

轨道车辆涂层的老化敏感性探究及选型建议

王瑾璐, 宗建平, 王 艳, 张晓凡
(中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063035)

摘要: 从轨道车辆涂层体系的构成与功能着手, 阐述了涂层老化机制, 通过调研城市轨道交通车辆涂层的老化失效表现形式, 探究与轨道车辆涂层老化敏感性相关的内在和外在影响因素; 在此基础上, 结合我国国内及出口城市轨道交通车辆项目涂装工艺设计的普遍经验, 给出了轨道车辆涂层选型建议, 以期助力我国城市轨道交通及其车辆涂装行业的发展。

关键词: 轨道车辆; 涂层体系; 老化探究; 选型

中图分类号: TQ639 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2026)03-0036-05

Study on Aging Sensitivity and Selection Suggestions of Coating for Railway Vehicles

WANG Jin-lu, ZONG Jian-ping, WANG Yan, ZHANG Xiao-fan
(CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063035, Hebei, China)

Abstract: In this paper, the composition and functions of the coating system for railway vehicles are studied, the aging mechanism of coatings are expounded, the aging failure forms of coatings for urban railway vehicles are investigated, and the internal and external factors affecting the aging sensitivity of coatings for railway vehicles are explored. On this basis, combined with the general experience in the design of coating processes for domestic and export urban rail transit vehicle projects in China, suggestions for the selection of coatings for railway vehicles are put forward, aiming to promote the development of China's urban rail transit and its vehicle coating industry.

Key words: railway vehicles; coating system; aging study; selection

0 引言

轨道车辆作为城市公共交通与跨区域干线运输的核心载体, 其运营寿命通常需满足 15~30 年的行业标准, 而车身涂层是保障车辆长期稳定运行的“第一道防线”。从功能看, 涂层不仅需通过均匀的色彩与光泽维持车辆外部美观性, 更承担着隔绝外界环境侵蚀的关键作用。对于碳钢车身, 可避免锈蚀导致的结构强度下降; 对于铝合金车身, 能防止电化学腐蚀引发的表面破损。据对国内轨道交通运营数据的调研统计, 因涂层老化失效引发的车身维修成本, 占车辆全生命周期维护费用的 12%~18%, 且严重时需停运检修, 这直接影响

运输效率。因此, 涂层的性能稳定性不仅关乎车辆经济性, 更与运营安全性紧密相关, 是轨道车辆制造与运维领域的核心关注方向之一。

近年来, 我国轨道车辆运营场景呈现显著的环境多样性^[1-3]: 从沿海城市地铁长期面临的高盐雾、高湿度环境, 到西北高原高铁遭遇的强紫外线、昼夜温差剧变, 再到工业密集区受到的 SO₂、粉尘等污染物侵蚀, 不同场景下的环境破坏因素差异, 导致涂层老化表现出明显的“场景特异性”。然而当前行业内的涂层选型仍存在两大痛点: 一是选型标准同质化, 主机厂未充分考虑运营环境差异, 采用统一的涂层体系, 导致在极端环境下涂层老化速率加快; 二是老化研究和评估滞后, 现有技术多依赖车辆运营后的外观巡检, 难以提前预判涂层老化趋势, 往往等到腐蚀问题显现后再进行维修, 增加了额外的成本与风险。因此, 深入研究涂层老

收稿日期: 2025-11-09

作者简介: 王瑾璐(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道客车车体涂装工艺技术工作。E-mail: 155365997@qq.com

化敏感性、科学选型具有迫切需求。

本文聚焦轨道车辆涂层,从涂层体系构成与功能定位出发,重点针对车身外表面的复合涂层体系展开分析,结合不同环境应用场景,研究不同环境胁迫因子对涂层老化的影响权重。通过研究涂层老化的核心机制与轨道车辆典型运营环境特征的关系,结合环境差异与成本分析,提出针对性的选型建议。

1 轨道车辆涂层老化相关理论

1.1 轨道车辆涂层的体系构成与功能定位

轨道车辆的涂层体系从底到面通常包括“底漆+腻子+中涂+面漆”,是一种复合保护体系,而每一层的涂料性能都有各自优势和敏感点,各涂层复合在一起,扬长避短,功能协同,才能发挥出整个涂层体系的最大优势,共同保障车身高效防护。

底漆:直接与车身基材(钢材/铝合金)结合,核心功能是增强涂层附着力与阻断基材腐蚀,常用类型包括环氧富锌底漆(针对钢材,利用锌粉牺牲阳极保护)、无铬钝化底漆(针对铝合金,避免电化学腐蚀),干膜厚度通常控制在 60~100 μm ,是涂层体系的“防腐根基”。

腻子:介于底漆与中涂漆之间,主要作用是填平基材表面缺陷(如基材凹坑、焊接痕迹、轻微划痕),提高车体表面平整度,根据需求使用,多采用不饱和聚酯,干膜厚度 0~2 mm,通常局部不超过 3 mm。腻子层是整体涂层中最脆弱的环节,与其他涂层相比,腻子层更加疏松,吸水性更强。

中涂:介于腻子与面漆之间,主要作用是填平腻子表面微小孔隙,提升面漆的饱满度,同时可辅助增强涂层整体抗冲击性,多采用聚氨酯中涂,干膜厚度 60~80 μm ,相当于涂层体系的“结构缓冲层”。

面漆:直接暴露于外界环境,承担外观装饰与抗老化双重职责,须具备优异的耐紫外线、耐湿热、耐液体介质、耐风沙等性能,主流类型为丙烯酸聚氨酯面漆/清漆类、氟碳面漆/清漆类,干膜厚度 30~70 μm ,是涂层体系的“外部屏障”。

1.2 涂层老化的核心机制与表现形式

涂层老化本质是化学结构降解与物理形态破坏的协同过程,受环境因子触发后,从表层向底层逐步蔓延,最终丧失防护功能,具体可分为三大类机制。

化学老化机制:环境中的紫外线、氧气、污染物(SO_2 、 NO_x)与涂层原料发生化学反应,导致树脂分子链断裂。例如:环氧树脂分子结构中的苯环在紫外线的照射下容易发生光氧化反应,导致聚合物主链裂解; SO_2 则会与涂层中的颜料(如钛白粉)反应生成可溶性硫酸盐,导致面漆褪色、粉化,这是涂层“失光、变

色”的主要原因。

物理老化机制:温度波动引发涂层物理性能劣化,表现为体积收缩与膨胀的循环,尤其腻子层较厚时最为明显。比如,高寒地区昼夜温差可达 30 $^{\circ}\text{C}$ 以上,复合涂层因热胀冷缩产生内应力,当应力超过涂层附着力阈值时,会出现开裂、翘边现象;在高湿环境下,水汽会渗透至涂层内部,导致涂层与基材间的附着力下降,最终引发剥落,这是涂层“开裂、剥落”的核心诱因。

环境交互老化机制:多种环境因子协同作用,加速老化进程,典型表现为“腐蚀—老化”耦合。以沿海地区为例,高盐雾环境中,氯离子会穿透面漆微小孔隙,与底漆中的锌粉发生电化学反应,消耗锌粉的同时生成疏松的腐蚀产物,破坏底漆防腐结构;同时,紫外线持续降解面漆,使孔隙扩大,进一步加速氯离子渗透,形成“面漆老化→盐分侵入→底漆失效→基材腐蚀”的恶性循环。

常见涂层老化失效形式:轨交车辆出厂时通常具有较漂亮的涂层外观,颜色、光泽能达到一定指标要求。随着运行服役,车辆经过常规的日晒雨淋,大气、酸雨、雾霾、风沙以及线路的跨度差带来的温差考验,还有隧道、会车等带来的压强变化等,车辆的涂层会发生老化。

图 1~6 为部分城轨交通线路上车辆涂层的局部老化失效形式。



图 1 风沙较大环境 + 外轮廓结构有错台,造成喷砂面



图 2 车窗边缘的侵蚀剥离

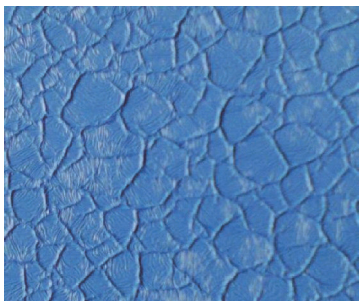


图3 漆膜起皱(温差、紫外线)



图4 涂层粉化失光(紫外线、酸雨)



图5 涂层脱落(左:铝基材;右:碳钢基材)

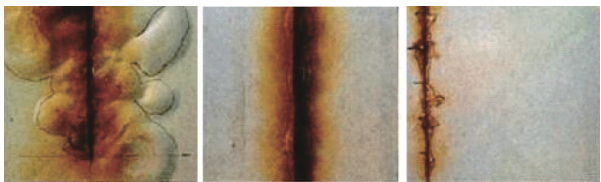


图6 盐雾腐蚀老化(碳钢基材)

2 轨道车辆涂层老化敏感性分析

涂层老化敏感性是指涂层在特定环境下发生性能劣化的难易程度与速率,其受内在材料特性与外在环境胁迫双重因素驱动,两类因素相互作用,共同决定涂层的老化进程与最终失效模式。

2.1 内在影响因素

涂层自身属性与制备工艺作为内在因素是决定涂层老化敏感性的“先天条件”,直接影响涂层抵御外界侵蚀的基础能力,主要体现在材料成分、基材适配性与施工工艺3个维度,本文对材料成分、基材适配性这类需要涂料生产商平衡的因素不做讨论,重点讨论涂料

应用环节的涂层内在影响因素。

涂层施工过程的质量控制和施工规范性直接决定涂层的物理结构完整性,工艺缺陷会和环境侵蚀提供“通道”,显著提升老化敏感性。

表面预处理:基材表面的油污、灰尘、氧化皮是涂层附着的“障碍”。若预处理后基材的表面粗糙度不足($Ra < 3.5 \mu\text{m}$),涂层与基材的机械咬合力下降,导致附着力不足;若喷砂后未及时涂覆底漆(如碳钢基材间隔超过4 h),基材表面会重新氧化,形成新的氧化层,不仅会导致附着力下降,还不能有效防腐。某试验数据显示,表面预处理不合格的涂层,在盐雾试验中出现锈蚀的时间比合格涂层提前50%~70%。

喷涂与干燥:喷涂均匀性与固化条件直接影响涂层结构稳定性。若涂层厚度偏差过大,薄涂层区域易先发生老化失效;若固化温度过低或固化时间不足,树脂交联不充分,涂层结构疏松,水汽、污染物易渗透。例如:聚氨酯面漆需至少在60℃下固化2 h,若固化温度仅为45℃且不延长时间,涂层的耐盐雾时间会从1 000 h缩短至600 h,老化敏感性显著提升。

2.2 外在影响因素

运营环境与使用条件作为外在因素,是触发涂层老化的“外部诱因”,不同环境下的胁迫因子强度与组合差异,会导致涂层老化敏感性呈现“场景特异性”,主要包括环境因素与运营因素两大类。

2.2.1 环境因素

自然环境中的紫外线、温度、湿度、污染物等因子,通过化学、物理作用直接加速涂层老化,是影响老化敏感性的核心外在因素。

紫外线:紫外线(尤其是波长280~400 nm的UVB与UVA)是引发涂层化学老化的主要诱因。紫外线光子能量可破坏树脂分子链,引发光氧化反应。例如,在紫外线年辐射量 $> 6\ 000 \text{ MJ/m}^2$ 的西北高原地区,涂层老化速率是年辐射量 $< 4\ 000 \text{ MJ/m}^2$ 的华南平原地区的2~3倍。试验表明:相同涂层在西北高原运营1年的失光率,相当于在华南平原运营3年的失光率,紫外线强度直接决定涂层化学老化敏感性。

温度与湿度:温度变化引发涂层物理应力,高湿度为腐蚀提供介质(微溶液效应)。在昼夜温差 $> 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高寒地区,涂层因热胀冷缩反复循环,易产生微裂纹;而在年均相对湿度 $> 80\%$ 的华南沿海地区,高湿度使水汽持续渗透涂层,与基材发生电化学腐蚀,同时加速腻子层吸水 and 树脂水解。一些试验数据显示,在“高温高湿+温度波动”的复合环境下,涂层剥落速率比单一环境下提升40%~60%。

污染物侵蚀:工业污染物与海洋盐雾是加剧涂层

老化的“催化剂”。工业密集区的 SO_2 、 NO_x 会与雨水结合形成酸雨，腐蚀涂层中的颜料与树脂，导致涂层粉化；沿海地区的盐雾中，氯离子具有强渗透性，可穿透涂层孔隙，与基材发生电化学反应，生成的腐蚀产物会膨胀，导致涂层剥落。数据显示，沿海地区轨道车辆涂层的腐蚀失效时间，比内陆无工业污染地区缩短 50% 以上。

2.2.2 运营因素

轨道车辆运营中的振动、气流冲刷、压差变化、清洗维护等行为，会破坏涂层物理完整性，间接提升老化敏感性。

振动与气流冲刷：车辆运行时的振动（频率 10~50 Hz）会使涂层与基材的界面应力持续累积，加速涂层开裂；同时，高速运行产生的气流（300 km/h 时气流速度约 83 m/s）会携带灰尘、砂石，对涂层表面产生冲刷磨损，破坏面漆防护层。例如，动车组前端因处于整列车“破风手”的位置长期受气流冲刷，表层磨损速率是车身侧墙的 1.5~2.0 倍，且一旦表面漆膜有损伤后将持续受到剥离力的作用，老化敏感性显著提升。

瞬态交变压差：当车辆以较高速度（200 km/h 以上）穿越隧道时，会产生压缩波；当两车会车时，会产生压缩波叠加和后续的膨胀波，这些作用产生的压强，使车辆侧墙短时间内发生形变，乘客会感到耳压不适，同时对车辆涂层结构中的每一道涂层尤其腻子层的柔韧性提出严峻挑战。

日常清洗维护：不当的清洗方式会损伤涂层。若使用高压水枪（压力 >8 MPa）直接冲洗涂层，易冲蚀涂层边缘与薄弱部位，导致涂层剥落；若使用碱性过强的清洗剂（pH > 10），会与涂层中的树脂发生皂化反应，破坏涂层微观结构，发生表面粉化或涂层剥落。例如：某轻轨项目单辆车因使用某碱性（pH 为 9~10）清洗剂清洗车辆外皮涂漆，清洗后仅 30 d 左右涂层就出现表面脱落失效，而其他规范清洗的车辆仍光亮如新。

3 基于老化敏感性的轨道车辆涂层选型建议

基于前文对涂层老化敏感性相关因素的分析，轨道车辆涂层选型需突破“单一性能导向”的传统模式，建立“技术兼容为基础、环境适配为核心、全周期成本为约束”的三维选型体系，本文同时结合国内和出口轨道交通车辆项目涂装工艺设计经验，给出轨道车辆涂层体系选型建议。

3.1 技术兼容性

涂层体系选型需首先遵循行业标准^[4-5]、客户要求，同时兼顾轨道车辆的制造工艺、维修条件，确保选型方案可落地、易执行。例如：需要考虑制造工艺的涂装条件（人工/自动化）、固化条件（温度、时间）；维修的

可行性、与检测技术的适配性；还有性能标准、环保标准的合规性等。

3.2 环境适配性

在技术兼容的基础上，针对项目运行线路的环境特点做分析并对涂料性能做针对性地提升选型和对涂层体系配置做优化设计，有助于提升产品品质和增强企业竞争力。

3.2.1 高盐雾/高温场景

此应用场景如沿海城市的地铁项目^[6-10]、穿江/跨海线路的项目等，此场景下需抵御氯离子渗透引发的电化学腐蚀，降低“涂层剥落+基材锈蚀”的老化风险。

底漆：碳钢基材可优先采用无机富锌底漆，牺牲阳极保护层，能有效阻挡氯离子与基材接触；若基材为铝合金，可选择添加了磷酸锌铝复合物（防腐颜料）的环氧底漆，通过形成钝化膜和络合物避免铝合金与涂层间的电偶腐蚀，同时与基材间具有较高结合力；且腻子层外层建议再使用底漆或中涂漆对腻子层进行封闭。中涂可选用环氧云铁中涂，云铁鳞片呈层状结构，可形成“物理屏障”，减缓水汽与盐分的渗透速率，进一步提升屏蔽性。面漆可采用氟碳面漆，其 C—F 键键能高，耐盐雾性与耐湿热性优异。同时可选择具有表面疏水性的面层涂料，减少盐雾附着。

3.2.2 强紫外线/大温差场景

对于西北高原的高铁项目、云贵高原的城际铁路项目等，则需要抵抗紫外线引发的树脂降解和较大温差带来的物理破坏，降低“失光、粉化、开裂”的老化风险。

底漆可采用添加紫外线吸收剂改性的环氧底漆，避免紫外线穿透面漆后引发底漆老化，同时底漆弹性模量需控制在 2 000~3 000 MPa，兼顾附着力与抗裂性。腻子、中涂漆都应选用含弹性体改性剂的腻子和中涂漆，确保涂层整体柔韧性。面漆建议优先选择硅改性丙烯酸聚氨酯面漆，该复配体系既保留丙烯酸树脂的高光泽性，又具备硅树脂的优异耐候性。

3.2.3 工业污染/酸性环境场景

对于华北工业区地铁或重化工城市的轻轨，则需要重点抵御酸雨引发的化学腐蚀，降低“粉化、斑点腐蚀”的老化风险。

底漆建议采用高耐酸环氧底漆，树脂分子链中不含易被酸腐蚀的酯键，避免酸性介质引发的底漆降解。中涂和面漆都建议采用高交联度聚氨酯中涂和面漆，可减少酸性介质的渗透通道，同时面漆须具备低孔隙率。

3.2.4 高寒干燥/风沙场景

对于东北高寒高铁项目、内蒙古城际铁路项目等，则需要重点抵抗低温脆化与风沙冲刷，降低“开裂、表层磨损”的老化风险。

底漆可选用低温固化环氧底漆,避免低温环境下底漆固化不完全,同时底漆与基材的附着力需达到0级,确保低温下涂层不脱落。中涂可选用高抗冲击中涂提升中涂的韧性,减少低温下因振动引发的开裂,平衡抗冲击性与涂层质量。面漆则建议采用高硬度丙烯酸聚氨酯面漆或添加氧化铝耐磨助剂的面漆,可提升面漆抗风沙冲刷能力;此外,面漆须具备低玻璃化转变温度,避免低温下涂层变脆开裂。同时,遇到此类项目线路,外表面增加高硬度清漆层也是较为有效的手段。这类项目还需考虑维护需求,如遇低温季节需要返修维护,面漆应具有低温下快速固化的特点。

3.3 全生命周期成本的经济性

涂层选型需避免“只看初始成本,忽视后期维护”的误区,需综合“初始成本+维护成本+失效损失”考虑,通过量化对比选择性价比最优的涂层体系。

初始成本包括涂层材料采购成本和施工成本(喷涂设备、人工等)。维护成本包括定期补涂成本(人工、材料、车辆停运损失)。城轨车辆聚氨酯涂层在沿海地区的维护周期约5年,且需单列车停运2~3d,再例如高铁动车组,一般在服役120万km之后进行局部补涂,在服役240万km之后进行面层重涂。若涂层老化失效引发基材腐蚀,需进行车身结构维修,成本可达涂层维护成本的10~20倍。综合全周期考虑,尽量避免因频繁维护导致运营中断,降低整体成本,才更具经济性。

4 结语

轨道交通业的发展带来了全球相关产业的飞速发展,轨道车辆的涂层体系应用在不同的场景将需要更加定制化的设计。本文对轨道车辆外表面的复合涂层

体系展开研究,分析了涂层老化机理和敏感因素,并结合轨道车辆涂装工艺开发经验给出了基于老化敏感性的轨道车辆涂层选型建议,以期助力行业技术交流与发展,但本文研究范围与试验条件有限,不同区域环境监测数据的连续性与统一性不足,模型量化精度有限,未来希望联合制造商、运营单位、科研机构共同制定分场景专项标准,填补行业标准空白。

参考文献:

- [1] 韩宝明,杨智轩,余怡然,等.2020年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J].都市轨道交通,2021(1):5-11.
- [2] 翟建青,代潭龙,王国复.2020年全球气候特征及重大天气气候事件[J].气象,2021(4):471-477.
- [3] 江永,明瑞利.我国城市轨道交通发展形势和政策探讨[J].都市轨道交通,2021(2):35-41.
- [4] 杨松柏,张宝祥,赵民,等.Q/CR 546 动车组用涂料与涂装[S].
- [5] 中国铁路总公司运输局运辆客车间函[2015]73号[Z].
- [6] 陈阳,缪道平,陈福贵.重庆市轨道交通快慢车运营方案设计研究[J].现代城市轨道交通,2021(9):76-81.
- [7] 侯秀芳,梅建萍,左超.2020年中国内地城轨交通线路概况[J].都市轨道交通,2021(1):12-17.
- [8] 王建文,王孟强,鲍志刚.厦门地铁1号线路况信息系统实施案例[J].都市轨道交通,2018(4):105-108.
- [9] 陈建福.厦门轨道2号线跨海段盾构适应性分析[J].施工技术,2019(12):64-67.
- [10] 张继超,周建军,孙飞祥,等.厦门地铁3号线过海段隧道盾构法与矿山法海下对接施工风险评估[J].隧道建设,2021(22):225-231. ◆

(上接第22页)物料属性进行管理,使物料管理更加系统化、高效化^⑧。涂装物料管理系统以“一桶一码”为抓手,将高端涂装车间的物料流转化为可量化、可追溯、可预测的数据流,在质量、成本、效率三方面取得显著收益。

针对涂装车间而言除调漆间的油漆和溶剂物料外,前处理的各类化学药剂,电泳乳液,色浆,密封胶,注蜡发泡工艺所用到的空腔防腐蜡,异氰酸酯等物料与油漆物料类似同属化学品类,均可以通过该系统进行物料管理。未来将实现全车间的物料数字化运营,并探索与油漆供应商共享库存数据,对接供应商物流体系,向“云调漆”模式迈进。进一步缩短油漆物料在库房内的滞留时间,实现物料的精准配送。

参考文献:

- [1] 赖明忠.试论企业数字化管理[J].湖南社会科学,2009(1):

214-216.

- [2] 高文超,蒋守军,邢晓威,等.浅谈水性B1B2与3C1B涂装工艺对比分析[J].现代涂料与涂装,2021(3):49-51.
- [3] 沈焱.浅谈涂装厂油漆的日常管理[J].现代涂料与涂装,2012(8):39-41.
- [4] 刘杰彬,冀军.浅谈汽车涂装调漆间防火防爆检证要点[J].现代涂料与涂装,2021(3):40-42.
- [5] 刘森.物料仓库管理中条码扫描技术的应用探析[J].中国物流与采购,2022(18):104-107.
- [6] 张保元.物料管理现状分析和优化建议[J].大众标准化,2010:180.
- [7] 朱安庆,刘海彬,姚颺.船舶建造涂装物料信息化管理[J].造船技术,2019(6):79-82.
- [8] 卢佳颖,伍华彬.物料管理系统的设计与实现[J].中国物流与采购,2025(14):59-61. ◆