聚氨酯/硅酸盐复合涂料的渗透性与耐老化性能分析

李 瑞[1],孙志海[2]

(1.国能神东煤炭集团有限责任公司洗选中心,陕西 榆林 719315;2.济南交通发展投资有限公司,山东 济南 250000)

摘 要:为改善混凝土防护涂料的渗透性与耐老化性能,提升其在混凝土结构中的实际应用效果,以正硅酸乙酯(TEOS)制备的硅酸盐溶胶(SS)和水性聚氨酯分散体(WPU)为基材,制备不同γ-缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH560)含量的复合涂膜,系统考察其渗透性与耐老化性能。结果表明:加入KH560对复合涂膜性能具有显著改善作用。当KH560质量分数为1.0%时,涂膜可形成致密的交联网络,综合性能最优。24 h吸水率降至3.0%,48 h渗透深度仅为0.6 mm,28 d 5% NaCl浸泡质量变化率为1.15%,700 h盐雾拉伸强度保持率为85%左右,600 ℃下质量保留率为90%。该配比下复合涂膜的渗透性与耐老化性能最为可靠,可为混凝土结构的长效防护提供有效材料支撑。

关键词:聚氨酯;硅酸盐;复合涂料;渗透性;耐老化性能

中图分类号:TQ630.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0098-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.018

Analysis of Permeability and Aging Resistance of Polyurethane/Silicate Composite Coatings

LI Rui[1], SUN Zhihai[2]

(1. Washing and Selection Center of Guoneng Shendong Coal Group Co. , Ltd. , Yulin 719315, China;
2. Jinan Transportation Development Investment Co. , Ltd. , Jinan 250000, China)

Abstract: To improve the permeability and aging resistance of concrete protective coatings and enhance their practical application effectiveness in concrete structures, silicate sol (SS) prepared from tetraethyl orthosilicate (TEOS) and waterborne polyurethane dispersion (WPU) were used as base materials to prepare composite coatings with different contents of γ-glycidoxypropyltrimethoxysilane (KH560). The permeability and aging resistance of the composite coatings were systematically investigated. The results showed that the addition of KH560 significantly improved the performance of the composite coatings. At a KH560 mass fraction of 1.0%, the coating formed a dense crosslinked network, achieving optimal overall performance. Its 24 h water absorption was reduced to 3.0%, the 48 h penetration depth was only 0.6 mm, the 28 d mass change rate in 5% NaCl solution was 1.15%, the tensile strength retention rate after 700 h of salt spray exposure reached about 85%, and the mass retention rate at 600 ℃ was 90%. Under this formula, the permeability and aging resistance of the coating were most reliable, providing effective material support for the long-term protection of concrete structures.

Keywords: Polyurethane; Silicate; Composite coating; Permeability; Aging resistance

混凝土材料凭借取材便捷和性价比高等优势,成为建筑、桥梁等基础设施的核心基材,其长期服役性能直接关乎工程安全与运维成本[1-3]。然而,混凝土长期暴露于自然环境,易受腐蚀性介质侵蚀,导致使用寿命缩短[4-6]。复合涂料能够在混凝土表面形成防护膜,通过阻隔侵蚀介质渗透与抵抗环境老化,成为延长混凝土结构寿命的关键技术手段[7-9]。在复合涂料的众多性能指标中,渗透性直接决定涂层的阻隔效率[10-11];耐老化性能则直接影响涂层长期防护效果[12-13]。若耐老化性能不足,涂层在长期使用中易出现开裂、粉化等问题,导致防护膜失效,难以实现对混凝土的长效保护[14-15]。因此,开发兼具优异渗透性与耐老化性能的复合涂料,对提升混凝土结构的耐久性具有重要意

收稿日期Submitted date 2025-11-16;修回日期Revised date 2025-12-09;录用日期Accepted date 2026-01-13

联系人,469640847@qq.com

引用本文:李瑞,孙志海.聚氨酯/硅酸盐复合涂料的渗透性与耐老化性能分析[J].塑料科技,2026,54(9):98-102.

Citation:LI R, SUN Z H. Analysis of permeability and aging resistance of polyurethane/silicate composite coatings[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 98-102.

义[16-18]。张寒露等[19]采用机械搅拌将短切玄武岩纤维分散于环氧树脂基体中，制备增强复合涂层。但纤维易团聚难以形成连续阻隔网络，对涂层渗透性的改善未达预期。崔灿等[20]将TiO_2纳米粒子与水泥颗粒复配作为功能填料加入聚氨酯树脂体系。结果表明：制备的复合防水涂料虽考察了吸水率与耐紫外老化性能，但填料与聚氨酯基体界面相容性较差，长期浸泡后易脱附，导致耐老化性能快速衰减。陈施润等[21]采用稀土铈盐修饰石墨烯，通过溶液插层法引入水性环氧树脂制得复合涂层。结果表明：虽提升了复合涂层的防腐性能，但稀土铈改性石墨烯制备工艺复杂，成本较高，难以满足工业化大规模生产需求。丁伟等[22]采用热固化制备复合环氧树脂涂层，虽增强了涂层与基材的附着力，但*L*-谷氨酸改性氧化石墨烯对涂层耐盐雾、耐高温等极端环境老化性能的提升有限，无法适配长期严苛防护场景。

现有复合涂层在渗透性与耐老化性能的协同优化方面存在不足，多数涂层难以同时保证高阻隔效率与长效稳定性[23-25]。为了进一步提升涂层的渗透性和耐老化性，本研究以γ-缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH560)为核心变量，研究KH560对水性聚氨酯(WPU)/硅酸盐溶胶(SS)复合涂料两相界面相容性的改善作用，以减少微空隙和缺陷。本研究系统考察KH560含量对复合涂膜渗透性和耐老化性能的影响，旨在开发兼具优异渗透性、耐老化性能及工艺简便性的复合涂料。

1 实验部分

1.1 主要原料

正硅酸乙酯(TEOS)，分析纯，苏州启航生物科技有限公司；无水乙醇，体积分数95%，青州市凯信化工有限公司；去离子水，实验室自制；盐酸(HCl)，质量分数36%~38%，北京化工厂；WPU，PU-400，固含量30%，烟台恒鑫化工科技；KH560，分析纯，武汉卡诺斯科技有限公司；混凝土试块，C30，水泥(P.O42.5R普通硅酸盐水泥)、砂(中砂)、石(5~20 mm碎石)、水和减水剂(聚羧酸系高效减水剂)质量比为1.00∶1.80∶3.50∶0.50∶0.01。

1.2 仪器与设备

三口烧瓶，250 mL，徐州玻璃仪器二厂；电动搅拌器，JJ-1，泰州市姜堰分析仪器厂；恒温水浴锅，HH-501，金坛区盛蓝仪器制造有限公司；pH计，PHS-3C，杭州齐威仪器有限公司；数显黏度计，1101，宁波天恒仪器厂；鼓风干燥箱，DHG-9070A，苏州江东精密仪器有限公司；线棒式涂布器，100 μm，东莞市恒准技术检测有限公司；混凝土试模，100 mm×100 mm×100 mm，钢材质，献县鹏翼建筑仪器厂；热重分析仪(TG)，TGA/DSC3+，北京精微高博科学技术有限公司；盐雾试验箱，YWX/Q-150，无锡苏南试验设备有限公司；游标卡尺，0~150 mm，浙江甬工工具有限公司；划格器，QFH，上海普申化工机械有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 SS的制备

将体积比为1∶4∶4的TEOS、无水乙醇、去离子水依次添加至250 mL三口烧瓶内，采用电动搅拌器以200 r/min的转速持续搅拌，确保混合均匀。将经过去离子水稀释10倍的稀HCl (稀释前质量分数为36%~38%)逐滴加入混合液中，采用pH计进行实时监测，直至混合液的pH值稳定在2~3的范围内。将混合液放入60 ℃恒温水浴锅中反应3 h，得到澄清且稳定的SS。该溶胶主要以Si—OH键形式存在。

1.3.2 复合涂料的制备

表1为复合涂料的配方。WPU与SS的质量比固定为8∶2，以KH560含量为变量，分别制备添加不同质量分数(相对WPU) KH560的WPU/SS复合涂料。将WPU加入烧杯中，根据表1配方分别加入KH560，采用电动搅拌器以150 r/min的转速搅拌15 min，使KH560均匀分散在WPU中，提高其与SS的相容性。将制备好的SS按规定量缓慢滴入WPU-KH560混合体系中，滴速控制在1 mL/min。滴加过程中搅拌速度保持在150 r/min，滴加完成后继续搅拌30 min，确保两相充分混合。使用数字黏度计测量混合物的黏度，使用去离子水将配方量调节至合适的涂层黏度(约500~800 mPa·s)，继续搅拌10 min，获得均匀的WPU/SS复合涂料。

表1 复合涂料的配方

Tab.1 Formula of composite coatings

样品	m_{WPU}/g	m_{SS}/g	w_{KH560}/%	m_{KH560}/g	$V_{去离子水}$/mL
WPU/SS-KH560-0	80	20	0	0	8
WPU/SS-KH560-0.5%	80	20	0.5	0.4	8
WPU/SS-KH560-1.0%	80	20	1.0	0.8	8
WPU/SS-KH560-1.5%	80	20	1.5	1.2	8

1.3.3 涂膜的制备与固化

将清洁干燥的马口铁板(100.0 mm×150.0 mm×0.3 mm)置于水平工作台上，使用100 μm线棒式涂布器将制备好的复合涂料均匀涂覆于马口铁板表面。完成涂布后，将涂膜置于25 ℃、相对湿度为60%的室温环境中表干2 h。随后将其放入鼓风干燥箱，于100 ℃固化45 min，促使SS网络缩聚，WPU链段交联。取出冷却至室温，即得WPU/SS复合涂膜样品。

1.4 性能测试与表征

1.4.1 渗透性测试

(1)吸水率分析：按照HG/T 3856—2006进行测试，样品尺寸为100 mm×100 mm(干膜厚度为40~50 μm)。检测样品干燥后质量，然后浸泡于25 ℃去离子水中，定时记录吸水后质量，计算吸水率。

(2)渗透深度分析：按照GB/T 50082—2024进行测试，

将复合涂料涂覆在尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的混凝土试块表面(干膜厚度为40~50 μm),养护7 d。采用蓝色染料渗透法,将试块完全浸泡于质量分数为1%的亚甲基蓝溶液中(25 ℃),定时取出后沿横截面切开,测量涂料渗透深度。

1.4.2 耐老化性能测试

(1)耐介质浸泡稳定性测试:按照GB/T 1766—2008进行测试,样品尺寸为100 mm×50 mm (干膜厚度为40~50 μm)。将样品浸泡于25 ℃、质量分数5%的NaCl溶液中,浸泡结束后,查看涂膜外观有无缺陷。附着力按照GB/T 9286—2021划格法进行测试,评级从0级到5级。测定样品浸泡前后的质量变化率。涂膜铅笔硬度按照GB/T 6739—2022进行测试。冲击强度按照GB/T 1732—2020进行测试,采用1 kg重锤从50 cm高度自由下落冲击涂膜,观察涂膜是否出现开裂或脱落,以此评估涂膜抗冲击性能。

(2)耐盐雾性能评估:中性盐雾试验按照GB/T 10125—2021进行测试,采用5% NaCl溶液,在35 ℃、盐雾沉降速率为1~2 mL/(h·80 cm^2)的条件下,持续700 h,每100 h取样一次,测其拉伸性能。拉伸强度按照GB/T 1040.3—2006进行测试,拉伸速率为50 mm/min。以未经盐雾处理的空白样品为对照组,测试其拉伸性能,计算拉伸强度保持率。

(3)耐碱性测试:涂膜耐碱性按照GB/T 9274—1988进行测试,样品尺寸为100 mm×50 mm(干膜厚度为40~50 μm),在25 ℃时,浸泡于5% NaOH溶液中(pH值为13),浸泡时间为700 h。涂膜浸泡前后的光泽度按照GB/T 4893.6—2013进行测试。

(4)热稳定性检测:在氮气环境中进行测试,气体流速控制在50 mL/min,升温速率为10 ℃/min。

2 结果与讨论

2.1 WPU/SS复合涂膜的吸水率分析

图1为复合涂膜的吸水率。从图1可以看出,随着浸泡时间的延长,4种WPU/SS复合涂膜试样的吸水率均逐渐上升。当浸泡结束时,WPU/SS-KH560-0试样的吸水率最低,为2.4%;WPU/SS-KH560-0.5%试样的吸水率高达5.6%左右;WPU/SS-KH560-1.0%试样仅为3.0%;WPU/SS-KH560-1.5%试样为4.2%。结果表明:加入KH560可以优化涂膜试样吸水率。当KH560质量分数为0.5%时,其偶联作用不充分,致使WPU与SS界面结合薄弱,大量微空隙的存在为水分子渗透提供便捷通道,因此吸水率最高且增长迅速。当KH560质量分数为1.0%时,KH560能够充分桥接WPU与SS,构建致密均匀的交联网络,有效阻隔水分子渗透路径,因此展现出最低吸水率与最平缓的增长趋势。当KH560质量分数增至1.5%时,过量的KH560发生自聚反应,形成低分子量硅氧烷低聚物,在涂膜内部引入微小缺陷,削弱了结构的完整性。

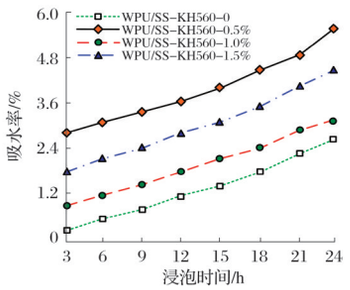


图1 复合涂膜的吸水率

Fig.1 Water absorption of composite coatings

2.2 WPU/SS复合涂膜的渗透深度分析

图2为复合涂膜的渗透深度。从图2可以看出,未加入KH560的WPU/SS-KH560-0试样在各浸泡时间点的渗透深度均最低,表明KH560对复合涂膜的渗透性能有增强作用。WPU/SS-KH560-0.5%试样在各浸泡时间点的渗透深度均保持最高,浸泡6 h时渗透深度约0.5 mm,48 h时已接近1.8 mm。WPU/SS-KH560-1.0%试样的渗透深度始终较小,6 h时仅约0.1 mm,48 h时也仅为0.6 mm。WPU/SS-KH560-1.5%试样的渗透深度则介于两者之间,48 h时约为1.1 mm。这种差异源于KH560对涂膜致密性与界面结合力的调控机制。当KH560质量分数为1.0%时,KH560充分桥接两相,形成致密且均匀的交联网络,阻挡染料分子向混凝土基材的渗透,从而展现出最优的阻隔性能。因此,WPU/SS-KH560-1.0%试样的抗渗透性相对较好。

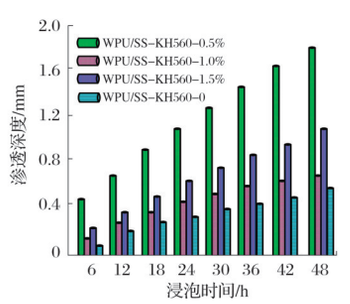


图2 复合涂膜的渗透深度

Fig.2 Penetration depth of composite coatings

2.3 WPU/SS复合涂膜的耐介质浸泡稳定性

5% NaCl溶液作为典型的盐蚀介质,其侵蚀机制以Cl^-渗透引发的涂膜溶胀、界面剥离及基材电化学腐蚀为主。表2为复合涂膜的耐介质浸泡稳定性。从表2可以看出,4种WPU/SS复合涂膜在该环境下的耐侵蚀老化性能存在明显差异。无论是外观与基材保护效果还是力学与界面稳定性,加入KH560的复合涂膜均优于未加入KH560的涂膜,体现了KH560的性能优化作用。从外观与基材保护效果方面来看,WPU/SS-KH560-0.5%试样的侵蚀劣化最为迅速,浸泡7 d时已出现局部泛黄,浸泡14 d时边缘起泡且失光加剧,浸泡28 d时更是呈现气泡连片现象,同时基材发生明显锈蚀。这表明低含量KH560未能有效改善WPU与SS的界面结合性,涂膜内部形成的微空隙为Cl^-与

水蒸气提供了快速渗透通道，最终引发基材腐蚀。WPU/SS-KH560-1.0%试样则展现出优异的阻隔保护能力，浸泡至28 d仅表现为中度失光，无任何起泡与基材锈蚀，致密的交联网络有效阻断了盐蚀介质的渗透路径。WPU/SS-KH560-1.5%试样浸泡7 d时无泛黄，浸泡14 d时仅轻微泛黄，但浸泡28 d时出现局部气泡且无锈蚀。这表明过量KH560自聚形成的低分子量硅氧烷低聚物引入微小缺陷，虽未导致基材严重腐蚀，却能够削弱涂膜对介质的完全阻隔能力。

表2 复合涂膜的耐介质浸泡稳定性

Tab.2 Stability of composite coatings against medium immersion

浸泡天数/d	样品	外观	附着力等级	质量变化率/%	铅笔硬度	冲击性能
7	WPU/SS-KH560-0	明显发黄	1	3.12	H	明显开裂
	WPU/SS-KH560-0.5%	局部泛黄	1	2.05	2H	无开裂
	WPU/SS-KH560-1.0%	外观完好	0	0.70	3H	无开裂
	WPU/SS-KH560-1.5%	无泛黄，轻微失光	0	1.12	2H	无开裂
14	WPU/SS-KH560-0	严重失光，气泡连片且基材锈蚀	2	3.42	HB	开裂严重
	WPU/SS-KH560-0.5%	明显失光，边缘起泡并泛黄	2	2.68	H	轻微开裂
	WPU/SS-KH560-1.0%	轻微失光，无变色	0	0.92	2H	无开裂
	WPU/SS-KH560-1.5%	中度失光，轻微泛黄	1	1.45	2H	无开裂
28	WPU/SS-KH560-0	无光泽，气泡连片且基材锈蚀	4	3.83	HB	开裂严重
	WPU/SS-KH560-0.5%	严重失光，气泡连片且基材锈蚀	3	3.20	HB	明显开裂
	WPU/SS-KH560-1.0%	中度失光，无锈蚀	1	1.15	2H	无开裂
	WPU/SS-KH560-1.5%	明显失光，局部气泡，无锈蚀	2	1.18	1H	轻微开裂

从力学与界面稳定性方面来看，附着力、质量变化率、铅笔硬度及冲击强度的变化进一步验证以上规律。在附着力方面，WPU/SS-KH560-0.5%试样从7 d的1级持续衰减至28 d的3级，界面结合力明显下降。WPU/SS-KH560-1.0%试样在28 d仍保持1级附着力，界面结合牢固。WPU/SS-KH560-1.5%试样在28 d降至2级，缺陷导致界面稳定性略逊于WPU/SS-KH560-1.0%。在质量变化率方面，WPU/SS-KH560-0.5%试样在28 d达3.20%，远超WPU/SS-KH560-1.0%的1.15%，表明其吸盐吸水量更大，涂膜致密性不足。铅笔硬度与冲击强度的衰减趋势也高度一致，WPU/SS-KH560-0.5%试样的铅笔硬度从7 d的2H降至28 d的HB，且28 d出现明显开裂；而WPU/SS-KH560-1.0%试样在28 d的铅笔硬度下仍保持2H且无开裂，结构完整性最优。

2.4 WPU/SS复合涂膜的耐盐雾性能分析

图3为复合涂膜的拉伸强度保持率。从图3可以看出，WPU/SS-KH560-0试样的拉伸强度保持率衰减最为迅速。WPU/SS-KH560-0.5%试样的拉伸强度保持率衰减较快，盐雾时间从0 h至700 h，拉伸强度保持率急剧降至约65%。其原因在于当KH560含量不足时，为盐雾介质的渗透提供了便捷通道，加速了涂膜的结构破坏与力学性能损失。WPU/SS-KH560-1.0%试样则展现出优异的耐盐雾稳定性，在700 h时拉伸强度保持率维持在85%左右，表明1.0% KH560可有效阻隔盐雾介质的侵入，从而最大程度保留涂膜的力学完整性。WPU/SS-KH560-1.5%试样的拉伸强度保持率在700 h时约为75%。原因是过量的KH560会削弱涂膜的致密性，使其耐盐雾性能略逊于WPU/SS-KH560-1.0%。

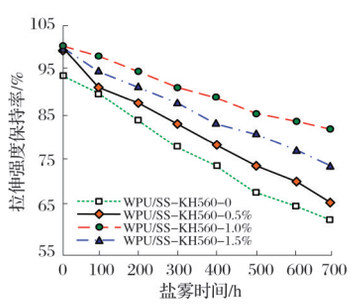


图3 复合涂膜的拉伸强度保持率

Fig.3 Retention rate of tensile strength of composite coatings

2.5 WPU/SS复合涂膜的耐碱性能分析

光泽度是评估涂膜表面完整性与致密性的关键指标，采用5% NaOH溶液作为强碱性介质，通过化学侵蚀与物理渗透作用使涂膜表面劣化，从而使光泽度下降。图4为复合涂膜的光泽度。从图4可以看出，未加入KH560的复合涂膜光泽度最低。在3种加入KH560进行性能改善的试样中，WPU/SS-KH560-0.5%试样的光泽度衰减最为剧烈，初始光泽度约为33，浸泡至700 h时已降至约23，在浸泡过程中，其表面结构被破坏，光泽度急剧下降。WPU/SS-KH560-1.0%试样展现出优异的耐碱光泽保留能力，700 h时光泽度仍维持在24左右，降幅相对平缓，可以在较大程度上保留涂膜表面的完整性。WPU/SS-KH560-1.5%试样的光泽度变化介于前两者之间，在700 h时光泽度约为23。虽未像WPU/SS-KH560-0.5%那样因界面结合不足导致光泽度快速衰减，但仍削弱了涂膜对强碱介质的完全阻隔能力，使其光泽保留性能略逊于WPU/SS-KH560-1.0%。

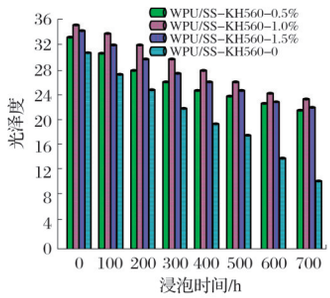


图4 复合涂膜的光泽度

Fig.4 Gloss of composite coatings

2.6 WPU/SS复合涂膜的热稳定性分析

热稳定性能够评估涂膜在高温或热老化环境下的耐老化性能，主要反映涂膜分子链结构与交联网络对热分解作用的抵抗能力。图5为复合涂膜的热稳定性。从图5可以看出，WPU/SS-KH560-0试样的热分解进程最为迅速，其次是WPU/SS-KH560-0.5%试样。这两种试样在100 ℃左右质量保留率均出现明显下降，在600 ℃时质量保留率均达到75%以下。这表明过低的KH560含量使WPU与SS的界面结合薄弱，涂膜内部形成大量微空隙，热分解过程中分子链易发生断裂、挥发，导致质量快速损失。WPU/SS-KH560-1.0%试样展现出优异的热稳定性，即便温度升至600 ℃，质量保留率仍保持在90%左右，表明加入1.0% KH560能够在较大程度上保留涂膜的质量与结构完整性。WPU/SS-KH560-1.5%试样在600 ℃时质量分数约为85%，明显低于WPU/SS-KH560-1.0%试样，表明其热稳定性较弱。因此，当KH560质量分数为1.0%时，涂膜能够通过构建最致密的交联网络，实现最佳的热稳定性。

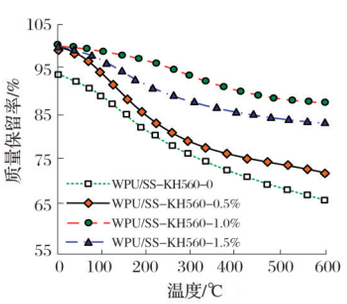


图5 复合涂膜的热稳定性

Fig.5 Thermal stability of composite coatings

3 结论

本研究以WPU和SS为基材，通过调控KH560的质量分数系统研究其对复合涂膜微观结构与防护性能的调控机制，探究渗透性与耐老化性能的协同优化规律。结果表明：KH560含量对涂膜的微观结构与宏观性能具有显著影响。当KH560质量分数为1.0%时，复合涂膜的渗透性和耐老化性能最优。添加1.0% KH560能够实现渗透性与耐老化性能的最佳协同。本研究突破传统复合涂料界面相容性不足的瓶颈，赋予涂膜优异的长期防护能力，为高性能混凝土防护涂料配方设计提供参考。后续可进一步优化WPU与SS的复配比例并结合纳米粒子掺杂、疏水改性等手段，开发适配极端环境的专用涂膜，拓宽其工程应用场景，推动该类复合涂料在基础设施防护领域中的应用。

参考文献

[1] 秦峰, 吴士云, 高原, 等. 纳米硅酸锂杂化聚合物在石化混凝土修复中的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2024, 41(3): 39-44.
[2] 徐国栋. 水运工程混凝土结构抗冻性能监测方法设计研究[J]. 智能城市, 2025, 11(5): 158-160.
[3] 李晓鹏. 混凝土施工技术在钢筋混凝土结构建筑的应用[J]. 工程设计与施工, 2024(5): 37-39.
[4] 肖垚, 贺小燕, 万涛, 等. 改性氧化铈/水性环氧复合涂层制备及防腐性能分析[J]. 表面技术, 2024, 53(14): 96-105.
[5] 杨国清, 蒋超璐, 张中杨, 等. 冷热冲击下纳米粒子改性硅橡胶/环氧树脂绝缘修复涂料耐电特性[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 2207-2216.
[6] 高晶晶. 高性能引气剂对混凝土抗盐侵蚀及抗冻性能的影响[J]. 盐科学与化工, 2025, 54(7): 28-32.
[7] 徐文玉, 孙佳文, 朱曜峰. 自组装碳/环氧树脂复合吸波涂料的制备及性能[J]. 材料研究学报, 2023, 37(12): 952-960.
[8] 张铖, 李维红, 范金朋, 等. 不同防护涂层提升混凝土耐久性能研究[J]. 混凝土, 2019(12): 165-168.
[9] 王旭, 勾志晔, 戴忠楠, 等. 基于线性疲劳累计损伤的聚氨酯混凝土疲劳性能[J]. 黑龙江交通科技, 2025, 48(7): 61-65.
[10] 仇文俊, 赵亚莉, 吴文. 二氧化硅改性聚合物防水涂料对混凝土性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(1): 107-113.
[11] 谷慧, 孟昭博, 荣华. 混凝土附加防腐蚀涂层性能试验研究[J]. 现代涂料与涂装, 2025, 28(2): 6-9.
[12] 曾令顺, 李承禹, 雒翠梅, 等. 壳聚糖/明胶/植酸复合阻燃涂料的制备及性能[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7): 112-122.
[13] 刘二利, 杨海成. 表面涂层对海工混凝土长期防护效果及结构寿命影响分析[J]. 水运工程, 2025(7): 29-35.
[14] 余伟, 王芳. 高速公路桥梁混凝土护栏复合涂层材料的耐久性研究[J]. 粘接, 2025, 52(6): 88-91.
[15] 刘建, 梁慧, 朱泽文, 等. 聚脲类水工混凝土防护涂层研究进展[J]. 四川水力发电, 2024, 43(1): 13-16.
[16] 李波, 何锦航, 余思伍, 等. TiO_2/GO/EP复合涂层的光电化学防腐蚀性能研究[J]. 涂料工业, 2023, 53(1): 22-29.
[17] 白广平. 硅酸盐改性聚氨酯加固材料的制备与性能研究[J]. 聚氨酯工业, 2025, 40(4): 29-31.
[18] 陈垦, 张淼澜, 喻亮, 等. 疏水性硅氧烷改性聚氨酯基涂层的制备和性能研究[J]. 胶体与聚合物, 2024, 42(3): 138-140.
[19] 张寒露, 曹京宜, 胡建海, 等. 短切玄武岩纤维增强环氧树脂复合涂层的制备及性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 149-162.
[20] 崔灿, 韩光明, 刘倩, 等. 高耐候聚氨酯/TiO_2-水泥复合防水涂料的制备及性能研究[J]. 涂料工业, 2025, 55(4): 54-59.
[21] 陈施润, 陈文革, 钱颖, 等. 稀土铈改性石墨烯/水性环氧树脂复合涂料涂装技术研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(1): 107-118.
[22] 丁伟, 杜伟, 郭铁滨, 等. *L*-谷氨酸改性氧化石墨烯复合环氧树脂涂层的制备及防腐性能[J]. 化工进展, 2025, 44(1): 424-435.
[23] 曹文凯, 张康捷, 李果, 等. 纳米材料在混凝土耐久性防护涂层中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 60-68.
[24] 谭洁, 胡伟, 刘洋. 滨海环境下混凝土抗硫酸铵侵蚀性能提升研究[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(2): 474-489.
[25] 张翼, 杨慧敏, 杨志. 环氧树脂-改性聚氨酯及聚脲复合涂层的制备及防护性能研究[J]. 材料保护, 2024, 57(9): 137-147.