

超低能耗建筑围护结构保温施工工艺优化与节能效益研究

史 峰

临清市历史文化名城保护服务中心 山东 临清 252600

【摘 要】：本文针对超低能耗建筑围护结构保温施工中存在的质量通病，系统研究外墙、屋面与地下室、门窗及热桥阻断与气密性四个方面的施工工艺优化措施，提出具体可操作的施工技术要点。通过构建节能效益评估指标体系，结合模拟与实测方法对优化效果进行评估。案例表明，优化后的施工工艺可使建筑供暖能耗降低 70%，具备显著节能效益，为超低能耗建筑施工提供技术参考。

【关键词】：超低能耗建筑；围护结构；保温施工工艺

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.014

引言

随着双碳目标推进和建筑节能要求不断提高，超低能耗建筑成为绿色建筑发展的重要方向。围护结构保温施工质量直接决定建筑能效目标的实现程度，当前施工中存在保温层粘贴不牢、热桥处理不到位、气密性不达标等问题，导致实际能耗与设计目标存在差距。本文系统研究围护结构保温施工工艺优化措施，构建节能效益评估体系，为提升施工质量提供技术支撑。

1 超低能耗建筑围护结构保温施工工艺简介及现存问题

超低能耗建筑围护保温施工是实现建筑低能耗设计的关键工序，作业依托高性能保温、高气密控制、弱化热桥三类技术要求完成外墙、屋面、门窗、地下室一体化保温构造。GB/T51350-2019 划定寒冷地区居住建筑外墙、屋面传热系数区间 $0.10 \sim 0.20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ，标准对施工精度管控设置严格约束。现场施工普遍留存工艺缺陷，保温板粘贴有效面积达不到设计要求，板缝粗放处理催生线性热桥，门窗洞口尺寸偏差削弱隔汽、透汽膜贴合效果，阴阳角、管井节点保温厚度不足放大局部热桥。超厚保温分层铺贴错缝尺寸管控疏漏，玻纤网搭接宽度偏离规范，抹面结构频发开裂脱落，建筑气密检测数据无法达标，实际运行能耗和前期设计指标形成显著落差^[1]。

2 超低能耗建筑围护结构保温施工工艺优化措施

2.1 外墙保温施工工艺优化

外墙保温正式施工前需要完成基层墙体的精细化处理作业，彻底清理墙面附着的浮灰、油污、脱模剂等杂物，对墙体表面蜂窝麻面、细微裂缝等缺陷进行修补处理，墙体每两米区间内平整度偏差需要控制在 3mm 以内。基层整改完毕后均匀涂刷界面剂材料，强化粘结砂浆与墙体基层的结合强度，保证界面剂涂刷覆盖面完整、无漏涂区域，待涂层达到表干状态后推进后续施工工序。施工人员需要结合建筑外立面实际尺寸完成保温板预排版作业，绘制专属排版图纸，明确标准板材安装位置与非标板材现场切割方案，有效控制施工现场材料裁切损耗。

保温板裁切作业选用专用电热丝切割设备，保障板材切口平整顺直，裁切尺寸偏差稳定在 $\pm 1.5 \text{ mm}$ 范围内。保温板采用双层错缝铺贴的施工方式，第一层板材依托点框法完成粘贴作业，有效粘结面积不低于 60%，第二层板材采用满粘工艺施工，粘结面积可达到 90% 以上。上下两层板材拼接缝隙相互错开，错缝距离不小于板材三分之一长度且最低不低于 200mm，杜绝竖向通缝结构形成。板材粘贴作业遵循自下而上的施工顺序，单块板材之间紧密拼接，缝隙宽度严控在 2mm 以内，超宽缝隙采用同材质保温条填充密实，禁止直接使用砂浆封堵缝隙。

板材粘贴作业全程采用两米靠尺实时核验墙面平整度，墙面两米区间内平整度偏差不得超过 3mm，保障保温层整体成型效果。DB11/T2377-2024《北京市超低能耗公共建筑节能工程施工及验收规程》明确超厚保温结构必须采用分层施工模式，单层保温构造厚度不宜超过 100mm。保温板粘贴作业完成 24 小时后开展机械固定件安装作业，配套使用断热桥型锚栓，锚栓钻孔深入基层墙体深度不小于 50mm，锚栓圆盘完全嵌入保温板面，保持板面平整无凸起结构^[2]。板材粘贴 48 小时后开展抹面层施工，抹面胶浆分两次涂刷成型，首层涂刷厚度控制在 2mm 左右，胶浆湿润状态下压入耐碱玻纤网布，网布搭接宽度不低于 100mm，墙体阴阳角位置增设 200mm 宽加强网结构，第二层抹面胶浆涂刷厚度约 1mm，整体抹面层厚度稳定在 3mm 至 5mm 区间。

2.2 屋面与地下室保温施工工艺优化

屋面选用倒置保温构造，保温层铺设于防水层上部，材料受潮失效问题得到规避。基层清理后浇筑 2%~3% 坡度找坡层，水泥膨胀珍珠岩、轻集料混凝土为常用原料，找坡层最薄部位厚度 30mm。结构干透铺设隔汽层，聚乙烯丙纶卷材、聚氨酯涂料均可作为施工原料，卷材搭接宽度 100mm，整体构造无断裂缺口。隔汽层验收合格铺设 SBS 或自粘聚合物防水卷材，防水层完工完成 24 小时蓄水渗漏测试，无渗水痕迹再铺设保温板材。屋面大面积区域保温板采用干铺、点粘施工，天沟、檐口等狭小边角实施满粘固定，板材无松动移位。

分层铺设保温板保持上下层缝隙错开，最小错缝距离

50mm, 拼接缝隙填充同质保温材料。寒冷地区屋面传热系数执行 $0.10\sim 0.20\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 标准, 各地域可依照气候分区调整限值。保温层完工浇筑 40mm 细石混凝土保护层, 内部配置 4mm 直径、150mm 间距双向钢筋网抑制表层开裂, 保护层划分分格区域, 单块面积不超 36m^2 , 20mm 宽缝填充密封膏。见图 1

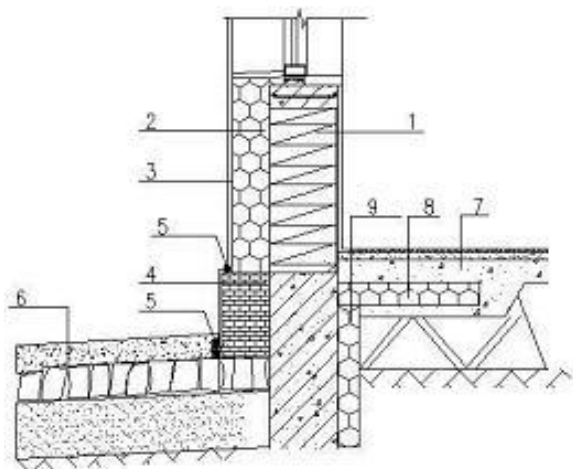


图 1 地下室外墙与底板保温构造节点图

地下室保温覆盖顶板、外墙、底板, 顶板粘贴挤塑聚苯板, 材料导热系数不高于 $0.028\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 抗压强度最低 250kPa。地下室外墙保温板粘贴在防水层外侧, 板缝灌注密封胶维持保温层连续完整。底板保温板材干铺垫层表层, 拼接缝粘贴密封胶带, 上方浇筑钢筋混凝土结构层。阴阳角增设 200mm 宽玻纤加强网, 转角圆弧半径设置 50mm, 削弱应力集中带来的开裂病害。施工缝两侧增设 250mm 宽防水加强层, 地下空间防水、保温工序同步统筹管控。

2.3 门窗保温施工工艺优化

门窗选用外挂安装方式, 窗框贴近外墙外侧和保温层齐平, 保温构造完整包裹窗框周边, 削弱窗框部位热桥^[3]。安装前复核洞口尺寸, 整体偏差控制 $\pm 5\text{mm}$, 框体与洞口间隙均匀。进场门窗完成外观查验与性能抽检, 型材、中空玻璃、五金配件核对设计参数, 重点检查密封胶条完整性, 排查玻璃内部起雾结露缺陷。配套附框选用聚氨酯、木塑断热桥材料, 四周预埋定型固定件, 构件距附框端头 150mm 以内, 排布间距不超过 500mm, 自攻螺丝将构件固定于附框铝方管空腔。

附框安装完成开展隐蔽验收, 位置、固定方式、周边密封均达标后安装窗框。不锈钢、防腐镀锌钢板连接件连接框体与附框, 排布间距 600mm, 四角位置加密增设连接件。框体与墙体空隙填充聚氨酯发泡剂, 填充层饱满无断点空鼓, 固化后切除多余发泡材料, 表层打密封胶收平。框扇间等压胶条、室外耐候硅酮胶、室内中性硅酮胶构成三道密封体系, 外窗整体传热系数控制在 $1.0\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 以内。

气密膜施工决定门窗保温气密效果, 室内防水隔汽膜同时覆盖窗框与墙体, 搭接宽度 50mm, 气密层无断开点位。室外

透汽膜铺贴标准和室内统一, 膜体平整无褶皱气泡, 转角做成圆弧避免拉扯撕裂。保温预制窗台表层做防水处理, 5%排水坡度保障雨水快速排走。门窗全部安装完毕调试启闭功能, 核查开合顺畅度、闭合密封性与五金锁紧效果, 各项指标匹配设计文件要求。

2.4 热桥阻断与气密性施工工艺优化

热桥阻断施工贯穿围护结构整体施工周期, 施工管控重点集中在梁柱节点、门窗洞口、管线穿越墙体、锚固件安装等热桥高发区域。建筑结构梁柱外侧采用保温层全包覆施工方式, 保温层连续包覆梁柱构件外部, 避免结构构件直接外露产生点状、线性热桥缺陷。DB21/T 4385-2026《辽宁省超低能耗建筑设计标准》规定建筑线性热桥系数 ψ 不得超过 $0.01\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 女儿墙、建筑挑檐、空调板等外挑结构全部采用保温材料全包覆处理, 保温层连续翻包宽度不小于 200mm, 有效抑制热桥产生。保温层固定作业选用断热桥型锚栓, 锚栓圆盘采用尼龙材质, 金属钉体与保温层之间增设隔热垫片, 降低金属构件的热量传导效率。

锚栓布设密度结合风压计算, 每平方米不少于 6 个, 墙体边角点位加密增设。门窗固定配件选用断桥、尼龙材质, 金属构件不穿透保温层形成导热通道。穿墙管线配套保温套管, 缝隙填充保温材料搭配密封胶封堵, 气密构造保持连贯。气密层搭建依托气密膜、专用石膏板、气密抹灰层三类材料, 所有管线、设备孔洞在气密施工前预留完毕, 穿越位置使用密封构件封堵, 空气渗透通道全部阻断。接线盒、开关插座装配气密盒或周边涂抹气密封胶, 门窗缝隙、墙楼板交接、墙体转角等薄弱区域增设密封胶带、加厚密封胶强化密闭性能。施工结束使用鼓风门法检测气密性, 50Pa 压差环境采集空气渗透数据, 建筑换气次数 $n_{50}\leq 0.6\text{次}/\text{h}$ 。检测前期封堵临时预留洞口, 风机分别生成正、负压工况, 记录多组压差流量数值核算换气指标。渗漏点位借助红外热成像、烟雾试验定位修补, 围护主体完工、装修竣工分两次气密检测, 全流程把控建筑气密性能。

3 超低能耗建筑围护结构保温施工节能效益评估

3.1 节能效益评估指标体系设计

节能效益评估指标体系划分成直接节能效益、间接节能效益两大板块, 直接节能效益指标围绕围护结构保温施工改造带来的能耗削减效果设置, 核心包含年节能量、单位面积节能量、节能率三类基础参数^[4]。年节能量体现超低能耗建筑相较于普通参照建筑的年度能耗削减额度, 计量单位可采用千瓦时或千克标准煤。单位面积节能量为年节能量与建筑总面积的换算比值, 计量单位为 $\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 可适配不同规模建筑的节能效果横向对比工作。节能率通过节能量与参照建筑基础能耗的比值核算, 直观体现建筑节能改造的相对成效。间接节能效益从碳减排数值、环境品质提升、室内热环境优化三个维度设定评

估参数,碳减排量依托节能数值结合电网排放因子、标准煤碳排放系数核算得出,环境效益通过污染物减排量化指标体现,室内热环境质量依托室内温度稳定性、围护结构内表面温度均匀性等参数综合评判。经济指标作为效益评估的补充内容,涵盖增量投资成本、年度节能收益、静态投资回收期等参数,可用于判定保温施工优化方案的经济可行性。

3.2 节能效益评估方法筛选与模型构建

节能效益评估手段主要分为模拟计算、现场实测两类,具体应用可结合项目建设阶段与数据获取条件灵活调整。建筑设计阶段优先采用能耗模拟法,依托 DeST、EnergyPlus 等专业能耗模拟软件,分别搭建超低能耗建筑模型与常规参照建筑模型,导入对应气候区典型气象年基础数据,模拟运算建筑全年采暖、制冷能耗数据,对比核算围护结构保温工艺优化产生的节能数值。DBJ33/T1288-2022《民用建筑项目节能评估技术规范》要求节能评估工作采用动态能耗模拟方式,保障评估结果的精准度。建筑施工完成后采用现场实测方式核验节能效果,热通量仪可现场测定外墙、屋面围护结构传热系数,完成实测数据与设计参数的对标核验。鼓风机设备用于检测建筑整体气密性,获取 n50 换气次数核心指标,红外热像仪可扫描识别建筑热桥分布状态,判定热桥阻断施工质量。经济效果评估采用静态投资回收期计算模型,通过增量投资成本与年度节能收益的比值完成核算,净现值、内部收益率等动态评估参数可根据需求补充引入,结合资金时间价值完成全方位效益分析。评估模型搭建需要明确边界条件,统一参照建筑能耗基准与计算标准,保障评估数据的科学性与可对比性。

参考文献:

- [1] 魏燕丽,许锦峰,吴志敏,高浩然.某超低能耗办公建筑高性能围护结构实践分析[J].新型建筑材料,2025,52(11):7-1017.
- [2] 李国经,杨杰,宋佳峰,王鹏程.某项目超低能耗住宅围护结构施工技术要点研究[J].建筑技术开发,2025,52(12):141-144.
- [3] 陈宏瑞,王磊,栾彩云,李宁,王菁,贾资茂.青岛市超低能耗装配式建筑围护结构技术研究[J].混凝土世界,2025(5):42-47.
- [4] 李贵宾.基于装配式结构体系的被动式超低能耗建筑施工技术[J].石材,2025(3):157-159.
- [5] 钱卉.外保温结构对超低能耗住宅建筑暖通设计的影响分析[J].新材料·新装饰,2025,7(4):73-76.

3.3 节能效益评估案例与启示

淄博市临淄区某恒温住宅项目采用标准化超低能耗围护结构保温施工工艺,建筑外墙保温厚度设置为 200mm,屋面保温厚度设置为 250mm,外窗选用三玻两腔 Low-E 中空玻璃构件。依托淄博市建筑节能监测平台 2024 年 11 月至 2025 年 3 月供暖季监测数据,项目年度供暖能耗实测数值为 6.7kgce/m²,相较于当地传统砖混住宅 22.3kgce/m²的能耗水平,能耗削减比例达到 70%,实测结果与设计预期保持一致。项目总建筑面积 10 万平方米,单供暖季可节约标准煤 1560 吨,对应年度节电总量 1360 万千瓦时,年度节能经济效益约 1000 万元。福州地区某超低能耗建筑实测数据显示,建筑单位面积年节能量可达 66.99kWh/m²,年度电费节约额度 73.21 万元,单位面积年度节能收益接近 23 元/m²。各类工程实践能够总结出多项行业应用经验,围护结构保温施工质量直接决定建筑节能设计指标的落地效果,工艺优化与质量管控需要贯穿施工全流程。节能效益评估工作需要结合模拟预判与现场实测,保障评估数据贴合建筑实际运行状态。超低能耗建筑建设阶段增量投资成本偏高,但长期运行阶段节能收益稳定,项目静态投资回收期普遍处于 8 至 12 年区间,具备优异的长期经济价值与生态环保价值^[5]。

4 结语

本文系统提出超低能耗建筑围护结构保温施工工艺优化方案,涵盖外墙、屋面与地下室、门窗及热桥阻断与气密性四个关键环节,明确具体施工要点与质量控制标准。案例验证表明,优化后的施工工艺可显著降低建筑能耗,节能效益和环境效益显著。研究成果可为超低能耗建筑施工提供技术参考,对推动建筑节能降碳具有重要意义。