

# 考虑塑性的钢轨表面疲劳微裂纹分析

咎晓东, 王强胜, 生月, 江晓禹

(西南交通大学 力学与工程学院, 成都 610031)

**摘要:** **目的** 研究塑性条件下受重复轮轨荷载的钢轨表面的初始疲劳裂纹行为。**方法** 建立含表面微裂纹的钢轨二维有限元模型, 通过耦合裂纹面对应节点达到无裂纹的效果。经过几次循环加载后取消节点耦合设置, 达到出现裂纹的效果。分析随着轮轨循环加载钢轨的响应, 计算残余应力强度因子, 并利用渐进状态 (随着循环次数的增加, 裂纹尖端区新产生的塑性越来越小, 裂尖小范围内塑性不再增加) 下的应力强度因子计算初始疲劳裂纹扩展速率。**结果** 有限元模拟中, 轮轨荷载循环加载在钢轨上表面, 使其产生拉伸残余应力, 且随着深度增加, 拉伸残余应力越来越小。裂纹萌生后, 不同角度的裂纹残余 ( $K_I$ ) 都随循环次数的增加而减小, 但残余 ( $K_{II}$ ) 都随循环次数的增加而增大。受残余应力的影响, 渐进状态下的钢轨表面初始微裂纹应力强度因子随裂纹角度 ( $\theta$ ) 的增加而增加。**结论** 钢轨表面的残余应力加快了初始微裂纹的扩展速率, 降低了钢轨的使用寿命。

**关键词:** 轮轨接触疲劳; 残余应力; 裂纹扩展速率; 应力强度因子; ANSYS

**中图分类号:** TG111.8; U211.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0151-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.022

## Analysis of Fatigue Micro-crack on Rail Surface under Plasticity

ZAN Xiao-dong, WANG Qiang-sheng, SHENG Yue, JIANG Xiao-yu

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

**ABSTRACT:** The work aims to study initial fatigue micro-crack behavior on rail surface which is subjected to cyclic wheel/rail loading under plastic stresses. A 2D finite model of rail with a surface crack was established. The corresponding nodes of the crack surface were coupled to achieve the effect without crack. After several cyclic loading, the joint coupling was released to show the crack. The residual stress intensity factor was calculated by analyzing the response of rail by cyclic wheel/rail loading. The initial fatigue crack growth rate was also calculated by stable stress intensity factors in the asymptotic state (As the number of cycles increased, the new plasticity in the crack tip became smaller and smaller, and the plasticity did not increase within the small range of crack tip). In the finite element simulation, the rail was subjected to cyclic wheel/rail loading to produce tensile residual stress on the upper surface, and the tensile residual stress became smaller and smaller with the increase of depth. After crack initiation, the residue ( $K_I$ ) of crack at different angles decreased with the increase of cyclic number, but residue ( $K_{II}$ ) increased with the increase of cyclic number. Under the influence of residual stress, the stable stress intensity factor of initial micro-crack on rail surface in the asymptotic state increased with the increase of crack angle ( $\theta$ ). The residual stress on the rail surface accelerates the propagation rate of the initial micro-crack and reduces the service life of rail.

收稿日期: 2018-04-24; 修订日期: 2018-06-15

**Received:** 2018-04-24; **Revised:** 2018-06-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (11472230)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (11472230)

**作者简介:** 咎晓东 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为轮轨接触疲劳。

**Biography:** ZAN Xiao-dong (1993—), Male, Master, Research focus: fatigue of wheel/rail contact.

**通讯作者:** 江晓禹 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复合材料力学和接触疲劳。邮箱: E-mail: xiaoyujiang8@sina.com

**Corresponding author:** JIANG Xiao-yu (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: mechanics of composite materials and contact fatigue. E-mail: xiaoyujiang8@sina.com

**KEY WORDS:** wheel/rail contact fatigue; residual stress; crack propagation rate; stress intensity factor; ANSYS

滚动接触疲劳下构件表面的失效机理比较复杂<sup>[1]</sup>。列车运行时,循环的滚动接触荷载导致钢轨表面或次表面萌生裂纹,如裂纹进一步发展,会形成复杂的裂纹网络,比如隐伤和轨头核伤。严重的裂纹扩展可能导致钢轨断裂,甚至列车脱轨事故。

轮轨接触荷载是一种与时间相关的多轴非比例荷载。轮轨循环荷载在钢轨内部产生渐进的应力状态,与裂纹的行为密切相关。而裂纹还会受到较大的压应力,从而引起裂纹面闭合和摩擦接触。

以往关于钢轨疲劳裂纹扩展的工作可在文献中查阅。弹性地基<sup>[2-3]</sup>、初始裂纹几何和裂纹面摩擦系数<sup>[2,4-5]</sup>等对应力强度因子和裂纹扩展路径<sup>[6]</sup>的影响已有研究报道。众所周知,残余应力场的分布影响裂纹扩展行为<sup>[7-8]</sup>,残余压应力的存在提高了裂纹的疲劳寿命,残余拉应力则相反。对于残余应力对钢轨疲劳裂纹影响的研究,大多数都使用简化的技术,把残余应力简化为均布压应力或拉应力作用在所研究模型的边界<sup>[5,9-10]</sup>。本文利用弹塑性有限元方法对钢轨初始疲劳裂纹进行了研究,考虑了裂纹萌生之前钢轨的稳定残余应力和裂纹萌生之后在裂纹尖端周围新的渐进残余应力。重点研究了循环加载过程中不同角度初始疲劳裂纹的残余应力强度因子以及残余应力对不同角度初始疲劳裂纹的应力强度因子和扩展速率的影响。

## 1 理论介绍

### 1.1 研究模型

轮轨接触的研究模型如图1所示。车轮在钢轨上从左到右重复滚动,开始时钢轨表面无裂纹。在考虑钢轨材料的双线性、各向同性强化的弹塑性应力与应变关系情况下,车轮滚动几次后,钢轨表面塑性不再增加,钢轨内部产生稳定的残余应力。接着在钢轨表面设置微裂纹,裂纹长度 300  $\mu\text{m}$ ,裂纹与行车方向的夹角分别为 15°、30°、45°、60°。轮轨间的接触作用力为法向接触压力  $p$  和切向摩擦力  $f$ 。

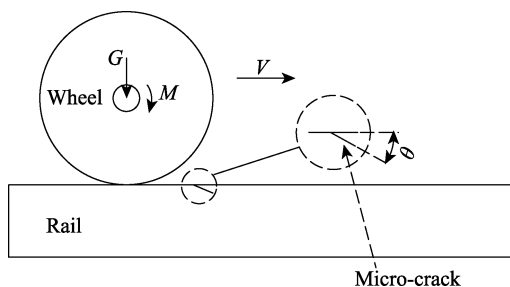


图1 轮轨滚动接触研究模型  
Fig.1 Model for wheel/rail rolling contact

### 1.2 残余应力

金属内部产生残余应力的原因有很多,例如金属相变、热处理和机械加工等。钢轨的残余应力主要来于钢轨的制造和使用过程。钢轨在制造过程中产生的残余应力相对复杂,且残余应力分布具有不确定性。本次研究只考虑钢轨受车轮碾压时所产生的残余应力,不考虑制造钢轨时所引起的钢轨内部残余应力。钢轨受载后,局部的应力达到屈服极限,于是出现局部塑性区域,塑性区的应力不再继续增大,而应力尚低于屈服极限的区域仍具弹性。卸载后塑性区的材料不再恢复,仅弹性区的材料恢复。若试样原来受的是拉伸荷载,则弹性区的材料恢复时要收缩,但由于受到不能再恢复的塑性区材料的制约,试样不得自由收缩,因而弹性区的材料产生残余拉应力;与此对应,塑性区的材料产生残余压应力。若试件原来受压缩荷载,则结果相反。

### 1.3 疲劳裂纹扩展速率

断裂力学是处理疲劳裂纹扩展的重要方法。自从Paris<sup>[11]</sup>成功地建立起疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子的关系,许多研究人员已经报告了关于裂纹传播速率与应力强度因子之间关系的数据。大多数实验都是针对循环拉伸荷载下简单的张开型裂纹扩展。但在实际情况中,构件会承受复杂的疲劳循环荷载,在这种循环荷载作用下,裂纹类型包括张开型、滑开型和撕裂型。在断裂力学的大多数研究中,假定  $\log(da/dN)$  和  $\log(\Delta K)$  之间的关系是线性的,可用 Paris 和 Erdogan<sup>[11]</sup>导出的方程来描述:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

其中  $C$  和  $m$  是材料参数,可以通过实验来确定。对于 I-II 混合模式循环加载引起的裂纹扩展,可以用  $\Delta K_{eff}$  代替  $\Delta K$ , Tanaka<sup>[12]</sup>将  $\Delta K_{eff}^4$  定义为:

$$\Delta K_{eff}^4 = \Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4 \quad (2)$$

其中  $\Delta K_I = K_{I,max} - K_{I,min}$ ,  $\Delta K_{II} = K_{II,max} - K_{II,min}$ 。计算中如果出现  $K_{I,max}$  和  $K_{I,min}$  都为负值,则  $\Delta K_I = 0$ ; 如果  $K_{I,min}$  为负值,  $K_{I,max}$  为正值,则  $\Delta K_I = K_{I,max}$ <sup>[13]</sup>。

## 2 有限元模拟

U71Mn 钢是一种常用的钢轨材质,广泛用于我国的铁路干线。钢轨材料参数<sup>[14-16]</sup>见表1。

在有限元模拟中,钢轨的本构模型为双线性、各向同性强化模型。其双线性强化材料应力应变关系如图2所示。

根据钢轨实际尺寸,建立二维有限元钢轨模型。

钢轨有限元模型高为 176 mm，长为 1000 mm，裂纹长为 300  $\mu\text{m}$ ，裂纹方向与行车方向夹角分别为 15°、30°、45°和 60°。有限元模型使用 8 节点的 PLANE183 单元，裂纹尖端采用 1/4 节点的奇异单元，单元尺寸为 8  $\mu\text{m}$ 。在裂纹面设置接触，接触摩擦系数为 0.2。不考虑轨枕的影响，钢轨底部采取全约束。钢轨有限元模型如图 3。

表 1 U71Mn 钢的力学性能  
Tab.1 Mechanical properties of U71Mn steel

Modulus of elasticity	Poisson's ratio	Static yield limit
210 GPa	0.3	550 MPa
Tangential modulus	Crack growth rate constant $C$	Crack growth rate constant $m$
21 GPa	$4.597\times 10^{-13}$	2.88

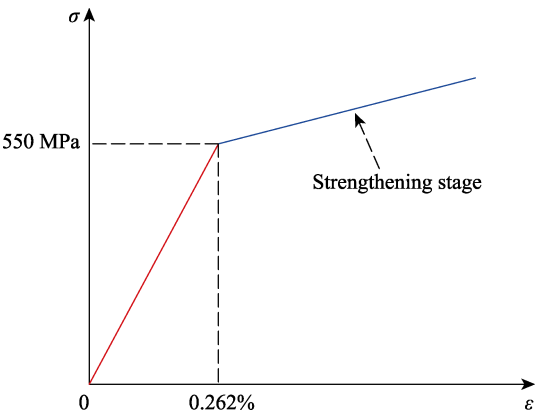


图 2 钢轨的双线性应力应变关系  
Fig.2 Bilinear stress-strain relationship of rail

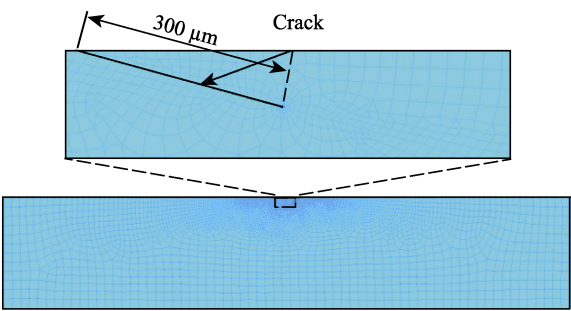


图 3 钢轨有限元模型  
Fig.3 Finite element model of rail

通常情况下，为了减少计算量，节省计算时间，轮轨接触疲劳分析分为轮轨的接触分析和钢轨的疲劳分析两部分。通过轮轨接触分析，求出轮轨间的接触应力。在钢轨疲劳分析时，将算得的连续分布接触荷载施加在钢轨表面，并且移动此荷载来模拟车轮在钢轨上滚动。本次研究的重点是钢轨表面裂纹的疲劳分析，不对钢轨的裂纹萌生做研究，而对于轮轨的接触荷载可从文献[17]获取。车轮在钢轨上作纯滚动(车轮与钢轨之间无整体滑动，但在接触区存在局部滑动和粘着)，速度 50 km/h，轮重 5 t，钢轨表面的接触压力和切向摩擦力分布如图 4。

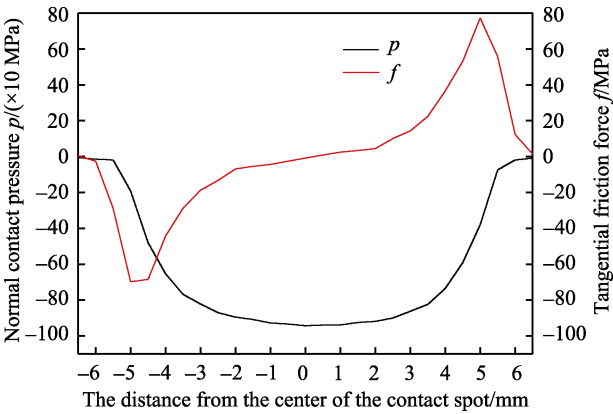


图 4 轮轨滚动接触荷载分布  
Fig.4 Distribution of contact forces between wheel and rail

钢轨塑性变形对钢轨疲劳裂纹有影响，本次模拟考虑了裂纹萌生之前钢轨的塑性变形。在初始有限元模型中，对裂纹面对应节点进行节点耦合，以模拟裂纹萌生之前的情况。在钢轨表面施加循环移动的轮轨载荷，经过几次循环，钢轨表面塑性不再变化，残余应力达到稳定状态。图 5 展示了材料弹塑性稳定应力状态。之后解除裂纹面节点耦合设置，以模拟裂纹萌生，继续在钢轨表面施加移动轮轨荷载，直到裂纹尖端应力达到渐近状态。

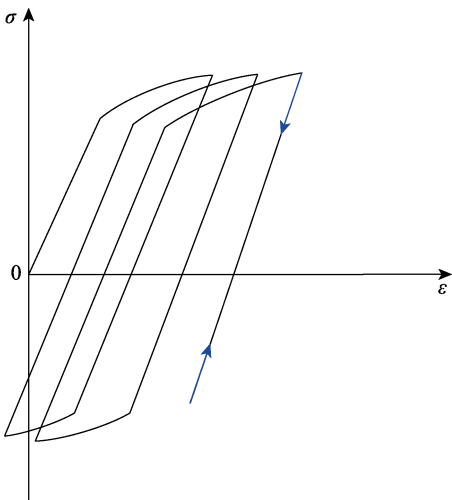


图 5 钢轨弹塑性稳定应力状态  
Fig.5 Stable stress state of rail elastoplastic behavior

3 结果分析

3.1 整个模拟过程中钢轨应力状态分析

钢轨从无裂纹开始承受循环移动的轮轨荷载，直到裂纹尖端应力集中达到渐近状态。以  $\theta=45^\circ$  的初始裂纹为例进行分析。距裂纹尖端前 8  $\mu\text{m}$  处，材料轴向应力与应变关系有限元结果如图 6。荷载循环 4 次后，钢轨循环应力状态稳定，不再产生新的塑性变形。此时钢轨表面稳定残余应力  $\sigma_y$  如图 7 所示，应力分

量及荷载示意图如图8。从图7中可以看出,钢轨表面的应力是拉伸残余应力,且随着深度增加,拉伸残余应力越来越小,并逐渐变为压缩残余应力。裂纹萌生后,首次加载时,裂纹尖端附近产生大的拉伸塑性变形,这是由于裂纹张开时尖端应力的奇异性导致。在随后的循环加载中,由于裂纹尖端附近材料的塑性强化作用,所产生的新塑性变形越来越小,最终达到渐近状态。

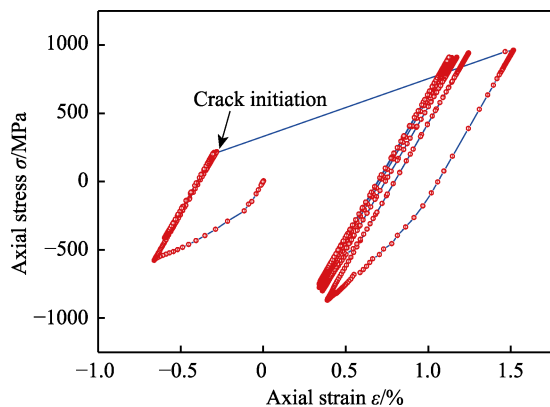


图6 整个模拟过程中材料应力应变关系 ( $\theta=45^\circ$ )  
Fig.6 Stress-strain relationship of materials throughout the whole simulation process ( $\theta=45^\circ$ )

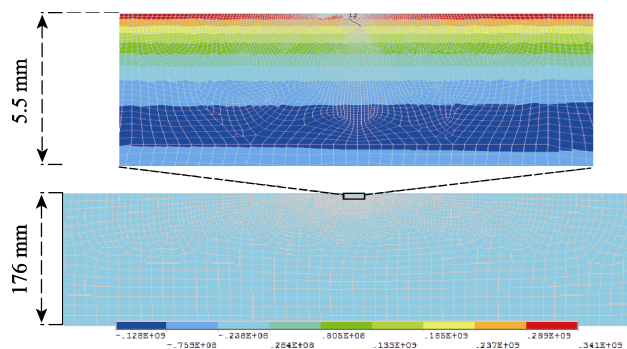


图7 稳定残余应力  $\sigma_{y'}$  云图 ( $\theta=45^\circ$ )  
Fig.7 Contours of stable residual stress  $\sigma_{y'}$  ( $\theta=45^\circ$ )

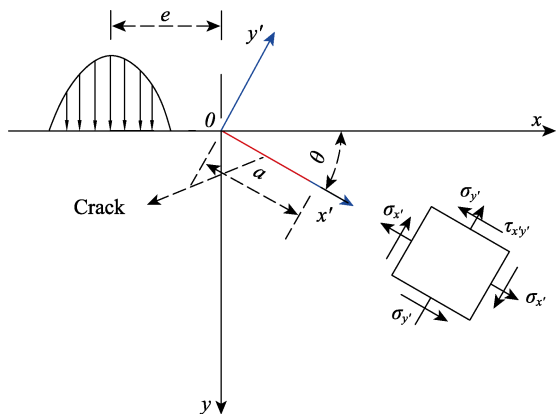


图8 平面上应力分量及荷载示意图  
Fig.8 Stress component and load diagram on plane

裂纹尖端应力强度因子随荷载位置的变化如图9所示,其中 $e$ 为荷载接触斑中心距裂纹的距离(如图8),

$a$ 为裂纹长度,循环次数从裂纹萌生后开始计算。从图中可以看出,随着滚动循环次数的增加,荷载在同一位置所引起的 $K_I$ (I型应力强度因子)不断减少,这是由于车轮每滚过一次,裂纹张开比裂纹闭合引起的应力大,裂纹张开时产生大的拉伸塑性应变,引起了压缩残余应力。而荷载在同一位置所引起的 $K_{II}$ (II型应力强度因子)不断增加,这是由于在每一次循环过后,裂纹尖端产生的新的残余剪切应力为正。

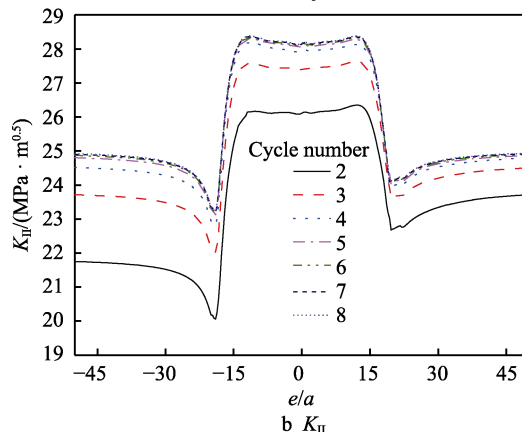
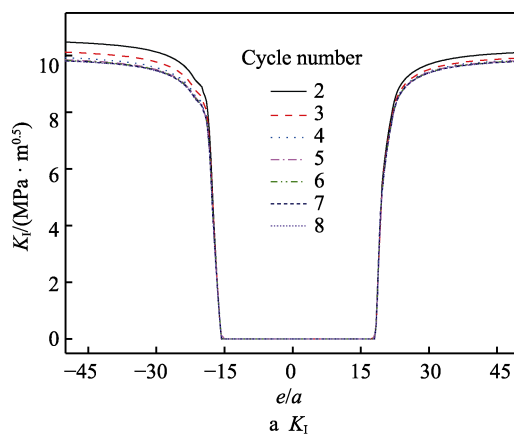


图9 裂纹应力强度因子 ( $\theta=45^\circ$ )  
Fig.9 Stress intensity factor of crack ( $\theta=45^\circ$ )

### 3.2 不同角度的初始裂纹的残余应力强度因子分析

轮轨接触荷载每循环一次过后,不同角度裂纹的残余应力强度因子随循环次数的变化如图10所示,裂纹萌生后还未施加循环荷载时的循环次数记为0。图11为裂纹未萌生时在虚设裂纹面的稳定残余应力分布,其中各变量的含义如图8。从图10和图11可以看出,随着 $\theta$ 的变化,初始 $K_I$ 和 $K_{II}$ 的相对大小分别与裂纹未萌生时虚设裂纹面残余正应力 $\sigma_{y'}$ 和残余剪应力 $\tau_{y'x'}$ 的相对大小一一对应。根据叠加原理,初始残余应力强度因子等于裂纹未萌生的虚设裂纹面稳定残余应力施加在裂纹面引起的应力强度因子。在非对称构件裂纹面施加荷载,垂向荷载和切向荷载对 $K_I$ 和 $K_{II}$ 都有影响,但是 $K_I$ 主要与垂向荷载相关,切



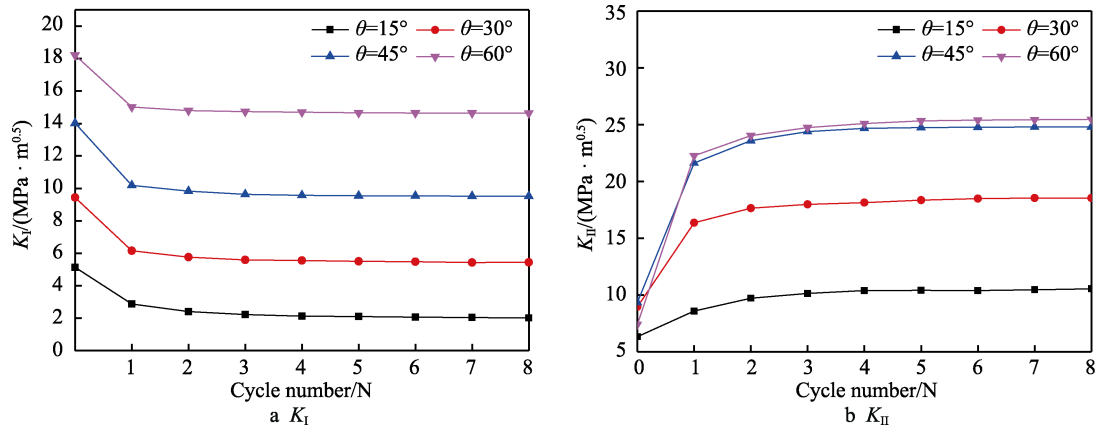


图 10 残余应力强度因子  
Fig.10 Residual stress intensity factor

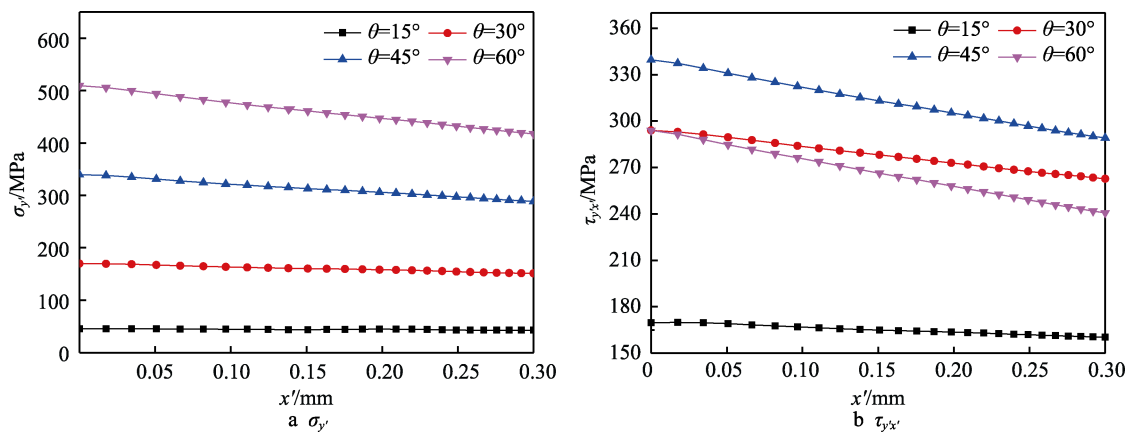


图 11 裂纹面稳定的残余应力分布  
Fig.11 Residual stress distribution of crack surface stability

向荷载对其影响很小； $K_{II}$  主要与切向荷载相关，垂向荷载对其影响很小。对于各角度裂纹，随着循环次数的增加，残余  $K_I$  逐渐减小，残余  $K_{II}$  逐渐增大。

### 3.3 初始裂纹扩展速率分析

以裂纹萌生后第 8 次循环的应力状态作为标准，对初始裂纹进行疲劳分析。在车轮第 8 次滚过钢轨表

面过程中，裂纹尖端应力强度因子如图 12 所示。根据 1.3 节的计算公式，算出不同角度初始裂纹的疲劳裂纹扩展速率。表 2 展示了考虑残余应力和未考虑残余应力（材料完全弹性）情况下初始疲劳裂纹的扩展速率。从表 2 看出，残余应力提高了初始裂纹扩展速率，且对大角度  $\theta$  初始裂纹扩展速率有显著的提高，而对小角度  $\theta$  裂纹扩展速率影响相对较小。

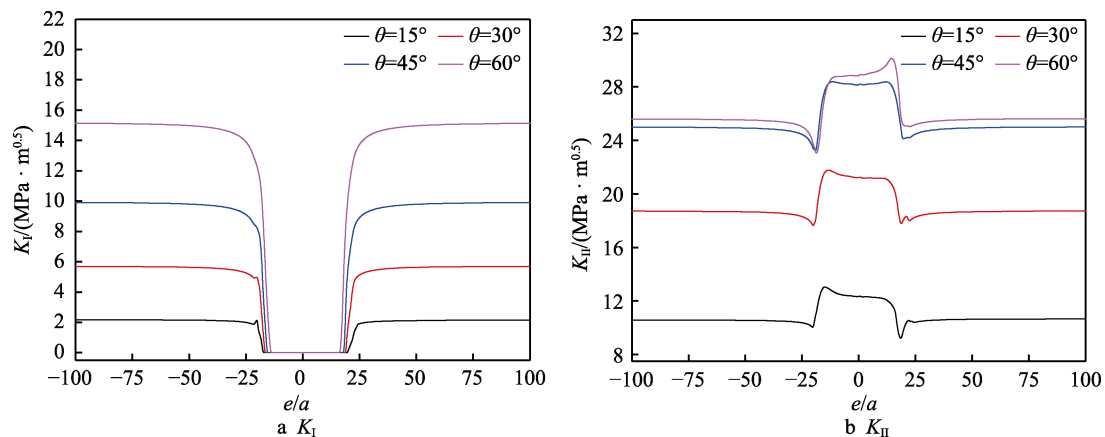


图 12 不同角度裂纹的渐进应力强度因子  
Fig.12 Asymptotic stress intensity factors of crack at different angles

表 2 初始裂纹扩展速率  
Tab.2 Initial crack growth rate

Angle of crack $\theta(^{\circ})$	Crack growth rate without residual stress / (nm·cycle <sup>-1</sup> )	Crack growth rate with residual stress / (nm·cycle <sup>-1</sup> )
15	2.033 922	2.062 019
30	0.972 359	3.397 877
45	0.360 562	9.879 107
60	0.721 849	30.385 720

## 4 结论

1) 车轮在钢轨上以 50 km/h 作纯滚动, 在钢轨内部形成稳定的残余应力, 钢轨表面的残余应力是拉伸残余应力, 且随着深度增加, 拉伸残余应力越来越小, 并逐渐变为压缩残余应力。

2) 随着  $\theta$  的变化, 初始  $K_I$  和  $K_{II}$  的相对大小分别与裂纹未萌生时虚设裂纹面稳定残余正应力  $\sigma_y$  和残余剪应力  $\tau_{yx}$  的相对大小对应。对于各角度裂纹, 随着循环次数的增加, 残余  $K_I$  逐渐减小, 残余  $K_{II}$  逐渐增大。

3) 钢轨表面的拉伸残余应力显著提高了初始疲劳裂纹扩展速率。在实际应用中应当对钢轨表面进行预处理, 使钢轨表面产生残余压缩应力或提高钢轨屈服应力, 这有助于提高钢轨的疲劳寿命。

## 参考文献:

- [1] 付泽民, 王佳炜, 张而耕, 等. 滚轮表面 TiAlSiN 涂层制备及失效机理研究[J]. 表面技术, 2017, 46(8):15-20.  
FU Ze-min, WANG Jia-wei, ZHANG Er-geng, et al. Preparation and failure mechanism of TiAlSiN coating on roller surface[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 15-20.
- [2] FARJOO M, PAL S, DANIEL W, et al. Stress intensity factors around a 3D squat form crack and prediction of crack growth direction considering water entrapment and elastic foundation[J]. Engineering fracture mechanics, 2012, 94: 37-55.
- [3] FARJOO M, DANIEL W, MEEHAN P A. Modelling a squat form crack on a rail laid on an elastic foundation[J]. Engineering fracture mechanics, 2012, 85(85): 47-58.
- [4] FLETCHER D I, SMITH L, KAPOOR A. Rail rolling contact fatigue dependence on friction, predicted using fracture mechanics with a three-dimensional boundary element model[J]. Engineering fracture mechanics, 2009, 76(17): 2612-2625.
- [5] 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.
- [6] BROUZOUOLIS 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.
- [7] RINGSBERG J W, LINDBÄCK T. Rolling contact fatigue analysis of rails including numerical simulations of the rail manufacturing process and repeated wheel-rail contact loads[J]. International journal of fatigue, 2003, 25(6): 547-558.
- [8] SEO J W, GOO B C, CHOI J B, et al. Effects of metal removal and residual stress on the contact fatigue life of railway wheels[J]. International journal of fatigue, 2008, 30(10): 2021-2029.
- [9] BOGDANSKI S, BROWN M W. Modelling the three-dimensional behaviour of shallow rolling contact fatigue cracks in rails[J]. Wear, 2002, 253(1): 17-25.
- [10] MELLINGS S, BAYNHAM J, ADEY R A. Automatic crack growth prediction in rails with BEM[J]. Engineering fracture mechanics, 2005, 72(2): 309-318.
- [11] PARIS P C. A critical analysis crack propagation laws[J]. Trans ASME ser D, 1963, 85(4): 528-533.
- [12] TANAKA K. Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis[J]. Engineering fracture mechanics, 1974, 6(3): 493-498.
- [13] CHAN K S, DAVIDSON D L, OWEN T E, et al. A fracture mechanics approach to high cycle fretting fatigue based on the worst case fret concept—II. Experimental evaluation [J]. International journal of fracture, 2001, 112(4): 331-353.
- [14] 曹世豪, 李煦, 文良华, 等. 钢轨表面裂纹扩展方向研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 37-42.  
CAO Shi-hao, LI Xu, WEN Liang-hua, et al. Analysis of propagation direction of rail surface crack[J]. Surface technology, 2014, 43(3): 37-42.
- [15] 曹世豪, 江晓禹, 文良华. 轴重和摩擦力对轮轨接触疲劳的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 10-14.  
CAO Shi-hao, JIANG Xiao-yu, WEN Liang-hua. Influence of axle load and friction on the fatigue of wheel/rail contact[J]. Surface technology, 2013, 42(6): 10-14.
- [16] 王文健, 刘启跃. PD3 和 U71Mn 钢轨钢疲劳裂纹扩展速率研究[J]. 机械强度, 2007, 29(6): 1026-1029.  
WANG Wen-jian, LIU Qi-yue. Study on fatigue crack growth rate of PD3 and U71Mn rail steel[J]. Journal of mechanical strength, 2007, 29(6): 1026-1029.
- [17] 江晓禹, 李孝滔, 李煦, 等. 轮轨高速滚动接触及钢轨疲劳裂纹扩展研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 274-281.  
JIANG Xiao-yu, LI Xiao-tao, LI Xu, et al. Research on wheel/rail rolling contact at high speed and fatigue crack propagation in rail[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 274-281.