

# 装配式建筑外墙密封胶智能施工系统及工程应用研究

程文

江西一冶建工有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i5.8891

**[摘要]** 近年来,装配式建筑因其施工快、环保性强、质量控制强等优势,被广泛用于各类工程项目中,而实际应用中,装配式建筑外墙存在接缝渗漏的质量缺陷,对其工程质量和安全形成较大的危害,因而需要采用密封胶施工的方式进行处理。本文针对装配式建筑外墙接缝渗漏的质量通病,选取纳米改性材料,提高密封性的性能,并引入智能化技术,形成精准控制技术的智能施工系统,以硬件-算法协同架构,可达到密封胶主胶施工全过程的精准闭环控制,有效提高施工精度和施工效率。结合工程应用验证,此智能施工系统在密封胶施工中的效果。

**[关键词]** 装配建筑; 外墙密封胶施工; 材料性能; 精准控制; 智能施工

**[中图分类号]** TU741

## Research on the Intelligent Construction System and Engineering Application of Sealant for Prefabricated Building Exterior Walls

Cheng Wen

Jiangxi First Metallurgical Construction Co., Ltd.

**[Abstract]** In recent years, prefabricated buildings have been widely adopted in various engineering projects due to their advantages such as rapid construction, strong environmental sustainability, and rigorous quality control. However, practical applications often reveal quality defects like joint leakage at exterior walls, which significantly compromise structural integrity and safety; thus, sealant application becomes essential. This study addresses common quality issues associated with exterior wall joint leakage by utilizing nano-modified materials to enhance sealing performance and integrating intelligent technologies to develop a precision-controlled construction system. Through a hardware-algorithm collaborative architecture, this system enables comprehensive closed-loop control throughout the entire sealant application process, effectively improving construction accuracy and efficiency. Engineering validation demonstrates the system's proven effectiveness in sealant application.

**[Key words]** Prefabricated buildings; Exterior wall sealant application; Material properties; Precise control; Intelligent construction

### 前言

装配式建筑工程实践中比较典型的缺陷表现在外墙接缝渗漏问题,对建筑质量形成较大的影响,频频受到建筑质量投诉<sup>[1]</sup>。外墙渗漏现象的出现,使得室内墙体发霉、破坏墙面装饰、锈蚀钢结构、碳化混凝土,使得钢结构的使用寿命降低<sup>[2-3]</sup>。外墙接缝渗漏问题制约着装配式建筑向高品质方向发展,那么则需要寻求更为高效的解决方法和技术,传统修复方式,一般采用人工密封施工,并定期进行抽检<sup>[4]</sup>。传统施工方式比较依赖于人工的经验和专业技术能力,在应用中具有一定的局限性,需要加强对密封性能和创新施工工艺,以此达到系统化的创新。

#### 1 装配外墙密封胶材料性能创新与突破

##### 1.1 传统密封胶材料的性能缺陷分析

传统密封胶的缺陷主要表现在三个方面:

第一,耐候性缺陷。传统的密封胶在紫外线照射6个月后,超过40%都存在裂开的限制,这是由于有机聚合物分子链受到了紫外辐射断裂的影响,增塑剂出现迁移后形成的脆化,直接导致密封胶的密封功能失效,形成渗漏。

第二,位移能力缺陷。当年温度差异查过60℃的地区,密封胶在长时间的使用下就会出现胶体开裂的情况,由于传统胶位移动能力降低,难以承受变形,这就导致应力过度集中在胶体,形成锯齿状断裂。

第三,界面兼容性缺陷。混凝土和保温板交界位置出现较高的剥离率,主要是由于混凝土表面能通常为38-45mN/m,传统胶粘结强度为0.48MPa,EPS板表面能通常为31-33mN/m,传统胶粘结强度为0.16MPa,低表面能基材导致粘结界面积弱,

多种材料协同出现失效的现象。

2.2 SiO<sub>2</sub> /TiO<sub>2</sub> 纳米改性密封胶的创新设计与机理

结合当前的专利技术，利用 SiO<sub>2</sub> /TiO<sub>2</sub> 复合纳米颗粒对硅酮密封胶达到改性的目的，调控微观结构，实现材料性能的优化和升级<sup>[5]</sup>。

SiO<sub>2</sub> /TiO<sub>2</sub> 两种纳米颗粒并不是独立工作，纳米 SiO<sub>2</sub> 的网络结构可以为纳米 TiO<sub>2</sub> 提供稳定固定定位，避免团聚失效，并且在纳米 TiO<sub>2</sub> 保护下，可以促使纳米 SiO<sub>2</sub> 的聚合物骨架增强，避免受到紫外线降解，可得到长时间稳定的性能，两者

结合设计达到了较好的效果。例如：改性密封胶在-40 摄氏度-80 摄氏度的极端测试条件下，纳米改性密封胶进行了 50 次循环冻融试验，结果显示：无开裂现象，位移跟随性达±35%。对比于传统技术，SiO<sub>2</sub> /TiO<sub>2</sub> 纳米改性密封胶展现出较大的优势，因被广泛推广和应用。

2.3 改性密封胶与传统密封胶的性能对标验证

对比传统密封胶和改性密封胶 (SiO<sub>2</sub> /TiO<sub>2</sub> 纳米)，详情如表 1 所示：

表 1 SiO<sub>2</sub> /TiO<sub>2</sub> 纳米改性密封胶和传统技术性能比较表

评价维度		传统硅酮密封胶	SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> 纳米改性密封胶	性能提升/突破
力学性能	拉伸强度	0.6-0.8 MPa	1.8-2.2MPa	上升 200%
	断裂伸长率	250%-300%	350%-400%	上升 40%
耐候性	-40℃弹性恢复率	≤30% (冻裂风险高)	≥92%	上升 207%
	紫外线老化后强度保持率	40%-50% (3000h)	≥85%	上升 90%
	耐湿热性 (50℃, 95%RH)	粘结强度衰减>60% (28d)	衰减<15%	下降 75%衰减率
功能特性	接触角	85° -95°	110° -118°	提高自洁性
	位移能力	±25%	±35%	适应更大变形

2 装配外墙密封胶精准控制智能施工系统设计

2.1 智能施工系统的整体设计思路

智能施工系统整体设计需要严格遵守“感知-决策-执行”循环工作逻辑，设计思路为：纳米改性密封胶作为物质基础，建立“温度-压力-速度”三维协同控制模型作为决策，执行终端则通过高精度的机电系统实现，符合设计工作逻辑性。

2.2 “温度-压力-速度”三维协同控制模型

接缝密封施工中，注胶工艺是比较关键性的环节，引入数字化技术，以实现自动化注胶工艺为目的，建立“温度-压力-速度”三维控制模型，利用多变量耦合关系，精确的调控注胶操作。“温度-压力-速度”三维控制模型的协同控制逻辑图，如图 1 所示：

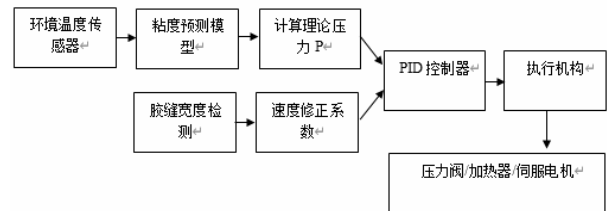


图 1 “温度-压力-速度”三维控制模型的协同控制逻辑图

2.3 硬件-算法协同构架

“温度-压力-速度”三维控制模型的硬件系统构成包括：温度控制、压力控制和速度控制三个模块，具体构成如表 2 所示：

表 2 硬件系统构成表

模块	组件	技术参数	功能
温度控制	PTC 加热片+PT100 传感器	控温精度±1℃	维持粘度稳定
压力控制	伺服电动缸+压力变送器	压力范围 0.2~1.0MPa±0.02MPa	精准输出注胶压力
速度控制	编码器伺服电机+激光测距仪	速度调节 0.3~1.0m/min±5%	匹配接缝宽度变化

3 智能施工系统核心技术与应用效能

3.1 三维控制自动注胶系统的关键技术实现

第一，温度补偿子系统。此系统以“粘温特性”为基础进行实时调控。系统内设置了纳米改性密封胶的“温度-粘度”特性曲线数据库，此曲线在前期的时候已经经过流变实验得到相关的数据，基于差异温度下，材料流动行为的精确描述。通过温度传感器，对环境的温度和胶桶内的胶体问题，对于温度的控制精确度可以达到±1℃。

第二，压力调节子系统。构建“接缝截面积×行进速度=所需出胶率”数学模型，动力源为伺服电动缸，可将活塞推动。通过压力变送器可对系统内部的压力进行实时性的反馈，达到

高精度的压力闭环控制。系统可以接受来自于速度子系统的实时速度信号和激光测距仪测量获得的接缝宽度信号，对出胶压力进行动态性的计算，并且指令伺服电动缸实时毫秒级的响应，压力范围：0.2-1.0MPa，偏差控制在±3%内。

第三，速度自适应系统。通过激光测距仪，连续性扫描接缝路径，对接缝宽度的变化进行有效识别。接缝变宽被识别后，系统会指令机械臂的速度降低，能够预留出更多的时间进行空间的填充，接缝变窄被识别后，则需要将其速度进行提升进行改善，响应时间低于 0.5s。

3.2 智能施工系统与传统工艺的效能对比分析

自动注胶系统与传统工艺对比，如表 3 所示：

表 3 自动注胶系统与传统工艺对比

对比维度	传统注胶工艺	三维控制自动注胶系统	工程价值	
控制原理	工人经验手动调节	温度-压力-速度闭环控制模型	避免人为变动	
核心参数	温度响应	忽略环境温度影响	解决冬夏季施工差异	
	压力控制精度	±40%波动 (0.3-0.8MPa)	±3%偏差 (0.45±0.015MPa)	预防欠注或溢胶的现象
	速度自适应	恒定速度，忽略接缝宽度变化	激光实时测宽调速 (0.3-1.0m/min)	解决不规则接缝

质量输出	胶缝截面高宽比	0.6-1.5 (离散)	0.95-1.05 (标准差<0.03)	确保密封有效性
	气泡/空腔率	9.7% (目测验收)	0.6% (AI 质检)	根治渗漏隐患
	粘结强度合格率	74% (GB 16776)	98.3%	脱粘风险下降
施工效能	单缝的施工效率	15m/h (含返修)	35m/h	工期降低 30%
	胶料利用率	65%-75%	92%-95%	节约材料成本
	人员技能依赖	高级技工 (经验 5 年)	普工培训 1 天	应对用工不足的问题
极端工况应对	低温施工 (-5℃)	停工作业	自动升温至 25℃, 压力提升至 0.78MPa	保证施工的连续性
	接缝突变 (15-20mm)	需停机调整参数	0.5s 内自动降速 38%	确保复杂节点的质量

### 3.3 系统在极端工况下的自适应能力

系统在极端工况下的自适应能力, 如表 4 所示:

表 4 系统在极端工况下的自适应能力

极端工况	传统问题	系统自适应	核心成效
低温环境	胶体凝固, 施工被中断, 质量控制能力低	实时性加热胶体, 同时提升注胶压力	打破了季节限制, 达到严寒环境下的持续高效施工
接缝尺寸突变	反应比较慢, 造成填充不足或者溢胶现象出现	提前感知宽度变化, 自动降速并调节压力	达到变截面接缝的饱满填充, 彻底解决渗漏隐患
高空与复杂立面	安全风险比较高, 施工精度控制难度较高	联合 BIM 模型路径规划, 机械臂精准作业	兼顾安全性和复杂几何条件下的施工质量和统一性

## 4 工程应用与全流程质量控制

### 4.1 示范工程概况

某城市的装配式保障房项目, 总面积 18.5 万平方米, 外墙板、阳台、楼梯采用预制构件。外墙接缝共计 32.5 万延米, 采用传统密封胶冻融开裂率为 31%, 每年需要大约 300 万元的接缝渗漏维修费用。

### 4.2 智能施工全流程落地实施

智能施工全流程落地, 构建“全链条”技术, 实施路径, 包括:

第一, 纳米密封胶进场检验: 利用里叶红外光谱 (FTIR) 检测  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  特征峰, 保证纳米粒子分散度高于 95%。每批次选取三组进行抽样, 关键指标包括: 拉伸强度、弹性恢复率。

第二, AI 辅助基底处理: 在 ResNet34 架构下, 监测出污染物, 确定污染区域的位置, 采用真空吸附装置, 对污水残渣等进行回收。工作流程包括: 扫描识别-定位及反馈-联动清理。可把依赖于工人责任心的隐蔽工序, 转化为客观、量化的标准化流程, 从根本上将因基层不洁导致的界面剥离隐患进行彻底的清除。

第三, 温控注胶施工: 核心的参数设定为温度、压力和速度, 将其控制在合理的范围内进行施工, 胶缝截面合格率为 98.7%, 材料的浪费率只有 5.3%。

第四, 三维扫描验收: 利用手持激光扫描仪, 和定制的验收算法, 生产数字化的验收报告, 验收效率为每小时 15 缝, 数据和 BIM 平台相连, 达到“一缝一码”终身追溯, 同时将接缝数据全程对接到 BIM 管理平台, 形成完整的数字化验收报告, 其验收的效率能够达到每小时 15 缝。同时需要在建筑的全周期中, 利用“二维码”扫描后, 能够将其信息进行全部的查询, 便于后期的维护和鉴定等, 形成客观性的数据。

第五, 平台动态监测: 设置风险阈值: 位移 > 设计值 × 80% 为黄色预警, 位移 > 设计值 × 100% 为红色预警, 通过温度-位移滞后曲线, 对结构变形和冻胀进行判别, 成功预警了两处风险缝: 缝 ID-JF-0832: 位移达 4.8mm; 缝 ID-JF-1075, 处理方式为立即进行注浆加固, 避免渗漏损失达到 200 万元。

### 4.3 失效防控效能量化对比

失效防控效能量化对比, 如表 5 所示:

表 5 失效防控效能量化对比

失效类型	防控机制	改善效果
界面剥离	纳米增强胶体+基面清洁度 AI 监控	剥离率降低了 95%
气泡空腔	压力闭环控制+实时缺陷拦截	空腔率降低了 94%
胶厚不足	激光测厚反馈+速度自适应	合格率上升了 45%
低温冻损	材料耐寒性 (-30℃)+智能升温注胶	-5℃环境连续施工无中断现象

## 5 结束语

装配式混凝土建筑外墙接缝渗漏是常见的质量缺陷, 针对这一缺陷, 本文创新的提出利用  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  纳米杂化增强技术开发出极端环境适应性密封胶, 开发智能化施工系统, 并结合示范工程, 验证失效防控的成效。

### [参考文献]

[1]尹远,李琳琛,杨朝旭.装配式混凝土建筑外墙接缝密封胶施工技术[J].产品可靠性报告,2024(11):145-147.

[2]张舜国.装配式混凝土建筑外墙接缝密封胶施工技术

[J].科学技术创新,2024(10):191-194.

[3]张超.装配式混凝土建筑外墙接缝密封胶施工工艺优化[J].中国建筑金属结构,2024,23(6):126-128.

[4]张慰慈.外墙接缝密封胶在装配式混凝土工程中的应用[J].四川建材,2023,49(11):130-132.

[5]朱浩,王晶晶.高温对装配式建筑外墙接缝密封胶性能的影响[J].液压气动与密封,2023,43(5):55-59.

作者简介:程文(1980-1-4),男,汉族,江西南昌人,中级职称,本科,研究方向建筑施工。