

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.035



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



钢桥面板疲劳裂纹全寿命周期扩展特性

鲁乃唯¹, 崔健¹, 罗媛², 王鸿浩¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要:正交异性钢桥面板的焊缝处微裂纹萌生, 初始焊接缺陷是影响该类构造细节疲劳性能的关键因素。为研究正交异性钢桥面板顶板与纵肋连接焊缝裂纹萌生与扩展的全寿命周期动态特性, 基于断裂力学理论与 ABAQUS-FRANC3D 交互技术, 研究焊缝埋藏缺陷至疲劳断裂全过程应力强度因子的动态演化特征, 揭示裂纹的形状发展规律, 分析敏感参数对裂纹扩展速率与疲劳寿命的影响, 明确了疲劳裂纹的全寿命扩展行为, 并通过钢桥面板足尺节段疲劳试验验证研究结果的可靠性。结果表明: 钢桥面板疲劳裂纹扩展行为可分为 3 个阶段: 即埋藏阶段、萌生阶段、扩展阶段, 沿裂纹不同路径的埋藏萌生阶段与扩展阶段的应力强度因子分布正好相反; 随着不断扩展, 任意初始形状的埋藏裂纹形状都趋近于圆形, 任意形状的表面裂纹形状逐渐扁平, 合理解释了表面裂纹持续扩展至贯穿顶板时呈扁平形态; 埋藏阶段的裂纹沿上表面的扩展速率较下表面增大了 54%, 裂纹从埋藏萌生阶段进入扩展阶段后向顶板方向扩展的速率较大; 裂纹形态比、埋藏深度对萌生寿命影响较大, 其中萌生寿命占疲劳总寿命的绝大部分。

关键词:钢桥面板; 疲劳裂纹; 疲劳寿命; 应力强度因子; 埋藏裂纹

中图分类号:U448.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)03-0180-10

Fatigue crack life cycle growth characteristics of steel bridge deck

LU Naiwei¹, CUI Jian¹, LUO Yuan², WANG Honghao¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, P. R. China)

Abstract: The initial welding defect is the key factor that affects the fatigue performance of the structural details of the orthotropic steel bridge deck. In order to study the whole life cycle dynamic characteristics of crack initiation and propagation of the joint weld between the top plate and the longitudinal rib of the orthotropic steel bridge deck, based on the fracture mechanics theory and ABAQUS-FRANC3D interactive technology, the dynamic characteristics of the stress intensity factor in the whole process from the weld buried defect to the fatigue fracture were studied, the crack shape development law was revealed, and the influence of sensitive parameters on the crack growth rate and fatigue life was analyzed, the full-life propagation behaviour of fatigue

收稿日期:2022-12-23

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2600900); 国家自然科学基金(51908068、52178108); 湖南省自然科学基金(2021JJ30720); 长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”(SJCX202121)

作者简介:鲁乃唯(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事桥梁结构可靠度与安全控制研究, E-mail: lunaiweide@163.com。

Received: 2022-12-23

Foundation items: National Key Research and Development Plan Project (No. 2021YFB2600900); National Natural Science Foundation of China (Nos. 51908068, 52178108); Hunan Natural Science Foundation Project (No. 2021JJ30720); “Practice Innovation and Entrepreneurship Improvement Plan” for Professional Degree Postgraduates of Changsha University of Technology (No. SJCX202121)

Author brief: LU Naiwei (1987-), PhD, associate professor, main research interests: structural reliability and safety control of bridges, E-mail: lunaiweide@163.com.

crack is clarified, and the reliability of the research results is verified by the full-scale segmental fatigue test of steel bridge deck. The analysis results show that the fatigue crack growth behavior of steel bridge deck can be divided into three stages: burial stage, initiation stage, and propagation stage. The distribution of stress intensity factors in the buried initiation stage and the propagation stage along different crack paths are exactly opposite; buried cracks of any initial shape tend to be round with continuous expansion, and surface cracks of any shape gradually flatten, which reasonably explains the flat shape of surface cracks when they continue to extend to the roof; the crack propagation rate along the upper surface of the buried stage is 54% higher than that along the lower surface. The crack propagation rate from the buried initiation stage to the roof direction is larger; The crack shape ratio and the burial depth have a great influence on the initiation life, and the initiation life accounts for the majority of the total fatigue life.

Keywords: steel bridge deck; fatigue crack; fatigue life; stress intensity factor; embedded crack

正交异性钢桥面板具有轻质高强、工厂化制作、施工便捷等优点^[1-2],但由于钢桥面板焊缝较多,含大量焊接接头,容易在焊缝内部或表面产生初始裂纹及气孔、夹杂等焊接缺陷。长期直接承受车辆荷载的反复循环作用,顶板与纵肋焊接焊缝处埋藏缺陷容易萌生疲劳裂纹并迅速扩展^[3],导致大量钢桥面板在通车后不久出现大量疲劳裂纹^[4]。《在用含缺陷压力容器安全评定》(GB/T 19624—2019)^[5]以裂纹面所处的相对位置将裂纹分为埋藏裂纹、表面裂纹。焊缝内部埋藏裂纹萌生成表面裂纹是裂纹缺陷失效破坏的常见形式之一^[6]。既有研究成果多从表面裂纹开始研究裂纹的扩展行为,而忽略了焊缝隐藏缺陷逐渐扩展形成表面裂纹的萌生过程。由于裂纹埋藏阶段具有隐秘性和不确定性,相对于其他焊接缺陷而言,其危害程度更大^[7]。因此,亟须开展钢桥面板疲劳裂纹全寿命周期特性研究。

学者们对钢桥面板焊缝处表面裂纹开展了大量试验与理论研究。张清华等^[8]提出一种三维裂纹模拟方法,该方法能准确模拟钢桥面板焊接构造细节疲劳裂纹的扩展过程。黄云等^[9]揭示了裂纹面空间位置对裂纹扩展速率和疲劳寿命的影响规律,并通过足尺试验模型验证疲劳寿命计算结果。Maljaars等^[10]研究了贯穿型疲劳裂纹扩展行为,提出了考虑疲劳裂纹贯穿顶板后的剩余扩展寿命分析方法。相较而言,对于焊接埋藏缺陷的研究却较为匮乏,其原因在于大型桥梁结构与疲劳裂纹的尺度差距带来的计算与试验方面的困难。应力强度因子能有效反映结构裂纹扩展特性,Li等^[11]基于位移法和能量法,获得含埋藏裂纹的压力管道应力强度因子数值。王本劲等^[12]针对钢桥面板的埋藏裂纹、气孔、夹杂等焊接缺陷进行均质化处理,发现了埋藏裂纹尺度的影响明显高于气孔、夹杂等其他缺陷。钢桥面板中含大量焊缝以及可能的焊接缺陷,由于设备灵敏度和精度等原因,现有技术所能达到

的精度难以覆盖所有可能的焊接缺陷尺度^[13],往往无法精确检测到埋藏裂纹在服役期中的演变过程,使得钢桥面板焊接缺陷难以获得准确的疲劳性能评估值。Liu等^[14]研究表明,表面裂纹几何形状对疲劳寿命有显著影响。

既往研究多聚焦于钢桥面板表面裂纹扩展分析,而对焊缝埋藏缺陷逐渐扩展形成表面裂纹的萌生过程及裂纹扩展全寿命周期分析较为欠缺。针对钢桥面板顶板与纵肋焊缝处的疲劳开裂问题,笔者结合线弹性断裂力学理论与F-A交互技术,以某大跨度钢箱梁悬索桥钢桥面板足尺节段疲劳试验和数值分析模型为基础,从断裂力学角度揭示焊缝处理藏型疲劳裂纹的扩展特性与规律,合理描述埋藏裂纹与表面裂纹扩展过程及形状演变,在此基础上,对顶板与U肋构造细节的疲劳寿命进行评估,并进一步探讨疲劳裂纹全寿命周期的形态、扩展速率、寿命分布等扩展特性以及裂纹形状和埋藏深度对疲劳裂纹扩展与寿命预测的影响。

1 钢桥面板疲劳裂纹模拟与寿命预测方法

1.1 应力强度因子基本理论

为了计算钢桥面板裂纹的疲劳总寿命,首先需要分析裂纹的疲劳扩展行为和特征。疲劳裂纹扩展分析的关键是计算裂纹前沿的应力强度因子和对裂纹扩展的预测。相互作用积分法又称M-积分法,可以确定具有复杂应力场的裂纹尖端的应力强度因子,使用M-积分法计算应力强度因子的表达式为

$$M^{(1,2)} = \int_{\Gamma} \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} - W^{(1,2)} \delta_{ij} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} ds / A_q \quad (1)$$

式中: $A_q = \int_L q_t ds$, q_t 是裂纹前沿函数值; $W^{(1,2)}$ 为应变能密度, 定义为

$$W^{(1,2)} = \sigma_{ij}^{(1)} \epsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \epsilon_{ij}^{(1)} \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为应力分量; ϵ_{ij} 为应变分量; 上标 1 和上标 2 分别代表实际场和辅助场。

式(3)可描述相互作用积分法、材料属性和应力强度因子间的相关性。

$$M^{(1,2)} = 2 \times \left[\frac{1-v^2}{E} K_I^{(1)} K_I^{(2)} + \frac{1-v^2}{E} K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} + \frac{1+v^2}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)} \right] \quad (3)$$

采用有限元方法, 联立式(1)~式(3)即可对不同类型疲劳裂纹的应力强度因子进行求解。

1.2 基于断裂力学的疲劳寿命评估方法

针对疲劳裂纹扩展阶段数值模型的研究, Paris 定律^[15]认为, 疲劳裂纹前沿应力强度因子幅值 ΔK 与裂纹扩展速率之间存在式(4)所示关系。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (4)$$

式中: a 为裂纹尺寸; N 为应力循环次数; ΔK 为应力强度因子幅值; C 和 n 是与材料相关的扩展参数。依据 BS 7910^[6] 建议的推荐值, 取 $C=5.21 \times 10^{-13} \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$, $n=3$ 。在裂纹扩展过程中, 钢桥面板顶板与纵肋焊接细节疲劳裂纹应力强度因子非恒定值, 对于有限裂纹扩展增量, 疲劳裂纹扩展寿命可以用式(5)计算。

$$N_f = \sum_{i=1}^r \Delta N_i = \sum_{i=1}^r \left(\frac{\Delta a_i}{C(\Delta K)_i^n} \right) \quad (5)$$

式中: Δa 为第 i 步的裂纹增长量; ΔN 为裂纹增长量 Δa 相对应的载荷循环次数; $i=1, 2, \dots, r$, 为裂纹扩展分析步数。

2 钢桥面板节段模拟仿真

2.1 钢桥面板节段模型

以某大跨度钢箱梁悬索桥为工程背景, 建立钢桥面板有限元模型。该模型材料为 Q345D 钢材, 弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.3, 模型包含横隔板与 U 肋各 2 个, 模型长度为 3 400 mm, 试验模型中顶板厚度为 16 mm, U 肋厚度为 8 mm, 顶板-U 肋上口宽 300 mm, 下口宽 170 mm, 高度 280 mm, 横隔板厚度为 10 mm。为与后续试验模型保持一致, 有限元模型采取两点加载, 加载面积为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的车轮加载, 约束钢桥面板横隔板底部所有节点的 3 向位移。模型参数如图 1 所示。

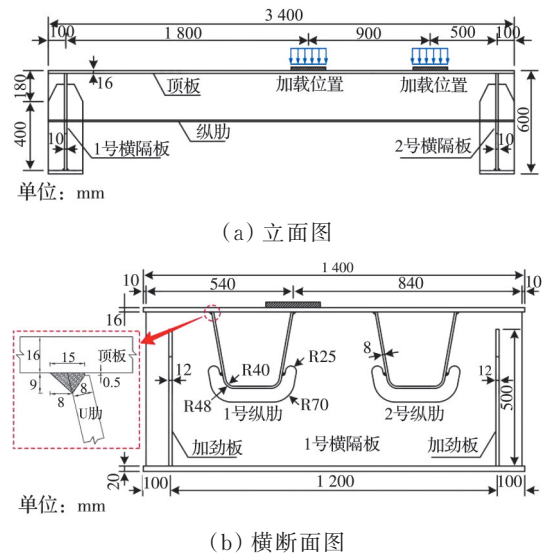


图 1 钢桥面板足尺模型具体参数

Fig. 1 Specific parameters of full scale model of steel bridge deck

2.2 基于 F-A 交互技术的裂纹扩展求解与分析方法验证

疲劳裂纹扩展分析通过有限元软件 ABAQUS 和 FRANC3D 的交互使用完成。Liu 等^[16]证明了 ABAQUS-FRANC3D 交互技术用于钢桥面板顶板与纵肋焊缝处的疲劳裂纹, 求解裂纹应力强度因子时具有较高精度。ABAQUS 主要用于应力分析, FRANC3D 用于计算应力强度因子和预测裂纹扩展。通过断裂力学分析软件 FRANC3D 在顶板与纵肋焊缝中插入一个初始裂纹, 尺寸为: 短半轴 a 、长半轴 c , 进行网格重划分, 输出网格尺度特征为 0.025 mm 的含裂纹实体子模型, 提交有限元计算持续扩展裂纹。根据国际焊接协会 IIW 的建议^[17], 当裂纹扩展深度达到顶板厚度的一半, 即可认为达到了裂纹的疲劳寿命。ABAQUS-FRANC3D 交互技术的工作流程如图 2 所示。

采用 F-A 交互技术计算钢桥面板的疲劳裂纹扩展速率, 并将计算结果与试验结果进行比较, 以验证方法的正确性。试验采用的加载设备为电液式脉动疲劳试验机, 作动器下设分配梁, 将力传至两端钢垫板, 钢垫板面积为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 模拟车轮加载。疲劳试验采用的荷载上峰值为 350 kN, 下峰值为 70 kN, 疲劳荷载幅值为 280 kN。在疲劳加载整个过程中采用常幅疲劳加载, 加载频率为 3 Hz, 记录疲劳裂纹扩展情况及相应的加载次数, 试验足尺模型如图 3 所示。

钢桥面板试验采取在分配梁下的顶板与纵肋焊缝焊趾处制造一条初始深度 $a=4 \text{ mm}$ 、半长轴

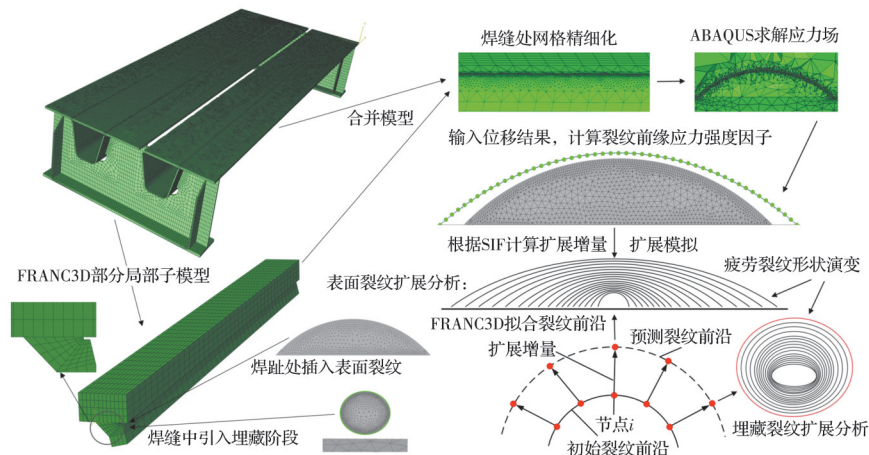


图2 ABAQUS-FRANC3D交互工作图

Fig. 2 ABAQUS-FRANC3D interactive working diagram



图3 钢桥面板足尺模型

Fig. 3 Full scale model of steel bridge deck

$c=20$ mm的初始缺陷,以模拟疲劳裂纹,采用渗透检测法测量疲劳裂纹表面扩展长度,并记录相应的荷载循环次数。图4显示,当裂纹沿表面扩展15 mm,通过数值模拟和试验获得的循环次数分别为441 622和477 000次循环,相对误差为7.4%。由于试验足尺模型中材料、人为制造表面初始缺陷的裂纹形态等因素无法完全等效数值模拟,数值模拟结果略小于试验结果,两者结果基本吻合,如图4所示。综合来看,F-A交互技术可用于钢桥面板疲劳裂纹扩展分析。

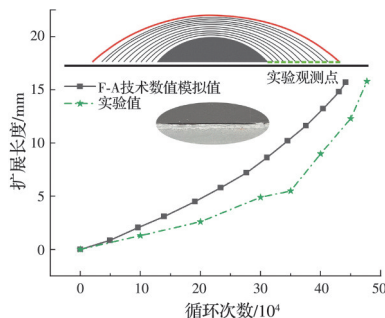


图4 F-A交互技术计算结果与试验结果对比

Fig. 4 Comparison between F-A interaction technology calculation results and experimental results

3 钢桥面板疲劳裂纹应力强度因子分析

3.1 疲劳裂纹应力强度因子扩展分析

为研究疲劳裂纹扩展全寿命周期裂纹前沿应力强度因子分布,引入埋藏式初始裂纹模拟焊接初始缺陷,根据焊接结构缺陷评定相关规范^[17],裂纹扩展分析中将埋藏裂纹近似为椭圆处理,但裂纹初始参数仍未统一。取较小尺寸即初始裂纹深度 $a=0.25$ mm、裂纹半长 $c=1.25$ mm的椭圆埋藏裂纹作为顶板与纵肋焊接构造细节处的初始缺陷,完整揭示裂纹扩展全过程。焊接细节处疲劳裂纹为I型为主的复合型裂纹^[18], K_{II} 、 K_{III} 的数值均远小于 K_I ,暂不进行分析。图5显示了埋藏式裂纹在不同生长阶段的裂纹前沿应力强度因子分布。

疲劳裂纹的整个生长过程可分为3个阶段。

第1阶段是埋藏阶段。横坐标0~0.5区间裂纹前沿代表埋藏裂纹上表面的应力强度因子,0.5~1区间裂纹前沿代表埋藏裂纹下表面的应力强度因子,整个埋藏阶段,上表面的应力强度因子大于下表面,如图5(a)所示。显示裂纹向顶板方向扩展更快,随着埋藏裂纹不断扩展,每一步分析应力强度因子也将逐渐增大。当埋藏裂纹持续扩展接近焊缝表面,其下表面应力强度因子受应力场相互叠加影响,裂纹生长进入萌生阶段,如图5(b)所示。

第2阶段是萌生阶段。随着埋藏裂纹不断扩展,其与焊缝下表面之间的距离逐渐减小,由于邻近表面应力集中的影响,下表面裂纹尖端的应力强度因子显著大于其他点的应力强度因子,由于邻近表面应力集中的影响,下表面裂纹尖端的应力强度因子显著大于其他点的应力强度因子,且持续增大,此时下表面扩展增量会大于上表面,裂纹快速贯穿焊缝萌生成表面裂纹,此时的裂纹前沿应力强度因子将会重分布,裂纹生长进入扩展阶段。

第3阶段是扩展阶段,这意味着裂纹已经萌生,裂纹扩展阶段的应力强度因子将会显著大于埋藏阶段,形成新的裂纹,前沿呈表面裂纹扩展规律,如图5(c)所示,裂纹符合张清华等^[19]提出的表面裂纹扩展规律。裂纹前沿两端的应力强度因子逐渐增大,表明裂纹表面尖端的扩展速率大于其他点,裂纹将逐渐变得扁平。

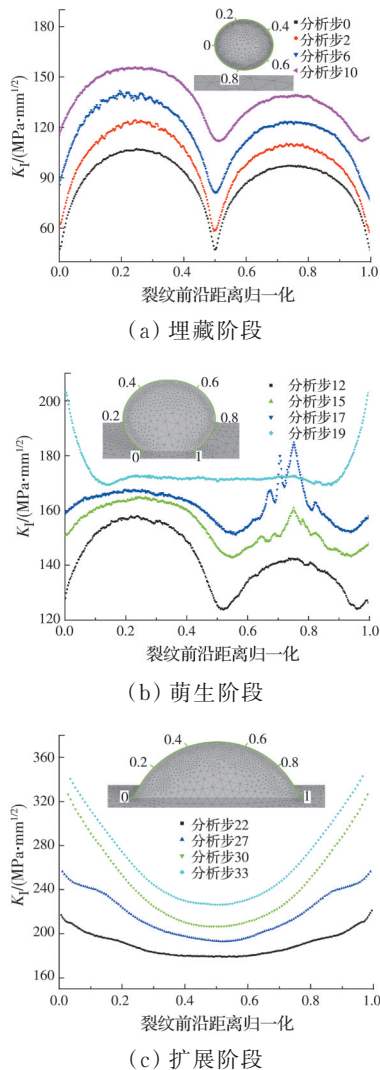


图5 疲劳裂纹前沿应力强度因子分布

Fig. 5 Distribution of stress intensity factors in fatigue crack front

3.2 应力强度因子沿不同路径的动态分析

在疲劳裂纹扩展过程中,不同路径的应力状态对于研究裂纹的不同生长阶段具有重要意义。分析初始深度 $a=0.25$ mm、裂纹半长 $c=1.25$ mm、裂纹形态比 $a/c=0.2$,以及初始深度 $a=0.25$ mm、裂纹半长 $c=0.5$ mm、裂纹形态比 $a/c=0.5$ 两种裂纹形态的应力强度因子发展规律,如图6所示。 $a/c=0.2$ 的埋藏裂纹在978 566次荷载循环即贯穿焊缝进入裂纹扩展阶段; $a/c=0.5$ 的埋藏裂纹在1 589 066

次荷载循环进入裂纹扩展阶段,较大形态比的埋藏裂纹更易萌生表面裂纹。

在埋藏阶段, 90° 扩展方向的应力强度因子最大, 0° 方向最小,之后两个方向的应力强度因子逐渐趋于一致。当多个方向的应力强度因子相等时,埋藏裂纹突破焊缝下表面进入到表面裂纹扩展阶段,在此阶段, 0° 方向的应力强度因子持续增大,并且显著大于其他方向,如图6所示。裂纹相应的长轴方向扩展速率也持续增加,而 90° 方向的应力强度因子缓慢增加后趋于稳定状态。裂纹向表面长轴方向加速扩展,最后,按卜一等^[20]提出的表面裂纹扩展规律发展成一条扁长的裂纹。

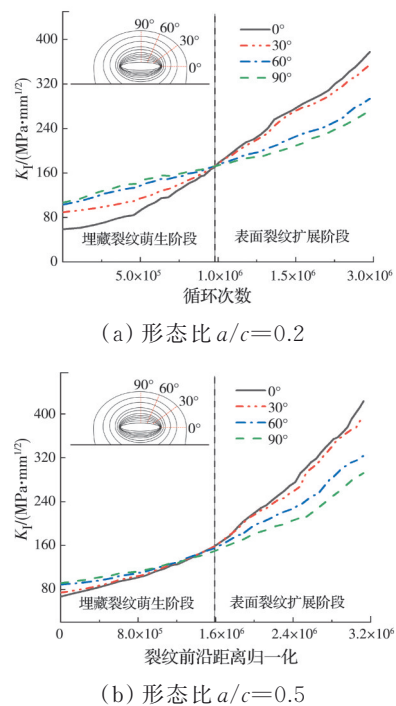


图6 应力强度因子沿路径变化曲线

Fig. 6 Stress intensity factor variation curve along the path

4 钢桥面板疲劳裂纹形态比分析

4.1 不同形态比的裂纹静态应力强度因子分析

在焊缝中引入埋深1 mm、初始深度 $a=0.25$ mm的轴向埋藏裂纹,通过改变裂纹形态比 a/c ,计算埋藏裂纹前沿应力强度因子的变化趋势,不同形态比的裂纹前沿应力强度因子曲线分布如图7所示。

K_I 数值呈双峰波浪形,当 $a/c < 1$ 时,其最小值位于裂纹的左右两端点,最大值位于裂纹的上下两端点,显示裂纹易沿上下表面扩展;随着 a/c 的增大, K_I 的数值整体下降,最大值与最小值之差逐渐减小,意味着此时裂纹扩展逐渐趋于稳定。当 $a/c=1.0$

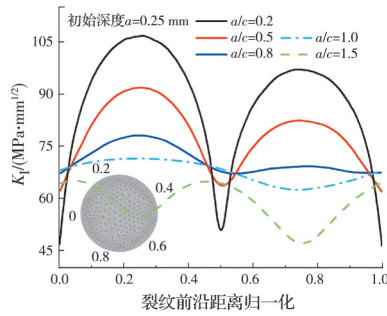


图7 埋藏裂纹静态应力强度因子

Fig. 7 Static stress intensity factor of buried crack

时,埋藏裂纹前沿的应力强度因子大小近乎相等,表明此时裂纹扩展比较稳定,会保持 $a/c=1.0$ 的形态持续扩展。当 $a/c>1.0$ 时,随着 a/c 的增大,最大值与最小值之差逐渐增大,形态比 $a/c>1.0$ 的最大值与最小值点的位置与 $a/c<1.0$ 时的位置刚好相反。因此,针对钢桥面板焊缝中检测出的埋藏裂纹,可通过埋藏裂纹形态比数值判断裂纹扩展方向,从而采取相应的预防措施。

顶板与纵肋焊接细节焊趾处引入初始深度 $a=2$ mm、半长轴 $c=4$ mm的初始裂纹,通过改变裂纹形态比 a/c 的数值,不同形态比的裂纹前沿 K_I 曲线分布如图8所示。疲劳裂纹前沿的 K_I 均随初始疲劳裂纹形态比 a/c 的增大而逐渐减小,除 $a/c=0.2$ 外,裂纹最深点的 K_I 的是整个裂纹前沿的最小点,裂纹两端表面点是整个裂纹前沿的最大点,表面裂纹易沿左右表面点扩展。

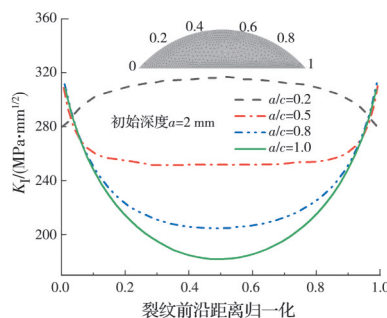


图8 表面裂纹静态应力强度因子

Fig. 8 Static stress intensity factor of surface crack

4.2 埋藏阶段裂纹形状演化

对于 $a/c<1.0$ 的埋藏裂纹,随着裂纹扩展深度的增加,裂纹形态比 a/c 逐渐增大至1.0,后保持不变;对于 $a/c>1.0$ 的埋藏裂纹,随着裂纹扩展深度的增加,裂纹形态比 a/c 减小,数值接近于1.0后保持不变,如图9所示。说明埋藏裂纹不断扩展,最后形状趋近于圆形。

钢桥面板埋藏阶段裂纹扩展形状演化过程为:随着疲劳裂纹扩展,裂纹扩展长度逐渐增大,但始终在长轴方向的扩展长度最短,在短轴方向的扩展

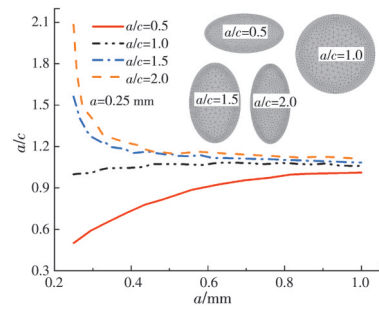


图9 埋藏阶段裂纹形态演变

Fig. 9 Evolution of crack morphology in burial stage

长度最长,且两者会逐渐接近,最终裂纹扩展的形状并非呈椭圆形,而是趋近于圆形。由于此时埋藏裂纹前沿的应力强度因子数值大小相近,除非受到外界条件的激励,否则埋藏裂纹一直保持圆形不断扩展。裂纹形态比演变有限元分析结果如图10所示,可以看出,埋藏裂纹形状会对初期扩展阶段产生影响,任意初始形状的埋藏裂纹逐步扩展为圆形,不受初始尺寸的影响。

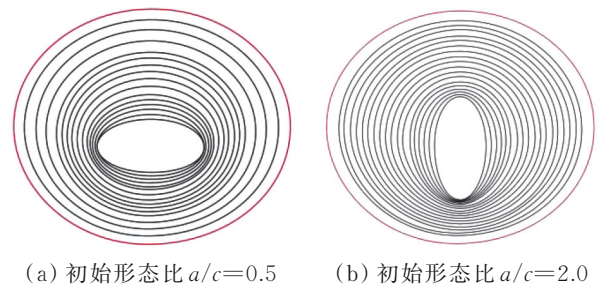


图10 埋藏裂纹扩展形态

Fig. 10 Buried crack propagation morphology

4.3 表面扩展阶段裂纹形状演化

对于 $a/c<0.25$ 的表面裂纹,随着裂纹扩展深度的增加,裂纹形态比 a/c 增大到0.26后保持不变;对于 $a/c>0.25$ 的表面裂纹,随着裂纹深度增加,裂纹形态比 a/c 减小到0.26后保持不变,说明表面裂纹随着扩展,最后趋于一个固定形状,如图11所示。

形态比 $a/c=0.2$ 、 $a/c=1.0$ 的表面裂纹数值模拟扩展轨迹结果如图12所示。裂纹最深点的扩展

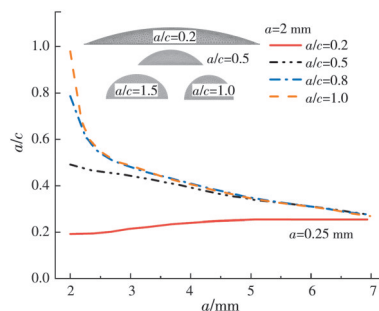


图11 扩展阶段裂纹形状演化

Fig. 11 Evolution of crack morphology during propagation

距离最小,而左右两端表面点的扩展距离最大且逐渐增大,裂纹将快速变得扁平。钢桥面板试验验证裂纹扩展阶段,当疲劳裂纹持续扩展至贯穿顶板被发现时,通常已经达到很长的长度,如图 13 所示。

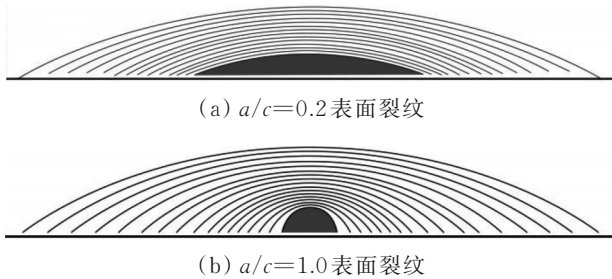


图 12 表面裂纹扩展阶段形状演化结果

Fig.12 Results of shape change in crack growth stage

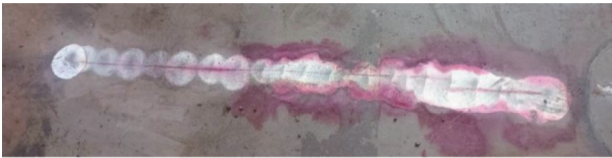


图 13 钢桥面板裂纹扩展试验图

Fig. 13 Test diagram of crack growth of steel bridge deck

4.4 钢桥面板疲劳裂纹全寿命周期形状变化结果

Gotoh 等^[21]对埋藏裂纹扩展形状演变进行了试验研究,试样的中心位置设有对接焊接接头,在图 14(a)中的灰色区域引入了一个初始的人工埋藏缺陷,采用均匀拉伸加载条件。

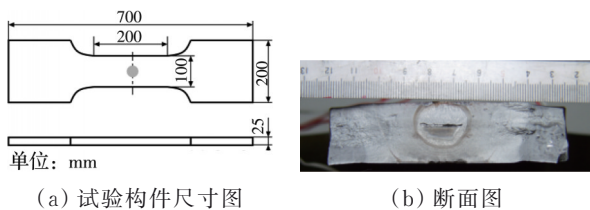


图 14 文献[21]试样细节

Fig. 14 Sample details in reference [21]

通过数值模拟得到的裂纹增长历程曲线与测量结果的比较如图 15 所示,其中虚线表示引用文献试验测量结果,实线表示 F-A 交互技术模拟结果。两者形态变化基本一致,分析结果表明,F-A 交互技术能够准确地估计焊缝中嵌入焊接缺陷产生的疲劳裂纹扩展轨迹历史。钢桥面板疲劳裂纹全寿命完整形状演化结果如图 15 所示。

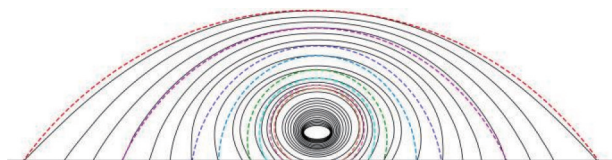


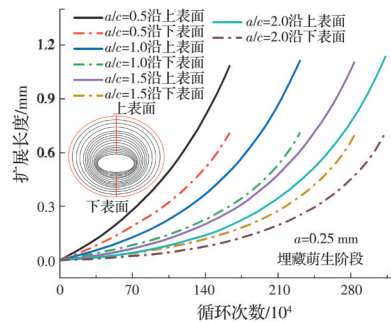
图 15 疲劳裂纹全寿命周期形状演化结果

Fig. 15 Fatigue crack life cycle shape change results

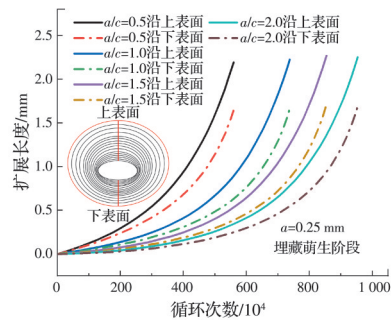
5 钢桥面板疲劳裂纹寿命分析

5.1 裂纹埋藏阶段扩展速率分析

钢桥面板疲劳裂纹扩展速率受形态比的影响,其中不同形态比下裂纹深度方向扩展到一半顶板厚度,定义疲劳破坏扩展终止^[17]。分析不同埋藏深度下 4 种形态比的裂纹扩展规律,如图 16 所示。



(a) 埋藏深度 1 mm



(b) 埋藏深度 2 mm

图 16 裂纹埋藏阶段扩展速率分析

Fig. 16 Analysis of crack propagation rate in buried stage

如图 16(a)所示,埋深 1 mm 的初始裂纹沿上表面的扩展速率明显大于下表面的扩展速率,埋藏裂纹下表面端点扩展 0.75 mm 至贯穿焊缝时,裂纹上表面扩展了 1.16 mm,相应的扩展长度增大了 54%;图 16(b)显示,埋深 2 mm 的初始裂纹沿上表面的扩展速率明显大于下表面的扩展速率,埋藏裂纹下表面端点扩展 1.75 mm 至贯穿焊缝时,裂纹上表面扩展了 2.3 mm,相应的扩展长度增大了 31%,裂纹向顶板方向扩展更快。

5.2 裂纹全寿命周期扩展速率分析

图 16 计算显示了裂纹埋藏阶段的扩展速率,为研究钢桥面板疲劳裂纹全寿命周期的扩展规律,还分析了疲劳裂纹扩展阶段的速率,如图 17 所示。规范^[6]对裂纹疲劳寿命定义为:裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命总寿命是二者之和。当埋藏裂纹突破焊缝下表面生成表面裂纹,即从埋藏萌生阶段进入到扩展阶段。在此阶段裂纹的扩展速率急剧增加,当初始埋藏形态比 $a/c=0.5$ 、埋藏深度 1 mm 时,扩展

阶段的扩展速率是埋藏阶段的6.5倍;当初始埋藏形态比 $a/c=0.5$ 、埋藏深度2 mm时,扩展阶段的扩展速率是埋藏阶段的8倍;当初始埋藏形态比 $a/c=2.0$ 、埋藏深度为1、2 mm时,扩展阶段的扩展速率是埋藏阶段的11.8倍、13.8倍。可见裂纹形态比和埋藏深度对扩展速率有很大影响。

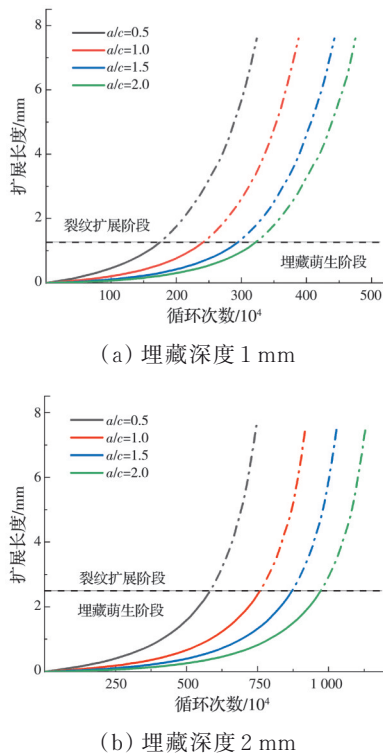


图17 疲劳裂纹全寿命周期扩展速率分析
Fig. 17 Analysis of fatigue crack growth rate in full life cycle

由此可见,若裂纹的形态比 a/c 较小,则可以更早进入裂纹扩展阶段。在新阶段,裂纹的应力强度因子更高,相应的裂纹扩展速度明显更快。相同的扩展长度下,较小形态比的裂纹循环次数明显降低,这也将导致不同形态的初始缺陷对疲劳寿命影响很大。

5.3 裂纹疲劳寿命分析

计算考虑裂纹不同形态比的裂纹扩展速率分析。为研究裂纹不同阶段的特性,计算了裂纹全寿命周期的分布特质,如图18所示。在初始埋藏深度为1 mm时,形态比 $a/c=0.5$ 的埋藏裂纹在1 748 452次循环后进入裂纹扩展阶段,而形态比 $a/c=2.0$ 的埋藏裂纹在3 227 473次循环后进入裂纹扩展阶段,受形态比的影响,埋藏阶段的疲劳寿命增大了85%,小形态比的裂纹更难萌生。而不同形态比的裂纹扩展寿命大致在148万次循环后,疲劳裂纹总寿命增大了47%。形态比 $a/c=0.5$,埋藏深度2 mm的裂纹疲劳总寿命是埋藏深度1 mm的2.3倍,较大

埋深的缺陷更难达到疲劳寿命。显然,初始形态比、埋藏深度等参数对裂纹疲劳寿命影响很显著。

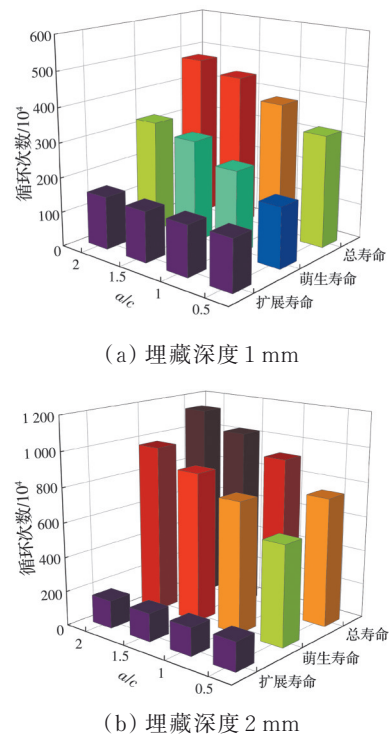


图18 各扩展阶段疲劳寿命分布图
Fig. 18 Fatigue life distribution diagram of each expansion stage

从图18可以看出,在裂纹扩展寿命分析中,扩展阶段的疲劳寿命较萌生寿命明显减小。随着裂纹形态比的增大,疲劳埋藏萌生寿命和疲劳总寿命逐步增大,而对扩展阶段疲劳寿命影响不大。裂纹埋藏萌生寿命在疲劳总寿命中占比很大,不同形态比对裂纹扩展有明显影响,工程实际中应考虑焊接缺陷形态比对疲劳寿命的影响。针对工程中检测出的埋藏裂纹或缺陷,可通过测量裂纹的形态比数值和埋藏深度,进而预测裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命,对应不同的发展阶段采取相应的预防和加固措施。

6 结论

开展钢桥面板焊缝处疲劳裂纹全寿命周期扩展分析,揭示疲劳裂纹不同生长阶段的应力强度因子分布及动态变化规律,发现裂纹扩展形态演化特性,开展不同埋藏深度的裂纹扩展速率及疲劳寿命分析。主要结论如下:

1) 针对疲劳裂纹扩展特性,将裂纹扩展划分为埋藏阶段、萌生阶段、扩展阶段,并揭示了不同发展阶段的应力强度因子变化规律。在沿不同角度路径的应力强度因子分析中,发现裂纹埋藏萌生阶段

和扩展阶段的应力强度因子分布正好相反。

2)不同形态的埋藏裂纹应力强度因子围绕 $a/c=1.0$ 的数值逐渐收敛。随着裂纹的扩展,任意初始形态比的埋藏裂纹最终形状都趋于圆形,不受初始尺寸影响。针对表面裂纹,任何形态的初始尺寸,最后形状都趋于一个固定形态 $a/c=0.26$,当疲劳裂纹持续扩展至贯穿顶板被发现时,已经达到较长的长度。

3)埋藏萌生阶段裂纹沿上表面的扩展速率明显大于下表面。埋藏裂纹会先贯穿焊缝下表面,从埋藏萌生阶段进入裂纹扩展阶段,急速往顶板方向扩展,裂纹扩展阶段的扩展速率是埋藏阶段的11.7倍。

4)随着形态比 a/c 的增大,埋藏裂纹更难贯穿表面,埋藏萌生阶段的疲劳寿命相应增大,扩展阶段的疲劳寿命保持不变。萌生寿命在疲劳总寿命中占比很大,验证了实桥和试验中裂纹一旦被发现将快速贯穿顶板的现象。综合来看,应考虑裂纹形态比、埋深等参数对钢桥面板疲劳评估寿命和可靠性的影响。

参考文献

- [1] 张清华, 劳武略, 崔闯, 等. 钢结构桥梁疲劳2020年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊1): 79-90.
ZHANG Q H, LAO W L, CUI C, et al. State-of-the-art review of fatigue of steel bridge in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup 1): 79-90.
- [2] CHENG B, YE X H, CAO X E, et al. Experimental study on fatigue failure of rib-to-deck welded connections in orthotropic steel bridge decks [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 157-167.
- [3] 周绪红, 朋茜, 秦凤江, 等. 钢桥面板顶板与纵肋连接焊根位置疲劳损伤特征[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 1-12.
ZHOU X H, PENG X, QIN F J, et al. Fatigue damage characteristics of rib-to-deck weld root on orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 1-12. (in Chinese)
- [4] 王春生, 翟慕赛, Houankpo TON. 正交异性钢桥面板典型细节疲劳强度研究[J]. 工程力学, 2020, 37(8): 102-111.
WANG C S, ZHAI M S, TON H. Fatigue strength of typical details in orthotropic steel bridge deck [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(8): 102-111. (in Chinese)
- [5] 在用含缺陷压力容器安全评定: GB/T 19624—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Safety assessment of in-service pressure vessels containing defects: GB/T 19624—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [6] Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures: BS 7910: 2019 [S]. London: British Standards Institution, 2019.
- [7] 谢阳, 龙伟, 赵波, 等. 压力容器疲劳加载下埋藏裂纹扩展规律的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58(2): 149-154.
XIE Y, LONG W, ZHAO B, et al. Research on embedded crack propagation law of pressure vessel under fatigue loading [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2021, 58(2): 149-154. (in Chinese)
- [8] 张清华, 金正凯, 刘益铭, 等. 钢桥面板纵肋与顶板焊接细节疲劳裂纹扩展三维模拟方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 57-66.
ZHANG Q H, JIN Z K, LIU Y M, et al. 3-D simulation method for fatigue crack propagation in rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 57-66. (in Chinese)
- [9] 黄云, 张清华, 余佳, 等. 钢桥面板与纵肋焊缝疲劳评估及裂纹扩展研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 260-268.
HUANG Y, ZHANG Q H, YU J, et al. Fatigue evaluation and crack propagation characteristics of rib-to-deck welded joints in steel bridge decks [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 260-268. (in Chinese)
- [10] MALJAARS J, VROUWENVELDER A C W M. Probabilistic fatigue life updating accounting for inspections of multiple critical locations [J]. International Journal of Fatigue, 2014, 68: 24-37.
- [11] LI C Q, YANG S T. Stress intensity factors for high aspect ratio semi-elliptical internal surface cracks in pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, 96/97: 13-23.
- [12] 王本劲, DE BACKER H, 陈艾荣. 正交异性钢桥面板裂纹扩展的均质化方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 113-120, 158.
WANG B J, DE B, CHEN A R. A homogenization method on crack growth on orthotropic steel decks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 113-120, 158. (in Chinese)
- [13] TABATABAEIPOUR M, HETTLER J, DELRUE S, et al. Non-destructive ultrasonic examination of root defects in friction stir welded butt-joints [J]. NDT & E International, 2016, 80: 23-34.
- [14] LIU Y, CHEN F H, WANG D, et al. Fatigue crack growth behavior of rib-to-deck double-sided welded joints of orthotropic steel decks [J]. Advances in Structur-

- al Engineering, 2021, 24(3): 556-569.
- [15] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.
- [16] LIU Y, CHEN F H, LU N W, et al. Fatigue performance of rib-to-deck double-side welded joints in orthotropic steel decks [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 127-142.
- [17] International Institute of Welding. Recommendations for fatigue design of welded joints and components: IIW-1823-07 [R]. IIW, Paris, 2008.
- [18] 张亚海, 郭宝圣, 张卫国, 等. 钢桥面板-纵肋双面焊缝疲劳裂纹应力强度因子[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(03): 62-70.
- ZHANG Y H, GUO B S, ZHANG W G, et al. Fatigue crack stress intensity factor of double-sided welded rib-to-deck joints in steel bridge deck [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 62-70.
- [19] 张清华, 李俊, 郭亚文, 等. 正交异性钢桥面板结构体系的疲劳破坏模式和抗力评估[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 71-81.
- ZHANG Q H, LI J, GUO Y W, et al. Fatigue failure modes and resistance evaluation of orthotropic steel bridge deck structural system [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 71-81. (in Chinese)
- [20] 卜一之, 金正凯, 黄云, 等. 钢桥面板纵肋顶板焊缝疲劳裂纹扩展的关键影响因素[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 61-70.
- BU Y Z, JIN Z K, HUANG Y, et al. Key influencing factors of fatigue crack propagation in rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9): 61-70. (in Chinese)
- [21] GOTOH K, HARADA K, ANAI Y. Estimation of the shape evolution and the growth history of an embedded crack by fatigue loading [C]//Proceedings of ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 19-24, 2011, Rotterdam, The Netherlands, 2011: 277-284.

(编辑 王秀玲)