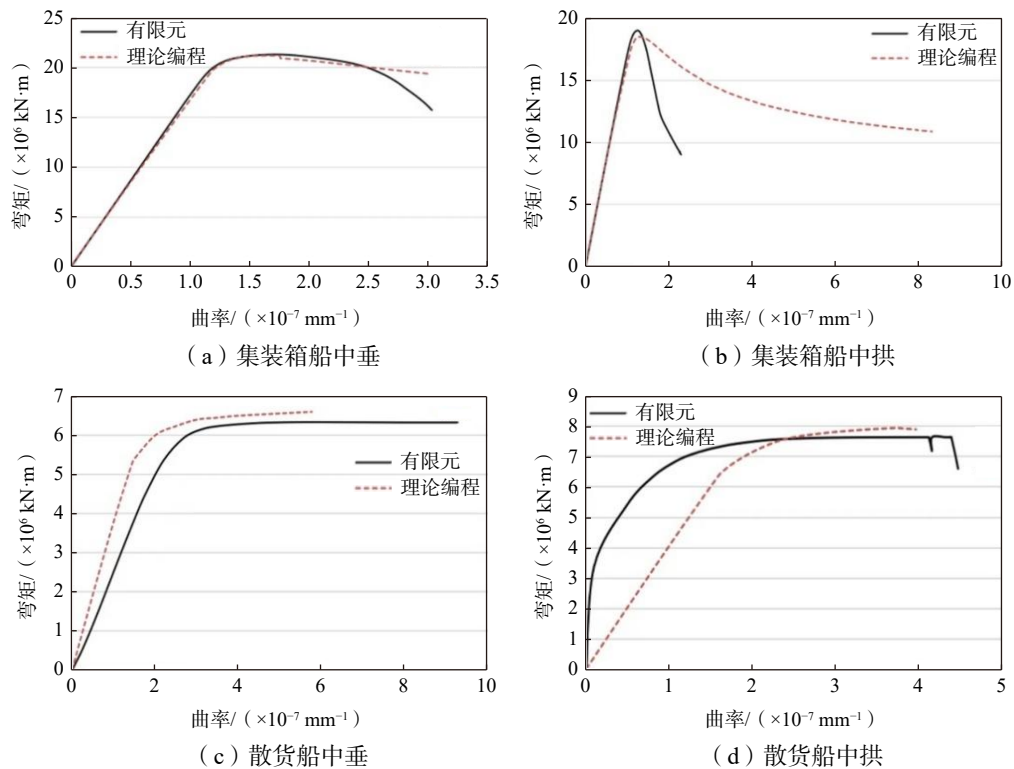


图 7 局部凹陷-断裂船体梁的曲线

Fig.7 Curve of locally dented and fractured hull girder

分别把中拱、中垂工况下的极限弯矩结果进行汇总对比,结果如表8所示。

表8 各种损伤模式的极限弯矩

Tab.8 Ultimate bending moment of various damage modes

船型	损伤	工况	有限元法/($\times 10^6$ kN·m)	理论编程/($\times 10^6$ kN·m)	理论编程/有限元法
集装箱船	完整	中垂	21.71	21.33	0.98
	完整	中拱	18.71	18.64	0.99
	凹陷	中垂	20.62	20.18	0.98
	凹陷	中拱	16.57	16.84	1.01
	断裂	中垂	20.01	20.18	1.01
	断裂	中拱	15.94	16.80	1.05
	凹陷-断裂	中垂	21.29	21.19	0.99
	凹陷-断裂	中拱	19.03	18.48	0.97
	断裂-腐蚀	中垂	19.49	21.19	1.09
	断裂-腐蚀	中拱	16.60	17.67	1.06
散货船	完整	中垂	6.28	6.18	0.98
	完整	中拱	8.31	8.07	0.97
	凹陷-断裂	中垂	6.33	6.60	1.04
	凹陷-断裂	中拱	7.64	7.93	1.04
	断裂-腐蚀	中垂	5.34	5.36	1.01
	断裂-腐蚀	中拱	7.43	7.76	1.04

由表8可以得到:1)损伤均会降低船体梁的极限弯矩,理论结果与有限元结果吻合较好,差值在5%左右;2)集装箱船体梁模型中垂极限弯矩大于中拱极限弯矩,散货船中垂极限弯矩小于中拱极限弯矩;3)凹陷单元造成的极限弯矩下降小于腹板断裂造成的折减。

4 结 论

本文进行了轴压作用下多种损伤模式扶强材的极限强度研究。构造了凹陷、断裂、腐蚀组合下的多种损伤模式的加筋板单元的端缩曲线,提出了轴压作用下的损伤船体梁极限弯矩计算的逐步迭代法,并与有限元结果进行了对比。主要结论如下:

(1)断裂、凹陷和腐蚀等组合损伤均会降低加筋板的极限强度。其中,凹陷损伤对于组合缺陷模型极限强度的影响小;而凹陷、断裂和点蚀组合对结构的极限承载能力削弱较大,对于加强筋腹板断裂、变形量为 $6a/1000$ (a 为一跨加强筋跨长)的凹陷、 DOV 为12%腐蚀的组合损伤模型,其极限承载能力较完整模型结果平均下降54%。

(2)带板柔度系数 β 变化对组合损伤模型极限强度退化有显著影响,带板长细比越大,极限强度退化越严重。相比之下,加强筋类型对组合损伤加筋板结构极限强度的退化程度影响不大。

(3)本文提出的计及各种损伤的船体梁逐步迭代法计算方便,其结果与有限元法误差在10%左右,可应用于老旧船舶极限弯矩的评估。

参 考 文 献:

- [1] Tekgoz M, Garbatov Y, Guedes Soares C. Review of ultimate strength assessment of ageing and damaged ship structures[J]. Journal of Marine Science and Application, 2020, 19(4): 512-533.
- [2] DNV. Allowable thickness diminution for hull structure[S]. 2013.

- [3] Wang Renhua, Lin Shouyi. On the effect of pit shape on pitted plates, Part I: Tensile behavior due to artificial corrosion pits[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 236: 108754.
- [4] Xu S, Wang H, Li A, et al. Effects of corrosion on surface characterization and mechanical properties of butt-welded joints[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 126: 50–62.
- [5] Zhang Jing, Shi Xinghua, Guedes Soares C. Experimental analysis of residual ultimate strength of stiffened panels with pitting corrosion under compression[J]. *Engineering Structures*, 2017, 152: 70–86.
- [6] Shi Xinghua, Zhang Jing, Guedes Soares C. Numerical assessment of experiments on the ultimate strength of stiffened panels with pitting corrosion under compression[J]. *Thin-Walled Structure*, 2018, 133: 52–70.
- [7] Cai Jie, Jiang Xiaoli, Lodewijks G. Numerical investigation of residual ultimate strength of dented metallic pipes subjected to pure bending[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2018, 13(5): 519–531.
- [8] 钟毅, 吕岩松, 刘旭. 含初始变形船体加筋板有效宽度及剩余极限强度研究[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(2): 43–47.
Zhong Yi, Lü Yansong, Liu Xu. Study on effective width and residual ultimate strength of stiffened plates of ship hull with initial deformation[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(2): 43–47. (in Chinese)
- [9] 胡康, 杨平, 夏添, 等. 组合初始缺陷对裂纹板极限强度的影响分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(7): 98–103.
Hu Kang, Yang Ping, Xia Tian, et al. Influence analysis of combined initial imperfection on ultimate strength of cracked plates[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(7): 98–103. (in Chinese)
- [10] Jeom K P, Satish Kumar Y V, Lee J M. Ultimate strength of cracked plate elements under axial compression or tension[J]. *Thin-Walled Structures*, 2005, 43: 237–272.
- [11] 袁园, 黄小平. 屈强比对裂纹板极限强度的影响[J]. *船舶力学*, 2015, 19(Z1): 115–125.
Yuan Yuan, Huang Xiaoping. Effect of yield-tensile strength ratio on the ultimate strength of cracked plate[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(Z1): 115–125. (in Chinese)
- [12] 张婧, 石晓彦, 施兴华, 等. 含裂纹加筋板在压缩载荷下的剩余极限强度试验研究[J]. *船舶力学*, 2018, 22(2): 189–197.
Zhang Jing, Shi Xiaoyan, Shi Xinghua, et al. An experimental study on ultimate strength of cracked welded steel stiffened panels under axial compressive loading[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(2): 189–197. (in Chinese)
- [13] 中国船级社. 钢质海船入级规范[S]. 北京: 人民出版社, 2021.
CCS. Rules for classification of sea-going steel ships[S]. Beijing: People's Publishing House, 2021. (in Chinese)
- [14] 张婧, 施兴华, 顾学康. 具有初始缺陷的船体加筋板结构在复杂受力状态下的极限强度研究[J]. *中国造船*, 2013, 54(1): 60–70.
Zhang Jing, Shi Xinghua, Gu Xuekang. Ultimate strength study of stiffened plate under complex loading with initial imperfections[J]. *Shipbuilding of China*, 2013, 54(1): 60–70. (in Chinese)
- [15] ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.14[M]. ABAQUS Standard: Vélizy-Villacoublay, 2014.
- [16] Nakai Tatsuuro, Matsushita Hisao, Yamamoto Norio, et al. Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report)[J]. *Marine Structures*, 2004, 17(5): 403–432.
- [17] Huang Yi, Zhang Yan, Liu Gang, et al. Ultimate strength assessment of hull structural plate with pitting corrosion damnification under biaxial compression[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(17/18): 1503–1512.
- [18] Mai Weijie, Soghrati S, Buchheit R G. A phase field model for simulating the pitting corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2016, 110: 157–166.
- [19] 王仁华, 刘耀阳. 加筋板的轴压强度受加筋随机点蚀的影响研究[J]. *海洋工程*, 2023, 41(4): 159–167.
Wang Renhua, Liu Yaoyang. Study on effect of random pitting corrosion of stiffeners on compressive strength of stiffened plates[J]. *The Ocean Engineering*, 2023, 41(4): 159–167. (in Chinese)
- [20] Wang R H, Shenoï R A, Sobey A. Ultimate strength assessment of plated steel structures with random pitting corrosion damage[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 143: 331–342.