

# 铁路钢桥节点既有腐蚀疲劳裂纹扩展寿命

刘 嘉<sup>1</sup>, 季则亮<sup>2</sup>, 瞿伟廉<sup>1</sup>, 卢家星<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430030)

**摘 要:**为评估服役中铁路钢桥由于环境腐蚀作用产生初始裂纹后的剩余疲劳寿命,对列车行走荷载作用下铁路钢桥节点横梁处在环境腐蚀形成初始裂纹后的疲劳裂纹扩展寿命进行研究。以铜九(铜陵—九江)线鄱阳湖铁路钢桥为背景,基于子模型法的多尺度建模方法,运用通用有限元软件建立铁路钢桥整体壳体模型和节点横梁处含初始裂纹的精细网格划分的实体模型,获得了在列车行走荷载作用下铁路钢桥节点横梁处的精确动应力响应;基于断裂力学的四参数 Forman 公式对铁路钢桥在 4 种不同初始裂纹长度下的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命进行了评估与对比,并对有无环境腐蚀作用下的疲劳裂纹扩展寿命进行了对比分析。结果表明:基于子模型法的壳-实体多尺度建模方法既可以满足大型复杂结构在数值计算过程中的计算效率,又能够满足评估疲劳寿命计算所需的精确动力响应要求,可以精确评估铁路钢桥腐蚀疲劳裂纹扩展寿命;铁路钢桥既有腐蚀疲劳裂纹扩展寿命主要产生在小裂纹扩展阶段,计算得到 0.5 mm 初始裂纹扩展到 10 mm 时需要循环 484 509 次,占总扩展寿命的 50.2%;铁路钢桥疲劳裂纹扩展寿命受环境腐蚀的影响非常大,其比无腐蚀疲劳裂纹扩展寿命降低 79% 左右。研究结果可为预测疲劳裂纹发展趋势、评估铁路钢桥剩余寿命和评定结构的安全性运营能力提供参考。

**关键词:**桥梁工程;腐蚀疲劳裂纹扩展寿命;多尺度建模方法;节点横梁;子模型法

**中图分类号:**U448.13

**文献标志码:**A

## Corrosion fatigue crack propagation life of joints of railway steel bridge

LIU Jia<sup>1</sup>, JI Ze-liang<sup>2</sup>, QU Wei-lian<sup>1</sup>, LU Jia-xing<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Hubei Province for Road, Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan 430030, Hubei, China)

**Abstract:** In order to evaluate the residual fatigue life of the serviced railway steel bridge after the occurrence of initial crack due to the environmental corrosion, the corrosion fatigue crack propagation life of crossbeam region on joints of steel railway bridge after the existence of corrosion fatigue crack in the environmental corrosion was studied under the train running load in this paper. Taking the Poyang Lake Railway Steel Bridge on Tongjiu (Tongling to Jiujiang) Line as a research background, the integral shell element model of steel railway bridge and the finely meshed solid model of joints with initial crack were established by using general finite element

software based on the multi-scale modeling method of the sub-model method. The precise dynamic stress response of the joints of steel railway bridge was obtained under the train running load. The corrosion fatigue crack propagation life of steel railway bridge with four different initial crack lengths were evaluated and compared based on the four parameters Forman formula, and the crack propagation life with or without environmental corrosion of railway steel bridge was analyzed and compared. The results show that the shell-solid multi-scale modeling method based on the sub-model method can not only meet the computational efficiency of the large-scale complex structure in the numerical calculation process, but also meet the requirements of precise dynamic response required for the calculation of fatigue life, and it can accurately evaluate corrosion fatigue crack propagation life of railway steel bridge. The corrosion fatigue crack propagation life of railway steel bridge is mainly produced in the small crack propagation stage, a 0.5 mm initial crack enlarging to 10 mm needs cycle 484 509 times, it account for 50.2% of the total propagation life. The fatigue crack propagation life of railway steel bridge is largely affected by environmental corrosion, and it is reduced by 79% compared with the fatigue crack propagation life without corrosion. The research results can provide a reference for predicting the development trend of fatigue crack, assessing the residual life of railway steel bridge and assessing the safety and operational capacity of the structure. 1 tab, 11 figs, 25 refs.

**Key words:** bridge engineering; corrosion fatigue crack propagation life; multi-scale modeling method; crossbeam region on joint; sub-model method

## 0 引言

随着中国高速铁路建设里程的快速增长,钢桥在铁路基础设施建设中得到了广泛应用,因此确保铁路钢桥运营过程中的安全性和耐久性,对防止重大安全事故的发生尤为重要。然而,铁路钢桥长期服役于自然环境下,其下弦节点横梁处非常容易积水,加之直接承受列车行走下的动力荷载,其处于多轴不对称交变应力状态,使得节点横梁处易产生初始腐蚀裂纹<sup>[1-3]</sup>。列车行走荷载产生的循环应力和自然环境腐蚀的协同作用会显著降低钢材的韧性,造成既有裂纹快速扩展,结构构件突然断裂失效,最终导致结构的腐蚀疲劳破坏<sup>[4-6]</sup>。因此,对铁路钢桥节点横梁处在既有腐蚀疲劳裂纹下进行裂纹扩展寿命评估是十分必要的。

目前,国内外学者对疲劳裂纹扩展寿命的评估进行了较多的理论研究和疲劳试验,取得了一系列重要成果。Dündar 等提出了一种用于多裂纹断裂和疲劳裂纹扩展的模拟方法<sup>[7]</sup>;Pereira 等提出了预测微动裂纹扩展的循环内聚力模型,运用此模型可以有效地模拟非线性效应在试件疲劳裂纹扩展中的作用<sup>[8]</sup>;Proudhon 等提出一种模拟晶体材料三维疲劳裂纹扩展的迭代方法,该方法基于塑性活动的裂纹尖端周围的损伤指标,通过局部裂纹方向和生长

速率估计裂纹扩展的路径<sup>[9]</sup>;刘艳萍等对 14MnNbq 焊接钢桥梁的疲劳裂纹扩展行为进行了研究,给出了参数  $C$  与应力比  $R$  关系的不同形式的函数表达式并考虑应力比对疲劳裂纹扩展速率表达式的改变<sup>[10]</sup>;谢凡等对不同板厚的 14MnNbq 钢焊接件进行了裂纹扩展试验,发现随着原始焊接板厚的增加,疲劳裂纹扩展速率也在增大<sup>[11]</sup>;宗亮等对 Q345qD 桥梁钢疲劳裂纹扩展速率进行了试验研究,获得了不同厚度、不同应力比下试件的疲劳裂纹扩展速率参数<sup>[12]</sup>。针对环境腐蚀对结构或构件疲劳寿命影响的研究,张春涛等对 Q345 等边角钢腐蚀疲劳性能进行了试验研究,发现在疲劳荷载一致情况下,试件疲劳寿命随腐蚀时间增加会急剧减小<sup>[13]</sup>;洪波等研究了干湿交替环境对海洋钢结构腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响,发现随着干湿比的增加,腐蚀疲劳裂纹扩展速率先增大后减小<sup>[14]</sup>;韩晓东对腐蚀作用下节段式钢箱梁试件焊缝热点应力的疲劳寿命做了相关研究,发现在荷载等级 25 kN、无涂层保护下试件的寿命大概是 10 年<sup>[15]</sup>。

综上所述,虽然对疲劳裂纹扩展寿命的研究已较为成熟,但大多研究局限于试件或结构构件的疲劳寿命评估,很少针对在环境腐蚀作用下实际运营中大型桥梁的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命进行研究。大型桥梁结构在数值模拟时,为了获得较高的计算效

率,大多采用简化的建模方法,但这会造成与疲劳寿命评估时所需的较高精确动力响应的矛盾。为此,本文结合铜九(铜陵—九江)线鄱阳湖铁路钢桁架桥,基于子模型法建立铁路钢桥整体壳体有限元模型和下弦大节点横梁处含既有腐蚀疲劳裂纹的实体模型;获取在实际列车行走荷载作用下,铁路钢桥节点横梁处的动应力响应和裂纹尖端应力强度因子;基于断裂力学的全范围四参数 Forman 公式对铁路钢桥在 4 种不同初始裂纹长度下的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命进行评估与对比,并对有无环境腐蚀作用下的疲劳裂纹扩展寿命进行对比分析。

## 1 腐蚀疲劳裂纹扩展理论

铁路钢桥下弦节点横梁处在列车行走荷载产生的动应力和环境腐蚀的交替作用下,初始裂纹逐渐扩展,一旦裂纹尖端的应力强度因子值达到材料断裂韧性  $K_c$ ,结构就会产生失效破坏<sup>[16]</sup>。因此,根据结构断裂失效公式可得到结构失效时的临界裂纹长度  $a_c$  满足

$$K_{\max} = k\sigma_{\max} \sqrt{\pi a_c} \leq K_c / C_{\text{corr}} \quad (1)$$

式中: $K_{\max}$  为应力强度因子最大值; $k$  为材料几何修正系数; $\sigma_{\max}$  为循环应力最大值; $C_{\text{corr}}$  为腐蚀疲劳裂纹扩展速率修正系数,与材料和环境有关。

当初始裂纹在应力强度因子值  $K$  大于应力强度因子阈值  $\Delta K_{\text{th,cf}}$  时裂纹开始扩展。根据文献[17],应力强度因子阈值  $\Delta K_{\text{th,cf}}$  与应力比  $R$  有关,即

$$\Delta K_{\text{th,cf}} \approx \Delta K_{\text{th}} = \Delta K_{\text{th(0)}} (1 - \beta R)^\alpha \quad (2)$$

$$R = K_{\min} / K_{\max}$$

式中: $\Delta K_{\text{th}}$  为修正应力强度因子幅阈值; $\Delta K_{\text{th(0)}}$  为基本应力强度因子幅阈值; $\alpha$ 、 $\beta$  为由试验确定的参数; $K_{\min}$  为应力强度因子最小值。

采用基于断裂力学的全范围四参数 Forman 公式<sup>[18]</sup>评估铁路钢桥既有腐蚀疲劳裂纹扩展寿命,即

$$\frac{da}{dN} = C(1-f)^n \Delta K^n \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{th}}}{\Delta K}\right)^p / (1-R)^n \left(1 - \frac{\Delta K}{(1-R)K_c}\right)^q \quad (3)$$

式中: $da/dN$  为疲劳裂纹扩展速率, $a$  为裂纹长度, $N$  为循环次数; $C$ 、 $n$ 、 $p$ 、 $q$  为试验所得与材料有关的常数; $\Delta K$  为应力强度因子幅; $f$  为裂纹张开函数,在应力比  $R$  较小时取  $f=R$ 。

根据腐蚀疲劳裂纹扩展和裂纹闭合效应试验得到相关数据<sup>[10,19]</sup>,对式(3)进行工程模型修正,可得

修正的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命  $\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{cf}}$  为

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\text{cf}} = C_{\text{corr}} C(1-f)^n (U\Delta K)^n \left(1 - \frac{\Delta K_{\text{th}}}{U\Delta K}\right)^p / (1-R)^n \left(1 - \frac{U\Delta K}{(1-R)K_c}\right)^q \quad (4)$$

式中: $U$  为闭合裂纹参数,与应力比  $R$  有关。

在确定初始裂纹长度、应力强度因子幅阈值  $\Delta K_{\text{th,cf}}$  以及腐蚀疲劳裂纹扩展速率修正系数  $C_{\text{corr}}$ 、 $n$ 、 $p$ 、 $q$ 、 $U$  后,铁路钢结构桥梁节点处腐蚀疲劳裂纹扩展寿命可利用式(4)来计算,计算步骤为:①利用有限元模型获取铁路钢桥节点各杆件边界处在裂纹水平开合方向的应力时程曲线,运用雨流计数法提取应力时程曲线的应力幅  $\Delta\sigma$ ,并对应应力幅分组,选取对疲劳裂纹扩展作用较大的若干组应力幅,获取初始裂纹尖端处的应力时程,利用式(2)计算应力比  $R$  和应力强度因子幅阈值  $\Delta K_{\text{th,cf}}$ ;②根据材料的断裂韧性,利用式(1)计算临界裂纹长度  $a_c$ ;③分别建立 29 组裂纹扩展模型并施加步骤①获取的应力幅,计算各裂纹扩展模型的应力强度因子幅  $\Delta K$ ,建立应力强度因子幅库,并对数据进行数值拟合,获得应力强度因子幅与裂纹长度的关系曲线;④编写用于腐蚀疲劳裂纹扩展寿命评估的程序,利用应力强度因子幅库对任意裂纹长度  $a_i$  对应的应力强度因子幅  $\Delta K_i$  线性插值,将插值得到的应力强度因子幅  $\Delta K_i$  与应力强度因子阈值  $\Delta K_{\text{th,cf}}$  比较,判断是否造成裂纹扩展;⑤根据式(4)计算每一步裂纹扩展长度  $\Delta a_{i-1}$  和裂纹扩展循环次数  $\Delta N_i$ ,计算裂纹扩展后每一步裂纹长度  $a_i = a_{i-1} + \Delta a_{i-1}$  和裂纹扩展循环次数  $N_i = N_{i-1} + \Delta N_{i-1}$ ,不断循环计算直到裂纹长度达到临界裂纹长度  $a_c$  时停止,输出铁路钢桥腐蚀疲劳裂纹扩展循环次数  $N$ 。计算流程如下页图 1 所示。

## 2 既有腐蚀疲劳裂纹扩展寿命评估

### 2.1 工程概况

以铜九线鄱阳湖铁路钢桁架桥为工程背景,对其既有腐蚀疲劳裂纹扩展寿命进行评估。桥主桁架共有 4 跨,每跨长度 120 m,结构总长 480 m。桁架高 14.5 m,宽 13 m,每节节间长 12 m。桁架上下弦杆为箱形截面,截面面积为 800 mm×800 mm。腹杆、纵横梁及上下平联等构件的材料均为 14MnNbq 的 H 形钢,下页图 2 给出了该桥 1/2 结构简图。其中第 1 跨跨中位置下弦大节点长 3.5 m,高 1.5 m,板材厚度为 40 mm,上下弦节点全部采用焊接整体

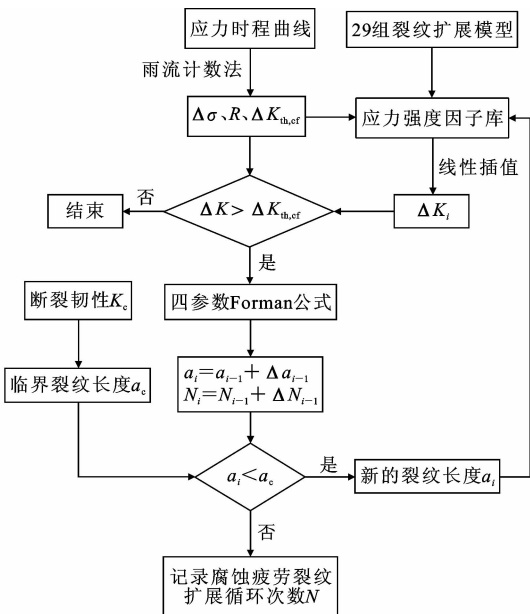


图1 腐蚀疲劳裂纹扩展循环次数计算流程  
Fig.1 Calculation flow of corrosion fatigue crack propagation cycle time

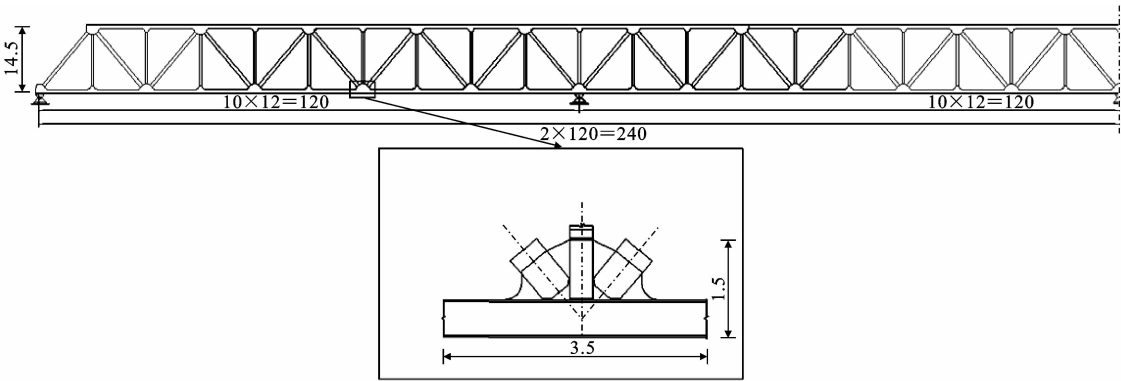
式节点,各杆件与整体式节点采用螺栓连接。

2.2 基于子模型法的铁路钢桥壳-实体多尺度模型

子模型法是 ANSYS 中提供的分离式建模方法,又称为切割边界位移法,是一种基于圣维南原理

的分析方法,是将桥梁整体粗糙壳体模型中对应实体子模型边界处的位移条件和应力条件提取出来,并将其作为精细实体子模型边界处的约束条件和外部荷载进行的分离式建模方式<sup>[20]</sup>。

由于结构疲劳寿命评估需要较为精确的动应力时程,如果建立全桥精细实体模型,虽然计算精度得到满足,但是会造成计算效率低下。因此,建立全桥较为粗糙的壳体模型和精细实体子模型不仅可以满足计算所需的精度,而且计算效率得到保证。此外铁路钢桥节点横梁处的疲劳性能对于全桥整体疲劳寿命的影响至关重要,需要进行精确分析,因此采用基于子模型法的铁路钢桥壳-实体多尺度建模较为合适。将铁路钢桥焊接薄钢板构件简化为壳体单元,采用 Shell63 单元进行建模,采用四边形单元网格划分,共 106 137 个单元,并且在整体壳体模型上施加相应支座约束。下弦大节点实体有限元模型除裂纹体外采用 Solid185 单元建立,节点有限元模型总单元数为 28 834。裂纹体单元采用 ANSYS 中的三维 20 节点实体单元 Solid95,通过 1/4 中点法<sup>[21]</sup>将其退化为奇异等参数单元,在裂纹两侧的接触面上采用 Conta174 和 Targe170 进行面-面接触,避免两侧单元的挤压切入现象。



单位: m

图2 鄱阳湖铁路钢桥桁架及其节点  
Fig.2 Truss and joints of Poyang Lake Railway Steel Bridge

以文献[22]中由环境腐蚀形成的腐蚀坑微小裂纹作为疲劳裂纹扩展的初始长度,其值在 0.5~2 mm 范围。因此,假设由环境腐蚀产生的初始裂纹长度  $a_0$  为 0.5、1、1.5 和 2 mm,采用上述建模方法建立带有这 4 种初始裂纹长度的实体子模型来考虑初始裂纹长度对裂纹扩展寿命的影响。另外,依据相同的建模方法分别建立 29 组裂纹扩展过程中相应长度的腐蚀疲劳裂纹扩展模型,以建立应力强度因子幅数据库,具体尺寸如下页表 1 所示。

2.3 含初始腐蚀裂纹节点子模型动应力分析

该桥所是以货运为主的铁路干线,具有十分繁重的货运任务。货车编号多由 1 节 DF4 和 30 节 C62 重车组成,平均每小时有 6 趟列车通过,当前列车过桥速度为 72 km/h。

以列车过桥时轨道的垂向不平顺为激励,根据列车-轨道耦合动力学原理将车轮压力简化为一系列节点荷载施加到整体壳体有限元模型上来模拟列车过桥过程。时间间隔取 0.02 s,在列车时速 72 km/h 的情况下,列车完全通过桥梁的总时长为

表 1 裂纹扩展模型的裂纹长度

Tab. 1 Crack sizes of crack propagation models

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
裂纹长度	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
裂纹长度	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	61.7	

38.32 s。图 3 给出了第 1 跨跨中某轨道节点处的荷载历程曲线。从图 3 可以看出,列车在过桥时由轨道垂向不平顺激励产生的最大荷载约为 115 kN,且荷载变化十分剧烈,能够造成桥梁结构的较大振动,对结构的疲劳寿命会产生严重影响。

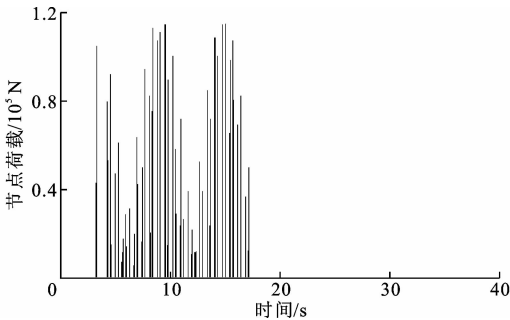


图 3 第 1 跨跨中某节点荷载历程

Fig. 3 Load history of node in the first mid span

利用有限元模型获取铁路钢桥下弦大节点横梁边界处沿裂纹水平开合方向的应力时程曲线,如图 4 所示。可以看出,在列车行走荷载作用下其应力随时间变化较大,在 13.2 s 到达最大应力 22.4 MPa,在 21.8 s 到达最小应力-7.6 MPa,计算得到应力幅约 30 MPa,铁路钢桥节点横梁处在列车行走荷载作用下可以产生振幅变化较大的动应力,且反复的列车过桥作用使其不断产生疲劳损伤累积,这对于结构的疲劳裂纹扩展寿命产生重要影响。

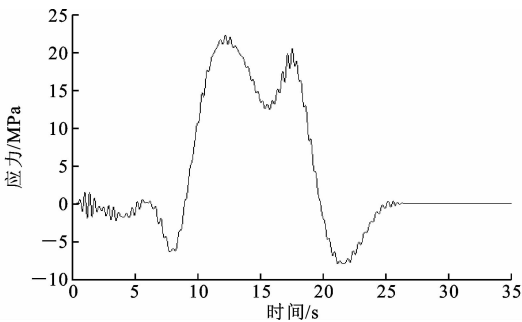


图 4 横梁处沿裂纹水平开合方向应力时程曲线

Fig. 4 Stress time history curve of crossbeam along horizontal open-close direction of crack

图 5 给出了利用雨流计数法提取的应力时程曲线所获得的循环应力幅,其中 2 个较大值分别为 30.18、28.39 MPa。通过与图 4 计算的应力幅对

比,验证了运用雨流计数法提取循环应力幅的准确性。采用相同方法得到铁路钢桥节点各杆件的循环应力幅,滤去较小的循环应力幅后得到若干组应力幅较大的循环,将循环应力幅施加到 29 组裂纹扩展模型上,利用 ANSYS 提供的位移外推法求解裂纹尖端应力强度因子幅<sup>[23]</sup>。

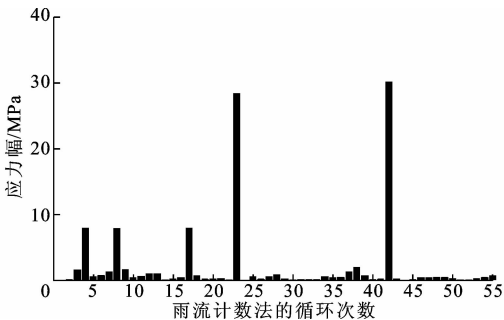


图 5 横梁处应力幅

Fig. 5 Stress amplitude of crossbeam

图 6 给出了初始裂纹尖端处沿裂纹水平开合方向位移时程曲线,由图 6 可知,裂纹尖端处位移峰值的绝对值为 6.1 mm,其位移较大,容易造成结构的疲劳损伤。利用同样的方法获取其他 4 个点的位移时程曲线,根据 ANSYS 的位移外推法利用裂纹前缘 5 个点的位移来计算裂纹的应力强度因子。

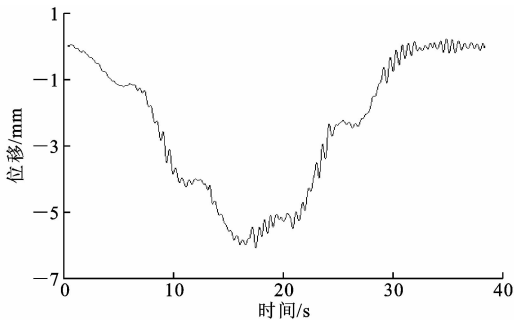


图 6 裂纹尖端位移时程曲线

Fig. 6 Displacement time history curve of crack tip

2.4 应力强度因子幅库

将应力强度因子幅数据库中的数据进行数值拟合,获得雨流计数法提取的循环应力幅作用下应力强度因子幅与裂纹长度的关系曲线,如下页图 7 所示。可以看出,循环 I、II 的应力强度因子幅明显大于循环 III、IV 和 V,会对结构产生较大损

伤,在计算腐蚀疲劳裂纹扩展寿命时,应重点考虑循环 I、II 对腐蚀疲劳裂纹扩展寿命的影响。另外,应力强度因子幅与裂纹长度有较强的线性关系,采用线性插值计算某一裂纹长度下的应力强度因子幅可以得到较为理想的结果。为了验证此结论,建立 11 mm 长的裂纹实体有限元模型,在循环 I 应力幅作用下运用位移外推法计算的应力强度因子幅为  $134.42 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ,利用应力强度因子幅数据库的进行插值计算的应力强度因子幅为  $138.15 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ,两者相差 2.7%,可满足工程计算精度要求。因此,利用应力强度因子幅数据库插值计算应力强度因子幅的方法可行。

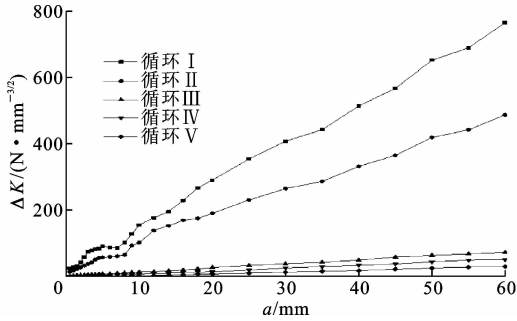


图 7 循环应力幅作用下  $\Delta K$ - $a$  曲线

Fig. 7  $\Delta K$ - $a$  curves under amplitude cyclic stress

2.5 既有腐蚀疲劳裂纹扩展寿命

根据文献[16]、文献[24]、文献[25]确定式(1)、式(2)和式(4)的计算参数,得到应力强度因子阈值  $\Delta K_{th,cf}$  与应力比  $R$  之间的关系为  $\Delta K_{th,cf} = 7.03(1 - 0.85R)$ ;14MnNbq 材料的断裂韧性  $K_c = 125 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,最大循环应力  $\sigma_{max} = 75 \text{ MPa}$ ,几何修正系数  $k = 1.12$ , $C_{corr} = 3.38$ ,根据式(1)计算裂纹扩展临界值  $a_c = 61.7 \text{ mm}$ ;式(4)的系数取值分别为  $C = 1.48 \times 10^{-11}$ 、 $n = 1.68$ 、 $p = 0.73$ 、 $q = 0.445$ ,裂纹扩展闭合效应与应力比的关系为  $U = 0.528 + 0.455R$ 。

利用腐蚀疲劳裂纹扩展寿命计算程序得到:在列车时速  $v = 72 \text{ km/h}$  下,初始裂纹  $a_0 = 0.5 \text{ mm}$  时,铁路钢桥腐蚀裂纹扩展循环次数  $N = 965\,227$ ;初始裂纹  $a_0 = 1.0 \text{ mm}$  时,腐蚀裂纹扩展循环次数  $N = 871\,532$ ;初始裂纹长度  $a_0 = 1.5 \text{ mm}$  时,腐蚀裂纹扩展循环次数  $N = 797\,351$ ;初始裂纹长度  $a_0 = 2.0 \text{ mm}$  时,腐蚀裂纹扩展循环次数  $N = 741\,011$ 。图 8 给出了这 4 种初始裂纹长度下的腐蚀疲劳裂纹扩展循环次数曲线,可以看出,腐蚀疲劳裂纹扩展循环次数曲线在裂纹扩展初期增长速率较慢,在裂纹扩展中后期裂纹扩展速率急剧变快。并且初始裂纹

长度越短其疲劳裂纹扩展循环次数越大,初始裂纹长度  $a_0 = 0.5 \text{ mm}$  的腐蚀裂纹扩展循环次数是初始裂纹长度  $a_0 = 2.0 \text{ mm}$  时的 1.3 倍左右。

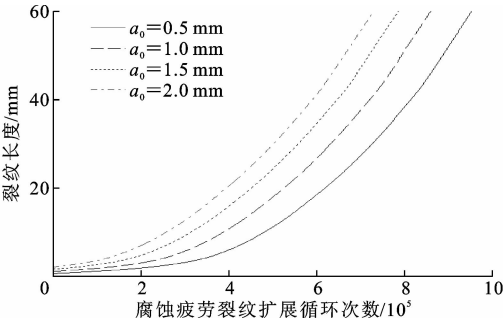


图 8 腐蚀疲劳裂纹扩展曲线

Fig. 8 Curves of corrosion fatigue crack propagation

该桥每小时有 6 趟列车通过,在初始裂纹长度  $a_0 = 0.5 \text{ mm}$  下腐蚀疲劳裂纹扩展寿命为  $965\,227 / (6 \times 24 \times 365) = 18.4$  年,同样获得其他初始裂纹长度下腐蚀疲劳裂纹扩展寿命,如图 9 所示。可以看出,初始裂纹长度  $a_0 = 0.5 \text{ mm}$  下的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命最长,相比之下,初始裂纹长度为 1.0、1.5、2.0 mm 的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命分别降低 9.7%、17.4%和 23.2%。通过计算得到初始裂纹长度由 0.5 mm 扩展到 5 mm 时的疲劳裂纹扩展循环次数为 378 948,占总腐蚀疲劳扩展寿命的 39.3%;初始裂纹长度 0.5 mm 扩展到 10 mm 时的疲劳裂纹扩展循环次数为 484 509,占总腐蚀疲劳扩展寿命的 50.2%,这也充分说明了铁路钢桥的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命主要产生在短小裂纹扩展阶段,在达到一定裂纹长度后会迅速扩展,造成结构的快速失效,严重影响结构的安全性。因此,在实际工程中严格控制构件的初始裂纹长度对提高腐蚀疲劳裂纹扩展寿命至关重要。

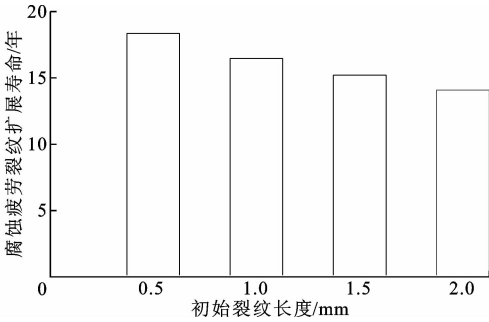


图 9 腐蚀疲劳裂纹扩展寿命

Fig. 9 Corrosion fatigue crack propagation life

2.6 无腐蚀疲劳裂纹扩展寿命

考虑到环境腐蚀在疲劳裂纹扩展过程中的作用,需对比分析有无腐蚀的条件下铁路钢桥的疲劳

裂纹扩展寿命。

图 10 给出了初始裂纹  $a_0 = 2.0 \text{ mm}$  下有无环境腐蚀的疲劳裂纹扩展循环次数曲线,对比发现:有无腐蚀的疲劳裂纹扩展循环次数曲线变化趋势基本一致,在裂纹扩展初期增长速率较小,裂纹扩展速率较慢,在中后期裂纹扩展急剧变快;有腐蚀情况下疲劳裂纹扩展循环次数曲线整体增长速率要远大于无腐蚀的情况,可见环境腐蚀对疲劳裂纹扩展具有很大的促进作用。

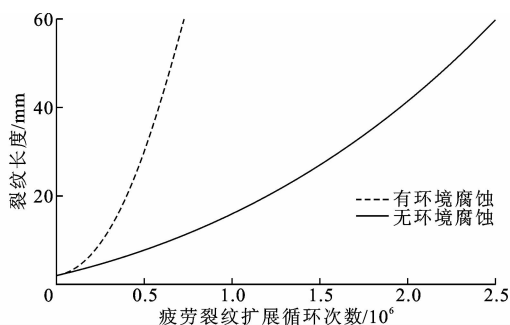


图 10 有无腐蚀的疲劳裂纹扩展曲线

Fig. 10 Crack propagation curves with or without corrosion

对于初始裂纹  $a_0 = 2.0 \text{ mm}$  的情况,无环境腐蚀条件下疲劳裂纹扩展循环次数  $N = 2\,544\,104$ ,寿命为 48.40 年,是有环境腐蚀情况下的 3.4 倍。图 11 给出了 4 种初始裂纹长度下有无腐蚀疲劳裂纹扩展寿命,可以看出,腐蚀疲劳裂纹扩展寿命比无腐蚀疲劳裂纹扩展寿命总体上低 79% 左右。因此,环境腐蚀对疲劳裂纹扩展寿命的影响非常大,在评估实际工程的疲劳寿命时必须对环境腐蚀的影响充分重视,实际工程在服役期间应严格做好防腐工作,这可以大大地延长其服役寿命,保证结构的安全性和耐久性。

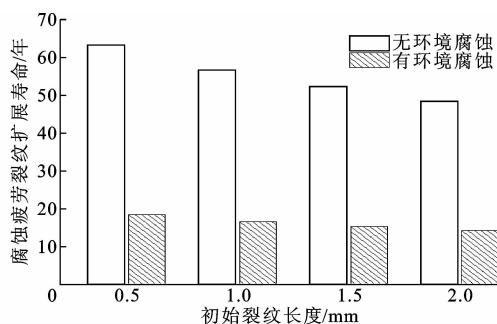


图 11 有无腐蚀裂纹扩展寿命

Fig. 11 Crack propagation lives with or without corrosion

### 3 结 语

(1)采用基于子模型法的铁路钢桥壳-实体有限元建模方法不仅可以提高计算效率,而且能有效获

取铁路钢桥节点横梁处精确动应力响应,以此来评估铁路钢桥既有腐蚀疲劳裂纹扩展寿命可以获得良好的计算效率和精度。

(2)初始裂纹长度为  $0.5 \sim 2.0 \text{ mm}$  时,铁路钢桥腐蚀疲劳裂纹扩展寿命主要产生于小裂纹扩展阶段,裂纹扩展到一定长度后腐蚀疲劳裂纹扩展速率会迅速增大,严格控制结构构件中初始裂纹长度对于提高腐蚀疲劳裂纹扩展寿命至关重要。

(3)铁路钢桥有无环境腐蚀时,疲劳裂纹扩展寿命曲线变化趋势基本一致,但有腐蚀情况下疲劳裂纹扩展速率远大于无腐蚀的情况,在相同初始裂纹长度下铁路钢桥节点横梁处既有腐蚀疲劳裂纹扩展寿命比无腐蚀疲劳裂纹扩展寿命低 79% 左右。环境腐蚀对疲劳裂纹扩展寿命影响非常大,实际工程在服役期间应严格做好防腐工作。

(4)铁路钢桥腐蚀疲劳裂纹扩展寿命评估方法可以为评估运营中的桥梁服役寿命作参考,但是由于每座桥梁的服役环境以及所采用的材料不同,需根据实际情况具体分析,能否提出一种统一的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命评估方法需要进一步研究;同时需要对铁路钢桥节点横梁处的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命进行试验研究,以检验该方法的准确性。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 李 俊,李小珍,任伟平,等. 轨道横梁与整体节点连接的疲劳试验[J]. 西南交通大学学报,2006,41(3): 371-375.  
LI Jun, LI Xiao-zhen, REN Wei-ping, et al. Fatigue test of connection between floor beams and monolithic joints[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006,41(3):371-375.
- [2] 刘 华,裴庆红,阳春龙,等. 钢桁桥横梁裂纹病害原因分析与处治对策[J]. 中国铁道科学,2012,33(增1):92-98.  
LIU Hua, PEI Qing-hong, YANG Chun-long, et al. Analysis of crossbeam crack of steel truss bridge and countermeasures[J]. China Railway Science, 2012,33(S1):92-98.
- [3] 李贞新,李小珍,李 俊,等. 既有线钢桁梁桥裂纹病害及整治措施研究[C]//刘志文,王海东. 全国土木工程研究生学术论坛. 长沙:湖南大学出版社,2007: 279-282.  
LI Zhen-xin, LI Xiao-zhen, LI Jun, et al. Safety evaluation and realignment measure for crack disease of steel truss bridge on existing railway[C] //LIU Zhi-

- wen, WANG Hai-dong. The 5th National Civil Engineering Graduate Academic Forum. Changsha: Hunan University Press, 2007: 279-282.
- [4] 丁国清, 蔡建军, 张波. 桥梁钢结构的大气腐蚀特征[J]. 公路交通科技, 2010, 27(9): 63-66.  
DING Guo-qing, CAI Jian-jun, ZHANG Bo. Features of atmospheric corrosion of bridge steel structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(9): 63-66.
- [5] 吴阿明. 桥梁钢结构腐蚀与疲劳应力研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
WU A-ming. Study of bridge steel structure's corrosion and fatigue stress[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [6] ZHANG Wei, YUAN Hao. Corrosion fatigue effects on life estimation of deteriorated bridges under vehicle impacts [J]. Engineering Structures, 2014, 71: 128-136.
- [7] DÜNDAR H, AYHAN A O. Three-dimensional fracture and fatigue crack propagation analysis in structures with multiple cracks[J]. Computers & Structures, 2015, 158: 259-273.
- [8] PEREIRA K, BORDAS S, TOMAR S, et al. Cyclic cohesive zone models and its applicability to fretting fatigue crack propagation[J]. International Journal of Fracture Fatigue and Wear, 2016, 4: 228-233.
- [9] PROUDHON H, LI J, WANG F, et al. 3D simulation of short fatigue crack propagation by finite element crystal plasticity and remeshing [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 82: 238-246.
- [10] 刘艳萍, 陈传尧, 李建兵, 等. 14MnNbq 焊接桥梁钢的疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 209-213.  
LIU Yan-ping, CHEN Chuan-yao, LI Jian-bing, et al. Fatigue crack of growth behavior for the weld heat-affected zone of 14MnNbq bridge steel[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 209-213.
- [11] 谢凡, 黄晶, 张涛, 等. 板厚对 14MnNbq 钢焊接件疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(3): 83-87, 93.  
XIE Fan, HUANG Jin, ZHANG Tao, et al. Thickness influence on the fatigue crack growth rate of 14MnNbq steel welding assembly[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(3): 83-87, 93.
- [12] 宗亮, 施刚, 王元清, 等. Q345qD 桥梁钢疲劳裂纹扩展速率试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(3): 37-44.  
ZONG Liang, SHI Gang, WANG Yuan-Qing, et al. Experimental study on fatigue crack growth rate of Q345qD bridge steel [J]. China Railway Science, 2015, 36(3): 37-44.
- [13] 张春涛, 范文亮, 李正良. Q345 等边角钢腐蚀疲劳性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 193-198.  
ZHANG Chun-tao, FAN Wen-liang, LI Zheng-liang. Experimental research on the corrosion fatigue properties of Q345 equal angles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 193-198.
- [14] 洪波, 黄一, 吴智敏. 干湿交替环境对海洋钢腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 136-140.  
HONG Bo, HUANG Yi, WU Zhi-min. Corrosion fatigue crack growth of marine steel under dry-wet cyclic conditions[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(5): 136-140.
- [15] 韩晓东. 腐蚀环境下节段式钢箱梁的疲劳性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
HAN Xiao-dong. Fatigue properties study of sectional steel box girder in corrosive environment [J]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [16] AKIIKE S, NOSE H, HIROTA Y, et al. Comparison of three testing methods of fracture toughness using indirect composite[J]. Nihon Hotetsu Shika Gakkai Zasshi, 2008, 52(1): 49-58.
- [17] DE PANNEMAECER A, FOUVRY S, BROCHU M, et al. Identification of the fatigue stress intensity factor threshold for different load ratios R: From fretting fatigue to C(T) fatigue experiments[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 82: 211-225.
- [18] 李慧涌, 熊峻江, 叶少波, 等. 四参数全范围 da/dN 曲线测定方法研究[J]. 实验力学, 2004, 19(2): 222-228.  
LI Hui-yong, XIONG Jun-jiang, YE Shao-bo, et al. 4-parameter full range crack growth rate curve[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(2): 222-228.
- [19] 赵学锋, 王富永, 赵海军. 预腐蚀疲劳寿命影响系数及 S-N 曲线研究[J]. 机械强度, 2008, 30(6): 977-981.  
ZHAO Xue-feng, WANG Fu-yong, ZHAO Hai-jun. Research on the influence coefficient and S-N curve for the pre-corrosion fatigue life[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(6): 977-981.
- [20] 孙正华, 李兆霞, 陈鸿天. 大型土木结构的结构行为一致多尺度模拟-模拟方法与策略[J]. 计算力学学报, 2009, 26(6): 886-892.  
SUN Zheng-hua, LI Zhao-xia, CHEN Hong-tian. Con-



- current multi-scale modeling of structural behavior for response analysis of large civil infrastructure: Modeling methodology and strategy[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(6): 886-892.
- [21] DHONDT G. 3-D mixed-mode  $K$ -calculations with the interaction integral method and the quarter point element stress method[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2001, 17(5): 303-307.
- [22] 黄小光. 腐蚀疲劳点蚀演化与裂纹扩展机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
HUANG Xiao-guang. Mechanism study of pit evolution and crack propagation for corrosion fatigue[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [23] ANTUNES F V, FERREIRA J M, BYRNE J. Stress intensity factor calculation based on the work of external forces[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(1): 1-14.
- [24] 蒋祖国. 飞机结构腐蚀疲劳[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.  
JIANG Zu-guo. Aircraft structure corrosion fatigue [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1991.
- [25] 祝时召. 14MnNbq 钢和焊接件的疲劳裂纹扩展研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
ZHU Shi-zhao. Study on fatigue crack growth of 14MnNbq steel and welds[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- (上接第 18 页)
- [45] WIKTOR V, JONKERS H M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(7): 763-770.
- [46] MOOKHOEK S D, COLVER P J, FISCHER H, et al. The creation of high aspect ratio capsules to improve the efficiency of self-healing polymer systems[C]//ICSHM. Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials. Amsterdam: Springer, 2007: 1-5.
- [47] BROWN E N, KESSLER M R, SOTTOS N R, et al. In situ poly (urea-formaldehyde) microencapsulation of dicyclopentadiene[J]. Journal of Microencapsulation, 2003, 20(6): 719-730.
- [48] SU J F, QIU J, SCHLANGEN E. Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen[J]. Polymer degradation and stability, 2013, 98(6): 1205-1215.
- [49] 同济大学. 同济大学自主研发的自愈合微胶囊沥青路面在上海竣工[EB/OL]. (2016-12-25)[2017-10-15]. [http://tjtt.tongji.edu.cn/index.php?classid=9482&newsid=15671&t=show&from=groupmessage&isappinstalled=0&page\\_9482=10](http://tjtt.tongji.edu.cn/index.php?classid=9482&newsid=15671&t=show&from=groupmessage&isappinstalled=0&page_9482=10).
- [50] 银河观察者. 重磅! 全球首条再生剂微胶囊自修复道路实现验证! [EB/OL]. (2017-01-08)[2017-4-25]. <http://www.tjsinogo.com/a/xinwendongtai/20170118/3>.  
THE GALAXY OBSERVER. Bomb, the world's first regenerant microcapsules self-repair road has test and verify[EB/OL]. (2017-01-08)[2017-4-25]. <http://www.tjsinogo.com/a/xinwendongtai/20170118/3>.
- [51] SU Jun-feng, HAN Shan, WANG Ying-yuan, et al. Experimental observation of the self-healing microcapsules containing rejuvenator states in asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 533-542.