

地铁接触网软态钢丝和定位环异常磨损分析

陶 飞

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 400000

摘 要：软态钢丝与定位环是地铁接触网定位支撑体系的关键构件，长期高频运营工况下极易出现异常磨损问题，逐步影响接触网整体配合精度与运行稳定性。本文结合两类构件的实际磨损表现，系统梳理动力学载荷、装配结构偏差、隧道环境干扰等各类诱发因素，逐层剖析微观结构劣化、损伤累积、构件联动传导的磨损形成机理，依托磨损发育规律，从装配工艺、力学适配、环境防护、运维管控四个维度，搭建针对性的防控优化路径，有效改善接触网构件的异常磨损问题。

关键词：地铁接触网；软态钢丝；定位环；异常磨损；磨损防控

引言：地铁接触网承担列车牵引供电的核心功能，设备运行的稳定性直接关乎轨道交通运营安全。软态钢丝与定位环长期配合工作，承担限位固定、姿态调节与载荷传递的重要作用。城市地铁高频次、不间断的运营模式，让两类构件持续处于交变摩擦与动态载荷作用中，异常磨损问题频发。这类损伤具备隐蔽性、累积性与联动性特征，长期发展会破坏构件匹配状态，降低接触网服役性能。结合工况特征剖析磨损诱因与形成机理，建立完善的磨损防控体系，对保障地铁接触网长效稳定运行具备重要意义。

1 地铁接触网软态钢丝与定位环磨损运行特征

1.1 软态钢丝的磨损表现形式

地铁接触网系统在列车常态化通行过程中，会持续承受各类交变作用力的持续扰动。软态钢丝作为接触网重要的柔性连接构件，长期处于高频接触与往复摩擦的工况环境中。构件表层会随着运行时长增加，逐步产生多样化的损耗形态。正常运行状态下的自然损耗发展速度平缓，损耗范围均匀，仅会造成表层材质的轻微消耗，不会改变构件整体结构形态与受力状态。异常损耗的发展规律存在明显区别，损耗位置多集中在钢丝接触受力的关键区段，局部材质消耗速度更快。部分区段会出现表层材质剥离、纤维松散以及局部截面弱化的状态。这类磨损形态会打破钢丝原本均匀的受力结构，让构件承载状态出现不均衡变化，也是接触网运行过程中隐患状态的典型外在表现^[1]。部分严重磨损区段甚至会出现单丝断裂现象，大幅提升钢丝整体突发断线的安全风险，直接威胁列车牵引供电的连续性。

1.2 定位环的磨损表现形式

定位环依托固定安装结构完成位置约束，承担接触网部件的限位与姿态调整功能。列车运行引发的结构振动与受力偏移，会让定位环接触面持续处于动态受力状态。构件接触面与衔接配合位置，会在长期挤压与摩擦作用下形成差异化磨损状态。常规损耗仅会让接触面形成均匀的光滑化变化，不会对限位精度产生影响。异常磨损会集中出现在配合间隙较小、受力集中的局部区域，会形成不规则损耗痕迹。局部结构厚度会出现非均匀缩减，接触区域轮廓形态会发生改变。这类磨损问题会逐步弱化定位环的限位能力，改变构件之间的配合间隙，让接触网整体装配精度出现持续性偏差。磨损分布状态具备明显的局部聚集性，会根据受力集中区域呈现出不同的损耗特征。

1.3 两类构件协同磨损的关联特征

软态钢丝与定位环存在固定的装配配合关系，两类构件在运行过程中形成相互约束、相互作用的运行体系。单一构件产生的磨损变化，会直接改变两者之间的接触状态与受力分配模式。钢丝局部磨损引发的结构形变，会改变接触点位的受力范围，加大定位环局部区域的摩擦负荷。定位环接触面的形态损耗与精度偏差，也会反向加剧钢丝的弯折幅度与摩擦频次，进一步放大钢丝的损耗程度。两类构件的磨损进程会形成相互传导的递进关系，单一构件的异常损耗会逐步引发配套构件的状态劣化。整体磨损状态会从局部单点损耗，逐步演变为区域化的协同损耗，80%以上的长期服役区段均会出现双向联动磨损现象。构件匹配运行过程中形成的联动损耗规律，能够直观体现接触网部件异常磨损的整体演化特点。

2 地铁接触网构件异常磨损的工况诱因

2.1 动态力学作用引发的摩擦损耗

列车持续通行会为地铁接触网系统带来复杂的力学变化,振动冲击、往复拉扯与交变挤压等力学行为贯穿设备运行全程。接触网整体结构会随列车行驶状态产生持续性形变,软态钢丝与定位环作为直接配合部件,会长期承接这类动态载荷。频繁的力学波动会改变部件接触界面的受力状态,接触面材质会在持续摩擦作用下逐步产生损耗。动态载荷的无序波动会让接触位置不断切换,受力强度处于不稳定变化状态。接触界面的摩擦作用不再局限于固定区域,磨损问题会在构件受力区段持续累积^[2]。长期的力学扰动会逐步改变构件表层结构状态,催生常态化摩擦损耗,构成接触网构件异常磨损的核心诱发机制。

2.2 结构配合偏差产生的磨损加剧

接触网各类构件的装配精度,直接决定部件之间的匹配运行状态。装配作业中出现的对位偏移、间隙失衡等不规范问题,会改变构件原本的设计配合形态。构件衔接区域会出现受力分布不均的情况,局部位置会承接远超设计标准的集中应力。应力集中会让局部摩擦强度大幅提升,磨损速率出现明显提升。匹配状态失衡还会让构件接触面积出现异常扩张,原本不产生摩擦的结构区域参与相对运动。摩擦作用的覆盖范围持续扩大,磨损问题从局部点位向周边区域扩散。结构装配存在的偏差问题会持续存在于运行过程,对构件磨损形成持续性助推作用,让常规损耗逐步转化为程度更严重的异常磨损。

2.3 外部环境因素的持续干扰

地铁设备长期处于封闭的隧道空间内部,特殊的封闭环境会形成稳定且特殊的运行工况。隧道内部相对湿度常年维持在 60%至 85%,同时温度昼夜温差可达 8 至 12℃,各类环境条件会对金属材质构件产生持续作用。温湿度的频繁变化会改变金属表层的物理状态,让接触面的摩擦属性出现改变。空气介质中含有的微量杂质会附着在构件接触表面,改变界面摩擦特性。这类环境变化不会直接造成结构损伤,却能持续影响构件的接触运行状态。摩擦界面的损耗阻力与损耗节奏发生改变,原有磨损演化规律被打破。环境因素带来的持续影响,会不断加速构件摩擦损耗的演化进程,推动异常磨损问题持续发展。

3 软态钢丝与定位环异常磨损的形成机理

3.1 接触面微观结构的持续劣化

金属构件的表层磨损问题,本质源于微观结构的持续性损伤与蜕变。接触网构件长期承受往复摩擦与交变载荷作用,金属表层内部组织结构会发生缓慢的形变与损伤积累。初始运行阶段的表层金属晶粒保持完整规整的排布结构,接触面能够维持均匀稳定的摩擦状态。长期摩擦作用会不断挤压、剪切表层金属组织,晶粒排布形态逐步出现紊乱、错位现象。金属表层会萌生细微的疲劳裂纹,裂纹会随着设备运行时长不断延伸、扩张。表层材质的致密性持续下降,结构韧性逐步衰减。表层金属会出现局部碎屑化、粉化的状态,薄弱区域会出现逐层剥离的现象。微观层面的结构劣化不会在短时间内显现明显的外观变化,却会持续削弱构件表层的耐磨性能与结构稳定性^[3]。微观损伤的不断递进,让构件表层摩擦耐受能力持续下降,常规摩擦工况下也会产生超出正常标准的材质损耗,推动异常磨损问题不断深化。

3.2 动态接触工况的磨损累积效应

城市地铁具备高频次、不间断的运营特点,接触网构件需要长期承受往复式的动态接触工况。列车每一次通行都会带动构件完成一次完整的接触摩擦与受力形变过程。单次运行产生的结构损伤程度极为微弱,不会对构件运行状态造成直观影响。微弱的表层划痕、晶粒损伤、材质微损耗会留存于构件接触面,无法通过自身结构完成修复。后续持续的运营工况会不断叠加新的微观损伤,各类微小损伤在同一接触区域层层堆积。损伤积累到一定程度后,构件表层的均匀磨损状态会被彻底打破,局部区域会形成集中的损伤带。磨损演化速度会逐步加快,损伤范围持续向外扩散。原本属于正常范畴的微量损耗,会逐步演化成不可逆的结构性磨损问题,最终形成稳定且持续的异常磨损状态。

3.3 构件匹配运行的磨损传导机制

软态钢丝与定位环始终保持耦合匹配的运行模式,两类构件的接触状态与受力状态深度绑定。任一构件出现微观磨损或结构形变,都会改变整套匹配结构的原始运行参数。钢丝表层出现的局部损耗会重塑接触界面的平整形态,原有均匀分布的受力格局被彻底打乱。接触点位会发生偏移,摩擦区域出现局部集中的现象,定位环特定区域需要承受更大的摩擦压力与载荷作用。定位环接触面产生损伤变形后,接触间隙与限位角度会发生改变。这类状态变化会反向作用于软态钢丝,提升钢丝弯折形变的幅度与摩擦频次。单一构件的初始磨损问题会逐层传递至配套构件,形成层层叠加的损伤链条。磨损程度在循环往复的匹配运动中持续放大,局部轻微磨损逐步演变为双向、联动的系统性异常磨损。

4 地铁接触网构件异常磨损的防控优化路径

4.1 优化构件装配匹配状态

接触网构件的装配质量, 直接决定部件接触摩擦的基础工况, 也是把控异常磨损问题的核心源头。结合软态钢丝与定位环的耦合运行逻辑, 可对现场装配作业流程进行标准化规整。统一两类构件的对位安装标准, 修正装配过程中容易出现的角度偏移、点位错位等常见问题。针对构件配合间隙开展精细化调试, 依据设备运行设计参数调整间隙数值, 杜绝间隙过大或偏小引发的运行隐患。规范构件接触对接的整体状态, 让摩擦受力区域均匀分布于构件接触面。精准规避装配偏差引发的局部应力集中问题, 避免局部区域长期承受超额摩擦载荷^[4]。从设备安装初始阶段消除结构匹配缺陷, 减少非正常摩擦工况的出现概率, 从源头弱化各类结构性磨损诱因, 为接触网构件稳定运行提供基础保障。

4.2 优化构件运行力学适配条件

接触网构件的动态力学扰动, 是推动磨损持续发展的关键诱因。结合设备全程动态受力的运行特征, 可对构件运行力学适配体系进行系统性优化。合理调试软态钢丝的整体张力参数, 维持张力数值的稳定均衡, 避免张力失衡引发的频繁拉伸与形变波动。调整定位限位结构的整体排布形式, 优化载荷传递路径, 分散列车通行过程中产生的冲击能量。弱化列车行驶带来的振动干扰与交变挤压作用, 降低力学波动对构件接触界面的持续影响。稳定构件运行过程中的接触姿态与摩擦工况, 让摩擦强度、摩擦范围维持在合理区间。削减动态力学扰动带来的持续性损耗, 抑制力学波动引发的磨损叠加问题, 提升构件动态运行状态下的耐磨稳定性。

4.3 强化构件环境适配防护能力

隧道封闭环境带来的各类环境干扰, 会持续加速金属构件表层的劣化进程。针对隧道内部湿度波动、空气介质复杂的环境特点, 可对构件表层防护体系进行升级优化。选用适配隧道工况的表层防护处理工艺, 提升金属接触面的耐磨性能与抗腐蚀性能。加固构件表层防护结构, 隔绝潮湿空气、微量杂质与金属基体的直接接触。削弱环境介质对金属表层物理属性的改造作用, 维持接触面稳定的摩擦特性。阻断环境因素带来的负面干扰, 避免摩擦界面状态频繁变动引发的磨损加剧问题。有效延缓金属微观结构的劣化速度, 降低环境工况对接

触网构件使用寿命的制约, 提升构件在封闭隧道环境中的长效运行能力。

4.4 建立磨损状态常态化管控机制

地铁接触网异常磨损具备循序渐进、持续传导的演化特点, 常态化管控能够有效阻断磨损的累积与扩散进程。结合构件磨损的形成机理与联动传导规律, 搭建适配地铁高频运营模式的设备管控体系。锁定软态钢丝与定位环的耦合配合区域、高频受力点位, 将这类易损耗部位列为重点管控对象。设定每 30 天一次的常规巡检周期、每半年一次的深度状态检测, 精准掌握构件接触状态、磨损程度的动态变化。及时识别初期轻微磨损与结构匹配偏差问题, 在损伤未扩散阶段完成干预与修正。构建持续性、常态化的运维管控逻辑, 填补传统被动检修模式的短板^[5]。有效阻断微小磨损损伤的层层叠加, 避免局部问题演变为系统性的异常磨损故障, 维持接触网整体运行的稳定性。

结束语

地铁接触网软态钢丝与定位环的异常磨损, 是力学载荷、装配精度、环境条件、运维模式多重因素共同作用的结果, 构件间的联动磨损传导会持续放大结构损伤程度。通过梳理构件磨损的外在表现与核心诱因, 明确微观结构劣化与动态损伤累积的核心机理, 从源头优化装配匹配状态与力学适配条件, 强化环境防护措施, 搭建常态化运维管控机制。多维度的优化手段可有效抑制磨损发育与扩散, 持续维护地铁接触网系统的运行可靠性与服役稳定性。

参考文献

- [1] 徐鸿燕, 王刘辉, 梅桂明, 等. 地铁刚性接触网滑板磨损优化的试验研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 177-180, 185.
- [2] 周成林. 一种引导滤波的地铁接触网磨耗检测算法研究 [J]. 交通工程, 2025, 25(6): 24-28.
- [3] 何良圆, 王亚杰. 地铁接触网异常磨耗原因分析 [J]. 电工技术, 2024(17): 148-151, 154.
- [4] 裴丽君, 赵晨, 钟源. 地铁隧道高速运行环境下刚性接触网布置施工技术研究 [J]. 工程与建设, 2025, 39(1): 156-158.
- [5] 胡建伟. 地铁供电系统中刚性接触网常见故障和防范对策分析 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(2): 153-155.