

沿海高铁 CRTSIII 无砟轨道氯盐侵蚀病害分级整治与防护技术体系

刘重鑫

喀什大学 新疆 喀什 844000

摘 要:沿海高铁 CRTSIII 型无砟轨道受氯盐侵蚀影响显著,病害呈渐进发展特征。本文系统分析了氯盐渗透扩散、电化学腐蚀及物理膨胀三重侵蚀机理,构建了涵盖 I 级至 IV 级的病害分级标准,结合外观损伤、氯离子含量、钢筋锈蚀率及轨道平顺度等多维指标实现精准分级。针对各等级病害提出差异化整治技术,并从施工质量控制、主动防护及智能监测三维度建立防护技术体系,为沿海高铁无砟轨道氯盐侵蚀病害的科学管控提供技术支撑。

关键词:沿海高铁; CRTS; III 型无砟轨道; 氯盐侵蚀; 病害分级; 整治技术; 防护体系

引言:沿海高铁 CRTS III 型无砟轨道长期处于高氯盐环境,氯离子渗透引发钢筋锈蚀、混凝土开裂及层间离缝,严重威胁轨道平顺性与行车安全。当前病害整治缺乏系统分级标准,防护措施针对性不足。本文围绕氯盐侵蚀机理,建立四级病害分级体系,提出各等级差异化整治技术,并构建施工控制、主动防护与智能监测相结合的综合防护体系,旨在实现病害精准识别与长效防控,延长无砟轨道服役寿命。

1 氯盐侵蚀机理及其对 CRTSIII 无砟轨道的影响

氯盐侵蚀是寒区、滨海及除冰盐路段 CRTS III 型无砟轨道结构损伤的核心诱因,侵蚀机理以渗透扩散、电化学腐蚀及物理膨胀破坏为主。外界氯离子通过轨道板混凝土表面毛细孔隙、微裂缝持续渗入结构内部,当钢筋表面氯离子浓度达到临界值时,会破坏钢筋表面钝化膜,使钢筋发生电化学锈蚀。锈蚀产生的氧化铁、氢氧化铁等产物体积膨胀 2 至 4 倍,对周边混凝土产生挤压力,逐步引发混凝土开裂、起壳。同时,氯盐在混凝土孔隙内反复结晶、溶融,产生物理膨胀应力,加剧内部孔隙扩张与微裂缝发育^[1]。CRTSIII 无砟轨道为板式整体结构,轨道板、自密实混凝土层、底座板层间粘结性要求极高,氯盐侵蚀造成的结构损伤会直接破坏轨道整体性,引发层间离缝、结构变形等问题,导致轨道平顺性超标,降低列车运行平稳性与安全性,大幅缩短无砟轨道结构服役寿命。

2 氯盐侵蚀病害分级标准

2.1 分级原则与依据

CRTSIII 无砟轨道氯盐侵蚀病害分级遵循安全性、适用性、针对性及可操作性核心原则,结合无砟轨道结

构构造特点、氯盐侵蚀发展规律制定分级体系。分级主要依据混凝土外观损伤状态、钢筋锈蚀程度、结构整体性指标、轨道平顺度参数及氯离子含量检测数据,同时兼顾病害发展速率与对行车安全的影响权重。分级过程严格贴合高铁无砟轨道养护维修规范,区分表层轻微侵蚀、结构性损伤、功能性失效等不同损伤层级,规避单一外观判定的局限性。通过现场无损检测、钻孔取样、钢筋锈蚀率测试等手段,量化各项病害指标,实现定性外观判定与定量数据检测相结合。分级核心目的是精准界定病害危害程度,为差异化整治、分级管控提供科学依据,保障养护施工精准高效,兼顾轨道结构安全与运维经济效益。

2.2 I 级(轻微)——外观完好,指标正常

I 级为轻微氯盐侵蚀病害,是轨道结构受氯盐侵蚀的初始阶段,整体结构无明显损伤,外观状态保持完好。现场观测可见 CRTSIII 轨道板、自密实混凝土层及底座板表面平整光洁,无锈渍、麻面、起皮、裂缝及离缝等外观缺陷,层间粘结紧密,无松动、脱空现象。通过专业检测可知,混凝土内部氯离子含量低于结构侵蚀临界阈值,钢筋钝化膜完整未遭到破坏,无锈蚀电位异常情况。轨道几何平顺度、结构刚度、层间粘结强度等核心技术指标均符合规范标准,不影响列车正常运行及轨道结构服役性能。此阶段氯盐仅附着于混凝土表层孔隙,未向结构深层渗透,病害发展速度缓慢,属于可预防性病害,无需开展结构性维修,仅需落实常态化防护与定期监测,即可有效阻断侵蚀进一步发展。

2.3 II 级(一般)——表面锈渍,局部破损

II 级为一般氯盐侵蚀病害,属于侵蚀发展中期阶段,

结构整体性能基本完好,仅出现表层局部损伤。外观上轨道混凝土表面出现零星点状、片状黄褐色锈渍,多分布于轨道板边角、接缝周边等易渗盐区域,无贯通性裂缝产生。局部混凝土表层出现轻微麻面、起砂、起皮现象,破损深度集中在表层2至5毫米,未伤及结构核心受力区域。经检测,混凝土浅层氯离子含量超标,深层结构氯离子浓度正常,钢筋仅表层轻微活化,锈蚀率极低,未出现截面损失。轨道层间粘结状态良好,无明显离缝、脱空问题,轨道几何尺寸、平顺度指标基本达标,对列车运行安全性、平稳性无显著影响。该层级病害处于可控状态,若及时开展表层修复与防护处理,可彻底阻断侵蚀延伸,避免病害向结构性损伤升级^[2]。

2.4 III级(较重)——顺筋开裂,层间离缝

III级为较重氯盐侵蚀病害,已形成结构性损伤,对无砟轨道服役性能产生明显影响。此阶段氯离子已渗透至钢筋保护层位置,钢筋锈蚀程度加剧,锈蚀产物膨胀引发混凝土顺筋方向开裂,形成长度不等的细微贯通裂缝,裂缝宽度处于0.2至0.5毫米区间。同时,钢筋锈蚀膨胀应力与氯盐结晶膨胀应力叠加,破坏轨道结构层间粘结界面,造成轨道板与自密实混凝土层、自密实层与底座板之间出现局部层间离缝、脱空缺陷。现场检测显示,混凝土内部氯离子含量大幅超标,钢筋锈蚀速率加快,保护层混凝土整体性受损,轨道局部刚度下降,几何平顺度出现偏差。列车通行时,受损结构会产生轻微振动异常,长期服役易导致裂缝扩张、离缝增大,逐步影响轨道结构稳定性,需及时开展专项整治,遏制病害持续恶化。

2.5 IV级(严重)——混凝土剥落,钢筋锈断

IV级为严重氯盐侵蚀病害,属于无砟轨道重度结构性损伤,严重威胁行车安全与结构服役寿命。该阶段钢筋锈蚀程度急剧加剧,锈蚀产物大量堆积,导致保护层混凝土大面积开裂、疏松、剥落,钢筋完全外露。外露钢筋持续受氯盐电化学腐蚀,出现截面大幅缩减、局部锈断、锈蚀穿孔等问题,结构受力钢筋承载能力大幅下降。轨道原有顺筋裂缝贯通延伸,层间离缝大范围扩展,出现大面积脱空、板块松动现象,部分轨道板出现沉降、偏移等变形问题。轨道几何平顺度严重超标,结构整体刚度、稳定性大幅失效,列车通行时振动、冲击响应剧烈,存在重大行车安全隐患。此类病害不可逆,常规表层修复无法恢复结构性能,需进行局部结构拆除重建、钢筋更换及整体加固,是无砟轨道养护中等级最高、处置难度最大的病害类型。

3 氯盐侵蚀病害分级整治技术

3.1 I级(轻微)病害整治

针对I级轻微氯盐侵蚀病害,整治核心以预防管控、阻断侵蚀为主,无需开展结构修复作业。首先对轨道全线病害区域进行全面排查标记,记录氯离子分布区域、表层渗透情况,建立专项病害台账。采用高压无尘清扫设备清理轨道混凝土表面浮尘、杂物及表层附着盐渍,保持结构表面洁净干燥。随后涂刷渗透型硅烷防护剂,利用材料渗透特性填充混凝土表层毛细孔隙,形成致密防水防护层,有效阻隔外界氯离子、水分渗入结构内部。完成防护施工后,定期开展月度巡检与季度氯离子含量检测,动态监测侵蚀发展状态。同时优化轨道周边排水体系,清理排水槽杂物,避免路面积水、融雪盐水长期浸泡轨道结构,从源头降低氯盐侵蚀风险,维持轨道结构完好状态。

3.2 II级(一般)病害整治

II级一般氯盐侵蚀病害整治以表层修复、防腐加固为核心,彻底消除表层损伤与浅层侵蚀隐患。施工前首先采用人工打磨结合高压水射流方式,彻底清除轨道表面锈渍、起砂起皮及疏松混凝土层,直至露出坚实、平整的混凝土基面,清理完成后充分干燥基面。针对浅层受侵蚀混凝土区域,涂刷专用混凝土阻盐防腐底漆,抑制残余氯离子持续反应,阻断钢筋活化锈蚀^[3]。随后采用高强聚合物砂浆进行表层修补,分层抹压成型,修复表层破损缺陷,保证修补区域与原结构平整度一致。砂浆养护达标后,整体涂刷耐候防腐防护涂层,强化结构表层抗渗、抗盐蚀能力。施工后及时复核轨道平顺度,做好养护观测,定期检查修复区域状态,杜绝表层病害反复,防止侵蚀向结构深层发展。

3.3 III级(较重)病害整治

III级较重病害整治聚焦裂缝处置、层间修复、结构加固,恢复轨道结构整体性与受力性能。首先对顺筋裂缝进行开槽处理,清理裂缝内部疏松混凝土与杂质,采用低压注浆工艺灌注环氧注浆液,填充裂缝内部孔隙,粘结开裂混凝土,阻止裂缝继续扩张。针对层间离缝、脱空区域,采用高压注浆方式灌注高强度环氧灌浆料,充实层间空隙,恢复轨道板、自密实层与底座板的粘结整体性,消除结构脱空隐患。对轻微锈蚀钢筋进行除锈防腐处理,涂刷钢筋专用阻锈剂,抑制钢筋持续锈蚀。完成修复后,对受损区域混凝土表层进行补强抹灰,打磨平整保障轨道平顺度。施工完成后开展静动态检测,核验结构刚度、层间粘结强度及轨道几何指标,确保修复后结构性能满足运营规范要求。

3.4 IV 级（严重）病害整治

IV 级严重病害需采用拆除重建、整体加固的综合整治技术，彻底修复重度结构损伤。首先对混凝土剥落、钢筋锈断的受损板块进行精准切割拆除，清除全部疏松、受侵蚀混凝土及失效钢筋，保留完好基层结构。重新绑扎合规规格受力钢筋，替换全部锈蚀破损钢筋，确保钢筋保护层厚度、间距符合设计规范，保障结构承载能力。随后采用高性能抗盐蚀自密实混凝土重新浇筑结构层，优化混凝土配比，添加阻锈、抗渗外加剂，提升新浇结构抗氯盐侵蚀性能。混凝土养护达标后，对新旧结构结合面进行专项防水防腐处理，封堵渗透通道。最后精细调整轨道几何尺寸，打磨整平轨道板面，开展结构承载力、平顺度全面检测，重建轨道结构整体稳定性与服役性能，消除行车安全隐患。

4 氯盐侵蚀防护技术体系

4.1 施工阶段质量控制

施工阶段质量控制是防范 CRTSIII 无砟轨道氯盐侵蚀的基础，核心从原材料、配合比、施工工艺三方面严控结构抗侵蚀性能。原材料进场时严格检验水泥、骨料、外加剂品质，严禁使用含氯超标原材料，选用低碱、抗硫酸盐水泥，采用洁净无氯骨料。优化混凝土配合比设计，精准控制水胶比，合理掺加粉煤灰、矿粉及专用阻锈外加剂，提升混凝土密实度与抗渗抗盐蚀能力，从源头减少内部孔隙缺陷。浇筑施工中严格执行振捣、收面工艺，杜绝蜂窝、麻面、空鼓等施工缺陷，减少氯离子渗透通道。强化混凝土养护管控，保障养护温湿度与养护周期，避免结构产生早期微裂缝。同时规范钢筋保护层施工精度，严控保护层厚度达标，防止钢筋外露引发锈蚀，全面提升轨道结构原生抗侵蚀性能。

4.2 主动型防护技术

主动型防护技术以源头阻隔、提前干预为核心，主动抵御氯盐对无砟轨道结构的侵蚀。常用主动防护技术包含结构表层憎水防护、钢筋前置阻锈、排水系统优化三类。表层防护采用硅烷浸渍、聚脲涂层涂刷工艺，在混凝土表面形成致密防水抗渗防护膜，阻断氯离子、水分渗透路径。钢筋前置防护通过在混凝土拌合阶段掺入复合型阻锈剂，或对钢筋提前涂刷阻锈涂层，从内部抑制钢筋电化学锈蚀反应，提升钢筋抗腐蚀能力^[4]。同时优化轨道整体排水体系，增设边坡排水、界面排水设

施，及时排走融雪盐水、雨水，避免盐水长期滞留轨道结构表面及接缝处。主动防护技术可长期维持结构防护性能，提前规避氯盐累积侵蚀问题，大幅降低后期病害发生概率，实现轨道长效防护。

4.3 智能监测与预警系统

智能监测与预警系统是现代化无砟轨道氯盐侵蚀防控的核心手段，实现病害动态监测、提前预警、精准管控。系统由传感器采集模块、数据传输模块、数据分析终端及预警终端组成，在轨道关键部位布设氯离子浓度传感器、钢筋锈蚀传感器、裂缝位移传感器及温湿度传感器，24 小时实时采集结构氯离子含量、钢筋锈蚀速率、裂缝发展、层间变形等核心数据。通过物联网技术将实时数据传输至云端平台，依托大数据算法分析侵蚀发展趋势，精准判定病害等级与发展风险。当监测数据超出预警阈值时，系统自动发出分级预警信号，推送隐患点位、风险等级及处置建议。技术人员可根据预警信息精准开展巡检与养护整治，实现氯盐侵蚀病害从被动处置向主动预判、精准治理转变，保障轨道结构安全稳定服役。

结束语

沿海高铁 CRTS III 型无砟轨道氯盐侵蚀病害具有渐进性与不可逆性，建立科学分级标准与差异化整治技术是保障轨道安全的关键。本文提出的四级分级体系与对应整治方案，结合主动防护与智能监测手段，可实现从被动修复向主动防控转变。后续应深化智能预警算法研究，推进防护材料耐久性验证，持续完善沿海特殊环境下无砟轨道全寿命周期病害防控技术体系。

参考文献

- [1] 刘光严, 穆松, 蔡景顺, 等. 侵蚀抑制材料对高速铁路无砟轨道现浇混凝土抗冻融性能影响及作用机制 [J]. 铁道建筑, 2022, 62(12): 35-39.
- [2] 王鹏程, 叶阳升, 尧俊凯, 等. 硫酸盐侵蚀条件下无砟轨道路基上拱特性研究 [J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 135-140.
- [3] 任娟娟, 杜威, 邓世杰, 等. 疲劳荷载下无砟轨道混凝土中氯离子传输研究 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(3): 510-516.
- [4] 杨选忠. CRTSIII 型板式无砟轨道底座板开裂原因分析与预防措施 [J]. 江西建材, 2024(1): 210-213, 220.