

# 被动式超低能耗建筑研究

文 / 王海银 济南文旅集团产业投资有限公司

**摘要：**在全球应对气候变化与我国“双碳”目标的双重驱动下，建筑行业的绿色转型迫在眉睫。被动式超低能耗建筑通过整合高性能围护结构、高效能源回收与可再生能源利用等技术，形成了区别于传统建筑的全新技术体系。本文系统解析其核心技术原理与设计策略，为推动该建筑模式从示范应用走向规模化发展提供理论支撑与实践路径。  
**关键词：**被动式建筑；超低能耗；绿色建筑；技术体系；可持续发展

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.036

## 引言

建筑行业作为全球能源消耗与碳排放的重要领域，其运行阶段能耗占社会总能耗的40%以上，传统建筑依赖空调、供暖等主动设备的高能耗模式，已难以适应低碳发展需求。被动式超低能耗建筑理念起源于20世纪末的欧洲，其核心思想是通过建筑本体性能优化，最大限度降低对机械制冷供暖设备的依赖，从而实现“超低能耗、高舒适度”的双重目标。我国自2010年引入该技术以来，经历了从技术引进、本土化改良到自主创新的发展阶段，在京津冀、长三角等地区建成一批示范项目，展现出显著的节能效益与环境价值。然而，该建筑模式在技术集成复杂度、建造成本与地域适应性等方面仍面临诸多挑战，亟需从技术体系、政策支持与产业生态等维度展开系统性研究。

### 一、被动式超低能耗建筑核心技术体系

#### （一）高性能围护结构构建技术

##### 1. 复合保温体系设计原理

围护结构作为建筑与外界环境的热缓冲层，其保温隔热性能直接决定建筑能耗水平。被动式建筑采用“保温层+结构层+防护层”的复合构造，其中保温材料需满足极低导热系数要求，如真空绝热板、气凝胶毡等新型材料的导热系数较传统聚苯板降低60%以上。外墙保温层厚度根据气候区差异进行动态调整，在严寒地区通常达到常规建筑的2-3倍，通过连续不间断的保温层覆盖，配合断热桥处理技术，将结构性热桥的热损失降低90%以上。门窗作为围护结构的薄弱环节，采用多腔体断热桥型材搭配三层中空Low-E玻璃，玻璃间隔层填充惰性气体（如氩气），使整窗传热系数较普通铝合金窗降低70%，有效阻断室内外热传导路径。

##### 2. 气密性强化技术要点

建筑气密性不足会导致冷风渗透能耗占比超过30%，被动式建筑通过系统化密封工艺解决这一问题。在设计阶段，采用三维建模技术识别门窗洞口、穿墙管线、阳台连接处等潜在漏风点；施工阶段，使用气密性隔汽膜、密封胶条等材料对节点进行密封处理，配合红外成像检测技术进行气密性验收，确保建筑在50Pa压差下的换气次数控制在极低水平。这种“全包裹式”密封设计，不仅减少了冬季热量流失，更避免了夏季湿热空气渗入导致的墙体结露问题，延长了建筑使用寿命。

## （二）能源回收与环境调控系统

### 1. 全热回收新风系统运行机制

新风系统是被动式建筑实现室内环境品质控制的核心设备，其工作原理是通过高效热交换芯体，在引入室外新鲜空气与排出室内污浊空气的过程中进行能量交换。冬季运行时，排风将自身携带的热量传递给新风，使新风温度提升至接近室内温度；夏季则反向运行，新风通过预冷处理降低空调负荷。该系统配备智能变频控制模块，可根据室内人员密度、CO<sub>2</sub>浓度自动调节风量，在保证每人每小时30立方米新风量的基础上，将通风能耗控制在传统建筑的1/3以下。配合湿度控制与PM2.5过滤功能，实现“恒温、恒湿、恒氧、恒净”的室内环境。

### 2. 可再生能源耦合技术路径

被动式建筑通过“被动优先、主动优化”原则整合可再生能源，形成多能互补的能源供应体系。在太阳能资源丰富地区，采用建筑光伏一体化（BIPV）技术，将光伏组件嵌入屋面或立面，所发电量除满足照明、设备用电外，可驱动热泵系统运行；地源热泵利用地下土壤恒定的温度场，通过埋管换热器实现冬季供热与夏季制冷，其能效比（COP）可达4.5以上，较空气源热泵节能30%；在缺乏深层地热资源的区域，空气源热泵结合高效热回收技术，可在-20℃环境下稳定运行，弥补传统热泵低温效率衰减问题。多种技术的协同应用，使建筑可再生能源利用率普遍达到50%以上。

## （三）气候适应性设计策略

### 1. 严寒地区保温与蓄热平衡

针对严寒地区漫长的供暖期，被动式建筑采用“超厚保温+高效蓄热”复合策略。外墙保温层厚度突破常规建筑限制，配合相变材料墙体，在白天吸收太阳辐射热量并储存，夜晚缓慢释放以维持室内温度；窗墙比控制在0.3以下，南向窗户采用低遮阳系数玻璃增强得热，北向则使用高保温性能窗减少散热。这种设计使建筑在无主动供暖情况下，室内温度波动范围可控制在3℃以内。

### 2. 夏热冬冷地区通风与隔热优化

在气候过渡区，被动式建筑通过动态遮阳系统与自然通风模拟提升夏季舒适性。外遮阳装置采用电动可调百叶，可根据太阳高度角实时调节，在阻挡直射阳光的同时保留散射光；建筑平面设计为南北通透布局，利用

中庭、拔风井形成热压通风通道，结合门窗开启策略，使室内风速在夏季达到 0.5-1.0m/s，实现“无空调”环境下的自然降温。屋面采用反射隔热涂料，降低太阳辐射吸收系数，配合架空通风层设计，进一步减少屋顶得热。

## 二、被动式超低能耗建筑设计关键要素

被动式超低能耗建筑的设计是一项融合建筑物理、环境控制与工程技术的系统性工程，其核心在于通过精细化设计将建筑本体性能发挥到极致。除技术体系的核心支撑外，建筑形态优化、材料部品创新与数字化工具应用构成了设计实践的三大关键维度，三者相辅相成，共同决定了建筑能耗水平与使用品质。

### （一）建筑形态与空间布局优化

#### 1. 体型系数控制的深层逻辑与形态创新

建筑体型系数 (S/V) 作为外表面积与体积的比值，直接反映了建筑与外界环境的热交换效率。被动式建筑将其严格控制在 0.3 以下，这一指标的背后是对“紧凑形态优先”设计原则的贯彻：通过减少建筑外表面积，可使单位体积的散热损失降低 40%-50%。在实践中，建筑师常采用“立方体原型衍生”策略，避免复杂的曲面造型与过多的凹凸变化，如将建筑轮廓简化为接近球体的几何体——因球体的体型系数最小，仅为 0.2 左右，能最大限度减少散热。对于多栋建筑组合，通过行列式布局形成南北向走廊，不仅降低单栋建筑的体型系数，更利用建筑群之间的风道效应强化自然通风，这种布局在夏热冬冷地区可使夏季室内风速提升 20%-30%。

#### 2. 朝向与窗墙比的动态平衡设计

朝向设计遵循“太阳能利用最大化、不利辐射最小化”原则：南北向立面作为主要得热面，窗墙比提升至 30%-40%，并采用高透光率 Low-E 玻璃（透光率 > 70%），使冬季太阳辐射得热占建筑供暖负荷的 30%-40%；东西向立面则严格控制开窗面积（窗墙比 ≤ 20%），并通过深挑檐（挑出长度 ≥ 1.5 米）、垂直遮阳板或绿化遮阳等手段，将夏季早晨与傍晚的低角度阳光遮挡率提升至 80% 以上。这种差异化设计在哈尔滨某项目中成效显著：南向房间冬季平均室温较北向高 3-5℃，而东西向房间夏季室内温度较无遮阳设计降低 4℃，避免了“向阳面过热、背阴面过冷”的传统建筑弊端。

### （二）材料选择与部品集成

#### 1. 高性能材料的技术突破与国产化进程

被动式建筑对材料的性能要求远超传统建筑：外墙保温材料需满足导热系数 ≤ 0.03W/(m·K)（如气凝胶复合保温板，导热系数低至 0.013W/(m·K)），且具备抗老化、防火 A 级性能；门窗玻璃需同时实现高透光率与低辐射率（辐射率 ≤ 0.1），三层中空玻璃的间隔层宽度扩展至 20mm 以上，填充氩气等高密度惰性气体，使整窗传热系数突破 0.8W/(m²·K) 瓶颈。经过“十二五”“十三五”国家科技计划攻关，国产材料已实现从依赖进口到全球领先的转变：山东某企业研发的真空绝热板，厚度仅 30mm 即可达到传统 100mm 聚苯板的保温效果，且

耐候性通过 8000 小时老化测试；浙江企业生产的断热桥铝型材，采用 PA66-GF25 隔热条（导热系数 ≤ 0.3W/(m·K)），结合多腔体结构设计，使型材传热系数降至 1.2W/(m²·K)，达到欧盟 EN12608 标准最高等级。

#### 2. 部品集成的工业化生产模式创新

部品集成化设计打破了传统建筑“现场堆砌”的建造方式，通过“设计标准化-生产工厂化-安装模块化”流程，实现被动式建筑的高效建造。在门窗部品中，采用“整窗预制”技术，将玻璃、型材、五金件在工厂完成密封组装，现场安装误差控制在 1mm 以内，较传统施工精度提升 5 倍；保温墙体采用“三明治”预制墙板，中间层为高效保温材料，内外层为混凝土保护层，出厂前完成气密性检测，现场通过螺栓连接即可实现 95% 以上的节点密封率。这种模式在河北高碑店“被动房产业园”得到典型应用：单栋住宅的施工周期从 180 天缩短至 120 天，人工成本降低 40%，且部品质量缺陷率从传统施工的 15% 降至 3% 以下。更重要的是，集成化部品为建筑后期维护提供了便利——当某块保温墙板出现破损时，可在 2 小时内完成整体更换，避免了传统建筑的“开膛破肚”式维修。

#### 3. 密封材料的系统性应用与节点优化

气密性是被动式建筑的生命线，而密封材料的选择与节点设计是实现高气密性的关键。在门窗与墙体连接处，采用“三元乙丙橡胶+自粘丁基胶”复合密封胶条，其拉伸强度 ≥ 6MPa，使用寿命超过 30 年，配合窗周连续密封膜（水蒸气渗透系数 < 1.0ng/(Pa·m·s)），可将单个窗洞口的漏风量控制在 0.5m³/(m·h) 以下；穿墙管道采用“预埋套管+弹性密封垫”组合，管道与套管间的环形缝隙填充硅酮密封胶，经压力测试，可承受 500Pa 压差而无明显漏风。这些细节在雄安新区某项目中通过“气密性施工日志”严格管控：每个密封节点需经过施工班组自检、监理单位抽检、第三方机构红外检测三级验收，最终实现整栋建筑 n50=0.3 次/h 的优异性能，较国标要求 (n50 ≤ 0.6 次/h) 提升 50%。

### （三）数字化模拟技术应用

#### 1. 多尺度模拟工具的协同设计框架

被动式建筑设计依赖“宏观气候分析-中观能耗模拟-微观节点优化”的三级数字化工具链：首先通过 Meteororm 等软件分析当地 50 年气象数据，提取逐时温度、湿度、太阳辐射等参数，建立气候边界条件；继而利用 EnergyPlus、DeST 等能耗模拟软件，输入建筑几何模型、围护结构参数与设备运行策略，进行全年 8760 小时的动态能耗计算，输出供暖/制冷负荷、新风量需求等关键指标；最后借助 ANSYSFluent 等 CFD 软件，对门窗节点、通风中庭等局部区域进行流体力学与传热模拟，优化遮阳板角度、风口位置等细节。这种多软件协同模式在杭州某项目中实现精准设计：通过 CFD 模拟发现，楼梯间顶部增设 2m 高拔风井可使自然通风量增加 25%，从而减少新风设备功率选型，降低初期投资 15 万元。

Radiation		Temperature		Precipitation	Sunshine duration	
Daily global radiation		Daily temperature		Data table		
	Gh kWh/m <sup>2</sup>	Dh kWh/m <sup>2</sup>	Bn kWh/m <sup>2</sup>	Ta °C	Td °C	FF m/s
January	67	33	92	-3.2	-14.8	2.9
February	85	44	85	0.4	-11.8	2.8
March	122	67	97	7.4	-8.2	3.4
April	146	85	92	15	0.6	3.3
May	170	100	98	21.2	8.6	3
June	155	108	63	25.1	15.5	2.5
July	145	101	59	26.7	20.9	2.3
August	137	95	61	25.4	20.3	2.1
September	118	70	80	20.9	13.8	2.2
October	96	57	73	13.3	4.5	2.3
November	67	37	70	4.5	-5.5	2.6
December	57	29	77	-1.9	-13.1	3
Year	1365	825	947	12.9	2.6	2.7

图 1 Meteonorm 气象数据库

2. 参数化设计与优化算法的应用

参数化设计工具（如 Grasshopper）与遗传算法、粒子群算法等优化技术的结合，使被动式建筑设计从“经验试错”转向“数据驱动”。设计师可定义窗墙比（20%-40%）、遮阳板长度（0.5-2.0 米）、保温层厚度（150-300mm）等设计变量，设定能耗最低或舒适度最高的目标函数，通过算法自动生成 thousands 种设计方案并筛选最优解。某西安项目利用该技术发现：当窗墙比为 35%、遮阳板挑出 1.2 米、保温层厚度 220mm 时，建筑能耗较初始方案降低 18%，而造价仅增加 5%，实现了经济性与节能性的最佳平衡。这种技术尤其适用于复杂形体建筑，如曲面立面或异形屋顶，可在保持建筑美学的同时满足能耗指标。

三、发展建议

（一）技术落地难点与解决方案

建筑节点如阳台挑梁、管道穿墙处易形成热桥，导致局部能耗增加 20%-30%。解决路径包括：开发断热桥锚栓、保温连接件等专用配件，采用 BIM 技术进行节点三维建模，在设计阶段明确构造细节；施工前进行热桥模拟分析，针对不同节点制定专项施工方案，通过红外热成像检测技术进行质量验收，确保节点热阻值达到主体结构围护结构的 90% 以上。

（二）成本控制与市场推广策略

1. 初期成本高企的破解路径

被动式建筑增量成本主要来自高性能门窗（占 40%）、保温材料（占 30%）与设备系统（占 20%）。通过规模化生产降低材料成本，如某河北企业建成年产 1000 万平方米保温板生产线，使单价较进口产品下降 40%；政府层面实施阶梯式补贴政策，对达到超低能耗标准的项目给予 800-1200 元/平方米补贴，将投资回收期从 15 年缩短至 8-10 年；开发商可通过提升项目溢价

空间平衡成本，调研显示被动式住宅售价较周边项目高 10%-15%，且去化率提升 25%。

2. 市场认知度不足的提升策略

针对消费者对“无空调”环境的疑虑，开展体验式营销，建设被动式建筑体验馆，展示不同季节室内环境参数；将被动式建筑纳入绿色建筑认证体系，给予更星级评价与政策倾斜；通过媒体宣传普及被动式建筑的健康价值，如减少空调病、降低 PM2.5 暴露风险等，引导市场从“价格敏感”向“价值敏感”转变。

结语

被动式超低能耗建筑通过技术创新重构了建筑与能源的关系，其核心价值不仅在于能耗指标的突破，更在于推动建筑从“能源消耗者”向“能源管理者”的角色转变。随着我国“双碳”目标的推进，该建筑模式将从政策驱动的示范阶段转入市场驱动的规模化发展阶段。未来需重点突破以下方向：一是加强湿热地区、温和地区的技术适应性研究，开发适用于全气候区的解决方案；二是推动被动式技术与装配式建筑、智能化系统的深度融合，构建“超低能耗+高舒适度+智慧化”的新一代建筑体系；三是探索基于生命周期的碳排放核算方法，将被动式建筑纳入区域碳中和规划，实现建筑与城市能源系统的协同优化。通过持续的技术创新与政策引导，被动式超低能耗建筑有望成为我国建筑行业绿色转型的核心载体，为全球低碳建筑发展贡献中国方案。

参考文献

[1] 费亮嵘. 基于超低能耗被动式建筑设计的施工策略分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (08): 127-129.  
 [2] 刘玲. 超低能耗被动式建筑施工技术及应用效果 [J]. 四川水泥, 2025, (03): 111-113.  
 [3] 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, (03): 157-159.