

文章编号: 1005-0523(2025)05-093-11



重载铁路道岔尖轨声发射波传播特性研究

冯青松, 袁佳鹏, 刘 健, 刘庆杰

(华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 为研究重载铁路道岔尖轨中伤损产生的声发射波的传播特性, 以重载铁路 12 号道岔尖轨为研究对象, 结合 Abaqus 仿真与断铅声发射实验技术, 通过断铅实验模拟尖轨伤损产生的声发射信号, 对道岔尖轨的声发射仿真方法展开了细致剖析, 验证了仿真模型的正确性与有效性, 并通过现场实测, 对仿真结果进行了验证。结果表明: 尖轨不同特征断面中的伤损发射信号具有相似的频率分布特征, 然而, 其强度会随着特征断面的增大而逐步降低, 并且在传导距离不断增加的情况下, 能量于小波时频图中会朝着其他频段进行分散; 伤损模型的引入使各频段声发射信号响应增大, 特别是在 160~200 kHz 产生异常峰值, 通过现场实测也验证了这一结果。研究成果可为道岔尖轨伤损检测中声发射信号的分析与应用提供参考。

关键词: 重载铁路; 道岔尖轨; 伤损检测; 声发射技术; 断铅实验

中图分类号: U216.3

文献标志码: A

本文引用格式: 冯青松, 袁佳鹏, 刘健, 等. 重载铁路道岔尖轨声发射波传播特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 93-103.

Research on the Propagation Characteristics of Acoustic Emission Wave at Switch Sharp Rail of Heavy-Haul-Railway

Feng Qingsong, Yuan Jiapeng, Liu Jian, Liu Qingjie

(State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure,
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to study the propagation characteristics of acoustic emission waves generated by damage in the switch rail of heavy-haul-railway, this article takes the switch rail of the No. 12 turnout on heavy haul railways as the research object. Combining Abaqus simulation and the lead-break acoustic emission experimental technique, it simulates the acoustic emission signal generated by the damage of the switch rail through the lead-break experiment, conducts a detailed analysis of the acoustic emission simulation method of the turnout switch rail, verifies the correctness and effectiveness of the simulation model, and validates the simulation results through on-site measurements. The results show that the damage emission signals in different characteristic sections of the switch rail have similar frequency distribution characteristics. However, the intensity gradually decreases with the increase of the characteristic section. Moreover, with the continuous increase of the conduction distance, the energy disperses to other frequency bands in the wavelet time-frequency diagram. The introduction of the damage model increases the response of the acoustic emission signals in each frequency band, especially producing an abnormal peak between 160 and 200 kHz. This result has also been verified through on-site mea-

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178423)

surements. The research results can provide reference for the analysis and application of acoustic emission signals in the detection of switch rail damage.

Key words: heavy-haul-railway; switch sharp rail; damage detection; acoustic emission technology; lead-break experiment

Citation format: FENG Q S, YUAN J P, LIU J, et al. Research on the propagation characteristics of acoustic emission wave at switch sharp rail of heavy-haul-railway[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (5): 93–103.

列车在运行期间,反复经历加速和制动过程,这些过程会对钢轨产生诸如强烈的摩擦、挤压、弯曲以及冲击等作用。在这些因素的长期影响下,钢轨非常容易出现疲劳裂纹,尤其是在钢轨的接缝处、弯道以及岔道等部位更为明显^[1]。倘若不采取有效的安全防范措施,萌生出来的裂纹在后续外力持续作用下,极易进一步扩展,最终会引起钢轨断裂,进而酿成重大事故^[2]。尖轨与心轨在钢轨道岔中占据着极为关键的地位。不过,因其边界条件复杂且断面变化幅度大,传统探伤技术在对其检测时面临诸多困难,进而成为保障道岔安全运行的关键阻碍。物体在遭受外力或内力作用时,其内部的局部能量会被快速释放,此现象即声发射^[3]。

在现有的研究中,声发射技术已广泛应用于一些截面形式较为简单的钢构件或混凝土构件的表面裂纹检测中,这些研究也从理论上充分的验证了声发射技术应用于伤损检测的可行性与有效性^[4]。声发射法在钢轨上的应用,最早是由 Murav'ev 等^[5]提出的。在声发射技术的基础上, Thakkar 等^[6-7]探索了一种用于监测轮轨相互作用状况的方法。他们借助一个简易模型解析模拟钢轨里声发射信号的传输情形,并且能够精准定位表面损伤。但遗憾的是,该设备的运行速率较为迟缓,其最高时速仅能达到 14 km/h。Bruzeliuss 等^[8]通过轮轨模拟试验系统地进行了最高时速 25 km/h 的试验测试,证实钢轨裂纹检测运用声发射的高效性,然而,鉴于设备的运行时速有限,信号数据受噪声干扰极小。为了检验在高速运行场景下 AE 信号是否能够被有效检测,章欣^[9]构建时速可达 177 km/h 的轮轨模拟实验系统,并研究了声发射信号(简称 AE 信号)的去噪方法。周长义等^[10],杨明伟^[11],郭力等^[12]在相关研究中做了断轨的相关试验,结合 TDOA 算法通过 AE 信号确认了断轨的位置。已有的大量试验均证实

了声发射技术在钢轨伤损检测的有效性。前述研究大多集中于钢轨的基本轨部分的研究,而将声发射技术应用于尖轨的研究十分有限。所以,为了更好地指导 AE 在道岔尖轨实际中的应用,将声发射技术应用于道岔尖轨并研究其在尖轨的传播特性是有前景的。司道林等^[13]也通过重载铁路岔区尖轨的特性分析,说明了岔区较普通区的差别。鉴于此,进一步深入剖析道岔尖轨中的声发射源特征以及 AE 波在道岔尖轨内部的传递特性^[14]显得尤为必要。

为深入探讨道岔尖轨内的裂纹声发射源,采取有限元技术构建了道岔尖轨以及内部的裂纹模型,并且选择在尖轨的适当位置放置裂纹声发射源以模拟裂纹的扩散。利用模型所得出的数据与实验获取的数据相比,通过仿真获取的信息可以产生统一且理想的数据,以便更好地探索裂纹声发射源的特性。

1 道岔尖轨有限元模型建立

1.1 尖轨模型建立

在模拟 AE 信号传递的过程中,有限元模型需选取合适的时间与空间分辨率,以准确模拟声发射波传播过程中的时空特性。依靠合理的时间与空间分辨率,有限元模型的数值解能够达到收敛状态。为此,本文运用式(1)与式(2),力求实现最优收敛效果。

$$\Delta t = \frac{1}{Kf_{\max}} \quad (1)$$

$$l_c = \frac{l_{\min}}{Kf_{\max}} \quad (2)$$

式中: Δt 为时间间距; $f_{\max}$ 为声发射感知的最大频率; l_c 为所选择单元的宽度; $l_{\min}$ 为声发射感知的最小波段; K 为空间抽样比例缩放因子,它的值必须是

所感知信息最大频次相对周期的 $1/K$ 和最少波段的 $1/K$ 。一般情况下, K 取 $10\sim 20$,本文 K 值取 20 。

结合原有研究,将AE信号的最大频率 $f_{\max}$ 设定为 10^6 Hz,并使用式(1)计算出 Δt ,从而确定出 $0.05\text{ }\mu\text{s}$ 的时间间隔。进而由式(2)求得 l_0 为 0.16 mm 。

借助有限元仿真技术,能够精准界定伤损AE源的位置、AE源上升时间、AE源的幅值,以及不受噪音干扰的声发射信号。这样的界定有助于我们深入认识伤损声发射源的特性,获取在试验研究中难以得到的关键信息,并且在模型仿真里更易达成这种界定要求。本文运用有限元软件Abaqus构建的钢轨有限元模型如图1所示,钢轨材料的物理特性参数详见表1。



图1 道岔尖轨的三维有限元模型
Fig. 1 Three-dimensional finite element model of switch sharp rail

表1 道岔尖轨的材料参数
Tab.1 Material parameters of switch sharp rail

材料参数	取值
杨氏模量 $E/(\text{N}/\text{m}^2)$	2.09×10^{11}
泊松比	0.30
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7 800
纵波波速 $v_p/(\text{km}/\text{s})$	5.98
横波波速 $v_s/(\text{km}/\text{s})$	3.20

重载12号道岔尖轨模型的几何形状参照了其设计图纸的尺寸,全长为 15.445 m ,可动段长度为 12.145 m ,固定段长度为 3.300 m 。因普通道岔选用的制作材料结构相对简单,主要用于维持轨道的直线性,而道岔尖轨具有特殊的几何形状和设计,通常包括尖轨本身、导轨、心轨等部分,结构复杂,要求较高的精度和耐磨损性能,非均匀特种截面(AT)铁轨便是较好的选择,具备出色的稳定性与耐久性。尖轨与钢轨其他部分连接处,尖轨的头部与底部需开展机械加工处理,且尖轨的截面处于持续变化之中。运用锻压工艺把非对称截面转变为常规

钢轨断面,便于尖轨端部与导曲线钢轨的连接,详见图2。在仿真模型里采用的实体单元为带沙漏控制的缩减积分技术的C3D8R。

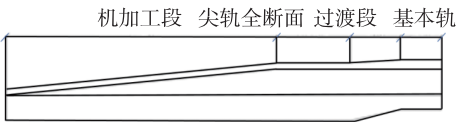


图2 尖轨断面变化
Fig. 2 Change of switch sharp rail

1.2 断铅试验声发射源的建模

通过研究发现,声发射信号源位置的波形一般呈现为宽频带尖脉冲形态,此类波形承载着信号源的相关定量信息。在模拟过程中,我们采用了多种形式的时变激励力,目的在于获取与Hsu-Neilsen断铅试验相近的波形效果,其计算式为

$$F(t)=\begin{cases} 0, & t<0 \\ 0.5-0.5\cos(\pi t/\tau), & 0\leq t\leq \tau \\ 1, & t>\tau \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ 为上升时间,调整 τ 的值,以获取不同的中心频率的激励函数。本文取上升时间为 $3.0\text{ }\mu\text{s}$,断铅激励波形如图3所示。

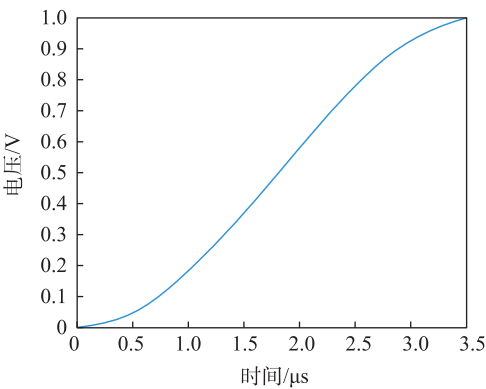


图3 断铅激励波形
Fig. 3 Lead-break excitation waveform

1.3 模型可行性验证

本文将仿真数据与室内试验数据进行对比,验证所构建的钢轨声发射有限元仿真模型在解决声发射相关问题时的有效性,通过这样的方式来评定该模型的可信度以及精准度。

实验验证所运用的仪器设备有:长度为 300 mm 的 $60\text{ kg}/\text{m}$ 钢轨、声发射信号接收传感器(图4(a))、铅笔铅芯(作为断铅试验的声发射激励源)、NI采集



(a) 声发射压电传感器



(b) NI采集卡



(c) 前置放大器

图4 实验装置

Fig. 4 Experimental device

卡(图4(b))、信号放大器(图4(c))以及信号显示器。

在实验过程中,在距轨底90 mm(轨腰)处设定断铅声发射激励源,仿真中的声发射激励源位置也是如此。试验与仿真的测点一致,均为距激励点140 mm处,采样频率为103 kHz,能够覆盖常用AE信号20~103 kHz的频率范围。因断铅产生的声发射信号较为微弱,若直接用传感器采集信号,难以获取有效数据,通过前置放大器获取有效数据,以保障数据采集工作顺利开展。

为证实文中构建的钢轨声发射有限元仿真模型可有效处理声发射问题,本研究对有限元仿真数据与断铅试验数据进行了对比分析。

试验期间,进行多次激励,每组数据均采集不少于9次的断铅数据记录。声发射压电传感器会采集到每次相应的AE信号。受试验外部环境不可抗拒的因素影响,得到的AE信号存在基线漂移的情况,对其采用滤波处理并截取得到单次断铅的AE信号。仿真所取信号时长为200 μs ,因此对单次断铅AE信号截取时长也为200 μs 。

在试验中,使用信号放大器对压电效应产生的AE信号进行放大,导致试验得到的AE信号与仿真的AE信号存在较大区别。同时将仿真数据放大,发现在放大 10^7 倍后,二者便可进行对比,放大后对比如图5所示。由图5可知二者时域信号存在一定的差距,但整体变化趋势基本一致,验证了该有限元模型的准确性与可行性。

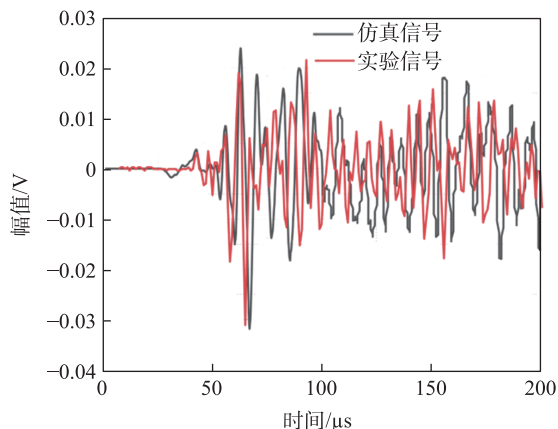


图5 声发射仿真时域信号与实验信号对比图

Fig. 5 Comparison diagram of acoustic emission simulation time domain signal and experimental signal

2 不同顶宽截面声发射波传播特性分析

2.1 不同顶宽尖轨段的声发射源特征分析

由于拥有特殊结构的道岔尖轨,其截面结构是一个连续变截面结构,各个截面的几何形位互不相同,受几何形位差异的影响,产生的AE信号也会有一定的差距。本节内容便以不同截面为研究对象,通过有限元模型展开讨论分析。如图2所示,12号道岔尖轨由机加工段、尖轨全断面、过渡段以及普通钢轨组成。通过大量研究,最终挑选了4个具有代表性的特征断面,特征断面信息及距离尖轨尖端的距离等信息如表2所示。

通过对不同特征断面进行声发射激励,并获取仿真数据,进而对其仿真结果进行分析。仿真模型

具体的测点与激励分布如图6所示。

表2 尖轨特征断面参数
Tab.2 Characteristic section parameters
of switch sharp rail

特征断面	距离尖端距离/m
尖端	0
顶宽 20 mm	1.176
顶宽 35 mm	2.408
AT 钢轨	5.365
基本轨	14.995

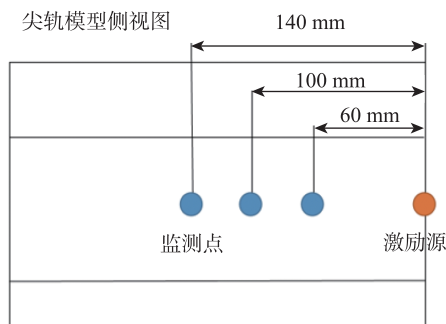


图6 仿真模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of simulation model

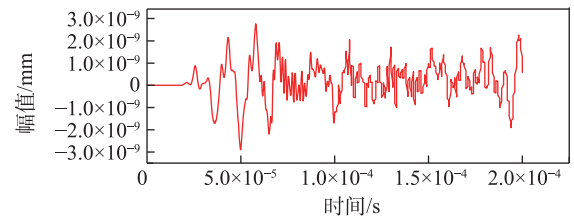
针对距离声源 100 mm 监测点,不同特征断面的时域响应数据进行分析,结果如图7所示。由图7能够发现,如所预测的结果一致,针对不同特征断面,其断铅AE信号于时域方面的幅值也有所不同,但在相同的断铅信号激励下,不同特征断面的模态在趋势上是大体一致的。

为进一步分析不同特征断面的AE信号特征,转换得到如图8所示的4个特征断面的频域响应图,通过详细分析可知,在相同的断铅信号激励下,4个特征断面的AE信号幅值主频均处于40~110 kHz,并且在110~220 kHz也都存在一定的响应情况,但随着特征断面的顶宽逐渐变宽,可以看出频域响应的幅值也在逐渐减小。

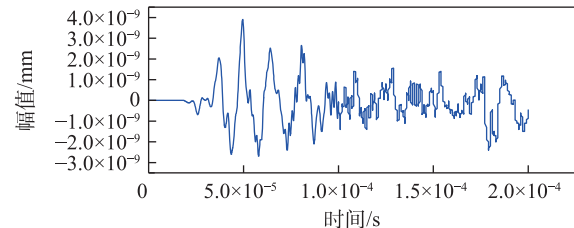
2.2 传导距离对声发射源特征的影响

为深入探究钢轨中传导距离对声发射源特性的影响,针对不同顶宽轨段的声发射仿真模型,分别提取距离声发射源60、100、140 mm处的声发射信号展开分析。对这些数据进行傅里叶变换,并运用复值小波变换剖析声发射信号,相应的声发射信号小波时频情况分别如图9、图10、图11、图12所示。

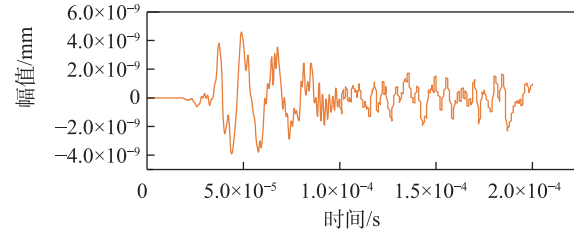
由图9、图10、图11和图12能够看出道岔尖轨里不同传导距离的声发射源具有如下特性:4种不



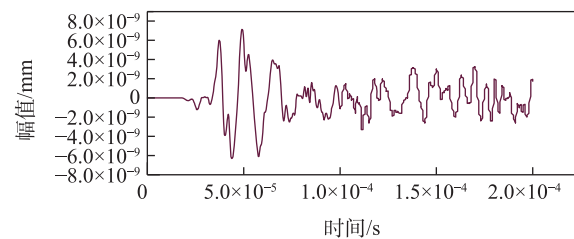
(a) 尖轨尖端声发射信号



(b) 顶宽20 mm声发射信号



(c) 顶宽35 mm声发射信号



(d) AT钢轨声发射信号

图7 不同特征断面声发射信号图

Fig. 7 Acoustic emission signal diagrams of different characteristic sections

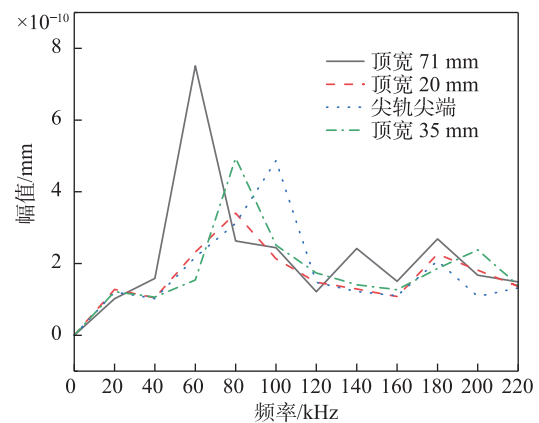


图8 不同特征断面等间距频率图

Fig. 8 Equidistant frequency diagrams of different characteristic sections

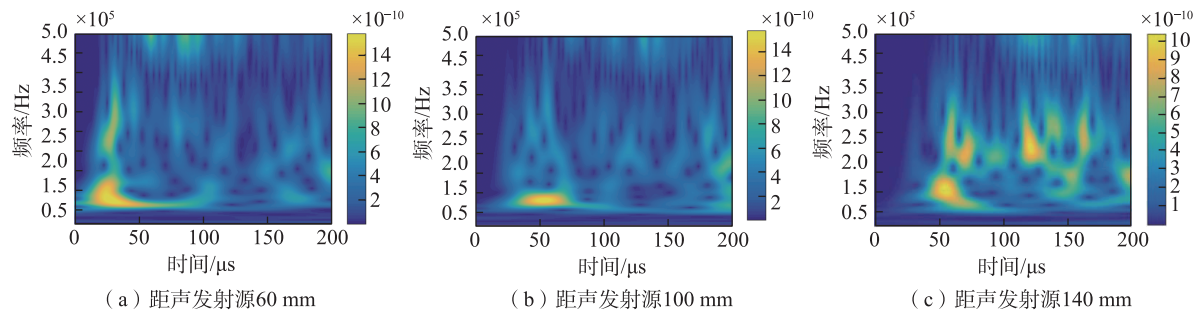


图9 尖轨尖端内声发射信号小波时频图

Fig. 9 Wavelet time-frequency map of acoustic emission signal for switch sharp rail tip

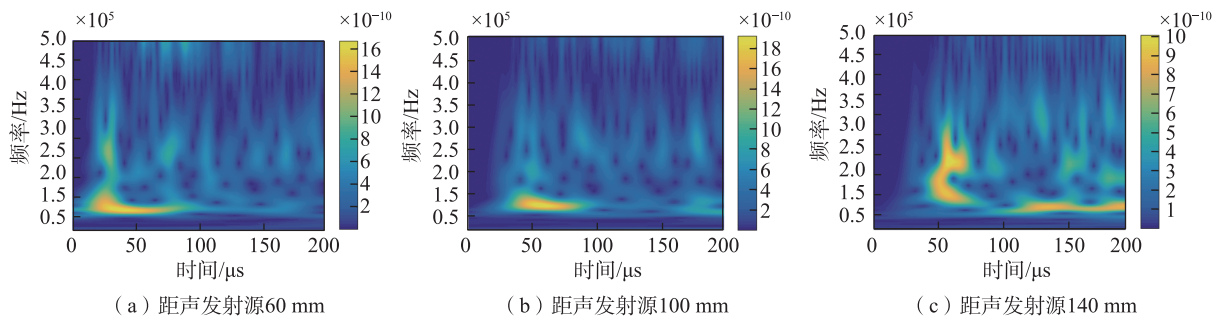


图10 顶宽20 mm轨段声发射信号小波时频图

Fig. 10 Wavelet time-frequency map of acoustic emission signal for top width of 20 mm

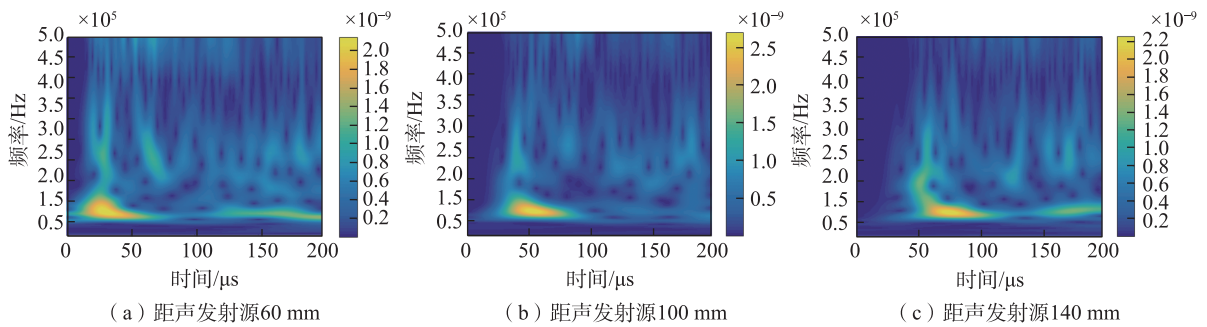


图11 顶宽35 mm轨段声发射信号小波时频图

Fig. 11 Wavelet time-frequency map of acoustic emission signal for top width of 35 mm

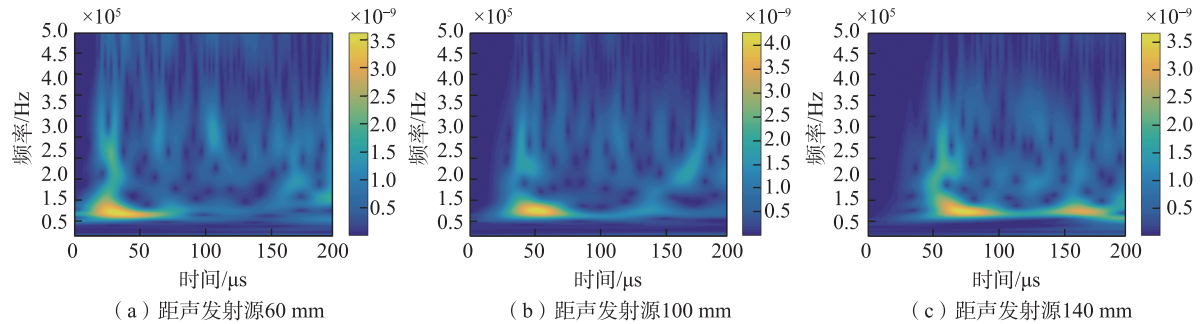


图12 顶宽71 mmAT轨段声发射信号小波时频图

Fig. 12 Wavelet time-frequency map of acoustic emission signal for top width of 71 mm AT

同顶宽的特征断面的声发射源其AE信号小波时频图在30~80 μs 内的100~200 kHz内均存在能量集中区域,由此可以判断不同顶宽的特征断面有相同的声发射模态特征,且能量大小随着顶宽的增大而不断减小。通过相对于单独相同特征断面不同声源的时频图可以看出,其模态特征随着传导距离的增长逐渐分散,当距离140 mm时时频图AE信号能量相对于60、100 mm最为分散。以尖轨尖端的AT轨AE信号小波时频图为例,60 mm声源测点能量主要集中于0~50 kHz,100 mm声源测点能量主要集中于50~100 kHz,而到了距声源140 mm处而在140 mm处能力分布比较散,出现了不同的能量集中区域,主要为50~100 μs 的50~100 kHz与150~180 μs 的50~75 kHz,其中第一部分与60 mm和100 mm测量点处还类似,但能量强度有所降低;而在第二个能量区域内60 mm和100 mm几乎不存在能量集中现象。此现象说明不同特征断面对AE信号小波模态分布影响不大,而不同传导距离会存在不同的能量特征分布,可将此应用于尖轨损伤的特征分析工作中。

3 伤损尖轨声发射波特性分析与验证

3.1 尖轨伤损特征断面模型建立

图13为本文所采用的道岔尖轨模型主体。若选取一长段模型进行仿真,网格划分复杂,且计算效率很低,本文为提升计算效率,分别选取4种不同特征断面的250 mm长的仿真模型段用于声发射仿真。为避免截取钢轨模型末端反射对结果产生影响,在末端采取吸收单元的方法,使得钢轨模型末端单元不受Z轴正方向的反射干扰,以此达到有限

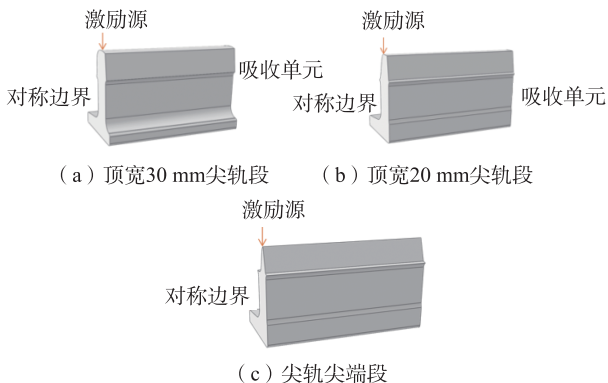


图13 仿真模型图

Fig. 13 Simulation model diagram

元仿真的最佳状态。

为进一步研究尖轨伤损情况下的声发射信号特征,选用12号道岔尖轨的尖端段模型,通过将长宽高分别为5、1、10 mm的长方体形态嵌入模型的不同位置处:轨头、轨腰以及轨底部位。具体模型细节如图14所示。

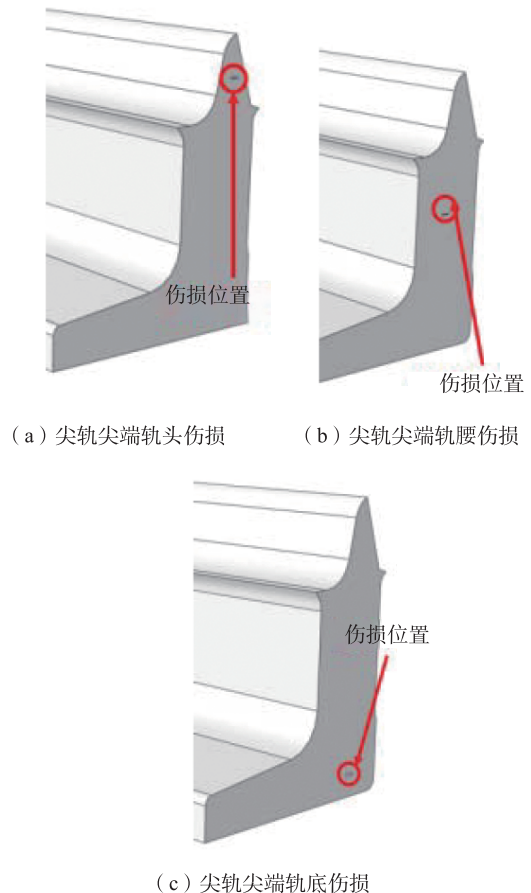


图14 仿真模型伤损位置示意图

Fig. 14 Sketch map of damage location of simulation model

3.2 不同特征断面的声发射信号特性分析

本节以及后文所涉及的仿真模型,激励源均采用现场实测的列车经过12号道岔时单轮所产生的激励。通过计算得到相应的荷载,并将该荷载施加于各模型轨顶与车轮的接触点位置。有限元模型网格长度设定为0.16 mm,仿真时长为0.02 s。分析顶宽30 mm尖轨段、顶宽20 mm尖轨段及尖轨尖端3种不同特征断面上AE信号时域响应的特征性质,通过仿真得到最大幅值及发生时间,如表3所示,时域图如图15所示。由图15可得,声发射时域响应随着顶宽不同的尖轨段变化而变化。

表3 声发射时域响应特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of AE in time domain

位置	最大幅值/mm	最大幅值到达时间/ μ s	50 μ s处幅值/mm
顶宽 30 mm	2.40×10^{-7}	5.70×10^{-4}	1.80×10^{-7}
顶宽 20 mm	2.50×10^{-7}	4.00×10^{-4}	2.00×10^{-7}
尖轨尖端	3.10×10^{-7}	6.25×10^{-4}	1.00×10^{-7}

分析表3与图15能够了解到,在30 mm的顶宽特征断面上,AE信号时域响应大体处于 $[-2 \times 10^{-7}, 3 \times 10^{-7}]$ mm,其中 2.4×10^{-7} mm为最大幅值。对于顶宽是20 mm的特征断面,声发射响应基本在 $[-2 \times 10^{-7}, 3 \times 10^{-7}]$ mm, 2.5×10^{-7} mm为最大幅值。而在尖轨尖端的特征断面上,声发射响应大致在 $[-2.5 \times 10^{-7}, 2.5 \times 10^{-7}]$ mm, 3.1×10^{-7} mm为最大幅值。通过对比可知,在列车荷载的激励下尖轨的声发射时域响应的最大幅值随着尖轨顶宽的减小而逐渐增大,其中尖轨尖端处的声发射时域响应最大。

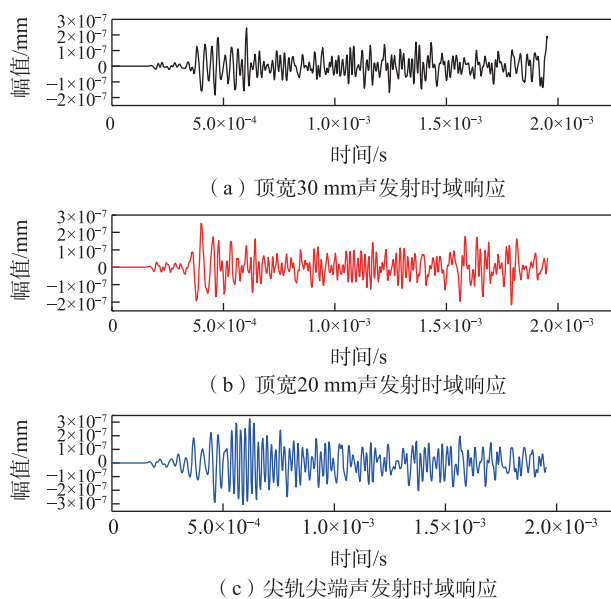


图15 不同顶宽的特征断面的声发射时域响应
Fig. 15 Acoustic emission time domain response for different top width

为深入地探究不同特征断面上声发射信号在等间距频域响应方面的特征,对相关数据进行了对比分析,结果如图16所示。结合图15对比结果可知,在列车单轮激励的情况下,3个特征断面的轨段所产生的声发射信号主频均处于25~150 kHz。不过,随着特征断面从顶宽30 mm向尖端发生改变,主频的位置也在持续变动,其特征参数可查看表4。

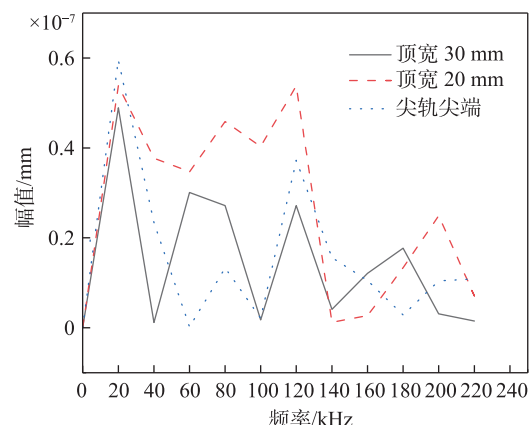


图16 不同顶宽的特征断面的声发射等间距频域响应
Fig. 16 Acoustic emission equidistant frequency domain response of characteristic sections with different top widths

表4 不同顶宽特征断面的声发射频域响应特征参数
Tab.4 Characteristic parameters of AE in frequency domain at different top width

位置	主频范围/kHz	最大幅值/mm	200 kHz处幅值/mm
顶宽 30mm	25~150	1.76×10^{-8}	2.50×10^{-9}
顶宽 20mm	25~150	1.82×10^{-8}	2.55×10^{-9}
尖轨尖端	25~150	4.90×10^{-8}	2.52×10^{-9}

通过对表4与图16分析可得,0~40 kHz区间范围内不同顶宽的尖轨声发射频域响应变化几乎一致。而就顶宽30 mm的尖轨分析,在40~140 kHz这个区间范围内声发射频域响应几乎是均匀分布的,在180 kHz前后也存在同样响应情况。顶宽20 mm的尖轨断面而言,其主频同样处于40~140 kHz均匀分布,但其在140 kHz处存在大幅度的变化。而在尖轨尖端的特征断面上,40 kHz处有着明显的增强表现,主频主要集中在40~100 kHz处,在180 kHz处的频域响应相对于顶宽20、30 mm的尖轨断面都有所减弱。

3.3 不同位置伤损响应与尖轨尖端无损响应分析

轨头、轨腰以及轨底部位的伤损加入后,通过仿真得到如图17的尖轨尖端的声发射时域响应图,可以看出三者声发射时域信号最大峰值大致相同,均接近 3.00×10^{-7} mm,具体数据如表5所示。

分析图17,表5及表3数据可知,尖轨尖端处无损时最大幅值为 3.10×10^{-7} mm,添加伤损后在轨头与轨底的最大幅值变为 3.00×10^{-7} mm,而仅仅轨腰处的声发射时域响应最大幅值降至 2.56×10^{-7} mm,虽然变化不是很大,但其发生的时间均出现了延迟

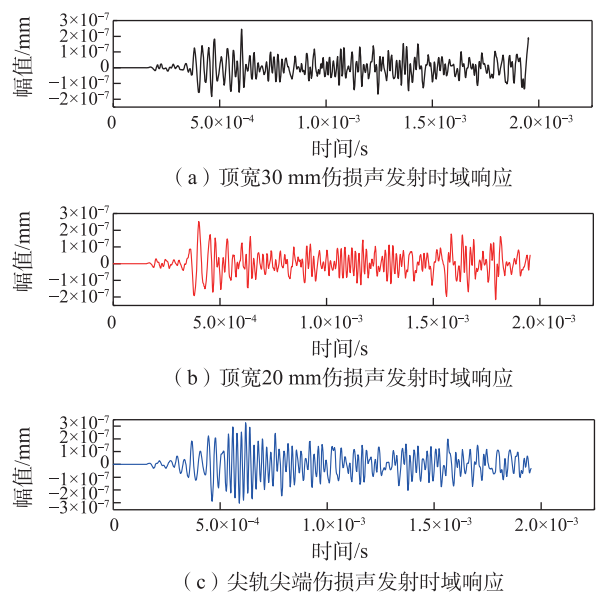


图 17 尖轨尖端断面不同伤损位置的声发射时域响应
Fig. 17 Time domain of AE at different damage locations on the tip section

表 5 不同伤损位置的声发射时域响应特征参数 Tab.5 Characteristic parameters of AE in time domain at different damage locations			
位置	最大幅值/mm	最大幅值到达时间/ μ s	50 μ s 处响应幅值/mm
轨头	3.00×10^{-7}	1.70×10^{-3}	1.97×10^{-7}
轨腰	2.56×10^{-7}	1.05×10^{-3}	1.89×10^{-7}
轨底	3.00×10^{-7}	1.38×10^{-3}	0.50×10^{-7}

现象,三者对比轨顶最大幅值出现时延迟最多所受影响最大。对于特殊时刻 50 μ s 处的响应,三者相对无损而言轨底下降最多,伤损的嵌入,三者 在 50 μ s 到 100 μ s 处的波形相对于无损模型的波形均发生了较为明显的变化。

为深入分析长方体模型比作伤损嵌入尖轨尖端模型轨头、轨腰以及轨底这 3 个位置的影响,将其时域响应转变为声发射等间距频域响应,同时与无损声发射等间距频域响应进行对比分析。详情可参照图 18。

通过对比能够发现,在同实测荷载的激励下,轨头、轨腰以及轨底伤损的轨段所产生的声发射信号主频均分布在 20~140 kHz。由于尖轨尖端是最脆弱的部位,容易出现损伤甚至断裂,本研究对比分析了无损尖轨尖端与伤损尖轨尖端的声发射等间距频域响应。结果表明,伤损尖轨尖端各个频段相对于无损尖轨尖端的频域响应都存在不同程度

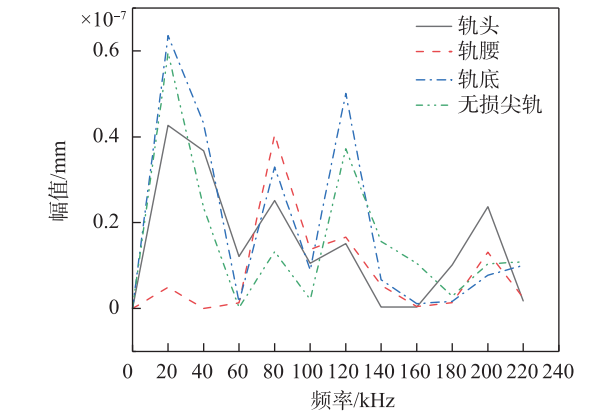


图 18 无损尖端与不同伤损位置的声发射等间距频域响应
Fig. 18 Acoustic emission equidistant frequency domain response of nondestructive tip and different damage positions

的增大,具体的特征参数可参照表 6。

表 6 不同伤损位置的声发射频域响应特征参数
Tab.6 Characteristic parameters of AE in frequency domain at different damage locations

位置	主频范围/Hz	最大幅值/mm	160~200 kHz 处最大幅值/mm
轨头	25~150	2.50×10^{-8}	0.89×10^{-8}
轨腰	25~150	3.20×10^{-8}	0.80×10^{-8}
轨底	25~150	2.26×10^{-8}	0.97×10^{-8}

在这些变化当中,等间距较高频段 200 kHz 处的声发射信号频域响应变化最为明显。其中,轨头出现伤损时,180~220 kHz 处的声发射频域发生十分明显的变化高出无损约 20%,由图 18 可知,按照影响程度从大到小依次排序为轨头>轨腰>轨底。并且,在 60~80 kHz 声发射频域峰值响应轨头、轨腰、轨底均出现高于无损时的变化,就影响程度而言,其强弱顺序为轨腰>轨底>轨头。在尖轨的仿真过程中,无损尖轨在 160~200 kHz 频段上的最大响应为 2.55×10^{-9} mm,而在轨腰处加入伤损的尖轨在该频段上的响应最小,其数值为 0.80×10^{-8} mm。也就是说,在仿真情境下,伤损轨在 160~200 kHz 频段上的响应要比无损轨大 3.14 倍。

3.4 实测伤损数据对比与分析验证

为对仿真结果加以验证,在某路局工务段的一组普速道岔处开展了实际测量工作。此次实测所运用的设备为 NI,该道岔的编号是 180。其道岔尖轨所处的里程为 K212+830(某联络线重点 K1+581),具体道岔尖轨信息与仿真时道岔尖轨一致。

通过对无损钢轨与伤损基本轨的声发射信号进行对比分析,本研究旨在探究钢轨伤损与声发射信号之间的内在关联。由于现场道岔尖轨在出现伤损后会被立即更换,未能获取相关声发射数据,本次测试以基本轨为研究对象,分别采集伤损与无损状态的声发射信号,对比其原始时域波形,并转换至频域作进一步分析。

图19展示了无损基本轨和伤损基本轨在等间距频段上有效电压RMS均值的对比情况。通过分析可知,货车经过荷载的作用下,二者所产生的AE信号在20~160 kHz整体趋势上大致相同,在20~40 kHz二者均出现了有效值电压RMS先逐渐增大至峰值后开始迅速减弱,在降至稳定值0.025 V上下后,伤损钢轨的有效值电压便高于无损钢轨,且在160 kHz处伤损基本轨开始逐渐增大出现异常峰值。无损轨在这个频段上的最大响应是0.021 V,而伤损基本轨的最大响应达到了0.082 V,160~200 kHz区间内二者均处于稳定状态且伤损基本轨的声发射频域响应比无损基本轨大了约3.9倍。由此可知,当钢轨出现伤损时其声发射信号会随之增大,并且在高频部分产生异常峰值。

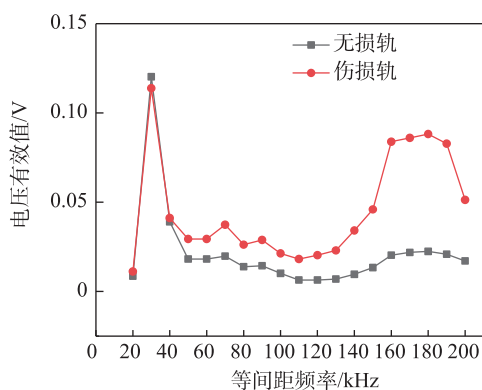


图19 无损与伤损基本轨等间距频段有效值电压图

Fig. 19 Effective value voltage diagram of frequency band with equal spacing for non destructive and damaged stock rails

通过对实测数据与仿真数据进行对比后发现,伤损模型的加入会导致各个频段的响应都出现不同程度的增大情况,且钢轨伤损时声发射信号在160~200 kHz会存在突然的峰值,与无损钢轨有着明显差异。不仅如此,在针对基本轨开展的声发射实测信号分析中,也呈现出了与之相同的规律。具体而言,在实测环节里,伤损基本轨在160~200 kHz

的响应要比无损基本轨大3.9倍;而在仿真过程中,伤损轨在160~200 kHz频段上的响应则比无损轨大3.14倍。基于上述情况可以得出这样的结论:当被检测的轨段所产生的声发射信号在160~200 kHz频段上的响应,出现超过同类型轨段3倍及以上的异常峰值时,便能够判定该轨段存在异常状况,此时就需要着重关注这一轨段钢轨的服役状态了。

4 结论

通过对复杂几何形状实施仿真以及对钢材料参数进行分析,运用三维有限元技术构建起了道岔尖轨末端钢轨裂纹发生模型,成功地对声发射问题予以模拟并完成了相应的验证工作。主要结论如下。

1) 通过断铅试验验证了仿真模型的可行性与准确性,针对4种不同顶宽的特征断面声发射信号的模态特征展开了对比分析。分析表明,随着特征断面的顶宽的增大,不同特征断面的轨段随顶宽的增加能量强度逐渐减弱但声发射模态特征大致一致,并且,随着传导距离的不断增加,通过声发射小波时频图,能量会朝着其他频段分散开来。

2) 对比分析仿真的伤损与无损模型下的声发射信号,发现声发射信号在160~200 kHz频段的异常响应,并将其与道岔尖轨实测无损与伤损数据进行对比分析,表明当在160~200 kHz中高频时出现3倍以上同类型轨段的异常峰值时可判断轨段存在异常,需关注钢轨的实际服务状态。

参考文献:

- [1] MATSUDA H, SATOH Y, KANEMATSU Y, et al. On-site investigation and analysis of flaking damage leading to rail break[J]. Wear, 2011, 271(1/2): 168-173.
- [2] 赵雪芹, 王文健, 钟雯, 等. 钢轨滚动疲劳裂纹与磨损耦合关系研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 84-87.
ZHAO X Q, WANG W J, ZHONG W, et al. Coupling relationship between rolling fatigue crack and wear of rail[J]. Journal of Railway, 2009, 31(2): 84-87.
- [3] 谢云叶, 周素霞, 谢基龙, 等. 表面裂纹连续扩展规律的仿真试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 31-36.
XIE Y Y, ZHOU S X, XIE J L, et al. Simulation experimental study on the law of continuous propagation of surface cracks[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 31-36.

- [4] 靳华尚. 基于声发射技术的列车钩尾框损伤检测研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- JIN H S. Research on damage detection of train hook tail frame based on acoustic emission technology[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [5] MURAV'EV V V, MURAV'EV M V, MURAV'EV T V. The possibilities of acoustic emission testing of rails during exploitation[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, 44(1): 33-40.
- [6] THAKKAR N A, STEEL J A, REUBEN R L. Rail-wheel interaction monitoring using acoustic emission: a laboratory study of normal rolling signals with natural rail defects[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(1): 256-266.
- [7] THAKKAR N A, STEEL J A, REUBEN R L. A laboratory study of rail-wheel interaction monitoring using acoustic emission: effect of rolling conditions with and without lateral rattling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2013, 227(2): 161-175.
- [8] BRUZELIUS K, MBA D. An initial investigation on the potential applicability of acoustic emission to rail track fault detection[J]. NDT and E International, 2004, 37(7): 507-516.
- [9] 章欣. 基于声发射技术的钢轨伤损检测与判别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- ZHANG X. Research on rail damage detection and discrimination based on acoustic emission technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [10] 周长义, 孙伟. 基于声发射检测的钢轨断裂实时监测及定位方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 232-238.
- ZHOU C Y, SUN W. Research on real-time monitoring and positioning method of rail fracture based on acoustic emission detection[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 232-238.
- [11] 杨明纬. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- YANG M W. Acoustic emission detection[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [12] 郭力, 霍可可. 断铅笔芯声发射实验信号研究[J]. 机电工程, 2018, 35(7): 663-667.
- GUO L, HUO K K. Study on acoustic emission experimental signal of broken pencil refill[J]. Mechatronics Engineering, 2018, 35(7): 663-667.
- [13] 司道林, 王猛, 王树国, 等. 重载铁路12号道岔尖轨转换特性分析[J]. 中国铁路, 2021(7): 36-40.
- SI D L, WANG M, WANG S G, et al. Analysis on conversion characteristics of No. 12 turnout sharp rail of heavy haul railway[J]. China Railway, 2021(7): 36-40.
- [14] 刘健. 基于声发射技术的道岔尖轨伤损检测研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
- LIU J. Research on damage detection of switch rail based on acoustic emission technology[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.



通信作者: 冯青松(1978—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为轨道结构服役性能监测与保障、轨道交通环境振动与噪声。E-mail: fqshdjtdx@aliyun.com。

(责任编辑: 吴海燕)