

文章编号:1005-0523(2020)02-0007-08

钢轨滚动接触疲劳多裂纹相互影响

周宇^{1,2}, 孙鼎人^{1,2}, 王树国³, 王璞³

(同济大学 1. 道路与交通工程教育部重点实验室; 2. 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:通过 X 射线计算机断层扫描得到曲线外轨轨距角-轨肩多条滚动接触疲劳裂纹的内部形态,采用栅格法得到真实裂纹的开口和尖端边界点,建立真实裂纹形态数学模型。以我国某重载线路通过总重约 62 MGT 时小半径曲线外轨轨肩-轨距角裂纹为例,分析了多条裂纹存在下的裂纹尖端应力强度因子变化及裂纹数量对其的影响。结果表明:裂纹最容易沿与轨顶纵向呈 $10^\circ \sim 30^\circ$ 的角度向钢轨内部扩展;不论何种条件, K 始终小于零,表明此处裂纹不受张开效应扩展;轮轨接触斑以作用在裂纹中部的方式通过裂纹区域时,裂纹尖端各点的应力强度因子 $K > 0$, K 沿裂纹尖端从轨距角一侧到轨顶中心一侧呈由正到负的趋势,表明此时裂纹的扩展形式主要由滑开型和撕开型复合而成,且裂纹在轨距角扩展的部分扩展较快;多裂纹的存在会促进裂纹的滑开和撕开效应,该促进作用随裂纹数量的增加而增强。多条裂纹的存在会使得裂纹尖端的应力强度因子增大,中间裂纹受到两侧裂纹的影响较明显。在进行裂纹扩展预测时,应至少考虑 3 条裂纹。

关键词:重载铁路;钢轨;滚动接触疲劳;裂纹扩展;X 射线计算机断层扫描

中图分类号:U213

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.002

当前,高硬度合金钢轨和热处理钢轨的使用,延缓了高频重载条件下钢轨的磨耗,但同时也使得钢轨表面滚动接触疲劳现象显著发生。这种表面疲劳裂纹在轮轨荷载和线路条件综合影响下萌生早、扩展快,导致钢轨疲劳寿命缩短^[1]。因此,准确描述钢轨滚动接触疲劳裂纹扩展特性对于预测裂纹扩展规律、指导养护维修非常必要和迫切。

现场观测发现轮轨荷载沿钢轨纵向的连续作用,钢轨表面疲劳裂纹以多裂纹的形式存在^[2]。郑欣平等^[3]、黄明利等^[4]和潘鹏志等^[5]在研究岩石中裂纹扩展时发现多裂纹间有相互作用。同理,钢轨表面的多条裂纹也会在轮轨荷载下相互影响,需要确定其相互影响的特征。在这方面,Dubourg 等^[6]采用数值方法,Dhanasekar 等^[7]采用半解析法,Fletcher^[8]采用边界元法分别建立了钢轨表面接触疲劳多裂纹模型,分析了多条裂纹尖端处的 K 和 K 型应力强度因子值的变化;李伟,金学松^[9]等利用热机耦合有限元法,分析了轮轨滑动接触时多裂纹相互作用和表面裂纹数量对钢轨疲劳裂纹扩展特性的影响。但上述方法的裂纹模型未考虑裂纹的真实形态。为进行裂纹真实形态建模,传统的电子显微镜观测^[10],交变磁场检测^[11],金相分析^[12]等技术存在切割破坏裂纹、精度不高和无法反映裂纹空间三维形态等问题,已经不能满足要求,而 X 射线计算机断层扫描技术(CT 扫描)能够在不破坏完整裂纹的前提下,扫描出裂纹真实三维形态特别是钢轨内部裂纹的尖端形态,已经用于钢轨裂纹空间三维形态的重构、建模^[13]和单裂纹扩展研究中^[14]。

本文在 CT 扫描的曲线外轨轨距角-轨肩滚动接触疲劳裂纹真实形态数据的基础上,采用栅格法提取裂纹尖端和开口的边界点,形成裂纹真实三维数学模型;建立含多条真实裂纹的三维钢轨有限元模型,分析不同的轮轨接触位置、裂纹数量对裂纹尖端应力强度因子的影响,研究多条裂纹存在下的裂纹相互影响特征,为准确预测裂纹扩展提供依据。

收稿日期:2019-10-08

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大课题(N2018G042)

作者简介:孙鼎人(1995—),男,硕士研究生,研究方向为钢轨伤损和轨道结构。

通讯作者:周宇(1977—),男,副教授,博士,研究方向为轨道管理和轨道养护维修技术。

1 钢轨滚动接触疲劳裂纹建模

1.1 真实裂纹扫描和提取

考虑到疲劳裂纹在钢轨内部呈浅层、近平面状分布的特征,以及 CT 扫描设备的精度与钢轨材料致密等特点,按照图 1 所示的方法制备试块,以包含完整的轨距角-轨肩疲劳裂纹^[13]。对我国某重载铁路 600 m 半径曲线、通过总重约 62 MGT 时的外轨进行取样,得到其轨距角-轨肩试块(图 1 中的试块 1')和滚动接触疲劳裂纹点云数据如图 1 所示。

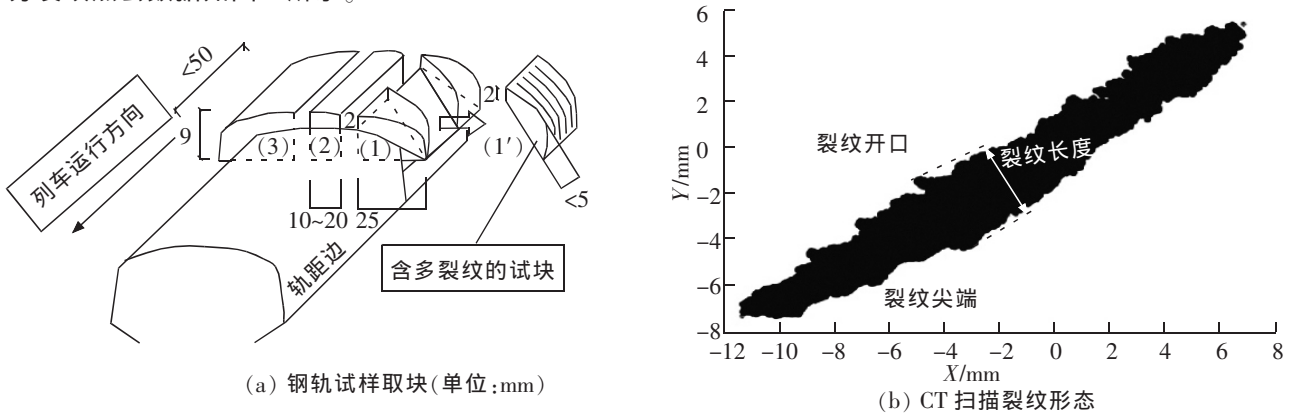


图 1 钢轨试块取样及 CT 扫描裂纹形态示意图

Fig.1 Specimen of rail & 3D geometry of cracks obtained by CT scanning

1.2 裂纹形态重构

从图 1 可以看出,钢轨轨距角-轨肩的疲劳裂纹呈近平面状的空间扩展形态,因此将扫描得到的裂纹点云数据进行平面化处理,得到裂纹空间平面点集,之后进行裂纹开口和尖端边界点的识别和尖端曲线的拟合。

为尽可能准确地还原裂纹开口和尖端形状,采用栅格法对其边界点进行识别,方法如下:

- 1) 遍历平面化后的裂纹点集,得到包含所有点的最小矩形边界;
- 2) 将矩形平均分成 n 个正方形栅格,栅格的边长为

$$L_c = \sqrt{(X_{\max} - X_{\min})(Y_{\max} - Y_{\min})/n} \quad (1)$$

式中: $X_{\max}, X_{\min}, Y_{\max}, Y_{\min}$ 分别为正方形栅格中裂纹点集在 x 轴, y 轴上的最大值和最小值。

3) 在 x 轴方向上 $X_k \sim X_{k+L_c}$ 范围内,找出点集的 Y_{\max} 与 Y_{\min} ,则点 $P_1(x_1, Y_{\min}), P_2(x_2, Y_{\max})$ 为该范围内的裂纹的边界点;

4) 以此类推,找出 $X_{\min} \sim X_{\max}$ 范围内的所有边界点。

采用三次 B 样条曲线对裂纹尖端和开口的边界点进行拟合,这样就得到了真实裂纹形态的空间平面数据点集。其中定义裂纹开口各边界点与裂纹尖端各边界点沿裂纹面扩展方向的最大平面直线距离为裂纹长度。

1.3 含多条裂纹的三维钢轨有限元模型

建立 20 m 的长钢轨全局有限元模型,并计算 1 节车辆 4 个车轮荷载作用下的钢轨位移。其中扣件系统简化为弹簧,并折算对应的刚度及阻尼;轨枕、道床及基础对钢轨的支反作用简化为弹簧底部接地约束;车轮荷载以集中力的方式施加在全局模型中。

在全局模型中截取 20 cm 钢轨作为子模型,对子模型中轮轨接触区域及裂纹所处位置进行网格加密。子模型的位移约束为上述全局模型计算的钢轨位移;轮轨接触荷载以接触斑和接触斑内法向和切向力的形式施加。

将 1.2 节得到的真实形态的裂纹点集生成壳单元面片,按照其所在的空间位置及裂纹间距^[15]插入钢轨

无影响, $\lambda_i < 0$ 代表多裂纹间的相互影响抑制裂纹扩展; 若 $K_i < 0$ 则相反。

2.3 分析方法

- 1) SIMPACK 车辆-轨道耦合动力学模型计算得到 1 节车辆一侧的 4 个车轮作用在外轨上的轮轨力、接触斑位置、轮对横移量等, 并施加到钢轨三维全局有限元模型中, 计算出钢轨位移;
- 2) CONTACT 和 FASTSIM 计算接触斑内滑动-黏着区分布、接触斑法向和切向应力分布;
- 3) 将上述接触斑蠕滑、应力和位移约束施加到含多条裂纹的钢轨有限元模型中, 按式(2)~式(4)分别计算不同时刻下的裂纹尖端各点的应力强度因子;
- 4) 根据应力强度因子和应力的情况, 检验含多条裂纹的钢轨三维有限元模型;
- 5) 根据公式(5)计算多条裂纹尖端各点的应力强度因子关系。

3 仿真参数

以我国某重载线路 600 m 半径曲线外轨为例, 车辆为 C70 货车, 轴重 23 t, LM 磨耗型车轮踏面, 运行速度为 80 km/h。钢轨为标准 75 kg/m U75V 热处理钢轨, 轨底坡 1:40, 钢轨材料的泊松比 0.3, 屈服强度 1 064 MPa, 轮轨间摩擦系数为 0.3。

根据第 1 节的方法得到该线路条件下通过总重 62 MGT 时外轨轨距角-轨肩的多条疲劳裂纹真实形态数学模型, 现场观测到这些裂纹在钢轨表面间距平均值约为 2 mm, 由此得到表 1 所示的 3 种仿真工况。

表 1 多条裂纹的模型参数
Tab.1 Parameters of cracks modeling

工况	裂纹数量/条	裂纹长度平均值/mm	裂纹间距平均值/mm
1	1	5	2
2	3	5	2
3	5	5	2

4 仿真结果分析

4.1 模型验证

以工况 2 中 3 裂纹为例, 通过改变裂纹面与轨顶面沿行车方向(钢轨纵向)的夹角, 计算相应的裂纹尖端应力强度因子, 并提取 T1~T5 时刻中间裂纹尖端的 Von Mises 应力最大值和尖端应力强度因子最大值, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 裂纹角度在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 时, 裂纹尖端区域的最大应力随角度的增大而增大; 裂纹角度在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 时, 裂纹尖端区域的最大应力随角度的增大而减小。应力强度因子 K 的最大值皆为负值, 表明图 2 所示的接触斑荷载作用下, 裂纹不发生张开型扩展。裂纹角度在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 时, 裂纹尖端应力强度因子 K , K 最大值随角度的增大而增大; 裂纹角度在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 时, 裂纹尖端应力强度因子 K , K 最大值随角度的增大而减小。当裂纹角度为 $10^\circ \sim 30^\circ$ 时, 裂纹尖端区域最大 Von Mises 应力和 K , K 最大值较其他角度大, 即该角度范围内裂纹最易发生扩展。

对曲线外轨轨距角-轨肩裂纹进行现场取样和实验室显微观测也发现: 裂纹扩展角度范围在 $10.8^\circ \sim 29.4^\circ$ ^[2], 与本文计算出的裂纹容易扩展的角度基本相同, 验证了本文所建立的多条裂纹扩展模型在裂纹扩展分析方面是可信的。

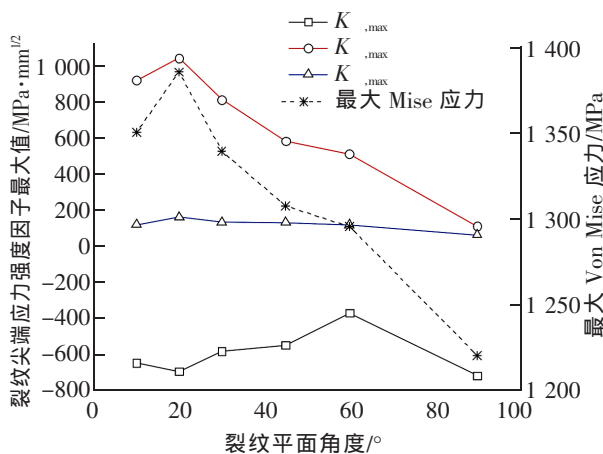


图 3 不同裂纹角度下 Von Mises 应力和裂纹尖端应力强度因子

Fig.3 Von Mises stress and stress intensity factors at different angles between crack and longitudinal direction

4.2 裂纹数量对扩展的影响分析

对工况 1,2,3 里中间裂纹尖端各点的应力强度因子进行分析,分别取接触斑中心位于中间裂纹的开口中心处(T3 时刻)时的结果,如图 4 所示。由图 3 可知,各个时刻的 K 始终小于零,表明这种荷载环境下,裂纹不发生张开型扩展,因此下面主要讨论尖端应力强度因子 K , K 。

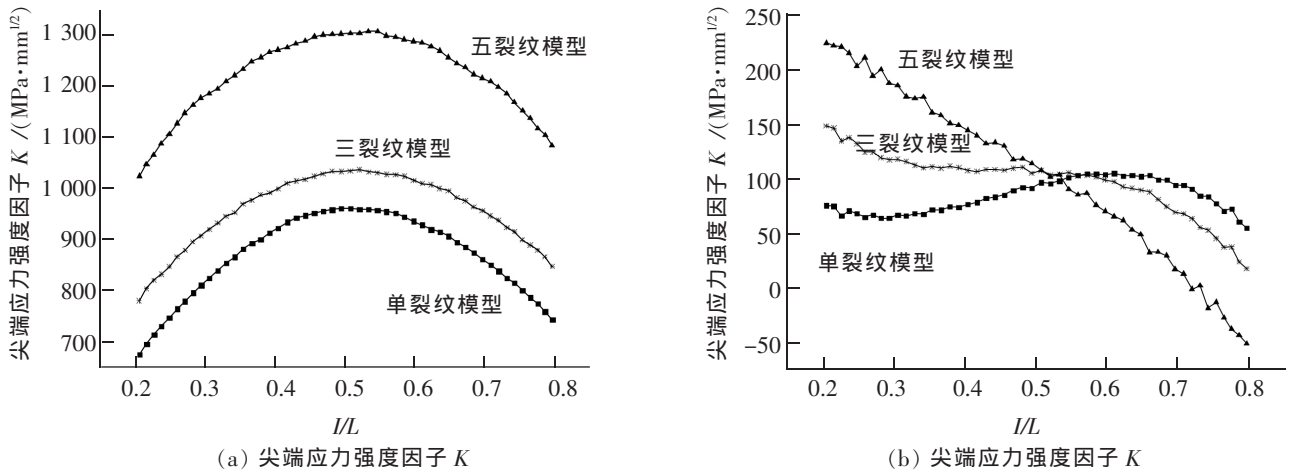


图 4 不同裂纹数量下的裂纹尖端应力强度因子

Fig.4 Stress intensity factors at crack tip when number of HCs varies

由图 1 可知,CT 扫描和拟合得到的真实裂纹尖端并非理想圆弧形,且轮轨接触荷载作用在裂纹上还受到钢轨轨距角-轨肩廓形影响,因此图 4 所显示的裂纹尖端各点的应力强度因子沿真实裂纹的尖端呈一定的波动,即裂纹尖端各点的扩展速率不同。

从图 4(a)进一步看出,各工况下, K 沿裂纹尖端从轨距角一侧($l/L=0$)向轨顶中心一侧($l/L=1$)增加。随着裂纹数量的增多而 K 逐渐增大,即裂纹的滑开效应越强。从图 4(b)可以看出,各工况下, K 以裂纹中心($l/L=0.5$)为界,呈中心对称。随着裂纹数量的增多,靠近轨距角一侧($l/L<0.5$)的 K 增加,而靠近轨顶中心一侧($l/L>0.5$)的 K 降低,即裂纹靠近轨距角一侧的撕开效应加强,而靠近轨顶中心一侧的撕开效应减弱。

相比单裂纹工况,3 条裂纹工况靠近轨距角一侧的裂纹尖端应力强度因子 K 和 K 最大值分别增大大约 15%和 50%,5 条裂纹工况靠近轨距角一侧的 K 和 K 最大值分别增大大约 80%和 180%。

根据式(5)取不同裂纹数量工况里中间裂纹的尖端应力强度因子最大值,计算不同裂纹数量下应力强度因子影响系数 λ ,如图 5 所示。

由图 5 可知,对于 3 裂纹和 5 裂纹工况,均有 $\lambda >0$,且 5 裂纹工况的 λ 更大,但如图 3 所示,由于 K 为负,因此多裂纹的存在会抑制裂纹的张开效应,而且裂纹数量越多,对裂纹张开的抑制作用越强;同理, λ , $\lambda >0$,且 5 裂纹工况的 λ , λ 也更大,表明多裂纹的存在会促进裂纹的滑开效应和撕开效应,且裂纹数量越多,对裂纹的滑开和撕开的促进作用越强。

由此可见,多裂纹间的相互影响会抑制裂纹的张开效应,但会促进裂纹的滑开和撕开效应,并且这种抑制或促进作用均随裂纹数量的增加而增强。

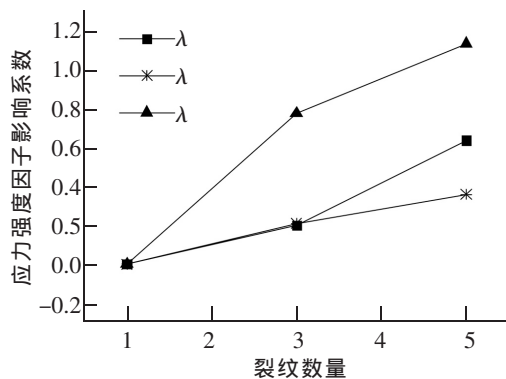


图 5 不同裂纹数量下应力强度因子影响系数

Fig.5 Influence coefficient of stress intensity factors when number of HCs varies

4.3 不同时刻裂纹尖端应力强度因子变化分析

提取工况 2 在 T1~T5 时 3 条裂纹各自的尖端应力强度因子最大值,如图 6 所示。

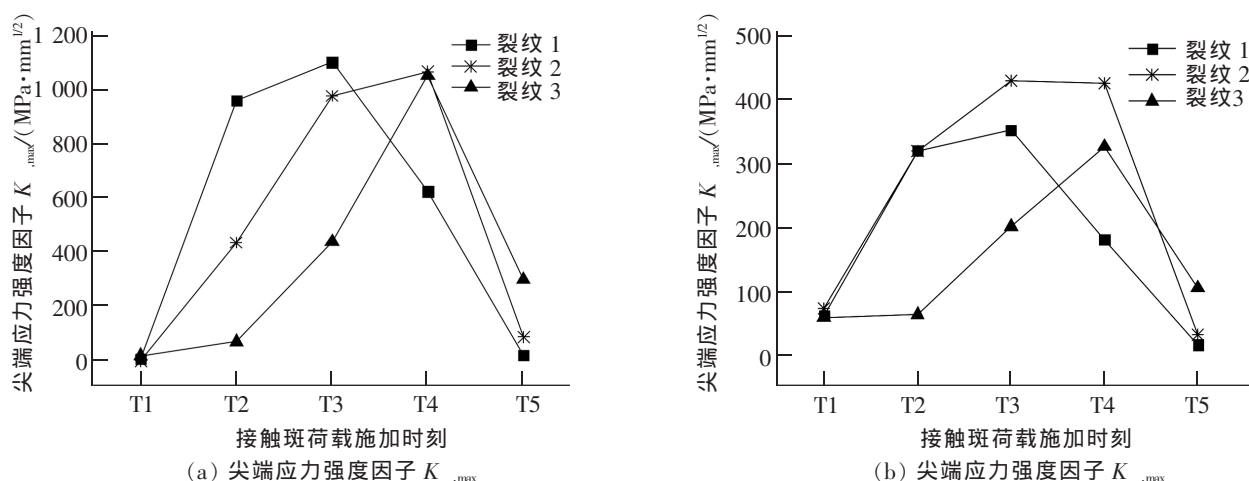


图 6 不同时刻裂纹尖端应力强度因子

Fig.6 Stress intensity factors at crack tip during T1~T5

由图 6 可知,由于 3 条裂纹在不同时刻受到接触斑的作用,裂纹 1,2,3 的 K_{max} 和 K_{min} 随接触斑的移动依次变化。3 条裂纹的 K_{max} , K_{min} 都是随着接触斑接近和离开该裂纹开口区域呈先增大后减小的趋势。裂纹 1 在 T2 和 T3 时刻、裂纹 2 在 T3 和 T4 时刻、裂纹 3 在 T4 时刻 K_{max} 和 K_{min} 较其他时刻大,这些时刻均为接触斑中心附近位于该裂纹的开口时,对应的裂纹尖端应力强度因子处于最大值。

进一步将接触斑中心分别位于裂纹 1、裂纹 2、裂纹 3 开口中心处时,该处裂纹的尖端应力强度因子的最大值与钢轨只含单条裂纹(工况 1)时,接触斑位于裂纹开口中心时裂纹尖端应力强度因子最大值进行对比,并计算 3 条裂纹工况与单条裂纹工况时, K_{max} , K_{min} 最大值的增量 ΔK_{max} , ΔK_{min} , 如表 2 所示。

表 2 单裂纹工况和三裂纹工况应力强度因子

Tab.2 Stress intensity factors of Condition 1 and 2

模型	裂纹编号	K_{max}	K_{min}	ΔK_{max}	ΔK_{min}
单裂纹	裂纹 1	953	117	-	-
	裂纹 1	957	121	4	4
三裂纹	裂纹 2	1 030	147	77	30
	裂纹 3	1 025	125	72	8

由表 2 可知,当接触斑作用于裂纹 1,2,3 开口处时,相比单裂纹工况,裂纹 1 的 K_{max} 和 K_{min} 分别增大了 0.4%和 3%,裂纹 2 的 K_{max} 和 K_{min} 分别增大了 8%和 26%,裂纹 3 的 K_{max} 和 K_{min} 分别增大了 8%和 7%,表明多条裂纹的存在会使得裂纹尖端的应力强度因子增大,且裂纹 2 的应力强度因子最大值增量最大,即中间裂纹受到两侧裂纹的影响较明显,裂纹 3 次之,裂纹 1 受到前方两条裂纹的影响最小,因此研究多条裂纹相互影响和扩展时,应至少考虑 3 条裂纹。

5 结论

1) 当裂纹面与钢轨纵向夹角在 10°~30°时,裂纹尖端区域的 Von Mises 应力和尖端应力强度因子 K_{max} , K_{min} 达到最大值,与现场观测的裂纹扩展角度基本一致,即该角度范围内裂纹最易发生扩展。

2) 在各工况、各时刻的荷载作用下, K_{max} 始终小于零,表明这种情况下裂纹不受张开效应而扩展。

3) 真实裂纹尖端并非理想圆弧形,且轮轨接触荷载作用在裂纹上还受到钢轨轨距角-轨肩廓形影

响,因此裂纹尖端各点的应力强度因子沿真实裂纹的尖端呈一定的波动,使得裂纹尖端各点的扩展速率不同。

4) 接触斑作用于裂纹中点的情况下,随着裂纹数量的增多,裂纹尖端应力强度因子 K 增大, K 以裂纹尖端中点为分界点,靠近轨距角一侧的增加,而靠近轨顶中心一侧的降低。说明裂纹数量的增加使得裂纹主要因滑开和撕开效应而扩展,这种效应随着裂纹数量的增多而增强。通过现场观测发现,裂纹最早出现在钢轨距角一轨肩处,并在轮轨接触荷载作用下迅速扩展并形成裂纹群。在上述结论下,延缓轨距角一轨肩处钢轨裂纹的萌生和扩展,应优化轨轨关系,降低该处钢轨廓形,避免这里受到过多轮轨接触。

5) 当接触斑接近裂纹开口时,对应裂纹的尖端应力强度因子逐渐增大;当接触斑远离裂纹开口时,对应裂纹的尖端应力强度因子逐渐降低。当接触斑中心附近位于裂纹开口时,对应的裂纹尖端应力强度因子达到最大。

6) 多条裂纹的存在会使得裂纹尖端的应力强度因子增大,中间裂纹受到两侧裂纹的影响较明显。考虑到仿真计算时间和多裂纹存在下对裂纹尖端应力强度因子的影响,在进行裂纹扩展预测时应至少考虑 3 条裂纹。

7) 基于以上结论,为延缓钢轨裂纹的萌生与扩展,建议在钢轨裂纹出现在数量较少时对钢轨进行预防性打磨,尤其是注意打磨轨距角处;同时,通过改善钢轨材质,改进钢轨制造和热处理等方法,提高钢轨硬度,疲劳韧性。

参考文献:

- [1] ZHOU Y, WANG S F, WANG T Y, 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): 68-77.
- [2] 周宇, 张杰, 杨新文, 等. U75V 热处理钢轨滚动接触疲劳裂纹和磨损试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(6): 877-881.
- [3] 郑欣平, 曹平, 蒲成志. 类岩材料多裂隙体在单轴压缩下的数值模拟[J]. *科学通报*, 2012, 57(13): 1106-1111.
- [4] 黄明利, 冯夏庭, 王水林. 多裂纹在不同岩石介质中的扩展贯通机制分析[J]. *岩土力学*, 2002, 23(2): 142-146.
- [5] 潘鹏志, 下梧秀, 冯夏庭, 等. 预制裂纹几何与材料属性对岩石裂纹扩展的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1882-1889.
- [6] DUBOURG M C, KALKER J J. Crack behaviour under rolling contact fatigue[C]//Proceeding of the International Conference on Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation. Kluwer Academic Pub, 1992: 373-384.
- [7] DHANASEKAR M, HAN J J, QIN Q H. Interaction of surface and internal cracks in railhead[J]. *Computer Assisted Mechanics & Engineering Sciences*, 2007, 14(1): 79-89.
- [8] FLETCHER D I, HYDE P, KAPOOR A. Growth of multiple rolling contact fatigue cracks driven by rail bending modeled using a boundary element technique[J]. *Proceedings of IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2004, 218(F3): 243-253.
- [9] 李伟, 温泽峰, 金学松, 等. 轮轨摩擦接触下钢轨多裂纹相互作用研究[J]. *工程力学*, 2012(11): 295-301.
- [10] CASEY J, JOHAN A, LARS H. 3D characterization of RCF crack networks[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Contact Mechanics, CM2015, 2015.
- [11] GARMHAM J E, FLETCHER D I, DAVIS C L, et al. Visualization and modelling to understand rail rolling contact fatigue cracks in three dimensions[J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2011, 225(2): 165-178.
- [12] NICHOLSON G L, KOSTRYZHEV A G, HAO X J, et al. Modelling and experimental measurements of idealized and light-moderate RCF cracks in rails using an ACFM sensor[J]. *NDT&E International*, 2011(44): 427-437.
- [13] 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): 21-31.
- [14] 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, 54(4): 158-166.

- [15] 姜俊楠. 基于三维重构和轮轨蠕滑的钢轨疲劳裂纹扩展分析[D]. 上海: 同济大学, 2015.
- [16] 贾学明, 王启智. 三维断裂分析软件 FRANC3D[J]. 计算力学学报, 2004(6): 764-768.
- [17] KALKER J J. Survey of wheel-rail rolling contact theory[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1979, 8(4): 317-358.
- [18] KALKER J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact[J]. *Vehicle system dynamics*, 1982, 11(1): 1-13.
- [19] 程新, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] 张澎湃. 动车组车轮疲劳性能数值仿真和评定方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- [21] 石晓玲, 李强, 薛海, 等. 高速列车锻钢制动盘多裂纹间作用机制研究[J]. *铁道学报*, 2016, 38(3): 36-41.
- [22] 周宇, 黄旭炜, 张东风, 等. 重载铁路车辆轴重对钢轨疲劳裂纹萌生和磨损发展的影响[J]. *华东交通大学学报*, 2019, 36(4): 8-16.

Interactive Influence on Multiple Head Checks Propagation in Rail

Zhou Yu^{1,2}, Sun Dingren^{1,2}, Wang Shuguo³, Wang Pu³

(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 Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Head checks (HCs) at rail gauge corner and shoulder were inspected by X-ray computed tomography scan technology (CT scanning). The boundary points at the mouth and tip of the real HCs were obtained by grid method to establish the numerical model of the real HCs. Taking the HCs at the gauge corner and shoulder of the high rail in a heavy-haul railway sharp curve with traffic gross tonnage of about 62 MGT as an example, this study analyzed the transformation of the stress intensity factors (SIF) at the tips of multiple HCs and the effect of the crack number on them. The results show that the HCs are more likely to extend with an orientation of 10° – 30° with respect to rail longitudinal direction, always less than 0 under any condition, indicating that the crack is not extended by Model I (opening). HCs are greater than 0, and the trend of is reduced from positive to negative along rail gauge corner to crown when contact patches pass by the crack central mouth, which shows that the HCs is mainly composed of Model II (sliding) and III (tearing). The existence of multiple HCs will promote their propagating as Model II and III, and the influence will be enhanced with the increase of crack number. Compared with the single crack, SIFs at the tips of multiple cracks will increase, and the SIFs at the tip of the middle crack will be greatly influenced by adjacent cracks. Therefore, at least 3 cracks are recommended in crack propagation modeling for crack prediction.

Key words: heavy-haul railway; rail; rolling contact fatigue; crack propagation; CT scanning