

# 高速铁路道岔曲尖轨疲劳裂纹萌生预测

翁之意<sup>1,2</sup>, 周宇<sup>1,2</sup>, 王驰<sup>1,2</sup>, 单涛涛<sup>3</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;  
3. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 上海, 201103)

**摘要:** 针对高速铁路道岔曲尖轨疲劳裂纹与磨耗共存发展的情况, 提出考虑磨耗的高速铁路道岔曲尖轨裂纹萌生预测方法。以列车侧向-逆向过岔时的轮载转移、轮轨接触状态为例, 结合曲尖轨和基本轨的廓形关系, 再现曲尖轨磨耗和疲劳累积过程, 并分析曲尖轨磨耗和疲劳损伤发展特征、轮载转移和轮轨接触变化, 从而预测曲尖轨裂纹萌生寿命和位置。结果表明, 考虑列车逆、侧向通过的情况, 在曲尖轨裂纹萌生过程中, 各磨耗阶段内达到磨耗阈值所需的通过总重呈波动变化, 即磨耗发展不规则, 且基本轨和曲尖轨的磨耗发展率呈相反趋势; 曲尖轨顶宽 35 mm 断面处疲劳裂纹萌生寿命约 11.7 MGT(百万吨), 裂纹萌生位置在轨顶区域内距轨顶中心 10~15 mm、钢轨表面 1~3 mm 处。

**关键词:** 高速铁路; 道岔; 曲尖轨; 轮载转移; 滚动接触疲劳  
**中图分类号:** U213.42 **文献标志码:** A

## Prediction of Fatigue Crack Initiation in Curved Switch Rail of High-speed Railway Turnout

WENG Zhiyi<sup>1,2</sup>, ZHOU Yu<sup>1,2</sup>, WANG Chi<sup>1,2</sup>, SHAN Taotao<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai 201103, China)

**Abstract:** In view of the co-existence of rolling contact fatigue (RCF) crack initiation and wear growth in the curved switch rail of high-speed railway turnout, a prediction method of RCF crack initiation considering the wear in the curved switch rail was proposed. Taking the wheel loading position transfer and wheel-rail contact

status when passing turnout along reverse and side direction as an example, and considering the profiles relationship between curved switch and stock rails, the wear and fatigue accumulation process of the curved switch rail was recreated. The development characteristics of wear and fatigue damage in the curved switch rail, changes in the wheel loading position transfer, and wheel-rail contact conditions were analyzed for predicting the initiation life and location of cracks in the curved switch rail. The results indicate that the traffic gross tonnage at each wear growth phase shows a fluctuation trend, which means that the wear grows with an irregularity process, during the process of crack initiation considering train passing with reverse and side direction. Moreover, a contrasting trend was observed in the wear growth rate between stock and curved switch rails. The RCF crack initiation life for a section with a top width of 35 mm of the curved switch rail is estimated to be approximately 11.7 MGT (million gross tonnage). The crack initiation position is located at an area on the top of the rail about 10-15 mm away from its center and 1-3 mm below its surface.

**Keywords:** high-speed railway; turnout; curved switch rail; wheel loading position transfer; rolling contact fatigue

高速铁路道岔是实现列车转股的关键设备, 其中转辙部分的曲尖轨承担列车侧向过岔的轮载转移功能。近年来, 在高速铁路道岔使用过程中滚动接触疲劳裂纹频繁出现在曲尖轨<sup>[1]</sup>, 这是由于曲尖轨的线型和无超高设置, 列车侧向通过道岔转辙器时轮缘贴靠曲尖轨工作边, 在轨距角和轨肩形成狭长

收稿日期: 2023-09-11

基金项目: 上海市科委项目(20dz1203100); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022-5-ZD-04); 申通地铁集团项目(JS-KY21R009-5); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(L2021G002)

第一作者: 翁之意, 博士生, 主要研究方向为钢轨伤损。E-mail: wengzhiyi@foxmail.com

通信作者: 周宇, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢轨伤损、轨道结构。

E-mail: yzhou2785@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

的接触斑及较高的接触应力,进而造成快速的曲尖轨磨耗和滚动接触疲劳<sup>[2]</sup>。曲尖轨各断面廓形连续变化并在某些断面与基本轨形成组合,造成轮轨相互作用的不规律性<sup>[3]</sup>,引起曲尖轨各断面磨耗疲劳发展各异,进而影响列车过岔的舒适性和安全性。因此,要分析曲尖轨的疲劳特性,就需要建立一种考虑曲尖轨服役特征的疲劳裂纹萌生预测方法。

目前钢轨疲劳裂纹和磨耗的形成和共存特征研究主要从现场观测<sup>[4]</sup>和数值仿真角度进行<sup>[5-6]</sup>,研究成果已经应用于区间钢轨<sup>[7]</sup>。部分道岔钢轨疲劳裂纹和磨耗相关研究对两者的产生机理和分布位置分别进行了讨论<sup>[8-10]</sup>,但缺乏对两者竞争关系的考虑,且尚未实现道岔曲尖轨疲劳裂纹萌生寿命和位置的预测。

针对高速铁路道岔曲尖轨疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展、相互影响的特点,考虑车辆侧向-逆向最不利情况下的轮载转移、车轮-曲尖轨接触状态变化和基本轨-曲尖轨廓形组合关系,建立高速铁路道岔曲尖轨裂纹萌生与磨耗共存发展预测模型,分析曲尖轨疲劳裂纹萌生和磨耗发展特征,预测曲尖轨裂纹萌生寿命,为高速铁路道岔曲尖轨养护维修提供理论方法和参考依据。

## 1 高速铁路道岔曲尖轨疲劳损伤特征

### 1.1 曲尖轨损伤特点

曲尖轨主要承担列车侧向过岔,按进出道岔又分为逆向和顺向过岔。以侧、逆向过岔为例,车轮运行轨迹为岔前直线基本轨—曲尖轨—曲导轨—辙叉—岔后直线基本轨,由于不设置超高,因此车轮特别是车辆1、3号位轮对的导轮依赖轮缘贴靠曲尖轨工作边转向<sup>[11]</sup>,存在多次轮载转移。此外,曲尖轨截面廓形沿纵向连续变化,与频繁转移的轮载共同导致曲尖轨沿纵向的磨耗、疲劳损伤分布差异较大,呈现出区别于区间曲线钢轨接触损伤和磨耗的特殊性和复杂性。已有研究表明,曲尖轨最早出现裂纹的区域在其顶宽20~50 mm范围内<sup>[3]</sup>;从磨耗角度看,曲尖轨在顶宽20 mm断面位置侧磨最严重,顶宽50 mm处垂向磨耗最严重<sup>[12]</sup>。

### 1.2 现场观测条件

对某高速铁路18号道岔的曲尖轨各控制断面位置进行基本轨—曲尖轨组合廓形与曲尖轨疲劳裂纹深度的测量,控制断面位置见表1<sup>[13]</sup>。

该道岔测试期间通过总重从2.4 MGT(百万吨)累积到25.2 MGT,通过总重既包括列车直向过

表1 道岔控制断面位置

Tab.1 Location of turnout control section

曲尖轨顶宽/mm	距曲尖轨尖端距离/mm	降低值/mm
尖端	0	23.0
3	578	18.0
5	964	14.0
20	3 855	3.0
35	6 574	1.3
50	8 604	0
72	10 970	0

岔的情况,又包括侧向过岔的情况,其中侧向通过总重为15.7 MGT。图1为曲尖轨表面疲劳裂纹位置及裂纹深度。

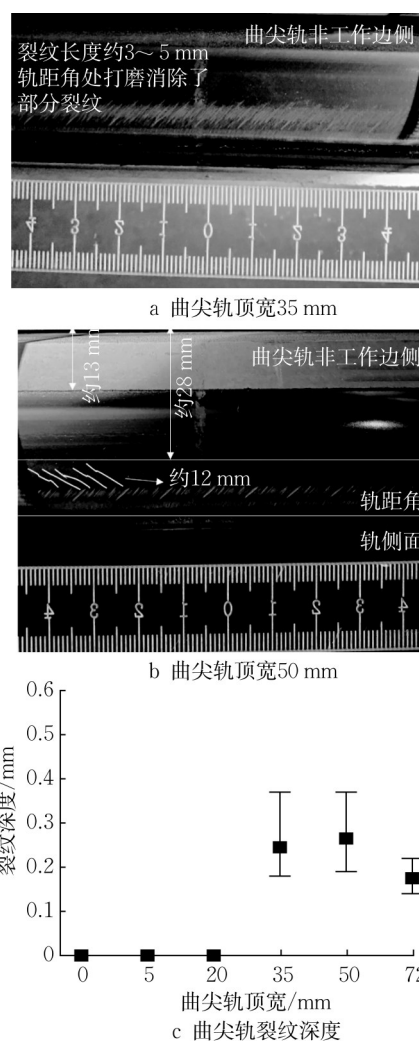


图1 曲尖轨裂纹位置及深度

Fig.1 Fatigue crack location on the surface of curved switch rail and its depth

如图1a、b所示,曲尖轨疲劳裂纹主要位于轨距角、轨肩和靠近轨肩的轨顶处,裂纹分布间距约2 mm;从裂纹表面长度来看,顶宽35 mm断面处裂纹表面长度约3~5 mm,而顶宽50 mm断面处裂纹长

度约12 mm。由图1c可知,裂纹主要分布在顶宽35~72 mm范围内的曲尖轨上。顶宽35 mm断面和50 mm断面处的裂纹深度较大,最大值约0.37 mm,中位数约0.25~0.27 mm;顶宽72 mm断面处的裂纹深度略小,最大值约0.22 mm,中位数约0.19 mm。

由于列车过岔时各控制断面的轮轨接触行为持续改变且差异较大,各控制断面磨耗发展情况存在差异,因此单靠磨耗量不能完全反映磨耗发展情况。为了评估道岔各控制断面钢轨廓形变化和磨耗发展情况,定义磨耗发展率为

$$v_{\text{test}} = \frac{\Delta w_{\text{test}}}{\Delta G_{\text{test}}} \quad (1)$$

式中: $v_{\text{test}}$ 为实测磨耗发展率, $\text{mm}\cdot\text{MGT}^{-1}$ ;  $\Delta w_{\text{test}}$ 为测试期间垂直、侧面或某特定角度径向磨耗量增量,视分析目的而定, $\text{mm}$ ;  $\Delta G_{\text{test}}$ 为测试期间通过总重增量, $\text{MGT}$ 。

基于此得到,观测道岔曲尖轨顶宽35 mm断面处的基本轨垂直磨耗发展率和曲尖轨垂直磨耗发展率在 $0.002\sim 0.135 \text{ mm}\cdot\text{MGT}^{-1}$ 范围内,顶宽50 mm断面处的基本轨和曲尖轨垂直磨耗发展率在 $0.005\sim 0.070 \text{ mm}\cdot\text{MGT}^{-1}$ 范围内。

根据上述分析,曲尖轨顶宽35 mm处虽然磨耗发展率较大,但是仍然发育较多裂纹,且裂纹分布间距小,深度也较大,说明裂纹在此处萌生较早、较快,因此选取曲尖轨顶宽35 mm断面为关键断面进行后续曲尖轨疲劳裂纹萌生预测。

## 2 考虑磨耗的曲尖轨裂纹萌生预测方法

### 2.1 预测方法

高速铁路道岔曲尖轨的磨耗和裂纹在形成过程中共存发展,且在曲尖轨与基本轨组合情况下因轮载转移而引起两者廓形的关联变化。为了预测高速铁路道岔曲尖轨的疲劳裂纹萌生寿命,在文献[7]中考虑磨耗影响的区间钢轨裂纹萌生预测模型的基础上,基于轮载转移过程中基本轨-曲尖轨的分担情况、关键断面的轮轨接触所引起的基本轨和曲尖轨磨耗及廓形变化组合关系,提出了高速铁路道岔曲尖轨裂纹萌生与磨耗发展共存的预测方法,流程如图2所示。

### 2.2 模型参数和轮轨接触计算

车辆-道岔动力学模型根据我国高速铁路350-18号道岔标准图、控制断面(见表1)的基本轨-曲尖轨廓形和CRH3型车相关参数建立,车轮踏面选择LM<sub>6</sub>廓形,设置侧向过岔速度为 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。钢轨有

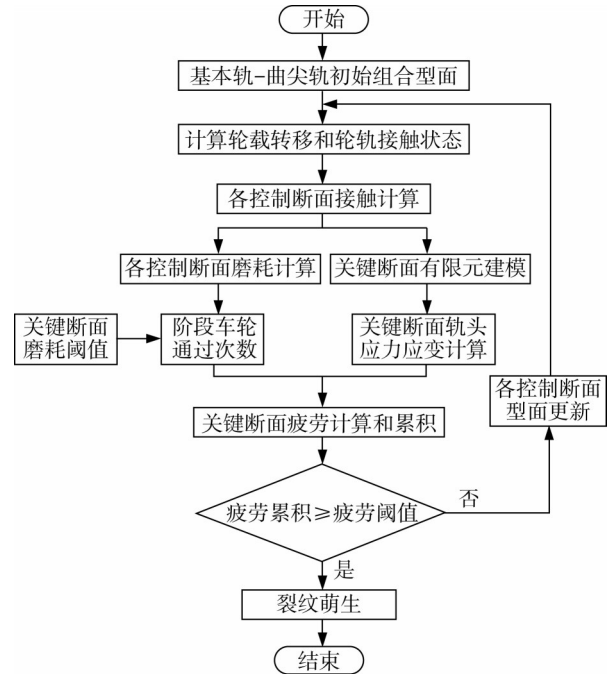


图2 高速铁路道岔曲尖轨裂纹萌生与磨耗共存发展建模方法  
Fig.2 Modeling for the co-existence of crack initiation and wear growth at the curved switch rail of high-speed railway turnout

限元模型的材料参数参考U71MnG钢轨钢设置,并考虑材料疲劳累积的非线性特点,设置弹塑性本构关系为双线性各向同性强化模型,弹性模量为214 GPa,强化模量为20.54 GPa<sup>[14]</sup>,泊松比为0.3,基本轨硬度取300 HB,曲尖轨硬度取350 HB。

轮轨接触计算时采用Kalker<sup>[15]</sup>提出的三维非Hertz滚动接触理论,接触面上的接触力最终分布结果应使总余能最小,表达式为

$$\min C = \int_{A_c} \left( h + \frac{1}{2} \mu_z \right) \sigma_z dS + \int_{A_c} \left( \omega_r + \frac{1}{2} \mu_r - \mu'_r \right) \sigma_r dS \quad (2)$$

式中: $A_c$ 为计算区域; $h$ 为法向间隙; $\mu_z$ 、 $\mu_r$ 为法向、切向位移; $\sigma_z$ 、 $\sigma_r$ 为法向、切向接触应力; $\omega_r$ 为刚性滑移。式(2)包含了法向和切向作用在接触区域上的余能积分,在力平衡方程、力边界方程、位移边界方程、接触条件、库伦定律及边界相容性等约束下对该方程求解,即可得出曲尖轨上的轮轨接触状态。

### 2.3 磨耗计算与廓形更新方法

通过2.2节得到基本轨、曲尖轨上的轮轨接触状态,如接触斑尺寸、接触斑内黏着区-滑动区分布等,进一步采用Archard磨耗模型计算基本轨-曲尖轨的磨耗量,计算式为

$$V_w = k_w \frac{F_N s}{H} \quad (3)$$

式中: $V_w$ 为磨耗体积; $k_w$ 为Archard磨耗系数,可查



表<sup>[16]</sup>得到; $F_N$ 为轮轨接触法向力; $s$ 为轮轨接触斑界面相对滑动距离; $H$ 为材料硬度。定义材料磨损只发生在接触斑滑动区内,材料的磨损体积与法向力、滑动距离成正比,与材料的硬度成反比。

将1节车辆4个车轮通过该断面引起的磨耗量

进行叠加,可得各断面基本轨和曲尖轨的磨耗量,受轮载转移的影响,需要根据不同曲尖轨顶宽位置的轮轨接触关系和轮载转移状态对曲尖轨和基本轨分别进行叠加。以顶宽 35 mm 断面为例,如图 3 所示,其余控制断面分别按此流程计算并叠加。

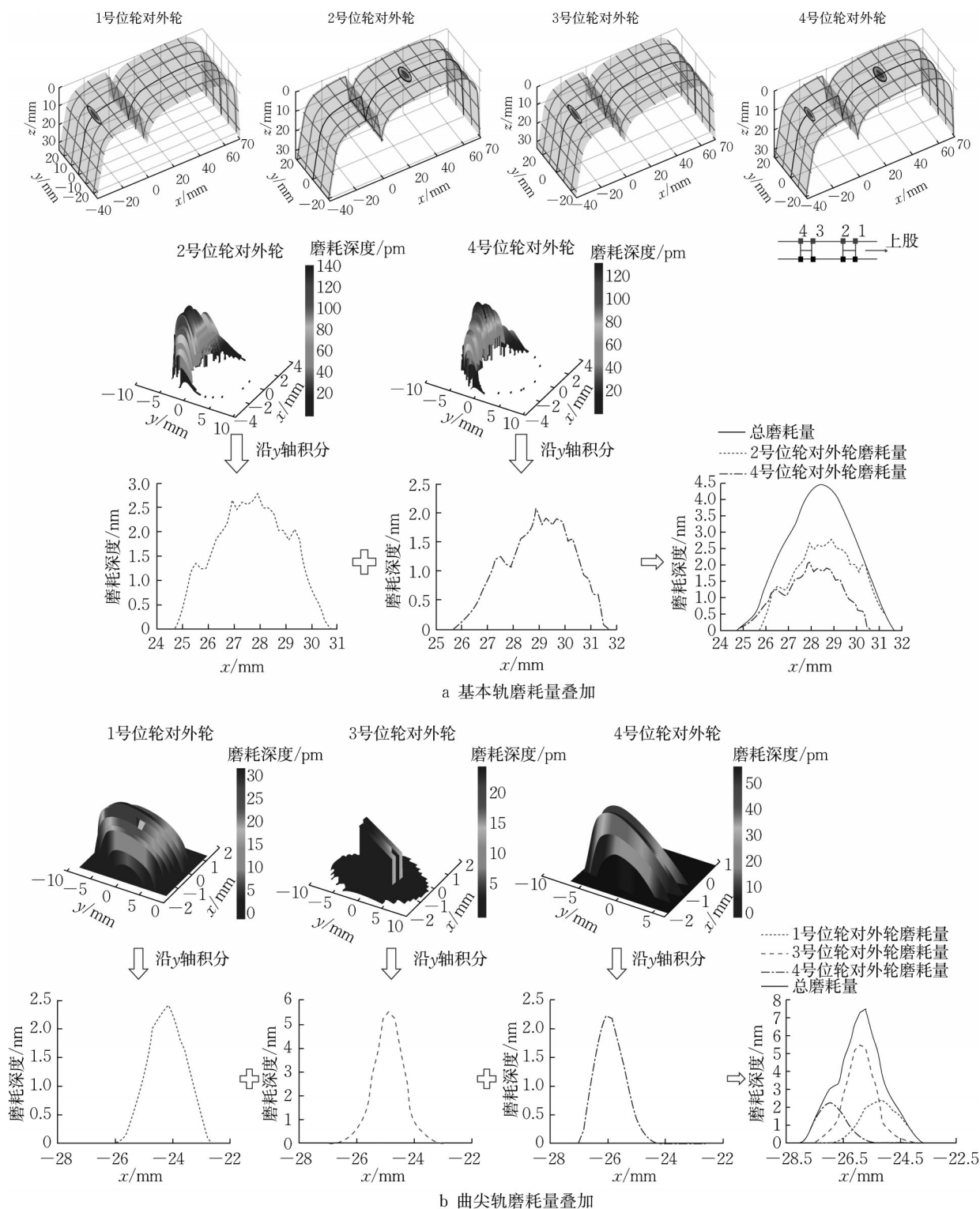


图3 磨耗量叠加

Fig.3 Accumulation of wear amount

当按照上述方法计算的基本轨轨面上任意点磨损深度达到磨损阈值(本文中为0.04 mm)时,磨损廓形将对轮轨作用及磨损和裂纹形成有明显影响,须进行廓形更新。考虑到基本轨-曲尖轨的组合关系,采取三次样条曲线平滑的方法将 Archard 模型得到的基本轨、曲尖轨轨面上各点磨损量叠加在标准廓形(或上一次的磨损廓形)上,再与廓形上其他点相连进行平滑处理,从而得到新的磨损廓形,如图4所示。

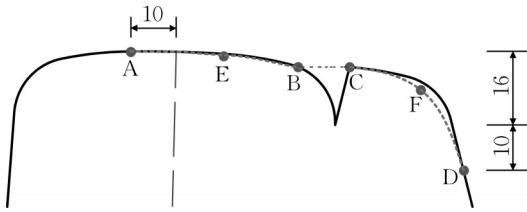


图4 廓形更新示意(单位:mm)

Fig.4 Schematic diagram of profile update (unit: mm)

#### 2.4 疲劳裂纹萌生预测模型

根据1节确定的曲尖轨关键断面建立有限元模型,由长度为200 mm的曲尖轨整体模型和长度为30 mm的曲尖轨轨头局部模型组成(见图5)。整体模型网格尺寸为5 mm,局部模型网格尺寸为0.5 mm。荷载以2.2节中计算得到的接触斑应力形式施加,进一步计算可得曲尖轨轨头应力大小和分布情况。

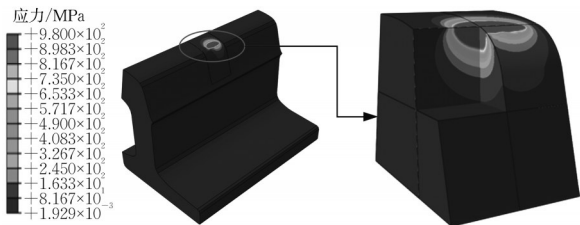


图5 曲尖轨轨头Mises应力分布

Fig.5 Mises stress distribution at the head of curved switch rail

疲劳裂纹萌生预测采用临界平面法中的Jiang-Sehitoglu模型<sup>[17]</sup>,通过上述轨头应力应变计算轨头各点所有应力应变组合下的疲劳参量,即:

$$F = \frac{\Delta\epsilon}{2} \langle \sigma_{\max} \rangle + J\Delta\tau\Delta\gamma \quad (4)$$

式中: $\langle \rangle$ 为MacCauley括号, $\langle \sigma_{\max} \rangle = 0.5(|\sigma_{\max}| + \sigma_{\max})$ ;  $\sigma_{\max}$ 为裂纹面上的最大正应力; $\Delta\epsilon$ 为裂纹面上正应变幅值; $\Delta\tau$ 、 $\Delta\gamma$ 为裂纹面上剪应力幅值和剪应变幅值; $J$ 为材料参数,由拉伸/扭转试验所得,

取0.3<sup>[18]</sup>。

结合Manson-Coffin公式<sup>[19-20]</sup>,输入疲劳参量最大值就可得到曲尖轨疲劳裂纹萌生寿命 $N_i$ (车轮通过次数),即:

$$F_{\max} = \begin{cases} \frac{\sigma'_i{}^{12}}{E} (2N_i)^{2b} + \sigma'_i \epsilon'_i (2N_i)^{b+c}, & \frac{\Delta\epsilon}{2} \langle \sigma_{\max} \rangle \geq J\Delta\tau\Delta\gamma \\ \frac{\tau'_i{}^{12}}{G} (2N_i)^{2b} + \tau'_i \gamma'_i (2N_i)^{b+c}, & \frac{\Delta\epsilon}{2} \langle \sigma_{\max} \rangle < J\Delta\tau\Delta\gamma \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\sigma'_i$ 、 $\tau'_i$ 分别为拉伸、剪切疲劳强度系数; $\epsilon'_i$ 、 $\gamma'_i$ 分别为拉伸、剪切疲劳延性系数; $b$ 为疲劳强度指数; $c$ 为疲劳延性指数; $E$ 、 $G$ 分别为钢轨弹性模量和剪切模量。根据拉伸部分和剪切部分对疲劳参量最大值 $F_{\max}$ 的贡献选择对应计算式,当裂纹类型为拉伸型时应选择式(5)上式,当裂纹类型为剪切型时应选择式(5)下式。

在车轮与基本轨-曲尖轨接触以及曲尖轨表面材料疲劳累积过程中,磨损导致曲尖轨廓形发生变化,轨头某处疲劳累积到材料失效时,会发生多次磨损廓形的更新,把2次廓形更新之间的时间间隔定义为1个磨损阶段。假设在第 $i$ 个磨损阶段内,车轮通过次数为 $n_i$ ,根据式(5)计算得到 $j$ 号位轮对外轮( $j=1, 2, 3, 4$ )作用下曲尖轨轨头各点的裂纹萌生寿命 $N_{ij}$ ,则在此磨损阶段, $j$ 号位轮对外轮作用下曲尖轨轨头各点的疲劳损伤可表示为

$$D_{ij} = \frac{n_i/4}{N_{ij}}, j=1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

磨损阶段 $i$ 曲尖轨轨头各点的疲劳损伤可表示为

$$D_i = \sum_j D_{ij}, j=1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

在各个磨损阶段,磨损引起的材料损失需进行廓形更新,轮轨动力作用、接触位置以及轨头应力应变大小和分布发生相应改变,因此应对不同应力应变状态下材料疲劳损伤情况进行累加。随着磨损阶段的增加,根据Miner线性疲劳法则对曲尖轨表面材料的疲劳损伤进行累积,当曲尖轨轨头某点在不同磨损阶段的疲劳损伤累积达到疲劳损伤阈值 $D_{CR}$ 时,裂纹在该点萌生,即:

$$\sum D_i = D_1 + D_2 + \dots + D_k + \dots = D_{CR} \quad (8)$$

此时,曲尖轨裂纹萌生寿命为

$$N = \sum n_i = n_1 + n_1 + \dots + n_m \quad (9)$$

### 3 预测结果验证与分析

#### 3.1 曲尖轨磨耗发展结果

以关键断面基本轨廓形上任意点的垂直磨耗达到 0.04 mm 磨耗阈值来控制磨耗量递增和廓形更新(仅考虑侧向-逆向过岔情况),当按式(8)得到的曲尖轨轨头任意点疲劳累积达到疲劳阈值时( $D_{CR} = 1$ ),共发生了 10 个磨耗阶段,即 10 次磨耗廓形的更新,期间累积通过总重为 11.7 MGT(累积车轮通过次数约  $7.8 \times 10^6$  次)。

以 1 号位轮对外轮为例,该车轮在磨耗阶段 1、5 和 9 时对关键断面曲尖轨造成的磨耗深度最大值及发生位置如图 6 所示。

由图 6 可知,随着廓形的更新,由于 1 号位轮对外轮在曲尖轨关键断面的接触点发生改变,因此曲尖轨轨顶至轨距测点范围内分别发生不同程度的磨耗。在磨耗阶段 1,车轮在轨肩(距轨顶中心横向约 25 mm)发生接触,单次车轮最大磨耗量约为 100 nm;在磨耗阶段 5,车轮与轨顶(距轨顶中心横向约 10 mm)接触,单次车轮最大磨耗量降低至约 40 nm;

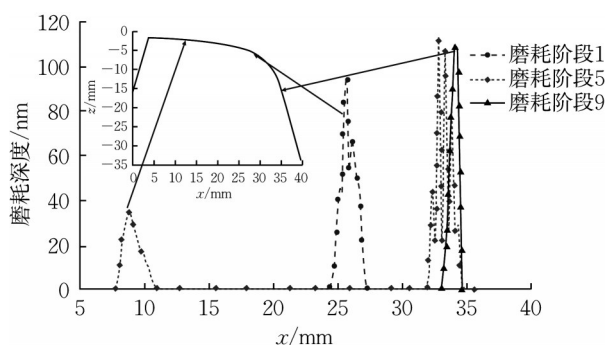


图 6 各阶段单次车轮引起的曲尖轨磨耗深度及位置  
Fig.6 Depth and location of wear on curved switch rail caused by single wheel at each phase

到了磨耗阶段 9,轮轨接触点转移到轨距角(距轨顶中心横向约 30~35 mm),此时单次车轮引起的最大磨耗量约为 110 nm。

#### 3.2 曲尖轨疲劳损伤发展结果

为了方便理解,根据累积疲劳损伤的大小及分布情况,将曲尖轨轨顶(距轨顶中心 10~15 mm)、轨距角(距轨顶中心 23~27 mm)和曲尖轨工作边轨距测点(简称轨侧)附近分别以区域 a、b、c 表示,如图 7a 所示。

由图 7b~d 可知,累积疲劳损伤呈非线性增长。

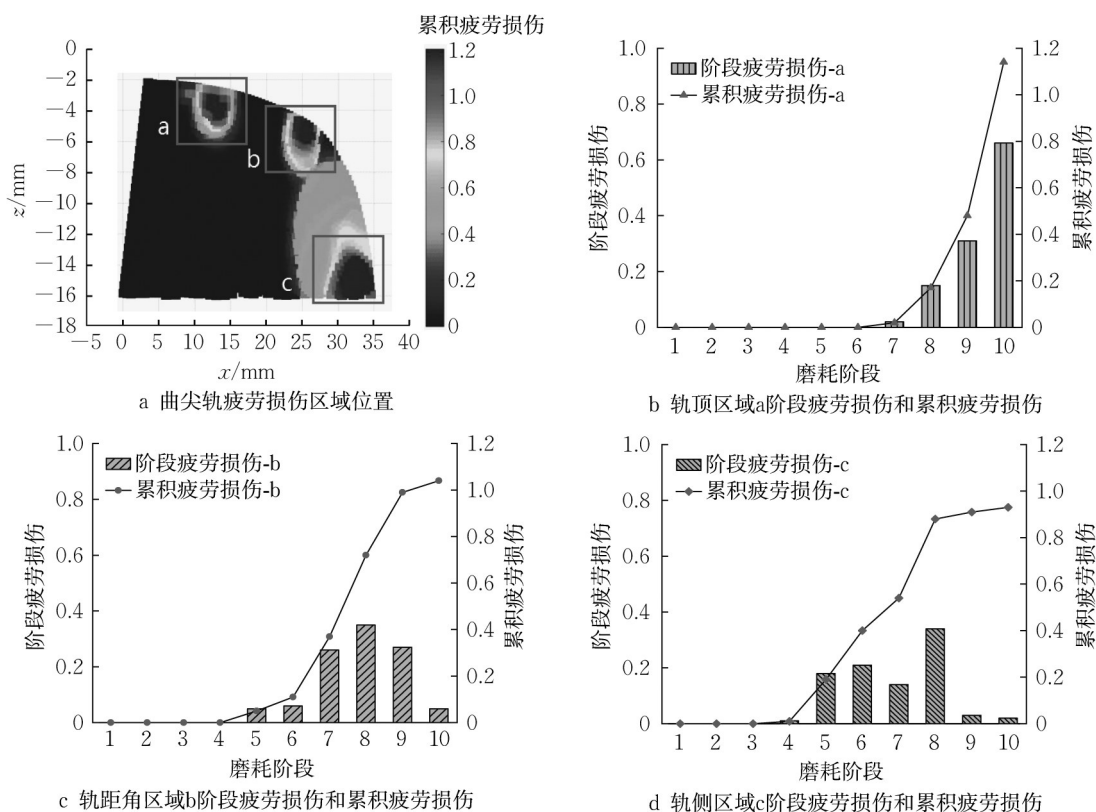


图 7 各位置阶段和累积疲劳损伤发展

Fig.7 Development of phased and cumulative fatigue damage at each location



根据图7b,轨顶区域a累积疲劳损伤在磨损阶段6后迅速发展并很快到限。这是因为此时基本轨轨顶、曲尖轨轨距角及轨侧已有一定量的磨损,轮轨接触点转移到曲尖轨轨顶区域a,所以该处的阶段疲劳损伤增大,损伤累积增快;对于图7c中的轨距角区域b和图7d中的轨侧区域c,累积疲劳损伤则呈现“慢—快—慢”的发展趋势。

### 3.3 磨损与疲劳损伤共存发展分析

在服役过程中曲尖轨的磨损和疲劳损伤是同时存在、共同发展的,本次仿真的10个磨损阶段中阶段磨损发展率和阶段疲劳损伤的变化情况如图8a~c所示。

由图8a~c可知,对于曲尖轨a、b、c 3个区域,当阶段磨损发展率较大(较小)时,阶段疲劳损伤值则较小(较大),即曲尖轨疲劳损伤与磨损相互竞争、共存发展;对于钢轨表面以及距表面1 mm范围内的点,阶段疲劳损伤值虽然较大,但是磨损发展率也较大,裂纹未来得及萌生该部分材料便被磨损掉,如图8d所示;对于亚表面1~3 mm范围内的点,疲劳损伤随着通过总重不断累积直至疲劳到限,裂纹萌生。

结合如图7所示的a、b、c 3个区域疲劳累积情况可知,轨距角区域b首先到达疲劳阈值,裂纹萌生并

进入扩展阶段,但由于该区域磨损发展率大且现场经常根据光带情况进行打磨,裂纹往往较难表现出来;当轮轨接触点向轨顶中心移动后,轨顶区域a疲劳损伤累积速率增快并达到疲劳阈值,裂纹萌生,该区域曲尖轨磨损发展率较小,裂纹萌生后逐渐扩展至表面;轨侧区域c处疲劳损伤最迟到达疲劳阈值,车轮轮缘与该区域接触时处于滑动状态,侧面磨损发展率较大,裂纹同样较难表现出来。因此,曲尖轨疲劳裂纹萌生位置位于轨顶区域a,距轨顶中心10~15 mm、钢轨表面1~3 mm处。

### 3.4 曲尖轨裂纹萌生预测和实测对比

由图9可知,现场曲尖轨裂纹多分布于轨顶面,轨距角、部分轨侧也表现出疲劳损伤痕迹,这与3.2节仿真得到的如图7a所示的a、b、c 3个区域位置相同。现场观测裂纹在曲尖轨顶面分布较多,结合磨损仿真和廓形实测情况来看,这与曲尖轨轨距角和轨侧磨损发展快、磨损量大,以及疲劳损伤累积竞争发展有关;此外,由图9b可知,曲尖轨轨距角处存在打磨痕迹,这在一定程度上抑制了疲劳损伤的累积和裂纹的萌生。

从裂纹萌生寿命来看,1.2节中实测的道岔曲尖轨自更换后至出现明显疲劳裂纹时直向和侧向过岔

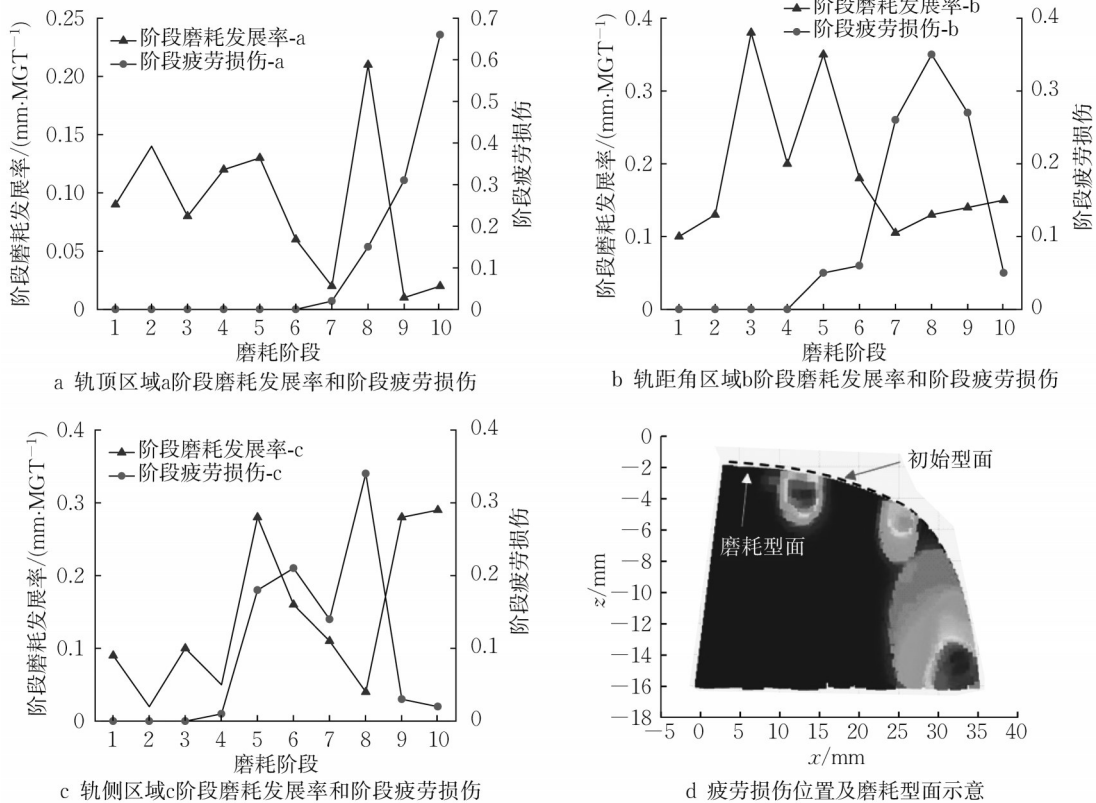


图8 各阶段磨损发展率和阶段疲劳损伤变化

Fig.8 Change of wear growth rate and fatigue damage at each phase

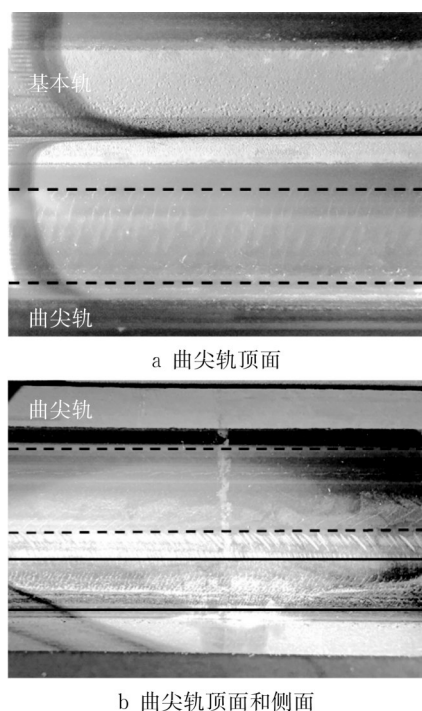


图9 现场观测曲尖轨疲劳伤损位置

Fig.9 Location of fatigue damage of curved switch rail at field

通过总重约 25.2 MGT,如只计算列车侧向通过,则通过总重约 15.7 MGT,而该道岔曲尖轨表面未检测到明显疲劳裂纹时的通过总重约 10.3 MGT。考虑到钢轨裂纹从疲劳到限萌生到扩展至可检测状态需要一定的荷载周次,可以认为曲尖轨裂纹萌生寿命在 10.3~15.7 MGT 范围内。仿真结果表明,10 个磨耗阶段迭代后通过总重约 11.7 MGT 时曲尖轨疲劳到限,裂纹萌生,与现场观测结果基本相符。

## 4 结论

(1)在曲尖轨裂纹萌生期内,各磨耗阶段达到磨耗阈值所需的通过总重不同,呈波动发展趋势。对于关键断面,当基本轨磨耗发展率较大时,曲尖轨磨耗发展率较小;反之,当基本轨磨耗发展率减小时,曲尖轨磨耗发展率则增大。

(2)曲尖轨疲劳损伤与磨耗相互竞争、共存发展,对于曲尖轨承担轮载的区域,当磨耗发展率较大时,疲劳损伤值则较小;反之,当磨耗发展率较小时,疲劳损伤值则较大。最终,曲尖轨疲劳裂纹萌生位置位于轨顶区域距轨顶中心 10~15 mm、钢轨表面 1~3 mm 处。

(3)根据模型预测,列车侧、逆向过岔时,考虑磨

耗影响的曲尖轨裂纹萌生寿命约为 11.7 MGT(累积车轮通过次数约  $7.8 \times 10^5$  次)。

综上所述,如果在养护维修策略的制订中充分利用磨耗与疲劳的竞争关系,对磨耗发展率较小的位置采取针对性打磨措施,同时兼顾基本轨和曲尖轨的廓形组合关系,就可能在较小打磨工作量下实现延长曲尖轨服役寿命的目标,但打磨带来的廓形变化又会影响轮轨接触行为,这需要进一步的研究来探索其影响规律。

### 作者贡献声明:

翁之意:仿真计算,数据处理,论文撰写及修改。

周宇:研究思路提供,现场测试指导,论文撰写指导。

王驰:现场测试,测试数据处理。

单涛涛:测试数据处理。

### 参考文献:

- [1] WANG S, WANG H, JING G. Experimental analysis of profile degradation of high-speed turnouts: a case study in China [J]. *Tribology International*, 2023, 178: 108035.
- [2] 高原. 高速铁路道岔转辙器区轮轨瞬态滚动接触行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.  
GAO Yuan. Research on transient wheel-rail frictional rolling contact behavior and non-uniform wear in turnout switch panel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [3] 周宇, 张聪聪, 王树国, 等. 高速铁路岔曲尖轨疲劳裂纹成因分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 1770.  
ZHOU Yu, ZHANG Congcong, WANG Shuguo, *et al.* Analysis on the cause of fatigue crack of high-speed switch rail [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(12): 1770.
- [4] 王璞, 王树国, 杨东升, 等. 达速条件下高速铁路道岔适应性研究 [J]. 铁道学报, 2022, 44(6): 75.  
WANG Pu, WANG Shuguo, YANG Dongsheng, *et al.* Study on adaptability of high-speed turnout under condition of designed speed [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(6): 75.
- [5] ZHOU Y, HAN Y, MU D, *et al.* Prediction of the coexistence of rail head check initiation and wear growth [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 112: 289.
- [6] MA X, WANG P, XU J, *et al.* Assessment of non-Hertzian wheel-rail contact models for numerical simulation of rail damages in switch panel of railway turnout [J]. *Wear*, 2019, 432: 102912.
- [7] 周宇, 张杰, 王少锋, 等. 考虑磨耗的钢轨疲劳裂纹萌生寿命预测仿真 [J]. 铁道学报, 2016, 38(7): 91.  
ZHOU Yu, ZHANG Jie, WANG Shaofeng, *et al.* Simulation on rail head crack initiation life prediction considering rail wear [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(7): 91.



- [8] 马晓川. 高速铁路道岔直尖轨滚动接触疲劳行为与优化控制研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.  
MA Xiaochuan. Research on rolling contact fatigue behavior and optimal control of straight switch rail in high-speed railway turnout[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [9] JOHANSSON A, PALSSON B, EKH M, *et al.* Simulation of wheel-rail contact and damage in switches & crossings [J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 472.
- [10] NIELSEN J C O, PALSSON B A, TORSTENSSON P T. Switch panel design based on simulation of accumulated rail damage in a railway turnout[J]. *Wear*, 2016, 366: 241.
- [11] 徐井芒. 高速道岔曲尖轨磨耗仿真分析研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.  
XU Jingmang. Research on simulation of curved switch rail wear in high-speed turnout [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [12] 杨飞, 王璞, 孙加林, 等. 高速道岔尖轨磨耗规律及对动力学性能的影响[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(3): 13.  
YANG Fei, WANG Pu, SUN Jialin, *et al.* The law of switch rail wear in high-speed turnout and its effect on dynamic performance[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(3): 13.
- [13] 中铁宝桥集团有限公司. 铁路道岔参数手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.  
China Railway Baoji Bridge Group Co., Ltd. Handbook for railway turnout parameters [M]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2009.
- [14] 樊译璘, 阚前华, 康国政, 等. 热处理U71Mn钢轨钢的棘轮行为及其本构模型[J]. *机械工程材料*, 2019, 43(11): 62.  
FAN Yilin, KAN Qianhua, KANG Guozheng, *et al.* Ratcheting behavior and constitutive model of heat-treated U71Mn rail steel [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2019, 43(11): 62.
- [15] KALKER J J. Survey of wheel-rail rolling contact theory[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1979, 8(4): 317.
- [16] JENDEL T. Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements[J]. *Wear*, 2002, 253(1/2): 89.
- [17] JIANG Y Y, SEHITOGLU H. A model for rolling contact failure[J]. *Wear*, 1999, 224(1): 38.
- [18] EL-SAYED H M, LOTFY M, ZOHNY H N E, *et al.* Prediction of fatigue crack initiation life in railheads using finite element analysis [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, 9(4): 2329.
- [19] 徐鹏. 金属材料应变寿命曲线估算的新方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
XU Peng. A new method for the estimation of strain-life curve of metals [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [20] 郑战光, 蔡敢为, 李兆军, 等. 基于损伤力学阐释Manson-Coffin低周疲劳模型[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(7): 812.  
ZHENG Zhanguang, CAI Ganwei, LI Zhaojun, *et al.* Interpretation of Manson-Coffin low-cycle fatigue model based on damage mechanics [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(7): 812.

### (上接第530页)

- Architecture Technology, 2010, 41(2): 139.
- [20] LEE W K, BILLINGTON S L. Performance-based earthquake engineering assessment of a self-centering post-tensioned concrete bridge system [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(8): 887.
- [21] ZHANG J H, LING X Z, GUAN Z G. Finite element modeling of concrete cover crack propagation due to non-uniform corrosion of reinforcement [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 132: 487.
- [22] PARK R, PRIESTLEY M J N, GILL W D. Ductility of square confined concrete columns [J]. *Journal of Structural Division*, 1982, 108: 929.
- [23] Japan Road Association. Specifications for highway bridges. Part V: seismic design [S]. Tokyo: Japan Road Association, 2002.
- [24] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, CALVI G M. Seismic design and retrofit of bridges [M]. New York: Wiley-Interscience, 1996.
- [25] LEHMAN D, MOEHLE J, MAHIN S, *et al.* Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(6): 869.
- [26] GUAN Z, ZHANG J, LI J. Multilevel performance classifications of tall RC bridge columns toward postearthquake rehabilitation requirements [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(10): 04017080.
- [27] KOWALSKY M J. Deformation limit states for circular reinforced concrete bridge columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(8): 869.
- [28] ZHAO J, SRITHARAM S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures [J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104: 133.
- [29] MARTINEZ-RODRIGO M D, FILIATRAULT A. A case study on the application of passive control and seismic isolation techniques to cable-stayed bridges: a comparative investigation through nonlinear dynamic analyses [J]. *Engineering Structures*, 2015, 99: 232.
- [30] LEE W K, BILLINGTON S L. Modeling residual displacements of concrete bridge columns under earthquake loads using fiber elements [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(3): 240.
- [31] DIMITRAKOPOULOS E, MAKRIS N, KAPPOS A J. Dimensional analysis of the earthquake-induced pounding between adjacent structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2009, 38(7): 867.