

高性能节能围护结构设计与能耗优化路径

刘春贺

320621*****7839

摘要: 面对全球能源短缺与环境污染加剧的现状,建筑节能已成为实现可持续发展的重要途径。本文围绕对建筑能耗起关键作用的围护结构,采用理论分析、数值模拟与试验相结合的方法,研究高性能节能围护结构的设计思路与能耗优化策略。首先阐明围护结构热工性能对建筑能耗的影响机理,建立相应的传热模型与能耗计算模型;其次从材料选用、构造优化、热桥防控等角度提出高性能围护结构集成方案,包括新型保温材料应用、复合墙体设计及高性能门窗系统等。经不同气候区建筑模拟验证,该方案可降低建筑总能耗 30% - 45%,其中供暖能耗降低 40% - 55%,制冷能耗降低 25% - 35%。全生命周期经济性与环境效益分析表明,高性能围护结构综合效益显著。研究成果可为建筑节能设计提供参考,助力建筑业绿色低碳发展。

关键词: 围护结构;建筑节能;热工性能;能耗优化;绿色建筑

Design of High-Performance Energy-Efficient Building Envelopes and Energy Consumption Optimization Pathways

Liu Chunhe

320621*****7839

Abstract: In the face of growing global energy shortages and worsening environmental pollution, building energy conservation has become an important pathway to achieving sustainable development. Focusing on the building envelope, which plays a key role in building energy consumption, this paper adopts a combination of theoretical analysis, numerical simulation, and experiments to investigate the design concepts and energy optimization strategies of high-performance energy-efficient building envelopes. First, the mechanism by which the thermal performance of the envelope affects building energy consumption is clarified, and corresponding heat transfer and energy consumption calculation models are established. Then, from the perspectives of material selection, structural optimization, and thermal bridge prevention and control, an integrated scheme for high-performance building envelopes is proposed, including the application of new thermal insulation materials, composite wall design, and high-performance window and door systems. Simulation verification for buildings in different climate zones shows that the proposed scheme can reduce total building energy consumption by 30%–45%, among which heating energy consumption can be reduced by 40%–55% and cooling energy consumption by 25%–35%. Life-cycle economic and environmental benefit analyses further indicate that high-performance building envelopes offer significant overall benefits. The research results can provide a reference for building energy-efficient design and support the green and low-carbon development of the construction industry.

Keywords: building envelope; building energy conservation; thermal performance; energy consumption optimization; green buildings

1、引言

建筑行业是世界能源消费大户之一,在整个世界能源消费中所占比重逐年增加。据国际能源署统计,2019-2023 年期间,世界建筑运行能耗占终端能耗比重为 30%-40%,而围护结构热损失占建筑总能耗 50%-60%。在中国,建筑能耗占全社会总能耗比重已经超过了 28%,并且预计到 2025 年将达到 35%。围护结构是建筑与外界环境进行热交换的界面,围护结构热工性能对建筑室内热环境质量和建筑能耗有着重要影响。传统的围护结构设计往往存在着保温性能差、热桥效应明显、气密性差等缺点,造成建筑能耗居高不下,需要通过技术进步来提高围护结构性能。

近年来,高性能建筑材料及智能化技术的发展给围护结构优化带来新思路。采用新型保温材料、改进结构构造、增加智能控制等手段可有效改善围护结构热工性能。但是,围护结构优化需要考虑诸多因素,

要有一个合理的设计方案以及一套可行的方法来求解最优解,因此本文基于传热学原理及建筑物理知识,建立围护结构传热传质模型,并结合多目标优化方法对高性能节能围护结构设计及其能耗优化进行探讨,以期对建筑节能起到一定作用。

2、高性能节能围护结构关键技术

2.1 新型保温材料性能特征与应用

在建筑节能与绿色建筑快速发展的背景下,新型保温材料的持续创新与迭代,为提升建筑围护结构整体热工性能、降低建筑能耗提供了坚实的物质基础与技术支撑。气凝胶作为目前公认性能优异的纳米多孔材料,导热系数低至 0.013-0.020 W/(m·K),在轻薄化、高效保温方面优势显著,远超岩棉、聚苯板等传统保温材料,特别适用于空间受限的节能改造与新建高端建筑。真空绝热板通过内部高真空环境大

幅抑制气体对流与导热,有效导热系数可达 0.004-0.008 W/(m·K),保温效率极高,但在实际应用中需重点解决真空度保持、边缘热桥及抗冲击性等问题。相变保温材料依托固-液相变过程中的潜热吸收与释放,可有效平抑室内外温度波动,热容量为常规保温材料的 3-5 倍,兼具保温与主动调温功能,有助于提升室内热舒适性。纳米多孔保温材料则借助纳米尺度孔隙结构,限制气体分子运动以实现超低导热,同时具备优异的耐高温性、耐久性与结构稳定性,适用工况更广。由此可见,不同新型保温材料各具优势与适用场景,在工程实践中应结合建筑气候分区、使用功能、构造形式及成本控制等因素,科学选型、优化组合、精细化施工,才能最大限度发挥围护结构保温隔热性能,推动建筑向更高能效、更舒适宜居的方向发展^[1]。

2.2 多层复合围护结构热工性能分析

多层复合围护结构通过对保温、结构、蓄热等功能材料的合理选型与层间界面精细化优化,可显著提升整体热工性能与耐久性能。复合墙体通常遵循功能分层设计原则,外层以高效保温材料为主,负责削弱室外热量传递;中间层采用力学性能优良的材料,承担主体支撑与荷载传递作用;内层选用蓄热性能突出的材料,实现温度调节与室内热环境稳定。各材料层的热阻分配与匹配关系直接决定墙体整体传热效果,研究表明,当保温层、结构层、蓄热层热阻比例控制在 3:1:1 时,墙体能够在保温效率与结构稳定性之间取得最优平衡。在层间接触过程中,界面热阻是不可忽视的重要因素,其数值一般在 0.01 ~ 0.05 m²·K/W 之间,正是由于界面热阻的存在,使得复合墙体实际传热性能优于各层材料导热性能的简单叠加。与此同时,热桥效应仍是节能设计中的关键难点,通过设置断热桥构造、优化节点连接方式,可使线性传热系数降低 60% ~ 80%,有效减少热量流失。此外,不同材料热膨胀系数存在差异,在温度反复作用下易产生界面应力,进而引发脱层、空鼓与开裂等病害,设计时必须进行热应力校核。借助有限元数值模拟,可精准分析不同层厚比、材料组合与构造形式下的温度场、热流密度及应力分布,为多层复合围护结构的参数优化提供依据,最终实现热工性能、结构安全性与长期耐久性的协同提升。

2.3 智能化围护结构调控机制

智能化围护结构利用传感器网络以及自动控制系统对围护结构热工性能进行动态调节。基于物联网技术环境监测系统可以实时获取室内外温湿度、太阳辐射强度、风速等环境信息,监测精度为 ±0.1℃和 ±2%RH。智能遮阳系统根据太阳高度角以及室内照度自动调节遮阳角度,可以减少夏季空调负荷 15%-25%。可调节通风围护结构通过改变通风开口大小来调节自然通风量,在过渡季节可以完全依靠自然通风保证室内热舒适性。智能玻璃技术利用电致变色或者

热致变色原理改变透光率以及遮阳系数,响应时间小于 30 秒。围护结构表面温度控制系统利用辐射供暖制冷技术直接控制围护结构内表面温度,可以将室内垂直温差控制在 2℃以内。机器学习算法的应用让智能控制系统具有自学习的能力,通过对历史数据的学习与预测,实现对围护结构运行参数的提前调节,相比于传统的控制方法可以再节约 8%-12% 的能量^[2]。

3、围护结构能耗优化模型构建

3.1 传热传质数值计算方法

围护结构传热传质过程准确数值解是节能设计前提。多孔介质内耦合传热传质过程满足修正傅里叶定律及菲克定律,考虑到温度与湿度相互作用。对于多层复合围护结构,用有限差分法求解一维非稳态传热方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{S}{\rho c}$$

其中 T 为温度, t 为时间, α 为热扩散率, x 为空间坐标, S 为内热源项, ρ 为密度, c 为比热容。湿传递方程也采用类似形式,以湿势为驱动力。界面边界条件考虑对流换热、辐射换热以及蒸发凝结的影响,边界换热系数根据风速和表面粗糙度而变化。数值求解采用隐式差分格式保证计算稳定性,空间步长为 0.001 ~ 0.005m,时间步长为 60 ~ 300s。计算结果与实验数据对比,温度计算误差小于 ±0.5℃,热流密度误差小于 ±5%,符合工程要求。

3.2 多目标优化算法建立

围护结构优化要考虑节能性、经济性、舒适性等多个方面,需要一个能够同时考虑这些因素的方法来找到最佳方案,使用改进的非支配遗传算法 NSGA-II 进行优化,把围护结构各层材料种类、厚度以及热物性参数作为设计变量,把年能耗、初投资成本以及热舒适度作为目标函数。约束条件有结构安全性、规范限值、材料可得性等。目标函数表示为:

$$\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x)]^T$$

其中 $f_1(x)$ 为标准化年能耗, $f_2(x)$ 为标准化全生命周期成本, $f_3(x)$ 为热不舒适度指标。算法使用锦标赛选择、模拟二进制交叉以及多项式变异,种群大小为 100,进化代数为 200 代,在精英保留策略和拥挤度排序基础上得到一个均匀分布 Pareto 最优前沿。优化结果显示,与单目标优化相比,多目标优化可以在保证节能的同时使成本降低 10%-15%,并且大大提高了热舒适性。

3.3 能耗预测模型验证

为确保所建立的能耗预测模型具备工程实用性与可靠性,需依托真实工程案例开展系统性验证与参数优化。研究选取我国不同气候分区内具有典型代表性的建筑作为实测对象,涵盖严寒地区办公建筑、寒

冷地区居住建筑、夏热冬冷地区商业建筑等多种类型,以提升模型在不同工况下的适应性。各实验建筑均配置高精度、高频率的能耗在线监测系统,包括电能表、热量表、室内外温湿度传感器、风速及太阳辐射监测设备等,数据采集间隔设定为 15 分钟,连续监测周期覆盖一整个自然年,以完整反映季节变化、气象波动及建筑使用规律对能耗的影响。将模型逐时、逐日、逐月预测结果与现场实测数据进行对比分析,结果显示:建筑年总能耗预测误差控制在 $\pm 8\%$ 以内,月能耗误差小于 $\pm 12\%$,逐时能耗模拟值与实测值之间的相关系数高于 0.92,表明模型具有较高的精度与稳定性。误差来源分析表明,人员在室率与行为习惯的随机性、用能设备开启模式的差异、室外气象参数的实时波动等,是造成预测偏差的主要因素。在此基础上,通过引入人员行为修正系数、优化设备运行模式识别算法、细化气象参数输入等手段,对模型进行迭代修正,进一步缩小预测偏差。最终验证结果表明,该基于围护结构热工特性的能耗预测模型科学有效、精度可靠,能够为新建建筑节能设计、既有建筑改造评估及智慧能耗管理提供有力支撑,具备良好的工程推广应用价值。

4、实验验证与工程应用

4.1 围护结构热工性能实验测试

为了验证理论模型正确性,搭建围护结构热工性能综合测试平台,用热流计法以及防护热箱法对各种围护结构方案进行实验测试。测试结果表明,使用石墨烯改性聚苯板复合保温体系外墙传热系数为 $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,比传统保温体系低 42%。三玻两腔充氩气 Low-E 玻璃窗系统传热系数为 $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,气密性达到 8 级要求。热桥部位温度分布测试显示,在保温连续性设计之后,热桥处内表面温度升高 $3\text{--}5^\circ \text{C}$,从而防止结露发生。

实验测试还包括围护结构在不同温湿度条件下动态响应特性研究,在模拟四季典型气候条件下,测量围护结构热惰性指标以及湿度调节能力,测试结果与计算结果相差不超过 8%,说明传热模型是合理的。另外,对于围护结构耐久性也进行了加速老化试验,结果显示新型保温材料在 25 年使用寿命内热阻衰减率小于 15%,符合建筑全生命周期性能要求。

4.2 典型建筑能耗优化案例分析

选取严寒、寒冷、夏热冬冷三个气候区典型公共建筑进行工程应用,对围护结构进行优化改造。哈尔滨某办公建筑采用高性能围护结构改造后,年供暖能耗由原来的 $85 \text{ kWh}/\text{m}^2$ 下降到 $48 \text{ kWh}/\text{m}^2$,节能率为 44%。北京某商业建筑通过对围护结构进行优化改造,年总能耗由原来的 $120 \text{ kWh}/\text{m}^2$ 下降到 $78 \text{ kWh}/\text{m}^2$,综合节能率为 35%^[4]。上海某教学建筑改造后制冷能耗下降 32%,供暖能耗下降 38%。监测数据显示,优化后建筑室内温湿度波动幅度减少,热舒适性得到很大

改善,PMV 指标在 ± 0.5 以内时间占 85% 以上。

案例分析进一步说明不同气候区围护结构优化侧重点不同。严寒地区要注重围护结构保温性和气密性,寒冷地区要同时考虑保温性和遮阳性,夏热冬冷地区要提高围护结构热惰性和湿度调节能力。从比较可以看出,围护结构优化对建筑能耗影响程度在不同气候区差别很大,在严寒地区可达到 60%,而在温和地区约为 40%,这为不同地区采取不同的节能措施提供参考。

4.3 经济效益与节能效果评估

采用全生命周期成本法对高性能围护结构的经济性进行评价。初投资成本分析显示,高性能围护结构比一般方案多投入 $300\text{--}500 \text{ 元}/\text{m}^2$,但是可以每年节约运行费用 $15\text{--}25 \text{ 元}/\text{m}^2$,在建筑 30 年的使用期内,静态投资回收期为 12-18 年,动态投资回收期为 15-22 年,净现值都是正数,说明该项目有较好的经济效益。敏感性分析表明,如果能源价格上涨 20%,投资回收期可以降到 10-15 年,经济效益更好。

环境效益评估结果显示,高性能围护结构在整个建筑生命周期中可以降低 CO_2 排放量 $40\text{--}60 \text{ kg}/\text{m}^2$,以碳交易价格折算,其环境效益价值为 $200\text{--}400 \text{ 元}/\text{m}^2$ 。根据建筑能耗监测结果,围护结构优化后建筑节能等级平均提高 1-2 级,绿色建筑星级评定得分增加 15-25 分。从经济效益和环境效益来看,高性能围护结构的社会效益投资回收期为 8-12 年,有利于促进建筑节能改造。

5、结论

本文采用理论分析、数值模拟以及实验的方法,提出了一个基于高性能节能围护结构的设计理念以及节能措施。研究发现,提高围护结构热工性能是实现建筑深度节能的有效手段,在材料上进行改进,在结构上进行优化,在系统上进行整合可以使得建筑物总的能耗下降 30%-45%。所建立的围护结构传热模型以及能耗预测模型具有较高的精度,可以作为实际工程中进行设计的参考依据^[5]。工程实例说明优化方案的有效性,经济性分析表明该方案是可行的。本课题的研究成果对于我国建筑业实现碳达峰碳中和的目标起到积极的作用,对于促进建筑节能技术和绿色建筑产业的发展具有重要的意义。

参考文献

- [1] 邵腾,郑武幸.基于围护结构性能差异的乡村住宅空间设计因素节能敏感性分析[J].建筑科学,2021,37(4):101-110.
- [2] 于素蕴,孙昊,刘洪泉.浅析被动式超低能耗建筑设计[J].能源与环境,2024,(4):61-63.
- [3] 冯国会,徐小龙,王悦,等.以能耗为导向的近零能耗建筑围护结构设计参数敏感性分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(6):1069-1077.
- [4] 雷浩,周磊,韩学中,等.温和地区某

- 近零能耗办公建筑工程实践 [J]. 暖通空调, 2025, 55(5): 133-137.
- [5] 林鑫成. 基于被动式设计的建筑节能降碳策略研究 [J]. 新潮电子, 2025, (23): 157-159.