

钢轨扣件弹条填充阻尼结构的优化设计*

何宇¹ 曾飞² 王安斌¹ 毛鹏军³ 王俊¹

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海; 2. 中船重工第七二五研究所洛阳双瑞橡塑科技有限公司, 471023, 洛阳; 3. 河南科技大学机电工程学院, 471003, 洛阳//第一作者, 讲师)

摘要 采用 Solidworks 软件建立了 WJ-2 型弹条扣件三维有限元模型, 对弹条在自由状态和标准安装状态下的固有频率和振型进行了分析, 得知该弹条在服役状态下与轮轨波磨激励一致时易引发共振, 且其共振频率位于尾部支承位置, 与现场断裂位置一致。基于此, 在不影响 WJ-2 型弹条扣件配套设施的前提下, 对该弹条结构进行优化设计, 并分别对弹条内腔掏空后无填充阻尼材料、填充橡胶及填充铁素体球墨铸铁等 3 种工况进行仿真分析。结果表明, 弹条内腔填充灰口铸铁时, 其减振性能良好, 但力学性能不佳; 弹条内腔填充铁素体球墨铸铁时, 其力学性能良好, 但收效同样不明显。

关键词 轨道交通; 钢轨扣件; 弹条; 填充阻尼结构; 优化设计

中图分类号 U213.5⁺31

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.027

Optimization Design of Track Fastener's Elastic Rod Filled Damping Structure

HE Yu, ZENG Fei, WANG Anbin, MAO Pengjun, WANG Jun

Abstract Solidworks software is adopted to construct WJ-2 elastic rod 3D finite element model. Analysis of the intrinsic frequency and vibration type of the elastic rod in free state and standard installation state is carried out. It is found that the elastic rod can easily cause resonance when being in service and consistent with wheel-rail corrugation excitation, and its resonance frequency domain is at the tail supporting position, same as the fracture position on site. Based on this, under the premises of no impact on the auxiliary facilities of WJ-2 rod fastener, an optimization design of the elastic rod structure is carried out. Simulation analysis is conducted respectively on the three working conditions of rod filled no damping material after the inner cavity is emptied, filled with rubber, filled with ferrite ductile iron. Results show that when the elastic rod cavity is filled with ferosteel, the vibration reduction effect is good, while mechanical performance is under expectation.

When the rod cavity is filled with ferrite ductile iron, the mechanical performance is good while the convergence effect is not evident as well.

Key words rail transit; track fastener; elastic rod; filled damping structure; optimization design

First-author's address School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

钢轨扣件是轨道结构中至关重要的组成部分。它担负着固定钢轨, 防止钢轨产生横向和纵向偏移, 进而发生倾斜而导致恶性事故^[1]。

文献[2]基于非线性接触理论和车轮-轨道耦合动力学理论, 发现随着现场钢轨波磨数据比例的增大, 钢轨在原有低频位移的基础上附加了高频位移。文献[3]研究了钢轨扣件的竖向振动特性, 结果表明, 扣压件及垫层作用在钢轨上的力均含有预扣压力及轮轨力的成分。文献[4]从弹条材质角度探究了材料性能对于扣件性能参数的影响。文献[5]研究了轮轨振动对于扣件损伤的影响。近年来在轨道交通运营中发现, 一些轨道区域出现了轮轨周期性磨耗的现象, 轮轨间的高频振动造成某些区段弹条发生断裂伤损, 轮轨周期性磨耗导致轮轨间产生高频激励, 钢轨波磨频繁地出现。当高速铁路发生钢轨波磨或动车组车轮产生多边形磨耗时, 轮轨之间会产生高频振动, 对钢轨产生高频激励。当弹条的固有频率与轮轨激励频率相同或接近时, 弹条会出现共振现象。磨损严重时, 轮轨激励能量大, 导致弹条共振应力过大, 产生断裂损伤。文献[6]采用金相组织对弹条进行了分析。

本文选择 WJ-2 型弹条扣件为研究对象, 该弹条扣件由螺母、螺栓、平垫圈、弹条、轨距挡板等部件组成, 除了能紧固钢轨防止横向侧移外, 还能吸

* 国家自然科学基金项目(51875097)

收来自钢轨的冲击作用。WJ-2 型弹条扣件和众多的弹条扣件一样,具有扣压力大、弹性好和维系轨距能力强等特点^[7]。

本文建立了钢轨扣件弹条三维模型,并分析其力学状态及强度。在此基础上对其展开动力学分析,探究弹条的模态频率,并进行优化设计,以避免其在工作中可能出现的共振破坏。另外,对弹条失效的原因进行了分析。

1 钢轨扣件弹条有限元分析

1.1 弹条模型的建立

采用 Solidworks 软件建立 WJ-2 型扣件弹条三维有限元模型(见图 1),并对其进行分析。建模时对 WJ-2 型弹条扣件进行简化处理,将螺母、平垫圈和螺栓组成的结构简化为平垫圈,同时确保弹条和轨距挡板接触处的尺寸。

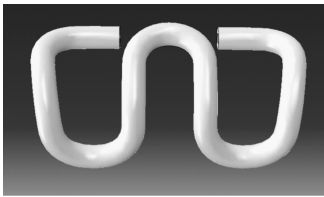


图 1 WJ-2 型弹条三维有限元模型

Fig. 1 3D finite element model of WJ-2 type elastic rod

钢轨扣件弹条选用的材料及其参数见表 1^[8]。平垫圈材料选用 Q235,作为起到防止弹条位移和缓振作用的轨距挡板材料选用 QT450^[8]。

表 1 弹条扣件材料参数

Tab. 1 Material parameters of track fastener				
名称	材料	泊松比	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa
弹条	60Si2CrVA	0.30	2.10×10^5	1 600
垫块	QT450-10	0.26	1.69×10^5	350
螺栓	Q235-A	0.28	2.10×10^5	235

1.2 弹条在自由状态下有限元分析

根据经验得知,弹条共振损伤的频率大多为 500 ~ 650 Hz,且轮轨激励作用传递至弹条上的振动频率大多在 1 200 Hz 以内。因此,本文研究 WJ-2 型弹条在 0 ~ 1 200 Hz 频率范围内的模态特征。弹条在自由状态下的模态特征可以揭示其在无边界约束条件下结构本身的模态特征。扣件弹条在自由状态下(固有频率为 0 ~ 1 200 Hz)的前两阶模态振型见图 2。其各阶振型描述见表 2。



图 2 WJ-2 型弹条在自由状态下的前两阶模态振型

Fig. 2 The first two order mode shapes of WJ-2 type elastic rod in free state

表 2 WJ-2 型弹条在自由状态下的各阶振型描述

Tab. 2 Description of each order mode shape of WJ-2 type elastic rod in free state	
振型阶数	振型描述
第 1 阶	弹条两侧肢对称振动
第 2 阶	扣压端与支承端反向振动,两侧扣压端反对称振动,振动节点为弹条中肢顶端
第 3 阶	两侧肢对称上下振动,弹条中肢与侧肢上下反对称振动,振动节点为弹条支承端
第 4 阶	扣压端对称上下振动,弹条中肢与扣压端反对称上下振动
第 5 阶	侧肢反对称向外翻转振动

由图 2 可见,WJ-2 型弹条第 1 阶模态振型的固有频率为 487.82 Hz,第 2 阶模态振型的固有频率为 572.06 Hz。

1.3 弹条在标准安装状态下有限元分析

弹条的安装状态为通过对螺栓施加扭矩实现其预紧的过程。分析弹条在其安装状态下的性能。沿竖向对平垫圈向下施加集中力来模拟弹条的预紧力,而螺栓的预紧力一般情况下为 25 kN 左右。

弹条的标准安装状态为通过与轨距挡板和中肢前端下颚接触,通过弹条中肢与左、右根部连接处的接触斑来判断其标准与否^[8]。弹条在安装状态下的应力云图如图 3 所示。由图 3 可见,其最大应力为 1 321.27 MPa,发生在弹条中肢与左、右根部连接处。弹条是不规则的空间立体条状结构,其

在安装时,其中肢与左、右肢根部连接处同时受弯矩和扭矩的作用。

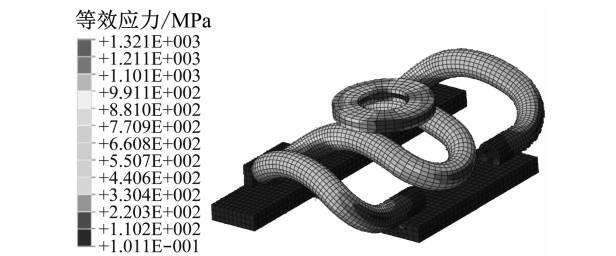


图3 WJ-2 型弹条等效应力云图

Fig.3 Nephogram of WJ-2 type elastic rod equivalent strain

WJ-2 型弹条在安装状况下,其与螺栓、绝缘块、轨枕垫板间都会有接触作用。因此,通过 ABAQUS 仿真软件对该模型模拟施加螺栓、绝缘块、轨枕垫板的约束条件,以更直接地反映弹条的实际受力情况。通过在螺栓上表面添加均布压力模拟扣压力,在弹条扣压端向下添加 25 kN 的载荷即为标准安装状态。图 4 为添加约束条件和扣压力的 WJ-2 型弹条模型^[9]。

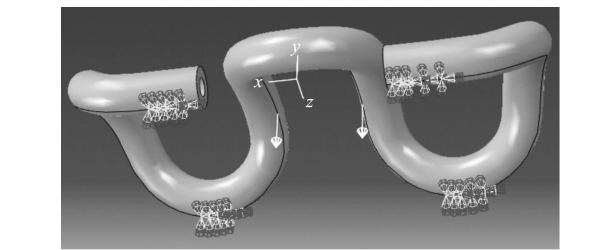


图4 WJ-2 型弹条约束分析图

Fig.4 Analysis diagram of WJ-2 type elastic rod constraints

WJ-2 型弹条在标准安装状态下的模态特征,可以揭示其在正常服役状况下的模态特征。该弹条在标准安装状态下(固有频率为 0 ~ 1 500 Hz)的模态振型见图 5,其各阶振型描述见表 3。图 5 中,WJ-2 型弹条第 1 阶模态振型的固有频率为 615.42 Hz,第 2 阶模态振型的固有频率为 1 469.50 Hz。由表 3 可见,与自由状态下的扣件弹条模态特征相比,其

表 3 WJ-2 型弹条在标准安装状态下的各阶振型描述
Tab.3 Description of each order mode shape of WJ-2 type elastic rod in standard installation state

振型	振型描述
第 1 阶	扣压端与支承端反向振动,振动节点为弹条中肢顶端
第 2 阶	两侧肢以扣压端与支承端为支点对称外翻振动,中肢向右偏移振动



图 5 WJ-2 型弹条在标准安装状态下的前两阶模态振型
Fig.5 The first two order mode shapes of WJ-2 type elastic rod in standard installation state

在标准安装状态下由于在扣压端、支承端及紧固位置与其他部件接触而增加了相应的约束,提高了弹条的各阶频率而改变了相应的模态振型。

轮轨高频共振的产生条件为:轮轨系统具有相同或相似的固有频率;多边形轮周轮对波长与钢轨波纹的波长相同或相似;轮对轮周周长与波纹波长之比为整数。当动车组速度达到 250 km/h 时,钢轨的高频激励为 440 ~ 580 Hz;当动车组速度达到 300 km/h 时,钢轨的高频激励为 530 ~ 700 Hz。如表 4 所示,动车组高速运行时,其受到波磨钢轨的激励,容易产生共振,引起扣件弹条发生疲劳断裂^[9]。

表 4 钢轨对动车组的激励数据
Tab.4 Excitation data of rail to EMU

动车组运行速度/ (km/h)	不同轮轨作用的波磨波长下的固有频率/Hz				
	120 mm	130 mm	140 mm	150 mm	160 mm
250	579	534	496	463	448
300	694	641	596	556	538

本文论述的弹条在标准安装状态下共振时的最大应力出现在尾部支撑位置,与现场断裂位置基本一致,见图 6。

2 WJ-2 型弹条结构优化设计

对 WJ-2 型弹条进行模态试验。根据其动态特性,参考仿真结果,对该弹条进行优化设计。为了

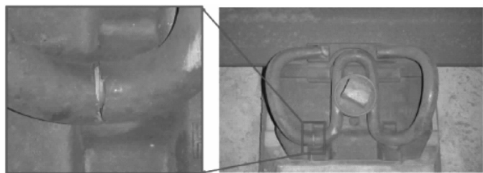


图6 WJ-2型弹条失效图

Fig. 6 Failure picture of WJ-2 type elastic rod

不影响 WJ-2 型弹条与其他设施进行配套,尽量对弹条内部进行优化。结合材料的减振、消振性能,设计新的 WJ-2 型弹条。本文主要研究了 WJ-2 型弹条失效的原因,最终寻求能够提高固有频率的低应力、高阻尼材料进行填充,以提高弹条的整体性能。本文的优化方案如下。

2.1 方案1(弹条内腔掏空无填充阻尼材料)

方案1对扣件弹条进行掏空处理,对现有钢轨扣件进行优化建模。所述弹条的变截面系数为1~3,即弹条的最大截面面积与最小截面面积之比为1:1~3:1^[10]。

2.2 方案2(弹条内腔掏空后填充橡胶)

方案2中,采用减振橡胶作为弹条内腔的填充物,达到所预想的弹条模型(见图7)。减振橡胶在振动、冲击传递和缓冲振动中有很强的限制作用。但在实际仿真中,填充了减振橡胶弹条的位移和方案1中弹条位移差别并不大,究其原因为硫化体会使减振橡胶的刚度、耐疲劳性及阻尼系数等发生不同程度的变化;使用传统硫化体,并适当提高其交联程度,对减振和耐动态疲劳性有利,但耐热性不够。在硫化胶的网络结构中,交联键中的硫原子及游离硫数量减小,交联越牢固,弹性模量越大,阻尼系数越小。导致在仿真过程中,橡胶的变形剧烈。因此,对于 WJ-2 型弹条而言,橡胶作为减振的填充物不太合适。

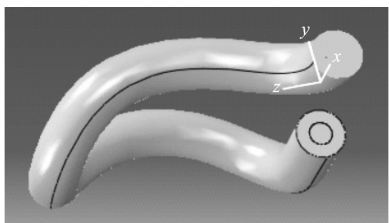


图7 弹条内腔填充橡胶

Fig. 7 Elastic rod cavity filled with rubber

2.3 方案3(弹条内腔掏空后填充合金)

2.3.1 弹条内腔填充灰口铸铁

选择填充减振性能较好的灰口铸铁作为填充

对象,在安装状态下对其进行模态分析,并与方案1中的弹条进行对比。灰口铸铁的体积质量为7 000 kg/m³,弹性模量为130 GPa,泊松比为0.26。图8为内腔填充灰口铸铁的弹条在安装状态下的第1阶和第2阶振型。由图8可见,相较方案1,内腔填充灰口铸铁弹条的相对位移增大了约1.3 mm,其固有频率提高了约1.54 Hz。由此可见,灰口铸铁由于其含碳量高使其耐磨性和消振性达到最优,但其抗拉强度相对较小,因此该材料不合适。



图8 内腔填充灰口铸铁的弹条在安装状态下的模态振型

Fig. 8 Mode shape of elastic rod cavity filled with ferrosteel in installation state

2.3.2 弹条内腔填充铁素体球墨铸铁

铁素体球墨铸铁具有一定的强度、良好的冲击韧性、更大的抗拉强度、更佳的延伸率及抗低温冲击等综合机械性能,常用来制备受力较大且同时承受振动和冲击的部件^[11]。目前,许多轨道的配套设施都采用铁素体球墨铸铁材料,如轨道中起到减振与固定作用的铁垫板、客运专线的钢轨垫板等^[12]。铁素体球墨铸铁的体积质量为7 010 kg/m³,弹性模量为161 GPa,泊松比为0.274。

对模型进行自由网格划分,网格类型为C3D8R,即八结点线性六面体单元,并采用减缩积分和沙漏控制。仿真结果如图9所示。由图9可见,内腔填充铁素体球墨铸铁弹条的固有频率比方案1提高了约3.6 Hz;该弹条在固有频率为617.52 Hz时,相较内腔填充灰口铸铁的弹条其位移不变,相较方案1中的弹条其最大位移增大了1.3 mm。因此,两种材料作为填充物的优化效果并不显著。



图9 内腔填充铁素体球墨铸铁的弹条在安装状态下的模态振型

Fig. 9 Mode shape of elastic rod cavity filled with ferrite ductile iron in installation state

根据 Hooke 定律,扣压力为弹条刚度与其弹程的乘积,而其刚度的大小由材料、弹臂的等效长度及截面积决定。弹条为等截面结构,其沿弹臂应力呈不均匀分布,且在支承位置的应力较大,这在弹条的静力仿真应力图中可以明显看到。除此以外,弹条结构本身的模态频率亦处在“车辆-轨道”激励频率范围内。

3 结语

1) 对 WJ-2 型弹条内部进行了优化,提出了弹条内掏空后无填充阻尼材料、填充橡胶、填充合金等 3 种比较方案,并对其减振性能及力学性能进行分析。

2) WJ-2 型弹条在服役状态下与轮轨波磨激励一致时而易引发共振,且其共振频率位于尾部支承位置,与现场断裂位置一致。

3) 弹条内部填充减振合金时,灰口铸铁本身减振性能良好,但力学性能不佳;弹条内部填充球素体球墨铸铁时,其力学性能良好,但收效同样不明显。

参考文献

[1] 刘松林. ω 弹条三维建模方法与力学性能分析的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2003.

LIU Songlin. Study on 3D modeling and analysis of mechanical performance for ω type spring-bar clip[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.

[2] 尚红霞. 钢轨波磨对扣件弹条受力分析[J]. 机械, 2014(8):11.

SHANG Hongxia. Analysis of rail corrugations on rail fastening clip force[J]. Machinery, 2014(8):11.

[3] 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(4):146.

WANG Kaiyun, CAI Chengbiao, ZHU Shengyang. Vertical dynamic model and vibration characteristic of rail fastening system[J]. Engineering Mechanics, 2013(4):146.

[4] 杨吉忠,潘自立,田春香. 弹条材质对扣件性能参数的影响分析[J]. 高速铁路技术, 2012(4):15.

YANG Jizhong, PAN Zili, TIAN Chunxiang. Analysis of material effect on performance parameters of fastening[J]. High-speed Railway Technology, 2012(4):15.

[5] 肖俊恒,闫子权,涂英辉,等. 轮轨振动对高铁扣件损伤的影响分析[J]. 中国铁路, 2017(11):10.

XIAO Junheng, YAN Ziquan, TU Yinghui, et al. On impact of wheel-rail vibration on HSR fastener damage[J]. China Railway, 2017(11):10.

[6] 李天夫,屈伸,董晨,等. 轨道扣件弹条断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2019(增刊1):174.

LI Tianfu, QU Shen, DONG Chen, et al. Failure analysis of breaking of a clip of the rail fastening[J]. Heat Treatment of Metals, 2019(S1):174.

[7] 杨程亮. DT-III 型扣件弹条断裂原因分析[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2019.

YANG Chengliang. Analysis of fracture reasons of elastic strip of DT-III fastener[D]. Beijing: Chinese Academy of Railway Sciences, 2019.

[8] 周素霞,郭子豪,周大军,等. 基于 Isight 集成平台的轨道扣件弹条优化设计[J]. 中国科技论文, 2019(2):145.

ZHOU Suxia, GUO Zihao, ZHOU Dajun, et al. Optimization design of the rail fastening clip based on the Isight integration platform[J]. China Sciencepaper, 2019(2):145.

[9] 费玉坤,陈永兴. 基于模态分析的弹条 I 型扣件断裂分析[J]. 中国高科技, 2018(7):77.

FEI Yukun, CHEN Yongxing. Fracture analysis of elastic-slip type I fastener based on modal analysis[J]. China High-Tech, 2018(7):77.

[10] 崔树坤,肖俊恒,闫子权,等. 高速铁路用 WJ-8 型扣件弹条模态特征试验研究[J]. 铁道建筑, 2019(4):131.

CUI Shukun, XIAO Junheng, YAN Ziquan, et al. Experimental study on modal characteristics of WJ-8 fastener elastic bars for high speed railway[J]. Railway Engineering, 2019(4):131.

(收稿日期:2020-07-13)