

文章编号:1671-1637(2016)02-0046-10

剥离掉块对轮轨滑动接触热弹塑性的影响

刘洋¹, 蒋硕¹, 吴亚平¹, 段志东¹, 王良璧²

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:利用有限元软件 ANSYS 建立了钢轨轨面剥离掉块伤损条件下的轮轨滑动接触有限元模型, 考虑了轮轨材料的非线性影响, 计算了车轮经过剥离掉块凹坑时的轮轨接触冲击行为, 并采用瞬态分析方法研究了不同剥离掉块伤损长度、深度、摩擦因数与轮轨间相对滑动速度对钢轨剥离掉块伤损区域热弹塑性的影响。分析结果表明:在剥离掉块伤损区域长度为 2 cm、深度为 4 mm 时, 钢轨等效塑性应变最大, 且伤损区域后侧的值为前侧的 3~4 倍;在剥离掉块伤损区域长度为 2 cm、深度为 6 mm 时, 塑性变形最大, 且伤损区域后侧的值约为前侧的 2 倍;轮轨接触应力随摩擦因数的增大而减小, 钢轨的摩擦温升、等效塑性应变、塑性变形、等效应力与纵向剪切应力均随摩擦因数的增大而增大, 当摩擦因数大于 0.3 时, 等效应力和纵向剪切应力的增长速率变缓;当相对滑动速度等于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或大于等于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 钢轨的受力、变形和温升最不利。

关键词:铁道工程;钢轨剥离掉块;摩擦因数;轮轨滑动接触;摩擦温升;弹塑性分析

中图分类号: U211.5

文献标志码: A

Effects of spallation on rail thermo-elasto-plasticity in wheel-rail sliding contact

LIU Yang¹, JIANG Shuo¹, WU Ya-ping¹, DUAN Zhi-dong¹, WANG Liang-bi²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: A finite element model with rail spallations in wheel-rail sliding contact was established by using the finite element software ANSYS, the material nonlinearity was considered, the impact behaviors of wheel-rail contact were calculated when the wheels passed through the rail spallations, and the influences of length and depth of rail spalling area, friction coefficient and sliding speed on the thermo-elasto-plasticity of rail spalling area were analyzed by transient analysis. Analysis result shows when the length of spalling area is 2 cm and the depth is 4 mm, the equivalent plastic strain of rail reaches to the maximum, and the value in the rear of spalling area is 3-4 times as large as the value in the front. When the length of spalling area is 2 cm and the depth is 6 mm, the plastic deformation reaches to the maximum, and the value in the rear is about twice as large as the value in the front. The contact stress reduces with the increase of friction coefficient, while the frictional rising temperature, equivalent plastic strain, plastic deformation, equivalent stress and longitudinal shear stress of rail increase. When the friction coefficient is bigger than 0.3, the growth of equivalent stress and longitudinal shear stress becomes slower as the increase of friction coefficient. When the sliding speed is equal to $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

收稿日期:2015-12-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51236003)

作者简介:刘洋(1986-),女,河南漯河人,兰州交通大学工学博士研究生,从事高速重载轨道结构与动力学研究。

导师简介:吴亚平(1958-),男,浙江湖州人,兰州交通大学教授,工学博士。

or is not less than $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the stress, deformation and temperature of rail are in most unfavorable conditions. 1 tab, 22 figs, 23 refs.

Key words: railway engineering; rail spalling; friction coefficient; wheel-rail sliding contact; frictional temperature rising; elastic-plastic analysis

Author resumes: LIU Yang(1986-), female, doctoral student, +86-931-4956389, dqliuyangdq@126.com; WU Ya-ping(1958-), male, professor, PhD, +86-931-4956389, wyps@163.com.

0 引 言

钢轨剥离掉块是指钢轨接触表面的金属材料呈薄片状剥离母体或呈块状剥离母体的损伤,属于疲劳磨耗伤损中的一种。当列车在钢轨上正常(高速)行驶时,遇到紧急情况会采取紧急制动措施,巨大的制动力使列车车轮与钢轨间产生强烈的摩擦作用,从而使轮轨接触斑在极短时间内产生较高的摩擦温升,瞬时温升甚至会使接触斑处的钢轨材料发生相变,而远离接触斑的钢轨温度仍处于常温状态,冷热材料间会进行热传导作用,使高温区材料快速冷却形成马氏体。钢轨材料组织在发生相变的过程中会在表面和次表面形成微裂纹,在轮轨法向应力和切向应力的反复作用下,微裂纹不断扩展,使各个交错裂纹间相互贯通,最终形成剥离掉块,若裂纹沿尖端处不断向下发展会形成核伤,严重时甚至会导致断轨,影响钢轨的使用寿命,严重威胁列车运行安全。对天津浦、沪宁、沪杭等干线上钢轨表面伤损的调查发现,钢轨剥离掉块伤损是接触疲劳伤损主要的表现形式^[1]。

目前,国内外学者对轮轨滚动接触条件下轮轨材料的受力情况进行了大量的研究^[2-9],对轮轨滚动接触伤损的研究主要集中在轮轨疲劳裂纹伤损和材料磨损上^[10-16],对钢轨剥离掉块的研究相对较少,主要集中在现场调研和试验研究方面。白雁等在对北京地铁钢轨常见伤损类型和现状进行统计的基础上,分析了剥离掉块的形成机理,并提出了相应的防治对策^[17];周清跃等对大秦线上钢轨的使用情况进行了调查,根据现场钢轨伤损的类型和特征,对钢轨的主要伤损类型进行了归纳,分析了运量和钢轨材质对钢轨伤损的影响,据此针对重载运输线路提出了预防和减轻钢轨伤损的措施,并铺设试验段对提出的对策进行了试验验证^[18];任安超等采用光学显微镜、图像仪和低倍检验等试验方法对钢轨表面掉块缺陷的机理展开研究,指出掉块缺陷的形成是由于钢轨滚动接触疲劳伤损所致^[19-21];吴雄先等采用化学成分分析、宏观和微观检验等方法分析了钢轨表面掉块原因,指出列车紧急制动时轮轨间的严重

摩擦导致钢轨接触斑处产生瞬时高温,发生马氏体相变,从而产生细小裂纹,在车轮的反复碾压作用下最终造成钢轨表面掉块^[22-23]。以上这些针对钢轨剥离掉块伤损的研究均是在现场调研的基础上,配合试验检测的方法分析钢轨表面剥离掉块的机理,但至今尚缺乏采用数值模拟的方法对钢轨剥离掉块伤损条件下钢轨的受力性能进行研究。基于此,本文采用有限元法建立了热-应力耦合场中钢轨表面剥离掉块伤损条件下的轮轨热接触二维数值模型,利用接触单元模拟轮轨间的接触关系,分析钢轨表面剥离掉块不同伤损长度和深度对钢轨受力和塑性变形的影响,在剥离掉块伤损条件一定的情况下,研究轮轨间的摩擦因数和滑动速度对钢轨接触表面热弹塑性的影响。

1 热力学模型

轮轨间的相对滑动会使接触斑附近的轮轨材料产生摩擦热,轮轨滑动接触中非稳态导热问题的微分方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \nabla^2 T = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为轮轨材料的密度; c 为轮轨材料的比热; T 为接触斑附近轮轨材料的温度; λ 为轮轨材料的热导率; ∇ 为 Hamilton 算子。

轮轨接触斑内由滑动摩擦导致的热流密度 q 为

$$q = \mu_T p v \quad (2)$$

式中: μ_T 为与材料温度相关的轮轨间滑动摩擦因数; p 为接触斑上的法向压力; v 为轮轨间相对滑动速度。

接触区内的表面边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = q \quad (3)$$

式中: z 为表面边界的位移。

在轮轨滑动摩擦过程中,假设摩擦功会全部转化为轮轨材料的热能,且热能会平均分配到车轮和钢轨中。轮轨间的热量传递可描述为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z_w} = h(T_w - T_r) \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z_r} = h(T_r - T_w) \quad (5)$$

式中： h 为车轮和钢轨间的全局传热系数； z_w 、 z_r 分别为接触斑处车轮和钢轨表面的位移； T_w 、 T_r 分别为车轮和钢轨的表面温度。

轮轨材料与环境间的热对流和热辐射过程可以描述为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = H(T - T_0) \quad (6)$$

式中： T_0 为环境温度； H 为表面传热系数。

2 有限元模型

本文以半径为 525 mm 的 LM 型踏面车轮和

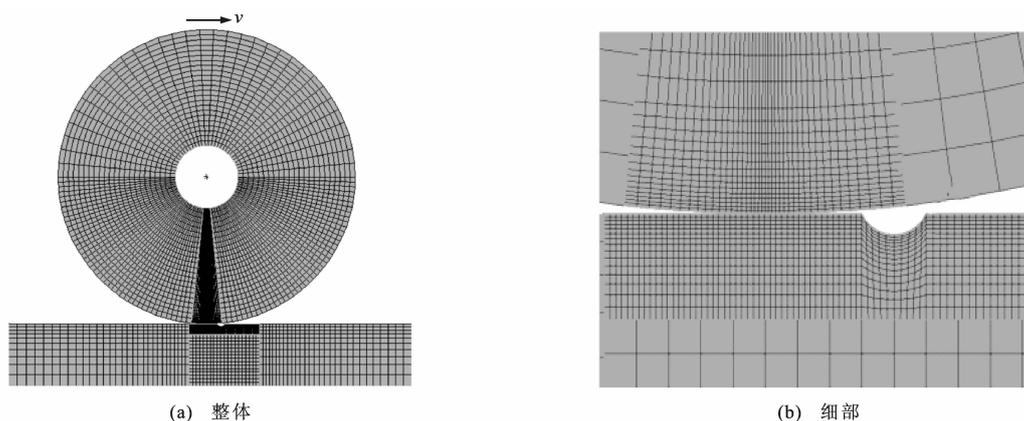


图1 钢轨剥离掉块有限元模型

Fig. 1 Finite element model of rail spalling

表1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

| 温度/℃ | 泊松比 | 弹性模量/GPa | 热膨胀系数/ 10^{-6} ℃ | 热导率/ $[W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}]$ | 比热/ $[J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$ | 抗拉强度/MPa | 屈服应力/MPa |
|-------|------|----------|--------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|----------|----------|
| 25 | 0.30 | 209 | 11.0 | 47.7 | 490.1 | 1 000.0 | 608 |
| 100 | 0.30 | 207 | 11.6 | 48.9 | 499.9 | 998.9 | 608 |
| 650 | 0.36 | 105 | 14.8 | 57.8 | 571.5 | 985.7 | 502 |
| 1 000 | 0.39 | 50 | 15.7 | 63.4 | 617.1 | 740.9 | 238 |
| 1 450 | 0.40 | 2 | 16.1 | 76.4 | 671.8 | 42.0 | 7 |

3 计算结果分析

3.1 剥离掉块伤损长度对钢轨的影响

当车轮滑动速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，轴重为 21 t，钢轨剥离掉块的深度取 1 mm 时，分析剥离掉块的长度分别取 1、2、…、6 cm 时车钢轨表面的温升、应力、塑性应变和变形情况。车轮在钢轨上滑行 100 mm 后，钢轨的等效塑性应变场分布和塑性变形场分布分别见图 2、3，坐标系的原点位于初始接触斑中心，纵坐标为 100 mm 的钢轨接触表面上的点为当前接

触斑中心，垂向坐标为 0 的线表示钢轨的接触表面，钢轨剥离掉块伤损位于钢轨纵向坐标为 30~40 mm 的钢轨表面上。

60 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 钢轨为例，将车轮的几何模型简化为外径为 525 mm、内径为 89 mm 的圆环，将钢轨的几何模型简化为高度为 176 mm、长度为 1 800 mm 的矩形，利用有限元软件 ANSYS 建立钢轨表面剥离掉块伤损条件下的轮轨接触热弹塑性平面应变有限元模型，见图 1。在模型中，采用热-物理场同时分析钢轨的摩擦热应力和机械荷载；由于轮轨滑动产生的摩擦热的影响范围很有限，因此，仅需要对轮轨接触斑附近车轮和钢轨的表层材料进行网格细化，细化网格的边长约为 0.9 mm；采用接触单元模拟轮轨间的接触关系；采用圆弧形凹坑模拟钢轨剥离掉块伤损；轮轨间的摩擦因数取 0.334，车轮和钢轨的材料参数见表 1^[23]。

由图 2 可知：剥离掉块伤损处钢轨的等效塑性应变远大于无损伤区域，且伤损处与行车方向相反的一侧（后侧）等效塑性应变约为另一侧（前侧）的 3~4 倍，剥离掉块伤损主要沿伤损处后侧扩展。由图 2、3 可知：钢轨塑性变形的分布情况和等效塑性应变的分布相似，最大塑性变形出现在等效塑性应变最大处（即剥离掉块伤损后侧），剥离掉块后侧的

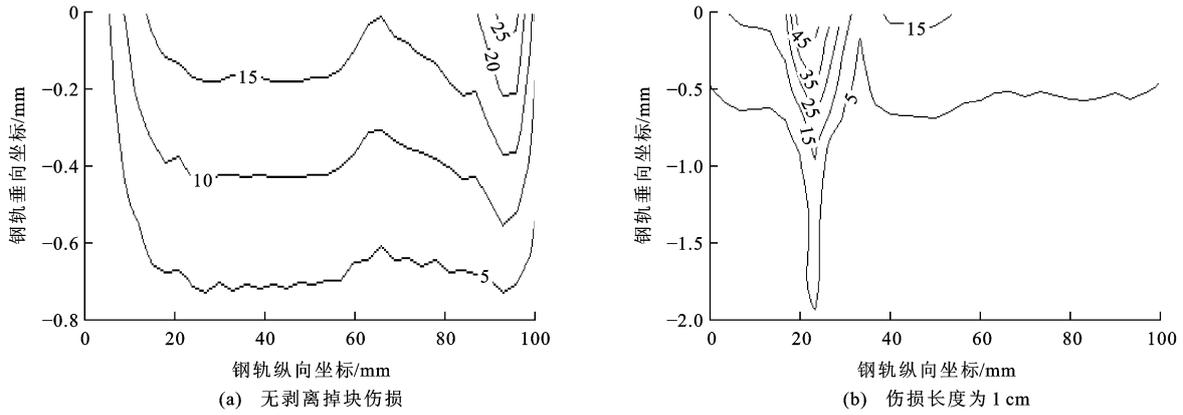


图 2 等效塑性应变场分布(单位: 10^{-3})

Fig. 2 Distributions of equivalent plastic strain fields (units: 10^{-3})

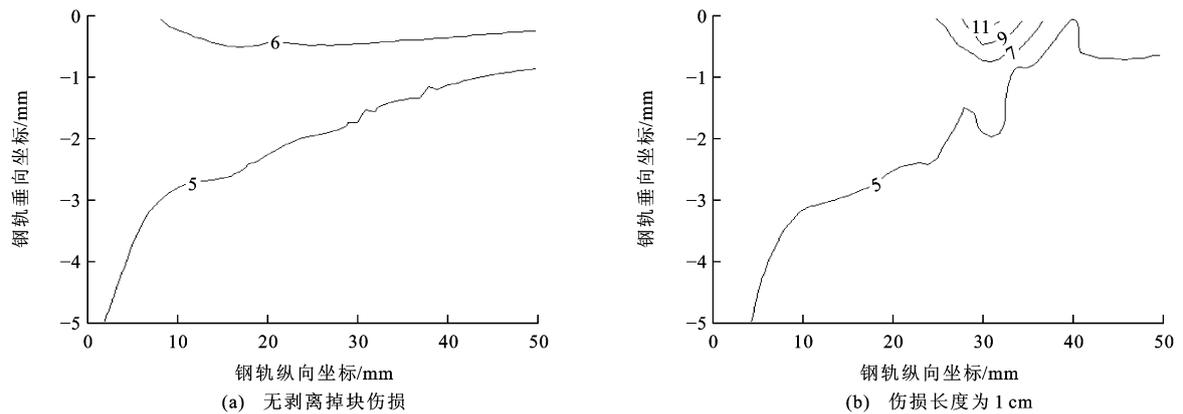


图 3 塑性变形场分布(单位: 10^{-2} mm)

Fig. 3 Distributions of plastic deformation fields (units: 10^{-2} mm)

塑性变形约为前侧的 2 倍,说明剥离掉块伤损沿伤损后侧扩展的程度大于前侧。

无剥离掉块伤损条件下和伤损长度为 1 cm 时车轮滑过伤损区后钢轨的温度场分布见 4, 纵坐标为 50 mm 的钢轨接触表面上的点为当前接触斑中心, 垂向坐标为 0 的线表示钢轨的接触表面, 钢轨剥离掉块伤损位于钢轨纵向坐标为 30~40 mm 的钢

轨表面上。由图 4 可知: 剥离掉块伤损区摩擦温升的影响深度小于无损伤时的情况, 这是由于车轮经过伤损区时不能与钢轨完全接触, 传递到钢轨上的摩擦热减少。无论钢轨有无剥离掉块伤损, 温度场在钢轨纵向距原点约 15 mm 处均有一个温度峰值, 这是由于车轮和钢轨间的接触类型是自由接触, 在车轮运行过程中, 车轮有垂向的振动, 因此, 轮轨间

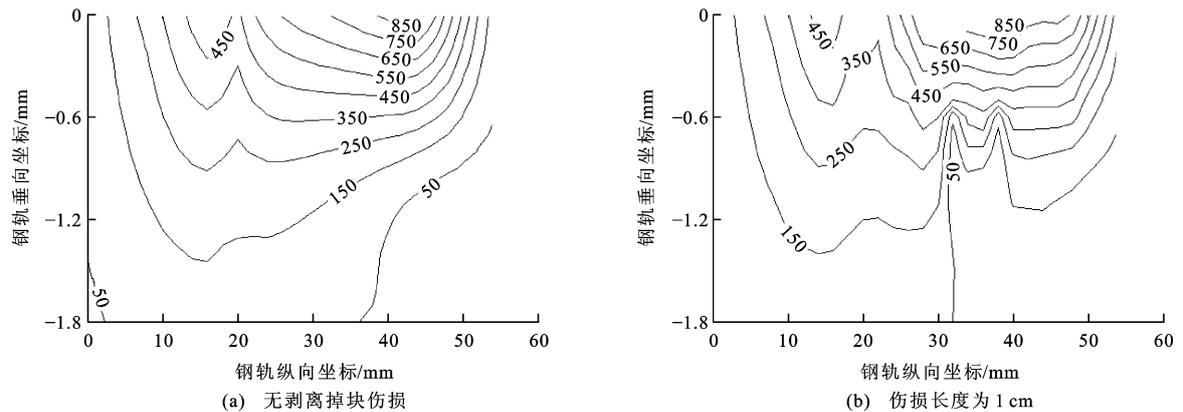


图 4 钢轨温度场分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Distributions of rail temperature fields (units: $^{\circ}\text{C}$)

的垂向力是变化的,接触斑上的法向压力也会随之变化。由式(2)可知,轮轨接触区内由摩擦导致的热流密度会随接触斑上的法向压力的变化而变化,因此,钢轨的温度会随热流密度的变化波动,钢轨的最高温升均出现在接触斑后半轴区域内。

钢轨的最大接触应力、最大等效应力和最大纵向剪切应力随剥离掉块伤损长度的变化见图 5,可以看出:剥离掉块处钢轨的最大接触应力远大于无损伤区域;当剥离掉块长度小于 2 cm 时,钢轨最大接触应力随伤损长度的增大而增大,这是由于伤损区域的扩大减小了轮轨的接触面积;当剥离掉块长度大于 2 cm 时,钢轨最大接触应力随伤损长度的增大而逐渐减小,因为当剥离掉块长度增大到一定程度后,车轮可以和伤损区中部部分接触;当剥离掉块长度小于 4 cm 时,剥离掉块伤损后侧钢轨的最大等效应力随伤损长度的增大呈增大趋势;当剥离掉块长度大于 4 cm 时,剥离掉块伤损后侧钢轨的最大等效应力随伤损长度的增加反而减小,这是由于随着伤损长度的增大,车轮与钢轨脱离接触的时间增加,轮轨摩擦热损失增多,热应力减小,同时在伤损深度不变条件下伤损长度增加缓和了剥离掉块处的轮轨冲击作用;钢轨的最大纵向剪切应力出现在剥离掉块处前侧,有剥离掉块伤损时的最大纵向剪切应力大于无损伤的情况,随着伤损长度的增大,最大纵向剪切应力呈减小趋势,当剥离掉块长度大于 4 cm 时,最大纵向剪切应力趋于稳定。

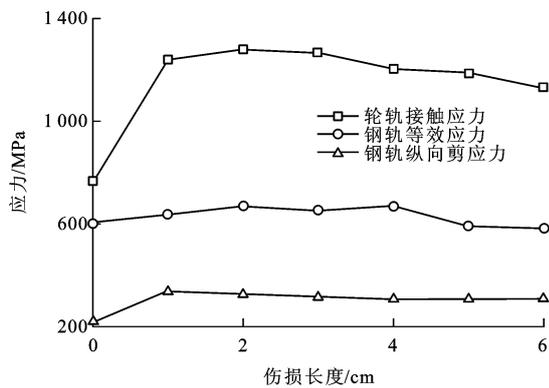


图 5 伤损长度对应力的影响

Fig. 5 Influences of spalling length on stresses

钢轨的最大等效塑性应变和最大塑性变形随剥离掉块伤损长度的变化分别见图 6、7,可以看出:当剥离掉块长度小于 2 cm 时,剥离掉块伤损前侧钢轨的最大等效塑性应变随伤损长度的增大而增大,伤损扩展程度加剧;当剥离掉块长度大于 2 cm 时,最大等效塑性应变随伤损长度的增大而减小,这是由

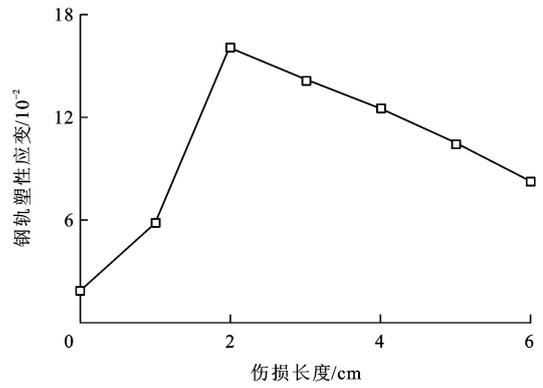


图 6 伤损长度对塑性应变的影响

Fig. 6 Influence of spalling length on plastic strain

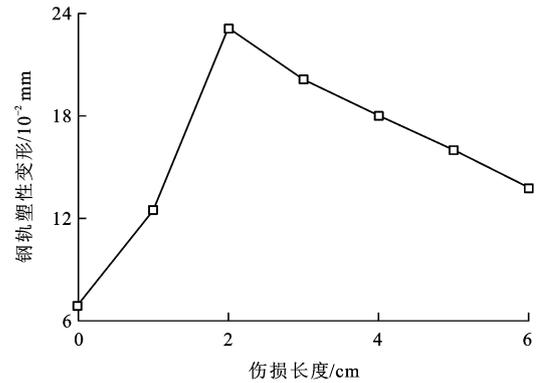


图 7 伤损长度对塑性变形的影响

Fig. 7 Influence of spalling length on plastic deformation

于伤损长度的增大降低了轮轨的冲击作用;钢轨的最大塑性变形与最大等效塑性应变出现在同一位置,且两者随剥离掉块伤损长度变化的趋势相同。

钢轨的最高温升随剥离掉块伤损长度的变化见图 8,可以看出:钢轨发生剥离掉块后的最高温升大于无损伤情况下的温升,剥离掉块伤损长度在 2 mm 左右时,钢轨的最高温升最大。

3.2 剥离掉块伤损深度对钢轨的影响

当车轮滑动速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,轴重为 21 t,钢轨

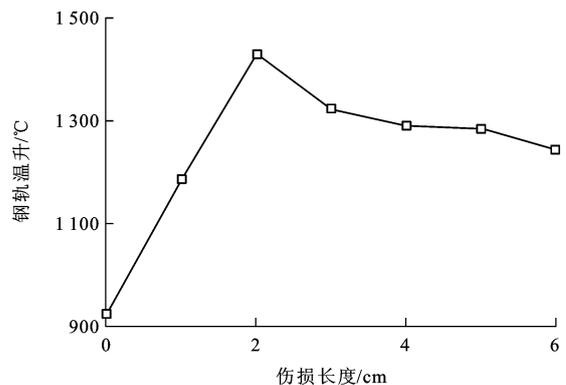


图 8 伤损长度对温升的影响

Fig. 8 Influence of spalling length on temperature rising

剥离掉块的长度取 2 cm 时,分析剥离掉块的深度分别取 0.5、1、2、…、6 mm 时车钢轨表面的温升、应力、塑性应变和变形情况。

钢轨的最大接触应力、最大等效应力和最大纵向剪切应力随剥离掉块伤损深度的变化情况见图 9,可以看出:当剥离掉块伤损深度小于 1 mm 时,最大接触应力随伤损深度的增大而增大;当伤损深度大于 1 mm 小于 5 mm 时,钢轨的变形加剧,最大接触应力随伤损深度的增大略有降低且逐渐趋于平稳;当伤损深度大于 5 mm 后,最大接触应力随伤损深度的增加又逐渐增大,这是由于伤损深度的增大加剧了应力集中效应;当剥离掉块深度小于 1 mm 时,剥离掉块伤损对钢轨最大等效应力几乎没有影响;当伤损深度大于 1 mm 时,剥离掉块伤损后侧钢轨的最大等效应力随深度的增加呈减小趋势;最大纵向剪切应力随剥离掉块伤损深度的增大呈增大趋势,当伤损深度达到 4 mm 后,最大纵向剪切应力趋于稳定。

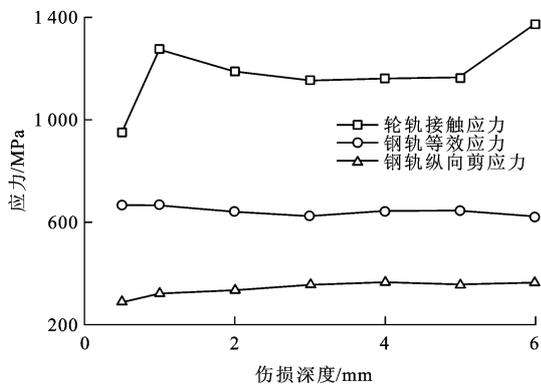


图 9 伤损深度对应力的影响
Fig. 9 Influences of spalling depth on stresses

钢轨的最大等效塑性应变和最大塑性变形随剥离掉块伤损深度的变化分别见图 10、11,可以看出:最大等效塑性应变随剥离掉块伤损深度的增大而增大,当伤损深度达到 4 mm 时,等效塑性应变最大,随着伤损深度的进一步增大,等效塑性应变呈减小趋势;钢轨的最大塑性变形随剥离掉块伤损深度的增大而增大。

钢轨的最高温升随剥离掉块伤损深度的变化见图 12,可以看出:剥离掉块伤损深度在 1 mm 左右时,钢轨的最高温升最大。

3.3 摩擦因数对钢轨剥离掉块伤损的影响

为了研究摩擦因数对钢轨剥离掉块伤损的影响,取轴重为 21 t,钢轨剥离掉块伤损长度为 2 cm,深度为 4 mm,摩擦因数 μ_T 分别取 0.05、0.1、0.2、0.3、0.334、0.4 六种工况进行对比分析。以摩擦因

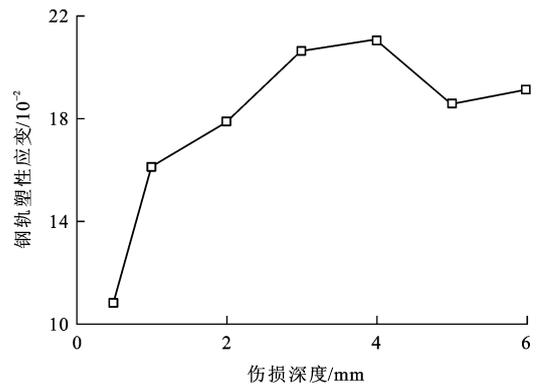


图 10 伤损深度对塑性应变的影响

Fig. 10 Influence of spalling depth on plastic strain

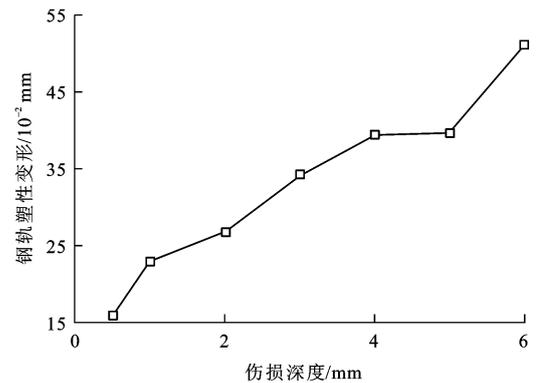


图 11 伤损深度对塑性变形的影响

Fig. 11 Influence of spalling depth on plastic deformation

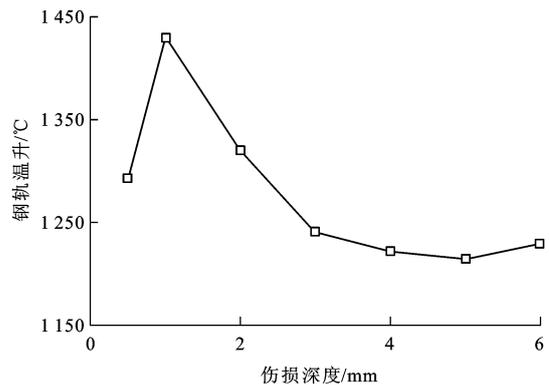


图 12 伤损深度对温升的影响

Fig. 12 Influence of spalling depth on temperature rising

数取 0.1、0.2 和 0.334 三种情况为例,钢轨的塑性应变场和塑性变形场分布分别见图 13、14,垂向坐标为 0 的线表示钢轨的接触表面,纵坐标为 100 mm 的钢轨接触表面上的点为当前接触斑中心,剥离掉块伤损位于钢轨纵向坐标为 30~50 mm 的钢轨表面上。

由图 13 可知:当摩擦因数小于 0.334 时,随着摩擦因数的增大,钢轨等效塑性应变的最大值增大,且等效塑性应变值大于 5.0×10^{-3} 的区域增大。由

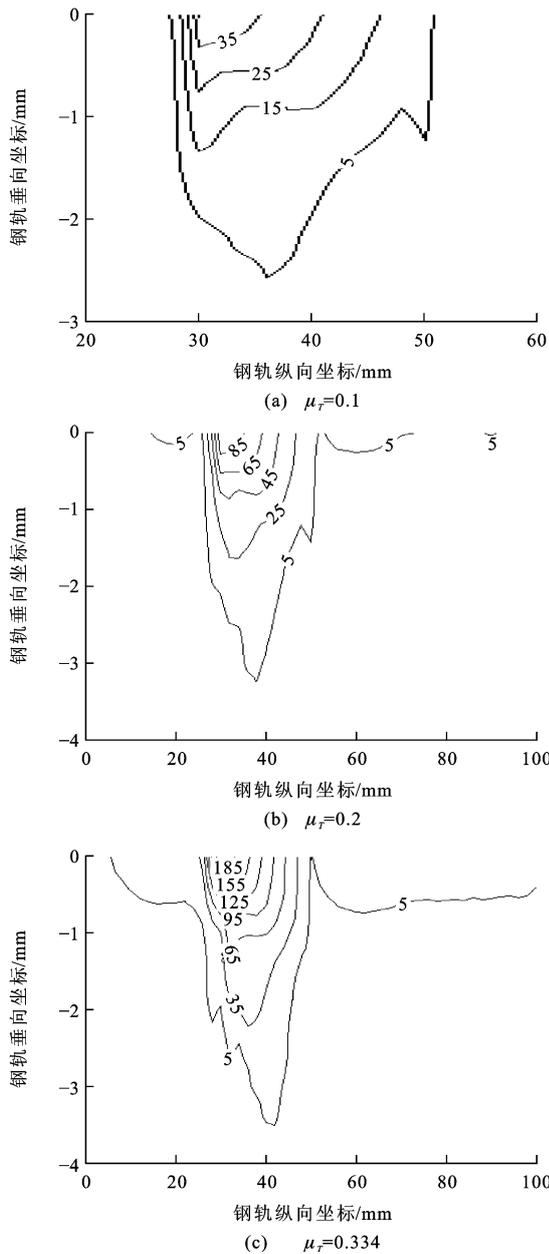


图 13 不同摩擦因数条件下等效塑性应变场分布(单位: 10^{-3})

Fig. 13 Distributions of equivalent plastic strain fields with different friction coefficients (units: 10^{-3})

图 14可知:钢轨的塑性变形主要分布在剥离掉块伤损附近的后侧,与钢轨等效塑性应变的分布规律基本一致;当摩擦因数小于 0.334 时,钢轨的塑性变形随摩擦因数的增大急剧增大,说明剥离掉块伤损的扩展速度会随着轮轨摩擦因数的增大而加剧,因此,合理安排钢轨涂油以减小车轮与轨头接触点的摩擦因数可以有效降低剥离掉块伤损的发展。

摩擦因数对钢轨最大接触应力、最大等效应力和最大纵向剪切应力的影响见图 15,可以看出:轮轨间最大接触应力随摩擦因数的增加呈减小趋势,最大接触应力发生在剥离掉块伤损处,当摩擦因数

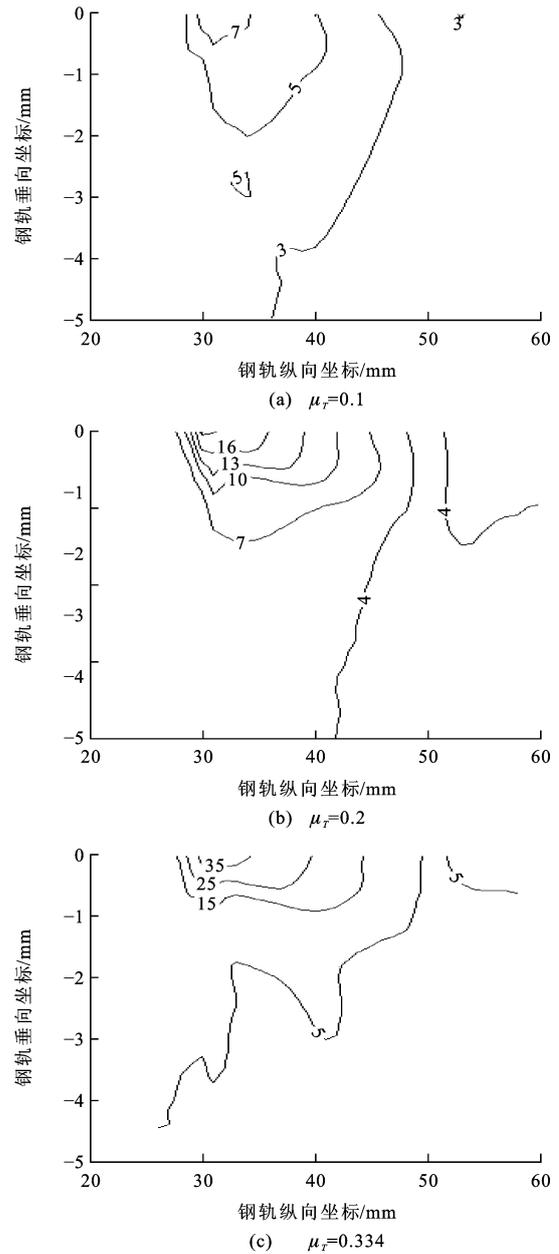


图 14 不同摩擦因数条件下塑性变形场分布(单位: 10^{-2} mm)

Fig. 14 Distributions of plastic deformation fields with different friction coefficients (units: 10^{-2} mm)

增大时,轮轨接触面上的摩擦力增大,车轮经过剥离掉块伤损处时,与列车运行方向反向的摩擦力会减弱该过程中冲击作用,从而在一定程度上降低了最大接触应力。由式(2)可知,随着摩擦因数的增大,接触斑处的热流密度增大,导致接触斑附近轨头材料的摩擦温升增大。当摩擦因数增大时,轮轨接触面上的摩擦力增大,同时摩擦温升高引起的热应力增加,因此,钢轨的最大等效应力和最大纵向剪切应力均随摩擦因数的增大而增大,当摩擦因数大于 0.3 时,随着摩擦因数的增大,最大等效应力和最大纵向剪切应力的增长速率变缓。摩擦因数对钢轨最

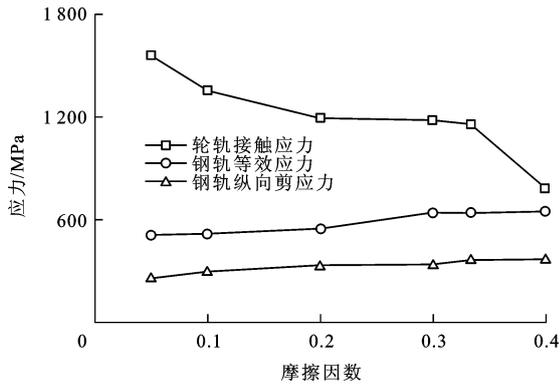


图 15 摩擦因数对应力的影响

Fig. 15 Influences of fraction coefficient on stresses

大等效塑性应变、最大塑性变形和最高温升的影响分别见图 16~18,可以看出:钢轨的最大等效塑性应变、最大塑性变形和最高温升均随摩擦因数的增大呈增大趋势。

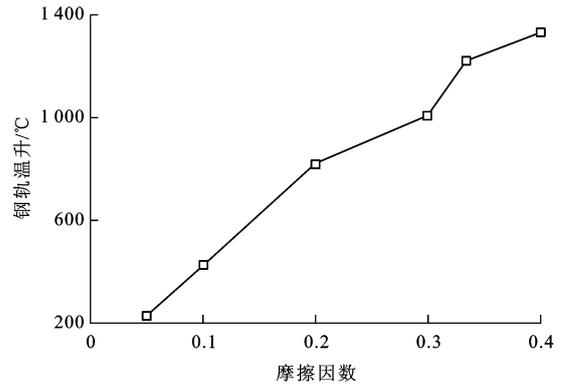


图 18 摩擦因数对温升的影响

Fig. 18 Influence of fraction coefficient on temperature rising

工况进行对比分析。

滑动速度对钢轨最大接触应力、最大等效应力和最大纵向剪切应力的影响见图 19,可以看出:当轮轨间的相对滑动速度小于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,轮轨间最大接触应力在滑动速度为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时最大;在相对滑动速度继续增大到 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的过程中,最大接触应力在滑动速度为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时最不利;钢轨的最大等效应力和最大纵向剪切应力受滑动速度的影响不大,最大等效应力在滑动速度为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到最大值,最大纵向剪切应力在滑动速度为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时最大。

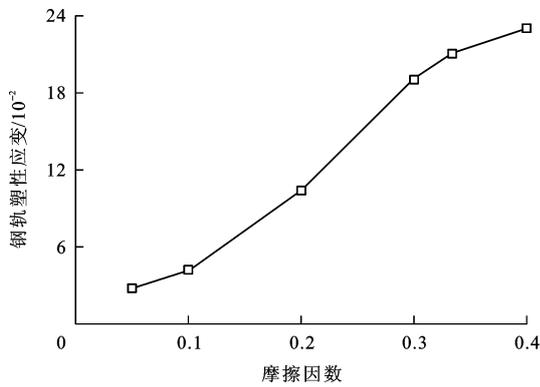


图 16 摩擦因数对塑性应变的影响

Fig. 16 Influence of fraction coefficient on plastic strain

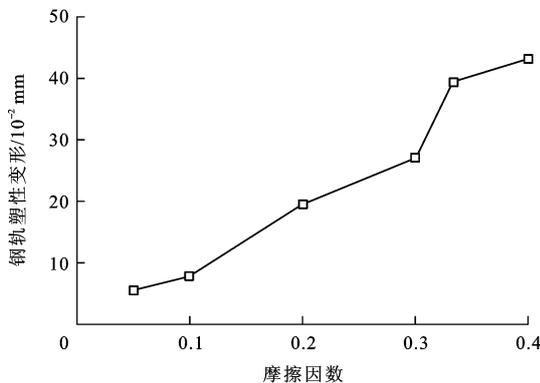


图 17 摩擦因数对塑性变形的影响

Fig. 17 Influence of fraction coefficient on plastic deformation

3.4 滑动速度对钢轨剥离掉块伤损的影响

为了研究轮轨间的相对滑动速度对钢轨剥离掉块伤损的影响,取轴重为 21 t,轮轨间的摩擦因数为 0.334,钢轨剥离掉块伤损长度为 2 cm,深度为 4 mm,滑动速度分别取 $0.5、1、2、\dots、6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 七种

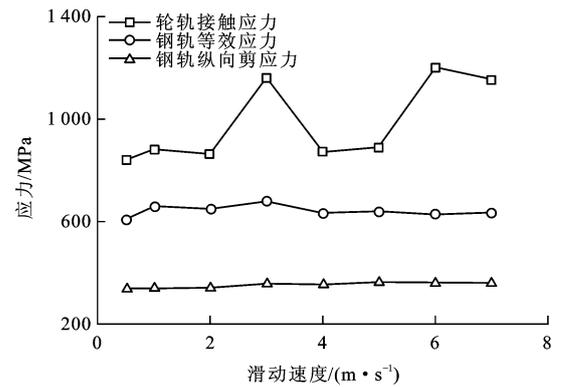


图 19 滑动速度对应力的影响

Fig. 19 Influences of sliding speed on stresses

滑动速度对钢轨最大等效塑性应变和最大塑性变形的影响分别见图 20、21,可以看出:当滑动速度小于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,钢轨最大等效塑性应变随滑动速度的增大而增大,滑动速度达到 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其值最大;当滑动速度从 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,塑性应变随滑动速度的增大而减小;随着滑动速度的继续增大,塑性应变呈增大趋势。当滑动速度小于等于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,钢轨最大塑性变形随滑动速度的增大而增大,滑动速度达到 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时其值最大;当滑动速度大于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,最大塑性变形在滑动

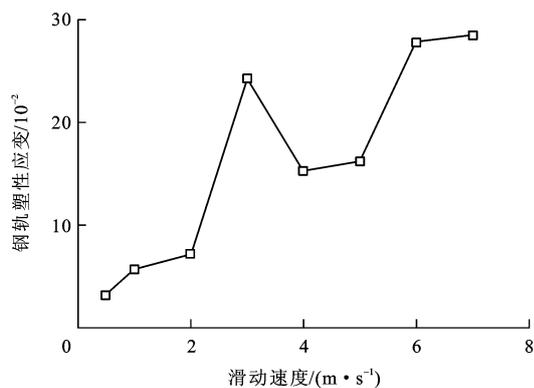


图 20 滑动速度对塑性应变的影响

Fig. 20 Influence of sliding speed on plastic strain

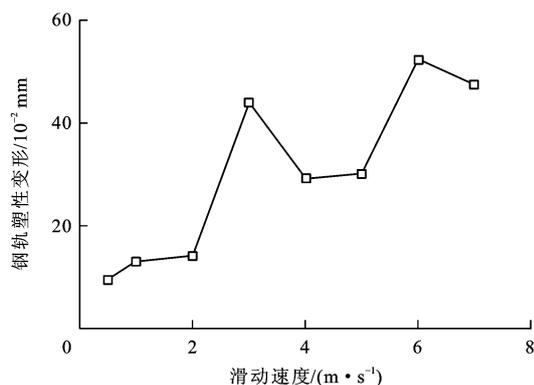


图 21 滑动速度对塑性变形的影响

Fig. 21 Influence of sliding speed on plastic deformation

速度为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时达到最大。

滑动速度对钢轨最高温升的影响见图 22, 可以看出: 钢轨的最高温升随滑动速度的增大呈升高趋势; 当滑动速度小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 最高温升随滑动速度的增大增长明显; 当滑动速度大于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 随滑动速度的增大, 最高温升增长不明显。

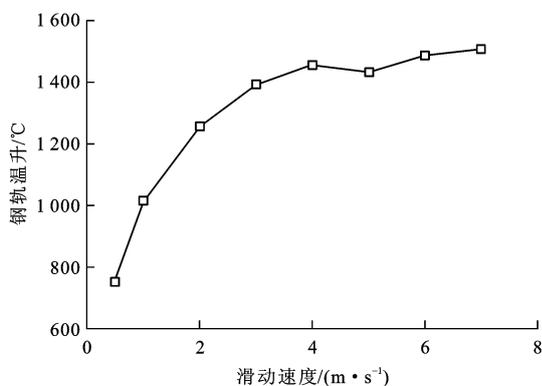


图 22 滑动速度对温升的影响

Fig. 22 Influence of sliding speed on temperature rising

4 结 语

利用有限元软件 ANSYS 建立钢轨表面剥离掉

块伤损条件下的热弹塑性平面应变有限元模型, 分析了钢轨表面剥离掉块不同伤损长度和深度以及特定伤损区域条件下不同摩擦因数和滑动速度对钢轨受力和变形的影响, 结论如下。

(1) 当剥离掉块伤损深度为 1 mm 时, 轮轨间的接触应力、瞬时摩擦温升、等效塑性应变与塑性变形在伤损长度为 2 cm 时达到最大值, 纵向剪应力在伤损长度为 1 cm 时达到最大值, 等效应力在伤损长度为 4 cm 时达到最大值。

(2) 当剥离掉块伤损长度为 2 cm 时, 轮轨间的接触应力与塑性变形在伤损深度为 6 mm 时达到最大值, 钢轨的瞬时摩擦温升与等效应力在伤损深度为 1 mm 时达到最大值, 等效塑性应变与纵向剪应力在伤损深度为 4 mm 时达到最大值。

(3) 剥离掉块区域后侧的等效塑性应变约为前侧的 $3 \sim 4$ 倍, 后侧的塑性变形约为前侧的 2 倍, 剥离掉块伤损沿伤损后侧扩展的速度大于前侧。

(4) 接触应力随摩擦因数的增大而减小, 钢轨的瞬时摩擦温升、等效塑性应变、塑性变形、纵向剪应力和等效应力均随摩擦因数的增大而增大, 当摩擦因数大于 0.3 时, 随着摩擦因数的增大, 最大等效应力和最大纵向剪切应力的增长速率变缓。

(5) 当轮轨间相对滑动速度小于 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 从钢轨的应力、应变、变形与温升方面综合比较, 可以看出当滑动速度等于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和达到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, 钢轨的受力、变形和温升最不利。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 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.
WANG Zhi-ping. Research of the 60 kg/m rail corner fine cracks and shelling defects on heavy-haul and fast speed railway[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2005, 22(4): 1-6. (in Chinese)
- [2] DOI H, MIYAMOTO T, NISHIYAMA Y, et al. A new experimental device to investigate creep forces between wheel and rail[J]. Wear, 2011, 274(1/2): 40-46.
- [3] SICHANI M S, ENBLUM R, BERG M. A novel method to model wheel-rail normal contact in vehicle dynamics simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(12): 1752-1764.
- [4] BIAN Jian, GU Yuan-tong, MURRAY M H. A dynamic wheel-rail impact analysis of railway track under wheel flat by finite element analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(6): 784-797.
- [5] ZHU Yi, OLOFSSON U, SÖDERBERG A. Adhesion modeling

- in the wheel-rail contact under dry and lubricated conditions using measured 3D surfaces[J]. *Tribology International*, 2013, 61: 1-10.
- [6] WEI Lai, ZENG Jing, WU Ping-bo, et al. Indirect method for wheel-rail force measurement and derailment evaluation[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(12): 1622-1641.
- [7] KUMINEK T, ANIOEK K. Methodology and verification of calculations for contact stresses in a wheel-rail system[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(1): 111-124.
- [8] ALONSO A, GUIRAL A, BAEZA L, et al. Wheel-rail contact: experimental study of the creep forces-creepage relationships[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(S1): 469-487.
- [9] 吴磊,温泽峰,金学松. 轮轨摩擦耦合热弹性有限元分析模型[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(6): 21-27.
WU Lei, WEN Ze-feng, JIN Xue-song. Elastic finite element analysis model of coupling friction heat for wheel/rail[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(6): 21-27. (in Chinese)
- [10] IGNESTIA M, MALVEZZI M, MARINI L, et al. Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems[J]. *Wear*, 2012, 284-285: 1-17.
- [11] ROVIRA A, RODA A, MARSHALL M B, et al. Experimental and numerical modelling of wheel-rail contact and wear[J]. *Wear*, 2011, 271(5/6): 911-924.
- [12] GORYACHEVA I G, SOSHENKOV S N, TORSKAYA E V. Modelling of wear and fatigue defect formation in wheel-rail contact[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(6): 767-783.
- [13] SUNDH J, OLOFSSON U. Relating contact temperature and wear transitions in a wheel-rail contact[J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 78-85.
- [14] SEO J, KWON S, LEE D. Effects of surface defects on rolling contact fatigue of rail[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 1274-1278.
- [15] 孙效杰,周文祥. 踏面磨耗及其对轮轨接触几何关系的影响[J]. *铁道车辆*, 2010, 48(7): 1-4, 14.
SUN Xiao-jie, ZHOU Wen-xiang. Tread wear and its effect on wheel-rail contact geometry[J]. *Railway Vehicles*, 2010, 48(7): 1-4, 14. (in Chinese)
- [16] 李伟,曾全军,朱士友,等. 地铁钢轨波磨对车辆和轨道动态行为的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15(1): 34-42.
LI Wei, ZENG Quan-jun, ZHU Shi-you, et al. Effect of metro rail corrugation on dynamic behaviors of vehicle and track[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(1): 34-42. (in Chinese)
- [17] 白雁,袁昊. 城市轨道交通钢轨伤损的评价分析[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(3): 124-128.
BAI Yan, YUAN Hao. Evaluation analysis on rail damage of urban rail transit[J]. *China Safety Science Journal*, 2006, 16(3): 124-128. (in Chinese)
- [18] 周清跃,张建峰,郭战伟,等. 重载铁路钢轨的伤损及预防对策研究[J]. *中国铁道科学*, 2010, 31(1): 27-31.
ZHOU Qing-yue, ZHANG Jian-feng, GUO Zhan-wei, et al. Research on the rail damages and the preventive countermeasures in heavy haul railways[J]. *China Railway Science*, 2010, 31(1): 27-31. (in Chinese)
- [19] 任安超,周桂峰,吉玉,等. 50 kg·m⁻¹钢轨踏面掉块缺陷分析[J]. *钢铁*, 2009, 44(1): 91-94.
REN An-chao, ZHOU Gui-feng, JI Yu, et al. Analysis on swap block on tread of 50 kg·m⁻¹ rail[J]. *Iron and Steel*, 2009, 44(1): 91-94. (in Chinese)
- [20] 周剑华,任安超,吉玉,等. U71Mn钢轨踏面剥离掉块缺陷分析[J]. *中国铁道科学*, 2013, 34(2): 1-6.
ZHOU Jian-hua, REN An-chao, JI Yu, et al. Analysis of the reasons for the spalling defects on U71Mn rail treads[J]. *China Railway Science*, 2013, 34(2): 1-6. (in Chinese)
- [21] 陈朝阳,张银花,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.
CHEN Zhao-yang, ZHANG Yin-hua, LIU Feng-shou, et al. Analysis on the formation cause of spalling and damage of the heat-treated low rail on Shuohuang Railway curve[J]. *China Railway Science*, 2008, 29(4): 28-34. (in Chinese)
- [22] 吴雄先,邓建辉,王飞龙. 钢轨踏面掉块原因分析[J]. *理化检验:物理分册*, 2009, 45(1): 39-41.
WU Xiong-xian, DENG Jian-hui, WANG Fei-long. Reason analysis of peeling on rail tread[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 2009, 45(1): 39-41. (in Chinese)
- [23] CHEN Y C, LEE S Y. Elastic-plastic wheel-rail thermal contact on corrugated rails during wheel braking[J]. *Journal of Tribology*, 2009, 131(1): 1-9.