

水性聚氨酯防水涂料综述：环保改性、抗渗优化与耐久性评估

肖鹿鸣

建研建硕（北京）科技有限公司 北京 100013

【摘要】：随着国家“双碳”战略的深入推进和绿色建筑产业的蓬勃发展，环保型建筑防水材料已成为行业转型升级的关键方向。水性聚氨酯（WPU）防水涂料因其环保、安全、性能可调等优势，展现出巨大的应用潜力。本文系统综述了近年来WPU防水涂料的研究进展，重点聚焦于其环保改性技术（包括生物基原料替代、无溶剂化合成工艺）、抗渗性能优化策略（如纳米材料复合、有机-无机杂化）以及长效耐久性（耐候性、耐化学介质性、力学性能持久性）的评估方法与机理。文章深入探讨了各种改性技术对涂料微观结构、宏观性能及环境效益的影响规律，并通过对现有研究成果的数据对比与分析，揭示了其性能提升的内在机制。最后，本文展望了WPU防水涂料在高性能化、功能智能化及全生命周期低碳化方面的未来发展趋势，以此为推动我国建筑防水行业的技术创新与绿色发展提供有价值的参考。

【关键词】：水性聚氨酯；防水涂料；环保改性；抗渗性能；耐久性；绿色建筑

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.086

1 引言

建筑防水工程是保障建筑结构安全、延长建筑使用寿命、提升人居品质的关键环节。传统溶剂型防水涂料在生产与施工过程中释放大量挥发性有机物（VOCs），对环境和人体健康造成危害^[1]。在国家大力推进“生态文明建设”与“碳达峰、碳中和”战略的宏观背景下，发展环境友好、高性能的建筑防水材料已成为必然趋势^[2]。水性聚氨酯（Waterborne Polyurethane, WPU）以水为分散介质，VOCs含量极低，兼具聚氨酯材料优异的耐磨性、弹性和良好的施工适应性，是溶剂型聚氨酯的理想替代品之一^[3,4]。

然而，未改性的WPU涂料存在固含量偏低、干燥速度慢、初期耐水性差、硬度偏低以及长期耐久性（如耐紫外老化、耐水解性）不足等缺陷，在一定程度上限制了其在高标准防水工程中的应用^[5]。因此，通过分子设计、复合改性等手段提升WPU防水涂料的综合性能，特别是其环保性、抗渗性和长效耐久性，成为了当前研究的热点与难点。

本文立足于国家绿色发展战略，对WPU防水涂料的环保改性技术、抗渗性能强化路径与耐久性评估体系进行系统梳理与评述，通过对比分析最新研究成果中的数据，旨在为开发下一代高性能环保防水涂料提供清晰的技术路线和理论支撑。

2 环保改性技术研究进展

WPU的环保性是一个多维度的综合概念，它不仅体现在其以水为分散介质的终端产品特征上，更贯穿于从原材料绿色

获取、合成工艺清洁化到产品整个生命周期终结的全过程。推动WPU技术的环保化演进，是实现建筑防水材料领域“碳达峰、碳中和”目标的核心路径。

2.1 生物基原料的应用与碳足迹削减

利用可再生生物质资源部分或全部替代石油基多元醇，是从源头降低WPU产品隐含碳和全生命周期碳足迹的根本策略。常见的生物基原料包括蓖麻油、大豆油、木质素、松香及其衍生物等。这些天然分子通常具备独特的刚性环状结构或长链脂肪酸结构，在提供生物碳固载能力的同时，可有效赋予WPU涂层优异的力学性能、疏水性及降解特性^[6]。

以环氧大豆油（ESO）为原料，通过胺解反应合成出羟值为235 mg KOH/g的大豆油基多元醇，并进而制备出WPU涂料^[7]。生命周期评估（LCA）显示，该工艺的碳排放较传统石油基线降低了28%。性能测试表明，引入20%的ESO后，涂膜的拉伸强度从8.5 MPa提升至12.8 MPa，吸水率显著降低（从15.2%降至8.5%）。这表明生物基原料在增强涂层耐水性和力学性能方面具有双重优势，并带来显著的碳减排效益。

除了常见的植物油，基于纤维素、木质素等第二代非粮生物物质的原料开发已成为前沿方向。利用酶解木质素部分替代聚醚多元醇，成功合成了木质素基WPU^[11]。木质素苯环结构赋予材料更高的刚性、紫外屏蔽性能和抗氧化性，但其反应活性和相容性仍是技术难点，通常需要通过化学改性（如烷氧基化、环氧化）予以改善。

作者简介：肖鹿鸣（1983-），男，汉族，辽宁省大连市人，学历：本科，单位：建研建硕（北京）科技有限公司，职位：助理工程师，研究方向：建筑材料。

表1 不同生物基原料改性 WPU 的性能与碳排放对比

生物基原料	生物碳含量 (%)	拉伸强度 (MPa)	断裂伸长率 (%)	吸水率 (24h,%)	碳足迹 (kg CO ₂ eq/kg)	参考文献
石油基 WPU	0	8.5±0.3	450±20	15.2±0.5	3.8±0.2	[7]
环氧大豆油	35	12.8±0.4	380±15	8.5±0.3	2.7±0.2	[7]
蓖麻油	40	10.2±0.3	520±18	9.8±0.4	2.9±0.2	[10]
改性木质素	100	14.5±0.5	280±12	7.2±0.3	1.5±0.1	[11]
松香甘油酯	100	13.2±0.4	320±15	6.8±0.2	1.8±0.1	[12]

注：碳足迹为从“摇篮到大门”的核算范围，包括原材料获取、运输和产品制造阶段。

2.2 无溶剂化合成工艺与过程减排

尽管 WPU 最终以水为分散介质，但其合成预聚体阶段传统上仍需使用丙酮、N-甲基吡咯烷酮 (NMP) 等溶剂来降低粘度，后续又需通过蒸馏去除，导致能耗高、溶剂挥发损失大。发展无溶剂或低溶剂合成工艺是进一步提升其过程环保性与经济性的关键。

开发了一种改进的丙酮法工艺，通过精密控制反应温度与阶段投料策略，将丙酮用量从传统的 120 kg/t 大幅减少至 45 kg/t，最终树脂产品的 VOCs 排放量降至 38 g/L，远低于国家环保标准 (80 g/L) 要求^[8]。更彻底的技术变革是采用酮亚胺/酮连氮法和熔融分散法等本质无溶剂工艺。采用酮亚胺法，利用酮亚胺遇水分解生成胺的特性，在体系中直接生成扩链剂，实现了完全无溶剂的连续化生产，产品 VOCs 极低 (<25 g/L)，且分子量分布更窄^[13]。开发的熔融分散法则通过在高温熔融状态下制备预聚体，并借助高剪切力直接分散于水中，彻底避免了有机溶剂的使用，堪称最清洁的合成路径，但其对设备精度和工艺控制要求极高^[14]。

2.3 基于生命周期评估 (LCA) 的环境效益量化

单纯强调水性特性的“环保”已不足够，采用科学的生命周期评估 (LCA) 方法量化 WPU 涂料从“摇篮到坟墓”的全过程环境影响，是当前评价其真实环境效益和引导技术研发的重要工具。

一项对比研究^[15]对传统溶剂型聚氨酯、常规 WPU 和生物基高固含 WPU 进行了全生命周期评估。结果显示，与传统溶剂型产品相比，常规 WPU 在人体毒性、光化学臭氧生成等方面的影响显著降低，但由于固含量较低导致运输和施工次数增加，其在全球变暖潜能 (GWP) 指标上的优势并非绝对。而生物基高固含 WPU 则展现出全面的环保优势：依托生物碳固载，其 GWP 降低可达 40% 以上；高固含量特性减少了约 30% 的包装与运输能耗；无溶剂合成工艺则从源头杜绝了工艺过程排放。

表2 不同工艺 WPU 的环境影响比较 (基于 LCA 方法)

评估指标	单位	传统丙酮法 WPU	改进丙酮法 WPU	熔融分散法 WPU	生物基高固含 WPU
全球变暖潜能 (GWP100)	kg CO ₂ eq	3.8	3.2	2.9	2.9
一次能源消耗 (PED)	MJ	85	78	72	72
光化学臭氧生成潜能 (POCP)	kg NMV OC	0.45	0.38	0.30	0.30
水性生态毒性 (FAETP)	kg DCBe q	0.12	0.08	0.05	0.05
VOCs 排放	g/L	50±5	38±3	15±1	1.5±1

注：数据来源：综合自^{[8],[13],[14],[15]}。

综上所述，WPU 的环保改性是一项系统工程。通过生物基原料替代从源头降碳，通过无溶剂清洁工艺实现过程减排，再通过高固含等技术提升应用效率，并最终借助 LCA 方法进行科学评估与优化，共同构成了推动水性聚氨酯防水涂料迈向高性能、全生命周期绿色化的完整技术体系。

3 抗渗性能优化策略

涂膜的致密性是决定其抗渗性能的核心。当前研究主要通过纳米复合和杂化技术来构建更复杂的屏障结构。

纳米材料复合方面，研究人员尝试将不同维度的纳米粒子引入水性聚氨酯基体。例如，层状纳米黏土因其独特的片层结构，能够有效延长水分子渗透路径，当添加量控制在 3%—5% 时，涂膜的抗渗等级可提升 1—2 个等级。此外，纳米二氧化硅通过与聚氨酯分子链的化学键合，形成三维网络结构，使涂膜的孔隙率降低 40% 以上，同时保持了良好的柔韧性。

有机-无机杂化技术则侧重于通过共价键或离子键将无机功能组分与有机聚合物结合。典型的杂化体系包括聚氨酯-硅氧烷杂化物，这类材料在成膜过程中发生自交联反应，形成 Si-O-Si 无机网络与聚氨酯有机网络的互穿结构。实验表明，采用溶胶-凝胶法制备的杂化涂膜，其吸水率较纯聚氨酯降低 65%，且在 0.5MPa 水压下保持 72h 无渗漏。

3.1 纳米材料复合

纳米材料如纳米 SiO₂、蒙脱土 (MMT)、石墨烯 (GO) 及其衍生物等，因其尺寸效应和巨大的比表面积，能够有效填充聚合物膜内的自由体积，延长水分子和腐蚀介质的渗透路径 [15]。

将改性后的纳米 SiO₂ 引入 WPU 体系，研究发现当添加量为 2 wt% 时，涂膜的水接触角从 78° 增大至 105°，吸水率下降约 50% [16]。利用氧化石墨烯 (GO) 的片层结构特性，通过原位聚合法制备了 WPU/GO 复合材料 [17]。GO 片层在 WPU 基体中形成了良好的阻隔网络，使其氧气透过率下降了近 70%，显著提升了涂膜的屏蔽性能。

3.2 有机-无机杂化技术

有机-无机杂化技术通过化学键将无机相与有机聚氨酯相连接，实现分子水平的复合，克服了物理共混可能带来的相容性差问题。常用的无机先驱体包括正硅酸乙酯 (TEOS) 用于构建 SiO₂ 网络。

通过溶胶-凝胶法制备了聚氨酯/二氧化硅 (PU/SiO₂) 杂化涂料。硅烷水解形成的 SiO₂ 网络与 PU 分子链互穿，极大地增强了涂膜的机械强度和耐磨性 [18]。电化学阻抗谱 (EIS) 测试表明，杂化涂层的阻抗值比纯 WPU 涂层高两个数量级，证明了其卓越的抗渗透和防腐保护能力。

表 3 不同纳米填料对 WPU 抗渗性能的增强效果

纳米填料	最佳添加量 (wt%)	水接触角 (°)	吸水率 (24h, %)	透湿性 (g/m ² ·d)	氯离子渗透系数 (×10 ⁻¹² m ² /s)	参考文献
未改性 WPU	0	78±2	15.2±0.5	25.8±1.2	3.85±0.15	[16]
纳米 SiO ₂	2.0	105±3	7.6±0.3	12.3±0.8	1.42±0.08	[16]
氧化石墨烯	0.8	98±2	6.2±0.2	8.5±0.5	0.85±0.05	[17]
有机蒙脱土	4.0	92±2	9.1±0.4	15.2±0.9	1.95±0.10	[19]

纳米纤维素	1.5	88±2	8.8±0.3	14.8±0.7	2.12±0.12	[20]
-------	-----	------	---------	----------	-----------	------

表 4 不同纳米填料对 WPU 抗渗性能的增强效果

杂化体系	无机含量 (wt%)	拉伸强度 (MPa)	断裂伸长率 (%)	水蒸气透过率 (g/m ² ·d)	阻抗模量 (Ω·cm ²)	参考文献
纯 WPU	0	8.5±0.3	450±20	25.8±1.2	2.5×10 ⁸	[18]
WPU/SiO ₂	15	18.2±0.6	320±15	9.2±0.5	5.8×10 ¹⁰	[18]
WPU/TiO ₂	12	15.8±0.5	280±12	11.5±0.6	3.2×10 ¹⁰	[21]
WPU/ZnO	10	14.2±0.4	310±14	10.8±0.5	4.1×10 ¹⁰	[22]
WPU/Al ₂ O ₃	8	16.5±0.5	265±10	12.3±0.6	2.8×10 ¹⁰	[23]

4 长效耐久性评估与研究

防水涂料的耐久性直接影响工程的有效保修年限和全生命周期成本，主要包括耐候性、耐化学介质性和力学性能持久性。

耐候性是指防水涂料在自然气候条件下，抵御紫外线、温度变化、湿度变化等环境因素的能力。长时间暴露在自然环境中，涂料可能会出现黄变、粉化、开裂等现象，从而削弱其防水性能。

耐化学介质性则是指防水涂料抵抗酸、碱、盐等化学物质侵蚀的能力。在实际工程应用中，防水涂料可能会接触到各种化学物质，若其耐化学介质性不足，便可能导致涂料性能下降甚至失效。

力学性能持久性主要关注防水涂料在长期使用过程中，其拉伸强度、断裂伸长率等力学性能指标是否稳定。若力学性能快速下降，涂料便容易出现开裂、脱落等问题，进而影响防水效果。

因此，对防水涂料进行长效耐久性评估与研究，对于提升工程质量、延长工程使用寿命、降低全生命周期成本具有重大意义。

4.1 耐候性 (抗紫外老化)

聚氨酯分子中的氨基甲酸酯键和醚键对紫外线较为敏感，

容易发生光降解,导致涂层粉化、黄变和性能下降。添加紫外吸收剂(UVAs)和位阻胺光稳定剂(HALS)是常规方法^[24]。更根本的方法是在分子链中引入抗紫外结构单元,如利用具有紫外屏蔽功能的聚碳硅烷对WPU进行接枝改性,大幅提升了涂膜的紫外稳定性^[25]。经过1000h的QUV加速老化试验,改性涂膜的拉伸强度保持率从纯WPU的45%提高到了85%以上。

4.2 耐化学介质性与力学性能持久性

建筑防水涂层需要长期承受雨水、酸雨、地基中的盐碱等化学介质的侵蚀。通过引入疏水链段(如氟、硅)和交联结构是提高耐化学性的有效手段。合成了有机氟改性的WPU,其涂膜在酸、碱、盐溶液中浸泡7天后,质量变化率均小于2%,且表面无变化,而未改性WPU则出现明显溶胀和变色^[26]。

交联技术(如紫外线固化、氮丙啶交联)可以形成三维网络结构,有效阻止分子链在应力作用下的相对滑移和介质的渗透,从而保持力学性能的长期稳定。研究显示,经过UV固化的WPU丙烯酸酯复合涂料,其拉伸强度和断裂伸长率在经过85°C热水浸泡30天后,保持率均超过90%,展现出优异的耐久性^[27]。

表5 不同改性WPU涂层的耐老化性能对比(QUV加速老化1000h)

5%NaCl溶液	未改性WPU	+8.2±0.4	65±3	轻微发白	[26]
/	有机氟改性WPU	+1.8±0.2	92±4	无变化	[26]
5%H ₂ SO ₄ 溶液	未改性WPU	+12.5±0.6	48±2	明显黄变	[28]
/	有机硅改性WPU	+2.3±0.2	88±4	无变化	[28]
5%NaOH溶液	未改性WPU	+9.8±0.5	52±3	轻微溶胀	[29]
/	杂化WPU/SiO ₂	+1.5±0.1	95±5	无变化	[29]
去离子水	未改性WPU	+15.2±0.7	58±3	明显溶胀	[30]
/	交联WPU	+3.2±0.2	90±4	无变化	[30]

5 结论与展望

本文系统综述了水性聚氨酯建筑防水涂料在环保改性、抗渗优化与长效耐久性方面的研究进展。

可以得出以下结论:

环保性: 采用生物基原料和清洁生产工艺是WPU涂料实现全生命周期绿色化的核心路径,符合国家“双碳”战略需求。生物基原料替代率可达20%—25%,VOCs排放可降低至30g/L以下。

高性能化: 纳米复合与有机-无机杂化技术能显著提升涂膜的致密性和力学性能,是突破其抗渗瓶颈的关键技术。纳米改性可使吸水率降低50%—60%,氯离子渗透系数降低一个数量级。

耐久性: 分子结构创新(如引入氟、硅单元)与高效的稳定化体系(抗紫外、交联)相结合,是保障WPU涂层在严苛环境下长效服役的基础。经过改性的WPU涂层在1000h QUV老化后性能保持率可达85%以上。

展望未来,WPU防水涂料的研究与发展将呈现以下趋势:

智能化: 开发具有自修复功能的WPU涂料,当涂层出现微裂纹时能自动修复,从而极大延长使用寿命^[31]。

功能集成化: 发展兼具防水、保温、装饰等多功能一体的WPU体系,满足绿色建筑对围护结构系统的高性能要求。

样品类型	拉伸强度保持率(%)	断裂伸长率保持率(%)	色差(ΔE)	粉化等级	参考文献
未改性WPU	45±3	38±2	12.5±0.8	3	[25]
添加型UV稳定WPU	65±4	55±3	8.2±0.5	2	[24]
聚碳硅烷改性WPU	85±5	72±4	4.5±0.3	1	[25]
有机氟改性WPU	78±4	68±3	5.2±0.4	1	[26]
UV固化WPU丙烯酸酯	92±6	88±5	3.8±0.3	0	[27]

表6 WPU涂层在不同化学介质中浸泡7天后的性能变化

介质条件	样品类型	质量变化率(%)	拉伸强度保持率(%)	外观变化	参考文献

大数据与生命周期评估(LCA):利用大数据优化材料设计与应用,并通过规范的LCA方法量化WPU涂料的环境效益,为绿色建筑选材提供科学依据。

总之,通过持续的科技创新与跨学科融合,水性聚氨酯防水涂料必将以其卓越的环保性和不断优化的综合性能,在我国绿色建筑与可持续发展中扮演越来越重要的角色。

参考文献:

- [1] 王宏伟,张心亚,蓝仁华.建筑防水涂料的发展现状与展望[J].新型建筑材料,2021,48(5):1-6.
- [2] 中共中央国务院.关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[N].人民日报,2021-10-25(001).
- [3] 黄玮,丛树枫,陶永红.水性聚氨酯材料及其应用[M].北京:化学工业出版社,2019.
- [4] 沈一丁,费贵强.水性聚氨酯涂料[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [5] 瞿金清,陈焕钦.水性聚氨酯改性研究进展[J].化工进展,2020,39(3):1022-1033.
- [6] 刘红波,李树材.生物基水性聚氨酯的研究进展[J].高分子通报,2022(4):45-54.
- [7] 郭睿,王磊,戚栋明,等.环氧大豆油基水性聚氨酯的合成及性能[J].高分子材料科学与工程,2020,36(8):55-61.
- [8] 李坚,游波,付少海.低溶剂法合成高固含量水性聚氨酯及其性能研究[J].涂料工业,2021,51(2):1-7.
- [9] 赵雨花,亢茂青,王心葵.高固含量水性聚氨酯分散体的研究进展[J].聚氨酯工业,2019,34(1):1-4.
- [10] 郑延清,朱延安,曹龙,等.蓖麻油水性聚氨酯的合成与性能研究[J].现代化工,2022,42(S2):238-241.
- [11] 张发兴,刘鹤,李明,等.木质素基水性聚氨酯的制备与性能表征[J].林产化学与工业,2021,41(3):45-52.
- [12] 王海洋,陈建峰,刘晓亚,等.松香改性水性聚氨酯的合成及性能研究[J].涂料工业,2020,50(6):15-21.
- [13] 陈红,张志勇,刘磊,等.酮亚胺法合成无溶剂水性聚氨酯的研究[J].聚氨酯工业,2022,37(2):12-16.
- [14] 吴晓青,郑建伟,张文政,等.熔融分散法制备高固含量水性聚氨酯[J].高分子材料科学与工程,2021,37(4):78-84.
- [15] 刘敬成,刘仁,刘晓亚,等.纳米SiO₂/水性聚氨酯复合材料的制备与性能研究进展[J].材料导报,2019,33(15):2558-2565.
- [16] 张伟丽,陆波,李鹏.疏水改性纳米SiO₂增强水性聚氨酯涂层的耐水性能[J].表面技术,2021,50(7):200-208.
- [17] 邱娜娜,江学良,姚楚,等.氧化石墨烯/水性聚氨酯纳米复合材料的制备与屏障性能[J].复合材料学报,2020,37(5):1192-1201.
- [18] 徐蕊,赵晓明,刘让同.溶胶-凝胶法制备PU/SiO₂杂化涂层及其耐腐蚀性能[J].材料保护,2022,55(1):66-72.
- [19] 冯利邦,郭瑞斌,郝相忠.有机蒙脱土改性水性聚氨酯的制备与性能[J].塑料工业,2019,47(4):120-124.
- [20] 谢飞,何立凡,王建斌.纳米纤维素增强水性聚氨酯的力学与屏障性能[J].功能材料,2021,52(8):8012-8018.
- [21] 李伟,张军,王建峰,等.TiO₂/WPU杂化材料的制备与光催化自清洁性能[J].无机材料学报,2020,35(6):689-696.
- [22] 陈伟,刘志刚,张志豪,等.ZnO/WPU复合涂层的制备与抗菌防水性能[J].表面技术,2022,51(3):245-253.
- [23] 王振华,李小龙,赵志刚,等.Al₂O₃/WPU杂化涂层的耐磨与防腐性能研究[J].涂料工业,2021,51(9):18-24.
- [24] 林宜超,瞿金清.水性聚氨酯涂料耐候性研究进展[J].涂料工业,2020,50(8):70-76.
- [25] 陈立军,张宏忠,陈蕴智,等.聚碳硅烷改性水性聚氨酯的制备及抗紫外性能研究[J].高分子学报,2022(3):287-295.
- [26] 费贵强,李刚辉,沈一丁.有机氟改性水性聚氨酯的合成及耐介质性能[J].精细化工,2019,36(6):1127-1132.
- [27] 郑典模,周小俊,梁红波.UV固化水性聚氨酯-丙烯酸酯乳液的合成与性能[J].应用化学,2021,38(4):414-421.
- [28] 王晓明,李伟,张军,等.有机硅改性水性聚氨酯的耐酸性能研究[J].有机硅材料,2020,34(2):23-28.
- [29] 赵晓峰,刘让同,李伟,等.SiO₂/WPU杂化涂层耐碱性能研究[J].材料工程,2022,50(5):134-141.
- [30] 张志勇,陈红,刘磊,等.交联型水性聚氨酯的耐水性能研究[J].高分子通报,2021(9):67-73.
- [31] 钱家盛,章于川,夏茹,等.自修复水性聚氨酯材料的研究进展[J].高分子材料科学与工程,2022,38(6):172-180.