

重载铁路轨道结构强化与病害防治技术研究

马卫翔

内蒙古东乌铁路有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010406

摘要: 本文聚焦重载铁路轨道结构强化与病害防治技术。剖析了轨道结构损伤机理与核心影响因素, 涵盖组成受力、损伤成因及荷载、材料等关键因素。构建强化技术体系, 包括钢轨、轨枕扣件、道床等强化技术及适配不同轴重方案。阐述了典型病害精准防治技术, 含检测预警、针对性防治、施工质量控制与特殊地段专项防治。旨在为重载铁路轨道结构优化与病害治理提供理论与技术支持, 保障铁路安全稳定运行。

关键词: 重载铁路; 轨道结构强化; 病害防治

引言: 随着我国重载铁路运输的快速发展, 列车轴重和运量不断增加, 轨道结构承受的荷载愈发巨大, 导致轨道损伤问题日益突出, 严重影响铁路运输的安全与效率。深入探究重载铁路轨道结构强化与病害防治技术, 成为保障铁路安全稳定运行的关键。本文围绕轨道结构损伤机理、强化技术体系构建以及典型病害精准防治等方面展开研究, 旨在为重载铁路轨道结构的优化与病害治理提供科学依据和技术支撑。

1 重载铁路轨道结构损伤机理与核心影响因素

1.1 重载轨道结构核心组成与受力特征

重载轨道结构核心由钢轨、轨枕、扣件、道床及轨道框架附属结构构成, 各部件协同承载列车荷载并维持轨道几何形位。钢轨作为直接受力部件, 承担列车轮对传递的竖向压力、横向水平力及纵向摩擦力; 轨枕通过扣件约束钢轨, 将荷载均匀传递至道床, 同时抵抗轨道横向位移与倾覆; 扣件系统提供可靠扣压力, 保障钢轨与轨枕的相对固定, 缓冲振动冲击; 道床依靠颗粒间摩擦力形成承载体系, 分散荷载、吸收振动并排水防渗^[1]。重载工况下, 轨道受力呈现荷载大、循环次数多、冲击性强的特征, 轮轨接触应力显著高于普通铁路, 易引发结构疲劳损伤, 且横向力与纵向力叠加易导致轨道几何变形累积, 加剧结构劣化速度。

1.2 轨道结构损伤机理分析

重载铁路轨道结构损伤源于荷载作用、材料劣化与环境影响的协同效应, 不同部件损伤机理存在差异。钢轨损伤以疲劳裂纹、磨损、剥离掉块为主, 轮轨高频循环接触产生的交变应力超过材料疲劳极限, 易形成核伤、轨头劈裂, 重载列车制动与启动产生的纵向力会加速裂纹扩展; 轨枕损伤表现为开裂、破损及老化, 混凝土轨枕受冲击荷载反复作用, 内部产生应力集中, 导致裂缝萌生扩展, 木质轨枕则易出现腐朽、磨耗; 扣件损

伤多为扣压力衰减、弹条失效, 长期振动冲击使扣件弹性部件疲劳, 同时杂物侵入与锈蚀会破坏扣件约束功能; 道床损伤体现为颗粒破碎、板结与不均匀沉降, 重载荷载导致道床颗粒相互挤压摩擦, 产生级配恶化, 雨水渗透与列车振动共同引发道床板结, 降低承载与缓冲能力。

1.3 核心影响因素识别

重载铁路轨道结构损伤的核心影响因素可分为荷载、材料、环境及运营维护四大类。荷载因素中, 轴重等级是关键, 轴重越大轮轨接触应力越高, 损伤速率呈非线性增长, 列车运行速度与密度通过增加荷载循环次数, 加速结构疲劳劣化, 制动方式与轮轨匹配度也会影响损伤分布。材料因素方面, 钢轨、轨枕及扣件的材料性能直接决定抗损伤能力, 如高强度钢轨可提升疲劳极限, 弹性扣件能优化荷载传递。环境因素包括温度变化、降水与地质条件, 温度交替引发轨道伸缩变形, 易产生温度应力裂纹, 雨水浸泡加剧道床板结与部件锈蚀, 软土、岩溶等不良地质会导致轨道基础不均匀沉降。运营维护因素中, 养护周期、检测精度与维修质量不足, 会使微小损伤无法及时处置, 逐步发展为重大病害, 加剧结构损伤。

2 重载铁路轨道结构强化技术体系构建

2.1 钢轨强化技术

钢轨强化技术主要围绕提升钢轨的抗疲劳和抗磨损能力展开, 形成了一套涵盖材质优化、结构改进与表面处理的综合技术体系。在材质层面, 采用高强度微合金钢轨, 通过控轧控冷工艺细化晶粒组织, 显著提高钢轨的抗拉强度与疲劳极限。针对重载运煤、矿石等线路, 选用耐磨合金成分钢轨, 增强轨头的耐磨性能, 延长钢轨使用寿命。结构改进方面, 推广使用热处理钢轨, 对轨头进行淬火处理, 提升表面硬度与耐磨性。同时优化

钢轨断面设计,增加轨头截面积与惯性矩,降低接触应力,减少磨损。表面处理技术包括钢轨打磨、涂油与激光熔覆^[2]。定期打磨可消除轮轨接触不良引发的应力集中,减少裂纹萌生;轮轨涂油能降低摩擦系数,减轻磨损与疲劳;激光熔覆技术可在钢轨表面形成高性能合金层,修复轻微损伤并提升表层性能,特别适配重载高频循环荷载工况,有效延长钢轨使用寿命。

2.2 轨枕与扣件系统强化

轨枕与扣件系统强化聚焦于提升约束稳定性与抗损伤能力,以适配重载荷载传递需求。轨枕强化采用高性能混凝土轨枕,掺入纤维材料优化内部结构,提高抗裂与抗冲击性能。针对重载关键区段,推广使用预应力混凝土岔枕与宽枕,增加承载面积与刚度,减少变形累积。同时改进轨枕预埋套管工艺,提升套管与混凝土的粘结强度,避免套管松动失效。扣件系统强化方面,选用高弹性、高强度扣件,优化弹条结构设计,提升扣压力稳定性与疲劳寿命。采用防腐防锈材质处理扣件部件,以应对潮湿、腐蚀环境。对于长大坡道与曲线区段,加装防爬扣件与横向限位装置,增强轨道纵向与横向约束能力,防止重载列车作用下轨枕位移与扣件失效,确保轨道系统的稳定性和安全性。

2.3 道床结构强化技术

道床结构强化以提升承载能力、抗变形能力与排水性能为核心,形成了一套包括道床材质优化、结构改进与辅助强化的技术体系。在材质上,选用级配良好、强度高的玄武岩或花岗岩道砟,严格控制道砟颗粒形状与破碎率,减少重载作用下的颗粒磨耗与破碎。推广使用道砟胶结技术,通过喷洒专用胶结材料使道砟颗粒胶结成型,提升道床整体刚度与稳定性,抑制道床板结与不均匀沉降。结构改进方面,优化道床厚度与断面形式,重载区段适当增加道床厚度,采用梯形断面提高侧向承载能力。设置道床防渗排水系统,在道床底部铺设防渗膜与排水盲沟,快速排出雨水,避免道床长期浸泡。辅助强化技术包括铺设土工合成材料,在道床与路基之间铺设土工格栅,增强道床与路基的协同作用,减少路基不均匀沉降对道床的影响,提升整体稳定性。

2.4 轨道框架与附属结构强化

轨道框架与附属结构强化旨在提升轨道整体稳定性,保障重载列车安全运行,涵盖轨道框架加固、附属结构优化与防护技术。轨道框架强化采用钢轨接头加固技术,优化接头结构形式,采用高强度接头夹板与螺栓,提升接头整体性与抗疲劳能力,减少接头处应力集中。对于曲线区段,通过设置轨距拉杆、轨撑等装置,

增强轨道框架横向刚度,抑制曲线轨道外挤变形。附属结构优化包括轨道防爬设备强化,选用高性能防爬器与防爬撑,提升轨道纵向防爬能力,防止重载列车制动与启动引发轨道纵向位移。优化道口结构,重载区段采用整体式道口板,提升道口承载能力与平顺性,减少道口处轨道损伤。加强轨道附属防护设施,设置钢轨防磨护轨、道床边坡防护网,避免外部因素对轨道结构造成破坏,确保轨道系统的长期稳定运行^[3]。

2.5 不同轴重等级轨道强化方案适配

针对不同轴重等级重载铁路的受力特征与损伤规律,需制定差异化的轨道强化适配方案,以实现技术经济性与安全性的平衡。对于25-30t轴重铁路,重点强化钢轨与扣件系统,选用耐磨型高强度钢轨,搭配高弹性扣件,增加道床厚度并优化道砟级配,适当加固轨道接头,无需大规模改造轨道框架,即可满足荷载需求。对于30-35t轴重铁路,在基础强化基础上,推广使用胶结道床与预应力混凝土宽枕,提升道床与轨枕的承载能力。采用激光熔覆处理钢轨表面,加装横向限位与纵向防爬装置,增强轨道整体稳定性。同时优化路基承载力,避免基础沉降引发轨道损伤。对于35t以上轴重铁路,需全面升级轨道结构,采用特种高强度钢轨与纤维增强混凝土轨枕,铺设土工合成材料强化道床与路基,优化轨道框架设计,增设辅助加固装置,并建立全生命周期监测体系,确保轨道结构适配超重荷载,保障行车安全。

3 重载铁路轨道典型病害精准防治技术

3.1 轨道病害检测与预警技术

重载铁路轨道病害检测与预警技术,以精准识别微小损伤、提前预判劣化趋势为核心目标,全力构建智能化、全方位的检测体系。常规检测环节,主要采用钢轨探伤车、轨道几何状态检测车等设备。钢轨探伤车运用超声波技术,能快速检测钢轨内部是否存在裂纹;轨道几何状态检测车借助电磁感应等技术,可精准测量轨头磨耗、轨道平顺度等关键指标,实现大范围病害的初步筛查。针对桥梁、隧道等关键区段,则采用人工精细检测与无人机巡检相结合的方式。人工检测能凭借经验细致排查道床板结、扣件失效等隐蔽病害;无人机巡检可快速覆盖大面积区域,发现轨枕开裂等不易察觉的问题。智能化检测技术同样不可或缺,光纤传感监测系统在钢轨、轨枕内植入光纤传感器,实时监测结构应力、应变与变形数据;基于机器视觉的病害识别技术,通过高清摄像头采集轨道图像,结合先进的AI算法,自动识别病害类型与等级。预警体系通过建立病害数据库与劣化模型,整合各类检测数据,预判病害发展趋势,设定

科学合理的预警阈值,及时发出养护维修预警,为精准防治提供坚实的数据支撑。

3.2 典型病害针对性防治方案

针对重载铁路轨道典型病害,制定差异化针对性防治方案,是实现精准治理的关键。在钢轨病害方面,对于钢轨疲劳裂纹,若裂纹较浅,采用打磨的方式消除表面裂纹;若裂纹深度较大,则实施钢轨截换处理,确保钢轨结构完整;对于磨损严重的区段,采用钢轨倒换使用策略,均衡钢轨磨损程度。轨头剥离掉块时,通过激光熔覆修复技术,在掉块处形成高性能合金层,恢复钢轨表面平整度;若掉块较小,也可采用局部打磨的方法处理。轨枕与扣件病害治理中,对开裂轨枕要及时更换,避免病害进一步扩大;对松动扣件重新紧固,并补充扣压力,确保扣件能牢固固定钢轨;失效扣件则需整体更换,同时清理扣件周边杂物,防止锈蚀加剧。道床病害治理时,对板结道床采用机械捣固与清筛结合技术,更换破损道砟,恢复道床的透气性与弹性;对不均匀沉降道床,通过起道捣固调整轨道高程,铺设土工格栅增强道床与路基的协同作用,强化道床稳定性。对于曲线轨道外挤、轨道爬行等整体病害,采用调整轨距、加装加固装置、优化防爬系统等方式,恢复轨道几何形位与整体稳定性。

3.3 病害治理施工质量控制

病害治理施工质量控制是保障防治效果、延长轨道使用寿命的关键环节,需建立全流程质量管控体系。施工前,要精准勘察病害范围与程度,详细了解病害的具体情况,为制定专项施工方案提供依据。选用适配重载工况的材料与设备,确保材料质量可靠、设备性能稳定。对施工人员进行专业培训,使其熟悉施工技术标准与操作流程。施工过程中,严格控制各工序质量。钢轨打磨时,要保证表面平整度与粗糙度符合规范要求,避免出现打磨过度或不足的情况;钢轨截换需确保接头对接精度与螺栓紧固力矩,保证接头处的强度与稳定性。道床清筛与捣固要控制道砟级配、捣固深度与频率,保证道床密实度均匀,提高道床的承载能力。轨枕更换与扣件安装要确保轨枕位置准确、扣件扣压力达标,使轨枕与钢轨连接牢固^[4]。施工后,及时对施工质量进行检测

验收,采用轨道几何状态检测仪、钢轨探伤设备等先进仪器,检查轨道平顺度、结构完整性等指标,对不合格部位及时整改。

3.4 特殊地段病害专项防治

重载铁路特殊地段因地质、环境条件复杂,病害易高发且治理难度大,需实施专项防治措施。软土路基地段,重点防治轨道不均匀沉降病害,采用CFG桩复合地基、粉体喷射搅拌桩等技术加固路基,提升路基承载力,在道床底部铺设土工合成材料,减少路基变形对轨道的影响,同时设置沉降观测点,实时监测沉降数据,及时调整轨道高程。长大坡道区段,针对钢轨磨损加剧、轨道爬行等病害,选用耐磨型钢轨,加强制动地段钢轨防护,加装高强度防爬装置,优化列车制动方式,减少制动对轨道的冲击;定期检查扣件状态,及时补充扣压力。桥梁、隧道等构筑物地段,优化轨道与构筑物的连接结构,减少沉降差引发的轨道应力集中,加强桥梁支座、隧道衬砌的检查与维护,防止构筑物病害传导至轨道结构,同时做好排水防护,避免环境腐蚀加剧轨道损伤。

结束语

重载铁路轨道结构强化与病害防治技术的研究意义重大。通过对轨道结构损伤机理的剖析,明确了核心影响因素,为技术体系的构建指明方向。强化技术体系从多个部件与结构入手,适配不同轴重等级,有效提升了轨道结构性能。精准防治技术涵盖检测预警、针对性方案、施工质量控制及特殊地段专项防治,保障了轨道健康。未来,需持续优化技术,以适应重载铁路发展需求,确保铁路运输安全高效。

参考文献

- [1] 刘志刚.重载铁路轨道结构优化设计研究[J].铁道工程学报,2023,20(3):45-52.
- [2] 李文强.重载铁路轨道结构长期性能分析[J].铁道科学与工程学报,2024,21(2):89-98.
- [3] 任可.基于动态规划的铁路轨道养护规划工作[J].四川建材,2024,50(02):151-153.
- [4] 高彦嵩,代冲,张军朝,等.铁路道床状态评估及大修决策关键技术[J].铁道建筑,2023,63(05):12-16.