

建筑工程中的聚氨酯防水涂料研究进展

王强

建工集团股份有限公司 上海 200080

摘要: 随着建筑行业对防水标准的不断提高, 以及绿色环保、长效耐久等需求的日益凸显, 传统聚氨酯防水涂料在耐候性、耐高温性、环保性等方面的局限逐渐显现, 推动其改性技术与工艺优化成为行业研究热点。该类涂料以异氰酸酯与多元醇为核心原料, 通过化学反应形成具有三维网状结构的弹性体防水膜, 借助分子链的交联作用、膜层的物理阻隔与渗透封闭效应实现防水功能。本文系统梳理聚氨酯防水涂料的核心成分、类型划分与成膜机理, 深入探讨环氧树脂、硅化物、纳米材料、聚合物、沥青等改性路径的技术原理与性能提升效果, 分析工艺优化对产品质量与施工效率的影响, 剖析当前技术发展面临的瓶颈, 并展望未来多功能、环保型、智能型聚氨酯防水涂料的发展方向, 为相关研究与工程应用提供参考。

关键词: 建筑工程; 聚氨酯防水涂料; 防水性能; 研究进展

Research Progress on Polyurethane Waterproof Coatings in Construction Engineering

Qiang Wang

Construction Engineering Group Co., Ltd., Shanghai, 200080

Abstract: With the continuous improvement of waterproofing standards in the construction industry and the increasing emphasis on green sustainability and long-term durability, the limitations of traditional polyurethane waterproof coatings in terms of weather resistance, high-temperature resistance, and environmental friendliness have gradually emerged, driving research and optimization of their modification technologies and processes to become a focal point in the industry. These coatings primarily utilize isocyanate and polyols as core raw materials, forming an elastic waterproof membrane with a three-dimensional network structure through chemical reactions. The waterproofing function is achieved through the cross-linking of molecular chains, the physical barrier effect of the film layer, and the permeation-blocking effect. This paper systematically reviews the core components, classification, and film-forming mechanisms of polyurethane waterproof coatings. It delves into the technical principles and performance enhancement effects of modification approaches such as epoxy resins, silicon-based materials, nanomaterials, polymers, and asphalt. The impact of process optimization on product quality and construction efficiency is analyzed, along with the current bottlenecks in technological development. The future direction of multifunctional, environmentally friendly, and intelligent polyurethane waterproof coatings is also explored, providing references for related research and engineering applications.

Keywords: Construction Engineering; Polyurethane Waterproof Coatings; Waterproof Performance; Research Progress

引言

建筑防水是抵御外界水侵害、保障建筑结构稳定与使用功能的关键环节, 被誉为建筑的“隐形铠甲”。在潮湿环境、极端气候、地质沉降等多重因素影响下, 建筑渗漏问题成为行业普遍面临的难题, 不仅会导致墙体霉变、装饰层脱落, 更可能侵蚀钢筋结构, 引发安全隐患, 缩短建筑使用寿命。聚氨酯防水涂料自问世以来, 凭借其弹性好、粘结牢固、施工便捷等优势, 迅速在防水工程领域占据重要地位, 成为解决建筑渗漏问题的核心材料之一。通过改性技术优化材料性能、革新生产与施工工艺, 成为提升聚氨酯防水涂料综合效能的关键路径。

1 聚氨酯防水涂料的基础认知

1.1 核心成分与类型划分

聚氨酯防水涂料是一类以聚氨酯树脂为基料, 辅以固化剂、增塑剂、填料、稀释剂、助剂等成分经混合调配而成的功能性涂料, 其核心成分的特性直接决定涂料的整体性能。异氰酸酯作为关键原料, 分为芳香族异氰酸酯与脂肪族异氰酸酯两类, 前者反应活性高、成本较低, 是目前市场主流原料, 后者则具有更优异的耐候性与抗黄变性, 多用于对外观与耐久性要求较高的工程; 多元醇作为另一核心原料, 包括聚醚多元醇、聚酯多元醇等, 聚醚多元醇赋予涂料良好的柔韧性与耐水性, 聚酯多元醇则能提升涂料的强度与粘结力, 二者的种类选择与配比调整是调控涂料性

能的核心手段。助剂作为辅助成分,虽添加量少但作用关键,催化剂可加速异氰酸酯与多元醇的反应速率,抗老化剂能延缓涂料在使用过程中的性能衰减,消泡剂可减少施工过程中气泡的产生,确保膜层致密性^[1]。

根据产品形态与施工特性,聚氨酯防水涂料主要分为单组分与双组分两类。单组分聚氨酯防水涂料无需现场调配,开桶即可施工,施工便捷、环保性较好,其成膜依赖空气中的水分与异氰酸酯发生反应,形成弹性防水膜,适用于小型工程与复杂节点的防水处理;双组分聚氨酯防水涂料由 A 组分(异氰酸酯预聚体)与 B 组分(多元醇、固化剂、填料等)组成,需在施工现场按一定比例混合均匀后使用,通过两组分的化学反应快速成膜,具有成膜厚度可控、强度高、耐候性好等优势,广泛应用于大型建筑、重要防水工程中。

1.2 成膜机制与防水机理

聚氨酯防水涂料的防水功能实现,源于其独特的成膜机制与膜层的物理化学特性,整个过程涉及复杂的化学反应与物理作用。单组分聚氨酯防水涂料的成膜过程以“潮气固化”为核心,涂料涂刷后,空气中的水分渗透至涂层内部,与异氰酸酯基团发生反应生成脲键,进而交联形成三维网状结构的弹性体膜层;同时,反应过程中产生的二氧化碳气体在助剂作用下被抑制或消除,确保膜层致密无孔隙。双组分聚氨酯防水涂料则通过 A、B 两组分混合后的“化学固化”成膜,异氰酸酯基团与多元醇中的羟基、固化剂中的氨基等发生加成聚合反应,快速形成交联度高、结构稳定的防水膜,成膜速度与膜层性能受混合比例、环境温度与湿度影响显著。

防水膜的防水机理主要体现在三个方面:其一,物理阻隔作用,致密的三维网状结构使防水膜具有极低的水渗透率,能够有效阻挡水分的渗透与扩散,形成连续的防水屏障;其二,粘结密封作用,防水膜与混凝土、金属、石材等基层材料具有极强的粘结力,能够紧密贴合基层表面,填补基层的微小裂缝与毛细孔隙,切断水分渗透通道;其三,弹性自愈作用,聚氨酯防水膜具有优良的柔韧性与弹性回复率,当基层因温度变化、轻微沉降产生微小变形时,膜层可随之伸缩,避免出现裂缝,部分轻微损伤还能通过自身弹性实现一定程度的自愈,确保防水功能的持续性^[2]。

2 建筑用聚氨酯防水涂料的改性技术与工艺优化

2.1 环氧树脂

环氧树脂改性是提升聚氨酯防水涂料力学性能与耐久性的经典路径,核心在于利用环氧树脂优异的强度、粘结力与耐化学腐蚀性,与聚氨酯形成性能互补的复合体系。环氧树脂分子结构中的环氧基团与聚氨酯预聚体的羟基、氨基发生开环反应,形成互穿网络结构,既保留聚氨酯的柔韧性与弹性,又融入环氧树脂的刚性与稳定性,显著提升涂料的拉伸强度、硬度与粘结强度。同时,

互穿网络结构增加防水膜交联密度,提高耐水性与抗化学侵蚀能力。研究人员通过优化环氧树脂类型与添加比例提升改性效果:选用低分子量环氧树脂提高相容性;添加量控制在 10%–30% 范围内,在不损失柔韧性前提下最大化提升强度与耐久性。复合改性成为新热点,环氧树脂与纳米粒子、硅烷偶联剂协同使用,通过多元协同效应提升力学性能与耐紫外线老化性能,使改性涂料适用于户外防水工程。

2.2 硅化物

硅化物改性核心目标是提升聚氨酯防水涂料疏水性与耐候性,解决传统产品耐紫外线老化差、易黄变龟裂问题。有机硅化合物分子中的硅氧烷键($-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$)具有极高键能与化学稳定性,引入聚氨酯体系后在膜表面形成疏水层,大幅降低表面能,使水分难以附着与渗透,提升防水性与耐污性。同时,硅氧烷键高稳定性抵御紫外线、氧气侵蚀,延缓膜层老化,延长使用寿命。硅化物改性通过两种方式实现:一是有机硅单体与异氰酸酯、多元醇共聚,使硅氧烷键直接接入聚氨酯分子链;二是有机硅树脂作为改性剂与涂料共混,均匀分散发挥疏水与抗老化作用。含氟硅化合物改性研究备受关注,氟元素引入进一步降低表面能,赋予超疏水性能,同时氟硅协同提升耐候性、耐化学腐蚀性与抗污性,适用于高湿度、强紫外线环境的防水工程。

2.3 纳米材料

纳米材料改性凭借微观尺寸效应与界面作用,成为提升聚氨酯防水涂料综合性能的创新路径。常用纳米材料包括纳米 SiO_2 、 TiO_2 、石墨烯、碳酸钙等,具有比表面积大、表面活性高特点,与聚氨酯基体结合后发挥填充、增强、催化等多重作用。纳米粒子均匀分散填充基体孔隙,形成致密复合膜层,提升抗渗性与力学强度;同时与分子链形成强烈界面相互作用,限制分子链运动,改善耐高温与抗老化性能。不同纳米材料具有不同改性效果:纳米 SiO_2 提升硬度、耐磨性与耐水性;纳米 TiO_2 实现自清洁与紫外线防护;纳米石墨烯形成物理阻隔网络,提升抗渗性与导电性。研究重点在于解决纳米粒子团聚问题,通过表面改性与分散剂添加,确保均匀分散,充分发挥微观调控作用,实现性能倍增效应^[3]。

2.4 聚合物

聚合物改性通过不同性能聚合物与聚氨酯共混或共聚,实现结构优化与特性融合,针对性改善传统聚氨酯防水涂料性能短板。常用改性聚合物包括丙烯酸酯、聚醚砜、聚氯乙烯、橡胶等,各赋予独特性能优势:丙烯酸酯提升耐候性与保色性;聚醚砜增强耐高温与耐化学腐蚀性;橡胶类聚合物提升低温柔韧性 with 弹性回复率,解决低温脆裂问题。改性关键在于控制共混比例与相容性,通过相容剂添加与反应条件优化,减少相分离现象,确保形成均匀稳定的复合体系。复合聚合物改性成为研究热点,如丙烯酸酯与橡胶类聚合物协同改性,同时提升耐候性与柔韧性,实现多重

性能协同提升。

2.5 沥青

沥青改性是兼顾性能与经济性的有效路径,通过沥青与聚氨酯复合,利用沥青成本低廉优势降低价格,同时借助聚氨酯弹性与粘结力弥补沥青脆性大、低温易开裂缺陷,实现功能互补与性价比提升。复合方式包括物理共混(熔融沥青与聚氨酯预聚体混合)与化学改性(添加偶联剂促进化学键合),后者增强界面结合力。改性后的聚氨酯-沥青防水涂料具有优异耐候性、抗老化性与防水性,成本显著低于纯聚氨酯产品,适用于大面积与成本敏感项目。研究通过优化沥青种类与添加比例,以及引入其他改性剂,进一步提升综合性能,改善成膜性与抗渗性能,成为建筑防水工程中性价比极高的选择^[4]。

2.6 工艺革新

生产与施工工艺优化是提升聚氨酯防水涂料性能、推动工程应用的重要支撑,围绕“高效、环保、精准”目标,各类工艺革新不断涌现。生产工艺方面,水性化工艺通过乳化技术制备水性聚氨酯涂料,大幅降低 VOC 排放;无溶剂化工艺减少有机溶剂使用,通过原料配比与反应条件优化,确保无溶剂下仍具良好施工性。施工工艺方面,机械化施工(如高压无气喷涂)实现均匀成膜,提升效率与质量稳定性;智能化施工技术通过设备控制实现数字化管控;专用节点处理工艺提升复杂部位防水可靠性,减少渗漏隐患。

3 现阶段的技术瓶颈与未来发展方向

3.1 当前技术瓶颈与现实挑战

尽管聚氨酯防水涂料的改性技术与工艺优化取得了显著进展,但在实际应用中仍面临诸多技术瓶颈与现实挑战。在性能方面,单一改性技术难以实现多重性能的协同提升,例如部分改性技术在提升材料强度的同时,会牺牲其柔韧性;耐极端环境性能不足的问题依然存在,长期暴露在强紫外线、高温、酸碱腐蚀等环境下,涂料仍会出现老化、龟裂、性能衰减等现象。在环保方面,虽然水性与无溶剂型涂料得到快速发展,但部分产品仍存在 VOC 排放超标、固含量不足等问题,难以满足日益严格的环保标准;生物降解性差的问题也尚未得到有效解决,废弃涂料易对环境造成污染。

在应用方面,涂料的施工性能与环境适应性有待提升,部分改性涂料存在粘度偏大、流平性差、固化速度受环境温湿度影响显著等问题,增加了施工难度;复杂节点的防水处理仍存在技术短板,节点部位因应力集中、基层不平整等因素,易出现膜层开裂、粘结不牢等问题,成为渗漏高发区。在成本方面,高性能改性原料(如纳米材料、脂肪族异氰酸酯)的价格较高,导致改性聚氨酯防水涂料的成本居高不下,限制了其在低端市场的广泛应用;规模化生产过程中,部分改性技术的稳定性不足,难以保

证产品质量的一致性。

3.2 未来创新路径与发展趋势

未来聚氨酯防水涂料的研究将围绕“多功能化、环保化、智能化、长效化”的方向展开,通过技术创新突破当前瓶颈,满足更高标准的防水需求。多功能复合改性将成为核心研究方向,通过将多种改性技术协同应用,例如纳米材料+硅化物+环氧树脂的三元复合改性,利用不同改性剂的协同效应,实现强度、柔韧性、耐候性、耐腐蚀性等多重性能的同步提升;同时,赋予涂料自清洁、抗菌、防霉、阻燃等附加功能,拓展其应用场景^[5]。

环保化发展将进一步深化,生物基聚氨酯防水涂料的研发将成为热点,利用可再生资源制备多元醇等原料,替代传统石油基原料,降低对化石资源的依赖,提升材料的生物降解性;无溶剂、零 VOC 涂料的技术将不断完善,通过优化配方与生产工艺,在保证环保性的同时,进一步提升产品性能。智能化发展将为防水工程带来新的变革,研发智能响应型聚氨酯防水涂料,如温敏、pH 敏、湿度敏涂料,能够在外界环境变化或基层出现裂缝时,自动调整性能或实现自愈,提升防水系统的可靠性;结合物联网技术,开发具有状态感知功能的防水涂料,实时监测膜层的完整性与性能变化,为防水工程的维护提供数据支持。

长效化与低成本化将同步推进,通过优化改性技术与配方设计,提升涂料的抗老化性能与使用寿命,降低后期维护成本;开发低成本高性能改性原料,优化生产工艺,实现规模化、连续化生产,降低产品成本,提高市场竞争力。此外,针对复杂节点防水、极端环境应用等特殊需求,将开展专项技术研究,开发专用涂料与施工工艺,提升防水工程的整体质量与可靠性。

结语

聚氨酯防水涂料作为建筑防水工程的核心材料,其技术发展性能升级始终紧跟建筑行业的高质量发展步伐。本文通过对聚氨酯防水涂料的基础认知、改性技术、工艺优化及发展趋势的系统研究,明确了各类改性技术的作用机理与性能提升效果,剖析了当前面临的技术瓶颈与现实挑战。未来,通过持续的技术创新与实践探索,聚氨酯防水涂料将为建筑防水工程提供更可靠、更环保、更高效的解决方案,为建筑行业的可持续发展筑牢防水屏障。

参考文献

- [1] 杨珺靓. 工程竣工结算审核依据与审核方法 [J]. 四川水泥, 2020,(05):280.
- [2] 严菊生, 高焕翔. 建设工程竣工结算审核重点与方法研究 [J]. 工程建设与设计, 2019,(15):271-273.
- [3] 岳雷. 建筑工程竣工结算审核的重点及方法研究 [J]. 住宅与房地产, 2018,(33):24.
- [4] 魏潇. 建筑工程的竣工结算审核工作的研究 [J]. 建材与装饰, 2018,(05):160-161.