

基于冲击疲劳本构模型的高速铁路轮轨滚滑接触力学行为*

周琛汶¹, 周雄飞¹, 敬霖¹

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 冲击疲劳是指材料/结构在反复冲击载荷作用下, 局部应力集中和应变快速累积引发材料/结构内部微损伤, 并最终发生断裂失效的现象。冲击疲劳载荷具有作用时间短、加载速度快和较高应变率等特点, 比常规疲劳具有更大的危害性。高速铁路轮轨动态接触载荷具有典型的冲击疲劳载荷特征, 会引起冲击疲劳损伤累积, 加剧服役性能劣化, 从而影响高速列车运行安全性。基于此, 本文基于轮轨材料冲击疲劳损伤耦合本构模型, 开展了三维轮轨滚动接触有限元模拟, 厘清了高速铁路轮轨瞬时滚滑接触应力/应变状态和黏滑特性, 分析了轮轨冲击疲劳损伤分布特征和累积演化规律, 探讨了列车速度、摩擦系数和牵引系数对冲击疲劳损伤的影响, 比较了材料本构模型对轮轨滚滑接触力学行为的影响。结果表明, 本文提出的轮轨材料冲击疲劳本构模型可以很好地模拟轮轨滚滑接触力学响应、黏滑分布特征和冲击疲劳损伤累积规律; 轮轨多次滚动接触时, 钢轨冲击疲劳损伤随滚动次数的增加呈现出非线性累积增长趋势, 但增长速率逐渐减小并近似趋于稳定; 与弹塑性本构模型相比, 冲击疲劳本构模型预测的轮轨接触力学响应更偏危险, 且随着滚动次数的增加, 这种耦合影响逐渐增大。研究结果可为高速轮轨系统的疲劳损伤评估与寿命预测提供理论指导和技术支持。

关键词: 冲击疲劳; 滚动接触; 塑性变形; 有限元分析; 高速轮轨

中图分类号: U211.5

国标学科代码: 58030

文献标识码: A

Wheel-rail rolling-sliding contact mechanical behavior of high-speed railways based on the impact fatigue constitutive model

ZHOU Chenwen¹, ZHOU Xiongfei¹, YUAN Kangbo², JING Lin¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Impact fatigue refers to the phenomenon in which materials or structures, subjected to repeated impact loading, experience localized stress concentrations and rapid strain accumulation, leading to the initiation of internal micro-damage and ultimately culminating in fracture failure. Impact fatigue loads are characterized by their brief duration, rapid loading rates, and significantly elevated strain rates, which has greater perniciousness than conventional fatigue. The dynamic contact forces between the wheel and rail of high-speed trains exhibit classic characteristics of impact fatigue loading, which induces the accumulation of impact fatigue damage, accelerates the deterioration of material mechanical properties; and consequently, compromises the operational safety of high-speed trains. In light of this, the present study integrates a material-based impact fatigue damage-coupled constitutive model to develop a comprehensive three-dimensional half-wheel-rail rolling contact finite element model. The stress-strain states and stick-slip characteristics of wheel-rail rolling/sliding contact are clarified, and the

*收稿日期: 2026-02-10; 修回日期: 2026-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (12122211); 国家铁路集团科技研究开发计划项目(L2024J003); 四川省自然科学基金 (2024NSFSC0155); 轨道交通运载系统全国重点实验室开放课题 (RVL2504)

第一作者: 周琛汶 (2001年—), 男, 硕士研究生. E-mail: zcw1528214702@my.swjtu.edu.cn;

通信作者: 敬霖 (1984年—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师. E-mail: jinglin@swjtu.edu.cn.

distribution features and accumulation evolution law of wheel-rail impact fatigue damage are analyzed. Meanwhile, the effects of train speed, friction coefficient, and traction coefficient on impact fatigue damage are explored, and the influence of material constitutive model on typical wheel-rail contact mechanical behavior is examined. The results clearly indicate that the proposed impact fatigue model is able to well represent the wheel-rail contact responses, stick-slip distribution characteristics and damage accumulation law. Under repeated rolling contact, the impact fatigue damage of the rail exhibits a nonlinear cumulative increasing trend with the rise of rolling cycles; however, the growth rate gradually decreases and eventually tends to stabilize approximately. Compared with the elastoplastic constitutive model, the wheel-rail contact mechanical responses predicted by the impact fatigue constitutive model are more severe and dangerous. Moreover, such coupling effect gradually intensifies with the increase of rolling cycles. These findings provide valuable theoretical insights and technical support for fatigue damage assessment and life prediction of high-speed wheel-rail systems.

Keywords: Impact fatigue; Rolling contact; Plastic deformation; Finite element analysis; High-speed wheel-rail

冲击疲劳是材料或结构在反复冲击载荷作用下, 损伤不断累积而引发的疲劳失效现象^[1-5], 如飞机起落架^[6]、舰载机拦阻钩^[7]等典型结构的失效。冲击疲劳损伤演化速度更快、失效机理更为复杂, 比常规疲劳具有更大的危害性。随着我国高速动车组运营速度的持续提升, 轮轨系统在服役过程中承受的动态载荷也急剧增大^{[8]-[9]}, 尤其在启动、制动、通过道岔、轨道不平顺及车轮不圆顺等条件下, 轮轨界面动力冲击效应进一步加剧。轮轨冲击载荷具有应变率高、作用时间短、加载速度快等特点, 反复冲击载荷极易引发轮轨材料内部损伤萌生, 进而诱发轮轨出现冲击疲劳失效。

冲击疲劳问题提出以来, 受到了航空航天等领域的广泛关注, 并在试验^[10]和仿真^[11]方面取得了一些研究成果。李泊立等^[12]开展了霍普金森杆式冲击疲劳试验方法的研究, 并通过 316L 不锈钢的三点弯曲试验验证了该方法的可靠性。研究发现, 高加载速率下位错缠结加剧导致裂纹更易萌生, 使得试样的冲击疲劳寿命显著低于非冲击疲劳寿命。钱诚成等^[13]利用落锤试验机研究了 TC18 钛合金在不同冲击能量下的冲击疲劳特性。研究表明, TC18 钛合金的冲击疲劳寿命随冲击载荷应变率的升高而显著下降。赵思涵等^[14]通过霍普金森杆式冲击疲劳试验系统, 研究了 Ti-6Al-4V 合金的冲击疲劳与非冲击疲劳性能, 发现在相同应力幅下冲击疲劳寿命仅为非冲击疲劳的 82.3%。可以发现, 冲击疲劳的作用会显著影响疲劳寿命, 应变率对疲劳性能的影响不可忽略。在轮轨关系研究领域, 针对高速轮轨滚动接触过程中的动态冲击和应变率效应, 相关研究团队围绕轮轨滚动接触力学行为和滚动接触疲劳方面开展了大量研究^{[15]-[16]}。研究表明, 车轮不圆顺引起的轮轨冲击载荷可达到准静态载荷的 2.5~7.5 倍^[17], 应变率水平可高至 10^2 量级以上^[18]; 轮轨接触不平顺引起的轮轨冲击作用和应变率效率对疲劳损伤影响不可忽略^[19]; 轨道不平顺同样会加剧冲击载荷, 从而加速疲劳裂纹的萌生与扩展^[20]。然而, 现有研究多聚焦于常规的滚动接触疲劳, 关于轮轨冲击疲劳损伤研究仍处于一片空白。

基于此, 本文从冲击疲劳的新视角研究轮轨滚动接触力学行为和疲劳损伤问题, 建立了考虑材料冲击疲劳损伤耦合的本构模型, 构建了三维轮轨滚动接触有限元模型, 探究了高速列车轮轨滚滑接触力学行为, 讨论了不同列车速度、不同摩擦系数以及不同牵引系数对冲击疲劳损伤的影响, 探讨了材料本构模型对轮轨接触力学行为的影响。

1 三维轮轨滚动接触有限元模型

1.1 有限元模型

考虑到轮轨系统的对称性, 建立了半轮对-钢轨三维轮轨滚动接触有限元模型, 模型包括簧上质量、一系悬挂、轮对和轨道, 如图 1 所示。簧上质量简化为质点, 并与一系悬挂相连; 一系悬挂采用连接器单元来模拟。车轮踏面采用 LMA 型磨耗踏面, 半径 R 为 460 mm; 钢轨为 CN60 型, 总长度 15392 mm, 轨底坡为 1:40。这里考虑无砟轨道结构, 从上到下依次为钢轨、扣件、轨道板、砂浆层、

底座和路基。其中，扣件系统使用 5×7 排列（横向为 7，纵向为 5）的连接单元来模拟橡胶垫，以表征其刚度和阻尼特性。为平衡模型求解精度与计算效率，对车轮与钢轨接触区附近的网格进行细化，最小网格尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ，其它区域的网格则合理过渡^[21]。模型选用 C3D8R 线性减缩积分 8 节点实体单元进行划分，整个模型包含 3599034 个单元和 3843871 个节点。

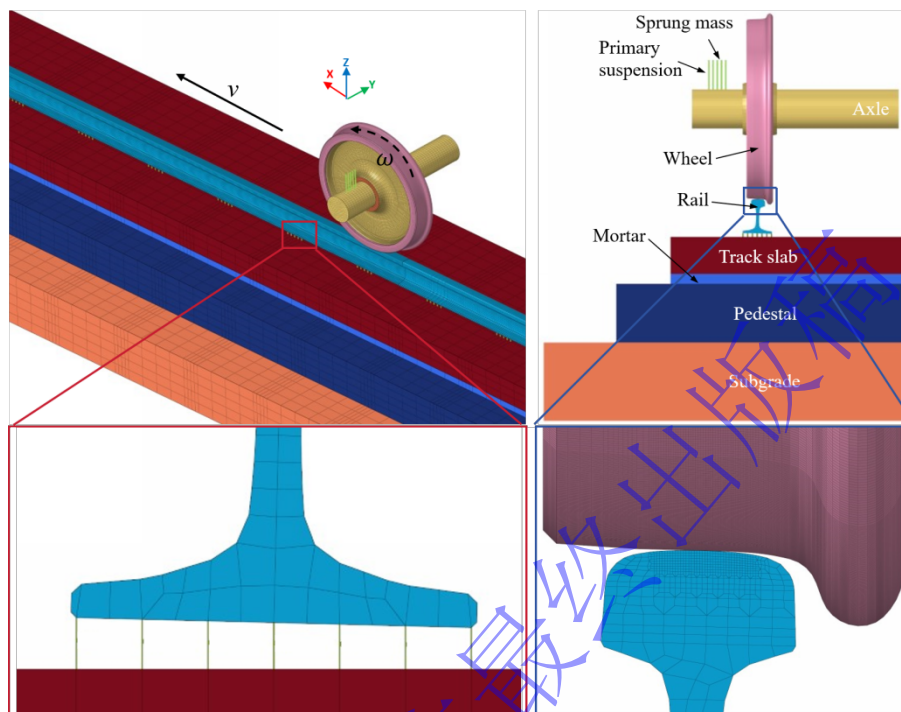


图 1 半轮对-钢轨三维轮轨滚动接触有限元模型

Fig.1 Half-Wheel-Rail Three-Dimensional Rolling Contact Finite Element Model

表 1 轮轨系统模型参数

Table 1 Wheel-rail system model parameters

| 参数 | 数值 |
|------------------------|-------------------|
| 车轮半径/mm | 460 |
| 簧上质量/kg | 6600 |
| 一系悬挂刚度 K_1 /(kN/m) | 880 |
| 一系悬挂阻尼 C_1 /(kN·s/m) | 8 |
| 扣件总刚度 K_2 /(kN/m) | 49000 |
| 扣件总阻尼 C_2 /(kN·s/m) | 63 |
| 列车速度(km/h) | 300、350、400、450 |
| 摩擦系数 f | 0.05、0.1、0.2、0.45 |
| 牵引系数 μ | 0.1、0.2、0.3、0.5 |

模型中，车轴与轮毂、轨下结构各部件之间均采用共节点连接。车轮踏面与钢轨之间采用基于罚函数的 Surface-to-surface contact 接触算法进行定义，钢轨表面被设定为主接触面，车轮踏面则为从接触面。接触属性包括轮轨接触面之间的法向作用和切向作用，其中法向接触采用“硬”接触算法，切向接触则通过罚函数法定义摩擦系数。通过连接器单元设置垂向刚度和阻尼来模拟一系悬挂和扣件。整个轮轨系统模型参数如表 1 所示。

1.2 材料模型及参数

为准确反映轮轨材料在滚动接触过程中的损伤演化，轮辋和钢轨材料采用了冲击疲劳损伤耦合本

构模型^[22]。该模型通过引入损伤变量 D 来描述材料的刚度退化与塑性变形的耦合作用，并在损伤演化方程中考虑应变率效应的影响，从而能够准确表征车轮和钢轨滚动接触过程中的塑性流动、损伤演化及其耦合作用。基于经典的 Lemaitre 塑性损伤演化方程^[23]，考虑应变率效应的影响，提出了适用于轮轨冲击疲劳的损伤演化方程，其表达式为^[23]：

$$\Delta D = \left[\frac{(\sigma_{eq}^D)^2 R_v}{2ES(1-D)^2} \right]^m \left[1 + \alpha \ln \left(\dot{\bar{\epsilon}}^{pl} / \dot{\epsilon}_0 \right) \right] \Delta \bar{\epsilon}^{pl} \quad (1)$$

式中， ΔD 为损伤增量， σ_{eq}^D 为损伤状态下的屈服应力， $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ 为塑性应变增量， $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ 为塑性应变率， $\dot{\epsilon}_0 = 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 为参考应变率， S 、 m 为材料性能参数， α 为冲击疲劳损伤应变率敏感系数， $D = \sum \Delta D$ 为材料当前状态下的损伤值，表示冲击疲劳作用下材料力学性能的退化程度， E 为弹性模量， R_v 为应力三轴度函数。 R_v 可写为：

$$R_v = \left[2(1+\nu)/3 \right] + \left[3(1-2\nu)(\sigma_H / \sigma_{eq}^D)^2 \right] \quad (2)$$

式中， ν 为泊松比， σ_H 为静水压力。

设材料未受损时的弹性模量为 E ，损伤后的等效弹性模量 E_D 可表示为：

$$E_D = (1-D)E \quad (3)$$

基于应变等价性假设，忽略温度的影响，将有效应力概念引入 Johnson-Cook 本构模型，得到以下损伤耦合的本构关系：

$$\sigma_{eq}^D = \left[(1-D)A + (1-D)B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\dot{\bar{\epsilon}}^{pl} / \dot{\epsilon}_0 \right) \right] \quad (4)$$

式中， $\bar{\epsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变， A 是材料在参考温度和参考应变率下的屈服强度； B 和 n 为加工硬化参数； C 是应变率敏感系数。

表 2 轮轨冲击疲劳损伤耦合本构模型参数

Table 2 Parameters of the coupled constitutive model for wheel-rail impact fatigue damage

| 结构 | E /MPa | ν | A /MPa | B /MPa | n | C | S /MPa | m | α |
|----|----------|-------|----------|----------|------|--------|----------|------|----------|
| 轮辋 | 213000 | 0.3 | 530 | 829.9 | 0.25 | 0.0095 | 2.7 | 2.34 | 4.1 |
| 钢轨 | 193000 | 0.3 | 525 | 837 | 0.23 | 0.0085 | 3.9 | 1.47 | 0.0057 |

表 3 轮轨系统其它部位的力学性能参数^[27]

Table 3 Structural mechanical performance parameters of wheel-rail systems^[27]

| 结构 | 密度/(kg/m ³) | 泊松比 | 弹性模量/GPa | 屈服强度/MPa | 切线模量/GPa |
|-----|-------------------------|-------|----------|----------|----------|
| 轮辐 | 7800 | 0.3 | 216 | 395 | 21 |
| 轮毂 | 7800 | 0.3 | 213 | 417 | 21 |
| 车轴 | 7800 | 0.3 | 206 | 560 | 20 |
| 轨道板 | 2500 | 0.167 | 36.5 | - | - |
| 砂浆层 | 1800 | 0.2 | 7 | - | - |
| 底座 | 2400 | 0.2 | 34 | - | - |
| 路基 | 2250 | 0.2 | 0.19 | - | - |

该本构模型共有 9 个待定参数，其中， E 和 ν 是根据车轮钢和轨道钢的准静态拉伸实验获得； A 、 B 、 n 、 C 是根据轮/轨钢的高应变率力学性能实验结果获得^[25, 26]；损伤参数 S 和 m 是通过低周疲劳试验

结果拟合获得； α 是通过冲击疲劳实验数据拟合获得。详细的冲击疲劳试验数据和参数标定过程见文献[23]，具体参数如表 2 所示。由于轮轨接触载荷主要由轮辋和钢轨承受，故轮辐、轮毂和车轴采用考虑弹塑性的双线性本构模型，轨下结构（轨道板、砂浆层、底座和路基）仅采用线弹性模型。相关材料力学参数见表 3^[27]。

1.3 子程序 VUMAT 及其实现

通过开发 ABAQUS 用户材料子程序 VUMAT，耦合材料弹塑性变形、损伤演化与应变率效应，以实现损伤耦合 Johnson-Cook 本构模型的数值计算。VUMAT 在每个积分点根据给定的应变增量计算应力，并更新包括塑性应变与损伤在内的材料状态变量。数值计算的实现流程基于径向返回算法，包括弹性预测、塑性修正和状态变量更新，具体步骤如图 2 所示。

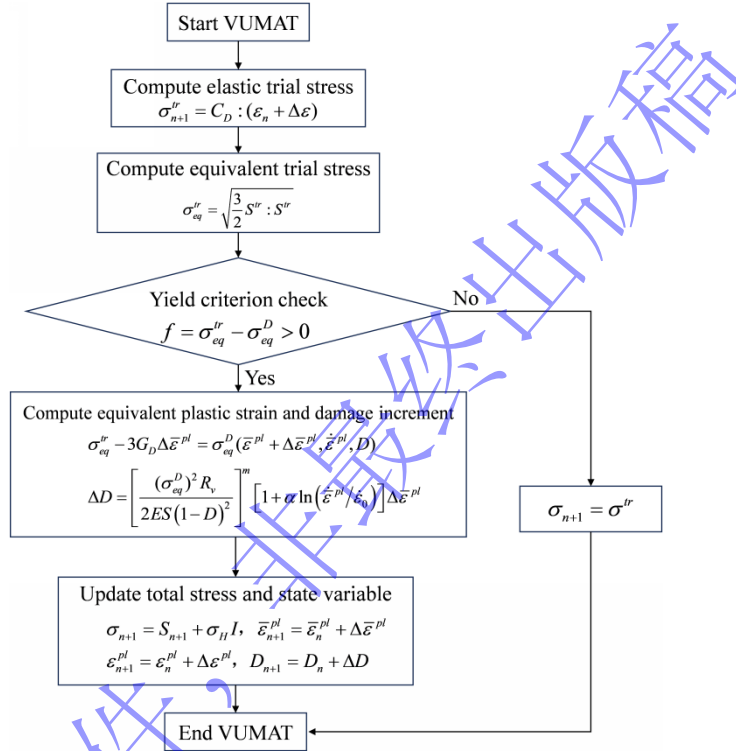


图 2 损伤耦合本构模型子程序流程图

Fig.2 Flowchart of the user material subroutine for the damage-coupled constitutive model

(1) 弹性预测

假设当前时间步的应变增量为纯弹性，计算试应力 σ^{tr} ：

$$\sigma_{n+1}^{tr} = \mathbf{C}_D : (\boldsymbol{\varepsilon}_n + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}) \quad (5)$$

式中， $\boldsymbol{\varepsilon}_n$ 为第 n 增量步开始时的应变张量， $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 为当前增量步的应变增量张量， \mathbf{C}_D 为当前损伤状态下的四阶弹性刚度张量，且有：

$$\mathbf{C}_D = (1-D)\mathbf{C}_0 \quad (6)$$

式中， \mathbf{C}_0 为无损材料的弹性刚度张量。

计算试等效应力 σ_{eq}^{tr} 可表示为：

$$\sigma_{eq}^{tr} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S}^{tr} : \mathbf{S}^{tr}} \quad (7)$$

式中， \mathbf{s}^{tr} 为试偏应力张量。

(2) 屈服判断

利用耦合损伤的 Johnson-Cook 屈服函数判断是否进入塑性：

$$f = \sigma_{eq}^{tr} - \sigma_{eq}^D \quad (8)$$

式中，耦合损伤的屈服应力 σ_{eq}^D 如式(4)所示，若 $f > 0$ 表示进入塑性阶段，若 $f \leq 0$ 则为弹性阶段，此时总应力 $\sigma_{n+1} = \sigma^{tr}$ 。

(3) 塑性修正

通过求解一致性条件 $f = 0$ 确定等效塑性应变增量 $\Delta\bar{\epsilon}^{pl}$ 。采用牛顿迭代法求解以下标量方程：

$$\sigma_{eq}^{tr} - 3G_D \Delta\bar{\epsilon}^{pl} = \sigma_{eq}^D(\bar{\epsilon}^{pl} + \Delta\bar{\epsilon}^{pl}, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl}, D) \quad (9)$$

式中， $G_D = (1-D)G_0$ 为损伤剪切模量， G_0 为无损伤时的剪切模量。迭代收敛后，更新偏应力 \mathbf{s} ：

$$\mathbf{s} = \frac{2G_D}{1 + \frac{3G_D}{\sigma_{eq}^D} \Delta\bar{\epsilon}^{pl}} \mathbf{e}^{tr} \quad (10)$$

式中， \mathbf{e}^{tr} 为试偏应变。

在每个增量步中，根据当前应力状态与塑性应变增量，通过式(1)计算损伤增量 ΔD ，并计算累积损伤量 D ：

$$D_{n+1} = D_n + \Delta D \quad (11)$$

式中， D_{n+1} 为当前增量步的损伤， n 为已完成的增量步总数。

(4) 变量更新

最后，进行应力与状态变量最终更新，总应力表达式为：

$$\sigma_{n+1} = \mathbf{S}_{n+1} + \sigma_H \mathbf{I} \quad (12)$$

式中， \mathbf{I} 为二阶单位张量。

同时，进行状态变量的更新，包括等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_{n+1}^{pl} = \bar{\epsilon}_n^{pl} + \Delta\bar{\epsilon}^{pl}$ ，塑性应变张量 $\boldsymbol{\epsilon}_{n+1}^{pl} = \boldsymbol{\epsilon}_n^{pl} + \Delta\boldsymbol{\epsilon}^{pl}$ 。每个积分点均重复上述计算过程，损伤以及损伤产生的影响将随应力应变状态实时更新。

1.4 隐式-显式序列求解

轮轨滚动接触模拟中采用隐式-显式序列求解方法^[21]，仿真流程分为隐式静态分析和显式动态求解。隐式静态分析阶段固定整个系统除垂向以外的自由度，施加重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ，并通过 ABAQUS/Standard 进行隐式求解，得到轮轨稳定接触的初始状态。随后将隐式结果作为初始条件传递至显式分析，解除纵向与转动约束。通过对轮对施加平动速度 \mathbf{v} 和相应的转动角速度 $\boldsymbol{\omega}$ ，模拟轮对在钢轨上的滚动行为，同时施加转矩 T 以模拟轮轨切向接触力。最后，采用 ABAQUS/Explicit 算法进行轮轨接触动态响应的求解。需要说明的是，仿真计算中还设置了动态松弛区段，以消耗初始波动，使车轮实现稳态滚滑接触。为实现多次循环滚动接触分析，在上述隐式-显式序列求解方法的基础上，将更新后的钢轨几何廓形和材料状态作为下一次求解的初始状态，重复上述步骤，以实现车轮多次循环通过目标区段的逐次模拟^[21]。

1.5 模型验证

图3给出了在摩擦系数 $f = 0.45$ 和牵引系数 $\mu = 0.3$ 条件下四种不同列车速度下(300 km/h、350 km/h、400 km/h、450 km/h)的轮轨接触力时程曲线。可以看出,不同列车速度下轮轨滚动接触力在20 ms已趋于稳定,动态松弛区 AB 段能有效消除初始波动,使稳态求解区 BC 段可以较准确地反映轮轨稳态滚动接触行为。图4对比了有限元法后处理所得黏滑特性曲线与基于弹性理论假设的FASTSIM算法^[28]计算的理论结果,数据点集分布在理论曲线附近,仿真和理论结果吻合较好,进一步验证了轮轨滚动接触有限元模型的准确性。

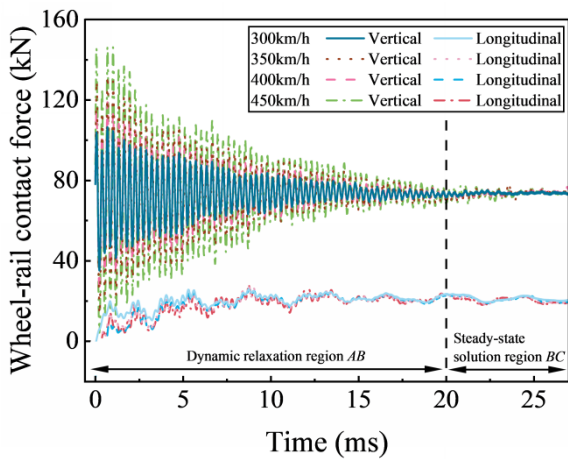


图3 不同列车速度下的轮轨接触力时程曲线
Fig.3 Time-history curve of wheel-rail contact force at different train speeds;

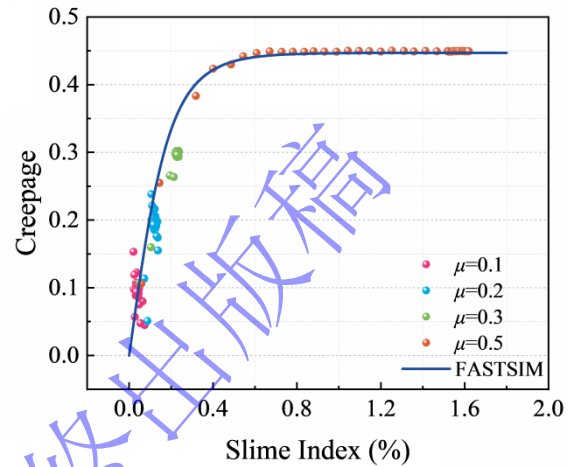


图4 基于有限元法和 FASTSIM 算法的黏滑特性曲线
Fig.4 Adhesion-slip characteristic curve based on the finite element method and FASTSIM algorithm

2 轮轨滚滑接触力学行为

基于冲击疲劳损伤耦合本构模型,分析了典型工况下(速度350 km/h、摩擦系数 $f = 0.45$ 和牵引系数 $\mu = 0.3$)轮轨单次滚动时的瞬时滚滑接触应力/应变响应和黏滑分布特性。

2.1 应力/应变响应

图5给出了沿车轮滚动方向的纵向截面和横向截面下的轮轨 Mises 应力分布图。可以看出,车轮与钢轨的 Mises 应力峰值均位于表面以下表层区域。由于牵引系数的作用,车轮的最大 Mises 应力中心位置在滚动方向上超前于车轮接触几何中心,表明牵引作用引起了应力分布的前移。车轮和钢轨上的最大 Mises 应力分别为 570.7 MPa 和 586.8 MPa,均超过了材料的屈服强度。

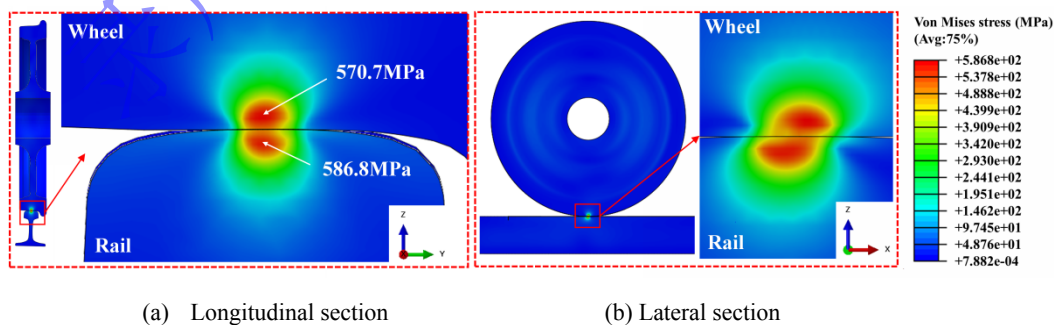


图5 轮轨 von Mises 应力分布

Fig. 5 Wheel-rail von Mises stress distribution

图6展示了轮轨接触区车轮单元#28407456和钢轨单元#24301792的 von Mises 应力及三向应力

分量的时程曲线。从图中可以看出，在非接触区时，轮/轨单元各应力分量为零；一旦进入接触区，单元在 0.3 ms 内就会产生的 von Mises 应力与三向应力响应，说明其承受着短时、高加载率的冲击载荷，极易引发冲击疲劳损伤。其中，y 向（横向）与 z 向（垂向）应力变化趋势相同，在接触过程中均表现为压应力，脱离接触后恢复为零。然而，x 向（纵向）应力行为明显不同：车轮单元进入接触区后纵向应力迅速转为压应力，脱离过程中逐渐转为拉应力，呈现“先压后拉”的受力特征；而钢轨单元则相反，表现为“先拉后压”。此外，由于轮轨接触区存在相对滑动，纵向应力时程曲线呈非对称形态，而横向与垂向应力则表现出明显对称性；纵向应力与 von Mises 应力的最大值出现位置均偏离接触斑中心。

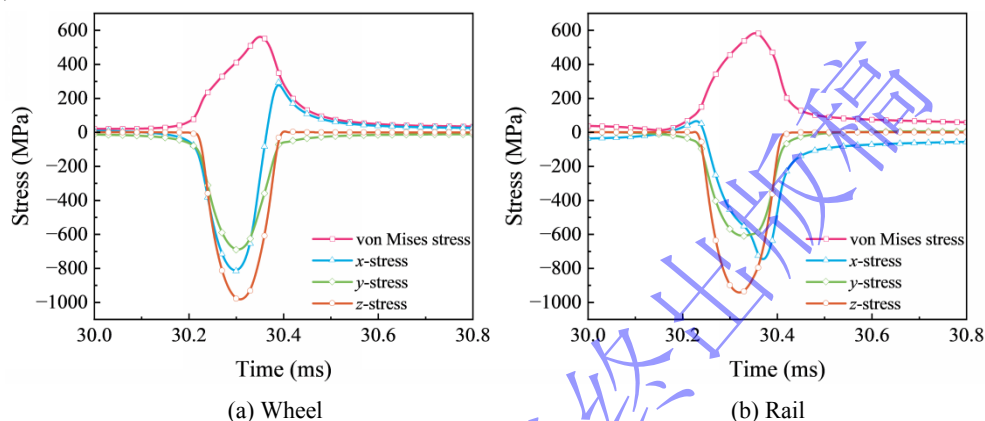


图 6 轮轨应力时程曲线图

Fig.6 Wheel-rail stress-time curve diagram

图 7(a)与(b)分别展示了车轮和钢轨沿纵向截面的等效塑性应变的分布云图。可以看出，两者的塑性应变峰值分布均位于次表面，分布面积较小且集中，其中车轮的峰值应变为 7.42×10^{-5} ，位于踏面以下 1 mm 处；钢轨的峰值应变为 2.55×10^{-5} ，位于轨下 2.5 mm 处。车轮的塑性应变高于钢轨，表明其更易在冲击下发生塑性变形；而钢轨的塑性区更深、峰值更低，说明其具有更强的抗冲击变形能力。图 7(c)为车轮单元#28407456 和钢轨单元#24301792 等效塑性应变的时程响应曲线，塑性应变在极短时间内迅速上升并达到峰值。

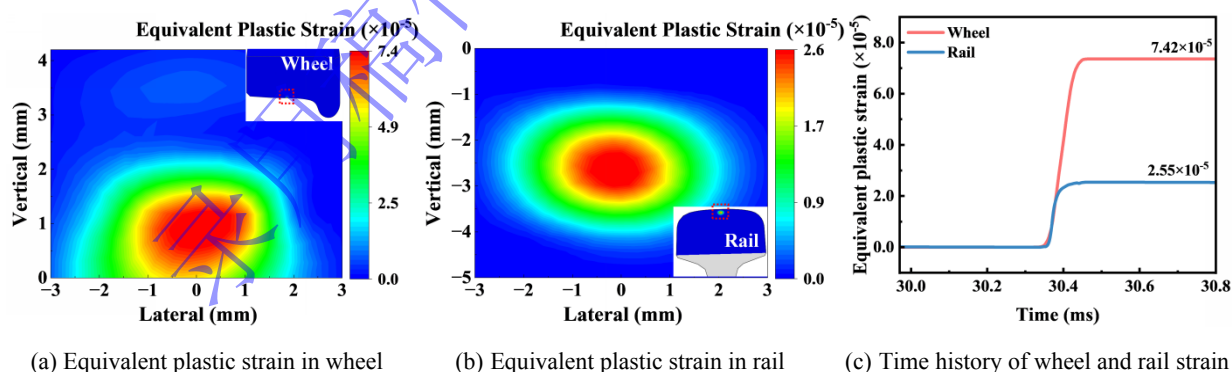


图 7 轮轨等效塑性应变分布及其时程响应特征

Fig.7 Equivalent plastic strain distribution in wheel-rail contact and its time-history response characteristics

2.2 轮轨接触黏滑分布特性

图 8(a)展示了轮轨接触斑微滑移场分布图。可以看出，接触斑近似呈现椭圆形，且沿横向基本对称，滑动水平较高的部分集中在接触斑前缘，微滑移最大值为 0.36 m/s，其矢量方向与轮轨纵向平行。滑动区面积约为 84 mm^2 ，黏着区面积约为 116 mm^2 ，黏着区面积占比约 58%，滑动区面积占比约 42%。图 8(b)给出了接触区剪切应力分布，高应力区呈“月牙形”分布并向周边迅速递减，最大剪切应力值

为 265 MPa，其矢量方向与微滑移方向相反。图 8(c)为接触斑黏滑分布图，其中红色区域代表滑移区，蓝色区域代表黏着区。可见滑移区主要集中在接触斑前缘，与微滑移场的分布特征一致，黏滑交界处的剪切应力达到材料弹塑性极限，形成局部高剪切应力区，这与图 8(b)中的剪切应力分布特征相吻合。

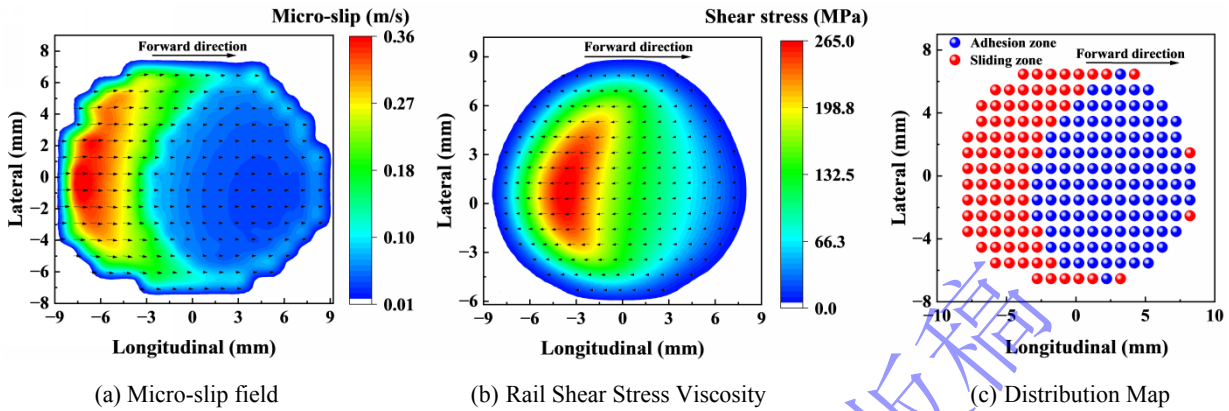


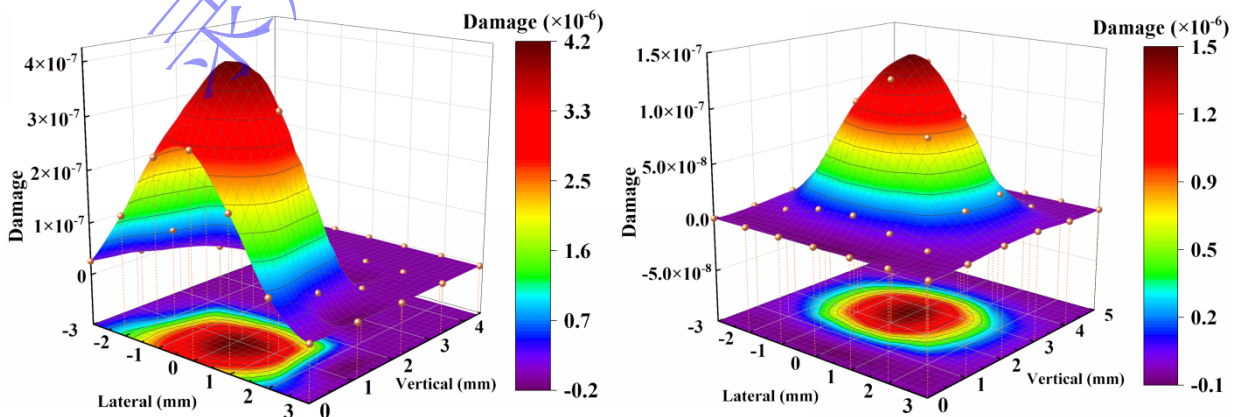
图 8 轮轨接触界面黏滑状态与剪切应力分布特性

Fig.8 Stick-slip behavior at the wheel-rail contact interface and characteristics of shear stress distribution

3 轮轨冲击疲劳损伤

3.1 冲击疲劳损伤分布

轮轨滚动接触中材料的损伤增量用式(11)的冲击疲劳损伤来表征，通过 ABAQUS 用户子程序中的状态变量(SDV)输出。图 9 展示了在列车速度 350 km/h 的工况下，轮轨单次滚滑接触过程中的车轮和钢轨沿纵向截面的冲击疲劳损伤分布情况。可以看出，车轮的损伤主要分布在表层至深度 2 mm 处，而钢轨的损伤则分布在深度 1~4 mm 之间。两者沿横向的损伤分布相似且近似对称，均位于 -2.5~2.5 mm 的范围内。车轮和钢轨的损伤峰值分别为 3.71×10^{-6} 和 1.36×10^{-6} ，且损伤峰值位置分别位于深度约 1~2.5 mm 处。上述差异是因为车轮材料的冲击疲劳损伤演化对应变率更加敏感，在高应变率冲击载荷下更易产生塑性流动与损伤；而钢轨材料因具有更高的抵抗塑性变形能力，损伤峰值相对较低。车轮损伤区更接近表面，表明在该工况下次表层在冲击下发生了更显著的塑性变形，冲击疲劳裂纹更易在近表面区域萌生。相比之下，钢轨损伤分布较深，且随着服役过程中损伤在次表层的持续累积，将诱发内部裂纹的萌生与扩展。图 10 展示了轮轨单次滚滑接触过程中车轮单元#28407456 和钢轨单元#24301792 的损伤变量时程响应曲线。轮轨接触时刻，其损伤量迅速增大并达到峰值，轮轨脱离接触后损伤不再增加。这与图 6 中的应力响应以及图 7 (c)中的等效塑性应变响应时程变化规律吻合，这也反映了轮轨损伤与其应力/应变响应之间的耦合关系。



(a) Wheel

(b) Rail

图 9 冲击疲劳损伤分布情况

Fig.9 Distribution of impact fatigue damage

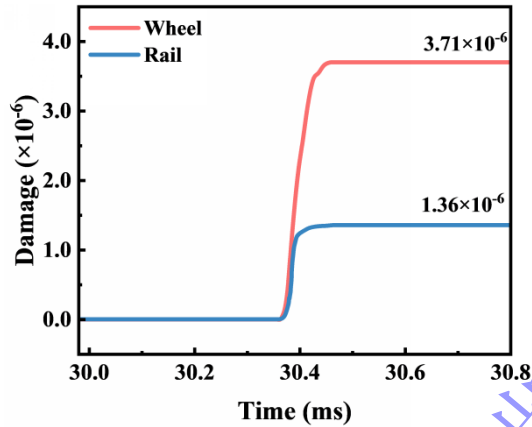
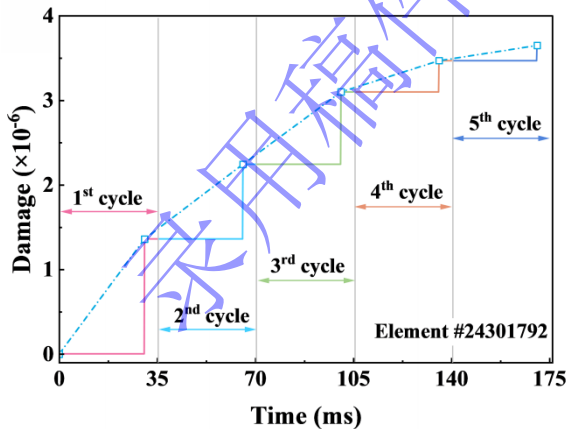


图 10 轮轨冲击疲劳损伤时程响应曲线

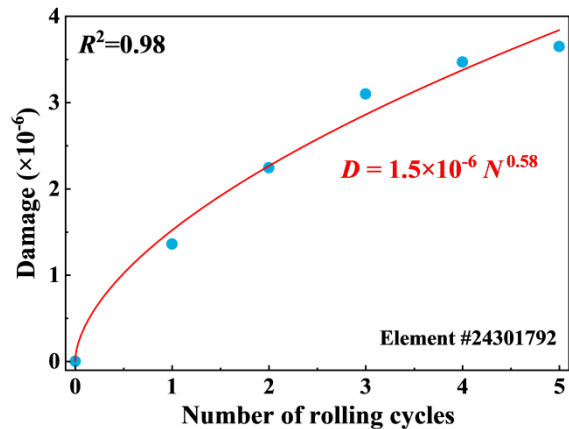
Fig.10 Time-response curve of wheel-rail impact fatigue damage

3.2 冲击疲劳损伤累积

基于轮轨滚动接触有限元模型和多次循环滚动接触模拟方法，研究了钢轨的冲击疲劳损伤累积规律。图 11(a)和(b)分别给出了轮轨 5 次循环滚动接触过程中钢轨单元#24301792（等效塑性应变最大）损伤随轮对通过次数的时程曲线和变化趋势。可以看出，随着滚动次数的增加，钢轨冲击疲劳损伤呈现出非线性累积增长的趋势，增长速率逐渐减小并近似趋于稳定。这里需要特别说明的是，本文目前仅考虑的是轮轨直线路路上的理想滚动接触情形（即没有考虑轮轨缺陷和接触不平顺等轮轨冲击载荷引起的损伤加剧）。由于轮轨系统是一个复杂的开放系统，实际服役时在多物理场（如力-热-化耦合）和多因素（如接触疲劳、高频冲击、磨损磨损、冰/雨/油/雪等“第三介质”侵入等）耦合作用下，势必会显著加剧轮轨冲击疲劳损伤，导致轮轨系统的实际运维周期和使用寿命大大低于设计目标，这也是铁路领域长期存在又亟待解决的难题。



(a) Time-history curve



(b) Cumulative growth trend

图 11 钢轨单元损伤变量随轮对通过次数的累积曲线

Fig.11 Accumulation of damage variable in rail element with increasing number of wheel passes

4 关键参数对轮轨冲击疲劳损伤的影响

4.1 列车速度的影响

在摩擦系数 $f = 0.45$ 和牵引系数 $\mu = 0.3$ 工况下，讨论了四种不同列车速度（300 km/h、350 km/h、400 km/h、450 km/h）下轮轨单次滚动时的冲击疲劳损伤响应。图 12 展示了在不同速度下车轮和钢轨沿纵向截面的冲击疲劳损伤分布云图。在不同列车速度下，损伤分布的空间分布范围并没有发生明显变化，但损伤峰值随速度提升而显著增大。这是由于列车速度增加导致轮轨接触应变率升高^[18]，从而加剧了材料内部冲击疲劳损伤的积累。在列车速度分别为 300 km/h、350 km/h、400 km/h 和 450 km/h 的条件下，车轮损伤峰值分别为 2.64×10^{-6} 、 3.71×10^{-6} 、 5.31×10^{-6} 和 6.06×10^{-6} ；钢轨损伤峰值则依次为 1.21×10^{-6} 、 1.36×10^{-6} 、 1.55×10^{-6} 和 1.62×10^{-6} 。与 300 km/h 工况相比，车轮损伤峰值在更高速度下分别增长了 40.5%、101.1% 和 129.5%，而钢轨损伤增幅仅为 6.8%、28.1% 和 33.9%。轮轨损伤增长趋势的差异主要源于车轮材料具有更高的损伤应变率敏感系数 α ，导致其在高速冲击载荷下损伤更为剧烈。图 13 给出了不同列车速度下的轮轨冲击疲劳损伤峰值。可以看出，不同列车速度下对应的车轮与钢轨冲击疲劳损伤峰值之间呈现近似线性的关系。

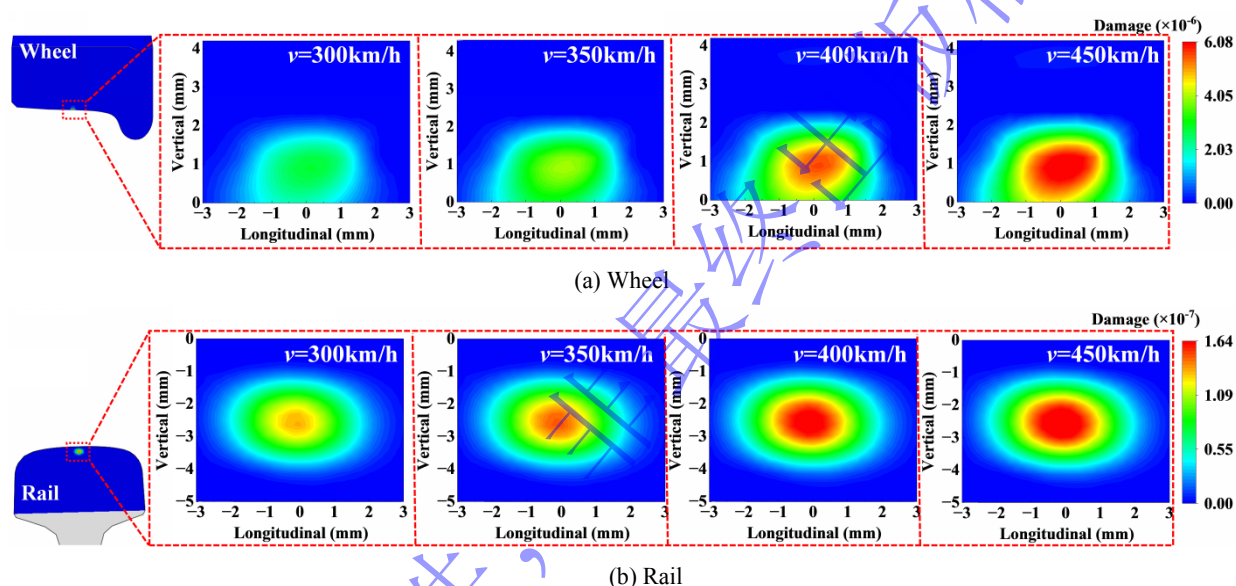


图 12 不同列车速度下的轮轨冲击疲劳损伤分布云图

Fig.12 Contour map of wheel-rail impact fatigue damage distribution at different train speeds

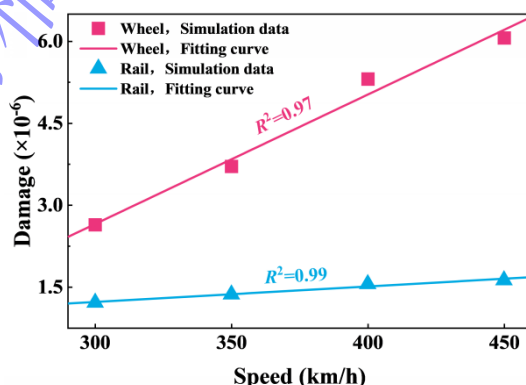


图 13 列车速度对轮轨冲击疲劳损伤的影响

Fig.13 Effect of train speed on wheel-rail impact fatigue damage

4.2 摩擦系数的影响

为研究不同摩擦系数对轮轨冲击疲劳响应的影响，选取了四个典型的摩擦系数值：

0.05、0.1、0.2 和 0.45，分别代表不同的轮轨表面接触状态：冰雪、油态、湿态和干态。所有仿真工况的列车运行速度设定为 350 km/h，为考虑恶劣牵引条件对轮轨单次滚动时冲击疲劳损伤的影响，牵引系数设置为较大值 $\mu = 0.5$ ，以模拟极端牵引工况下的轮轨服役环境。

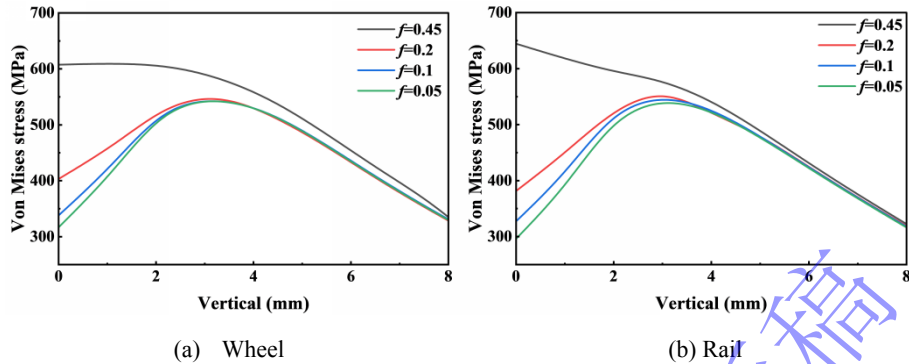


图 14 摩擦系数对轮轨最大 von Mises 应力的影响

Fig.14 Effect of friction coefficient on maximum von Mises stress in wheel-rail interaction

如图 14 所示，不同摩擦系数下车轮和钢轨的最大 von Mises 应力均随摩擦系数增大而增大。这是因为摩擦系数提高会增强轮轨接触区的切向力，导致接触应力升高。在摩擦系数较低（例如 $f \leq 0.2$ ）时，轮轨之间的切向力较小，最大 von Mises 应力通常位于轮轨的次表面区域，并沿深度方向呈现先升高后降低的趋势；而在摩擦系数较高（例如 $f = 0.45$ ）时，切向力显著增大，最大 von Mises 应力从次表面转移到接触表面，并且沿深度方向逐渐降低。所有工况下的轮轨最大 von Mises 应力均超过材料的屈服强度，说明轮轨系统在这些条件下均会出现塑性变形。

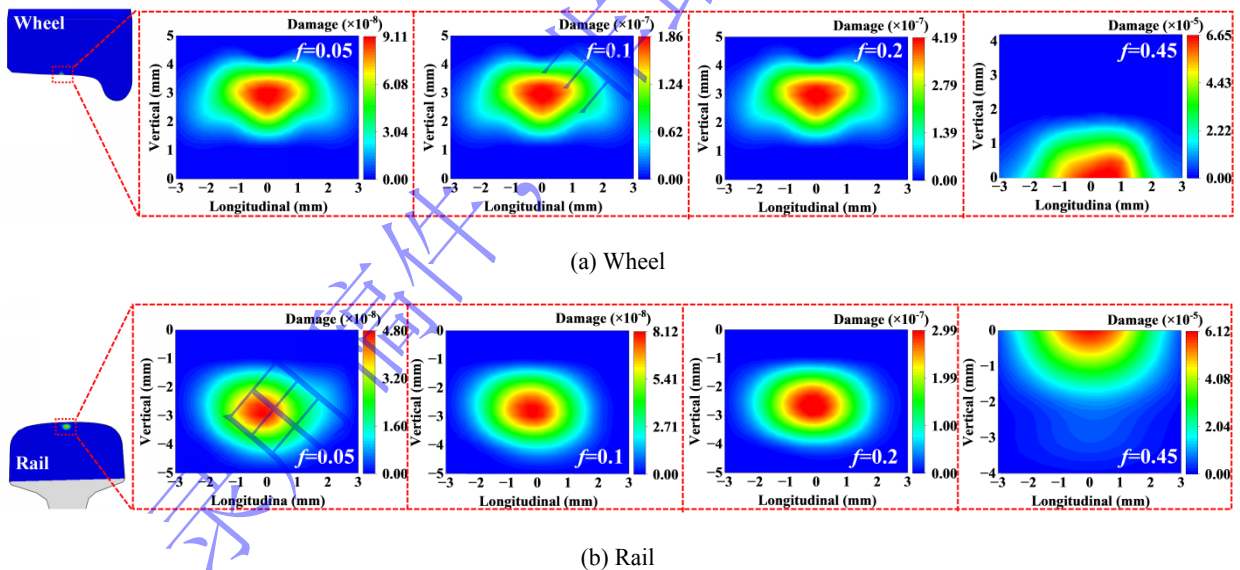


图 15 不同摩擦系数下的轮轨冲击疲劳损伤分布云图

Fig.15 Contour map of wheel-rail impact fatigue damage distribution at different friction coefficients

图15展示了不同摩擦系数下车轮和钢轨沿纵向截面的冲击疲劳损伤云图。随着摩擦系数的增大，车轮和钢轨冲击疲劳损伤峰值逐渐增大，并且增幅随着摩擦系数的增加而加大。在垂直深度方向上，各节点的损伤呈近似对称分布，同一深度处中心区域的损伤值最大。从损伤演变趋势来看，随着摩擦系数提高，轮轨表面节点的损伤增幅显著，而表层以下节点损伤变化相对较小。当摩擦系数为 0.05、0.1和0.2时，车轮的损伤峰值分别出现在表面以下3 mm、2.5 mm 和 2.3 mm 处，数值分别为 9.08×10^{-8} 、 1.85×10^{-7} 和 4.15×10^{-7} ；钢轨最大损伤则均位于表面以下约2.7 mm 处，相应损伤峰值分别为

4.71×10^{-8} 、 8.01×10^{-8} 和 3.09×10^{-7} 。当摩擦系数增至0.5时，轮轨损伤峰值均转移至表面，车轮和钢轨的损伤峰值分别为 6.51×10^{-5} 和 6.03×10^{-5} 。这是因为摩擦系数增大导致的切向力增强，使轮轨表面应力与应变显著增加，进而促使损伤最大位置由次表面逐步向表面迁移，冲击疲劳裂纹萌生位置也将从内部转向表面。

4.3 牵引系数的影响

在列车速度 $v = 350 \text{ km/h}$ 和摩擦系数 $f = 0.45$ 的工况下，讨论了四种不同牵引系数（0.1、0.2、0.3 和 0.5）下轮轨单次滚动时的冲击疲劳损伤响应。

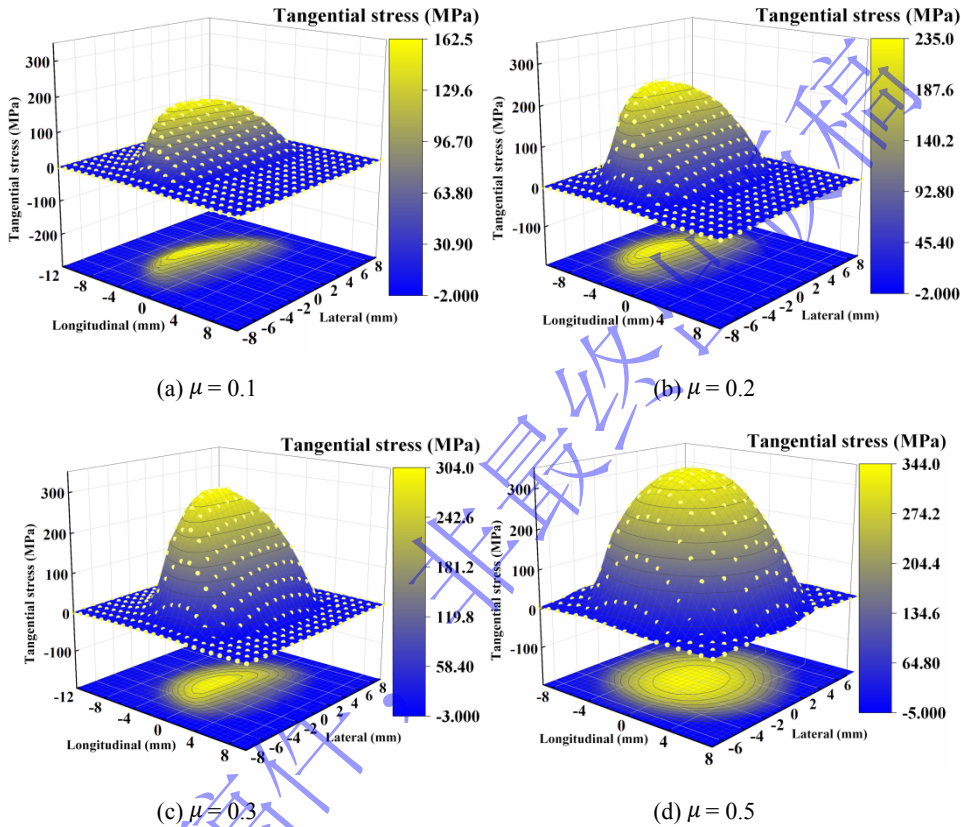


图 16 不同牵引系数轮轨表面切向应力分布

Fig.16 Tangential stress distribution on wheel-rail surfaces with different traction coefficients

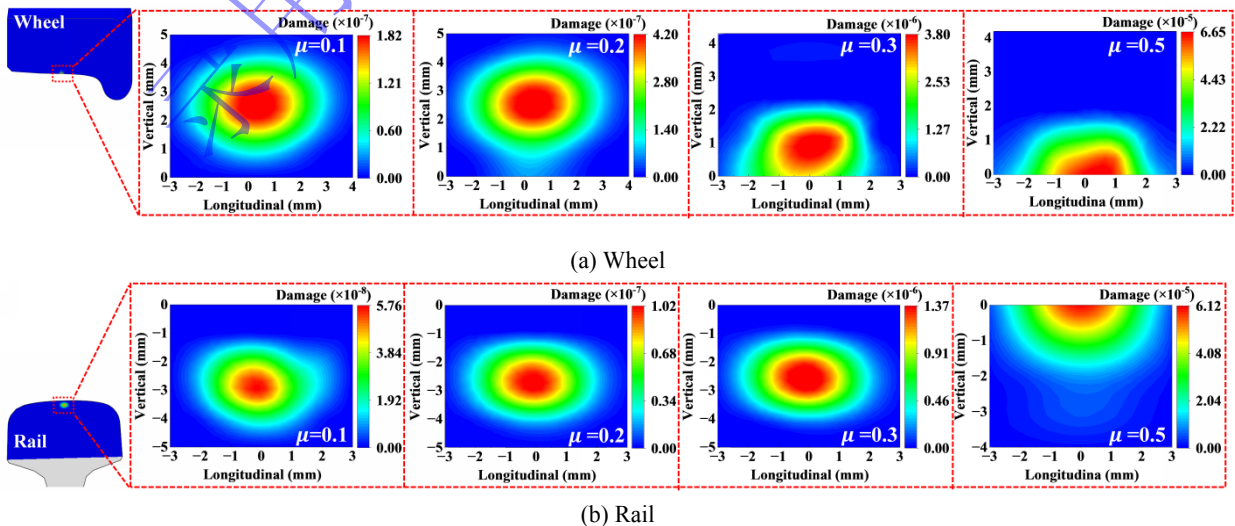


图 17 不同牵引系数下的轮轨冲击疲劳损伤分布云图

Fig.17 Contour map of wheel-rail impact fatigue damage distribution at different traction coefficients

图 16 展示了不同牵引系数下轮轨表面切向应力的分布情况。随着牵引系数增加，切向应力峰值逐渐增大，且其分布形态从“扁月牙状”逐渐转变为“满月状”。图 17 展示了不同牵引系数下车轮和钢轨沿纵向截面的冲击疲劳损伤云图。可以看出，随着牵引系数增大，轮轨接触区域的冲击疲劳损伤峰值显著提高，损伤分布形态也发生显著变化，损伤集中区逐渐向接触表面迁移。随后对比了轮轨损伤响应，当牵引系数从 0.1 增至 0.5 时，车轮最大损伤值由 1.78×10^{-7} 增加至 6.51×10^{-5} ；钢轨最大损伤值则由 5.71×10^{-8} 上升至 6.03×10^{-5} ，增幅更为显著。损伤峰值位置均随牵引系数增加从次表层逐渐向表面转移：车轮峰值位置由深度约 2.8 mm 迁移至表面，钢轨则由约 2.7 mm 深度处迁移至轨面。该现象可归因于牵引力增大引起的轮轨表面切向应力增大，导致塑性应变增强，促使损伤集中区域向轮轨接触表面移动。在高牵引工况下，轮轨系统冲击疲劳裂纹将萌生于表面。

5 材料本构模型对轮轨力学行为的影响

本节对比研究了冲击疲劳本构模型和弹塑性本构模型（未考虑损伤演化）对轮轨滚滑接触力学行为的影响，分析了不同列车速度、摩擦系数和牵引系数条件下轮轨 von Mises 等效应力和等效塑性应变的差异。

5.1 轮轨单次滚动接触情形

图 18 对比了在摩擦系数 $f = 0.45$ 和牵引系数 $\mu = 0.3$ 、不同列车速度（300 km/h、350 km/h、400 km/h、450 km/h）和不同本构模型计算得到的轮轨典型响应特征。随着列车速度提升，两类模型预测的 von Mises 应力均呈上升趋势，但冲击疲劳本构模型预测的应力峰值始终低于弹塑性本构模型预测结果，且两者间的差异随列车速度增大而逐渐扩大；随着列车速度由 300 km/h 增至 450 km/h，冲击疲劳本构模型预测的等效塑性应变峰值比弹塑性本构模型预测结果呈现出更显著的增长。

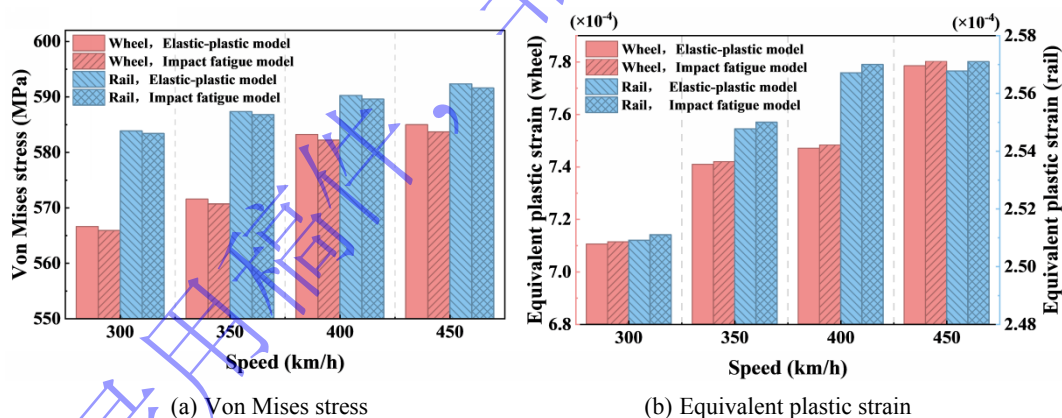


图 18 不同列车速度下的轮轨瞬态接触力学响应

Fig.18 Wheel-rail transient contact mechanical responses at different train speeds

图 19 展示了在列车速度 $v=350$ km/h 和牵引系数 $\mu=0.5$ 、不同摩擦系数（0.05、0.1、0.2、0.45）和不同本构模型预测的典型参数响应特征。在低摩擦系数条件下 ($f \leq 0.2$)，冲击疲劳本构模型与弹塑性本构模型预测的 von Mises 应力和等效塑性应变差异较小。例如，当 $f=0.2$ 时，冲击疲劳本构模型下车轮的 von Mises 应力峰值较无损伤模型仅下降约 0.11%，等效塑性应变增幅约为 0.09%。这说明在润滑或污染导致的低摩擦状态下，切向力较小，损伤程度较低，所以损伤对轮轨力学行为的作用尚不显著。但是，当摩擦系数增加到 0.45 时，损伤耦合效应显著增强。在该工况下，冲击疲劳本构模型下车轮的 von Mises 应力峰值比弹塑性本构模型预测结果降低约 1.42%，等效塑性应变则增加约 1.37%。钢轨表现出相似规律。这是因为在高摩擦系数的工况下，切向力大幅增加，促进了损伤的

快速演化，进而通过材料软化与刚度退化机制，更明显地改变了应力分布与塑性变形行为。

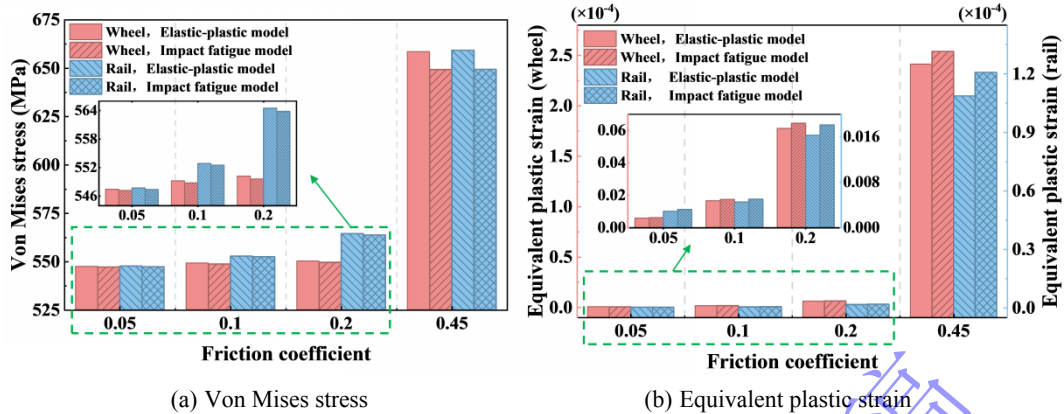


图 19 不同摩擦系数下的轮轨瞬态接触力学响应

Fig.19 Wheel-rail transient contact mechanical responses at different friction coefficients

图 20 比较了在列车速度 $v = 350 \text{ km/h}$ 和摩擦系数 $f = 0.45$ 、不同牵引系数 (0.1、0.2、0.3、0.5) 和不同本构模型预测的典型响应特征。在低牵引系数工况 ($\mu \leq 0.3$) 下，两类模型预测的响应差异虽较摩擦系数影响更为明显，但仍处于相对较低水平。以 $\mu = 0.3$ 为例，冲击疲劳本构模型下车轮的 von Mises 应力峰值比弹塑性本构模型预测结果下降约 0.35%，等效塑性应变则增加约 0.29%。而在高牵引极端工况 ($\mu = 0.5$) 下，损伤耦合影响尤为突出。此时，冲击疲劳本构模型预测的车轮 von Mises 应力峰值比弹塑性本构模型预测结果降低约 1.42%，等效塑性应变增加约 1.37%；钢轨的响应变化趋势与车轮一致，并且整体变化幅值也相近。这表明，在高牵引系数条件下，切向应力大幅提升不仅直接增大了塑性应变，还通过损伤耦合效应使其进一步加剧。

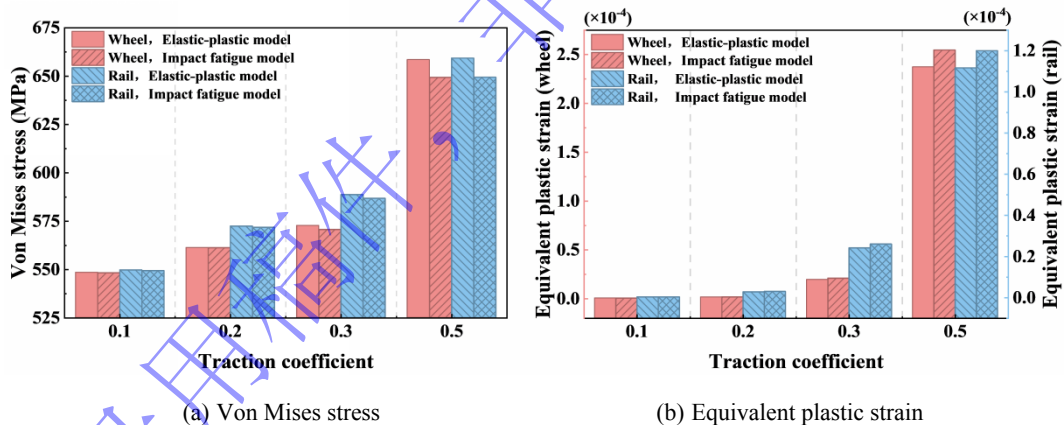


图 20 不同牵引系数下的轮轨瞬态接触力学响应

Fig.20 Wheel-rail transient contact mechanical responses at different traction coefficients

5.2 轮轨多次滚动接触情形

这里分析了典型工况 (速度 350 km/h 、摩擦系数 $f = 0.45$ 和牵引系数 $\mu = 0.3$) 下两类材料本构模型 (冲击疲劳本构模型和弹塑性本构模型) 对轮轨多次滚动接触力学响应的差异。Error!

Reference source not found.给出了轮对通过 5 次后钢轨 von Mises 应力和等效塑性应变的分布情况。可以看出，与弹塑性本构模型预测结果相比，冲击疲劳本构模型得到的 von Mises 应力更小和等效塑性应变更大。图 22 给出了不同滚动次数钢轨的 von Mises 应力和等效塑性应变的变化趋势。随着轮对滚动次数的增加，钢轨单元的 von Mises 应力逐渐降低，等效塑性应变逐渐增大，但变化速率均逐渐减小，这与 3.2 节冲击疲劳损伤累积的规律是一致的。但是，随着轮对滚动次数的增加，两类模型预测结果的差异性逐渐增大：第 1 次滚动接触时，冲击疲劳模型预测的 von Mises 应力和等效塑性应

变分别比弹塑性模型预测结果减小 0.09%和增加 0.12%；第 5 次滚动接触时，二者差异增大至 0.35% 和 1.72%。这表明，随着滚动次数的增加，轮轨冲击疲劳损伤将进一步加剧，也反映了采用冲击疲劳本构模型来研究轮轨滚动接触力学的必要性。

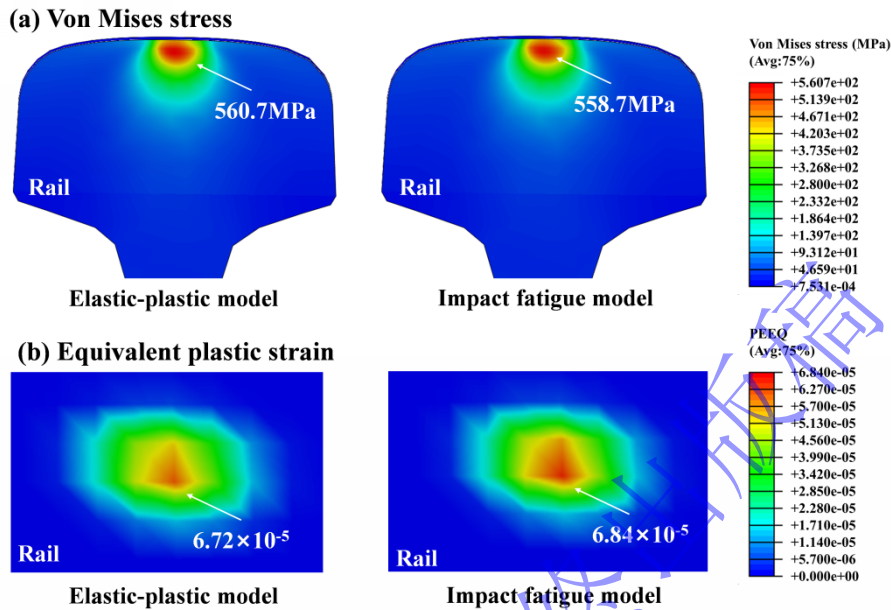


图 21 轮对通过 5 次后钢轨的 von Mises 应力和等效塑性应变分布

Fig.21 Von Mises stress and equivalent plastic strain distribution of the rail after five wheel passes

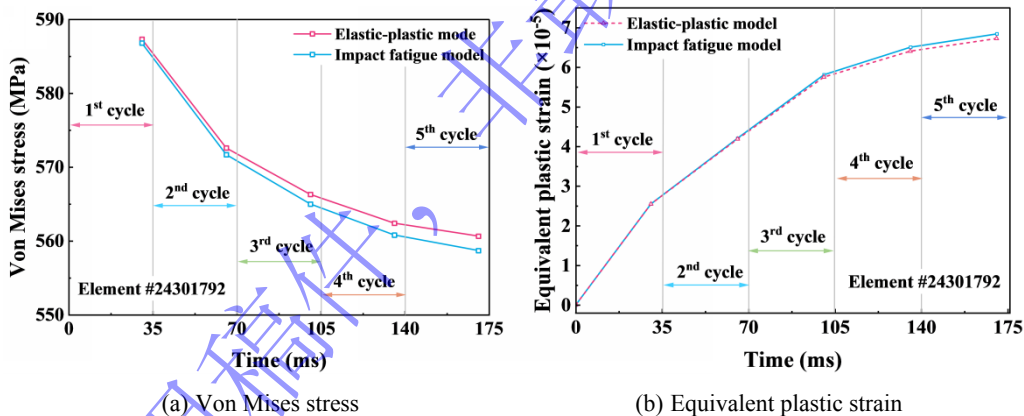


图 22 不同滚动次数下钢轨的 von Mises 应力和等效塑性应变

Fig. 22 Von Mises stress and equivalent plastic strain of rail under different rolling numbers

6 结论

基于冲击疲劳损伤耦合本构模型，建立了三维轮轨滚动接触有限元模型，分析了高速铁路轮轨滚动接触力学行为与冲击疲劳损伤特性，得到了以下主要结论：（1）提出的基于经典 Lemaitre 塑性损伤演化修正方程和冲击疲劳本构模型，考虑了应变率效应对损伤演化的影响，可以很好地模拟轮轨滚动接触力学行为；（2）轮轨单次滚动接触时，轮轨损伤量随列车速度的提高呈近似线性增长，而随摩擦系数或牵引系数增大呈非线性增长；轮轨多次滚动接触时，钢轨冲击疲劳损伤随滚动次数的增加呈现出非线性累积增长趋势，但增长速率逐渐减小并近似趋于稳定；（3）轮轨材料本构模型对轮轨滚动接触力学行为和损伤演化规律影响较大，且随着滚动次数的增加，冲击疲劳损伤的耦合影响逐渐增大。

参考文献

- [1] GAO Y, WANG P, WANG K, et al. Damage tolerance of fractured rails on continuous welded rail track for high-speed railways[J]. Railway engineering science, 2021, 29(1): 59-73. DOI:10.1007/s40534-020-00226-7
- [2] JOHNSON A A, STOREY R J. The impact fatigue properties of iron and steel[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 308(3-5): 458-466. DOI:10.1016/j.jsv.2007.06.044
- [3] 刘小川, 王彬文, 白春玉, 等. 航空结构冲击动力学技术的发展与展望[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 1-14. DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2020.03.001.
LIU X C, WANG B W, BAI C Y, et al. Development and prospects of impact dynamics technology in aerospace structures[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3): 1-14. DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2020.03.001.
- [4] 杨素淞, 白春玉, 杨强, 等. 金属材料与结构冲击疲劳问题研究综述[J]. 航空科学技术, 2021, 32(2): 1-13. DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2021.02.001.
YANG S S, BAI C Y, YANG Q, et al. A review of impact fatigue issues in metallic materials and structures[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(2): 1-13. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.02.001.
- [5] 郭玉佩, 王彬文, 杨强, 等. 航空材料的冲击疲劳问题研究进展与展望[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 609-617. DOI:10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.05.001.
GUO Y P, WANG B W, YANG Q, et al. Research progress and prospects of impact fatigue issues in aerospace materials[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 609-617. DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.05.001.
- [6] HOLMES G, SARTOR P, REED S, et al. Prediction of landing gear loads using machine learning techniques[J]. Structural Health Monitoring, 2016, 15(5): 568-582. DOI:10.1177/1475921716651809
- [7] ZHU Q D, MENG X, ZHANG Z. Simulation research on motion law of arresting hook during landing[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 300: 997-1002.
- [8] 王金能, 郭鑫, 敬霖, 等. 高速列车车轮踏面剥离引起的轮轨冲击力学响应有限元模拟[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(4): 151-165. DOI:10.11883/bzycj-2021-0374
WANG J N, GUO X, JING L, et al. Finite element simulation of the wheel-rail impact mechanics response induced by wheel tread spalling in high-speed trains[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(4): 151-165. DOI:10.11883/bzycj-2021-0374
- [9] LIU C, XU J M, WANG K, et al. Numerical investigation on wheel-rail impact contact solutions excited by rail spalling failure[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135: 106116. DOI: 10.1016/j.jengfailanal.2022.106116
- [10] 惠煜中, 徐浩嘉, 郝宏伟, 等. 高应变率载荷下纯钛的非连续冲击疲劳失效模型及其微观机理[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(1): 79-87. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0073
HUI Y Z, XU H J, HAO H W, et al. Discontinuous impact fatigue failure model and its microscopic mechanism of pure titanium under high strain rate loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(1): 79-87. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0073
- [11] LI X F, HU W P, WANG B, et al. A new combined impact fatigue damage model and its application of influencing factors analysis on impact fatigue of TC18 titanium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 182: 108180. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2024.108180

- [12] LI B L, ZHAO S H, WANG J J, et al. Impact fatigue behavior of laser metal deposition 316L stainless steel with an automated impact fatigue system based on split Hopkinson bar technique[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 185: 108370. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2024.108370
- [13] 钱诚成, 白春玉, 杨强, 等. 金属材料重复冲击拉伸试验方法研究[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(12): 98-106. DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2021.12.011.
QIAN C C, BAI C Y, YANG Q, et al. Research on the testing method for repeated impact tensile tests of metallic materials[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(12): 98-106. DOI: 10.19452/j.issn 1007-5453.2021.12.011.
- [14] ZHAO S H, LI B L, YUAN K B, et al. Design of a continuously repeated impact method with constant amplitude based on Hopkinson bar: Principle and impact fatigue life testing[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 193: 105038. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2024.105038
- [15] HAN L L, JING L, ZHAO L M. Finite element analysis of the wheel-rail impact behavior induced by a wheel flat for high-speed trains: The influence of strain rate[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2018, 232(4): 990-1004. DOI:10.1177/0954409717704790
- [16] HAO C J, ZHU X X, WANG W, et al. An adaptive multi-axial fatigue model and fatigue damage prediction of the turnout rail[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 472: 140934. DOI:10.1016/j. conbuildmat.2025.140934
- [17] 敬霖, 刘凯. 车轮踏面缺陷引起的轮轨动态响应综述[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(1): 285-315. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.014.
JING L, LIU K. A review of the dynamic response of wheel-rail systems induced by wheel tread defects[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(1): 285-315. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.014.
- [18] WANG J N, JING L, ZHOU X , et al. Influence of material properties on the high-speed wheel-rail rolling contact behaviour[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2024, 62(7): 1686-1712. DOI:10.1080/00423114.2023. 2251617
- [19] ZHOU X F, WANG J N, JING L. Coupling effects of strain rate and fatigue damage on wheel-rail rolling contact behaviour: a dynamic finite element simulation[J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2023, 11(3): 317-338. DOI:10.1080/23248378.2022.2083711
- [20] ZHOU Z Z, TAO G Q, WEN Z F. Finite element analysis of wheel-rail cyclic rolling contact and ratcheting on corrugated rail[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025: 110483. DOI:10.2139/ssrn.5743624
- [21] 马登程, 刘腾, 周雄飞, 等. 曲线段高速轮轨循环滚动接触力学响应与黏滑行为[J/OL]. *交通运输工程学报*, 1-15[2026-03-08].<https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.205>.
MA D C, LIU T, ZHOU X F, et al. Mechanical response and stick-slip behavior of high-speed wheel-rail cyclic rolling contact in curved sections[J/OL]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 1-15[2026-03-08]. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.205>.
- [22] WANG B W, QIAN C C, BAI C Y, et al. Study on impact fatigue test and life prediction method of TC18 titanium alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 168: 107391. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2022.107391
- [23] ZHOU C, LIANG Y, YUAN K, et al. Impact fatigue behavior and damage constitutive model of U71MnG rail steel under high strain-rate loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2026 (under review)

- [24] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1985, 107(1): 83-89. DOI:10.1115/1.3225775
- [25] 敬霖, 冯超, 苏兴亚, 等. 高速动车组 D2 车轮钢的率温耦合变形机理与本构关系[J]. 科学通报, 2022, 67(34): 4068-4079.
JING L, FENG C, SU X Y, et al. Strain-rate-temperature coupling deformation mechanism and constitutive relationship of D2 wheel steel for high-speed electric multiple units[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(34): 4068-4079.
- [26] 苏兴亚. 复杂载荷下高速轮/轨钢的动态力学行为与本构关系[D]. 西南交通大学, 2019. DOI:10.27414/d.cnki.gxnju.2019.002295.
- [27] LIU K, JING L. A finite element analysis-based study on the dynamic wheel-rail contact behaviour caused by wheel polygonization[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(10): 1285-1298. DOI:10.1177/0954409719891549
- [28] 安博洋, 王平, 徐义新, 等. 基于 POLACH 方法的轮轨蠕滑曲线研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 124-131. DOI: 10.3901/JME.2018.04.124
AN B Y, WANG P, XU Y X, et al. Study on the wheel-rail creep-slip curve based on the POLACH method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 124-131. DOI: 10.3901/JME.2018.04.124