

引用格式: 杜鹏. 基于工程临界评定(ECA)的海洋油气导管架平台结构裂纹评定[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(1): 161-166.

DU Peng. Structural assessment of an offshore oil and gas jacket platform with cracks based on engineering critical assessment (ECA)[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 161-166.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.01.020

基于工程临界评定(ECA)的海洋油气导管架平台结构 裂纹评定

杜鹏

(中国石化上海海洋油气分公司, 上海 200120)

摘要: 针对已发现结构裂纹的海洋油气导管架平台, 基于工程临界评定(ECA)技术, 形成适用的结构完整性评价及维修周期策略制定方法, 并对某导管架平台进行了案例分析。使用莫里森方程(Morison equation)对目标平台进行了水动力学分析, 估算了平台关键节点的极限载荷。通过有限元分析方法及热点应力线性外推法对关键节点进行了热点应力评估。通过帕里斯公式(Paris' law)对关键节点处裂纹扩展行为进行了相关模拟, 求解目标裂纹尖端应力强度因子。通过失效评定图(FAD)对相关裂纹进行了ECA评估, 给出了临界裂纹范围。结合临界裂纹深度和裂纹扩展关系, 给出参考维修周期。结果表明: 管架水平杆与立管相连节点为易于受疲劳损伤杆件。通过失效评定, 该结构裂纹深度方向失效以塌陷失效为主, 裂纹长度方向存在塌陷失效和裂纹失效可能。针对案例分析中平台, 建议考虑临界裂纹深度5.3 mm, 临界裂纹半宽长度9.8 mm。如发现0.5~2.0 mm的裂纹, 建议在13.2~5.2 h内完成维修。该方法可推广应用于周边海域相似海洋油气平台已发现裂纹评定。

关键词: 导管架平台; 热点应力; 裂纹扩展; 工程临界评定(ECA); 临界裂纹

中图分类号: TE54

文献标识码: A

Structural assessment of an offshore oil and gas jacket platform with cracks based on engineering critical assessment (ECA)

DU Peng

(Sinopec Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: For offshore oil and gas jacket platforms with detected structural cracks, a methodology for structural integrity evaluation and maintenance cycle strategy formulation was developed based on engineering critical assessment (ECA) techniques. A case study was conducted on a specific jacket platform. The Morison equation was used for hydrodynamic analysis of the target platform to estimate the ultimate load of joints prone to failure. Hotspot stress assessment was performed on these joints using the finite element analysis method and linear extrapolation. Crack propagation behavior at critical joints was simulated using Paris' law, and the stress intensity factor at the crack tip was determined. Cracks were assessed using failure assessment diagrams (FAD), and the critical crack sizes were provided. Based on the relationship between critical crack depth and crack propagation, a reference maintenance cycle was proposed. The results showed that the joints connecting horizontal braces and risers of the jacket structure were prone to fatigue damage. Failure assessment indicated that failure in the crack depth direction was primarily dominated by collapse, while failure in the crack length direction may involve both collapse and fracture. For the analyzed platform, it was recommended to consider a critical crack depth of 5.3 mm and a critical crack half-width of 9.8 mm. If cracks ranging from 0.5 to 2.0 mm were detected, maintenance was recommended within 13.2 to 5.2 h. This methodology can be extended to similar offshore oil and gas platforms with detected cracks in adjacent sea areas.

Keywords: jacket platform; hotspot stress; crack propagation; engineering critical assessment (ECA); critical crack

收稿日期: 2024-09-26。

作者简介: 杜鹏(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事海洋石油工程等专业领域研究。地址: 上海市浦东新区商城路1225号, 邮政编码: 200120。

E-mail: Dup.shhy@sinopec.com

基金项目: 中国石化科技部项目“涠洲油田海工设施优化关键技术研究”(P24119)。

海洋工程导管架平台作为一种大型固定式焊接结构物,在服役期间长期受到海洋环境导致的交变载荷、船撞导致的事故载荷等影响,平台结构在服役期间易受到疲劳损伤、机械损伤等结构性损伤。并且,平台结构在生产实践中面临着难于监测、不易于检维修等问题^[1]。因此,如何评定结构已发生损伤能否被接受,合理制定已发生损伤检维修策略,对导管架平台运维尤为关键。在海洋工程导管架结构评估中,广泛采用基于疲劳-应力区间(S-N)曲线的疲劳评估方法进行结构疲劳性能预测^[2-3]。但由于S-N曲线一般是基于无明显裂纹的试件疲劳试验结果绘制而成的,将其直接应用于已发生损伤结构的评估存在一定技术困难。

工程临界评定(ECA)是一种基于断裂力学原理的裂纹评定方法,可用于评定不影响结构完整性的最大裂纹尺寸^[4-8]。总体而言,ECA评定方法在汽车工业、航空航天、石油化工、长输管线、船舶工程等领域存在部分应用^[8-12],部分相关行业协会也发布了焊接结构物ECA指导文件,例如英国国家标准《Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures: BS 7910—2013》^[13]、美国石油行业学会和美国机械工程师协会标准《Fitness-for-service: API 579-1/ASME FFS-1—2021》^[14]、美国石油行业学会标准《Welding of pipelines and related facilities: API 1104—2021》^[15]、加拿大标准协会标准《Oil and gas pipeline systems: CSA Z662—2023》^[16]、挪威船级社标准《Submarine pipeline systems: DNV ST F101—2021》^[17]等,但ECA在海洋石油工程领域的研究应用相对较少。中国海上石油作业公司在对评定海上结构物缺陷及针对裂纹进行运维策略制定缺乏合理的技术手段。

为解决如何将ECA方法应用于在海洋油气导管架平台裂纹评定、运维策略制定等专业领域的问题,搭建了ECA方法在海洋油气导管架结构裂纹评估应用执行框架,提出完整评估结构裂纹影响流程,并提出基于评定结果进行检维修周期策略制定的方法,为海上石油作业公司运维策略制定提供一种可行选择。案例分析中,通过莫里森方程(Morison equation)对目标平台进行了水动力学分析,估算了目标平台关键节点的极限载荷。通过有限元分析方法对关键节点进行了热点应力分析,提取了关键节点处热点应力。通过帕里斯方程(Paris' law)对关键节点处裂纹扩展行为进行了模拟,通过失效评定图(FAD)对相关裂纹进行了ECA评定,给出了临界裂纹深度。结合临界裂纹及裂纹扩展情况,制定检维修周期策略。

1 结构裂纹评定方法及检维修周期策略

针对海洋油气工程导管架平台结构设计分析原理,

制定了基于ECA分析的海洋油气工程导管架平台结构裂纹检维修策略,其执行流程如图1所示。

该研究将该流程中涉及的主要分析方法分节进行论述。

1.1 平台水动力计算方法

Morison方程一般认为可直接应用于波浪长度大于5倍杆件直径情况下的导管架平台水动力学评估,海上导管架平台杆件直径范围一般满足Morison方程适用需求。采用Morison方程的平台总体水动力学评估中,结构物水动力载荷可考虑为由结构质量引起的惯性力和水流拖曳导致的拖曳力两部分。对于固定式结构物,Morison方程可表达为:

$$F_w = \rho(1 + C_A)A\dot{v} + \frac{1}{2}\rho C_D Dv|v| \quad (1)$$

式中: F_w 为波浪载荷,单位N; ρ 为流体密度,单位 kg/m^3 ; C_A 为附加质量系数; A 为杆件遮蔽面积,单位 m^2 ; \dot{v} 为波浪加速度,单位 m/s^2 ; C_D 为拖曳力系数; D 为杆件直径,单位m; v 为波浪速度,单位 m/s ; $\rho(1 + C_A)A\dot{v}$ 为惯性力部分; $\frac{1}{2}\rho C_D Dv|v|$ 为拖曳力部分; C_D 和 C_A 选取可参考平台检验船级社相关规范或平台建设方相关企业规范要求。

1.2 裂纹构件热点应力评估方法

工业应用采用的热点应力评估的方法多应用经验公式法和热点应力评估的方法。经验公式法计算较为简便,但精确度相对较低。热点应力插值法通常需进行有

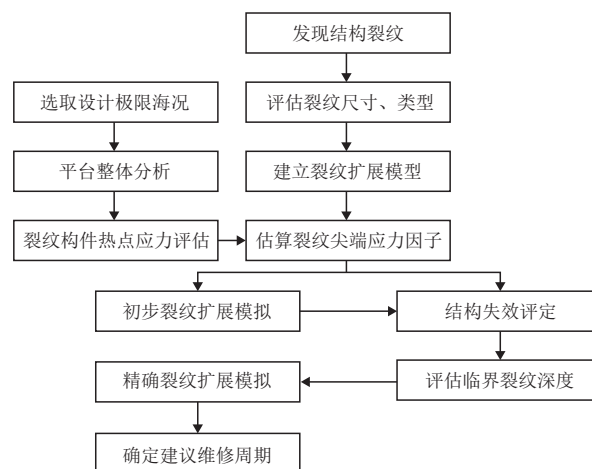


图1 基于ECA分析的海洋油气工程导管架平台结构裂纹检维修周期策略制定流程

Fig. 1 Flowchart for formulating inspection and maintenance cycle strategies for structural cracks of offshore oil and gas jacket platform based on ECA analysis

限元建模分析,评估结果更为准确。选取管结点热点应力插值法进行热点应力评估方法说明。

如图2所示,选取 a_0 、 b_0 两点读取相关节点应力,线性插值推算冠点及鞍点处热点应力,即:

$$\sigma_H = \frac{(\sigma_a - \sigma_b)L_b}{L_b - L_a} + \sigma_b \quad (2)$$

式中: σ_a 为 a_0 点处应力,单位MPa; σ_b 为 b_0 点处应力,单位MPa; L_a 为 a_0 点距热点距离,单位m; L_b 为 b_0 点距热点距离,单位m。

支管外表面选取距焊缝 $0.20\sqrt{rt}$ 和 $0.65\sqrt{rt}$ (r 为支管半径,单位m; t 为支管壁厚,单位m)处进行线性差值推算支管外表面焊缝处热点应力,弦管冠点处选取距焊缝 $0.20\sqrt{RT}$ (R 为弦管半径,单位m; T 为弦管壁厚,单位m)处进行线性差值推算弦管冠点处热点应力,弦管鞍点处选取距焊缝 $0.20\sqrt{RT}$ 和 $\pi R/3$ 处进行线性插值推算弦管鞍点处热点应力。

1.3 裂纹扩展分析方法

结构裂纹一般可分为表面裂纹和内部裂纹。在现场检验中,表面裂纹较为常见,因此考虑管体外表面裂纹作为分析对象,其示意图见图3。

帕里斯方程可应用于一般钢结构裂纹扩展^[13,18-19],该方程可表示为:

$$\begin{cases} \frac{da}{dn} = C(\Delta K_{Ia})^m \\ \frac{dc}{dn} = C(\Delta K_{Ic})^m \end{cases} \quad (3)$$

式中: a 为裂纹深度,单位mm; c 为裂纹半宽,单位mm; n 为应力循环次数; C 和 m 为断裂力学模型材料参数; ΔK_{Ia} 和 ΔK_{Ic} 分别为深度方向和半宽方向应力强度因子范围,单位 $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$ 。

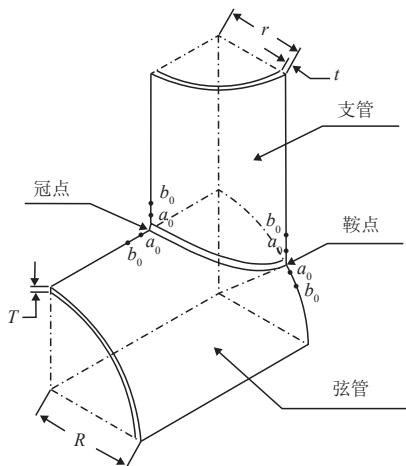


图2 管节点热点应力插值示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hotspot stress interpolation at tubular joints

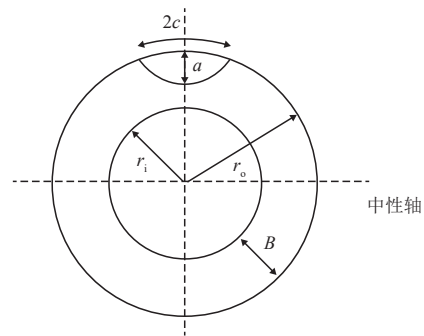
该研究根据英国国家标准《Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures: BS 7910—2013》^[13]中海洋环境自由腐蚀简化裂纹扩展模型进行相关参数选取及裂纹扩展预测,裂纹扩展速率曲线见图4。

应力强度因子可通过式(4)计算:

$$K_I = Mf_w(M_m k_{tm} M_{km} \sigma_m + M_b k_{tb} M_{kb} \sigma_{be}) \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

式中: K_I 为应力强度因子,单位 $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$; M 为隆起修正系数; f_w 为限制宽度修正系数; M_m 和 M_b 分别为薄膜应力和弯曲应力引起的应力强度放大因子; k_{tm} 和 k_{tb} 为由结构不连续等因素导致的应力集中系数; M_{km} 和 M_{kb} 为因焊趾导致的应力修正系数; σ_m 和 σ_{be} 分别为薄膜应力和弯曲应力,单位MPa。

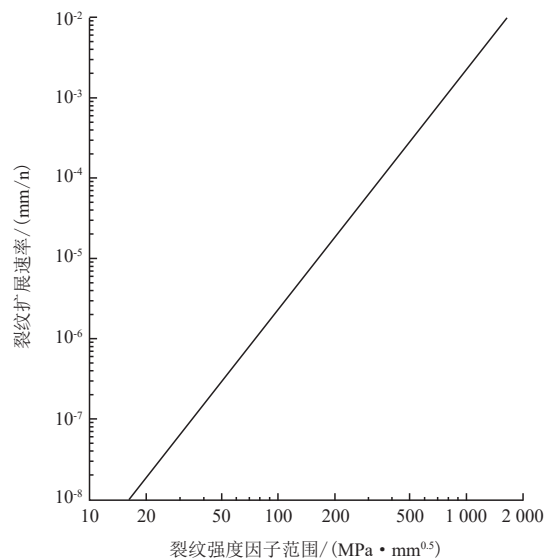
对于图3所示管体外表面裂纹,可参考图5所示板结构表面裂纹进行应力强度因子估算。具体如下:



注: r_i 为内径,单位mm; r_o 为外径,单位mm; B 为壁厚,单位mm。

图3 管节点外表面裂纹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of surface cracks at tubular joints



注: n 为应力循环次数。

图4 裂纹扩展速率

Fig. 4 Crack propagation rate

$$M = 1 \tag{5}$$

$$f_w = \left\{ \sec \left[\left(\frac{\pi c}{w} \right) \left(\frac{a}{B} \right)^{0.5} \right] \right\}^{0.5} \tag{6}$$

$$M_m = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{B} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right] \frac{g f_\theta}{\Phi} \tag{7}$$

$$M_b = H M_m \tag{8}$$

式(5)一式(8)中: w 为宽度,单位mm; M_1 、 M_2 、 M_3 、 f_θ 、 g 、 Φ 、 H 为裂纹扩展相关参数。

1.4 工程临界评定(ECA)方法

根据失效评定图进行评定是基于断裂力学的ECA的重要方法。通常认为,失效评定图可以用于评估当结构物已发现裂纹后能否继续服役,以及当前裂纹可能导致的失效原因。失效评定中主要分析参数为断裂率(K_r)和载荷比(L_r),具体可以表示为:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \tag{9}$$

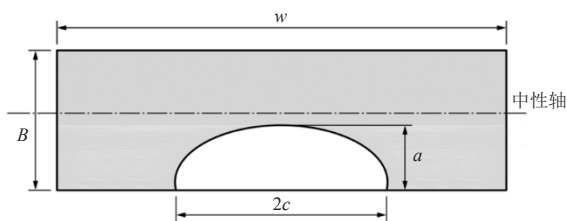
$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \tag{10}$$

式(9)一式(10)中: K_{mat} 为材料断裂韧性,单位 $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$; σ_Y 为材料屈服应力,单位 MPa ; σ_{ref} 为管体外表面裂纹参考应力,可由式(11)进行计算:

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_m \left[\pi \left(1 - \frac{a}{B} \right) + 2 \left(\frac{a}{B} \right) \sin \left(\frac{c}{r_0} \right) \right]}{\left(1 - \frac{a}{B} \right) \left[\pi - \left(\frac{c}{r_0} \right) \left(\frac{a}{B} \right) \right]} + \frac{2\sigma_{be}}{3(1-\alpha'')^2} \tag{11}$$

式中: α'' 为关于 a 、 B 、 c 、 r_0 的变量。

失效评定图一般可以被分为3个区域,每个区域分别代表了不同的可能失效模式^[7](图6)。如评定点落在安全区内,则认为结构暂时处于相对安全状态;如评定点落在区域一内,则认为此时结构应力强度因子将会接近断裂韧性因子,发生由裂纹引起的结构失效;如评定点落在区域三内,结构将会发生由塌陷导致的失效。区域二为裂纹塌陷过度区,如评定点落在该区域内,2种形式的结构失效都有可能发生。



注: w 为宽度,单位mm。

图5 板表面裂纹示意图

Fig. 5 Schematic diagram of surface cracks on plates

2 案例分析及结果

2.1 分析案例

选取某4腿12群桩导管架平台进行案例分析。该平台作业水深约80 m,设12井槽,平台总干重约5 200 t。其总体水动力分析及初步疲劳评估在基于Morison方程的海洋工程软件SACS中进行。该案例中管结构拖曳力系数取值1.05,惯性力系数取值1.2。波浪通过流理论进行规则波模拟^[2]。

FAD中需考虑设计平台可能面临的最危险情况,因此选取目标平台设计中参考所在位置波浪载荷进行评估。最大波高为23.1 m,平均周期为15.2 s。该环境下,对应风速21.04节(1节=0.514 4 m/s),表层流速1.4 m/s。SACS中模型及分析结果如图7所示。水动力分析结果表明:图8所示水平杆与立管相连接处节点(位于平台飞

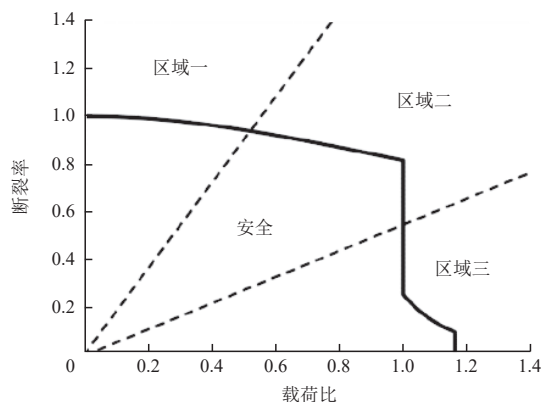
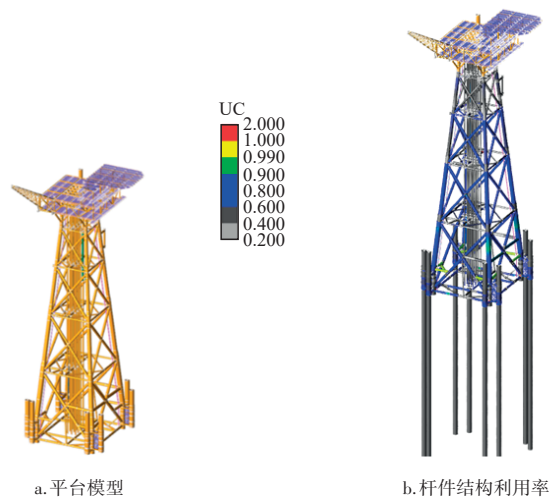


图6 失效评定图

Fig. 6 Failure assessment diagram



a. 平台模型

b. 杆件结构利用率

注:UC为结构利用系数。

图7 导管架平台模型图及UC图

Fig. 7 Jacket platform model and UC diagram

溅区,水面上约11 m处)UC值最高。此节点处主要载荷可能为立管与平台主体结构间相对运动所致。弦管受轴向压力1 334 kN,支管对弦管产生285 kN压力。且该节点疲劳寿命最短,预测疲劳寿命不足30 a。故选取该节点进行FAD分析。

2.2 有限元分析及热点应力评估

通过有限元分析软件ABAQUS对相关节点进行仿真,求解目标杆件应力分布情况,进而通过热点应力插值法评估假定裂纹处热点应力。

全模型采用S4R(ABAQUS软件四边形单元类型)四边形单元,结构模型及网格示意图9。

弦杆A端连接导管架主桩腿结构,因此有限元模型中将A端设为固定端,锁定6个自由度。弦杆B端和支管C端作为载荷端进行模拟,分别施加SACS模型中所提取波浪载荷所致的杆端力。有限元分析结果如图10所示。

通过有限元分析,读取插值点应力后,按照式(2)进行热点应力估算。估算结果表明:鞍点处应力水平高于冠点处应力水平。考虑到支杆壁厚小于弦杆,且支杆鞍点处

应力水平高于弦杆鞍点处应力水平。故认为支杆鞍点处为最易受疲劳损伤影响位置。沿图9所示Y轴方向,读取相应插值点 $0.20\sqrt{rt}$ 和 $0.65\sqrt{rt}$ 处应力(273.4 MPa和96.3 MPa),后插值支杆鞍点处热点应力水平为352.5 MPa。

2.3 裂纹扩展及工程临界评定

裂纹扩展代码基于MATLAB进行开发。根据相关研究成果,海上超声检验理论可发现裂纹尺寸中位数为0.5 mm^[3,20-22]。因此考虑初始裂纹0.5 mm进行裂纹扩展分析,给出如图11所示裂纹扩展历程。

裂纹扩展预测结果显示,在持续遭遇极端海况情况下,经历80余小时极限海况,裂纹深度将扩展至约8 mm,裂纹半宽长度将扩展至约22 mm。

工程临界评定结果如图12所示,结果表明:该构件主要失效评定区间为二区间至三区间,故该结构裂纹深度方向失效以塌陷失效为主,裂纹长度方向同时存在塌陷失效和裂纹失效可能。评定表明:临界裂纹深度为5.3 mm,临界裂纹半宽长度为9.8 mm。

结合FAD分析结果,进行二次裂纹扩展评估,考虑5

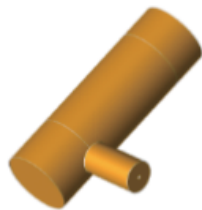


图8 ECA分析选取节点
Fig. 8 Selected joint for ECA analysis

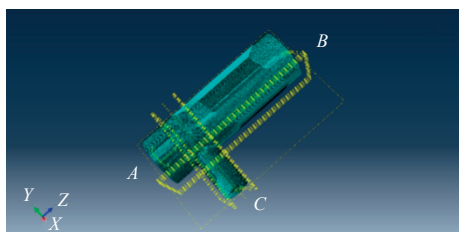


图9 分析节点有限元模型及网格
Fig. 9 Finite element model and meshes for the analyzed joint

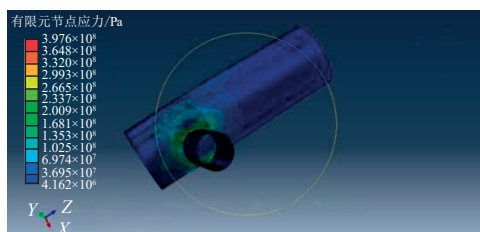


图10 有限元分析应力分布
Fig. 10 Stress distribution from finite element analysis

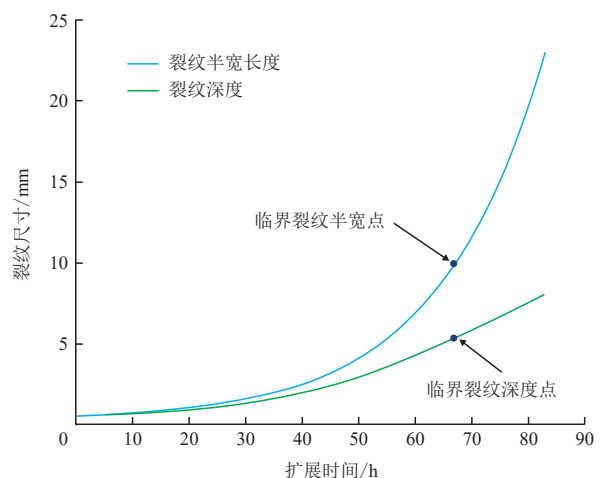


图11 裂纹扩展行为预测
Fig. 11 Predicted crack propagation behavior

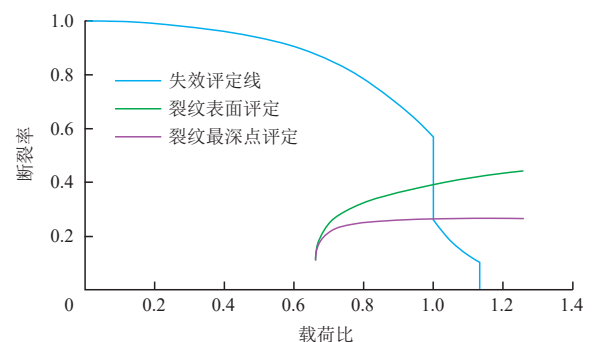


图12 工程临界评定结果
Fig. 12 Engineering critical assessment results

倍安全系数^[4],即发现0.5 mm裂纹后应在13.2 h内进行裂纹修复或结构替换。发现1 mm裂纹后应在8.8 h内进行裂纹修复或结构替换。发现2 mm裂纹后应在5.2 h内进行裂纹修复或结构替换。

3 结论

针对如何进行已发现结构裂纹的海洋油气导管架平台结构完整性评定及维修策略制定问题,提出了一套基于ECA分析并适用于海洋油气工程导管架平台的结构裂纹评定方法及检维修周期策略,并给出了推荐执行流程。由于该研究基于的理论方法具有通用性,可推广至一般海洋油气导管架平台进行应用。

针对案例分析,可得到以下结论:

1) 该研究提出的基于ECA分析的海洋油气工程导管架平台的结构裂纹评定方法及检维修周期策略具有可行性。

2) 由于立管和平台主体间的相对运动,分析导管架及采用相同标准化设计成果的导管架水平杆与立管相连接节点为易于受疲劳损伤杆件。

3) 通过失效评定,分析结构裂纹深度方向失效以塌陷失效为主,裂纹长度方向存在塌陷失效和裂纹失效可能。

4) 给出目标分析结构临界裂纹深度5.3 mm,临界裂纹半宽长度9.8 mm;如发现0.5~2.0 mm的裂纹,建议在13.2~5.2 h内完成维修。

参考文献

- [1] 张东卫,周雷,卢华. ECA技术在海洋平台结构延期服役评估中的应用[J]. 中国海洋平台, 2018, 33(2): 49-53.
ZHANG Dongwei, ZHOU Lei, LU Hua. ECA technique applied in life-extension of in-service jacket platform structure[J]. China Offshore Platform, 2018, 33(2): 49-53.
- [2] American Petroleum Institute. Planning, design, and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API Recommended Practice 2A-WSD[S]. Washington: API Publishing Services, 2014.
- [3] CHEN N Z, WANG G, SOARES C G. Palmgren-Miner's rule and fracture mechanics based inspection planning[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78: 3166-3182.
- [4] 侯静,李旭,杨璇,等. 深水钢悬链立管工程临界评估关键参数敏感性分析研究[J]. 中国造船, 2022, 63(4): 199-206.
HOU Jing, LI Xu, YANG Hu, et al. Sensitivity study of key parameters in engineering critical assessment of steel catenary riser [J]. Ship Building of China, 2022, 63(4): 199-206.
- [5] CHENG A, CHEN N Z. An extended engineering critical assessment for corrosion fatigue of subsea pipeline steels[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 84: 262-275.
- [6] HE M, PANG M, CHEN N Z. Engineering critical assessment (ECA) for monopile foundation of an offshore wind turbine subjected to pitting[J]. Ocean Engineering, 2023: 115400.
- [7] AMIRAFSHARI P, BRENNAN F, KOLIOS A. A fracture mechanics

framework for optimising design and inspection of offshore wind turbine support structures against fatigue failure[J]. Wind Energy Science, 2021, 6(3): 677-699.

- [8] 高慧颖. 自升式海洋平台桩靴裂纹工程临界评估(ECA)[J]. 中国海洋平台, 2018, 33(3): 38-43.
GAO Huiying. Engineering critical assessment for crack of spud can in jack-up offshore platform[J]. China Offshore Platform, 2018, 33(3): 38-43.
- [9] 孙培翔,戴国文,李学达,等. 长输油气管道环焊缝工程临界评估技术的应用现状及探讨[J]. 电焊机, 2023, 53(5): 30-37.
SUN Peixiang, DAI Guowen, LI Xueda, et al. Application status and discussion of ECA technology in girth welds of oil and gas pipelines [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(5): 30-37.
- [10] 李立英,牛先伟,刘雪光,等. 高钢级油气管道ECA评价技术研究现状与展望[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(7): 20-28.
LI Liying, NIU Xianwei, LIU Xueguang, et al. Current situation and prospect of ECA technology for high grade oil and gas pipelines[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(7): 20-28.
- [11] 张振永,周亚薇,张金源. 采用失效评估图确定新建油气管道环焊缝断裂韧性的方法[J]. 焊接技术, 2017, 46(7): 72-76.
ZHANG Zhenyong, ZHOU Yawei, ZHANG Jinyuan. A method for determining the fracture toughness of girth welds of new oil and gas pipelines by using failure assessment diagrams[J]. Welding Technology, 2017, 46(7): 72-76.
- [12] 杨双羊. 海底管道ECA评估技术应用[J]. 无损探伤, 2014, 38(3): 38-40.
YANG Shuangyang. Application of ECA assessment technology for submarine pipeline[J]. Nondestructive Inspection, 2014, 38(3): 38-40.
- [13] The British Standards Institution. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures: BS 7910—2013[S]. London: BSI Standards Limited, 2013.
- [14] American Petroleum Institute and The American Society of Mechanical Engineers. Fitness-for-service: API 579-1/ASME FFS-1—2021 [S]. Washington: API Publishing Services, 2021.
- [15] American Petroleum Institute. Welding of pipelines and related facilities: API Standard 1104[S]. Washington: API Publishing Services, 2021.
- [16] Canadian Standards Association. Oil and gas pipeline systems: CSA Z662—2023[S]. Toronto: CSA Group, 2023.
- [17] Det Norske Veritas. Submarine Pipeline Systems: DNV ST F101—2021[S]. Det Norske Veritas, 2021.
- [18] American Bureau of Shipping. Guide for fatigue assessment of offshore structures[S]. American Bureau of Shipping, 2020.
- [19] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.
- [20] XUE X, CHEN N Z, WU Y, et al. Mooring system fatigue analysis for a semi-submersible[J]. Ocean Engineering, 2018, 156: 550-563.
- [21] XUE X, CHEN N Z. Fracture mechanics analysis for a mooring system subjected to Gaussian load processes[J]. Engineering Structures, 2018, 162: 188-197.
- [22] XUE X, CHEN N Z, PU Y. Mooring fatigue assessment evaluating chain twist and out-of-plane bending for a semi-submersible[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2020, 142(6): 061703.