

地铁受电弓平顶绝缘涂层应用研究

张鸿飞¹, 陈 卉², 项志鹏², 力心宇², 姚佳毅²

(1.中国计量大学,杭州 310018; 2.杭州中车车辆有限公司,杭州 311200)

摘要: 地铁受电弓平顶绝缘从技术角度进行改造优化,需要通过制作聚氨酯复合涂层样板获得测试结果,研究满足地铁受电弓平顶绝缘的应用需求。

关键词: 聚氨酯; 复合涂层; 平顶绝缘

中图分类号: TQ639

文献标志码: A

文章编号: 1007-9548(2025)03-0023-03

Application of Flat Top Insulation Coating for Pantograph in Metro

ZHANG Hong-fei¹, CHEN Hui², XIANG Zhi-peng², LI Xin-yu², YAO Ji-yi²

(1.China Jiliang University, Hangzhou 310018, China 2.Hangzhou CRRC Vehicle Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: To optimize the flat top insulation of metro pantographs from the technical point of view, the test results should be obtained by making polyurethane composite coating sample to meet the application requirements of metro pantograph flat top insulation.

Key words: polyurethane; composite coating; flat top insulation

0 引言

地铁列车能够动起来,就是依靠地铁车辆顶部受电弓匀速升弓,并且在规定的时间内与接触网(额定电压 DC 1 500 V)平稳接触,传输电力使地铁获取电能,牵引地铁运行。地铁供电环节——弓网系统是电气化列车运行的动力之源,弓网之间的良好接触、稳定配合,是确保地铁能够持续安全运行的重要保障。一旦弓网配合不良就有可能导致地铁列车运营暂停、中途清客、退出正线等事件发生。比如上海地铁 11 号线接触网故障,引发一列出库无人列车瞬间短路拉弧,现场伴有瞬时响声、烟雾和火光,并未引发火灾爆炸^[1]。

地铁运行晚点推动地铁主机厂、地铁运营公司质量安全管理向事前预防、事中控制转变。基于受电弓平顶质量安全的理念和现有受电弓平顶设计结构,需要对受电弓平顶进行技术层面改造优化,实现提升地铁受电弓平顶瞬时耐高电压、防电弧等保护功能,确保地铁不发生瞬时响声、烟雾和火光等事件,有效降低故障

发生率,确保地铁列车有序运行。

1 受电弓平顶结构

受电弓平顶由平顶、空调隔板和边梁通过手工焊组焊而成,平顶板模块由 3 块分段型材搅拌摩擦焊接成平顶板,最后整体机加工完成。受电弓平顶表面分布有受电弓安装座、避雷器安装座、摄像头安装座等。

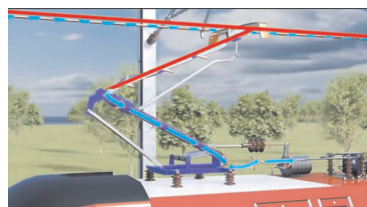


图 1 受电弓及其平顶

如图 1 所示,平顶是作为地铁车辆受电弓顶部的承重结构,必须具有足够的刚度和支撑力,同时为了防止受电弓在地铁运行震动或其他工况下倾斜移位,而提供稳定支撑和安装固定受电弓的工作平台,平顶面积约 7 m²。长三角地区运营的地铁列车,气候相对温和,年平均气温在 15~17 ℃,极端最低气温-12 ℃,极端最高气温 40.2 ℃,无霜期约 240 d,年平均降水量

收稿日期: 2024-06-04

作者简介: 张鸿飞(1991—),男,硕士,高级工程师,主要从事工艺技术和质量管理工作。E-mail:594601674@qq.com。

1 000 mm 以上。局部地区气候条件复杂,存在天气多变,环境多变,局部有高温、湿热、台风和暴雨等极端天气。在弓网系统中,架空接触网是受电弓运行的路线,受电弓与接触网接触成为传输电能的纽带。接触网与受电弓相互作用,通过不间断的接触向地铁列车提供电能,使地铁列车可靠运行。

2 聚氨酯复合涂层组成

聚氨酯复合涂层主要由两部分组成,第一部分聚氨酯胶黏剂,第二部分聚氨酯绝缘面漆,每个部分包含 A、B 两个组分。

聚氨酯胶黏剂 A 组分主要由氢氧化铝和蓖麻油改性多元醇构成,聚氨酯胶黏剂 B 组分主要由多亚甲基多苯基多异氰酸酯构成。聚氨酯胶黏剂 A、B 两个组分按照比例混合,发生化学反应,生成聚氨酯网络结构并释放热量,不挥发物含量达到 97% 以上。

聚氨酯绝缘面漆 A 组分主要成分是含羟基的聚酯,是一种带有多个羟基(—OH)的化合物;聚氨酯绝缘面漆 B 组分主要是脂肪族异氰酸酯,含有高度活性的异氰酸酯基团(—NCO)。A、B 两个组分按照比例混合发生化学反应,形成氨基甲酸酯基团,生成聚氨酯网状结构,交联固化从而形成硬化的涂层。

3 聚氨酯复合涂层样板制作

原材料及其特性如表 1 所列。

表 1 原材料及其特性

体系组成	组分特性
底涂	湿气固化的黑色液体,能够提高聚氨酯胶与基材之间的粘接力。
聚氨酯胶黏剂	双组分聚氨酯胶黏剂,可自流平,耐湿热、耐水、耐紫外线、耐电压。
聚氨酯配套绝缘面漆	双组分聚氨酯面漆,附着力优良,耐候性好。

检测设备包括 CS5601AS 耐压测试仪、QNIX 涂层测厚仪。施工工具包括滚筒刷、羊毛刷、铲刀、磨光机、180 目砂纸、吸尘器。

样板制作流程为:表面清洗→表面晾干→表面打磨→表面擦拭除尘→表面刷活化剂→表面晾干→表面刷底涂→表面晾干→样板防护→标记→刷涂聚氨酯胶黏剂→表面干燥→表面打磨→表面擦拭除尘→配套面漆刷涂→自然干燥。

使用砂纸、磨光机等打磨样板表面,用吸尘器清理至表面无打磨灰尘;使用干净毛刷,蘸清洁活化剂,将样板涂装表面涂刷一次,晾干时间不低于 15 min,至溶剂彻底挥发;使用干净毛刷,蘸底涂剂(底涂剂使用前要充分摇晃 3~5 min)将样板涂装表面涂刷一次,晾干时间不低于 30 min,至溶剂彻底挥发;聚氨酯胶黏

剂 A、B 两组分按 5:1(质量比)的比例进行调配,搅拌必须使用带齿状分散盘的电动搅拌工具进行匀速搅拌,注意将底部沉降物充分搅拌均匀;混匀后的聚氨酯胶液按厚度要求浇灌或涂覆于样板表面,室温固化 24 h;配套绝缘面漆 A、B 两组分按 8:1(质量比)的比例进行调配,为了防止面漆沉淀,先用搅拌器将 A 组分搅拌 1 min,搅拌至均匀,再加入 B 组分进行搅拌,搅拌 2 min 至面漆均匀;混匀后的聚氨酯面漆按 30~80 μm 厚度要求涂刷于样板表面,室温干燥 24 h。底涂、聚氨酯胶黏剂和聚氨酯配套绝缘面漆按工艺均匀涂覆在已经表面处理好的铝板上(尺寸规格为 100 mm×100 mm×3 mm),总膜厚要求 1.0~2.5 mm 之间。

4 性能研究

聚氨酯复合涂层首要考量的是耐压试验。耐压试验是一种非破坏性的测试方法,主要检查电气设备在额定电压的多倍电压下的绝缘性能。我们针对聚氨酯复合涂层样板进行承受过电压的能力测试,试验结果是最高能够耐受 50 kV,最低能够耐受 36 kV。

外观检查通常也是检查涂层最基本的方法,可通过目视检查涂层表面是否含有杂质、是否均匀、是否平整光滑,漆膜是否存在气泡、龟裂、结块、起皱等缺陷。

聚氨酯复合涂层的电气粘接性能和机械性能可以通过对涂层的拉伸强度、断裂伸长率、拉开强度等指标进行测试来评估其是否满足设计要求。其中拉伸强度是评价聚氨酯复合涂层拉伸至断裂过程所承受的最大拉伸应力;除了需要关注拉伸强度,还应该关注断裂伸长率。断裂伸长率是复合涂层体系在拉伸过程中发生弹性形变与塑性形变阶段的力学响应。断裂伸长率决定了材料延展性能、形变恢复能力以及在复杂应力下的服役寿命。拉拔测试则是定量测定聚氨酯复合涂层的拉开强度,并以此评价聚氨酯复合涂层附着力。

涂层厚度^[2]是决定其绝缘耐压能力的重要因素。一般来说,涂层越厚其绝缘性能越好,但同时也要考虑到涂层的机械性能和材料成本预算,可以通过使用涂层测厚仪来检测涂层的厚度。

涂层体系中最后一道涂层与大气、紫外线等腐蚀介质接触,还需要具备较好的耐盐雾、耐老化、耐腐蚀性、耐候性等化学性能。

可以通过对涂层的电气强度^[3]、击穿电压等指标进行测试来评估聚氨酯复合涂层的电气性能。如果聚氨酯复合涂层的绝缘性足够好,则不会发生击穿现象;如果以上性能要求不能够得到满足,有可能会影响受电弓平顶的使用寿命。

5 应用原则

鉴于地铁受电弓平顶没有具体的、现成的绝缘技

术可供指导和规范, 研究人员需要参考以下原则进行选材: 首先要结合地铁实际工况, 克服个人对地铁受电弓平顶绝缘认识的片面性、局限性; 其次要回归地铁受电弓平顶绝缘应用的基本原理和本质; 第三, 要结合受电弓平顶现有设计结构、上游供应链、施工的难易程度和成本经济等实际情况。

绝缘耐压材料包括气体绝缘材料、液体绝缘材料、固体绝缘材料和复合绝缘材料, 绝缘耐压材料的特性如表 2 所列。

表 2 绝缘耐压材料的特性

材料	特性
气体绝缘	绝缘强度低, 击穿后能够自恢复, 高压、高真空或非空气绝缘需要密封
液体绝缘	易受潮、易脏污、易燃, 需要密封、需要散热和净化
固体绝缘	绝缘强度较高、耐高温、界面击穿后不可自恢复、脆性较大易机械疲劳、电化学老化等
复合绝缘	复合绝缘结构, 材料协同优化损耗低

由于车辆顶部设计结构已经通用化、标准化, 为了不增加顶部的承重结构不影响承载力, 便于施工和规模化生产, 所以绝缘耐压材料必须满足质量轻量化要求。材料密度如表 3 所列。

表 3 材料密度

材料类型	密度/(g·cm ⁻³)
塑料	0.8~2.2
聚氨酯	1.1~1.25
橡胶	0.9~1.93
玻璃	2.5
陶瓷	2.4~2.9
玻璃钢	1.5~2.0
云母	2.7~3.5

如表 3 所列, 塑料、聚氨酯和橡胶这 3 种材料进入质量轻量化的候选名单。传统塑料(如聚乙烯、聚丙烯)的拉伸强度普遍较低, 在高载荷场景中易因强度不足失效, 一般在 20~30 MPa 范围内。其分子链以线性结构为主, 结晶度较高, 导致弹性模量低且易发生塑性变形。如高密度聚乙烯(HDPE)的拉伸强度约为 25 MPa, 聚丙烯(PP)的拉伸强度为 30~40 MPa。

聚氨酯(PU)通过调节异氰酸酯与多元醇的比例, 可形成从软质弹性体到硬质塑料的多样化结构。常规聚氨酯拉伸强度为 28~42 MPa, 最高可达 70 MPa。聚氨酯的拉伸性能源于其交联网络结构和氢键作用^[4]。

天然橡胶(NR)硫化后拉伸强度为 25~35 MPa, 合成橡胶(如丁苯橡胶 SBR)拉伸强度为 15~25 MPa。

传统塑料的拉伸强度通常低于聚氨酯材料, 应用场景适合在包装、日用品领域。天然橡胶或合成橡胶拉伸强度数值上低于聚氨酯材料, 更适用于轮胎、减震器等需高弹性和适度拉伸强度的场景。

聚氨酯材料具有良好的耐磨耐割性、复原性、抗震性和隔热性, 在不同温度和湿度条件下性能稳定; 橡胶材料在低温环境下可能会变硬并失去弹性, 稳定性不及聚氨酯材料。在适应受电弓平顶应用环境能力和弓网工作实际工况方面, 绝缘耐压材料也不宜选择气体绝缘材料、液体绝缘材料和固体绝缘材料, 我们研究团队最终选择了聚氨酯材料。

在上述原则总框架下, 为了了解地铁受电弓平顶绝缘性能, 需要把涂层样板放置在高压电场当中, 模仿电弧瞬间并辅以较快的升压速率来检测涂层样板瞬间耐高电压、防电弧直到被击穿所能承受的最高电压。这是一种破坏性的检测手段。该试验由于具有破坏性、专业性、风险性, 通常作为型式试验, 送第三方机构进行检测。

根据我国制造业长期的经验积累和研究成果, 关于受电弓平顶的标准绝缘水平宜考虑受电弓与接触网高压输电线的平顶绝缘特性来选取。基于所在区域是采用 DC 1 500 V 制式直流供电电压, 我们把受电弓平顶耐压试验要求定义为: 满足 60 s 耐压测试时间, 同时能够耐受 DC 5 000 V 电压不被击穿作为检验依据。

6 测试结果

涂层体系测试结果如表 4 所列。

表 4 涂层体系测试结果

测试项目	涂层体系测试结果
拉伸强度	5.1 MPa
断裂伸长率	94.5%
拉拔试验	3.9 MPa, 100%面漆内聚破坏
附着力	0 级
柔韧性(圆柱轴弯曲)	无可见开裂和剥离
耐冲击性	50 cm 冲击下无可见开裂和剥离
击穿测试(短时快速升压)	37.6 kV 被击穿
电气强度	28 kV/mm
耐中性盐雾	2 mm 范围无可见起泡、锈蚀
耐光老化	1 级

由表 4 可知, 聚氨酯复合涂层电气强度为 28 kV/mm, 击穿测试试验(短时快速升压)为 37.6 kV 被击穿, 反映了该涂层体系在耐受电压能力方面能够较好地满足地铁受电弓平顶绝缘耐压应用要求。

涂层体系其他指标在受电弓平顶绝缘应用中也提供了有价值的参考。其中, 拉拔试验是(下转第 29 页)