

钢轨表面裂纹扩展路径的数值模拟

杨鸿达, 张言库, 李孝滔, 李 煦, 江晓禹

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

摘 要:通过采用有限元分析软件 ANSYS 对钢轨表面裂纹扩展路径进行模拟,在主裂纹尖端微小区域虚设出不同角度的次裂纹来计算出钢轨表面斜裂纹的扩展路径。仿真结果表明模拟的裂纹路径与实验得到的裂纹路径基本吻合。由此可知,用虚设的次裂纹计算裂纹的扩展方向是可行的。

关键词:裂纹扩展;主裂纹;次裂纹;ANSYS

中图分类号:TB115

文献标志码:A

引 言

由于高速铁路和重载铁路的快速发展,轮轨的损伤破坏问题已越来越普遍。我国每年因为钢轨的损伤维护甚至更换的费用达到了 80 亿,产生了高昂的铁路维护成本,这不仅加大了投入的成本,更直接威胁到列车的行驶安全^[1]。例如,2002 年,广深线曲线半径为 1000 m 的上股钢轨,先后有两处由踏面斜裂纹导致的钢轨横向断裂^[2]。

国内外的学者对于复杂载荷作用下的裂纹扩展问题,采用的是在裂纹尖端建立一段相对于主裂纹无穷小的次裂纹,认为裂纹的扩展方向为:次裂纹 K_I 最大方向, ΔK_I 最大的方向或者 ΔK_{eff} 最大的方向等。很多研究者用这种方法来判断裂纹的扩展方向^[3-8]。本文在主裂纹尖端区域虚设出不同方向的次裂纹,认为裂纹会朝等效应力强度因子幅值最大的方向扩展的判据,运用有限元软件 ANSYS 模拟计算出整条主裂纹的扩展路径,通过与实际钢轨裂纹形貌对比,结果基本吻合,验证了该方法的合理性。

1 轮轨接触模型

陈朝阳等^[9]测量统计了多组剥离掉块样品的裂纹

扩展角度,得到裂纹的初始扩展角度大部分都在 $30^\circ \sim 65^\circ$ 之间。因此本次试验研究裂纹的初始扩展角度设为 30° 。模型如图 1 所示。

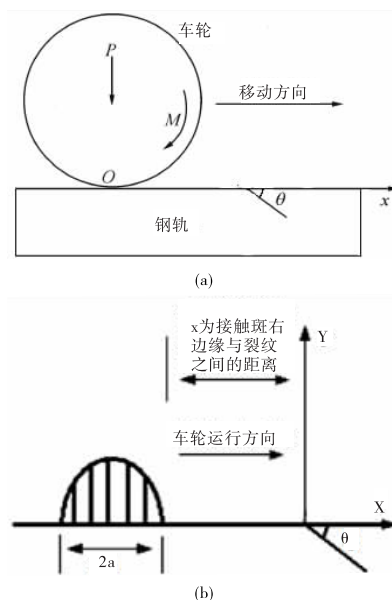


图 1 轮轨接触模型

2 有限元模型

因我国铁路钢轨基本采用 60 kg/m 钢轨,其用材为

收稿日期:2016-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(11472230)

作者简介:杨鸿达(1992-),男,湖南邵阳人,硕士生,主要从事疲劳与损伤方面的研究,(E-mail)2523047589@qq.com

U71Mn 钢。U71Mn 钢的力学性能^[10]见表 1。

表 1 U71Mn 钢的力学性能

弹性模量	泊松比	屈服极限
210 GPa	0.3	550 MPa
切向模量	门槛值	断裂韧性
21 GPa	2.2 MPa·m ^{0.5}	47 MPa·m ^{0.5}

有限元模型高为 176 mm、长为 1 m、裂纹长度为 100 μm,单元类型为奇异性单元 PLANE183,钢轨整体有限元模型和裂纹尖端有限元模型如图 2 与图 3 所示。

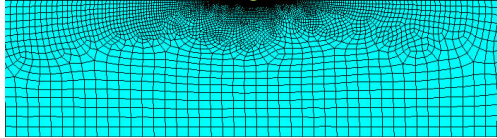


图 2 表面含次裂纹的钢轨有限元模型

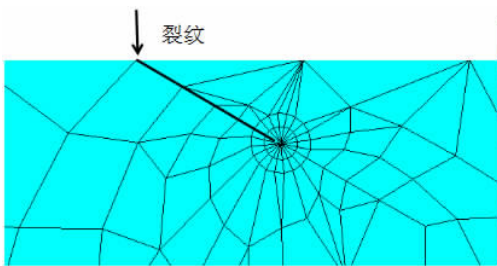


图 3 初始裂纹尖端的有限元模型

3 结果分析

3.1 裂纹扩展的速率

车轮在钢轨表面做纯滚动时,考虑主裂纹尖端微小区域的各个不同方向的次裂纹,可计算出各个不同方向上次裂纹的应力强度因子。

$$\bar{k}_{1_0} = \lim_{a \rightarrow 0^+} \bar{k}_1 = \frac{1}{2} \cos(\theta_0/2) [k_1(1 + \cos\theta_0) - 3k_2 \sin\theta_0] \quad (1)$$

$$\bar{k}_{2_0} = \lim_{a \rightarrow 0^+} \bar{k}_2 = \frac{1}{2} \cos(\theta_0/2) [k_1(1 + \cos\theta_0) - 3k_2 \sin\theta_0] \quad (2)$$

其中, k_1 、 k_2 分别表示主裂纹的 I 型和 II 型裂纹的应力强度因子; \bar{k}_{1_0} 与 \bar{k}_{2_0} 分别表示次裂纹的 I 型和 II 型裂纹的应力强度因子。

应力强度因子幅值:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (3)$$

式中, ΔK 决定了裂纹的扩展方向。裂纹扩展速率可根据 Paris 公式计算得到^[12]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

其中, $\frac{da}{dN}$ 为疲劳裂纹的扩展速率; C 和 m 是由材料材质

所决定的常数; ΔK 为应力强度因子幅值。

由于轮轨接触疲劳裂纹是张开型与滑开型同时存在的复合型裂纹,所以不能由单一判据来作为断裂判断的依据,需根据复合型裂纹的判定依据,对于 I 型与 II 型同时存在的复合型裂纹,可用等效应力强度因子 ΔK_{eff} 替代 ΔK_I 与 ΔK_{II} 共同作用效果^[13]:

$$\Delta K_{eff} = \sqrt{(\Delta K_I^2 + 2 \Delta K_{II}^2)} \quad (5)$$

3.2 通过次裂纹判断钢轨表面主裂纹扩展路径

研究车速为 350 km/h,轴重为 5 t 的车轮在钢轨表面做纯滚动时,初始裂纹的角度为 30°,长为 100 μm。列车在钢轨表面运行时,钢轨在车轮的挤压效果下会使接触斑边缘附近的区域产生拉伸力,从而使次裂纹产生张开位移,在车轮接近裂纹位置及车轮滚过裂纹的某一位置时应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的值均明显增大,出现两个峰值,如图 4 所示。其中 x 表示接触斑右边缘与裂纹尖端的距离。

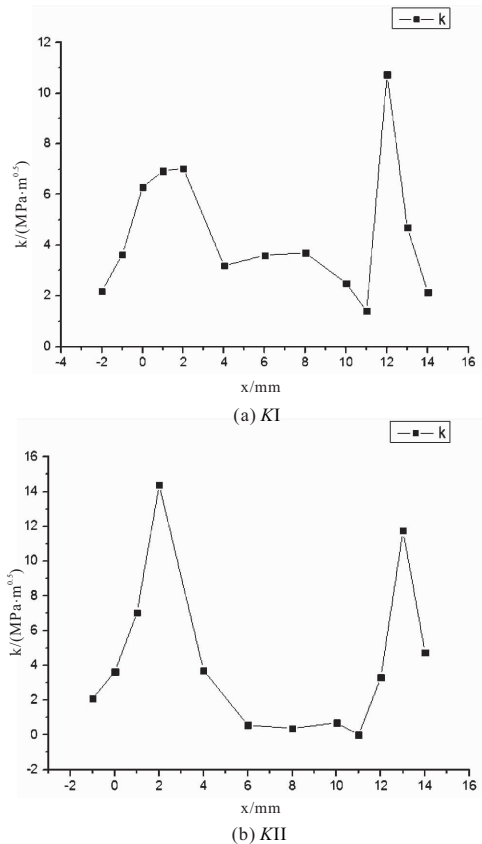


图 4 车轮压过裂纹的过程中应力强度因子的变化

在初始裂纹尖端建立次裂纹模型, X 轴正向表示行车方向, Y 轴正向代表钢轨纵深方向, \bar{a} 的值代表初始裂纹的长度 ($\bar{a} = 0.1 \text{ mm}$), θ 表示假设的次裂纹与主裂纹的夹角,初始裂纹与钢轨表面呈 θ_0 夹角 ($\theta_0 = 30^\circ$),如图 5 所示。

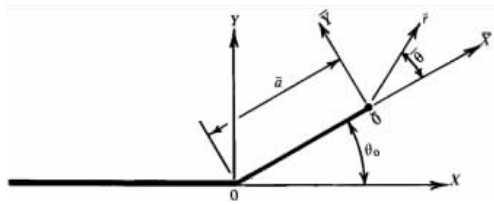


图5 在主裂纹尖端建立的次裂纹模型

在初始裂纹尖端区域虚设出次裂纹,由公式(1)和公式(2)可计算得到车轮滚过斜裂纹的过程中,裂纹尖端假设的各个不同方向的次裂纹的应力强度因子,再通过公式(4)和公式(5)得到的次裂纹在各个方向的等效应力强度因子 ΔK_{eff} 最大值,如图6所示。

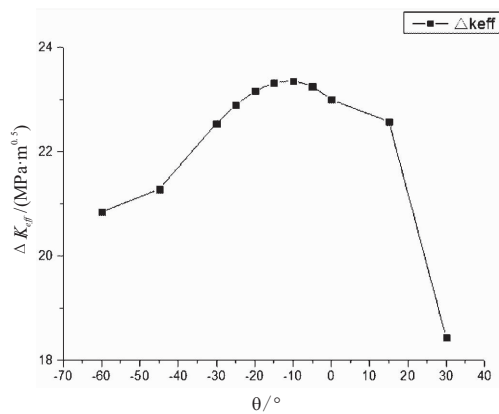


图6 虚设的次裂纹在不同方向的 ΔK_{eff} 最大值

从图6中可看出,微裂纹在 -10° 时等效应力强度因子 ΔK_{eff} 最大,最大值为 $23.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$,所以,主裂纹的下一段扩展方向为 40° 。之后每段方向都可依次得到,其主裂纹的扩展路径见表2。

表2 主裂纹长度、扩展角度以及等效应力强度因子幅值最大值

裂纹长度/ μm	扩展角度/ $^\circ$	$\Delta K_{eff} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$
100	30	
200	40	23.4
300	55	44.5
400	65	56.5
500	75	56.2
600	95	60.0
700	105	60.2
800	105	58.9
900	105	56.3
1000	105	59.3
1100	105	59.1
1200	105	57.3

为了更清楚地描述随着裂纹长度增加,主裂纹扩展趋势的变化情况,探究主裂纹的扩展规律,绘制出了不同长度时的主裂纹扩展速率最快的方向,如图7所示。从图7中可知,当裂纹长度 $a < 0.6 \text{ mm}$ 时,主裂纹的扩

展角度绕上一段顺时针旋转基本在 15° 左右,当裂纹长度 $a \geq 0.7 \text{ mm}$ 时,主裂纹基本沿着上一段方向继续扩展。

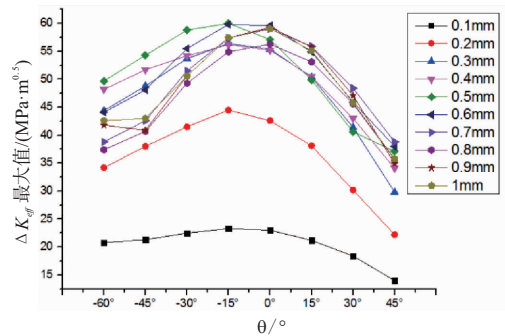
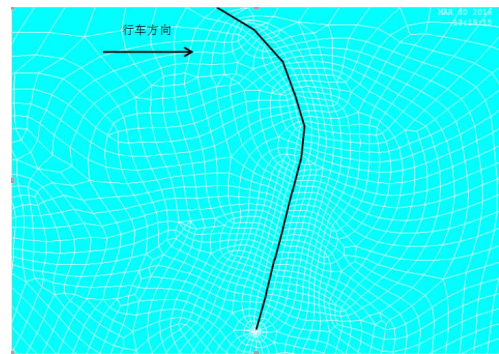
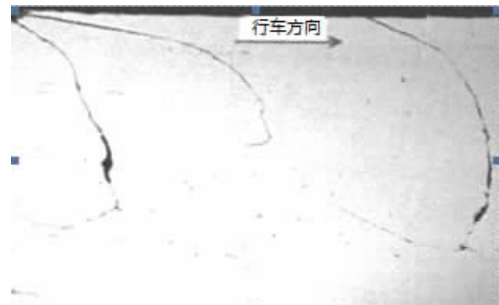


图7 不同长度的次裂纹在各个方向上的最大扩展速率

综合表2与图7可知,每一段主裂纹扩展方向都比较平缓,没有出现较大幅度的波动。通过有限元数值模拟得到整条裂纹的扩展路径如图8所示。由图8可知,模拟结果与陈朝阳^[9]等对朔黄线剥离掉块样品纵断面上的裂纹扩展路径的实物图片比较吻合。



(a) 裂纹长度为1200 mm



(b) 朔黄线钢轨裂纹形貌^[9]

图8 模拟的裂纹扩展路径与实验测得的裂纹扩展路径对比

4 结束语

本文研究 U71Mn 钢主裂纹的扩展路径,通过在主裂纹尖端微小区域虚设的次裂纹,并根据等效应力强度

因子幅值最大的方向扩展的判据,通过有限元数值模拟了一条比较平滑的裂纹扩展路径,与实际得到的钢轨表面的裂纹扩展结果比较吻合,因此,通过次裂纹方向扩展的判据得出主裂纹扩展路径的方法是可行的。

参考文献:

- [1] 金学松,温泽峰,张卫华,等.世界铁路发展状况及其关键力学问题[J].工程力学,2004,6(S1):90-102.
- [2] 刘学文,邹定强,邢丽贤,等.钢轨踏面斜裂纹损伤原因及对策的研究[J].中国铁道科学,2004,25(2):82-87.
- [3] DUBOURG M C, LAMACQ V. A predictive rolling contact fatigue crack growth model: onset of branching, direction, and growth-role of dry and lubricated conditions on crack patterns[J]. Journal of Tribology, 2002, 124(4):680-688.
- [4] HOURLIER F, PINEAU A. Propagation of fatigue crack under polymodal loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2007, 5(4):287-302.
- [5] BAIETTO M C, PIERRES E, GRAVOUIL A, et al. Fretting fatigue crack growth simulation based on a combined experimental and XFEM strategy[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 47:31-43.
- [6] TROLLE B, BAIETTO M C, GRAVOUIL A, et al. 2D fatigue crack propagation in rails taking into account actual plastic stresses[J]. Engineering Fracture mechanics, 2014, 123:163-181.
- [7] BROUZOU LIS J, EKH M. Crack propagation in rails under rolling contact fatigue loading conditions based on material forces[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 45(3):98-105.
- [8] BAIETTO M C, PIERRES E, GRAVOUIL A. A multi-model X-FEM strategy dedicated to frictional crack growth under cyclic fretting fatigue loadings[J]. International Journal of Solids & Structures, 2010, 47(10):1405-1423.
- [9] 陈朝阳,张银华,刘丰庆,等.朔黄铁路曲线股热处理钢轨剥离损伤成因分析[J].中国铁道科学,2008, 29(4):28-34.
- [10] 何越磊,石嵘,刘志刚.城市轨道交通钢轨损伤检测技术[M].北京:中国铁道出版社,2010.
- [11] NUISMER R J. An energy release rate criterion for mixed mode fracture[J]. International Journal of Fracture, 1975, 11(2):245-250.
- [12] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4):528-534.
- [13] LUCHT T. Finite element analysis of three dimensional crack growth by the use of a boundary element sub model[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(14): 2148-2162.

Numerical Simulation of Crack Propagation Path of Rail Surface

YANG Hongda, ZHANG Yanku, LI Xiaotao, LI Xu, JIANG Xiaoyu

(School of Mechanics & Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The finite element analysis software ANSYS is used to simulate the rail with surface crack growth. In the small region of the main crack tip, the crack of different angle is assumed to calculate the propagation path of the crack on the rail surface. As a result, the simulation of the crack path is basically consistent with the experimental crack path. In conclusion, it is reasonable to calculate the main crack propagation direction by dummy branch crack.

Key words: crack propagation; the main crack; the branch crack; ANSYS