

文章编号: 1005-0523(2009)02-0001-07

钢轨踏面疲劳裂纹扩展行为分析

王建西, 许玉德, 曹 亮

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:根据试验观察的裂纹尖端特征,建立了钝形疲劳裂纹模型,以裂纹尖端位移为断裂参量,分析了 U75V 钢弹塑性情况下踏面疲劳裂纹扩展特性。结果显示:踏面疲劳裂纹尖端有较大的塑性区,应采用弹塑性断裂力学理论分析踏面疲劳裂纹的扩展行为;裂纹尖端滑动位移受轮轨力、轮轨摩擦系数和裂纹面摩擦系数影响,其中裂纹面摩擦系数对裂纹尖端滑动位移影响最大。裂纹尖端张开位移主要受轮轨力和轮轨摩擦系数影响。利用塑性复合系数分析踏面疲劳裂纹扩展特性,认为踏面疲劳裂纹主要以 I /II 复合型扩展方式扩展。

关键词:钢轨;弹塑性;钝形裂纹;裂纹尖端位移;复合裂纹

中图分类号: U213.42

文献标识码: A

随着列车提速和重载列车的开行,钢轨轨面伤损成增加趋势^[1,2]。在钢轨轨面伤损中,钢轨踏面疲劳裂纹是其中一种重要的伤损形式。钢轨踏面疲劳裂纹的产生不仅影响行车品质,甚至可能导致断轨,危及行车安全^[3]。为了分析疲劳裂纹的扩展行为,很多学者进行了深入的研究。Ringsberg JW 等利用有限元^[4,5], Makoto AKAMA 等利用边界元^[6]采用线弹性断裂力学对疲劳裂纹的扩展行为进行了分析;李晓宇等分析了轮轨接触位置对应力强度因子的影响^[7]。这些研究中大都是分析了弹性状态下疲劳裂纹扩展特性,但试验研究发现裂纹尖端存在明显的塑性变形,裂纹尖端钝化^[8,9]。本文建立了考虑材料弹塑性特点的钝形踏面疲劳裂纹模型,对踏面疲劳裂纹扩展特性进行了分析。这将为建立疲劳裂纹扩展速率模型提供依据,为制定预防疲劳裂纹的措施提供理论指导。

1 踏面疲劳裂纹模型

踏面裂纹是轮轨反复作用的结果,而随着轮轨反复接触,轮轨产生磨耗,轮轨接触表面不断发生变化,轨顶圆弧会被磨成平面形状,这样可以把轮轨接触看作是一圆柱体作用在平面上,因此,假设轮轨接触是一种平稳接触,建立二维滚动接触模型来分析疲劳裂纹扩展特性。文献^[10]认为轮轨在轨顶接触时赫兹接触应力与采用弹塑性有限元计算的接触应力差异不大,因此,以移动荷载模拟车轮的滚动;轮轨接触应力为二维赫兹分布^[11]:

$$p(x) = P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x-b}{a}\right)^2} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-01-13

基金项目: 教育部博士点基金新教师项目资助课题 (200802471003)

作者简介: 王建西 (1979-), 男, 河南许昌人, 博士研究生。

式中: P_0 为最大接触应力; b 为接触半宽; e 为接触斑中心偏离裂纹口距离 $(-3 \leq e/b \leq 3)$ 。

考虑轮轨接触的最不利情况, 轮轨接触处于全滑动状态。根据库仑摩擦定理计算, 切向应力分布:

$$q(x) = \mu_s p(x) \quad (2)$$

式中: μ_s 为轮轨摩擦系数; $p(x)$ 为法向赫兹分布。

文献 [8, 9] 试验研究发现裂纹尖端存在明显的塑性变形, 裂纹尖端钝化, 因此, 在建模中要考虑裂纹尖端钝化。文献 [16] 观察发现疲劳裂纹扩展角度在 $30^\circ \sim 65^\circ$, 文中取裂纹扩展角度为 $\alpha = 35^\circ$ 。利用非线性各向同性随动硬化模型描述塑性应变状态下应力应变关系^[12], 建立了考虑 U75V 钢轨弹塑性特点的钝形踏面疲劳裂纹模型, 如图 1。

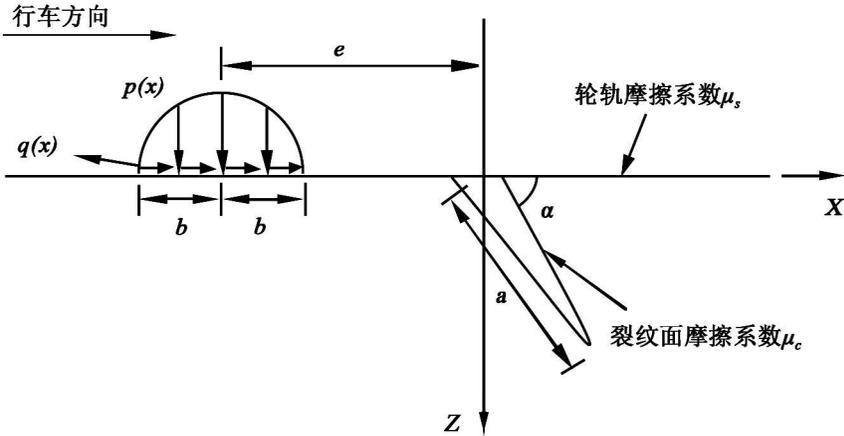


图 1 疲劳裂纹模型

采用通用有限元软件进行仿真计算, 计算中采用四节点平面应变单元, 整个模型共划分为 31 490 个单元, 图 2 为疲劳裂纹模型有限元网格。在图 2 中裂纹尖端部采用较小的单元格, 减小裂纹尖端部应力集中影响, 提高计算精度。同时裂纹面附近区域网格质量是影响裂纹面接触分析中收敛性的一个重要原因, 因此在裂纹面附近区域也进行了网格细化。

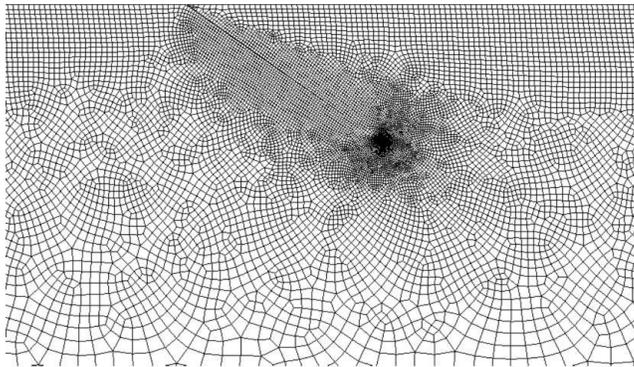


图 2 疲劳裂纹模型有限元网格

2 断裂参量

弹塑性断裂力学中断裂参量主要是 J 积分和裂纹尖端位移。 J 积分只适用于单调加载情况^[13], 而轮轨接触中, 车轮滚动中存在加载和卸载过程, 因此, 在疲劳裂纹扩展分析中不能采用 J 积分作为断裂参量。同时文献 [14] 认为疲劳裂纹尖端位移比 J 积分更适合作为弹塑性状态断裂参量。本文以疲劳裂纹尖端位移作为断裂参量, 分析疲劳裂纹扩展特性。根据文献 [15] 裂纹尖端位移分为裂纹尖端张开位移 (Crack

Tip Open Displacement CTOD) 和裂纹尖端滑动位移 (Crack Tip Slip Displacement CTSD), 如图 3。

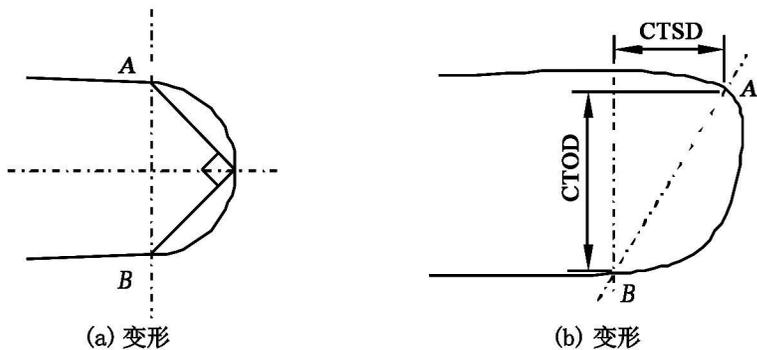


图 3 断裂参量定义图示

3 裂纹尖端塑性区分析

利用等效塑性应变描述裂纹端部塑性情况。等效塑性应变是整个变形过程塑性应变的累积^[12]。等效塑性应变 (Equivalent Plastic Strain, EPS):

$$EPS = \epsilon^p | _0 + \int_0^t \left(\frac{2}{3} \epsilon^p : \epsilon^p \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3)$$

式中: $\epsilon^p | _0$ 为初始塑性应变; ϵ^p 为塑性应变率。

图 3 为 $P_0=1\ 200\ \text{MPa}$, $\mu_s=0.3$, $\mu_c=0.3$ 时等效塑性应变分布图。从图中可以看出, 裂纹端部有两个大的塑性区组成。把图 4 中 A 部分称为裂纹端部前方塑性区; 把图 4 中 B 部分称为裂纹面塑性区。这两个塑性区都比较大, 裂纹端部前方塑性区半径 R_a 与裂纹长度 b 比值为 0.41; 裂纹面塑性区半径 R_b 与裂纹长度 b 的比值为 0.24。这两个塑性区尺寸大大超过线弹性断裂力学小范围屈服的限度^[13], 因此, 应采用弹塑性断裂力学理论来分析踏面疲劳裂纹的扩展特性。

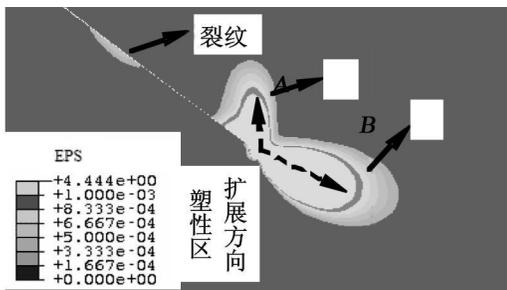


图 4 等效塑性区图 ($P_0=1\ 200\ \text{MPa}$, $\mu_s=0.3$, $\mu_c=0.3$) 图 5 钢轨剥离掉块 ($P_0=1\ 200\ \text{MPa}$, $\mu_s=0.3$, $\mu_c=0.3$)

从荷载加载过程分析, 由于裂纹尖端应力集中而产生了裂纹端部前方塑性区, 该塑性区先出现。而裂纹面塑性区是在裂纹端部前方塑性区影响下, 是裂纹面受力和轨面受力共同作用的结果。这两大塑性区都可能是裂纹扩展区域。裂纹在裂纹端部前方塑性区向轨头里面扩展, 可能导致断轨; 裂纹在裂纹面塑性区向轨面扩展, 可能导致轨面的剥离掉块。钢轨剥离掉块如图 5 所示^[16], 对比图 4 与图 5, 可以看出图 4 塑性区扩展方向和图 5 中裂纹扩展方向基本一致, 而剥离掉块部分在裂纹面塑性区。这说明踏面疲劳裂纹的扩展受裂纹尖端塑性控制, 剥离掉块与裂纹面塑性区的塑性变形有关。

现场观察发现, 在踏面出现疲劳裂纹后, 继续涂油会加速剥离掉块。这是由于在水或润滑液浸入裂纹时, 水和润滑液的润滑作用会使裂纹面摩擦系数减小, 使裂纹面塑性区变大, 塑性累积加快, 易造成该区域

因塑性累积超过材料韧性极限而断裂。图 6 为裂纹面摩擦系数为 0.1 时的等效塑性应变图。这时裂纹面塑性区比正常情况下裂纹面塑性区大 1.3 倍。这样在荷载反复作用下裂纹面塑性区会很快扩展到轨面, 当该区域塑性累积超过材料韧性极限就会断裂, 造成剥离掉块。

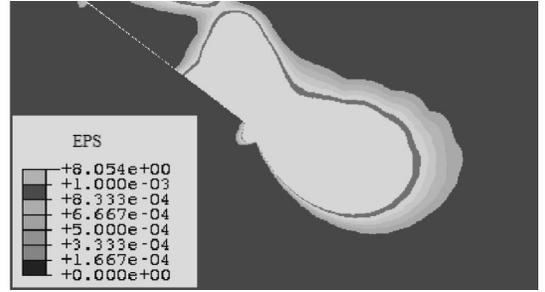


图 6 等效塑性区图 ($P_0=1\ 200\text{MPa}$ $\mu_s=0.3$ $\mu_c=0.1$)

轮轨力、裂纹面摩擦系数和轮轨摩擦系数对断裂参数的影响各不相同, 通过对 10 种工况的研究, 分析轮轨力、裂纹面摩擦系数和轮轨摩擦系数对断裂参数的影响特点, 表 1 为工况参数表。

表 1 各工况下参数表

工况	最大接触应力 /MPa	a/b	轮轨摩擦系数	裂纹面摩擦系数
1	1 000	1.00	0.3	0.30
2	1 100	0.90	0.3	0.30
3	1 200	0.83	0.3	0.30
4	1 200	0.83	0.2	0.30
5	1 200	0.83	0.4	0.30
6	1 200	0.83 <td 0.3	0.00	
7	1 200	0.83	0.3	0.05
8	1 200	0.83	0.3	0.10
9	1 200	0.83	0.3	0.40
10	1 200	0.83	0.3	0.50

4.1 轮轨力的影响

从图 7 可以看出, 无论在何种轴重作用下, CTSD 与 CTOD 变化趋势一致。当轮载未接触裂纹口时, 仅裂纹下面受力, 裂纹成张开状态; 随着轮载向裂纹口方向移动, CTSD 成减小趋势, CTOD 呈增加趋势; 当荷载作用中心在 $e/b=-1$ 时, CTSD 与 CTOD 同时达到一个极值点; 随着荷载逐渐作用在裂纹上, 裂纹上下面同时受力, 裂纹滑动方向反向, 随着荷载逐渐向前移动, CTSD 呈增加趋势而 CTOD 成减小趋势。当 e/b

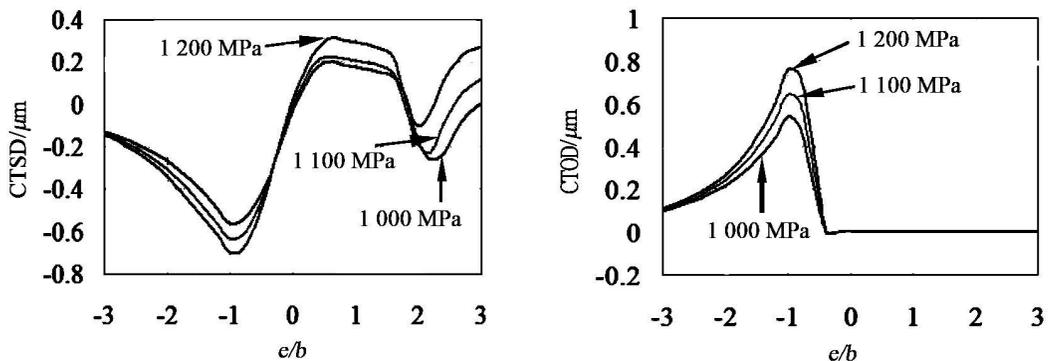


图 7 不同轮轨力下断裂参量对比图

$= -0.4$ 时,裂纹完全闭合。当 $e/b = 0.6$ 时,CTSD 达到最大值;荷载过了该点,裂纹滑动方向再次反向,这时 CTSD 变化率很小,裂纹面处于粘着状态。当 $e/b > 2$ 时,荷载完全不作用在裂纹面上方,裂纹面滑动方向再次方向,CTSD 呈增加趋势。从断裂参量幅度来看,随着轴重的增加断裂参量幅度增大很多。当最大轮轨接触应力从 1 000 MPa 增加到 1 200 MPa 时,CTSD 幅度增大了 32.5%,CTOD 幅度增大了 40.7%。可见,轴重的增加加剧了钢轨伤损破坏;这就是提速线路开行重载列车后,钢轨伤损大幅增加的重要原因^[2]。

4.2 轮轨摩擦系数的影响

从图 8 可以看出,随着轮轨摩擦系数的增加 CTSD 与 CTOD 变化趋势与随着轴重的增加时的变化趋势基本一致,裂纹滑动方向经历了三次反转;在 $e/b = -1$ 时,CTSD 与 CTOD 同时达到极值。但从断裂参量幅度来看,随着轮轨摩擦系数的增加,断裂参量增幅很大。当轨面摩擦系数从 0.2 增加到 0.4 时,CTSD 幅度增加了多达 243.6%,CTOD 幅度增加了 73.5%。轨面摩擦系数的变化改变了钢轨的应力应变状态。根据文献 [17] 安定极限图,当轨面摩擦系数为 0.2 与 0.3 时,钢轨处于弹性状态,塑性区主要出现在裂纹尖端处。而当轨面摩擦系数增加到 0.4 时,钢轨即将进入了棘轮状态。同时在轮载作用下轨面出现了塑性区,轨面塑性区与裂纹尖端塑性区相连,使裂纹尖端位移显著增大了。

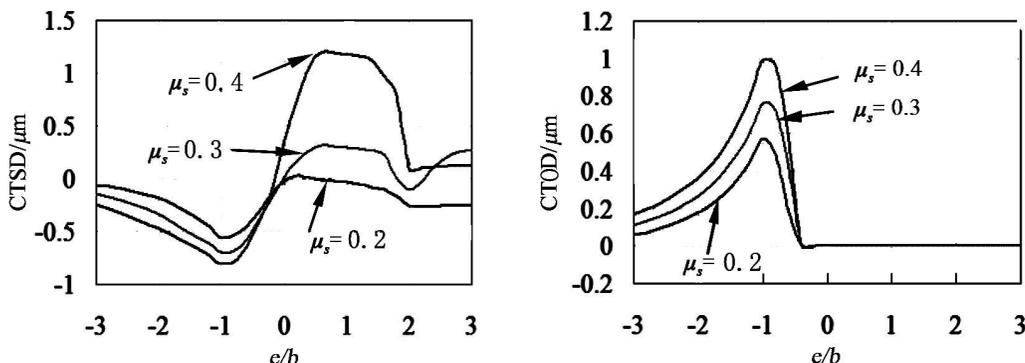


图 8 不同轮轨摩擦系数下断裂参量对比图

4.3 裂纹面摩擦系数的影响

从图 9 看,无论裂纹面摩擦系数大还是小,断裂参量随轨面摩擦系数增大的变化趋势基本一致;裂纹滑动方向经历了三次反转,在 $e/b = -1$ 时,CTSD 与 CTOD 同时达到极值;但 CTSD 与 CTOD 随裂纹面摩擦系数的增加变化趋势不一样。CTSD 受裂纹面摩擦系数影响比较大,当裂纹面摩擦系数小于 0.3 时,CTSD 增大幅度比较大;裂纹面无摩擦时的 CTSD 幅度比裂纹面摩擦系数为 0.5 时的 CTSD 幅度大 4.7 倍。而 CTOD 基本不受裂纹面摩擦系数影响,不同裂纹面摩擦系数下,CTOD 值基本一样。这是由于裂纹面摩擦的存在减小了裂纹尖端的应力集中程度;而且裂纹面摩擦系数越大,裂纹尖端的应力集中程度就越小,塑性区越小,CTSD 值就比较小。

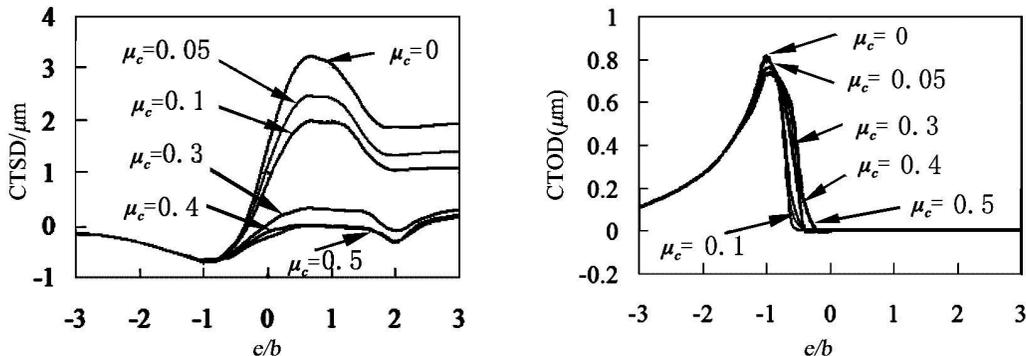


图 9 不同裂纹面摩擦系数下断裂参量对比图

从图 9 还可以看出,在荷载未达到 $e/b=1$ 前,裂纹呈张开状态,裂纹面摩擦未起作用,在图 9 中表现为 CTSD 曲线重合;当荷载超过 $e/b=1$ 后,裂纹逐渐闭合,裂纹面摩擦开始起作用;不同裂纹面摩擦系数下,裂纹面分担剪力的比例不同,使裂纹端部应力集中程度不同,造成裂纹尖端的塑性区大小不同对比(图 4 与图 6), CTSD 值也不同。

5 裂纹扩展类型分析

二维情况下,裂纹扩展类型为 I 型与 II 型。这里引入塑性复合系数 M^P ^[14],它是裂纹尖端张开位移幅度和裂纹尖端滑动位移幅度的比值。塑性复合系数:

$$M^P = \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{\Delta CTOD}{\Delta CTSD} \right) \quad (4)$$

对于纯 II 型, $M^P = 0$; 对于纯 I 型, $M^P = 1$; 对于 I/II 复合型, $0 < M^P < 1$ 。图 10 为不同工况下裂纹塑性复合系数。从图中可以看出,大部分工况下裂纹按 I/II 复合型扩展。仅当裂纹面摩擦系数比较小时(工况 6、7 与 8), M^P 比较小,可以认为疲劳裂纹是按 II 型扩展。因此,在进行裂纹扩展速率的计算中,要考虑 I/II 复合型扩展的特性;仅当裂纹面摩擦系数比较小(裂纹面有水或润滑油浸入时),裂纹扩展是以 II 型为主的扩展形式。

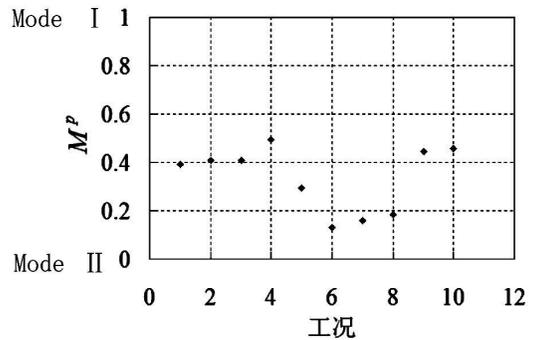


图 10 不同工况下裂纹塑性复合系数

6 结论

建立了钝形踏面疲劳裂纹模型,以裂纹尖端位移为断裂参量,分析了在弹塑性情况下疲劳裂纹的扩展特性,得出以下结论:

- (1) 踏面疲劳裂纹端部存在两个较大塑性区,其范围超过了线弹性断裂力学要求的小塑性区的限度,需要利用弹塑性断裂力学理论分析踏面疲劳裂纹的扩展特性。
- (2) 裂纹尖端塑性区,尤其是裂纹面塑性区是造成钢轨剥离掉块的重要原因。
- (3) 裂纹尖端滑动位移受轮轨力、轨面摩擦系数和裂纹面摩擦系数影响;裂纹面摩擦系数对裂纹尖端滑动位移影响很大,在仿真分析中,对裂纹面摩擦系数的选取要慎重;而裂纹尖端张开位移只受轮轨力和轨面摩擦系数影响,不受裂纹面摩擦系数影响。
- (4) 利用裂纹塑性复合系数分析了各种工况下疲劳裂纹的扩展形式,认为踏面疲劳裂纹主要以 I/II 复合型扩展方式扩展。

文中在疲劳裂纹扩展特性分析中采用二维接触模型进行分析,但实际轮轨接触是个三维接触问题,钢轨受到垂向、纵向和横向的三个方向力的作用,在二维接触模型中无法施加横向力,这一点是模型中的不足之处,这有待完善轮轨接触模型,进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘学文, 邹定强, 邢丽贤, 等. 钢轨踏面斜裂纹伤损原因及对策的研究 [J]. 中国铁道科学, 2004, 25(2): 82-87.
- [2] 王志平. 重载快速大运量区段 P60 钢轨鱼鳞伤和剥离掉块的研究 [J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(4): 1-6.
- [3] 史密斯. 钢轨滚动接触疲劳的进一步研究 [J]. 中国铁道科学, 2002, 23(3): 6-10.
- [4] Bogdanski S, Olzak M, Stupnicki J. Numerical stress analysis of rail rolling contact fatigue cracks [J]. Wear 1996, 191(1): 14

- [5] Ringsberg JW, Bergkvist A. On propagation of short rolling contact fatigue cracks [J]. *Fatigue Fracture Engineering Materials Structures* 2003, 26(10): 969—983.
- [6] Makoto A, Tado M. Boundary element analysis of effects of crack face friction and trapped fluid on rolling contact fatigue cracks [J]. *Quarterly Report of RTRI* 2005, 46(4): 231—237.
- [7] 李晓宇, 习年生, 周清跃. 轮轨接触位置对钢轨斜裂纹扩展行为影响的仿真 [J]. *中国铁道科学*, 2008, 29(2): 44—47.
- [8] 钟 雯, 赵雪芹, 王文健, 等. PD3 与 U71Mn 钢轨疲劳裂纹扩展特性研究 [J]. *中国机械工程*, 2008, 19(14): 1740—1743.
- [9] 李晶晶, 田常海, 汪越胜. U71Mn 和 U75V 钢轨钢疲劳短裂纹的扩展行为 [J]. *钢铁研究学报*, 2006, 18(4): 37—40.
- [10] Daves W, Fischer F D. Modelling of the plastification near the rough surface of a rail by the wheel-rail contact [J]. *Wear* 2002, 253(1): 241—246.
- [11] Johnson K L. *Contact Mechanics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press 1985.
- [12] Dunne F, Petrinic N. *Introduction to Computational Plasticity* [M]. New York: Oxford University Press 2005.
- [13] 丁遂栋, 孙利民. *断裂力学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [14] Keith JM, David L M. *Mixed Mode Crack Behavior* [M]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials 1999.
- [15] 沙江波, 邓增杰, 周惠久. COD 准则在 40CrNiMo 钢弹塑性 I+II 型断裂分析中的应用 [J]. *西安交通大学学报*, 1998, 32(2): 48—52.
- [16] 陈朝阳, 张银华, 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, 29(4): 28—34.
- [17] Ekberg A, Kabo E and Andersson. An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 2002, 25(10): 899—909.

An Analysis on Propagation Behavior of Rail Tread Fatigue Crack

WANG Jian-xi XU Yu-de CAO Liang

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

Abstract According to the features of tread fatigue crack tip, a blunt-shaped model of tread fatigue cracks is presented. Adopting the fracture parameters as crack tip displacement, crack propagation of U75V steel tread fatigue is analyzed in elastic-plastic case. The results show a large plastic zone lines near the crack tip and elastic-plastic fracture mechanics should be used to analyze features of tread fatigue crack propagation. Crack tip sliding displacement is affected by wheel load, friction coefficient of wheel/rail and crack surface friction coefficient. Crack surface friction coefficient is more sensitive than others to affect crack tip sliding displacement. Crack tip opening displacement is only affected by wheel load and friction coefficient of wheel/rail. At last, the plastic mixed mode factor is used to analyze the propagation mode which propagates by means of composite propagation.

Key words rail plasticity; blunt-shaped crack; crack tip displacement; composite crack

(责任编辑: 王全金)