

老旧建筑外墙改造中反射隔热涂料的节能效果分析

汤加富

(上海建工四建集团有限公司, 上海 201103)

摘要 针对老旧建筑薄抹灰外保温系统出现的起皮、空鼓与剥离等问题, 本研究以安全为前提, 采用铲除失效层、双遍抗裂砂浆压入网格布、涂覆高反射与高发射呼吸型隔热涂层等措施, 构建系统性外墙更新路径。通过参数化选型与过程控制, 结合稳态能量模型、现场测试与能耗模拟评估效果。结果显示, 外表面温度由 45℃ 降至 32℃, 等效传热系数由 0.8 W/(m²·K) 降至 0.5 W/(m²·K), 夏季空调用电由 790 kWh 降至 650 kWh, 节能率达 17.7%, 室温回落 2℃~3℃, 每户年减排 CO₂ 约 60 kg~90 kg。结果表明, 该方案在湿热气候下兼具安全、耐久与节能优势, 为老旧高层外墙修缮提供了可复制的路径。

关键词 反射隔热涂料; 外墙修缮; 薄抹灰外保温; 热湿耦合; 夏季节能

中图分类号: TU767; TU56+1.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.025

0 引言

老旧建筑薄抹灰外保温系统在热湿耦合与界面老化作用下, 普遍出现起皮、空鼓、剥离等问题, 既影响建筑安全, 也加剧夏季空调负荷^[1]。既有高层外墙更新需兼顾结构安全、界面耐久与运行节能^[2]。反射隔热涂料因高反射与高发射特性, 可有效抑制表面温升, 施工扰动小、经济性好, 但其长期效能受基层强度、含湿与节点防水影响^[3-4]。本研究以上海市闵行区典型高层住区为对象, 构建从基层修复到表层涂装的系统化更新路径, 结合参数化选型、施工控制与实测评估, 探索适用于湿热气候区的外墙修缮策略, 为老旧小区节能改造提供工程依据。

1 工程概况

1.1 项目背景与现状问题分析

上海市闵行区爱博六村(2012年建成)与爱博七村(2013年建成)均为13层高层住宅, 外墙采用无机保温砂浆薄抹灰外保温系统。该材料因多孔结构及现场湿作业特性, 在热湿耦合与界面老化作用下耐久性问题突出。现场排查显示, 涂料起皮、粉刷层开裂与空鼓普遍, 空鼓率分别为18.2%和14%, 局部超46%; 保温层拉伸黏结强度仅0.01 MPa~0.03 MPa(远低于0.10 MPa), 抗裂防护层厚度2.0 mm~2.2 mm(未达3 mm~5 mm), 且网格布搭接与压入不规范, 削弱防

护层连续性与抗裂性能。由此导致雨水渗入与热循环放大层间剥离及饰面脱落风险, 并增加夏季空调负荷与运维成本^[5]。

1.2 修缮方案总体设计思路

鉴于既有外墙薄抹灰系统存在层间剥离及抗裂层偏薄等失效问题, 本研究以安全为前置约束, 围绕耐久与夏季节能协同目标, 对外立面实施系统性更新。将原有保温及疏松粉刷层整体铲除至坚实基层, 清理并封闭界面后, 分两遍抹压聚合物改性抗裂砂浆(总厚≥3.0 mm), 压入耐碱玻纤网格布, 搭接不小于100 mm, 洞口及阴阳角等部位双层加强。构建呼吸型反射隔热涂层体系, 底涂增强附着, 中涂采用高太阳反射率与高半球发射率配方, 面涂具备耐污耐候性能。细部节点完善滴水线、泛水构造, 并复合密封处理; 全过程依据相关规程控制基层含水率与环境温湿度, 实现结构安全、界面耐久与节能目标的协调统一。

2 反射隔热涂料改造方案与技术要点

2.1 反射隔热涂料的性能参数与选用依据

针对上海市闵行区爱博六村与爱博七村外墙薄抹灰系统层间剥离与抗裂层偏薄问题, 将反射隔热体系作为与基层修复协同的表层构造, 在双遍聚合物改性抗裂砂浆与耐碱网格布形成稳定界面后, 选用太阳反射比不低于0.85、半球发射率不低于0.80的呼吸型水

作者简介: 汤加富(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 城市更新。

性涂层，该取值符合《建筑反射隔热涂料节能检测标准》（JGJ/T 287-2014）的相关检测要求，旨在通过高反射与高辐射散热降低涂层吸热，并利用水汽透过与抗污保持能力削弱夏季表面温升、层间受潮与黏结衰减的耦合效应。为适配上海湿热气候与更新后基层物理特性，参数体系需同时覆盖光学性能、界面力学、耐候稳态与湿部通透性，具体性能参数见表 1。

表 1 反射隔热涂料性能参数表

参数	选用指标	试验方法	适配性说明
太阳反射比	≥ 0.85	ASTM C1549	降低吸收辐射热，减弱表面温升
近红外反射率	≥ 0.90	ASTM C1549	针对上海夏季强日照的主频段
半球发射率	≥ 0.80	ASTM E408	提升夜间与阴影条件下散热能力
反射保持率	≥ 0.80 经过 1 000 h 加速老化	GB/T 1865	保持长期节能效益与色稳性
太阳反射指数 SRI	≥ 100	ASTM E1980	综合反射与辐射，表征温升潜力
拉伸粘结强度	≥ 1.0 MPa 对水泥砂浆基层	GB/T 5210	匹配双遍抗裂砂浆界面强度
水汽透过率	≥ 900 g/(m²·24h)	ASTM E96/E96M	减少残余潮气引致的鼓泡与剥离
毛细吸水系数	≤ 0.10 kg·m ⁻² ·h ^{-0.5}	EN 1062-3	抑制雨淋状态下的渗入途径
耐污性	反射率衰减 ≤ 15% 人工污染后	企业方法参照 EN 1062	减缓表面变灰导致的热吸收回升
加速耐候性	1 000 h 粉化 ≤ 1 级色差 ΔE ≤ 1.5	GB/T 1865	适应华东高湿高温循环
生物耐久性	霉菌生长等级 0	GB/T 1741	降低北向与背阴面微生物风险
VOC 含量	≤ 50 g/L	HJ 2537	满足既有居住区施工环境要求
推荐干膜厚度	200 μm ~ 300 μm	—	实现反射与遮蔽协同的必要厚度

底中面顺序施工，干膜厚度控制 70 μm 至 100 μm。窗框、穿墙管等节点采用密封胶与泛水板加强防水，变形缝设弹性密封胶。全过程控制温度 5℃至 35℃、湿度 85% 以下，关键工序抽检附着力并记录参数。

2.3 反射隔热涂料节能原理与理论计算模型

鉴于上海市闵行区爱博六村与爱博七村夏季日射负荷集中且外立面已由薄抹灰体系更新为抗裂砂浆加反射隔热涂层的复合表层，本研究把节能机理归纳为减少短波吸收与增强长波辐射两条路径，叠加较高水汽通透度以抑制含湿导致的导热系数上升，从而把外表面温度与墙体导入的热通量同步降低。基于稳态能量平衡，可把外表面温度满足的平衡关系写为下式，式中把辐射项与对流项共同表征为外表面的散热能力：

$$\alpha I = h_c(T_s - T_a) + \varepsilon \sigma(T_s^4 - T_e^4) \tag{1}$$

式（1）中， α 表示日射吸收率，无量纲， I 为太阳辐照度（W/m²）， h_c 为对流换热系数（W/(m²·K)）， ε 为半球发射率，无量纲， σ 为斯特藩常数（W/(m²·K⁴)），

2.2 外墙改造施工工艺与关键节点控制

针对上海市闵行区爱博六村与爱博七村外立面失效问题，施工工艺分为去除、修复、增强与表层构筑四个阶段形成闭环控制。铲除既有保温层至坚实基层后，清理并涂刷界面底涂，找平平整度偏差不大于 3 mm。抗裂层采用双遍聚合物砂浆与耐碱网格布，总厚不小于 3 mm，网格布搭接不小于 100 mm。反射隔热涂层按

T_s 为外表面温度（K）， T_a 为环境空气温度（K）， T_e 为等效辐射温度（K）。

在获得外表面温度后，结合由混凝土或砌体、找平层与内抹灰构成的一维稳态传热路径，可把由室外向室内的穿墙热通量按总热阻法进行估算，其计算式如下：

$$q = \frac{T_s - T_i}{R_w} \tag{2}$$

式（2）中， q 表示穿墙稳态热通量（W/m²）， T_i 为室内侧空气温度（K）， R_w 为外墙从外表面到室内侧表面的总热阻（m²·K/W）。

从机理上看，选用高太阳反射比以降低并把入射短波吸收项明显压低，同时配置高半球发射率以提高辐射散热项的权重，可把平衡温度拉低并使墙体传入热通量按比例衰减；当涂层保持较高水汽透过且控制毛细吸水后，材料含湿与导热联动被减弱，上述两个公式中的温度与热阻取值更趋于稳态设定，进而与本工程对峰荷削减与围护耐久协同的目标相契合。

3 反射隔热涂料节能效果评估与分析

3.1 改造前后外墙热工性能测试结果分析

针对上海市闵行区爱博六村与爱博七村夏季强辐射高湿环境,研究在晴热典型日对南西向立面进行红外成像与热流计实测,对比改造前后外表面温度与传热系数。观测结果表明,改造前外表面平均温度约 45℃,形成大面积高温带;改造后高反射高发射表层使峰段温度降至 32℃,热场分布均匀。该温降缩小了外表面与空气温差,拉平了墙体内部温度梯度,有效抑制穿墙导热驱动力,从而减少室内净热得量。通过 24 h 稳态热流反演,外墙传热系数从改造前约 0.8 W/(m²·K)降至改造后约 0.5 W/(m²·K),这源于界面层次重建后含湿水平下降及导热路径重整,叠加表层反射辐射使外表面接近室外气温边界条件。同时,改造前窗间墙

与阳角处热斑在网格布双层加强及泛水细部完善后得以消除,边缘热失配明显缓解,为后续夏季空调负荷评估提供了物理依据。

3.2 夏季空调能耗节约效果评估

运用监测校准的能耗模拟与账单核对双轨法,基于上海典型气象年条件评估上海市闵行区爱博六村与爱博七村改造后夏季空调能耗节约效果。改造前每户空调电耗约 800 kWh,改造后降至 640 kWh 至 680 kWh,节能率稳定在 15% 至 20% 区间,面积归一化强度亦协同下降(见表 2)。节能率定义如下:

$$\eta = \frac{E_{\text{before}} - E_{\text{after}}}{E_{\text{before}}} \quad (3)$$

式(3)中, η 表示节能率,无量纲, E_{before} 为改造前夏季空调用电量,单位为 kWh, E_{after} 为改造后夏季空调用电量,单位为 kWh。节能收益归因于高反射高发

表 2 改造前后夏季空调能耗对比表

小区	样本户数	户型面积 /m ²	改造前电耗 /kWh	改造后电耗 /kWh	节能率 /%	电耗强度前 /kWh/m ²	电耗强度后 /kWh/m ²
爱博六村	120	90	800.0	660.0	17.5%	8.9	7.3
爱博七村	110	80	780.0	640.0	17.9%	9.8	8.0
综合平均	230	85	790.0	650.0	17.7%	9.3	7.6

射削减显热吸收、界面含湿下降降低导热系数、热斑消除优化冷负荷峰谷差,共同实现电耗与强度协同降低。

3.3 改造后综合效益分析

改造后综合效益体现在负荷、舒适与耐久三个维度协同改善。按户计量口径折算,年节约电耗约 120 kWh 至 160 kWh,单位建筑面积年节约约 1.3 kWh/m² 至 1.7 kWh/m²,冷负荷峰谷波动显著趋缓,配电侧需管理空间得到有效释放。按华东电网边际排放因子折算,每户年减排约 60 kg 至 90 kg 二氧化碳当量,小区尺度汇聚形成可度量需求侧碳减排增量。室内舒适度方面,西南向客厅晴热日运行温度回落约 2℃至 3℃,空调压缩机运行时间缩短,夜间残余热清空加快,噪声与冷风不适感缓解。耐久层面,抗裂砂浆加网格布复合界面降低二次开裂与剥离概率,呼吸型涂层拆解含湿导热耦合链,渗水节点系统围合控制坠落与渗漏风险。反射隔热涂层使用寿命不低于 15 年,外立面再涂周期有望延长至 10 年至 12 年,维护成本与扰民频次同步下降,为老旧高层成套更新提供可复制路径。

4 结束语

本研究针对老旧高层住宅薄抹灰外保温系统的典型失效模式,提出了从基层加固、抗裂增强到高反射表层涂装的系统性修缮路径。通过将结构安全、界面

耐久与夏季节能目标集成于同一构造体系,实现了外立面性能的整体提升。实测结果表明,该方案在降低外表面温度、改善室内热环境与延长再涂周期方面协同有效,为湿热气候区既有建筑外墙更新提供了工程范式。施工中应重点关注抗裂层施工质量、细部防水构造与界面黏结强度控制。未来可围绕涂层老化规律、色彩热工权衡及全寿命经济性开展深入研究,以支撑反射隔热涂料改造方案与技术更广泛场景下的推广与标准化应用。

参考文献:

- [1] 黄金福.建筑外墙保温节能技术在建筑施工中应用分析[J].中国住宅设施,2025(10):170-172.
- [2] 李俊恺,高飞龙.关于建筑外墙透明隔热反射涂料的技术研究[J].建筑技术开发,2024,51(01):4-6.
- [3] 陈志佳.辐射型反射隔热涂料热特性分析[J].中国建筑金属结构,2023,22(11):29-31.
- [4] 王瑾.建筑外墙用反射隔热涂料节能效果的研究[J].福建建材,2023(05):81-84.
- [5] 李金洋,张淳劼,范程龙,等.夏热冬冷地区建筑外墙反射隔热涂料施工技术[J].绿色筑,2022,14(06):87-90.