

W300-1型扣件弹条疲劳寿命的预测和评估

刘艳^{1,2}, 姜秀杰¹, 李秋彤^{1,2}, 赵威³, 刘欢³

(1. 上海材料研究所, 上海 200437; 2. 上海消能减震工程技术研究中心, 上海 200437; 3. 上海第二工业大学 环境与材料工程学院, 上海 201209)

摘要: 为有效评估和预测 W300-1 型扣件弹条在实际工作状态下的疲劳寿命, 综合考虑弹条材料的弹塑性力学特性及复杂接触关系, 建立有限元模型; 分析弹条在不同安装扭矩下的受力情况, 并用数字图像相关(DIC)测试结果予以验证; 基于京沪高铁实测轮轨力时程曲线, 施加等效循环疲劳载荷谱, 结合弹条材料应变-寿命曲线, 预测弹条疲劳寿命; 分析安装扭矩、疲劳载荷幅值、以及两者匹配关系(应力比)对弹条疲劳寿命的影响。结果表明: 无论处于略微欠拧、正常安装或过拧状态, 弹条危险点位置均位于跟端圆弧内表面, 已发生塑性变形。弹条疲劳寿命随安装扭矩和疲劳载荷幅值的增加而降低, 与危险点应力比呈线性关系。因此, 为保证弹条的实际使用寿命, 特别是在车速较高或波磨较严重的线路, 建议弹条安装时安装扭矩不超过 300 N·m。

关键词: 扣件弹条; 安装扭矩; 疲劳载荷; 应力比; 疲劳寿命

中图分类号: U213.5+31

文献标志码: A

Fatigue Life Prediction and Evaluation of the W300-1 Fastening Clip

LIU Yan^{1,2}, JIANG Xiujie¹, LI Qiutong^{1,2}, ZHAO Wei³, LIU Huan³

(1. Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Earthquake Energy Dissipation, Shanghai 200437, China; 3. School of Environmental and Material Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: To effectively evaluate and predict the fatigue life of the W300-1 fastening clip during service, a finite element model was established, by considering the elastic-plastic mechanical properties and nonlinear contact relations of the clip. The strain characteristics of the clip at different installation loads were analyzed, and the test results were verified based on digital image correlation

(DIC) technology. The fatigue life of the clip was calculated by applying the fatigue load in combination with the strain-life curve based on the actual measurement wheel-rail force time-history curve of Beijing-Shanghai High Speed Railway. The influence of installation torque, fatigue cycle load amplitude and the matching relations between them (the stress ratio) on the fatigue life of the clip was analyzed. The results show that the lowest fatigue life is found at the heel of the clip, and plastic deformation occurs no matter in a state of slightly under-tightening installation, normal installation, or over-tightening installation. The fatigue life decreases with the increase of installation torque and fatigue load amplitude, but it is linearly proportional to the stress ratio at the dangerous point of the clip. Therefore, to ensure the actual service life of the clip, especially in high speed or serious corrugation lines, it is recommended that the installation torque of the clip should not exceed 300 N·m.

Key words: fastener clip; installation torque; fatigue load; stress ratio; fatigue life

行车条件下, 扣件系统为车辆平稳运行提供安全保障。扣件中的弹条起到扣压钢轨、保持轨距的作用, 同时可为钢轨提供必要的弹性变形能力^[1]。但是, 由于受力状态复杂, 弹条极易疲劳失效, 从而加速轨道机械损害^[2-3]。陈宪麦等^[4]发现当弹条弹程大于 12 mm 时, 表面会发生塑性变形; 在循环载荷作用下, 塑性变形处易发生疲劳断裂。XIAO 等^[5]联合 ABAQUS 和 Fe-safe 软件仿真, 基于 S-N (应力-寿命) 曲线计算 e 型弹条疲劳寿命, 发现弹条后拱内侧处的疲劳寿命最短。Mohammadzadeh 等^[6]通过数值计算仿真和试验测试, 分析了不同列车荷载作用下

收稿日期: 2021-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708422); 上海市青年科技启明星基金(19QB1401100); 上海市浦江人才计划(20PJ1417300)

第一作者: 刘艳(1985—), 女, 副研究员, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道结构工程。

E-mail: 15000200006@163.com

通信作者: 李秋彤(1991—), 女, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为轨道结构工程。E-mail: lqt910818@163.com



论文
拓展
介绍

弹条的疲劳可靠度。Anat等^[7]通过试验测得不同工况下弹条小拱处的等效力数值,进而采用Goodman曲线近似评估弹条疲劳寿命。向俊等^[8]通过建立包含弹条、铁垫板、绝缘板、螺栓和螺栓垫片在内的WJ-7型扣件系统模型,从多边形磨损、车速、曲线线形等方面探究弹条疲劳寿命降低的原因。辛涛等^[9]分析e型弹条在不同弹程下的疲劳性能,探究弹程的合理控制范围。

既有研究中的有限元模型大多存在元件少、材料仅考虑弹性部分、接触关系简单等缺点。同时,大多数研究仅关注单一因素对弹条疲劳寿命的影响,如初始扣压力、轨道线形、车速、轨面平顺度等,鲜有研究分析初始扣压力和实际动态轮轨力的匹配关系对弹条疲劳寿命的影响。为此,本文将W300-1型扣件系统为研究对象,综合考虑材料的非线性力学行为和弹条的非线性接触属性,建立完整的扣件系统有限元模型,分析弹条实际受力状态,结合弹条材料的应变-寿命曲线,研究安装载荷、实际动态轮轨力(以下称疲劳载荷)以及二者匹配关系所导致的不同应力比对弹条疲劳性能的影响,为有效评估及提高弹条使用寿命提供参考依据,指导工程实践。

1 扣件系统有限元模型

1.1 扣件系统模型

高铁常用的W300-1型扣件系统应考虑钢轨、弹条、螺栓、轨距挡板、轨下垫板、铁垫板、弹性垫板及轨枕等多个元件。弹条在标准安装状态下可为钢轨提供初始扣压力,保证钢轨在行车条件下的稳定。同时,弹条、轨下垫板及弹性垫板可缓冲轮载冲击,抵抗钢轨横向及纵向变形,保证轨道结构稳定可靠。若仅建立包含少数零件的扣件系统模型,则难以有效反映弹条在实际服役状态下的受力情况^[1,4-5]。为此,本文建立包含10个部件在内完整的扣件系统有限元模型,如图1所示。

扣件主要用来减振,一般由扣压件和弹性垫层构成。因此,可用图2所示的模型来研究扣件系统的动力问题, K_{CV} 、 C_{CV} 表示扣件的刚度和阻尼, K_{PV} 、 C_{PV} 表示垫层的刚度和阻尼, F_0 表示扣压件的预压力^[10]。扣件安装完成后,扣压件和垫层均处于压缩状态,可得单个扣压件的预压缩量 Z_{c0} ,忽略每个扣件上的钢轨分布质量,可得弹性垫层的预压缩量 Z_{p0} ,分别如式(1)和式(2)所示:

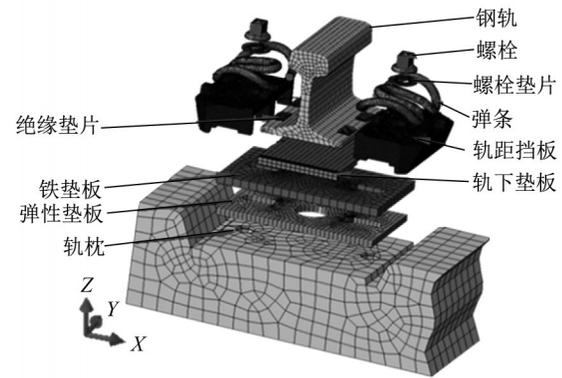


图1 W300-1型扣件系统有限元模型

Fig. 1 A finite element model of the W300-1 fastening system

$$Z_{c0} = \frac{F_0}{K_{CV}} \quad (1)$$

$$Z_{p0} = \frac{2F_0}{K_{PV}} \quad (2)$$

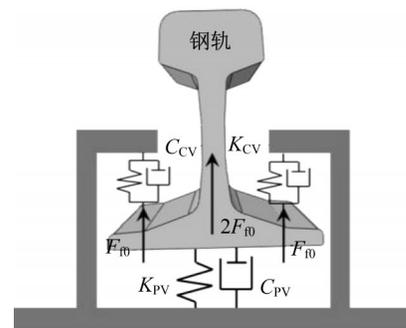


图2 扣件系统动力分析模型

Fig. 2 Dynamic analysis model of the fastening system

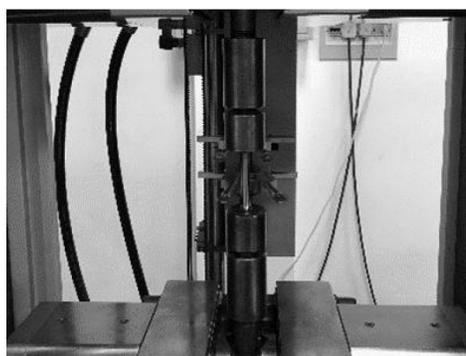
为减少计算量,适当简化模型参数,钢轨、轨枕和轨枕螺栓考虑为解析刚体外,其余部件采用实体单元。弹条和轨距挡板采用四面体单元C3D10M,螺栓垫片、轨下垫板、绝缘垫片和弹性垫板采用六面体单元C3D8R,铁垫板采用六面体单元C3D8I;为避免计算过程中出现大变形网格畸变,去除扣件系统各元件的倒角及圆角特征,以及螺栓、轨距挡块等对力学性能影响较小的局部特征。

1.2 材料属性

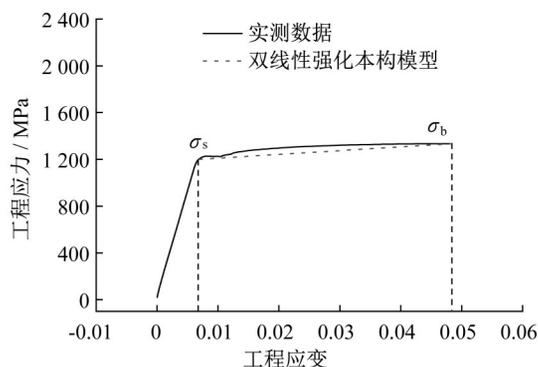
相关研究表明标准安装状态下,弹条局部区域已发生显著的塑性变形^[11-12]。若对弹条材料进行理想弹性简化,结果将难以准确反映弹条的变形情况^[12-13]。为此,本文对弹条进行材料拉伸试验,如图3所示,得到材料的屈服强度 $\sigma_s=1\ 242\ \text{MPa}$,抗拉强

度 $\sigma_b=1\ 350\ \text{MPa}$,依据此实测数据采用双线性强化本构模型,定义弹条材料60Si2Mn的弹塑性力学特

性。考虑到本文研究对象为 ω 型弹条,故简化模型中其余元件的材料属性,见表1。



a 拉伸试验装置



b 应力应变曲线

图3 弹条拉伸测试

Fig. 3 Tensile test of the clip

表1 扣件系统各部件材料属性

Tab.1 Material property of parts in fastening systems

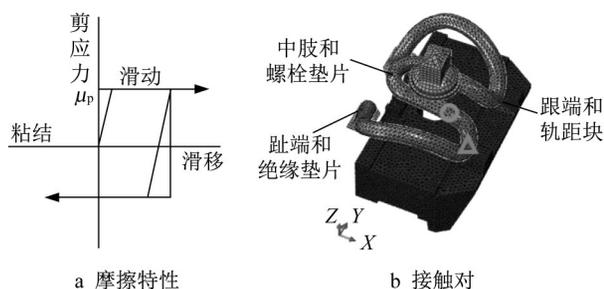
编号	零部件名称	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	ω 型弹条	1.80×10^5	0.26	7 800
2	轨枕螺栓	2.06×10^5	0.30	7 850
3	轨下垫片	24.50	0.30	929
4	铁垫板	1.73×10^5	0.30	7 850
5	弹性垫板	19.50	0.49	870
6	轨距挡板	8 500	0.40	1 150
7	螺栓垫片	8 500	0.40	1 150
8	绝缘垫片	8 500	0.40	1 150

1.3 接触设置

扣件系统在实际服役状态下,弹条与螺栓垫片、弹条与轨距挡板、以及弹条与绝缘垫片均存在接触,且随着螺栓预紧力和行车载荷的变化,弹条实际受力情况也跟着改变^[4,8]。为此,基于非线性接触理论,将弹条与其接触元件间的关系设置为面-面接触,包含法向接触和切向接触,法向接触通过拉格朗日法设置为“硬接触”,即两物体间不允许相互贯穿或侵入;切向接触采用库伦摩擦模型,用一个允许“弹性滑动”的罚摩擦公式来处理滑移和粘结两种状态间的不连续而导致的不收敛问题;其中,弹条与螺栓垫片、弹条与轨距挡板、以及弹条与绝缘垫片的切向摩擦系数分别定义为0.1、0.2、0.15^[14],如图4所示。为节约计算资源,提高收敛性,其余元件间的接触均定义为绑定约束。

1.4 边界条件

扣件有限元模型不考虑地基振动响应,因此,固定轨枕底面6个方向的全部自由度;为避免弹条在安装过程中发生沿钢轨长度方向的移动,约束弹条



a 摩擦特性

b 接触对

图4 接触设置

Fig. 4 Contact setting

中肢纵向(图4中的y轴方向)位移。安装过程中,弹条通过自身变形产生扣压力扣压钢轨。为此,对有限元模型中的螺栓施加一定的垂向静态载荷,用以模拟弹条的安装扭矩。合理的载荷将通过与试验结果对比确定。

2 结果对比与分析

2.1 安装状态的确定

考虑到实际工程安装中可能会出现欠拧或过拧的情况,本文将对分析不同安装扭矩下弹条的受力状态。将仿真计算得到的弹条表面位移和应变与基于数字图像相关技术(digital image correlation, DIC)的实测结果进行对比,确定仿真中弹条欠拧、标准安装及过拧状态的安装扭矩,试验现场如图5所示。

采用两台高清相机(Schneider镜头,焦距50 mm,拍摄速度30帧 $\cdot\text{s}^{-1}$ 、满幅分辨率4 096 \times 3 000像素),测量弹条在欠拧、标准安装及过拧下的表面位移场及应变场。试验前,首先采用黑白哑光喷漆,

在弹条表面制作具有高灰阶差异的人工散斑;然后将两台相机架设在预定位置,根据试验环境调整光源(图5a),用标定板标定测量系统。试验时,用带有示数的扭矩扳手(图5b)对弹条依次施加150、210、250、300及350 N·m的螺栓扭矩,采集弹条变形前后

的散斑图像。试验后,将图像文件输入至后处理系统,设置子区搜索参数,采用数字图像相关算法对两台相机采集到的图像信息进行匹配,得到被测表面的全场位移及应变信息,实现非接触式全场位移及应变测量。

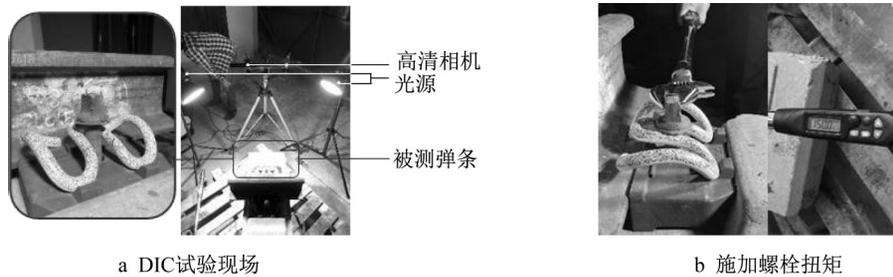


图5 组装状态下弹条表面位移场及应变场试验

Fig. 5 Site for testing the surface displacement field and the surface strain field of the clip in the assembly state

图6是弹条位于螺栓下方附近区域(图4中圆圈标记位置)垂向位移及弹条跟端小圆弧区域(图4中三角形标记位置)主应变的实测与仿真结果,可以看出,随着螺栓扭矩的增加,弹条表面垂向位移及主应变逐渐增大。通过对比仿真与实测结果,确定仿真

计算工况:当预紧力为17 kN时,对应的螺栓扭矩为标准安装扭矩250 N·m;当弹条处于欠拧状态(预紧力为15 kN),对应的螺栓扭矩为150 N·m;当弹条处于过拧状态(预紧力为19 kN),对应的螺栓扭矩为350 N·m。

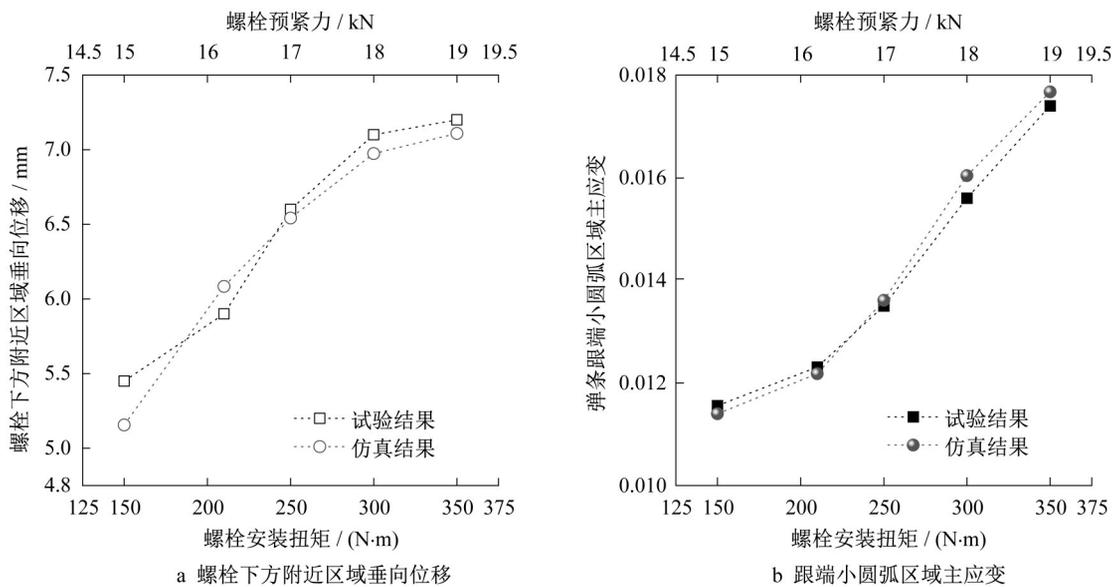


图6 弹条表面垂向位移及主应变实测与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of tested and simulated results for the vertical displacement and the principal strain of the clip

2.2 不同安装扭矩下的应变特点

为了分析弹条疲劳寿命,先确定扣件弹条在安装完成后本身的危险区域。对比标准安装状态下(扭矩:250 N·m)弹条全局应变场的实测和仿真结果,如图7所示。由图可知,安装完成后弹条实测最

大主应变出现在弹条跟端,结果为0.013 5,大于弹条材料的屈服应变0.007 7,且方向与水平方向近似呈45°。观察图7b中的仿真结果,可知最大主应变的位置,数值(0.015 9)及方向(与水平方向近似呈45°)与实测结果均有较好的一致性。

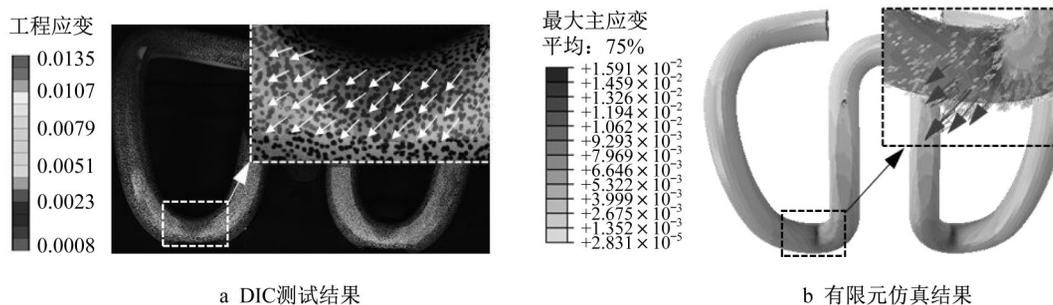


图 7 标准安装扭矩下弹条最大主应变分布图

Fig. 7 Maximum principal strain distributions of the clip at standard installation load

对比欠拧和过拧状态下实测弹条表面应变场, 由图 8 可知, 当安装扭矩减小至 150 N·m, 欠拧时, 应变分布与标准安装时一致, 最大应变发生在跟端, 最大值为 0.011 5, 也已大于材料屈服应变。当安装扭矩增加至 340 N·m, 过拧时, 应变分布未发生改变, 最大值增加至 0.017 4。观察图 9 仿真结果可知, 实

测和仿真结果的应变分布、最大主应变数值和位置基本吻合。综上, 本文所建立的扣件系统有限元模型, 考虑了弹条材料的弹塑性力学特性, 以及多个复杂接触对, 可有效预测弹条在不同安装条件下的受力状态。

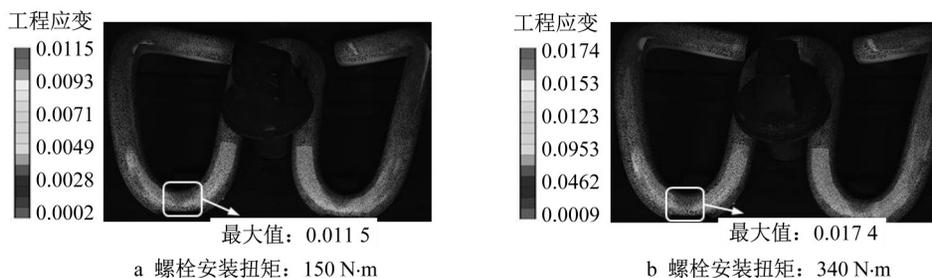


图 8 弹条在不同螺栓安装扭矩作用下的实测应变场

Fig. 8 Tested strain fields of the clip at different bolt installation torques



图 9 不同安装扭矩下弹条表面应变分布

Fig. 9 Strain distributions on the clip surface at different installation torques

由上述分析可知, 安装完成后弹条的最大主应变发生在弹条跟端, 因此, 以标准安装状态为例, 分析弹条跟端内部应力应变状态, 如图 10 所示。

弹条危险区域上半部应变指向 y 轴正向, 下半部指向 y 轴负向 (图 10a), 说明弹条受弯曲变形; 主应力方向在危险截面两侧呈相反方向 (图 10b), 说明弹条受扭转变形; 危险截面等效应力由中心向四周

逐渐增大, 进一步说明弹条受弯曲和扭转变形, 最大应力出现在跟端内侧表面 (图 10c); 塑性应变也发生在跟端内表面 (图 10d), 在循环载荷作用下, 易产生残余变形。综上, 在安装完成后, 弹条跟端处于弯扭组合变形状态, 已进入屈服阶段, 是易发生断裂的危险区域。

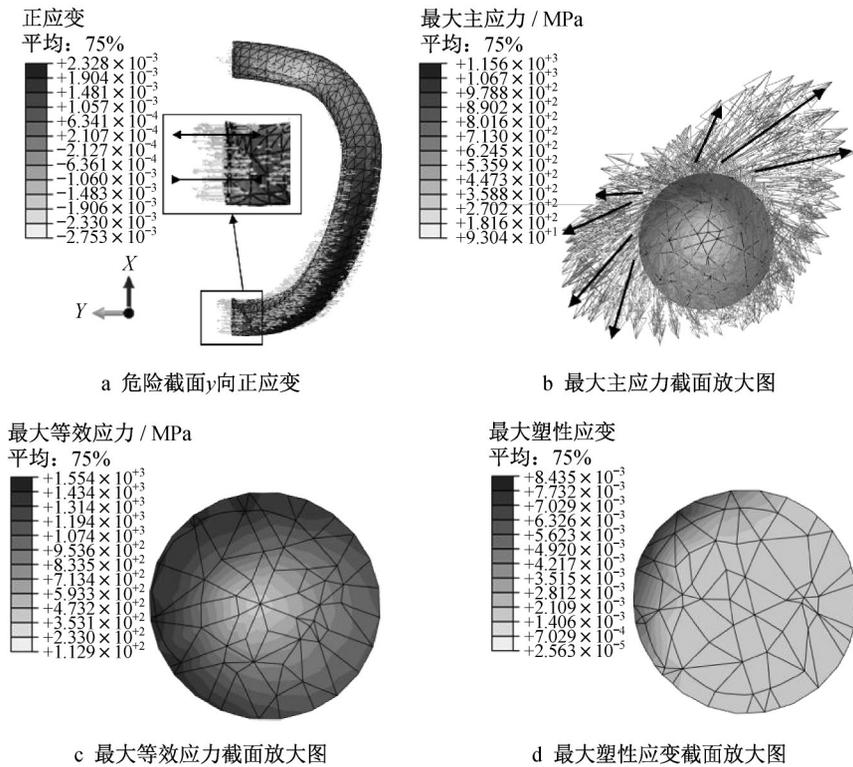


图 10 弹条跟端应力应变状态

Fig.10 Stress and strain state at the heel of the clip

3 疲劳寿命预测方法

弹条在实际服役状态下,除了承受安装扭矩的作用,还会承受大密度列车运行时通过钢轨所产生的循环疲劳载荷的作用,循环动力载荷易引起材料疲劳从而导致零件破坏,而疲劳破坏也是工程结构失效的主要原因之一。为了保证扣件系统的正常使用,研究弹条在静态安装扭矩以及循环疲劳载荷下的疲劳性能,对弹条疲劳寿命进行估算十分必要。

构件的弹性变形疲劳寿命通常采用应力-疲劳寿命(S-N)关系曲线来计算^[15-16]。但是,弹条无论处于欠拧、标准安装或者过拧状态,危险点位置均已进入屈服阶段。应力水平越高,循环加载中危险点的塑性变形越大,疲劳寿命对应变的变化越敏感^[17]。使用S-N曲线不足以描述弹条的疲劳性能,而采用控制应变法估算寿命将会更加合理。因此,本文将基于应变-疲劳寿命(ε-N)曲线,对弹条寿命进行评估和预测。

3.1 考虑平均应力影响的弹条ε-N曲线

本文采用工程中最常用的Brown-Miller准则,结合Seeger算法表征弹条应变幅与疲劳寿命间的关系^[18]。弹条材料的应变-疲劳寿命(ε-N)曲线可表达为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = 1.65 \frac{1.5\sigma_b}{E} (2N_f)^{-0.087} + 1.0325 \left(1.375 - \frac{125\sigma_b}{E} \right) (2N_f)^{-0.58} \quad (3)$$

式中:等号右侧第一项为寿命的弹性分量,第二项为塑性分量。 $\Delta\gamma_{\max}$ 为最大剪应变幅值; $\Delta\epsilon_n$ 为垂直于最大剪应变方向的法向应变幅值; σ_b 为材料抗拉强度; E 为材料弹性模量; N_f 为以循环数计的疲劳寿命。

由式(3)绘制的ε-N曲线仅考虑了对称循环应力幅对弹条疲劳寿命的影响。但实际轮轨载荷为非对称载荷,会引起弹条大部分位置处于复杂应力状态,其中,平均应力既有拉应力又有压应力,仅通过式(3)计算弹条疲劳寿命并不合理。为此,采用Morrow模型修正平均应力^[18],修正后的ε-N曲线可表示为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = 1.65 \frac{1.5\sigma_b - \sigma_m}{E} (2N_f)^{-0.087} + 1.0325 \left(1.375 - \frac{125\sigma_b}{E} \right) (2N_f)^{-0.58} \quad (4)$$

式中: σ_m 为平均应力, $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ 。

3.2 疲劳载荷施加

依据扣件系统在行车条件下的实际受力情况可知,其疲劳载荷主要由钢轨垂向振动引起。因此,本

文将在钢轨轨顶处施加实测轮轨垂向力(图11a),通过仿真计算得到弹条应力应变载荷谱,分析弹条疲劳寿命。基于现行标准《TBT 2489—2016 轮轨横向力和垂向力地面测试方法》^[18],采用应变片在现场钢轨上测量轮轨垂向力,得到我国某高铁线路的实测轮轨力时程曲线(车速 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$),如图11b虚线所示,其中正值表示钢轨受到铅垂向下的载荷,而负值表示因测量钢轨轨腰剪应变负值,通过标定关系,得到的铅垂向上的测试值。由于本文研究对象为弹

条,钢轨反向运动对弹条趾端的激励不可忽视。对弹条而言,输入钢轨的位移与载荷起到相同作用,故采用实测未忽略负值的轮轨垂向力作为外部激励。由图11b可知,实测轮轨力最大约为 160 kN ,最小约为 -50 kN 。为此,本文将其实等效为振幅 100 kN ,均值 40 kN 的垂向正弦载荷激励,如图11b实线所示。等效的疲劳载荷最大值为 140 kN ,低于轮轨力最大允许值 170 kN 。

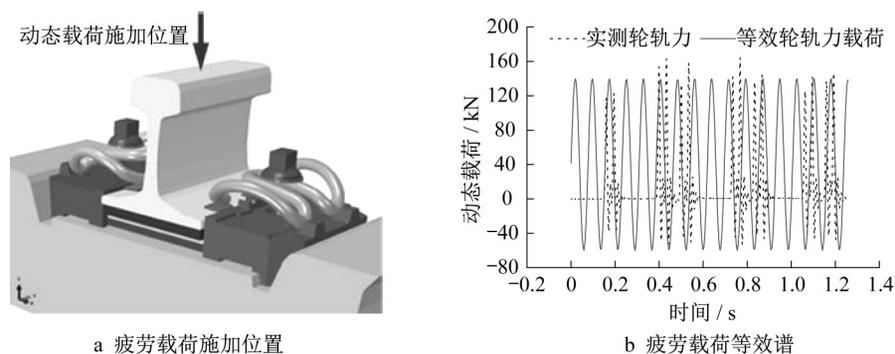


图11 等效疲劳载荷施加

Fig. 11 Applied equivalent fatigue load

在实际线路中,轮轨力是由沿纵向多个并联的弹性元件共同承担,若直接将实测轮轨力加载在单个扣件的简化模型上时,会导致钢轨垂向位移过大。因此,本文通过提高弹性垫板的弹性模量(由原有的 7.84 MPa 提高至 19.50 MPa),提高扣件系统整体垂向刚度,以保证在实际轮轨力作用下,钢轨位移不超过最大允许值 2 mm 。

通过在钢轨轨顶施加上述循环载荷,得到钢轨位移时程曲线,如图12所示。由图可知,最大值约为 1.67 mm ,小于 2 mm ,表明钢轨位移符合实际工况,该简化模型可用于分析弹条在实际工况下的疲劳性能。此外,由2.1节DIC试验验证可知,提高弹性垫板的弹性模量,对弹条在安装扭矩下的静力学受力特点影响较小,可忽略不计。因此,该简化模型可用于分析不同安装扭矩、疲劳载荷幅值及安装扭矩和疲劳载荷幅值的匹配关系对弹条寿命的影响。

将标准安装扭矩的加载方式作为疲劳寿命计算中的工况1,对扣件系统中的钢轨施加上述疲劳载荷,进行有限元分析,获取弹条(特别是产生塑性变形的危险点位置)在动态载荷作用下的应力应变时程结果;然后采用局部应力应变法,基于平均应力修正的 $\epsilon-N$ 曲线,结合线性疲劳累积损伤理论,对弹条元件在不同工况下的疲劳寿命进行计算。

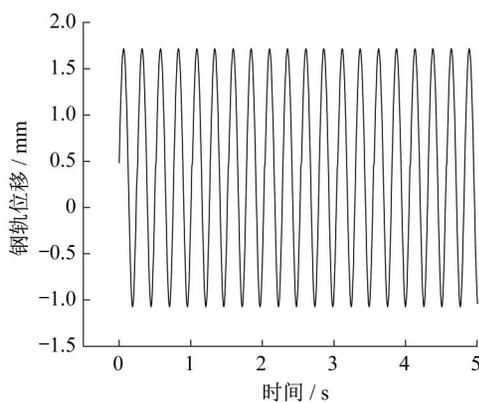


图12 钢轨位移时程曲线(等效正弦载荷幅值为 100 kN)

Fig. 12 Time history curve of the rail displacement (at an equivalent sinusoidal load of 100 kN)

4 弹条疲劳寿命的评估

图13a展示了安装扭矩为 $250\text{ N}\cdot\text{m}$,疲劳载荷幅值为 100 kN 、均值为 40 kN 时的弹条疲劳寿命云图。由图可知,弹条疲劳寿命的危险点位于跟端小圆弧内表面,与实际线路中弹条裂纹萌生位置、扩展方向、以及断裂位置吻合较好(图13b)。此工况下,弹条的疲劳寿命次数在 1×10^8 以上($\lg(N_{\min})=8.557$),满足500万次的弹条出厂要求。



图 13 弹条计算疲劳寿命与实际断裂特征对比

Fig. 13 Comparison of the calculate fatigue life and the actual fracture characteristics of the clip

进一步分析弹条危险点疲劳寿命随安装扭矩的变化规律,如图 14 所示。随着安装扭矩的增加,弹条危险点位置的疲劳寿命逐渐降低。因此,在弹条安装时,应尽可能避免过拧情况的发生,以提高弹条在实际服役过程中的疲劳寿命。

高铁线路中的实际轮轨力大小会因线路设计、簧下质量以及车轮状态而有所变化^[19-21];姜子清等^[19]通过测试不同列车速度和线路线形条件下最大轮轨垂直力,发现在缓和曲线段、车速为 250 km·h⁻¹时,有波磨路段轮轨力比无波磨路段约增大 30 kN;刘卫星等^[20]研究附加动载荷取值时,发现当速度从 200 km·h⁻¹增加至 300 km·h⁻¹时,轮轨力约增加 30 kN;刘欢等^[21]研究车轮多边形对轮轨力的影响,发现轮轨法向力的最大波动幅值为 65 kN。为此,本文基于上述线路中的轮轨力参数,确定需讨论的疲劳载荷幅值计算工况,见表

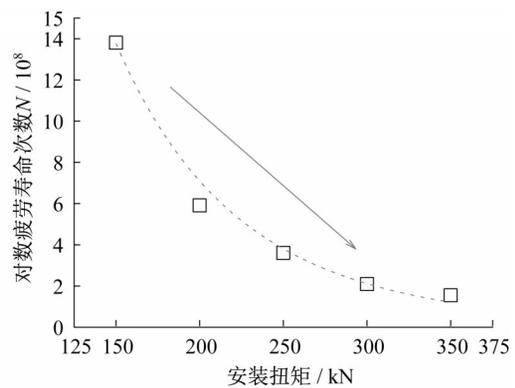


图 14 弹条危险点寿命-安装扭矩曲线

Fig. 14 Installation torque curve for the dangerous point of the clip

2。用与工况 1 同样的计算方法,计算不同循环疲劳载荷作用下的弹条危险点疲劳寿命,见图 15。

表 2 计算工况

Tab.2 Calculation cases

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
安装扭矩/(N·m)	250	250	250	250	150	150	150	150	350	350	350	350
疲劳载荷幅值/kN	100	70	130	170	70	100	130	170	70	100	130	170

观察图 15 中的每一条曲线可以发现,随着疲劳载荷幅值的增加,弹条危险点位置的疲劳寿命明显降低,二者近似呈反比关系。当疲劳载荷幅值超过 130 kN 后,危险点位置的疲劳寿命次数已小于设计要求的 5×10⁶,弹条出现疲劳失效的可能性显著增加。

通过比较图 15 中不同安装扭矩作用下的各条曲线还可发现,随着疲劳载荷幅值的增加,安装扭矩对弹条疲劳寿命的影响逐渐增大。例如,当疲劳载荷幅值为 70 kN 时,安装扭矩从 150 N·m 增加到 350 N·m,弹条疲劳寿命次数从 5.9×10¹⁰降低为 5.0×10⁹,降低至原有的 8%;当疲劳载荷幅值为 170 kN 时,安装扭矩从 150 N·m 增加到 350 N·m,弹条的疲劳寿命次数从 4.8×10⁶降低为 1.0×10⁵,降低至原

有的 2%。由图 14 还可知,考虑实际高铁中的不利工况(疲劳载荷幅值为 130 kN),安装扭矩 350 N·m 对应的弹条疲劳寿命次数为 4.4×10⁶,已不满足弹条 5×10⁶的使用要求。因此,为保证弹条的实际使用寿命,特别是在车速较高或波磨较严重的线路,建议弹条在安装时安装扭矩不要超过 300 N·m。

5 安装扭矩和疲劳载荷匹配关系对弹条疲劳寿命的影响

由第 4 节分析可知,疲劳载荷幅值会影响安装扭矩对弹条疲劳寿命的影响程度。不同安装扭矩和疲劳载荷幅值的匹配会直接影响弹条所受的静态应力及交变应力,从而改变弹条在实际服役过程中的

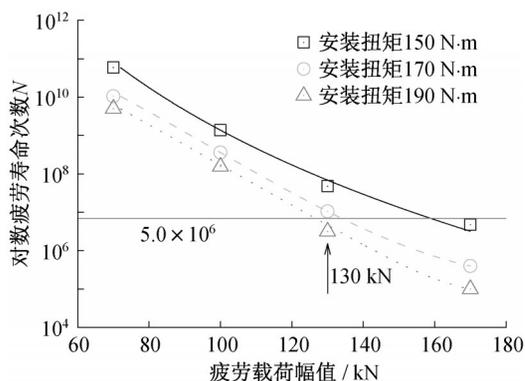


图 15 不同安装扭矩及疲劳载荷作用下的弹条疲劳性能
Fig. 15 Fatigue performances of clip at different installation torques and fatigue loads

最小应力与最大应力之比,即改变应力比 R 这一循环特征值,进而影响弹条疲劳寿命。因此,研究安装扭矩和疲劳载荷幅值的匹配关系,对提高弹条疲劳寿命具有重要意义。

基于上述分析,弹条跟端危险点位置的应力比可通过有限元静力学及动力学分析得到。分析应力比随安装扭矩及疲劳载荷幅值的变化规律,如图16所示。由图可见,安装扭矩和疲劳载荷幅值对应力比的影响与对弹条疲劳寿命的影响(图15)基本一致。

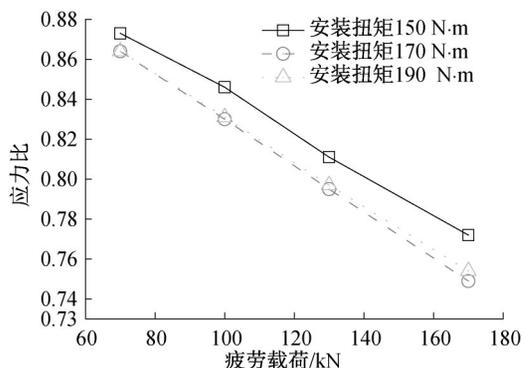


图 16 安装扭矩和疲劳载荷对应力比的影响
Fig. 16 Influences of installation torque and fatigue load on stress ratio

进一步分析应力比与弹条疲劳寿命的关系,见图17。由图可知,随着应力比减小,弹条疲劳寿命逐渐降低,二者近似呈线性关系。采用最小二乘法拟合曲线,可得线性回归决定系数 $R^2=0.95$ 。因此可以表明,弹条危险点的应力比可用于判断弹条是否满足疲劳寿命设计要求:当应力比低于0.8时,疲劳寿命将小于设计要求的 5×10^6 ,弹条极易萌生裂纹,随着循环载荷的持续作用,裂纹极易扩展导致弹条

断裂;当应力比在0.8以上,弹条寿命满足设计要求。

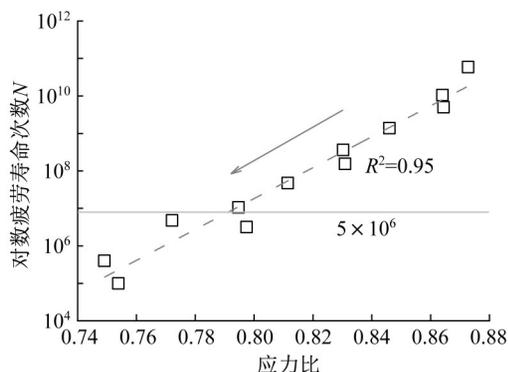


图 17 不同应力比下的疲劳寿命
Fig. 17 Fatigue lives at different stress ratios

6 结论

(1) 本文建立的W300-1型扣件系统有限元模型,综合考虑了弹条材料的弹塑性力学特性以及多种复杂接触关系,其仿真结果与DIC测试结果具有很好的一致性,可有效计算弹条在不同安装扭矩下的受力情况。

(2) 无论处于略微欠拧、正常安装或过拧状态,W300-1型扣件弹条全局危险点位置均位于跟端圆弧内表面,同时危险点在标准安装状态下已发生塑性变形。

(3) 安装扭矩和疲劳载荷幅值的增加会导致弹条疲劳寿命降低。且随着疲劳载荷幅值的增加,弹条疲劳寿命对安装扭矩更加敏感。因此,为保证弹条的实际使用寿命,特别是在车速较高或波磨较严重的线路,建议弹条安装时安装扭矩不超过 $300 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

(4) 弹条危险点的应力比与疲劳寿命近似呈线性关系。因此,可通过有限元静力及动力分析,计算弹条危险点的应力比,对弹条的寿命进行评估和预测:当应力比在0.8以上,弹条疲劳寿命次数满足设计要求的 5×10^6 。

作者贡献说明:

- 刘艳:课题来源、确定试验方案、模拟方法概念。
姜秀杰:模拟方法实现,数据分析,撰写论文初稿。
李秋彤:数据分析指导,指导论文修改。
赵威:模拟方法指导。
刘欢:试验方法指导、文章编辑。

参考文献:

- [1] 肖宏, 马春生, 郭晓, 等. e型扣件弹条断裂原因频谱分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(7):1000.
XIAO Hong, MA Chunsheng, GUO xiao, *et al.* Fractures of e-type fastening clip by spectral analysis method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(7):1000.
- [2] 刘小军. 重载铁路钢轨焊缝不平顺对扣件弹条动态应力的影响分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LIU Xiaojun. Effect of rail weld irregularities on dynamic stress of heavy-haul railway fastening spring clip [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [3] 张松琦, 张远庆, 汝继来, 等. 扣件DI弹条非正常部位断裂原因分析及结构优化[J]. 铁道建筑, 2020, 60(3): 137.
ZHANG Songqi, ZHANG Yuanqing, RU Jilai, *et al.* Fracture analysis and structural optimization of abnormal part of fastener DI spring clip [J]. Railway Engineering, 2020, 60(3): 137.
- [4] 陈宪麦, 屈郑嘉, 陈文韬, 等. 地铁DTⅡ2扣件弹条力学特性及断裂研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(11): 2813.
CHEN Xianmai, QU Zhengjia, CHEN Wentao, *et al.* Study on mechanical properties and fracture of DTⅡ2 fastener elastic bar [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(11): 2813.
- [5] XIAO Hong, GAO Xiaogang, WANG Haoyu, *et al.* Fatigue damage analysis and life prediction of e-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(3):2072045812.
- [6] MOHAMMADZADEH S, AHADI S, NOURI M. Stress-based fatigue reliability analysis of the rail fastening spring clip under traffic loads [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2014, 11:993.
- [7] ANAT H, PHANASINDH P, NITIKORN N, *et al.* Influence of toe load on the fatigue resistance of elastic rail clips [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017. 232(4): 1078.
- [8] 向俊, 袁铖, 余翠英, 等. 高速铁路无砟轨道扣件弹条断裂原因分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7): 1605.
XIANG Jun, YUAN Cheng, YU Cuiying, *et al.* Analysis of elastic bar fracture causes of fasteners in ballastless track of high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7): 1605.
- [9] 辛涛, 杨学敏, 肖宏, 等. 基于车轨耦合和扣件精细模型的弹条疲劳分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(12): 4270.
XIN Tao, YANG Xuemin, XIAO Hong, *et al.* Fatigue analysis of spring clip based on vehicle-track coupled model and detailed fastener model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(12): 4270.
- [10] 王开云, 蔡成标, 朱胜阳. 铁路钢轨扣件系统垂向动力模型及振动特性[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 146.
WANG Kaiyun, CAI Chengbiao, ZHU Shengyang. Vertical dynamic model and vibration characteristic of rail fastening system [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(4): 146.
- [11] 尚红霞, 温泽峰, 吴磊, 等. 地铁扣件III型弹条失效有限元分析[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 210.
SHANG Hongxia, WEN Zefeng, WU Lei, *et al.* Finite element analysis of type III rail fastening clip failure in metro lines [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 210.
- [12] FERREÑO D, CASADO J A, CARRASCAL I A, *et al.* Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system [J]. Engineering Structures, 2019, 188:553.
- [13] 元伟, 刘玉涛, 陈江, 等. 客货混运线路扣件弹条疲劳特性准静态分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 1.
QI Wei, LIU Yutao, CHEN Jiang, *et al.* Quasi-static analysis of fatigue characteristic of rail fastening clip for railways with passenger and freight traffic [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 1.
- [14] 李中, 郭瑞琴, 武帅. 弹条偏转和扣件松动对弹条扣压力的影响[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(2): 47.
LI Zhong, GUO Ruiqin, WU Shuai. Effects of elastic strip deflection and fastening looseness on toe load of elastic strip [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(2): 47.
- [15] 林腾蛟, 沈亮, 赵俊渝. 风电增速箱输出级齿轮副疲劳寿命有限元分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2012, 35(1): 1.
LIN TENG Jiao, SHEN Liang, ZHAO Junyu, *et al.* Fatigue life finite element analysis of output gear pair of wind turbine speed-increase gearbox [J]. Journal of Chongqing University (Science and Technology), 2012, 35(1): 1.
- [16] HE Peiyu, HONG Rongjing, WANG Hua, *et al.* Fatigue life analysis of slewing bearings in wind turbines [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111:233.
- [17] GIANNELLA V, CITARELLA R, FELLINGER J, *et al.* LCF assessment on heat shield components of nuclear fusion experiment "Wendelstein 7-X" by critical plane criteria [J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 8:318.
- [18] 国家铁路局. 轮轨横向力和垂向力地面测试方法: TB/T 2489—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
State Railway Administration. Track side test methods of vertical and lateral wheel-rail forces: TB/T 2489—2016[S]. Beijing: China Railway Press, 2017.
- [19] 姜子清, 司道林, 李伟, 等. 高速铁路钢轨波磨研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 9.
JIANG Ziqing, SI Daolin, LI Wei, *et al.* Study on rail wave grinding of high speed railway [J]. China Railway Science, 2014, 35(4): 9.
- [20] 刘卫星, 赵坪锐, 毕澜潇, 等. 高速铁路有砟轨道轮轨附加动荷载取值研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(5): 50.
LIU Weixing, ZHAO Pingrui, BI Lanxiao, *et al.* Study on the value of additional dynamic load of ballast track on high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(5): 50.
- [21] 刘欢, 陶功权, 蔡晶, 等. 车轮多边形形态下车轮轨动态响应研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 16.
LIU Huan, TAO Gongquan, CAI Jing, *et al.* Influence of wheel polygon on locomotive wheel-rail dynamic response [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(16): 16.