

# 钢轨疲劳裂纹萌生与磨耗发展共存预测中的磨耗阈值

周宇<sup>1,2</sup>, 孙鼎人<sup>1,2</sup>, 王树国<sup>3</sup>, 王璞<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. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081)

**摘要:** 提出了等磨耗深度与等车轮通过次数两种不同的磨耗阈值确定方法, 分析了磨耗阈值对钢轨型面、磨耗发展率、疲劳损伤、裂纹萌生位置和寿命等预测的影响。结果表明: 不同的磨耗阈值下, 三次插值样条曲线平滑处理磨耗型面时引起的误差可以忽略; 磨耗阈值对平均磨耗发展率影响不大, 但对疲劳损伤及其发展影响明显; 磨耗阈值较小时, 如磨耗深度  $h \leq 0.04$  mm 或车轮通过次数  $t \leq 3.0 \times 10^4$ , 预测的裂纹萌生位置、裂纹萌生寿命基本接近, 计算效率略低; 磨耗阈值较大时, 相比阈值较小的结果, 裂纹萌生位置有小于 5.0% 的偏差, 裂纹萌生寿命最大有 13.5% 的偏差, 计算效率提高 50%~60%。

**关键词:** 钢轨; 滚动接触疲劳; 磨耗; 钢轨型面; 裂纹

中图分类号: U216.3

文献标志码: A

## Effect of Wear Threshold on Prediction for Rolling Contact Fatigue Crack Initiation and Wear Growth of Rail

ZHOU Yu<sup>1,2</sup>, SUN Dingren<sup>1,2</sup>, WANG Shuguo<sup>3</sup>, WANG Pu<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 Safty, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** The determination of wear thresholds by the methods of wear vertical depth and wheel cycles was presented. The effect of wear thresholds on the prediction of rail profile, wear growth rate, fatigue damage, crack initiation position and life was analyzed. The results show that the error by the cubic interpolation spline with different wear thresholds to smooth rail profiles can be ignored. The wear thresholds have little effect on the

average wear growth rate and an obvious impact on the fatigue damage. With small wear thresholds, such as the wear depth  $h \leq 0.04$  mm or the wheel cycles  $t \leq 3.0 \times 10^4$ , the predicted crack initiation position and life is close to each other. The simulation efficiency is slightly lower. Compared with the results at smaller wear thresholds, the predicted crack initiation position at larger wear thresholds has a deviation of less than 5.0%. The crack initiation life has a maximum deviation of 13.5%. And the simulation efficiency is increased by 50%~60%.

**Key words:** rail; rolling contact fatigue; wear; rail profile; crack

钢轨服役中其表面滚动接触疲劳和磨耗受荷载反复作用而长期共存、共同发展, 持续影响钢轨使用寿命<sup>[1]</sup>。对两种损伤的预测, 特别是对钢轨使用初期裂纹萌生伴随磨耗发展的预测, 是进行轮轨硬度匹配<sup>[2]</sup>和选型<sup>[3]</sup>、预防性打磨等措施的理论工具。

在钢轨疲劳裂纹萌生和磨耗发展中, 车轮荷载的反复作用一方面引起接触区的轨面材料磨损和型面变化, 另一方面引起相应位置的材料疲劳。因此, 目前的钢轨疲劳裂纹萌生和磨耗发展共存预测方法<sup>[4-5]</sup>, 将疲劳裂纹萌生看作因轨头型面逐渐磨耗变化而引起的变幅荷载作用下的疲劳累积问题。其中, 磨耗量和钢轨型面变化更新的合理性影响到上述预测方法的准确性。Archard 磨耗模型<sup>[6]</sup>中考虑了材料参数、轮轨接触斑滑动速度、磨耗量(体积)等参数, 能较好地根据轮轨接触状态来预测相应的磨耗量, 在车轮踏面和钢轨型面的预测中有较多应用<sup>[7-9]</sup>。在预测型面变化更新时, 该模型的关键参数

收稿日期: 2020-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51678445, 51878661); 中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(N2018G042)

第一作者: 周宇(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢轨损伤、轨道结构。

E-mail: yzhou2785@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

是磨耗阈值,即假定型面上任意点的磨耗量在一定的车轮次数作用下达到该阈值时,则认为型面因磨耗而发生变化,并由此生成新的磨耗型面。大部分研究采用了选取尽量小的磨耗阈值的原则,如Chang等<sup>[10]</sup>在预测车轮型面、Wang等<sup>[11]</sup>在预测道岔尖轨磨耗时,磨耗阈值分别为型面上任意点垂直磨耗深度0.10 mm和0.05 mm。Braghin等<sup>[12]</sup>认为,0.10 mm的磨耗深度足以保证精确度并且不会给电脑计算带来过大负担。

对于较小的磨耗阈值,会有较多的型面更新次数和较低的计算效率;较大的磨耗阈值使型面更新产生跳跃,并且每个钢轨磨耗型面以最大垂直磨耗深度的点和型面上不会被磨耗部分的端点为控制点,通过曲线平滑的形式将型面磨耗部分与非磨耗部分进行连接,这将带来人为误差<sup>[13]</sup>,即型面不是轮轨接触磨耗掉的,而是被连续的平滑曲线“切割”掉的。此外,已有研究主要是预测磨耗及其引起的车轮或钢轨型面变化,不考虑其中的材料疲劳问题,无法检验这些磨耗阈值对疲劳累积以及裂纹萌生寿命的影响。在考虑疲劳裂纹萌生和磨耗共存预测中,现有文献<sup>[14]</sup>选取钢轨型面的磨耗阈值为0.04 mm,尚未对该阈值的选取及其影响进行检验。

针对上述问题,提出等磨耗深度和等车轮通过次数两种阈值选取方法,分析两种阈值选取方法对钢轨磨耗、疲劳累积、裂纹萌生寿命和位置的影响,为裂纹萌生和磨耗发展理论预测提供依据。

## 1 钢轨裂纹萌生和磨耗共存预测

### 1.1 基本方法

真实情况下的钢轨裂纹萌生及磨耗发展是一个在车轮荷载反复作用下连续和相互干扰的过程,将这个连续过程根据钢轨磨耗及由磨耗引起的型面变化更新并分解为多个离散过程,就形成了变幅荷载作用下的疲劳累积问题<sup>[5]</sup>。每个离散过程分为两个阶段,即磨耗-疲劳损伤单独累积阶段和磨耗型面替换-疲劳损伤累积阶段<sup>[15]</sup>。在疲劳损伤单独累积阶段,钢轨型面不变,单独计算磨耗及累积疲劳损伤,当达到磨耗阈值时,判断疲劳累积损伤是否达到疲劳限值<sup>[16]</sup>,若是则得出裂纹萌生位置及寿命,否则进入磨耗型面替换-疲劳损伤累积阶段,将钢轨型面替换为减少上述磨耗量并平滑后的磨耗型面,同时对疲劳损伤单独累积阶段的车轮通过次数和轨头各点疲劳损伤进行累积。之后进入下一次循环,直到钢

轨任意点疲劳累积损伤达到疲劳限值,这时认为疲劳裂纹萌生,仿真结束。可以看出,磨耗阈值是上述损伤离散过程中的关键问题,控制着离散过程数量。

### 1.2 磨耗阈值分析

钢轨型面上任意点的磨耗量由Archard磨耗模型计算<sup>[6]</sup>,如下所示:

$$\frac{V}{D} = K \frac{P}{H} \quad (1)$$

式中: $V$ 为材料磨耗体积; $D$ 为滑动距离; $P$ 为轮轨法向力; $H$ 为材料的硬度; $K$ 为磨耗系数,其值由滑动距离和法向压力决定,这里根据文献<sup>[16]</sup>中的磨耗系数取平均值。一般认为磨耗是由接触斑内滑动区引起的,考虑到钢轨二维横断面,式(1)中的 $P$ 由法向接触应力代替,则可以计算出接触斑内滑动区通过钢轨型面任意点所引起的磨耗量,即磨耗深度<sup>[4]</sup>。

磨耗阈值可以用钢轨二维型面上任意点的沿钢轨竖直方向的垂直磨耗深度来表示。磨耗深度由单次车轮通过引起的垂直磨耗量和车轮通过次数决定,考虑到一节车辆前后2个转向架的4个车轮作用在一股钢轨上,4个车轮的接触斑位置、面积及接触斑内黏着-滑动区各不相同,所引起的单次车轮作用下的磨耗量应分别计算再叠加;车轮通过次数则进一步由一节车辆同一侧的4个车轮累积得到。因此,这里选择两个参数来分别控制磨耗阈值,即钢轨头部任意点的垂直磨耗深度(下文称磨耗深度)和累积车轮通过次数。

可以看出,无论是磨耗深度还是车轮通过次数,结果都使得钢轨型面上与车轮频繁接触的位置发生磨耗,导致该处型面相较初始型面发生降低,该处降低后的部分再与型面上其他未发生磨耗的部分连接,形成磨耗后的型面。因此,磨耗阈值的大小决定了磨耗型面误差、计算效率及离散过程数量,也进一步影响磨耗型面及其变化、轮轨接触点位置变化及接触状态如接触应力、黏着区-滑动区分布等。

已有研究<sup>[1,5]</sup>表明,曲线钢轨的裂纹萌生寿命(车轮通过次数)在 $10^5$ 数量级以上,由此提出采用钢轨横断面任意点的磨耗量达到一定垂直深度(下文称等磨耗深度 $h$ )和车轮通过次数达到一定数量(下文称等车轮通过次数 $l$ )的方法来确定磨耗阈值,如图1所示。在车轮型面不变和不考虑轨道几何不平顺引起的车轮横移的情况下(见图1a),钢轨初始型面与车辆同侧的车轮型面在轨面某区域接触,继而在该区域引起垂直磨耗及随车轮次数累积下的磨耗深度累积。轨面发生磨耗位置的最大深度

$$\max h = \max \sum_{j=1}^J h_j \quad (2)$$

式中:  $h_j$  为沿列车运行方向第  $j$  个车轮通过一次时在钢轨接触位置引起的磨耗深度,  $h_j = \{h_{j1}, h_{j2}, h_{j3}, \dots, h_{jk}\}$ , 其中  $h_{jk}$  为第  $j$  个车轮在轨头第  $k$  点引起的磨耗深度, 由式(1)计算得到;  $J$  为在一个廓形替换阶段钢轨任意点磨耗深度达到磨耗阈值(等磨耗深度)时的车轮总数。应该注意到, 一节车辆同侧的4个车轮在钢轨上的接触位置以及引起的磨耗均不相同。

图1b中, 钢轨初始型面与一节车辆转向架一侧的第1个车轮接触, 引起单次车轮的磨耗深度  $h_1$ , 以此磨耗深度继续进行车轮次数累积, 该节车同侧的第2、3、4个车轮同样分别在轨面某点发生接触并引起该处的磨耗。当达到预设的车轮通过次数  $t$  时, 计算对应的磨耗深度并由此形成磨耗型面  $R'_1$ , 再与车轮型面接触, 同样发生单次车轮磨耗深度  $h_2$  以及此深度下的车轮次数累积, 直到再次达到预测的车轮通过次数  $t$ , 形成磨耗型面  $R'_2$ 。

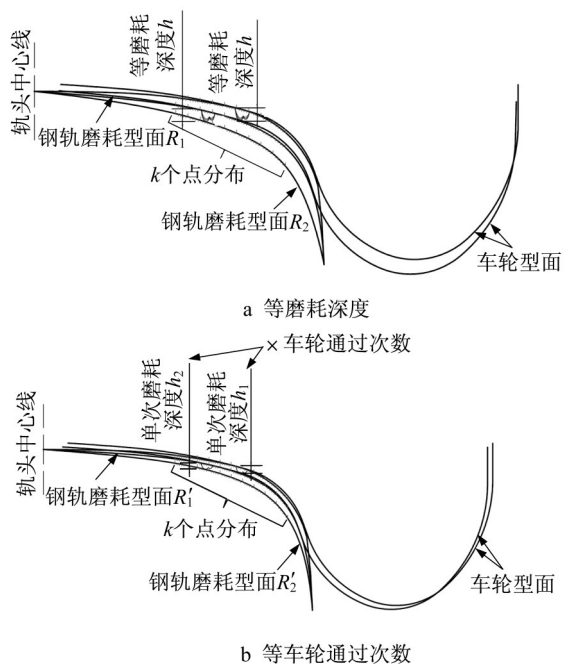


图1 磨耗阈值定义

Fig.1 Definition of wear threshold

等车轮通过次数情况下的钢轨轨头各点磨耗量

$$h = \sum_{t=1}^T h_t \quad (3)$$

式中:  $h_t$  为沿列车运行方向第  $t$  个车轮通过一次时在钢轨接触位置引起的各点磨耗深度,  $h_t = \{h_{t1}, h_{t2}, h_{t3}, \dots, h_{tk}\}$ , 其中  $h_{tk}$  为第  $t$  个车轮在轨头第  $k$  点引起的磨耗深度, 由式(1)计算得到;  $T$  为在一个廓形替换阶

段达到磨耗阈值(等车轮通过次数)时的车轮总数。

采用裂纹萌生和磨耗发展共存预测模型分别评价两种磨耗阈值确定方法的计算效率和预测结果。

### 1.3 磨耗阈值的应用

#### 1.3.1 等磨耗深度 $h$ 更新钢轨型面

以标准轨钢轨型面为初始型面, 记作型面  $R_0$  (见图2), 设置于轨道模型的两股钢轨上。根据车辆-轨道动力学理论、轮轨接触理论及式(1)和式(2)分别计算并累加一节车辆作用在一股钢轨上的4个车轮产生的接触位置、接触应力和磨耗深度。随着车轮通过次数的累积, 当型面上任意点的最大磨耗深度达到  $h$  时, 则认为该型面已经因磨耗而发生变化。以该点和型面上轮轨可能的接触范围以外的型面端点(型面上发生磨耗和不发生磨耗的交点)为特征点, 采用三次插值样条曲线进行型面平滑, 从而生成磨耗型面  $R_1$  并把型面  $R_0$  进行更新, 将该过程看作是一个磨耗型面替换迭代的过程, 如图2所示。之后, 车辆-轨道动力学和轮轨接触因型面  $R_1$  发生变化, 重复磨耗计算过程, 直到  $R_1$  型面上任意点的最大磨耗深度再次达到  $h$ , 再以该点和型面发生磨耗和不发生磨耗的交点为特征点进行型面平滑, 生成第2个磨耗阶段的型面  $R_2$ , 如此反复。型面迭代更新的标准是型面上任意点的垂直磨耗深度最大值达到  $h$ , 而型面替换更新的终止条件是疲劳累积损伤达到临界疲劳损伤值。

#### 1.3.2 等车轮通过次数 $t$ 更新钢轨型面

如图3所示, 由式(1)计算出单次车轮引起的磨耗深度, 并得到一节车辆同一侧前后4个车轮引起的磨耗深度之和, 考虑车辆反复通过, 当车轮通过次数达到阈值  $t$  时, 则认为所引起的磨耗足以导致型面发生变化, 由此按式(3)得到该车轮通过次数下的累积磨耗深度, 再以该磨耗深度最大值的点为特征点, 用三次插值样条曲线进行型面平滑, 得到磨耗型面并替换掉上一个型面, 如此反复。型面迭代更新的标准是车轮通过次数累积达到  $t$ , 型面替换更新的终止条件同样是疲劳累积损伤达到临界疲劳损伤值。

## 2 裂纹萌生和磨耗预测

### 2.1 仿真参数

建立的车辆-轨道多体动力学模型、轮轨接触模型参数如表1所示。

等磨耗深度方法确定的磨耗阈值  $h$  分别为 0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.08 mm; 等车轮通过次数方法确定的磨耗阈值  $t$  分别为车轮通过次数



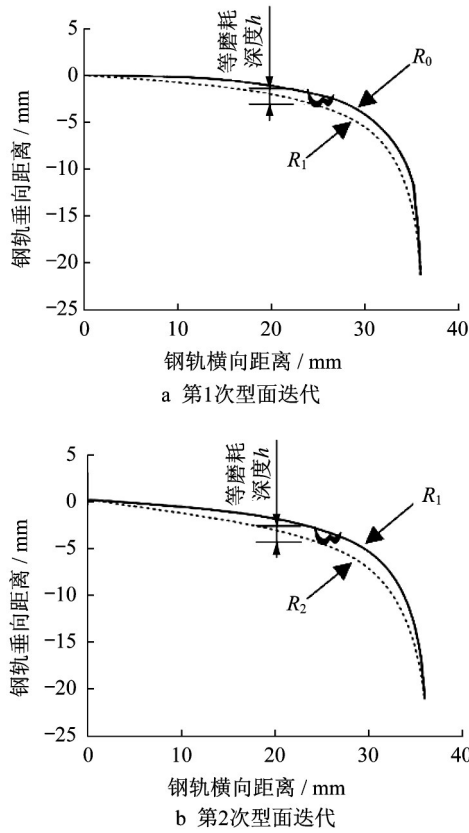


图2 以等磨耗深度 $h$ 更新钢轨型面

Fig.2 Rail profile evolution with constant wear depth  $h$

$2.0 \times 10^4, 2.5 \times 10^4, 3.0 \times 10^4, 4.0 \times 10^4, 5.0 \times 10^4$ .

## 2.2 预测结果对比

### 2.2.1 磨耗型面

采用第2.1节的仿真参数分别进行等磨耗深度和等车轮通过次数下钢轨裂纹萌生和磨耗共存预测,达到对应的磨耗阈值时在原型面上减掉对应位置的磨耗量,并采用三次插值样条曲线,以最大磨耗深度点、型面上发生磨耗区域的两端点为控制点,平滑生成新的型面以替换原型面。在裂纹萌生前,钢轨型面发生若干次磨耗型面的替换。例如,等磨耗深度 $h$ 为0.03、0.04 mm时,到钢轨裂纹萌生为止,分别共发生9次和7次型面替换;等车轮通过次数为 $3.0 \times 10^4$ 时,到钢轨裂纹萌生为止,共发生10次型面替换,如图4所示。由于相邻廓形的磨耗量较小,廓形变化轻微,为了清晰显示,图4只放了部分廓形。

从图4可以看出,无论是等磨耗深度还是等车轮通过次数,钢轨型面每次达到磨耗阈值时将前一型面减掉对应的磨耗量并用三次插值样条曲线平滑整个轨头型面,平滑的区域主要在轨顶中心靠轨距边一侧0~30 mm的区域,前后磨耗型面的变化非常

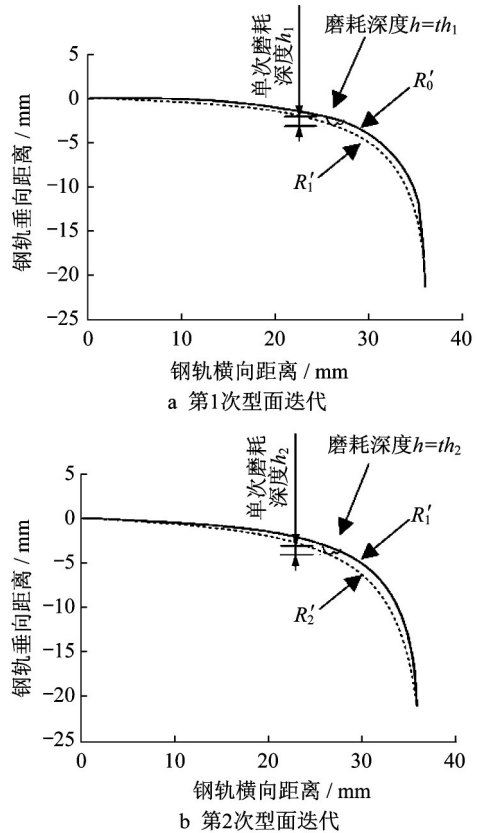


图3 以等车轮通过次数 $t$ 更新钢轨型面

Fig.3 Rail profile evolution with constant wheel cycles  $t$

表1 车辆和轨道主要参数

Tab.1 Parameters of vehicle and track

参数	描述
车辆模型	C70型敞车
轴重/t	23
曲线半径/m	800
钢轨类型	U75V 热处理
车轮踏面	LM磨耗型
钢轨硬度/HB	340~400
钢弹性模量/GPa	206
转向架	ZK6
列车速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	50
轨底坡	1:40
轨头顶面中心线硬度/HB	340~400
钢轨初始型面	$75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 标准型面
钢轨屈服强度/MPa	838
钢轨泊松比	0.29

微小。等磨耗深度和等车轮通过次数方法下,将任意两次相邻磨耗型面横坐标相同点的纵坐标相减,得到的纵坐标最大偏差值为 $2.36 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ ;将上述纵坐标偏差值除以横坐标点数得到平均差值,最大平均差值为 $7.8 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 。

此外,等磨耗深度为0.05 mm时,单次型面平滑前后对比及其一阶导数的变化如图5所示。从平滑

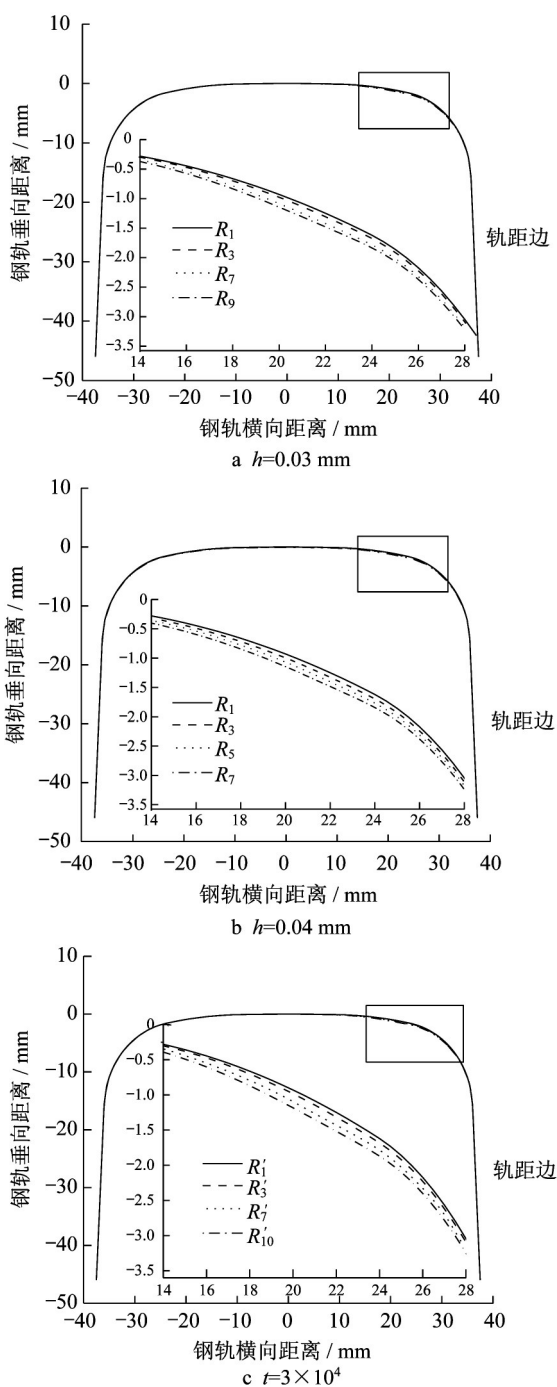


图4 不同磨损阈值时钢轨型面变化

Fig.4 Rail profile evolution with different wear thresholds

前后两型面沿横向的一阶导数可以看出,在相同横坐标处纵坐标最大偏差值为  $1.49 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ ,平均值为  $3.7 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ ,一阶导数的趋势基本一致。可见,由于磨损阈值均较小,因此平滑处理型面时的误差可以忽略。

### 2.2.2 磨损发展率

根据等磨损深度和等车轮通过次数方法得到的

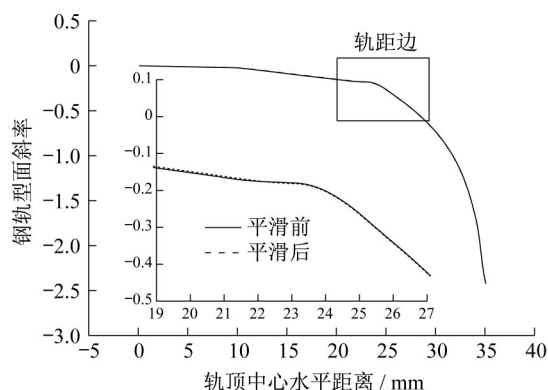


图5 平滑前后型面沿横向的一阶导数

Fig.5 First derivative of rail profiles along transverse direction before and after smoothing

各个磨损型面,计算裂纹萌生前各个磨损型面替换时的阶段磨损发展率和平均磨损发展率。阶段磨损发展率是指钢轨型面从  $R_i$  变化为  $R_{i+1}$  过程中(第  $i$  个磨损阶段),钢轨型面上各点磨损深度的平均值除以车轮通过次数;平均磨损发展率为在钢轨裂纹萌生时,  $m$  次型面变化过程( $m-1$ )个磨损阶段)中阶段磨损发展率的平均值。

不同等磨损深度  $h$  和不同等车轮通过次数  $t$  情况下,裂纹萌生时对应的平均磨损发展率如图6所示。从图6可以看出,等磨损深度  $h$  情况下,磨损深度在  $0.02 \sim 0.06 \text{ mm}$  时,裂纹萌生时的平均磨损发展率为  $4.53 \sim 4.55 \mu\text{m} \cdot \text{万次}^{-1}$ ,变化幅度为  $0.4\%$ ;磨损深度在  $0.08 \text{ mm}$  时,裂纹萌生时的平均磨损发展率为  $4.59 \mu\text{m} \cdot \text{万次}^{-1}$ ,增幅为  $0.9\% \sim 1.3\%$ 。等车轮通过次数  $t$  情况下,车轮通过次数在  $2.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$  时,裂纹萌生时的平均磨损发展率为  $4.53 \sim 4.55 \mu\text{m} \cdot \text{万次}^{-1}$ ,变化幅度也仅为  $0.4\%$ 。

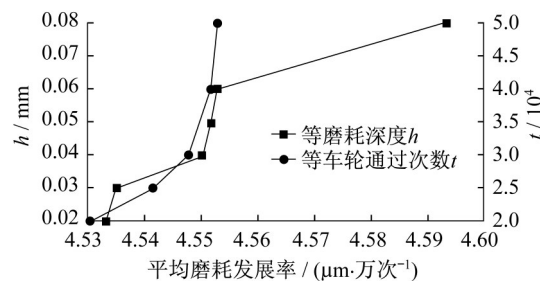


图6 不同等磨损深度  $h$  及等车轮通过次数  $t$  下钢轨平均磨损发展率

Fig.6 Average wear growth rate at different constant wear depths  $h$  and constant wheel cycles  $t$

由式(1)可知,影响钢轨磨损发展率的主要因素是钢轨的接触斑黏着-滑动分布、接触应力、钢轨材

质,以及每次磨耗型面替换时车轮通过次数和裂纹萌生前的磨耗型面累加次数,所以在裂纹萌生前的平均磨耗发展率受磨耗深度和车轮通过次数两种磨耗阈值的影响不大,在以磨耗深度  $h=0.08\text{ mm}$  替换型面时产生一定的偏差。

### 2.2.3 疲劳损伤及其累积

#### (1)等磨耗深度

等磨耗深度更新钢轨型面时,裂纹萌生前每个磨耗阶段的单次疲劳损伤及其发展趋势如图7所示。

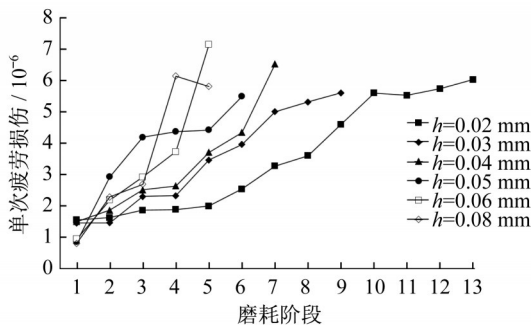


图7 不同等磨耗深度  $h$  下单次疲劳损伤

Fig.7 Single fatigue damage at different constant wear depths  $h$

从图7发现,单次疲劳损伤随磨耗发展呈非线性增加的趋势。当磨耗深度  $h \leq 0.04\text{ mm}$ , 单次疲劳损伤发展较连续和平缓。随着磨耗增加,单次疲劳损伤在前4个磨耗阶段的平均增速为9.84%;第4个磨耗阶段后,增速逐渐增大,平均增速为39.28%。当磨耗深度  $h > 0.04\text{ mm}$  时,单次疲劳损伤发展较快且急剧,相邻磨耗阶段的疲劳损伤有明显的跳跃。 $h$  为0.05、0.06、0.08 mm时单次疲劳损伤分别在第5、4、3次迭代发生急剧增加,平均增速为81.33%。

#### (2)等车轮通过次数

等车轮通过次数更新钢轨型面时,裂纹萌生前每个磨耗阶段的单次疲劳损伤及其发展趋势如图8所示。

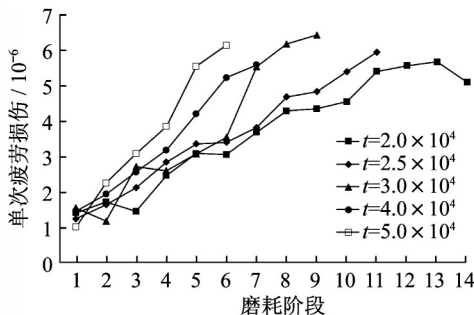


图8 不同等车轮通过次数  $t$  下单次疲劳损伤

Fig.8 Single fatigue damage at different constant wheel cycles  $t$

从图8同样可以发现,单次疲劳损伤随磨耗发展呈非线性增加的趋势。当  $t \leq 3.0 \times 10^4$  时,随着磨耗次数增加,单次疲劳损伤增加较平缓。单次疲劳损伤在前3个磨耗阶段的平均增速为30.0%,之后平均增速提高到33.7%。当  $t > 3.0 \times 10^4$  时,单次疲劳损伤发展较快。 $t$  为  $4.0 \times 10^4$ 、 $5.0 \times 10^4$  时单次疲劳损伤分别第5、4次迭代发生急剧增加,平均增速为38.0%。

结合第2.2.1节来看,磨耗阈值越小,裂纹萌生前的磨耗阶段越多,即疲劳累积较平稳。随着磨耗阈值增加,疲劳累积趋势逐渐加快,如在  $h > 0.04\text{ mm}$ 、 $t > 3.0 \times 10^4$  时,疲劳累积发展出现明显波动。

### 2.2.4 裂纹萌生位置

当钢轨轨头内部某点的疲劳累积损伤达到临界疲劳损伤时,认为裂纹在该点萌生,这时对应的车轮通过次数即是裂纹的萌生寿命。利用上述方法对比不同磨耗阈值下的裂纹萌生位置。

#### (1)等磨耗深度

从图9可以看出,当  $h \leq 0.04\text{ mm}$  时,裂纹萌生位置的预测几乎相同,在距离轨顶中心靠近轨距角一侧约16.4 mm、距离轨顶面垂直向下约3.3~3.4 mm处。当  $h > 0.04\text{ mm}$  时,由于每次更新型面后疲劳累积变化较明显(见图7和图8),因此最后预测的裂纹萌生位置距离轨顶中心靠近轨距角一侧约16.6~17.1 mm、距离轨顶面垂直向下约3.1~3.5 mm处,与  $h \leq 0.04\text{ mm}$  情况相比,裂纹萌生位置水平和垂直偏差分别为1.2%~4.2%和约3.0%。

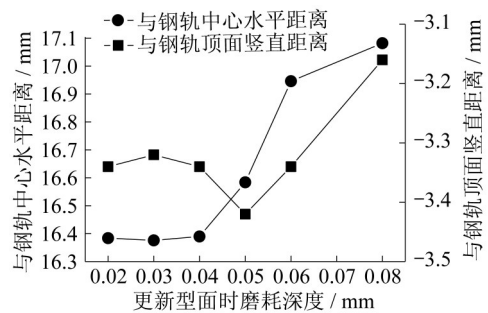


图9 不同等磨耗深度  $h$  下裂纹萌生位置

Fig.9 Crack initiation position at different constant wear depths  $h$

#### (2)等车轮通过次数

如图10所示,当  $t \leq 3.0 \times 10^4$  时,钢轨的裂纹萌生位置几乎相同。当  $t > 3.0 \times 10^4$  时,轨头疲劳累积点的位置远离轨顶中心,裂纹萌生位置有所偏差,与  $t \leq 3.0 \times 10^4$  情况相比,裂纹萌生位置的水平



偏差分别为2.8%~3.4%和约1.2%。

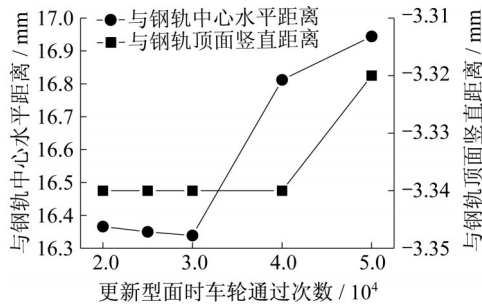


图10 不同等车轮通过次数  $t$  下裂纹萌生位置

Fig.10 Crack initiation position at different constant wheel cycles  $t$

### 2.2.5 裂纹萌生寿命

对更新型面时不同磨耗处理方法下预测的钢轨裂纹萌生寿命进行对比。

#### (1)等磨耗深度

从图11可知,当  $h \leq 0.04$  mm时,裂纹萌生寿命几乎相同,为277 585次左右。当  $h > 0.04$  mm时,裂纹萌生寿命与0.04 mm时相比,分别增大了2.3%、3.93%、13.51%。据此可知,若磨耗深度  $h$  取0.10 mm作为磨耗阈值,则裂纹萌生寿命将有更大偏差。

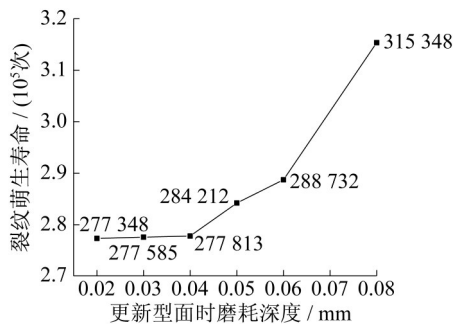


图11 不同等磨耗深度  $h$  下钢轨裂纹萌生寿命

Fig.11 Rail crack initiation life at different constant wear depths  $h$

#### (2)等车轮通过次数

从图12可以看出,当  $t \leq 3.0 \times 10^4$  时,裂纹萌生寿命几乎相同,在277 600次左右,并且与等磨耗深度算法的结果接近。当  $t > 3.0 \times 10^4$  时,裂纹萌生寿命分别比  $t = 3.0 \times 10^4$  时增大了2.30%和3.73%。

观测现场同等条件仿真下的重载铁路曲线(800 m半径,75 kg·m<sup>-1</sup>标准型面、U75V热处理钢轨),外轨裂纹萌生寿命约为3.52~8.14 MGT(百万吨通过总重)<sup>[17]</sup>,此时曲线大部分区段的外轨轨距角萌生裂纹,换算成车轮通过次数约为  $1.53 \times 10^5 \sim 3.54 \times 10^5$ 。此外,Makama等<sup>[18]</sup>观测的现场钢轨裂

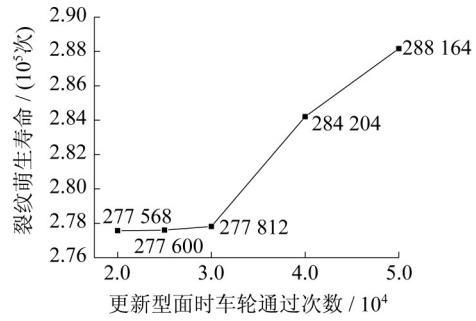


图12 不同等车轮通过次数  $t$  下钢轨裂纹萌生寿命

Fig.12 Rail crack initiation life at different constant wheel cycles  $t$

纹萌生寿命为车轮通过次数  $5.10 \times 10^4 \sim 6.07 \times 10^5$ 。

采用不同磨耗阈值的方法来完善裂纹萌生和磨耗共存预测模型,预测800 m半径曲线外轨的轨距角-轨肩疲劳裂纹萌生寿命为277 348~315 348次车轮,均在上述裂纹萌生寿命范围内。

### 2.2.6 预测耗时

当预测到裂纹萌生时,采用等磨耗深度  $h$  与等车轮通过次数  $t$  所耗费的仿真时间如表2所示。

表2 不同磨耗阈值下计算用时

Tab.2 Calculation time at different wear thresholds

磨耗阈值	参数值	迭代次数	计算用时/h
$h/\text{mm}$	0.02	13	14~16
	0.03	9	9~11
	0.04	7	7~9
	0.05	6	6~8
	0.06	5	5~7
	0.08	5	5~7
$t$	$2.0 \times 10^4$	15	15~18
	$2.5 \times 10^4$	13	14~16
	$3.0 \times 10^4$	10	10~12
	$4.0 \times 10^4$	8	8~10
	$5.0 \times 10^4$	7	7~9

从表2可见,无论是等磨耗深度还是等车轮通过次数,磨耗阈值越小,则型面替换迭代次数越多、型面变化越微小、疲劳损伤累积趋势越平稳,但相应的仿真耗时增加较多。当  $h \leq 0.04$  mm时,预测结果接近,但耗时较长;当  $h = 0.08$  mm,耗时减小了50%以上,预测的裂纹萌生寿命较其他阈值最多增大13.51%,萌生位置较其他阈值偏差3%~4%。同理,当  $t \leq 3.0 \times 10^4$  时,预测结果接近但耗时较长,  $t > 3.0 \times 10^4$  时,计算用时较长,预测结果有一定偏差。

## 3 结论

(1)用三次插值样条曲线平滑磨耗后的钢轨型

面,主要在轨顶中心靠轨距边一侧0~30 mm的区域内,前后两次型面的纵坐标偏差和沿横向一阶导数的纵坐标偏差均在 $10^{-2}$   $\mu\text{m}$ 级。三次插值样条曲线平滑处理磨耗型面时引起的误差可以忽略。

(2)磨耗阈值对裂纹萌生前的平均磨耗发展率的影响不大,在 $4.53\sim 4.59 \mu\text{m}\cdot\text{万次}^{-1}$ ,平均磨耗发展率最大偏差约为1.3%。

(3)磨耗阈值对疲劳损伤及疲劳损伤的发展影响明显。磨耗阈值越小,裂纹萌生前的磨耗阶段越多,即疲劳累积较平稳。随着磨耗阈值的增加,疲劳累积趋势逐渐加快,并出现明显波动。

(4)磨耗阈值对裂纹萌生位置预测有一定的影响。磨耗阈值较小时( $h\leq 0.04 \text{ mm}$ 或 $t\leq 3.0\times 10^4$ ),预测的裂纹萌生位置基本相同,均处于距离轨顶中心靠近轨距角一侧约16.4 mm、距离轨顶面垂直向下约3.3~3.4 mm处;阈值较大时(磨耗深度 $h> 0.04 \text{ mm}$ 或车轮通过次数 $t> 3.0\times 10^4$ ),预测的裂纹萌生位置较阈值较小的结果有不超过5%的偏差。

(5)磨耗阈值对裂纹萌生寿命预测有明显影响。磨耗阈值较小时( $h\leq 0.04 \text{ mm}$ 或 $t\leq 3.0\times 10^4$ ),裂纹萌生寿命基本近似。随着阈值的增大,裂纹萌生寿命较阈值较小的结果产生偏差,最大到13.51%。

(6)磨耗阈值对计算效率有明显影响。磨耗阈值选取越小,型面替换迭代次数越多、型面变化越微小、疲劳损伤累积趋势越平稳,但相应的仿真耗时增加较多。磨耗阈值较大时,仿真耗时减小50%~60%。

## 参考文献:

- [1] ZHOU Y, WANG S F, WANG T Y. Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and wear in a heavy-haul railway[J]. *Wear*, 2014, 315: 68.
- [2] 周宇, 练松良, 孙礼超. 城市轨道交通轮轨硬度匹配研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2018, 21(4): 35.  
ZHOU Yu, LIAN Songliang, SUN Lichao. Hardness matching of wheel-rail system in urban rail transit [J]. *Urban Mass Transit*, 2018, 21(4): 35.
- [3] 周宇, 木东升, 邝迪峰, 等. 城市轨道交通钢轨磨耗和裂纹萌生分析与选型建议[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(4): 82.  
ZHOU Yu, MU Dongsheng, KUANG Difeng, *et al.* Analysis on rail wear and crack initiation and recommendation on rail selection in rail urban transit [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(4): 82.
- [4] 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 check initiation life prediction considering rail wear [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(7): 91.
- [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] LI Z, KALKER J, WIERSMA P, *et al.* Non-Hertzian wheel-rail wear simulation in vehicle dynamical systems [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Railway Bogies and Running Gears*. Budapest: [s.n.], 1998: 187-196.
- [7] WARD A, LEWIS R, DWYER-JOYCE R S. Incorporating a railway wheel wear model into multi-body simulations of wheelset dynamics [J]. *Tribology Series*, 2003, 41: 367.
- [8] LEWIS R, BRAGHIN F, WARD A, *et al.* Integrating dynamics and wear modelling to predict railway wheel profile evolution [C]// *6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2003)*. Gothenburg: [s.n.], 2003: 7-16.
- [9] LEWIS R, OLOFSSON U. Mapping rail wear regimes and transitions [J]. *Wear*, 2004, 257(7/8): 721.
- [10] CHANG C, WANG C, JIN Y. Study on numerical method to predict wheel/rail profile evolution due to wear [J]. *Wear*, 2010, 269(3/4): 167.
- [11] WANG P, XU J, XIE K, *et al.* Numerical simulation of rail profiles evolution in the switch panel of a railway turnout [J]. *Wear*, 2016, 366: 105.
- [12] BRAGHIN F, LEWIS R, DWYER-JOYCE R S, *et al.* A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear [J]. *Wear*, 2006, 261(11/12): 1253.
- [13] 王天一. 重载铁路小半径曲线钢轨特殊型面设计方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2014.  
WANG Tianyi. Research on rail profile designing method for heavy-haul railway with sharp radius curves [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [14] 张杰. 重载铁路钢轨型面磨耗对疲劳裂纹萌生的影响研究 [D]. 上海: 同济大学, 2015.  
ZHANG Jie. Research on the influence of rail profile wear on fatigue crack initiation in heavy-haul railway [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [15] 周宇, 黄旭炜, 王树国, 等. 考虑轨道几何不平顺的钢轨裂纹萌生与磨耗共存预测 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(11): 1600.  
ZHOU Yu, HUANG Xuwei, WANG Shuguo, *et al.* Prediction of rail rolling contact fatigue crack initiation and wear growth considering track geometry irregularity [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2019, 47(11): 1600.
- [16] MINER M A. Cumulative damage in fatigue [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, 12(3): A159.
- [17] WANG J, XU Y, LIAN S, *et al.* Probabilistic prediction model for initiation of RCF cracks in heavy-haul railway [J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(2): 212.
- [18] MAKAMA M, MATSUDA H, DOI H, *et al.* Fatigue crack initiation life prediction of rails using theory of critical distance and critical plane approach [J]. *Journal of Computational Science and Technology*, 2012, 6(2): 54.