

高压直流下的受电弓拉杆轴承电蚀分析及对策

骆开荣 程 聪 叶 凯

(贵阳市城市轨道交通集团有限公司运营分公司, 550081, 贵阳//第一作者, 工程师)

摘 要 受电弓受流稳定是保障地铁车辆安全运行的重要条件。受电弓拉杆轴承电蚀后失效, 弓网关系恶化、受流不稳定甚至会出现弓网事故。通过分析, 接触网网压波动大、轴承导电通道少、轴承润滑脂材料特性等多种因素综合影响下造成轴承电蚀。提出在轴承配合的轴套上增加绝缘层, 防止特大电流经过轴承内部造成电蚀损伤。实践证明该方法有效, 可为解决高压电流下的轴承电蚀故障提供一种参考。

关键词 城市轨道交通; 受电弓; 拉杆轴承电蚀

中图分类号 U264.3⁺⁴

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.045

Analysis and Countermeasures of the Electric Erosion of Pantograph Pull Rod Bearing under High Voltage and Direct Current

LUO Kairong, CHENG Cong, YE Kai

Abstract The current collection stability of pantograph is an important condition to ensure the safe operation of metro vehicles. After electric corrosion, failure of pantograph pull rod bearing occurs, as well as deterioration of pantograph catenary relationship, unstable current collection and even pantograph catenary accidents. Analysis shows that the electric erosion of bearing is caused by comprehensive impact of many factors including large fluctuation of catenary voltage, few conductive channels of bearing, the material characteristics of bearing grease. It is proposed to add insulating layer on the bearing sleeve to prevent the electric erosion damage caused by extra-large current passing through the bearing. Practice proves that the method is effective and can provide a reference for solving the problem of bearing erosion under high voltage current.

Key words urban rail transit; pantograph; electric erosion of pull rod bearing

Author's address Guiyang Urban Rail Transit Group Co., Ltd., 550081, Guiyang, China

自 2019 年 4 月起, 贵阳地铁 1 号线(以下简为“1 号线”)陆续有近 30 个受电弓拉杆轴承出现烧损现象。如图 1 所示, 烧损的轴承出现大面积熔点及

金属堆积, 轴承内部及拉杆孔损坏严重。轴承烧损使受电弓升降卡滞, 严重威胁了正线行车安全。研究烧损轴承发现, 当 1 500 V 高压直流电经过轴承与拉杆套、轴的接触表面及轴承内外圈的滚动表面时, 轴承就会出现严重的电蚀损伤。



a) 电蚀损伤的轴承 b) 电蚀损伤的端盖

图 1 电蚀损伤的轴承及端盖

Fig. 1 Bearing and end cap damaged by electric erosion

对于轴承电蚀, 文献[1]提出使用陶瓷滚子的轴承来减少电蚀, 但未进行具体验证。文献[2]采用导电润滑脂增加轴承内部导电通道的方法来减少或消除电蚀。文献[3]使用耐高压润滑脂来防止大电流击穿油膜产生闪络造成电蚀。本文基于 1 号线受电弓运行情况, 分析拉杆轴承电蚀原因, 进而提出解决拉杆轴承电蚀损伤的方法, 并完成试验验证。

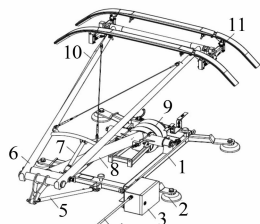
1 受电弓结构及使用情况

1.1 受电弓结构

1 号线采用的单臂式受电弓, 主要由底架、下臂杆、上臂杆、弓头及控制系统等模块组成(见图 2), 其受流电压为直流 1 500 V。在图 2 中, 电蚀轴承位于拉杆两端。拉杆以上臂杆与下臂杆铰链为支点, 起固定弓头轨迹的作用, 主要承受与上臂杆及弓头重量等效的拉力(约 200 N)^[4]。

1.2 列车运行环境

1 号线全长 34.8 km。其中: 地上段长 7.6 km, 采用柔性接触网; 地下段长 27.2 km, 采用刚性接触网。贵阳市年平均总降水量为 1 129.5 mm, 一年阴雨天在 200 天以上^[5]。



注：1——底架；2——绝缘子；3——气动控制箱；
4——绝缘气管；5——拉杆；6——上臂杆；
7——阻尼器；8——下臂杆；9——气囊；
10——平衡杆；11——弓头

图 2 受电弓结构

Fig. 2 Pantograph structure

1.3 露天段弓网关系试验

本文选取 1 号线下麦西站至窦官站区间的 1.1 km 长露天段作为试验段,对列车弓网监测试验数据进行研究。试验相关数据见表 1、表 2 及表 3。

表 1 1 号线弓网动态接触压力试验结果

Tab. 1 Test results of line 1 catenary dynamic contact pressure

方向	列车运行速度/(km/h)	平均最大压力/N	平均最小压力/N	平均压力/N
上行	60	138	83	121
	70	136	79	119
	80	139	85	118
下行	60	138	88	117
	70	129	94	118
	80	133	93	120

表 2 1 号线试验段燃弧试验数据统计

Tab. 2 Test data statistics of line 1 test section arcing

方向	列车运行速度/(km/h)	燃弧最大持续时间/ms	燃弧总次数/次	线路坡度/%
上行	60	15	5	28(上坡)
	70	14	3	
	80	21	5	
下行	60	29	4	28(下坡)
	70	23	3	
	80	31	4	

表 3 受电弓的硬点

Tab. 3 Pantograph hard point

方向	列车运行速度/(km/h)	硬点最多数/个	各情况出现的次数		
			10~20 个硬点	20~30 个硬点	>30 个硬点
上行	60	27	8	2	0
	70	31	8	2	1
	80	29	11	3	0
下行	60	22	7	1	0
	70	26	5	2	0
	80	36	12	3	1

注：硬点为受电弓与接触线的接触力突然变化的地点。

由试验结果可知:平均弓网动态接触压力约为 120 N;以不同速度行驶的列车在试验区段出现数次燃弧和多处硬点,虽满足运营标准规范,但可以看出运行过程中网压波动是真实存在的^[6]。文献[7]研究结果表明,受电弓碳滑板与接触网从接触到脱离过程最大会产生 20 N 的突变力。

2 轴承电蚀原因分析

2.1 网压波动产生点蚀现象

由表 1、表 2 及表 3 可见,列车在试验段出现数次燃弧和硬点^[8]。在接触网网压波动影响、上臂杆及弓头重量等效力^[4]、平均 120 N 的动态接触压力,以及碳滑板脱离接触网过程中产生 20 N 突变力^[6]等的综合作用下,特大电流(指直流 1 500 V,下同)经过轴承滚珠与轴承内外圈接触表面之间的极薄油膜时,会使接触表面产生电闪络、弧光及高热熔化,进而发展为电蚀损伤^[9-11]。在电蚀初期检查,会发现端盖内侧面烧痕、轴承润滑脂变质、轴承滚珠及滑道接触面轻微烧痕等轻微电蚀损伤现象,如继续使用,则轻微电蚀损伤会逐步发展为轴承内部烧损及金属堆积等严重电蚀损伤。

2.2 导电润滑脂对点蚀损伤的影响

由于传统常用轴承润滑脂的主要成分为脂肪酸锂皂、精炼矿物基础油及石油添加剂,其质量分数分别为 8%~18%、80%~95%、6%~10%,具有无导电特性及耐高压特性,故特大电流只能沿滚珠与内外圈点接触形成的单一导电通道通过。由于导电通道过少,而且在滚珠与内外圈的相对运动过程中点接触不稳定,故接触面会发生电闪络、产生高温,进而形成熔瘤、疤结或弧坑,最后发展为电蚀损伤。文献[2]的试验结果证明,加入导电润滑脂后轴承的导电通道增多,可预防滚动轴承电蚀(见图 3,图中箭头表示电流流向)。文献[3]研究发现,耐电压值的润滑脂也可减少或消除轴承中的电蚀损伤。

2.3 导流不畅加剧电蚀损伤

导流线螺栓松动、螺栓紧固缝隙中积灰、导流线及连接处螺栓在长期行车过程中吸附大量灰尘等多种因素,会导致导流不畅或相对于拉杆轴承该导流线未形成低阻值导电通道,部分特大电流通过拉杆轴承造成电蚀。此时,如有列车再生制动产生的大电流逆向经过该轴承,则会进一步加剧电蚀损伤。

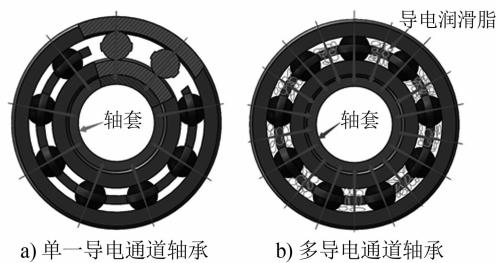


图 3 单一导电通道轴承与多导电通道轴承

Fig. 3 Single conductive channel bearing and multi conductive channel bearing

2.4 气候影响

贵阳长年多雨。在露天段,如有少量雨水进入拉杆轴承中,就会使润滑脂变质,产生少量硬质粒子,严重时会导致局部润滑失效。随着列车运行,特大电流作用使轴承内部温度急剧上升,润滑脂碳化严重,产生越来越多硬质粒子和不规则熔瘤、疤结或弧坑,逐步造成轴承内部卡滞、固死,进而恶化为大面积电蚀损伤^[5]。

3 改进措施

针对贵阳多雨天气,其为客观条件无法避免,只能通过增加拉杆轴承内部导电通道或防止特大电流经过轴承内部的方法才能避免轴承电蚀损伤。工业防水密封轴承虽具有防水、防尘、保油及密封的特点,却不能有效解决大电流通过轴承内部的问题,且其在检修作业中无法添加润滑脂,故受电弓拉杆轴承不宜采用密封轴承。此外,目前耐高压导电润滑脂在轨道交通行业应用不够广泛,相关的现场验证文献较少,而且导电润滑脂测试的周期长、拆装轴承作业较为繁琐等,故本文也不考虑采用耐高压导电润滑脂方法。

经综合考虑,本文提出的改进措施为:在轴套外表面增加绝缘层。在配合轴承使用中,绝缘层可避免特大电流由拉杆套流经轴承内部。增加绝缘层的新轴套长度相对轴承单侧多出 4 mm 余量,故端盖与拉杆套配合时与轴承有 4 mm 的安全空隙,可避免轴承与端盖接触形成导电通道(见图 4),新旧轴套对比见图 5。

1 号线新轴套的更换于 2019 年 6 月—8 月完成。更换后半年内进行了间断性普查,均未发现拉杆轴承出现电蚀现象。2020 年 4 月随机拆卸一套使用新轴套的拉杆轴承,并在清洁后检查,未发现内部出现电蚀现象,且轴承内部表面状态良好,见图 6。

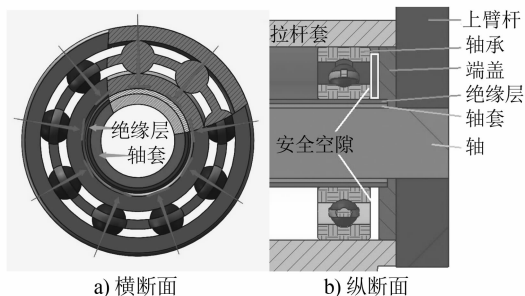


图 4 增加绝缘层的轴套

Fig. 4 Shaft sleeve with insulating layer

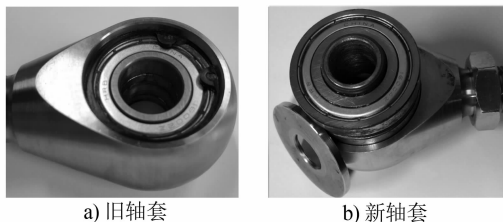


图 5 新旧轴套对比

Fig. 5 Comparison of new and old shaft sleeves



图 6 使用 10 个月后的轴承

Fig. 6 Bearings after 10 months of service

4 结语

受电弓拉杆轴承的电蚀是网压波动产生特大电流、轴承导电通道过少、润滑脂材料特性、导流线相对阻值不低、暴雨渗水等因素综合作用的结果。本文提出在轴套增加绝缘层的改进措施,消除了轴承内部的导电通道。1 号线 10 个月的使用情况证明,增加绝缘层后,可有效防止 1 500 V 高压直流电流经拉杆轴承内部,有效减少了受电弓拉杆轴承的电蚀损伤。

参考文献

- [1] 林沛扬. 广州地铁三北线牵引电机轴承烧损原因分析及对策[J]. 机车电传动, 2015(1): 71.
LIN Peiyang. Cause analysis and Countermeasures of bearing burning of traction motor in the north extension section of Guan-

- gzhou Metro Line 3[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(1):71.
- [2] SUZUMURA Junichi, 周贤全. 用导电润滑脂预防滚动轴承电蚀[J]. 国外铁道车辆, 2018(2):33.
- SUZUMURA Junichi, ZHOU Xianquan. Prevention of electrical pitting on rolling bearings by electrically conductive grease[J]. Foreign Rolling Stock, 2018(2):33.
- [3] 小松崎, 白鸿顺. 消除电蚀对轴承和润滑脂的影响[J]. 润滑与密封, 1989(6):56.
- KOMATSU Saki, BAI Hongshun. Eliminating influence of electric corrosion on bearing and grease[J]. Lubrication Engineering, 1989(6):56.
- [4] 于淑君, 杨俭, 方宇, 等. 城市轨道交通车辆受电弓等效质量分析研究[J]. 城市轨道交通研究, 2010(2):39.
- YU Shujun, YANG Jian, FANG Yu, et al. On equivalent mass of urban rail transit vehicle's pantograph[J]. Urban Mass Transit, 2010(2):39.
- [5] 李大伟, 李兰. 贵阳市轨道交通 1 号线长大坡道车辆安全运行控制方案的研究[J]. 铁道机车车辆, 2016(6):111.
- LI Dawei, LI Lan. Research on control scheme of vehicle safety operation in long ramp for Guiyang Rail Transit Line 1[J]. Railway Locomotive & Car, 2016(6):111.
- [6] 郭风平. 受电弓参数优化对弓网系统动态受流的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2010(4):60.
- GUO Fengping. Influence of pantograph parameter optimization on current-collecting in pantograph-catenary system[J]. Urban Mass Transit, 2010(4):60.
- [7] 刘吉. 受流条件下受电弓温度分布与力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- LIU Ji. Temperature distribution and mechanical properties research of pantograph under current collection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [8] 罗益, 卢勇, 申天亮, 等. 广州地铁 1 号线车辆受电弓碳滑板运用现状分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016(6):152.
- LUO Yi, LU Yong, SHEN Tianliang, et al. Application of pantograph carbon slipper on Guangzhou Metro Line 1 vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2016(6):152.
- [9] 闫海城, 陈志东. 城市轨道交通车辆两种受电弓跟随性试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(2):32.
- YAN Haicheng, CHEN Zhidong. Experimental study of pantograph following performance in two driving modes for urban rail transit vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2017(2):32.
- [10] MIDYA S, BORMANN D, SCHÜTTE T, et al. DC component from pantograph arcing in AC traction system—influencing parameters, impact and mitigation techniques[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(1):18.
- [11] NITUCA C. Thermal analysis of electrical contacts from pantograph-catenary system for power supply of electric vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 96:211.

(收稿日期:2019-12-10)

“中老铁路工程国际联合实验室”在上海应用技术大学揭牌

上海市外办、上海市友协、上海市教委、上海应用技术大学相关负责人 12 月 4 日齐聚上海应用技术大学, 回顾为“一带一路”建设大局服务的工作历程, 畅想未来发展。会上, “中老铁路工程国际联合实验室”揭牌。该实验室依托“一带一路”建设旗舰项目中老铁路, 在上海应用技术大学参与中老铁路建设科教实践成果基础上, 联合上海华测导航技术股份有限公司、老挝国立大学和苏发努冯大学等单位共建。实验室主要开展以保障铁路运营安全为首要目标, 以基础设施、移动装备智能监测和服役安全控制为主题的国际间科技合作, 同时融合国际间科技合作体制机制建设、中国铁路“走出去”本土化标准体系建设以及国际化应用创新型科技人才培养和培训等“科教结合产教融合”模式探索, 务实打造具有示范引领效应的“一带一路”铁路国际合作平台, 对维护“一带一路”标志性成果安全运营、打造具有战略意义的中老命运共同体均具有重要现实意义。

中老铁路已全线开通运营。自 2017 年底开始, 上海应用技术大学协同中国铁路“走出去”相关企业, 在上海市外办、友协、教委、科委等指导下, 联盟老挝国立大学、苏发努冯大学, 开展“中国-老挝铁路工程高等教育合作”办学项目, 成立中老铁路通、“一带一路”澜湄铁路互联互通中心等科教交流平台, 为“一带一路”示范项目中老铁路培养亟需的本土化技术人才。首批铁道工程专业老挝留学生毕业生已服务于中老铁路。作为中老铁路工程高等教育合作项目的参与者、老挝首批来华学习铁道工程专业留学生成长的见证者, 上海应用技术大学铁道工程专业教师李培刚感叹, 四年前播撒的种子今天已开花结果, 十分欣慰地看到同学们从中老铁路佳音频传。目前在上海应用技术大学学习的李东是第二批老挝留学生之一。李东表示, 中老铁路是老中双方建设者共度艰辛、通力合作而建成的铁路, “我通过专业学习, 学到了铁路专业知识和技能, 我想为老挝建设更多的铁路, 让国家提速发展, 改变我们的生活。”谈及第一批老挝毕业生, 李东说, 他们已经回到老挝, 现在都在中老铁路上工作, 有的已经申请在上海应用技术大学读研究生, 一边工作一边学习, 我为他们骄傲, 他们是我们学习的榜样, 因为我们都希望毕业后能为中老铁路服务。

(摘自 2021 年 12 月 4 日中新网, 记者许婧报道)