

文章编号: 1007-7294(2026)01-0089-15

基于谱分析的船型网箱疲劳裂纹 扩展分析及剩余寿命预测

刘安民¹, 谢凌俊¹, 苏一鸣¹, 张正艺², 曹海鹏¹, 何文涛¹

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 武汉 430074)

摘要: 基于断裂力学的大型海洋结构物的疲劳裂纹扩展分析过程复杂、计算效率低。本文借鉴传统 S-N 曲线方法计算疲劳寿命的基本思想, 构造了应力强度因子传递函数, 提出了一种基于谱分析的海洋结构物疲劳裂纹扩展分析方法。结合 Python 编程语言以及 SESAM、ABAQUS 和 FRANC3D 计算软件, 开发了高效的裂纹自动扩展程序; 实现了基于谱分析的大型复杂海工结构疲劳裂纹扩展分析和剩余寿命预测。本文应用多尺度子模型技术, 实现了模型从壳体到实体的转变, 从而解决了大尺度结构与小尺寸裂纹融合的难题。采用自开发的疲劳裂纹自动扩展程序系统分析了疲劳热点(D1、D2、D3)结构形式与位置、初始裂纹尺寸、初始裂纹形状对裂纹扩展行为与疲劳寿命的影响——裂纹尺寸在服役时呈指数级增加。同一节点的应力强度因子传递函数形状相似, 但不同节点差异较大。D1、D2、D3 疲劳寿命分别为 11.3 年、17.3 年与 33.1 年; 其中初始裂纹尺寸对疲劳寿命影响显著, 而初始裂纹长深比对裂纹扩展过程影响较大, 对疲劳寿命影响较小。

关键词: 断裂力学法; 疲劳裂纹扩展; 疲劳寿命预测; 谱分析; 船型网箱

中图分类号: U661.43 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.01.010

Fatigue crack propagation analysis and remaining life prediction of ship-shaped net cages based on spectral analysis

LIU An-min¹, XIE Ling-jun¹, SU Yi-ming¹, ZHANG Zheng-yi², CAO Hai-peng¹, HE Wen-tao¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The fatigue crack propagation analysis process of large ocean structures based on fracture mechanics is complex and computationally inefficient. This paper draws on the basic idea of the traditional S-N curve method for calculating fatigue life, constructs a stress intensity factor transfer function, and proposes a spectrum-based fatigue crack propagation analysis method for ocean structures. By combining the Python programming language with SESAM, ABAQUS, and FRANC3D calculation software, an efficient automatic crack propagation program was developed to achieve fatigue crack propagation analysis and residual life prediction of large and complex marine structures based on spectrum analysis. A multi-scale sub-model technology was used to realize the transformation of the model from the shell to the solid, solving the problem of the fusion of large-scale structures and small-sized cracks. Using the self-developed automatic crack propagation program system, the influence of fatigue hotspot (D1, D2, D3) on crack propagation behavior and fatigue life was analyzed and it was found that the crack size increases exponentially during

收稿日期: 2025-07-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071308)

作者简介: 刘安民(2001-), 男, 硕士; 何文涛(1986-), 男, 教授, 通讯作者, E-mail: hewentao@ouc.edu.cn。

service. The stress intensity factor transfer function has a similar shape for the same node, but varies significantly between different nodes. The fatigue lives of D1, D2, and D3 are 11.3 years, 17.3 years, and 33.1 years, respectively. The initial crack size has a significant effect on fatigue life, and the crack length-to-depth ratio has a greater impact on the crack propagation process than on fatigue life.

Key words: fracture mechanics; fatigue crack propagation; fatigue life prediction; spectral analysis; ship-shaped net cages

0 引言

疲劳失效是海洋结构物最主要的失效类型^[1-2],尤其是大型和使用高强钢的海洋结构物,在其服役期间会遭受高达 10^8 数量级的波浪载荷,疲劳问题尤为突出。采用合理的疲劳评估方法不仅可以准确地进行海洋结构物寿命预报,还可以提高疲劳裂纹扩展分析的效率。

S-N 曲线法是目前主流的疲劳评估方法^[3-4],但存在无法考虑初始缺陷、载荷顺序等不足,而使用断裂力学进行疲劳评估会得到更精确的结果^[5]。余立^[6]对典型海洋用钢 EQ70 展开了裂纹尖端张开位移(CTOD)的相关研究,认为 CTOD 实验是研究海洋工程用钢的最佳方法。He 等^[7]利用 CT 试样对 Q345 钢的高载迟滞效应展开了详细的研究,实现基于有限元方法(Finite Element Method, FEM)的裂纹扩展模拟。何文涛^[8]利用有限元软件 ABAQUS 及脚本程序 Python 开发了基于壳单元的船体结构疲劳裂纹扩展系统,为船舶与海洋工程结构物疲劳裂纹扩展的研究提供了新思路。

断裂力学方法的理论和计算不仅复杂繁琐,且应用往往受到限制。此外,海洋结构物尺寸巨大、结构多样、载荷复杂,使得基于谱分析方法的疲劳裂纹扩展分析与寿命预测面临诸多难题,如大尺度模型与小裂纹融合问题^[20],以及边界条件与疲劳载荷的获取与施加问题,水动力计算软件到裂纹扩展软件的转化问题等。黄小平课题组^[9-13]针对海洋结构物的疲劳裂纹扩展和疲劳寿命预测进行了研究,对基于断裂力学的谱分析方法等开展了研究。王小松^[14]以在役 FPSO 为对象,进行了多种规范之间的比较,该研究对营运安全具有指导意义,但仅采用无裂纹模型模拟,未能有效反映裂纹厚度方向的真实应力,精度有待提高。

为此,本文结合谱分析方法与断裂力学方法,开发了一套高效的裂纹自动扩展程序,采用多尺度子模型技术,将应力强度因子与谱分析结合,实现了从水动力分析软件到通用有限元软件再到裂纹扩展软件,从而对复杂海况下的大型海洋结构物进行高效疲劳寿命预测。此外,还对疲劳热点的结构形式与位置、初始裂纹尺寸、初始裂纹形状对裂纹扩展行为与疲劳寿命的影响进行了参数化分析。

1 谱分析原理和断裂力学

谱分析方法中,海洋结构物被认为是线性系统,而且应力与应力强度因子(SIF)之间亦为线性关系,如图1所示。谱分析方法通过传递函数对响应谱密度函数求解。相较于 S-N 曲线的方法,断裂力学需

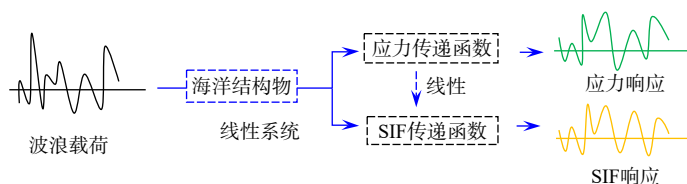


图1 载荷输入和结构响应的线性传递

Fig.1 Linear transfer of load input and structural response

要对 SIF 进行计算,且有

$$G_{\text{sif}}(w) = H_{\text{sif}}^2(w) \times G_{\text{wave}}(w) \quad (1)$$

$$G_{\text{wave}}(w) = \frac{H_s^2}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 w^{-5} \exp \left(-\frac{1}{\pi} \times \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 w^{-4} \right) \quad (2)$$

其中, $G_{\text{sif}}(w)$ 为 SIF 响应谱密度函数, $H_{\text{sif}}(w)$ 为 SIF 传递函数, 通过海洋结构物在波浪中的结构响应计算所得。波浪谱 $G_{\text{wave}}(w)$ 为 ISSC 推荐的双参数 P-M 谱^[15]。 w 为波频, H_s 为有效波高, T_z 为跨零周期。

如此可得到 SIF 响应谱的 n 阶谱矩 m_n 为

$$m_n = \int_0^\infty w^n \times G_{\text{sif}}(w) dw \quad (3)$$

SIF 传递函数 $H_{\text{sif}}(w)$ 是频率相关的函数, 由离散的应力强度因子 K_i 组成。波浪载荷作用下的船体响应包括实部与虚部两部分, 因此 K_i 同样为实部与虚部两部分的叠加。

$$K_i = \sqrt{K_{\text{real_eq}}^2 + K_{\text{ima_eq}}^2} \quad (4)$$

其中, $K_{\text{real_eq}}$ 和 $K_{\text{ima_eq}}$ 分别为实部等效 SIF 和虚部等效 SIF。SIF 按其受力形式可区分为 K_I (model I, 张开型), K_{II} (model II, 滑开型) 以及 K_{III} (model III, 撕开型) 三种类型, 在其共同作用下有

$$K_{\text{real_eq}} = \sqrt{K_{\text{real_I}}^2 + K_{\text{real_II}}^2 + (1 + \nu) K_{\text{real_III}}^2} \quad (5)$$

$$K_{\text{ima_eq}} = \sqrt{K_{\text{ima_I}}^2 + K_{\text{ima_II}}^2 + (1 + \nu) K_{\text{ima_III}}^2} \quad (6)$$

其中, ν 为泊松比。

将波视为窄带高斯过程, 把海洋结构物这一线性系统上的 SIF 响应也视为窄带高斯过程, 并认为 SIF 幅值 K 的分布满足瑞利分布, 其概率密度函数 $F(K)$ 为

$$F(K) = \frac{K}{\sigma_K^2} \exp \left(-\frac{K^2}{2\sigma_K^2} \right) \quad (7)$$

SIF 范围 ΔK 是 SIF 幅值的两倍, 即 $\Delta K = 2 \times K$, 则 SIF 范围的概率密度函数为

$$F(\Delta K) = \frac{\Delta K}{4\sigma_K^2} \exp \left(-\frac{\Delta K^2}{8\sigma_K^2} \right) \quad (8)$$

其中, 瑞利分布参数 σ_K 表示为

$$\sigma_K = \sqrt{m_0} \quad (9)$$

并且, 其平均过零率 f_0 可表示为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (10)$$

对于裂纹稳定扩展阶段, 扩展模型为如下 Paris 模型

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (11)$$

其中, $\frac{da}{dN}$ 为裂纹扩展速率, C 和 m 为材料参数, ΔK_{eff} 为有效 SIF 范围。

单一短期海况下的裂纹扩展增量 $E(da)$ 根据下式进行计算

$$E(da_i) = C \frac{\Delta T_i}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2i}}{m_{0i}}} \left\{ \int_0^\infty C K_{\text{eff}}(x)^m \times f_{i\Delta K}(x) dx \right\} \quad (12)$$

其中, ΔT_i 为第 i 段短期海况下的持续时间, f_i 为对应海况下的平均过零率。

2 疲劳裂纹扩展实现

2.1 裂纹扩展实现流程

基于谱分析的疲劳裂纹扩展涉及到结构响应分析、含裂纹模型的建立和 SIF 求解等, 流程复杂且

计算繁琐。为了提高计算效率,本文采用多尺度子模型技术开发了自动裂纹扩展程序,其流程图如图2所示,步骤如下:

(1) 利用 SESAM 软件进行海洋结构物建模(壳单元)、频域内的水动力分析以及模型的整体结构响应分析,筛选出容易发生疲劳失效的关键节点(D1, D2, D3)。在 SESAM 中保留局部模型和边界节点位移并细化网格,进行局部子模型结构应力分析,如图3所示。在进行整体响应分析时,对整体模型进行六自由度约束(约束三个点,分别为 xyz 约束, xy 约束和 x 约束)。

(2) 以 SESAM 中的局部模型为基础,在 ABAQUS 软件中构建壳-实体耦合模型。在建立壳-实体模型时,使用“Shell to Solid”约束完成壳单元和实体单元之间的耦合,如图4所示。实体模型网格尺寸根据裂纹尖端应力梯度如下设定:裂纹前沿采用六面体单元,尺寸为初始裂纹深度的 $1/10(0.1\text{ mm})$;周边区域采用过渡网格,尺寸从 0.1 mm 渐变至 2 mm ,以确保计算精度与效率的平衡。子模型边界节点位移通过 SESAM 导出,并传递至实体模型。最后,通过 FRANC3D 在裂纹扩展区域中完成裂纹插入与网格重划分后,裂尖区域采用四面体单元(尺寸为 0.05 mm),采用自适应网格技术,以确保裂纹扩展过程中网格质量满足 ΔK 计算要求,整体流程如图5所示。

(3) 在 ABAQUS 中完成含裂纹模型的有限元分析。

(4) 以 ABAQUS 软件有限元分析得到的位移场、应力场和应变场数据为基础,在 FRANC3D 软件中通过 M 积分计算裂纹尖端 SIF。

(5) 以应力强度因子为基础计算裂纹扩展增量,并更新裂纹,重复步骤(3)-(5)。

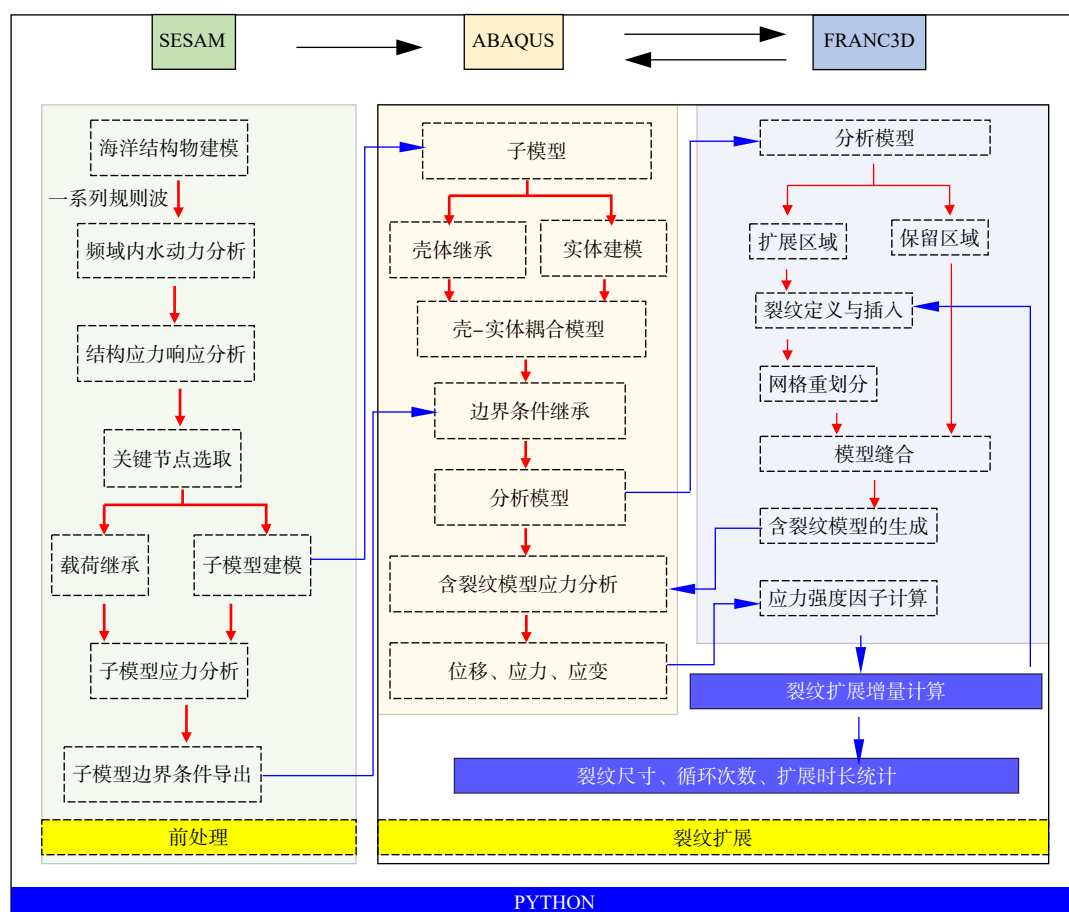


图2 疲劳裂纹扩展分析流程

Fig.2 Analysis process of fatigue crack propagation

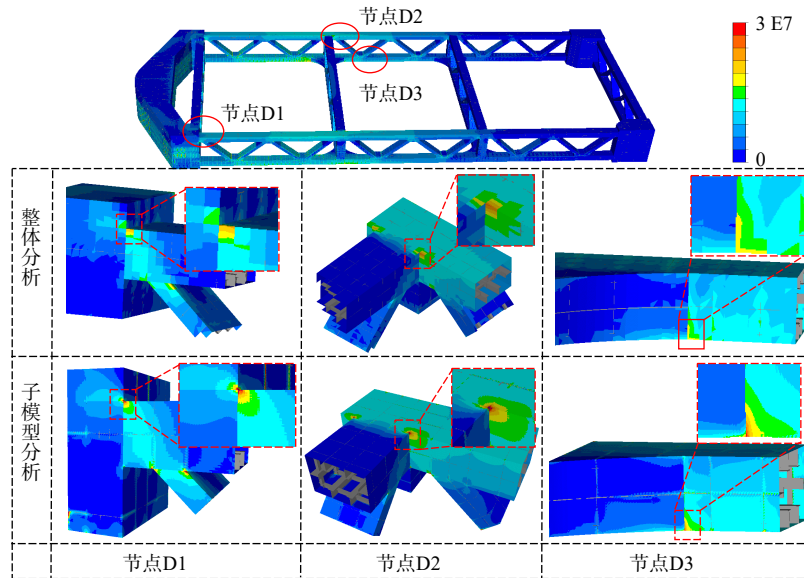


图 3 网箱局部应力响应及选取的关键节点

Fig.3 Local stress response of the cage and the selected key nodes

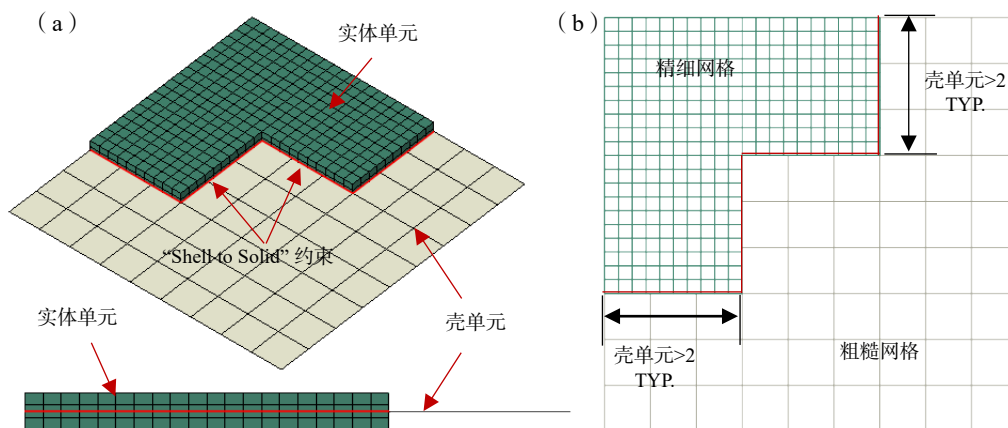


图 4 “Shell to Solid”界面约束

Fig.4 Interface constraints of 'Shell to Solid'

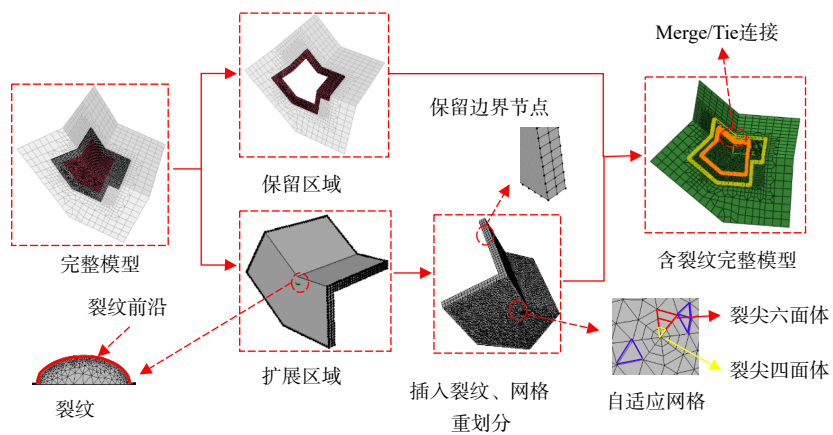


图 5 含裂纹模型生成

Fig.5 Crack-containing model generation

2.2 裂纹自动扩展程序

本文中裂纹扩展和 SIF 计算通过 FRANC3D 软件和 ABAQUS 之间的模型、载荷、计算结果传递和交互实现。为了实现基于谱分析的裂纹扩展和提高疲劳分析效率,本研究开发了一套裂纹扩展程序,以实现裂纹的自动高效扩展。

理论上,对海洋结构物遭受的每次海况都进行裂纹扩展和 SIF 的计算能够得到更为准确的结果,但此方法会导致计算时间大幅增加,计算效率严重降低。因此,本文提出当裂纹累积扩展增量 Δc 达到设定的更新阈值 c_{th} 时,才进行一次裂纹尺寸的更新。这不仅提高了疲劳分析效率,还能有效保证计算精度。另外,为了减少裂纹扩展分析的难度与计算量,并保证疲劳扩展分析与剩余寿命预测的精度,本文仅对裂纹深度与裂纹长度进行 SIF 传递函数与裂纹增量的计算。

综上,裂纹自动扩展程序的流程如图 6 所示,步骤如下:

(a) 利用双参数半椭圆裂纹进行裂纹的描述^[16-17]。初始化裂纹半长 a 、深度 c ,根据 ABS 的规定^[18],本文将初始裂纹定义为椭圆形裂纹,裂纹如图 7 所示。

(b) 在壳-实体耦合模型中,逐次施加某一浪向下所有不同频率的单位波幅规则波对应的边界条件,插入当前尺寸裂纹,并计算对应的 SIF,以此构建该裂纹尺寸以及该浪向下的 SIF 传递函数。

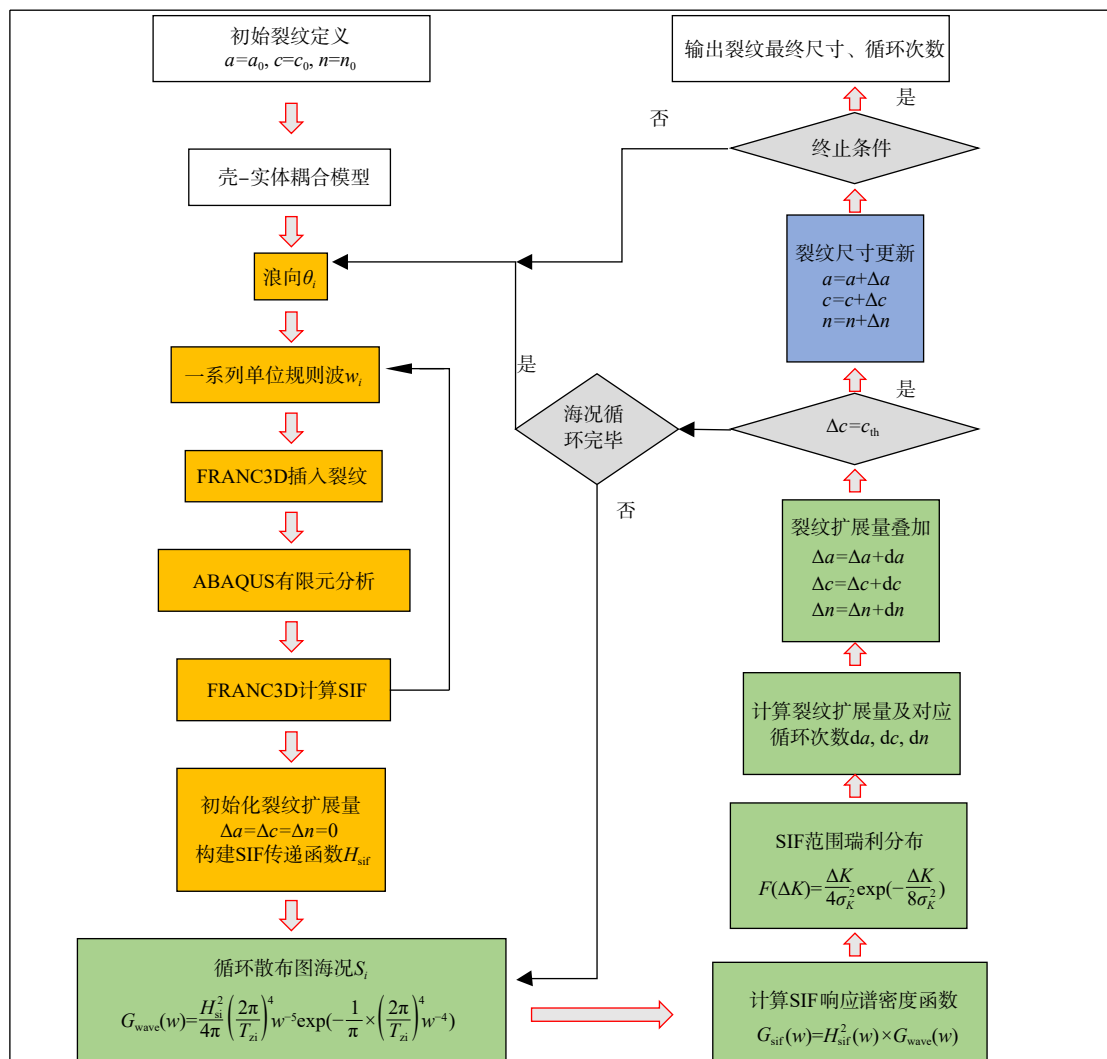


图 6 基于谱分析的疲劳裂纹自动扩展程序

Fig.6 Fatigue crack automatic extension program based on spectral analysis

(c) 根据 SIF 传递函数, 结合各短期海况的波浪谱, 计算各短期海况下裂纹扩展增量, 并进行叠加。

(d) 当该浪向下所有短期海况均已循环完毕或者达到裂纹更新阈值 c_{th} 时, 进行裂纹尺寸更新, 并重复步骤(b)、(c)、(d)。

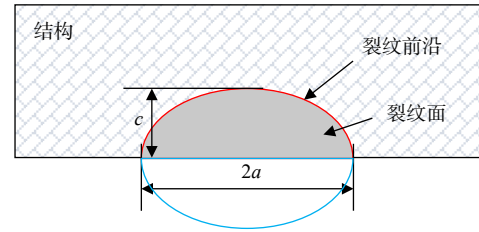


图 7 双参数半椭圆裂纹

Fig.7 Two-parameter semi-elliptical cracks

3 裂纹扩展分析和寿命预报

本部分将以典型节点 D3 为例对裂纹扩展过程中的 SIF、裂纹扩展形貌、SIF 传递函数和疲劳寿命预测进行分析。

3.1 应力强度因子

D3 节点疲劳裂纹扩展中裂纹前沿的各 SIF 分量如图 8 所示。其中 K_I 占等效力强度因子 K_{eq} 的 90% 以上, 对裂纹扩展起主导作用。因此, 该类裂纹以张开型裂纹为主, 说明计算中将裂纹视为平面裂纹的合理性, 也降低了有限元模型的复杂性和裂纹计算的难度。

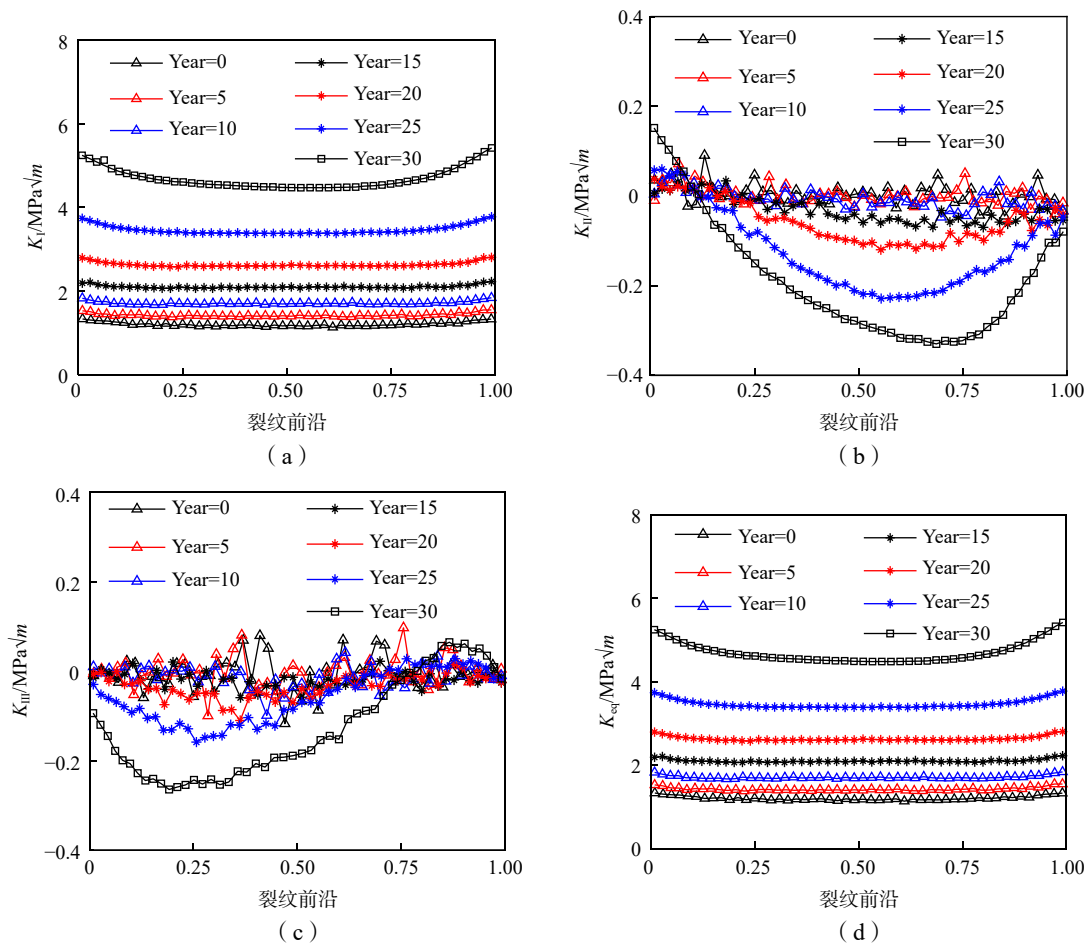


图 8 裂纹扩展过程中 SIF 变化 (D3)

Fig.8 Changes in SIF during crack propagation

3.2 裂纹扩展形貌

D3 节点扩展到第 0、5、10、15、20、25、30 年时的裂纹形貌如图 9 所示。第 0–5 年、第 5–10 年、第 10–15 年、第 15–20 年、第 20–25 年、第 25–30 年内裂纹深度扩展量分别为 0.165 mm、0.267 mm、0.465 mm、0.797 mm、1.699 mm 和 3.676 mm, a/c 逐渐增大。裂纹两端和前沿的应力集中随裂纹尺寸的增加而更为明显, 单位时间内的裂纹扩展量随时间推移而增大。综合图 8 可知, 等效应力强度因子随服役年限增加, 裂纹在服役期内呈指数级增长。

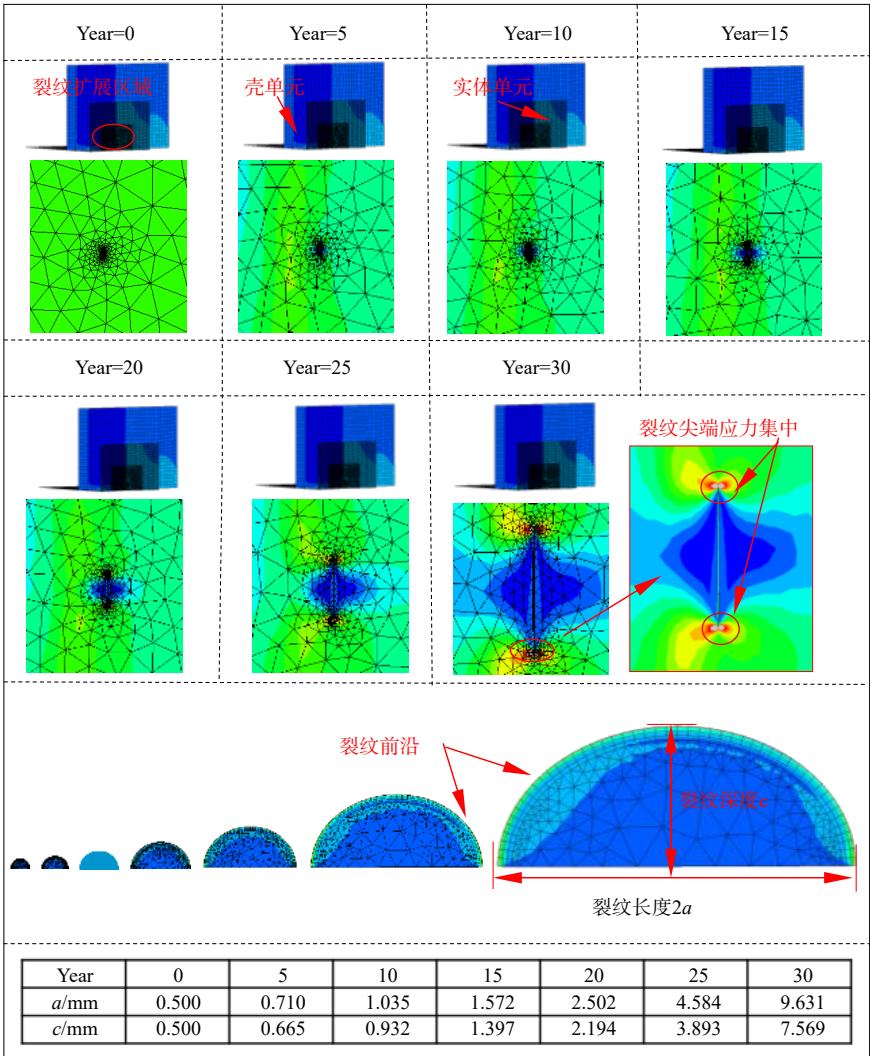


图 9 裂纹形貌变化
Fig.9 Variation of crack morphology

3.3 SIF 传递函数

图 10 为 D3 节点裂纹更新时不同尺寸的裂纹最深点和表面点的 SIF 传递函数。随着裂纹尺寸增加, 同一频率下的 SIF 增大。研究发现, 不同 SIF 传递函数的极大值与极小值对应的频率相同, 且函数形状相似。裂纹最深点和表面点的 SIF 传递函数相似。对于同一裂纹尺寸, SIF 随波浪频率变化。

由于模型采用单点系泊且忽略波浪扩散作用, 模型始终保持迎浪状态, 因此, 仅需计算 0° 浪向角下的波浪载荷。由图 9 可知, 对于同一结构, SIF 传递函数的差异只与裂纹尺寸相关。对于同一裂纹尺寸, 由式(12)可知, 波浪频率对裂纹扩展速率有显著影响。

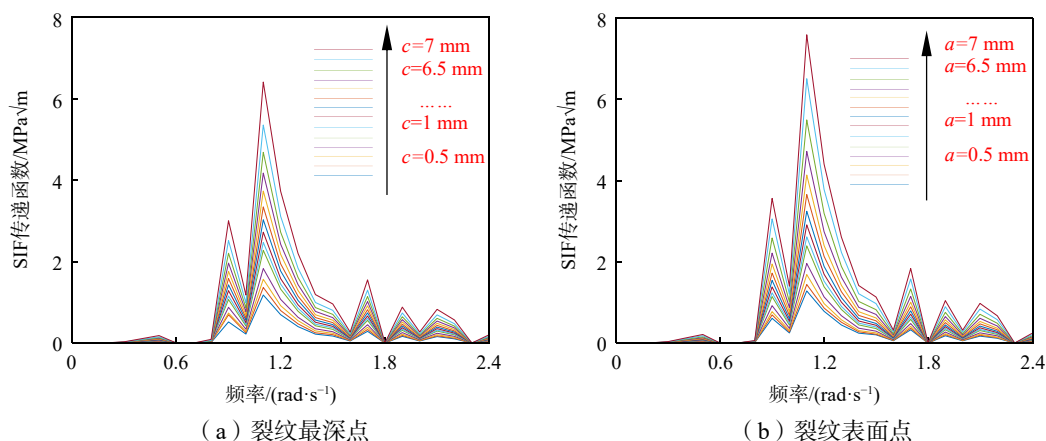


图 10 应力强度因子传递函数

Fig.10 Transfer function of SIF

3.4 寿命预测

如图 11 所示, 裂纹扩展寿命曲线呈现指数增大趋势, 当裂纹接近或穿透板厚时, 可认为结构达到疲劳失效, 当裂纹深度达到 50%、80% 和 100% 板厚时, 对应的疲劳寿命分别为 29.9 年、33.1 年与 34.2 年。研究表明, 若将 50% 板厚作为失效判定标准时, 疲劳寿命评估较为保守, 而裂纹深度由 80% 板厚扩展至 100% 板厚所需时间又极短, 且贯穿裂纹会导致结构强度严重降低。因此, 本文将 80% 板厚作为结构疲劳失效判定标准。

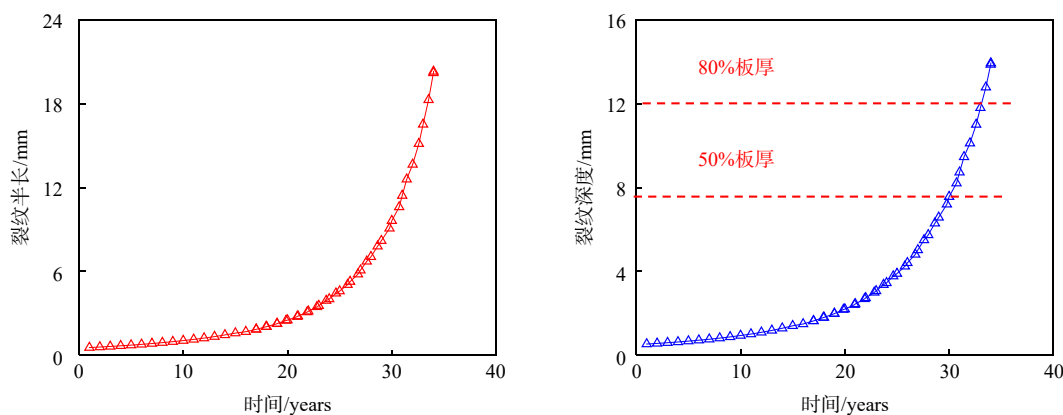


图 11 裂纹扩展寿命曲线

Fig.11 Life curve with crack propagation

4 参数化分析

为了进一步研究基于谱分析和断裂力学的海洋结构物疲劳性能, 本章将从不同节点、不同裂纹尺寸、不同初始裂纹长深比三个方面对裂纹扩展行为和疲劳寿命展开对比和分析。

4.1 疲劳热点

由于位置、结构形式的差异, 不同疲劳热点在遭受随机波浪载荷作用时, 其疲劳性能不同^[19]。因此本文对 D1、D2、D3 三处典型节点进行分析比较 (如图 12)。

(a) SIF 传递函数

图 13 所示为典型节点 D1、D2、D3 裂纹扩展中不同长度及深度的 SIF 传递函数。不同节点、不同方向对应的传递函数存在着明显的区别。SIF 传递函数是几何形状、裂纹尺寸和外部载荷的函数。不同节点的几何形状、承受的波浪力和波浪弯矩导致各节点传递函数在值的大小、极值点对应的频率上存在较大的差异。节点 D1、D3 在裂纹深度方向的传递函数的值均小于裂纹长度方向, 而节点 D2 则相反。

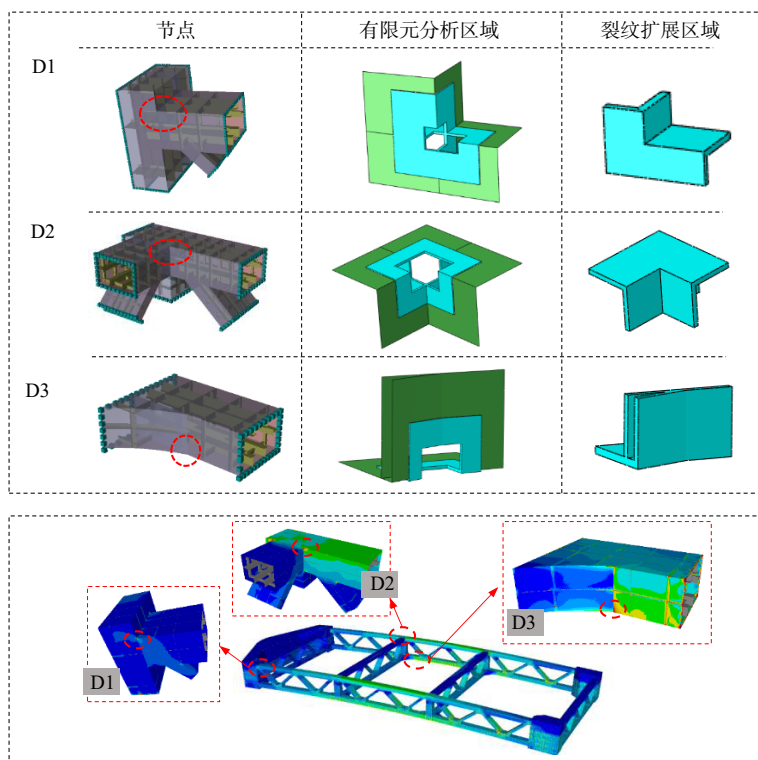
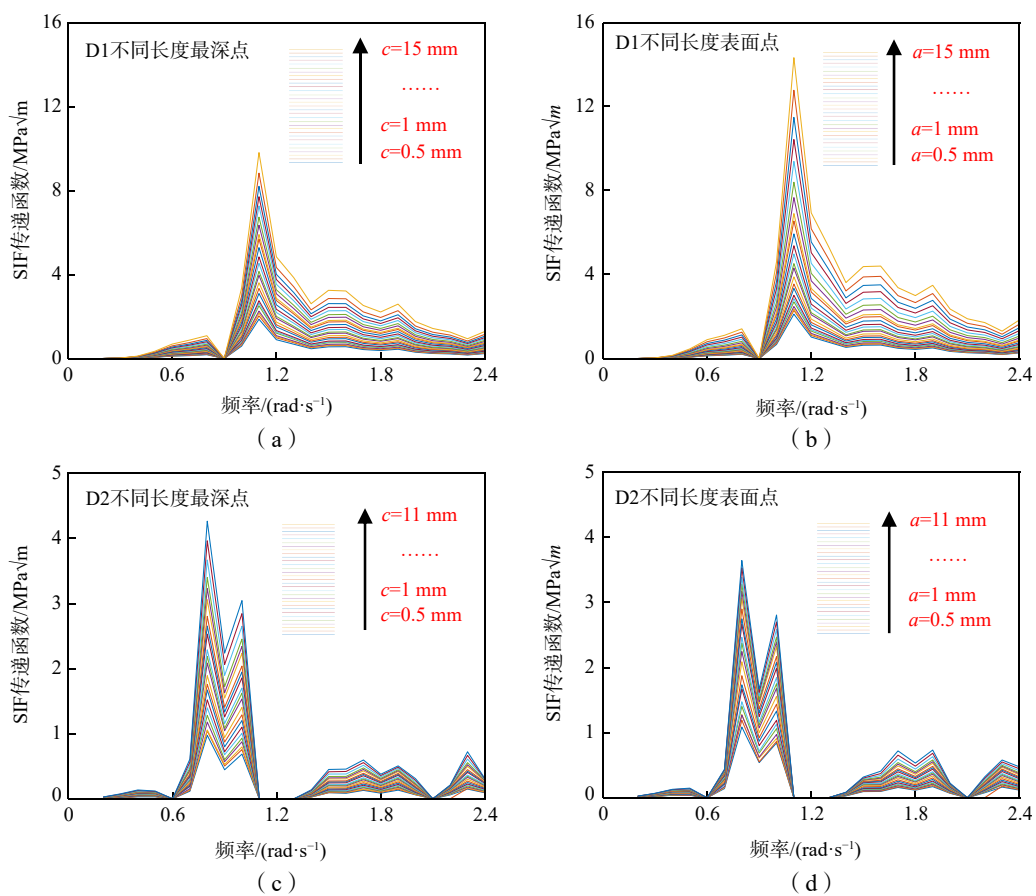


图12 典型节点具体分析模型

Fig.12 Analysis model of typical node



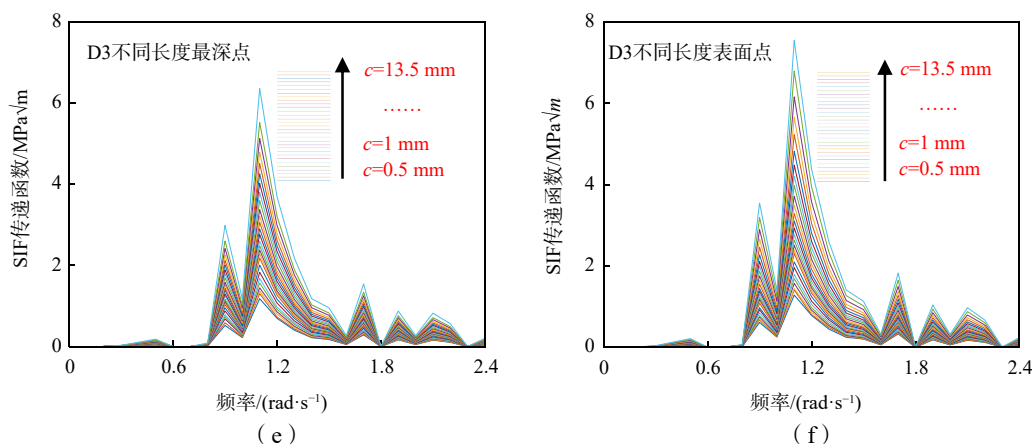


图 13 不同节点应力强度因子传递函数

Fig.13 Transfer function of SIF at different nodes

(b) 裂纹扩展

图 14 是裂纹长深比 a/c 在裂纹扩展过程中的变化。节点 D1、D3 的裂纹长深比在裂纹扩展的过程中不断变大, 最终扩展成裂纹半长为长轴的椭圆形裂纹。节点 D3 的裂纹长深比变化较为平缓, 节点 D1 的裂纹长深比变化较为显著, 其疲劳寿命较 D3 更短。节点 D2 的裂纹长深比先增大后减小, 最终形成以裂纹深度方向为长轴而裂纹长度方向为短轴的椭圆裂纹。图 15 为节点 D1、D2、D3 裂纹扩展过程中的有限元模型, 结构失效时裂纹长深比分别为 1.94、0.94 和 1.46。

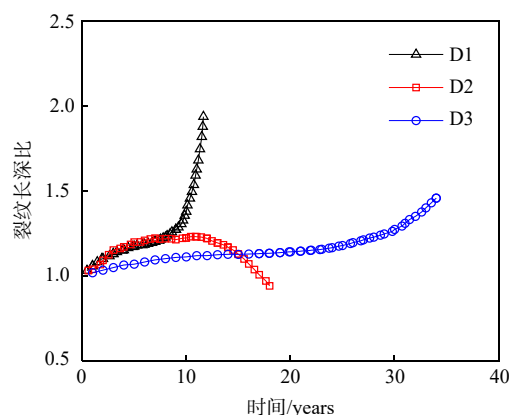


图 14 裂纹长深比变化

Fig.14 Variation of crack length-to-depth ratio

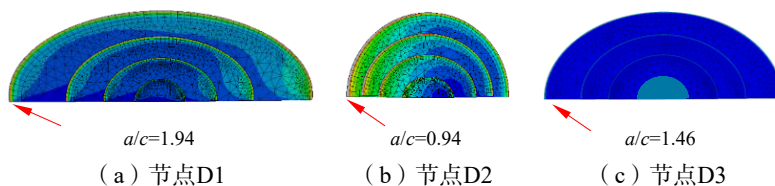


图 15 各节点裂纹形状变化

Fig.15 Variation of crack shape at each node

4.2 初始裂纹尺寸

以 D3 节点为例, 对不同初始裂纹尺寸下结构的裂纹扩展与疲劳寿命展开对比。共设置三组不同尺寸的初始裂纹, 即 $a = c = 0.3$ mm, $a = c = 0.5$ mm, $a = c = 0.7$ mm。图 16 为初始裂纹尺寸对结构疲劳寿命的影响。由于裂纹越小, 裂纹扩展速率越低, 因此在初始裂纹均相差 0.2 mm 情况下, $a = c = 0.5$ mm 与 $a = c = 0.3$ mm 的疲劳寿命之差比 $a = c = 0.7$ mm 与 $a = c = 0.5$ mm 的更大, 分别为 5.8 年与 9.0 年的差异。

不同初始裂纹尺寸下裂纹长深比 a/c 变化的对比结果如图 17 所示。 a/c 随着时间变化的趋势相似, 均为先增大后保持不变然后迅速增大。随着裂纹扩展, 相同裂纹深度下, 不同初始裂纹尺寸下的 a/c 基本一致。即裂纹形状与初始裂纹尺寸关系不大, 主要由节点的结构形式和受力形式决定。由图 16 和图 17 说明, 初始裂纹尺寸对裂纹扩展行为的影响很小, 但对最终的疲劳寿命影响显著。

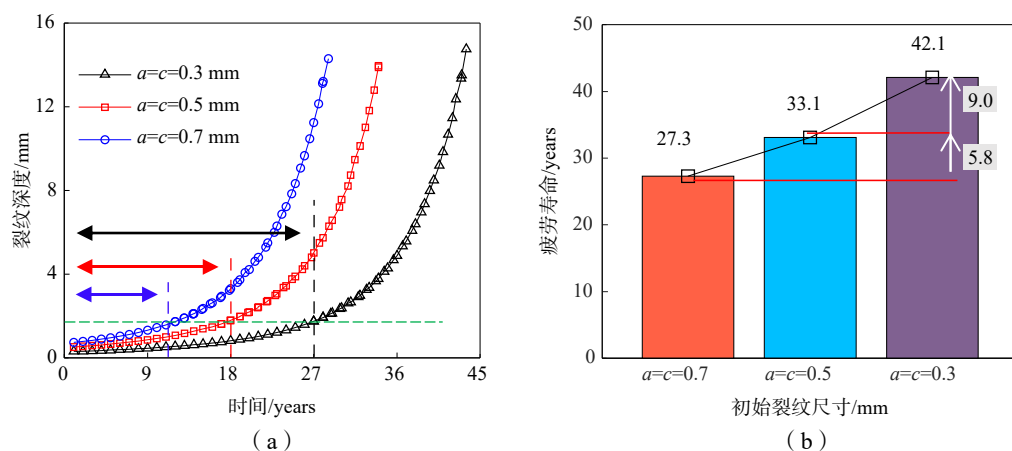


图16 初始裂纹尺寸对疲劳寿命的影响

Fig.16 Effect of initial crack size on fatigue life

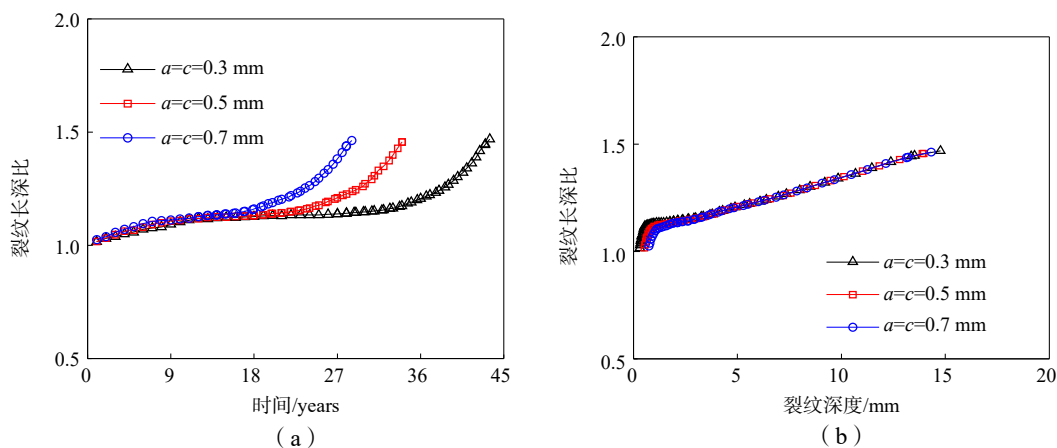


图17 初始裂纹尺寸对裂纹形状的影响

Fig.17 Effect of initial crack size on crack shape

4.3 初始裂纹长深比

以 D3 节点为例, 考虑裂纹深度均为 $c = 0.5$ mm, 长深比 a/c 分别为 1.0 ($a = 0.5$ mm)、1.2 ($a = 0.6$ mm) 和 1.4 ($a = 0.7$ mm) 的三组初始裂纹, 对其进行初始裂纹长深比对裂纹扩展影响的对比和分析。

图 18~19 分别为不同初始裂纹长深比下, 节点 D3 对应的疲劳裂纹扩展寿命和应力强度因子曲

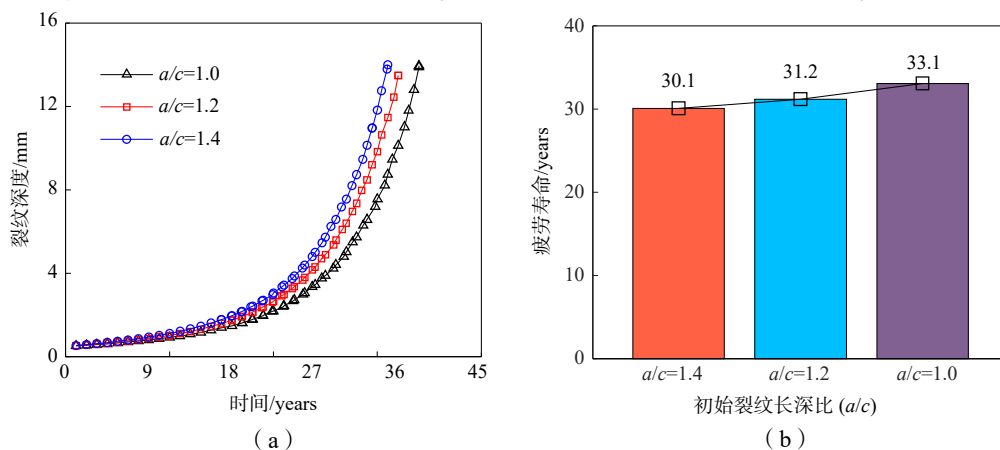


图18 初始裂纹长深比对疲劳寿命的影响

Fig.18 Effect of initial crack length-to-depth ratio on fatigue life

线。由于裂纹长深比越大,初始裂纹长度越大,裂纹尖端的应力集中越明显,所以随着初始裂纹长深比的增大,裂纹扩展速率增大,疲劳寿命减小。结果显示,长深比为 1.0、1.2、1.4 的初始裂纹对应的疲劳寿命分别为 33.1 年、31.2 年与 30.1 年,差距不大。这表明相同的初始裂纹深度下,疲劳寿命随着初始裂纹长深比的增大而减小,但是疲劳寿命之间的差距不显著。

图 20 为不同初始裂纹长深比下, a/c 在裂纹扩展中的变化曲线。虽然三组裂纹的 a/c 变化趋势并不一致,对于 a/c 为 1.2 和 1.4 的初始裂纹, a/c 先减小后增大。对于 a/c 为 1.0 的初始裂纹, a/c 一直增大,但三组初始裂纹均是扩展到 a/c 为 1.14 左右后增大。然后,三组裂纹在相同裂纹深度下的长深比相同。这是由于相同节点有着相同的受力状态,裂纹前沿的应力分布相似,因此裂纹的长深比会收敛到一致的水平。

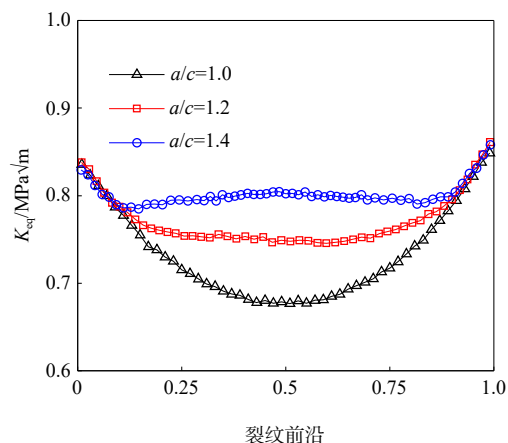


图 19 不同裂纹长深比下应力强度因子对比

Fig.19 Comparison of stress intensity factors under different crack length-to-depth ratios

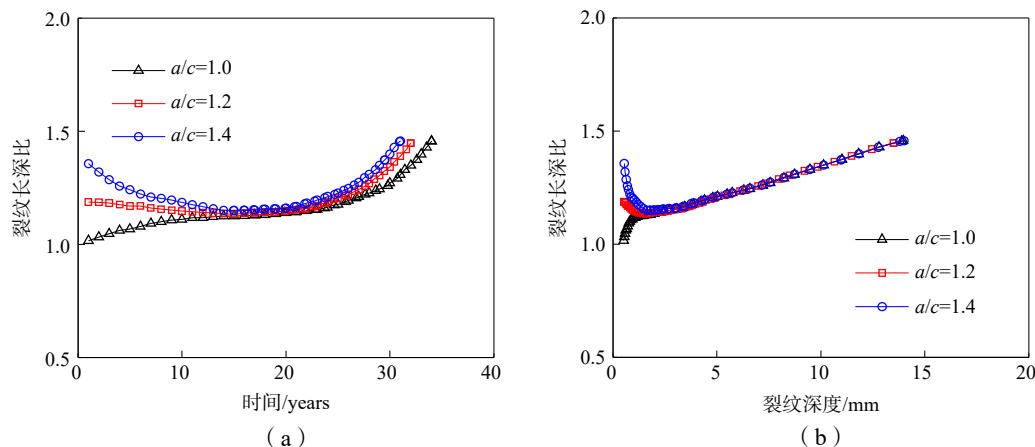


图 20 初始裂纹长深比对裂纹形状变化的影响

Fig.20 Effect of the initial crack length-to-depth ratio on the change of crack shape

5 结 论

本研究开展了基于谱分析方法的疲劳裂纹扩展分析与寿命预测,并编写了裂纹自动扩展程序。在此基础上,以船型网箱为例进行了随机海况下海洋结构物的疲劳裂纹扩展与剩余寿命预测研究,对应力强度因子、应力强度因子传递函数、裂纹扩展特性与疲劳寿命预测进行了分析与讨论。同时,分析了疲劳热点结构形式与位置、初始裂纹尺寸、初始裂纹形状对裂纹扩展行为与疲劳寿命的影响。本文主要得到以下几点结论:

(1) 以 Python 语言结合 SESAM、ABAQUS 和 FRANC3D 软件实现了基于谱分析的海洋结构物疲劳裂纹扩展分析与寿命预测,解决了大尺度模型与小尺寸裂纹之间的耦合、模型与载荷的传递、计算效率与计算精度的平衡等问题。

(2) 典型节点 D3 裂纹深度达到 50%、80%、100% 板厚时疲劳寿命分别为 29.9 年、33.1 年与 34.2 年。 K_I 占等效应力强度因子 K_{eq} 的 90% 以上,而 K_{II} 、 K_{III} 均很小。等效应力强度因子随服役时间增

加, 裂纹尺寸在服役期内呈指数级增长。不同波浪频率对结构的裂纹扩展有着显著的影响。

(3) 疲劳热点位置对裂纹扩展路径影响显著: D1 节点裂纹长深比变化剧烈(最终值为 1.94), D2 节点裂纹沿深度方向扩展(最终值为 0.94), D3 节点扩展平缓(最终值为 1.46)。初始裂纹尺寸对寿命影响显著, 初始裂纹尺寸每增加 0.2 mm, 疲劳寿命减少 5.8~9.0 年; 虽然初始长深比变化对寿命影响较小(差异 < 3 年), 但对扩展路径有显著影响。

参 考 文 献:

- [1] 中国船级社. 船体结构疲劳强度指南[S]. 2018.
CCS. Guidelines for fatigue strength of ship structures[S]. 2018. (in Chinese)
- [2] DNV. Fatigue assessment of ship structures[S]. 2003.
- [3] 阚 涛. FLNG 全船结构强度计算及疲劳强度分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
Kan T. Structure strength calculation and fatigue strength analysis of FLNGV[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [4] Muhammed A, Stacey A. Probabilistic S-N fatigue assessment methods for welded joints in offshore structures[C]//ASME 2008, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2008: 335-354.
- [5] 冯国庆. 船舶结构疲劳评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
Feng G Q. The fatigue assessment methods for ship structures[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003. (in Chinese)
- [6] 余 立. 海洋工程用钢疲劳性能与 CTOD 韧度的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
Yu L. The study on fatigue performance and fracture toughness of marine steel[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [7] He W, Wang C, Deng J, et al. Effect of single tensile overload on fatigue crack growth behavior based on plastically dissipated energy and critical distance theory[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 223(C): 106744–106744.
- [8] 何文涛. 船体结构疲劳裂纹扩展及其可靠性分析直接算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
He W T. Research on the direct analysis approach of reliability fatigue crack growth of ship structures[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 张 鼎. 基于裂纹扩展的海洋结构物安全寿命评估方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
Zhang D. Study on safety life assessment method for marine structures based on FCP theory[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [10] 张 宇. 新型 LNG 液舱裂纹扩展寿命预报与可靠性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
Zhang Y. Fatigue crack growth life and reliability prediction of new type LNG tank[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016. (in Chinese)
- [11] Yan X, Huang X, Huang Y, et al. Prediction of fatigue crack growth in a ship detail under wave-induced loading[J]. Ocean Engineering, 2016, 113(C): 246–254.
- [12] Zhang Y, Huang X, Wang F. Fatigue crack propagation prediction for marine structures based on a spectral method[J]. Ocean Engineering, 2018, 163: 706–717.
- [13] Qi T, Huang X, Li L. Spectral-based fatigue crack propagation prediction for very large floating structures[J]. Marine Structures, 2018, 57: 193–206.
- [14] 王小松. 基于断裂力学的在役 FPSO 船体结构疲劳分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Wang X S. Fatigue analysis of FPSO hull structure in service based on fracture mechanics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [15] 漆 涛. 超大型浮式结构物的疲劳寿命分析方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Qi T. Fatigue life prediction methods for very large floating structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [16] Cui W, Fang W, Huang X. A unified fatigue life prediction method for marine structures[J]. Marine Structures, 2011, 24(2):

- 153–181.
- [17] Mohamed H S, Gao F, Zhu H P. The influence of crack propagation angle on the Stress Intensity Factors (SIFs) of cracked tubular T-Joints[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2018, 18(2): 391–401.
- [18] ABS. Guide for fatigue assessment of offshore structures[S]. American Bureau of Shipping, 2018.
- [19] 刘安民, 谢凌俊, 苏一鸣, 等. 基于断裂力学的船型网箱疲劳损伤评估研究[J]. *装备环境工程*, 2023, 20(9): 105–113.
- Liu A M, Xie L J, Su Y M, et al. Fatigue damage assessment of ship-shaped net cages based on fracture mechanics[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(9): 105–113. (in Chinese)
- [20] 曲文辉. 基于体-壳混合单元结构的焊缝疲劳强度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- Qu W H. Research on fatigue strength of weld based on solid-shell element structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)