

城市轨道交通钢轨锈蚀成因及综合治理技术研究

白昭军

天津津铁工程技术有限公司 天津 300000

摘要:城市轨道交通钢轨锈蚀主要由环境因素、杂散电流及应力机械损伤引发。高湿度、盐离子渗透加速电化学腐蚀,杂散电流通过钢轨破损处形成腐蚀回路,动态载荷导致微裂纹扩展与腐蚀协同作用。综合治理采用防锈涂料涂刷、包覆式扣件绝缘及阴极保护技术,通过物理阻隔、电流阻断与电化学保护协同作用,可降低钢轨锈蚀速率超70%,延长使用寿命5-8年,保障轨道交通运营安全。

关键词:城市轨道交通;钢轨锈蚀成因;综合治理技术

引言:城市轨道交通作为城市公共交通的骨干,其安全高效运行至关重要。然而,钢轨锈蚀问题日益凸显,成为制约轨道交通耐久性与安全性的关键因素。钢轨锈蚀不仅增加维护成本、缩短使用寿命,更可能引发断裂等严重事故。其成因复杂,涉及环境侵蚀、杂散电流干扰及机械应力损伤等多方面。因此,深入探究钢轨锈蚀机理,研发高效综合治理技术,对提升轨道交通运营品质、保障行车安全具有重大现实意义。

1 城市轨道交通钢轨锈蚀成因分析

1.1 环境因素

(1) 地铁隧道高湿度环境加速电化学腐蚀:地铁隧道处于地下封闭空间,通风条件有限,地下水渗透、设备冷凝水及列车制动散热等因素,使隧道内相对湿度常维持在80%以上。高湿度环境为钢轨表面的电化学腐蚀提供了必要条件,钢轨中的铁元素与空气中的氧气、水分发生电化学反应,生成氢氧化亚铁,进一步氧化为氢氧化铁(铁锈),且湿度越高,电极反应速率越快,锈蚀进程显著加快。(2) 盐离子渗透对钢轨表面的侵蚀:城市中融雪盐残留、地下水及工业废水渗透等,会使隧道内空气中或附着于钢轨表面的粉尘携带氯离子。氯离子具有强穿透性,能突破钢轨表面的氧化膜,吸附在金属表面并破坏电极平衡,加速阳极溶解过程,同时还会与铁锈反应生成易溶的氯化铁,导致钢轨表面保护层持续失效,加剧锈蚀程度。

1.2 杂散电流腐蚀机制

(1) 轨道交通直流牵引供电系统杂散电流的产生与传播路径:城市轨道交通采用直流牵引供电时,电流经钢轨回流至牵引变电所。若钢轨与大地间绝缘性能下降,部分电流会泄漏形成杂散电流。杂散电流从钢轨破损处流出后,通过土壤、隧道结构钢筋等介质传播,最终在其他低电位区域(如钢轨另一破损点)重新流入钢

轨,形成腐蚀电流回路,引发钢轨局部锈蚀。(2) 轨底、扣件接触区等薄弱部位的电流集中效应:轨底与道床接触部位、扣件与钢轨连接点易因长期振动出现缝隙,导致绝缘性能下降。杂散电流在此类薄弱部位易发生集中,使局部电流密度升高,加速钢轨金属的电化学溶解,形成明显的锈蚀坑或锈蚀带^[1]。

1.3 应力与机械损伤影响

(1) 钢轨动态载荷下的微裂纹扩展与腐蚀协同作用:列车运行时,钢轨承受反复的弯曲、冲击等动态载荷,易在轨头、轨腰等应力集中部位产生微裂纹。环境中的水分、盐离子等腐蚀介质会渗入微裂纹内,一方面通过电化学腐蚀扩大裂纹内部面积,另一方面裂纹扩展过程中会破坏钢轨表面的氧化保护层,形成“应力-腐蚀”恶性循环,加速钢轨锈蚀与结构损伤。(2) 扣件松动导致的接触电阻变化加剧电化学腐蚀:扣件作为钢轨与道床的连接部件,长期使用易出现螺栓松动、弹条老化等问题,导致钢轨与扣件间的接触电阻增大。接触电阻不均会使钢轨表面形成电位差,引发局部电化学反应,同时松动的扣件无法有效固定钢轨,加剧钢轨振动磨损,使腐蚀介质更易侵入,进一步恶化锈蚀情况。

2 城市轨道交通钢轨锈蚀综合治理技术体系

2.1 防锈涂料涂刷技术

(1) 涂料类型的筛选与性能对比:环氧树脂涂料具备优异的附着力与耐化学腐蚀性,能在钢轨表面形成致密薄膜,隔绝水分与盐离子侵入,但低温固化性能较差,且长期处于潮湿环境易出现局部鼓泡;无机富锌涂料以锌粉为主要防锈成分,通过牺牲阳极保护机制抵御腐蚀,耐高温与抗冲击性能突出,适配钢轨动态载荷场景,不过涂层硬度较高,施工时需严格控制厚度以防开裂。实际应用中需结合隧道湿度、钢轨受力部位差异筛选,例如轨头易磨损区域优先选用无机富锌涂料,轨底静态区

域可采用环氧树脂涂料。(2) 轨底及扣件接触区局部涂装的工艺优化: 轨底与扣件接触区存在缝隙, 传统刷涂易导致涂料堆积或漏涂。优化工艺采用“高压无气喷涂+局部人工补涂”组合方式, 先通过高压设备将涂料雾化后均匀覆盖轨底平面, 再用特制小型毛刷对扣件螺栓孔、轨底边缘等死角进行补涂; 同时调整涂装前预处理流程, 增加喷砂除锈等级至Sa2.5级, 确保钢轨表面粗糙度达50–80 μm , 提升涂料附着力, 避免后期因振动出现涂层脱落^[2]。(3) 耐久性测试与经济性分析: 通过加速老化试验模拟隧道环境, 将涂覆试样置于温度40 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度90%且含5%氯化钠的密闭空间, 环氧树脂涂料可维持18–24个月无明显锈蚀, 无机富锌涂料使用寿命可达24–30个月; 经济性方面, 无机富锌涂料单平米施工成本较环氧树脂高15%–20%, 但因更换周期延长30%, 全生命周期成本反而降低8%–12%, 更适合长期运营线路。

2.2 包覆式扣件绝缘技术

(1) 扣件结构设计: 全包覆型扣件采用玻璃纤维增强塑料(FRP)对扣件主体进行整体包覆, 仅在受力关键部位保留金属芯, 实现全表面绝缘; 复合绝缘层扣件则在金属扣件表面依次涂覆聚酰亚胺底层与聚四氟乙烯表层, 底层提升附着力, 表层增强耐磨性。两种结构相比, 全包覆型绝缘性能更优(体积电阻率 $\geq 10^{14}\Omega\cdot\text{cm}$), 但重量增加15%; 复合绝缘层重量接近传统扣件, 绝缘性能略低(体积电阻率 $\geq 10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$), 适用于对扣件重量敏感的曲线轨道段。(2) 绝缘材料性能要求: 材料需满足地铁运营环境要求, 耐磨损性能需通过10万次往复摩擦试验, 磨损量 $\leq 0.1\text{mm}$; 抗老化性能需经紫外老化试验(累计辐照量1500 kJ/m^2)后, 拉伸强度保留率 $\geq 80\%$; 高电阻率要求在温度–30 $^{\circ}\text{C}$ 至60 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度95%条件下, 体积电阻率稳定维持在 $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上, 避免环境变化导致绝缘失效。(3) 现场安装工艺与长期稳定性验证: 安装时采用扭矩扳手精准控制螺栓预紧力(根据扣件型号设定为30–50 $\text{N}\cdot\text{m}$), 防止过紧破坏绝缘层或过松导致缝隙; 安装后通过接地电阻测试仪检测轨地绝缘电阻, 需 $\geq 10\Omega$ 。长期稳定性验证通过跟踪运营线路3年数据, 全包覆型扣件绝缘失效率仅0.3%, 复合绝缘层扣件失效率1.2%, 均满足运营安全要求^[3]。

2.3 阴极保护技术

(1) 锌片安装位置(轨底脚与轨距块)的腐蚀电流分布模拟: 通过COMSOL Multiphysics软件模拟可知, 轨底脚与轨距块为杂散电流集中区域, 此处安装锌片(纯度 $\geq 99.99\%$)可使腐蚀电流密度从0.2 mA/cm^2 降至0.05 mA/cm^2 以下。模拟结果显示, 轨底脚每侧安装2片长

100 mm 、宽50 mm 、厚5 mm 的锌片, 轨距块对应位置安装1片同规格锌片, 可形成均匀的保护电流场, 覆盖钢轨易锈蚀区域, 避免局部保护盲区。(2) 锌片尺寸与材料选型对保护效果的影响: 锌片尺寸需结合钢轨型号调整, 60 kg/m 钢轨适配锌片尺寸为100 $\text{mm}\times 50\text{mm}\times 5\text{mm}$, 50 kg/m 钢轨适配80 $\text{mm}\times 40\text{mm}\times 4\text{mm}$; 材料选型上, 纯锌片牺牲效率达90%以上, 而锌铝合金(锌含量95%、铝含量5%)牺牲效率虽提升至95%, 但成本增加25%, 综合保护效果与经济性, 纯锌片更适合大规模应用^[4]。(3) 多技术协同作用下的电位控制策略: 当阴极保护技术与防锈涂料、包覆式扣件绝缘技术协同使用时, 需通过参比电极(铜/硫酸铜电极)实时监测钢轨表面电位, 控制保护电位在–0.85V至–1.2V(相对于铜/硫酸铜电极)。若电位高于–0.85V, 需增加锌片数量; 若电位低于–1.2V, 需减少锌片或调整涂料厚度, 避免过度保护导致钢轨氢脆。协同应用后, 钢轨锈蚀速率可降低70%以上, 延长钢轨使用寿命5–8年。

3 城市轨道交通钢轨锈蚀综合治理技术实验设计与结果分析

3.1 实验平台搭建

(1) 模拟地铁隧道环境(湿度、盐雾、杂散电流)的加速腐蚀试验舱: 试验舱尺寸为3 $\text{m}\times 2\text{m}\times 2\text{m}$, 内置温湿度控制系统、盐雾发生装置及杂散电流模拟模块。通过调控参数模拟典型地铁隧道环境: 温度维持 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $85\pm 5\%$, 盐雾浓度(以NaCl计)5%, 杂散电流密度0.2 mA/cm^2 , 实验周期设定为90天, 以加速钢轨锈蚀进程, 缩短测试周期。(2) 钢轨试样分组(对照组、单一技术组、综合治理组): 选取60 kg/m 标准钢轨, 切割为100 $\text{mm}\times 50\text{mm}\times 15\text{mm}$ 的试样, 每组3个平行试样, 共分5组。对照组: 无任何防护措施的裸钢试样; 单一技术组1: 仅涂刷无机富锌涂料; 单一技术组2: 仅采用全包覆式扣件绝缘; 单一技术组3: 仅安装锌片阴极保护; 综合治理组: 同时采用无机富锌涂料+全包覆式扣件绝缘+锌片阴极保护技术。

3.2 关键指标监测

(1) 腐蚀速率(失重法、电化学阻抗谱): 失重法通过实验前后试样称重(精度0.1 mg)计算腐蚀速率, 公式为 $v = (m_0 - m_1) / (S \times t)$ (v 为腐蚀速率, m_0 、 m_1 分别为实验前后质量, S 为试样表面积, t 为实验时间); 电化学阻抗谱采用三电极体系(工作电极为钢轨试样, 参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为铂电极), 测试频率范围 10^{-2} – 10^5Hz , 通过阻抗谱拟合获取电荷转移电阻, 反映腐蚀反应难易程度^[5]。(2) 绝缘电阻(扣件系统): 采用

数字绝缘电阻测试仪（量程 $0\sim 10^{15}\Omega$ ），测量扣件与钢轨、扣件与道床模拟件间的绝缘电阻，每15天测试1次，记录数据变化趋势。（3）锌片消耗速率与钢轨电位变化：通过称重法计算锌片消耗速率，公式为 $v_{Zn} = (m_{Zn0} - m_{Zn1}) / (S_{Zn} \times t)$ （ m_{Zn0} 、 m_{Zn1} 为锌片实验前后质量， S_{Zn} 为锌片表面积）；采用铜/硫酸铜参比电极，每周监测钢轨表面电位，记录电位波动范围。

3.3 实验结果对比

表1各组钢轨试样腐蚀速率及锈蚀抑制率对比

| 组别 | 腐蚀速率（mm/a） | 锈蚀抑制率（%） |
|--------------|------------|----------|
| 对照组 | 0.32 | 0 |
| 单一技术组1（涂料） | 0.15 | 53.1 |
| 单一技术组2（绝缘） | 0.18 | 43.8 |
| 单一技术组3（阴极保护） | 0.11 | 65.6 |
| 综合治理组 | 0.05 | 84.4 |

（2）各技术模块的协同增益分析：通过对比单一技术与综合治理的效果，计算协同增益（协同增益=综合治理抑制率-各单一技术抑制率平均值）。各单一技术抑制率平均值为 $(53.1\%+43.8\%+65.6\%) / 3 \approx 54.2\%$ ，协同增益达 $84.4\% - 54.2\% = 30.2\%$ 。其中，涂料隔绝腐蚀介质、绝缘技术减少杂散电流泄漏、阴极保护抑制电化学腐蚀，三者形成“物理阻隔-电流阻断-电化学保护”的协同机制：涂料降低锌片与腐蚀介质接触，延长其使用寿命；绝缘技术减少杂散电流干扰，提升阴极保护电位稳定性；阴极保护弥补涂料破损处的局部防护漏洞，三者互补，大幅提升防锈效果。

结束语

城市轨道交通钢轨锈蚀问题，是影响轨道交通安全稳定运行与长期效益的“顽疾”。本研究深入揭示了环境、杂散电流、应力机械损伤等因素耦合作用下的锈蚀机理，创新性地提出防锈涂料、包覆式扣件绝缘、阴极保护的

（1）综合治理技术对锈蚀抑制率提升效果（如 $> 80\%$ ）：实验结束后，各组腐蚀速率及锈蚀抑制率数据如下表所示。由表可知，对照组腐蚀速率最高，达 0.32mm/a ；单一技术组中，阴极保护组效果最优，腐蚀速率 0.11mm/a ，抑制率 65.6% ；综合治理组腐蚀速率仅 0.05mm/a ，锈蚀抑制率高达 84.4% ，远超单一技术组，验证了综合治理技术的优异防锈效果。

综合治理技术体系。实验数据有力证实，多技术协同可大幅提升锈蚀抑制效果。未来，需进一步融合智能监测与自适应防护技术，实现精准高效运维，为城市轨道交通的安全、持久运行筑牢根基。

参考文献

- [1]韩旭.城市轨道交通钢轨伤损原因及维护管理对策[J].时代汽车,2024(15):178-180.
- [2]王建立.城市轨道交通钢轨预打磨施工技术研究[J].铁道标准设计,2021,65(8):38-41.
- [3]李明华.轮轨接触力学在钢轨打磨中的应用[J].城市轨道交通研究,2022,25(5):158-160.
- [4]赵冠闯,丁军君.钢轨打磨偏差研究进展与展望[J].铁路采购与物流,2021,16(12):98-100.
- [5]贾军.铁路道岔打磨技术装备现状与应用分析[J].中国铁路,2022,(07):89-91.