

新农村住宅建筑太阳能主动采暖室内热环境试验*

李金平^{1, 2, 3}, 甄箫斐^{1, 2, 3}, 李修真⁴, 崔维栋^{1, 2, 3}, 董缙⁴

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州市, 730050;

2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州市, 730050;

3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 兰州市, 730050;

4. 中国科学院广州能源研究所, 广州市, 510640)

摘要:解决新农村住宅冬季采暖问题是绿色节能建筑的一项技术壁垒。本文试验对比研究甘肃省民勤县两处相同朝向大小的新农村居住建筑室内空气温度和平均辐射温度, 其中一处经外墙保温改造且利用太阳能主动采暖技术, 另一处是未加任何改造的原始新农村住宅建筑。试验实时监测改造建筑的室内相对湿度、温度垂直分布和空气流速, 并对室内温度与相关因素的关系进行分析。结果表明: 在环境最低温度为 -16.2°C 的条件下, 改造建筑的室内平均温度、平均辐射温度分别高出未改造建筑 5.4°C 和 3.3°C , 改造建筑室内湿度为 58% , 室内空气流速为 0.28m/s ; 得到太阳能热水供暖时室内温度与暖气片热水温度和环境温度的二元线性关系。

关键词:太阳能; 农村建筑; 热环境; 采暖

中图分类号:TK01+9 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2016) 11-0161-05

李金平, 甄箫斐, 李修真, 崔维栋, 董缙. 新农村住宅建筑太阳能主动采暖室内热环境试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(11): 161~165

Li Jinping, Zhen Xiaofei, Li Xiuzhen, Cui Weidong, Dong Ti. Experimental study on indoor thermal environment of active solar heating in new rural residential construction [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11): 161~165

0 引言

随着我国新农村建设进程的推进和人民生活水平的提高, 人们越来越注重舒适的室内热环境, 许多新农村居住建筑开始摒弃烟熏火燎的火炕^[1]而寻找清洁、舒适的采暖方式。许多学者基于太阳能具有清洁、普遍、长久的优点, 已提出不同形式的太阳能供暖系统; 但研究重点主要在于供暖系统的性能方面, 而较少关注室内热环境的研究, 多以室内温度的描述一笔带过, 对新农村建筑采用太阳能主动供暖的室内热环境研究更少, 而欠舒适的室内热环境既会降低人们的工作效率, 又会影响人们的身心健康^[2]。

为定量分析太阳能主动供暖新农村居住建筑室内热环境, 并为改善室内热环境提出可行办法, 本文在甘肃民勤地区进行了现场实测对比试验, 为新农村建筑室内热环境的改善提供理论依据。

1 试验

1.1 试验背景

试验地点位于民勤县张麻村, 海拔 $1\,385\text{m}$, 气候属大陆性沙漠气候, 光照充足, 年平均气温 8.3°C , 建筑气候分区属寒冷(A)区^[3]。张麻村新农村建筑层高统一为 3m , 建筑面积约为 117m^2 , 外墙构造从内到外依次是 15mm 砂浆、 370mm 烧结多孔砖、 15mm 砂浆, 墙体传热系数为 $1.21\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。当地新农村建筑多采用小型燃煤锅炉带动暖气片的方式采暖。对一栋建筑进行节能改造作为试验建筑, 外墙外贴 60mm 挤塑聚苯板进行保温处理, 保温处理后的墙体传热系数为 $0.35\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; 在原有锅炉采暖管道基础上适当增添太阳能热水采暖部件, 形成太阳能主动采暖方式, 太阳能主动供暖系统如图1所示。太阳能主动供暖系统的运行方式依天气条件和蓄热水箱中热水温度而定。

收稿日期: 2016年7月14日 修回日期: 2016年8月17日

* 基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2015DFA60460); 国家 863 计划课题(2014AA052801); 甘肃省自然科学基金(1508RJZA051); 兰州理工大学“红柳杰出人才计划”(Q201101); 甘肃省自然科学基金项目(1508RJYA097); 甘肃省委组织部“陇原青年创新人才扶持计划”(09—059001)

第一作者: 李金平, 男, 1977年生, 宁夏中宁人, 博士, 教授, 博导; 研究方向为先进可再生能源系统。E-mail: zxf283386515@163.com

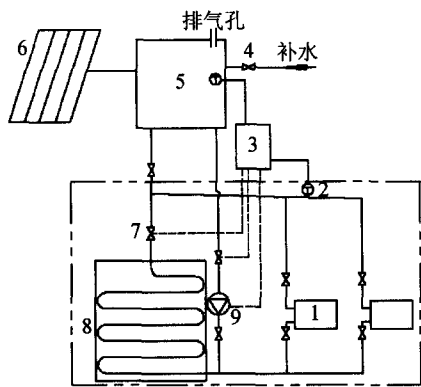


图1 太阳能主动供暖系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solar and boiler complementary system

1. 散热器 2. 温度传感器 3. 控制箱 4. 球阀 5. 蓄热水箱
6. 全真空玻璃管太阳能集热器 7. 电磁阀 8. 锅炉 9. 循环泵

试验采用的全玻璃真空管太阳能集热器将太阳辐射转变成热水热能蓄在蓄热水箱中,冬季当蓄热水箱中热水温度满足供暖需求(设定高于 50°C)时,太阳能热水供暖系统运行,控制箱关闭V1、打开V2,并启动循环水泵驱动蓄热水箱中热水至室内暖气片散热供暖;当蓄热水箱中热水温度低于供暖要求水温(设定低于 40°C)时,控制箱关闭循环水泵和V2并打开V1,由燃煤锅炉采用自然循环的方式驱动热水至室内暖气片散热供暖;其它季节关闭控制箱即可,蓄热水箱中热水

表1 测试参数及仪器

Tab. 1 Test parameters and instruments

测试参数	测试仪器	技术参数
室内外温度	四线制 Pt100 温度传感器	量程: $-50\sim 120^{\circ}\text{C}$, 精度: A 级, $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$
室内湿度	STH-TW2-RHT10AP2S0 温湿度变送器	温度范围: $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$, 精度: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$; 湿度范围: $0\sim 100\% \text{RH}$, 精度: $\pm 2\% \text{RH}$
太阳能集热器集热面 太阳辐射强度	TBQ-2 总辐射表	量程: $0\sim 2000 \text{W}/\text{m}^2$, 精度: 2% 灵敏度: $8.963 \mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
室内空气流速	YGC-RMFS 热膜风速传感器	量程: $0\sim 5 \text{m}/\text{s}$, 精度: $\pm 0.01 \text{m}/\text{s}$
壁面温度	雷泰 ST61 红外测温仪	量程: $-40\sim 650^{\circ}\text{C}$, 精度: $\pm 0.5\%$
竖直温度	水银温度计	量程: $-30\sim 20^{\circ}\text{C}$, 精度: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
采暖耗煤量	TGT300kg 机械磅秤	量程: $0.2\sim 300 \text{kg}$, 精度: $\pm 0.2 \text{kg}$
/	Agilent 34970A 数据采集仪	/

2015年1月19日~2月23日进行实测对比试验,监测两栋建筑室内温湿度、室外气温和太阳辐射强度,并由安捷伦数据采集仪 Agilent 34970A 每隔10s自动采集记录。8:00~24:00使用红外测温仪手动测量并记录两栋建筑各房间的6个壁面的温度,测试间隔为30min,利用水银温度计测量距地面1m、1.5m、2m处竖直温度分布,每30min人工记录温度示数。

1.3 试验原理

室内热环境形成原因存在于室外气候参数和室内设

备、人员等热湿源。舒适的室内热环境主要在于建筑从供暖设备的得热与向外界环境的失热的平衡上,体现在室内空气温度、相对湿度、气流速度和壁面平均辐射温度四个参数。客厅的空间最大,且客厅门经常开关,客厅与外界环境热交换频繁,其热环境参数最具代表性。为简化室内热环境分析过程,作以下假设:

1.2 试验方案

参考民用建筑室内热湿环境评价标准^[4]布置测点,建筑平面和测点布置如图2所示。

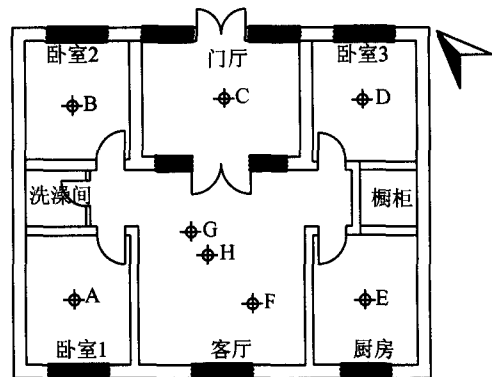


图2 建筑平面及测点布置

Fig. 2 Measured building and measure spots

图2中,测点A~测点G是温度测点,测点A~测点G分别是各房间的气温测点,距地面1.7m左右,距墙均大于0.5m;测点F和测点G位于客厅对角线的两个等分点上。测点H是湿度和空气流速测点,距地面约1m。测试参数及仪器见表1。

(1) 忽略室内家电及人员活动产生的热量对室内热环境的影响;(2) 忽略室内采暖管道的散热,认为各暖气片进口水温、暖气片内水温均一致;(3) 忽略太阳辐射对室内热环境的影响。

2 测试结果与分析

2.1 太阳辐射强度

1月21日和22日太阳能主动供暖,太阳能集热器集热面的太阳能辐射强度如图3所示,平均太阳辐射强度为当日测得大于120W/m²的太阳辐射强度的算术平均值。两日有效日照时数分别约为9.2h和9.0h,平均太阳总辐射强度分别为0.68kW/m²和0.64kW/m²,对比试验期间测得的平均日照时数为8.3h,平均太阳总辐射强度为0.56kW/m²,该地区冬季太阳能资源丰富,存在太阳能供暖优势。

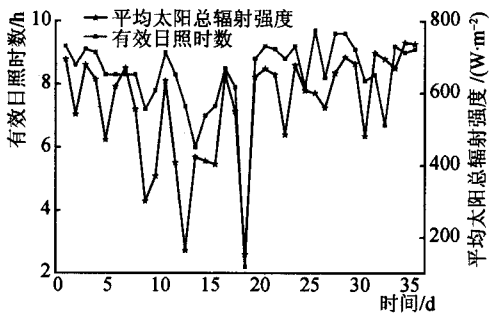


图3 正南45°斜面太阳辐射强度

Fig. 3 Solar radiation intensity of 45° slope facing south

2.2 室内空气温度

取最冷月内的典型数据分析,1月21日和22日太阳能热水供暖时段为16:00~24:00,其余时段锅炉供暖。两日内两栋建筑的客厅温度变化如图4(a)所示,客厅温度随外界温度变化如图4(b)所示。

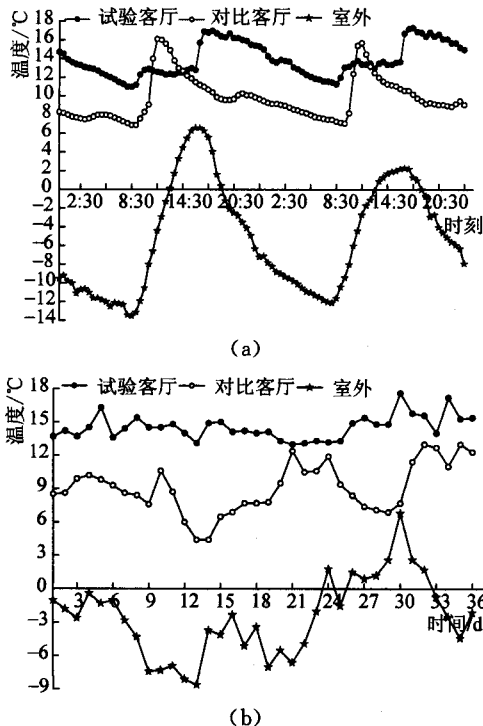


图4 室内外测点温度变化

Fig. 4 Temperature of outdoor and indoor measure spots

寒冷地区村镇居民与城市居民在生活习惯、经济条件和生活标准等方面存在较大差异,这导致村镇居民对热舒适的感觉与城市居民存在差异,相关研究表明,农村居住建筑室内温度不应低于14.0℃^[5-6]。1月21日和22日两日内室外最低温度为-13.5℃,平均气温为-5.2℃。试验建筑客厅两日内最低气温为11.0℃,最高气温为17.4℃,平均气温14.2℃,波幅约3.2℃,温度较稳定;对比建筑客厅两日内最高气温为16.1℃,最低气温为6.8℃,平均气温为9.8℃,波幅为6.3℃,温度波动较大,客厅内温度全天大部分时间低于10.0℃,冷感明显。对比试验期间环境最低温度为-16.2℃,试验建筑客厅平均温度约为14.5℃,高出对比建筑客厅温度约5.4℃。

2.3 室内空气温度垂直分布及平均辐射温度

试验建筑客厅中心距地面1.0m、1.5m和2m分别布置水银温度计测量客厅内空气温度垂直方向的分布情况^[7-8],1月21日和22日测得的垂直温度分布如图5所示,客厅白天温度垂直方向最大温差为0.5℃,室内温度在垂直方向上分布均匀。

平均辐射温度决定了人体辐射散热的强度,进而影响人体的冷热感。平均辐射温度(MRT)公式^[8-9]如下

$$MRT = \frac{\sum A_n T_n}{\sum A_n}$$

式中: A_n ——房间各表面可看到的面积, m²;

T_n ——各表面对应的温度, °C。

室内平均辐射温度低于平均气温,平均辐射温度和房间内气温的变化趋势基本一致。1月21日两栋建筑客厅的平均辐射温度如图5所示。

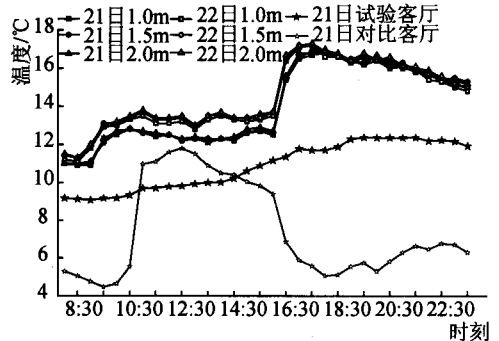


图5 室内垂直温度分布和平均辐射温度

Fig. 5 Indoor vertical temperature distribution and mean radiant temperature

试验建筑客厅的平均辐射温度随客厅温度变化平稳,室内冷热感觉稳定;对比客厅平均辐射温度波动非常明显,且平均辐射温度在夜间较低,室内热舒适度较差,影响住户生活质量。试验建筑客厅平均辐射温度

高出对比建筑的 3.3℃。试验建筑节能改造后围护结构的保温性能优于对比建筑,而试验建筑客厅平均辐射温度最大值延迟气温最大值约 30min,可见试验建筑围护结构的保温性虽好,但建筑材料蓄热能力不足^[10],建筑内墙可考虑采用蓄热能力较强材料以提高室内平均辐射温度,维持舒适热环境。

2.4 室内温度与暖气片热水温度

室内温度是建筑从暖气片中热水得热与向外界散热的动态平衡的结果,室内温度与室内墙体等蓄热体热物性、建筑围护结构热工性能、暖气片热水温度、室外温度等因素有关。太阳能热水供暖时,循环水泵强制循环管道内热水,室温变化显著,暖气片热水温度直接影响室内温度,采用二元线性回归模型分析太阳能热水供暖时段暖气片热水温度和室外温度作为自变量与室内温度作为因变量的关系。样本数量为 750 个,分析结果见表 2,得到二元线性回归方程如下

$$T_i = 0.154 1T_g - 0.039 5T_e + 9.141$$

式中: T_i ——室内空气温度,℃;
 T_g ——暖气片内热水温度,℃;
 T_e ——室外环境温度,℃。

表 2 数据分析结果
 Tab. 2 Analyses results of data

因变量	R^2	标准误差	P 值	偏回归系数 β_1	偏回归系数 β_2	截距
T_i	0.663	0.387	1.629E-176	0.154 1	-0.039 5	9.141

R^2 为 0.663,说明因变量变异性的 66.3%,可由线性回归方程解释;标准误差为 0.387,主要因为忽视暖气片中热水和暖气片进口热水温度差异和影响室内温度的其它因素; P 值远小于 0.05,认为自变量可引起因变量的显著性差异,回归方程是显著的;偏回归系数 β_1 为 0.154 1,表示暖气片热水温度每升高 1℃,室内温度升高 0.15℃;偏回归系数 β_2 为 -0.039 5,表示室外温度每降低 1℃,室内温度下降约 0.04℃。可以看出,建筑外墙保温后,暖气片热水温度与室外温度相比对室内温度影响较大,室内温度随暖气片热水温度的升高而升高。

2.5 相对湿度

室内湿度受人活动影响较大,客厅使用最频繁,在客厅布置湿度测点 H 观测室内湿度变化情况,日平均相对湿度为当天测得的室内相对湿度的算术平均值。试验建筑室内相对湿度变化如图 6,1 月 21 日和 1 月 22 日的相对湿度早晨较高,下午较低,相对湿度最高约 62.0%,最低约 48.9%,平均相对湿度约 58.0%,相对湿度波幅约 4.0%,最低相对湿度出现在 15:30 左

右。阳光在 13:00~16:00 时段内照进客厅使温度升高,导致相对湿度下降。试验期间试验建筑室内相对湿度在 57%左右,满足冬季室内湿度在 40.0%~70.0%的舒适区域的要求^[11]。

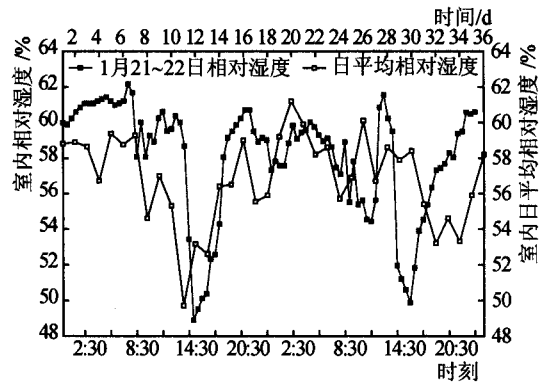


图 6 室内相对湿度

Fig. 6 Indoor relative humidity

2.6 室内空气流速

试验建筑室内空气流速如图 7 所示。

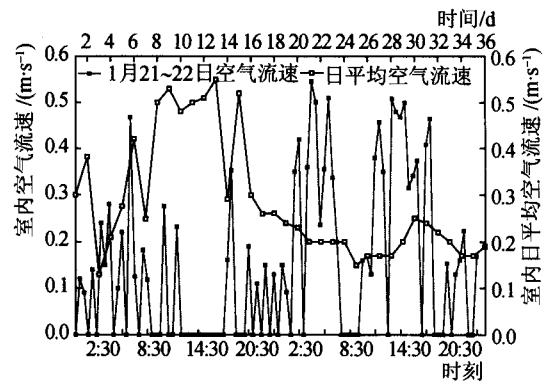


图 7 室内空气流速

Fig. 7 Indoor air velocity

室内日平均空气流速为当日测得的室内空气流速的算术平均值,室内空气流速在 0.13~0.55m/s 波动,波动较大^[12]。室内空气流速主要受门窗缝隙漏风影响,试验建筑的门窗密封性有待提升,可以看出夜间室内空气流速较小,原因在于白天人员进出房间较夜间频繁,导致室内空气流速明显波动。

3 讨论

试验当地太阳能资源丰富,在环境最低温度为 -16.2℃,试验建筑室内平均温度高出对比建筑的约 5.4℃,试验建筑的平均辐射温度高出对比建筑的约 3.3℃,试验建筑室内温度在低于 2m 的竖直方向上分布均匀,试验建筑室内平均相对湿度约为 58.0%,室内平均空气流速 0.28m/s,说明在太阳能资源丰富地区,利用太阳能主动采暖和外墙保温改善新农村建筑室内热环境具有实际应用价值和推广意义。

试验过程中发现蓄热水箱中水温低于 40℃ 时, 暖气片散热对室内供暖效果较差, 因此蓄热水箱中水温降至 40℃ 时, 循环水泵停止工作, 而蓄热水箱中的低温热水仍储存的大量热量耗散到环境中, 若将散热末端换为对进口水温要求较低的散热装置, 太阳能热水采暖时间延长, 太阳能热水中的热量将得到充分利用, 室内平均温度将得到提升, 下一步的优化试验会在数值模拟分析的基础上进行。

4 结论

通过对比研究冬季利用太阳能主动采暖和外墙保温改造和未改造的西北新农村住宅建筑室内热环境, 可以得到以下结论:

1) 采用太阳能主动供暖和外墙保温措施对改善西北新农村建筑室内热环境效果显著; 其节能效果明显, 可有效降低新农村住宅建筑的采暖能耗。

2) 在西北民勤气象条件下, 利用 6 组 40 根管的全玻璃真空管太阳能热水器为 117m² 的经外墙保温改造后的新农村住宅建筑供暖, 可以在整个采暖季维持建筑室内平均温度 14.2℃ 以上。

3) 利用太阳能热水供暖时, 暖气片热水温度每升高 1℃, 室内温度升高 0.15℃; 室外环境温度每降低 1℃, 室内温度下降约 0.04℃;

参 考 文 献

[1] Zhuang Z, Li Y, Chen B, et al. Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China—a review [J]. *En-*

ergy and Buildings, 2009, 41(1): 111~119.

[2] 魏生贤, 晏翠琼, 时有明, 等. 云贵高原干季室内热环境参数关系研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(1): 148~152.

[3] GB 50352—2005, 民用建筑设计通则[S].

[4] GBT50785—2012, 民用建筑室内热湿环境评价标准[S].

[5] GBT50824—2013, 农村居住建筑节能设计标准[S].

[6] 朱轶韵, 刘加平. 西北农村建筑冬季室内热环境研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(2): 400~403.
Zhu Yiyun, Liu Jiaping. Research on the indoor thermal environment of rural architecture in winter in northwestern areas [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(2): 400~403.

[7] Porrás-Amores C, Mazarrón F R, Cañas I. Study of the vertical distribution of air temperature in warehouses [J]. *Energies*, 2014, 7(3): 1193~1206.

[8] 金招芬, 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[9] Alfano F R A, Dell'Isola M, Palella B I, et al. On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment [J]. *Building and Environment*, 2013, 63: 79~88.

[10] 胡冗冗, 李万鹏, 何文芳, 等. 秦岭山区民居冬季室内热环境测试[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(2): 171~174.
Hu Rongrong, Li Wanpeng, He Wenfang, et al. Study on winter indoor thermal environment of the folk houses in Qinlin Mountains [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, 32(2): 171~174.

[11] GB50736—2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].

[12] 刘加平, 杨柳. 室内热环境设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

Experimental study on indoor thermal environment of active solar heating in new rural residential construction

Li Jinping^{1,2,3}, Zhen Xiaofei^{1,2,3}, Li Xiuzhen⁴, Cui Weidong^{1,2,3}, Dong Ti⁴

(1. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China;

2. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou, 730050, China;

3. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou, 730050, China;

4. Guangzhou Institute of Energy Conversion Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China)

Abstract: Solving the problem of the new rural residential heating in winter is a technical barrier of green energy-saving building. This paper was studied the experimental comparison of two same toward the size of the new rural residential building indoor air temperature and mean radiant temperature in Minqin County of Gansu Province; one of the exterior wall insulation alteration and the use active solar heating technology, and the other was without any modification of the original new rural residential building. The temperature vertical distribution and air velocity in building was monitored constantly in the experiment, and the relationship between indoor temperature and related factors was analyzed. The experimental result indicated that under the condition of the lowest ambient temperature of -16.2℃, reconstructive of the building's indoor average temperature, the mean radiant temperature were higher than the unreformed of the construction of 5.4℃ and 3.3℃, the reconstructive building indoor humidity of 58%, indoor air velocity was 0.28m/s, and obtained binary linear relations between the indoor temperature when the solar energy hot water heating and radiator hot water temperature and ambient temperature.

Keywords: solar energy; rural building; thermal environment; heating