

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-455-07

西安农村住宅建筑围护结构 热工性能实测及节能改造优化研究

谢安生 郝倩 田欣猛 江超

(长安大学建筑工程学院 西安 710064)

【摘要】 西安地区占据关中盆地大部分区域,农村面积较大、冬季采暖能耗较高。为了减少农村地区冬季采暖能耗,改善农村房屋居住环境,对西安农村住宅形式及构造进行了调研,实测其围护结构传热系数。并基于实测结果对外墙、屋顶、外窗进行改造。对比建筑围护结构改造前后的采暖热负荷,综合考虑改造节能率及经济分析,得出结论:基于同一种改造方式,针对不同构造形式的农村建筑,需制定不同的改造优先策略。

【关键词】 农村住宅;节能改造;负荷模拟;优化
中图分类号 TU201 文献标识码 A

Energy Saving Optimization for Rural Residential Building Envelope Structure in Xi'an with Measured Data

Xie Ansheng Hao Qian Tian Xinmeng Jiang Chao

(School of architectural engineering, Chang'an University, Xi'an, 710064)

【Abstract】 Xi'an occupies most of the Guanzhong basin, which has a large rural area and high heating energy consumption in winter. In order to reduce heating energy consumption in rural areas, and further improve the living environment of rural houses, the layout and building envelope structure of rural residential building in Xi'an were investigated, the heat transfer coefficient of the surrounding structure were measured as well. And based on the actual measurement results to transform the external walls, roofs, and external windows. Then we compare the heating load before and after the building enclosure structure transformation, the energy saving rate and economic analysis should be considered comprehensively, the result shows that based on the same transformation method, and different transformation priority strategies should be formulated for rural buildings of different structural forms.

【Keywords】 rural residential building; energy-saving renovation; heating load simulation; optimization

基金项目: 陕西省2021年自然科学基金基础研究计划项目(2021JM-176)

作者(通讯作者)简介: 谢安生(1964.02-),男,硕士,教授级高级工程师, E-mail: 82129710@qq.com

收稿日期: 2021-09-23

0 引言

随着城镇化的逐步推进,农村住宅的规模已经基本稳定在230亿 m^2 左右,农村人口减少至5.6亿人,人均住房面积达到 $41m^2/人$ ^[1]。2018年农村住宅的能耗为2.16亿tce,占全国建筑总能耗的

22%^[1]。“新农村建设”与“节约型社会”工作的开展和深入使得农村建筑节能受到广泛关注。西北地区作为我国七大地理分区之一,既有建筑的节能改造是建筑节能的重点任务^[2]。

农村居住建筑节能改造问题,一直都受到关

注。刘满等^[3]人针对辽宁省农村住宅进行了调研, 并进行能耗结构的研究, 提出了适合该地区的节能措施。张晓丹^[4]针对陕西地区农村住宅, 结合外围护结构的保温措施, 对墙体保温结构进行传热计算, 从而提出适合该地农村住宅的墙体保温结构。李政等^[5]利用 DeST 模拟软件, 对山东某农村建筑进行模拟, 计算出用聚氨酯硬泡沫塑料作为保温材料时的最佳厚度层, 且南向外墙为最佳保温外墙。白雪^[6]通过对比测试不同类型的保温材料的性能, 运用 DeST-h 模拟全年能耗计算出了能耗降低值, 得出了最经济实用的保温材料厚度。张兴惠等^[7]通过将 DeST 模拟软件、ADIAN 有限元分析软件相结合, 分析建筑能耗及围护结构传热等相关问题, 得出墙体耗能占比最高。李哲^[9]提出针对学校围护结构收益率外窗改造最高, 外墙次之, 屋顶最低。冷红等^[10]通过 EnergyPlus 软件模拟不同形态建筑, 发现各类住宅的体形系数与住宅单位体积总能耗成正比, 建议在进行寒冷城市居住规划时, 应在满足各项规范的基础上使住宅体形系数最小化。张海滨等^[11]提出当实际的体形系数超过规定范围时, 可以通过提高围护结构热工性能, 进而权衡判断建筑是否满足要求。

现有研究大多以围护结构热工参数的理论值为基础, 对墙体保温结构及材料、改造效果进行了研究, 但对农村住宅建筑围护结构热工性能的实测研究以及改造优先性的研究较为缺乏, 忽略了即有农村居住建筑的实际围护结构热工性能, 从而影响改造后的实际效果。

本文对西安地区既有农村住宅建筑进行了实地调研, 选取具有代表性的布局形式建筑, 使用热流计法测试了通过外墙和屋面的热流, 使用温度传感器测试了墙体内外壁面温度, 通过算术平均法计算得出墙体热阻及传热系数。确定合理的改造方案, 使用 DeST 能耗模拟软件模拟计算建筑节能改造前后的建筑热负荷, 并计算得出改造节能率; 同时结合经济性分析, 提出西安地区农村住宅建筑节能改造的优化方案, 得出农村地区建筑围护结构改造的优先顺序。

1 农村住宅建筑围护结构特征

西安市地势平坦, 村落密度、地理环境相似, 选取西南部鄠邑区(陈坪村)、东北部高陵区(南

郭村)的农村住宅进行分析。

1.1 建筑布局型式

西安地区农村住宅的型式主要有传统大进深型(见图1)、分块非对称型(见图2)、分块对称型(见图3)和L型(见图4)四种布局型式。建筑布局正南正北, 窗户主要在南、北两面外墙上。

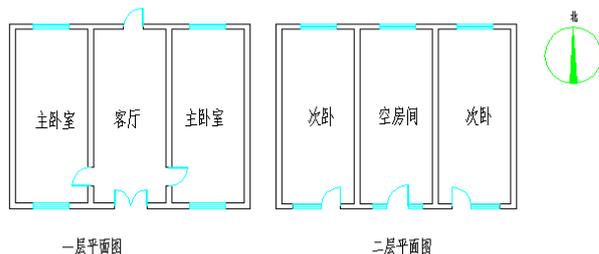


图1 农村住宅建筑布局型式一

Fig.1 The first type of rural residential building layout

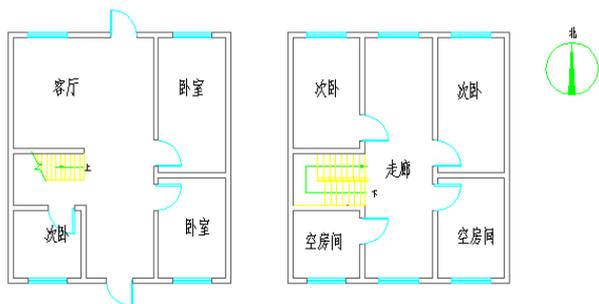


图2 农村住宅建筑布局型式二

Fig.2 The second type of rural residential building layout

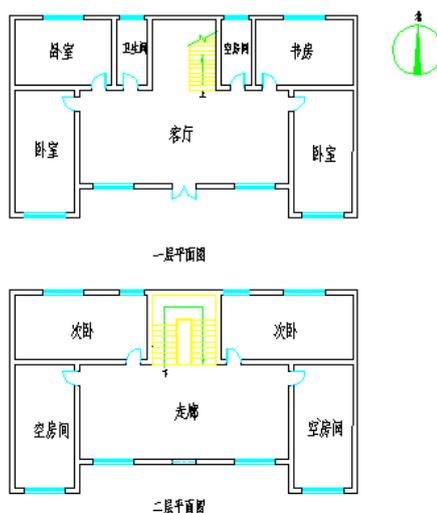


图3 农村住宅建筑布局型式三

Fig.3 The third type of rural residential building layout

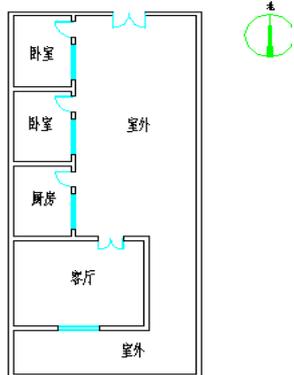


图 4 农村住宅建筑布局型式四

Fig.4 The fourth type of rural residential building layout

模拟得出以上四种布局型式的采暖季平均热负荷分别为 $64.47\text{W}/\text{m}^2$ 、 $73.77\text{W}/\text{m}^2$ 、 $71.99\text{W}/\text{m}^2$ 、 $125.98\text{W}/\text{m}^2$, 且最大热负荷分别可达 $199.88\text{W}/\text{m}^2$ 、 $173.95\text{W}/\text{m}^2$ 、 $195.23\text{W}/\text{m}^2$ 、 $216.16\text{W}/\text{m}^2$, 可得供暖季农村房屋热负荷较大。

1.2 建筑特征

西安地区的农村住宅主要为单层或二层单体建筑, 前三种建筑布局型式为鄠邑区陈坪村的典型建筑, 建筑布局型式四为高陵区南郭村的典型建筑, 所有住宅建筑的外墙、屋面均无保温层。

表 1 建筑特征

Table 1 Architectural features

建筑布局型式	所在位置	体形系数	围护结构构造形式
一	鄠邑区陈坪村	0.646	240mm 厚实心黏土砖加内外抹灰+预制水泥板+木门+铝合金窗
二	鄠邑区陈坪村	0.528	240mm 厚实心黏土砖加内外抹灰+预制水泥板+木门+铝合金窗
三	鄠邑区陈坪村	0.534	240mm 厚实心黏土砖加内外抹灰+预制水泥板+木门+铝合金窗
四	高陵区南郭村	1.002	240mm 厚实心黏土砖加内外抹灰+现浇屋面+木门+木窗

体形系数是影响建筑能耗的重要因子, 根据《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 26-2018^[12], 寒冷地区居住建筑节能设计标准限定住宅体形系数的取值应 ≤ 0.57 , 布局二、三建筑满足规范要求。

西安地区受传统建房形式、社会、经济等多方面的影响, 村落住宅建设缺乏规划, 具有无序性, 是制约农村住宅节能水平提升的瓶颈^{[13][14]}。对既有建筑而言, 体形系数较难改变, 降低既有农村建

筑能耗, 应主要通过改善围护结构热工性能来实现^[11]。

1.3 围护结构热工性能测试

测试时间为 2020 年 12 月, 根据《居住建筑节能检测标准》(JGJ/T132-2009)^[15], 采用热流计法检测外墙及屋面传热系数。测试房间采用 2200W 电加热器连续供热。为了减少太阳辐射对墙体温度的干扰, 将测点布置于测试房间北外墙上。测试仪器参数如表 2 所示。

表 2 测试仪器概况

Table 2 Overview of test equipment

仪器名称	型号	测试内容	测量范围	测量精度
热流计	HS-100	热流密度	-200~200kW/m ²	±3%
热电偶	K 型	围护结构表面温度	-50~300°C	±0.5°C

热流计及热电偶布置如图 5、图 6 所示。室内每个测点测试了该点处内壁面温度及通过的热流, 温度传感器布置于热流计两侧 (见图 5), 室外墙面的测点对应室内温度探测点相同位置布置温度传感器 (见图 6)。测试外表面温度时采用锡纸覆盖温度传感器探头避免阳光直射, 以保证墙体外表面温度测试的准确性。



图 5 建筑内部测点布置

Fig.5 Layout of measuring points inside the building



图 6 建筑外部测点布置

Fig.6 Layout of measuring points outside the building

以布局二建筑为例，测试总时间为 114h，采用其中较为稳定的 96h 的数据进行分析。如测点 1，末次计算得出的热阻值为 $0.47\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ，24h 之前的计算值 $0.45\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ，差值为 4.4%，小于 5%，处于规定范围。

测试期间的温度数据显示（见图 7），外壁温度与室外温度变化趋势极为相近，内壁温度与室内温度较为接近，且变化趋势相同，且峰值存在时间上的延迟，延迟时间约为 30min。由于现场测试条件限值，墙体内外表面温度差值在 $5.1\text{℃}\sim 12\text{℃}$ 之间，呈周期性变化（见图 8）。

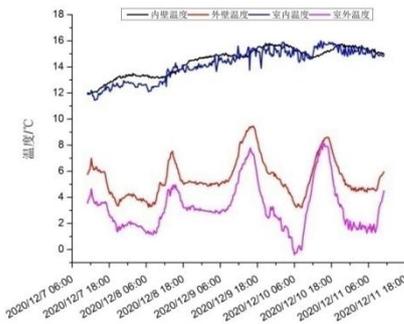


图 7 室内外温度变化图

Fig.7 Indoor and outdoor temperature change graph

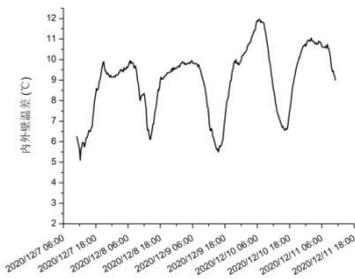


图 8 内外壁面温差

Fig.8 Temperature difference between inner and outer walls

采用算术平均法计算并进行数据分析。围护结构主体部位热阻按下式进行计算：

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (t_{i_j} - t_{e_j})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (1)$$

式中： R 为围护结构主体部位热阻， $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ； t_{i_j} 为围护结构主体部位内表面温度的第 j 次测量值， ℃ ； t_{e_j} 为围护结构主体部位外表面温度的第 j 次测量值， ℃ ； q_j 为围护结构主体部位热流密度的第 j 次测量值， W/m^2 。

围护结构主体部位传热系数按下式计算：

$$K = \frac{1}{R_i + R + R_e} \quad (2)$$

式中： K 为围护结构主体部位传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； R_i 为内表面换热热阻， $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ，一般取 0.11； R_e 为外表面换热热阻， $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ，一般取 0.04。

测试计算结果如表 3 所示。

表 3 住宅建筑墙体及屋面实测传热系数 $K[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$

Table 3 Measured heat transfer coefficient of residential wall and roof		
建筑布局型式	外墙主体部位平均值	屋顶平均值
一	1.33	—
二	1.405	2.39
三	1.383	2.765
四	1.69	3.83

根据《农村居住建筑节能设计标准》（GB/T 50824-2013）^[16]，寒冷地区外墙传热系数限值为 $0.65\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，屋面为 $0.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，南向外窗 $2.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，其他外窗 $2.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。分析以上数据可得，西安农村地区住宅建筑围护结构的传热系数较大，外墙传热系数实测值相比于规范值超出 104.6%~161.5%，屋面的传热系数则超出规范值 378%~666%，且现浇屋顶相较于预制水泥板屋面的传热系数大约 48.6%。

从测试结果可以看出，西安地区的围护结构保温性能较差，舒适度较低，建筑节能现状不理想。为了使农村居民拥有良好的居住舒适度，同时达到节能效果，需对农村居住建筑采取节能改造措施。

2 围护结构改造优化

2.1 改造措施

建筑外墙建筑节能改造主要通过保温实现; 外窗除了增加保温性能, 还要增加采光率和气密性; 屋面围护结构改造可通过设保温或设置室内吊顶实现^[17]。

根据布局二建筑的围护结构热负荷, 得出外门及地面热负荷占比分别为 4%、5%, 占总围护结构热负荷比例极小, 所以不考虑对外门及地面的改造。

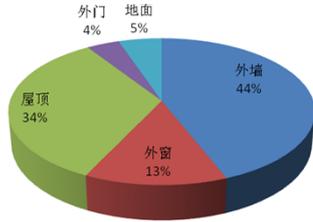


图 9 围护结构热负荷

Fig.9 Surrounding structure heat load

表 4 改造方案及改造后围护结构传热系数

Table 4 Remodeling plan and heat transfer coefficient of surrounding structure after transformation

改造对象	改造方案	改造后传热系数 K [$W/m^2 \cdot K$]			
		布局一	布局二	布局三	布局四
外墙	50mmEPS 板对外墙外保温改造	0.552	0.561	0.559	0.606
外窗	6mm+9A+6mm 塑钢中空双玻窗	2.5	2.5	2.5	2.5
屋面	70mmEPS 板屋面外保温+20mmEPS 板吊顶保温	0.429	0.428	0.439	0.46

2.3 节能分析

2.3.1 采暖参数设置

采用 DeST 软件对住宅改造前后的能耗进行模拟。室内采暖温度设定为 $16^{\circ}C$, 由于农村建筑房间较多, 存在些许空房间, 不对其设置采暖。人员作息、采暖时间等参数如表 5 所示。

表 5 负荷计算参数设置

Table 5 Load calculation parameter setting

作息时	8:00~20:00	20:00~8:00
卧室人员在室率	0	1
采暖时间	0	1
人员密度 (总量指标)	2	2
客厅人员在室率	1	0
采暖时间	1	0
人员密度 (总量指标)	3	3

2.3.2 改造效果分析

围护结构改造方法后的传热系数数据均达到规范要求, 并通过模拟得出改造前后西安地区农村建筑的采暖季平均热负荷及其节能率。

2.2 改造方式选取

外墙及屋顶保温可选择发泡聚苯乙烯 (EPS) 板和挤塑聚苯乙烯 (XPS) 板, EPS 板的价格相对较低, 施工过程相对简单, 因此现选取常用的聚苯乙烯泡沫塑料板为保温材料。当保温层厚度到达一定程度后, 节能率会降低^[6], 选择导热系数为 $0.047W/(m \cdot K)$ 、厚度为 50mm 的 EPS 板进行外墙外保温改造; 屋顶保温材料采用与墙体相同, 厚度为 70mm; 对吊顶进行保温, 在吊顶上敷设聚苯板 20mm。

既有建筑的外窗大多采用的是木窗或者铝合金窗户, 保温性能不佳。在寒冷地区, 宜将单层玻璃窗改造为双层玻璃窗, 且使用塑钢做窗框保温性能会更好^[18]。综上, 窗户选用传热系数为 $2.5W/m^2 \cdot K$ 的 6mm+9A+6mm 塑钢中空双玻窗。

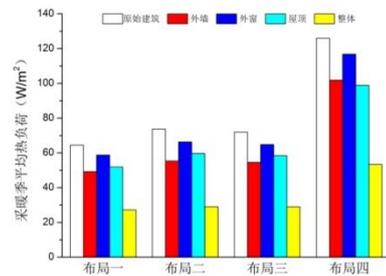


图 10 围护结构改造前后平均热负荷对比

Fig.10 Comparison of the average heat load before and after the renovation of the surrounding structure

分析图 10, 前三种布局形式建筑同时采取节能措施后采暖季平均热负荷分别可降低至 $27.22W/m^2 \sim 28.99W/m^2$ 。其中单项改造中外墙的改造效果最好, 其次为改造屋顶, 外窗由于建筑的窗墙比较小, 且改造前后的传热系数变化量为 $0.7W/m^2$, 改变幅度要小于外墙与屋顶, 所以外窗的改造效果最差。

布局形式四建筑为现浇屋顶, 外窗为木窗的一层建筑, 围护结构传热系数较大, 因此较于前三种布局形式建筑热负荷偏大, 同时采取节能措施后的

采暖季平均热负荷从 125.98W/m² 降低为 53.37W/m²。且从图中可见，改造屋顶的热负荷降低量要大于外墙改造，改造外窗后的热负荷变化值最小。

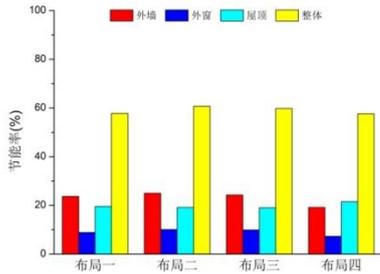


图 11 各改造项目节能率

Fig.11 Energy saving rate of each renovation project

由图 11 可见，前三种布局形式建筑单项改造中，改造外墙节能率最大，可达 23.7%~24.98%，其次为改造屋面，节能率可以达到 18.96%~19.57%。布局形式四建筑改造外墙的节能率为 19%，小于改造屋面的节能率 21.51%。

每种布局形式建筑改造窗户的节能率均小于其余单项改造节能率，约为 7.3%~10.09%；若是整体改造，可使节能率达到 57.64%~60.70%。墙体保

温层与屋顶保温层两者采用的保温层厚度不同，通过降低的热负荷得出节能率，可综合节能效果及经济性比较两个单项节能措施的优先级。

由于计算建筑能耗的围护结构参数不一样，故无法将体形系数与能耗直接作比较。但分析节能率数据可得，改造整体的节能率与体形系数呈正相关关系。

3 经济分析

将建筑能耗折合为电价，按电价取 0.5 元/kWh，材料费参考市场价，EPS 板 400 元/m³，塑钢双玻窗价格为 320 元/m²。对于一般建筑物可以安全使用 50 年，外墙、屋顶保温层的使用年限 25 年，塑钢窗的使用年限取值 30 年。实际过程中热负荷随室外温度逐时变化，因此以耗热量进行经济性分析。投资回收期按下式计算：

$$\text{投资回收期} = \frac{\text{项目总投资}}{\text{项目运行后的年净收益}} \quad (3)$$

以外墙为例，投资回收期 = $\frac{4934}{9274-6947} \approx 2.1$ 年，节约电费 = $(25 - 2.1) \times (9274 - 6947) = 53288$ 元，其余结果如表 6 所示。

表 6 围护结构保温措施的经济比较

Table 6 Economic Comparison of Thermal Insulation Measures for Envelope Structure

保温特征	耗热量/kWh	折合电价/元	保温造价/元	投资回收期/年	节约电费/元
保温前	18548	9274	/	/	/
保温后 外墙	13894	6947	4934	2.1	53288
保温后 外窗	16743	8371.5	10368	11.5	16696
保温后 屋顶	15195	7597.5	3991.68	2.4	37889

表 6 中布局形式二建筑采用该保温措施在使用年限内一共可节省总数约为 10.79 万元。外墙和屋顶的投资回收期较短，分别为 2.1 年、2.4 年，分别可节约电费约 5.32 万元、3.79 万元。而外窗改造的投资回收期最长，可达 11.5 年，可节约电费 1.67 万元。以投资回收期为依据，综合考虑节约电费，外墙与屋顶的改造最为可观，且外墙改造优先于屋顶。经计算，构造形式一中其余两种布局形式与布局二建筑结论相同。

布局形式四建筑可节省总数约 5.8 万元。外墙和屋顶的投资回收期分别为 2.2 年、1.8 年，分别可节约电费 2.37 万元、2.94 万元。而外窗改造的投资回收期最长，可达 14.2 年，可节约电费 0.5 万

元。改造的优先顺序应为屋顶、外墙、外窗。

4 结语

经实测，西安农村居住建筑围护结构的传热系数远超出规范值。该地区外墙以及屋顶的传热热阻小，传热系数大，导致室内热舒适性差、供暖能耗高。

确定了合理的改造优化方式：50mmEPS 板进行外墙外保温改造；70mmEPS 板进行屋顶改造+吊顶上敷设聚苯板 20mm；窗户选用传热系数为 2.5W/m²·K 的 6mm+9A+6mm 塑钢中空双玻窗。改造整体的节能率达到 57.64%~60.70%，与体形系数呈正相关关系。

基于同一种改造方式, 应针对不同构造形式的农村建筑, 制定不同的改造优先策略。综合考虑改造的节能率、投资回收期 and 节约电费, 在资金有限的情况下, 构造形式为 240mm 厚实心黏土砖+内外抹灰+预制水泥板+铝合金外窗的建筑改造, 应优先考虑改造外墙, 其次为屋顶、外窗的节能改造; 构造形式为 240mm 厚实心黏土砖+ 内外抹灰+ 现浇屋面+木窗的建筑改造, 改造优先级依次为屋顶、外墙、外窗。

由于西安地区占据关中盆地大部分区域, 故关中地区的整体特征与西安具有极大的相似性。西安地区既有农村建筑节能改造的推广有助于推进关中地区农村节能改造及新建绿色节能农村建筑。

参考文献:

- [1] 中国国家统计局. 中国统计年鉴 2014[R]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [2] 中国建筑节能年度发展研究报告[R]. 清华大学建筑节能研究中心, 2020.
- [3] 范萍萍, 赵子琴. 西北地区农村既有农居建筑围护结构的节能改造[J]. 中国建材科技, 2019, 28(2): 26-27.
- [4] 刘满, 夏晓东. 辽宁省农村住宅的采暖方式与能耗研究[J]. 建筑节能, 2007, (7): 56-59.
- [5] 张晓丹. 陕西农村住宅墙体保温效果与节能技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011.
- [6] 李政, 刁乃仁, 姚晓宇. 山东某城市住宅建筑外墙节能优化的研究[J]. 区域供热, 2016, (5): 103-106.
- [7] 白雪. 关中地区居住建筑墙体保温性能设计研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
- [8] 张兴惠, 马质聪, 高晨晖, 等. 山西农村住宅建筑能耗分析及节能改造策略[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(5): 667-673.
- [9] 李哲. 山东地区农村建筑节能改造和清洁取暖适宜性分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [10] 冷红, 肖雨桐. 寒地城市居住区形态对住宅能耗影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(12): 147-156, 163.
- [11] 张海滨, 王立雄. 建筑节能设计因素影响分析[J]. 建筑节能, 2016, 44(1): 45-49.
- [12] JGJ 26-2018, 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [13] Tonooka Y, Liu J, Kondou Y, et al. A survey on energy consumption in rural households in the fringes of Xian city[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(11): 1335-1342.
- [14] 崔德芹. 新农村住宅节能问题研究[J]. 吉林农业科技学院学报, 2010, 19(3): 18-21.
- [15] JGJ/T 132-2009, 居住建筑节能检测标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [16] GB/T 50824-2013, 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.
- [17] 赵明, 赵香田. 农村住宅节能改造工程分析[J]. 建筑科学, 2019, 35(11): 145-146.
- [18] 白雪莲, 吴利均, 苏芬仙. 既有建筑节能改造技术与实践[J]. 建筑节能, 2009, 37(1): 8-12.
- [19] 刘学来, 李永安. 居住建筑外墙外保温作法及经济分析[J]. 建筑技术, 2005, (10): 7-9.