

客货共线铁路新型扣件研发与应用

刘雪峰¹, 孙鸿斌², 张鲁顺¹, 马佳骏¹

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 中国铁路昆明局集团有限公司, 昆明 650011)

摘要:【目的】客货共线铁路是一种兼运旅客和货物的铁路形式,其轨道结构需同时满足客货运需求。经现场调研,传统的客货共线铁路扣件存在钢轨空吊、挡肩离缝、螺栓弹条折断、金属件锈蚀等病害,无法满足货运铁路对轨道强度和客运铁路对乘坐舒适性的要求,并存在一定的安全隐患,因此需针对性研发新型扣件系统。【方法】结合既有客货共线铁路对扣件性能的要求及接口条件,新型扣件采用弹性分开式直列式结构,设置双向限位挡肩。首先建立动静力学有限元模型并进行理论分析;然后进行组装疲劳、组装静刚度、绝缘电阻等扣件性能检验,并进行钢套管后锚固抗拔力检验;最后选取客货共线铁路隧道内无砟轨道地段进行新型扣件铺设及测试。【结果】分析结果表明,扣件主要零部件及支承块挡肩强度、钢轨垂横向位移及各项动力学参数均满足要求;各项厂内试验结果均达到预期效果并有合理的安全储备,套管锚固后0.5 h抗拔力可达60 kN,满足当日列车荷载要求,2 h后可达100 kN,满足远期列车荷载要求;试验段范围内TQI由13.05降至11.10,钢轨横向位移由1.2 mm降至0.5 mm。【结论】测试结果表明,新型扣件铺设地段轨道几何状态及动力性能均有明显提升,具有良好的推广应用价值。

关键词:客货共线铁路;既有线改造;无砟轨道;扣件;双向限位;套管锚固

中图分类号:U213.5; U239.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202409270008

Development and Application of New Fastening System for Mixed Passenger and Freight Railways

LIU Xuefeng¹, SUN Hongbin², ZHANG Lushun¹, MA Jiajun¹

(1. China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China;

2. China Railway Kunming Group Co., Ltd., Kunming 650011, China)

Abstract: [Objective] Mixed passenger and freight railways carry both passengers and freight, and their track structures must simultaneously meet the requirements of both passenger and freight transportation. Field investigations show that conventional fastenings on mixed passenger and freight railways suffer from defects such as rail suspension, shoulder gaps, fracture of bolts and elastic clips, and corrosion of metal components. These deficiencies fail to meet the requirements of freight railways for track strength and passenger railways for ride comfort and also pose certain safety hazards. Therefore, it is necessary to develop a targeted new fastening system. [Methods] Based on the performance requirements and interface conditions of existing mixed passenger and freight railways, the new fastening system adopted an elastically separated in-line structure with bidirectional limiting shoulders. First, static and dynamic finite element models were established for theoretical analysis. Then, fastening performance tests, including assembly fatigue, assembly static stiffness, and insulation resistance, were carried out, and pull-out resistance tests of post-anchored steel sleeves were also conducted. Finally, a ballastless track section inside a tunnel on a mixed passenger and freight railway was selected for installation and testing of the new fastening system. [Results] The theoretical results showed that the strength of the main fastening

components and the support-block shoulders, as well as rail vertical and lateral displacements and various dynamic parameters, all met the requirements. All factory test results achieved the

收稿日期:2024-09-27; 修回日期:2024-12-01; 网络首发日期:2025-04-30

基金项目:中国铁路昆明局集团有限公司科技计划课题(K24G38)

作者简介:刘雪峰(1990—),男,高级工程师,2015年毕业于北京交通大学道路与铁道工程专业,工学硕士,主要从事铁路轨道设计研究工作,E-mail:1401541796@qq.com。

expected performance with reasonable safety margins. The pull-out resistance of the anchored sleeve reached 60 kN after 0.5 hours, meeting the train load requirement on the day of construction, and reached 100 kN after 2 hours, meeting the long-term train load requirement. In the test section, TQI decreased from 13.05 to 11.10, and the rail lateral displacement decreased from 1.2 mm to 0.5 mm.

[**Conclusion**] The test results show that both the track geometric condition and dynamic performance are significantly improved in the section installed with the new fastening system, indicating good prospects for application and promotion.

Key words: mixed passenger-freight railway; existing line reconstruction; ballastless track; fastening system; bidirectional limiting; sleeve anchorage

引言

轨道扣件是具有弹性扣压件的紧固装置,连接钢轨与轨下基础^[1],与铁路设计速度、轴重、无砟轨道接口相协调。客货共线铁路兼顾客运与货运的运输任务,是我国早期铁路主要运输模式^[2-3],货运列车轴重大,需要轨道结构具有更高的强度;客运列车速度快,需要轨道结构具有更好的平稳性。扣件系统上承钢轨,下连轨枕,均为刚性结构,扣件是轨道系统中提供弹性的主要元件,也是薄弱环节之一。

经现场调研,既有客货共线铁路扣件为在 TF-Y 型扣件基础上改造而成的扣件结构,铺设至今已有 20 余年,随服役年限增加逐渐暴露出多种问题。

(1)既有扣件结构型式复杂,主体受力结构由承轨铁垫板和左右限位铁座组合而成,对结构匹配度要求高,接触面磨损或锈蚀后容易出现离缝,见图 1,导致轮轨横向力无法传递至支承块挡肩,全部转化为对螺栓的剪力,既有螺栓采用 $\phi 24$ mm 的碳素钢,螺栓直径小、材料强度低,频繁出现被剪断的现象,见图 2。



图 1 扣件离缝

Fig. 1 Fastening system gap



图 2 螺栓剪断

Fig. 2 Bolt cutting

(2)既有扣件调高能力有限,而铺设地段地下水资源丰富,隧道结构普遍出现沉降,导致大多数扣件存在调高超限或钢轨空吊问题,见图 3,影响扣件正常工作状态,出现弹条折断等病害,见图 4。

(3)常年受列车荷载作用,轨下弹性垫板已大面积积压溃,经现场抽检,垫板静刚度基本为 150 ~ 160 kN/mm,无法正常提供弹性。



图 3 钢轨空吊

Fig. 3 Rail suspension



图 4 弹条折断

Fig. 4 Elastic clip fracture

(4)隧道内无砟轨道扣件常年处于潮湿工作环境,随服役年限增加,金属件锈蚀严重,甚至诱发钢轨锈蚀。

(5)预埋尼龙套管出现老化甚至粉化情况,螺旋道钉无法旋出,或取出后对套管造成不可逆损伤,无法安装复位。

调研结果表明,既有扣件存在大量失效的情况,扣件失效破坏了轨下支承的连续性,使轮轨作用增强,同时将影响前后正常轨道结构的工作状态^[4-6],形成较长范围的线路不平顺甚至引发钢轨波磨,影响列车运行的平稳性^[7-8]。既有扣件因自身缺陷已停产,无法直接采购更换,若改造道床结构,难度及造价较高^[9-10],因此需针对现场病害问题研发新型客货共线铁路扣件系统。

针对客货共线铁路扣件的选型方案及主要影响因素,国内外目前已经有大量的研究成果。扣件下部支承块设置挡肩结构,可有效提高抗横向力水平,保证曲线地段轨道系统的承载能力,同时也可以提高调高状态下扣件的稳定性^[11-12]。轨下垫板是扣件系统中主要的易损部件,其型式尺寸对垫板的磨损速率有决定性的影响,而垫板硬度和杨氏模量的合理选取对控制垫板的使用寿命同样有关键作用^[13]。扣件组装垂向刚度的合理匹配可以显著减少车辆振动,提高列车运行稳定性,同时可以有效减少钢轨磨耗^[14-15],而预压荷载、螺栓扭矩等参数同样对扣件系统组装静刚度有显著影响^[16]。板下垫板的型式和材质决定了垫板的

摩擦系数,从而影响扣件系统抗横向力的能力^[17]。因本扣件铺设地段以货车为主,大轴重会引起弹条疲劳寿命和通过总重降低,应根据列车轴重确定合理的弹条型式尺寸^[18]。扣件弹条、螺栓、螺母、垫圈等金属件采用渗锌防腐工艺,可显著改善金属表面耐腐蚀性,同时提高其耐磨损性和耐冲击性^[19-20]。

1 客货共线铁路新型扣件研发

扣件系统应同时满足客运和货运铁路对轨道系统的需求,解决现场各种病害问题。

1.1 研发原则

(1)扣件系统强度应明显提升,有效抵抗列车通过时的垂、横、纵向荷载。

(2)具有适宜的支承刚度,客运列车通过平稳舒适性得到明显改善。

(3)预留足够的调整能力,避免出现空吊或超垫情况。

(4)结构尽量简单,便于养护维修,充分考虑现场接口要求。

(5)具有足够的耐久性,保证扣件在潮湿环境中具有稳定的性能。

1.2 结构设计

扣件采用弹性分开式结构,有效降低扣件组装刚度和垫板压应力,并减小钢轨倾翻,提升扣件调高能力;采用有螺栓扣件,可通过螺栓复拧来维持扣压力,可以在轨下增设垫板进行调高,便于养护维修;采用有挡肩结构,利用支承结构承受横向作用力,在满足大轴重货车通行的同时为降低组装刚度提供保障^[1]。新型扣件系统三维模型见图5。

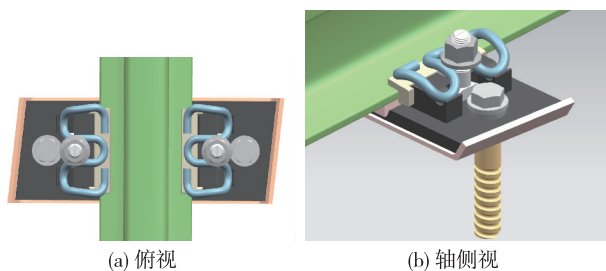


图5 扣件系统三维模型

Fig.5 Three-dimensional model of fastening system

(1)扣件平面呈“平行四边形”,与支承块挡肩匹配,实现双向限位,小半径曲线地段轮轨横向荷载通过铁垫板传至支承块挡肩承担;大坡道或列车启停时楔形结构抵抗纵向荷载,确保扣件在平面范围内的稳定性。采用 $\phi 30$ mm 锚固螺栓,强度等级提升至8.8级,即使挡肩破损仍可有效抵抗横向作用力。

(2)扣件采用“上软下硬”设计理念,铁垫板下部采用橡塑材质,耦合铁垫板与支承块承轨槽;上部采用橡胶材质,为钢轨提供弹性,结合规范要求和既有研究成果^[21],扣件节点垂向静刚度取40~50 kN/mm。

(3)采用轨下和板下配合调高的方案,调高量可达30 mm;采用绝缘轨距块和耦合垫板配合调距的方案,调距量可达 ± 12 mm。

(4)预埋件采用由尼龙套管和钢套管预装的组合套管结构,套管内部设置锁紧装置,尼龙套管损坏时可采用专用工具将其旋出更换。

(5)扣件金属件采用渗锌防腐工艺,使扣件在潮湿工作环境中保持稳定的性能。

2 客货共线铁路新型扣件理论分析

分别建立扣件实体和隧道-轨道系统有限元模型,分析静、动态下的工作性能。

2.1 静力计算分析

考虑标准和最大调高量下两种工作状态,分析钢轨位移及主要零部件强度,荷载经计算确定,相关参数均按最不利情况选取^[22]。扣件各零部件材料力学性能指标见表1。

表1 主要零部件材料力学性能指标

Tab.1 Mechanical performance indicators of main component materials

零部件	材质	弹性模量/MPa	泊松比
耦合垫板	橡塑	3.00×10^3	0.35
铁垫板	QT450-10	1.55×10^5	0.25
轨下垫板	橡胶	7.84	0.47
弹条	60Si2Cr	2.10×10^5	0.30
锚固螺栓	8.8级	2.06×10^5	0.29
轨距块	玻纤增强聚酰胺66	3.50×10^3	0.34
承轨台	C60混凝土	3.60×10^4	0.20

扣件实体有限元模型见图6。

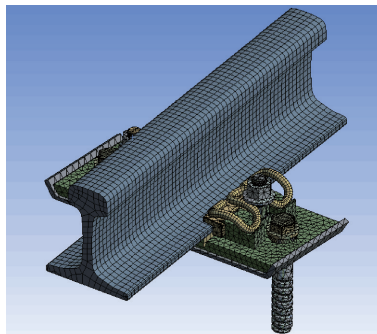


图6 扣件实体有限元模型

Fig.6 Solid finite element model of fastening system

根据我国轨道强度计算方法^[23],考虑动力效应的垂向动压应力 R_d 按式(1)计算。

$$R_d = R_s(1 + \alpha + \beta) \quad (1)$$

式中, R_s 为由静轮载计算得到的压力; α 为速度系数, 电力机车为 0.45V/100, 其中 V 为列车最高运行速度, 取 160 km/h; β 为偏载系数, 由车辆重心高、不平衡超高、钢轨中心线间距算得。

算得垂向动压力为 95 kN, 根据垂向荷载、导向力、不平衡超高等^[1]算得横向动压力为 57 kN。

标准状态下钢轨垂、横向位移分别为 1.1 mm 和 0.8 mm, 最大调高状态下约为 1.3 mm 和 1.0 mm, 满足垂、横向位移客运列车不超过 2.0 mm, 货运列车不超过 2.5 mm 的要求, 见图 7。

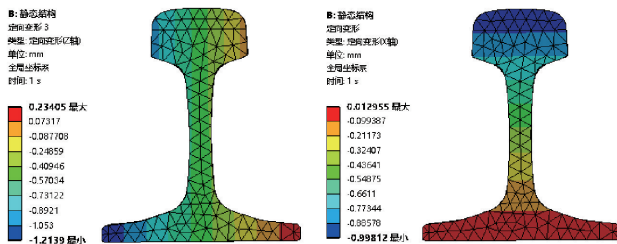


图 7 最大调高状态钢轨垂、横向位移云图

Fig. 7 Vertical and lateral rail displacement contour maps at maximum height adjustment

铁垫板主体结构受压, 应力均布于板体未出现明显集中, 最大应力为横向力作用方向铁座与承轨面交界处, Mises 应力最大值约为 285.3 MPa, 见图 8。

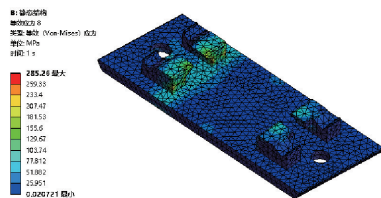


图 8 铁垫板应力云图

Fig. 8 Stress contour map of iron pad

耦合垫板应力主要集中于横向力作用方向顶面外边缘和同侧挡肩位置, 由铁垫板倾翻和横向挤压引起, Mises 应力最大值约为 2.1 MPa, 见图 9。

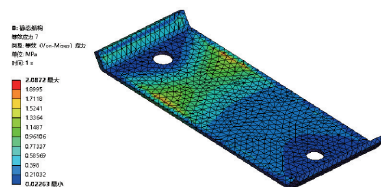


图 9 耦合垫板应力云图

Fig. 9 Stress contour map of coupling pad

轨下垫板最大应力和压缩变形位于横向力作用方向顶面外侧, 最大应力约为 0.1 MPa, 最大压缩变形约为 0.8 mm, 见图 10。

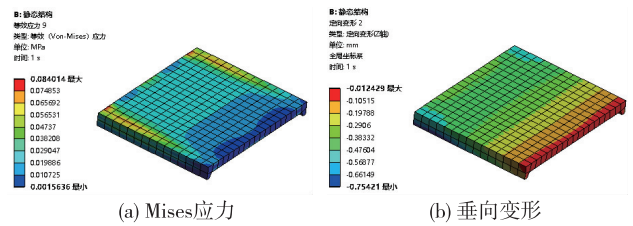


图 10 轨下垫板应力及变形云图

Fig. 10 Stress and deformation contour maps of under-rail pad

弹条应力最大值位于中趾与侧趾相交圆弧处, Mises 应力最大值为 1 375.1 MPa, 见图 11。

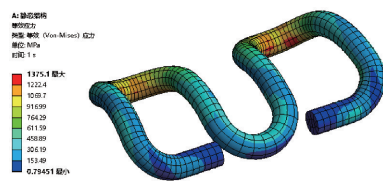


图 11 弹条应力云图

Fig. 11 Stress contour map of elastic clip

锚固螺栓最大应力位于与承轨台顶面相交位置, 由螺栓承受弯曲和剪切而引起, Mises 应力最大值约为 122.8 MPa, 见图 12。

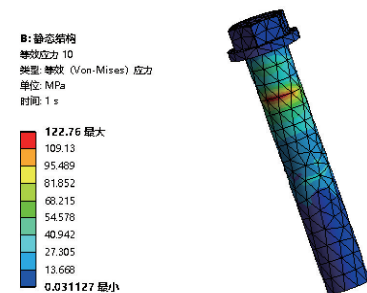


图 12 锚固螺栓应力云图

Fig. 12 Stress contour map of anchor bolt

承轨台应力集中于套管周围和横向力方向挡肩位置, 分别由螺栓的上拔及弯曲、铁垫板传递的横向力引起, Mises 应力最大值为 25.6 MPa, 见图 13。

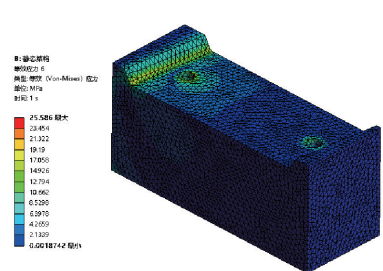


图 13 承轨台应力云图

Fig. 13 Stress contour map of track support platform

扣件组装状态下静力分析结果表明, 钢轨位移、主

要零部件及承轨台力学性能均满足要求,并有一定的安全储备。

2.2 动力计算分析

建立隧道-道床-扣件-钢轨有限元模型,列车轴重 25 t,运行速度 160 km/h,扣件按 1 760 对/km 布置,分析轨道结构动力响应^[24],见图 14。

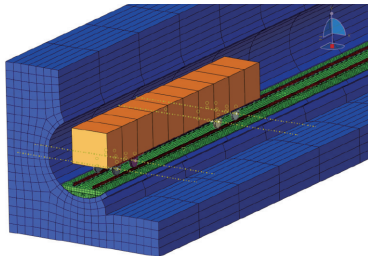


图 14 隧道-轨道-车辆系统耦合模型

Fig. 14 Coupled tunnel-track-vehicle system model

各项结果均符合客货共线铁路动态响应指标要求,见表 2。

表 2 理论动力响应指标与限值对比

Tab. 2 Comparison between theoretical dynamic response indicators and limit values

动力响应指标	计算结果	限值要求
脱轨系数	0.39	0.80
轮重减载率	0.42	0.80
钢轨横向位移/mm	0.7	2.0
钢轨垂向位移/mm	1.2	2.0
钢轨振动加速度/(m/s ²)	324	5 000
道床振动加速度/(m/s ²)	25	300
车体垂向加速度/(m/s ²)	0.2	1.0

3 客货共线铁路新型扣件厂内试验

开展客货共线铁路扣件厂内试制和试验,验证扣件各零部件强度及组装性能,并模拟现场条件进行套管锚固后抗拔力检测。

3.1 轨下垫板静刚度试验

将位移传感器置零后以 (60±10) kN/min 的速度加载至 100 kN,分别记录 F_1 和 F_2 时加载钢板的位移 D_1 、 D_2 ,见图 15。

按下式计算轨下垫板静刚度

$$K_{STA} = \frac{F_2 - F_1}{D_2 - D_1} \tag{2}$$

式中, F_1 为试验机加载荷载 1,荷载值为 20 kN; F_2 为试验机加载荷载 2,荷载值为 80 kN; D_1 为 F_1 荷载下 3 个位移传感器的平均值; D_2 为 F_2 荷载下 3 个位移传感器的平均值。

选取 3 块样品进行静刚度检测,检测结果分别为 46.5、47.6、47.4 kN/mm,与期望值吻合。

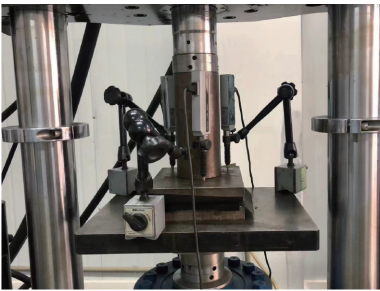


图 15 轨下垫板静刚度检测

Fig. 15 Static stiffness testing of rail pad

3.2 弹条室内试验

以 0.5 kN/s 的速度向加载梁施加荷载,同时记录荷载-位移曲线,当曲线出现拐点后卸载。从荷载-位移曲线中读取拐点处对应荷载值,即为弹条扣压力。以 4~16 Hz 频率向弹条施加 5×10^6 次 +0.5~-0.9 mm 的动态位移,记录弹条的残余变形,见图 16。



图 16 弹条疲劳性能检测

Fig. 16 Fatigue performance testing of elastic clip

选取 3 根弹条进行扣压力检测,检测结果分别为 10.8、11.2、10.5 kN,对应的残余变形为 0.25、0.33、0.28 mm,达到预期目标。

3.3 组装性能试验

将检测合格的零部件进行试组装,并开展组装性能检测,见图 17。



图 17 扣件组装疲劳性能检测

Fig. 17 Fatigue performance testing of assembled fastening system

组装状态下扣件的各项性能指标及 3×10^6 次疲劳试验前后扣件性能的变化情况均符合要求,检测结果见表3。

表 3 扣件组装性能检测结果

Tab.3 Performance testing results of assembled fastening system

组装性能检测项目		技术要求	检测结果
组装扣压力/kN		≥ 20	21.0
钢轨纵向阻力/kN		>9	10.1
组装静刚度/(kN/mm)		40~50	45.4
绝缘电阻/kΩ		≥ 3	50.4
组装疲劳性能 (两承轨面,节点垂向荷载 75 kN,横向荷载 40 kN,加载频率 4 Hz,300 万次)	疲劳后外观	零部件不得损伤	各部件均未损坏
	组装扣压力变化率/%	≤ 20	8.6
	组装静刚度变化率/%	≤ 25	10.4
	钢轨纵向阻力变化率/%	≤ 20	10.2
	轨距扩大量/mm	<6	3.8

3.4 组合套管抗拔力试验

扣件与支承块采用组合套管连接,需进行现场钻孔锚固,根据隧道内温度、湿度及施工条件,选用低粘快固型注浆材料,为便于施工,采用 A、B 组分 1 : 1 现场混合而成,见图 18。

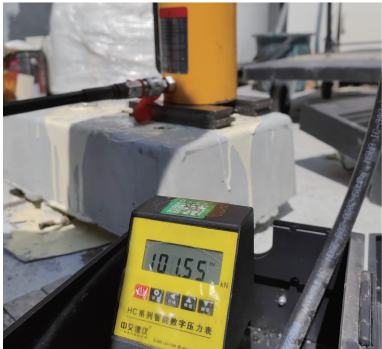


图 18 锚固套管抗拔力检测

Fig. 18 Anchor sleeve pull-out resistance test

为满足运营线改造需求,对 3 根组合套管按 40~60 kN/min 的速率施加荷载,分别在锚固 0.5 h 后加载到 60 kN、锚固 2 h 后加载到 100 kN,保持 3 min 缓慢卸载,套管均未破坏,周边均无锚固剂剥离。确保近远期列车通过时套管连接强度均满足荷载要求。

4 客货共线铁路新型扣件上道试铺

为验证新型扣件系统性能指标,选取隧道内客货共线铁路试验段进行换铺,安装前对支承块挡肩进行表面修整打磨,以增强扣件与支承块匹配度,见图 19。

试验区段列车最高运行速度 120 km/h,最大轴重 25 t,铺设 60 kg/m 钢轨无砟轨道,试验段长度为 200 m,扣件铺设标准为 1 760 对/km,合计铺设新型扣



图 19 支承块挡肩打磨

Fig. 19 Grinding of support block shoulder

件 704 套,见图 20。



图 20 新型客货共线铁路扣件上道试铺

Fig. 20 Trial installation of new fastening system for mixed passenger and freight railway

分别对试验段内扣件更换前后的轨道几何尺寸进行检测。各项轨道几何状态指标均有明显改善。以 200 m 试验段作为评价单元,TQI 由 13.05 降至 11.10,降幅达到 15%,以轨距为例,检测结果见图 21。

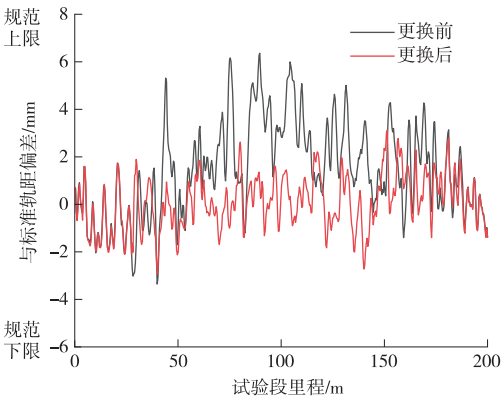


图 21 试验段扣件更换前后轨距偏差对比

Fig. 21 Comparison of track gauge deviation before and after fastening system replacement in test section

选取试验段中部断面进行轨道系统动力性能测试,测试项目包括扣件更换前后的钢轨垂向位移、钢轨及道床振动加速度,见图 22,测试结果见表 4。

扣件整体性及与挡肩匹配度的提高显著降低了钢轨横向位移,扣件刚度的降低使钢轨垂向位移和振动加速度有所提高,扣件稳定性的提高改善了轮轨作用



图22 新型客货共线铁路扣件动力性能检测

Fig. 22 Dynamic performance testing of new fastening system for mixed passenger and freight railway

对道床结构的扰动。

表4 试验段扣件更换前后轨道系统动力性能对比

Tab. 4 Comparison of dynamic performance of track system before and after replacement of fastening system in test section

动力响应指标	更换前	更换后	限值要求
钢轨横向位移/mm	1.2	0.5	2.0
钢轨垂向位移/mm	0.7	0.9	2.0
钢轨振动加速度/(m/s^2)	230.4	312.2	5 000
道床振动加速度/(m/s^2)	19.4	11.7	300

5 结论

结合客货共线铁路扣件病害问题,充分考虑客货运制式特点研发新型扣件系统。扣件整体结构简单,减少养护维修工作量。平行四边形承轨台挡肩对扣件形成双向限位,有效保证了扣件的稳定性。兼顾货运列车对扣件强度和客运列车对运行平稳性的要求,扣件组装静刚度选定为40~50 kN/mm。扣件连接件选用组合套管,为远期套管更换预留条件,所选锚固方案可保证套管抗拔力达到100 kN。弹条、螺栓等金属部件采用渗锌防腐工艺,延长了扣件在湿润环境中的使用寿命。

静、动力学理论分析及室内试验结果表明扣件组装性能满足使用需求。上道试铺试验结果表明新型扣件铺设地段TQI由13.05降至11.10,主要动力学性能指标有显著提高,铺设地段轨道结构性能得到改善,对于新建及改建线路具有良好的推广应用价值。

利益冲突声明/Conflict of Interests:

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献/Authors' Contributions:

刘雪峰参与了论文的写作和修改,孙鸿斌参与了现场情况调研和试验段铺设及测试,张鲁顺参与了理论计算分析,马佳骏参与了研发方案审定和厂内试验。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

参考文献:

- [1] 赵汝康. 铁路钢轨扣件[M]. 北京:中国铁道出版社,2018:1, 145-153.
- [2] 王顺发. 客货共线铁路分级标准评价与研究[J]. 铁道运输与经济,2024,46(8):74-81,125.
WANG Shunfa. Evaluation and Research on Classification Standard of Mixed Passenger and Freight Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2024,46(8):74-81,125.
- [3] 梁东. 中国路网铁路分类、分级研究[D]. 成都:西南交通大学,2010:41-58.
LIANG Dong. Study on Chinese Railroad Network Classifications and Grading[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2010:41-58.
- [4] ZHAN T, YAO Y, LI J P, et al. Influence of Fastener Failure on Dynamic Performance of Subway Vehicle[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13):6769.
- [5] XU Lei, GAO Jianmin, ZHAI Wanming, et al. On Effects of Rail Fastener Failure on Vehicle/Track Interactions[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017,63(5):659-667.
- [6] 肖新标,金学松,温泽峰. 轨下支承失效对直线轨道动态响应的影响[J]. 力学学报,2008,40(1):67-78.
XIAO Xinbiao, JIN Xuesong, WEN Zefeng. Effect of Track Support Failure on Dynamic Response of Tangent Track[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008,40(1):67-78.
- [7] 朱剑月. 轨下扣件支承失效对轨道结构动力性能的影响[J]. 振动工程学报,2011,24(2):158-163.
ZHU Jianyue. On the Effect of Rail Fastener Support Failure on the Dynamic Behavior of Railway Track[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011,24(2):158-163.
- [8] 肖炳环,牛留斌,刘金朝,等. 重载铁路典型波磨区段轮轨力仿真分析[J]. 铁道标准设计,2023,67(3):68-73.
XIAO Binghuan, NIU Liubin, LIU Jinzhao, et al. Simulation Analysis of Wheel-rail Force in Typical Corrugation Section of Heavy-haul Railway[J]. Railway Standard Design, 2023,67(3):68-73.
- [9] 张爽,杜香刚,张艳荣,等. 重载和客货共线铁路弹性支承块式无砟轨道快速换块关键技术[J]. 铁道建筑,2024,64(1):1-6.
ZHANG Shuang, DU Xianggang, ZHANG Yanrong, et al. Key Technologies for Rapid Block Replacement of Elastic Support Block Ballastless Track in Heavy Haul Railway and Mixed Passenger and Freight Railway[J]. Railway Engineering, 2024,64(1):1-6.
- [10] 常卫华. 客货共线铁路弹性支承块式无砟轨道伤损分析及整治[J]. 铁道建筑,2021,61(5):106-108,114.
CHANG Weihua. Damage Analysis and Treatment of Ballastless Track with Elastic Bearing Block for Mixed Passenger and Freight Railway[J]. Railway Engineering, 2021,61(5):106-108,114.
- [11] 李子睿,方杭玮,刘伟明,等. 客货共线无砟轨道用扣件系统的研究与设计[J]. 铁道建筑,2016,56(7):109-113.
LI Zirui, FANG Hangwei, LIU Weiming, et al. Research and Design on Fastening System of Ballastless Track for Railway for Mixed Passenger and Freight[J]. Railway Engineering, 2016,56(7):109-113.
- [12] 马晓华,钟依琳,王立川,等. 城市轨道交通有挡肩承轨台优化设计[J]. 铁道建筑,2023,63(11):57-61.
MA Xiaohua, ZHONG Yilin, WANG Lichuan, et al. Optimization

