

弓网异常磨耗分析及解决方案

邱伟明 贺佳琦 李 懋 陈忠明

(广州地铁集团有限公司, 511430, 广州)

摘 要 [目的] 弓网异常磨耗在严重情况下, 可能导致接触线断裂并引发网络塌陷, 直接造成供电中断, 进而可能诱发交通事故。因此, 有必要对其进行分析并研究解决方案。[方法] 基于对广州地铁 3 号线的深入分析, 结合隧道温湿度监测、碳滑板与接触线表面状态检查、检修频次加密、接触网热滑频次提升及专项打磨作业等手段, 系统探究了冬季大幅度降温干燥时段对弓网磨耗的影响, 并提出了相应的特殊维护策略。[结果及结论] 针对弓网异常磨耗这一复杂现象, 广州地铁通过深入分析发现, 降温、湿度以及接触面廓形匹配是其关键影响因素。所采取的优化措施显著改善了弓网关系, 为全国多个城市面临的刚性接触网弓网异常磨耗问题提供了有效的解决方案, 并取得了显著的成效。

关键词 地铁; 弓网; 异常磨耗; 相对湿度

中图分类号 U231.94: TM922.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.051

Analysis and Solutions for Pantograph-Catenary Abnormal Wears

QIU Weiming, HE Jiaqi, LI Mao, CHEN Zhongming

(Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 511430 Guangzhou, China)

Abstract [Objective] Severe abnormal wear of PC (pantograph-catenary) systems can lead to the breakage of contact wires and the collapse of the overhead network, directly causing power supply interruptions and potentially triggering traffic accidents. Therefore, it is essential to analyze this issue and develop effective solutions. [Method] Based on a thorough analysis of Guangzhou Metro Line 3, various measures are adopted, including monitoring tunnel temperature and humidity, inspecting the surface conditions of carbon strips and contact wires, increasing maintenance frequency, enhancing thermal sliding operations, and conducting specialized grinding work. The impact of significant temperature drops and dry conditions during winter on PC wear is explored and corresponding special maintenance strategies are proposed. [Result & Conclusion] Targeting the complicated phenomenon of PC abnormal wear, Guangzhou Metro identifies temperature drops, humidity, and

surface profile matching of contact components as key factors influencing abnormal wear through in-depth analysis. The implemented optimization measures significantly improve the PC interaction, and provide an effective approach to addressing abnormal wear in rigid catenary systems encountered by many Chinese cities, achieving remarkable results.

Key words metro; pantograph and catenary; abnormal wear; relative humidity

地铁弓网作为供电系统的关键组件, 其运行状态直接关系到地铁的安全运营与乘客体验。针对地铁弓网异常磨耗现象, 本文基于广州地铁 3 号线的实际案例, 深入分析了异常磨耗的原因, 并提出了相应的改善措施。

1 问题概述

广州地铁 3 号线曾 2 次出现弓网异常磨耗情况。首次发生在 2019 年 12 月, 列车受电弓碳滑板表面局部粗糙析铜, 接触线表面呈现亮铜色, 磨耗率急剧上升, 最大达到 56 mm/万 km, 导致全线接触网受损。通过应急处置与整治措施, 历时 3 个星期恢复正常。第二次发生在 2021 年 1 月大降温干燥时期, 同样发现碳滑板表面粗糙析铜现象, 但得益于及时的针对性检查和打磨, 异常磨耗得到有效控制。图 1 为受电弓碳滑板局部粗糙实景图。图 2 为接触线出现亮铜色实物图。

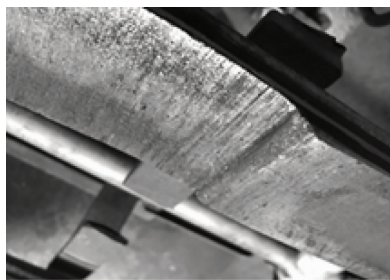


图 1 受电弓碳滑板局部粗糙实景图

Fig. 1 Photo of local roughness on pantograph carbon strips



图2 接触线出现亮铜色实物图

Fig. 2 Photo of contact wire exhibiting a bright copper color

2 原因分析

地铁弓网异常磨损是一个跨学科的复杂问题,涵盖了摩擦学、材料学、电化学、电接触学和传热学等多个领域。基于行业理论研究与现场数据的综合分析,本文主要从环境温湿度影响和弓网接触面廓形匹配两个方面深入探讨地铁弓网异常磨损的原因。图3为弓网异常磨损鱼骨图。

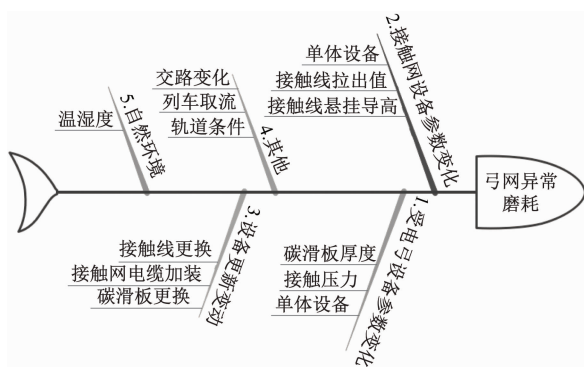


图3 弓网异常磨损鱼骨图

Fig. 3 Fishbone diagram of abnormal PC wear

2.1 环境温湿度对弓网磨损的影响

通过对2019年12月和2021年1月地铁弓网异常磨损期间的环境数据进行详细调查,发现这两个时间段内降雨稀少,天气干燥,相对湿度偏低,且均处于大幅度的降温时期。进一步的数据采集揭示,隧道内的环境温度相对稳定,但相对湿度的变化幅度显著,甚至出现了急剧下降的现象。

现场跟踪观测与文献分析显示,在低湿度环境下,由于水汽缺乏,大量细小的铜颗粒和磨屑容易附着在磨损表面上,导致黏着磨损和磨粒磨损的程度加剧,形成犁沟状的磨损痕迹。随着湿度的逐渐上升,水汽增多,在接触区域形成了不完整的吸附水膜,这在一定程度上减轻了黏着磨损和磨粒磨

损。同时,水分子被电离出的氢氧根离子和氧离子促进了材料表面的氧化过程,从而有效地隔离了金属-金属的直接对磨,进一步减小了黏着磨损。因此,合理的潮湿条件有利于减少滑板磨损,而低湿度则是弓网异常磨损的主要诱发因素。图4为异常磨损期间月份雨量与历年对应时期比较。图5为3号线隧道环境温湿度数据。

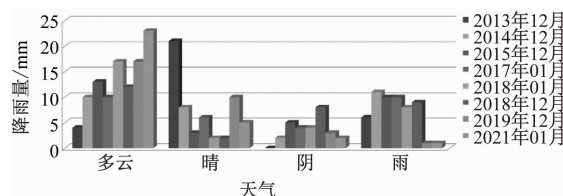


图4 异常磨损期间月份雨量与历年对应时期比较

Fig. 4 Comparison of monthly rainfall during the period of abnormal wear with corresponding periods in previous years

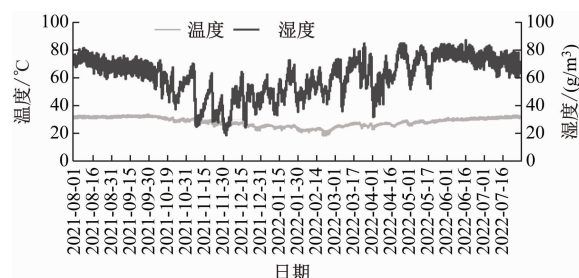


图5 3号线隧道环境温湿度数据

Fig. 5 Temperature and humidity data for Line 3 tunnel environment

图6为碳膜不完整时的碳滑板表面状态。在地铁运行过程中,碳滑板与接触线表面均会出现凹凸不平和平磨耗凹槽。当受电弓碳滑板滑过接触线局部磨耗区域时,不平整的接触面导致弓网磨损显著增加,同时微小的接触间隙放电进一步加剧了接触面的烧蚀和磨损。



图6 碳膜不完整时的碳滑板表面状态(碳膜不完整)

Fig. 6 Surface condition of carbon strip when the oxide film is incomplete

经过排查,发现异常磨耗主要集中在接触线磨耗剩余厚度在 3.0 ~ 7.5 mm 的范围内,且伴随有汇流排被刚蹭的现象。此外,碳滑板在距中心线两侧 200 mm 附近的不平顺程度尤为明显,出现磨耗凹槽且斜面角度较大。分析指出,碳滑板磨耗凹槽的凸起部分与汇流排发生刚蹭,同时接触线磨耗棱边对碳滑板产生了类似切割的磨耗作用。

对该时期的碳滑板和接触线表面状态进行了持续跟踪。在 2021 年 11 月 7 日,地面环境出现大幅度降温,隧道内相对湿度降低了接近 20%。2021 年 11 月 13 日的检查发现,个别受电弓碳滑板在拉出值约 200 mm、靠近棱边处的表面略显粗糙,碳膜不明显,甚至出现了轻微犁沟状磨耗。随着隧道湿度的逐渐回升,碳滑板表面的碳膜状态开始逐步恢复。然而,在 2021 年 12 月初,当相对湿度再次降至 20% 以下时,碳滑板表面状态出现了轻微反复。但随着隧道湿度的继续增加,碳滑板表面又逐步形成了完整的碳膜,犁沟状磨耗现象也逐渐减少。与此同时,接触线局部表面的碳膜保持完整状态,如图 7 所示。



图 7 接触线表面状态(碳膜完整)

Fig. 7 Surface condition of contact wire (intact oxide film)

结合现场跟踪观测与文献[1]的理论分析,可以得出结论:在低湿度环境下,由于环境水汽缺乏,大量细小的铜颗粒和磨屑容易附着在磨损表面上,导致黏着磨损和磨粒磨损加剧,形成犁沟状磨耗。随着湿度的增加,水汽逐渐增多,在接触区域形成不完整的吸附水膜,从而减轻了黏着磨损和磨粒磨损。此外,水分子被电离出的氢氧根离子和氧离子促进了材料表面的氧化过程,有效地隔离了金属-金属的直接对磨,进一步减小了黏着磨损。因此,存在一个合理的潮湿度范围,有利于减少地铁弓网滑板磨耗。而低湿度则是弓网异常磨耗出现的主要诱发因素。

2.2 弓网接触面廓形匹配对弓网磨耗的影响

在地铁车辆运行过程中,碳滑板与接触线的相

互作用导致碳滑板表面出现凹凸不平及磨耗凹槽,而接触线则呈现出局部波状磨耗。当受电弓碳滑板滑过接触线局部磨耗区域时,不平整的弓网接触面会加剧弓网磨耗。此外,弓网接触面间微小的接触间隙放电进一步导致接触面烧蚀,从而加速碳滑板与接触线的磨耗进程。

针对 2021 年 1 月份接触线线面异常磨耗现象的位置进行了详细排查。结果显示,异常磨耗区段主要集中在接触线磨耗剩余厚度介于 3.0 ~ 7.5 mm 的范围内,且伴随有接触线汇流排被刚蹭的情况。在部分列车上,碳滑板距中心线两侧 200 mm 附近的不平顺程度较为明显,出现磨耗凹槽,且斜面角度较大。通过分析认为,弓网磨耗过程中,碳滑板磨耗凹槽的凸起部分与汇流排发生刚蹭,同时接触线磨耗棱边对碳滑板产生了类似切割的磨耗作用,具体形态如图 8 和图 9 所示。



图 8 接触线与碳滑板接触剖面图

Fig. 8 Cross-sectional diagram of contact between contact wire and carbon strip



a) 接触线

b) 碳滑板

图 9 汇流排刚蹭和碳滑板凹槽图片

Fig. 9 Photos of busbar scratching and carbon strip groove

为了改善刚蹭和切割磨耗现象,优化弓网接触面的廓形匹配,基于理论计算与实际测量验证的结果,提出了以下措施:在距离碳滑板中心线 - 240 ~ 240 mm 区域内的凹槽位置,应对凹槽斜边的角度进行控制,确保其不大于 12°。对于超出此范围或无法圆滑过渡的段落,需进行打磨处理。同时,当接触线的可磨耗厚度少于 4 mm 时,应对其棱边进行打磨作业,以减少对碳滑板的切割磨耗影响。

3 整改措施

3.1 弓网设备日常维护策略优化

基于应急处置响应与根本原因分析,对弓网相关设备的更换标准、打磨规范及检查频率进行了系统性优化。

3.1.1 更换标准优化策略

为确保弓网系统的稳定运行,刚性接触网接触线在经历磨耗后,汇流排夹持口外的接触线最小剩余厚度需维持在3 mm及以上。在任何运行工况下,必须避免汇流排与碳滑板发生直接接触。碳滑板的整体厚度需不低于27 mm,且其可磨耗部分的最小厚度应保持在5 mm以上。

3.1.2 打磨标准细化方案

针对站台及其延伸出的两个接触网锚段范围内,若汇流排夹持口外的接触线厚度小于4 mm,需实施跟踪监测,记录接触线厚度,并通过打磨作业去除接触线两侧的棱角与毛刺。

此外,对于距离碳滑板中心线-240~240 mm区域内的凹槽,需检查确认其斜边角度。对于角度大于12°或无法实现圆滑过渡的凹槽边缘,需执行打磨处理。打磨作业应使用至少600目砂纸或等效打磨设备,以确保打磨质量。

3.1.3 检查周期调整方案

正线(包括转换轨与出入段线)的弓网运行状态将采用热滑视频进行持续跟踪分析。其中,正线及正线咽喉区的检查频率不低于每月1次,正线非咽喉区则至少每季度检查1次。

碳滑板的检查周期被设定为不超过15 d(或累计行驶10 500 km)。在每根受电弓碳滑板的两侧,于碳滑板厚度27~30 mm的位置标记磨耗警戒线,以确保警戒线清晰可见且无中断。

3.1.4 专用打磨工装研发

为提升打磨效率与质量,自主研发了弓网打磨测量工装(已申请专利保护,见图10)。该工装使接触线的打磨效率提高了约5倍,显著提升了在线打磨的速度与效率,有效解决了全线线路长、现场作业时间受限及打磨作业难度大等问题。

3.2 制定冬季大降温干燥时段的弓网特殊维护策略

3.2.1 启动条件界定

为应对冬季极端气候条件下的弓网维护挑战,安装隧道温湿度监测仪器,实施环境湿度的实时追

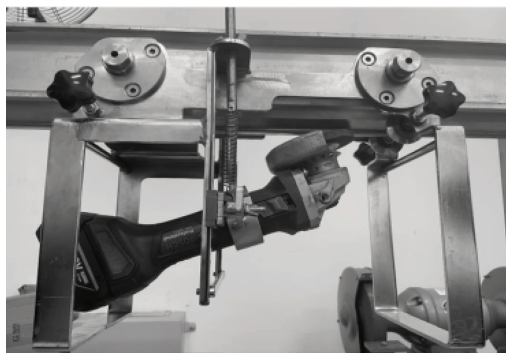


图10 接触网打磨工装实物图

Fig. 10 Photo of catenary grinding tooling

踪。当相对湿度降至30%以下,或寒冷预警系统被激活时,即触发特殊维护策略的实施。

3.2.2 特殊维护周期设定

特殊维护策略的执行周期,自相对湿度降至20%或寒冷预警启动之日起计算,直至环境条件恢复并稳定两周后结束。

3.2.3 特殊维护措施概述

在弓网设备的维护作业中,需重点检查并记录碳滑板及接触线表面的状态(涵盖颜色、粗糙度等特征),并拍摄照片以备后续分析。同时,增加碳滑板的检修频率至每周1次,以及提升接触网热滑测试的频率至每周1次。此外,针对接触线与碳滑板,实施针对性的打磨作业,以优化其接触性能。

4 结语

弓网异常磨耗是复杂多因素环境下的一种典型磨损现象。通过对广州地铁3号线的深入分析,得出以下结论:

1) 大幅度降温对接触网具有显著影响,热胀冷缩效应导致接触线收缩,可能引发线夹卡滞,从而形成硬点及不平顺现象,加剧弓网磨耗。

2) 环境湿度是弓网异常磨耗的关键因素之一。当相对湿度低于30%时,需密切关注碳滑板与接触线表面的状态(包括颜色、粗糙度及碳膜的完整性)。一旦发现异常,应立即采取维护措施。

3) 碳滑板与接触线在运行过程中,若接触面廓形匹配不良,将增加弓网异常磨耗的风险。因此,需对碳滑板廓形进行修复性打磨,并对接触线棱边实施倒圆打磨,以优化接触性能。

4) 研究新一代耐候性纯碳纤维滑板等新材料,减少碳滑板和接触线之间的黏着磨损。

(下转第285页)

- (9): 18.
- [3] 王喜军, 杨立新, 武少峰. 城市轨道交通信号系统升级改造项目方案研究[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(11): 77.
WANG Xijun, YANG Lixin, WU Shaofeng. Study on upgrading and transformation scheme of signal system in urban rail transit [J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(11): 77.
- [4] 王二中, 李新. 两种城市轨道交通既有信号系统改造方案对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(5): 66.
WANG Erzhong, LI Xin. Comparison and analysis of two types of reconstruction schemes of urban rail transit existing line signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(5): 66.
- [5] 倪尉. TACS 系统在城市轨道交通信号系统更新改造工程中的应用研究[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(8): 73.
NI Wei. Research on application of TACS in renovation project of signal system in urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(8): 73.
- [6] 杨安玉, 张志恒. 城市轨道交通信号系统倒切电路设计[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(2): 98.
YANG Anyu, ZHANG Zhiheng. Design of quick switch circuit of signal system used in urban rail transit[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(2): 98.
- [7] 马永恒. 城市轨道交通信号系统改造倒接方案设计[J]. 微型机与应用, 2015, 34(19): 7.
MA Yongheng. Signal system migration design of urban transit re-vamping project[J]. Microcomputer & Its Applications, 2015, 34(19): 7.
- [8] 孙庆斌. 城市轨道交通信号系统工程倒切开关应用研究[J]. 电气化铁道, 2018, 29(3): 60.
SUN Qingbin. Researches of application of changing over switches for signal system of urban mass transit [J]. Electric Railway, 2018, 29(3): 60.
- [9] 李立明, 李建光, 顾家泉, 等. 轨道交通信号系统升级改造期间新旧系统倒接方式及应用分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(9): 22.
LI Liming, LI Jianguang, GU Jiaquan, et al. Analysis of the application and reverse connection methods between the rail transit signal new and old systems during upgrading [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(9): 22.
- 收稿日期:2023-02-08 修回日期:2023-03-05 出版日期:2025-03-10
Received:2023-02-08 Revised:2023-03-05 Published:2025-03-10
• 第一作者:叶富智,高级工程师,yefuzhi@gzmtr.com
通信作者:牟宗元,工程师,mouzongyuan-signalling@ey-crec.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 279 页)

我国某地铁曾连续 2 年遭遇弓网异常磨耗导致的全线接触线更换问题。通过借鉴广州地铁的优化措施,该地铁的弓网关系得到了显著改善。在弓网异常磨耗研究领域,广州地铁集团有限公司的专项工作已取得了明显成效,成功为近年来全国范围内多个城市所遭遇的刚性接触网弓网异常磨耗难题,提供了切实可行的解决方案。

参考文献

- [1] 李含欣, 季德惠, 沈明学, 等. 环境湿度对碳/铜滑动接触副载流摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(4): 709.
LI Hanxin, JI Dehui, SHEN Mingxue, et al. Effect of environmental humidity on tribological behavior of carbon/copper current-carrying sliding contact pairs[J]. Tribology, 2022, 42(4): 709.
- [2] 孙逸翔, 岳洋, 宋晨飞, 等. 相对湿度对铜材料载流磨损的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1.
SUN Yixiang, YUE Yang, SONG Chenfei, et al. Effect of relative humidity on triboelectric wear of copper[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 39(1): 1.
- [3] 王蒙, 郭凤仪, 王智勇, 等. 潮湿条件下滑板磨耗特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 292.
WANG Meng, GUO Fengyi, WANG Zhiyong, et al. Study on the wear characteristics of slide plate under wet conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 292.
- [4] 宋相宇, 李耕, 高志良, 等. 郑州地铁 3 号线弓网异常磨耗情况分析[J]. 河南科技, 2021, 40(36): 77.
SONG Xiangyu, LI Geng, GAO Zhiliang, et al. Analysis on abnormal wear of pantograph and catenary of Zhengzhou Metro Line 3 [J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(36): 77.
- 收稿日期:2022-11-23 修回日期:2023-02-09 出版日期:2025-03-10
Received:2022-11-23 Revised:2023-02-09 Published:2025-03-10
• 通信作者:邱伟明,正高级工程师,qiuweiming@gzmtr.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821