

文章编号:1671-1637(2026)08-0116-13

基于纹理重塑的机场道面 MMA 基抗滑 涂层配方设计与性能评价

王 明¹, 李嘉怡¹, 程怀磊^{*2}, 植隽彦¹, 林长安³

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 3. 北京恒宇得钢材料有限公司, 北京 102200)

摘 要:以纹理重塑为目标,主要采用甲基丙烯酸甲酯(MMA)、2 种固化剂以及石英砂、碳化硅、棕刚玉 3 种优质骨料,设计了 4 种用于水泥混凝土道面的 MMA 基修复涂层。该涂层由界面层和功能层双层组成,界面层的质量比 MMA:粉状过氧化苯甲酰(BPO)为 25:1,性能层 MMA:粉状 BPO:液体固化剂:骨料为 100:1:3.3:30;从纹理重塑状态、界面粘结强度、抗冻耐久性对 MMA 基修复涂层进行了性能评价。研究表明:在纹理重塑状态方面,与无涂层试样(混凝土拉毛纹理)相比,MMA 涂层的纹理高度、均值断面深度以及斜率谱密度(特征波长为 0.1 mm)分别提升 3、7.5、23 倍;添加 MMA 涂层后,混凝土基准板 BPN 值增大约 1 倍,且其与均值断面深度(MPD)相关性良好($R^2=0.85$),这证明了不同测试尺度抗滑性能表征结果的一致性;在界面粘结强度方面,4 种 MMA 基涂层的 3、24 h 拉拔强度分别集中在 3.47~4.46、3.70~4.76 MPa,说明 MMA 涂层不但固化速度快且与混凝土界面粘接性能优异,这源于 MMA 与混凝土界面交互的物理嵌锁行为、化学键合作用和环境适应机制;在抗冻耐久性方面,经 150 次冻融循环,无涂层试样出现了大面积露骨现象,而 MMA 基涂层试样经 300 次冻融循环后,涂层脱落面积仍小于 1%,且混凝土试样表现状态完好,说明了涂层抗冻防护性良好。可见,本研究设计的 MMA 基涂层具有丰富的纹理构造、优异的界面粘接性能以及良好的冻融防护能力,为水泥混凝土道面的抗滑修复、韧性提升技术研究提供新材料储备与思路借鉴。

关键词:机场道面;MMA 基涂层;纹理重塑;抗滑性能;界面性能;冻融

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.237

Formulation design and performance evaluation of MMA-based anti-skid coating for airport pavements based on texture reconstruction

WANG Ming¹, LI Jia-yi¹, CHENG Huai-lei^{*2}, ZHI Juan-yan¹, LIN Chang-an³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University,

Shanghai 201804, China; 3. Beijing Hengyudegu Materials Co., Ltd., Beijing 102200, China)

出版日期:2025-11-25 收稿,2026-01-06 修回,2026-03-20 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52308469,52578527);国家自然科学基金配套项目(3122024PT19);天津市教委科研计划项目(2021KJ056)

作者简介:王 明(1987-),女,河北衡水人,副教授,工学博士,E-mail:m_wang@cauc.edu.cn。

*** 通信作者:**程怀磊(1993-),男,山东枣庄人,副教授,博士生导师,工学博士,E-mail:chl6218@tongji.edu.cn。

引用格式:王 明,李嘉怡,程怀磊,等.基于纹理重塑的机场道面 MMA 基抗滑涂层配方设计与性能评价[J].交通运输工程学报,2026,26(8):116-128.

Citation:WANG Ming, LI Jia-yi, CHENG Huai-lei, et al. Formulation design and performance evaluation of MMA-based anti-skid coating for airport pavements based on texture reconstruction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 116-128.

Abstract: To achieve texture reconstruction, four types of MMA-based repair coatings for cement concrete pavements were designed by mainly using methyl methacrylate (MMA), two curing agents, and three high-quality aggregates including quartz sand, silicon carbide, and brown fused alumina. The coating consists of a double-layer structure: an interface layer and a functional layer. The mass ratio of the interface layer of MMA : powdered benzoyl peroxide (BPO) is 25 : 1, while that of the functional layer of MMA : powdered BPO : liquid curing agent : aggregate is 100 : 1 : 3.3 : 30. The performance of the MMA-based repair coatings was evaluated in terms of texture reconstruction state, interfacial bonding strength, and freeze-thaw durability. Research results indicate that in terms of texture reconstruction state, compared with the uncoated specimens (concrete roughened texture), the texture height, mean profile depth, and slope spectral density (characteristic wavelength=0.1 mm) of the MMA-coated specimens increase by 3, 7.5, and 23 times, respectively. After applying the MMA coating, the BPN of the concrete reference slab approximately doubles, and it has a good correlation with the mean profile depth (MPD) ($R^2=0.85$), which verifies the consistency of skid resistance characterization results at different test scales. In terms of interfacial bonding strength, the pull-off strengths of the four MMA-based coatings at 3 and 24 h are concentrated in 3.47-4.46 and 3.70-4.76 MPa, respectively. This indicates that the MMA coatings not only have a fast curing speed but also exhibit excellent interfacial bonding performance with concrete, which is attributed to the physical interlocking behavior, chemical bonding interaction, and environmental adaptation mechanism of the interface interaction between MMA and concrete. In terms of freeze-thaw durability, after 150 freeze-thaw cycles, the uncoated specimens show extensive aggregate exposure; in contrast, after 300 freeze-thaw cycles, the coating peeling area of the MMA-based coating specimens is still less than 1%, and the concrete specimens maintain a sound apparent state, which demonstrates the good freeze-thaw protection performance of the coatings. Therefore, the designed MMA-based coatings possess abundant texture structures, excellent interfacial bonding performance, and good freeze-thaw protection capacity, providing new material reserves and reference ideas for the research on skid resistance repair and toughness improvement technologies of cement concrete pavements.

Keywords: airport pavement; MMA-based coating; texture reconstruction; anti-skid performance; interface performance; freeze-thaw

Publication history: Received 2025-11-25; Received in revised form 2026-01-06; Accepted 2026-03-20

Funding: National Natural Science Foundation of China (52308469, 52578527); Matching Special Project of National Natural Science Foundation of China (3122024PT19); Scientific Research Program of Tianjin Municipal Education Commission (2021KJ056)

* **Corresponding author:** CHENG Huai-lei, associate professor, PhD, E-mail: chl6218@tongji.edu.cn.

0 引 言

机场道面的纹理特征决定其抗滑耐久性能^[1],直接影响飞机的行驶安全。受飞机轮载磨损、道面除胶、强冻融等因素耦合影响^[2],水泥混凝土道面的拉毛纹理在1、2年内快速衰退,极大降低道面的抗滑耐久性能^[3],增加了飞机发生跑道偏移的风险^[4]。聚焦道面表层纹理重塑,研制新一代修复材料,以提升道面的整体抗滑性能,是保障机场道面行驶安全

的迫切需求^[5-6]。

国内外学者在机场道面(路面)纹理分析已进行了较多研究。黄晓明等^[5]较早提出了路面正向纹理优于负向纹理的观点,并基于此建议了路面纹理重塑方法。Wang等^[7]研究发现微观纹理能够有效增加真实接触面积,增强黏附效应,且密集的微纹理能够提供更多接触点,从而提高宏观抗滑性能。郑木莲等^[8]借助数字图像技术,表征了微观纹理的分布特性,量化了纹理特点对路面抗滑性能的影响。

Yang 等^[9]提出了纹理分辨率灵敏度指标(Texture Resolution Sensitivity Index, TRSI),以量化纹理分辨率对防滑性测量和误差的影响。同时,激光纹理扫描与数字图像处理^[10]、三维纹理重构^[11]、有限元模拟、数值模拟^[3]等测试与仿真模拟方法也被引入纹理研究,以解释道面(路面)纹理特征与抗滑性能之间的关联性。上述研究重点关注施工后纹理特定的表征。道面服役后需进行纹理修复,相应的道面纹理修复材料也是当前研究重点。典型的,Bawono 等^[12]开发了具有可见光激活光催化性能的防滑工程水泥复合材料,分析了该材料对路表抗滑性能的影响。Yuan 等^[13]分析了植石工艺对混凝土路面防滑和耐磨性能的影响,发现该工艺可显著提高路表抗滑性能。谭祺琦等^[14]发现环氧树脂抗滑薄层在适应性与抗滑效果上优于水泥混凝土加铺层,可用于路表抗滑性能的提升。

除以上常规修复材料外,常用于桥面防水粘接^[15]、道路标线^[16]的新一代甲基丙烯酸甲酯聚合物(Methyl Methacrylate, MMA)由于常温快速固化、力学性能优异、耐久性高等特点^[17],也逐渐被用于道面纹理修复。He 等^[18]通过改变 MMA 和过氧化苯甲酰(Benzoyl Peroxide, BPO)固化剂的含量,实现了在-25℃低温条件下快速固化,增强混凝土表面性能。施彦等^[19]发现 MMA 通过共聚改性,可构建高强度聚合物网络,为混凝土表面提供良好的力学支撑。Li 等^[20]开发了 MMA 改性不饱和聚酯树脂(Unsaturated Polyester Resin, UPR)复合改性砂浆作为机场道面的高性能、低成本薄层修复材料,极大提升了道面稳定性。Eom 等^[21]采用 MMA 材料、弹性橡胶颗粒、硬质抗滑骨料和相变材料复合制备了抗冰超薄磨耗层,以提升道面表面的抗滑性能。

综上,MMA 材料在机场道面纹理修复方面表现出良好的潜力,国内外学者对 MMA 修复材料的性能也进行了初步研究。但目前相关研究重点分析了材料配比自身的设计,其对道面宏观纹理的影响及与抗滑性能之间的量化关系仍需进一步研究。为此,本文以道面纹理重塑为目标,基于 MMA、BPO 固化剂以及石英砂、碳化硅、棕刚玉 3 种优质骨料,设计了多种用于机场水泥混凝土道面纹理修复的 MMA 基修复涂层;其次,采用三维激光纹理扫描和多种试验方法(拉拔试验、摆式摩擦试验、抗冻性试验),系统分析了所设计的 MMA 涂层材料对机场道面表面纹理的影响,并评价了该材料对道面抗滑性能和力学性能的恢复效果,本研究成果预期可为机场道面纹理恢复与

抗滑性能提升提供关键支撑。

1 MMA 材料制备与试验方法

1.1 MMA 涂层组成与制备

1.1.1 材料组分

本研究 MMA 涂层由界面层和性能层组成。界面层主要由 MMA 和 BPO 组成(MMA:BPO 为 25:1),性能层主要由 MMA、粉状固化剂、液体固化剂、骨料按比例(MMA:粉状 BPO:液体固化剂:骨料为 100:1:3.3:30)组合而成,骨料类型有 4 种,分别是粗石英砂、碳化硅、棕刚玉和细石英砂。研究所用材料均由北京恒宇得铜材料有限公司提供,MMA 主要技术指标如表 1,其中防滑性能用英国摆式仪摆值(British Pendulum Number, BPN)作为评价标准,骨料主要技术指标、粒度参数如表 2、3,其中 $D_v(10)$ 、 $D_v(50)$ 和 $D_v(90)$ 分别为颗粒体积累计分布达到 10%、50% 和 90% 时所对应的粒径。粉状固化剂为过氧化苯甲酰(Benzoyl Peroxide, BPO),在配方中作为主要的固化剂,可促进 MMA 快速固化;液态固化剂为胺类固化剂,作为促进剂,配合 BPO 使用,使固化反应在常温下也可迅速进行。

表 1 MMA 乳液主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of MMA emulsion

颜色	黏度/ (Pa·s)	密度/ (g·cm ⁻³)	固化后拉伸 强度/MPa	工作温度/ ℃
白色	40~60	0.96~1.01	20.7~24.1	-54~121

表 2 骨料主要技术指标

Table 2 Main technical indicators of aggregates

指标	(粗/细)石英砂	碳化硅	棕刚玉
化学成分	SiO ₂	SiC	Al ₂ O ₃
莫氏硬度	7	9.5	9
耐磨性	中	极高	高
成本	低	高	中
适用场景	常规防滑、 经济需求	极端耐磨、 高温环境	重载、抗冲击 区域

1.1.2 制备方法

MMA 涂层主要制备流程见图 1。首先,制备界面层,将 4% 的粉状 BPO 加入 MMA 中搅拌 5 min(气温低时可适当延长),待固化剂充分溶解后,按照 1 kg·m⁻² 的标准在需要涂刷的部位均匀的薄涂一层,厚度不超过 1 mm。其次,制备性能层,将 1% 的 BPO 加入 MMA 中搅拌 3 min,再将 3.3% 的液体固化剂加入 MMA 中搅拌 8 min,再加入

表 3 骨料粒度参数

Table 3 Aggregate gradation parameters				
骨料	$D_v(10)/\text{mm}$	$D_v(50)/\text{mm}$	$D_v(90)/\text{mm}$	细度模数
粗石英砂	0.82	1.57	2.20	3.74
碳化硅	0.33	0.45	0.57	2.00
棕刚玉	0.33	0.46	0.60	2.08
细石英砂	0.11	0.34	0.57	1.41

30%的抗滑骨料,使用分散机搅拌混合 3 min,在固化成型后的界面层上,按照 $2.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的标准均匀地涂刷性能层,厚度不超过 2 mm。为方便后续表述,研究将粗石英砂涂层、碳化硅涂层、棕刚玉涂层、细石英砂涂层、无涂层(混凝土拉毛纹理表面)分别标识为 A、B、C、D、Z。所制备的不同涂层材料的表观形貌汇总见图 2。

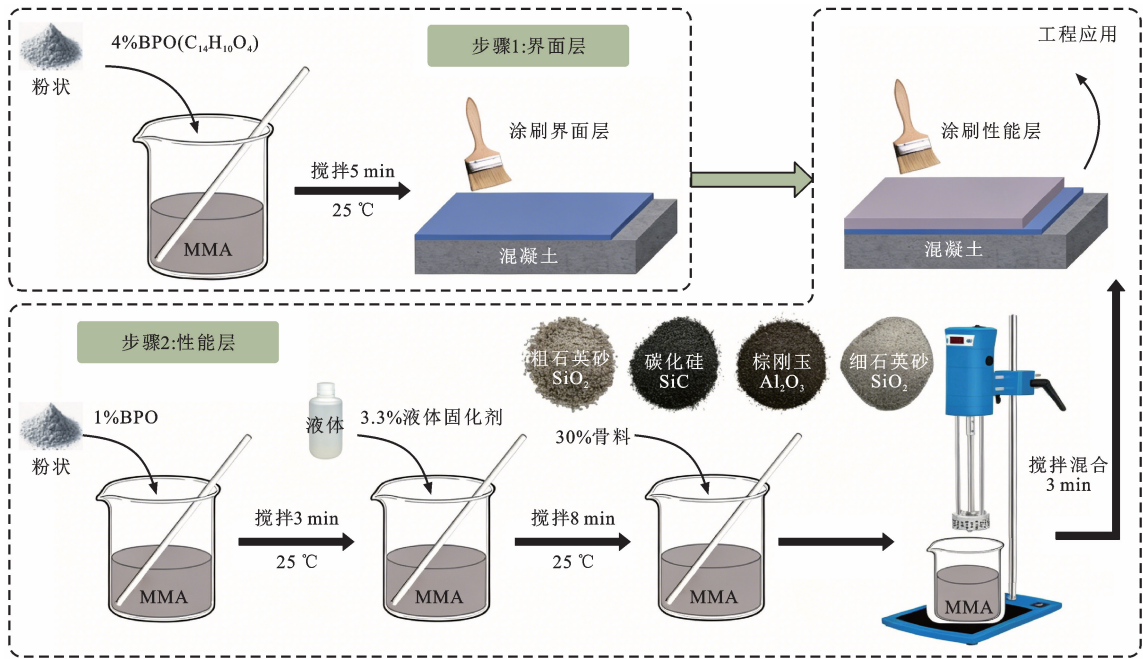


图 1 MMA 涂层制备流程
Fig. 1 Preparation process of MMA coating

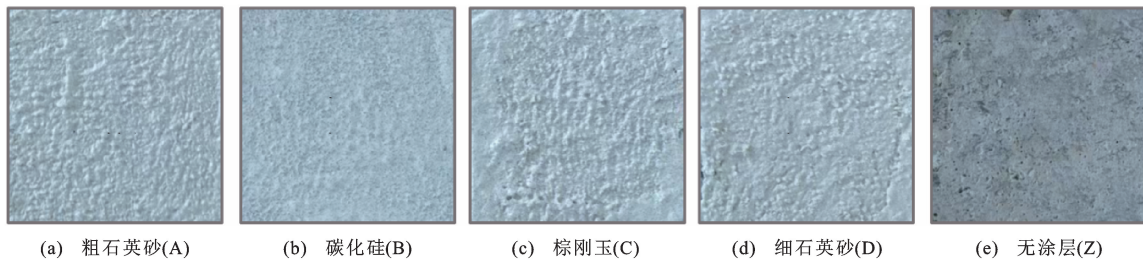


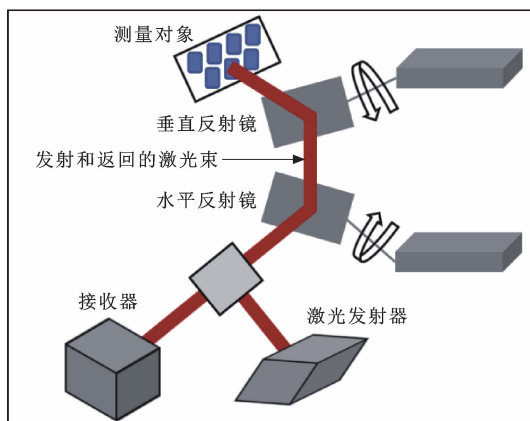
图 2 不同骨料类型的 MMA 涂层
Fig. 2 MMA coatings with different aggregate types

1.2 试验方法

1.2.1 三维激光纹理扫描

使用美国 AMES 9500 激光纹理扫描仪进行 MMA 涂层纹理结构的识别表征,AMES 成像原理及扫描测试场景见图 3。测试过程扫描参数设置为,激光点范围为 0.025 mm,边缘约为 60 μm ,垂直采样分辨率 0.005 mm,长度样本间距为 0.006 5~0.806 3 mm,最小宽度样本间距为 0.024 69 mm^[22]。每次扫描选定区域 10 cm $\times$ 10 cm。此外,借助设备附带的 Ames Texture Scanner 软件实现图像可视化。

在纹理表征方面,研究者通常采用均值断面深度(Mean Profile Depth, MPD)^[23]、斜率谱密度(Slope Spectral Density, SSD)^[22]等指标来进一步分析。MPD 是用于量化路面表面宏观纹理深度的 1 个指标^[24],在一定长度(通常为 100 mm)的路面纵断面轮廓上,MPD 越大,表示路面越粗糙,纹理越深,其计算模型见图 4^[23]。SSD 是指信号在各个波长下斜率大小随波长变化的频谱特性,可很好地显示材料表面高程及粗糙程度的变化差异,其中较短波长范围内具有较大的 SSD 可以对应于

(a) AMES原理^[25]

(b) 扫描场景

图3 AMES设备成像原理及扫描场景

Fig. 3 Imaging principle and scanning scenario of AMES equipment

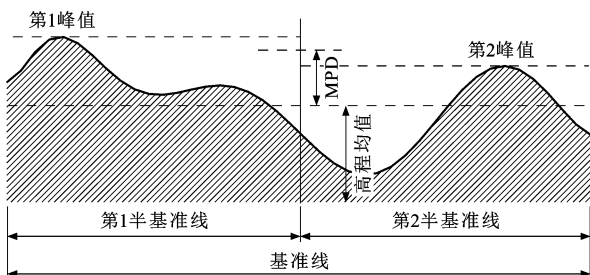


图4 平均断面深度计算模型

Fig. 4 Calculation model of average mean profile depth

该表面微观纹理较为丰富,相反在较长波长范围内的SSD相对较高的,就可以认为其对应的表面的宏观纹理更多,宏观形貌更明显。SSD计算公式为^[22]

$$S_{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{z_{i+1} + z_i}{\Delta x} \right)^2}$$

式中: S_{λ} 为构造波长是 λ 时的斜率谱密度; N 为基线内的坐标数; z_i 为坐标 i 的高程; Δx 为坐标之间的水平距离。

此外,为评价MMA涂层在宏观尺度的抗滑性能,研究同步进行了摆式摩擦因数测定试验,试验参照《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)进行,使用的摆式摩擦因数测定仪见图5,以评价不同尺度测试结果的相关性。

1.2.2 拉拔试验

本研究采用拉拔试验分析了涂层与机场道面之间的粘接性能,以进一步评价涂层材料的服役耐久性。拉拔试验参照《民用机场水泥混凝土道面维护技术规范》(MH/T 5084—2025)进行,混凝土基材包括基板和基准试块,混凝土中水泥:水:砂子:小石子配合比(质量比)为1:0.5:1.65:3.08,其



图5 摆式摩擦因数测定仪

Fig. 5 Tester of pendulum friction coefficient

中水泥为PO52.5硅酸盐水泥,砂子为中等细度的河砂,石子为2.5~9.5 mm的石灰岩。基板使用40 cm×40 cm×4 cm的钢模成型,采用分层浇筑方法;基准块混凝土采用4 cm×4 cm×16 cm的三连钢模成型。拉拔头为45 mm×45 mm×20 mm不锈钢块,用环氧-粉煤灰高强胶粘剂粘接基准试块,基准板与基准试块间涂刷MMA材料,见图6(a)。成型试样后实体图,见图6(b)。在20℃条件下,将成型好的拉拔头与浇筑好的涂层试样粘接,待时间达到3、24 h时,采用智能拉拔仪进行拉拔强度测试,拉拔仪加载速率为5 mm·min⁻¹,见图6(c)。

1.2.3 抗冻性试验

为评价MMA涂层材料的抗冻融耐久性能,本研究开展冻融循环试验,使用的快速冻融设备符合《混凝土抗冻试验设备》(JG/T 243—2009)的规定,见图7。采用尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件,混凝土配合比与第1.2.2节拉拔试验中使用的混凝土配合比一致,试件侧面涂刷封层胶(E44环氧树脂胶)以控制变量,确保快速冻融循

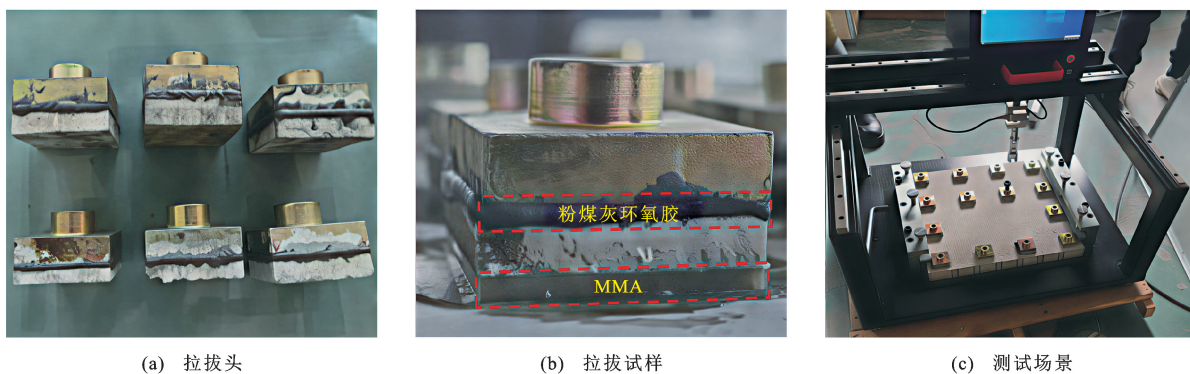


图 6 拉拔试样及测试场景

Fig. 6 Pull-out specimens and testing scenarios



图 7 冻融循环试验箱

Fig. 7 Freeze-thaw cycle test chamber

环破坏仅在 MMA 涂层面发生。试件按照标准养护龄期养护 28 d,冻融试验开始前将其从养护箱中取出,在 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中浸泡 4 d,水面高出试件 20 mm。冻融循环温度区间为 $-18^\circ\text{C}\sim 5^\circ\text{C}$,降温 2.5 h 和升温 1.5 h,一个冻融循环周期为 4 h。在试验开始前及每 25 次循环结束,观察试样涂层损伤状态并称量试样质量,利用冻融前后质量损失比评价 MMA 涂层材料的抗冻融性能。

2 MMA 涂层纹理结构表征与性能评价

2.1 MMA 涂层纹理结构表征与抗滑性能评价

2.1.1 基于纹理高度的纹理结构表征

基于纹理高度(Texture Height, TH)图像可清晰呈现 MMA 涂层在混凝土基体表面的微观形态。无涂层试样和部分涂层的 TH 图像如图 8 所示。图像中颜色不同表征了纹理高度值的差异,青色区域为基准值,紫色、蓝色、绿色代表纹理高度值较小的负向纹理,红色、黄色代表纹理高度值较大的正向纹理。

由图 8 可知,不同类型涂层的纹理高度值差异

性显著。无涂层试样的纹理高度图像以蓝、绿色区域为主;碳化硅涂层中黄色区域为主,辅以部分绿、红色区域。从颜色上可以直观地看出,MMA 涂层的添加使得纹理高度图像从以蓝色、绿色为主转变为以黄色、红色为主,这表明其正向纹理凸显。另一方面,从纹理高度量化数值来看,无涂层试样的纹理高度集中在 7~8 mm;添加涂层后,粗石英砂涂层、碳化硅涂层、棕刚玉涂层、细石英砂涂层分别集中于 8~10、12~14、13~15、12~15 mm。相比而言,碳化硅、棕刚玉、细石英砂对正向纹理丰富度的提升效果优于粗石英砂。这是由于 MMA 流动性较好,使得骨料成为影响涂层微观纹理丰富度的主要影响因素,粗石英砂的细度模数为 3.74,而碳化硅、棕刚玉和细石英砂的细度模数均不大于 2,粒径更小的骨料对微观纹理的提升效果更加明显。

2.1.2 基于均值断面深度(MPD)的纹理结构表征

MPD 是表征道面纹理结构的常用参数,其反映轮胎接地范围内路面“峰-谷”起伏的平均深度,数值越大表示宏观纹理越丰富。不同涂层的 MPD 可视化图像见图 9,其均值统计结果见图 10。与 TH 图像类似,MPD 图像中不同颜色代表了不同的 MPD,其中绿色、黄色代表 MPD 较高,表面高低起伏大,紫色、红色反之。研究指出^[26],MPD 与抗滑性能呈正相关关系,MPD 越大,路面宏观纹理越粗糙,高速行驶时轮胎与路面间水膜更易排出,抗滑性能越好。

由图 9 可知:无涂层试样的 MPD 图像以红、紫、蓝色区域为主,颜色过渡平缓;碳化硅涂层图像颜色过渡陡峭,具有明显的突变区,密集分布较多绿色尖端。从颜色上可以直观地看出,相较于无涂层试样表面,涂层表面的 MPD 图像颜色突变区增多,即表面高低起伏更大、微观纹理更丰富。

同时,结合图 9、10 结果,无涂层试样的 MPD 在

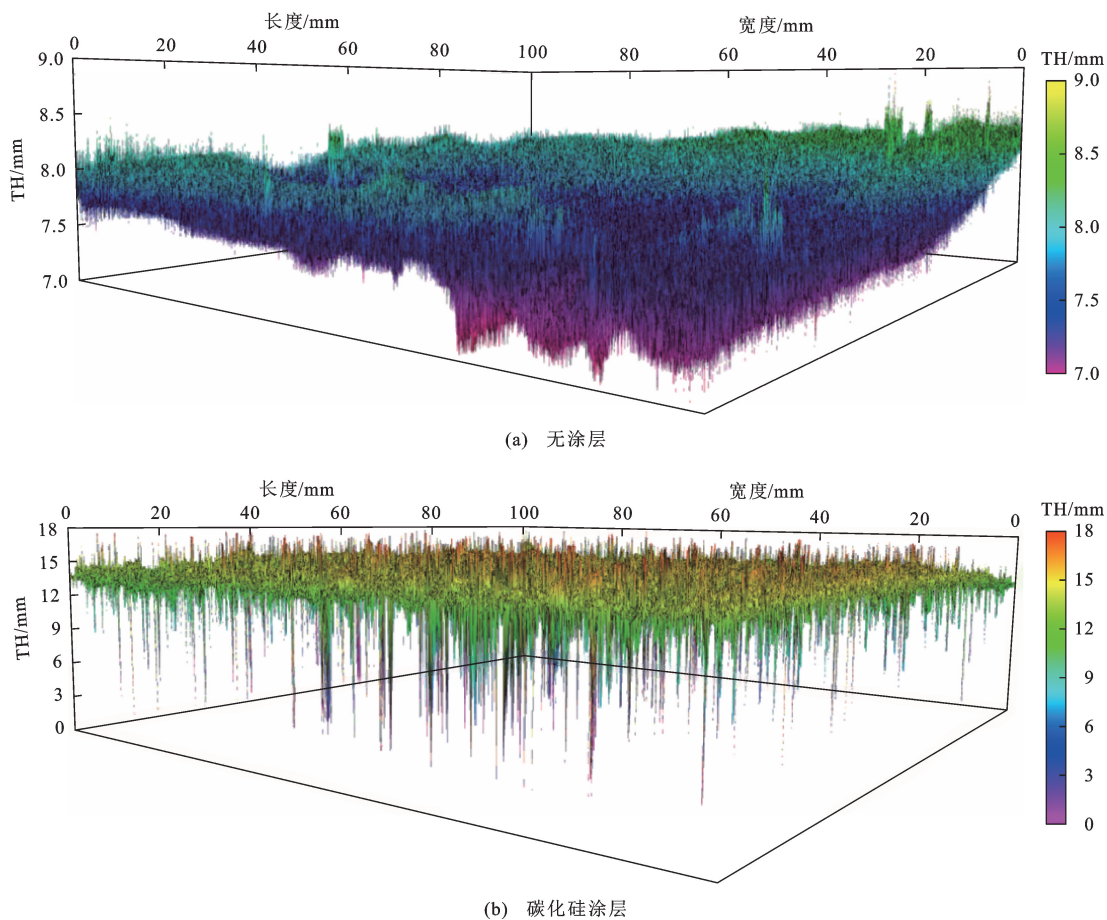


图 8 不同涂层材料的纹理高度图像

Fig. 8 Texture height images of different coating materials

95%以上都低于 0.5 mm,MPD 均值不足 0.2 mm;而涂刷 MMA 涂层的试样均值大于 0.8。其中涂刷碳化硅涂层对 MPD 的提升效果最显著,粗糙度大且分布均匀,MPD 均值可达 1.36,相较于无涂层的 MPD 提高了 7.5 倍。同时,研究也发现添加不同骨料的涂层在 MPD 提升方面,差异性并不显著。总体而言,细集料(粒径小于 2.36 mm)的添加有助于提升纹理的丰富度,但其粒径大小对纹理构造产生的影响较小。由此来看,与 TH 相比,MPD 更适合用于纹理结构的表征。

2.1.3 基于斜率谱密度(SSD)的纹理结构表征

SSD 是表征纹理构造形态的另一常用指标。有学者指出 SSD 能更好地表述表面纹理构造波长,且 SSD 峰值对应波长可视为扫描区域内构造纹理的特征波长^[22]。因此,短波长范围内具有较大的 SSD,预示其表面微观纹理较为丰富。不同涂层的 SSD 随波长的变化的分布图像,见图 11。

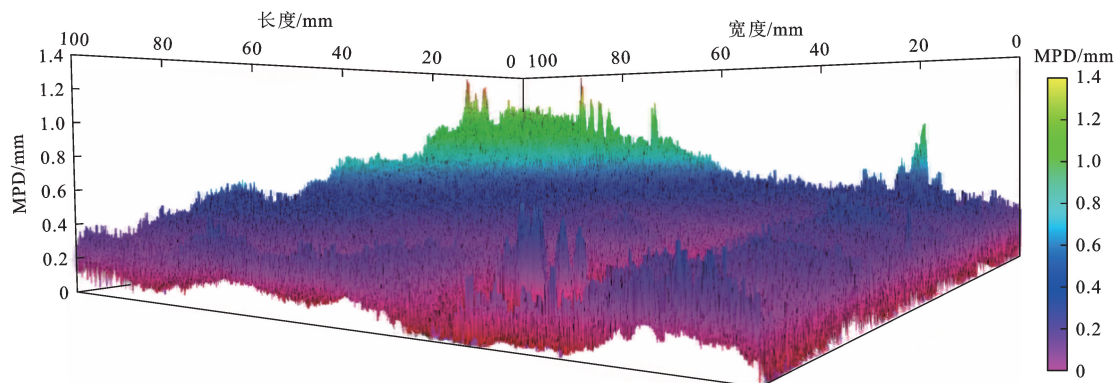
由图 11 可知,涂层的 SSD 曲线均随波长增大逐渐降低,在波长为 0.1 mm 时取得 SSD 的峰值,

因此涂层的特征波长为 0.1 mm,此时的 SSD 值可作为纹理构造丰富程度的评价指标。相较于无涂层的混凝土拉毛表面,MMA 涂层的 SSD 均有所提升。粗石英砂、碳化硅、棕刚玉、细石英砂涂层特征波长对应的 SSD 峰值分别为 1.74、9.32、1.45、0.93 mm。通常认为小于 1 mm 的纹理波长与抗滑性能正相关性高达 80%以上,1.00~1.25 mm 波长对抗滑性能的影响减弱,而 1.25~2.50 mm 波长与抗滑性能呈现负相关^[27]。添加碳化硅的 B 涂层,SSD 在短波扫描区间(0.1~1.0 mm)较高,且在 0.1 mm 波段处 SSD 达到了 9.32 mm,为无涂层的 12.6 倍。由于粗石英砂粒径较大,对于微观纹理的丰富程度不高,主要适用于宏观纹理排水等作用,因此添加石英砂的 D 配方 SSD 提升不显著。

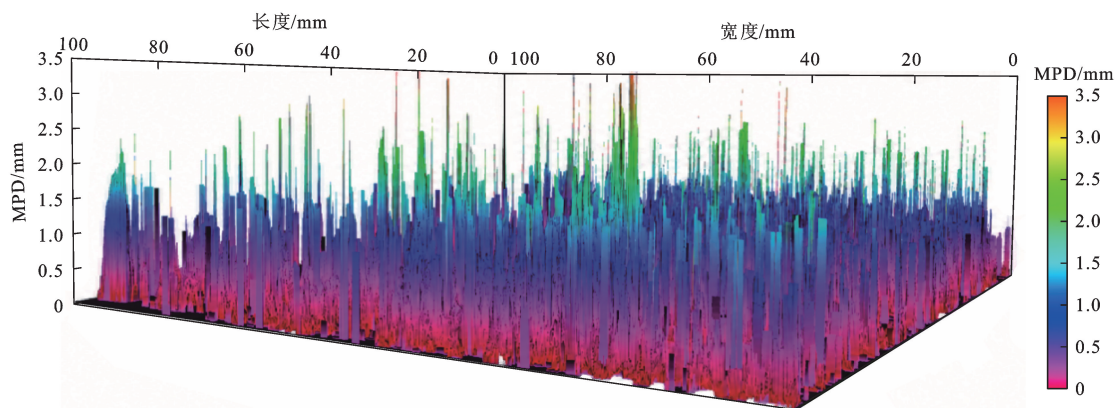
2.1.4 纹理参数与 BPN 相关性探讨

为评价涂层的抗滑性能,同时探讨其与纹理结构参数的相关性,研究进行了摆式摩擦因数测定试验,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,涂层后混凝土试样的 BPN 显著



(a) 无涂层



(b) 碳化硅涂层

图 9 涂层前后的 MPD 图像

Fig. 9 MPD images before and after coating application

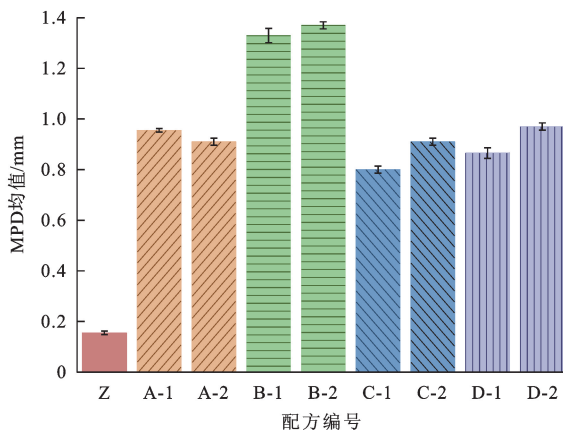


图 10 MPD 统计结果

Fig. 10 Statistical results of MPD

提升。与无涂层相比,4 种涂层试样 BPN 分别增加 115.5%、116.7%、98.2%、97.8%,这从工程性能角度证明了涂层改善抗滑性能的有效性。结合相关性分析可知,BPN 表征结果与 MPD 的线性相关性达 0.847,且大部分的散点落在了 95%的置信区间带,这说明涂层 MPD 与 BPN 有着较强的线性相关性,MPD 较高的涂层,其 BPN 值也相对较高,表明不同尺度测试结果具有一致性。基于微观纹理调控宏观

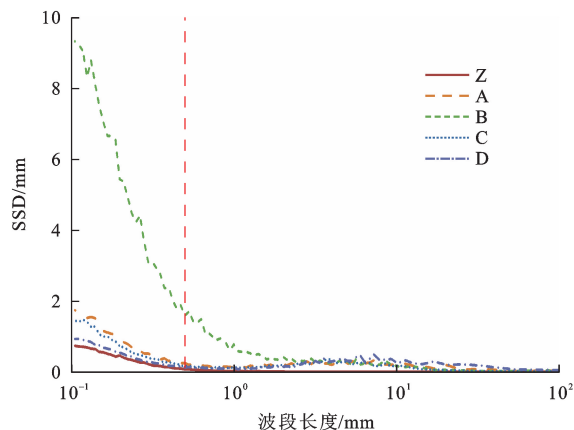


图 11 不同 MMA 涂层的 SSD

Fig. 11 SSD of different MMA coatings

性能的研究思想,是合理且可靠的。此外,也进一步说明了可以用激光扫描技术中的 MPD 代替 BPN 进行抗滑性能表征,提高测试效率及精度。

2.2 MMA 涂层-机场道面界面粘接性能评价

2.2.1 MMA 涂层与机场道面界面交互机制解析

传统环氧类道面修复材料的粘接机制以物理咬合为主^[28-29],粘接强度低且固化时间长,物理咬合强度随服役时间增加衰减明显。而 MMA 单体分子

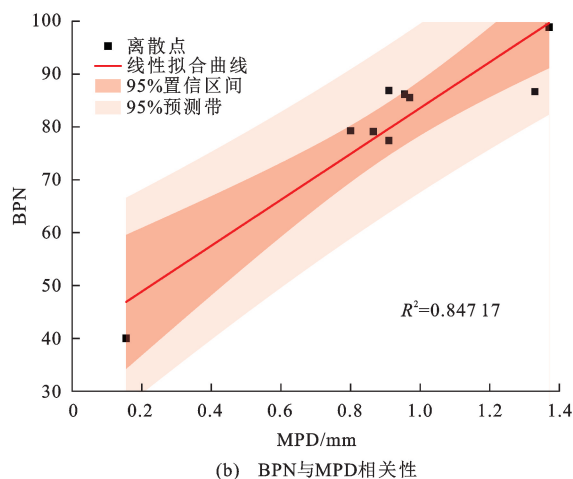
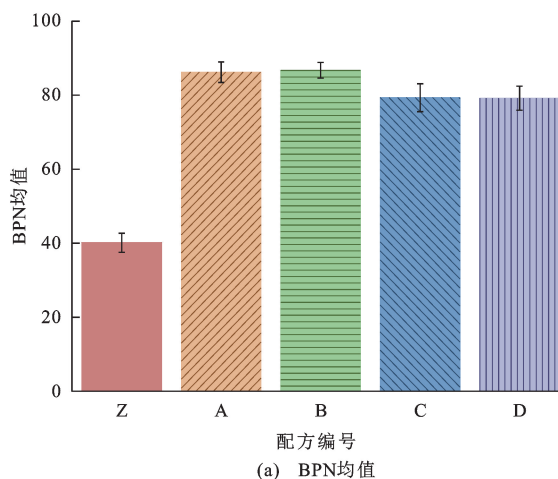


图 12 BPN 表征结果及与 MPD 相关性

Fig. 12 BPN characterization results and their correlation with MPD

量小,能够渗透进水泥基材料微孔,同时其具有良好的化学活性,这使得 MMA 材料可与混凝土在交互界面上发生一系列物理、化学的交互反应^[30-33],主要表现在物理嵌锁、化学键合、环境适应性 3 个方面,如图 13 所示。

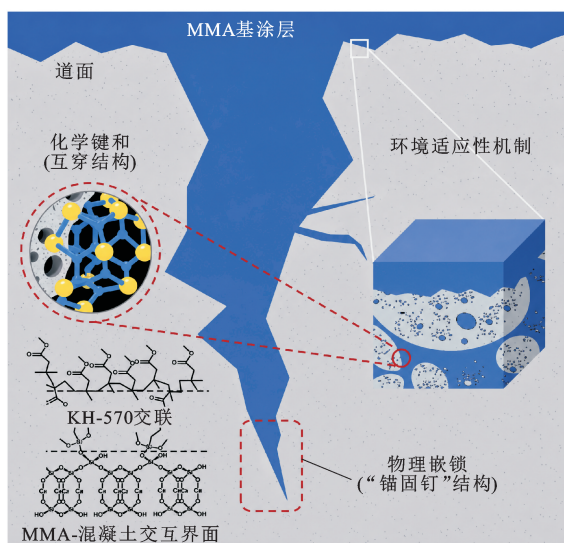


图 13 MMA-混凝土界面交互机制

Fig. 13 Interaction mechanism of MMA-concrete interface

首先,MMA 聚合物主链为极性酯基,赋予其对混凝土良好的亲和性;MMA 为低黏度液态树脂,可通过毛细作用快速渗透至混凝土表层 0.1~1.0 mm 深度的微裂缝,固化后形成“锚固钉”结构,提升机械互锁强度。其次,MMA 的酯基可与基材表面的羟基、羧基形成氢键,而甲基丙烯酸酯在自由基聚合过程中,残留的羧酸根可与水泥中的 Ca^{2+} 发生配位键合,形成不可逆的化学键。聚合反应生成的高交联度聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)与混凝土孔隙形成互穿网络,界面应力传

递效果好。最后,相较于水性环氧树脂材料对施工界面“干透、无尘、无油”的要求,MMA 在达到“不积水、微灰、不松散”的条件后即可施工。微量粉尘可被低黏度的 MMA 润湿包裹,仍保持较高的界面强度,且通过增加 BPO 的掺量,可以使 MMA 在 0 °C 的条件下 20 min 固化^[34],环境适应性较好。

2.2.2 拉拔过程曲线分析

拉拔试验中拉拔力-时间的关系曲线,可表征涂层-混凝土之间界面的破坏形式。不同固化时间(3 h 和 24 h)涂层的拉拔力-时间曲线见图 14。由图 14 可知:拉拔曲线近乎呈线性增长的趋势,到达某一瞬间拉拔力呈现最大值,试样完全破坏。这一增长趋势反映了材料弹性性质,与涂层材料的弹性模量及混凝土刚度匹配度密切相关,拉拔力增大到某一瞬间混凝土突然发生了脆性断裂。其次,不同固化时间的拉断曲线均呈现脆性断裂形式,但 24 h 固化时间的试样在拉断过程中屈服时间更长,说明其延长固化时间,可以增强涂层材料的韧性。

试样的破坏状态见图 15,可知,无论是 3 h 还是 24 h 的涂层试样,破坏断面均为水泥基准板而非粘接层;且各涂层材料的峰值拉力区域一致,均处于 5~7 kN,这说明 MMA 聚合物与混凝土的粘接强度高于混凝土自身抗拉强度。若要获取准确、可靠的材料粘接强度,后期需改进拉拔试验方法,如增加一个拉拔头同时开展试验。

2.2.3 基于拉拔强度的界面性能评价

为进一步评价涂层-混凝土界面粘接性能,计算了不同固化时间涂层的拉拔强度,结果见图 16,可知,MMA 涂层固化 3、24 h 的拉拔强度分别集中在 3.47~4.46、3.70~4.76 MPa,粗石英砂涂层拉拔

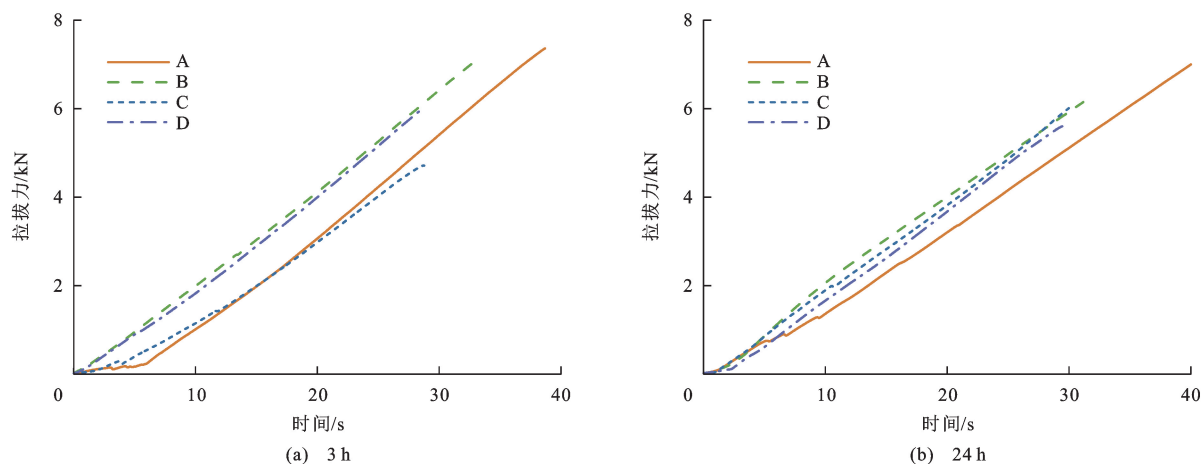


图 14 不同固化时间涂层的拉拔力-时间曲线

Fig. 14 Pull-out force-time curves of coatings with different curing times

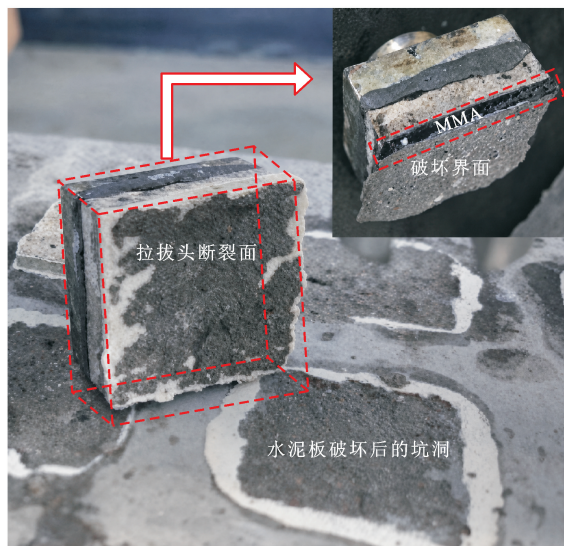


图 15 拉拔试样破坏状态断面

Fig. 15 Cross-section of pull-out specimen failure state

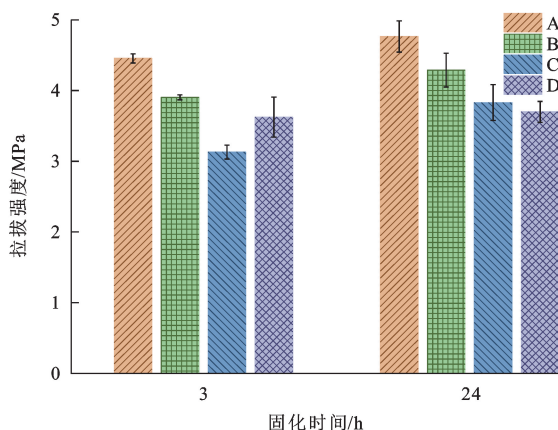


图 16 不同固化时间 MMA 涂层的拉拔强度

Fig. 16 Pull-out strength of MMA coatings with different curing times

强度最大,棕刚玉涂层最小。研究表明,普通水泥基修复材料界面强度通常在 $2.5 \sim 3.5 \text{ MPa}$ ^[35]。粗石

英砂涂层 24 h 拉拔强度达到 4.76 MPa 以上,相较于混凝土材料本体的抗拉强度提升 90% 以上。这一现象主要归结于 MMA-混凝土界面强烈的交互机制效应(物理嵌锁、化学键合、环境适应性)。由此来看,本研究设计的 MMA 涂层材料具有显著早强的优势,在不停航施工快速修复领域具有广阔的应用前景。

对于负荷较小的机场,可以选用以石英砂为骨料的配方,此配方成本低且修复后的道面同样展现出了较好的抗滑性能;而负荷较高,且雨水偏多的机场,可以选用碳化硅为骨料的配方,此配方中的碳化硅骨料具有较为丰富的微凸体,其尖锐的微凸体边缘能够轻易的划破水磨,能够在湿滑条件下,提供更优的抗滑性能。

2.3 MMA 涂层抗冻耐久性性能评价

在冻融试验中,研究将每 50 次冻融循环作为 1 个观测周期,实时记录不同涂层试样的质量损失情况(表 4)和外观损坏状态(图 17)。

表 4 试件质量损失百分比

Table 4 Percentage of specimen mass loss %

涂层情况	不同循环次数的质量损失百分比		
	50	150	300
无涂层	0.1	4.2	
粗石英砂	0.0	0.0	0.2
碳化硅	0.0	0.0	0.0
棕刚玉	0.0	0.0	0.1
细石英砂	0.0	0.0	0.2

由表 4 和图 17 可知:对于无涂层的混凝土试件,经历 50 次冻融循环后,试样表面已呈现“麻面”的状态,砂浆层部分脱落,这是典型的冻胀破坏的征

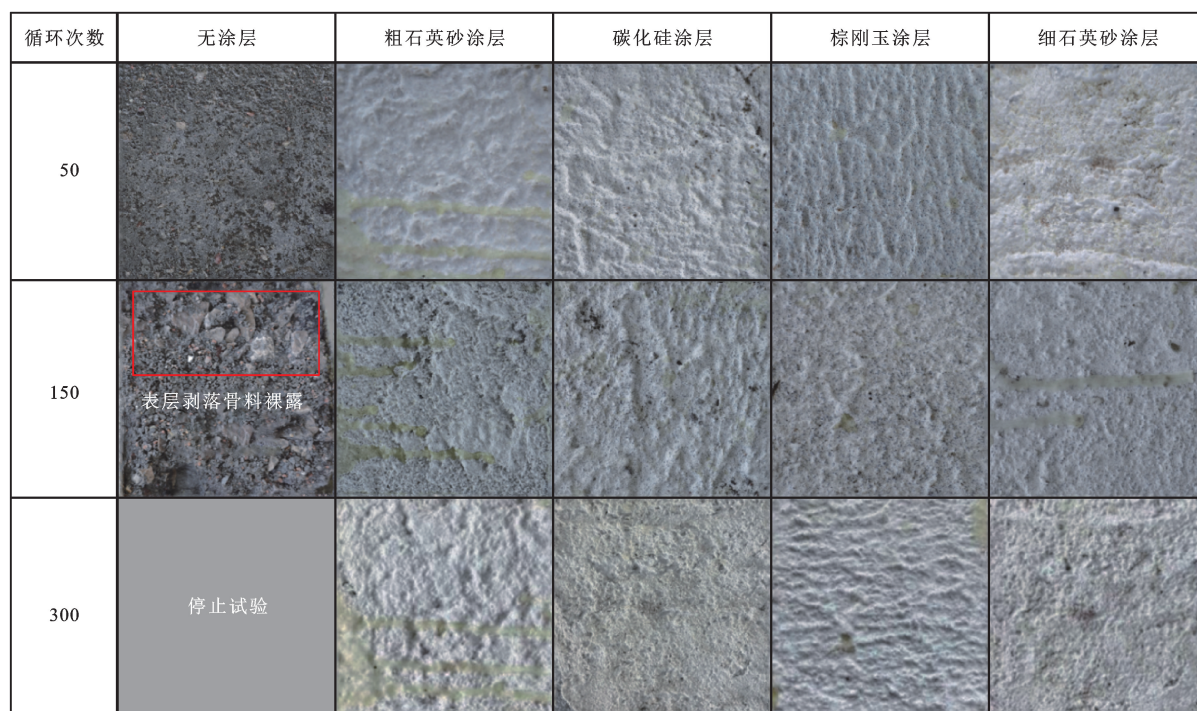


图 17 冻融循环次数对涂层外观状态的影响

Fig. 17 Influence of freeze-thaw cycle number on coating appearance state

兆;在经历 150 次冻融循环后,试样表面出现了大面积粗骨料裸露形态,质量损失达 4.2%。相比而言,对于 4 种 MMA 基涂层试样,经历 150 次冻融循环后,外观状态良好,未出现质量损失;经历 300 次冻融循环后,涂层边缘与混凝土试样粘接位置,个别出现脱落迹象,但外观状态总体良好,涂层脱落面积不足 1%,其中碳化硅涂层未发生任何破坏;质量损失均可忽略不计。由此可知,MMA 涂层具备良好的冻融防护性能。

3 结 语

(1)在纹理重塑状态方面,与无涂层试样(混凝土拉毛纹理)相比,MMA 涂层的纹理高度、均值断面深度以及斜率谱密度(特征波长为 0.1 mm)分别提升 3、7.5、23 倍;添加 MMA 涂层后,混凝土基准板 BPN 值增大约 1 倍,且其与 MPD 相关性良好($R^2=0.85$),这证明了不同测试尺度抗滑性能表征结果的一致性。其中碳化硅涂层抗滑性能最佳,建议实际施工中可优先选择该配方涂层。

(2)在界面粘接强度方面,4 种 MMA 基涂层的 3、24 h 拉拔强度分别集中在 3.47~4.46、3.70~4.76 MPa。性能最好的添加粗石英砂的 MMA 基涂层,24 h 拉拔强度达 4.76 MPa,相较于混凝土材料提升 90%以上。说明 MMA 涂层不但固化速度

快且与混凝土界面粘接性能优异,这源于 MMA 与混凝土界面交互的物理嵌锁行为、化学键合作用和环境适应机制。

(3)在抗冻耐久性能方面,在 150 次循环时,无涂层保护的试件出现了 4.2%的质量损失和骨料裸露;而 MMA 基材料在 150 次循环后均未出现质量损失,300 次循环后个别涂层边缘出现脱落迹象,但外观状态总体良好,涂层脱落面积不足 1%,试件质量损失小于 2.1%,印证了涂层优异的疏水性与抗冻融能力。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 谭忆秋,肖神清,熊学堂.路面抗滑性能检测与预估方法综述[J].交通运输工程学报,2021,21(4):32-47.
TAN Yi-qiu, XIAO Shen-qing, XIONG Xue-tang. Review on detection and prediction methods for pavement skid resistance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(4): 32-47.
- [2] 战 友,李 强,马啸天,等.基于宏微观纹理特征融合的路面摩擦性能预测[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(4):684-694.
ZHAN You, LI Qiang, MA Xiao-tian, et al. Macro and micro texture based prediction of pavement surface friction[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(4): 684-694.
- [3] LUO H Y, CHEN S Y, ZHU L Y, et al. Investigation of surface textures deterioration on pavement skid-resistance

- using hysteresis friction models and numerical simulation method[J]. *Friction*, 2024, 12(4): 745-779.
- [4] LIU Y Y, WANG R Y, WAN T T. A method determining critical operating parameters for landing aircraft based on runway pavement skid resistance[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2024, 25(1): 2346286.
- [5] 黄晓明,郑彬双. 沥青路面抗滑性能研究现状与展望[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(4): 32-49.
- HUANG Xiao-ming, ZHENG Bin-shuang. Research status and progress for skid resistance performance of asphalt pavements[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(4): 32-49.
- [6] 黄晓明,孙雨彤,徐海川,等. 基于离散元的正纹理抗滑磨损层纹理特征分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 1520-1529.
- HUANG Xiao-ming, SUN Yu-tong, XU Hai-chuan, et al. Analysis on texture characteristics of positive texture skid-resistance friction course based on discrete element [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(6): 1520-1529.
- [7] WANG Y Y, LAI X Y, ZHOU F, et al. Evaluation of pavement skid resistance using surface three-dimensional texture data[J]. *Coatings*, 2020, 10(2): 162.
- [8] 郑木莲,陈 旺,王海阳. 基于图像处理技术的低噪声微表处纹理与噪声评价[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(1): 80-92.
- ZHENG Mu-lian, CHEN Wang, WANG Hai-yang. Evaluation of texture and noise of low-noise micro-surface based on image processing technology[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(1): 80-92.
- [9] YANG L T, LIU J Q, TU H Z, et al. Optimizing pavement skid resistance measurement with texture resolution sensitivity indices[J]. *Measurement*, 2025, 249: 116986.
- [10] 李 辉,张 雪,吕兴国,等. 热反射降温路面路表构造特性及其光热性能影响[J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(5): 96-116.
- LI Hui, ZHANG Xue, LYU Xing-guo, et al. Surface structural characteristics of heat-reflective cooling pavement and their influence on optical and thermal performance[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(5): 96-116.
- [11] 钱振东,薛永超,张令刚. 沥青路面三维纹理分形维数及其抗滑性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(10): 3590-3596.
- QIAN Zhen-dong, XUE Yong-chao, ZHANG Ling-gang. 3-D textural fractal dimension and skid resistance of asphalt pavement[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(10): 3590-3596.
- [12] BAWONO A A, LECHNER B, YANG E H. Skid resistance and surface water drainage performance of engineered cementitious composites for pavement applications[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104: 103387.
- [13] YUAN J B, FENG Z Z, CUI P. Research on anti-slip and wear resistance of concrete pavement after optimization of stone-planting process[J]. *Materials*, 2025, 18(10): 2210.
- [14] 谭祺琦,朱洪洲,代 思,等. 沥青路面薄层环氧铺装材料抗滑性能衰变规律[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(9): 18-26.
- TAN Qi-qi, ZHU Hong-zhou, DAI Si, et al. Attenuation rule of skid resistance of thin epoxy paving material for asphalt pavement[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(9): 18-26.
- [15] HUANG B, SHI J, CHEN S Q. Research on the performance of different waterproof bonding layer materials for steel bridge decks[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 39858.
- [16] 路 鑫,尚巧燕,鲁孝松,等. 废玻璃粉复合双组分道路标线抗滑性能[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2025, 45(2): 36-45.
- LU Xin, SHANG Qiao-yan, LU Xiao-song, et al. Skid resistance of composite two-component road marking with waste glass powder[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2025, 45(2): 36-45.
- [17] HAN J, XU L L, FENG T, et al. Effect of PCE on properties of MMA-based repair material for concrete[J]. *Materials*, 2021, 14(4): 859.
- [18] HE Y S, WANG Z Y, WEN F Y, et al. MMA-based fast-curing repair materials suitable for low-temperature application[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2022, 42(4): 343-350.
- [19] 施 彦,董广绰,刘 亮,等. MMA 彩色抗滑薄层胶结料研发及混合料设计[J]. *中外公路*, 2021, 41(1): 253-260.
- SHI Yan, DONG Guang-chuo, LIU Liang, et al. Mixture design and binder research of MMA binder with colorful anti-skid thin layer[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021, 41(1): 253-260.
- [20] LI J Y, ZHANG H L, WANG N, et al. Preparation methodology and performance of methyl methacrylate modified unsaturated polyester resin mortar for thin layer repair[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2025, 26: 2490217.
- [21] EOM S H, JEON H S, RYUE T G, et al. Development of anti-icing and skid-resistant road surfaces using methyl methacrylate (MMA) resin-based composites[J]. *Materials*, 2025, 18(3): 501.
- [22] 林江涛,王 昊,樊 亮,等. 集料表面纹理构造波长 SSD 分布规律及特征参数[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(12): 1310-1318.
- LIN Jiang-tao, WANG Hao, FAN Liang, et al. SSD distribution law and characteristic parameters of texture construction wavelength on aggregate surface[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(12): 1310-1318.
- [23] 刘炳华,闫新勇,丁润铎,等. 花岗岩-钢渣沥青混合料抗滑衰变特性研究[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(4): 16-25.
- LIU Bing-hua, YAN Xin-yong, DING Run-duo, et al. Study on anti-skid decay characteristics of granite and steel slag asphalt mixture[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(4): 16-25.
- [24] 冉茂平,杨艳梅,黄乐源,等. 路面纹理对胎-路滚动阻力的影

- 响分析[J]. 公路交通科技, 2021, 38(3): 23-29.
- RAN Mao-ping, YANG Yan-mei, HUANG Le-yuan, et al. Analysis on influence of pavement texture on tire-road rolling resistance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(3): 23-29.
- [25] 李城林. 三维激光扫描技术在高铁隧道工程测量中的应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(9): 125-128.
- LI Cheng-lin. Study on stability and control of tunnel face of large section multi-arch tunnel in weak surrounding rock[J]. Modern Engineering Technology, 2025, 4(9): 125-128.
- [26] 彭 毅, 李 强, 战 友, 等. 基于区域三维纹理特征的路面抗滑性能评估[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 667-676.
- PENG Yi, LI Qiang, ZHAN You, et al. Pavement skid resistance evaluation based on 3D areal texture characterization[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(4): 667-676.
- [27] 徐 粒, 吕润华, 彭慧婷, 等. 三维激光断面仪调查系统工作原理及其应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(10): 1202-1211.
- XU Li, GUO Run-hua, PENG Hui-ting, et al. Three-dimensional laser profilometer survey system of pavement slip characteristics[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(10): 1202-1211.
- [28] 刘 刚, 钱振东, 陈磊磊, 等. 自流平环氧沥青混凝土制备及其拌和摊铺期流变性能研究[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(5): 53-64.
- LIU Gang, QIAN Zhen-dong, CHEN Lei-lei, et al. Preparation of self-leveling epoxy asphalt concrete and its rheological properties during mixing and paving periods[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(5): 53-64.
- [29] ZHENG X G, CHEN Y J, XU W W, et al. Long-term performance analysis of epoxy resin ultra-thin wearing course overlay on cement concrete pavement[J]. Coatings, 2023, 13(8): 1455.
- [30] ZHANG M Y. Investigation on the effect of butyl acrylate (nBA) to improve the toughness properties of methacrylate-based waterproofing adhesive material (MMA) for the steel bridge deck[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022: 4310662.
- [31] 陈宇婷, 杨 周, 李 静, 等. PMMA 聚合物复合混凝土的制备及机理研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(1): 21-25.
- CHEN Yu-ting, YANG Zhou, LI Jing, et al. Preparation and mechanism research of PMMA polymer composite concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(1): 21-25.
- [32] 范玉辉, 王 宁. MMA 强化再生粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 189-195.
- FAN Yu-hui, WANG Ning. Experimental study on mechanical properties of MMA reinforced recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(1): 189-195.
- [33] JI K, STEWART L K, ARSON C. Molecular dynamics analysis of silica/PMMA interface shear behavior[J]. Polymers, 2022, 14(5): 1039.
- [34] 刘俊权. 双组份道路快速修补材料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(11): 119-121, 139.
- LIU Jun-quan. Study on the properties of two-component rapid repairing material for road[J]. New Building Materials, 2019, 46(11): 119-121, 139.
- [35] BIZU A N, ISOPESCU D N, DRAGHICI G, et al. An experimental and FE modeling investigation of the pull-out behavior of anchoring solutions in concrete: A comparative study[J]. Materials, 2025, 18(19): 4596.