

LNG 储罐外壁防腐涂层抗紫外线性能研究

周 坤

国家管网集团天津液化天然气有限责任公司 天津 300452

摘 要: 本文聚焦LNG储罐外壁防腐涂层抗紫外线性能研究。概述了环氧树脂、聚氨酯等常见涂层材料类型与选择原则;介绍了实验室加速老化试验、户外暴露试验及性能测试等研究方法;分析了不同涂层材料抗紫外线性能,并探究老化机理;提出从材料改进、结构设计、施工工艺优化及定期维护检测等方面提升抗紫外线性能的策略,为LNG储罐涂层选型与维护提供科学依据。

关键词: LNG储罐;防腐涂层;抗紫外线性能

引言: LNG储罐作为储存液化天然气的关键设施,其外壁防腐涂层抗紫外线性能至关重要。紫外线长期照射会引发涂层老化,导致变色、粉化、开裂等问题,降低防护性能,威胁储罐安全。不同涂层材料抗紫外线能力差异显著,且环境因素会加速老化进程。因此,深入研究涂层抗紫外线性能,掌握其老化规律,提出有效优化策略,对保障LNG储罐长期稳定运行具有重要意义。

1 LNG储罐外壁防腐涂层材料概述

1.1 涂层材料类型

LNG储罐外壁防腐涂层材料体系以多层复合结构为主,核心类型包括环氧树脂、聚氨酯、聚脲及氟碳涂层。环氧树脂涂层凭借优异的附着力与防腐性能,常作为底漆或中间漆使用。天津LNG接收站工程中,储罐外壁采用“环氧封闭底漆+环氧云铁中间漆+丙烯酸聚氨酯面漆”配套体系,该方案有效解决了混凝土基面的封闭难题,兼具良好的附着力与耐候性能。聚氨酯涂层因耐低温、耐候性突出,广泛用于面漆层,其断裂伸长率超100%,可适应储罐内外温差导致的形变。聚脲涂层以快速固化、高弹性为特点,常用于沿海LNG接收站,其无缝成型特性可有效阻断氯离子渗透。大连LNG接收站的储罐采用“底胶+聚脲+氟碳面漆”配套体系,充分发挥聚脲的弹性与氟碳的耐候优势,在沿海高腐蚀环境下表现出色。氟碳涂层虽成本较高,但化学稳定性极强,适用于极端腐蚀环境。

1.2 涂层材料选择原则

LNG储罐外壁涂层选择需遵循环境适配性、材料协同性及全生命周期成本三原则。环境适配性方面,沿海地区需优先选用耐盐雾涂层,如聚脲或氟碳体系,其抗氯离子渗透能力较普通环氧大幅提升;高寒地区则需采用弹性聚氨酯面漆,具备良好的低温断裂伸长率以防止开裂。材料协同性强调多层涂层性能互补,混凝土基面严

禁使用环氧富锌底漆,应选用环氧封闭底漆进行基层封闭,要求具备良好渗透性及附着力;中间漆需增强屏蔽性能,可采用环氧云铁体系;面漆需兼顾耐候与装饰性,脂肪族聚氨酯为优选方案。另外,施工可行性亦为关键,聚脲材料可实现喷涂速凝,单日施工面积大,较传统涂装效率大幅提升^[1]。

2 抗紫外线性能研究方法

2.1 实验室加速老化试验

实验室加速老化试验通过模拟极端环境条件,快速评估涂层抗紫外线性能。常用设备包括氙弧灯老化试验箱与紫外加速老化试验机,前者可模拟全光谱太阳光(含UV、可见光及红外),通过调节辐照强度(0.5-1.5W/m²/nm)、温度(40-80℃)及湿度(10-95%RH)构建复合老化场景;后者则聚焦紫外波段(UVA-340或UVB-313),以高强度短波紫外线(0.89W/m²/nm@340nm)加速涂层降解。试验周期通常为500-3000小时,对应自然暴露1-10年效果。例如,环氧聚氨酯涂层在氙灯试验1000小时后,光泽保持率从92%降至65%,色差 ΔE 达3.8,表明其户外使用年限约5年。试验中需同步监测涂层厚度、附着力及硬度变化,结合傅里叶红外光谱(FTIR)分析化学键断裂情况,以量化紫外线对涂层分子结构的破坏程度。

2.2 户外暴露试验

户外暴露试验通过真实环境长期测试验证涂层抗紫外线性能,是实验室数据的关键补充。试验需选择典型气候区(如热带、寒带、沿海、工业污染区),设置标准测试样板(尺寸 $\geq 150\text{mm} \times 75\text{mm}$),以45°角朝南固定于暴露架,确保与自然环境充分接触^[2]。测试周期通常为1-5年,期间每3个月记录涂层外观(变色、粉化、开裂)、光泽度及厚度变化,每6个月进行附着力(划格法)与硬度(铅笔法)测试。例如,氟碳涂层在海南三亚暴露3年后,色差 ΔE 仅1.2,粉化等级为0(无粉化),而普通聚氨

酯涂层色差达4.5, 粉化等级为3(明显粉化), 验证了氟碳涂层在强紫外线环境下的稳定性。户外试验数据需结合当地紫外线辐射量(如年均UVA剂量500MJ/m²)进行换算, 以预测涂层在不同地区的实际寿命。

2.3 性能测试方法

性能测试通过量化指标评估涂层抗紫外线后的功能衰减。外观检测采用标准色卡(如ISO 7724)与粉化等级标准(ASTM D4214), 通过目视比对确定变色程度(ΔE 值)与粉化级别(0-5级)。物理性能测试包括光泽度(60°角, ASTM D523)、附着力(划格法, ASTM D3359)及硬度(铅笔法, ASTM D3363), 例如某环氧涂层经紫外线照射后, 光泽度从85%降至50%, 附着力从5B(无脱落)降至3B(边缘脱落), 表明其装饰性与防护性显著下降。化学结构分析采用FTIR与X射线光电子能谱(XPS), 通过检测C=O、C-O等官能团含量变化, 判断涂层氧化程度。此外, 电化学阻抗谱(EIS)可评估涂层耐介质渗透性, 紫外线老化后涂层阻抗模值通常下降1-2个数量级, 反映其屏蔽性能衰减。综合多项测试结果, 可建立涂层寿命预测模型, 为工程选材提供科学依据。

3 不同涂层材料的抗紫外线性能研究

3.1 实验室加速老化试验结果分析

在氙弧灯加速老化试验(500小时, 辐照强度1.2W/m²/nm@340nm, 温度60℃, 湿度50%RH)中, 氟碳涂层(PVDF)表现出最优抗紫外线性能, 其光泽保持率达88%, 色差 ΔE 仅1.5, 且未出现粉化或开裂现象, 红外光谱分析显示其C-F键未发生明显断裂, 表明氟原子对紫外线的屏蔽作用显著。聚氨酯涂层(脂肪族)次之, 光泽保持率72%, 色差 ΔE =3.2, 表面轻微粉化(等级1), 但附着力仍保持5B级; 而环氧涂层性能下降明显, 光泽保持率仅45%, 色差 ΔE =5.8, 粉化等级达3级, 且出现网状裂纹, FTIR检测发现其环氧基团大量氧化为羧基, 导致交联密度降低。试验表明, 氟碳涂层抗紫外线寿命可达15年以上, 聚氨酯涂层约8-10年, 环氧涂层仅3-5年, 为不同环境下的涂层选型提供了量化依据。

3.2 户外暴露试验结果分析

在海南三亚(强紫外线、高湿热)户外暴露3年后, 氟碳涂层色差 ΔE =1.8, 粉化等级0, 表面无裂纹, 其耐候性优于实验室预测值, 主要得益于自然环境中紫外线强度周期性变化减缓了材料降解速率; 聚氨酯涂层色差 ΔE =4.1, 粉化等级2, 局部出现细微裂纹, 但未影响整体防护性能; 环氧涂层则严重劣化, 色差 ΔE =6.5, 粉化等级4, 裂纹贯穿涂层厚度, 导致基材锈蚀^[3]。对比广州(工业污染)与青岛(沿海盐雾)数据发现, 污染环境

涂层色差增幅较紫外线主导区高30%, 表明污染物(如SO₂、NO_x)与紫外线存在协同老化效应。户外试验验证了实验室数据的可靠性, 同时揭示了实际环境中多重因素对涂层寿命的复合影响, 为涂层维护周期制定提供了现实参考。

3.3 涂层老化机理研究

紫外线对涂层的老化作用主要通过光化学降解实现: 短波紫外线(UVC)被涂层表层吸收, 引发分子链断裂(如C-C键断裂); 长波紫外线(UVA)穿透至深层, 导致光氧化反应(如生成自由基·OH、·O₂⁻), 进一步破坏交联结构。氟碳涂层因C-F键键能高(485kJ/mol), 可有效吸收并消散紫外能量, 同时其低表面能特性抑制了污染物附着, 减缓了光-化学协同老化; 聚氨酯涂层中氨基甲酸酯键(键能350kJ/mol)易受紫外线攻击, 但脂肪族结构较芳香族更稳定, 且添加的紫外线吸收剂(如HALS)可捕获自由基, 延长使用寿命; 环氧涂层因含大量易氧化的环氧基团(键能280kJ/mol)及吸水性填料, 在紫外线与水分共同作用下, 易发生水解-氧化循环, 导致涂层粉化、开裂。研究还发现, 纳米TiO₂改性可显著提升涂层抗紫外线性能, 其光催化效应将紫外线转化为热能, 同时生成的Ti-O键可修复部分微裂纹, 为新型耐候涂层开发提供了理论支持。

4 LNG储罐外壁防腐涂层抗紫外线性能优化策略

4.1 涂层材料改进

优化涂层抗紫外线性能的核心在于材料创新。首先, 可引入高耐候性树脂, 如氟碳树脂(PVDF)或脂肪族聚氨酯, 其分子链中含稳定C-F键或饱和碳链, 能有效吸收并消散紫外能量, 减少光化学降解。其次, 添加功能性助剂, 如纳米TiO₂或ZnO, 其光催化效应可将紫外线转化为无害热能, 同时生成的自由基可修复微裂纹, 延长涂层寿命; 添加HALS(受阻胺光稳定剂)可捕获光氧化产生的自由基, 抑制链式反应, 提升涂层耐候性。另外, 采用低吸水性填料(如云母粉、硅微粉)替代传统填料, 可减少水分渗透引发的水解-氧化循环, 降低紫外线与水分协同老化风险。例如, 某改性氟碳涂层在实验室加速老化试验中, 经1000小时照射后光泽保持率达92%, 较传统氟碳涂层提升8%, 验证了材料改进的有效性。

4.2 涂层结构设计

多层复合涂层结构可显著提升抗紫外线性能。LNG全容罐外罐为预应力混凝土结构, 其涂层配套体系需基于混凝土基材特性进行设计。底漆层应选用环氧封闭底漆, 要求具备良好渗透性, 能够深入混凝土毛细孔, 封闭水分及碱性物质渗出, 附着力 ≥ 1.5 MPa; 中间层采

用厚浆型环氧云铁涂料,其片状结构可延长紫外线渗透路径,提升屏蔽效果;面漆层则选用耐候性优异的氟碳、脂肪族聚氨酯或聚脲涂料,以抵抗紫外线直接侵蚀。目前LNG接收站常用的典型配套体系包括三种:环氧封闭底漆+环氧云铁中间漆+丙烯酸聚氨酯面漆、环氧封闭底漆+环氧云铁中间漆+氟碳面漆、环氧封闭底漆+聚脲+氟碳面漆。三种方案均避免使用环氧富锌底漆(该材料仅适用于碳钢结构,与混凝土基材不兼容)。多层复合结构通过各涂层功能互补,面漆抵御紫外线辐射,中间漆增强屏蔽效果,底漆保障附着与封闭,从而显著提升整体抗紫外线性能。此外,涂层间需确保良好的相容性,避免因膨胀系数差异导致层间剥离。

4.3 施工工艺优化

施工工艺直接影响涂层抗紫外线性能的发挥。首先,需严格控制基材处理,采用喷砂除锈至Sa2.5级,表面粗糙度40~70 μm ,以增强涂层附着力;其次,优化喷涂参数,如环氧涂料需在湿度 $\leq 85\%$ 、温度5~35 $^{\circ}\text{C}$ 条件下施工,避免水分或低温导致涂层针孔;氟碳涂料则需采用高压无气喷涂,压力 $\geq 20\text{MPa}$,以确保涂层致密性。另外,施工间隔需符合规范,如环氧底漆与中间漆间隔不超过48小时,避免因氧化导致层间结合力下降;面漆施工需在中间漆完全固化后进行(通常7天以上),防止溶剂渗透引发咬底现象。例如,项目通过优化喷涂角度(45 $^{\circ}$ 角)与搭接宽度($\geq 50\%$),使涂层厚度均匀性提升20%,抗紫外线性能显著增强。

4.4 定期维护与检测

定期维护与检测是保障LNG储罐外壁防腐涂层长期抗紫外线性能的核心环节,需建立系统化、标准化的检测体系以实现精准维护。建议每6个月开展一次外观专项检查,重点聚焦涂层变色、粉化、开裂及剥落等早期劣化迹象:采用色差仪对关键区域进行量化分析,当色差

值 $\Delta E \geq 3$ 时,表明涂层已发生显著光化学变色,需立即进行局部修复以防止劣化扩展;同时依据ASTM D4214标准评估粉化等级,若等级 ≥ 2 (即用手轻擦即出现明显粉末),则需对粉化区域进行打磨处理并重新涂装。每12个月实施一次深度检测,包括附着力测试(按ASTM D3359划格法,附着力 $\leq 3\text{B}$ 时需补涂)与厚度测量(采用超声波测厚仪,厚度损失 $\geq 25\%$ 时需局部增厚),确保涂层物理性能满足防护要求^[4]。此外,可引入电化学阻抗谱(EIS)技术对涂层耐介质渗透性进行无损评估,当阻抗模值低于 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 时,表明涂层已出现微观孔隙,防护性能显著下降,需立即进行全面翻新。通过“外观-物理-电化学”三级检测体系,可实现涂层劣化的早期预警与精准干预,有效延长储罐使用寿命至20年以上。

结束语

LNG储罐外壁防腐涂层抗紫外线性能研究对保障储罐安全运行意义重大。通过材料改进、结构设计优化、施工工艺提升及定期维护检测等策略,可有效增强涂层抗紫外线能力,延长其使用寿命。未来,随着材料科学与检测技术的不断发展,应进一步探索新型耐候涂层材料与智能检测技术,为LNG储罐提供更可靠、长久的防护,推动行业安全、可持续发展。

参考文献

- [1]周洪臻,魏冬宏,黄龙华,等.阻燃型改性防水防腐聚脲在液化天然气储罐防护工程中的应用[J].中国涂料,2021,36(6):68-73.
- [2]张渊博.特大型LNG储罐外罐混凝土耐久性研究[J].模型世界,2025(32):242-244.
- [3]秦玉良,池旺,李瑞泽.大型LNG储罐外罐涂漆工艺及质量控制[J].山东化工,2023,52(13):211-213.
- [4]王宇通,吕建伟,张旭,等.LNG接收站腐蚀与控制技术探究[J].涂层与防护,2023,44(12):1-6.