

# 高温高湿地区夏季室内热环境改善的实例研究\*

## A Case of the Thermal Environment Improvement of an Energy-saving House in Hot and Humid Region During Summer

缪军 何江 杜晖 胡东南 谢绿萍  
Miao Jun He Jiang Du Hui Hu Dongnan Xie Luping

(广西科学院应用物理研究所 南宁市大岭路 2号 530003)  
(Applied Physics Institute of Guangxi Academy of Sciences,  
2 Dalinglu, Nanning, Guangxi, 530003, China)

**摘要** 以 1999年夏季在位于南宁地区的一栋实验太阳房所进行的热工测试为例,对比分析太阳房室内热环境,讨论隔热墙体、空气调节系统、屋面铁板辐射致冷等措施在高温高湿地区建筑室内热环境改善方面的可行性。表明实验太阳房夏季室内热环境有明显改善,但尚未达到舒适的温度。

**关键词** 太阳房 节能房 室内热环境 高温高湿气候  
中图法分类号 TU 241.91

**Abstract** Techniques such as hot-resistant wall, indoor air exchange system and radiant cooling method of making the indoor thermal environment more friendly have been described through analyzing the results of a recent thermal experiment of an energy-saving house located in Nanning, Guangxi. It released that the indoor thermal environment was improved obviously in summer, but not reach to comfortable.

**Key words** solar house, energy-saving house, indoor thermal environment, hot and humid climate

长期以来,人们对太阳房的认识与研究,主要是考虑如何为北方地区的居民住宅进行供暖,而对于如何为住宅的夏季进行排热、隔热及降温等问题的研究却不多见,但这却是一个非常有意思的课题<sup>[1]</sup>。有鉴于此,本项目与日本 OM 太阳协会进行合作,在高温、高湿的广西南宁地区建成一栋旨在研究为住宅进行降温、去湿的太阳房。为了对太阳房夏季室内热环境作进一步的验证及评价,我们在太阳房内外的不同地方和位置布置了许多测试点,对太阳房的各主要热工指标进行测试,并对所测试的数据进行分析,研究其排热、隔热及降温效果以及评价其室内热环境的舒适度,以期今后节能房的建造和普通住宅的改造积累更充足的依据

### 1 太阳房的整体结构

本太阳房的外观如图 1所示,为两户毗邻组成一栋,东半部为两层复合式结构的住宅(一层堂屋,二

层卧室),西侧为一层会议室,内含一间日本式的茶室,居住面积为 164.87 m<sup>2</sup>。建筑结构为钢筋混凝土。



图 1 太阳房外观

Fig. 1 The front view of solar house

为了考察节能住宅的夏季室内热环境,我们在南宁日照充足的 9月、10月进行了实时测试。以下是对这段时间收集到的大量数据处理结果的分析。

### 2 $\pi$ 型砖复合墙体的隔热性能分析

#### 2.1 $\pi$ 型砖复合墙体的结构

在太阳房外墙采取的隔热措施是,在现浇混凝土墙的外侧附上 50 mm厚的聚乙烯作为隔热层,然后

1999-12-27收稿, 2000-03-09修回。

\* 广西科学院应用物理研究所与日本 OM 太阳协会合作研究项目,获广西科技厅、广西科学院(桂科回 9456013);广西建设厅(项目编号 19961011)科研经费资助。

用 $\pi$ 型砖砌成外墙,采用 $\pi$ 型砖为面砖,不作为墙体的承重部分,如图2所示:

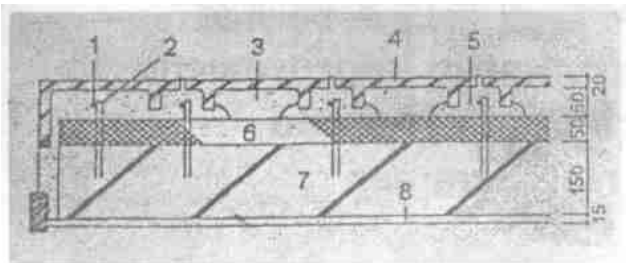


图2 外墙结构

Fig. 2 Wall structure

1. 竖向钢筋 Vertical bar; 2. 横向钢筋 Horizontal bar; 3. 通气层 Air passage; 4. 空心砖 Core brick; 5. 砂浆 Mortar; 6. 隔热材料(聚苯乙烯) Insulating material; 7. 混凝土 Concrete; 8. 灰泥 Lime plaster

此砖的形状像板凳,砌成墙时,砖的凹部与隔热材料之间形成一个通气层(故形象地称之为 $\pi$ 型砖)。在砖墙的最底和最高排砖层中,开有风口,分别作为进气口和出气口。当太阳照射到墙壁上时,空心砖内的空气将受热变轻,沿着通气层自然上升,然后从上部的出气口排出墙体,冷空气从底部进气口补充。因此,透过外墙面的相当一部分热量被排出墙外,而且,加上墙体内隔热材料的隔热作用,从墙外传入室内的热量就会变得很少<sup>[2]</sup>。

## 2.2 $\pi$ 型砖复合墙体的热性能分析理论及所用的计算公式

普通实心墙的外壁与内壁之间的热量传递,只是通过热传导进行的,而 $\pi$ 型砖复合墙体与普通实心墙的不同之处,就在于其中有一层空气层。从外墙到内壁之间的热量传递,不但有热传导,还有热对流及传质等过程。为简单起见,我们假定把 $\pi$ 型砖复合墙体的传热过程等效地看成热传导,用一个“等效导热热阻”来分析其热性能,并且可据此来观察一天不同时段 $\pi$ 型砖复合墙体中的热量传递情况。

根据公式,墙体内壁表面温度

$$\theta_i = t_i - (t_i - t_e) \cdot Ri / R_0^{[3]} \quad (1)$$

我们可以得到:

$$R_0 = R^* + |(t_i - t_e) / (t_i - \theta_i)| \quad (2)$$

式中:  $t_i, t_e$ ——住宅室内和室外气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$R_i$ ——墙体内表面换热热阻 ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ ),其值取  $0.11 (\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W})$ ;  $R_0$ ——墙体围护结构等效导热热阻 ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ )。

## 2.3 数据处理与分析

为了能取得比较理想的分析结果,我们从9月6日至10月9日所收集到的数据中,选出9月24日,26日和10月1日,2日,3日这5天晴天模型气候条

件下的数据进行分析。

为研究 $\pi$ 型砖复合墙体等效导热热阻的变化规律,我们绘制等效导热热阻  $R_0$ 与墙体两侧(室内,室外)气温差  $\Delta T$ 的关系曲线,并加上二阶趋势线,见图5

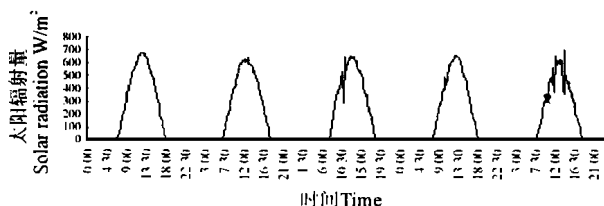


图3 水平面太阳辐射量

Fig. 3 Horizontal solar radiation

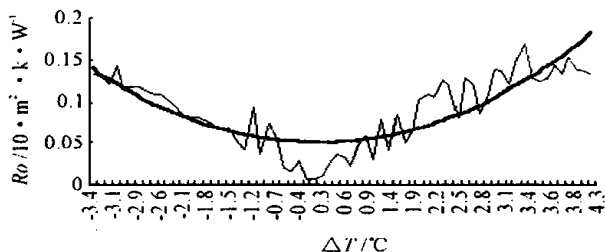


图4 等效导热热阻与室内外温差关系

Fig. 4 The thermal insulating performance of wall

从图3图4中我们看出, $\pi$ 型砖复合墙体的等效导热热阻并不像普通实心墙的导热热阻那样是一个常量,而是一个与墙体两侧温差有关的变量,并且其数值随着墙体内外温差的增大而增大。也就是说,在炎热的夏季,当室内外温差越大时, $\pi$ 型砖复合墙体的隔热效果越好,使人在室内有凉爽的感觉;相反,在寒冷的冬季,当它的内外温差越大时, $\pi$ 型砖复合墙体的保温性能也越好,能使室内保持一个较为温暖的温度。并且,在1天范围内,当室外温度有大的波动时,室内温度的波动范围相对较小(图5)

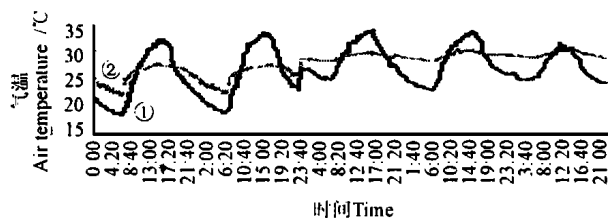


图5 室内外气温波动

Fig. 5 Fluctuation of air temperature of indoor and outdoor air temperature

① 室外气温 Outdoor air temperature; ② 东堂屋室内气温 Indoor air temperature;

## 3 太阳房屋面排热、隔热性能的分析

太阳房的屋面构造如图6

我们选出9月30日,10月1日,10月2日连续

3天晴天模型气候条件下的数据进行分析。整个屋面隔热系统(包括空气集热器)的隔热性能是非常优越的,这一点可以在图 10(4)中清楚地看到。

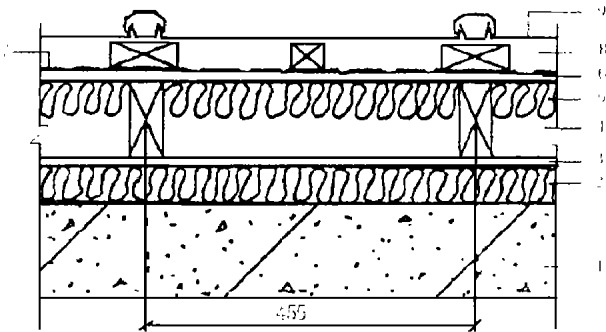


图 6 屋面构造图

Fig. 6 The roof structure of solar house

1. 混凝土屋面; 2. 岩面隔热层; 3. 垫木; 4. 架空空气层; 5. 岩面隔热层; 6. 胶合板屋面; 7. 防水层(加吸湿材料); 8. 架空通气层; 9. 涂黑漆铁板屋面(部分为太阳能电池板)。
1. Concrete roof; 2. Insulating material; 3. Supporting wood; 4. Air passage; 5. Insulating material; 6. Wood roof; 7. Water resistance material; 8. Air passage; 9. Blacken steel sheet (heat collector) (part of it is solar cell).

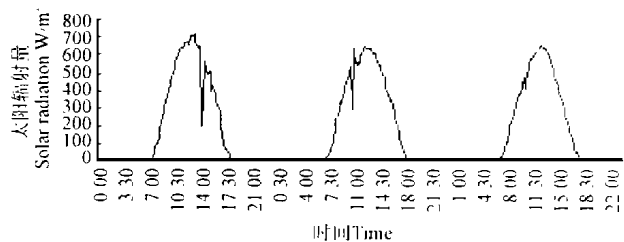


图 7 9月30日至10月2日水平太阳辐射量

Fig. 7 Horizontal solar radiation from 30 Sep. to 2 Oct.

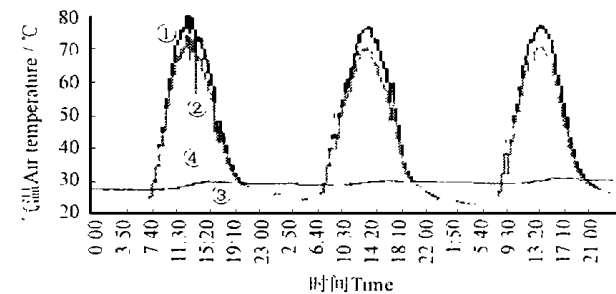


图 8 隔热效果测试结果

Fig. 8 The results of insulating measured measure from 30 Sep. to 2 Oct.

- ① 集热槽进气口(无吸湿材料)气温; ② 铁板下; ③ 天花板; ④ 室外气温。
- ① Air temperature in roof-top duct; ② Air temperature under heat collecting layer; ③ Air temperature of roof; ④ Outdoor air temperature.

虽然集热槽进气口的日最高温度将近  $80^{\circ}\text{C}$ , 铁板下日最高温度高达  $70^{\circ}\text{C}$ , 但天花板的表面温度却保持在  $30^{\circ}\text{C}$  左右, 而且波动的范围很小, 说明其集热效果良好, 热效率高, 室内气温也因此在此较舒适的范围内<sup>[4]</sup>。

#### 4 太阳房屋顶空气集热器表面(铁板)夜间辐射致冷利用

理论上, 温度高的物体通过向温度低于它的空间或物体辐射热量而导致高温物体温度的下降。在夏季天气晴朗的夜晚, 室外气温在  $25^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ , 而天气晴朗的高空对流层温度为  $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 。宇宙空间的巨大容量, 使之可以看成是一个热量的“黑洞”。因此, 铁板将不断地向天空辐射热量使自身的温度降低。由于环境空气向天空辐射热量的能力较弱, 结果铁板的温度就会低于环境空气的温度。夜晚, 当屋外的空气在风机的带动下沿着空气集热器向上流动时, 将会被冷却, 到达位于屋脊处的集热槽进气口时, 其温度将下降到最低点。

我们来看一下夜间辐射致冷利用效果

夜间在屋面铁板下由冷辐射所产生的冷气被导入室内, 室内气温由此而被降低。为了验证这一点, 我们把 9月12日, 13日(OM运转箱工作)和 9月15日, 16日(OM运转箱停电)凌晨 00~600 之间太阳房屋东屋的室内气温变化绘制成图。

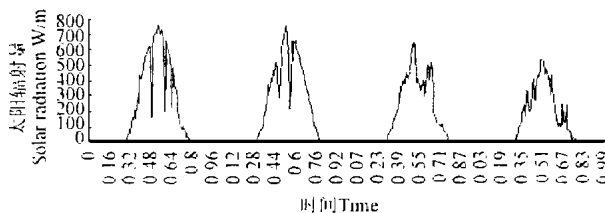


图 9 水平面太阳辐射量

Fig. 9 Horizontal solar radiation on 12, 13, 15 and 16 Sep.

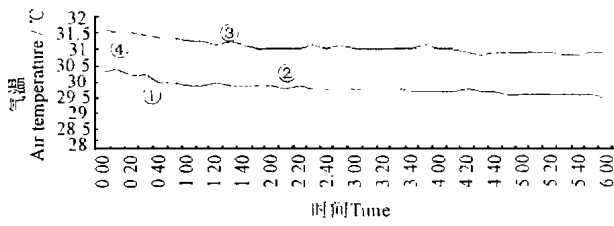
从图 10看出, 9月12日, 13日夜间 OM运转箱工作时的室内气温都低于 9月15日, 16日夜间 OM运转箱停电时的室内气温  $1^{\circ}\text{C}$  左右。

为进一步考察辐射制冷的效果, 我们比较这几天凌晨 00~700 室外、铁板下、东住宅 HB出口的温度变化, 图 10(3):

空气从室外进入集热器后, 温度明显比室外气温要低 ( $1^{\circ}\text{C}$  左右), 但奇怪的是, 室外空气经集热器铁板降温后, 再经过集热槽和 OM运转箱到地板下 HB出口, 温度却是上升(比室外气温高约  $1^{\circ}\text{C}$ )<sup>[5]</sup>。

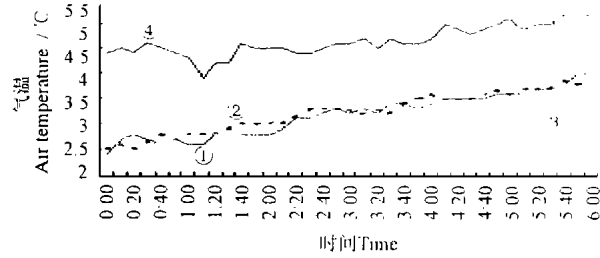
原先我们认为这是由于冷气经过 OM运转箱, 通过直立管道进入地板下由蓄热卵石床构成的地基时被升温而造成。但这一想法却被测试的结果否定了。见图 10(4)。

经过仔细观察, 发现问题在于集热槽上。冷气经过集热槽到达 OM运转箱进气口, 温度升高了  $1^{\circ}\text{C}$  左



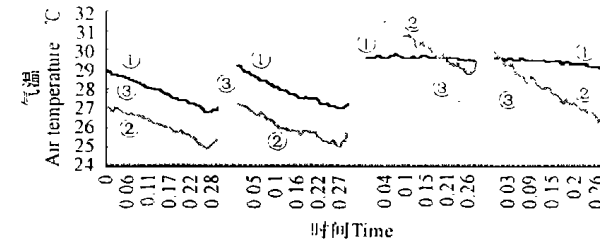
(1)

① 9月12日 OM箱运行; ② 9月13日 OM箱运行; ③ 9月15日 OM箱停电; ④ 9月16日 OM箱停电. ① 12 Sep. OM system was on; ② 13 Sep. OM system was on; ③ 15 Sep. OM system was off; ④ 16 Sep. OM system was off.



(2)

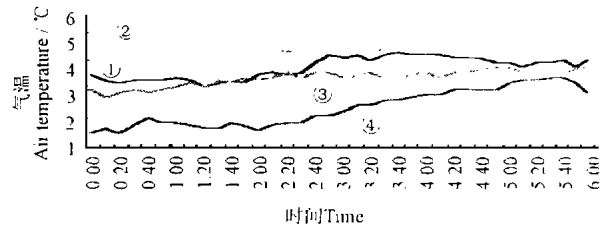
① 9月12日 OM箱运行; ② 9月13日 OM箱运行; ③ 9月15日 OM箱停电; ④ 9月16日 OM箱停电. ① 12 Sep. OM system was on; ② 13 Sep. OM system was on; ③ 15 Sep. OM system was off; ④ 16 Sep. OM system was off.



(3)

① 东 HB 出口 Air temperature of vertical duct; ② 铁板下 Air temperature under heat collecting layer; ③ 外气温 Outdoor air temperature;

(9月15日, 16日 OM运转箱停电, 铁板下及集热槽里所积蓄的热量只能慢慢向外扩散 OM system didn't work on 15 and 16 Sep. So the thermal stored under the heat collector and in the roof-duck spread out slowly then)



(4)

① 10月3日连接管切开; ② 10月4日连接管切开; ③ 9月30日 OM正常运行; ④ 10月1日 OM正常运行. ① Vertical duct off; ② Vertical duct off; ③ OM running; ④ OM running.

图 10 辐射致冷效果对比测试的结果

Fig. 10 The result of radiant cooling

右,很明显,集热槽把冷气加热了。由于铁板下的通气层、集热槽白天是通热空气的,集热槽内积蓄了相当的热量,到晚上才逐渐释放出来,夜间辐射致冷取凉的效果有一部分被通气层白天积蓄的热量所消耗,再加上东集热槽上多了玻璃集热保温层,其保温的效果更加明显。所以出现地下 HB出口处气温比外气温高的现象是必然的。

## 5 太阳房室内温度、相对湿度的统计分析

1999-09-06~ 1999-10-09太阳房东屋的日平均室内气温和相对湿度变化见图 11 图 12

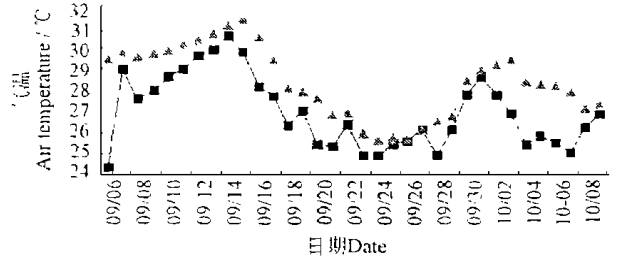


图 11 日均室外和室内气温

Fig. 11 Average air temperature of indoor and outdoor —■— 室外日均气温 Outdoor daily mean temperature; —▲— 东堂屋日均气温 Indoor daily mean temperature.

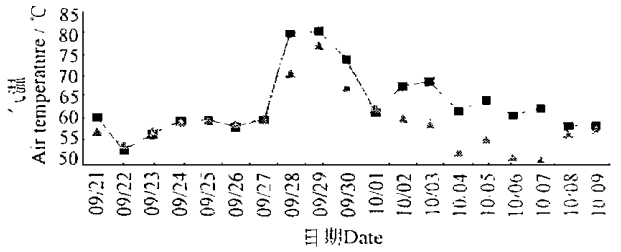


图 12 日均室外和室内相对湿度

Fig. 12 Average relative humidity of indoor and outdoor —■— 室外日均相对湿度 Outdoor daily mean relative humidity; —▲— 室内日均相对湿度 Indoor daily mean relative humidity.

从图 11 图 12 看出,在测试时间里,东屋的室内日平均气温均高于屋外日平均气温,说明太阳房的蓄热效果非常良好(这对冬季采暖很有利),但也说明太阳房的夏季降温技术还有待进一步提高。太阳房去湿效果是很明显的,室内空气相对湿度能够控制在室外空气相对湿度之下<sup>[6,7]</sup>。

夜间把所有门窗打开自然通风也许是解决舒适环境问题的一条捷径。夜间自然通风的 9月24日~9月29日和门窗全封闭的 10月1日~10月6日 0:00~7:00室内气温、天花板表面平均温度对比结果见表 1。

表 1 表明室内气温和天花板表面温度在自然通风时确实比门窗全封闭时低了不少。可见在炎热夏季的夜晚,不妨经常打开门窗以改善室内热环境。

## 6 太阳房热舒适性评价

热舒适性是评价被动式太阳房热工设计优劣的重要指标。影响人体在热环境中热舒适度的因素有室内环境空气温度、室内放射温度(黑球温度)、室内空气相对湿度,以及人的代谢量(工作量)和衣着量等。为了对比评价,我们对太阳房东边住宅堂屋和没有保温措施的普通住宅的室内热环境进行了实测。实测的普通住宅和太阳房的东边住宅堂屋在9月份的月平均室内温度、平均壁面温度、相对湿度、标准有效温度 SET\* 和 PMV 值见表 2。

表 1 门窗开闭时室内热环境比较

Table 1 The comparison of the indoor thermal condition

日期 Date	室内温度 Indoor temperature (°C)	天花板表面 温度 Roof temperature (°C)	门窗开闭 状态 Status of doors and windows
9月 24日 Sep. 24	23.3	27	打开 Open
9月 25日 Sep. 25	23.4	27.2	打开 Open
9月 26日 Sep. 26	23.5	27.3	打开 Open
9月 27日 Sep. 27	24.3	27.4	打开 Open
9月 28日 Sep. 28	25.4	27.5	打开 Open
9月 29日 Sep. 29	25.4	27.3	打开 Open
10月 1日 Oct. 1	28.3	29.2	关闭 Close
10月 2日 Oct. 2	28.4	29.5	关闭 Close
10月 3日 Oct. 3	29	30.1	关闭 Close
10月 4日 Oct. 4	28.6	29.6	关闭 Close
10月 5日 Oct. 5	27.6	28.7	关闭 Close
10月 6日 Oct. 6	27.7	28.6	关闭 Close

表 2 9月份室内热环境实测评价

Table 2 The living conditions of solar house in Sep.

房子 House	室内月 平均温度 Monthly average indoor temperature (°C)	平均壁面温 度 Monthly average wall temperature (°C)	平均相对湿 度 Monthly average indoor relative humidity (%)	标准有效 温度 SET*	PMV
普通住宅 Normal building	29.8	29.9	77	28.5	1.82
太阳房 Solar house	28.4	28	60	28.5	1.1

(衣着量 The quantity of clothing= 0.6clo, 代谢量 Metabolization= 1.0met)<sup>[8]\*</sup> Standard new effective temperature.

从表 2 看出,太阳房和普通住宅相比,夏季堂屋平均室内温度、平均壁面温度、平均相对湿度、PMV 都低(标准有效温度 SET\* 相同),说明太阳房夏季室内热环境得到了明显的改善。

## 7 小结

$\pi$  型砖复合墙体的等效传递热阻是随着墙体内外温差的变化而变化的变量,这一性质与普通实心墙

体的导热热阻为一常数的特点有着本质的区别。

$\pi$  型砖复合墙体的等效导热热阻随着墙体内外温差的增大而增大。

太阳房屋顶空气集热器的排热性能状况良好,其日平均热转换效率为 10% 左右。由于它的排热作用,当铁板下空气层的温度达 70°C 左右时,天花板的温度只有 30°C 左右。

太阳房屋顶集热系统由于热容量较小,当太阳辐射量下降时,其热转化效率非但没有减小,反而有增大的趋势。表明在冬季,当太阳辐射量不甚理想的状态下,由于太阳房屋顶集热系统存在上述特性,也能对室内进行正常供暖。

太阳房屋顶集热系统的排热及  $\pi$  型砖复合墙体的隔热作用,大大地改善了太阳房室内的居住环境。实测结果表明:在全天范围内,室内温度的波动平缓,其波动幅值为室外温度波动幅值的 1/5~ 1/10。

本太阳房屋顶的空气集热器不但有冬季供暖及夏季排热的功能,在炎热的夏季夜晚尚有通过辐射致冷制取冷气的功能。所制取的冷气,其温度要比室外空气的温度平均低 2.5°C 左右,将此冷气排入室内,能使室内的温度有所降低。

辐射致冷受气候的影响较大,在高温高湿的南宁地区,能取得这样的致冷效果,可以设想,在北方地区辐射致冷的效果也必将是十分理想的。

在测试期间,室内日平均气温均高于室外日平均气温,说明太阳房具有良好的蓄热功能,对冬季采暖非常有利;但也说明太阳房夏季降温技术还有待作更进一步的研究、改善。

测试期间的室内日平均相对湿度均比室外日平均相对湿度低 7% 左右,室内能保持一个较为舒适的潮湿环境(60% 左右)。

夜间自然通风是一个能迅速改善室内热环境的有效途径。

与供试普通住宅相比,太阳房的夏季室内热环境有了明显的改善。但从太阳房的热感觉指标 PMV (= 1.1) 来看,太阳房的室内热环境只是有所改善,还未达到舒适的温度。

在南宁这样一个高温高湿持续时间长,且夏日温差并不明显的地方开展太阳能去湿降温住宅技术研究,从技术上来说具有相当的难度。本太阳房能达到这样的效果,已是非常的不容易。而对于普通住宅室内热环境的改善措施,可以借鉴本太阳房的设计思路,采用由 OM 系统控制的隔热屋面以及空心砖墙体,可以有明显的效果。

(下转第 102 页 Continue on page 102)

less than  $33^{\circ}\text{C}$  with a little difference from the air temperature. The calculated value of SET\* (standard new effective temperature) is  $30^{\circ}\text{C}$  from the measured data of the air temperature, relative humidity, air velocity on condition that the quantities of clothing and metabolism are 0.3 clo (without sleeve), 1met (resting) respectively. This means that a suitable environment can be achieved.

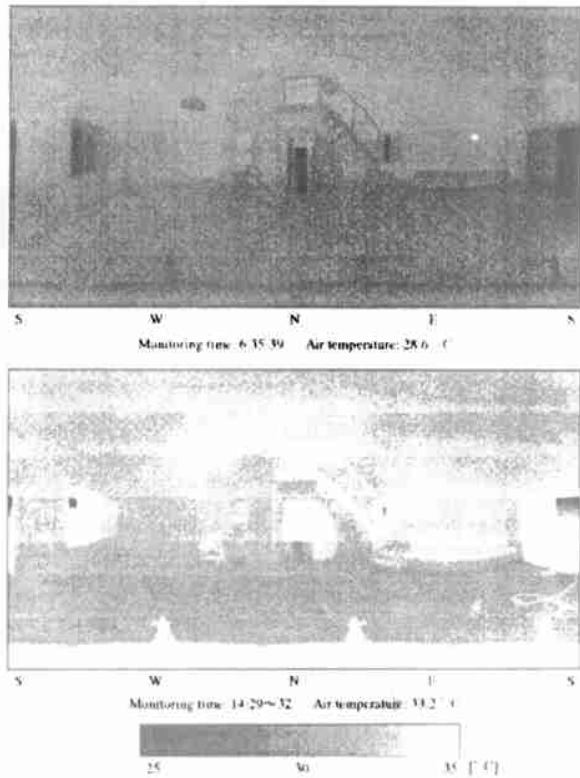


Fig. 10 Surface temperature distribution in the living room (Aug. 10)

## 4 Conclusions

This paper has presented an experimental environment-friendly house constructed in a city (Nanning) of the southern China where the hot and humid summer lasts over a half year. From measurements made in summer, it was found that the ventilating wall built of the proposed brick has an effect of heat-exhausting ventilation. The monitoring has shown that the indoor thermal environment of the building can be improved by utilizing the proposed cooling techniques, for instance, roof heat-exhausting, ventilating stack, openings planning, night cooling, under-floor energy storage, etc. In conclusion the presented environmentally friendly building can achieve a satisfactory thermal environment during the summer in the subtropical regions. An application to the mid-rise apartment house is being planned in our next project. A positive utilization of natural materials such as bamboo will be also considered.

## References

- 1 Akio Okumura. The present and future OM solar system. Proceedings of the 14th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, 1996, 1: 69~ 74.
- 2 He Jiang, Wang Mingzhen, Guo Bing. Design and analogue computation on the environment-friendly and energy-saving house in the hot and humid climate. Guangxi Sciences, 1997, 4 (3): 224~ 229.
- 3 David Anink, Chiel Boonstra, John Mak. Handbook of sustainable building, James & James UK. 1996.
- 4 Kohichi Asano, Akira Hoyano. Application of a new spherical thermography technique to monitoring of outdoor long wave radiant fields. Proceedings of SPIE, 1998, 3436, July 1998, United States.

(责任编辑: 蒋汉明)

(上接第 97页 Continue from page 97)

致谢

本文得到广西科学院应用物理研究所何淑文研究员的指导和审阅, 在此表示衷心的感谢。

## 参考文献

- 1 李元德. 被动式太阳房的原理和设计. 北京: 能源出版社.
- 2 涂逢祥. 建筑节能技术. 北京: 中国计划出版社.
- 3 李元哲. 被动式太阳房热工设计手册.
- 4 何江, 王明真, 郭兵. 高温高湿地区环保节能住宅的设计与模拟计算. 广西科学, 1997, 4 (3): 224~ 229.
- 5 Akio Okumura, The present and future OM solar system.

Proceedings of the 14th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Kushiro, Japan, 1997, (1): 69~ 74.

- 6 Kazuhiko Suzuki, Ken-ichi Sakakura. Nanning-Japan friendship solar house. Proceedings of the 14th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Kushiro, Japan, 1997, (2): 429~ 434.
- 7 He Jiang, Seiji komano. Measurement of OM solar house in a warm region of Japan, precedings of the 14th international conference on passive and low energy architecture, Kushiro, Japan, 1997, (3): 103~ 108.
- 8 蔡君馥等. 住宅节能设计. 北京: 中国建筑工业出版社.

(责任编辑: 蒋汉明)