

# 高性能纤维增强剂对城市轨道交通 车辆涂料防滑性能的影响

王 飞 冯东喆 张 硕 刘 绪 杨 晶 康丽齐 高 雅

(中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春)

**摘 要** [目的]城市轨道交通车辆防滑涂料大多涂覆在被接触物体表面, 形成一个摩擦因数较高的防滑表面, 以增加表面粗糙度, 大幅度提高摩擦力, 进而提高表面的防滑性能。随着城市轨道交通车辆技术的持续发展, 有必要对车辆防滑涂料的相关助剂进行深入研究。[方法]以 SiC(碳化硅)短纤维与常规防滑颗粒混合物为研究对象, 在环氧树脂中添加 SiC 短纤维高性能纤维增强剂, 并进行了相关的试验。介绍了试验的原料配方、仪器及测试程序, 研究了纤维增强剂取不同质量分数值时对涂料的综合性能、耐老化性能、耐磨性、摩擦因数的影响。研究了涂料干燥状态(以下简称“干态”)、潮湿状态(以下简称“湿态”)2 种状态下纤维增强剂用量对涂料摩擦因数的影响。[结果及结论]随着纤维增强剂质量分数增加, 防滑漆的耐老化性能明显提升, 且在质量分数为 10% 时漆膜涂层的摩擦因数最大。随着纤维增强剂质量分数的增加, 涂料的磨损量呈现先减少后增加的变化趋势, 且在纤维增强剂的质量分数为 5% 时, 漆膜涂层的磨损量最小。随着纤维增强剂质量分数的增加, 干态和湿态下漆膜涂层的摩擦因数均会明显增加, 且在纤维增强剂质量分数一定情况下, 其湿态的摩擦因数要高于干态的摩擦因数。

**关键词** 城市轨道交通车辆; 防滑涂料; 纤维增强剂; 防滑性能

**中图分类号** U270.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.02.016

## Effect of High-performance Fiber Reinforcement Agent on Anti-slip Coating Properties for Urban Rail Transit Vehicles

WANG Fei, FENG Dongzhe, ZHANG Shuo, LIU Xu, YANG Jing, KANG Liqi, GAO Ya

(Engineering Technology Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] Anti-slip coatings for urban rail transit vehicles are typically applied to the surfaces of objects being contacted, forming a high-friction anti-slip surface, which could enhance the surface roughness and significantly improve frictional force, thereby boosting surface anti-slip performance. With the continuous advancement of urban rail transit vehicle technologies, it is essential to conduct an in-depth study of ad-

ditives related to vehicle anti-slip coatings. [Method] Taking the mixture of SiC (silicon carbide) staple fiber and conventional anti-slip particles as research object, the high-performance fiber reinforcement agent of SiC staple fiber is incorporated into epoxy resin, and relevant experiments are conducted. The raw material formulas, instruments, and test procedures are introduced. The impact of varying mass fractions of fiber reinforcements agents on the overall performance, aging resistance, wear resistance, and friction coefficient of the coatings is investigated. The influence of fiber reinforcement dosages agent on the coating friction coefficient is studied under two conditions of dry state ('dry') and wet state ('wet'). [Result & Conclusion] As the mass fraction of fiber reinforcement agent increases; the aging resistance of anti-slip coating significantly improves, with the friction coefficient of film coating peaking at a mass fraction of 10%; while the wear volume of the film coating initially decreases and then increases, reaching its minimum at a fiber reinforcement agent mass fraction of 5%. With the increase of fiber reinforcement agent mass fraction, the friction coefficient of the film coating increases markedly under both dry and wet states, and the wet-state friction coefficient is higher than the dry-state friction coefficient at a given fiber reinforcement agent mass fraction.

**Key words** urban rail vehicle; anti-slip coating; fiber reinforcement agent; anti-slip performance

随着轨道交通行业的迅猛发展, 与城市轨道交通车辆相关的功能性涂料的性能提升也越来越受到重视, 车辆防滑涂料便是其中之一。在城市轨道交通车辆上涂装防滑涂料, 其防滑机理是通过增加乘客、检修运维人员可能接触到的车体部位(如车顶空调机组两侧、客室门底部、司机室门底部及逃生门底部等)的表面粗糙度, 以大幅度提高摩擦力, 进而提高其防滑性能。

一般的防滑涂料是将带有明显棱状形态的颗粒加入涂料主剂(如环氧树脂)中, 待涂料固化后,

颗粒会在涂料上形成极不规则的表面,常用的防滑颗粒主要包括石英砂、氧化铝等。在车辆实际应用中发现,由于长时间受外力作用,传统的防滑涂料易出现开裂、粉化、变色等缺陷,且缺陷会随时间进一步扩散,进而存在开裂和脱落的风险。同时,传统防滑涂料在湿度不同的运行工况下,其防滑性能会明显不同。本文重点研究 SiC(碳化硅)短纤维与常规防滑颗粒混合使用后的性能,分别就 SiC 添加量对涂层综合性能、耐老化性能、不同状态下的耐磨性、对摩擦因数的影响等方面进行分析。

## 1 试验内容

### 1.1 试验原料及配方表

本文采用的防滑涂料配方为环氧树脂普遍采用的配方<sup>[1]</sup>,如表 1 所示。其中:A 组分由环氧树脂、流变助剂、功能助剂及带有鲜明棱角的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  防滑颗粒等构成;B 组分为 SiC 短纤维增强剂。

表 1 防滑涂料配方

Tab. 1 Anti-slip coating formula

组分名称	原材料	质量分数/%	作用类型
A 组分	环氧树脂(型号为 6301)	6~10	主剂
	环氧树脂(型号为 691-S-5)	15~25	主剂
	甲基纤维素(型号为 6900)	3~5	流变助剂
	有机胺中和剂(型号为 PSI-530)	5~12	功能助剂
	滑石粉(型号为 BHS-1851)	25~40	填料
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 防滑颗粒	8	防滑
B 组分	SiC 短纤维增强剂	2~12	增强剂

### 1.2 试验仪器

本试验涉及的仪器如下:①摩擦因数测试仪,该仪器由济南兰光机电技术有限公司生产,型号为 FPT-F1;②耐候性试验机,该仪器由美国 Q-panel 公司生产,型号为 QUV/Spray;③漆膜磨损仪,该仪器由普申化工有限公司生产,型号为 JM-IV。

### 1.3 试验测试程序简介

#### 1.3.1 耐磨性能测试

本文参考 GB/T 1768—2008《漆膜耐磨性测定法》的橡胶砂轮法进行测试。按规范要求,把橡胶砂轮固定在磨损仪的可转动底座上,并将橡胶砂轮与涂层表面压至水平。用分析天平称取磨损前后橡胶砂轮样板的质量,二者的差值即为磨损量。

#### 1.3.2 摩擦因数测试

将防滑涂料涂覆在测试样板表面,经干燥处理

后备用。将涂覆好的塑料薄膜裁成 250 mm(长)×60 mm(宽)的试样,将试样固定在小滑块和滑板上,用摩擦因数测试仪测定塑料薄膜接触面的摩擦因数。每个试样测 3 次数值,然后求其平均值。

#### 1.3.3 耐老化性能测试

将涂料涂覆于镀锡钢板和玻璃板上,在室温条件下干燥成膜。利用人工加速老化的方式,以 72 h 为 1 个老化阶段,直至符合 GB/T 1766—2008《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》漆膜耐候性综合评级方法中“差级”的任一项时,终止试验。

## 2 试验结果分析

### 2.1 纤维增强剂用量对涂料综合性能的影响

表 2 为纤维增强剂对涂料综合性能的影响。从表 2 可以看出:增加纤维增强剂后,防滑涂料整体性能产生了较大的影响。未添加纤维增强剂的防滑涂料在 72 h 加速老化试验(采用人工加速方式)后,已经无法满足技术要求。与未添加纤维增强剂的涂料相比,添加了纤维增强剂的涂料在经过 72 h、192 h 老化试验后,其耐老化性能有了明显的提升。对 192 h 老化试验后漆膜的综合性能进行汇总,仅有 1 项起泡性能轻微下降,其余指标均保持良好。究其原因,主要为纤维增强剂不但能够大幅度提升漆膜的机械韧性,还能使漆膜普遍具备较强的抗紫外线功能,因此,添加了纤维增强剂的涂料不仅可以提升防滑涂料抗裂纹、抗粉化等机械方面的性能,还可以提高涂料耐高温、耐老化的化学性能。

表 2 纤维增强剂对涂料综合性能的影响

Tab. 2 Influence of fiber reinforcement agents on the overall performance of coatings

试验时间/h	测试工况	试验样件表面状态等级					
		变色	粉化	裂纹	起泡	生锈	脱落
72	未添加纤维增强剂	3	3	1	2	1	2
	添加纤维增强剂	1	1	0	0	0	0
192	未添加纤维增强剂	4	4	3	3	3	3
	添加纤维增强剂	3	3	1	2	1	0

### 2.2 纤维增强剂用量对涂料耐磨性的影响

图 1 为不同纤维增强剂质量分数对涂料磨损量的影响。从图 1 可看出:不同质量分数的纤维增强剂对涂料耐磨性和耐磨量有较大影响。添加纤维增强剂后,防滑涂料的耐磨性明显提高,但随着质量分数的进一步增加,涂料的磨损量呈现先减少后

增加的变化趋势。当纤维增强剂的质量分数为5%时,涂料的磨损量最小。其主要原因为:增强纤维为短纤维,纤维尺寸小且可以分散在环氧树脂中,当防滑涂料涂层发生摩擦时,其表面的纤维端具有类似自润滑的功能,从而降低了表面的磨损量。但是,随着纤维增强剂质量分数继续增加,纤维增强剂会出现聚集现象,并对环氧树脂聚凝造成干扰,进而破坏涂层表面的稳定结构,导致磨损量增大。

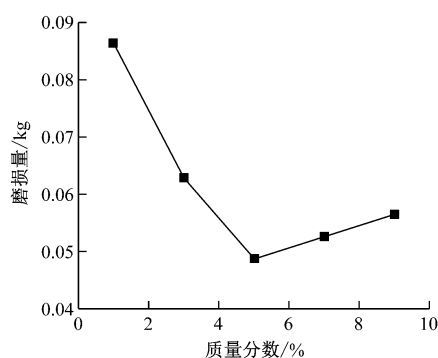


图1 不同纤维增强剂质量分数对涂料磨损量的影响

Fig. 1 Influence of different fiber reinforcement agent mass fractions on the wear volume of coatings

### 2.3 纤维增强剂用量对涂料摩擦因数的影响

图2为不同纤维增强剂质量分数对涂料摩擦因数的影响。从图2可看出:随着纤维增强剂质量分数的增加,防滑涂料的摩擦因数呈现先增加后减少的变化趋势。这是因为纤维增强剂具有强大的聚集交联性能,能提高 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 防滑颗粒的稳定性,进而提高漆膜表面的摩擦性能。但是,当纤维增强剂质量分数达到10%及以上时,纤维增强剂会出现聚集、分布不均匀的现象,导致涂料的摩擦因数有所下降。

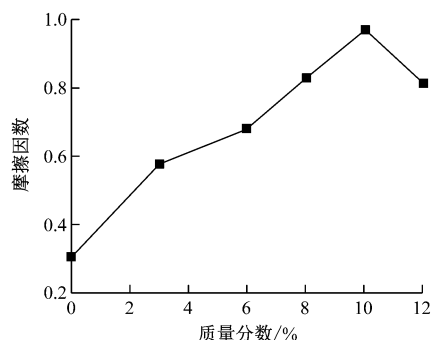


图2 不同纤维增强剂质量分数对涂料摩擦因数的影响

Fig. 2 Influence of different fiber reinforcement agent mass fractions on the friction coefficient of coatings

### 2.4 纤维增强剂用量对涂料干湿状态下摩擦因数的影响

防滑漆所在区域大多为车顶、客室门下部、司机室门下部等区域。这些区域容易受到天气因素的影响,或因乘客鞋部有雨水导致防滑区域长时间处于潮湿环境中,所以研究纤维增强剂对防滑涂料干燥状态(以下简称“干态”)、潮湿状态(以下简称“湿态”)2种状态下摩擦因数的影响,也具有重要的意义。

图3为不同纤维增强剂质量分数对涂料干湿状态下摩擦因数的影响。由图3可看出,随着纤维增强剂质量分数的增加,干态和湿态下涂料的摩擦因数均会明显增加。在纤维增强剂质量分数相同的情况下,湿态下涂料的摩擦因数要大于干态下涂料的摩擦因数,其原因为:防滑漆表面为不平整状态,表面存在很多小的凹坑,当液体受到外力作用时,接触面与凹坑内的空气会被排出,使得加压部位产生明显的负压吸附作用,这进一步增强了运动阻力,导致摩擦因数增大。另外,由于水的存在,涂膜表面的粘性增加,粘弹性也随之增加,这同样会增加运动阻力。

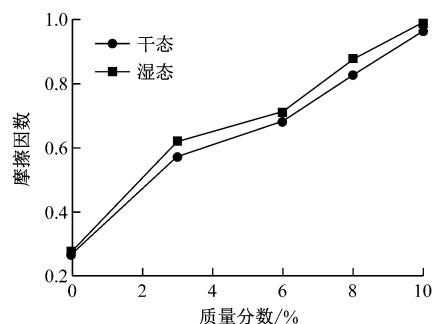


图3 不同纤维增强剂质量分数对涂料干湿状态下摩擦因数的影响

Fig. 3 Influence of different fiber reinforcement agent mass fractions on the friction coefficient of coatings in dry and wet states

## 3 结语

本文研究表明:增加纤维增强剂后,漆膜的抗裂纹、抗粉化、耐高温及耐老化性能均有较大程度的提高,且进一步明确了纤维增强剂对防滑涂料磨损量和摩擦因数的影响。在今后的研究中,应以此试验成果为基础,进一步研究纤维增强剂与其他类型增强材料(如纳米粒子等)复合使用时对漆膜

(下转第84页)

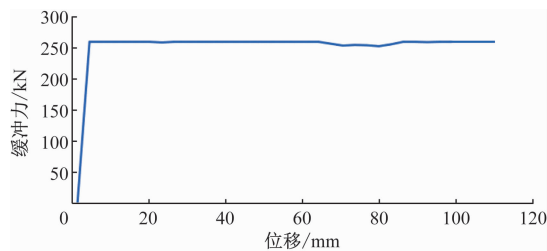


图 12 排障器的缓冲力-位移曲线

Fig. 12 Buffer force-displacement curve of the obstacle deflector

碰撞过程中,吸能位移为 110 mm,此时的总吸能量为 29.15 kJ,大于 EN 15227:2020 中对总吸能量的要求(140 km/h 等级列车排障器对应的总吸能量为 28.80 kJ)。由此可认为,本文设计的排障器可以满足标准要求。

### 3 结语

本文结合我国某市域轨道交通列车实际需求,提出了一种可满足设计速度为 140 km/h 的市域轨道交通 A 型列车的排障器。本文设计的排障器在结构方案上具有屏障结构连续、几何造型合理等特点,可将障碍物推到轨道两边,满足 EN 15227:2020 对排障器的外形要求。选用塑性变形可控的铝蜂窝作为吸能单元,将吸能单元设置在屏障后方两侧,当吸能单元触发后,排障器整体结构可有序稳定地后退,不会出现传统排障器在发生碰撞后仅中间吸能单元后退、两侧屏障不动的问题,也不会发生排障器夹住障碍物无法将其排至轨道两侧的情况。

静强度仿真分析结果表明,在中心静压 240 kN 和侧面静压 200 kN 这 2 种静态负载工况下,该排障

器的最大应力为 651 MPa,未超过标准规定的防撞部件材料的屈服强度值。

动态吸能仿真分析结果表明,该排障器在吸能过程中,整体结构后退趋势平稳,未发生失效。吸能单元缓冲力波动较小,总吸能量达到了 29.15 kJ,可以满足标准要求。

### 参考文献

- [1] 张云峰. 列车排障吸能器结构设计及仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(6): 79.  
ZHANG Yunfeng. Structural design and simulation analysis of the trouble shooting and energy absorbing device for train[J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(6): 79.
- [2] 苏永章, 付耿哲, 岳译新, 等. 列车与活体侵入物高速碰撞的安全性研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(13): 79.  
SU Yongzhang, FU Gengzhe, YUE Yixin, et al. Study on safety of high-speed collision between train and living invader[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(13): 79.
- [3] 刘星宇, 李娅娜. 动车组排障器优化设计[J]. 机械, 2023, 50(1): 35.  
LIU Xingyu, LI Yana. Optimization design of EMU cowcatcher[J]. Machinery, 2023, 50(1): 35.
- [4] 胡坤镜, 袁文辉. 200 km/h 客运机车排障器强度分析及设计改进[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(1): 56.  
HU Kunjing, YUAN Wenhui. Strength analysis and improved design of pilot on 200 km/h passenger locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2012, 35(1): 56.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10

Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10

· 通信作者:段鹏飞,高级工程师,013200029040@crregc.cc

· ©《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 79 页)

磨损量和摩擦因数的影响,分析其协同效应,以期开发出综合性能更优的复合增强体系,提升漆膜性能。

### 参考文献

- [1] 江林峰, 陈雷, 李一新.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  防滑粒料对防滑涂层防滑及磨损性能的影响[J]. 涂料工业, 2014, 44(1): 6.  
JIANG Linfeng, CHEN Lei, LI Yixin. Effects of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nonskid particles on antiskid and wear performance of non-skid coating[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(1): 6.
- [2] 邓琦, 徐金文, 高新华, 等. 舰船甲板防滑涂料技术现状及发展趋势[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(2): 111.  
DENG Qi, XU Jinwen, GAO Xinhua, et al. Technology and

developing tendency of warship deck paints[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(2): 111.

- [3] 陈从棕, 冷晓飞, 姜秀杰, 等. 轻质耐磨防滑涂料的制备及其性能研究[J]. 涂料工业, 2022, 52(5): 48.

CHEN Congzong, LENG Xiaofei, JIANG Xiujie, et al. Preparation and performance of lightweight wear-resistant non-skid coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2022, 52(5): 48.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10

Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10

· 通信作者:王飞,高级工程师,redstaroverworld@126.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