

摩擦磨损与润滑

钢轨轨面静电喷涂 SiO_2 增黏颗粒
行为与利用率研究黄启芮¹, 张沐玥², 王文健^{1,2}, 师陆冰³, 林强², 丁昊昊^{1,2}

(1.西南交通大学 唐山研究院, 河北 唐山 063000; 2.西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031; 3.郑州机械研究所有限公司, 郑州 450052)

摘要: 目的 为了改善传统撒砂过程中 SiO_2 增黏微粒利用率低的问题, 将静电喷涂技术引入轮轨增黏领域, 研究不同喷涂参数与颗粒粒径对 SiO_2 微粒行为与利用率的影响, 并进一步对比分析静电喷涂微粒与传统撒砂的增黏效果。方法 利用 Gema 静电喷枪与静电喷涂动态试验平台进行喷涂试验; 利用 MJP-30A 轮轨滚动磨损与接触疲劳试验机进行轮轨黏着与磨损试验; 利用光学显微镜 (OM) 对 SiO_2 微粒吸附情况进行观察与分析, 并通过电子天平测量与计算轨面颗粒量与颗粒利用率。结果 相较于未施加静电电压, 静电电压为 90 kV 时轨面颗粒量提升了 3.8 倍。静电电压由 30 kV 增加至 70 kV 时, 颗粒利用率提升约 60%; 当静电电压进一步增加至 90 kV 时, 由于颗粒带电量趋于饱和, 颗粒利用率仅提升 10%。 SiO_2 微粒利用率随着喷嘴高度与颗粒粒径的增大先增大后减小, 喷嘴高度为 25 cm 且颗粒粒径为 300 目时颗粒利用率最高, 可达 60%; 300 目 SiO_2 微粒在静电电压为 90 kV 时, 随着喷枪移速的增大, 喷枪在单位距离上喷涂时间相对减少, 使得喷涂在钢轨轨面的颗粒量降低。90 kV 静电喷涂 SiO_2 微粒增黏时, 最大黏着系数接近传统撒砂增黏, 有效作用时间是传统撒砂的 2.2 倍, 轮轨磨损率仅为传统撒砂增黏的 75% 与 65%, 轮轨损伤显著减轻。结论 利用静电喷涂技术可以有效提升 SiO_2 微粒在钢轨轨面的利用率, 并提升颗粒在轨面的吸附性; 静电喷涂 SiO_2 微粒增黏与传统撒砂增黏的黏着系数相近, 且轮轨磨损率更低。

关键词: 静电喷涂; 轮轨增黏; 撒砂增黏; 增黏颗粒; 颗粒参数

中图分类号: TH117.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)06-0196-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.06.017

Behaviour and Utilization Rate of SiO_2 Particles by
Electrostatic Spraying on Rail SurfaceHUANG Qi-rui¹, ZHANG Shu-yue², WANG Wen-jian^{1,2}, SHI Lu-bing³, LIN Qiang², DING Hao-hao^{1,2}

收稿日期: 2022-05-16; 修订日期: 2022-09-08

Received: 2022-05-16; Revised: 2022-09-08

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项 (2018YFE0109400); 四川省苗子工程项目 (2021JDRC0086); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划系统性重大项目 (P2021J038)

Fund: National Key R&D Program Intergovernmental Key Items for International Scientific and Technological Innovation Cooperation (2018YFE0109400); Sichuan Science and Technology Program (2021JDRC0086); Systematic Major Project of Science and Technology Research and Development Plan of China State Railway Group Co., Ltd. (P2021J038)

作者简介: 黄启芮 (1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为轮轨增黏调控技术。

Biography: HUANG Qi-rui (1998-), Male, Postgraduate, Research focus: wheel/rail adhesion control technology.

通讯作者: 丁昊昊 (1988—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为轮轨摩擦学。

Corresponding author: DING Hao-hao (1988-), Male, Doctor, Research assistant, Research focus: tribology of wheel and rail.

引文格式: 黄启芮, 张沐玥, 王文健, 等. 钢轨轨面静电喷涂 SiO_2 增黏颗粒行为与利用率研究[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 196-207.

HUANG Qi-rui, ZHANG Shu-yue, WANG Wen-jian, et al. Behaviour and Utilization Rate of SiO_2 Particles by Electrostatic Spraying on Rail Surface[J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 196-207.

- (1. Tangshan Institute, Southwest Jiaotong University, Hebei Tangshan 063000, China;
2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

ABSTRACT: In railway systems, sands are often applied to the wheel-rail interface to improve the adhesion coefficient. However, hard particles such as quartz sand will inevitably cause wear to the wheel and rail after entering the contact area of wheel and rail. The viscosity increase effect of sand sprinkling mainly comes from the broken sand particles and has nothing to do with particle size. Therefore, using SiO₂ particles instead of sand particles to increase viscosity can not only meet the viscosity increase effect but also significantly reduce wheel-rail damage. However, due to the small particle size and lightweight of SiO₂ particles, it is difficult to effectively apply SiO₂ particles to the wheel-rail interface by using the sand spout device in the current railway system. If electrostatic spraying is used to improve the utilization rate of SiO₂ particles, it will have a high application prospect. Therefore, the work aims to introduce electrostatic spraying technology into the wheel-rail viscosity increase field and study the effects of different spraying parameters and particle sizes on the behavior and utilization of SiO₂ particles, so as to solve the problem of low utilization of SiO₂ viscosity increase particles in the traditional sanding process, and further compare and analyze the viscosity increase effects of electrostatic spraying particles and traditional sanding.

The rail material selected in the test was U75V rail cut at each section of 50 cm from the site, and the size of SiO₂ micro-powder was 100, 200, 300 and 500 mesh, and the content of silica in SiO₂ micro-powder was more than 95%. Before each coating test, the rail surface was sanded, polished and cleaned with anhydrous ethanol and the spray gun was flushed with compressed air to prevent powder from blocking the muzzle, and the grounding wire was fixed to the rail. During the test, the Gema electrostatic spray gun was fixed on the rodless slider of the dynamic test bench. At the end of the coating test, it stood for 5 min, and after the suspended particles in the air were completely deposited, the particles adsorbed on the rail surface were collected and weighed by an electronic balance, and then the effective utilization rate was calculated, and the particle adsorption was observed by an optical microscope.

Compared with the traditional spraying method, the amount of SiO₂ particles on the rail surface by electrostatic spraying increased about 3.8 times. When the electrostatic voltage was increased from 30 kV to 70 kV, the particle utilization rate increased by 60%, but when the electrostatic voltage was further increased to 90 kV, since the particle charge tended to saturate, the particle utilization rate only increased by 10%. The utilization rate of SiO₂ particles firstly increased and then decreased with the increase of nozzle height and particle size. When the nozzle height was 25 cm and the particle size was 300 mesh, the particle utilization rate was the highest, reaching 60%. When the electrostatic voltage of the 300 mesh SiO₂ particles was 90 kV, the spraying time of the spray gun on the unit distance was relatively shortened with the increase of the moving speed of the spray gun. Therefore, the number of spraying particles on the rail surface of the spray gun decreased with the increase of the speed. When the nozzle height was 10 and 25 cm, the particle utilization rate increased with the increase of flow rate. When the nozzle height was 35 cm, the particle utilization rate increased firstly and then decreased with the increase of the gun moving speed. Compared with the nozzle of 1 m/s, the particle utilization rate of 9 m/s nozzle height at 10 and 25 cm increased by 8% and 7% respectively, while the particle utilization rate at 35 cm decreased by 8%.

When 2 g viscous particles were sprayed on a single time, the adhesion enhancement effect of direct spraying SiO₂ particles was lower than traditional sand spraying and electrostatic spraying. At electrostatic voltage of 90 kV, the maximum adhesion coefficient of SiO₂ particles by electrostatic spraying was close to traditional sand spraying, and the action revolution was 400 revolutions, which was 8 times of that under direct spraying SiO₂ particles and 2.2 times of that under traditional sand spraying. When the amount of sand was 5 g/min, the adhesion coefficient of SiO₂ particles by 90 kV electrostatic spraying was 0.28, which was close to 0.3 of traditional sand spraying, and the wheel-rail damage was only 75% and 65% of that under traditional sand spraying. The damage to wheel-rail increased by direct spraying SiO₂ particles was 66% and 57% of that under traditional sand spraying, but its adhesion coefficient was lower than 0.2. Electrostatic spraying technology can effectively improve the utilization rate of SiO₂ particles on the rail surface and enhance the adsorption of particles on the rail surface. The adhesion coefficient of electrostatic spraying SiO₂ particles is similar to that under traditional sanding, and the wheel-rail damage rate is lower.

KEY WORDS: electrostatic spraying; wheel/rail adhesion; sanding adhesion; viscosity increase particles; particle parameters

良好的轮轨黏着关系是保障列车安全高效运行的前提,由于轮轨系统运行环境较为开放,轮轨间黏着关系极易受到外部因素影响,引发低黏着问题^[1]。低黏着会导致列车运行效率低下、制动距离过长、轮对空转/打滑、轮轨擦伤等问题^[2],并可能引发列车延误、相撞等一系列安全与经济问题^[3]。轮轨低黏着主要是因为第三体介质在轮轨接触界面形成的润滑膜或污染层隔离金属微凸体的接触所致^[1]。为防止列车运行过程中低黏着问题的出现,铁路系统中常采用向轮轨界面撒砂的方法来提高黏着系数^[4]。通过向轮轨界面撒砂可以有效去除轨面污染物,而且进入轮轨接触界面的硬质颗粒会穿透污染膜,通过轮轨接触表面的犁沟作用提高黏着力^[5]。然而,在提高轮轨黏着系数的同时,砂子等硬质颗粒也会不可避免地加剧轮轨磨损与损伤。现有研究结果均证明,进入轮轨界面的砂颗粒会显著提高轮轨材料的磨损率,并导致轮轨表面损伤和棘轮效应的加剧^[6-11]。为了降低砂子等硬质颗粒对轮轨造成的损伤,许多学者对撒砂增黏的机理进行了相关研究。孙琼等^[12]研究表明,硬质颗粒在金属界面上的犁沟作用力是提高轮轨黏着系数的主要机理;Shi等^[13]研究表明,撒砂的增黏效果主要来自于破碎后的砂子微粒,而与颗粒粒径无关,直接使用微粒增黏能够在保证增黏效果的同时降低轮轨损伤。

然而,由于 SiO_2 微粒粒径小、质量轻、吸附性差,利用现行铁路系统的撒砂装置难以有效施加到轮轨界面,限制了 SiO_2 微粒在轮轨增黏领域的应用。为了提升 SiO_2 微粒的利用率,本文将静电喷涂技术引入轮轨增黏领域。静电喷涂的概念起源于20世纪50年代^[14]。在过去的几十年里,静电喷涂因吸附性好、环保、粉末可回收等优点发展迅速^[15],广泛应用于涂装、防腐、电气原件绝缘及制造业领域^[16],并逐渐向纳米级超高精度喷涂及生物制药等领域发展^[17-18]。静电喷涂技术基于高压静电电晕电场的原理^[19],利用静电吸附效应,使得颗粒在物体表面的吸附性大大增强。现有研究表明,在良好的喷涂环境下静电喷涂颗粒的利用率可以达到80%以上^[20]。因此,研究钢轨

轨面静电喷涂 SiO_2 增黏微粒的行为与利用率对 SiO_2 微粒在轮轨增黏领域的应用具有重要的理论和工程价值。

文中利用Gema静电喷枪、静电喷涂动态试验平台和轮轨滚动磨损与接触疲劳试验机研究不同喷涂参数与环境条件下静电喷涂对 SiO_2 增黏颗粒利用率与吸附率的影响,探讨喷涂参数与颗粒参数同 SiO_2 微粒利用率的关系,分析静电喷涂 SiO_2 微粒的增黏效果,以期对 SiO_2 增黏微粒在轮轨增黏领域的应用提供一种新技术。

1 试验材料及方法

1.1 静电喷涂试验

1.1.1 试验设备及材料

喷涂试验利用Gema静电喷涂装置(OptiFlex Pro F, Switzerland)进行,该装置由供粉/供气系统、高压静电喷枪、喷枪控制器及接地装置组成。静电喷涂装置工作示意图如图1所示,被喷涂工件接地(正极),喷枪头部金属喷杯和电极针接高压负极(一般为60~100 kV)产生电晕放电,在其附近产生密集的负电荷,使喷枪和工件之间形成一个较强的静电场^[21]。作为运载气体的压缩空气将 SiO_2 微粉从供粉桶输送至喷枪的喷杯和极针,使 SiO_2 微粉带负电荷进入静电场,在静电力和运载气体推动力的双重作用下, SiO_2 微粉均匀地飞向接地工作表面,形成厚度均匀的 SiO_2 微粉涂层^[22-24]。

试验使用静电喷涂动态试验平台模拟列车行进时喷涂增黏颗粒的现场工况,该试验台由高压静电喷枪、高度调节支架、钢轨及无杆滑块装置组成。静电喷枪固定在无杆滑块装置上(图1),通过调节支撑板高度设置静电喷枪喷嘴与钢轨轨面的距离,通过控制无杆滑块装置来调整涂敷位置。此外,无杆滑块装置可以通过调节输入气压使静电喷枪以不同的速度移动。

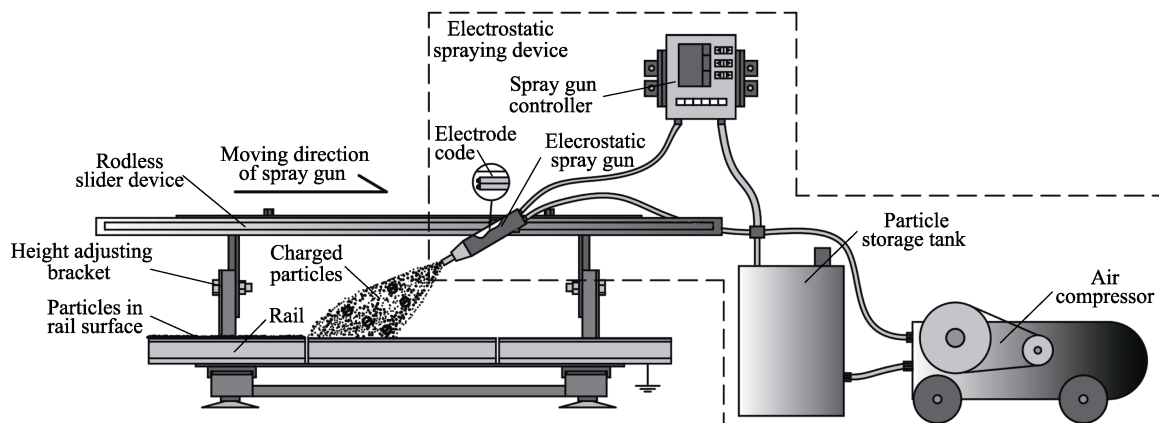


图1 静电涂敷装置与动态试验平台

Fig.1 Electrostatic spraying device and dynamic test platform

试验选用的钢轨材料为长 150 cm 的 U75V 热轧钢轨。已有研究表明, 静电喷涂的颗粒粒径在 20~90 μm 之间较为合适^[25], 对应目数约为 100 目—550 目, 因此, 试验过程中选择的 SiO₂ 微粉粒径分别为 100 目、200 目、300 目、500 目。此外, SiO₂ 微粉中 SiO₂ 含量大于 95%, 符合国家标准对撒砂颗粒成分的要求^[26]。

1.1.2 试验过程及参数

在进行不同喷涂参数对颗粒利用率与轨面颗粒量影响的试验时, 由于喷枪在动态试验平台上移动时气流及静电电场变化, 使得颗粒粒径与静电电压对颗粒吸附性及利用率的影响难以评估。因此, 为控制试验变量、减少试验量, 在研究静电电压、颗粒粒径、喷嘴高度对颗粒吸附性及利用率的影响时, 将喷枪固定在动态试验台上进行涂敷 (即喷枪移动速度为 0, 称为静态涂敷试验, 具体试验参数见表 1)。通过静态涂敷试验确定颗粒粒径、静电电压、喷嘴高度对颗粒吸附性与利用率的影响关系并进行参数优化后, 利用动态试验平台开展动态静电喷涂试验, 模拟列车行进时颗粒喷涂的现场工况, 研究喷枪移速对颗粒利用率与轨面颗粒量的影响。此外, 为了进一步了解喷枪高度对动态静电喷涂颗粒利用率的影响, 在动态静电喷涂试验过程中开展了不同喷枪喷嘴高度试验, 具体试验参数如表 2 所示。

每次喷涂试验前用砂纸打磨抛光钢轨轨面, 用无水乙醇清洗钢轨轨面, 利用压缩气流冲洗喷枪, 防止粉末堵塞枪口, 然后将接地线固定在钢轨上。试验时将静电喷枪固定在动态试验台无杆滑块上, 喷枪输入

表 1 静电喷涂试验参数 (静态)

Tab.1 Parameters of electrostatic spraying experiment (static state)

Parameter	Value
Electrostatic voltage/kV	0, 30, 50, 70, 90
Particle distribution/mesh	100, 200, 300, 500
Nozzle height/cm	10, 25, 35
Spray gun speed/(m·s)	0

表 2 静电喷涂试验参数 (动态)

Tab.2 Parameters of electrostatic spraying experiment (dynamic state)

Parameter	Value
Electrostatic voltage/kV	90
Particle distribution/mesh	300
Nozzle height/cm	10, 25, 35
Spray gun speed/(m·s)	1, 3, 5, 7, 9

气压为 0.8 MPa, 由于一次喷涂时间仅约为 2~3 s, 因此气压等参数变化对试验影响很小。试验温度为 17~25 ℃, 相对湿度为 55%~70%。喷涂试验结束后静置 5 分钟, 待空气中悬浮颗粒完全沉积后, 收集吸附于钢轨轨面的 SiO₂ 颗粒, 用电子天平 (JA4103, China) 称重, 并利用光学显微镜 (OM, OLYMPUS BX60M, Japan) 观察颗粒吸附情况。本文将钢轨轨面颗粒量定义为落于钢轨轨面并可进入轮轨接触区域内的颗粒量; 颗粒吸附量定义为钢轨侧倾 90°时未从轨面脱落的颗粒量; 颗粒利用率为轨面颗粒量与颗粒输出总量之比; 颗粒吸附率为颗粒吸附量与轨面颗粒总量之比。

1.2 轮轨黏着与磨损试验

1.2.1 试验设备及材料

滚动试验在 MJP-30A 轮轨滚动磨损与接触疲劳试验机上进行^[27-28], 如图 2 所示。试验中上试样为取自 C 级车轮踏面的车轮试样; 下试样为取自 U75V 热轧钢轨轨头的钢轨试样。试样直径为 60 mm, 取样位置及试样结构如图 3 所示。试验中所选用的增黏颗粒为石英砂颗粒与 300 目 SiO₂ 微粒, 其中, 石英砂颗粒为现行铁路系统中所使用的撒砂颗粒 (粒径范围为 16 目—32 目), 用于模拟传统撒砂增黏试验; 300 目 SiO₂ 微粒则用于喷涂微粒增黏试验。

1.2.2 试验过程及参数

滚动试验设置法向载荷为 2 350 N, 通过赫兹模拟准则计算得到轮轨最大接触应力为 1 100 MPa, 对

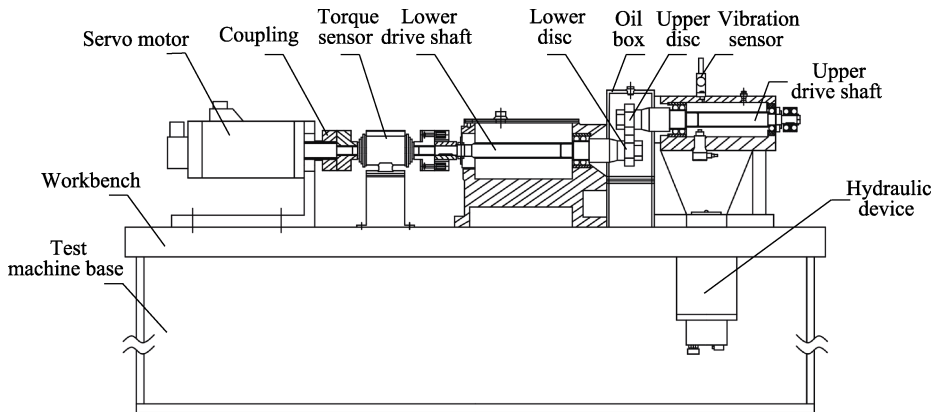


图 2 MJP-30A 轮轨滚动磨损与接触疲劳试验机结构简图
Fig.2 Structural sketch of MJP-30A rolling-sliding wear and contact fatigue apparatus

应列车轴质量约 14 t^[29], 车轮试样转速为 495 r/min, 钢轨试样转速为 500 r/min, 轮轨滑差率为 1%。滚动试验时, 首先将提前收集并裁剪为约 10 mm×10 mm 大小的新鲜树叶用镊子连续添加进滚动接触界面入口区, 用于模拟树叶低黏着工况, 添加速率为 10 片/min; 然后进行撒砂(传统石英砂)或喷涂 300 目 SiO₂ 微粒(不带电喷涂和带静电喷涂)。喷涂时, 喷枪输入气压为 0.8 MPa, 喷嘴距离轮轨接触区 25 cm。

模拟试验主要分为 2 个部分: 第 1 部分进行传统撒砂增黏、不带电喷涂微粒增黏及不同静电电压下喷涂微粒增黏, 在树叶低黏着工况下进行单次增黏操作(即撒一次砂或喷涂一次微粒), 分析黏着系数随时

间的变化规律, 对比 3 种增黏方式的增黏效果(最高黏着系数和有效作用时间), 具体试验参数如表 3 所示。第 2 部分则进行传统撒砂增黏、不带电喷涂微粒增黏、90 kV 静电电压下喷涂微粒增黏对轮轨磨损的对比试验, 试验过程中持续增黏操作(即持续撒砂或持续喷涂微粒), 从磨损率与表面损伤两方面进行对比分析, 具体试验参数如表 4 所示。以上两部分试验中, 第 1 部分试验以施加硬质颗粒后黏着系数重新恢复至低黏着状态为一次试验; 第 2 部分试验则是以 5 g/min 撒砂量持续喷涂增黏颗粒直至试样滚动 5 万转为一次试验。本研究中轮轨试样均在干态工况下磨合至摩擦因数稳定后才开始试验。

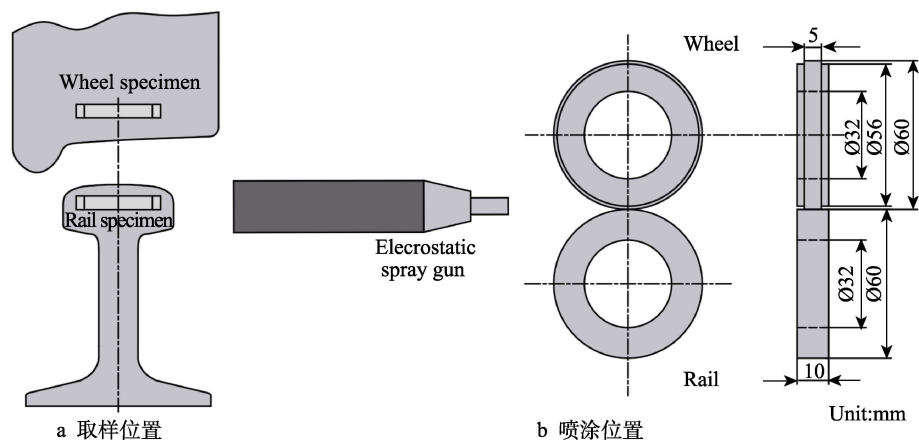


图 3 轮轨试样取样位置及结构

Fig.3 Sampling position and structure of wheel/rail rollers: a) sampling position; b) spraying position

表 3 3 种增黏方式增黏效果对比试验

Tab.3 Comparison test of viscosity increase effect in three viscosity increase methods

Simulated condition	Sanding particles	Addition amount		Electrostatic voltage/kV
		Leaf medium	Particle	
Adhesion enhancement in leaf condition	Sand			
	300 mesh SiO ₂	10 piece/min	2 g/time	0
	300 mesh SiO ₂			30, 50, 70, 90

表 4 3 种增黏方式轮轨损伤对比试验

Tab.4 Comparison test of wheel-rail damage in three viscosity increase methods

Simulated condition	Sanding particles	Addition amount		Electrostatic voltage/kV	Number of cycles/r
		Leaf medium	Particle		
Adhesion enhancement in leaf condition	Sand				
	300 mesh SiO ₂	10 piece/min	5 g/min	0	50 000
	300 mesh SiO ₂			90	

2 试验结果与分析

2.1 静电电压对颗粒利用率及吸附率的影响

为探究静电电压对 SiO₂ 微粒吸附性与利用率的影响, 进行未施加静电电压与不同静电电压下喷涂

SiO₂ 微粒试验, 结果如图 4 所示。可以看到, 增大静电电压可以有效增加 SiO₂ 微粒在轨面上的颗粒量与吸附量(图 4a), 相较于未施加静电, 静电电压 90 kV 时电压轨面颗粒量提升了 3.8 倍。同时, 颗粒吸附率与利用率存在明显的线性关系(图 4b), 即增大静电电压可以提升颗粒的静电吸附性, 进而提升颗粒的利用率。

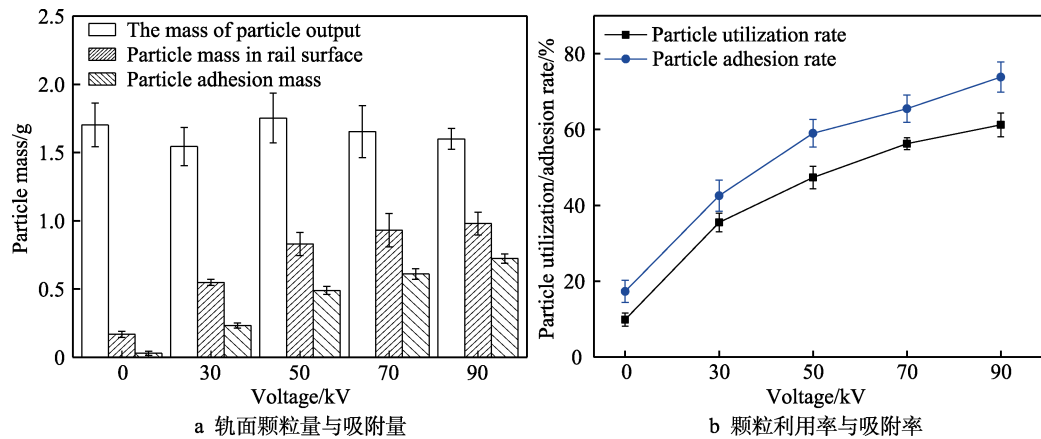


图 4 电压对颗粒利用与吸附的影响

Fig.4 Effect of voltage on utilization and adsorption of particles: a) particle utilization mass and adhesion mass on rail surface; b) utilization rate and adhesion rate of particle

对比图 4b 中施加 30、50、70、90 kV 电压时颗粒的利用率与吸附率, 发现当静电电压低于 70 kV 时, 随着静电电压由 30 kV 增大至 50 V, 再逐渐增大至 70 kV, SiO₂ 微粒利用率依次提升了 33% 与 23%; 而当静电电压由 70 kV 增大至 90 kV 时, 颗粒利用率仅提升了 10%。即静电电压低于 70 kV 时, 提升静电电压可以显著增大颗粒利用率, 而静电电压高于 70 kV 时, 继续增大电压对颗粒利用率提升不明显。导致这一现象的主要原因与颗粒带电量及最大带电量有关。由喷涂机理可知, 静电喷涂的主要吸附力是静电力, 而静电力大小与颗粒的带电量直接相关。根据库仑定律, 一定时间里颗粒的带电量如式 (1) 所示^[27]。

$$Q_s = 3\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} d^2 E \quad (1)$$

式中: Q_s 为颗粒的带电量; ϵ 为颗粒的介电常数; d 为颗粒粒径; E 为外加电场强度; ϵ_0 为空气介电常数。由式 (1) 可知, 在颗粒粒径不变的情况下, 随着静电电压的增大, 电极产生的电场强度也随之增大, 此时颗粒经过电极针时携带的电荷量也会增加, 从而使得颗粒吸附性增强, 进而提升了颗粒利用率。而持续增大外电场强度并不会增大颗粒的最大带电量, 根据颗粒的最大带电量公式可知^[30], 颗粒最大带电量存在如式 (2) 所示关系。

$$q_{\max} = \frac{2\pi\epsilon_0 dkT}{e} \quad (2)$$

式中: q_{\max} 为颗粒最大带电量; k 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度; e 为元电荷。从式 (2) 可以看出, q_{\max} 并不会随着外电场的增强而提升, 因此, 随着达到最大带电量的 SiO₂ 微粒数量逐渐增多, 即使继续增大静电电压也无法显著提升 SiO₂ 微粒的利用率。

为了进一步分析静电电压对颗粒吸附性的影响, 利用光学显微镜 (OM) 观察了不同电压条件下颗粒在钢轨轨面的吸附情况。图 5 为未施加静电电压与不同静电电压下 SiO₂ 微粒在轨面吸附情况的微观图像。

对比发现, 未施加静电直接喷涂的颗粒由于吸附性差, 难以附着在钢轨轨面, 喷涂后的钢轨试样表面由于气流的影响仍有大片区域未被 SiO₂ 微粒附着 (图 5a); 而静电喷涂的 SiO₂ 微粒由于静电力的作用在钢轨试样表面形成了一层厚度均匀的 SiO₂ 涂层 (图 5b—e), 且随着静电电压的增大, 涂层厚度不断增加, 静电电压 90 kV 时涂层平均厚度为 950 μm (图 5e)。因此, 相较于直接在轨面喷涂 SiO₂ 微粒, 利用静电喷涂可以有效提升 SiO₂ 微粒在钢轨轨面的吸附性, 进而改善增黏效果。

2.2 颗粒粒径与喷嘴高度对颗粒利用率的影响

为进一步探究静电喷涂颗粒利用率的影响因素, 在 90 kV 静电电压下进行了 100 目、200 目、300 目、500 目的 SiO₂ 微粒在喷嘴高度为 10、25、35 cm 时的静电喷涂试验, 结果如图 6、图 7 所示。从图 6 中可以看出: 当喷嘴与钢轨距离 10 cm 时, 随着颗粒粒径的增大, 轨面颗粒量呈先增大后减小的趋势。这是由于喷嘴与钢轨距离 10 cm 时, 相较于其他因素, 喷嘴处喷射的气流对轨面颗粒的影响更显著, 而相较于小粒径颗粒, 大粒径颗粒在轨面抵抗气流影响的能力更强, 因此留存在轨面的颗粒量更高。

从图 7 中可以看到, 喷嘴高度为 35 cm 时 SiO₂ 微粒利用率低于喷嘴高度为 25 cm 时, 这主要与静电电场的强度有关。静电电场强度决定了颗粒从喷嘴飞向轨面时所受静电力的大小, 一般由平均电场强度表示^[31], 见式 (3)。

$$E = \frac{U}{L} \quad (3)$$

式中: U 为静电电压; L 为极距 (放电电极与被喷涂物之间的距离)。由式 (3) 可知, 随着喷嘴与钢轨轨面极距的增大, 电场强度越来越弱, 导致颗粒所受静电力变弱, 从而使得颗粒利用率降低。此外, 随着喷嘴高度的增大, 静电喷枪中喷出的颗粒有明显的发

散趋势,导致散落在轨面之外的颗粒数量增加,进一步加剧了 SiO_2 微粒的损耗。

根据式 (1) 可知,一定时间里颗粒带电量与颗

粒粒径的平方成正比,因此,增大颗粒粒径可以提升颗粒带电量,从而提升颗粒的利用率。然而,通过对比图 7 中喷嘴高度为 25 cm 时不同粒径分布下的颗粒

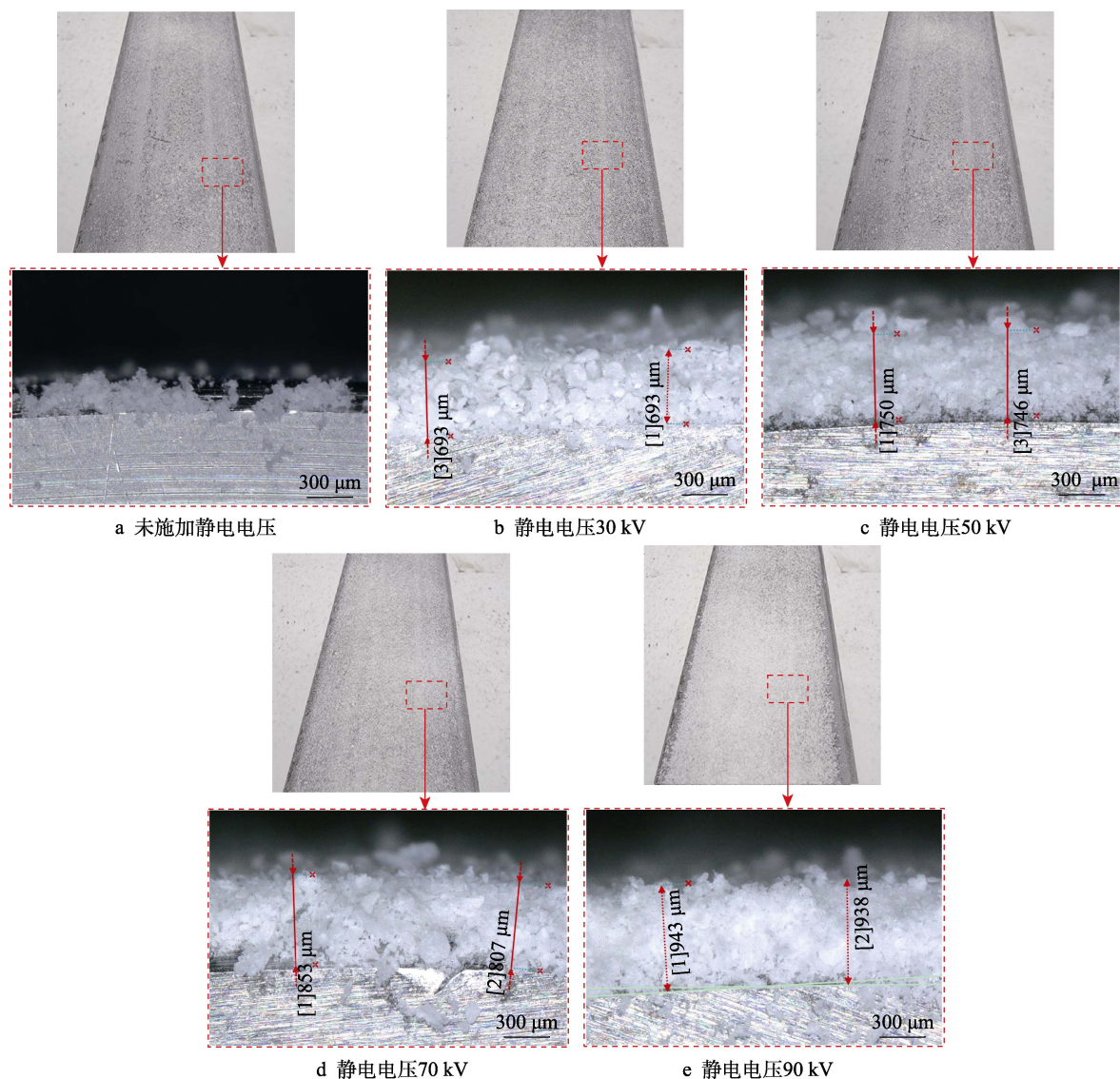


图 5 不同电压下轨面微观图像对比

Fig.5 Microscopic image comparison of rail surface under different voltage: a) no electrostatic voltage; b) electrostatic voltage of 30 kV; c) electrostatic voltage of 50 kV; d) electrostatic voltage of 70 kV; e) electrostatic voltage of 90 kV

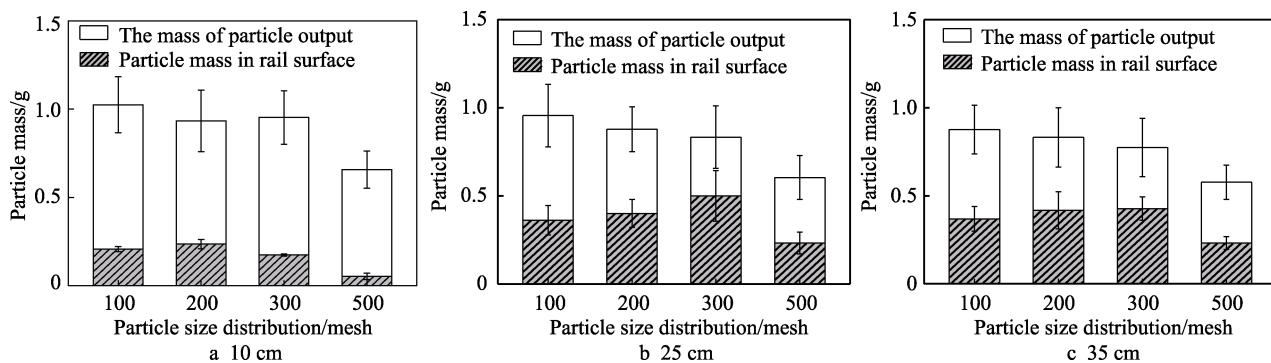


图 6 颗粒粒径与喷嘴高度对轨面颗粒量的影响

Fig.6 Effect of particle size and nozzle height on particle amount of rail surface

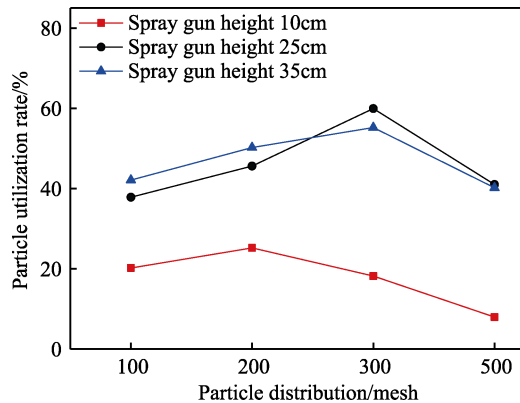


图 7 颗粒粒径与喷嘴高度对颗粒利用率的影响
Fig.7 Effect of particle size and nozzle height on utilization rate of particle

利用率可以看出, SiO_2 微粒粒径由 500 目降低至 300 目时, 颗粒利用率增大 19%; 而 SiO_2 微粒粒径由 300 目降低至 100 目、200 目时, 颗粒利用率却分别降低 23% 与 15%。这是由于 100 目与 200 目的 SiO_2 微粒粒径大, 经过静电喷枪电极时受电不均匀甚至只有局部带电, 且易受到自身重力及颗粒反弹的影响, 导致颗粒难以吸附在钢轨轨面。此外, 从图 7 中可以看出, 颗粒粒径为 100 目和 200 目时, 喷嘴高度为 35 cm 的颗粒利用率更高, 这是由于大粒径颗粒由喷嘴喷出时速度保持能力更强, 喷嘴高度为 10、25 cm 时喷涂至轨面的颗粒发生反射的概率更高, 导致颗粒利用率降低。

2.3 喷枪移动速度对轨面颗粒量与颗粒利用率的影响

前期试验表明, 当静电电压为 90 kV、颗粒粒径为 300 目、喷嘴高度为 25 cm 时, 静态喷涂 SiO_2 微粒利用率最高。然而, 当颗粒粒径为 300 目, 喷嘴高度分别为 25、35 cm 时, 颗粒利用率仅相差 5%, 且喷嘴高度的变化在喷枪移动过程中对颗粒发散影响很大, 因此, 在动态试验时研究了喷嘴高度对颗粒利

用率与轨面颗粒量的影响。

图 8 为静电电压 90 kV、颗粒粒径 300 目时, 喷枪不同移动速度与喷嘴高度对轨面颗粒量的影响。从图 8 中可以看出, 随着喷枪与钢轨之间相对速度的增大, 喷枪在单位距离上的喷涂时间减少, 使得喷涂在钢轨轨面的颗粒量持续降低。在 10、25、35 cm 3 种喷嘴高度下, 喷枪移动速度从 1 m/s 增大至 9 m/s 时, 总出粉量分别下降了 0.97、0.85、0.95 g/m, 轨面颗粒量分别降低了 0.13、0.42、0.49 g/m。

图 9 为静电电压 90 kV、颗粒粒径 300 目时, 喷枪不同移动速度与喷嘴高度对颗粒利用率的影响。可以看到, 当喷嘴高度为 10、25 cm 时, 在喷枪移速由 1 m/s 逐渐增大至 9 m/s 的过程中, SiO_2 微粒利用率均存在不同程度的上升, 分别提升了 7% 与 8%。出现这种现象的原因主要与电势差有关, 相较于已有颗粒吸附的涂层表面, 接地钢轨的轨面电势更低, 更有利于颗粒的吸附, 随着喷枪移速的增大, 颗粒直接吸附在钢轨轨面的概率提高, 从而提升了颗粒的利用率。喷嘴高度为 35 cm 时, 随着喷枪移速由 1 m/s 增大至 3 m/s, SiO_2 微粒利用率上升了 2%; 而随着喷枪移速由 3 m/s 增大至 9 m/s, 颗粒利用率逐渐降低, 对比喷枪移速 1 m/s 时, 喷枪移速为 9 m/s 时颗粒利用率降低了 8%。出现这种现象主要与静电电场存在时间有关, 随着喷嘴高度与喷枪移速的增大, 静电电场强度变低且静电电场存在时间变短。当喷枪移速由 1 m/s 增大至 3 m/s 时, 颗粒与钢轨直接接触占比的增大对颗粒利用率的提升相较于静电电场存在时间变短对颗粒利用率降低的影响更显著, 此时颗粒利用率提升了 2%。然而, 随着喷枪移速的逐渐增大, 单位距离上静电电场的存在时间持续减少, 越来越多的颗粒悬浮在空气中无法到达钢轨轨面, 导致喷枪移速由 3 m/s 增大至 9 m/s 时颗粒利用率降低。此外, 可以发现, 动态喷涂下, 喷嘴高度为 25 cm 时轨面颗粒量与颗粒利用率均最高, 与静态喷涂试验结果一致。

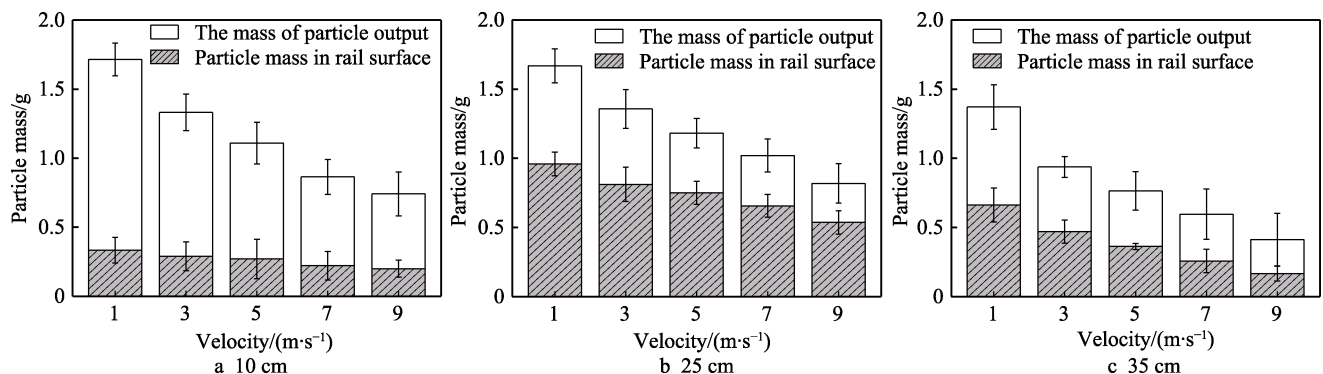


图 8 喷枪移动速度与轨面颗粒量的关系
Fig.8 Relationship between the moving speed of spray gun and the particle amount of rail surface

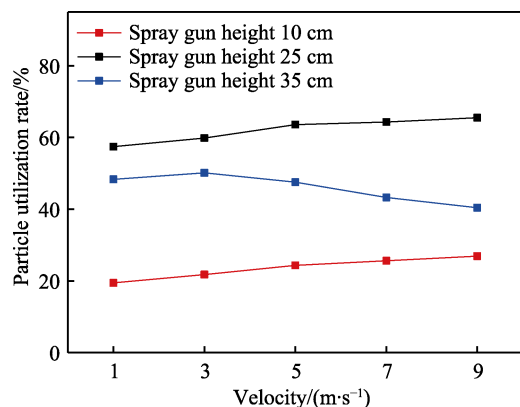


图9 喷枪移动速度与颗粒利用率的关系

Fig.9 Relationship between the moving speed of spray gun and the utilization rate of particle

2.4 传统撒砂增黏、不带电喷涂微粒增黏与静电喷涂微粒增黏效果对比

进入轮轨接触界面的硬质颗粒通过轮轨接触表面的犁沟作用来提高黏着力,因此,进入轮轨接触区内颗粒量的多少对轮轨增黏效果影响显著,且增黏后轮对间黏着系数大于0.2方能满足增黏需求。图

10 为传统撒砂增黏、不带电喷涂微粒增黏及不同静电电压下喷涂微粒的增黏效果对比。从图10中可以看出,传统撒砂可使黏着系数提升至0.34,有效作用转数为180 r(图10a),不带电喷涂 SiO_2 微粒(图10b)的最大黏着系数与有效作用转数均远小于传统撒砂增黏;而利用静电喷涂 SiO_2 微粒进行增黏时,由于增大了颗粒利用率,在喷涂同等质量 SiO_2 微粒时,有更多颗粒作用于轮轨接触区,提升了其增黏效果(图10c—f)。当静电电压为90 kV时(图10f),增黏效果达到最佳,此时最大黏着系数为0.33,已接近传统撒砂增黏的最大黏着系数,且由于静电吸附力的作用,使得颗粒的有效作用转数增加至400 r,分别是不带电喷涂 SiO_2 微粒、传统撒砂的8、2.2倍。

2.5 3种增黏方式下轮轨磨损与损伤对比

图11为传统撒砂增黏、不带电喷涂微粒增黏与90 kV静电喷涂微粒增黏的黏着系数与磨损率。从图11中可以看出,在树叶低黏着状态下,不带电喷涂 SiO_2 微粒进行增黏时,黏着系数远低于传统撒砂增黏,其轮轨磨损率为传统撒砂的66%与57%,需要说明的是,由于硬质颗粒在轮轨接触界面的犁沟作用是

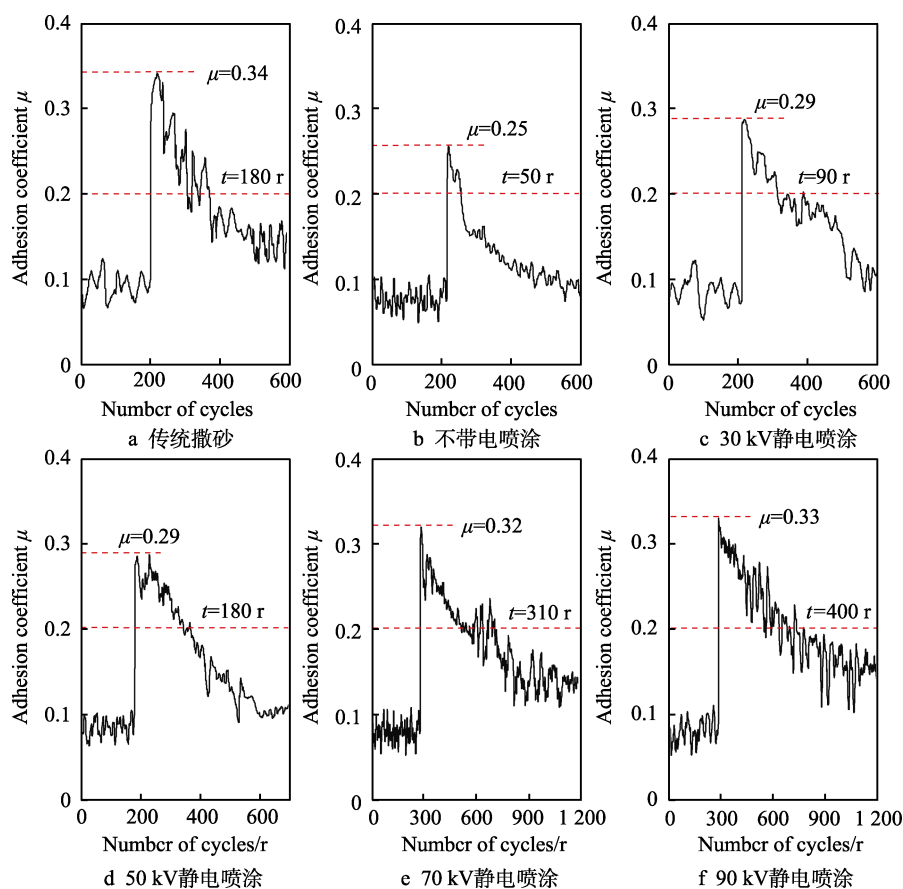
图10 不同电压下 SiO_2 微粒增黏效果

Fig.10 Viscosity increase effect of SiO_2 particles under different voltages: a) traditional sanding; b) particles sprayed without electrostatic voltage; c) particles sprayed at electrostatic voltage of 30 kV; d) particles sprayed at electrostatic voltage of 50 kV; e) particles sprayed at electrostatic voltage of 70 kV; f) particles sprayed at electrostatic voltage of 90 kV

产生增黏效果的主要作用机制, 与低黏着工况相比, 增黏颗粒导致的轮轨磨损加剧可以看作是提高黏着系数的必要代价, 不带电喷涂 SiO_2 微粒进行增黏时黏着系数仍低于 0.2; 而在 90 kV 静电电压下喷涂 SiO_2 微粒进行增黏时, 黏着系数已接近撒砂增黏, 与图 10 中结果一致。车轮与钢轨的磨损率仅为传统撒砂的 75% 与 65%。该对比结果可以说明, 利用静电喷涂 SiO_2 微粒进行增黏可以在满足增黏效果的同时降低轮轨磨损加剧的问题。

试验后试样表面宏观形貌如图 12 所示。各试验中, 利用传统撒砂颗粒增黏后轮轨表面损伤最为严重, 其轮轨试样表面均分布有大量显著压痕和嵌入颗

粒, 且车轮试样表面有更明显的片层剥落损伤。在不带电喷涂 SiO_2 微粒进行增黏时, 由于实际进入轮轨接触界面的颗粒量少, 试样表面无明显的压痕与颗粒嵌入损伤, 仅有少量的剥落坑。相较于不带电喷涂, 90 kV 静电喷涂 SiO_2 微粒增黏时轮轨试样表面有明显的起皮与剥落坑, 但相较于传统撒砂而言, 压痕与嵌入颗粒更轻更小, 也无明显的片层剥落。

综上, 90 kV 静电喷涂 SiO_2 微粒时, 其最大黏着系数与传统撒砂处于统一水平, 而有效作用时间大幅提升, 轮轨磨损量减小, 轮轨损伤更加轻微。因此, 静电喷涂增黏微粒技术可成为铁路现场提升轮轨增黏效果的有效方法。

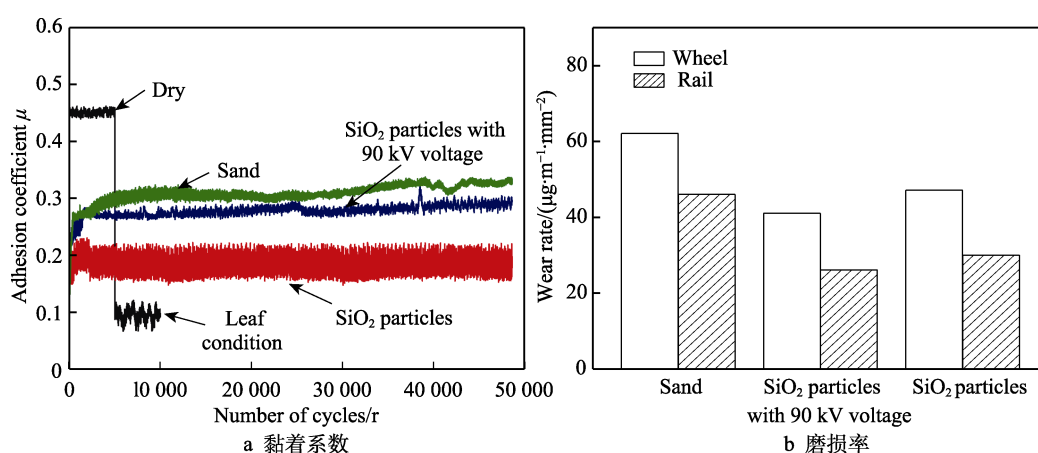


图 11 3 种增黏方式下轮轨黏着系数与磨损率对比

Fig.11 Comparison of wheel-rail adhesion coefficient and damage rates under three viscosity increase methods: a) adhesion coefficient; b) damage rate

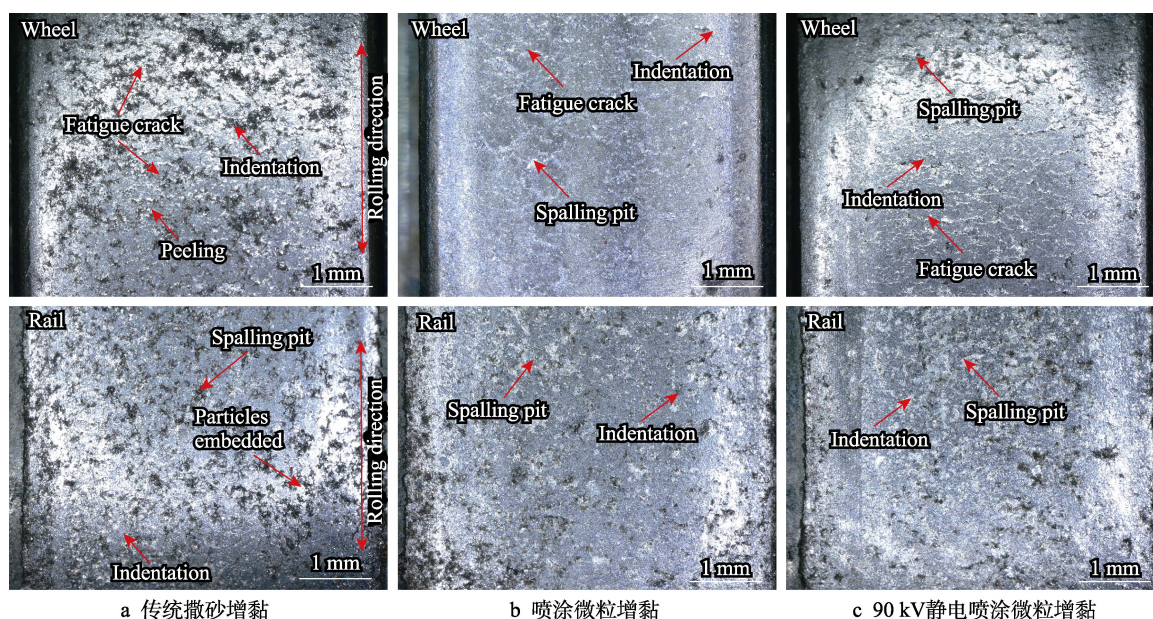


图 12 3 种增黏方式下轮轨表面损伤

Fig.12 Wheel-rail surface damage in three viscosity increase methods: a) traditional viscosity increase by sanding; b) viscosity increase by spraying particles; c) viscosity increase by electrostatic spraying particles at 90 kV

3 结论

1) 相较于未施加静电电压, 静电电压 90 kV 时轨面颗粒量提升了 3.8 倍。静电电压由 30 kV 增大至 70 kV 时, 颗粒利用率提升了 60%, 当静电电压进一步增大至 90 kV 时, 由于颗粒带电量趋于饱和, 颗粒利用率仅提升 10%。

2) SiO_2 微粒利用量随着喷嘴高度与颗粒粒径的增大先增大后减小, 喷嘴高度为 25 cm 且颗粒粒径为 300 目时颗粒利用率最高, 最大利用率为 60%。

3) 针对 300 目 SiO_2 微粒而言, 当静电电压为 90 kV 时, 随着喷枪移速的增大, 喷枪在单位距离上喷涂时间减少, 喷涂在钢轨轨面颗粒量降低。喷嘴高度为 10、25 cm 时, 颗粒利用率随喷枪移动速度的增大而增大; 喷嘴高度为 35 cm 时, 颗粒利用率随喷枪移速的增大先提升后降低; 与喷嘴移速 1 m/s 相比, 在 9 m/s 的喷嘴移速下, 喷嘴高度为 10、25 cm 时颗粒利用率分别提升 8% 与 7%, 喷嘴高度为 35 cm 时利用率降低 8%。

4) 单次喷涂 2 g 增黏颗粒时, 直接喷涂 SiO_2 微粒增黏效果比传统撒砂增黏与静电喷涂 SiO_2 微粒增黏差; 静电电压 90 kV 时, 静电喷涂 SiO_2 微粒增黏最大黏着系数接近传统撒砂增黏, 作用转数为 400 r, 分别是直接喷涂 SiO_2 微粒和传统撒砂的 8、2.2 倍。

5) 当撒砂量为 5 g/min 时, 90 kV 静电喷涂 SiO_2 微粒增黏的黏着系数为 0.28, 接近传统撒砂增黏黏着系数 (0.3), 且轮轨损伤仅为传统撒砂增黏的 75% 与 65%; 直接喷涂 SiO_2 微粒增黏轮轨损伤为传统撒砂增黏的 66% 与 57%, 但其黏着系数低于 0.2。

参考文献:

- [1] ARIAS-CUEVAS O. Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact[D]. Delft: Technical University Delft, 2010.
- [2] 师陆冰. 轮轨界面硬质颗粒增黏与损伤行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
SHI Lu-bing. Study on Adhesion and Damage Behavior of Hard Particles at Wheel-Rail Interface[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [3] 王文健, 刘启跃. 轮轨黏着行为与增黏[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
WANG Wen-jian, LIU Qi-yue. Wheel-Rail Adhesion Behavior and Adhesion Enhancement[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [4] 黄万亮. 轮轨界面低黏着与增黏行为实验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
HUANG Wan-liang. Experimental Study on Low Adhesion and High Adhesion Behavior of Wheel-Rail Interface[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [5] GAO H, KATHARINA B, RAPHALE P, et al. Model of Wheel-Rail Contact for Sanding and Adhesion Enhancement[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System (CM2018). Delft, 2018.
- [6] KUMAR S, KRISHNAMOORTHY P K, PRASANNA RAO D L. Wheel-Rail Wear and Adhesion with and without Sand for a North American Locomotive[J]. Journal of Engineering for Industry, 1986, 108(2): 141-147.
- [7] ARIAS-CUEVAS O, LI Z, LEWIS R. A Laboratory Investigation on the Influence of the Particle Size and Slip during Sanding on the Adhesion and Wear in the Wheel-Rail Contact[J]. Wear, 2011, 271(1/2): 14-24.
- [8] FACCOLI M, PETROGALLI C, LANCINI M, et al. Effect of Desert Sand on Wear and Rolling Contact Fatigue Behaviour of Various Railway Wheel Steels[J]. Wear, 2018, 396/397: 146-161.
- [9] GRIEVE D G, DWYER-JOYCE R S, BEYNON J H. Abrasive Wear of Railway Track by Solid Contaminants[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(3): 193-205.
- [10] DWYER-JOYCE R S, LEWIS R, GAO N, et al. Wear and Fatigue of Railway Track Caused by Contamination, Sanding and Surface Damage[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System (CM2003). Gothenburg, 2003.
- [11] LEWIS R, DWYER-JOYCE R S. Wear at the Wheel/Rail Interface when Sanding is Used to Increase Adhesion[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2006, 220(1): 29-41.
- [12] 孙琼, 臧其吉. 喷撒颗粒的增粘机理研究[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 44-50.
SUN Qiong, ZANG Qi-ji. On Mechanism of Improving Wheel/Rail Adhesion by Way of Spraying Granules[J]. China Railway Science, 2000, 21(4): 44-50.
- [13] SHI L B, WANG C, DING H H, et al. Laboratory Investigation on the Particle-Size Effects in Railway Sanding: Comparisons between Standard Sand and Its Micro Fragments[J]. Tribology International, 2020, 146: 106259.
- [14] SHAH U, ZHU J, ZHANG C, et al. Numerical Investigation of Coarse Powder and Air Flow in an Electrostatic Powder Coating Process[J]. Powder Technology, 2006, 164(1): 22-32.
- [15] 张葆青, 王华. 用于静电喷涂的金属粉体气力输送研究[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(6): 133-134.
ZHANG Bao-qing, WANG Hua. Study on Pneumatic Conveying of Metal Powder for Electrostatic Spraying[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(6): 133-134.
- [16] WANG Jun-feng, ZHANG Ya-ting, ZHANG Wei, et al. Research Progress of Electrostatic Spray Technology over

- the last Two Decades[J]. Journal of Energy Engineering, 2021, 147(4): 1-19.
- [17] CHEN Peng, LU Sheng-zhe, PAN Bin, et al. Development, Optimization, and Pharmacokinetics Study of Bufalin/Nintedanib Co-Loaded Modified Albumin Sub-Microparticles Fabricated by Coaxial Electrostatic Spray Technology[J]. AAPS PharmSciTech, 2021, 23(1): 1-13.
- [18] GARLICH N, GARCIA G L, DE OLIVEIRA A C, et al. Electrostatic Spraying of Imazamox to Control the Floating Aquatic Plant *Salvinia Molesta* and Its Effects on Environmental Indicators of Water Quality[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2021, 56(3): 251-258.
- [19] 金海陆, 杨玉敏, 李庆军, 等. 静电喷涂粉末输送方式综述[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(6): 310-316.
- JIN Hai-lu, YANG Yu-min, LI Qing-jun, et al. Summary of Electrostatic Spraying Powder Transportation Mode[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(6): 310-316.
- [20] 魏恒远, 王晓梅. 粉末静电喷涂工艺探讨[J]. 上海涂料, 2009, 47(9): 41-44.
- WEI Heng-yuan, WANG Xiao-mei. Discussion on Powder Electrostatic Spraying Process[J]. Shanghai Coatings, 2009, 47(9): 41-44.
- [21] 陈文龙, 胡永俊, 刘煌萍, 等. 基于粉末涂料特性的静电粉末喷涂上粉率影响因素研究[J]. 涂层与防护, 2021, 42(7): 17-23.
- CHEN Wen-long, HU Yong-jun, LIU Huang-ping, et al. Study on Influencing Factors of Powder Coating Rate in Electrostatic Powder Spraying Based on the Characteristics of Powder Coatings[J]. Coating and Protection, 2021, 42(7): 17-23.
- [22] 董猛, 邱佳红, 汪元奎, 等. 不同参数选择对静电喷涂效果的影响[J]. 现代涂料与涂装, 2019, 22(12): 16-18.
- DONG Meng, QIU Jia-hong, WANG Yuan-kui, et al. The Influence of Different Parameters Selection on Electrostatic Spraying[J]. Modern Paint and Finishing, 2019, 22(12): 16-18.
- [23] 曾盛渠, 董雪芳, 叶真午, 等. 静电喷涂高附着力疏水涂层及其性能[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 203-208.
- ZENG Sheng-qu, DONG Xue-fang, YE Zhen-wu, et al. High Adhesion Hydrophobic Coating by Electrostatic Spraying and Properties[J]. Surface Technology, 2019, 48(4): 203-208.
- [24] YE Q, STEIGLEDER T, SCHEIBE A, et al. Numerical Simulation of the Electrostatic Powder Coating Process with a Corona Spray Gun[J]. Journal of Electrostatics, 2002, 54(2): 189-205.
- [25] 刘宏, 刘正尧. 影响粉末涂料上粉率因素的探讨[J]. 涂料工业, 2004, 34(6): 26-28.
- LIU Hong, LIU Zheng-yao. Discussion on Factors Influencing the Powder Utilization of Powder Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2004, 34(6): 26-28.
- [26] 机车车辆撒砂装置: TB/T 3254—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
- Sanding Device of Rolling Stock: TB/T 3254-2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [27] 曹熙, 王文健, 刘启跃, 等. 激光离散淬火对轮轨材料磨损与损伤性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 72-79.
- CAO Xi, WANG Wen-jian, LIU Qi-yue, et al. Effects of Laser Dispersed Quenching on Wear and Damage Performances of Wheel/Rail Materials[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 72-79.
- [28] HU Y, GUO L C, MAIORINO M, et al. Comparison of Wear and Rolling Contact Fatigue Behaviours of Bainitic and Pearlitic Rails under Various Rolling-Sliding Conditions[J]. Wear, 2020, 460/461: 203455.
- [29] DING H H, SU C R, WANG W J, et al. Investigation on the Rolling Wear and Damage Properties of Laser Discrete Quenched Rail Material with Different Quenching Shapes and Patterns[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378: 124991.
- [30] 张宝峰, 张连洪, 李双义. 颗粒人工荷电带电量测量的研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2002, 35(6): 696-698.
- ZHANG Bao-feng, ZHANG Lian-hong, LI Shuang-yi. Investigation on the Measurement of Artificial Electric Charge[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2002, 35(6): 696-698.
- [31] 杨一鸣. 静电喷漆后漆膜质量问题原因分析及解决措施[C]//中国科协“振兴东北地区等老工业基地”专家论坛暨首届沈阳科学学术年会论文集. 沈阳: 沈阳出版社, 2004: 583-585.
- YANG Yi-ming. Analysis and Solution of Quality Problem of Paint Film after Electrostatic Painting[C]//The Expert Forum of "Revitalizing Northeast China and Other Old Industrial Bases" of China Association for Science and Technology and the Proceedings of the first Shenyang Annual Scientific Conference. Shenyang: Shenyang Press, 2004: 583-585.