

# 基于近场动力学的裂纹扩展及轨面剥离掉块成因机理

程中宁<sup>1,2</sup>, 周宇<sup>1,2</sup>, 李骏鹏<sup>1,2</sup>, 黄旭炜<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. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235)

**摘要:** 建立了态基近场动力学钢轨表面滚动接触疲劳裂纹扩展模型, 研究钢轨疲劳裂纹的扩展以及由此引起的轨面剥离掉块形成过程。结果表明, 轨面单裂纹或裂纹间距 $>1.5$  mm 情况下, 随着通过总重的累积, 裂纹扩展的路径逐渐转向钢轨内部, 且扩展速率随着通过总重累积和裂纹长度的增加逐渐降低; 轨面多裂纹情况下, 通过总重增量低于 8.8 Mt 时, 裂纹在荷载作用下主要发生沿长度方向扩展。通过总重增量超过 8.8 Mt 后, 裂纹之间的次生损伤形成; 而且, 这种情况在轨面多条裂纹间距 $\leq 1.5$  mm 时较为显著, 裂纹间距 $>1.5$  mm 时, 裂纹间的相互影响减小; 轨面多条裂纹同时存在且裂纹间距 $\leq 1.5$  mm 时, 通过总重增量达到一定程度( $>10.0$  Mt), 裂纹间的次生损伤形成剥离掉块, 剥离掉块深度约为裂纹深度的 $1/2$ 以上。

**关键词:** 铁路; 钢轨; 剥离掉块; 裂纹扩展; 近场动力学

**中图分类号:** U213.4+2

**文献标志码:** A

## Crack Propagation and Rail Surface Spalling Mechanism Based on Peridynamics

CHENG Zhongning<sup>1,2</sup>, ZHOU Yu<sup>1,2</sup>, LI Junpeng<sup>1,2</sup>, HUANG Xuwei<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 Transit Structure Endurance and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235)

**Abstract:** Rail surface rolling contact fatigue (RCF) crack propagation model based on state peridynamics was

established to research the propagation of RCF crack and the formation process of spalling. It was found that the crack propagation path gradually turned towards into the internal rail with the accumulation of traffic tonnage in the case of single crack or cracks with distance longer than 1.5 mm between each other. The propagation rate gradually decreases with the increase of traffic tonnage and crack length. In the case of multiple cracks, the cracks propagated along their length direction below traffic tonnage of about 8.8 Mt. After the traffic exceeded 8.8 Mt, the secondary damage between cracks was formed especially between the cracks which their distance was less than 1.5 mm. If the distance between cracks was longer than 1.5 mm, the interaction among cracks was reduced. In the case of multiple cracks with adjacent distance less than 1.5 mm, the spalling occurred from the secondary damage when the increment of traffic tonnage reached a certain amount ( $>10.0$  Mt). At that time, the spalling depth was about over  $1/2$  depth of the crack.

**Key words:** railway; rail; spalling; crack propagation; peridynamics

钢轨表面材料在车轮荷载的反复作用下, 容易产生滚动接触疲劳, 形成疲劳裂纹<sup>[1]</sup>, 并进一步引发剥离掉块<sup>[2]</sup>。这类剥离掉块影响超声波探伤, 引起轮轨振动和噪声, 严重时会导致断轨的风险。

既有钢轨疲劳裂纹扩展与剥离掉块的研究<sup>[1, 3]</sup>大多基于断裂力学 Paris 理论和有限元方法。裂纹和钢轨模型受有限元网格划分影响大, 且仅能考虑裂纹尖端处的参数, 由此推算一定荷载次数下的扩

收稿日期: 2022-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(51878661); 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)

第一作者: 程中宁(1997—), 男, 博士生, 主要研究方向为轨道结构, 钢轨伤损。E-mail: johnsonjkl@tongji.edu.cn

通信作者: 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



论文  
拓展  
介绍

展速率和角度,其本质是一个静态计算过程。研究认为动态解和静态解有较大差异<sup>[4]</sup>。此外,有限元方法也较难以处理多裂纹之间互相交叉连通的问题<sup>[5]</sup>。在裂纹动态扩展研究中,近场动力学理论<sup>[6]</sup>将物质离散成物质点,通过物质点之间的“键”将模型无网格化;利用积分项代替连续介质力学本构方程中的微分项,计算中对每一根键的损伤程度的更新,符合裂纹的动态变化过程。该理论已经在多晶体断裂<sup>[7]</sup>、结构稳定性和破坏分析<sup>[8]</sup>、路径扩展<sup>[9]</sup>等领域得到应用,且键基(bond)近场动力学方法已经用于钢轨疲劳裂纹萌生中<sup>[10]</sup>,但钢轨材料在荷载作用下发生材料断裂、形成裂纹并扩展和交互,还需要考虑材料点之间的相互影响和作用,引入“态”(state)基近场动力学方法。

本文根据态基近场动力学理论,建立钢轨表面多裂纹疲劳扩展模型,分析钢轨表面疲劳裂纹的动态扩展和剥离掉块的形成,研究不同裂纹间距、裂纹数量在扩展中引起钢轨表面剥离掉块形成过程,为研究钢轨表面疲劳裂纹扩展机理和剥离掉块形成原因提供参考。

## 1 基于近场动力学的钢轨滚动接触疲劳裂纹扩展

### 1.1 态基近场动力学方法

近场动力学将连续物体离散为物质点 $x_i$ ,每个物质点 $x_i$ 包含了位置坐标( $P_x, P_y, P_z$ )、密度 $\rho$ 、体积 $V$ 等信息。物质点 $x_i$ 与其周围一定范围 $H_{x_i}$ 内的其他任意一物质点 $x_j$ 相互之间存在作用。这样的范围 $H_{x_i}$ 称作近场作用域(peridynamic horizon)。

上述物质点之间的互相作用,通过“键”(bond)来表达,当键满足一定准则断裂后,即可判定键发生断裂,而穿过这些断裂键所在的位置即是裂纹,如图1所示。一般以 $\varphi(x_i)$ 表征物质点 $x_i$ 处发生损伤的程度,即一个物质点 $x_i$ 的断裂键数量占其近场作用域内总的键数量的比,公式如下:

$$\varphi(x_i) = 1 - \frac{\int_H \mu dV_{x_i}}{\int_H dV_{x_j}} \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为一个具有时间历程的标量函数; $V$ 为体积; $H$ 为作用范围(本文域的取值主要参考Ramulu等<sup>[11]</sup>提出的特征距离 $r_0$ ,在允许伤损区定义域大小为0.15 mm,在非裂纹扩展区域不存在尺度效应<sup>[12]</sup>,大

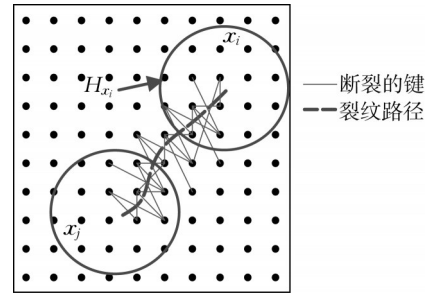


图1 近场动力学的物质点、作用域与键的断裂

Fig. 1 Material point, horizon and bond breakage in peridynamics

小为1.5 mm)。

考虑到钢轨材料在出现裂纹及其扩展过程中,材料点间的作用力大小不一定相等、方向也不一定一致,进一步引入态基动力学<sup>[6]</sup>的“态”(state)来表示此种情况,其中“态”包含了材料点相互作用信息的无限维数组。这样,任意向量 $\xi \in H$ 在态 $\underline{A}$ 的运算下的映射是一个 $m$ 阶张量,记为 $\underline{A}\langle\xi\rangle$ ,可表示为函数

$$\underline{A}\langle\xi\rangle = H \rightarrow L_m \quad (2)$$

式中: $L_m$ 为所有 $m$ 阶张量的集合,其余参数含义同式(1)。

态基近场动力学中键之间的关系分变形态和力态,态基近场动力学的物质点运动方程为

$$\rho(x_i)\ddot{u}(x_i, t) = \int_H f(x_j, x_i, t) dV_{x_j} + b(x_i, t) \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为物质点的密度; $\ddot{u}$ 为加速度矢量; $f$ 为点对互相作用的力密度; $x_j$ 为物质点 $x_i$ 的近场作用域内其他物质点; $x_i$ 为物质点的位置矢量; $b$ 为物质点 $x_i$ 受到的体力密度。

可见,式(3)中将时间、物质点及其之间的关系考虑进来,可以描述物质点相互之间的动态关系,其中力密度函数的具体形式如下:

$$f(x_j, x_i, t) = t(x_j, x_i, t) - t(x_i, x_j, t) \quad (4)$$

$$t(x_j, x_i, t) = \underline{T}[x_i, t]\langle x_j - x_i \rangle \quad (5)$$

$$t(x_i, x_j, t) = \underline{T}[x_j, t]\langle x_i - x_j \rangle \quad (6)$$

式中: $\underline{T}$ 为力态; $\langle \rangle$ 中为力态的映射对象,表示两物质点之间的位置矢量,也就是联系两个物质点的键 $\xi$ ,又可以记作 $\underline{T}\langle\xi\rangle$ ,即力态 $\underline{T}$ 是键 $\xi$ 和时间 $t$ 的函数。因此, $\underline{T}$ 完整表达写作 $\underline{T}[x, t]\langle x' - x \rangle$ 。

### 1.2 基于近场动力学的疲劳裂纹扩展方法

采用各向同性线弹性材料疲劳断裂准则<sup>[13]</sup>来推断近场动力学模型中键的断裂。假定一个物体受到循环外载作用,而每个键 $\xi$ 都有剩余寿命 $\lambda$ ,初始值

设定为 1, 并且随着循环荷载加载周期  $N$  增加而减少。

$$\frac{d\lambda}{dN}(N) = -A\epsilon^m \quad (7)$$

$$\lambda(0) = 1$$

式中:  $A$  与  $m$  为疲劳损伤待定参数;  $\epsilon = |s^+ - s^-|$  为键的“循环应变”, 其中  $s^+$ 、 $s^-$  分别为在一次载荷循环中某个键的伸长率的最大值和最小值。

假设在有限次循环周期中, 裂纹每一周期恒定向前扩展  $da/dN$  长度,  $a$  表示裂纹深度,  $N$  表示应力循环次数。裂纹尖端位置表达式如下:

$$z = x - \frac{da}{dN}N \quad (8)$$

式中:  $x$  为沿裂尖轴线方向的空间坐标;  $z$  为裂纹尖端的空间坐标, 当  $z=0$  时表示键即将断裂。

记该键的循环应变  $\bar{\epsilon}(0) = \epsilon_{core}$ , 则推导出裂纹扩展速率同裂纹尖端即将断裂的键循环应变之间的关系式为

$$\frac{da}{dN} = C\epsilon_{core}^m \quad (9)$$

式中:  $C$  为材料常数。

根据线弹性断裂力学, 可知  $\epsilon_{core}$  与应力强度因子范围  $\Delta K$  成正比。同时, 式(9)与描述疲劳裂纹扩展速度变化规律的 Paris 公式<sup>[14]</sup>相似。因此可直接利用 Paris 公式获取参数  $C$ 、 $m$ 。为获得参数  $A$  必须进行一次疲劳试算, 然后再根据试算得到的疲劳损伤发展数据进行校准。首先设定任意  $A$  值, 记作  $A'$ , 施加循环荷载, 得到该模型中的裂纹扩展速率  $(da/dN)'$ , 据此进行材料实际疲劳参数  $A$  的计算。

$$A = A' \frac{da/dN}{(da/dN)'} \quad (10)$$

根据近场动力学理论, 参数  $A$  同近场作用域大小  $\delta$  的值相关。因此, 一般转换为独立于作用域的参数  $\hat{A}$ , 再根据模型情况进行放缩。

$$A(\delta) = \hat{A}\delta^{\frac{m-2}{2}} \quad (11)$$

根据上述理论和方法, 建立如下材料疲劳损伤计算方法:

- (1) 根据轮轨接触状态, 采用式(3)计算钢轨受轮轨接触影响的每个物质点位移。
- (2) 选取任一物质点, 确定式(7)中的循环应变。
- (3) 更新式(7)中键的剩余寿命。
- (4) 若剩余寿命小于等于 0, 则认为键断开。
- (5) 遍历该物质点所连接的键, 并更新式(1)的损伤度。
- (6) 遍历所有物质点, 循环(2)~(5)步骤。
- (7) 直到循环荷载达到上限值。

以上步骤采用 Peridigm 计算平台进行二次开发, 编写疲劳损伤键断裂和裂纹扩展算法。

### 1.3 疲劳裂纹扩展建模

#### 1.3.1 二维模型

首先, 根据裂纹在钢轨上的空间位置<sup>[15]</sup>, 以过裂纹在轨面上开口的中心点、沿钢轨纵向的铅垂面为纵剖面, 建立含裂纹的钢轨二维模型, 如图 2 所示。其中, 二维平面模型尺寸为长 40 mm × 高 10 mm × 厚 0.1 mm。整个平面从上至下划分为 4 个部分: 荷载施加区、允许损伤区、常规(材料)区和固定边界区。以二维平面模型的左下角为坐标原点。裂纹按其扩展时与轨面的夹角设置在荷载施加区和允许损伤区。

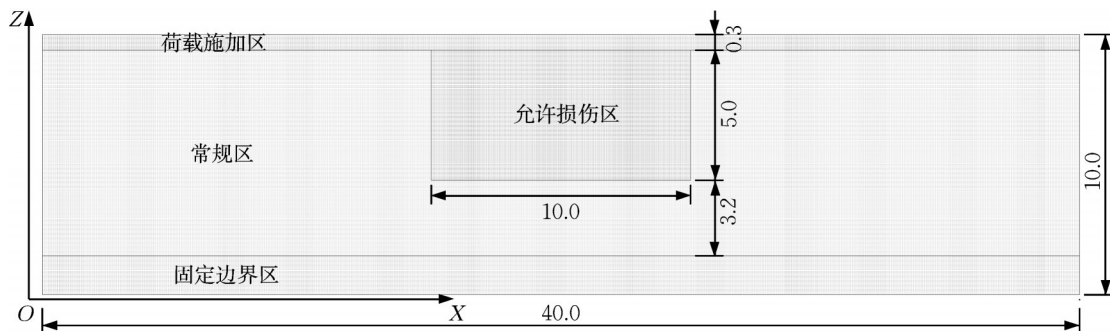


图 2 钢轨二维平面模型与区域划分

Fig. 2 Rail model and area division in 2 dimensional

根据图 2 的二维平面模型区域划分, 做如下设定:

- (1) 对固定边界区内的物质点施加位移约束。
- (2) 对荷载施加区的物质点施加移动轮轨接触



荷载。

(3)允许损伤区物质点之间键的损伤和断裂。

(4)设定组成裂纹的两平面物质点间存在法向接触作用,引入“罚函数”思想,即两裂纹面之间存在有限的穿透量和较大的接触刚度,从而约束裂纹面两侧物质点之间的法向渗透,使得两者渗透较小,且整体刚度矩阵不出现病态,保证计算结果收敛。

(5)采用库伦摩擦模型<sup>[16]</sup>描述裂纹面的切向接触属性,以摩擦系数及裂纹面受轮轨接触荷载作用下的法向压力表示裂纹面两侧物质点之间的切向摩擦力。

### 1.3.2 裂纹数量

裂纹扩展研究发现<sup>[17]</sup>,钢轨表面疲劳裂纹常以多裂纹形态出现,本文为做对比,设定钢轨中存在单裂纹和三裂纹工况。每种工况再根据裂纹间距和裂纹长度进行分类,其中裂纹间距分别为1.0、1.5以及2.0 mm,裂纹初始长度为1.5和2.0 mm。

### 1.3.3 施加荷载

采用车辆-轨道动力学模型计算车轮在轨面上运行时产生的轮轨接触位置和面积、接触斑黏着-滑动区分布、接触法向应力和切向应力分布等。根据接触斑中心与轨面裂纹的位置关系在裂纹开口后方施加接触斑法向和切向应力,并使上述接触应力沿钢轨纵向通过裂纹开口。

### 1.3.4 裂纹的不同位置

对真实裂纹进行观测发现<sup>[15, 18]</sup>,裂纹尖端各点受到的轮轨接触作用不同,因而其扩展情况也相应不同。为了评价裂纹不同尖端位置的扩展情况,使用尖端为半椭圆或样条曲线的平面来模拟裂纹<sup>[19]</sup>,如图3所示。裂纹开口位于轨面,裂纹向钢轨内部扩展方向与车轮运行方向一致,且裂纹与轨面纵向水平线呈一定角度。这里将裂纹开口长度为1.5 mm、开口与车轮运行方向呈90°、裂纹向钢轨内部扩展角度为30°且具有一定长度和间距的平面状裂纹加入到钢轨三维模型中。再对裂纹沿车轮运行方向纵剖,形成不同裂纹位置的二维断面,分别按1.3节的方法建立含裂纹的二维模型。同时,每个二维模型上对应的轮轨接触应力为该铅垂面所切位置的轮轨接触应力。

### 1.4 参数确定

通过车辆-轨道动力学模型计算轮轨接触荷载。其中,线路为半径500 m曲线;车辆为重载货运C70型敞车,轴重23 t,ZK6转向架,列车速度60 km·h<sup>-1</sup>,LM磨耗型车轮踏面;钢轨为75 kg·m标准型面

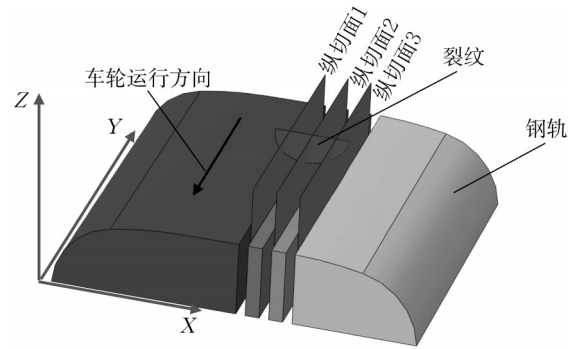


图3 裂纹扩展三维模型

Fig. 3 3-dimensional model for crack propagation

U75V热处理钢轨,1:40轨底坡,轮轨摩擦系数0.3。接触斑相应参数如表1所示。

表1 接触斑参数

Tab. 1 Contact patch parameters

轮轨接触状态参数	数值
纵向蠕滑率	$6.8 \times 10^{-4}$
横向蠕滑率	$3.9 \times 10^{-4}$
自旋蠕滑率	0.19
纵向蠕滑力(分布力)/MPa	87.5
横向蠕滑力(分布力)/MPa	-171.1
法相接触力(分布力)/MPa	1 853.43
接触斑长半轴长/mm	8.3
接触斑短半轴长/mm	3.4
接触斑中心到轨顶中心的距离/mm	6.5

根据轮轨接触荷载,并参考文献[20-21]的疲劳试验结果,确定的U75V钢轨的Paris公式为

$$\frac{da}{dN} = 2.16567 \times 10^{-4} + 4.234 \times 10^{-15} (\Delta K - 650)^{3.656} \quad (12)$$

$$\Delta K \geq 650 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

根据式(12),确定参数 $m_2=3.656$ 。参数 $A_2$ (式中下标1代表萌生阶段,2代表扩展阶段,)不能从Paris曲线数据直接获得,需要进行一次疲劳试算然后再根据数据校准。该试算根据规范<sup>[22]</sup>和文献<sup>[23]</sup>用单边缺口疲劳试样近场动力学模型来进行。试样长50 mm、宽8 mm、厚3 mm,模型左侧预设单条长5 mm的裂纹缺口,物质点尺寸为0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm,上下面物质点层施加均布循环拉荷载 $\sigma_{\max}=50 \text{ MPa}$ ,应力循环比 $R=0.1$ ,疲劳损伤试算参数取 $A_2'=100\ 000$ , $m_2=3.656$ 。计算发现,在荷载循环次数405 017次后,数值求解不再收敛。计算上述模型中疲劳裂纹扩展速率与裂尖应力强度因子,并进行数据拟合,如图4所示。

根据图4中的裂纹扩展速率数据与拟合结果,

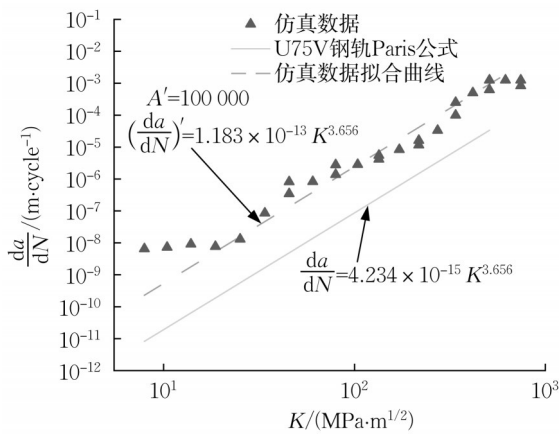


图 4 试算模型疲劳裂纹扩展速率与 U75V 材料 Paris 曲线  
Fig. 4 Fatigue crack propagation rate in test model with U75V rail material Paris curve

结合 1.2 节中的式(9), 计算 U75V 钢轨材质对应的独立于物质点尺寸的疲劳损伤参数  $\hat{A}$  为 2 558. 224,  $m$  为 3. 656。

1.5 模型验证

根据 1.1~1.4 节方法, 建立如图 2 所示的基于近场动力学的钢轨位移模型, 同时建立相同尺寸的

有限元模型, 材料采用 U75V 钢轨线弹性模型, 在上表面中心施加最大接触压力 1 800 MPa, 接触斑长半轴 8 mm 的标准 Hertz 理论法向应力, 纵向切应力设置为垂向应力数值大小的 0.3 倍, 模型底部施加固定边界条件, 分别计算在相同车辆荷载和轨道条件下两模型的位移结果, 如表 2 所示。

从图 5 和表 2 的结果对比来看, 近场动力学模型与有限元模型计算结果之间具有较好的一致性。两模型在 X 方向(钢轨纵向)的位移相差 8. 49%~11. 75%, 在 Y 方向(钢轨横向)的位移相差 3. 17%~3. 79%。

2 预测结果与分析

2.1 单条裂纹的动态扩展

以向钢轨内部扩展角度为 30° 的裂纹为例, 不同车轮荷载通过次数下的钢轨接触疲劳裂纹扩展过程如图 6 所示。每一计算工况都如 1.3 节中所述包括 3 个钢轨二维切面, 切面坐标以左下角为原点。每一切面上设有初始裂纹, 右侧条带表示物质点损伤度。

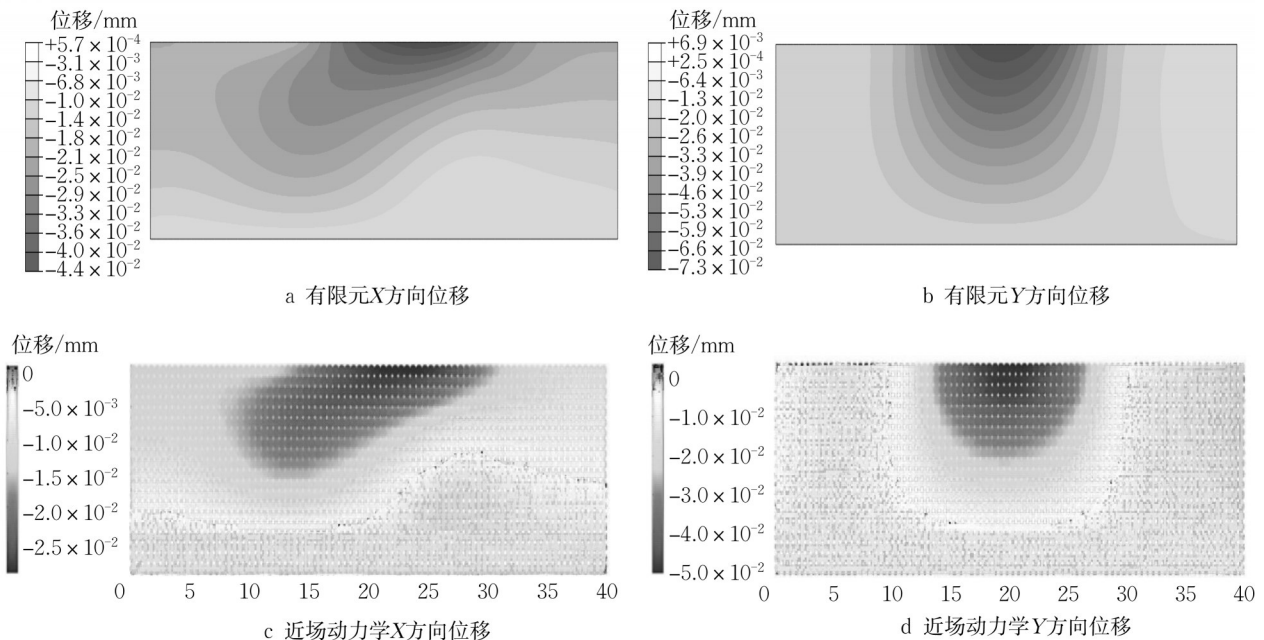


图 5 位移云图对比

Fig. 5 Comparison of displacement

表 2 有限元与近场动力学计算的最大、最小位移结果

Tab. 2 Maximum and minimum displacement by the finite element and peridynamics models

最值	X 方向位移/mm			Y 方向位移/mm		
	有限元	近场动力学	相差/%	有限元	近场动力学	相差/%
最大	$5.70 \times 10^{-4}$	$5.03 \times 10^{-4}$	-11.75	$6.86 \times 10^{-3}$	$6.60 \times 10^{-3}$	-3.79
最小	$-4.36 \times 10^{-2}$	$-3.99 \times 10^{-2}$	-8.49	$-7.25 \times 10^{-2}$	$-7.02 \times 10^{-2}$	-3.17



行车方向为从左至右。此外,本文的分析是基于已经有一定长度的预设裂纹,即已经有一定的通过总重,因此,下文所述通过总重均是指在该通过总重下继续积累形成的增量。一般认为当损伤程度 $> 0.385$ ,则物质点之间存在裂纹,为了使结果更加明确,文中的色图中已经将数据经过前处理,将损伤程

度低于 $0.385$ 的部分转化为与损伤程度为 $0$ 相同的颜色。下图相同。

根据图3的3个切面,确定预设裂纹被切面1、3所切得长度为 $1.5\text{ mm}$ ;被切面2所切得长度为 $2.0\text{ mm}$ ,初始裂纹如图6a所示。

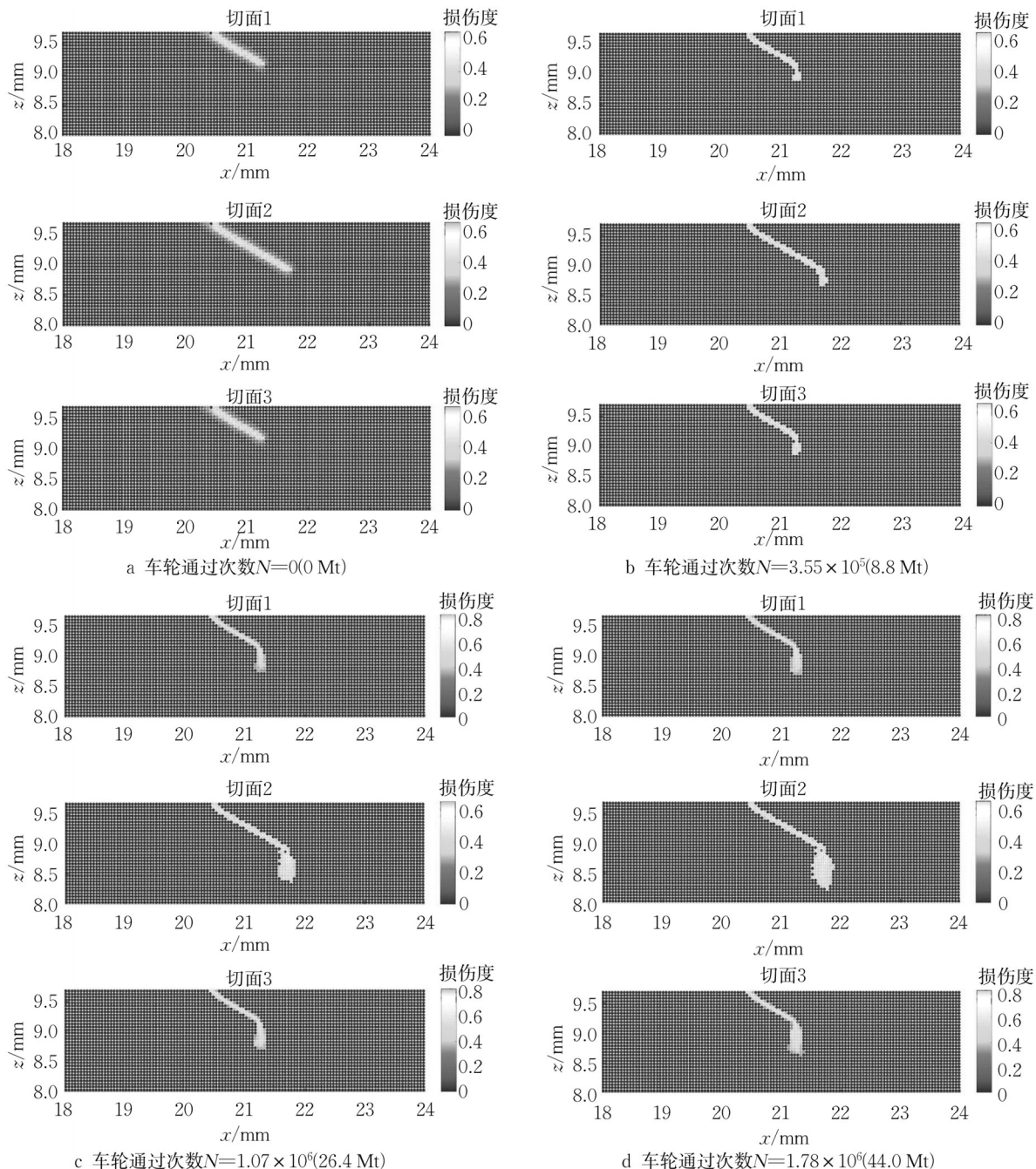


图6 单裂纹扩展情况

Fig. 6 Single crack propagation

从图6b可以看出,当通过总重增量达到约 $8.8\text{ Mt}$ 时(车轮通过次数约 $N=3.55 \times 10^5$ 次),疲劳裂纹尖端出现向钢轨内部扩展的现象。图6c反映的是通

过总重增量约 $26.4\text{ Mt}$ 时裂纹进一步向钢轨内部扩展,且路径转向与轨面垂直近 $90^\circ$ 方向,也即在通过总重增量 $8.8\sim 26.4\text{ Mt}$ 时,裂纹扩展的路径开始发

生变化。当通过总重增量达到约 44.0 Mt 时(图 6d),裂纹扩展路径进一步朝向钢轨内部并有轻微转向与车轮滚动方向相反方向趋势(图 6d 切面 2)。进一步,将图 6 所示的裂纹尖端 3 处位置的扩展情况结合,得到裂纹尖端三维形态示意图,如图 7 所示。

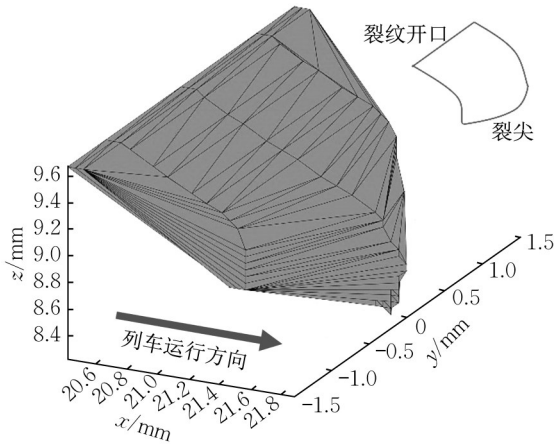


图 7 裂纹三维扩展及路径变化示意  
Fig. 7 3D crack propagation and its route change

尽管图 7 描述的裂纹尖端点只有 3 处,但综合图 6、图 7 仍然可以看出,单条裂纹情况下,随着通过总重的累积,浅角度裂纹扩展会发生路径变化,转向钢轨内部;由于裂纹尖端各个点受到的接触斑荷载条件不同,尖端各点的发展速率不同,从三维形态来看,裂纹扩展呈现“凸”的形态。

3 个切面上疲劳裂纹长度随着通过总重增加的变化,以及裂纹扩展速率分别如图 8、图 9 所示。

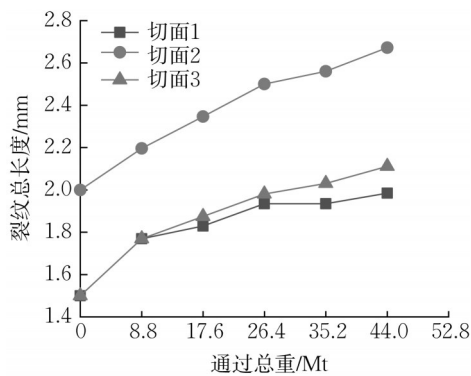


图 8 疲劳裂纹长度变化  
Fig. 8 Variation in fatigue crack length

从图 8 可以看出,裂纹长度随通过总重累积而逐渐增加,且切面 2(裂纹尖端的中点)的裂纹长度在各通过总重时期均大于切面 1、3(裂纹尖端中点两侧的点),这与尖端中点上方的轨面承受接触斑中心的荷载有关,即接触荷载大,裂纹的长度长,裂纹沿其

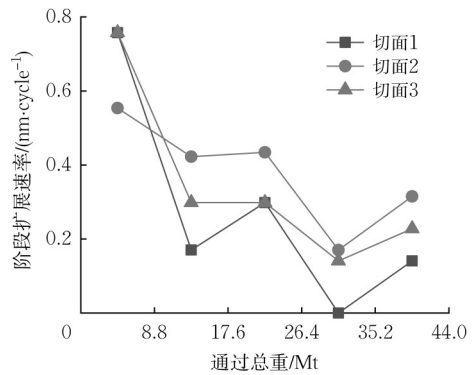


图 9 裂纹各切面的阶段扩展速率  
Fig. 9 Propagation rate at each section of the crack during different wear phases

尖端呈现“凸”形发展(同图 6、图 7),这与文献[24]所测情况吻合。

从图 9 可以看出,裂纹扩展速率随着通过总重累积和裂纹长度的增加呈降低趋势,最大扩展速率约 0.7 nm·cycle<sup>-1</sup>;在通过总重在 26.4~35.2 Mt 阶段时,扩展速率降低到约 0.2 nm·cycle<sup>-1</sup>,并呈上下波动趋势,说明随着裂纹增长,接触斑荷载对裂纹扩展的作用降低,扩展减缓。

在本节预测的通过总重增量情况下,裂纹平均扩展速率约 0.33 nm·cycle<sup>-1</sup>,扩展了约 0.5~0.7 mm,转向角度为 79°~110°。

### 2.2 多裂纹的动态扩展

实际情况下,钢轨表面同时会存在多条裂纹,且研究认为多条裂纹在扩展中相互影响<sup>[17]</sup>。因此,在模型中考虑多条裂纹的情况,裂纹截取的切面方法同 1.3 节。裂纹间距分别为 1.0、1.5 和 2.0 mm,裂纹数量为 3 条。裂纹扩展情况如图 10~11 所示。

从图 10~11 可以看出,随着通过总重的累积,裂纹沿其长度方向逐渐向钢轨内部扩展,同时轨面纵向的相邻裂纹之间发生损伤,特别是裂纹间距小于 1.5 mm 时(多发于硬质钢轨)。在通过总重增量为 4.5 Mt 时,各裂纹相互之间的影响不明显,但对于间距小的裂纹,裂纹间已经出现损伤迹象(图 10a),特别是裂纹尖端中部位置(图 10a 切面 2);通过总重增量为 13.2 Mt,裂纹间距为 1.0~1.5 mm 时,裂纹在尖端尚未出现明显的路径转向时,就已经发生裂纹间的损伤,形成裂纹之间的次生裂纹(图 11a、11b),这种次生裂纹与水平面的夹角约 45°~73°,将会引起剥离掉块。即多裂纹情况下,裂纹间距小于 1.5 mm,通过总重累积使得裂纹间的材料先发生破坏。而裂纹间距为 2.0 mm 时,裂纹间的材料



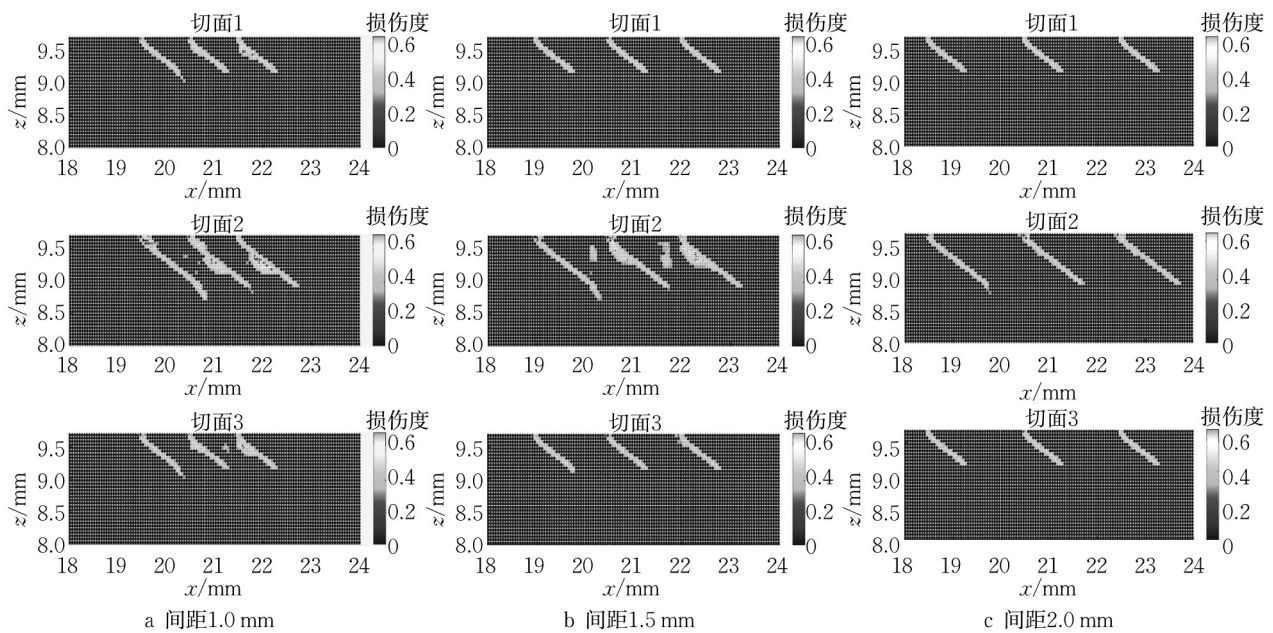


图 10 车轮通过次数  $N=1.77 \times 10^5$  (4.5 Mt)

Fig. 10 Wheel cycles  $N=1.77 \times 10^5$  (4.5 Mt)

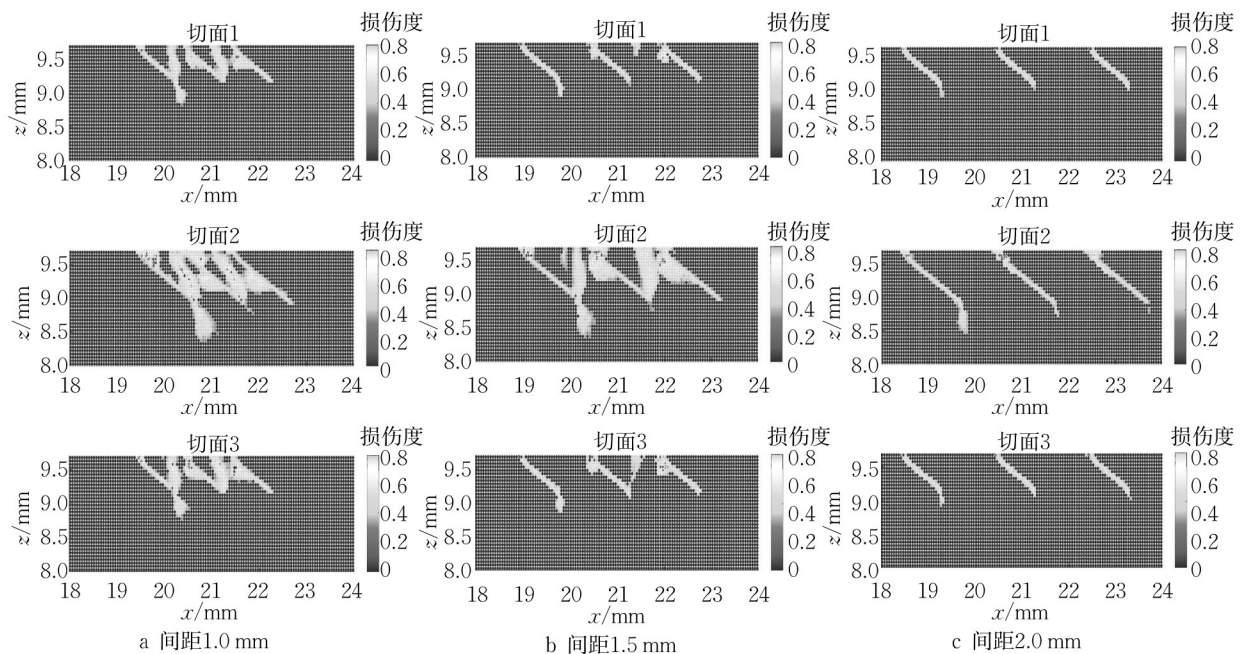


图 11 车轮通过次数  $N=5.32 \times 10^5$  (13.2 Mt)

Fig. 11 Wheel cycles  $N=5.32 \times 10^5$  (13.2 Mt)

损伤不明显,而裂纹仍然随着通过总重累积向钢轨内部扩展,并在裂纹尖端中点发生路径转变(图 11c 切面 2)。

可以看出,轨面存在多裂纹情况是实际钢轨使用中出现疲劳裂纹的基本特征,而裂纹间距与钢轨材质有关。随着通过总重的累积,裂纹在荷载作用下扩展,是持续向内部扩展还是出现剥离掉块,则受到裂纹间距(钢轨材质)的影响。

### 2.3 结果验证

#### 2.3.1 现场取样观测数据

图 11a 切面 2 放大后如图 12a 所示,当钢轨轨面存在多裂纹,且裂纹间距  $\leq 1.5$  mm 时,通过总重增量达到一定程度 ( $>10.0$  Mt),裂纹间的材料发生水平方向的损伤,损伤深度约为裂纹深度的 1/2 以上。这样,裂纹间出现损伤区域并发展成次生裂纹,与相邻裂纹串联引起掉块。类似情况也在重载铁路现场



取样钢轨的纵断面金相观测中发现,如图 12b、12c 所示。其中图 12b、12c 均为沿列车运行方向(从左向右)的钢轨纵向断面观测图。

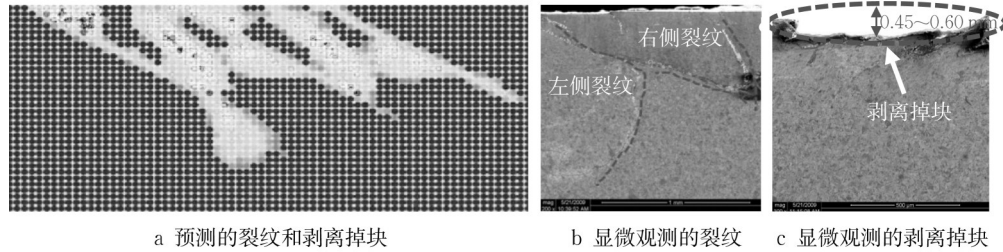


图 12 多裂纹情况

Fig. 12 Multi-crack

图 12b、12c 显示的是同一条曲线的内轨顶面裂纹和掉块情况,对应通过总重分别为 60.0 Mt 和 80.0 Mt<sup>[18]</sup>,可以发现,通过总重增量约 20.0 Mt 时,裂纹之间已经形成深度约 0.45~0.60 mm 的剥离掉块。考虑到现场钢轨磨损速度约  $0.0055 \text{ mm} \cdot \text{Mt}^{-1}$ <sup>[25]</sup>,出现剥离掉块时磨损深度约 0.22 mm,则加上磨损量,剥离掉块实际深度为 0.67~0.82 mm。而本文预设的裂纹发展到剥离掉块的深度为 0.70~1.10 mm,对应的通过总重增量约 13.2~17.6 Mt。

进一步对通过总重 60.0~150.0 Mt 范围的重载铁路曲线内轨表面试块进行金相观测,可以观测到

从主裂纹扩展出分枝裂纹或是在裂纹间出现次生裂纹的现象,如图 13 所示。从图 13a 可以看出,相邻裂纹间的次生裂纹,呈与裂纹扩展角度更小、近似平行钢轨表面的角度发展,扩展至一定长度后与相邻裂纹串联,导致裂纹上方的材料与钢轨整体的连接减少,最终脱离钢轨表面母材。当裂纹范围内大面积区域发生材料破坏,就形成宏观的钢轨表面剥离掉块,多条裂纹的存在促进了这一过程。对现场取样的钢轨表面疲劳损伤发展观测中(图 13b)也能够观察到分枝裂纹与次生裂纹的出现和发展,与仿真形态相似。

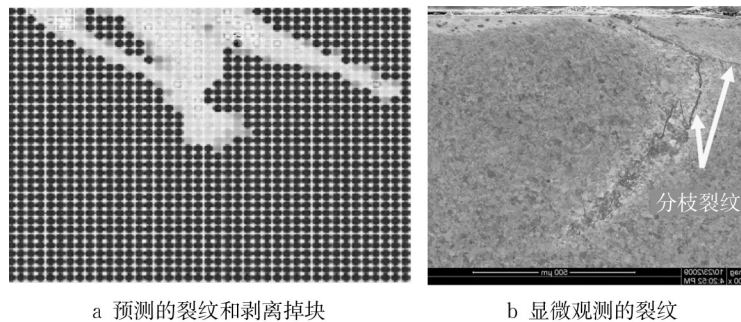


图 13 次生裂纹情况

Fig. 13 Secondary crack

### 2.3.2 与现有文献的对比

文献[26]的重载铁路钢轨裂纹扩展,线路条件与本文仿真的线路条件相近。上述文献和本文的预测结果如表 3 所示。

表 3 预测结果对比

Tab. 3 Comparison of forecast results

对比	钢轨材质	扩展速率/( $\text{nm} \cdot \text{cycle}^{-1}$ )	扩展角度/( $^{\circ}$ )
文献[26]	U75V	0.325	145~150
本文	U75V	0.270~0.340	79~110

从表 3 可以看出,本文提出的基于态基近场动力学的疲劳裂纹扩展方法,预测的裂纹扩展速率和裂纹扩展角度与观测结果相近。

## 3 结论

(1) 轨面单裂纹(或裂纹间距  $> 1.5 \text{ mm}$ ) 情况下,通过总重增量 8.8~26.4Mt 时,裂纹扩展的路径开始发生变化,裂纹有向钢轨内部扩展的趋势,且裂

纹扩展速率随着通过总重累积和裂纹长度的增加逐渐降低。

(2)轨面多裂纹情况下,通过总重增量低于8.8 Mt时,轮轨接触荷载为裂纹扩展的主要推动因素,裂纹沿长度方向扩展,但未发生剥离掉块现象。通过总重增量超过8.8 Mt后,裂纹在沿长度方向扩展的同时,裂纹之间的次生损伤形成,同时,裂纹间距会直接影响裂纹是否通过次生损伤发生交叉联通形成剥离掉块。

(3)轨面多条裂纹同时存在且裂纹间距 $\leq 1.5$  mm时,在裂纹扩展过程中裂纹间出现次生裂纹和损伤。裂纹间距大于 $>1.5$  mm,裂纹间的相互影响减小。

(4)轨面多条裂纹同时存在且裂纹间距 $\leq 1.5$  mm时,通过总重增量达到一定程度( $>10.0$  Mt),形成剥离掉块,剥离掉块深度(0.7~1.10 mm)约为裂纹深度的1/2以上,且剥离掉块深度随裂纹间距增大(裂纹间距不超过1.5 mm)呈增大趋势。

#### 作者贡献声明:

程中宁:论文撰写,仿真方法设计,结果可视化。

周宇:论文指导,文本内容校准。

李骏鹏:电镜图片收集整理。

黄旭炜:仿真数据整理与管理。

#### 参考文献:

- [1] CANADINC D, SEHITOGLU H, VERZAL K. Analysis of surface crack growth under rolling contact fatigue [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(9): 1678.
- [2] 张斌,付秀琴. 铁路车轮、轮箍踏面剥离的类型及形成机理 [J]. *中国铁道科学*, 2001(2): 76.  
ZHANG Bin, FU Xiuqin. Type and formation mechanism of railway wheel and tire tread spall [J]. *China Railway Science*, 2001(2): 76.
- [3] MAI S H, GRAVOUIL A, NGUYEN-TAJAN M L, *et al.* Numerical simulation of rolling contact fatigue crack growth in rails with the rail bending and the frictional contact [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 174: 196.
- [4] ZHAO X, ZHAO X, LIU C, *et al.* A study on dynamic stress intensity factors of rail cracks at high speeds by a 3D explicit finite element model of rolling contact [J]. *Wear*, 2016, 366/367: 60.
- [5] 黄丹,章青,乔丕忠,等. 近场动力学方法及其应用 [J]. *力学进展*, 2010, 40(4): 448.  
HUANG Dan, ZHANG Qing, QIAN Pizhong, *et al.* A review on peridynamics (PD) method and its applications [J]. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(4): 448.
- [6] SILLING S A, EPTON M, WECKNER O, *et al.* Peridynamic states and constitutive modeling [J]. *Journal of Elasticity*, 2007, 88(2): 151.
- [7] ASKARI E, BOBARU F, LEHOUCQ R B, *et al.* Peridynamics for multiscale materials modeling [J]. *Journal of Physics Conference*, 2008, 125: 12078.
- [8] KILIC B, MADENCI E. Structural stability and failure analysis using peridynamic theory [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2009, 44(8): 845.
- [9] SILLING S A, WECKNER O, ASKARI E, *et al.* Crack nucleation in a peridynamic solid [J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 162(1): 219.
- [10] 马晓川,刘林芽,张鹏飞,等. 近场动力学框架下钢轨疲劳裂纹萌生预测的数值方法研究 [J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(5): 608.  
MA Xiaochuan, LIU Linya, ZHANG Pengfei, *et al.* Numerical method for predicting rail fatigue crack initiation with peridynamic theory [J]. *Tribology*, 2020, 40(5): 608.
- [11] RAMULU M, KOBAYASHI A S, KANG B, *et al.* Further studies on dynamic crack branching [J]. *Experimental Mechanics*, 1983, 23(4): 431.
- [12] BOBARU F, HU W. The meaning, selection, and use of the peridynamic horizon and its relation to crack branching in brittle materials [J]. *International Journal of Fracture*, 2012, 176(2): 215.
- [13] SILLING S A, ASKARI A. Peridynamic model for fatigue cracking [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2014.
- [14] PARIS P. A critical analysis of crack propagation laws [J]. *J Basic Eng*, 1963, 85(4): 528.
- [15] ZHOU Y, ZHENG X, JIANG J, *et al.* Modeling of rail head checks by x-ray computed tomography scan technology [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 100: 21.
- [16] KALKER J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1982, 11(1): 1.
- [17] 周宇,孙鼎人,王树国,等. 钢轨滚动接触疲劳多裂纹相互影响 [J]. *华东交通大学学报*, 2020, 37(2): 7.  
ZHOU Yu, SUN Dingren, WANG Shuguo, *et al.* Interactive influence on multiple head checks propagation in rail [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2020, 37(2): 7.
- [18] ZHOU Y, WANG S, WANG T, *et al.* Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and wear in a heavy-haul railway [J]. *Wear*, 2014, 315(1): 68.
- [19] 周宇,邝迪峰,郑晓峰,等. 基于三维重构的钢轨滚动接触疲劳裂纹扩展预测 [J]. *机械工程学报*, 2018(4): 158.  
ZHOU Yu, KUANG Difeng, ZHENG Xiaofeng, *et al.*



- Prediction of the rail head checks propagation based on three dimensional reconstruction [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018(4): 158.
- [20] 吕斌. U75V 钢轨疲劳裂纹扩展行为研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2013.
- LÜ Bin. Research on fatigue crack propagation behavior of U75V rail steel [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [21] 王文健, 刘启跃. 轮轨滚动接触疲劳与磨损耦合关系及预防措施研究[J]. *中国铁道科学*, 2009, 30(4): 137.
- WANG Wenjian, LIU Qiyue. Study on the coupling relationship between the rolling contact fatigue and the wear of wheel-rail and prevention measures [J]. *China Railway Science*, 2009, 30(4): 137.
- [22] 钢铁研究总院, 北京航空材料研究院, 冶金工业信息标准研究院. 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法: GB/T 6398—2017[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- Institute Central Iron Steel Research, Materials Beijing Institute of Aeronautical, Institute China Metallurgical Information and Standardization Institute. Metallic materials-fatigue testing-fatigue crack growth method: GB/T 6398—2017[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017.
- [23] FREIMANIS A, KAEWUNRUEN S. Peridynamic analysis of rail squats[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2299.
- [24] 陈朝阳, 张银花, 刘丰收, 等. 朔黄铁路曲线下股热处理钢轨剥离伤损成因分析[J]. *中国铁道科学*, 2008(4): 28.
- CHEN Zhaoyang, ZHANG Yinhua, LIU Fengshou, *et al.* Analysis on the formation cause of spalling and damage of the heat-treated low rail on Shuohuang railway curve [J]. *China Railway Science*, 2008(4): 28.
- [25] 周宇, 姜俊楠, 张杰, 等. 重载铁路曲线内轨疲劳裂纹与磨耗关系现场试验分析[R]. 北京: 中国铁道学会, 2014.
- ZHOU Yu, JIANG Junnan, ZHANG Jie, *et al.* Field test and analysis on the relationship between fatigue crack and wear of curved inner rail on heavy haul railway [R]. Beijing: China Railway Society, 2014.
- [26] 木东升. 钢轨滚动接触疲劳弯钩形裂纹扩展路径变化研究[D]. 上海: 同济大学, 2019.
- MU Dongsheng. Research on the propagation route change of the hook-shaped rolling contact fatigue crack in the rail [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.