

湿热环境下装配式填充墙材料与填缝体系性能研究

管贤良 康红刚 杨明达 石向阳 雷润杰
中建五局土木工程有限公司 湖南 长沙 410000

摘要: 针对我国南方高温高湿(湿热)气候区装配式建筑中蒸压加气混凝土(ALC)条板填充墙普遍存在的裂缝开裂与返潮问题,本研究系统探究了ALC基材及填缝体系在复杂热湿耦合作用下的多尺度性能演变规律与失效机理。通过微观结构表征、宏观物理力学性能测试及数值建模,揭示了ALC条板孔隙结构损伤、非对称性湿胀-干缩行为及界面粘结劣化等关键现象;在此基础上,构建了填缝材料多维度性能评价体系,成功开发并验证了掺入温/湿度敏感微胶囊与聚丙烯纤维的智能响应型填缝材料。研究表明,所建立的三因素(温度-湿度-时间)界面粘结强度衰减模型预测精度误差小于8%,优化后的智能填缝材料在50次标准湿热循环后裂缝宽度控制在0.25mm以内,显著优于传统材料。本研究为解决南方湿热地区装配式建筑的质量通病提供了坚实的理论依据和可直接应用的技术方案。

关键词: 湿热环境; 装配式建筑; ALC条板; 填缝材料

引言

建筑工业化是我国建筑业转型升级核心,装配式建筑技术受政策大力推动。蒸压加气混凝土(ALC)条板作为非承重围护结构理想选择,在装配式项目中应用广泛。但我国长江流域及华南地区夏季漫长、高温高湿,年均相对湿度超70%,极端“回南天”达95%以上,这对ALC填充墙系统长期服役性能挑战巨大。工程实践表明,ALC墙板间拼缝、与主体结构连接缝及门窗洞口周边等填缝区域是墙体系统薄弱环节。温湿度波动下,ALC板材湿胀干缩变形、与混凝土结构约束变形以及填缝材料收缩,易在接缝处诱发应力集中,导致贯穿性裂缝。裂缝会使外部高湿空气侵入,影响建筑美观、室内环境健康,还威胁结构耐久性^[1]。南昌高新区瑶湖花园七期安置房项目大规模采用200mm厚ALC条板作内外填充墙,保障其在本地区域气候下服役品质是关键难题。现有研究多聚焦单一因素对材料影响,缺乏对南方湿热地区多场耦合环境的系统考量。为此,本研究从材料科学与工程应用结合角度,剖析ALC条板及其填缝体系在模拟南方湿热环境下的全生命周期性能,揭示劣化机理,开发高性能填缝方案,为行业提供技术支撑。

1 ALC条板在湿热耦合环境下的性能响应机理

为从根本上理解填缝失效的原因,必须首先明晰ALC基材在目标环境下的行为模式。本研究通过一系列精细化的实验,从微观到宏观,系统地揭示了其性能演变规律。

1.1 多尺度微观结构的损伤演化机制

1.1.1 孔隙结构的动态演变

采用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)对经历0次、

25次、50次标准湿热循环(温度25~40℃,相对湿度80%~95%)后的ALC样品进行观察。结果显示,未循环样品的孔隙呈均匀分布的椭球状,孔径主要集中在80~150μm,孔壁光滑致密,这是ALC优异保温性能的来源。经历25次循环后,部分孔壁开始出现微米级的裂纹,尤其是在孔隙交汇处。至50次循环后,孔壁裂纹明显增多、加宽,并有向相邻孔隙贯通的趋势。同时,在高湿阶段取样的样品中,孔隙内壁附着有絮状的二次水化产物,这源于水分携带的可溶性离子在孔隙内的迁移与再沉淀。

1.1.2 水化产物的稳定性分析

利用X射线衍射(XRD)对不同循环次数的样品进行物相定量分析。谱图显示,托贝莫来石(Tobermorite, $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)和硬硅钙石(Xonotlite, $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$)作为ALC的主要胶凝相,其峰位和强度在整个循环过程中保持稳定,表明其晶体结构具有良好的热湿稳定性。然而,氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)的衍射峰强度在50次循环后增加了约18%。这证实了在高湿环境中,部分未完全反应的游离石灰或硅酸盐矿物发生了持续的水化反应,生成了更多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。这一过程虽然短期内可能填充部分微孔,但长期来看,其体积变化及易溶出特性可能对材料耐久性产生不利影响。

1.1.3 界面过渡区(ITZ)的弱化过程

ALC基体与内部骨料(如石英砂)之间的界面过渡区(ITZ)是材料内部的天然薄弱面。SEM-EDS(能谱分析)结果显示,循环前ITZ区域元素分布均匀。循环后,该区域的Ca/Si比值发生显著波动,且出现了明显的元素偏析现象。微观形貌上,ITZ变得疏松多孔,微裂缝优先在此处萌生并沿界面扩展。这种弱化直接降低了材料的

整体抗拉和抗折强度,是宏观力学性能下降的微观根源。

1.2 宏观物理性能的量化表征

1.2.1 非对称性湿胀-干缩行为

设计了为期90天的多周期湿热循环试验,精确记录ALC试件(40×40×160mm)在湿度从40%升至95%(湿胀阶段)和从95%降至40%(干缩阶段)的长度变化。在湿胀阶段,试件长度迅速增加,前7天完成了总湿胀量的70%。整个过程(40%→95%RH)的平均线性湿胀率为0.018%,对应的线性湿胀系数为 $(1.8 \pm 0.15) \times 10^{-5} / \%RH$ 。该系数随湿度升高而略有增大,表现出非线性特征。在干缩阶段,试件长度减少,但其总干缩率仅为0.012%,明显小于湿胀率。这表明ALC材料的湿胀-干缩过程存在约33%的不可逆变形。这种非对称性意味着在经历一个完整的干湿循环后,材料无法完全恢复到原始尺寸,从而在约束条件下产生累积残余应力。基于上述数据,建立了如下非线性湿胀-干缩本构关系:

$$\epsilon_h = a \cdot \ln(RH) + b \cdot (1 - \exp(-c \cdot t))$$

其中, ϵ_h 为湿度引起的应变,RH为相对湿度,t为时间,a,b,c为通过拟合确定的材料常数^[2]。该模型能准确描述ALC在任意湿热路径下的瞬时与长期变形。

1.2.2 力学性能的退化规律

同步测试了循环前后ALC试件的抗压强度和抗折强度。结果显示,随着循环次数的增加,两种强度均呈下降趋势。50次循环后,抗压强度由初始的4.2MPa降至3.6MPa(保留率85.7%),抗折强度由0.65MPa降至0.48MPa(保留率73.8%)。抗折强度的更大降幅再次印证了材料内部微裂缝的扩展对其抗弯性能造成了更严重的影响。

1.3 界面粘结性能的劣化与预测

1.3.1 粘结强度的衰减规律

制备了ALC-ALC和ALC-C30混凝土两种双面剪切试件,置于湿热循环箱中。每完成10次循环后,取出一组试件进行剪切强度测试。ALC-ALC界面初始剪切强度为0.85MPa。50次循环后,强度降至0.55MPa,保留率为64.7%。ALC-混凝土界面初始剪切强度为0.78MPa。50次循环后,强度降至0.45MPa,保留率仅为57.7%。异质材料界面因热膨胀系数和湿胀系数差异更大,表现出更严重的劣化。

1.3.2 三因素衰减预测模型的构建与验证

基于大量试验数据,采用多元非线性回归方法,构建了综合考虑温度(T)、湿度(H)和时间(t)的粘结强度衰减模型:

$$S(t, T, H) = S_0 \times \exp[-k \times t^\alpha \times (\beta_1 \times (T - T_0) + \beta_2 \times (H - H_0))]]$$

其中, S_0 为标准状态($T_0 = 20^\circ C, H_0 = 50\%$)下的初始强度, $k, \hat{\alpha}, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ 为回归系数。利用额外的10组试验数据对该模型进行验证,其预测值与实测值的相关系数 R^2 达到0.96,平均绝对百分比误差(MAPE)为7.8%,证明了模型的高精度和可靠性。

2 填缝材料体系的优化与性能评价

在明晰了基材性能的基础上,本研究转向填缝材料本身的优化,旨在开发能够主动适应ALC板变形、抵抗环境侵蚀的高性能体系。

2.1 多维度性能评价指标体系的建立与基准测试

2.1.1 评价体系的构建原则

传统的填缝材料评价方法往往过分侧重于单一的力学强度指标,难以全面反映其在南方湿热这种复杂服役环境下的综合表现。为此,本研究确立了“力学-变形-耐久-施工”四位一体的综合评价框架。该框架强调,一种理想的填缝材料不仅需要具备足够的抗压和抗拉强度以传递荷载,更需要拥有优异的变形能力(如高极限拉伸应变和低弹性模量)以适应基材的体积变化;同时,它必须具有出色的耐水性、抗老化性等耐久性能,以抵抗长期湿热侵蚀;最后,良好的施工性能(如适宜的稠度、开放时间和表干时间)是保证现场施工质量的前提^[3]。这一多维度的评价体系为科学、客观地衡量和比较不同填缝材料的优劣提供了全面的依据。具体指标包括:①力学性能:抗压强度(28d)、抗拉强度(28d)。②变形能力:极限拉伸应变($\geq 1.5\%$ 为优)、弹性模量(越低越好,利于释放应力)。③耐久性能:吸水率(24h)、软化系数(≥ 0.8)、Q-UV老化后强度保留率($\geq 80\%$)。④施工性能:稠度(mm)、开放时间(min)、表干时间(h)。

2.1.2 市售材料的基准性能对比

选取三种代表性填缝材料进行测试:A(普通水泥砂浆)、B(聚合物改性水泥砂浆)、C(硅酮密封胶)。

表1:市售材料的基准性能

性能指标	材料A	材料B	材料C
极限拉伸应变(%)	0.32	2.45	3.10
软化系数	0.65	0.88	0.92
Q-UV2000h强度保留率(%)	55	82	88
开放时间(min)	> 120	45	20
与ALC粘结强度(MPa)	0.60	0.85	0.50

综合来看,材料B(聚合物改性水泥砂浆)在各项指标上取得了最佳平衡,尤其在ALC基材的粘结性方面表现突出,故被选为本研究的优化基础。

2.2 智能响应型填缝材料的开发与机理

2.2.1 温/湿度敏感微胶囊的引入与作用

选用相变温度为28°C、粒径为10-50 μm 的石蜡类微胶囊(MC),按质量比1.5%掺入材料B中。其作用机理在于:当环境温度超过28°C(南方夏季常态),微胶囊芯材熔化吸热,同时体积膨胀约10-15%,对砂浆基体施加微预压应力,有效抵消了因ALC板热膨胀和湿胀产生的拉应力^[4]。反之,在温度降低时,芯材凝固收缩,释放应力。这种“自调节”机制显著降低了填缝区域的峰值拉应力。

2.2.2 聚丙烯(PP)纤维的优选与协同效应

系统测试了0.9 kg/m^3 、1.2 kg/m^3 、1.5 kg/m^3 三种PP纤维(长度12mm,直径32 μm)掺量对材料B性能的影响。结果表明,1.2 kg/m^3 为最优掺量。在此配比下:早期(7d内)塑性收缩裂缝数量减少了72%。极限拉伸应变从2.45%提升至2.80%。对砂浆的工作性影响最小,稠度损失率<5%。PP纤维通过桥接作用阻止了微裂缝的扩展,与微胶囊的应力调节功能形成了良好的协同效应。

2.3 加速老化与实际服役寿命的关联性研究

2.3.1 Q-UV加速老化试验方案

参照ISO 4892-3标准,设定老化条件为:UV-A 340灯管,光照60°C/4h,冷凝50°C/4h,循环进行。分别在500h、1000h、1500h、2000h取样,测试其粘结强度、极限拉伸应变等关键指标。

2.3.2 关联模型的建立与验证

试验数据显示,粘结强度(S)随老化时间(t_a)的变化遵循对数衰减规律: $S = S_0 - k \ln(t_a)$ 。通过对2000h内数据的拟合,确定了材料常数k。进一步,通过与少量(因

时间限制)长达18个月的自然暴露试验数据对比,建立了加速老化时间(t_a)与南方地区实际服役年限(t_r)的换算关系:

$$t_r(\text{年}) = 0.032 * \ln(t_a(\text{h})) + 0.15$$

利用该公式,2000h的Q-UV老化相当于南方地区约5.2年的自然暴露。经验证,该模型对5年服役性能的预测误差为 $\pm 11.5\%$,满足工程应用对快速评估的需求。

3 结语

本研究聚焦南方湿热地区ALC填充墙填缝性能提升,经深入探究与材料优化得出结论:微观上,湿热循环使ALC条板孔隙壁现微裂缝、水化产物迁移再沉淀,界面过渡区弱化致宏观性能劣化;宏观上,ALC呈非对称性湿胀-干缩,有不可逆变形,湿热循环后抗折强度保留率低;界面性能方面,ALC-混凝土异质界面粘结强度衰减剧烈,构建的三因素粘结强度衰减模型预测精度高;材料优化上,开发出智能响应型填缝材料,提升填缝体系适应性与耐久性;评价方法上,建立多维度评价体系与定量换算模型。研究成果为南昌瑶湖七期等项目提供技术方案,对提升我国湿热地区装配式建筑质量与长期性能有重要推广价值和实践意义。

参考文献

- [1]赵旭.新型装配式轻质条板填充墙框架抗震性能有限元模拟分析研究[D].吉林建筑大学,2025.
- [2]吕伟.装配式混凝土框架-填充墙力学性能研究[J].砖瓦,2025,(04):42-45.
- [3]张大英,薛威林,孙露馨.装配式EPS混凝土低碳填充墙及结构性能研究[J].混凝土,2025,(04):223-226+235.
- [4]杨镜玄.装配式混凝土填充墙对框架结构抗震性能的影响研究[J].砖瓦,2025,(01):51-53.