

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2403153

寒冷地区低层住宅被动式设计策略研究

孙乾

(天津城建大学 建筑学院, 天津 300384)

摘要:通过调研低层节能住宅典型性案例并建立寒冷地区低层住宅基础模型,分析其被动式节能的主要影响因素,遴选出基于围护结构、外窗及通风的11项适合于低层住宅的被动式节能设计参量.利用建筑能耗模拟软件Designbuilder定量地分析各项设计参量的节能贡献效果,并对建筑能耗影响较大的因子进行正交试验与组合能耗模拟,得出组合后节能效果最佳的方案,对今后寒冷地区低层节能住宅设计中如何依据节能潜力设计不同的建筑节能参量提供参考.

关键词:低层住宅;寒冷地区;节能贡献率;能耗

中图分类号:TU241 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-719X(2024)03-0153-07

Research on Passive Design Strategy of Low-Rise Residential Buildings in Cold Regions

SUN Qian

(School of Architecture, TCU, Tianjin 300384, China)

Abstract: With the rapid growth of new rural construction and continuous progress of living demand, the use and energy consumption of low-rise residential buildings are also growing. Energy saving design of residential building is particularly important. By investigating typical cases of low-rise energy-saving residential buildings and establishing basic model of low-rise residential buildings in cold areas, this paper analyzes the main influencing factors of passive energy-saving, and selects 11 passive energy-saving design parameters suitable for low-rise residential buildings based on envelope structure, exterior windows and ventilation. The energy saving contribution of each design parameter is quantitatively analyzed by using Designbuilder, which is a simulation software for building energy consumption. Orthogonal test and combined energy consumption simulation are carried out for the factors that have great influence on building energy consumption, and the optimal scheme of energy saving effect after combination is obtained. The purpose is to provide reference for how to design different building energy saving parameters according to energy saving potential in the design of low-rise energy-saving housing in cold areas in the future.

Key words: low-rise residence; cold regions; energy-saving contribution rate; energy consumption

中国是能源消耗大国,而建筑领域是能源消耗的重灾区.据中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会发布的《中国建筑能耗研究报告》(2021)统计,2019年全国建筑全过程能耗总量达22.33亿tce,其中建筑运行阶段能耗10.3亿tce,占比全国能耗消费总量的21.2%.中国在“十三五”期间建筑能耗年均增速4.3%,碳排放量逐年增长2.7%.2018年全国建筑运行阶段城镇居住建筑能耗3.8亿tce,占比38%,单位面积能耗12.38kgce/m²;农村居住建筑能耗2.37亿tce,

占比23.7%,单位面积能耗9.98kgce/m²,住宅建筑节能问题迫在眉睫^[1].大量数据与实践表明,在建筑设计阶段有超过30%的潜力可以降低能源消耗.根据住宅建筑样本的初步分析,住宅建筑能耗强度与其类型相关(分类型住宅建筑能耗强度比较差异较显著, $p < 0.05$),低层住宅的全年能耗强度平均值为18.80kW·h/m²·年^[2].

本文将从低层住宅建筑入手,通过对节能设计的类型划分,全面梳理不同设计参量对建筑耗能的影

收稿日期:2022-11-30;修订日期:2023-04-23

作者简介:孙乾(1997—),男,山西太原人,天津城建大学硕士生.

响,并通过大量案例分析选取典型模型与模拟方法,通过能耗模拟分别得到不同水平下各设计参量的节能潜力排序.研究成果将为建筑师在设计寒冷地区低层住宅时快速筛选出节能潜力更高的,并对其有显著影响的节能设计参量提供参考.

1 参考案例选取与基础模型建立

1.1 参考项目

本文选取的案例均取自国际太阳能十项全能竞赛(solar decathlon,简称SD)历届作品.SD是一项享有太阳能“奥林匹克”和绿色住宅“世博会”双重美誉的全球顶级大学生科技创新赛事.由各个学校及单位带领的师生及技术人员组成团队,每队设计并建造一栋以太阳光为唯一能源的高性能全尺寸房屋,参与十项指标评比与公共展示.该十项指标围绕建筑展开,每届大体相同,略有差异.以河北省张家口市的2022届SDC(solar decathlon China)为例,十项指标依次为:建筑设计、工程设计、能源利用、市场潜力、宣传推广、室内环境、能源自给、可再生能源、家居生活和互动体验.其中前五项为主观评审,由国内外专家进行评价;后五项为客观评比,通过数据监测、媒体大众反馈等方式得分.

1.2 基础模型的建立

1.2.1 几何参数

目前对于低层住宅的标准模型尚未有统一标准,为进行后续研究,在对低层住宅建筑的空间组合模式进行归纳总结后,通过对SDC2022中15个参赛案例的实地调研与图纸分析,得出能够适用于寒冷地区的该建筑类型特征的基础模型作为后续研究的载体.基础模型的建立综合并代表了寒冷地区低层住宅的基本特征,使研究结论更具科学性及普适性.

通过对竞赛实际案例的实地调研与图纸进行参数提取和归纳演绎,得到寒冷地区低层住宅建筑基础模型的几何参数:①建筑朝向为南向;②建筑面积150m²;③建筑长宽比为1.1;④柱网尺寸为3.2m×3.2m;⑤建筑层高3.5m;⑥窗墙面积比为南向0.37、北向0.08、东向0.12、西向0.12;⑦建筑功能构成有设备间、卫生间、起居室、厨房、主次卧室、阳光房及书房.根据室内各功能组成占比与平面轴网结合,参照低层住宅建筑的空间功能组合规律对各个房间进行划分,得到基础模型的平面图(见图1).

1.2.2 热工参数与运行参数

建筑围护结构的构造是影响建筑节能至关重要

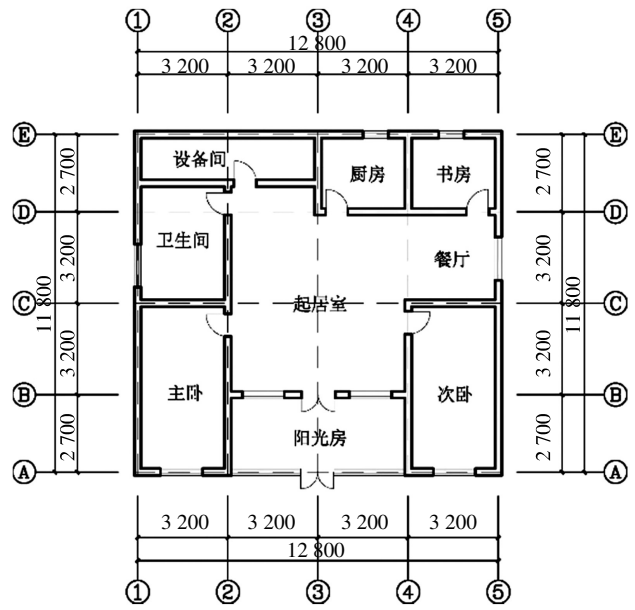


图1 基础模型平面

的环节.不同建筑的围护构造存在差异,但相同气候区环境下的同种类型建筑的做法存在相似之处.根据对比SDC2022案例中围护结构的做法,可总结归纳出寒冷地区低层住宅相对节能的建筑构造形式.在其基础之上,依据《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 26—2018、《绿色建筑评价标准》GB/T 50378—2019、《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准》DB13(J)/273—2018、《河北省居住建筑节能设计标准》DB13(J)185—2020、《建筑节能气象参数标准》JGJT 346—2014、《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》GB/T 7106—2019等规范的相应内容,结合案例图纸相关调研数据,确定热工参数与运行参数,如表1所示^[9].

通过Designbuilder对基础建筑模型进行能耗模拟,得出该模型年采暖能耗量为28.9kW·h/m²a,年制冷能耗量为19.8kW·h/m²a,在此基础上分析各项节能技术指标对建筑能耗的影响.

2 被动式节能因子的模拟

基于需求最小化与供给最优化理论,通过控制各种节能技术构造最佳化设计变量对标准模型进行相关技术策略能耗模拟,得出其对于建筑能耗的具体影响,从而有针对性地提升建筑整体的气密性及保温性能,以减少建筑能耗损失.本研究从围护结构、外窗性能与通风换气次数三方面入手,对其中11项节能因子进行定量模拟.

表1 基础模型热工参数与运行参数

| 参数分类 | 参数名称 | 参数定义 |
|----------|------------|------------------------------------|
| 热工参数 | 外墙传热系数 | $K_w = 0.35$ |
| | 屋面传热系数 | $K_r = 0.25$ |
| | 外窗传热系数 | $U = 1.5$ |
| | 外窗气密性 | 7级 |
| | 体型系数 | 0.55 |
| | 外窗 SHGC | 0.50 |
| | 气象参数 | CHN-Hebei.Zhangbei.533990-CSWD.epw |
| 运行参数 | 空调系统类型 | 理想空调系统 |
| | 供暖期 | 11月15日至3月15日 |
| | 室内计算温度设定 | 18℃ |
| | 照明功率密度 | 5 W/m ² |
| | 设备功率密度 | 3.8 W/m ² |
| | 人员设置 | 卧室2人、起居室3人,其他房间1人 |
| | 换气次数 | 0.5 h ⁻¹ |
| 供暖系统运行时间 | 0:00—24:00 | |

2.1 建筑围护结构节能影响因子分析

围护结构的设计直接影响着建筑整体采暖和制冷的能源消耗. 建筑外墙是主要的建筑围护结构,在建筑物总体面积中外墙面积的占比达到了40%以上^[4]. 其不仅具有承重作用,还能保证室内热稳定. 外墙与屋面在建筑围护结构中占比较高,因此结合建筑的实际构造情况,合理设计围护结构的保温材料厚度和气密性是节能的关键.

(1)外墙保温层厚度的影响. 目前最普遍的外墙节能手段是改变保温层厚度从而降低外墙整体传热系数 K 值^[5]. 其节能水平随着保温层厚度的改变呈现出较为规律的变化^[6]. 本文将标准模型中的膨胀型聚苯板(EPS)厚度以10 mm为步长,从100 mm增加至200 mm并分别进行模拟,得出寒冷地区低层住宅建筑外墙保温层厚度与建筑年采暖、制冷能耗的变化关系,如图2a所示. 由模拟结果可知,当保温层厚度增加时,单位面积年采暖量呈现出下降趋势,节能贡献率为28.6%;而单位面积年制冷量呈缓慢上升趋势,节能贡献率为-13.0%. 由图中斜率的变化可以看出,当保温层厚度增加至一定区间时,年采暖与制冷能耗量逐渐变化且趋于平缓,相应节能贡献率也会逐步降低,其对应的传热公式表示为

$$q = K\Delta t = \frac{\Delta t}{R + R_a} = \frac{\Delta t}{R + \frac{\delta}{\lambda}} \quad (1)$$

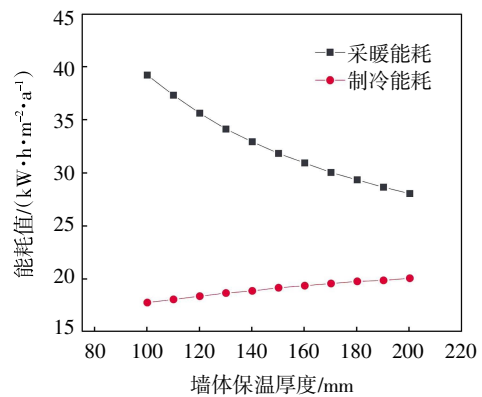
将传热公式两次求导后可推导出保温层厚度对墙体热流增量的影响公式为^[7]

$$q'' = \frac{2\Delta t}{\lambda^2} (R + \frac{\delta}{\lambda})^{-3} \quad (2)$$

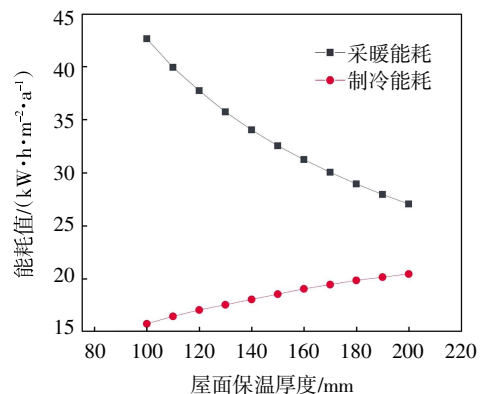
式中: q 为通过墙体的热流密度; Δt 为室内外温差; R 为除保温层以外的其他墙体材料的总热阻; R_a 为保温层热阻; λ 为保温层导热系数; δ 为保温层厚度. 由公式可知,不能一味通过改变保温层厚度改善节能效果,当厚度增加到一定程度时,节能率会显著下降,且会增加不必要的初期节能投资成本. 为保证多方面因素择优,需要结合建筑全生命周期增量经济效益分析从而确定最佳保温层厚度.

(2)屋面保温层厚度的影响. 将屋面EPS材料保温层以10 mm为步长,从100 mm增加至200 mm并分别进行模拟,模拟结果如图2b所示. 其中采暖与制冷趋势与墙体类似,此处不再赘述.

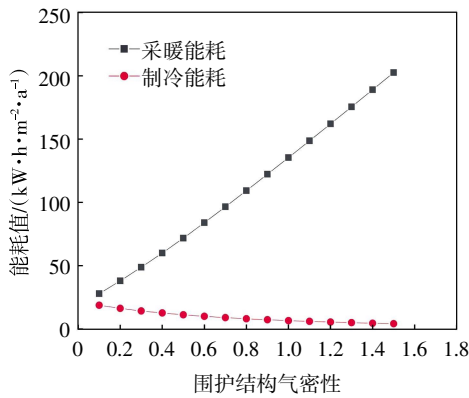
(3)气密性对建筑能耗的影响. 在风压、热压作用下,减少建筑全年总能耗的方式之一是保障建筑的气密性. 由空气渗透引起的能量消耗约占建筑热负荷的25%~50%^[8]. 将门窗气密性量化为空气渗透次数进行模拟,将其从0.1 h⁻¹至1.5 h⁻¹逐步增加,模拟结果如图2c所示. 随着空气渗透次数的增加,即气密性逐步降低时,单位面积年采暖量迅速上升,单位面积年制冷量呈缓慢下降趋势.



(a) 不同墙体保温厚度时的能耗变化



(b) 不同屋面保温厚度时的能耗变化



(c) 不同气密性时的能耗变化

图2 围护结构对建筑能耗的影响

2.2 建筑外窗节能影响因子分析

(1)窗墙面积比的影响. 各向立面窗墙比的确定需结合多方面因素考虑, 不能盲目进行扩大或减小. 以下分别模拟了基本模型中各向窗墙比在 0.1~0.8 工况的范围内对建筑能耗的影响, 结果如图 3a~d 所示. 结果表明, 随着窗墙比的增大, 室内热交换量增加, 房间太阳辐射得热增加速率低于热损失速率, 导致年采暖与制冷量均呈上升趋势.

(2)外窗传热系数的影响. 依据稳态传热公式^[9]可得某一时刻通过外窗的传热量为

$$HG(n) = KF[t_a(n) - t_r(n)] \quad (3)$$

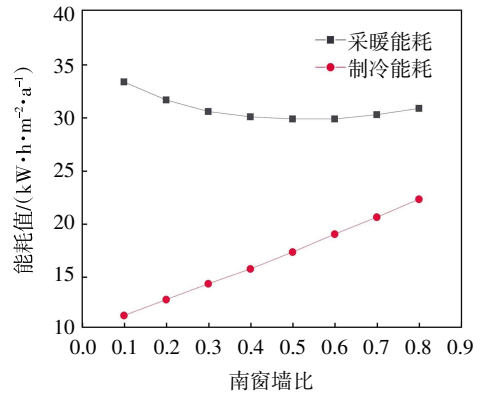
式中: $HG(n)$ 为 n 时刻的传热量; K 为外窗传热系数; F 为外窗面积; t_r 与 t_a 分别为某时刻室内外空气温度. 可看出外窗传热系数对建筑能耗有显著影响. 对基础模型 K 值进行控制变量模拟, 如图 3e 所示. 结果表明, 建筑年采暖量整体呈快速上升趋势, 年制冷量在 K 值为 1~3 之间逐渐下降, 在 K 值大于 3 后基本呈现平稳.

(3)太阳能得热系数 SHGC 的影响. 太阳能得热系数 SHGC 直接影响到房屋对太阳辐射的得热量. 以下分别模拟 SHGC 值在 0.1 至 0.9 之间对建筑能耗的影响, 如图 3f 所示. 结果表明, 随着 SHGC 值的增大, 年采暖量迅速下降, 制冷量逐步提升. 因此, 选择何种遮阳系数的玻璃是建筑节能的重要因素之一.

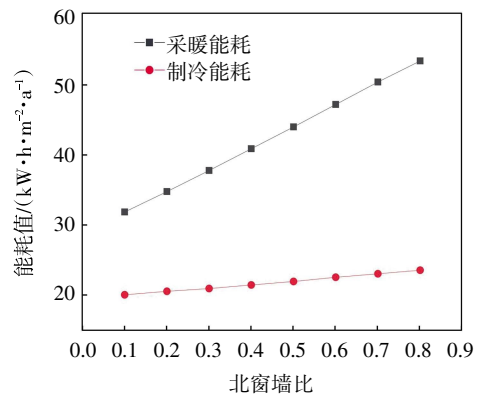
2.3 建筑通风节能影响因子分析

(1)自然通风换气次数的影响. 当夏季室内温度过高时, 通过自然通风的方式排除室内余热以保证室内温度舒适, 可在一定程度上降低建筑空调负荷^[10]. 全年空调负荷节约率 ACSR 可作为自然通风效果的评价指标, 其计算公式为

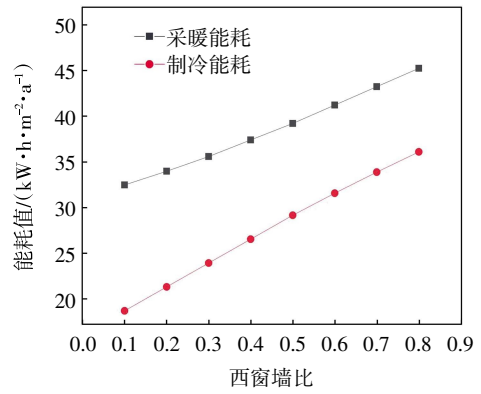
$$ACSR = (1 - \frac{Q_{nv}}{Q}) \times 100\% \quad (4)$$



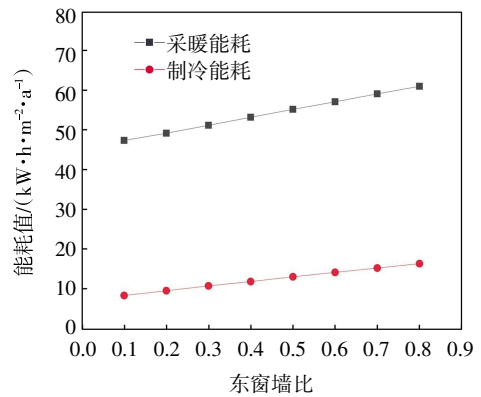
(a) 不同南向窗墙比的能耗变化



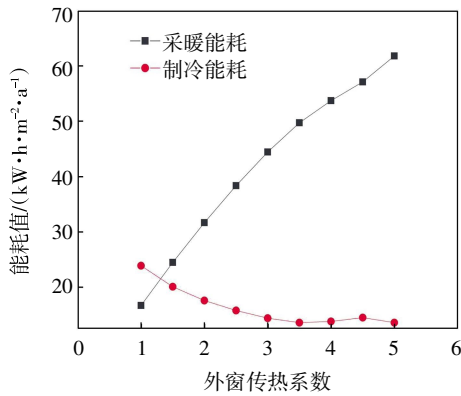
(b) 不同北向窗墙比的能耗变化



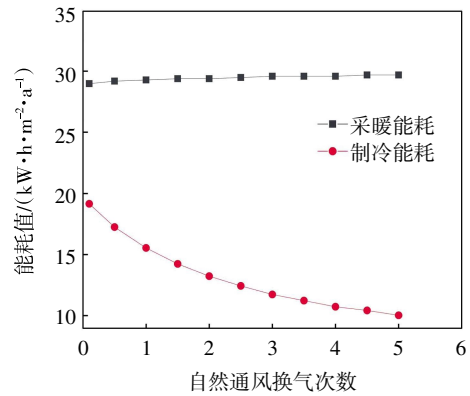
(c) 不同西向窗墙比的能耗变化



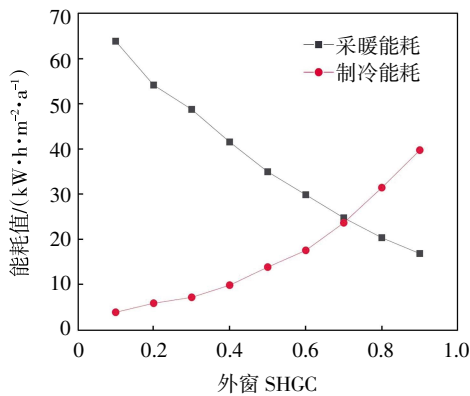
(d) 不同东向窗墙比的能耗变化



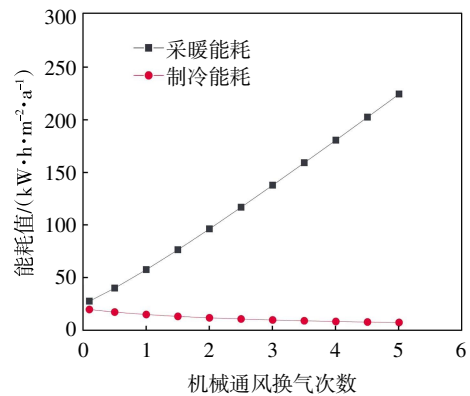
(e) 不同外窗传热系数下的能耗变化



(a) 不同自然通风换气次数下的能耗变化



(f) 不同外窗 SHGC 下的能耗变化



(b) 不同机械通风换气次数下的能耗变化

图3 外窗对建筑能耗的影响

图4 通风对建筑能耗的影响

其中: Q_m 为自然通风环境下的建筑全年空调负荷; Q 为密闭环境下的负荷.自然通风的节能效率随着ACSR的增加而得到提升.以下分别模拟自然通风换气次数在0.1~5 h⁻¹下的建筑能耗量,如图4a所示.结果表明,随着自然通风换气次数的增加,全年采暖能耗并未出现明显变化,但制冷能耗显著下降.

(2)机械通风换气次数的影响.建筑的空气渗透次数等级与建筑的冷热能耗呈逆相关趋势,当建筑气密性良好时,空气渗透量的降低会导致室内新风情况不佳,对人体健康造成一定的危害.此时需要通过主动式的机械通风换气设备引入新风.在此情况下,虽减小了因空气渗透造成的热损失,但同时增加了机械设备能耗量,整体的节能效率需进一步计算分析^[8].以下分别模拟机械通风换气次数在0.1~5 h⁻¹下的建筑能耗量,如图4b所示.结果表明,随着机械通风换气次数的增加,全年采暖能耗呈上升趋势,全年制冷能耗有所降低.

析,以其对建筑能耗的影响程度进行计算并排序(见表2),将影响程度较低的因子剔除,以筛选出对建筑能耗有显著影响的建筑节能技术,做后续研究.

表2 各因素在单因子变化下对建筑能耗的影响程度

| 序号 | 影响因子 | 最大总能耗 | 最小总能耗 | 影响程度/% |
|----|----------|--------|-------|--------|
| 1 | 外墙保温层厚度 | 101.20 | 98.41 | 2.78 |
| 2 | 屋面保温层厚度 | 101.57 | 96.83 | 4.70 |
| 3 | 南向窗墙比 | 99.29 | 88.27 | 10.92 |
| 4 | 北向窗墙比 | 101.06 | 97.55 | 3.48 |
| 5 | 西向窗墙比 | 113.56 | 96.33 | 17.08 |
| 6 | 东向窗墙比 | 67.48 | 59.54 | 7.87 |
| 7 | 外窗传热系数 | 105.00 | 94.72 | 10.19 |
| 8 | 外窗气密性 | 100.89 | 86.42 | 14.34 |
| 9 | SHGC | 121.00 | 85.14 | 35.54 |
| 10 | 自然通风换气次数 | 100.31 | 91.26 | 8.97 |
| 11 | 机械通风换气次数 | 100.83 | 88.54 | 12.18 |

3.2 正交试验数据确定

根据表2,剔除掉影响程度低于5%的单因子,选择出:A(南向窗墙面积比)、B(西向窗墙面积比)、C(东向窗墙面积比)、D(外窗传热系数)、E(外窗气密性)、F(太阳能得热系数SHGC)、G(自然通风换气次数)、H(机械通风换气次数)8个因素进行量化,并对每个因

3 被动式节能因子的选择

3.1 影响程度计算

根据上文中对各项节能因子技术策略的模拟分

子选取 7 个水平进行组合试验.应用 SPSS 数据分析软件对其进行正交试验表设计,可得出 $L_{49}(7^8)$ 正交试验 49 组标准试验方案.将水平量化值分配其中,以寒

冷地区张家口为例,使用 Designbuilder 软件对每组数据进行分别模拟,得到 49 种组合方案下的全年采暖能耗与制冷能耗值,如表 3 所示.

表 3 $L_{49}(7^8)$ 正交试验模拟结果

| 编号 | A | B | C | D | E | F | G | H | 采暖能耗/(kW·h·m ⁻² ·a ⁻¹) | 制冷能耗/(kW·h·m ⁻² ·a ⁻¹) |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 1.5 | 0.2 | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 65.90 | 3.22 |
| 2 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 3.0 | 1.0 | 0.8 | 3.5 | 1.0 | 184.21 | 5.62 |
| 3 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 4.5 | 0.4 | 0.5 | 3.0 | 1.5 | 181.77 | 7.74 |
| 4 | 0.1 | 0.4 | 0.7 | 2.5 | 1.2 | 0.2 | 2.5 | 2.0 | 327.42 | 1.62 |
| 5 | 0.1 | 0.5 | 0.2 | 4.0 | 0.6 | 0.9 | 2.0 | 2.5 | 215.33 | 22.71 |
| 6 | 0.1 | 0.6 | 0.4 | 2.0 | 1.4 | 0.6 | 1.5 | 3.0 | 340.68 | 13.51 |
| 7 | 0.1 | 0.7 | 0.6 | 3.5 | 0.8 | 0.4 | 1.0 | 3.5 | 649.58 | 8.56 |
| 8 | 0.2 | 0.1 | 0.7 | 4.0 | 1.0 | 0.5 | 1.5 | 3.5 | 351.18 | 3.58 |
| 9 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 2.0 | 0.4 | 0.2 | 1.0 | 0.5 | 107.06 | 2.88 |
| 10 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 3.5 | 1.2 | 0.9 | 0.5 | 1.0 | 95.23 | 28.61 |
| 11 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 3.5 | 1.5 | 80.66 | 22.40 |
| 12 | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 3.0 | 1.4 | 0.4 | 3.0 | 2.0 | 119.21 | 8.09 |
| 13 | 0.2 | 0.6 | 0.3 | 4.5 | 0.8 | 0.1 | 2.5 | 2.5 | 191.80 | 1.41 |
| 14 | 0.2 | 0.7 | 0.5 | 2.5 | 0.2 | 0.8 | 2.0 | 3.0 | 96.49 | 46.00 |
| 15 | 0.3 | 0.1 | 0.6 | 3.0 | 0.4 | 0.9 | 2.5 | 3.0 | 57.71 | 19.98 |
| 16 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 4.5 | 1.2 | 0.6 | 2.0 | 3.5 | 109.38 | 10.32 |
| 17 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 2.5 | 0.6 | 0.4 | 1.5 | 0.5 | 112.57 | 6.98 |
| 18 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 4.0 | 1.4 | 0.1 | 1.0 | 1.0 | 192.00 | 1.07 |
| 19 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 2.0 | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 1.5 | 80.46 | 48.86 |
| 20 | 0.3 | 0.6 | 0.2 | 3.5 | 0.2 | 0.5 | 3.5 | 2.0 | 131.69 | 14.97 |
| 21 | 0.3 | 0.7 | 0.4 | 1.5 | 1.0 | 0.2 | 3.0 | 2.5 | 117.92 | 6.40 |
| 22 | 0.4 | 0.1 | 0.5 | 2.0 | 1.2 | 0.4 | 3.5 | 2.5 | 103.66 | 6.80 |
| 23 | 0.4 | 0.2 | 0.7 | 3.5 | 0.6 | 0.1 | 3.0 | 3.0 | 187.89 | 0.89 |
| 24 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 1.5 | 1.4 | 0.8 | 2.5 | 3.5 | 63.92 | 32.83 |
| 25 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 3.0 | 0.8 | 0.5 | 2.0 | 0.5 | 124.02 | 13.73 |
| 26 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 4.5 | 0.2 | 0.2 | 1.5 | 1.0 | 208.00 | 4.02 |
| 27 | 0.4 | 0.6 | 0.1 | 2.5 | 1.0 | 0.9 | 1.0 | 1.5 | 83.49 | 50.86 |
| 28 | 0.4 | 0.7 | 0.3 | 4.0 | 0.4 | 0.6 | 0.5 | 2.0 | 145.24 | 26.40 |
| 29 | 0.5 | 0.1 | 0.4 | 4.5 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 2.0 | 117.17 | 24.17 |
| 30 | 0.5 | 0.2 | 0.6 | 2.5 | 1.4 | 0.5 | 0.5 | 2.5 | 113.57 | 13.83 |
| 31 | 0.5 | 0.3 | 0.1 | 4.0 | 0.8 | 0.2 | 3.5 | 3.0 | 152.13 | 2.76 |
| 32 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 2.0 | 0.2 | 0.9 | 3.0 | 3.5 | 50.69 | 14.42 |
| 33 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 3.5 | 1.0 | 0.6 | 2.5 | 0.5 | 138.83 | 24.04 |
| 34 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 1.5 | 0.4 | 0.4 | 2.0 | 1.0 | 102.60 | 18.28 |
| 35 | 0.5 | 0.7 | 0.2 | 3.0 | 1.2 | 0.1 | 1.5 | 1.5 | 181.07 | 1.54 |
| 36 | 0.6 | 0.1 | 0.3 | 3.5 | 1.4 | 0.2 | 2.0 | 1.5 | 150.57 | 2.22 |
| 37 | 0.6 | 0.2 | 0.5 | 1.5 | 0.8 | 0.9 | 1.5 | 2.0 | 57.95 | 60.05 |
| 38 | 0.6 | 0.3 | 0.7 | 3.0 | 0.2 | 0.6 | 1.0 | 2.5 | 128.20 | 23.84 |
| 39 | 0.6 | 0.4 | 0.2 | 4.5 | 1.0 | 0.4 | 0.5 | 3.0 | 157.74 | 10.71 |
| 40 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 2.5 | 0.4 | 0.1 | 3.5 | 3.5 | 172.12 | 1.38 |
| 41 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 4.0 | 1.2 | 0.8 | 3.0 | 0.5 | 144.88 | 52.47 |
| 42 | 0.6 | 0.7 | 0.1 | 2.0 | 0.6 | 0.5 | 2.5 | 1.0 | 102.89 | 23.92 |
| 43 | 0.7 | 0.1 | 0.2 | 2.5 | 0.8 | 0.6 | 3.0 | 1.0 | 97.41 | 16.48 |
| 44 | 0.7 | 0.2 | 0.4 | 4.0 | 0.2 | 0.4 | 2.5 | 1.5 | 156.00 | 8.41 |
| 45 | 0.7 | 0.3 | 0.6 | 2.0 | 1.0 | 0.1 | 2.0 | 2.0 | 158.53 | 1.36 |
| 46 | 0.7 | 0.4 | 0.1 | 3.5 | 0.4 | 0.8 | 1.5 | 2.5 | 109.94 | 38.93 |
| 47 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 1.5 | 1.2 | 0.5 | 1.0 | 3.0 | 88.49 | 23.59 |
| 48 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 3.0 | 0.6 | 0.2 | 0.5 | 3.5 | 185.14 | 4.65 |
| 49 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 4.5 | 1.4 | 0.9 | 3.5 | 0.5 | 165.00 | 72.32 |

我国《被动式超低能耗绿色建筑技术导则》^[11]规定,寒冷地区年制冷需求为 $\leq 3.5 + 2.0 \times \text{WDH}_{20} + 2.2 \times \text{DDH}_{28}$ 。根据张家口地区气候数据可计算出年制冷需求限值为 $20 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2\text{a}$;年采暖、空调和照明一次能耗

为 $\leq 60 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2\text{a}$;气密性指标为 ≤ 0.6 。对49组集成方案进行模拟研究后,基本符合《被动式超低能耗绿色建筑技术导则》能耗指标规定的是15与32号方案(见表4及图5)。

表4 方案15、32技术集成对比

| 编号 | 南向窗墙比 | 西向窗墙比 | 东向窗墙比 | 外窗传热系数 | 外窗气密性 | 外窗SHGC | 自然通风换气次数 | 机械通风换气次数 | 采暖能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) | 制冷能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|--------|----------|----------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 15 | 0.3 | 0.1 | 0.6 | 3.0 | 0.4 | 0.9 | 2.5 | 3.0 | 57.71 | 19.98 |
| 32 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 2.0 | 0.2 | 0.9 | 3.0 | 3.5 | 50.96 | 14.42 |

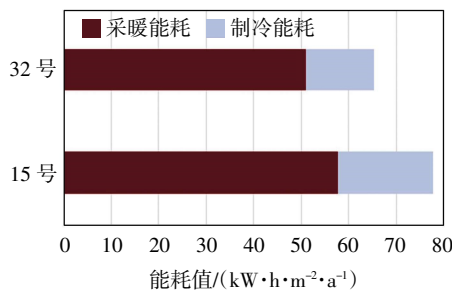


图5 两组技术方案能耗对比

根据图5,两组方案中32号的建筑采暖与制冷能耗更符合《被动式超低能耗绿色建筑技术导则》相关要求,因此,采用32号方案可作为该地区超低能耗低层住宅被动式技术最优集成方案。

4 结论

本文以寒冷地区超低能耗低层住宅为例,从11个被动式设计参量中对8项影响因子较大的参量进行正交试验,得出49种组合方案并逐一进行模拟计算,得出各方案的全年采暖与制冷能耗量,具体结论如下。

(1)寒冷地区被动式节能设计参量中,节能影响力最大的因子有南向窗墙比、西向窗墙比、东向窗墙比、外窗传热系数、外窗气密性、太阳能得热系数SHGC、自然通风换气次数、机械通风换气次数8个因素,其影响程度均大于5%。

(2)将以上8项因子进行正交组合并模拟,得出寒冷地区超低能耗低层住宅被动式技术最优集成方案组合为南向窗墙比0.5、西向窗墙比0.4、东向窗墙比0.3、外窗传热系数2.0、外窗气密性0.2、太阳能得

热系数(SHGC)0.9、自然通风换气次数3.0、机械通风换气次数3.5。

研究结果可作为建筑师对寒冷地区低层住宅相关被动式设计策略的筛选与取值提供理论指导与技术参考。

参考文献:

- [1] 中国建筑能耗研究报告2020[J]. 建筑节能,2021,49(2):1-6.
- [2] 吴良龙,罗涛,黄丽坤,张雪葳.住宅建筑周边空间形态与能耗强度的关联性:以长兴县城区为例[J]. 住区,2021(3):149-158.
- [3] 刘刚,郭彬彬,原野,等.基于节能贡献率的北方办公建筑设计策略研究[J]. 建筑节能,2021,49(4):1-8.
- [4] 张鑫.建筑外墙节能保温材料与检测技术[J]. 陶瓷,2020,418(8):90-91.
- [5] 李宁.寒冷地区节能75%居住建筑围护结构热工性能优化研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.
- [6] 张国强,周晋,肖坚.墙体保温层厚度对建筑能耗的影响[C]//中国建筑学会建筑热动力分会.中国建筑学会建筑热动力分会第十六届学术交流大会论文集.武汉:建筑热能通风空调出版社,2009:284-287.
- [7] 弗兰克P.英克鲁佩勒.传热和传质基本原理[M].北京:化学工业出版社,2016.
- [8] 丰晓航,燕达,彭琛,等.建筑气密性对住宅能耗影响的分析[J]. 暖通空调,2014,44(2):5-14.
- [9] 黄光德.夏热冬冷地区居住建筑能耗分析[D].重庆:重庆大学,2006.
- [10] 黄河,李晓锋,张明瑞,等.自然通风建筑能耗全年模拟研究[J]. 建筑科学,2012,28(2):46-50.
- [11] 近零能耗建筑技术标准:GB/T 51350—2019[S].