

重载铁路隧道内整体道床结构动力响应特性分析

范淑宜

徐州地铁运营有限公司 江苏 徐州 221000

【摘要】：重载铁路隧道内整体道床结构在长期高频重载作用下，其动力响应特性直接影响线路稳定性与运营安全。本文以典型重载铁路隧道为研究对象，结合现场实测与数值模拟方法，系统分析整体道床在列车荷载作用下的加速度、动应力及位移响应规律，揭示结构动力响应随轴重、速度及轨道状态变化的内在机制。研究发现，道床板与仰拱连接区域为动力响应敏感区，易产生疲劳损伤；轨道不平顺加剧结构振动，影响耐久性。基于分析结果，提出优化轨道结构刚度匹配与加强关键部位构造措施的建议，为重载铁路隧道整体道床设计与养护提供理论支持。

【关键词】：重载铁路；整体道床；动力响应；隧道结构；振动特性

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.028

引言

重载铁路作为大宗货物运输的核心通道，其基础设施长期承受高轴重、大运量的运营压力，对结构安全提出严峻挑战。隧道内整体道床因其整体性强、维修量小等优势被广泛采用，但在复杂动载环境下，其动力响应特性尚不完全明确，尤其在道床与围岩相互作用、结构疲劳演化等方面存在研究空白。实际运营中已出现道床开裂、支承块松动等问题，威胁行车安全。深入探究整体道床在重载作用下的动力响应机制，不仅关乎结构服役性能评估，更对延长结构寿命、提升线路可靠性具有重要意义。本文通过实测与仿真相结合的方法，系统揭示关键参数影响规律，为科学养护与结构优化提供依据。

1 重载铁路隧道整体道床结构动力响应特征分析

重载铁路隧道内整体道床在列车反复动载作用下表现出显著的动力学行为，其响应特征直接关系到轨道结构的稳定性与服役寿命。整体道床作为无砟轨道的重要组成部分，其刚度大、整体性好，但在高频重载激励下，结构内部应力分布不均，易在道床板与仰拱连接部位形成应力集中区域。现场实测数据显示，列车通过时道床板顶面加速度响应呈现脉冲式增长，且振动能量主要集中在低频段，与车辆运行频率及轨道结构自振频率耦合明显。动应力传播路径主要沿道床板纵向和垂向扩散，尤其在轨道接缝或支承块周边区域，应力波叠加效应显著，易诱发微裂缝扩展。

整体道床各部件间的相互作用显著影响其动力响应特性。扣件系统作为钢轨与道床的连接枢纽，其刚度与阻尼性能直接决定振动能量的传递与耗散行为。过高刚度易导致冲击荷载加剧，过低则可能引发轨道几何形变失稳。支承块与道床混凝土的粘结退化会造成局部脱空，改变荷载传递路径，诱发应力重分布。道床与仰拱间的连接质量同样关键，离缝或灌浆不实将削弱结构整体刚度，引发过大挠曲变形，加速疲劳损伤。随着

运营时间推移，混凝土徐变、收缩及微裂纹扩展使结构刚度逐渐退化，振动响应随之增强，尤其在高温高湿隧道环境中更为明显。轨道不平顺的持续发展进一步加剧轮轨动力作用，形成“不平顺—振动—损伤—恶化”的恶性循环，掌握其演化规律对养护决策与性能评估至关重要。

2 关键运营参数对整体道床动力响应的影响机制

轴重是影响整体道床动力响应的核心运营参数之一。重载列车通常具有较高的轴重，导致轮轨接触力显著增大，进而使道床承受更大的垂向动荷载。轴重增加不仅提升了结构响应的绝对幅值，还改变了应力波的传播模式。高轴重条件下，应力波在道床板内的传播速度加快，能量衰减速率减缓，导致振动影响范围扩大。特别是在道床板边缘和支承块端部，局部应力集中现象更为突出，易引发混凝土剥落或钢筋锈蚀。轴重增大也加剧了轨道结构的塑性变形积累，长期作用下可能引起道床板下沉或横向位移，破坏轨道平顺性，进而反作用于动力响应过程，形成正反馈效应。

列车运行速度对整体道床动力响应具有复杂影响。速度提升意味着荷载作用频率增加，当其接近或达到结构某一阶自振频率时，可能发生共振现象，显著放大振动响应。高速通过时，轮轨冲击力的持续时间缩短但峰值提高，导致道床在短时间内承受剧烈冲击，增加了材料疲劳损伤的风险。速度变化还影响荷载分布的时空特性，高速列车引起的动荷载更集中于轨道局部区域，使得道床板在纵向上的应力梯度增大，易在接缝处产生剪切破坏。实际运营中，不同速度等级下的振动频谱特征差异明显，低速时以低频为主，而高速时高频成分比例上升，这对道床材料的阻尼性能提出了更高要求。

轨道不平顺作为不可忽视的激励源，对整体道床动力响应起着放大作用。轨面不平顺直接导致轮轨之间产生附加动力作用，这种作用力通过扣件传递至道床，成为结构振动的主要驱

动力。不平顺程度越高,轮轨力波动越剧烈,道床的加速度和动应力响应随之增强。尤其在波长较短的局部不平顺(如焊缝错边、轨面剥离)作用下,高频振动成分显著增多,容易激发道床局部构件的高频共振。道床自身变形引起的几何偏差也会形成次生不平顺,进一步加剧结构受力。控制轨道几何状态不仅是保证行车舒适性的需要,更是降低结构动力响应、延长服役寿命的关键措施。

3 整体道床结构动力响应的优化控制策略

优化轨道结构刚度匹配是降低整体道床动力响应的有效途径。道床、扣件、钢轨及围岩构成一个多层复合体系,各层刚度的协调性直接影响荷载传递效率和振动能量分布。若道床刚度过高而扣件刚度过低,会导致荷载集中于局部支承点,增加混凝土开裂风险;反之则可能引起轨道变形过大。应根据重载运营特点,合理设计扣件刚度,使其既能有效缓冲冲击,又不至于造成轨道几何失稳。道床与仰拱之间的连接应保证足够的刚度和连续性,避免因界面刚度突变引发应力集中。在特殊区段,如隧道进出口或地质变化带,可采用变刚度设计,实现荷载的渐变过渡,减少动力冲击。

加强关键部位构造设计是提升整体道床抗疲劳性能的重要手段。道床板与仰拱连接区域、支承块周边及轨道接缝处是动力响应敏感区,应作为重点加强部位。可通过增加构造钢筋配置、优化混凝土配合比、采用纤维增强材料等方式提高局部抗裂能力。在支承块预埋区域,应确保锚固可靠,防止因松动导致应力重分布。对于已出现微裂缝的区段,可采用压力注浆

或表面封闭技术进行修复,阻止裂缝扩展。在道床板底部设置弹性垫层或隔离层,有助于改善荷载分布,减少来自围岩的不利影响。构造措施的实施应结合施工工艺可行性与长期耐久性要求,确保结构在全生命周期内保持良好性能。

建立基于状态监测的动力响应控制体系是实现精细化管理的关键。通过在隧道内布设加速度传感器、应变计等监测设备,实时采集道床结构的动力响应数据,结合轨道几何状态检测信息,构建结构健康评估模型。利用大数据分析技术识别异常响应模式,预测潜在损伤发展趋势,为养护决策提供科学依据。当监测到某区段动力响应显著增强时,应及时开展专项检查,排查轨道不平顺、扣件失效或结构离缝等问题,并采取针对性整治措施。应将动力响应控制纳入日常养护规程,形成“监测—评估—干预—反馈”的闭环管理机制,提升重载铁路隧道整体道床的安全性与可靠性。

4 结语

本文围绕重载铁路隧道内整体道床结构的动力响应特性展开系统分析,揭示了在高频重载作用下道床加速度、动应力及位移响应的关键规律,明确了结构敏感区域与主要影响因素。研究指出,轨道结构刚度匹配、关键部位构造状态及运营参数变化显著影响动力响应行为,长期服役过程中材料性能退化与轨道不平顺发展形成耦合劣化效应。基于此,提出优化刚度设计、强化关键构造及建立状态监测机制等控制策略,为提升整体道床耐久性与运营安全性提供了理论支撑与技术路径。

参考文献:

- [1] 刘志远,陈晓峰.重载铁路隧道整体道床动力响应现场测试与分析[J].铁道工程学报,2023,40(5):45-51.
- [2] 孙立群,郑宏伟.基于多场耦合的整体道床疲劳损伤演化模拟研究[J].工程力学,2022,39(8):112-120.
- [3] 胡建平,周文涛.考虑轨道不平顺激励的隧道无砟轨道结构振动特性研究[J].振动与冲击,2023,42(12):78-85.