

轮对蠕滑条件下钢轨疲劳裂纹萌生寿命预测

王少锋, 周宇, 许玉德, 李海锋

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 采用多体动力学与三维弹性体非赫兹滚动接触理论, 得到不同轨底坡、超高、摩擦系数与曲线半径等多种轨道条件下的轮轨蠕滑状态, 将接触力分别施加于钢轨有限元模型的接触斑位置, 分析轨头应力应变响应, 得到所有节点的疲劳参量。研究疲劳参量的组成类型, 若剪应力与应变部分占主要组成部分, 则采用剪切型裂纹萌生预测公式, 否则采用拉伸型预测公式。分别预测导向轮与非导向轮作用下的曲线外轨疲劳裂纹萌生寿命, 结果表明, 外轨疲劳裂纹主要由导向轮作用产生, 非导向轮对其影响很小; 裂纹萌生寿命随曲线半径的增大而延长, 随摩擦系数的增大而减小; 设置 1:20 轨底坡可以延缓外轨疲劳裂纹萌生, 尤其是在半径较小的曲线上效果更明显; 过超高能延缓曲线外轨疲劳裂纹萌生; 当摩擦系数大于 0.3 时裂纹萌生于曲线外轨表面, 而小于 0.3 时裂纹萌生位置则逐渐向轨头内部转移。

关键词: 轮轨蠕滑; 临界平面法; 疲劳参量; 应力-应变分析; 裂纹萌生寿命

中图分类号: U213.4

文献标志码: A

Rail Fatigue Crack Initiation Life Prediction Under Wheelset Creep Condition

WANG Shaofeng, ZHOU Yu, XU Yude, LI Haifeng

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Multi-body dynamics and three-dimensional elastic bodies Non-Hertz rolling contact theory were used to obtain wheel-rail creep states in several tracks which include different rail cant, superelevation, coefficients of friction (COF) and radius. Pressure and tangential force distribution were loaded to the contact patch of rail finite element model. Then the fatigue parameters of all nodes in the railhead were obtained by stress/strain response analysis. Composition of fatigue parameter was analyzed to decide the prediction formula. If the share stress/strain part was dominating, the share type prediction formula should be used, otherwise the

tensile type formula was used. Rolling contact fatigue (RCF) crack initiation life in the leading and trailing wheel was predicted separately. The result shows that the high-rail RCF crack is caused by the leading wheel, the influence of the engaged wheel is little. High-rail RCF crack initiation life increases with the augment of the curve radius or superelevations, and it decreases with the augment of COF. It can delay high rail RCF crack initiation to set the cant of 1:20. When COF is over 0.3, the high-rail RCF crack is initiated on the surface of railhead; when COF becomes smaller than 0.3, the location of RCF crack initiation transfers to the inside rail head gradually.

Key words: wheel-rail creep; critical plane; fatigue parameter; stress-strain analysis; crack initiation life

在钢轨滚动接触疲劳(rolling contact fatigue, RCF)裂纹萌生寿命周期预测的多种不同方法中^[1-4], Jiang 和 Sehitoglu 在临界平面法基础上, 提出了基于应变能的疲劳参量 F_P ^[5], 文献[6-11]利用临界平面法分别预测了不同条件下的钢轨 RCF 裂纹萌生寿命周期。这些研究用赫兹理论来模拟轮轨间法向力, 假设轮轨处于最不利的全滑动状态, 切向力是等效库伦摩擦力, 未考虑轮对粘滑状态下的蠕滑率, 因而无法区分同一转向架的导向轮与非导向轮各自对钢轨伤损的贡献程度。而只有在极端的轮轨接触条件下, 轮轨界面才会处于全滑动, 曲线钢轨长期承受的是粘着/滑动状态, 因此, 轮轨蠕滑率尤其是自旋蠕滑率就不可忽视。由于铁路轮轨的系统性, 影响接触状态的因素众多, 不同的线路条件其接触状态差异很大。无论是小比例还是全尺寸的实验设备, 都很难在有限的代价下得到准确的结果^[12], 因此利用仿真技术来分析这些问题已经成了一种有效快捷的手段。

本文建立了重载铁路货车车辆-轨道多体动力

收稿日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51378395; 50908179); 上海市自然科学基金(11ZR1439200); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 王少锋(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢轨伤损。E-mail: wsf126@126.com

通讯作者: 周宇(1977—), 男, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为轨道工程。E-mail: wqhuo2785@163.com

学模型,利用轮轨蠕滑理论,得到轮对粘/滑运动条件下的接触斑状态与法向/切向力分布,并将其施加于钢轨有限元模型上的相应接触斑位置,以临界平面法的疲劳参量 F_P 为裂纹萌生参量^[5],分别预测导向轮/非导向轮作用下的钢轨 RCF 裂纹萌生寿命周期 N_f 及其位置,研究轨底坡、超高、摩擦系数与曲线半径对 RCF 裂纹萌生寿命和萌生位置的影响。

1 裂纹萌生寿命预测模型

本文采用 Jiang 等^[5]提出的基于应变能的疲劳参量 F_P ,其公式如下:

$$F_P = \langle \sigma_{\max} \rangle \frac{\Delta \epsilon}{2} + J \cdot \Delta \tau \cdot \Delta \gamma \quad (1)$$

式中: F_P 指的是临界平面的疲劳参量; $\langle \rangle$ 为 MacCauley 括号; σ_{\max} 为裂纹平面的最大正应力; $\Delta \epsilon$ 为垂直于裂纹表面的正应变变程; $\Delta \tau$ 为裂纹平面的剪应力变程; $\Delta \gamma$ 为裂纹平面的剪应变变程。常数 J 决定于材料在一定的应力-应变状态下的性能,从拉伸/扭转实验得到。

通过材料中任意一点的所有平面,均对应相应的 F_P 值,其中最大值 $F_{P,\max}$ 所在的平面即为疲劳裂纹萌生的平面^[11]。基于 Manson-Coffin 公式^[1]建立预测钢轨 RCF 裂纹萌生寿命周期的公式如下:

$$F_{P,\max} = \begin{cases} \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{(b+c)} & (2a) \\ \frac{(\tau_f')^2}{G} (2N_f)^{2b} + \tau_f' \gamma_f' (2N_f)^{(b+c)} & (2b) \end{cases}$$

式中: σ_f' 、 τ_f' 分别为拉伸/剪切疲劳强度系数; E 、 G 分别为杨氏弹性模量和剪切模量; ϵ_f' 、 γ_f' 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; N_f 为疲劳裂纹萌生寿命周期,即通过的轮对数。

式(2a)与(2b)分别为拉伸型与剪切型裂纹萌生寿命预测公式。采用哪一个预测公式,需要通过 $F_{P,\max}$ 的组成部分来进行分析,若拉伸部分起决定作用,则应选用式(2a),若剪切部分起决定作用,应选用式(2b)。

2 裂纹萌生寿命预测步骤

2.1 线路条件与轮轨接触状态

首先根据 Kalker 三维弹性体非赫兹滚动接触理论和多体动力学理论,得到接触斑的位置与法向力、纵向及横向蠕滑力分布。采用多体动力学软件 Simpack 建立我国重载铁路车辆-轨道模型,车辆为 C70 型敞车,转向架为 ZK6 型,轴重 23 t,车轮踏面为 LM 型,钢轨为 $75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 的 U71Mn 热处理钢

轨,其材质性能与疲劳参数采用文献[6-8]的参数。

轨道模型设置 9 种不同的线路条件,见表 1。每种线路下再设置 5 种不同的曲线半径(R 为 2 000, 1 500, 1 000, 800, 600 m),速度恒定为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。分别研究轨底坡(线路 T3、T7)、摩擦系数 μ (线路 T1~T6,间隔 0.1)、超高 h (线路 T3、T8、T9)和曲线半径等对钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生寿命的影响,忽略轨道不平顺与轨面不平顺。

表 1 不同的线路条件

序号	μ	轨底坡	$h/\%$
T1~T6	0.1~0.6	1:40	100
T7	0.3	1:20	100
T8	0.3	1:40	115
T9	0.3	1:40	85

从现场观测与轮轨几何学来看,在设定的曲线半径内轮轨主要发生一点接触^[13]。由于材料硬度等原因,在疲劳裂纹萌生寿命周期内的钢轨磨耗非常小,不足以改变型面与减小裂纹,因此,本文的研究中不考虑两点接触与磨耗的影响。

根据轮轨接触理论,不同线路条件下的轮轨接触状态各不相同;同一线路导向轮与非导向轮的接触斑状态也大不相同,如图 1 所示。图 1 为 T2($R=800 \text{ m}$)的外轨接触斑示意图,其中 $y=0$ 为钢轨纵向轨顶中心线, $y=-23.9 \text{ mm}$ 为钢轨轨距角弧线起点沿钢轨纵向的直线,接触斑内白色部分为黏着区,阴影部分为滑动区。图 2 为导向轮作用下接触斑纵向蠕滑力与横向蠕滑力分布图。

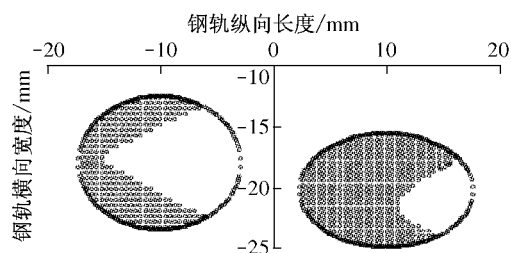
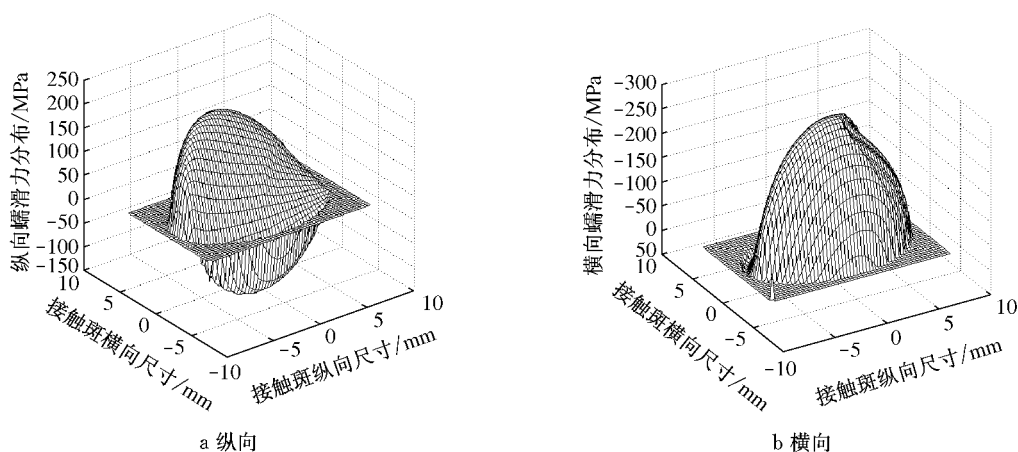


图 1 典型的接触斑粘着区与滑动区分布示意图

Fig.1 Example of contact patch location and adhesion/slip area

从图 2 可以看出,由于存在自旋蠕滑,接触斑的纵向蠕滑力分成了方向相反的两部分,并且其幅值也与库伦摩擦力有较大差距。即使滑动区很大,纵向蠕滑力也不能用库伦摩擦力来等效。对于横向蠕滑力来说,其滑动区的蠕滑力与库伦摩擦力相差不大,但粘着区有较大差异。只有在全滑动状态,横向蠕滑力才可以近似用库伦摩擦力来等效。

图 2 T2($R=800\text{ m}$)导向轮作用下蠕滑力分布Fig.2 Distribution of the tangential traction force under leading wheel in Case 2($R=800\text{ m}$)

2.2 轨头应力-应变分析模型

利用有限元及其二次开发,将所得到的法向/切向力分布施加到钢轨轨头有限元模型接触斑位置.由于曲线外轨起导向作用,最容易产生裂纹,在本文中以曲线外轨作为研究对象,对其接触斑附近及轨

距角进行网格细化,研究其应力-应变状态,如图 3 所示,有限元下的接触斑与蠕滑力方向都跟图 2 相符合,用这种二次开发的方法可以施加任意形状的接触斑与法向/切向力分布.

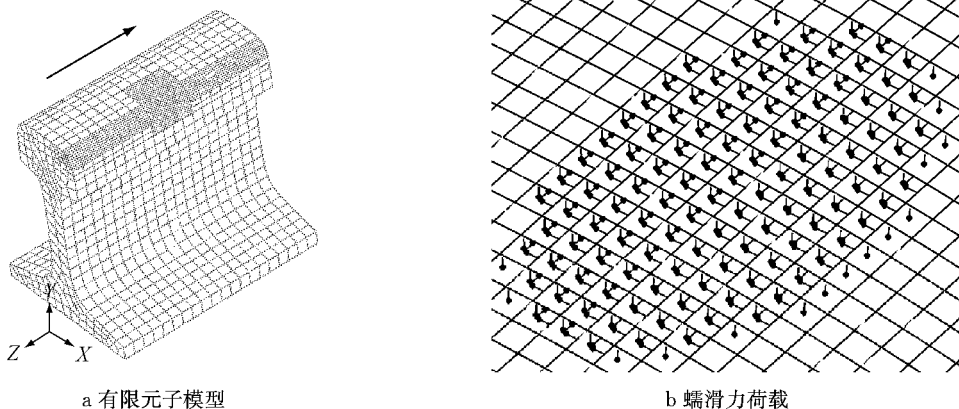


图 3 钢轨有限元子模型及蠕滑力荷载施加图

Fig.3 Rail finite element sub model and creep force loading map

利用有限元分析得到钢轨轨头节点应力分量和应变分量,根据一点应力/应变状态理论,以每 5° 为步长,对应力、应变张量进行坐标转换^[14],得到这一点任意斜面上的应力-应变状态,根据式(1)计算 F_P 值.在轨头全部节点的所有斜面 F_P 值里确定最大值 $F_{P,\max}$.量化分析后,选择合适的预测公式(2a)或(2b),分别预测导向轮与非导向轮作用下的钢轨 RCF 裂纹萌生寿命 N_f (分别以 N_{fL} 和 N_{fN} 表示).

3 结果与分析

3.1 不同轨底坡条件下的 RCF 裂纹萌生寿命

轨底坡直接影响到轮轨接触斑的位置和接触面积大小. $F_{P,\max}$ 量化分析的结果显示应采用剪切型裂纹萌生预测公式(2b),结果如图 4 所示,从中可以看

出以下几点:

(1) 不同轨底坡 N_{fL} 的比较:如果轨道的其他条件都相同,设置 1:20 轨底坡(T7),其 N_{fL} 要远远大于设置 1:40 轨底坡(T3)的 N_{fL} . 半径越小,这种差异越明显. 当 $R=2\,000\text{ m}$ 时, T7 的 $N_{fL}=6.37 \times 10^7$, 而 T3 的 $N_{fL}=1.60 \times 10^7$, 二者之比约为 4:1; 当 $R=600\text{ m}$ 时, T7 的 $N_{fL}=2.05 \times 10^7$, 而 T3 的 $N_{fL}=6.83 \times 10^5$, 二者之比达到 30:1. 说明设置 1:20 轨底坡可以延缓导向轮作用下曲线外轨的 RCF 裂纹萌生寿命, 曲线半径越小则越明显.

(2) 不同轨底坡 N_{fN} 的比较:如果轨道的其他条件都相同,设置 1:20 轨底坡(T7),其 N_{fN} 要大于设置 1:40 轨底坡(T3)的 N_{fN} . 半径越小,这种差异越明显, 当 $R=2\,000\text{ m}$ 时, T7 的 $N_{fN}=7.46 \times 10^7$, 而 T3 的 $N_{fN}=5.35 \times 10^7$, 二者之比约为 1.4:1; 当 R

$=600\text{ m}$ 时, T7 的 $N_{\text{IN}}=1.89\times 10^8$, 而 T3 的 $N_{\text{IN}}=1.60\times 10^7$, 二者之比达到 12:1. 说明设置 1:20 轨底坡同样可以大大延缓非导向轮作用下钢轨 RCF 裂纹萌生寿命.

(3) 1:40 轨底坡下 N_{IL} 和 N_{IN} 的比较: T3 的 N_{IL} 和 N_{IN} 随曲线半径的变化趋势一致, 即随着曲线半径的增加, 导向轮和非导向轮作用下的外轨疲劳裂纹萌生寿命延长, 且 $N_{\text{IL}}\ll N_{\text{IN}}$; 当 $R=2\,000\text{ m}$ 时, $N_{\text{IL}}:N_{\text{IN}}=1:3.3$, 当 $R=600\text{ m}$ 时, $N_{\text{IL}}:N_{\text{IN}}=1:23$. 说明设置 1:40 轨底坡条件下, 曲线外轨 RCF 裂纹主要由导向轮作用产生, 非导向轮对其影响作用很小. 半径越小, 导向轮作用影响权重越大.

(4) 1:20 轨底坡下 N_{IL} 和 N_{IN} 的比较: T7 的 N_{IL} 随曲线半径的变化趋势相同, 而 N_{IN} 随曲线半径的变化趋势相反, 即随着曲线半径的增加, 导向轮作用下的外轨疲劳裂纹萌生寿命延长, 非导向轮作用下的外轨疲劳裂纹萌生寿命降低, 且 $N_{\text{IL}}<N_{\text{IN}}$. 说明 1:20 轨底坡下的轮轨匹配关系处于一种特殊的状态, 其具体原因需要通过详细的轮轨接触状态分析来确定, 本文仅研究其对疲劳裂纹萌生寿命的影响, 轮轨接触状态需要将整车模型下内外轨结合起来研究, 在此不再详述. 当 $R=2\,000\text{ m}$ 时, $N_{\text{IL}}:N_{\text{IN}}=1:1.2$, 当 $R=600\text{ m}$ 时, $N_{\text{IL}}:N_{\text{IN}}=1:9.5$. 说明设置 1:20 轨底坡, 当曲线半径较大时, 曲线外轨 RCF 由导向轮和非导向轮共同作用产生, 导向轮所占比重较大. 当曲线半径减小, 导向轮作用权重变大, 非导向轮作用权重减小.

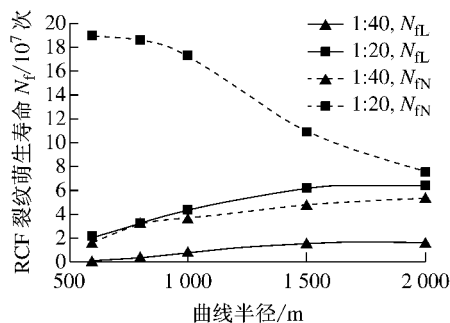


图4 不同轨底坡下的 N_f 预测结果

Fig.4 Prediction result N_f in different kinds of cants

由 3.1 节分析可知, 使用 1:20 的轨底坡, 可以延缓曲线外轨 RCF 裂纹的萌生. 其原因是, 当使用磨耗型(LM 型)车轮踏面与设置 1:20 轨底坡的 75 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 曲线钢轨接触时, 外轨接触位置要远离钢轨轨距角, 靠近轨顶中心, 其接触应力等参量要远小于 1:40 轨底坡钢轨接触应力, 这一点与文献[13, 15]的结论相吻合.

3.2 不同超高下的钢轨 RCF 裂纹萌生寿命

根据三种不同超高线路条件计算出的 $F_{\text{P,max}}$ 量

化分析结果, 其拉伸部分全都接近于 0, 因此采用剪切型裂纹萌生预测公式(2b), 结果如图 5 所示, 从中可以看出:

(1) 在一定的曲线半径条件下, N_{IL} 随着超高的增大而增大, 即过超高条件下, 导向轮引起的外轨疲劳裂纹萌生寿命较长; 欠超高条件下, 导向轮引起的外轨疲劳裂纹萌生寿命较短, 欠超高对导向轮作用下的外轨不利, 会较快地引起疲劳裂纹. 但 N_{IN} 趋势与之不同, 过超高线路 N_{IN} 最小, 均衡超高线路 N_{IN} 最大, 即在均衡超高时, 非导向轮引起的裂纹萌生寿命最长.

(2) 在相同的超高和曲线半径条件下, N_{IL} 都小于所对应的 N_{IN} . 说明在三种超高情况下, 外轨 RCF 裂纹萌生都主要由导向轮作用产生. 因此, 尽管在第(1)条结论 N_{IN} 随超高的趋势不同, 但由于非导向轮的影响非常小, 因此可以忽略其对外轨 RCF 裂纹萌生的作用.

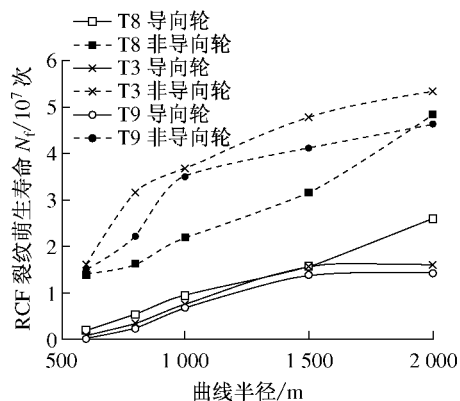


图5 不同超高条件下的钢轨 RCF 裂纹萌生寿命预测

Fig.5 Rail RCF crack initiation life in different kinds of superelevation

由 3.2 节分析可知, 在相同的轨道条件下, 欠超高越大, 导向轮与外轨接触斑越接近于轨距角, 从而造成裂纹萌生寿命减小. 当 $R=600\text{ m}$ 时, T9(欠超高)的 $N_{\text{IL}}=9.90\times 10^4$, 而 T8(过超高)的 $N_{\text{IL}}=1.80\times 10^6$, 二者之比为 1:18. 因此, 从延缓曲线外轨 RCF 裂纹萌生的角度看, 应采取增大超高措施.

3.3 不同摩擦系数下钢轨 RCF 裂纹萌生寿命

当线路铺设完成后, 轨底坡与超高很难改变与调整, 而由于轮轨磨耗、液体润滑、第三方介质与轮轨面粗糙度等因素的影响, 轮轨之间的摩擦系数 μ 的变化范围较大^[16-17]. 因此, 在仿真中 T1~T6 分别设置了不同摩擦系数的轨道条件($\mu=0.1\sim 0.6$)以研究摩擦系数的影响.

当 $\mu=0.1\sim 0.5$ 时, 两个轮对作用下的 $F_{\text{P,max}}$ 拉伸部分全都接近于 0, 因此采用剪切型裂纹萌生预测公式(2b); 而当 $\mu=0.6$ 时, 导向轮作用下的 $F_{\text{P,max}}$ 其

剪切部分接近于 0, 因此采用拉伸型裂纹萌生预测公

式(2a), 预测结果如图 6 所示。

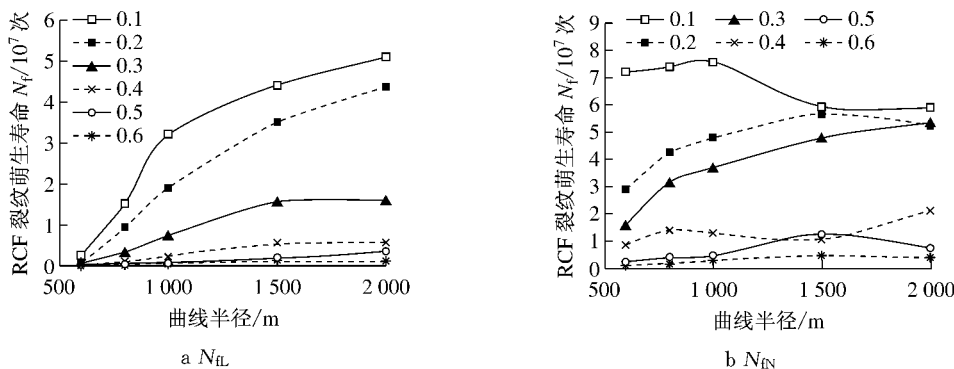


图 6 不同摩擦系数下 N_f 预测结果

Fig. 6 Prediction result of N_f in different kinds of coefficients of friction (COF)

从图 6 可以看出:

(1) 在 6 种摩擦系数下, N_{IN} 都要大于所对应的 N_{IL} , 半径越小, 其差异越大. 只有在同时满足小摩擦系数和大半径两个条件下 (比如 $\mu=0.1\sim0.2$, $R=2000\text{ m}$), 曲线外轨 RCF 裂纹由导向轮和非导向轮共同作用产生, 导向轮作用影响权重较大. 在大部分条件下, 曲线外轨 RCF 裂纹主要由导向轮作用产生, 非导向轮对其有影响, 但影响很小.

(2) 若线路其他条件都相同, N_{IL} 随摩擦系数的增大而减小, 随曲线半径的减小而减小, 即小半径曲线、摩擦系数大的条件下, 导向轮作用下的外轨会较快萌生疲劳裂纹. N_{IN} 趋势稍有不一致, 但因为其影响较小, 故 N_{IL} 的趋势可以代表曲线外轨 RCF 裂纹萌生寿命的趋势.

(3) 根据蠕滑理论, 摩擦系数越小, 其轮轨接触状态的滑动区越大. 当 $\mu=0.1$ 时, 各条曲线上的接触斑几乎处于全滑动状态, 但 N_f 反而更大. 这说明了全滑动状态下并不是最恶劣的状态, 用等效库伦摩擦力来代替蠕滑力, 不能反映钢轨真实的 N_f .

3.4 裂纹萌生位置

临界平面法认为 $F_{P,max}$ 所在的节点即为裂纹萌生位置. 从 3.1~3.3 节的分析可知, 曲线外轨 RCF 裂纹主要由导向轮作用产生, 因此这里分析导向轮作用下裂纹萌生位置. 研究表 1 中 9 条线路 (各 5 种曲线半径) 下的导向轮 $F_{P,max}$ 所在的节点位置. 由于 T4、T5、T8、T9 的裂纹萌生位置与 T3 的萌生位置很接近, 因此以线路 T1、T2、T3、T6、T7 为例, 其在钢轨轨头横断面的 RCF 裂纹萌生位置如图 7 所示.

从图 7 可以看到, 当摩擦系数小于 0.3 时 (T1、T2), 其 RCF 裂纹萌生于钢轨内部, 其他线路上疲劳裂纹则萌生于钢轨表面. T7 (1:20 轨底坡) 疲劳裂纹萌生位置比 T3 (1:40 轨底坡) 更靠近轨顶中心. 在所有线路上, 曲线半径越小, 裂纹萌生位置就越接

近于轨距角.

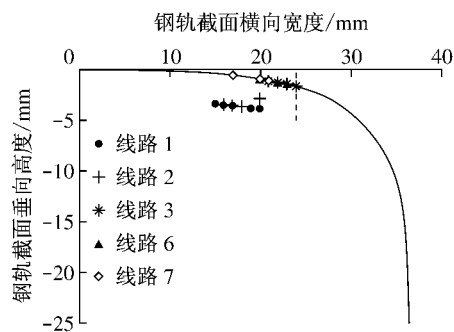


图 7 疲劳裂纹萌生位置

Fig. 7 Fatigue crack initiation position

现实中的轮轨摩擦系数 μ 长期处于 $[0.3, 0.5]$ 的范围^[16], 即使在人为干预或环境影响的情况下, 摩擦系数 $\mu < 0.3$ 或 $\mu > 0.5$ 的情况也不多见, 而疲劳裂纹萌生是一个长期累积的过程, 短期的摩擦系数的改变很难在其相应位置产生裂纹. 因此, 现场观测到的 RCF 疲劳裂纹几乎都萌生于钢轨表面, 这与图 7 的预测结果一致.

3.5 裂纹萌生现场实验

现场轨道与车辆条件都十分复杂, 仿真中无法完全模拟实际线路运行情况. 经过对国内某重载铁路现场观测, 新上道钢轨在通过轮对约 2.82×10^5 次后 (约 6.5 MGT), 大部分区段出现裂纹. 所观测曲线半径为 550 m, 所测得的轮轨摩擦系数范围在 0.35~0.45 之间, 轨底坡为 1:40, 欠超高. 在仿真中与此轨道条件相接近的曲线为 T4 与 T5 的半径 $R=600\text{ m}$ 曲线. 从仿真结果中可以看出, N_{IL} 位于 1.30×10^5 与 3.29×10^5 之间, N_{IN} 位于 2.23×10^5 与 8.54×10^6 之间, 导向轮起主要作用. 根据 Miner 损伤累积理论, 忽略非导向轮的影响, 则需要通过的轮对次数在 2.60×10^5 与 6.58×10^5 之间, 与现场观测的结果相近.

现场中对于疲劳裂纹萌生的因素非常多,在不同的条件下或促进裂纹萌生、或延缓裂纹萌生。因此,本文仿真所得到的结果,可以认为符合现场疲劳裂纹萌生寿命。

4 结论

本文根据临界平面法理论,预测轮对粘滑运动条件下的曲线外轨 RCF 裂纹萌生寿命问题。采用 Kalker 轮轨蠕滑理论和多体动力学理论,得到轮对粘滑运动条件下的法向/切向力分布,将其施加于钢轨有限元模型的接触斑位置,以临界平面法的疲劳参量 F_P 为裂纹萌生参量,计算了不同轨道条件下外轨 RCF 裂纹萌生寿命,研究轨底坡、超高、摩擦系数与曲线半径对钢轨 RCF 疲劳裂纹萌生寿命和萌生位置的影响,可以得到如下结论:

(1) 在大多数线路上,曲线外轨在导向轮作用下的 N_f 值其要远远小于非导向轮作用下的 N_f 值,半径越小,这种差异越明显。因此,钢轨疲劳裂纹主要由导向轮引起,非导向轮对其影响很小,对同一个转向架只需研究导向轮的作用即可。

(2) 对于采用 LM 型车轮踏面和 $75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 钢轨的曲线轨道来说,与 $1:40$ 轨底坡相比,设置 $1:20$ 轨底坡可以改变轮轨接触点位置,降低轮轨接触应力,从而延缓外轨 RCF 裂纹萌生,尤其是在半径较小的曲线上效果更明显。

(3) 从延缓裂纹的角度看,过超高能延缓曲线外轨 RCF 裂纹萌生。

(4) 摩擦系数越大,曲线外轨 RCF 裂纹萌生寿命就越短。 $\mu < 0.3$ 的条件下,裂纹萌生于钢轨内部。 $\mu \geq 0.3$ 条件下则萌生于钢轨表面,这与现场观测相符。

参考文献:

- [1] Ringsberg J W, Loo-Morrey M, Josefson B L, et al. Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22: 205.
- [2] Kapoor A. A re-evaluation of the life to rupture of ductile metals by cyclic plastic strain [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1994, 17(2): 201.
- [3] 金学松,张继业,温泽峰,等. 轮轨滚动接触疲劳现象分析[J]. *机械强度*, 2002, 24(2): 250.
JIN Xuesong, ZHANG Jiye, WEN Zefeng, et al. Overview of phenomena of rolling contact fatigue of wheel/rail [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002, 24(2): 250.
- [4] 金学松,沈志云. 轮轨滚动接触疲劳问题研究的最新进展[J]. *铁道学报*. 2001, 23(2): 92.
JIN Xuesong, SHEN Zhiyun. Rolling contact fatigue of wheel/rail and its advanced research progress [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2001, 23(2): 92.
- [5] Jiang Yanyao, Schitoglu H. A model for rolling contact failure [J]. *Wear*, 1999, 224(1): 38.
- [6] 王建西,许玉德,王志臣. 影响钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生寿命的主要因素分析[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(7): 914.
WANG Jianxi, XU Yude, WANG Zhichen. Analysis of major influencing factors of rolling contact fatigue crack initiation life of rails [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2009, 37(7): 914.
- [7] 王建西,许玉德,练松良. 随机轮轨力作用下钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生寿命预测仿真[J]. *铁道学报*, 2010, 32(3): 66.
WANG Jianxi, XU Yude, LIAN Songliang, et al. Simulation of predicting RCF crack initiation life of rails under random wheel-rail forces [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(3): 66.
- [8] WANG Jianxi, XU Yude, LIAN Songliang, et al. Probabilistic prediction model for initiation of RCF cracks in heavy-haul railway [J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(2): 212.
- [9] Akama M. Development of finite element model for analysis of rolling contact fatigue cracks in wheel/rail systems [J]. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 2007, 48(1): 8.
- [10] Pun C L, Yan W Y, Mutton P J. Stress analysis in rail head of high strength rail steel in heavy haul operations [C]//9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2012). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012: 516-522.
- [11] 王建西. 现代运输条件下滚动接触疲劳损伤研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
WANG Jianxi. The research of rail rolling contact fatigue damage under modern transport [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [12] 张军. 基于有限元法的轮轨蠕滑理论研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
ZHANG Jun. A study on wheel/rail creep theory by using finite element method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [13] 金学松,刘启跃. 轮轨摩擦学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
JIN Xuesong, LIU qiye. *Tribology of wheel and rail* [M]. Beijing: China Railway Press, 2004.
- [14] Young Warren, Budynas R, Sadegh A. Roark's formulas for stress and strain [M]. 8th Ed. New York: McGraw-Hill Press, 2011.
- [15] 李霞,温泽峰,金学松. 钢轨轨底坡对 LM 和 LM_A 两种轮对接触行为的影响 [J]. *机械工程学报*, 2008(3): 64.
LI Xia, WEN Zefeng, JIN Xuesong. Effect of rail cant on the rolling contact behavior of LM and LM_A wheelsets [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008(3): 64.
- [16] Lewis R, Olofsson U. Wheel-rail interface handbook [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited and CRC Press, 2009.
- [17] ZHAO Xin, LI Zili. Three dimensional finite element solution of wheel rail rolling contact with velocity dependent friction [C]//9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2012). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012: 103-111.