

# 硅基绝缘材料在轨道绝缘技术中的应用

刘国平

(青岛地铁集团有限公司, 266001, 青岛//高级工程师)

**摘要** 为改善轨道对地绝缘,降低杂散电流的泄露程度,提出一种基于硅基绝缘材料的轨道复合绝缘技术。结合试验验证和仿真分析手段,对轨道样品进行老化、疲劳及绝缘方面的试验与仿真,检验该绝缘技术在提升轨道对地绝缘性能方面的适用性。结果表明,硅基绝缘材料在轨道绝缘技术中的应用效果良好,可有效改善轨道对地绝缘,并具有良好的稳定性和可靠性。

**关键词** 轨道绝缘;硅基材料;复合绝缘技术

**中图分类号** U231.2; TM215.92

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.12.043

## Application of Silica-based Insulation Material in Rail Insulation Technology

LIU Guoping

**Abstract** To improve rail-ground insulation condition and reduce stray current leakage, a rail composite insulation technology based on silica-based nano insulation material is proposed. With combined test verification and simulation analysis methods, tests and simulations of aging, fatigue and insulation are carried out on rail samples, inspecting the applicability of the insulation technology in improving rail-ground insulation performance. Results show that the application outcome of silica-based insulation material in rail insulation technology is good, which can effectively improve the rail-ground insulation and demonstrate good stability and reliability.

**Key words** rail insulation; silica-based material; composite insulation technology

**Author's address** Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266001, Qingdao, China

随着近年来市内地铁线网的逐渐形成,地铁杂散电流泄漏对外界金属设施所造成的影响也愈受重视,已引发相关产权单位的强烈维权<sup>[1-2]</sup>。地铁杂散电流形成的首要途径,是钢轨上流过的电流透过轨道对地绝缘薄弱区域向大地中泄散,因此国家及轨道交通行业对于地铁轨道绝缘性能一直有着明确的要求。以行业标准为例,CJJ/T 49—2020《地

铁杂散电流腐蚀防护技术标准》中明确规定轨道绝缘性能指标,即钢轨的对地电阻不应低于 $15\ \Omega\ \text{km}^{[3]}$ 。

当前对于地铁杂散电流的研究更多着重于杂散电流产生之后的防护措施,如对杂散电流的智能化监测、收集、排流、日常维护和阴极保护等方面。地铁线路中的轨道绝缘薄弱问题,同时也是杂散电流最直接来源的问题。受限于工程成本和线路每日运营要求,往往缺乏真正有效的整改技术。

## 1 复合绝缘技术方案

结合硅基纳米绝缘材料,本文提出一种能够阻断回流轨电流泄漏路径的复合绝缘技术,简称为轨道复合绝缘技术。使用该技术的轨道简称为复合绝缘轨道。

轨道复合绝缘技术采用双层物理绝缘设计。轨道复合绝缘技术的第一层次为硅基复合绝缘垫层。该垫层又分为三层,即底层绝缘层、中间增强层和表面防污层;其中,绝缘层提供强绝缘功能,增强层提供高强度功能,防污层提供表面防污染及防闪络功能。轨道复合绝缘技术第二层次绝缘设计是对扣件上弹条、螺栓等关键位置喷涂室温硫化硅基材料。该材料具有较强的绝缘性能及耐污闪能力,可有效提升扣件表面电阻。

## 2 试验验证分析

选取运营线路中常见的轨道结构,进行老化、疲劳、电气绝缘对比试验,验证轨道复合绝缘技术的效果和稳定性。

### 2.1 老化试验

模拟我国亚热带湿度环境和饱和湿度环境,对轨道复合绝缘技术中的相关绝缘材料(简称“RTV材料”),进行高温高湿状态下的老化试验。试验中环境温度选择为 $40\ ^\circ\text{C}$ ,环境湿度选择为75%和96%,试验完成后采用电镜扫描来分析材料特性。

通过电镜扫描照片发现,经过 3 600 h 的高温、高湿环境老化试验后,RTV 材料与被涂刷绝缘体之间的界面没有出现分层现象和脱落迹象;且材料交接处变得模糊,两种材料之间出现了相互渗透的趋势。这表明轨道复合绝缘技术中所使用的绝缘材料可保证粘接效果在恶劣环境下的长期稳定性。

## 2.2 疲劳试验

在疲劳试验中,首先,分析复合绝缘轨道和普通轨道的联结结构在进行疲劳试验前的性能指标

差异性<sup>[4]</sup>。选取普通扣件组装的轨道为对照组,其中,令扣件绝缘材料为聚氨酯材料的普通轨道为对照组 1,采用橡胶材料的普通轨道作为对照组 2;在对照组 1、对照组 2 的基础上使用轨道复合绝缘技术的轨道分别作为试验组 1、试验组 2。普通轨道与复合绝缘轨道的扣件力学性能对比如图 1 所示。

根据图 1 的数据可得,两种扣件材料类型的对照组与试验组力学性能指标基本一致,相差比例最大值为 4.8%,变化范围为 1%~5%。

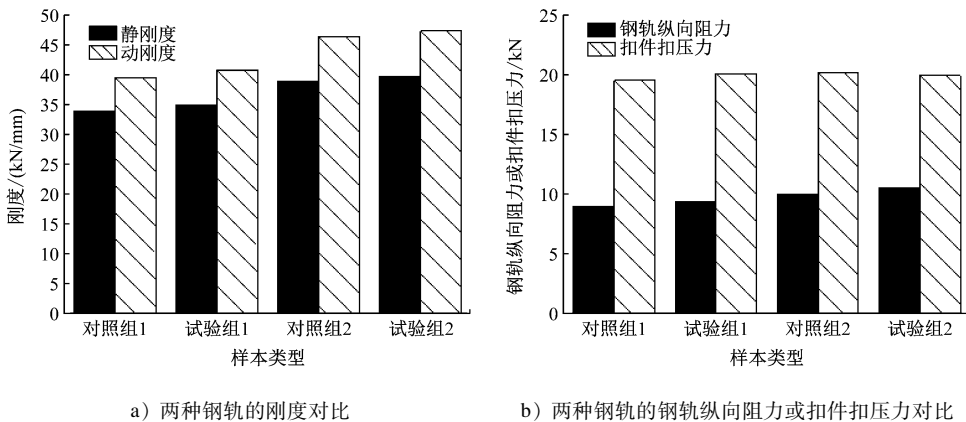


图1 普通轨道与复合绝缘轨道的力学性能对比

Fig. 1 Comparison of mechanical properties between ordinary rail and composite insulated rail

随后,在实验室环境中开展针对复合绝缘轨道试验组 1、试验组 2 的 300 万次疲劳性试验,以评价轨道复合绝缘技术的性能稳定性。测试项目包括静刚度、动刚度、轨道纵向阻力、扣件扣压力、绝缘电阻等。

由图 2 的数据可得,试验组 1、试验组 2 的力学性能指标相差比例最大值为 6.12%,变化范围为 3%~7%,其中使用聚氨酯材料的试验组 1 性能变

化幅度稍大于使用绝缘材料的试验组 2;电学性能方面,试验组 1、试验组 2 的扣件绝缘电阻在经过疲劳试验后均有不同程度的降低,最大降低幅度达到 72.1%,其中使用聚氨酯材料的试验组 1 性能变化幅度稍大于使用绝缘材料的试验组 2;但试验组 1、试验组 2 绝缘电阻数值仍明显高于对照组轨道绝缘电阻  $1 \times 10^5$  倍以上。

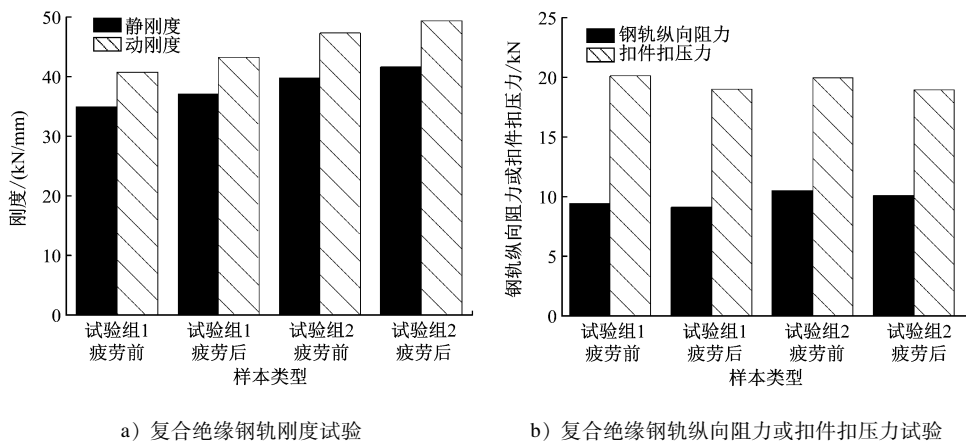


图2 复合绝缘轨道的力学性能疲劳试验

Fig. 2 Fatigue test of mechanical properties of composite insulated rail

2.3 电气绝缘试验

鉴于实验室环境下的复合绝缘轨道疲劳性试验中,电学性能指标的变化比例大于力学性能指标的变化比例,因此对普通轨道和复合绝缘轨道进行轨道绝缘的现场对比试验。

2.3.1 扣件绝缘电阻对比试验

对新建线路单一扣件进行轨道绝缘对比试验<sup>[6]</sup>。按照地铁正线常用标准建造两块板式道床(2.00 m 长×6.25 m 宽)作为新建线路试验环境。其中,道床板和轨枕混凝土材料、配置钢筋、施工工艺等与常规线路的正线完全一致,扣件类型为 DZⅢ型。

对比试验中将采用常规类型扣件的普通轨道设定为对照组 3。对使用同样扣件类型的复合绝缘轨道设定为试验组 3。对照组采用了普通混凝土道床、普通混凝土轨枕、常规扣件,而试验组采用了普通混凝土道床、普通混凝土轨枕、常规扣件和轨道复合绝缘技术。由表 1 可见,采用了轨道复合绝缘技术的试验组,其轨道绝缘电阻测试结果普遍高于对照组,整体较对照组高出约 7 倍。

2.3.2 钢轨对地电阻对比试验

选取两种不同扣件型式(DTVI2 型、ZX-2 型)的、长度各为 200 m 的轨道区间,其中轨道扣件型

表 1 对照组和试验组的绝缘电阻测试数据

Tab.1 Insulation resistance test data of control group and experimental group					
	单位:MΩ				
测试序号	1	2	3	4	5
试验组 3	4 390	4 500	4 630	4 630	4 730
对照组 3	638	639	639	641	642

式仅为 DTVI2 型或 ZX-2 型的普通轨道的区间分别设定为对照组 4、对照组 5;对使用同样扣件类型的复合绝缘轨道区间分别设定为试验组 4、试验组 5。其中,对照组和试验组测试长度均为 200 m。湿态测试时,使用 60 L 自来水喷淋,将轨条及扣件反复淋湿以模拟湿态环境。

结合表 2 中试验测试数据可见,使用 DTVI2 型扣件的轨道,在干态环境下试验组 4 的钢轨对地电阻与对照组 4 的相比,提升了 10.1 Ω·km;在湿态环境下试验组 4 的钢轨对地电阻与对照组 4 的相比,提升了 9.3 Ω·km。由此可见,对于使用普通 DTVI2 型扣件的轨道,采用轨道复合绝缘技术在干、湿态环境下均能够显著提升轨道对地的绝缘性能,提升效果高达 70% 及以上;使用 ZX-2 型扣件的轨道,在干态环境下试验组 5 的钢轨对地电阻较对照组 5 提升了 13.8 Ω·km。

表 2 钢轨对地电阻测试结果  
Tab.2 Test results of rail-ground resistance

测试组	测试对象	扣件类型	测试状态	电阻测试结果/(Ω·km)
对照组 4	普通轨道	DTVI2	干燥	14.0
试验组 4	复合绝缘轨道	DTVI2(加绝缘材料 JYTC-JY001)	干燥	24.1
对照组 4	普通轨道	DTVI2	扣件淋水	11.5
试验组 4	复合绝缘轨道	DTVI2(加绝缘材料 JYTC-JY001)	扣件淋水	20.8
对照组 5	普通轨道	ZX-2	干燥	2.4
试验组 5	复合绝缘轨道	ZX-2(加绝缘材料 JYTC-JY001)	干燥	16.2

3 仿真验证分析

随着线路开通后每日不间断的密集行车,扣件很容易受到隧道水汽、灰尘、车轮与钢轨摩擦铁屑等物质的侵蚀和附着,随着表面污垢的累积、集聚效应,会在表面形成一层表面污垢<sup>[8]</sup>。随着线路运营年限的增加,扣件自身也会发生老化现象。

首先,进行轨道扣件表面污垢层厚度变化对轨道绝缘性能影响的仿真分析。模型中表面污垢层厚度变化范围设定为 0.1~2.0 mm,此时表面污垢

层电阻率为 1×10<sup>5</sup> Ω·m。复合绝缘轨道为试验组 6,普通轨道为对照组 6,模型仿真结果如表 3 所示。在污垢层厚度变化 20 倍情况下,试验组 6 的钢轨对地电阻变化仅为对照组 6 的 9.42%。

其次,进行轨道扣件老化对轨道绝缘性能影响的仿真分析。模型中设定扣件中绝缘材料的电阻率变化范围为 1×10<sup>3</sup>~1×10<sup>8</sup> Ω·m,数值变化了 10<sup>5</sup> 倍;扣件表面污垢层厚度为 0.3 mm,电阻率为 1×10<sup>5</sup> Ω·m。复合绝缘轨道用于试验组 7,普通轨道用于对照组 7,模型仿真结果如表 4 所示。

表 3 表面污垢层厚度变化对钢轨对地电阻的影响分析表

Tab.3 Influence analysis of surface fouling layer thickness variation on rail-ground resistance

扣件表面污垢层厚度/mm	试验组 6 的钢轨对地电阻值/( $\Omega \cdot \text{km}$ )	对照组 6 的钢轨对地电阻值/( $\Omega \cdot \text{km}$ )
0.1	13 501.0	6 468.6
0.3	10 944.0	2 577.9
0.5	10 277.0	1 611.2
0.7	9 962.6	1 172.0
0.9	9 777.5	921.0
1.0	9 710.4	832.0
2.0	9 384.8	423.0

从表 4 可见,试验组 7 在扣件绝缘材料电阻率变化了  $10^5$  倍的情况下,试验组 7 的钢轨对地电阻变化仅为对照组 7 的 0.14%。

表 4 扣件老化对钢轨对地电阻的影响分析表

Tab.4 Influence analysis of fastener aging on rail-ground resistance

扣件绝缘材质电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	试验组 7 的钢轨对地电阻值/( $\Omega \cdot \text{km}$ )	对照组 7 的钢轨对地电阻值/( $\Omega \cdot \text{km}$ )
$1 \times 10^8$	10 944.00	2 577.90
$1 \times 10^7$	2 972.10	1 389.50
$1 \times 10^6$	1 288.50	263.60
$1 \times 10^5$	1 026.80	29.60
$1 \times 10^4$	997.70	3.00
$1 \times 10^3$	994.72	0.32

综合以上仿真分析结果可知,在扣件表面出现污垢层和扣件老化情况下,轨道复合绝缘技术的绝缘性能具有较好的稳定性和可靠性。

4 结论

1) 150 d 高温高湿的老化试验表明,轨道复合绝缘技术中的绝缘材料能满足材料稳定的界面特性,不会产生分层现象,具有极高的稳定性。

2) 300 万次疲劳试验表明,轨道复合绝缘技术对轨道联结结构的力学性能基本不构成负面影响,且电气绝缘性能要显著优于普通轨道。

3) 现场试验结果表明,轨道复合绝缘技术在不同扣件类型和干湿态环境下的轨道绝缘性能提升范围为  $9.3 \sim 13.8 \Omega \cdot \text{km}$ ,提升效果至少达到 70% 及以上。

4) 仿真结果表明,轨道复合绝缘技术可有效减缓普通轨道对地绝缘性能随时间持续降低的现象,并可有效延缓降低的比例。

参考文献

[1] 史云涛,赵丽平,林圣,等. 城市电网中地铁杂散电流分布规律及影响因素分析[J]. 电网技术, 2021(5): 1951. SHI Yuntao, ZHAO Liping, LIN Sheng, et al. Analysis of distribution of metro stray current in urban power grid and its influencing factors[J]. Power System Technology, 2021(5):1951.

[2] 蒋卡克. 地铁检修基地杂散电流对高压天然气管道的干扰及治理措施[J]. 腐蚀与防护, 2021(5): 64. JIANG Kake. Interference of stray current from subway maintenance base to high pressure natural gas pipeline and protective measures[J]. Corrosion and Protection, 2021(5): 64.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁杂散电流腐蚀防护技术标准: CJJ/T 49—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for stray current corrosion protection in metro: CJJ/T 49—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2020.

[4] 国家铁路局. 高速铁路扣件系统试验方法 第 5 部分:绝缘电阻的测定: TB/T 3396.5—2015[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016. National Railway Administration of the People's Republic of China. Test methods for fastening systems of high-speed railway—Part 5: determination of electrical resistance: TB/T 3396.5—2015 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.

[5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 轨道交通地面装置 电气安全、接地和回流 第 2 部分: 直流牵引供电系统杂散电流的防护措施: GB/T 28026.2—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. Standardization Administration of the People's Republic of China. Railway applications—fixed installations—electrical safety, earthing and the return circuit—part 2: provisions against the effects of stray currents caused by D. C. traction systems: GB/T 28026.2—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[6] 国家能源局. 现场绝缘试验实施导则 绝缘电阻、吸收比和极化指数试验: DL/T 474.1—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018. National Energy Bureau of the People's Republic of China. Guide for insulation tests on site insulation resistance, dielectric absorption ratio and polarization index test: DL/T 474.1—2018 [S]. Beijing: China Electric Power Press,2018.

[7] 李鲲鹏, 曹晓斌, 沈豪, 等. 环境因素对地铁轨道扣件绝缘性能影响的试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020 (3): 48. LI Kunpeng, CAO Xiaobin, SHEN Hao, et al. Experimental study of environmental influence on metro rail fastener insulation performance[J]. Urban Mass Transit, 2020 (3): 48.

(收稿日期:2021-08-23)