

高原气候条件下建筑外墙保温系统耐久性研究

——以西藏为例

陈志雄, 李毛加

西藏藏青工业园投资股份有限公司, 西藏 拉萨 816000

DOI:10.61369/ETQM.2026050010

摘 要 : 西藏地区海拔颇高, 气压较低, 紫外辐射强烈, 昼夜温差悬殊且冻融循环频繁。在此环境下, 建筑外墙保温系统长期服役时, 材料老化、界面粘结强度降低、抗裂性能变差等耐久性问题极易出现, 考虑西藏典型气候参数和工程应用实际情况, 探究低气压、强辐射、温差循环耦合作用中保温材料孔结构的演变、导热系数的改变以及界面应力的重分布机制, 搭建起包含冻融保持率、紫外老化系数、粘结强度衰减率的耐久性评价体系, 同时提出适宜高原环境的材料选型与构造优化技术办法, 为高寒高原地区建筑节能体系的稳定运行提供理论依据。

关 键 词 : 高原气候; 外墙保温; 冻融循环; 紫外老化; 耐久性

Research on the Durability of Building Exterior Wall Insulation Systems under Plateau Climatic Conditions — A Case Study of Tibet

Chen Zhixiong, Li Maojia

Xizang Zangqing Industrial Park Investment Co., Ltd., Lasa, Xizang 816000

Abstract : Tibet is characterized by its high altitude, low atmospheric pressure, intense ultraviolet radiation, significant temperature variations between day and night, and frequent freeze-thaw cycles. Under such conditions, building exterior wall insulation systems are prone to durability issues such as material aging, reduced interfacial bonding strength, and deteriorated crack resistance during long-term service. Considering the typical climatic parameters and actual engineering applications in Tibet, this study explores the evolution of pore structure in insulation materials, changes in thermal conductivity, and the redistribution mechanism of interfacial stress under the coupled effects of low pressure, intense radiation, and temperature cycling. A durability evaluation system is established, incorporating freeze-thaw retention rate, ultraviolet aging coefficient, and bonding strength degradation rate. Additionally, material selection and structural optimization techniques suitable for plateau environments are proposed, providing a theoretical basis for the stable operation of building energy-saving systems in cold and high-altitude regions.

Keywords : plateau climate; exterior wall insulation; freeze-thaw cycle; ultraviolet aging; durability

引言

在“双碳”目标提出以及高寒地区节能建筑快速发展的背景下, 西藏等高原区域的建筑外围护结构面临着更为严峻的环境挑战, 低气压、强紫外辐射、显著昼夜温差与频繁冻融循环叠加, 让外墙保温系统长时间处于多场耦合作用的状态, 致使材料性能和界面稳定性加速下降, 目前的技术体系大多是基于温带地区的经验形成的, 无法充分体现高原气候条件下的耐久特性, 对气候作用原理和性能退化规律进行系统梳理, 构建适合高原环境的技术途径, 对于提高外墙保温系统服役的安全性和节能的可靠性有着重要的工程意义。

一、高原气候环境特征及其对外墙保温系统的影响机理

(一) 西藏地区气候参数特征分析

西藏地区海拔大多处于3500 ~ 4500米, 大气压一般为60 ~ 70千帕, 仅是平原地区的60% ~ 70%, 空气密度降低近

30%, 这对建筑外围护结构的热湿传递条件影响颇大, 这里年太阳总辐射量能达到5800 ~ 6500兆焦每平方米, 紫外辐射强度比内地高出20% ~ 35%, 年日照时数超2800小时, 冬季极端最低气温可降至零下25摄氏度^[1], 夏季日间表面温度能超40摄氏度, 单日温差普遍在15 ~ 25摄氏度, 部分高海拔区域超30摄氏度, 冻融循环次数因海拔与朝向不同处于50 ~ 120次, 个别寒冷区域超

150次；低气压、高辐射和大温差一同造就了高原地区独特的热环境边界条件，让外墙保温系统长期受反复热应力与湿度梯度变化影响^[2]。如表1所示。

表1 西藏典型高原气候环境参数统计

参数名称	数值范围	对比平原地区差异	工程影响
海拔高度	3500 ~ 4500 m	↑显著升高	低气压环境
大气压	60 ~ 70 kPa	↓约30%	孔结构稳定性下降
年太阳辐射量	5800 ~ 6500 MJ/m ²	↑20% ~ 35%	紫外老化加剧
昼夜温差	15 ~ 30 ℃	↑明显	热应力循环增强
年冻融循环次数	50 ~ 120次	↑1.5 ~ 2倍	冻融破坏显著

（二）高原气候对保温材料物理性能的影响机制

低气压环境下，闭孔类保温材料内部气体体积膨胀率增大，孔壁承受的拉应力增加，长此以往可能致使孔结构微裂纹扩展，材料导热系数从初始的0.035瓦每米开尔文升至0.038 ~ 0.040瓦每米开尔文，紫外辐射波长主要集中在290 ~ 400纳米区间，会对聚合物分子链产生光氧化作用，使抗拉强度下降10% ~ 25%，表层粉化厚度随辐照时间增长而增大，昼夜温差导致线膨胀系数有差异，EPS板与抹面砂浆线膨胀系数差值约为 $(3 \sim 5) \times 10^{-6}$ 每摄氏度，25摄氏度温差时界面剪应力可达0.08 ~ 0.12兆帕，接近部分粘结砂浆极限剪切强度。冻融循环时，材料含水率每增加1%，体积膨胀率约提升0.3% ~ 0.5%，50次循环后抗压强度保持率可能降至85%以下，界面粘结强度衰减幅度在15% ~ 30%^[3]。

（三）多因素耦合作用下系统耐久失效路径

高原气候条件下，紫外老化、温差循环与冻融作用相互叠加，材料表层在强辐射下产生微裂纹，刚开始裂缝宽度小于0.05 mm，经反复温差作用后逐渐扩展至0.1 mm以上，为水分渗入创造条件，夜间低温时含水层冻结，冰胀压力达2 ~ 5 MPa，超过部分抹面层抗拉强度，致使界面剥离，粘结层受湿热交替影响，粘结强度从0.15 MPa降至0.10 MPa以下，空鼓面积比例大幅增加，服役周期内耐久性能呈非线性衰减，前3年变化较缓，5 ~ 10年衰减加快，最终形成“老化—裂缝—渗水—脱落”的渐进式失效模式，对高原地区建筑节能体系稳定性构成长期威胁^[4]。如图1所示。

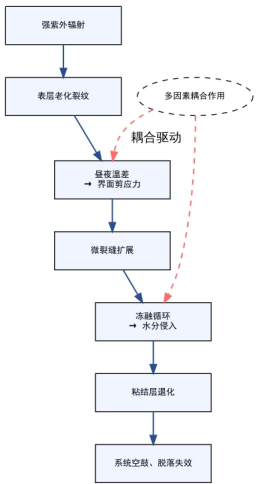


图1 高原气候多因素耦合作用下外墙保温系统失效路径示意图

图1 高原气候多因素耦合作用下外墙保温系统失效路径

二、高原气候条件下外墙保温材料性能衰减规律分析

（一）有机保温材料耐久性特征

聚苯板（EPS）、挤塑聚苯板（XPS）这类有机保温材料多为闭孔结构，孔隙率一般在90%以上，初始导热系数处于0.030 ~ 0.040 W/(m · K)范围，体积密度为15 ~ 35 kg/m³，抗拉强度约0.10 ~ 0.20 MPa，在海拔3500 m以上地区，紫外辐射强度能达到600 ~ 800 W/m²，材料表层在290 ~ 400 nm波段光照下发生光氧化反应，自由基生成速度加快，分子链断裂加剧，造成表层模量降低和微裂纹产生，累计辐照1000 h后，表层粉化厚度可达0.3 ~ 0.8 mm，抗拉强度降低10% ~ 25%，冲击韧性下降约15%，低气压环境中，闭孔内部气体压强差异变大，孔壁长期承受附加拉应力，孔径分布从原来的0.1 ~ 0.3 mm扩展至0.3 ~ 0.6 mm，微裂纹密度增加约20%，冻融循环时，材料吸水率从1% ~ 2%上升到3% ~ 5%，循环100次时，导热系数增幅达5% ~ 12%，压缩强度保持率降至85%以下，孔结构塌陷与热工性能退化同步出现，保温体系稳定性随时间推移明显减弱^[5]。

（二）无机保温材料抗冻与抗裂性能

岩棉、泡沫玻璃这类无机保温材料于紫外辐射环境中化学稳定性佳，几乎不出现光降解现象，其导热系数处于0.040 ~ 0.055 W/(m · K)范围，体积密度大多在100 ~ 180 kg/m³之间，岩棉纤维直径为4 ~ 7 μm，抗拉强度在0.07 ~ 0.15 MPa，纤维依靠树脂或无机粘结剂相连构成多孔结构。若材料含水率超出8% ~ 10%，孔隙内冻结会致使体积膨胀，冰胀压力能达到2 ~ 4 MPa，对纤维连接界面造成剪切破坏，使得纤维断裂率升高，经过50次冻融循环，抗压强度保持率约为85% ~ 90%，循环100次后或许会降至80%以下，且厚度膨胀率会增加0.5% ~ 1.0%。泡沫玻璃孔径多在0.5 ~ 2.0 mm，吸水率低于0.5%，抗压强度为0.7 ~ 1.5 MPa，冻融100次时强度保持率可维持在90%上下，然而与基层的界面区域仍会受温差应力影响产生细微裂缝，裂缝宽度会从0.05 mm逐渐扩展至0.10 mm以上，成为潜在渗水通道，对整体系统耐久性产生影响。

（三）粘结与抹面层界面耐久性能

粘结砂浆抗拉粘结强度一般为0.10 ~ 0.20 MPa，抗压强度8 ~ 15 MPa，弹性模量6 ~ 10 GPa，抹面抗裂砂浆厚度多是3 ~ 5 mm，在高原地区昼夜温差达20 ~ 30 ℃的条件下，混凝土基层线膨胀系数约 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，EPS板约 $6.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，这种差异引发的界面剪应力幅值可达0.08 ~ 0.12 MPa，经过100次反复热循环，粘结层内部会产生疲劳微裂纹，当界面粘结强度从初始的0.15 MPa降至0.10 MPa以下，空鼓面积比例会显著增加，抹面层在干湿交替和温差作用下干缩应变约为 $200 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ ，裂缝宽度会从小于0.05 mm扩大到0.10 ~ 0.20 mm，裂缝密度提高30% ~ 50%，水分沿裂缝渗入后，界面含水率升至6% ~ 8%，粘结强度进一步衰减10% ~ 20%，在冻融循环叠加情况下会形成剥离与脱落风险，界面区域从微裂缝发展成贯通裂缝通常要历经5 ~ 8年的阶段性演化过程，耐久失效呈现累积加速的特征，这一过程中多种因素相互作用，对保温系统的长期性能有着复杂而深

远的影响^[6]。如表2所示。

表2 高原环境下不同保温材料性能衰减对比				
材料类型	初始导热系数 W/(m·K)	100次冻融后 导热系数增幅	抗压强度保 持率	吸水率变化
EPS	0.035	+8%~12%	80%~85%	1%→5%
XPS	0.030	+5%~9%	85%~90%	1%→3%
岩棉	0.045	+3%~6%	80%~90%	5%→10%
泡沫玻璃	0.050	+2%~4%	90%以上	≤0.5%

三、高原地区外墙保温系统耐久性评价指标体系构建

（一）冻融循环耐久性评价指标

考虑到西藏地区年冻融循环次数处于50~120次的气候特点，耐久性评价可借助快速冻融循环试验来做等效模拟，试验温度范围控制在-20℃~20℃，单次循环周期为4~6h，循环次数设为50次、75次、100次三个级别，评价指标涵盖抗压强度保持率、拉伸粘结强度保持率、质量损失率以及表面裂缝发展状况，抗压强度保持率用循环前后强度比值体现，若低于85%就判定耐久性不足，拉伸粘结强度保持率低于80%时界面稳定性等级会降低。

（二）紫外老化与热循环耦合试验方法

高原紫外辐射强度能达到600~800W/m²，在耐久评价里紫外辐照试验采用波长290~400nm区间光源，辐照强度设定在0.60~0.80W/(m²·nm)，累计辐照时间1000~2000h，以此模拟3~5年自然暴露效果，热循环试验温度范围设置为-25℃~60℃，单循环时间6~8h，循环次数不少于100次，在耦合试验过程同步测定导热系数变化率、体积吸水率和拉伸粘结强度保持率，当导热系数增幅超过10%、拉伸粘结强度保持率低于85%时，耐久等级需下调一级，依据这些参数可构建A、B、C三级耐久性划分标准，其中A级要求1000h紫外老化后性能保持率不低于90%^[7]。

（三）全寿命周期性能衰减模型构建

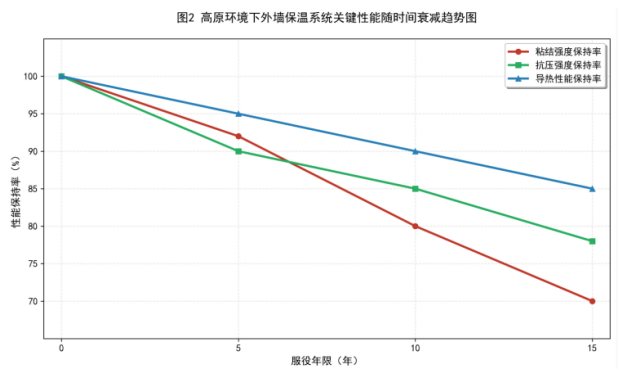


图2 高原环境下外墙保温系统关键性能衰减曲线

结合西藏地区气候数据和材料性能测试结果，能够构建服役年限t和关键性能指标P之间的衰减函数模型，其形式可用指数型或者分段线性模型呈现，以导热系数λ(t)来说，可设λ(t)=λ₀(1+αt)，其中α取值范围是0.005~0.015/年，粘结强度衰减函数可表示成τ(t)=τ₀e^{-βt}，β取值0.03~0.06，按

照典型参数计算，服役10年时导热系数增幅可能达8%~12%，粘结强度保持率降至75%~85%，到15年阶段衰减速率有加快趋势，通过构建性能—时间曲线，能够确定设计耐久年限以及维修干预节点，当关键性能指标接近下限值（像粘结强度0.10MPa）时启动维护策略，达成全寿命周期风险控制。如图2所示。

四、适应西藏高原气候的外墙保温系统构造优化与技术路径

（一）材料选型与性能提升技术

高原强紫外辐射与频繁冻融循环耦合作用环境下，保温材料选型得兼顾低吸水率、高尺寸稳定性和抗老化性能，体积吸水率最好控制在2%以下，尺寸变化率不超过0.3%，导热系数不高于0.040W/(m·K)，如此才能保障长期热工性能稳定。有机类材料可选用添加抗氧化剂和紫外稳定剂的改性EPS或XPS产品，氧指数不低于30%，经1000h紫外辐照后抗拉强度保持率不低于90%，导热系数增幅不超过5%，通过闭孔率不低于95%的结构控制降低水分渗入风险。无机类材料像高密度岩棉，憎水率应不低于98%，体积密度控制在120~160kg/m³，以此增强抗风压和抗冲击性能，冻融50次后抗压强度保持率最好不低于90%，粘结砂浆要有抗冻融性能，冻融循环50次后粘结强度保持率不低于85%，弹性模量控制在5~8GPa，从而减少界面热应力集中。

（二）构造节点优化设计

高原地区昼夜温差大且风压作用显著，节点部位成了耐久性的薄弱处。女儿墙压顶和窗洞口四周要设置附加防水层，防水涂膜厚度不低于1.5mm，搭接宽度不小于100mm，阴阳角部位用双层耐碱玻纤网格布增强处理较好，单位面积质量不低于160g/m²，两层搭接宽度不少于100mm，进而提高抗裂和抗冲击力，外墙立面长度超20m时设置垂直伸缩缝为好，缝宽10~20mm，内填弹性密封材料以释放温差应力集中，屋面与外墙交接部位增加泛水构造，坡度不低于2%防止融雪水倒流渗入保温层，高层建筑保温板锚固件数量每平方米宜不少于6个，单个锚栓抗拉承载力不低于0.6kN以增强系统整体抗风稳定性^[8]。

（三）施工质量控制与运维管理措施

高原地区的外墙保温系统耐久性能深受施工质量和后期管理影响，施工阶段需把控基层含水率在10%以内，基层平整度偏差控制在4mm/2m以内以保障界面受力均匀，粘贴前涂刷界面剂且界面拉伸粘结强度达0.30MPa以上，保温板施工采用点框法或满粘法，有效粘结面积50%~60%，板缝宽度≤2mm，错缝搭接长度≥1/2板长防止热桥，锚固件每平方米≥6个（风压大区域8个/m²），埋入深度≥30mm，施工后开展拉拔试验（抽检≥1%，拉拔力≥1.2设计值），抹面层环境温度5~35℃、相对湿度≤85%，避免强紫外直射，运行阶段每2~3年红外热像检测（灵敏度≤0.05℃），识别空鼓渗水区域，若空鼓超5%或裂缝≥0.20mm需修复，规范施工并维护可延长寿命提升稳定性。

五、结语

西藏高原地区低气压强紫外及大温差等气候特点，对外墙保温系统耐久性提出更严苛要求。围绕材料性能衰减原理、界面失效途径及多因素耦合规律，构建适应高原环境的耐久性评价指标

体系，提出针对性材料选型、节点优化及施工控制方案。借助全寿命周期性能预测与风险控制，可延缓系统性能退化，增强结构安全与节能稳定，为高寒高原建筑围护结构技术体系完善提供工程参考。

参考文献

[1] 郑伟, 时文东, 杜文明. 新型保温材料改善建筑外墙保温效果设计方案探讨 [J]. 新城建科技, 2024, 33(12): 37–39.

[2] 赵永杰, 江爱玲. 建筑保温材料的研发趋势与应用分析 [J]. 居舍, 2025, (01): 63–65+72.

[3] 吕美样, 周建宏, 陈涛, 等. 装饰一体板在建筑外墙保温中的应用研究 [C]//《施工技术》杂志社. 2024 年全国土木工程施工技术交流会论文集 (上册). 中建二局第二建筑工程有限公司; 2024: 754–757.

[4] 钟新. 吉林省教育类建筑 A 级外墙保温体系应用策略研究 [D]. 长春工程学院, 2024.

[5] 李琳. 基于 BIM 的绿色建筑外墙节能保温施工技术 [J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(12): 74–76.

[6] 张泽文. 房屋建筑中外墙保温系统的节能技术研究 [J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(12): 89–91.

[7] 罗航. 外墙保温技术在绿色建筑设计中的应用研究 [J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(12): 160–162.

[8] 王澄瑜, 谭渊文, 王华丽. 保温节能施工技术在土建建筑外墙施工中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024, (23): 260–262.