

重载铁路桥梁病害成因分析及综合整治技术研究

姬 雷

中国神华能源股份有限公司神朔铁路分公司 陕西 榆林 719316

摘要：重载铁路桥梁是重载运输的核心枢纽，长期承受大轴重、高频率动载及复杂环境作用，病害频发且影响运营安全。本文系统梳理梁体结构、墩台及基础、桥面系及附属结构的典型病害类型，从荷载、环境、设计、施工、运营养护五个维度，深度剖析各类病害的形成机理。阐述适配重载桥梁的无损检测、智能化检测及现场实测技术，构建科学的病害评估体系，提出针对性的综合整治技术及施工配套措施。研究成果可为重载铁路桥梁病害防控、整治施工提供实用技术支持，保障桥梁结构安全稳定及重载运输有序开展。

关键词：重载铁路；桥梁病害；类型；成因；综合整治技术

引言：随着重载铁路运输量提升及运营年限延长，桥梁结构长期处于复杂受力状态，各类病害逐步显现，不仅降低桥梁耐久性，还威胁行车安全，增加养护成本。当前，重载铁路桥梁病害存在类型多样、成因复杂、整治难度大等问题，现有研究对工程实际针对性不足。基于此，本文以重载铁路桥梁为研究对象，聚焦典型病害类型及成因，探索科学高效的检测评估与综合整治技术，解决工程实际中的病害防控难题，对提升重载铁路桥梁服役性能、保障运输安全具有重要的工程实践意义。

1 重载铁路桥梁典型病害类型

1.1 梁体结构典型病害

梁体作为核心承重构件，长期承受重载动载，病害发生率高：（1）混凝土梁常见表面裂缝、剥落及碳化，裂缝多分布于梁端、跨中及支座附近，以竖向和斜裂缝为主，部分宽度超标；剥落多在梁体侧面及底部，由施工振捣不密实、环境侵蚀导致；碳化超标会降低混凝土强度，加速钢筋锈蚀。（2）预应力混凝土梁主要存在预应力损失、钢绞线锈蚀及锚具失效，前者降低承载能力，钢绞线锈蚀源于防水破损和氯离子侵蚀，锚具失效易引发局部应力集中。（3）钢梁以疲劳开裂、锈蚀及变形为主，开裂集中在焊缝、节点等应力集中部位，锈蚀多见于表面及连接处，变形主要表现为挠度超标。

1.2 墩台及基础典型病害

墩台及基础是桥梁支撑核心，病害直接影响稳定性：（1）墩台常见裂缝、倾斜及混凝土剥落，裂缝多为竖向或横向，由地基不均匀沉降、荷载冲击导致；倾斜多发生在软土地基或冲刷严重区域，影响梁体对位；剥落集中在墩台顶部及底部受力较大部位。（2）基础病害核心为沉降、冲刷及桩基损坏，沉降分均匀与不均匀两类，后者易致墩台倾斜、梁体开裂；冲刷多发生在跨河、跨沟桥

梁，易造成基础掏空；桩基存在锈蚀、断裂及承载力下降问题，源于地下水侵蚀和施工缺陷。

1.3 桥面系及附属结构典型病害

桥面系及附属结构虽不承担主要荷载，但影响行车安全和桥梁耐久性：（1）桥面铺装常见开裂、脱空及破损，裂缝多为横向或纵向，脱空因基层压实不足、排水不畅导致，破损表现为松散、坑槽。（2）支座病害包括老化、脱空、移位及损坏，老化源于橡胶老化、油脂流失，脱空及移位由墩台沉降、梁体变形引发，影响受力传递。（3）伸缩缝主要存在损坏、漏水及堵塞，损坏因重载冲击、安装不当导致，漏水侵蚀梁体及墩台，堵塞易造成桥面积水，加剧其他病害^[1]。

2 重载铁路桥梁病害成因分析

2.1 荷载因素引发的病害成因

荷载因素是重载铁路桥梁病害产生的核心诱因，直接与桥梁结构受力相关，实际工程中主要表现为：（1）重载动载长期冲击，重载列车轴重大、编组多，通过桥梁时产生反复动荷载，超出普通铁路桥梁设计冗余，导致梁体、墩台受力疲劳，逐步引发裂缝、变形等病害。（2）列车超载运行，部分重载线路因运输需求存在超载现象，荷载超出桥梁设计承载力，加剧结构应力集中，加速混凝土剥落、预应力损失等病害发展。（3）荷载分布不均，列车编组偏差、轮轨接触不良等情况，导致桥梁局部受力过大，如梁端、支座、焊缝等部位，易出现局部开裂、损坏。

2.2 环境因素引发的病害成因

环境侵蚀是桥梁病害耐久性下降的主要原因，不同运营环境引发的病害成因存在差异，具体为：（1）温湿度与冻融循环，北方寒冷地区冬季冻融交替，混凝土内部水分结冰膨胀，破坏混凝土结构完整性，引发裂缝、剥

落；高温高湿地区则加速混凝土碳化和钢筋锈蚀。(2) 腐蚀作用，沿海地区氯离子、工业区域有害气体，会侵蚀混凝土保护层和钢梁表面，导致钢筋锈蚀、钢梁变薄，降低结构强度。(3) 地质与水文影响，软土地基区域易发生地基沉降，跨河桥梁基础受水流冲刷，导致墩台倾斜、基础掏空，进而引发桥梁整体病害。

2.3 设计因素引发的病害成因

设计缺陷是桥梁先天病害的主要来源，贴合实际工程的常见成因包括：(1) 荷载考虑不足，设计阶段对重载列车动载冲击、超载可能性预估不足，桥梁结构选型、截面设计不合理，导致服役后受力超出设计限值。(2) 细节设计疏漏，梁体节点、墩台连接、支座选型等细节设计不完善，存在应力集中隐患，易引发局部开裂；防水、排水设计缺陷，导致桥面漏水，侵蚀梁体和墩台。(3) 耐久性设计欠缺，未结合运营环境针对性采用防腐、抗冻措施，如混凝土保护层厚度不足、钢梁防腐涂层设计不合理，加速病害发展^[2]。

2.4 施工因素引发的病害成因

施工质量不达标是桥梁后天病害的重要诱因，实际施工中常见问题为：(1) 混凝土施工缺陷，混凝土振捣不密实、配合比偏差，导致混凝土强度不足、内部孔隙多，易引发裂缝、剥落；预应力张拉工艺不当，导致预应力损失超标，影响梁体承载能力。(2) 钢结构施工缺陷，钢梁焊接质量不合格、焊缝未按规范处理，存在夹渣、未焊透等问题，成为疲劳开裂的隐患；钢结构安装偏差，导致受力不均。(3) 施工验收不严格，对施工过程中的质量问题未及时整改，如桩基施工偏差、支座安装不到位，验收时未发现，服役后逐步引发病害。

2.5 运营养护因素引发的病害成因

运营养护不到位会导致病害快速发展，甚至引发二次病害，具体成因包括：(1) 日常养护缺失，未定期对桥梁进行巡检，裂缝、锈蚀、支座老化等初期病害未及时发现，逐步发展为严重病害；桥面清洁、排水系统维护不及时，导致积水、杂物堆积，加剧桥面铺装和梁体病害。(2) 养护方法不当，对裂缝、锈蚀等病害维修时，未采用规范工艺，如裂缝修补不彻底、钢梁除锈不达标，导致病害反复出现。(3) 运营调整后养护滞后，重载线路荷载调整、运营频率增加后，未及时对桥梁结构进行评估和加固，导致原有结构无法适应新的运营需求，引发病害^[3]。

3 重载铁路桥梁病害检测与评估技术

3.1 核心检测技术

结合重载铁路桥梁服役特点，采用针对性检测技术，

确保检测精准性和高效性：(1) 无损检测技术，应用最广泛，包括超声探伤、回弹法、磁粉检测等，可在不破坏桥梁结构的前提下，检测梁体裂缝、混凝土强度、钢筋锈蚀及钢梁焊缝缺陷，适配重载桥梁核心构件检测需求。(2) 智能化检测技术，依托无人机巡检、红外热像检测等手段，解决高空、跨河等复杂场景检测难题，实现桥梁全域覆盖检测，提升检测效率；结构健康监测技术通过部署传感器，实时采集结构受力、变形等数据，实现病害动态监测。(3) 现场实测技术，针对基础沉降、墩台倾斜等病害，采用水准仪、全站仪等设备进行精准量测，获取病害实际参数，为评估提供可靠数据支撑。

3.2 病害评估技术

基于检测数据，构建科学评估体系，明确病害等级及整治优先级：(1) 评估指标，聚焦结构安全性和耐久性，包括裂缝宽度、沉降量、钢筋锈蚀程度、钢梁疲劳损伤等核心指标，严格遵循行业规范设定限值。(2) 评估方法，采用定性与定量结合方式，结合检测数据、桥梁服役年限及运营荷载，对病害严重程度进行分级，分为轻微、中度、重度三级。(3) 评估应用，根据评估结果，明确病害成因关联及发展趋势，为后续综合整治技术选择、方案设计提供精准依据，确保整治工作针对性和有效性，兼顾安全性与经济性^[4]。

4 重载铁路桥梁病害综合整治技术

4.1 梁体结构病害综合整治技术

针对梁体结构不同病害类型，采用针对性整治技术，贴合工程实际应用：(1) 混凝土梁裂缝整治，轻微裂缝采用环氧树脂封闭法，沿裂缝走向涂刷封闭材料，阻断外界侵蚀；中度、重度裂缝采用低压注浆法，注入高强度注浆材料，修复裂缝完整性，恢复结构受力性能；裂缝伴随混凝土剥落时，先凿除破损部分，清理基层后采用高强度修补砂浆找平，必要时铺设碳纤维布加固。(2) 预应力混凝土梁整治，预应力损失采用体外预应力加固技术，增设体外钢束并张拉，补偿预应力不足；钢绞线锈蚀时，拆除破损防护层，除锈后涂刷防腐涂层，更换老化锚具，重新张拉固定；梁体挠度超标时，采用增设支座垫石、梁底粘贴钢板等方式进行纠偏加固。(3) 钢梁病害整治，疲劳裂缝采用焊接修补法，清理裂缝后进行补焊，焊后打磨平整并做防腐处理；钢梁锈蚀采用喷砂除锈，去除锈蚀层后涂刷底漆和面漆，形成完整防腐体系；钢梁变形采用机械矫正法，精准调整梁体位置，确保符合规范要求。

4.2 墩台及基础病害综合整治技术

围绕墩台及基础稳定性，结合病害成因实施整治，

兼顾施工便捷性和整治效果：(1)墩台病害整治，墩台裂缝采用与梁体裂缝对应的封闭、注浆技术，根据裂缝宽度选择合适工艺；混凝土剥落部位凿除松动部分，采用聚合物修补砂浆修补，增强表面强度；墩台倾斜时，采用配重纠偏或高压喷射注浆加固地基，调整墩台垂直度，避免倾斜加剧。(2)基础病害整治，基础沉降采用换填垫层法，挖除软土基层，换填级配砂石、灰土等材料，提高地基承载力；基础冲刷采用抛石防护、钢筋混凝土护基等方式，阻挡水流冲刷，填补掏空部位；桩基锈蚀、断裂时，采用桩身包裹碳纤维布、注浆加固等技术，修复桩体结构，提升桩基承载力；对严重损坏的桩基，采用植桩加固法，增设新桩基分担荷载。

4.3 桥面系及附属结构病害综合整治技术

针对桥面系及附属结构病害，以快速整治、减少运营干扰为原则，采用实用型技术：(1)桥面铺装病害整治，轻微开裂采用密封胶封闭，脱空部位采用压力注浆填充，破损严重路段进行局部翻修或整体重铺，选用抗重载、抗开裂的铺装材料，完善桥面排水系统，避免积水加剧病害。(2)支座病害整治，支座老化、损坏时，采用同步顶升技术，顶起梁体后更换新支座，确保支座安装平整、对位准确；支座脱空时，采用砂浆或钢板垫塞，调整支座受力状态，避免局部受力过大；支座移位时，采用千斤顶纠偏，固定支座位置，做好密封防护。(3)伸缩缝病害整治，损坏的伸缩缝及时拆除，清理缝隙内杂物，安装新的伸缩装置，确保伸缩灵活；伸缩缝漏水时，修补密封胶，增设防水垫层；缝隙堵塞时，采用高压水枪清理，定期维护确保排水畅通。

4.4 综合整治施工配套技术

为保障整治效果，配套采用施工优化及质量控制技术，贴合重载铁路运营实际：(1)施工组织优化，采用模块化施工方式，合理划分施工区域，避开列车运营高

峰，缩短施工工期，减少对重载运输的干扰；对高空、跨河等复杂部位，采用挂篮施工、无人机辅助作业等技术，提升施工安全性和效率。(2)施工质量控制，整治过程中严格把控材料质量，选用符合重载桥梁要求的修补、加固材料；对关键工序进行全程监测，如焊接质量、注浆密实度、支座安装精度等，确保施工质量达标。(3)后期防护技术，整治完成后，对梁体、墩台等构件增设防腐、防水涂层，定期开展养护维护；对整治部位安装监测传感器，实时跟踪结构状态，及时发现并处理二次病害，延长桥梁服役寿命^[5]。

结束语：本文围绕重载铁路桥梁病害成因及综合整治技术开展系统研究，明确了各类典型病害的表现形式，分析了多因素耦合作用下的病害形成机制，提出了适配工程实际的检测评估方法及分部位综合整治技术，结合施工配套措施保障整治效果。后续可结合运营数据，优化整治技术方案，强化全生命周期养护管理，为重载铁路桥梁安全长效服役提供更全面的技术保障。

参考文献：

- [1]宋宗莹,董军文,李瑞俊,王文斌,徐化雨.既有重载铁路桥梁典型病害分析与处治技术研究[J].世界桥梁,2026,54(2):119-125.
- [2]安生兵.重载铁路线桥偏心病害整治方法研究[J].运输经理世界,2025(31):135-137.
- [3]张佳旺.重载铁路桥梁支座病害分析及改造技术[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(10):0184-0186.
- [4]张丽霞.重载铁路桥梁预应力混凝土梁病害原因分析及整治措施[J].铁道工务,2025,3(2):40-44.
- [5]孙明德,臧晓秋,曹志峰,董亮,葛凯,张国强,张志国.重载铁路桥梁支座病害分析及改造技术[J].铁道建筑,2021,61(10):62-64.