

# 水性聚氨酯树脂在工业水性涂料中的运用研究

林志丰 陈自刚 阙财政  
浙江闽锋化学有限公司 浙江 丽水 323000

**摘要:** 本文聚焦水性聚氨酯树脂在工业水性涂料中的应用研究,系统梳理其水介质环保特性、成膜机理及核心性能调控方法,深入分析其在金属防腐、木器涂装、工业地坪及汽车内饰等关键场景的应用实践与性能表现。重点探讨改性技术对其耐候、耐磨等短板的突破,结合VOCs减排政策导向,展望生物基与智能化配方发展方向,为工业涂料水性化转型提供切实可行的技术参考。

**关键词:** 水性聚氨酯树脂;工业水性涂料;运用

**引言:** 随着环保法规日趋严格,工业涂料正加速向低碳环保转型,溶剂型涂料因高VOC排放逐渐被限制,传统水性涂料却存在性能不足等瓶颈。水性聚氨酯树脂(WPU)凭借软硬段微相分离结构,实现环保性与使用性能的平衡,成为替代溶剂型涂料的核心选择。当前其应用拓展迅速,但耐水性、储存稳定性及成本适配性等问题仍需解决,本文围绕其技术创新与应用展开论述,助力行业高质量发展。

## 1 水性聚氨酯树脂的基本特性与合成工艺

### 1.1 水性聚氨酯树脂的核心特性

(1) 环保特性:以水为分散介质,无需大量有机溶剂,VOC含量远低于传统溶剂型聚氨酯,不含甲醛、APEO等有毒有害物质,无刺鼻异味,符合欧盟、中国等全球主流环保法规,适配绿色化工发展趋势,广泛应用于环保要求较高的领域。(2) 力学与化学特性:兼具刚性与柔韧性,力学性能优异,具备良好的耐磨性、耐酸碱等耐化学品性,对金属、木材、塑料等多种基材附着力强,不易出现脱落、开裂现象,适配不同场景的使用需求。(3) 施工特性:与其他树脂、助剂相容性好,可采用喷涂、刷涂、辊涂等多种工业涂装工艺,施工便捷高效,干燥速度较快,能有效提升施工效率,降低施工成本<sup>[1]</sup>。

### 1.2 水性聚氨酯树脂的分类

(1) 按亲水基团电荷性质:分为阴离子型、阳离子型、非离子型,其中阴离子型因合成简便、稳定性好,应用最为广泛,阳离子型多用于特殊防腐领域,非离子型相容性更佳。(2) 按合成单体:可分为聚醚型、聚酯型、聚碳酸酯型及混合型,聚醚型耐水性好,聚酯型附着力强,

聚碳酸酯型耐候性优异,混合型可兼顾多种性能。(3) 按外观形态:主要有水溶液、水分散体、乳液三种,其中水分散体和乳液稳定性好,是工业生产中最常用的形态。

### 1.3 水性聚氨酯树脂的主要合成工艺

(1) 丙酮法:合成过程中加入丙酮调节粘度,产物分子量和粒径分布窄,产品性能均匀优良,但需额外增加脱溶剂工序,能耗较高,成本略高。(2) 预聚体分散法:先合成预聚体,再分散于水中,无需脱溶剂,生产流程简便,成本较低,但分子量和粒径分布较宽,性能略逊于丙酮法。(3) 熔融分散法:无需有机溶剂,工艺简单、环保,生产成本低,但产品性能存在一定局限,仅适用于对性能要求不高的场景。

## 2 水性聚氨酯树脂在工业水性涂料中的配方设计与制备

### 2.1 工业水性涂料的核心性能要求

(1) 基础性能:核心需满足附着力、硬度、耐磨损性三大关键指标,确保涂料成膜后能紧密附着于工业产品各类基材,不易出现脱落、起皮现象,具备足够硬度以抵御日常摩擦和机械碰撞,同时拥有良好的耐磨损性,可长期承受工业生产中的频繁接触,切实满足工业产品的长期使用需求。(2) 环境适应性:需具备优异的环境耐受能力,耐高低温性能可适配不同地域气候差异和工业生产环境温度变化;耐湿热、耐盐雾性能能有效抵御潮湿、盐雾侵蚀,避免基材锈蚀、涂层损坏;耐化学品腐蚀性能可耐受工业生产中常见的酸碱、溶剂等介质,延长产品使用寿命<sup>[2]</sup>。(3) 施工与环保要求:施工便捷性需适配工业化生产,可灵活采用喷涂、辊涂、刷涂等多种工艺,且干燥速度适中、成膜均匀,降低施工难度;环保方面需严格控制VOC排放,不含有毒有害物质,完全符合国家及行业环保标准,契合绿色工业发展趋势。

### 2.2 水性聚氨酯树脂基工业涂料的配方设计原则

**通讯作者:** 阙财政,1983年12月生,毕业于丽水学院,现就职于浙江闽锋化学有限公司。主要从事化工过程安全管理、聚氨酯合成技术研究

(1) 树脂选型原则: 根据工业场景具体性能需求匹配树脂类型, 如防腐场景优先选用耐腐蚀性强的聚醚型水性聚氨酯树脂, 木器涂装场景选用附着力佳的聚酯型树脂, 确保树脂性能与使用需求高度契合。(2) 助剂搭配原则: 优化分散剂、流平剂、固化剂等助剂的协同作用, 分散剂提升颜料分散均匀性, 流平剂改善涂料成膜平整度, 固化剂增强涂层硬度和耐水性, 合理搭配弥补单一助剂不足, 全面提升涂料综合性能。(3) 成本与性能平衡原则: 在保证涂料核心性能达标的前提下, 合理选择树脂、助剂及颜料种类, 优化配比, 避免过度添加高价成分, 有效控制配方整体成本, 兼顾实用性与经济性, 助力规模化应用。

### 2.3 不同类型工业水性涂料的制备工艺

(1) 水性聚氨酯工业防腐涂料的制备: 先将水性聚氨酯树脂、防腐颜料、分散剂加入分散设备, 高速搅拌分散至均匀细腻, 再依次加入流平剂、消泡剂、固化剂等助剂, 低速搅拌混合均匀, 经过过滤去除杂质、调适粘度至适宜范围后, 得到合格的防腐涂料。(2) 水性聚氨酯木器工业涂料的制备: 重点优化成膜助剂选择, 选用相容性好、挥发速度适中的成膜助剂, 搭配水性聚氨酯树脂, 加入适量固化剂和增稠剂, 严格控制固化温度和时间, 提升涂层透明度、附着力和耐磨损性, 适配木器装饰与保护需求。(3) 水性聚氨酯塑料工业涂料的制备: 针对塑料基材附着力较差的问题, 添加专用附着力促进剂, 搭配适配的水性聚氨酯树脂, 优化搅拌分散速度和时间, 调整涂料粘度, 适配塑料基材的喷涂施工工艺, 确保涂层均匀、附着力达标<sup>[3]</sup>。

### 2.4 配方优化实验设计与参数确定

(1) 单因素实验: 固定其他配方成分及用量, 仅改变单一成分(如树脂含量、助剂用量、搅拌速度), 通过测试涂料的附着力、硬度、耐水性等性能, 明确单一成分对涂料性能的影响规律, 确定各成分的适宜用量范围, 为后续配方优化提供基础数据。(2) 正交实验: 选取影响涂料性能的关键因素及水平, 设计正交实验方案, 通过多组平行实验, 分析多因素协同作用对涂料性能的影响, 筛选出最优配方组合, 确定各参数的最佳取值, 实现涂料性能与成本的最优平衡。

## 3 水性聚氨酯树脂在工业水性涂料中的具体应用及性能评价

### 3.1 在工业防腐涂料中的应用

(1) 应用场景: 主要用于钢结构、机械设备、管道等工业构件的防腐涂装, 涵盖化工、建筑、电力、冶金等多个行业。钢结构建筑的梁柱、机械设备的外壳、输

送介质的管道等, 长期暴露在户外或腐蚀环境中, 易发生锈蚀, 水性聚氨酯防腐涂料可形成致密防护膜, 有效隔绝水、氧气及腐蚀性介质, 延长构件使用寿命。(2) 性能评价: 通过专业测试验证防腐性能, 耐盐雾测试中, 涂层在中性盐雾环境下可连续耐受1000小时以上无锈蚀、无脱落, 满足工业重防腐要求; 耐酸碱测试中, 将涂层浸泡于5%盐酸、5%氢氧化钠溶液中72小时, 无鼓泡、变色现象, 耐腐蚀性优良; 耐老化测试经紫外老化1000小时后, 涂层无粉化、开裂, 光泽保持率达85%以上, 老化性能优异, 可适配长期户外使用<sup>[4]</sup>。

### 3.2 在木器工业涂料中的应用

(1) 应用场景: 广泛应用于实木家具、人造板(刨花板、密度板)等木器产品的装饰与保护涂装, 包括家用家具、办公家具、木地板等。水性聚氨酯木器涂料可凸显木器天然纹理, 同时形成防护层, 抵御日常使用中的摩擦、污渍侵蚀, 兼顾装饰性与实用性, 契合家具行业绿色环保需求。(2) 性能评价: 硬度测试达铅笔硬度2H以上, 可有效抵御日常刮擦; 耐乙醇擦拭测试中, 用75%乙醇反复擦拭50次, 涂层无发白、脱落, 耐污性好; 耐热性测试中, 在80℃环境下放置24小时, 涂层无变形、变色; 装饰性方面, 涂层透明度高、光泽均匀, 可很好地呈现木器原生纹理, 外观质感优良, 满足木器产品的装饰需求。

### 3.3 在塑料与金属工业涂料中的应用

(1) 应用场景: 重点用于PP/ABS等塑料材质的电子产品外壳、汽车零部件(如内饰件、外饰件)的涂装, 同时也适用于铝合金、锌合金等金属零部件的防护涂装。此类产品对涂料的附着力、装饰性和耐候性要求较高, 水性聚氨酯涂料可适配塑料、金属不同基材的特性, 实现良好涂装效果。(2) 性能评价: 附着力测试采用划格法, 塑料基材附着力达0级, 金属基材附着力达1级以下, 无脱落现象; 耐汗渍测试中, 模拟人体汗液浸泡48小时, 涂层无变色、鼓泡, 适配电子产品、汽车零部件的使用场景; 耐磨损测试经1000次摩擦后, 涂层无露底、划痕; 耐高低温测试中, 在-40℃~80℃循环10次, 涂层无开裂、脱落, 可适应极端环境使用<sup>[5]</sup>。

### 3.4 在其他工业领域涂料中的应用

(1) 应用场景: 拓展应用于皮革、纺织品、包装材料等工业涂装领域。皮革制品(如沙发、箱包)涂装后可提升质感和耐磨性; 纺织品(如工业面料、装饰面料)涂装后可增强防水、防污性能; 包装材料(如食品包装、工业包装)涂装后可提升阻隔性和耐候性, 满足工业生产与使用需求。(2) 性能评价: 柔韧性测试中, 涂层可

弯曲180°无开裂,适配皮革、纺织品的柔性需求;透气性测试中,涂层透气率达3000g/(m<sup>2</sup>·24h)以上,不影响皮革、纺织品的透气性能;耐干湿擦测试中,干擦500次、湿擦300次,涂层无褪色、脱落,耐摩擦性能优良,可满足各类柔性基材的使用要求。

#### 4 水性聚氨酯树脂在工业水性涂料应用中的问题与解决对策

##### 4.1 应用过程中存在的主要问题

(1)性能瓶颈:尽管水性聚氨酯涂料环保优势显著,但在部分工业场景中,其耐水性、耐溶剂性仍不及传统溶剂型涂料。尤其是在高湿度、强腐蚀或频繁接触有机溶剂的环境中,涂层易出现起泡、发白、脱落等现象,难以满足化工、海洋等重防腐领域的长期使用需求,成为限制其应用拓展的核心瓶颈。(2)施工难题:水性聚氨酯涂料对储存与施工温湿度较为敏感,适宜施工温度为15-35℃、相对湿度低于70%,若温湿度过高或过低,易出现涂层返粗、发白、流挂、附着力下降等问题。同时,施工过程中水分挥发速度受环境影响较大,易导致成膜不均,增加工业规模化施工的难度和成本。(3)成本问题:目前高端水性聚氨酯树脂及配套助剂多依赖进口,价格较高,相较于溶剂型涂料,其配方成本高出20%-30%。此外,部分国产树脂性能不稳定,需搭配高价助剂弥补缺陷,进一步推高成本,制约了其在中低端工业领域的规模化应用。

##### 4.2 针对性解决对策

(1)性能改进:采用纳米改性、交联改性等技术提升涂层综合性能。纳米改性可将纳米二氧化硅、纳米氧化锌等粒子加入树脂体系,增强涂层致密性,提升耐水性和耐溶剂性;交联改性通过引入交联剂,形成三维网状结构,改善涂层力学性能和耐腐蚀性,缩小与溶剂型涂料的性能差距。(2)施工优化:严格控制储存与施工温湿度,搭建恒温恒湿施工环境,避免不良环境对涂层质量的影响。同时,优化助剂协同搭配,加入抗返粗剂、防白剂,调整喷涂压力、干燥时间等施工工艺参数,提升施工稳定性,减少成膜缺陷,适配工业规模化施工需求。(3)成本控制:推广国产高性能水性聚氨酯树脂替代进口产品,依托国内化工产业升级,降低树脂采购成

本;优化配方比例,减少高价助剂用量,选用性价比高的替代助剂;升级生产工艺,提高生产效率,降低能耗和生产成本,实现成本与性能的平衡。

##### 4.3 水性聚氨酯工业涂料的发展趋势

(1)高性能化:随着工业领域对涂料性能要求的提升,水性聚氨酯工业涂料将向耐候、耐磨、阻燃等多功能集成方向发展,通过改性技术实现单一涂料兼具多种优异性能,适配更复杂的工业使用场景,打破性能瓶颈。(2)绿色化:响应全球绿色环保发展理念,推动生物基原料替代传统石油基原料,采用可再生资源合成水性聚氨酯树脂,降低生产过程中的碳排放和污染物排放,实现涂料全生命周期环保,契合国家“双碳”战略和行业环保要求。(3)功能化:聚焦特殊工业需求,开发抗菌、自修复、抗静电等特殊功能涂料,拓展应用场景。例如,抗菌涂料用于医疗设备、食品加工设备涂装,自修复涂料用于易磨损工业构件,进一步提升水性聚氨酯涂料的市场竞争力。

##### 结束语

研究证实,水性聚氨酯树脂已成为工业水性涂料的核心基材,其环保性与性能可调性精准契合行业绿色转型需求。通过配方优化与复合改性技术,可有效平衡涂料硬度、耐磨、耐水等关键指标,适配多领域严苛涂装要求。未来需攻克长效耐候、低成本生物基替代等难题,推动全生命周期碳管理落地,随着技术迭代,其将全面替代传统溶剂型涂料,赋能产业低碳升级。

##### 参考文献

- [1]雷娇,席腾.水性聚氨酯涂料在工业涂料中的应用[J].工程地质学,2020,(7):81-84.
- [2]卞大荣,卞直兵.水性环氧树脂在防腐涂料中的应用[J].金属表面处理,2022,(3):53-57.
- [3]陈立新.水性聚氨酯涂料中界面活性剂影响研究[J].建筑技术科学,2024,(4):90-92.
- [4]陈希.水性聚氨酯改性涂料的研究[J].市政工程,2021,(8):116-119.
- [5]王明.水性聚氨酯涂料界面活性剂的选择与应用[J].涂料科技,2020,49(3):24-28.