

# 钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生和磨耗共存预测方法验证

周宇<sup>1,2</sup>, 王钰<sup>1,2</sup>, 卢哲超<sup>1,2</sup>, 梁旭<sup>3</sup>, 李骏鹏<sup>1,2</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金属及化学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 采用小比例轮轮滚动接触疲劳试验再现钢轨裂纹萌生和磨耗过程, 根据钢轨裂纹萌生和磨耗共存预测方法结合试验条件建立相应的预测模型, 分别对试验和仿真预测的钢轨试样磨耗、裂纹萌生寿命和启裂角度等进行比对, 从而验证钢轨裂纹萌生和磨耗共存预测方法。研究发现: 当试样萌生裂纹时, 有53.8%的试样经历了2个磨耗阶段, 平均磨耗发展率约为 $5.83 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ ; 预测的试样在萌生裂纹前经历了2次磨耗阶段, 平均磨耗发展率约为 $5.18 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ , 较试验结果低约11.1%; 试验中试样裂纹萌生寿命在 $6 \times 10^4 \sim 14 \times 10^4$ 次范围内, 且裂纹长度在荷载循环次数在 $11 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$ 次时达到极大值, 预测的裂纹萌生寿命为 $11.1 \times 10^4$ 次, 基本与试验结果中裂纹萌生时出现极大值的试样所对应的荷载作用次数接近。试验观测到试样表面裂纹开口与滚动方向的角度平均值约为 $45^\circ$ ; 仿真预测的裂纹开口与滚动方向的角度平均值基本与观测到的裂纹开口与滚动方向的角度一致。

**关键词:** 钢轨; 滚动接触疲劳; 裂纹萌生; 磨耗; 小比例轮轮试验

中图分类号: U213.42

文献标志码: A

## Verification of Prediction Method for Coexistence of Rolling Contact Fatigue Crack Initiation and Wear Growth in Rail

ZHOU Yu<sup>1,2</sup>, WANG Zheng<sup>1,2</sup>, LU Zhechao<sup>1,2</sup>, LIANG Xu<sup>3</sup>, LI Junpeng<sup>1,2</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 Transit Structure Endurance and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Metals and Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

收稿日期: 2020-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(51678445, 51878661); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(K2019G010)

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伤损、轨道结构。

E-mail: yzhou2785@tongji.edu.cn

**Abstract:** A small-scale wheel-wheel rolling contact fatigue (RCF) experiment was applied to reproduce the rail RCF crack initiation and wear growth process. Then, according to the experimental conditions, the prediction model was established based on the method for the coexistence of rail rolling contact fatigue(RCF) crack initiation and wear growth. The wear, crack initiation life and the angle of the RCF crack in the rail specimens of the experiment and simulation were compared to verify the method. The result shows that when the crack initiated in the specimen surface during the experiment, 53.8% of the specimen experiences two wear phases. The average wear growth rate is about  $5.83 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{cycles}^{-1}$ . In the simulation, there are also two wear phases when the crack was initiated. The average wear growth rate is about  $5.18 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{cycles}^{-1}$  which is about 11.1% lower than the experimental results. In the experiment, the crack initiation life is about  $6 \times 10^4$  to  $14 \times 10^4$  cycles. Moreover, the crack length reaches its maximum value when the loading cycles is about  $11 \times 10^4$  to  $12 \times 10^4$  cycles. In the simulation, the predicted crack initiation life is about  $11.1 \times 10^4$  cycles, which is close to that of the specimen with the maximum crack length in the experiment. It is observed that the average value of the angle between the crack mouth and the running direction along the specimen surface is about  $45^\circ$  which is close to that of simulation.

**Key words:** rail; rolling contact fatigue; crack initiation; wear; small scale wheel-wheel experiment

对钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生和磨耗发展共存的预测, 有助于为钢轨使用和维修提供指导和参考。已有的钢轨裂纹萌生和磨耗共存预测方法<sup>[1]</sup>已经用于地铁钢轨裂纹萌生的预测中<sup>[2]</sup>。但由于现场钢轨



论文  
拓展  
介绍

疲劳裂纹萌生较早、较快<sup>[3]</sup>,且萌生阶段的裂纹尺寸较小,不容易被观测,仅能得到大致的裂纹萌生寿命范围。因此,对钢轨裂纹萌生和磨耗共存预测方法的验证,现有研究只能将预测结果与现场观测到的萌生寿命范围进行对比,这就影响了对预测方法准确度的判断。

鉴于现场观测来确定裂纹萌生寿命的方法耗时多、可控性不强,且发现裂纹时基本上已经是裂纹扩展阶段。本文考虑采用可控制条件的小比例轮轮滚动接触疲劳试验展开验证。该试验常用于评价钢轨材料的疲劳和磨耗特性。王文健等<sup>[4-5]</sup>采用小比例轮轮滚动试验机研究了干摩擦状态下轮轨滚动过程中接触疲劳与磨损相互竞争与制约的机制。Bolton和Clayton<sup>[6]</sup>采用小比例滚动接触磨损试验机研究了试样材料的磨损率和接触参数之间的关系。Tyfour等<sup>[7]</sup>采用滚动-滑动接触试验机分析了不同接触状态下钢轨材料磨损随循环次数的变化规律。张伟<sup>[8]</sup>,张波等<sup>[9]</sup>以及王文健等<sup>[10]</sup>分别采用轮轨试验机研究了荷载、转速、蠕滑率和材质对钢轨接触疲劳磨损特性的影响。可见,小比例轮轮滚动接触试验可以通过设计轮轨接触条件定量再现滚动接触疲劳裂纹和磨耗发展过程,可以用来验证裂纹萌生和磨耗发展共存预测方法。

本文通过1:5小比例轮轮滚动接触疲劳试验,再现重载铁路钢轨材料滚动接触疲劳裂纹萌生和磨耗共存发展过程,建立轮轮试验条件下的钢轨滚轮试样裂纹萌生和磨耗共存预测模型,对比试验和仿真中的磨耗、裂纹萌生等情况,从而验证裂纹萌生和磨耗发展共存预测方法。

## 1 验证方法

真实情况下的钢轨疲劳裂纹萌生及磨耗共存发展是车轮荷载反复作用下的连续且相互影响的过程<sup>[11]</sup>,将此过程按照磨耗引起钢轨型面变化而进行离散,就转变为因型面变化导致荷载变化(变幅荷载)下的疲劳损伤和磨耗累积问题。这里每个离散过程再分为两个子过程,即磨耗-疲劳损伤单独累积子过程和磨耗型面替换-疲劳损伤累积子过程<sup>[1]</sup>。在子过程1里钢轨型面不变,分别单独计算磨耗及廓形不变情况下的疲劳损伤累积;当达到磨耗阈值时,判断疲劳损伤累积是否达到限值,若是,则得出裂纹萌生位置及寿命,否则进入子过程2;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,累积子过程1的车轮通过次数和轨头各点疲劳

损伤。之后进入下一次循环,直到钢轨任意点疲劳损伤累积达到疲劳限值<sup>[12]</sup>。

这里进一步将上述预测方法的思路应用到小比例轮轮滚动接触疲劳试验中。小比例轮轮滚动接触疲劳试验是将取自钢轨和车轮材料的滚轮试样,按照轮轨接触和黏滑运动的特点施加到轮轮滚动试验台中,以此来模拟轮轨接触疲劳裂纹萌生和磨耗现象。当轮轮试样的接触表面出现裂纹后,轮轮滚动接触会使得试样产生明显的振动加速度,为防止试验台失稳而导致试验失败,在正常运转加速度基础上提高15%~20%,作为预警值,当达到预警值时,结束试验并观测试样表面的裂纹和磨耗。同时,根据小比例轮轮试验的接触条件进行疲劳裂纹萌生和磨耗发展共存建模,则可以分别从仿真和试验角度对裂纹萌生和磨耗共存预测方法进行对比验证,流程如图1所示。

## 2 轮轮滚动接触试验

试验采用1:5小比例MJP(疲劳试验机型号)轮轮滚动接触疲劳试验机。根据实际轮轨接触状态,制备1:5的钢轨、车轮材料的轮盘试样。结合实际轮轨接触情况,设置荷载和蠕滑率施加到轮轮试样上,实现轮轮滚动-滑动运动,试验中未在轮轮界面增加润滑或摩擦控制介质,以模拟干摩擦状态下轮轨材料磨耗和疲劳共存过程。

### 2.1 试样设计与制作

试验采用重载铁路 $75\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 热处理钢轨材料。根据重载铁路车辆-轨道动力学仿真分析和现场观测<sup>[1]</sup>,当车轮横移量小于6 mm时,磨耗型车轮踏面主要与 $75\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 钢轨顶面和R80圆弧段接触。同时,现场跟踪观测发现, $75\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 钢轨的R80圆弧段半径较小,轮轨接触应力较大,会较早萌生疲劳裂纹,并较快扩展引起剥离掉块<sup>[3]</sup>。因此,本文试验模拟钢轨轨头R80圆弧段的滚动接触状态。

对轮盘钢轨主试样和车轮陪试样的形状与尺寸改进设计<sup>[12]</sup>。两试样外径均为60 mm,内径为30 mm,厚度为20 mm,钢轨主试样接触区具有宽度为5 mm,高度为3 mm的凸起,凸起顶端接触面设计为圆弧面,弧面半径80 mm,弧面高度0.039 mm,试样接触表面的初始粗糙度 $R_a$ 约为 $0.3\ \mu\text{m}$ ,磨擦系数约为0.01~0.05。

根据文献<sup>[13]</sup>,钢轨主试样从与轨顶中心线垂直方向的轨头部分进行取样,主试样R80弧面基本

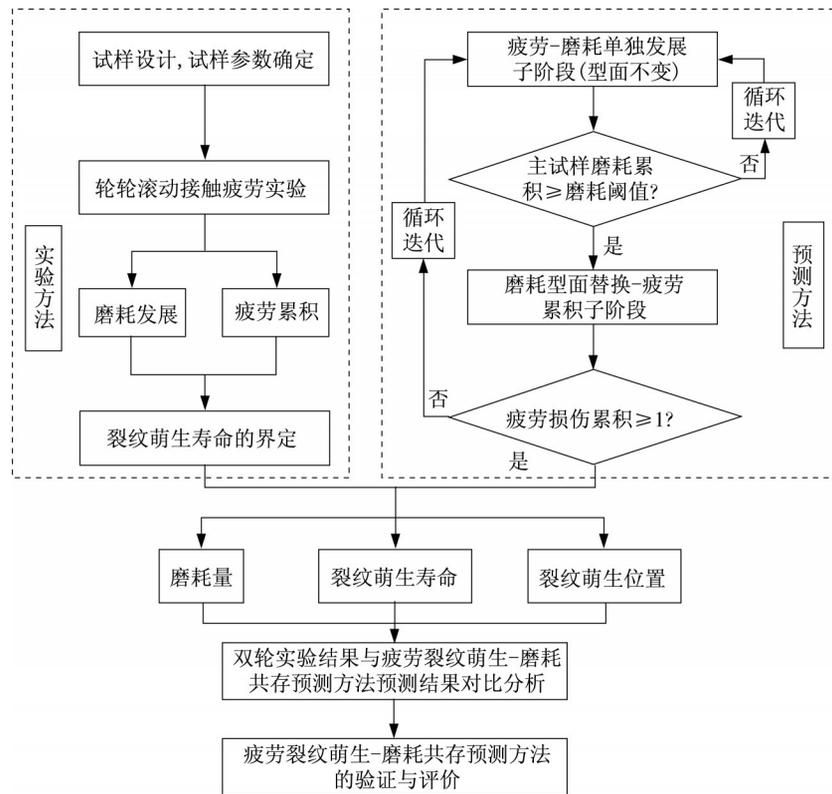


图1 裂纹萌生-磨耗共存方法的试验和预测对比

Fig. 1 Comparison of experiment and prediction of coexistence of crack initiation and wear

处于钢轨轨头同一深度,硬度基本接近,陪试样取自重载车辆的车轮,具体如图2所示。

主试样与陪试样的设计尺寸、接触状态与实际

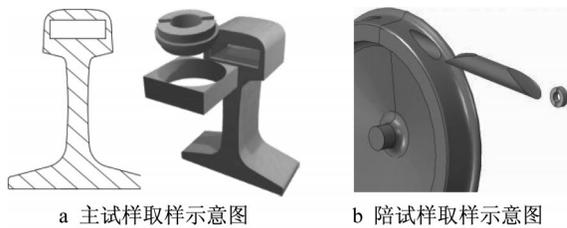


图2 试样取样位置

Fig. 2 Sampling position of specimen

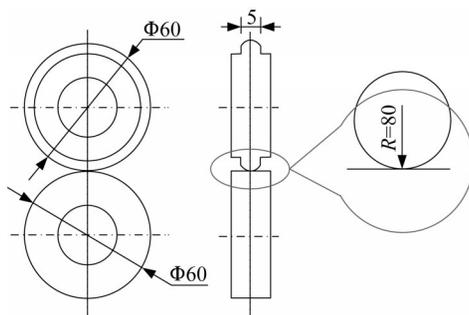
接触状态分别如图3所示。

### 2.2 试验参数的确定

#### (1) 荷载

试验模拟的重载铁路货车轴重为25 t,轮重为12 500 kg,根据点接触时的最大赫兹接触应力公式<sup>[12]</sup>,得到标准LM磨耗型踏面与75 kg·m<sup>-1</sup>钢轨R80圆弧段接触时的最大接触应力为2 265.1 MPa。考虑列车在不平顺线路上的动荷载效应,取动荷载系数为1.3。车轮与钢轨在R80圆弧段接触时的最大接触应力为2 582.6 MPa,取整为2 600 MPa。

根据点接触赫兹接触应力公式<sup>[12]</sup>,可以求得试



a 试验状态下主试样与陪试样的设计接触状态



b MJP滚动接触疲劳试验机试样实际接触状态

图3 轮轮接触状态(单位:mm)

Fig. 3 Wheel-wheel contact (unit:mm)

验荷载如下:

$$F = \frac{2}{3} \frac{\pi^3 \alpha^3 \beta^3 \sigma_{\max}^3}{(\Sigma \rho)^2 \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2} \quad (1)$$

式中:  $F$  为接触载荷, 即接触物体间的垂直压力, N;  $\alpha$ 、 $\beta$  为点接触变形系数;  $\sigma_{\max}$  为最大接触应力, MPa;  $\Sigma \rho$  为两个接触物体的主曲率之和,  $\text{mm}^{-1}$ ;  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别为两个接触物体的泊松比;  $E_1$ 、 $E_2$  分别为两接触物体的弹性模量, MPa;

根据主试样和陪试样的尺寸, 结合文献[14], 求得  $\cos \tau = 0.7749$ ,  $\alpha = 2.17$ ,  $\beta = 0.561$ , 则根据式(1)求得试验荷载为 7 851 N, 试验时便于设置试验机参数, 将试验荷载设置为 7 850 N。

### (2) 纵向蠕滑率的确定

试验机纵向蠕滑率  $\xi_x$  按照式(2)进行计算:

$$\xi_x = \frac{R_r V_r - R_w V_w}{R_r V_r + R_w V_w} = 1 - \frac{V_r}{V_w} \quad (2)$$

式中:  $R_r$ 、 $R_w$  分别为主试样与陪试样的半径, mm;  $V_r$ 、 $V_w$  分别为主试样与陪试样的转速,  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

MJP 系列滚动接触疲劳试验机的转速范围是 200 ~ 3 000  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 考虑到试样热效应。经过预试验发现, 在试样转动速度为 200 ~ 2 000  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  时的接触面温度较低, 为提高试验效率, 决定主试样的转动速度为 1 500  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 经过计算, 得到设计纵向蠕滑率为 0.002。

## 2.3 试验数据的采集

用 75  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$  U75V 钢轨制备了 13 个钢轨主试样, 结合对应的车轮陪试样, 分别进行轮轮滚动接触试验。

在试验前, 先用精密天平测量钢轨主试样的质量, 裂纹萌生停止试验后, 再测量钢轨主试样的质量, 通过质量差计算相应的磨耗损失量, 并结合试样材料的密度与试样接触面尺寸计算得到每组试样的垂直磨耗深度。

一般认为, 疲劳裂纹萌生寿命为当材料接触表面或亚表面的某一微裂纹长度达到指定长度时所经历的荷载循环次数<sup>[15]</sup>。而在轮轮滚动试验中, 试样接触面出现裂纹后, 会使得主、陪试样产生明显的振动加速度, 由此确定试样表面产生了裂纹。由于疲劳裂纹的产生具有一定的随机性<sup>[16]</sup>, 上述钢轨主试样分别在荷载循环次数  $N$  为  $5 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4$  次范围内出现细微裂纹。对出现裂纹的主试样滚动面采用电子显微镜观察(图4), 并根据比例尺计算表面裂纹的长度。

图4所示为不同的钢轨主试样在试验前、分别

滚动  $8 \times 10^4$ 、 $12 \times 10^4$ 、 $18 \times 10^4$ 、 $20 \times 10^4$  和  $30 \times 10^4$  次时, 其各自滚动面及裂纹情况。试样表面裂纹萌生后根据表面裂纹长度, 结合椭圆形裂纹表面长度和内部长度之间的比例关系<sup>[17]</sup>, 得到钢轨主试样接触面裂纹在试样内部的长度。

从图4可以看出, 开始试验时, 试样表面是光滑无损伤的, 初始粗糙度约  $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 。由于裂纹萌生的随机性, 在相同的试验环境下(荷载和蠕滑率稳定), 不同的试样在不同荷载循环次数时在表面萌生裂纹, 裂纹开口与滚动方向呈一定角度; 在荷载循环次数  $8 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$  时, 裂纹在试样表面较明显, 当荷载循环次数超过  $18 \times 10^4$  次, 尽管试样表面存在明显裂纹, 但同时已经有明显的摩擦磨损的痕迹。

## 3 轮轮滚动接触裂纹萌生和磨耗预测

### 3.1 有限元建模

根据 2.1 和 2.2 节试验机的轮轮滚动情况, 建立轮轮滚动接触有限元模型, 其中轮轮接触部分如图5所示。从图5可以看出, 对轮轮接触区处的局部网格进行细化, 该部分细化后的子模型包括  $7.8 \times 10^4$  个单元尺寸为  $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$  的 C3D8I 单元网格, 83 793 个有效单元结点(多个单元的重合结点视为 1 个结点)。

### 3.2 磨耗预测

首先, 对轮轮接触进行有限元计算, 得到钢轨主试样接触面上的接触应力, 以轮轮接触范围内每个磨耗计算单元网格的 4 个结点的平均接触应力作为该单元的接触应力; 根据 2.2 节试验的纵向蠕滑率计算得到接触面以及每个磨耗计算单元上的切向应力及其分布。之后, 将接触面沿纵向等分若干条带, 则位于同一纵向条带上的单元网格作为一个磨耗计算条带, 应用 Archard 磨耗理论<sup>[18]</sup> 计算每个磨耗计算条带内单元网格的磨耗量, 即接触斑上磨耗计算单元的磨耗量为

$$dV(x, y) = \begin{cases} k \frac{p(x, y) \cdot ds(x, y)}{H}, & (x, y) \in A_s \\ 0, & (x, y) \notin A_s \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $dV(x, y)$  为单元网格上的磨耗量(磨耗体积);  $k$  为磨耗系数;  $p(x, y)$  为磨耗计算单元  $(x, y)$  受到的法向压力;  $ds(x, y)$  为单位时间增量内磨耗计算单元  $(x, y)$  的相对滑动距离;  $H$  为试块硬度;  $A_s$  为接触斑滑动区面积。

经过接触面内某点纵向条带所有单元网格的磨

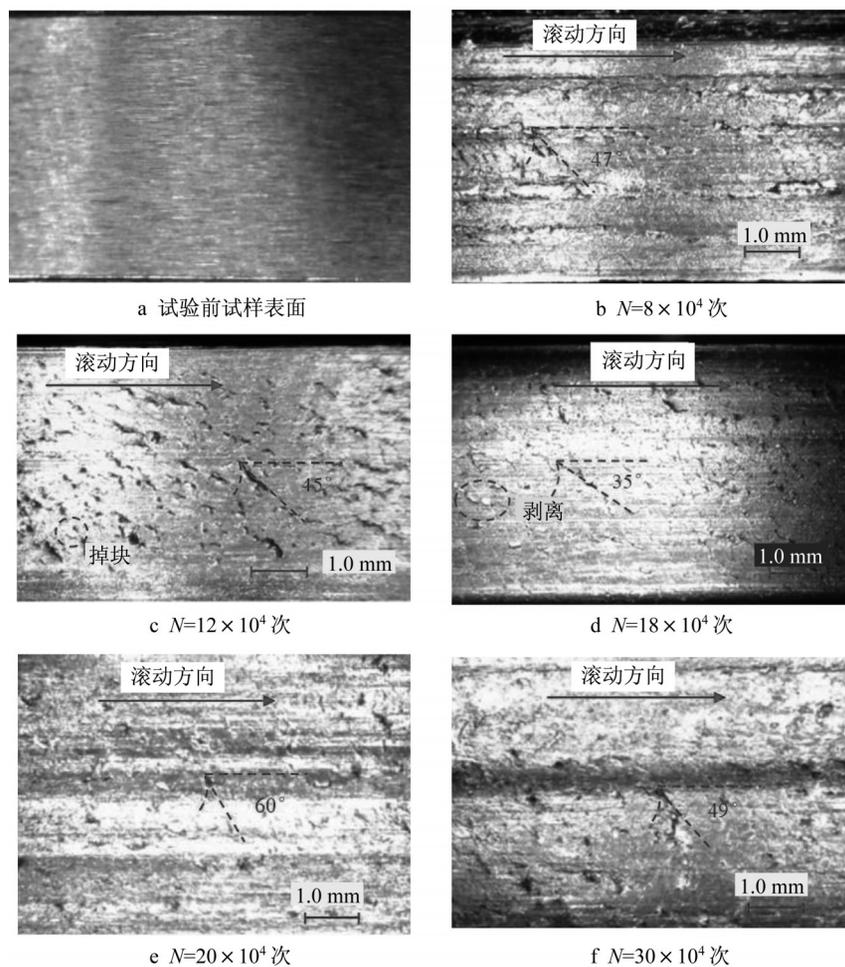


图4 主试样接触表面形貌特征图

Fig. 4 Topography feature of rail specimen surface

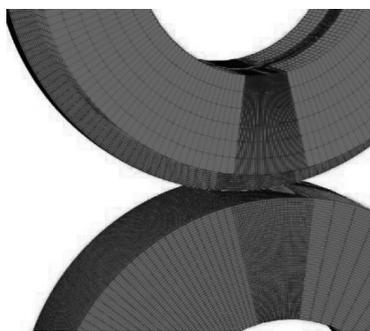


图5 试样有限元模型接触区局部网格细化

Fig. 5 Local mesh refinement in contact area of finite element model of rail specimen

耗量之和即为接触面某点的磨耗深度,当接触面内任意点的最大磨耗深度达到预设阈值时,将型面各点减去其相应的磨耗深度,并将接触型面的磨耗部分与非磨耗部分平滑连接,形成新的磨耗型面替换原来型面,进入下一个磨耗型面阶段。采用替换后的型面按照相同的步骤计算接触面形状、接触应力和切向应力,从而计算接触面的磨耗深度,迭代分析

至疲劳损伤到限,即裂纹萌生。

已有研究<sup>[19]</sup>中采用的磨耗型面替换控制阈值为垂直磨耗深度0.04 mm,本文所采用的轮轨试验中钢轨主试样弧面高度为0.039 mm,因此,在仿真和试验中,将磨耗型面替换过程按磨耗深度0.039 mm划分不同的磨耗阶段。从初始型面磨耗到平面接触型面定义为磨耗阶段1(钢轨主试样中R80弧面被磨平),平面接触型面进一步发生深度为0.039 mm的磨耗依次定义为阶段2、阶段3……型面变化如图6所示。本文的仿真中,当预测裂纹萌生时,共发生2次磨耗型面替换,即初始型面的R80弧面被磨平、平面型面又因磨耗掉0.039 mm而被替换1次。根据试验观测,轮轨接触的磨耗从点接触过渡到面接触,基本是均匀的,且在试验中试验机设定的荷载和纵向蠕滑率保持稳定。

### 3.3 裂纹萌生的确定

根据临界平面法理论<sup>[20]</sup>进行裂纹萌生预测,采用考虑应力、应变参数以及能够反映材料内部应力

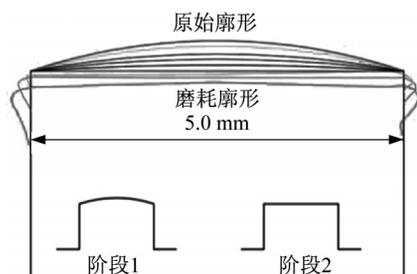


图6 主试样接触区磨损廓形与阶段划分

Fig. 6 Wear profile and phase division of contact area of specimen

在裂纹萌生中所起作用的 Jiang-Schitoglu 疲劳参量模型<sup>[21]</sup>,如式(4)所示:

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

式中:  $F_P$  为疲劳损伤参量;  $\langle \rangle$  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;  $\Delta \tau$  和  $\Delta \gamma$  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。

采用3.1节轮轮滚动接触有限元模型计算每个磨损型面阶段轮轮接触位置所有结点的应力应变状态,包括每个结点的应力分量  $\sigma_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ 、应变分量  $\epsilon_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ ; 利用坐标转换矩阵<sup>[21]</sup>计算每一个结点的最大疲劳参量  $F_{P, \max}$ <sup>[11]</sup>并得到该疲劳参量所在的平面; 得到所有结点的最大疲劳参量后, 计算该磨损型面阶段接触状态下的裂纹萌生寿命  $N_{fi}$ , 则试样旋转一周时试样的疲劳损伤量为  $1/N_{fi}$ , 在第  $i$  个磨损型面替换前该磨损型面阶段的试样旋转周次  $N_i$  与对应的疲劳损伤累积量为  $N_i/N_{fi}$ , 直至计算至任意点的疲劳损伤累积量  $\sum N_i/N_{fi}$  达到1时, 停止计算, 认为此时在该点萌生疲劳裂纹<sup>[2]</sup>。此外, 当裂纹萌生点确定后, 其对应的最大疲劳损伤参量的临界平面就可以确定, 进而可以确定裂纹萌生时启裂方向与试样滚动方向的夹角。模型中疲劳损伤分析位置如图7所示。

## 4 结果对比

### 4.1 磨损

#### (1) 轮轮试验的磨损

试验发现13个钢轨主试样分别在不同的荷载循环次数下出现表面裂纹。根据2.3节的方法, 分别在试验结束后测量主试样接触面的磨损深度, 得到钢轨主试样在不同荷载循环次数时的垂直磨损深度, 如图8所示, 可以看出, 尽管试样不同, 但是在裂

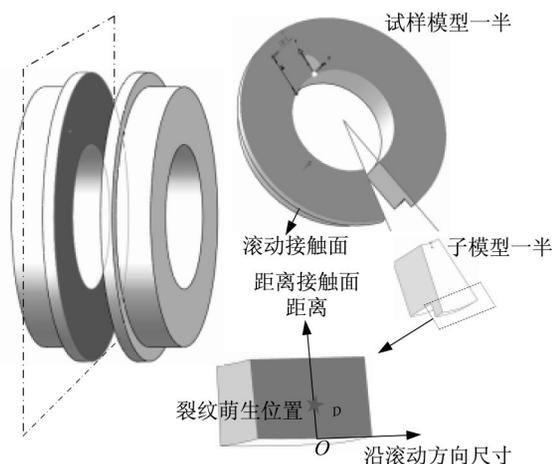


图7 疲劳损伤累积量分析平面与裂纹萌生位置

Fig. 7 Plane of fatigue damage accumulation and position of crack initiation

纹萌生时的荷载循环次数越高, 则磨损深度越大, 与图4所示试样结果相印证。

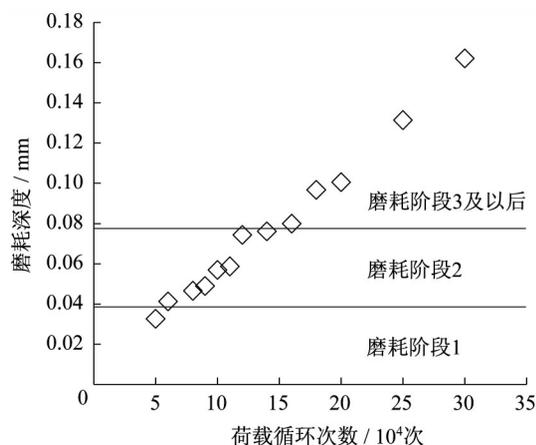


图8 试样磨损深度与荷载循环次数关系

Fig. 8 Specimen surface wear depth versus loading cycles

将图8中每个钢轨试样的磨损深度除以其对应的荷载循环次数, 可以得到不同试样在裂纹萌生时的磨损发展率。根据主试样R80弧面磨损与否以及0.039 mm的磨损阈值(预测为2次磨损阶段), 可将钢轨主试样在试验中的磨损发展分为3组。第一组有1个试样, 在裂纹萌生时磨损深度约为0.033 mm, 处于磨损阶段1, 对应的磨损发展率约为  $6.54 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ ; 第二组有7个试样, 在裂纹萌生时磨损深度在0.041 ~ 0.076 mm, 平均磨损深度0.058 mm, 处于磨损阶段2, 对应的磨损发展率在  $5.33 \sim 6.88 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ , 平均约为  $5.83 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ ; 第三组有5个试样, 在裂纹萌生时磨损深度约为0.080

~0.162 mm,平均磨耗深度0.114 mm,处于磨耗阶段3及以后阶段,对应的磨耗发展率在 $5.00 \sim 5.40 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ ,平均约为 $5.21 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ 。

#### (2) 仿真预测的磨耗

采用3.2节的磨耗预测算法得到不同磨耗阶段下试样旋转1周(加载1次),主试样接触面任意一点的磨耗深度分布情况,如图9所示。

由图9可知,磨耗阶段1时主试样旋转1周时的磨耗深度呈山峰状分布,因为主要在R80圆弧发生点接触,该处垂直磨耗深度最大,约为 $7.54 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ ,则阶段1的磨耗发展率为 $7.54 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ ;接触范围内平均磨耗发展率约为 $4.55 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ 。磨耗阶段2时主试样旋转1周时的磨耗深度成平面状分布,因为这时R80圆弧已经被磨掉,接触呈面接触,主要接触面位置的最大垂直磨耗深度为 $5.81 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ ,则阶段2的磨耗发展率 $5.81 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ 。2个阶段的平均磨耗发展率为 $5.18 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ 。通过3.2节的磨耗计算方法,得到裂纹萌生时对应的总磨耗深度为0.073 mm。可见,预测的磨耗深度、磨耗发展率均位于图8试验结果的磨耗阶段2范围内,预测裂纹萌生时的试样表面平均磨耗发展率( $5.18 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ )略低于试验中第2磨耗阶段平均磨耗发展率( $5.83 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ ),低约11.1%。

### 4.2 裂纹萌生寿命

#### (1) 轮轨试验的裂纹萌生寿命

试验中,各个钢轨主试样接触面出现疲劳裂纹所对应的荷载循环次数不同。试验结束后根据2.3节的方法得到裂纹在试样内部的长度。裂纹内部长度最大值、中位数和最小值与荷载循环次数的关系如图10所示。

从图10可知,在试验结束即裂纹萌生时,各钢轨试样内部疲劳裂纹长度最大值约为0.07~0.11 mm,中位数约为0.03~0.06 mm,最小值约为0.01~0.03 mm。从试样表面裂纹萌生寿命来看,具有较明显的随机性,裂纹萌生时对应的荷载循环次数在 $5 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4$ 范围内。其中,经历2个磨耗阶段的7个试样的裂纹萌生对应的荷载循环次数在 $6 \times 10^4 \sim 14 \times 10^4$ 范围内。

尽管2.3节裂纹尺寸来自不同试样,但是进一步采用移动平均法来拟合各试样裂纹内部长度分布,发现各试样裂纹萌生时的长度随荷载循环次数的增加,呈起伏状分布。例如,荷载循环次数小于 $11 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$ 次时,此阶段磨耗较小且增加相对缓慢(如图8磨耗阶段1和磨耗阶段2前半部的试样),裂纹萌生时的试样内部裂纹长度随荷载循环次数增加呈小幅增长趋势,即荷载循环次数在 $11 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$ 次时的试样萌生的裂纹长度达到极大值,这时裂纹明显而磨耗较小。其中试样所有裂纹的长度最大值约为0.093 mm、中位数约为0.048 mm、最小值约为0.019 mm。循环次数大于 $12 \times 10^4$ 次后的磨耗增加(图8的磨耗阶段2后半部和磨耗阶段3),则萌生的裂纹长度有所降低。当荷载循环次数在 $18 \times 10^4$ 次时,裂纹萌生时的长度再次达到极大值,但这时磨耗已经较为明显。其中试样所有裂纹的长度最大值约为0.091 mm、中位数约为0.041 mm、最小值约为0.021 mm。

#### (2) 仿真预测的裂纹萌生寿命

根据3.3节的裂纹萌生预测方法,结合试样接触位置的廓形变化以及由此形成的磨耗阶段,计算单次荷载作用下的疲劳损伤、磨耗阶段内的疲劳损伤累积量以及裂纹萌生寿命。其中试样接触表面各

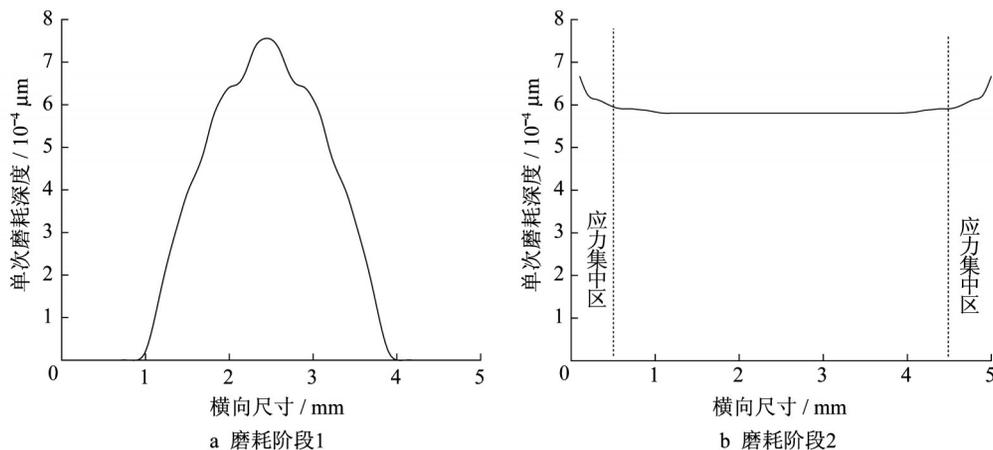


图9 不同磨耗阶段下试样旋转1周主试样接触面磨耗深度

Fig. 9 Wear depth of contact surface of specimen by one cycle in different wear phases

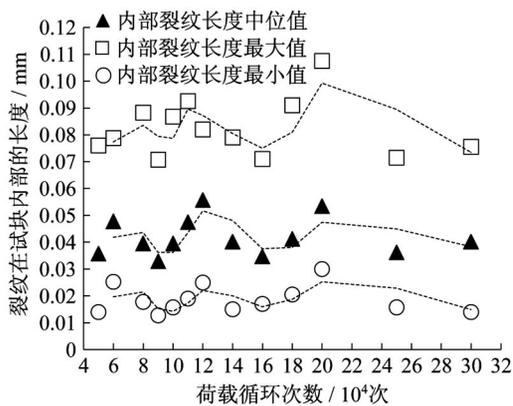


图10 主试样接触面裂纹萌生时的长度

Fig. 10 Crack length at contact surface of specimen when crack initiation

点(图7的D面)的在裂纹萌生前的疲劳损伤累积情况如图11所示。

从图11可以看出,在磨损阶段1,钢轨主试样的R80圆弧存在,接触面上的疲劳损伤积累较快,特别是发生主要接触的 $P$ 点及其附近各点。在阶段1结束时, $P$ 点的疲劳损伤积累量达到0.78,而相邻点的疲劳损伤也达到次大值0.57。到了磨损阶段2,因为R80圆弧被磨平,接触状态变得稳定,接触面各点的特别是 $P$ 点及其附近各点疲劳累积速度基本一致,但由于 $P$ 点在磨损阶段1已经积累了较大的疲劳损伤,因此综合2个磨损过程,该点首先达到疲劳损伤限值1,即裂纹在该点萌生。

这也可以通过 $P$ 点的等效塑性应变(PEEQ)和等效应力(Mises应力)看出,如图12所示, $P$ 点在磨损阶段1和2的等效塑性应变与等效应力均较大,等效塑性应变越大,则该点累积的塑性变形越大,更容易发生破坏,即越容易萌生疲劳裂纹。

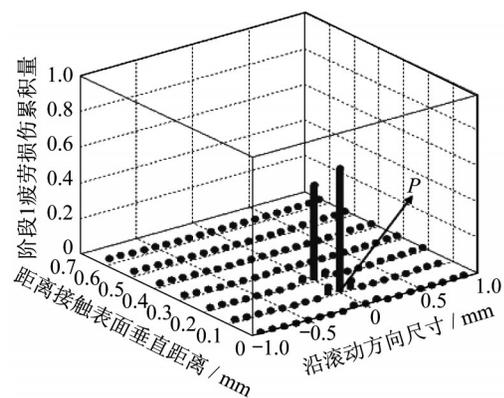
预测得到钢轨主试样( $P$ 点处)的裂纹萌生寿命、萌生位置至接触表面的距离以及与试样接触面和纵剖面的夹角见表1。

可以看出,预测的裂纹萌生寿命为 $11.1 \times 10^4$ 次,在试验结果的磨损阶段2的试样表面疲劳裂纹萌生寿命范围内,基本与试验结果中裂纹萌生时出现极大值的试样所对应的荷载作用次数接近。此外,预测的裂纹萌生寿命接近试验裂纹萌生寿命的中位数。在该荷载循环次数下,13个钢轨试样已经有7个萌生裂纹,裂纹萌生的试样数量占试样总数的约53.8%。

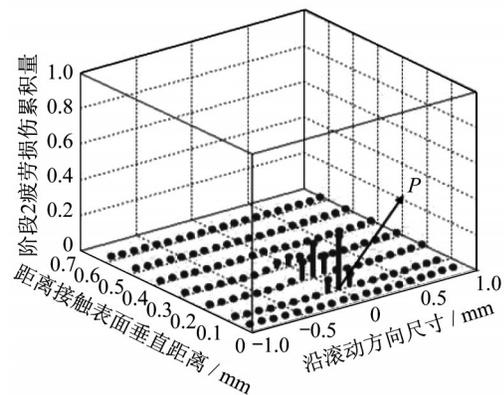
#### 4.3 裂纹启裂角度

##### (1) 轮轮试验的裂纹启裂角度

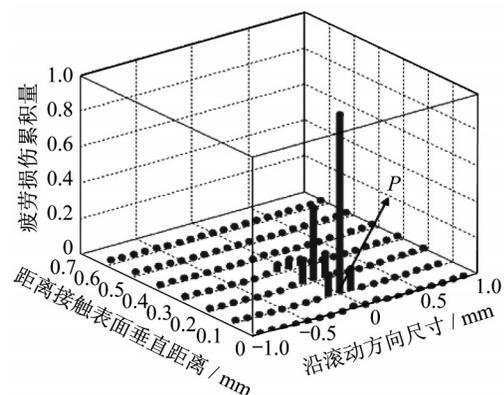
从图4可以看出,轮轮试验观测到试样表面裂纹



a 阶段1疲劳损伤积累量



b 阶段2至裂纹萌生前疲劳损伤积累量



c 疲劳裂纹萌生时疲劳损伤积累量

图11 试样表面疲劳损伤累积过程

Fig. 11 Fatigue damage accumulation at surface of specimen

开口与滚动方向的角度分布在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围,平均值约为 $45^\circ$ 。

##### (2) 仿真预测的裂纹启裂角度

如表1示,仿真预测的磨损阶段1和阶段2中裂纹开口与滚动方向的角度 $\phi$ 分别在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 和 $130^\circ \sim 140^\circ$ 范围内,平均值约为 $45^\circ$ 和 $135^\circ$ ,基本与观测的裂纹开口与滚动方向的角度一致,仿真预测得到的裂纹开口与滚动方向角度与试验结果处于试验结果范围内;裂纹萌生-磨损共存预测方法预测的裂纹启裂方向在

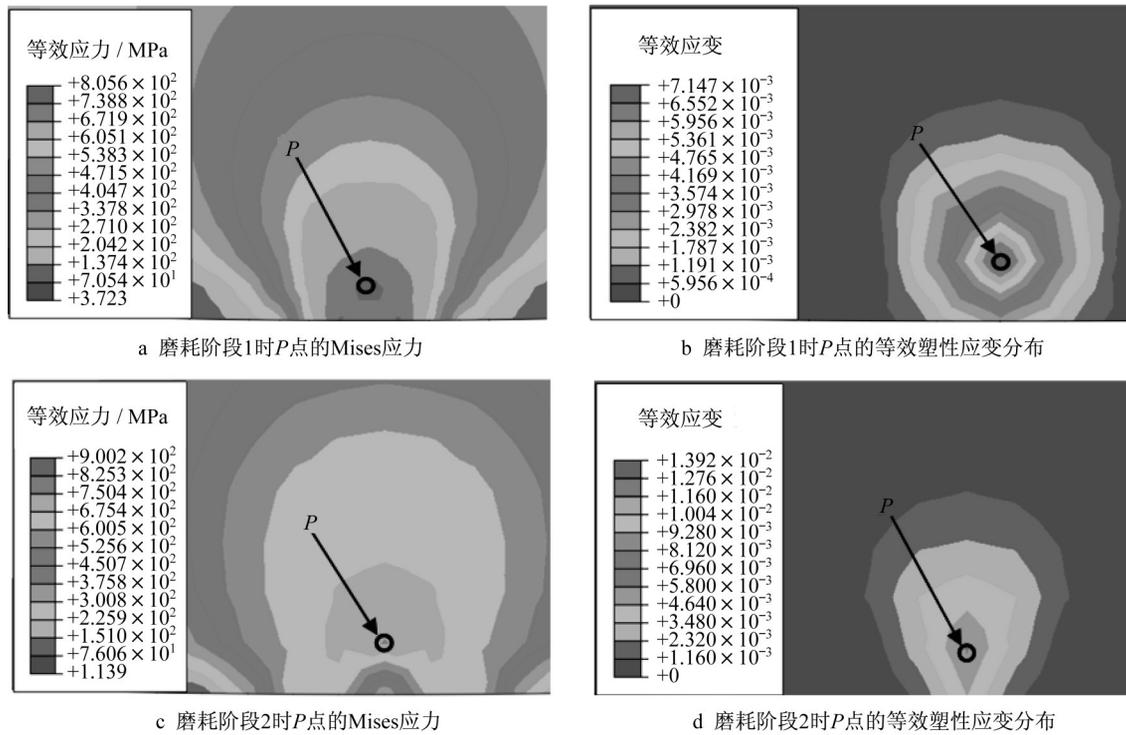


图 12 不同磨耗阶段 P 点的 Mises 应力与等效塑性应变分布

Fig. 12 Mises stress and equivalent plastic strain distribution at point P in different wear phases

表 1 不同磨耗阶段时的临界平面与单次荷载作用疲劳损伤量

Tab. 1 Critical plane and fatigue damage of single load in different wear phases

P 点至试样表面 距离/mm	启裂方向与在垂直于接触面纵剖面 内与滚动方向的夹角 $\theta/(^\circ)$	启裂方向与滚动方向的夹角 $\phi/(^\circ)$	单次荷载作用 疲劳损伤量	裂纹萌生寿命/次
0.031	5 ~ 15(阶段 1)	40 ~ 50(阶段 1)	$1.35 \times 10^{-5}$ (阶段 1)	$11.1 \times 10^4$
	0 ~ 10(阶段 2)	130 ~ 140(阶段 2)	$5.10 \times 10^{-6}$ (阶段 2)	

垂直于接触面的剖面内,与滚动方向的夹角  $\theta$  分别约为  $5^\circ \sim 15^\circ$  和  $0^\circ \sim 10^\circ$ , 平均分别约为  $5^\circ$  和  $10^\circ$  (图 13)。

### 5 结论

采用小比例轮轮滚动接触疲劳试验的方法,验证了钢轨表面疲劳裂纹萌生和磨耗共存预测方法的准确性,从磨耗、裂纹萌生寿命和裂纹启裂角度等方面进行了对比,发现钢轨裂纹萌生和磨耗共存预测方法与试验有较好的吻合度,结果较为准确。结论如下:

(1)磨耗对比:轮轮试验中,当试样萌生裂纹时,13 个试样中有 7 个试样经历了 2 个磨耗阶段,对应的磨耗深度在  $0.041 \sim 0.076$  mm,平均磨耗发展率约为  $5.83 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ ,约占试样总数的 53.8%;仿真预测试样在萌生裂纹前经历了 2 次磨耗阶段,平均磨耗发展率约为  $5.18 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{次}^{-1}$ ,对应的总磨耗深度为 0.073 mm。预测的磨耗深度、磨耗发展率均在试验结果的磨耗阶段 2 范围内,平均磨耗发展率较试验结果低约 11.1%。(2)裂纹萌生寿命对比:轮轮试验中,经历 2 个磨耗阶段的试样裂纹萌生对应的荷载循环次数在  $6 \times 10^4 \sim 14 \times 10^4$  范围内。且裂

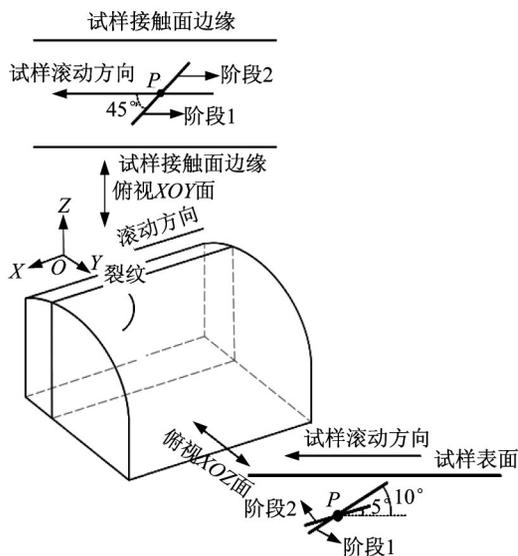


图 13 仿真预测的裂纹角度

Fig. 13 Initiation angle of crack predicted in simulation

纹在荷载循环次数小于  $11 \times 10^4$  次  $\sim 12 \times 10^4$  次时达到极大值,这时裂纹明显、磨耗较小。预测的裂纹萌生寿命为  $11.1 \times 10^4$  次,基本与试验结果中裂纹萌生时出现极大值的试样所对应的荷载作用次数接近。在该荷载循环次数下,13个钢轨试样已经有7个萌生裂纹。(3)裂纹启裂角度:轮轨试验观测到试样表面裂纹开口与滚动方向的角度分布在  $30^\circ \sim 60^\circ$  范围,平均值约为  $45^\circ$ ;仿真预测的裂纹开口与滚动方向的角度平均值约为  $45^\circ$  和  $135^\circ$ ,基本与观测到的裂纹开口与滚动方向的角度一致。

### 作者贡献申明:

周宇:研究思路和方法的提出,研究结果分析,结论的总结;  
王钰:小比例轮轨滚动接触疲劳试验的设计,开展和数据的采集;

卢哲超:有限元仿真建模,接触应力计算和分析,预测磨耗;  
梁旭:提供参数,分析对比试验数据与仿真结果;  
李骏鹏:有限元仿真建模,预测裂纹萌生。

### 参考文献:

- [1] 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 the coexistence of crack initiation and wear of rail considering the geometric irregularities of the track[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 1600.
- [2] 吴强.城市轨道交通钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生预测[J].上海工程技术大学学报,2017,31(4):295.  
WU Qiang. Prediction of rolling contact fatigue crack initiation of rail transit in urban rail transit[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2017, 31(4): 295.
- [3] 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(1/2): 68.
- [4] 王文健.轮轨滚动接触疲劳与磨损耦合关系及预防措施研究[D].成都:西南交通大学,2008.  
WANG Wenjian. Study on coupling relationship between wheel-rail rolling contact fatigue and wear and preventive measures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [5] 王文健,郭俊,刘启跃,等.磨损对钢轨滚动接触疲劳损伤的影响.机械工程材料[J],2010(1):17.  
WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue, *et al.* Effect of wear on rolling contact fatigue damage of rail [J]. Mechanical Engineering Materials, 2010(1): 17.
- [6] BOLTON P J, CLAYTON P. Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels[J]. Wear, 1984, 93(2): 145.
- [7] TYFOUR W R, BEYNON J H, KAPOOR A. The steady state wear behaviour of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions[J]. Wear, 1995, 180(1/2): 79.
- [8] 张伟.钢轨滚动接触疲劳实验研究[D].成都:西南交通大学,2005.  
ZHANG Wei. Experimental study of rail rolling contact fatigue [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [9] 张波,刘启跃.轮轨磨损的实验研究[J].机械,2001,28(4):20.  
ZHANG Bo, LIU Qiyue. Experimental study of wheel-rail wear [J]. Machinery, 2001, 28(4): 20.
- [10] 王文健,郭俊,刘启跃.轮轨磨损与滚动疲劳裂纹损伤关系及预防研究[J].中国表面工程,2010,23(3):106.  
WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue. Study on the relationship between wheel-rail wear and rolling fatigue crack damage and its prevention[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(3): 106.
- [11] ZHOU Yu, HAN Yanbin, MU Dongsheng, *et al.* Prediction of the coexistence of rail head check initiation and wear growth[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 112: 289.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部.金属材料滚动接触疲劳试验方法:YB/T 5345—2014[S].北京:冶金工业出版社,2014.  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Rolling contact fatigue test method for metal materials: YB/T 5345—2014[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
- [13] ZHAO Xin, WANG Zhe, WEN Zefeng, *et al.* The initiation of local rolling contact fatigue on railway wheels: An experimental study[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105354.
- [14] KALKER J J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact [M]. Dordrecht: Springer, 1990.
- [15] CLAUDE B, ANDRE P. 材料与结构的疲劳[M].吴圣川,李源,王清远译.北京:国防工业出版社,2016.  
CLAUDE B, ANDRE P. Fatigue of materials and structures [M]. Translated by WU Shengchuan, LI Yuan, WANG Qingyuan. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [16] 李飞.随机因素作用下钢轨接触疲劳裂纹萌生寿命研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2019.  
LI Fei. Research on rail contact fatigue crack initiation life under random factors[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2019.
- [17] NEJAD R, FRAHANGDOOST K, SHARIATI M. Three-dimensional simulation of rolling contact fatigue crack growth in UIC60 rails[J]. Tribology Transactions, 2016(4): 1059.
- [18] ARCHARD F J. Wear theory and mechanisms[Z]. New York: ASME, 1980.
- [19] 邝迪峰.钢轨裂纹萌生预测中的磨耗问题研究[D].上海:同济大学,2017.  
KUANG Difeng. Study on abrasion in prediction of rail crack initiation[D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [20] JIANG Y, SEHITOGLU H. A model for rolling contact failure [J]. Wear, 1999, 224(1): 38.
- [21] 尚德广,王德俊.多轴疲劳强度[M].北京:科学出版社,2007.  
SHANG Deguang, WANG Dejun. Multiaxial fatigue strength [M]. Beijing: Science Press, 2007.