



# 内蒙古西部超低能耗草原民居外围护结构节能优化研究\*

■ 金国辉<sup>1,2\*\*</sup> 李佳<sup>1\*\*</sup> 杨鹏<sup>1</sup> 陈伟<sup>1</sup>

1. 内蒙古科技大学土木工程学院 包头 014010

2. 西安建筑科技大学西部绿色建筑国家重点实验室 西安 710043

**摘要:**为解决内蒙古西部草原民居建筑因外围护结构设计不科学而造成的室内热环境质量差、能源浪费量大及供热能效低的问题。文章对内蒙古西部初始民居进行了分析,利用DeST软件优化建筑结构、替换保温材料、增加保温层厚度、更换外窗等方式研究外围护结构保温隔热性能对建筑能耗的影响,并对其经济性进行分析。通过净现值法,计算出了适合内蒙古西部草原民居的三种外保温材料不同厚度的净现值和节能率。结果表明:外墙围护结构的优化对建筑整体节能效果最好,节能率可达20.92%。内蒙古西部超低能耗草原民居外围护结构优化的综合节能率超过86.7%,冬季采暖能耗为29.75 kW·h/m<sup>2</sup>。

**关键词:**超低能耗 草原民居 外围护结构

**DOI:**10.11842/chips.20201019001

## 0 引言

内蒙古西部草原民居多数为自建单体建筑,呈分散状态分布,在相近的村落中存在相互借鉴和参考现象,因此在整体布局上缺少规划和建设经验,由于外围护结构无法对室内达到预期的保温效果,居民冬季采暖通过增加采暖设备来提高室内热环境,这使一次能源消耗量过大。因此,优化当地民居能耗实现能源合理利用势在必行。国内外学者对于建筑能耗降低研究做了很多贡献,尤其超低能耗建筑的提出将建筑节能推到了大众的眼前。陈凯等模拟设计新型节能农宅,从建筑朝向、平面形态以及外围护结构等方面对固有住宅进行综合优

化,构建出低成本节能农村住宅<sup>[1]</sup>。王宁<sup>[2]</sup>利用不同的保温材料分类组合后进行能耗模拟,寻找外围护结构材料的整体能耗影响值规律,得出墙体节能技术影响因素最大为18.47%。我国任志刚、张强等<sup>[3]</sup>学者从气候舒适性角度出发,各选取中国、德国11座具有代表性城市,通过5大指标对被动房在我国的适应性进行分析,表明不同热工区的被动房能源影响因素各有不同,对能源需求也比德国增多。此外国内学者也对超低能耗技术在我国建筑节能中的应用进行了深化研究,徐伟、孙德宇<sup>[4]</sup>通过对比梳理国内外超低能耗标准,初步形成了适合我国国情的超低能耗建筑理论指标体系,提出了先北后

\* 2017年国家自然科学基金地区项目(51768053):多目标优化导向的内蒙古西部草原民居被动式超低能耗建筑营造策略研究,负责人:金国辉;2019年内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2019MS05007):基于多能耦合的内蒙古西部草原民居被动式超低能耗建筑节能策略研究,负责人:金国辉;2018年西部绿色建筑重点实验室培育基地开放课题资助项目(LSKF201803):内蒙古西部草原民居被动式超低能耗建筑营造策略研究,负责人:金国辉;

\*\* 金国辉,教授,研究方向:建筑节能与绿色建筑等;李佳(通讯作者),在读硕士研究生,研究方向:建筑节能与绿色建筑等。

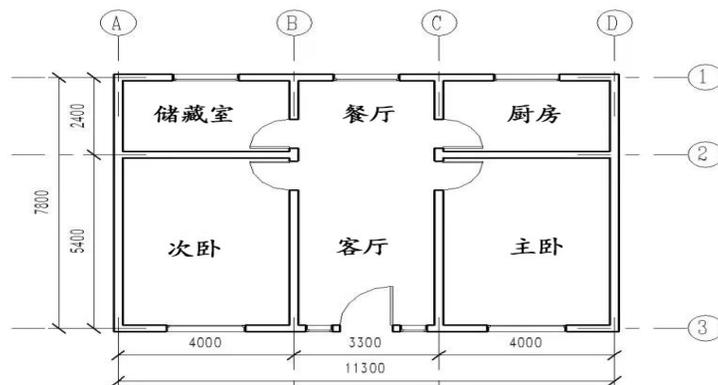


图1 初始草原民居平面示意图

南、先民后公的推广方向,奠定了我国超低能耗建筑的理论发展和技术基础。山东省作为超低能耗建筑发展先驱,山东建筑大学教学实验综合楼的设计便是利用了装配式被动式超低能耗建筑节能技术,对其外墙、保温、构造节点等进行优化<sup>[5]</sup>。张雅婷<sup>[6]</sup>通过对已建的办公楼进行 Design Builder 能耗模拟分析,提出适用于当地的办公楼能耗极值和围护结构性能限值,并归纳总结了严寒地区办公楼超低能耗优化组合方案。尹志芳通过对比3种可实现超低能耗建筑能耗软件,由于软件内置的计算方式不同,在对建筑模型描述时会导致最终能耗模拟输入和结果存在差异<sup>[7]</sup>。于玉等通过 Trnsys 软件对山东省济南市某被动式超低能耗建筑5层办公楼的全年动态负荷进行了模拟,全年供热能耗为  $30.87 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ,与节能建筑能耗进行对比该超低能耗建筑节能率约为40%<sup>[8]</sup>。夏热冬冷地区的气候适应型超低能耗建筑采暖供冷技术对建筑外围护结构的影响中利用 EnergyPlus 进行了分析,运用正交试验法得出外围护结构各部分的影响趋势,并得出相应设计方案使之达到总能耗全年最低<sup>[9]</sup>。徐伟和吕燕捷结合严寒和寒冷地区超低能耗建筑新风系统研究,以哈尔滨地区建筑为例,分时段开闭新风系统较全时段开闭分别节能30%和65%<sup>[10]</sup>。利用德国被动房技术对夏热冬冷地区建筑进行设计并不适配,实测数据表明,被动式超低能耗建筑的室内舒适度存在较大优势,因此对于室内制冷供热能耗应采用间歇式用能方式,在满足超低室内舒适要求的前提下实现超低能耗目标<sup>[11]</sup>。

综合以上文献整理分析可知我国学者对于内蒙古西部围护结构的研究虽已开展,但仅通过被动式节能优化达到超低能耗技术指标的研究比较缺乏。本文对外围护结构隔热保温性能研究分析,通过优化替换保温材料、增加保温层厚度、更换外窗等方式,提出适合内蒙古

西部草原地区气候条件和当地民居特点的超低能耗建筑外围护结构,并进行建筑能耗和经济性综合分析,从而确定适合内蒙古西部草原民居外围护结构的最佳优化方案,预期达到超低能耗技术指标。

优化当地民居外围护结构保温隔热性能,不但可有效降低房屋冬季采暖期对一次能源的需求,达到节能减排的环保目标,也有利于缓解当地牧民的经济压力。根据十九届五中全会提出的“优先发展农业农村,全面推进乡村振兴”的战略方针,内蒙古西部严寒地区超低能耗建筑的研究将对我国农村改革、能源优化以及提高利用率等方面起到显著作用。从国家到地方政府科技部门皆设立了关于“内蒙古西部草原民居超低能耗”的相关研究课题,本文基于基金项目的科研内容对其中外围护结构部分进行了研究,是所研究的课题内容的重要组成部分之一。

## 1 内蒙古西部草原民居初始模型确定

以内蒙古巴彦淖尔市五原县新公中镇一户牧民的住宅为基础建立本次研究的初始模型,绘制平面示意图(图1)。该草原民居总建筑面积为  $88.14 \text{ m}^2$ ,包括卧室、客厅、厨房和储藏间。供暖区域为卧室和客厅,面积为  $61.02 \text{ m}^2$ ;层高3.3m;南侧、北侧窗墙比分别为0.20和0.15,东西两侧无窗。

利用 DeST-h 模拟软件建立草原民居初始模型,围护结构参数参照初始草原民居围护结构构件(表1)。研究仅针对民居建筑本体参数对能耗的影响,室内内扰在本研究中属于有利因素,因此忽略人员、设备、照明损失能耗,模拟时设定所有房间的室内内扰值为0。北方严寒地区采暖约180天,冬季室内设计温度为  $15^\circ\text{C}$ <sup>[12]</sup>,气象参数参考同纬度乌拉特后旗。草原民居冬季采暖总能耗模拟结果为  $19552.11 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,冬季采暖能耗为  $221.83 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

表1 初始草原民居外围护结构参数及标准值

项目	构造	传热系数 $K(\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$	超低能耗建筑标准值 $K(\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$
外墙结构	20mm 水泥砂浆+370mm 烧结普通砖+20mm 混合砂浆	1.57	0.10~0.15
外窗结构	双层3mm 普通玻璃窗	5.89	$\leq 1.0$
外门结构	单层铁质门	3.11	$\leq 1.2$
屋顶结构	10mm 抹面砂浆+5mm 塑料薄膜+80mm 石棉水泥板+吊顶	2.87	0.10~0.15
内门结构	单层木门	5.15	$\leq 1.3$
地面结构	20mm 水泥砂浆找平层+碎石垫层+素土夯实	1.37	0.15~0.30
人员密度	人员均数为4人	/	/
室内热扰	0	/	/

$\text{h}/\text{m}^2$ 。

## 2 模拟节能改造方案

### 2.1 太阳能及可再生能源应用

内蒙古巴彦淖尔市五原县新公中镇地处典型的中温带大陆性季风气候带,属于干旱地带,日照丰富多平原,海拔较高导致太阳辐射强,仅次于青藏高原地区日照辐射,平均日照时数在3200小时左右,全市辐射量在 $6278.25 \sim 6603.04 \text{MJ}/\text{m}^2$ 之间<sup>[13]</sup>,因此在民居南向外墙外建立被动式凸出式阳光间如图2所示,阳光间纵深选择 $1.4 \text{m}$ <sup>[14]</sup>,选择普通中空玻璃加配塑钢外框,可以将白天的太阳能转化成热能有效地储存起来,并在夜间通过外墙再将热能传导至室内。

通过DeST-h模拟软件模拟得出典型日无阳光间主卧室、次卧室室温以及有阳光间主卧室、次卧室的基础室温数据表并绘制成24h曲线分布图(图3)。由此可知,增加阳光间可以阻挡室内热量损失,减小向外热量传递,有利提高室内温度。当民居冬季室内维持在 $15^\circ\text{C}$ 时,相较于未增设阳光间时草原民居冬季采暖模拟能耗

的 $19552.11 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,增加凸出式阳光间后草原民居冬季采暖能耗下降了46.2%,冬季采暖能耗为 $10519.04 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

### 2.2 草原民居外窗优化

考虑到当地牧民经济情况,选择了较为常见的几种外窗表2所示,序号1外窗为初始模型外窗。利用能耗模拟软件DeST-h分析不同外窗构造下对草原民居能耗的影响,其他模型参数不变,结果见图2。结合表2、图4可以看出,外窗的传热系数与太阳得热系数(SHGC)随着中空玻璃的层数增加而降低,草原民居能耗因传热系数减小而减小;低辐射中空玻璃窗的节能效果较明显,但相应的太阳得热量同样也会受到影响;无论是从能耗降低结果还是太阳得热情况出发,70系列平开下悬窗是最理想的选择,并且其传热系数最为接近超低能耗建筑标准值,但70系列平开下悬窗由于密封性生产技术要求,造价成本相对较高。建议选择3层Low-e 双中空玻璃窗作为构建内蒙古西部草原民居外窗。

### 2.3 草原民居屋顶保温厚度优化

内蒙古草原民居多为单层独栋建筑,除去外墙,民居的屋面与外界环境接触面积最广,结构多以木屋梁+

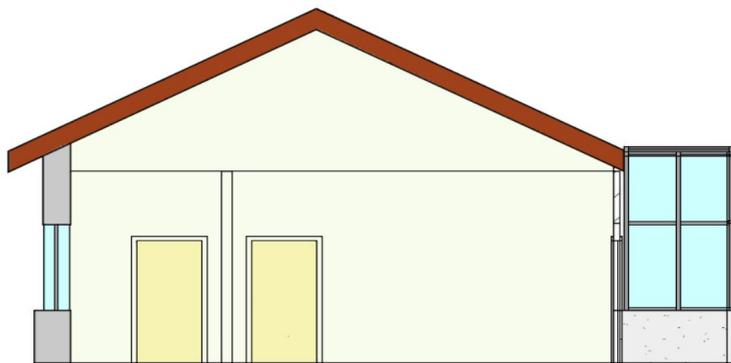


图2 阳光间与主体建筑剖面图

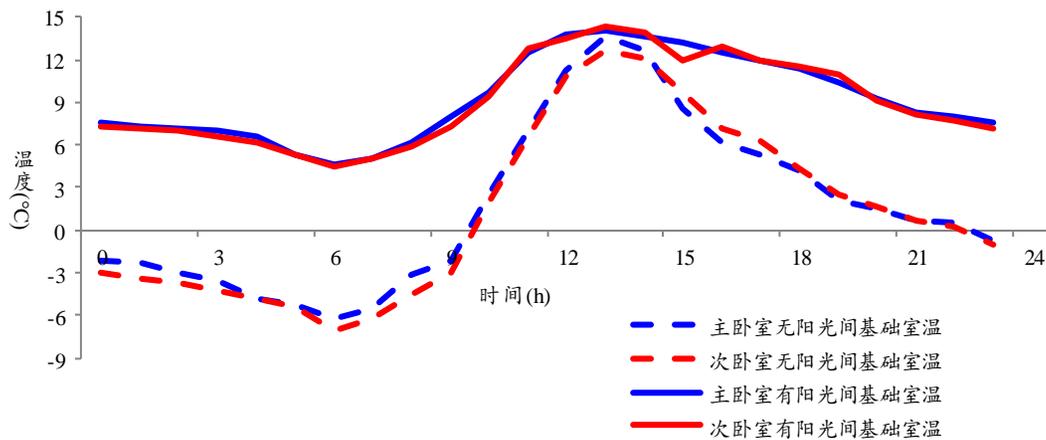


图3 基础室温模拟曲线分布图

表2 不同类型外窗参数

序号	玻璃类型	窗框材料	结构	传热系数 $K(W/m^2 \cdot K)$	太阳得热系数 (SHGC)
1	双倍普通玻璃	钢窗	3C	5.891	0.861
2	普通双层中空玻璃	塑钢	3C+6A+3C	3.159	0.762
3	双层惰性气体中空玻璃	塑钢	3C+6Ar+3C	2.884	0.763
4	双层Low-e中空玻璃	塑钢	3L+6A+3L	2.412	0.288
5	普通三层中空玻璃	塑钢	3C+6A+3C+6A+3C	2.178	0.682
6	三层惰性气体中空玻璃	塑钢	3C+6Ar+3C+6Ar+3C	1.930	0.683
7	三层Low-e双中空玻璃	塑钢	3L+6A+3L+6A+3L	1.541	0.212
8	70系列内平开下悬窗	塑钢	3C+6A+3C+6A+3C	1.083	0.682

注:C表示普通透明玻璃,L表示Low-e玻璃,A表示空气夹层,Ar表示氩气夹层。

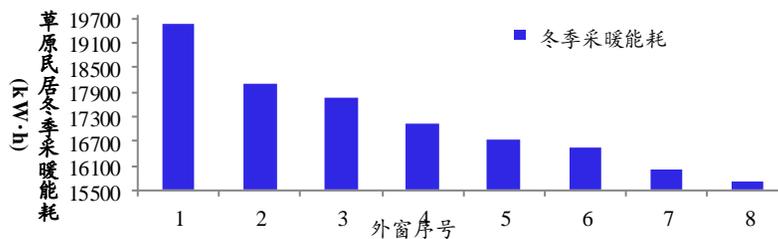


图4 不同类型外窗冬季采暖能耗

砖瓦+秸秆泥+吊顶构成,没有设置正规的保温层。室内热空气在秋冬季上浮于屋顶,造成热损失严重。

选择常见石墨聚苯乙烯泡沫板作为屋顶的保温层材料,在保持原屋顶结构的基础上,通过增设防水层和增加保温层厚度等手段,研究屋顶能耗变化规律,提供适合当地民居建设的保温材料选择。由图5可知,仅增

设10mm防水层后,屋顶虽具有一定的自身保温能力,但能源并未得到有效降低。在此基础上继续增加保温层草原民居冬季采暖能耗明显下降,保温层厚度设置60~300mm区间,取值间隔为30mm。当厚度达到210mm时采暖能耗曲线变化波动平缓,后续增加保温层厚度草原民居冬季采暖能耗降低值不明显。

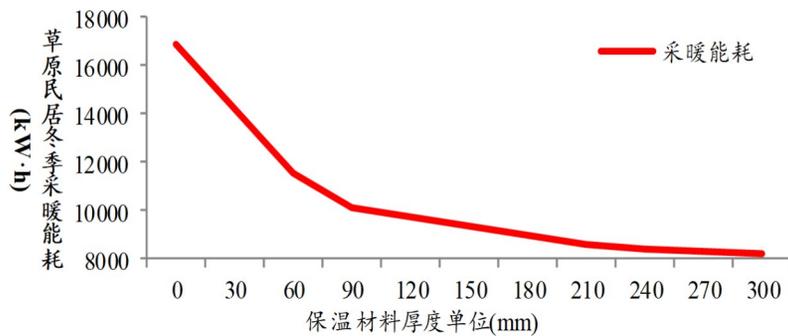


图5 屋面改造后冬季采暖能耗

考虑到当地牧民经济情况,选择210~240mm范围内石墨聚苯乙烯泡沫板作为屋顶的保温层材料较为合适。从民居采暖耗能量来看,随保温层厚度的增加呈逐渐降低趋势,但能耗的降低趋势随保温层厚度无限扩大时逐渐趋于缓和。保温层210mm时传热系数为 $0.096\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,240mm时传热系数为 $0.088\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,300mm传热系数为 $0.075\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。传热系数从 $0.096\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 降低至 $0.088\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,冬季采暖能耗递减百分比为2.12%,传热系数从 $0.088\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 降低至 $0.075\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,冬季采暖能耗递减百分比为2.13%。此时继续增加保温层的厚度对草原民居冬季采暖能耗的减少效果已不明显。通过上述简单的分析可以初步得出,内蒙古西部草原民居屋面的最佳保温层厚度为240mm,对应选择的传热系数为 $0.088\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 为宜。

#### 2.4 草原民居外墙外保温材料及厚度优化

超低能耗建筑对外墙的隔热保温要求高于普通节能建筑,还要兼具抗老化、防火防潮、耐候行良好等功能。鉴于内蒙古巴彦淖尔市属于严寒地区对保温材料的自身性能要求更严苛,以及当地牧民经济条件的限制,选取石墨聚苯乙烯、岩棉、硬质聚氨酯、STP真空绝热板四种保温材料进行研究,选择加气混凝土代替普通烧结砖作为内蒙古草原民居的墙体主要材料。研究不同结构构造形式的内蒙古草原民居外墙方案,见表3。

模拟分析各方案的冬季采暖能耗,得到加气混凝土墙体结合不同保温材料的冬季采暖能耗对比,如图6

所示。

##### 2.4.1 同保温材料不同厚度对采暖能耗的影响

草原民居的冬季采暖能耗受外墙保温材料厚度影响较大,冬季采暖能耗会因外围护结构保温层厚度的增加而逐渐降低。根据图6可以看出,4种保温材料冬季采暖能耗随厚度变化的趋势走向基本一致,且都存在相同的递减模式,类分函数曲线图。保温材料厚度未超过200mm时下降速度较快,超过200mm后能耗减少趋势略平缓。但是由于增加保温层厚度会引起建筑成本的提高,若不考虑经济情况,在给出的保温层限值内,超低能耗草原民居的外墙厚度越厚冬季采暖能耗越低。

##### 2.4.2 同厚度不同保温材料对采暖能耗的影响

根据图6的能耗结果显示,相同厚度的保温材料真空绝热板的能耗最少;其次是硬质聚氨酯和石墨聚苯乙烯,而岩棉的冬季采暖能耗相较于其他3种材料显著增加;硬质聚氨酯和石墨聚苯乙烯两者的采暖能耗相差不大。采用STP真空绝热板具备大幅降低采暖能耗的优势,并且在达到相同能耗时STP真空绝热板的厚度较其他3种材料可减少近50%的厚度,但根据现有实际测量结果分析,真空绝热板性能受工艺及外界环境的影响较大,保温隔热性能无法得到保障,多数测量结果只能达到理论值的80%。另STP真空绝热板的造价相对其他3种保温材料略高,出于多因素考虑,在优化内蒙古西部草原民居外墙保温时选择放弃STP真空绝热板材料。综上,在不考虑经济条件时,同厚度前提下硬质聚氨酯、

表3 外墙结构及保温材料厚度范围

序号	外墙结构(mm)	保温材料厚度(mm)	传热系数 $\text{K}(\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$
1	10mm抹灰涂层+石墨聚苯乙烯+20mm水泥砂浆+240mm加气混凝土+20mm抹面砂浆	100~300	0.085~0.189
2	10mm抹灰涂层+岩棉+20mm水泥砂浆+240mm加气混凝土+20mm抹面砂浆	100~300	0.100~0.212
3	10mm抹灰涂层+硬质聚氨酯+20mm水泥砂浆+240mm加气混凝土+20mm抹面砂浆	100~300	0.069~0.160
4	10mm抹灰涂层+STP真空绝热板+20mm水泥砂浆+240mm加气混凝土+20mm抹面砂浆	100~300	0.037~0.173

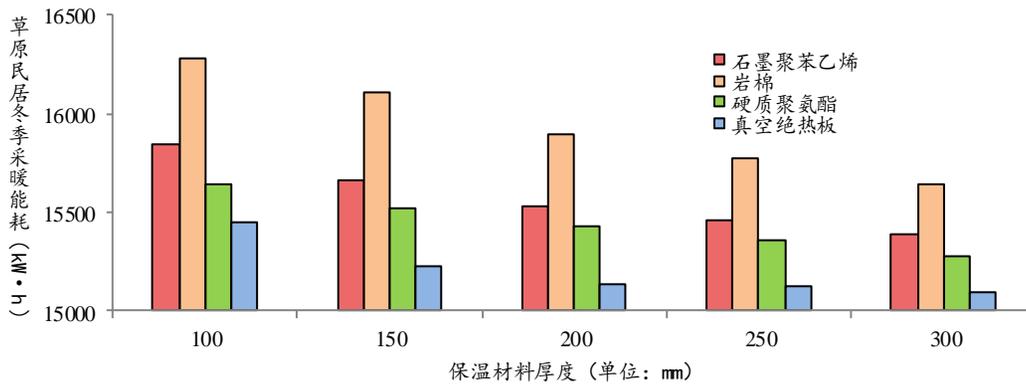


图6 加气混凝土墙体结合不同保温材料冬季采暖能耗

石墨聚苯乙烯和岩棉3种保温隔热性能选择时,可参考优先石墨聚苯乙烯次之硬质聚氨酯然后岩棉的顺序进行选择。

### 3 保温层经济性分析

为选择适合严寒地区的最佳保温材料厚度,本文选择使用净现值法来分析。净现值法(NPV)是经济性分析方法中常用的评价方式,是指节能节约费用经社会折现率后与初始投资费用的差值。通过式(1)计算各种材料不同厚度的NPV值,可以得到保温材料较经济的保温层厚度:

$$NPV = \sum_{t=1}^n (CO - CI) \times (1 + i)^{-t} \quad (1)$$

式中:NPV——净现值,元;  
CI——年节约费用,元;

CO——初始投资费用,元;  
i——社会折现率,%;  
t——使用年限。

经当地走访,硬质聚氨酯、石墨聚苯乙烯和岩棉的市场价格分别为900元/m<sup>3</sup>、700元/m<sup>3</sup>、1100元/m<sup>3</sup>,社会折现率设为5%,当地商用电价为0.526元(kW·h),使用年限约为25年。通过计算适合内蒙古西部草原民居的3种外保温材料不同厚度的净现值和节能率如图7所示。

若仅考虑净现值的情况下,NPV值越大对应的保温材料经济效益越大。NPV值最大都出现在保温材料厚度最低限值时,即3种材料厚度均为100mm时,而对于内蒙古西部草原民居而言,还应考虑民居的节能率,当外保温层厚度最大时,其节能率必然也最低。通过Matlab软件对内蒙古西部草原民居的净现值和节能率的曲

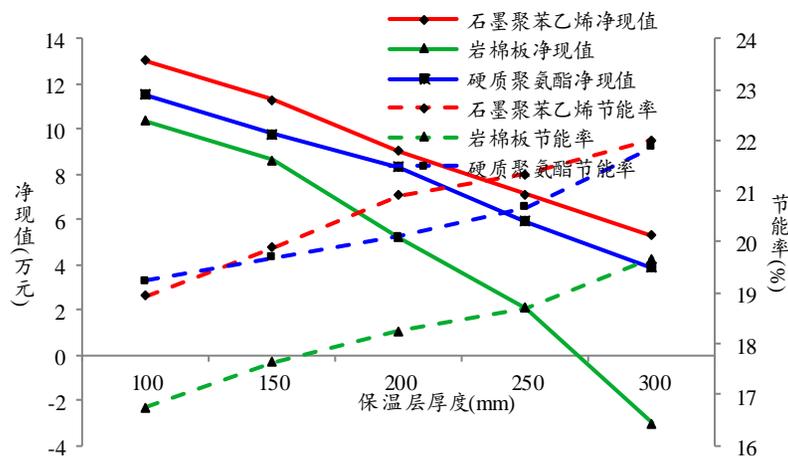


图7 不同保温材料不同厚度净现值与节能率对比

表4 优化后草原民居围护结构参数

项目	构造	传热系数 K(W/m <sup>2</sup> ·K)
外墙结构	10mm 抹灰涂层+220mm 石墨聚苯乙烯+20 mm 水泥砂浆+240 mm 加气混凝土+20 mm 抹面砂浆	0.111
外窗结构	三层 Low-e 双中空玻璃	1.537
外门结构	保温夹层防盗门	1.817
屋顶结构	25mm 瓦面+10mm 防水层+240mm 石墨聚苯乙烯+80mm 石棉水泥板+吊顶	0.106
内门结构	保温夹层木门	1.268
地面结构	瓷砖+20mm 水泥砂浆找平层+碎石垫层+素土夯实	0.767
附加阳光间	双层惰性气体中空玻璃钢架结构	2.134
人员密度	人员均数为4人	/
室内热扰	0	/

线分别进行拟合, NPV 和节能率的交点所对应的厚度则为保温材料最优厚度。曲线拟合方程如下:

$$\text{硬质聚氨酯: } Y_{NPV} = -2086.9x^2 - 4415x + 117886.4;$$

$$Y_{\text{节能率}} = -0.002x^2 + 0.0251x + 0.1426,$$

计算得  $x=239\text{mm}$ 。

$$\text{石墨聚苯乙烯: } Y_{NPV} = -1751x^2 - 8987.6x + 159848.8;$$

$$Y_{\text{节能率}} = -0.0017x^2 + 0.0203x + 0.1655;$$

计算得  $x=220\text{mm}$ 。

$$\text{岩棉: } Y_{NPV} = -2212.4x^2 - 11058x + 95677;$$

$$Y_{\text{节能率}} = -0.0022x^2 + 0.0262x + 0.151;$$

计算得  $x=245\text{mm}$ 。

综上所述,综合净现值 NPV 和节能率分别可以获得内蒙古西部草原民居 3 种外墙保温材料的最优厚度。在内蒙古西部严寒地区,硬质聚氨酯、石墨聚苯乙烯和岩棉的最优厚度为 239mm、220mm、245mm。同时 3 种保温材料的综合性能均为石墨聚苯乙烯>硬质聚氨酯≈岩棉。

#### 4 综合分析

根据以上提出的关于内蒙古西部草原民居超低能耗外围护结构构建,最终选择的适合内蒙古西部超低能耗草原民居外围护结构构建参数如表 4。在 DeST 能耗模拟软件中输入表 4 外围护结构构件,对其进行冬季采暖能耗模拟。环境、热扰参数设置应设置与初始模型相同参数。附加阳光间开启关闭时间设置为冬日平均日和日落时间,即开启时间为 7:00~17:00,关闭时间为 17:00~7:00。内蒙古西部超低能耗草原民居附加阳光间整体模型图见图 8。

通过对初始模型和优化后两种模型的模拟能耗结果分析,未优化前内蒙古西部草原民居初始模型冬季采暖总能耗达到 19552.11 kW·h,冬季采暖能耗为 221.83 kW·h/m<sup>2</sup>。而增加阳光间后的优化内蒙古西部草原民居模型冬季采暖能耗可达到 2622.4 kW·h。冬季采暖能耗为 29.75 kW·h/m<sup>2</sup>。对比两组数据,冬季采暖能耗节能率达到 86.7%,低于严寒地区超低能耗居住建筑能耗为

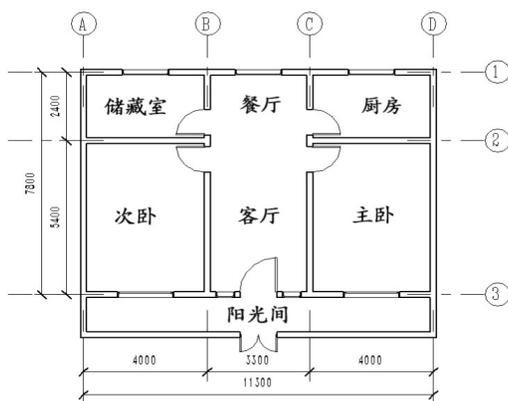


图8 附加阳光间整体模型图

30 kW·h/m<sup>2</sup>的标准值,冬季采暖能耗得到大幅降低。

## 5 结语

文章通过 DeST 模拟软件分析了不同材料在内蒙古西部严寒地区草原民居外围护结构的能耗状况,计算了所对应材料的节能率,并对所选外墙保温材料运用工程技术经济学中净现值法进行经济分析,主要结论如下:

(1)在超低能耗标准外墙传热系数限值内,随着保温材料厚度的增加,草原民居冬季采暖能耗明显下降,但下降走势随着保温层变厚而逐渐平和;通过对所选不同保温材料不同厚度的 NPV 值与节能率的对比,得到3种材料在达到超低能耗技术指标要求时的外墙保温最佳经济厚度分别为:硬质聚氨酯 239 mm、石墨聚苯乙烯 220 mm 和岩棉 245 mm。

(2)3种保温材料中节能率最大的是石墨聚苯板。因此,对内蒙古西部草原民居外围护结构优化,外墙宜选择 220mm 的石墨聚苯板及加气混凝土砖;外窗应优先选用 3 层 Low-e 双中空玻璃塑钢窗;屋面保温层材料应优先选用传热系数为 0.088 W/(m<sup>2</sup>·K)的石墨聚苯乙烯泡沫板,最佳厚度宜为 240mm。

(3)对各方案的节能率进行计算分析,结果表明,改变外墙保温层后节能效果最佳,节能率可达到 20.92%,而外窗及屋面的节能率分别为 16.21%、11.29%。综合外墙、外窗、屋面优化结果可使内蒙古草原民居冬季采暖能耗降低至 4118.4 kW·h,节能率超过 82.1%。在这基础上增加被动式阳光间后,节能率可达 86.7%,能耗进一步显著降低,实现了超低能耗在内蒙古西部严寒地区民居建筑冬季采暖能耗的技术指标要求,为我国实现“两山论”、“全面推进可持续发展”目标开辟了新的途径。

## 参考文献:

- [1] 金虹,陈凯,邵腾,等. 应对极寒气候的低能耗高舒适村镇住宅设计研究——以扎兰屯卧牛河镇移民新村设计为例[J]. 建筑学报,2015,1(2):74-77.
- [2] 王宁,闫增峰. 西安地区居住建筑外墙节能潜力研究[J]. 建筑与文化,2018(8):195-196.
- [3] 任志刚,张强,涂警钟,等. 基于气候适应性分析德国被动房概念在中国的实现[J]. 建筑科学, 2017,33(4):150-157.
- [4] 徐伟,孙德宇. 中国被动式超低能耗建筑能耗指标研究[J]. 动感(生态城市与绿色建筑), 2015(1):37-41.
- [5] 张雅婷. 严寒地区近零能耗办公建筑节能设计研究[D]. 沈阳建筑大学,2016.
- [6] 浦华勇,孔祥忠,樊则森,等. 国内钢结构装配式被动房设计实践[J]. 建设科技,2018(13):42-47.
- [7] 尹志芳,李聪聪,路国忠. 不同软件在超低能耗建筑能耗分析中的对比[J]. 墙材革新与建筑节能,2018(6):41-46.
- [8] 于玉,李慧. 基于山东省超低能耗建筑设计标准的某建筑能耗模拟探究[J]. 建筑节能,2017,45(12):77-79+94.
- [9] 李峥碟,篙玉辉,赵群,等. 夏热冬冷地区超低能耗建筑热工优化设计及负荷分析[J]. 建筑科学, 2017,33(12):182-187.
- [10] 徐伟,吕燕捷,孙德宇. 超低能耗建筑新风系统不同运行策略下新风热负荷计算[J]. 建筑科学,2016,32(4):10-14.
- [11] 潘黎,徐强. 上海地区气候适应型被动式超低能耗建筑技术路线探索[J]. 建设科技,2015(23):22-23+28.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50824-2013,农村居住建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
- [13] 胡亚男,李兴华,郝玉珠. 内蒙古太阳能资源时空分布特征与评估研究[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(12):132-138.
- [14] 桑国臣,王文康,朱轶韵,等. 多空间被动式太阳能采暖建筑热工设计[J]. 西安理工大学学报,2018,34(2):141-146+171.

# Energy-saving Optimization of the Peripheral Protection Structure of Ultra-Low Energy-Consuming Grassland Residential Buildings in Western Inner Mongolia



JIN Guohui<sup>1,2</sup>, LI Jia<sup>1</sup>, YANG Peng<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010

2. State Key Laboratory of Green Buildings in the West, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710043

**Abstract:** The study aimed to solve the western Inner Mongolia grassland dwellings' problems of poor indoor thermal environment quality, large energy waste and low heating efficiency caused by unscientific design of the outer envelope structure of residential buildings. The initial residential houses in western Inner Mongolia were analyzed, and the DeST software was used to optimize the building structure, replace thermal insulation materials, increase the thickness of the thermal insulation layer, and replace external windows to study the impact of the thermal insulation performance of the external protective structure on the building energy consumption, and its economic performance analysis was conducted. Through the net present value method, the net present value and energy-saving rate of the three types of external insulation materials with different thicknesses suitable for the grasslands in western Inner Mongolia were calculated. The results showed that the optimization of the outer wall enclosure structure obtained the best effect on the overall energy saving of the building, and the energy saving rate could reach 20.92%. The overall energy saving rate of the outer protection structure optimization of ultra-low energy grassland residential buildings in western Inner Mongolia exceeded 86.7%, and the heating energy consumption in winter was 29.75 kW·h/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** ultra-low energy consumption; grassland dwellings; exterior protection structure

(责任编辑:何岸波; 责任译审:毛子英 何岸波)