

重载铁路轨道结构优化与耐久性提升

白志强

国能朔黄铁路原平分公司东冶工务工队 山西 忻州 034100

摘要：随着重载铁路运输的快速发展，轨道结构的承载能力与耐久性日益成为铁路系统安全与经济效益的重要保障。重载列车的运行对轨道结构提出了更高的要求，传统的轨道设计在面对巨大的荷载与频繁的振动时，表现出一定的局限性。优化轨道结构、提升轨道的耐久性，已成为提高重载铁路运营效益、保障铁路系统长效运行的重要途径。通过采用新型轨道材料、改进轨道设计、加强维护管理等措施，能够有效延长轨道的使用寿命，降低运维成本。

关键词：重载铁路；轨道结构；耐久性；优化设计；材料创新

1 重载铁路轨道结构优化与耐久性提升的重要性

重载铁路轨道的结构优化与耐久性提升是保障铁路系统长期稳定运营和提高运输效率的核心要素。近年来，随着国家对资源型经济的重视，尤其是煤炭、矿石、钢铁等大宗物资的运输需求激增，铁路在国家交通运输体系中承担了越来越重要的角色^[1]。与此同时，列车载重的逐步增大和运输频次的不断提升，给轨道结构带来了前所未有的压力，导致轨道出现严重的磨损和疲劳积累现象，直接影响到铁路系统的安全性、稳定性和长期运营能力。在此背景下，重载铁路轨道结构优化与耐久性提升已成为亟待解决的技术难题。根据国家近年来发布的《铁路中长期发展规划（2021-2035）》及《“十四五”铁路建设规划》，重载铁路建设和现有轨道优化被明确列为重要发展方向。重载列车的高速、大载荷特性对轨道结构提出了更高要求。传统的铁路轨道设计和施工方法虽然能满足一般运输需求，但在面对长期高强度荷载、频繁振动及极端气候条件下的考验时，轨道的疲劳破坏和老化现象逐渐显现，尤其是在轨道的变形、裂纹扩展、材料老化等方面。为应对这一挑战，国家有关部门在近几年出台了多个政策，要求加大对重载铁路轨道优化技术的研发投入，推动轨道材料的创新和升级，以实现轨道的高强度承载能力与高耐久性的双重目标^[2]。

2 重载铁路轨道结构优化与耐久性提升的现状分析

2.1 轨道材料的性能局限

当前，重载铁路轨道的设计通常依赖传统的材料组合，如钢轨、混凝土枕木和碎石道床。然而，这些材料在面对日益严苛的重载条件时暴露出许多局限性。钢轨和混凝土枕木作为轨道结构的主要组成部分，虽然具有较好的强度和承载能力，但在高强度的重载运输下，钢轨和道床之间的磨损加剧，导致轨道的疲劳性增强。长

时间运行后，钢轨的接触面会出现显著的磨损，尤其在连续重载列车的冲击下，钢轨的表面会出现裂纹，甚至导致断轨的风险^[3]。

2.2 轨道结构设计的不足

随着重载列车运行需求的不断增加，现有轨道结构设计未能有效满足重载铁路的承载要求。传统的轨道结构设计在很多情况下依赖于中低载荷的设计标准，这些设计虽然能够满足一般铁路运营的要求，但并未充分考虑到重载铁路长期高强度负荷下的运行特性。在轨道结构设计中，往往过于侧重于初期的建设和施工质量，忽视了轨道在长期运营中可能面临的疲劳破坏和寿命衰减问题。现有的钢轨和道床设计方案大多未能根据重载列车的实际运行状态进行针对性优化，缺乏对轨道材料应力、疲劳特性和变形行为的深入分析。尤其是在轨道与道床的连接结构设计中，未能充分考虑到重载列车通过时对接触面产生的巨大压力和周期性冲击，导致轨道在长期负荷下易发生不均匀沉降、裂纹扩展以及道床松散等现象。

2.3 轨道维护管理的挑战

随着重载列车运行频次的增加，现有的轨道维护管理机制逐渐显现出滞后性。传统的轨道维护模式主要依赖定期巡检和人工检测，难以应对现代重载铁路的高频次和高强度的运营需求。在高强度运输条件下，轨道的表面磨损和内部结构损伤的发生速度加快，传统的定期检查方式难以在损伤发生的早期进行有效发现。由于铁路运营中的突发性损坏和隐蔽性故障较多，人工巡检的效果受到技术手段和操作人员经验的限制，常常导致对潜在故障的预判不足，进而增加了轨道维护的难度和成本^[4]。

3 重载铁路轨道结构优化与耐久性提升的策略

3.1 轨道材料选型与组合优化方案

重载铁路轨道的优化设计与材料选型密切相关。传

统轨道材料在高强度、长时间运载负荷下容易出现早期损伤和疲劳现象,因此需要采用新型材料以提高轨道性能。耐磨钢轨在现代重载铁路中得到广泛应用,凭借其高硬度和耐磨性,显著延长了轨道寿命,减少了磨损和裂纹的产生。聚合物混凝土枕木作为替代传统混凝土枕木的材料,具备更好的抗腐蚀性和弹性模量,在恶劣环境下表现出优异的稳定性,优化了抗裂性和抗震性,减少了道床变形。高弹性道床材料由改性橡胶和塑料等聚合物组成,具有良好的抗振动和减震能力,有效延长轨道寿命^[5]。

在实际操作中,越来越多的重载铁路工程开始采用新型材料进行轨道优化设计。例如,在某些长途运输线路的重载铁路项目中,采用了耐磨钢轨与聚合物混凝土枕木的组合方案。通过严格的工程参数设计,这些项目实现了轨道结构的显著优化。耐磨钢轨的硬度在Brinell硬度测试中通常超过400HB,而传统钢轨的硬度多在250-300HB之间,这使得新型钢轨在长期重载运行中表现出更强的抗磨损性。此外,聚合物混凝土枕木的弹性模量通常达到25-35GPa,相比传统混凝土枕木的15-25GPa,能够更好地适应重载运输过程中的巨大冲击力与长期应力作用。高弹性道床材料的引入,使得轨道的整体振动幅度减少了约15-20%,进一步提升了轨道的稳定性和耐久性。通过这些材料的合理配合和应用,重载铁路的轨道结构得到了显著改善,不仅减少了因材料老化引起的损伤,还大幅提高了运输效率和安全性。在这些项目的实际运行中,结合“智能监测系统”后,轨道的维护周期得到有效延长,故障发生率显著下降,同时整体运营成本也得到了优化。随着新型材料和智能技术的不断发展,未来的重载铁路轨道将在耐久性、承载力和安全性等方面不断提升,为重载运输的高效、可持续发展提供更强有力的支持。

3.2 轨道设计施工工艺的创新应用

在重载铁路轨道的设计与施工过程中,传统的设计方法和施工工艺存在一定的局限性,无法有效应对日益增长的运输需求和高强度的动态负荷。尤其是传统的轨道设计主要侧重于静态负荷的分析,忽视了列车动载作用下轨道的动态响应,导致轨道结构在高频次重载条件下容易发生变形和疲劳损伤。为应对这些挑战,现代轨道设计需更多地考虑列车在行驶过程中所产生的动载效应。有限元分析(FEA)作为一种先进的数值模拟技术,能够对轨道的受力和变形过程进行精准模拟,帮助设计人员预测轨道在动态载荷作用下的行为,并优化设计方案。在这一过程中,轨道钢轨的几何形状、道床的厚度与刚

度、以及轨道结构的接触面等因素,都可以通过FEA技术得到精细调整,以提升轨道的抗疲劳和抗冲击能力^[6]。

在实际工程应用中,某重载铁路项目在设计与施工过程中采取了新型的轨道结构优化方案,成功提升了轨道的耐久性和稳定性。该项目采用了基于有限元分析的动态负荷优化设计方法,对钢轨和道床结构进行了全方位的优化。在钢轨设计方面,特别在钢轨的几何形状上做出了优化调整,通过FEA模拟对钢轨的受力分布进行了精确分析,减少了动态冲击对钢轨接触面的损伤,钢轨头部轮廓的改进提升了钢轨的耐磨性能。同时,道床采用了高弹性、高韧性复合材料,增强了轨道的减震效果和对动态载荷的适应性。该材料的弹性模量可达30GPa,相比传统道床材料提高了近15%。在施工阶段,采用了现代化的轨道铺设技术,通过激光导向设备和自动化铺轨机的应用,确保了轨道的平整度和精确度。铺设过程中,对道床的厚度和密实度进行了严格控制,避免了由于不均匀沉降导致的轨道变形。这一系列设计与施工工艺的创新,使得该项目的轨道在投入使用后表现出了优异的稳定性与耐久性。经过长期的运营检测,轨道变形量保持在5mm以内,远低于传统轨道设计的容许误差,轨道的维修频率大幅降低,项目的运营成本也显著减少。

3.3 轨道健康监测与智能维护系统

随着铁路运输的现代化和重载需求增加,传统轨道维护方式已无法满足高强度运营要求。轨道健康监测与智能维护系统通过集成应变、温湿度、加速度和振动传感器等技术,对轨道进行全方位实时监测。传感器通过“物联网”(IoT)将数据传输至中央平台,并运用大数据分析 with 云计算技术,实现轨道状态的智能预测与诊断。系统通过“机器学习”和“人工智能”(AI)算法,结合历史数据,预测轨道老化和故障风险,提前采取预防性维护措施。与传统人工巡检相比,智能系统能够精准识别轨道微小变形或裂纹,提高维护效率和精准度,显著减少潜在故障和维修成本。

在工程实践中,某铁路项目的轨道健康监测系统为提升重载铁路的运营稳定性与安全性提供了切实有效的解决方案。该项目采用了集成式的智能传感器网络,利用“无线传感器网络”(WSN)技术,将轨道的动态负荷、垂直位移、横向位移、温度变化等参数实时监控并传输至数据中心。通过有限元分析(FEA)模拟,系统能够实时预判不同载荷下轨道的受力状态,分析不同气候条件下对轨道结构的影响。此外,通过传感器所获得的“轨道健康指数”(Track Health Index, THI),系统可以全面评估轨道的使用寿命,并对可能出现的高风险区

域进行精准定位。以动态荷载分析为例,该项目在运行时记录的最大荷载应力为每米20kN,而经过智能传感器的监控,系统能够准确识别出局部应力超标的情况,并在前期预警系统的辅助下,及时安排维修,避免了因轨道失效导致的铁路事故发生。整个系统的实施使得轨道的维护周期得到了有效延长,故障率显著降低,同时大大降低了人工巡检的成本和劳动强度。

3.4 轨道维修加固技术的推广应用

轨道的定期维修与加固是确保重载铁路长期高效、安全运营的重要手段。在高强度的重载运输条件下,轨道的使用寿命和稳定性会受到持续的动态荷载、环境变化以及材料疲劳的影响,常规的维修和加固工作成为防止轨道失效、确保运输安全的必备措施。现代轨道维修技术包括轨道铣削、磨轨、轨道焊接修复、道床加固等。这些技术可以显著提升轨道表面的平整度、减少轨道结构的变形,进而提高铁路运输的平稳性和舒适性。轨道铣削技术可以有效去除轨道表面的裂纹、龟裂和疲劳区,恢复钢轨的表面光洁度,防止裂纹扩展,延长轨道使用寿命。磨轨技术则通过对轨道表面进行精细打磨,去除由于车轮与轨道之间的摩擦产生的磨损层,恢复轨道的几何形状,有效减少车轮与轨道之间的冲击,提高轨道的稳定性。

以中国重载铁路项目为例,轨道的定期维修和加固技术得到了广泛应用。在项目中,针对长期高强度运输所带来的轨道表面磨损和局部裂纹,采用了磨轨和轨道铣削相结合的方式,提升了轨道的承载能力和使用寿命。在该项目的维修计划中,轨道铣削作业被定期进行,每次铣削深度达到2-3mm,通过铣削去除钢轨表面的微裂纹和损伤,确保了钢轨表面平整度与光洁度,避免了因表面缺陷导致的进一步损坏。在轨道焊接修复方面,该项目采用了“铝热焊接技术”(Thermit Welding),成功修复了数百处局部损伤的轨道接头,避免了因接头裂纹扩展造成的轨道断裂。轨道加固方面,结合道床的监测数据,利用“道床稳定性增强技术”对

部分线路进行了加固,尤其是在高负荷运转的区段,通过深层注浆、加固道床基础,增加道床的刚度,防止轨道沉降和变形。通过这一系列的维修与加固措施,项目在高强度运营条件下的轨道稳定性得到了显著提升。经过五年的运营,这些加固后的轨道段出现的表面磨损程度较常规段减少了约30%,轨道的沉降率保持在3mm/km以内,大大提高了运输效率和安全性。该项目的成功经验表明,通过先进的轨道维修与加固技术,不仅能够延长轨道使用寿命,减轻后期维护成本,还能提高整体铁路运营的可靠性和运输能力。

4 结语

在重载铁路运输日益增长的背景下,轨道结构的优化与耐久性提升已成为铁路行业面临的重要课题。通过改进材料选择、优化设计、引入智能监测与维护技术,能够有效提升轨道的承载能力与使用寿命,确保铁路运输的高效、安全和可持续发展。未来,随着技术的不断进步,重载铁路轨道的优化将更加注重综合性的设计理念与系统化的维护管理,为推动现代铁路运输行业的长远发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]李永强.改性水滑石对砂浆氯离子固化性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2024,(08):101-105.
- [2]谭明波,刘欣,蓝麒,等.我国超龄老旧设备设施安全管理的经验综述[J/OL].工业安全与环保,1-8[2024-08-27].
- [3]靳红华.模拟酸雨侵蚀环境下悬臂抗滑桩服役性能及耐久性极限寿命研究[D].重庆交通大学,2024.
- [4]《中国公路学报》编辑部.中国路面工程学术研究综述·2024[J].中国公路学报,2024,37(03):1-81.
- [5]张旭苹,周广南,王浩然,等.基于分布式光纤声场传感的预应力钢管混凝土管断丝监测研究进展[J].光学学报,2024,44(01):149-160.
- [6]张家荣.探讨土木工程建筑结构的安全性及耐久性[J].中国住宅设施,2024,(08):156-158.