

摩擦系数对滚动接触疲劳裂纹萌生和磨耗影响

周 宇, 韩延彬, 木东升, 黄旭炜

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 提出了疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展离散化过程建模设想, 根据临界平面法材料疲劳损伤理论和 Archard 磨耗理论, 建立钢轨三维疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展预测模型, 分析轮轨接触位置的摩擦系数对曲线段钢轨表面疲劳裂纹萌生与磨耗发展的影响。结果表明, 摩擦系数对接触斑面积、形状和位置无影响, 但影响轮轨接触斑黏着区/滑动区的分布和切向应力状态; 随着摩擦系数的增大, 钢轨的平均磨耗发展率增加、磨耗量增大、裂纹萌生寿命减小, 其中, 摩擦系数从 0.3 增大至 0.7 时, 外轨和内轨的平均磨耗发展率分别增大了约 17%~55%、16%~42%, 外轨和内轨的裂纹萌生寿命分别降低约 24%~34% 和 18%~35%; 随着摩擦系数的增加, 外轨的裂纹萌生位置从轨面以下 2.0~2.5 mm 处向亚表面 0.9~1.0 mm 移动; 内轨的裂纹萌生位置基本处于轨顶面下 2.4~2.6 mm; 轮轨接触位置的摩擦系数控制在 0.3~0.4 的范围, 可以达到延长钢轨疲劳裂纹萌生寿命、减缓钢轨磨耗的目的。

关键词: 钢轨; 滚动接触疲劳; 裂纹; 磨耗; 摩擦系数

中图分类号: U213.4

文献标志码: A

Effects of Friction Coefficient on Rolling Contact Fatigue Crack Initiation and Wear Growth

ZHOU Yu, HAN Yanbin, MU Dongsheng, HUANG Xuwei

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

Abstract: The modeling to discrete the continuous process of the coexistence of the fatigue crack initiation and wear growth was presented. Then, a three-dimensional rail model for predicting the coexistence of the fatigue crack initiation and wear was established according to the theories of critical plane fatigue damage and Archard wear. The effects of different friction coefficients between wheel and rail contact positions on fatigue crack initiation and wear growth was analyzed.

Results show that the friction coefficient has a great influence on the distribution of the adhesive and slip area, and the tangential stress in wheel-rail contact patch, but has little effect on the size, shape and location of the contact patch. When the friction coefficient increased, the average wear growth rate and wear amount increased while the crack initiation life reduced. For example, with the increasing of the friction coefficient from 0.3 to 0.7, the average wear growth rate of the high and low rails increased about 17%~55% and 16%~42% respectively, and crack initiation life of them decreased about 24%~34% and 18%~35% respectively. The crack initiation position in the high rail was at about 2.0~2.5 mm below the rail surface and moved upward to 0.9~1.0 mm with the increasing of the friction coefficient. And the crack initiation position in the low rail kept at about 2.4~2.6 mm below the rail surface with the increasing of the friction coefficient. It can prolong the crack initiation life and reduce the wear of the curve rails to keep the friction coefficient at 0.3~0.4 between wheel and rail contact positions.

Key words: rail; rolling contact fatigue; crack; wear; friction coefficient

钢轨表面的滚动接触疲劳裂纹和磨耗是影响钢轨寿命的主要损伤^[1], 轮轨间的摩擦系数对轮轨力有明显的影 响^[2], Li Zili 等^[3] 分析了摩擦系数对钢轨材料塑性变形和压陷型损伤形成的影响。邓铁松等^[4] 分析了不同摩擦因数对疲劳裂纹萌生寿命、萌生位置和启裂角度的影响。肖乾等^[5] 分析了摩擦系数对车轮接触斑疲劳指数和车轮伤损分布的影响。更多文献对摩擦系数的研究则是针对裂纹扩展阶段的裂纹尖端应力强度因子^[6]、扩展路径变化^[7] 等开展。而钢轨疲劳裂纹和磨耗是同时存在、共同发展、相互影响的, 考虑轮轨间的摩擦系数对钢轨这 2 种

收稿日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51678445, 51778484); 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室基金(石家庄铁道大学 STKF201715)

第一作者: 周 宇(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道结构、钢轨伤损及养护维修管理。

E-mail: yzhou2785@tongji.edu.cn

损伤相互作用机制情况下的影响程度,特别是曲线外轨轨距角裂纹和内轨顶面裂纹萌生与两轨磨耗之间的关系,对于调节轮轨摩擦系数、减缓钢轨疲劳损伤,延长钢轨表面疲劳裂纹萌生寿命和磨耗寿命非常重要。

基于临界平面法材料疲劳损伤理论和 Archard 磨耗理论,建立三维钢轨裂纹萌生和磨耗发展共存预测模型,分析不同轮轨摩擦系数条件下曲线外轨和内轨的钢轨表面疲劳裂纹萌生寿命、萌生位置以及裂纹萌生时的磨耗量、磨耗发展率,量化轮轨摩擦系数对疲劳裂纹萌生和磨耗共存发展的影响,为合理的摩擦系数管理和调节提供依据。

1 裂纹萌生和磨耗共存发展预测模型

1.1 疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展离散化过程建模

钢轨疲劳裂纹和磨耗是一个同时存在、共同发展、相互影响的连续过程^[1,8],为了将这一连续过程用数学方法描述和建模,首先认为这个疲劳裂纹和磨耗的连续发展过程是大量车轮作用的结果,假设每一个车轮作用在一段钢轨上都会引起该段钢轨材料的疲劳损伤累积、磨耗并引起钢轨型面的变化。那么疲劳裂纹萌生和磨耗的连续发展过程就可以离散成有限个车轮作用在钢轨上引起材料疲劳累积、磨耗和钢轨型面变化、直至疲劳裂纹萌生的过程。

这样,当一个车轮通过某段钢轨时,轮轨接触状态引起钢轨产生应力应变,导致材料疲劳损伤和磨耗;该车轮通过后下一个车轮通过前,钢轨材料疲劳损伤发生累积,同时型面因磨耗而发生变化,成为磨耗型面;下一个车轮作用在这个磨耗型面时,发生新的轮轨接触状态,又引起新的钢轨应力应变、材料疲劳损伤和累积、磨耗和型面变化。这就将钢轨疲劳裂纹萌生和磨耗共存发展的连续过程离散为每个车轮作用结果的组合,可由图 1 示意。

从图 1 可以看出,针对钢轨疲劳裂纹萌生这个阶段,将裂纹萌生和磨耗共存发展的连续过程离散化,每个离散化的阶段由 2 个主要的子阶段组成,分别是①疲劳-磨耗单独发展子阶段;②磨耗型面替换-疲劳累积子阶段。在疲劳-磨耗单独发展子阶段,钢轨型面不变化,磨耗和疲劳分别单独计算,即一方面根据磨耗模型计算单次车轮通过时引起的轨头接触区的磨耗量,但不替换钢轨型面,另一方面,计算钢轨型面不变情况下钢轨轨头任意点的疲劳损伤寿

命,并得到单次车轮作用下的单次疲劳损伤;之后,进入磨耗型面替换-疲劳累积子阶段,将单次车轮引起的磨耗量叠加到钢轨型面上,计算型面接触区的磨耗分布并平滑型面,得到磨耗型面,并替换掉上一阶段的钢轨型面,同时,将疲劳损伤累积;接下来又进入新的疲劳-磨耗单独发展子阶段,但在这个阶段钢轨型面已经替换成了上一子阶段得到的磨耗型面,轮轨接触和由此引起的应力应变、疲劳累积、磨耗位置和磨耗量相应都发生变化,如此循环直到钢轨疲劳累积损伤达到临界值,则钢轨疲劳裂纹萌生。

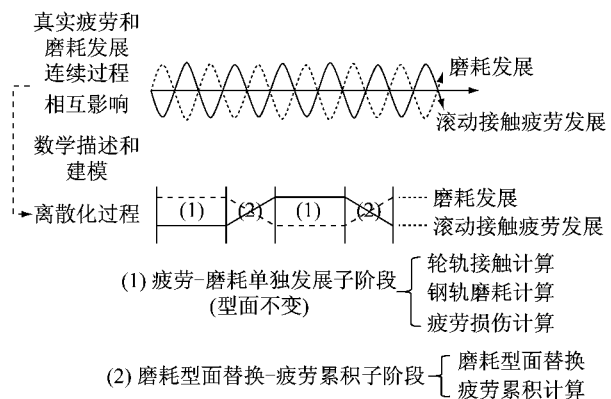


图 1 钢轨疲劳裂纹萌生和磨耗共存发展过程的离散化
Fig. 1 Discretization of the coexistence process of fatigue crack initiation and wear growth

这样,将每个车轮作用下的裂纹萌生-磨耗共存发展过程离散成钢轨疲劳-磨耗单独发展子阶段和磨耗型面替换-疲劳累积子阶段,既可以认为逼近了裂纹萌生-磨耗共存发展的连续过程,又可以实现数学描述和建模。

考虑到离散成每个车轮作用在钢轨上时的仿真过程非常耗时,也可以将上述离散过程按照一定的累积磨耗量(即累积一定通过车轮次数)分段,整个裂纹萌生-磨耗共存的过程仍然分为有限个车轮通过次数积累的磨耗-疲劳单独累积子阶段,以及瞬时完成磨耗型面替换和疲劳累积的磨耗型面替换-疲劳累积子阶段,直至疲劳到限,裂纹萌生。这样,可以在疲劳-磨耗单独累积子阶段分别计算磨耗量和疲劳损伤,当钢轨轨头任意点的最大磨耗量达到设定值时,仿真进入磨耗型面替换-疲劳累积阶段,同时累积车轮通过次数、计算总磨耗量和磨耗型面、替换磨耗型面并进行不同离散阶段间的疲劳累积,如图 2 所示^[9]。图 2a~2d 分别是每个磨耗型面对应的轨头内若干点的疲劳累积情况,其中 R_0 (实线)表示标准型面, R_i (虚线, $i=1,2,3,\dots,i$,下同)表示第 i 次替换的磨耗型面。轨面下的黑色点表示荷载作用下轨

头材料中疲劳累积较大的点,其中 A 点为疲劳累积最快到达临界疲劳损伤的点,该点在每个磨耗型面时对应的萌生寿命为 N_{fi} (即型面不变情况下达到疲劳损伤时车轮通过次数),实际上每个型面发生磨耗被替换时对应的车轮通过次数为 n_i . 因此,每个磨耗型面时 A 点的疲劳损伤为 $D_i = n_i / N_{fi}$.

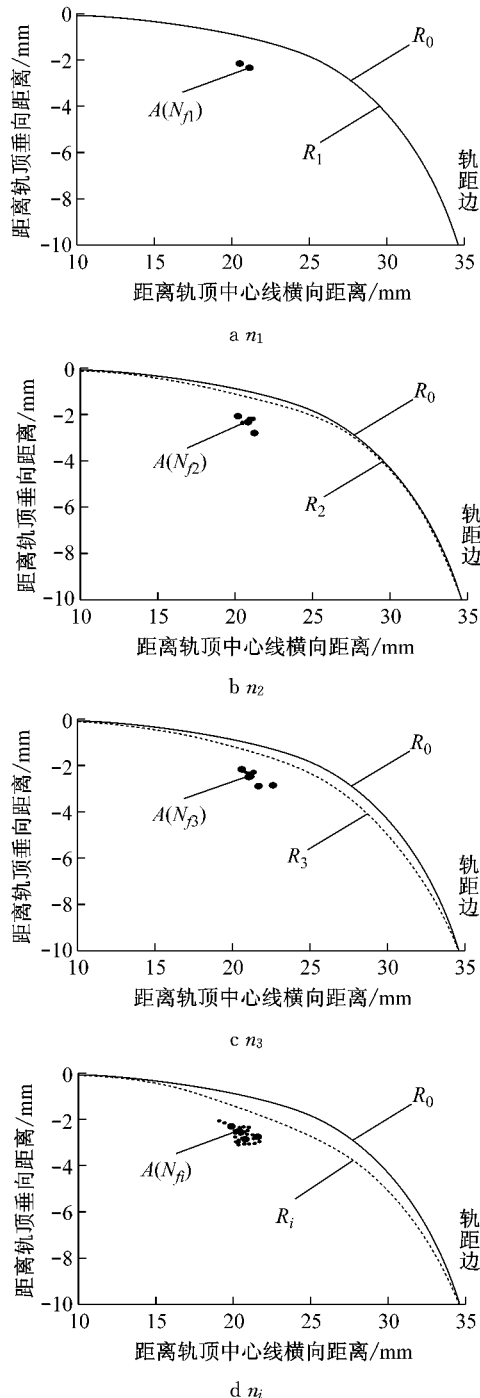


图 2 疲劳裂纹萌生和磨耗共存发展预测过程

Fig. 2 Prediction procedure of the coexistence of fatigue crack initiation and wear growth

1.2 疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展预测模型

根据疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展建模设想,

建立疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展预测仿真流程如图 3 所示. 图 3 中 z_{ni} 表示在车轮第 n 次通过时,第 i 个磨耗型面时引起的钢轨磨耗深度; Σz_{ni} 表示车轮通过 n 次、第 i 个磨耗型面时的钢轨磨耗累积深度; F_{pmax} 表示钢轨轨头材料的疲劳参量最大值.

从图 3 可以看出,要实现疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展建模设想,2 个子阶段分别需要轮轨接触计算、磨耗计算、疲劳损伤计算、磨耗型面替换和疲劳累积等 5 个关键步骤.

1.2.1 疲劳-磨耗单独发展子阶段

(1) 轮轨接触计算. 轮轨接触斑计算获得钢轨接触斑蠕滑状况和法向力、切向力分布. 首先,采用多体动力学软件 Simpack 计算轮轨力、接触斑形状和位置、蠕滑状况等参数;采用轮轨接触软件 CONTACT 计算轮轨接触应力和切向应力及其分布;然后,建立长钢轨三维有限元全局模型,计算钢轨位移约束条件;其次,把全局模型中单个车轮作用下的接触斑及其附近一定范围的钢轨细化网格,形成钢轨子模型,在轮轨接触位置施加垂向和切向应力分布,计算轨头内部各节点的应力应变状态. 如图 4 所示.

(2) 钢轨磨耗计算. 根据 Archard 磨耗理论,有

$$\frac{V_m}{D} = K \cdot \frac{T}{H} \quad (1)$$

式中: V_m 为材料磨耗体积; D 为滑动距离; T 为轮轨法向力; H 为材料的硬度; K 为磨耗系数,由滑动距离和法向压力决定^[10]. K 值取各区域磨耗系数平均值^[10-11]. 当考虑接触斑面积及接触斑的黏着区/滑动区分布且认为只有滑动区引起磨耗,式(1)中的 N 由接触应力代替,则可以计算出接触斑内滑动区任意点的磨耗量,即磨耗深度.

对于一个车轮来说,钢轨表面某点的磨耗是由该车轮在不同时刻碾压该点的所有接触斑滑动区引起,而该车轮在不同时刻的接触斑与该点的相对位置不同,为计算一个车轮滚过某点的等效磨耗效应,假设轮轨接触为稳态形式,即不同时刻接触斑上的接触应力、蠕滑率、蠕滑力、接触斑面积、黏着区/滑动区等保持不变. 当一个车轮滚过时,钢轨表面某点的磨耗量等效于该车轮不同时刻的接触斑滑动区前缘向后沿纵向直线方向移动至接触斑滑动区后缘引起的累积磨耗量. 例如图 5 中一个车轮引起的接触斑对轨头某点(通过接触斑中心的 O 点)的磨耗量为经过该点的接触斑滑动区内纵向黑色条带所引起(图 5 中阴影单元格为接触斑滑动区范围)^[12].

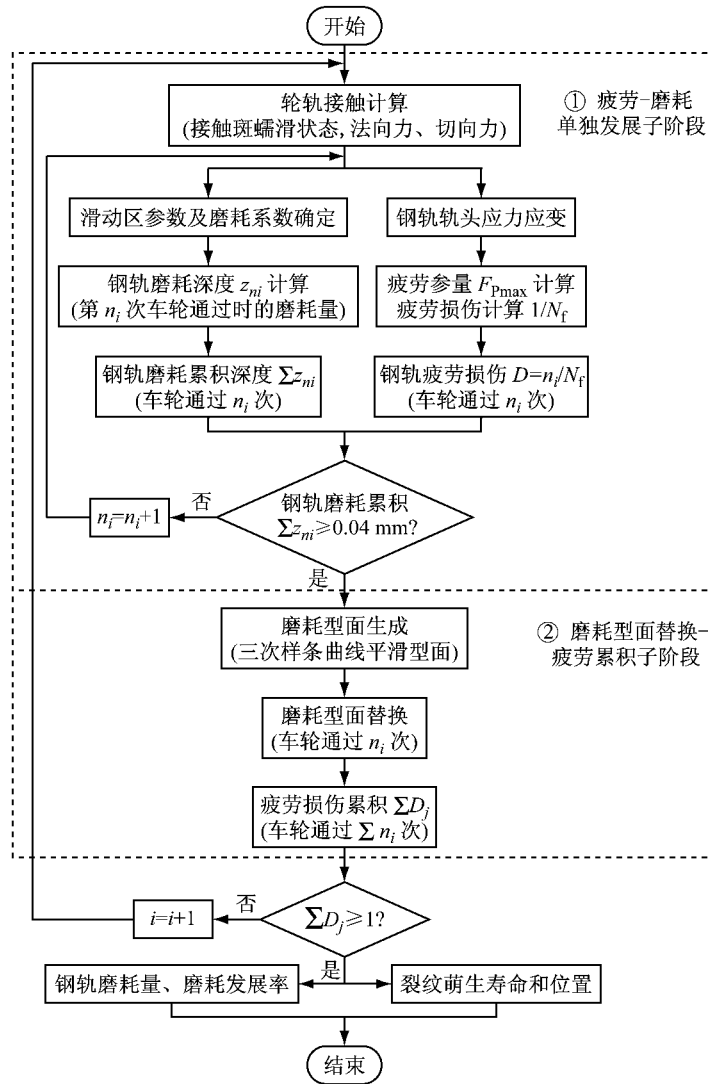


图 3 疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展离散化仿真计算流程

Fig.3 Simulation of the coexistence process of fatigue crack initiation and wear growth

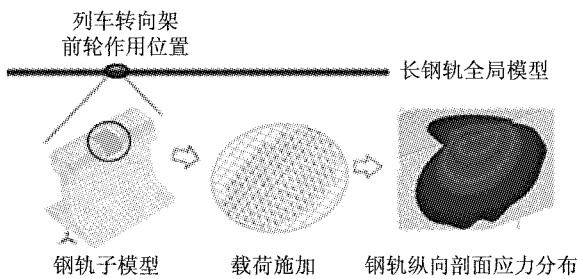


图 4 钢轨有限元模型

Fig.4 Finite element model of rail

因此,当 4 个车轮通过时,钢轨表面接触斑内任意的等效磨耗量为

$$\Delta z_y = \sum_{x=1}^m \Delta z(x,y) \quad (x = 1 \sim m, y = 1 \sim l) \quad (2)$$

式中: Δz_y 为接触斑在横坐标为 y 时的纵向阴影单元格的磨耗量; $\Delta z(x,y)$ 为单元格 (x,y) 处的磨耗量; m 为接触斑纵向单元格数量; l 为接触斑横向单

元格数量.

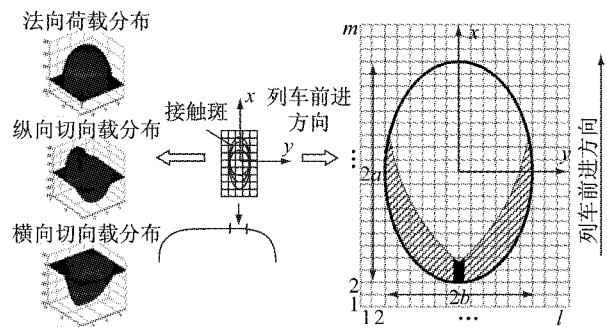


图 5 接触斑通过钢轨某点磨耗累积计算

Fig.5 Wear accumulation calculation of random point on rail by contact patches

(3)钢轨疲劳损伤计算和裂纹萌生寿命预测. 对于每一个型面,其对应的疲劳损伤根据临界平面法和能量密度法得到,其中疲劳参量为^[9,12-14]

$$F_P = \langle \sigma_{\max} \rangle \frac{\Delta \varepsilon}{2} + J \Delta \tau \Delta \gamma \quad (3)$$

式中: $\langle \rangle$ 为 MacCauley 括号, $\langle \sigma_{\max} \rangle = 0.5(|\sigma_{\max}| + \sigma_{\max})$, σ_{\max} 为裂纹面上的最大正应力; $\Delta \varepsilon$ 为裂纹面上正应变幅值; $\Delta \tau$ 和 $\Delta \gamma$ 分别为裂纹面上剪应力幅值和剪应变幅值; J 为材料参数。

将轨头各点的应力应变输入式(3)中, 计算得到轨头任意点的疲劳参量, 找到最大疲劳参量 $F_{P_{ij \max}}$ 及其所在点; 由最大疲劳参量, 考虑正应力和剪应力的关系, 采用式(4)可以计算出每个磨耗型面不变时任意点 j 对应的裂纹萌生寿命 N_{ij} 以及单个车轮作用下的单次疲劳损伤 $1/N_{ij}$ 。

$$F_{P_{ij \max}} = \begin{cases} \frac{\sigma'_f}{E} (2N_{ij})^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_{ij})^{(b+c)}, & \langle \sigma_{\max} \rangle \Delta \varepsilon / 2 \geq J \Delta \tau \Delta \gamma \\ \frac{\tau'_f}{G} (2N_{ij})^{2b} + \tau'_f \gamma'_f (2N_{ij})^{(b+c)}, & \langle \sigma_{\max} \rangle \Delta \varepsilon / 2 < J \Delta \tau \Delta \gamma \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_{P_{ij \max}}$ 为第 i 个钢轨磨耗型面时材料内 j 点的疲劳参量; σ'_f 、 τ'_f 分别为拉伸、剪切疲劳强度系数; ε'_f 、 γ'_f 分别为拉伸、剪切疲劳延性系数; b 、 c 分别为疲劳强度、延性指数; N_{ij} 为第 i 次钢轨磨耗型面替换时材料内 j 点的疲劳裂纹萌生寿命; E 、 G 分别为材料弹性、剪切模量; $\Delta \tau$ 、 $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta \gamma$ 分别为裂纹面上的剪应力幅值、正应变幅值和剪应变幅值。

1.2.2 磨耗型面替换-疲劳累积子阶段

(1) 磨耗型面替换. 根据式(2)计算 1 节车辆分别作用在 2 股钢轨上的 4 个车轮的接触斑所引起的钢轨磨耗量. 当轨头任意点累积磨耗量达到一定数值时(本文为 0.04 mm), 将接触斑滑动区范围内的累积磨耗量叠加到钢轨型面上, 并用三次插值样条曲线进行型面平滑^[11], 得到磨耗型面, 同时得到型面替换时阶段累积车轮通过次数 n_i 。

(2) 疲劳累积. 根据 n_i 与 N_{fi} , 可得到该磨耗阶段对应的阶段疲劳损伤为

$$D_i = n_i / N_{fi} \quad (5)$$

根据 Miner 法则, 当钢轨轨头任意点在不同磨耗阶段的疲劳损伤累积达到临界疲劳损伤, 即

$$\sum D_i = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_i = 1 \quad (6)$$

此时认为该点萌生疲劳裂纹. 其萌生寿命为

$$N = \sum_{i=1}^M n_i \quad (7)$$

式中: N 为钢轨疲劳裂纹萌生寿命; M 为磨耗型面的替换次数, 即裂纹萌生-磨耗共存离散化的次数。

2 仿真条件

根据上述疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展预测模型, 按表 1 车辆、轨道条件进行仿真, 其中摩擦系数为轮轨接触位置的摩擦系数, 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7. 对于曲线外轨, 轮轨接触主要分布在轨距角-轨肩, 对于曲线内轨, 轮轨接触主要分布在钢轨顶面. 摩擦系数的取值范围从较光滑情况的 0.1、0.2 至较粗糙情况的 0.6、0.7, 内外轨摩擦系数相同。

表 1 车辆和轨道主要参数

Tab.1 Parameters of vehicle and track			
项目	参数	项目	参数
车辆模型	C70 型敞车	转向架	ZK6
轴重	23t	列车速度	50 km · h ⁻¹
车轮踏面	LM 磨耗型	钢轨初始型面	75 kg · m ⁻¹ 标准型面
钢轨类型	U75V 热处理	轨头顶面中心线硬度	340~400 HB
曲线半径	800 m	轨底坡	1:40

3 结果分析

3.1 摩擦系数对轮轨接触的影响

在 4 种摩擦系数工况下, 前转向架第 1 个轮对外侧车轮所引起的接触斑在钢轨上的位置及黏着区/滑动区分布如图 6 所示, 其中 μ 为摩擦系数。

从图 6 可知, 4 种摩擦系数下前转向架第 1 个轮对外侧车轮的接触斑形状与接触位置变化微小, 但是接触斑黏着区/滑动区的分布有所不同, 黏着区面积随着摩擦系数的增大而增加, 滑动区的变化趋势则相反. 在不同摩擦系数工况下, 接触斑上的应力分布情况如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着摩擦系数的增大, 作用于钢轨上的法向应力基本保持不变, 接触区纵向切应力和横向切应力有增大的趋势. 摩擦系数由 0.3 增大至 0.5、0.7 时, 接触斑内的纵向切应力分别增大约 20%、80%, 横向切应力均增大约 30%。

3.2 摩擦系数对磨耗的影响

阶段磨耗发展率是指在每一个疲劳-磨耗单独发展子阶段, 从钢轨第 i 个磨耗型面上任意点的累积磨耗量达到规定值(本文为 0.04 mm)时, 每万次车轮通过时产生的磨耗量. 平均磨耗发展率为裂纹萌生时所有阶段磨耗发展率平均值. 其中, 曲线内轨在摩擦系数为 0.1 时的裂纹萌生寿命无穷大, 故内轨在摩擦系数为 0.1 的工况下不进行分析. 不同摩

摩擦系数下曲线外轨从原始型面到裂纹萌生时的阶段 磨耗发展率如图 8 所示.

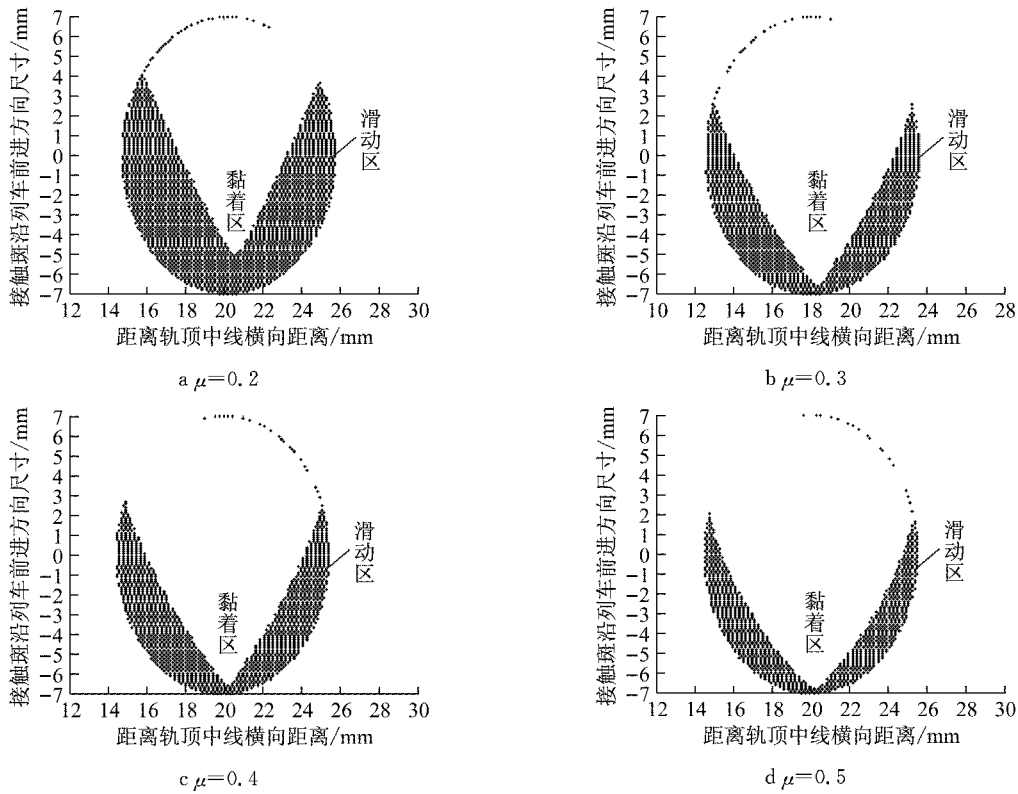


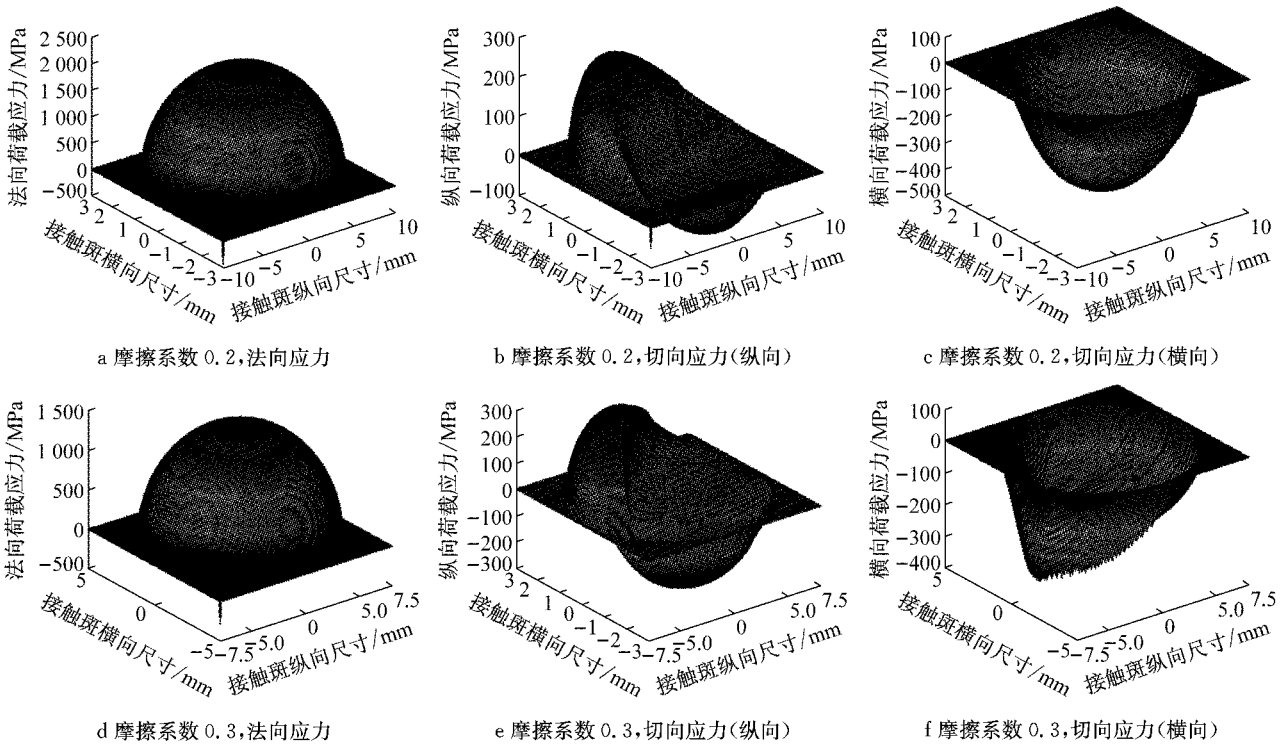
图 6 4 种典型摩擦系数工况下的轮轨接触斑黏着区/滑动区分布状态

Fig. 6 Distribution of the adhesion and slip area of contact patch in four typical friction coefficient

由图 8 可知:

了 5 次磨耗型面的替换过程,总磨耗量约为 0.14~

(1)在不同摩擦系数下,外轨至裂纹萌生前发生 0.18 mm.



d 摩擦系数 0.3,法向应力

e 摩擦系数 0.3,切向应力(纵向)

f 摩擦系数 0.3,切向应力(横向)

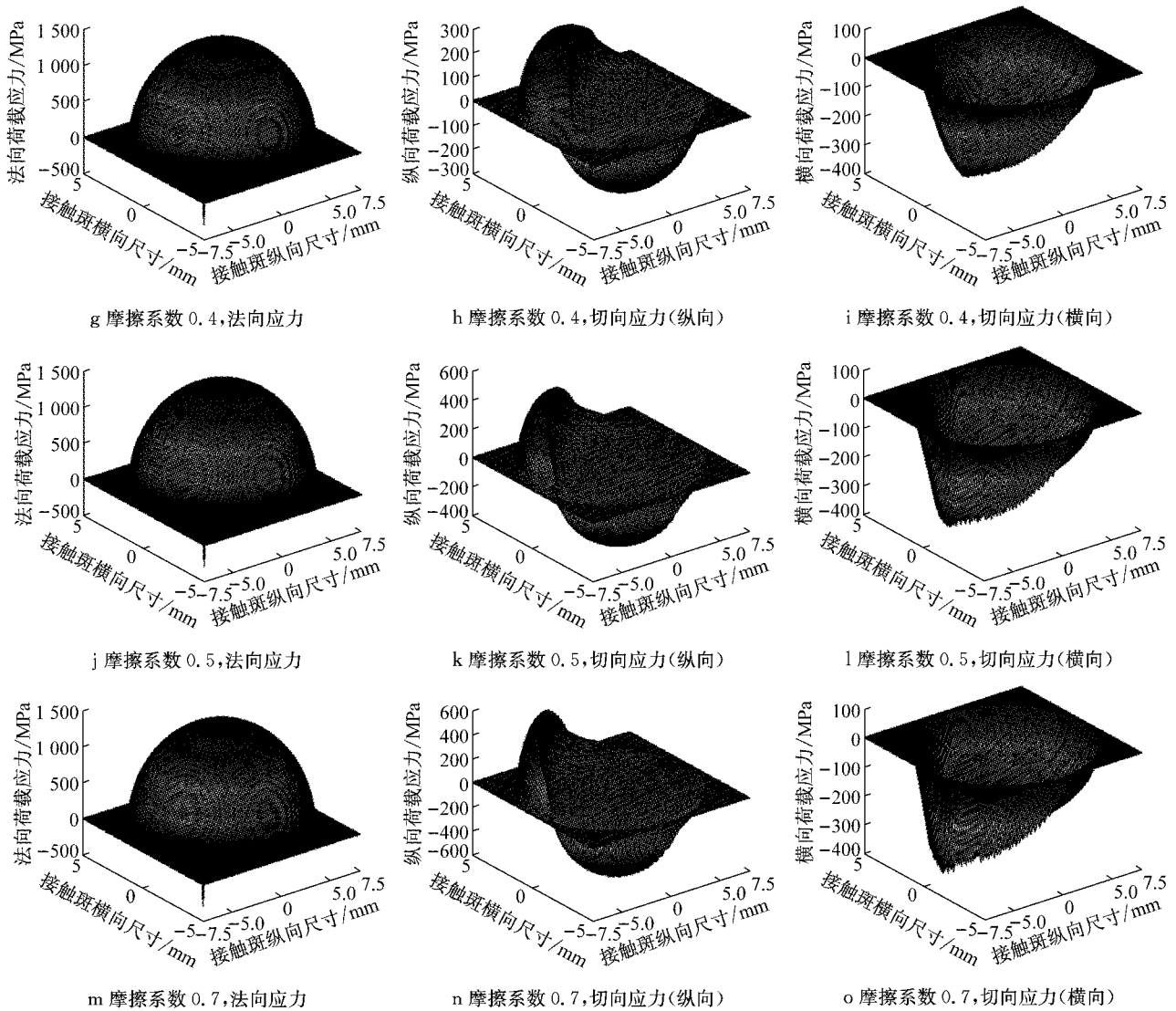


图 7 不同摩擦系数下的轮轨接触斑应力分布

Fig.7 Stress distribution of wheel-rail contact with different friction coefficient

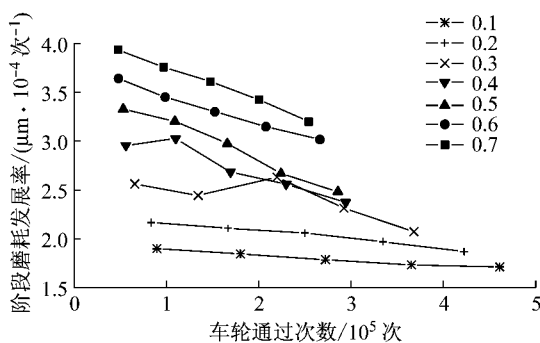


图 8 不同摩擦系数下外轨的磨耗发展率随车轮通过次数的发展情况

Fig.8 Development of wear growth rate of high rail by the wheels cycle accumulation with different friction coefficient

(2)随着车轮累积通过次数即通过总重的增加,不同摩擦系数下外轨的磨耗发展率整体上都呈现降

低的趋势,说明无论在任何摩擦系数下,钢轨的磨耗使得轮轨型面匹配改善,轮轨关系趋向于良好,但是由于磨耗发展率仍为正值,钢轨累积磨耗量仍然不可避免呈现增加趋势。

(3)摩擦系数在 0.1~0.2 时,磨耗发展率随着车轮通过次数累积呈降低趋势且降速较平缓,2 次磨耗型面替换之间的车轮通过次数较多;摩擦系数在 0.3~0.7 时,磨耗发展率随着车轮通过次数累积呈降低趋势且降速较快,2 次磨耗型面替换之间的车轮通过次数较少,即摩擦系数大,磨耗速率变化快、磨耗增加快,车轮通过次数累积就少。

此外,内轨磨耗发展率随车轮通过次数的发展趋势与外轨相同,在裂纹萌生前同样发生了 5 次磨耗型面的替换,裂纹萌生时的磨耗量约为 0.16~0.18 mm,但在同一摩擦系数下,内轨裂纹萌生时的

车轮通过次数约为外轨的 1.8~2.0 倍,即内轨裂纹萌生寿命较外轨长。

在不同摩擦系数下,裂纹萌生时曲线外轨和内轨的平均磨耗发展率如图 9 所示,其中平均磨耗发展率按二次多项式进行拟合。

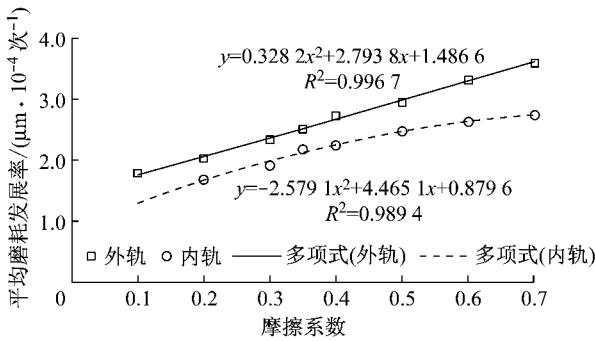


图 9 不同摩擦系数下的钢轨平均磨耗发展率

Fig.9 Average wear growth rate of rails with different friction coefficient

从图 9 中可以看出,

(1)随着摩擦系数的增大,内轨、外轨的至裂纹萌生时的平均磨耗发展率均呈增大趋势,其中外轨平均磨耗发展率增幅较大。

(2)摩擦系数为 0.3 时,外轨平均磨耗发展率为 $2.32 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$;摩擦系数为 0.4 时,其平均磨耗发展率为 $2.72 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$,比摩擦系数为 0.3 时增大约 17%,摩擦系数为 0.5、0.6、0.7 时的平均磨耗发展率分别相对摩擦系数为 0.3 时增大约 26%、42%、55%。

(3)摩擦系数为 0.3 时,内轨平均磨耗发展率为 $1.92 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$;摩擦系数为 0.4 时,其平均磨耗发展率为 $2.24 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$,比摩擦系数为 0.3 时增大约 16%,摩擦系数为 0.5、0.6、0.7 时的平均磨耗发展率分别相对摩擦系数为 0.3 时增大约 29%、38%、42%。

3.3 摩擦系数对裂纹萌生的影响

在不同摩擦系数下,内、外轨的疲劳裂纹萌生寿命如图 10 所示,其中车轮通过次数按照表 1 的轴重进一步统计为通过总质量。此外,根据不同摩擦系数下的内、外轨裂纹萌生寿命,按二次多项式进行拟合。

从图 10 中可以看出:

(1)随着摩擦系数的增大,外轨和内轨的裂纹萌生寿命均减小,且内轨疲劳裂纹萌生寿命减小趋势较外轨明显,说明曲线段内轨裂纹萌生寿命对摩擦系数的变化更为敏感。

(2)摩擦系数为 0.3 时,外轨的裂纹萌生寿命为

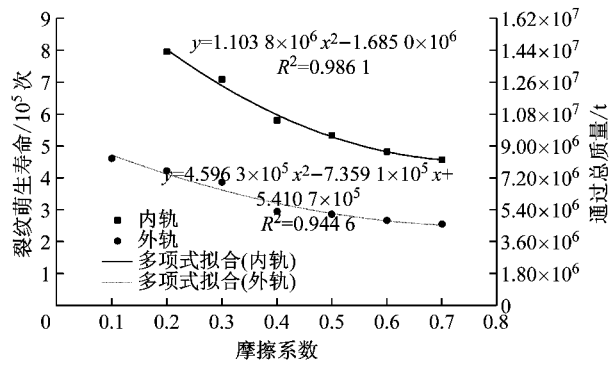


图 10 裂纹萌生寿命与摩擦系数的关系

Fig.10 Relationship between crack initiation life and friction coefficient

3.86×10^5 次车轮通过次数,对应的通过总质量约为 $6.95 \times 10^6 \text{ t}$;摩擦系数为 0.4 时,外轨的裂纹萌生寿命为 2.94×10^5 次车轮通过次数,对应的通过总质量约为 $5.29 \times 10^6 \text{ t}$,比摩擦系数为 0.3 时减小约 24%。摩擦系数为 0.5、0.6、0.7 时的裂纹萌生寿命分别相对摩擦系数为 0.3 时减小约 26%、31%、34%。

(3)摩擦系数为 0.3 时,内轨的裂纹萌生寿命为 7.09×10^5 次车轮通过次数,对应的通过总质量约为 $1.28 \times 10^7 \text{ t}$;摩擦系数为 0.4 时,内轨的裂纹萌生寿命为 5.81×10^5 次车轮通过次数,对应的通过总质量约为 $1.05 \times 10^7 \text{ t}$,比摩擦系数为 0.3 时减小约 18%。摩擦系数为 0.5、0.6、0.7 时的裂纹萌生寿命分别相对摩擦系数为 0.3 时减小约 25%、32%、35%。

不同摩擦系数下曲线内、外轨疲劳裂纹萌生位置如图 11 所示。

由图 11 可知,在同样的车辆和线路条件下,不同摩擦系数下的疲劳裂纹萌生于钢轨表面或亚表面的同一局部范围内,且摩擦系数增大,外轨的裂纹萌生位置向钢轨表面移动。进一步,不同摩擦系数下内轨和外轨的裂纹萌生点分布位置如图 12 所示。

由图 12 可知:

(1)在不同摩擦系数情况下,外轨疲劳裂纹萌生位置分布在靠近轨肩-轨距角一侧、距离轨顶中线 17~18 mm、轨顶面下 0.9~2.5 mm 的局部区域。

(2)在不同摩擦系数情况下,内轨疲劳裂纹萌生位置分布在靠近轨肩-轨距角一侧距离轨面中线 10~11 mm、轨顶面下 2.4~2.6 mm 的局部区域。内轨裂纹萌生位置相对于外轨更靠近轨面中线,垂向位置更靠下,这与现场观测情况吻合^[8]。

(3)当摩擦系数小于 0.3 时,外轨裂纹萌生点垂

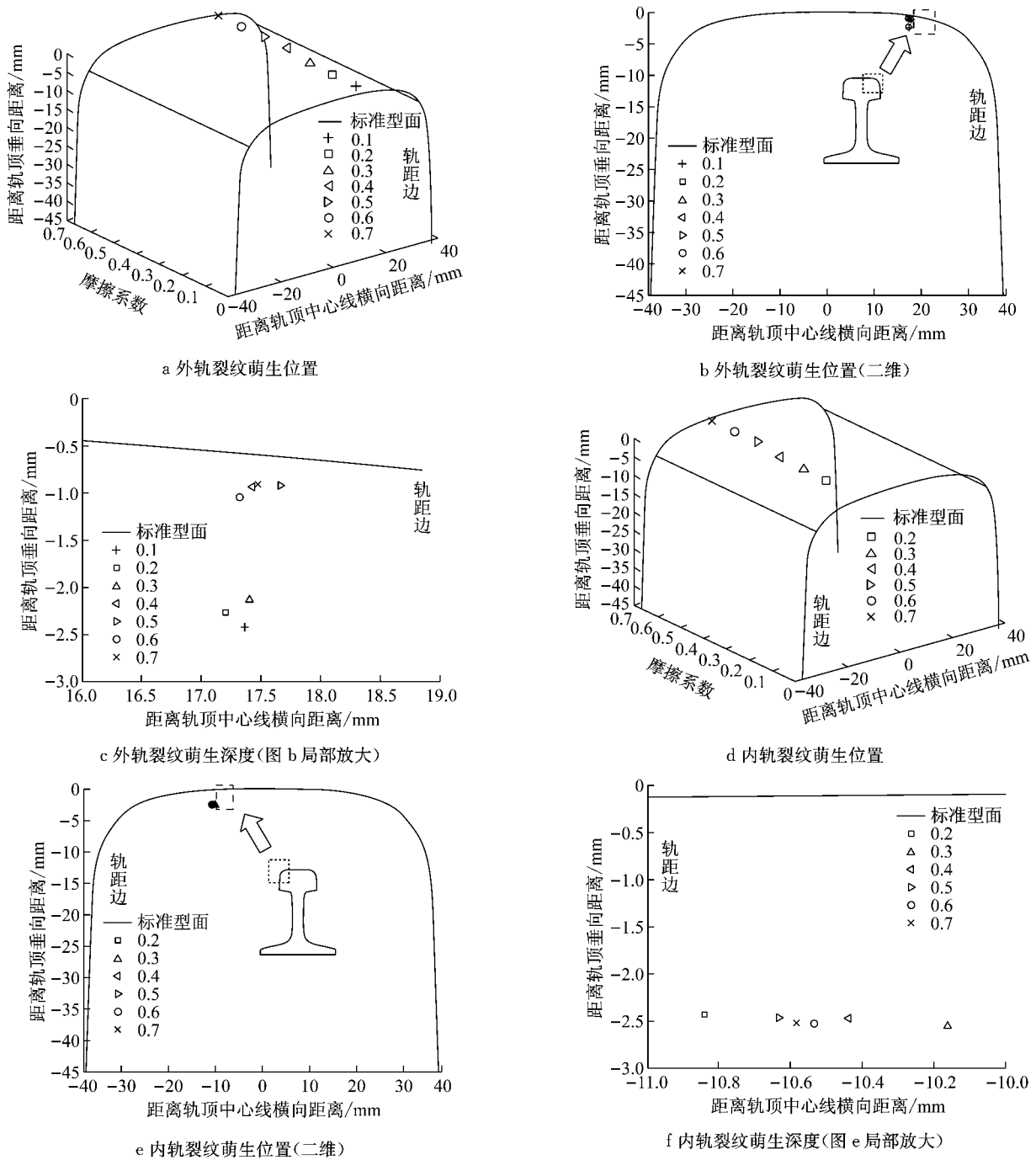


图 11 不同摩擦系数下的曲线段钢轨疲劳裂纹萌生位置

Fig. 11 Crack initiation position in curve rails with different friction coefficient

向位置在轨面以下 2.1~2.4 mm,当摩擦系数大于 0.3 时,裂纹萌生点垂向位置在轨面以下 0.9~1.0 mm,更靠近轨顶面.

(4)当摩擦系数在 0.2~0.7 时,内轨裂纹萌生点垂向位置始终在轨面以下 2.4~2.6 mm.

3.4 摩擦系数对裂纹萌生和磨耗共存的影响

将图 9、图 10 综合分析,如图 13 所示.值得注意的是,图 13 中纵向坐标轴裂纹萌生寿命和平均磨耗发展率并无对应关系,两者单位和含义不同,因此图

中趋势线的交点并无含义,将裂纹萌生寿命和磨耗发展率放在同一图表中仅仅是便于直观对比分析.

从图 13 及前几节分析看出:

(1)当摩擦系数在 0.1~0.2 之间时,外轨裂纹萌生寿命约为 $4.22 \times 10^5 \sim 4.61 \times 10^5$ 次,对应通过总质量约为 $7.72 \times 10^6 \sim 8.43 \times 10^6$ t,平均磨耗发展率约为 $1.79 \sim 2.03 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$;内轨裂纹萌生寿命约为 8.00×10^5 次以上,对应通过总质量约为 1.46×10^7 t,平均磨耗发展率约为 $1.69 \mu\text{m} \cdot$

(10^4 次) $^{-1}$.

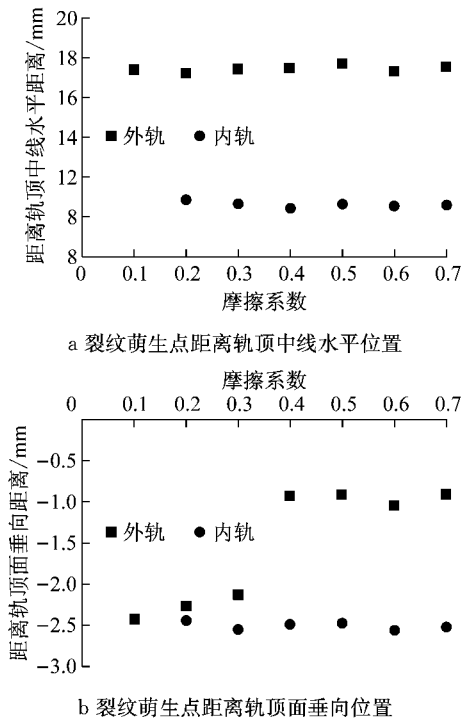


图 12 不同摩擦系数下钢轨疲劳裂纹萌生位置

Fig. 12 Crack initiation position in rails with different friction coefficient

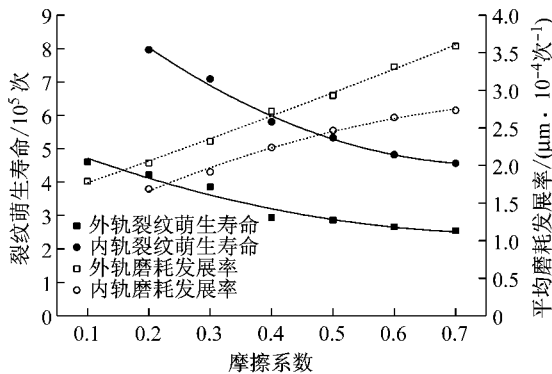


图 13 不同摩擦系数下钢轨裂纹萌生寿命与平均磨耗发展率

Fig. 13 Rail crack initiation life and average wear growth rate with different friction coefficient

(2)当摩擦系数在 0.3~0.4 之间时,外轨裂纹萌生寿命约为 $2.94 \times 10^5 \sim 3.86 \times 10^5$ 次,对应通过总质量约为 $5.29 \times 10^6 \sim 6.95 \times 10^6$ t,平均磨耗发展率约为 $2.32 \sim 2.72 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$;内轨裂纹萌生寿命约为 $5.81 \times 10^5 \sim 7.09 \times 10^5$ 次,对应通过总质量约为 $1.05 \times 10^6 \sim 1.28 \times 10^7$ t,平均磨耗发展率约为 $1.92 \sim 2.24 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$.

(3)当摩擦系数在 0.5~0.7 之间时,外轨裂纹萌生寿命约为 $2.55 \times 10^5 \sim 2.86 \times 10^5$ 次,对应通过

总质量约为 $4.10 \times 10^6 \sim 4.67 \times 10^6$ t,平均磨耗发展率约为 $2.94 \sim 3.59 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$;内轨裂纹萌生寿命约为 $4.57 \times 10^5 \sim 5.33 \times 10^5$ 次,对应通过总质量约为 $8.36 \times 10^6 \sim 9.75 \times 10^6$ t,平均磨耗发展率约为 $2.46 \sim 2.73 \mu\text{m} \cdot (10^4 \text{ 次})^{-1}$.

以摩擦系数 0.3~0.4 时的裂纹萌生寿命和磨耗发展率作为基准,对比其他摩擦系数的相应结果发现,摩擦系数在 0.1~0.2 时,尽管外轨和内轨的裂纹萌生寿命分别延长了 1.1~1.6 倍、1.1~1.3 倍,外轨和内轨的平均磨耗发展率分别降低了 12%~34%、12%~25%,但摩擦系数较小有可能造成轮轨黏着降低、车轮打滑;摩擦系数在 0.5~0.7 时,外轨和内轨的裂纹萌生寿命分别降低了 3%~34%、10%~35%,平均磨耗发展率分别增加了 8%~55%和 10%~43%,且摩擦系数越大,裂纹萌生寿命降低幅度和平均磨耗发展率增加幅度越大.

再对比摩擦系数 0.3、0.4、0.5 时的裂纹萌生寿命和平均磨耗发展率,摩擦系数从 0.5 降低到 0.4,外轨和内轨的裂纹萌生寿命分别延长 3%和 10%,而相应的平均磨耗发展率降低分别为 8%和 10%;摩擦系数从 0.4 降低到 0.3,外轨和内轨的裂纹萌生寿命分别延长 31%和 20%,而相应的平均磨耗发展率降低分别为 15%和 14%,因此,将轮轨摩擦系数控制在 0.3~0.4 间可以得到较长的裂纹萌生寿命和较小的平均磨耗发展率.

4 结论

(1)根据一定车轮通过次数即一定通过总重下的钢轨磨耗累积和型面变化,考虑轮轨接触、钢轨材料疲劳损伤、磨耗型面形成和替换、疲劳损伤累积等过程,建立了钢轨疲劳裂纹萌生与磨耗共存发展预测模型,可以同时分析裂纹萌生和磨耗发展情况.

(2)改变轮轨接触位置的摩擦系数对接触斑位置、形状和面积无影响,但会影响接触斑黏着区/滑动区的分布状态,从而影响钢轨疲劳裂纹萌生寿命与磨耗.随着摩擦系数的增大,黏着区面积增大,滑动区面积减小,接触斑横向、纵向切应力增大.摩擦系数从 0.3 增大至 0.5、0.7 时,接触斑横向、纵向切应力分别增大约 20%、80%和 30%、30%,但法向应力基本保持不变.

(3)随着摩擦系数的增大,钢轨的平均磨耗发展率增加、磨耗量增大.摩擦系数从 0.3 增大至 0.7 时,外轨的平均磨耗发展率增加约 17%~55%;内轨

的平均磨耗发展率增加约 16%~42%。在同一摩擦系数下,在裂纹萌生前,每个磨耗型面替换过程的阶段磨耗发展率随着车轮通过次数的增加呈递减趋势,在裂纹萌生时,外轨和内轨的磨耗量分别约为 0.14~0.18 mm、0.16~0.18 mm。

(4)随着摩擦系数的增大,内、外轨的裂纹萌生寿命均减小,摩擦系数从 0.3 增加至 0.7,外轨裂纹萌生寿命降低了约 24%~34%,内轨裂纹萌生寿命降低了 18%~35%。

(5)摩擦系数对外轨和内轨疲劳裂纹萌生位置的影响不同。各个摩擦系数条件下,外轨和内轨的裂纹萌生位置分别距离轨顶中心为 17~18 mm 和 10~11 mm;随着摩擦系数的增加,外轨的裂纹萌生位置从轨面以下 2.0~2.5 mm 处向亚表面 0.9~1.0 mm 移动;内轨的裂纹萌生位置基本处于轨顶面下 2.4~2.6 mm。

(6)轮轨接触位置的摩擦系数控制在 0.3~0.4 的范围,可以既延长相应位置的疲劳裂纹萌生寿命,也减缓磨耗。

参考文献:

- [1] ZHOU Yu, WANG Shaofeng, WANG Tianyi, *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.
- [2] ZHOU Yu, WANG Tianyi, WANG Shaofeng. Field studies of the effect of top of rail friction modifier on wheel/rail interaction of heavy-haul railway [C] //Proceeding of 10th International Heavy Haul Association Conference. New Delhi: International Heavy Haul Association, 2013: 329.
- [3] LI Zili, ZHAO Xin, COENRAAD E, *et al.* An investigation into the causes of squats—Correlation analysis and numerical modeling [J]. *Wear*, 2008, 265(9): 1349.
- [4] 邓铁松,李伟,温泽峰,等. 钢轨滚动接触疲劳裂纹萌生寿命预测[J]. *润滑与密封*, 2013, 38(8): 46.
- DENG Tiesong, LI Wei, WEN Zefeng, *et al.* Prediction on rolling contact fatigue crack initiation life of rails [J]. *Lubrication Engineering*, 2013, 38(8): 46.
- [5] 肖乾,方骏,王磊. 摩擦系数对高速列车车轮瞬时滚动接触疲劳的影响[J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(3): 68.
- XIAO Qian, FANG Jun, WANG Lei. Influence of friction coefficient on wheel transient rolling contact fatigue of high speed train[J]. *China Railway Science*, 2016, 37(3): 68.
- [6] JIM B, MAGNUS E. Crack propagation in rails under rolling contact fatigue loading conditions based on material forces[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 45(3): 98.
- [7] CHO Doo-Ho, SEONG Hwan, KIM Young-Jin, *et al.* Parametric study on the fatigue life of railways under rolling contact fatigue by three-dimensional numerical analysis [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(2): 359.
- [8] 周宇,张杰,杨新文,等. U75V 热处理钢轨轨距角滚动接触疲劳裂纹和磨耗试验分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(6): 877.
- ZHOU Yu, ZHANG Jie, YANG Xinwen, *et al.* Experiment on the rolling contact fatigue crack and wear of U75V heat-treated rail[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2015, 43(6): 877.
- [9] ZHOU Yu, YU Miao, JIANG Junnan. Research on the effect of rail hardness on rail wear and head check initiation [J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2545(2545): 56.
- [10] ARIZON J D, VERLINDEN O, DEHOMBREUX P. Prediction of wheel wear in urban railway transport; Comparison of existing models [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(9): 849.
- [11] TOMAS J, MATS B. Prediction of wheel wear for rail vehicles—Methodology and verification [M]. Netherlands: Springer, 2002.
- [12] 周宇,张杰,王少峰,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.
- [13] JIANG Yanyao. A fatigue criterion for general multiaxial loading [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2000, 23(1): 19.
- [14] SEHITOGLU H, JIANG Y. Fatigue and stress analyses of rolling contact: Materials engineering-mechanical behavior [R]. Illinois: College of Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign, 1992.