

基于 PMHS-TEOS 改性地聚合物涂料的疏水性能研究

胡源, 金祖权*, 逢博

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:地聚合物涂料的亲水性导致其易受水和可溶性离子的渗透破坏, 影响其耐久性能。试验研究了含氢硅油(PMHS)和正硅酸四乙酯(TEOS)的混合溶液作为表面渗透改性剂对地聚合物涂料疏水性能的影响。通过表面接触角、饱和吸水率和耐磨性能试验分析其疏水效果。PMHS-TEOS 改性后地聚合物涂料表面接触角为 136.8° , 吸水率降低了 62.9%, 在累积磨损 21 m 后具有良好的疏水性。扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、傅里叶红外光谱(FTIR)和压汞测试(MIP)等微观测试结果表明, TEOS 和 PMHS 有助于地聚合物涂料表面孔隙结构的填充和疏水膜结构的构建。此外, PMHS-TEOS 与地聚合物涂料之间形成了良好的化学结合, 即使表面磨损破坏后, 仍能保持较优异的疏水性能。

关键词:地聚合物涂料; 疏水性能; 微结构; 改性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)05-0032-08

Study on the hydrophobic performance of the geopolymer coatings modified with PMHS-TEOS

HU Yuan, JIN Zuquan*, PANG Bo

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: The hydrophilicity of geopolymer coatings renders them susceptible to the penetration and damage from water and soluble ions, thus impacting their durability. This study investigates the impact of a mixed solution containing polymethylhydrogensiloxane (PMHS) and tetraethyl orthosilicate (TEOS) as surface penetrating modifiers on the hydrophobicity of geopolymer coatings. The hydrophobic effect is analyzed through tests on surface contact angle, water absorption rate and abrasion resistance. Following PMHS-TEOS modification, the surface contact angle of the geopolymer coatings reaches 136.8° , with a 62.9% reduction in water absorption rate, and the coatings exhibits good hydrophobicity after 21 m of cumulative abrasion. Microscopic tests including scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and Mercury intrusion porosimetry (MIP) reveal that TEOS and PMHS contribute to the filling of surface pores and the construction of hydrophobic film structure in geopolymer coatings. Additionally, a good chemical bond is formed between PMHS-TEOS and the geopolymer coatings, ensuring

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(52225905)

作者简介: 胡源(1999—), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为混凝土耐久性。E-mail: 3305514993@qq.com。

* 通信作者: 金祖权(1977—), 男, 四川南充人。博士, 教授, 主要从事海工混凝土制备及耐久性等方面的研究。
E-mail: jinzuquan@126.com。

excellent hydrophobic performance even after surface abrasion damage.

Key words: geopolymer coatings; hydrophobic; microstructure; modification

地聚合物材料是由活性硅铝质原料与碱性激发剂混合而成的无机聚合物,因其优异的耐酸性、耐热性和力学性能而广泛应用于无机涂料^[1-2]。地聚合物涂料不含任何有机溶剂,在使用周期内无可挥发性化合物生成^[3-4],是环境友好型涂料。

地聚合物涂料的硅酸盐成分使其表面存在大量的亲水基团,能使涂料表面更容易与水分子相互作用,形成较强的润湿效应^[5]。这种强烈的亲水性可能导致涂料在潮湿环境中更容易受到水和可溶性离子的侵蚀,影响涂料的表面美观、稳定性和耐久性。同时,地聚合物凝胶相的多孔结构导致 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等侵蚀性离子随着水的迁移而侵入或渗出,降低涂料的防护性能。

近年来,研究者发现使用硅氧烷类改性剂对地聚合物涂料表面疏水改性可以有效改善其疏水性能。LV 等^[6]发现内掺聚二甲基硅氧烷(PS)可以有效提高地聚合物涂料表面的疏水性能。结果表明,当 PS 掺入增加至 2% 时,饱和吸水率与未改性试样相比降低了 70%。但 PS 会降低前驱体材料的溶解度,影响力学性能发展,不适用实际工程。XUE 等^[7]采用辛烷基三乙氧基硅氧烷对地聚合物表面处理,改性后地聚合物表面接触角为 144.1° ,水的毛细吸收和扩散受到明显抑制;此外,所选硅氧烷通过化学键作用成功地附着在地聚合物表面,展示出优异的化学结合性。LIU 等^[8]提出一种在高温条件下通过含氢硅油(PMHS)在新固化的地聚合物涂料表面原位合成硅纳米丝的新方法。该复合涂层表现出较为优异的超疏水性能和自清洁性能,其接触角约为 161° 。然而,上述表面改性方法容易受到磨损的影响,导致疏水效果的减弱甚至失效。此外,硅氧烷类改性剂(如 PMHS)的填充作用较差,降低了疏水膜结构的完整性。随着时间的推移,单一 PMHS 改性体系的保护效果逐渐减弱,影响涂料的耐久性能。

因此,本文选用 PMHS 和正硅酸四乙酯(TEOS)的混合溶液作为表面疏水改性剂,通过刷涂对新制备的地聚合物涂料表面改性。地聚合物涂料孔隙结构的填充和表面疏水结构的构建在一步碱催化反应中同时进行。通过涂料表面接触角、饱和吸水率和耐磨性能等宏观测试,PMHS-TEOS 改性的地聚合物涂料表现出优异的疏水性能,且相比于单 PMHS 改性体系更具耐磨性。通过扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、傅里叶红外光谱(FTIR)和压汞测试(MIP)等微观测试方法综合分析表层物相及微结构变化,进而得出 PMHS-TEOS 改性机理。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

本研究中地聚合物涂料前驱体由 I 级粉煤灰和 S95 级矿粉混合配制而成,均购自河南恒源材料有限公司,其化学组成如表 1 所示。

表 1 前驱体材料化学组成

元素组成	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	TiO_2	Na_2O	MgO	P_2O_5
粉煤灰	52.53	35.06	5.00	2.72	1.59	1.14	0.90	0.85	0.21
矿粉	32.89	19.17	0.42	35.67	0.33	0.91	0.65	9.94	0.02

碱性激发剂由水玻璃溶液、氢氧化钠和水混合制备。水玻璃溶液购自于嘉善县优瑞耐火材料有限公司,模数 $M_s = 2.25$;氢氧化钠购自于国药集团化学试剂有限公司。通过加入氢氧化钠和水将水玻璃的模数从 2.25 调整到 1.2。充分搅拌溶液,静置至清澈,温度降至环境温度(25 ± 0.5) $^\circ\text{C}$,为试验做准备。表面疏水改性剂由 TEOS、PMHS 和无水乙醇(Ethanol Absolute, EA)按照比例混合配置成复合溶液。

1.2 地聚合物涂料制备

本研究地聚合物涂料各组分掺量如表 2 所示。将矿粉和粉煤灰按质量比 3 : 1 称取 100 g,使用电动搅拌器以 300 r/min 搅拌 2 min,混合制备成地聚合物前驱体材料;然后,缓慢加入碱性激发剂,再以

800 r/min 的速度搅拌 3 min, 得到涂料料浆; 最后, 将制备的料浆用喷枪以 200 mm 间距均匀喷涂在水泥板上, 并在 25 °C 的环境中固化, 得到 GPC 试样(空白组)。使用尼龙毛油漆刷将配置的 PMHS 和 PMHS-TEOS 表面疏水改性剂均匀涂刷在新制备的 GPC 试样表面, 分别制备得 P-GPC 和 PT-GPC, 作为对照组。

表 2 地聚合物涂料各组分掺量

编号	前驱体/g		碱性激发剂/g			表面疏水改性剂/g		
	矿粉	粉煤灰	水玻璃	NaOH	水	PMHS	TEOS	EA
GPC						—	—	4.0
P-GPC	75.0	25.0	38.8	6.0	78.2	5.0	—	4.0
PT-GPC						5.0	0.6	4.0

1.3 试验方案

1.3.1 疏水性能测试

将制备的 GPC、P-GPC 和 PT-GPC 试样置于养护室((25±3) °C, 相对湿度 60%) 进行养护。在不同养护龄期的试样表面选取 3 个不同区域, 滴加体积为 5 μL 的去离子水, 利用 ImageL 软件测量养护不同龄期的表面接触角(Contact Angle, CA), 评价其疏水性能。

本文根据《涂料抗磨损性能测试法》(ASTM D4060-14) 标准, 将制备的涂料试样养护 28 d 后, 用 800 目砂纸在 800 Pa 压力下对表面进行磨损, 并沿 0~21 m 的累积磨损距离测试其表面接触角。

1.3.2 饱和吸水率和失水率测试

将新拌地聚合物涂料浆料倒入 40 mm×40 mm×40 mm 的立方体模具并置于养护室中养护 1 d。脱模后, 试样的 5 个面使用石蜡密封, 保留 1 个面用于疏水处理。随后置于养护室中固化 28 d 后, 将试样取出并放入真空干燥箱中干燥 1 d。最后, 将干燥后的试样完全浸泡在去离子水中, 测量其饱和吸水率。饱和吸水率由式(1)计算:

$$V_{\text{吸水}} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为试样在真空中干燥 1 d 后的质量; m_1 为试样浸泡后的质量。

1.3.3 疏水材料渗透性能测试

采用机械角磨机将干燥后的试件表面疏水防护涂料打磨至暴露出基体, 利用德国 ImageL 测试涂料与暴露基底交界处表面的接触角, 用于分析疏水材料的渗透作用。此测试有助于评估疏水涂料的防护性能, 深入了解材料的渗透行为。

1.4 分析与测试

使用 Zeiss Sigma300 扫描电子显微镜观察并分析空白组和对照组试样的表面形态和微结构变化。使用 Smartlab X 射线衍射分析研磨过筛的涂料粉末试样未改性与改性地聚合物涂料的物相组成。采用 Bruker Vector 70 傅里叶变换红外光谱对试样的化学结构进行表征。采用 AutoPore IV 9600 高性能全自动压汞仪分析上述 3 组涂料试样的表面孔隙结构。

2 结果与分析

2.1 地聚合物涂料的表面形貌

图 1 为未改性处理与改性后地聚合物涂料固化 28 d 的表面形貌。相比于 GPC 试样, 经过 PMHS 和 PMHS-TEOS 表面疏水改性后的涂料表面更致密, 表面的孔隙和裂纹数量减少。由于碱的催化作用, PMHS 在 P-GPC 试样表面形成了硅纳米丝疏水膜结构^[8], 有效地提高了涂料表面的疏水性能。但由于 PMHS 没有填充作用^[9], P-GPC 试样表面存在大量孔隙结构, 这导致疏水膜结构的完整性较差, 试样的疏水性能受到影响。此外, GPC 和 P-GPC 试样存在大量未水化的前驱体材料。由于地聚合物涂料相对薄, 材料内部的水分迅速流失, 导致内部湿度降低, 孔隙中用于溶解的碱液含量减少。较低的内部湿度阻碍了

溶解过程,导致前驱体材料在地聚合物水合反应中的参与不足。与此相反,PT-GPC 试样表面更为致密和完整,孔隙和微裂纹数量较少,前驱体颗粒水化更为彻底。

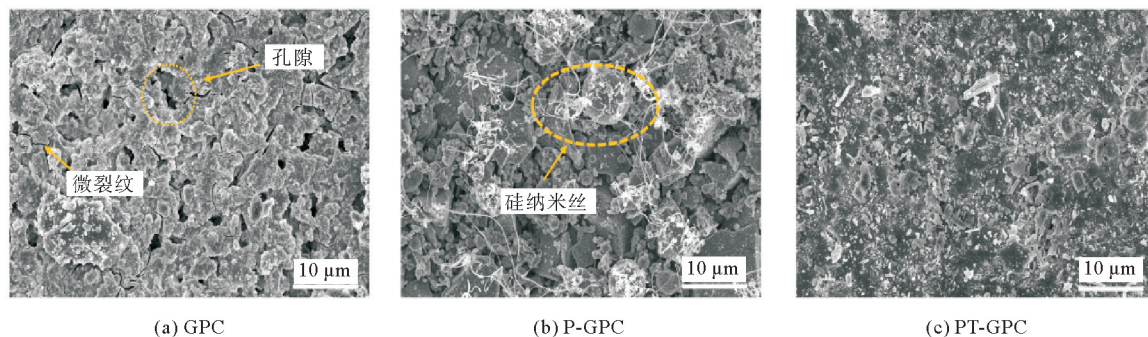


图 1 试样表面形貌

2.2 PMHS-TEOS 对地聚合物涂料疏水性能的影响

图 2(a)显示了养护 1、3、7、14 和 28 d 的改性和未改性地聚合物涂料试样的表面接触角(CA)值。固化 28 d 后, GPC 的接触角仅为 61.6° , 表明其表面具有亲水性。而采用 PMHS 和 PMHS-TEOS 表面改性的地聚合物涂料试样, 在固化 1 d 后, 表面的 CA 值分别达到 112.3° 和 118.6° , 显示出疏水性。与单 PMHS 改性的试样相比, 采用 PMHS-TEOS 改性的 PT-GPC 试样的疏水性能提升更为显著。在 28 d 时, PT-GPC 试样表面的 CA 值达到 136.8° , 比 P-GPC 试样提高了 18.2%。此外, PT-GPC 试样表面的 CA 值随着养护龄期的延长而增加。

图 2(b)为 3 组试样的耐磨性能测试结果。在磨损 5 m 时, 由于摩擦使得涂料表面粗糙度增加, 3 组试样的表面接触角增大。随着摩擦距离的进一步增加, P-GPC 试样的接触角减小, 在磨损 21 m 时 CA 值仅为 92.1° 。结合 SEM 观测结果, 由于 PMHS 在地聚合物涂料表面构建的疏水膜结构完整性和结合性较差, 易受到磨损破坏, 从而导致疏水性能下降。而 PMHS-TEOS 的改性体系, 由于表面疏水膜结构更稳定, PT-GPC 试样在累积磨损 21 m 后 CA 仍可达到 124.5° , 表现出较为优异的耐磨性能。

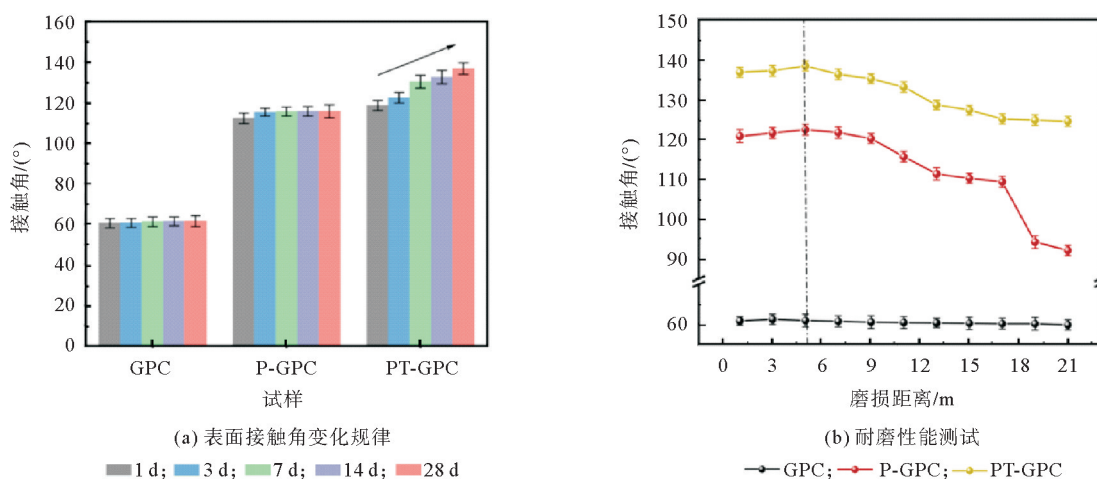


图 2 不同养护龄期的地聚合物涂料试样表面接触角变化规律和耐磨性能测试

2.3 PMHS-TEOS 对地聚合物涂料饱和吸水率和失水率的影响

饱和吸水率测试结果如表 3 所示。由于地聚合物材料具有极强的亲水性, GPC 试样测出较高的饱和吸水率, 仅需 43 min 即可达到饱和状态。而经过 PMHS 和 PMHS-TEOS 表面疏水改性后, P-GPC 和

PT-GPC 试样的饱和吸水率分别为 3.08% 和 2.43%，相比 GPC 试样分别降低了 55.2% 和 64.7%，且饱和时间分别延长了 174.4% 和 376.7%。相较于 P-GPC 试样，采用 PMHS-TEOS 改性的 PT-GPC 试样具有更强的疏水性能，减少了水分子的侵入，降低了饱和吸水率，延长了试样达到饱和状态的时间。

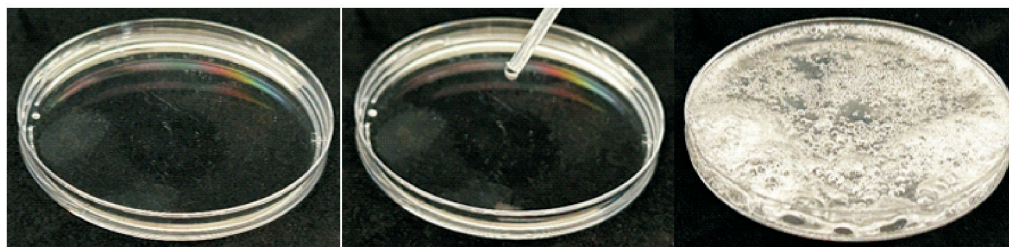
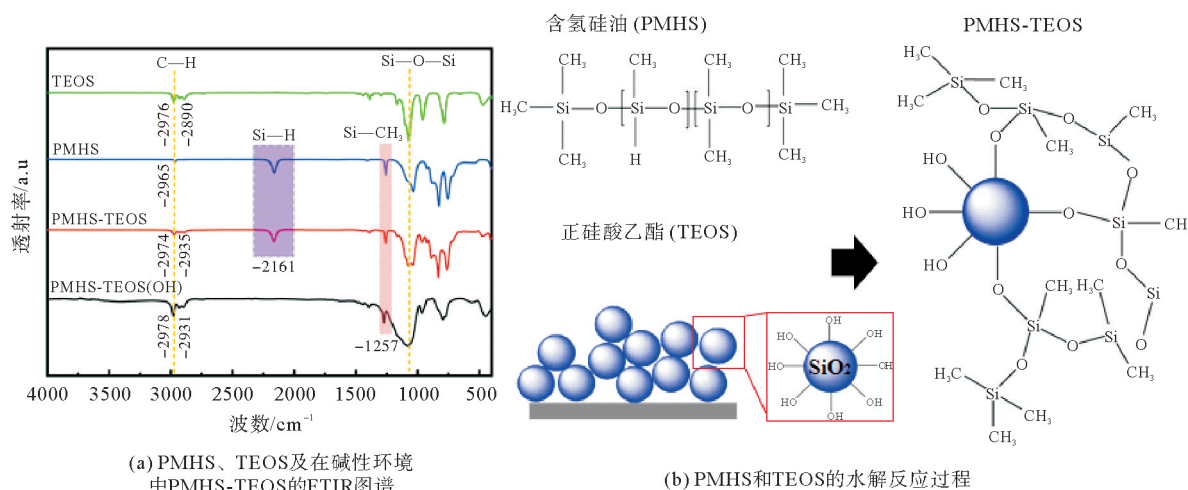
2.4 PMHS 和 TEOS 协同改性机理分析

2.4.1 模拟 PMHS 和 TEOS 在地聚合物孔隙液中的反应情况

图 3 显示了 PMHS 和 TEOS 及其混合溶液的 FTIR 测试结果。在 PMHS 中，Si—H 键的拉伸振动峰出现在 2161 cm^{-1} 处^[8,10]。当 PMHS 和 TEOS 混合后，Si—H 键的特征峰未发生变化，表明二者混合并未发生化学变化。当向 PMHS-TEOS 混合溶液中滴加 1 mL 地聚合物模拟孔溶液时，Si—H 键的特征峰消失，Si—O—Si 的拉伸振动峰的峰值增加(图 3(a))。这表明此时 PMHS 与 TEOS 发生了化学反应，反应示意如图 3(b)(c)所示。与单 PMHS 改性体系不同，TEOS 的添加使其在地聚合物材料孔隙液中受到碱的催化，从而迅速水解生成纳米 SiO_2 颗粒。这些纳米 SiO_2 颗粒表面—OH 基团与 PMHS 中的活泼 Si—H 键发生脱氢反应^[11-13]，使得疏水基团与纳米 SiO_2 颗粒表面链接。这些富含疏水基团的活性纳米 SiO_2 颗粒能够参与地聚合水化反应，从而实现疏水基团与地聚合物内凝胶相的链接，达到地聚合物涂料表面的改性。

表 3 饱和吸水率测试

试样	饱和吸水率/%	达到饱和时间/min
GPC	6.88	43
P-GPC	3.08	118
PT-GPC	2.43	205



(c) 模拟PMHS-TEOS在地聚合物孔隙液中的反应变化

图 3 PMHS、TEOS、PMHS-TEOS 在地聚合物孔隙液中的水解反应

2.4.2 物相分析

未改性及改性地聚合物涂料的化学组成如图 4 所示。在 XRD 光谱中没有新的峰出现，且特征峰的位置相同。这表明 PMHS 和 PMHS-TEOS 改性地聚合物涂料没有新的物质生成。而相比于 GPC 和 P-GPC 试样，TEOS 在碱的催化下迅速水解和聚集，形成纳米 SiO_2 ，导致 PT-GPC 试样的 XRD 图谱中石英

(PDF# 85-0795)特征峰^[14]的峰值强度增加。这与2.4.1模拟结果一致。此外,在PMHS-TEOS改性体系中,C—S—H/C—(A)—S—H凝胶特征峰强度显著增加。这表明形成的纳米SiO₂参与地聚合二次水化反应,水化产物含量增加。

2.4.3 微结构演变

地聚合物涂料表面的孔隙结构对水侵起着至关重要的作用。地聚合物的孔径通常由凝胶孔(<10 nm)、少害孔(10~50 nm)和有害孔(> 50 nm)3类孔隙结构组成^[9]。根据压汞测试(MIP),图5(a)为3组试样的表面孔径分布,GPC试样的孔径分布最大,为10²~10³ nm。PMHS细化了地聚合物涂料的孔隙结构,P-GPC试样的有害孔体积略微减少。这是由于PMHS的油性减少了分散过程中前驱体材料之间的摩擦,产生致密化效应,从而降低了地聚合物涂料表面的孔隙率。经过PMHS-TEOS改性后,TEOS的水解作用使PT-GPC的孔径分布范围减小至2~20 nm,凝胶孔含量增加。根据BJH(Barrett-Joiner-Halenda)法计算,PT-GPC的平均孔径最小,为15.37 nm,而GPC为51.40 nm。此外,PT-GPC试样的总孔隙体积显著减小(图5(b)),孔隙率相对于GPC和P-GPC试样分别降低了53.7%和36.1%。

综上所述,PMHS和TEOS在GPC试样表面的孔隙中迅速水解并快速水化成新凝胶相,填充了孔隙,从而降低了涂料表面的孔隙率。

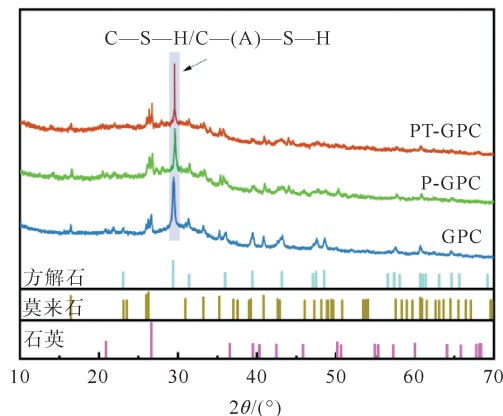


图4 未改性和改性地聚合物涂料试样养护28 d后的XRD图谱

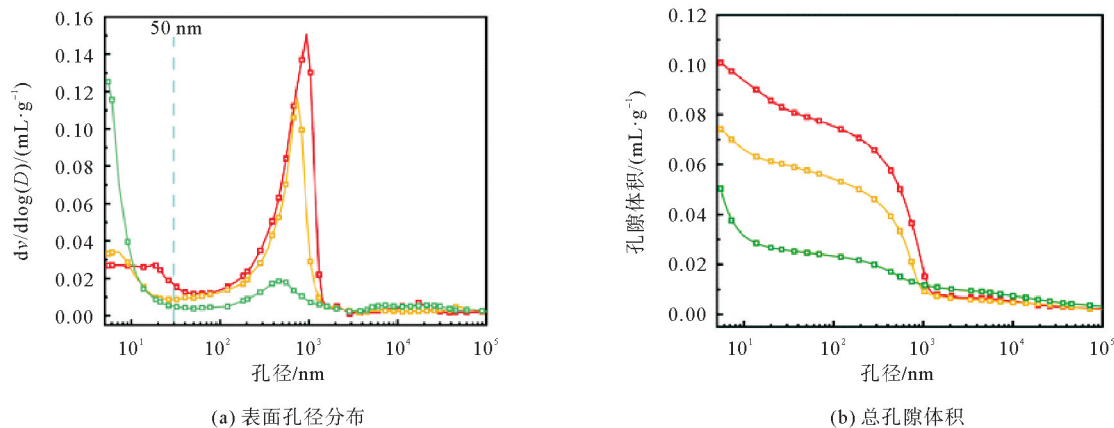


图5 地聚合物涂料表面孔径分布和总孔隙体积

—■— GPC; —■— P-GPC; —■— PT-GPC

2.4.4 PMHS-TEOS与地聚合物涂料的结合性

图6为在固化28 d后3组试样在400~4000 cm⁻¹范围内的FTIR分析图谱。与GPC试样相比,经过PMHS和PMHS-TEOS表面疏水处理的涂料试样在2927~2969 cm⁻¹处出现了一系列新的振动吸收峰,这是C—H键的拉伸振动峰^[5,15]。其中,在1272 cm⁻¹处的峰对应于Si—CH₃键的弯曲振动峰^[15]。由于Si—CH₃和C—H基团仅存在于疏水改性剂中,这说明PMHS和PMHS-TEOS与地聚合物涂料发生化学结合,使GPC试样具备了疏水性能。此外,PT-GPC试样中Si—H键特征峰消失。结合上述试验结果,这表明PMHS与TEOS在地聚合物涂料内碱的催化作用下发生了交联和结合,在涂料表面形成了一层更稳定的疏水膜结构。这种结合方式相比于单PMHS改性体系,使得疏水基团与涂料表面牢固连接,提高了表面的疏水性能,并增强了材料的耐久性和稳定性。这与2.4.1模拟结果一致。此外,随着

PMHS-TEOS 水解产物的反应,PT-GPC 表面的疏水膜结构逐渐增强,疏水性能不断提高,与 2.2 测试结果一致。

峰值强度在 $1280\sim 879\text{ cm}^{-1}$ 之间的高强度宽峰,对应 Si—O—T 键的非对称伸缩振动峰(其中 T 对应 Si 或 Al 的四面体)。相较于 P-GPC 试样,PT-GPC 试样中 Si—O—T 键不对称拉伸振动峰面积增大,说明试样内 Si—O—T 键的含量增加。这表明经过掺加 TEOS 后,其水解生成的纳米 SiO_2 参与了地聚合水化反应,地聚合物涂料内 C—(A)—S—H 凝胶生成量增加,表面结构更加致密。

2.5 涂料的疏水渗透性能

图 7 中展示了 P-GPC 和 PT-GPC 的疏水渗透性能测试结果。当疏水涂料因磨损而使基体暴露时,PT-GPC 涂覆的混凝土在涂料与基体交界处的接触角仍能保持在 135.2° ,呈现出卓越的疏水性能。而单 PMHS 改性体系界面处的接触角仅为 59.4° ,表现出亲水性。

这种显著差异可归因于 PMHS-TEOS 的水解单体结构相对较小,具有优越的渗透性。在碱刻蚀作用下,涂料与基体交界处发生了化学键作用,引发地聚合水化反应并生成新的化合物。PMHS-TEOS 水解生成的富含疏水基团的纳米 SiO_2 颗粒渗透至界面处,参与地聚合水化反应并渗透进水泥基体。在界面 4 mm 深度处,可观察到明显的 C—H 拉伸振动峰,表明其仍具有疏水性能。在恶劣环境中,即使涂料表面因外界因素脱落或破坏,这种界面处的强疏水性能仍然有效地抑制水分子和有害离子的侵入,提高混凝土结构的使用寿命和耐久性。

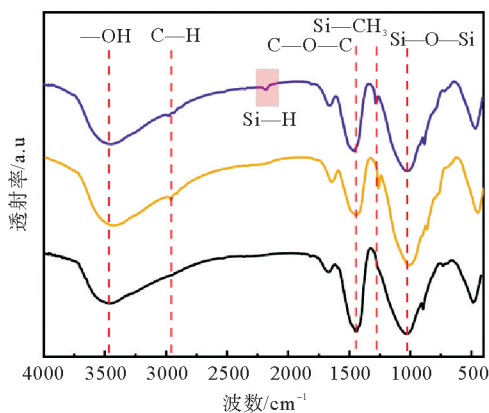


图 6 地聚合物涂料的 FTIR 图谱

— GPC; — P-GPC; — PT-GPC

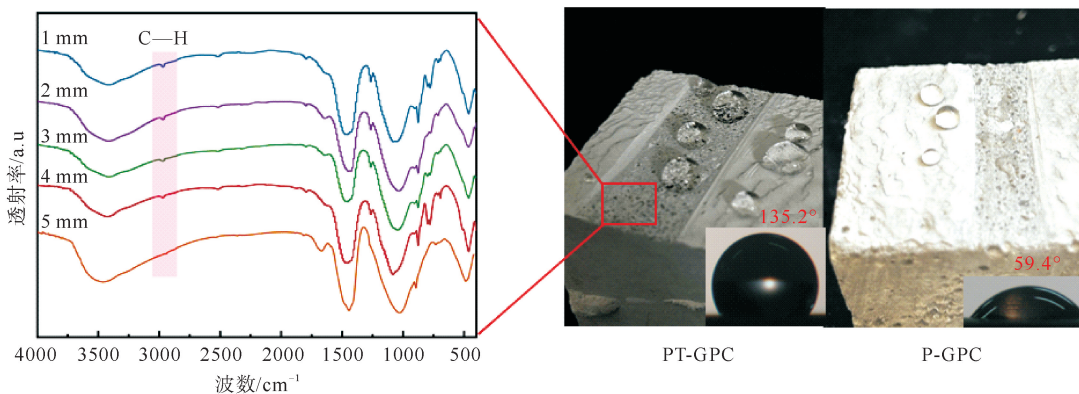


图 7 PT-GPC 的疏水渗透性能和界面处不同深度的 FTIR 图谱及 P-GPC 的疏水渗透性能

3 结论

本文主要研究了 PMHS-TEOS 表面改性对地聚合物涂料疏水性能的影响。通过表面接触角、饱和吸水率和耐磨性能测试探究改性后地聚合物涂料疏水性能的提升效果,并通过 SEM、XRD、FTIR 和 MIP 等微观测试方法探究 PMHS-TEOS 的改性机理。主要结论如下:

1) 与未改性的地聚合物涂料相比,通过 PMHS-TEOS 改性后地聚合物涂料表面接触角增至 136.8° ,饱和吸水率仅为 2.43%,表现出良好的疏水性能。此外,PMHS-TEOS 与地聚合物涂料之间形成稳定的化学结合,在累积磨损 21 m 后,PT-GPC 试样接触角仍可达到 124.5° ,表现为较为优异的耐磨性能。

2) PMHS-TEOS 改性效果优于单 PMHS 疏水改性剂。TEOS 在水解过程中生成的纳米 SiO_2 和

PMHS 中的 $-CH_3$ 在一步碱催化反应中同时完成对地聚合物涂料孔隙结构的填充和表面疏水结构的构建。这种改性的方法可以更有效地提高涂料的疏水性能和表面致密性,从而提高涂料在潮湿环境中的稳定性和耐久性。

参考文献(References):

- [1] LV X S, WANG K T, HE Y, et al. A green drying powder inorganic coating based on geopolymer technology[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 214: 441-448.
- [2] GAIKWAD M S, KUSUMKAR V V, YEMUL O S, et al. Eco-friendly waterborne coating from bio-based polyester amide resin[J]. *Polymer Bulletin*, 2019, 76(6): 2743-2763.
- [3] QI Y Q, SHEN L M, ZHANG J L, et al. Species and release characteristics of VOCs in furniture coating process[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 245: 810-819.
- [4] ZHANG S H, YOU J P, KENNES C, et al. Current advances of VOCs degradation by bioelectrochemical systems: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 2625-2637.
- [5] QIN Y, FANG Z, CHAI X R, et al. A superhydrophobic alkali activated materials coating by facile preparation[J]. *Coatings*, 2022, 12(6): 864.
- [6] LV X S, QIN Y, LIN Z X, et al. Inhibition of efflorescence in Na-based geopolymer inorganic coating[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(24): 14822-14830.
- [7] XUE X, LIU Y L, DAI J G, et al. Inhibiting efflorescence formation on fly ash-based geopolymer via silane surface modification[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 94: 43-52.
- [8] LIU Z H, PANG X Q, WANG K T, et al. Superhydrophobic coatings prepared by the in situ growth of silicone nanofilaments on alkali-activated geopolymers surface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(25): 22809-22816.
- [9] LIU Z D, WANG J L. TEOS modified with PMHS as consolidating coating to improve the strength and hydrophobicity of earthen structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 322: 13.
- [10] YANG G, CHEN Z H, LV C W, et al. Preparation and performance of H-PDMS/PMHS/OTS hybrid nanosilica hydrophobic and self-cleaning coatings on phosphogypsum surface[J]. *Polymers*, 2023, 15(17): 3574.
- [11] ZHANG X X, XIAO F C, FENG Q F, et al. Preparation of SiO_2 nanoparticles with adjustable size for fabrication of SiO_2 /PMHS ORMOSIL superhydrophobic surface on cellulose-based substrates[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 138: 105384-105384.
- [12] DARMAWAN A, PUTRI S N, MUHTAR H, et al. Unveiling the influence of MTMS:TEOS ratios in silica layer membranes enhanced by cetyltrimethylammonium bromide[J]. *Ceramics International*, 2024, 50: 11904-11915.
- [13] JING Y Q, TIAN F, GUO L H, et al. Effect of TEOS content on microstructure evolution and optical properties of Sm:YAG transparent ceramics[J]. *Optical Materials*, 2024, 147: 114681.
- [14] YANG J X, SHE W, ZUO W Q, et al. Rational application of nano- SiO_2 in cement paste incorporated with silane: Counterbalancing and synergistic effects[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2021, 118: 11.
- [15] PASUPATHY K, RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J. Effect of hydrophobic surface-modified fine aggregates on efflorescence control in geopolymer[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2022, 126: 12.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)