

太阳能相变蓄能通风系统实验研究

陈士凌^{1a,b}, 卢军^{1a,b}, 李永财²

(1. 重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; b. 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045;
2. 考文垂大学 建筑环境学院, 英国 考文垂 CV15FB)

摘要:针对太阳能通风的不稳定性和不可控性, 提供一种利用太阳能作为热源, 相变蓄热材料在日间进行蓄热, 夜间利用储存热量热压通风的新型系统, 使建筑物达到理想的通风效果。通过分别对相变温度为 63℃、44℃ 的相变蓄热材料进行通风实验, 得到不同相变温度下系统夜间通风量变化特性。结果表明, 采用相变温度分别为 63℃、44℃ 的相变蓄热材料棕榈酸和月桂酸, 太阳能通风系统在夜间通风 10 h 累计通风量分别为 806.6 m³、615.4 m³, 单位面积水平集热面通风量分别为 53.8 m³/h、41 m³/h。使用棕榈酸的通风系统效果要优于使用月桂酸。提出的太阳能通风屋顶结合相变蓄热系统能有效的强化建筑物夜间自然通风, 改善建筑室内热环境, 减少空调用能。

关键词:自然通风; 建筑节能; 太阳能; 相变蓄热

中图分类号: TU834.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)02-0097-04

Experimental Analysis of Solar Energy Combined with Phase-change Energy Storage Ventilation System

CHEN Shi-ling^{1a,b}, LU Jun^{1a,b}, LI Yong-cai²

(1a. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Econ-Environment, Ministry of Education; 1b. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Department of Built Engineering, Coventry University, Coventry CV15FB, UK)

Abstract: Solar Ventilation System is unstable and uncontrollable, so a new technology is proposed to get a system that takes solar energy as heat source and applies phase change material in daytime to store energy which is used to keep ventilation in nighttime by thermal pressure. This new system is helpful to get the ideal ventilation effect for buildings. Through the experiments on ventilation with PCM of 63℃ and 44℃, ventilation rate change curve is obtained to analyse ventilation system efficiency. The results indicate that using the PCM of 63℃ and 44℃, the total ventilation of the solar ventilation system in 10 hours are respectively 806.6 m³ and 615.4 m³ at night, and the average ventilation per hour and area are 53.8 m³/h and 41 m³/h. Based on the experiment, when PCM is palmitic acid, the ventilation effect is superior than that of lauric acid. To sum up, the system of conventional solar rooftop ventilation system combined with phase change materials can intensify the nature ventilation effectively in nighttime for buildings, improve indoor thermal environment and reduce the energy consumption in air conditioning building.

Key words: nature ventilation; building energy conservation; solar energy; phase-change energy storage

收稿日期: 2010-09-25

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助(2006BAJ01A05-06-04, 2006BAJ02A02-05)

作者简介: 陈士凌(1987-), 男, 博士生, 主要从事建筑节能和城市热环境研究, (E-mail)aling19870407@126.com。

卢军(通讯作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)lujun66@vip.sina.com。

据统计,欧美发达国家建筑能耗占总能耗的 42%~47%,中国已达 30%^[1],且其中现有建筑中高耗能建筑占 95%^[2],节能减排已成为国家政策。M. Haase 研究表明亚热带地区的自然通风潜力在 18%~29%,在过渡季节可达到 80%^[3]。太阳能作为一种清洁、免费、潜能巨大的新能源形式越来越受到人们的重视,近年太阳能通风技术的研究成为建筑通风领域的热点之一^[4-8]。

Yu-Min Kim 的研究表明,只在晴朗天气下,夹层围护结构模型才能起到较好的通风效果,供热能耗降低 14.71%,且集热面设置在西向比东向能更好的吸收太阳辐射,达到很好的通风效果^[9]。Kwang Ho Lee 通过模拟表明太阳能烟囱能有效的降低建筑制冷能耗,烟囱高度,太阳辐射吸收率和太阳辐射透射率比空气层厚度在加强自然通风效果方面作用更显著^[10]。Sompop Punyasompun 认为顶部开口的太阳能烟囱模型通风效果好^[11]。A K ATHIENTIS 进行太阳能通风墙实验中把 16~20.8℃ 的相变蓄热材料丁硬脂酸盐封装在建筑外围护结构中,白天室内最高温度降低 4℃,夜间也较好的降低室内温度^[12]。

以上文献重点在太阳能烟囱强化通风方面进行技术研究,夏热冬冷地区日间太阳辐射强度大时,可以增强房间通风量;而太阳辐射强度小时或夜间,太阳能烟囱的通风能力却很低。为了充分利用太阳能资源,实现通风的时间和风量可控,该文对常规太阳能屋顶通风系统结合不同相变蓄热材料蓄热进行了实验研究,得出在不同相变温度下的夜间通风曲线,分析其性能影响因素,提出了优化的组合方案。

1 实验原理

导致自然通风的动力是由密度差引起的热压和风力所造成的风压。一般来讲,风压是一个不稳定的因素,它随着室外风速、风向的变化具有很大的波动;而热压是一个较稳定的因素^[13]。太阳能通风结合相变蓄热材料的复合型技术正是热压通风技术的一种,热压通风一般计算公式为^[14]:

$$\Delta P = \xi \frac{v^2 \rho}{2} \quad (1)$$

式中, ΔP 为孔口两侧的压力差,Pa; v 为空气通过孔口时的流速,m/s; ρ 为空气的密度,kg/m³; ξ 为孔口的局部阻力系数,其值与孔口的构造有关。

2 实验方案

2.1 实验台及仪器

实验平台搭建在重庆大学城环实验楼的平屋顶上。太阳能通风屋顶的集热面部分如图 1 所示。集热面的尺寸为 1 500 mm×1 000 mm,空气通道的尺寸为宽 1 000 mm×300 mm,进风口的尺寸为 400

mm×200 mm,出风口尺寸为 1 000 mm×200 mm,进出风口之间的高度差为 2 m。

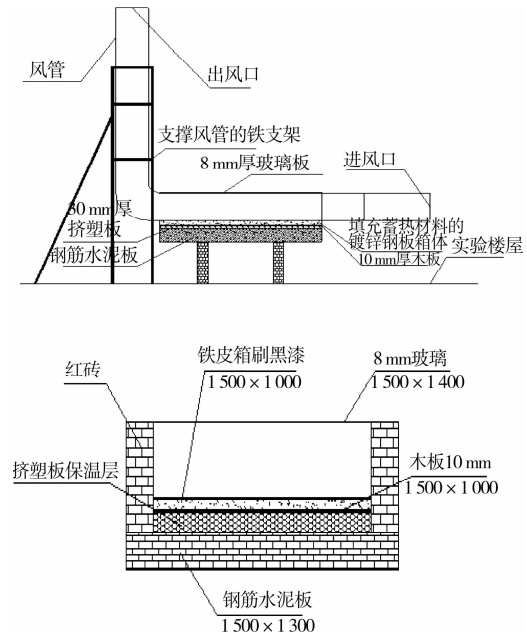


图 1 太阳能通风屋顶平、剖面图

风管外表面由厚度为 10 mm 的橡塑保温材料包裹,以减少热量散失,水平风管内部如图 2 所示放置铜—镍铜热电偶进行温度数据采集。实验中将相变蓄热材料填充在镀锌钢板箱中,集热面为钢板箱的上表面。钢板箱内采用 0.5 mm 厚的镀锌钢板网格,强化蓄热材料和集热面之间的换热。钢板箱的下方采用 30 mm 的挤塑板作为保温层。为避免保温层在填入蓄热材料时受到物理伤害,在保温层上方设置一层木板起保护作用。空气通道上方采用 8 mm 厚的普通玻璃,两侧是 140 mm 的水泥砖墙,墙体与玻璃之间用保温棉密封。实验所用的主要仪器如表 1 所示,

表 1 实验仪器一览表

测试参数	仪器名称	精度
太阳辐射	PC-2 型太阳辐射记录仪	±1 W
风速	A531 型热式风速仪	±(示数的 2%+0.01)m/s
温度	美国安捷伦 34970A 数据采集仪	0.004% 基本直流精度

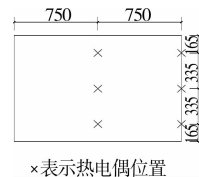


图 2 空气通道水平方向热电偶的布置图

2.2 相变蓄热材料的选择

石蜡和脂肪酸类有机物等有机相变材料属于中温相变材料,符合实验装置相变蓄热温度的要求。文献^[15]对月桂酸和棕榈酸进行 DSC (Differential

Scanning Calorimetry)测试,表明月桂酸开始熔化的温度为 40.70℃,熔化完的温度为 47.14℃,相变点为 44.01℃,熔化热为 173.3 kJ/kg;棕榈酸开始熔化的温度为 57.82℃,熔化完的温度为 66.29℃,相变点为 62.98℃,熔化热为 201.9 kJ/kg。

2.3 实验模型

由于进行对比实验,实验时间均安排在白天为晴朗、少云的天气下进行,间歇通风时间从下午 18:00到次日凌晨 4:00,太阳能屋顶通风系统实验模型分为 2 种:

1) 模型 1:在钢板箱里储存相变温度为 63℃的相变蓄热材料棕榈酸,夜间间歇通风,实验日期为 9 月 12 日。

2) 模型 2:在钢板箱里储存相变温度为 44℃的相变蓄热材料月桂酸,夜间间歇通风,实验日期为 9 月 30 日。

3 夜间间歇通风实验结果分析

3.1 太阳辐射能分析

太阳辐射能为太阳能通风结合相变蓄热材料组合系统的唯一能量来源,因此在进行对比实验的时候,记录 9 月 12 日及 30 日 2 天全天太阳辐射逐时变化值来进行分析。

图 3 和图 4 为 9 月 12 日及 9 月 30 日太阳辐射值及累计值逐时变化对比,可得太阳辐射强度随时间的推移由弱到强再变弱。实验中 12 日、30 日 2 天对应的日累计太阳辐射值分别是 12.71 MJ/m²、14.88 MJ/m²。太阳辐射强度较大的时段是 9:00 到 16:00,最强的太阳辐射集中在 11:00 到 14:00 之间,12 日最大值 597 W/m² 出现在 12:00,30 日最大值 556 W/m² 出现在 13:00。

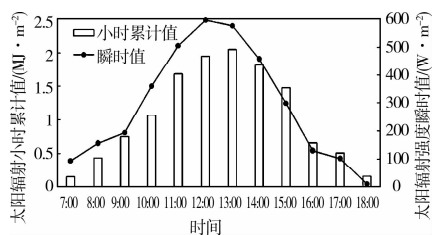


图3 9月12日太阳辐射累计值及瞬时值

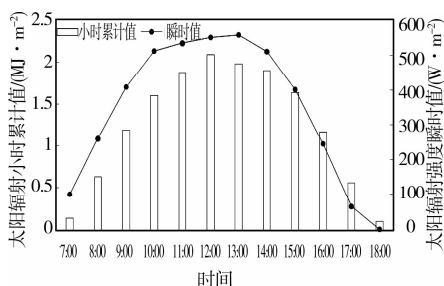


图4 9月30日太阳辐射累计值及瞬时值

3.2 通风量分析

太阳能通风屋顶的自然通风量是通过测定通道的平均风速,由式(2)计算出来的^[16]。

$$M = \bar{u} \times A \quad (2)$$

式中, M 为自然通风量,m³/h; \bar{u} 为平均速度,m/s,

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i; A \text{ 为太阳能屋顶通道截面积, m}^2。$$

图 5 是太阳能屋顶通风系统在实验模型 1、2 下 9 月 12 日、30 日 2 天的通风量实测值,9 月 12 日 7:00~18:00 时间段内太阳辐射强度平均值 290 W/m²,夜间室外平均风速 0.65 m/s;9 月 30 日 7:00~18:00 时间段内太阳辐射强度平均值 345 W/m²,夜间室外平均风速 0.43 m/s,风速不大且受建筑物等遮挡,同时风向均不正对通道进口,可忽略室外风对实验测试的影响。

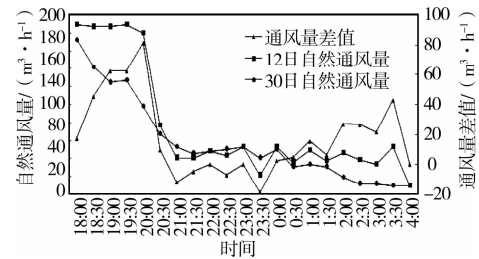


图5 12日及30日自然通风量及差值

由图 5 可得,随着时间推移,通风量越来越少。在凌晨 2:00 时,实验模型 1 通风量降至 30 m³/h 左右,实验模型 2 通风量降至 10 m³/h 左右,此时的通风时间均为 8 h。通风量随着时间的变化是波动的,并不是一直下降。一方面随着环境温度的下降,空气与集热面之间的换热温差加大,换热量增加,从而使得热压增大;另一方面,室外空气温度下降,使得出口处内部与外部空气的密度差加大,这两方面均有助于通风量增长。

实验模型 1 在 12 日 18:00 至 20:00 时间段内通风量基本保持在 190 m³/h,然后出现较大幅度的下降。由图 6 可得,在通风开始阶段集热面的温度较高,与空气通道中空气换热较强,通道内空气与室外空气温差较大,形成较大的密度差,而热压与密度差成正比关系,因此这段时间通风量较大。20:00 后通风量大幅下降,钢板箱中上表面的蓄热材料由于不断释放热量首先发生相变,由液态变成固态,固态的相变材料温度不能维持在相变温度而开始逐步下降,导致集热面温度下降至 39.9℃,此时空气通道温度下降为 33.4℃,通风量出现急剧下降;由图 7 可得,实验模型 2 在 30 日 18:00 开始通风后,通风量便开始出现下降,并不像棕榈酸那样在刚开始通

风后的一段时间内通风量基本保持不变,然后才出现较大幅度的下降,与实验模型 1 相比,差值最高达 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

对比图 6 及图 7,月桂酸热稳定性较差,在较短的时间内钢板箱中上表面的月桂酸由于不断释放热量发生相变,由液态变成固态,固态的相变材料温度不能维持在相变温度开始逐步下降,导致集热面温度迅速下降至 34.4°C ,空气通道温度下降至 29.6°C ,通道内外温度差持续减小,热压持续减小,‘烟囱效应’持续减弱,导致通风量持续下降。

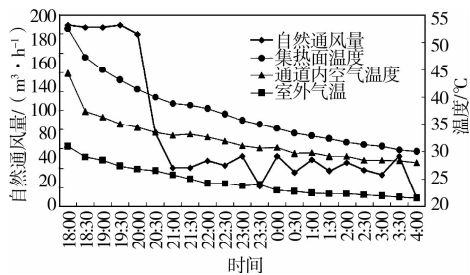


图 6 12 日自然通风量随温度的变化

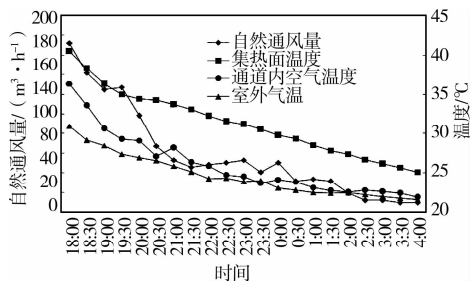


图 7 30 日自然通风量随温度的变化

从图 8 可以得出实验模型 1、2 在 10 h 内的累计通风量分别为 806.6 m^3 、 615.4 m^3 ,太阳能通风屋顶单位集热面面积平均通风量是为 $53.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $41 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

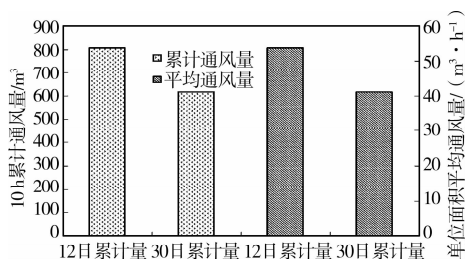


图 8 12 日及 30 日通风量累计值及单位集热面平均通风量

4 结论

通过对 2 种不同相变温度的太阳能蓄能通风系统进行实验研究,得出如下结论:

1) 常规太阳能通风系统只能在日间太阳辐射强

度较大的时段进行,通风量及通风时间均为不可控制;而室外太阳辐射强度大时,室外空气温度也偏高,不适合通风,应控制通风量。太阳能蓄能通风系统可以实现全天稳定或间歇性可控制通风,满足室内环境的控制要求。

2) 夜间通风实验得到 2 种不同相变蓄热材料的通风特性曲线。相变温度分别为 63°C 、 44°C 的相变蓄热材料棕榈酸和月桂酸,太阳能通风屋顶在夜间通风平均通风量分别为 $80.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $61.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3) 63°C 相变材料在蓄热能力及热稳定方面要优于 44°C 相变材料,且在夜间放热稳定,持续时间长,更适用于太阳能通风组合技术。

4) 相变蓄热材料与太阳能通风相结合的技术适用于夏热冬冷地区建筑物间歇通风,可有效减少空调用能,为建造超低能耗建筑提供室内热环境控制措施。

参考文献:

- [1] 宋德萱. 节能建筑设计与技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [2] 徐斌, 叶宏, 葛新石. 隔热涂层降低建筑空调负荷效果的参数分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 857-865.
XU BIN, YE HONG, GE XIN-SHI. The parameter analysis of the effect of utilizing the thermal insulation coatings to decrease building cooling load [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(9): 857-865.
- [3] HAASE M, AMATO A. An investigation of the potential for natural ventilation and building orientation to achieve thermal comfort in warm and humid climates [J]. Solar Energy, 2009, 83: 389-399.
- [4] AMOS-ABANYIE S, AKUFFO F O, KUTIN-SANWU V. Energy saving potential of passive and low energy cooling techniques in buildings in Ghana [C]// 6th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning Proceedings. 2009: 130-137.
- [5] LI H F, DAI Y J, LI Y, et al. Theoretical and experimental study of solar assisted heat pump system for grain storage drying [C]// 6th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning Proceedings. 2009: 1777-1784.
- [6] INAGAKI T, OHNO S, SHIRATO T. Thermal and hydrodynamical characteristics of an externally insulated building with a vent layer [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2009, 35(5): 480-487.
- [7] DEHRA H. A two dimensional thermal network model for a photovoltaic solar wall [J]. Solar Energy, 2009, 83(11): 1933-1942.

(下转第 111 页)

- HEARD, ROBERTO BEST. Exergy analysis of air cooling systems in buildings in hot humid climates [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25 (4): 507-517.
- [9] SAKULPIPATSIN P, ITARD L C M, VAN DER KOOI H J. An exergy application for analysis of buildings and HVAC systems [J]. Energy and Buildings, 2010, 42 (1): 90-99.
- [10] 颜志猛, 连之伟, 王文. 一次回风空调系统的焓分析[J]. 流体机械, 2002, 30(11): 58-64.
- YAN ZHI-MENG, LIAN ZHI-WEI, WANG WEN. Analysis on exergie of air conditioning system with primary return air [J]. Fluid Machinery, 2002, 30 (11): 58-64.
- [11] TOLGA BALTA M, YILDIZ KALINCI, ARIF HEPBASLI. Evaluating a low exergy heating system from the power plant through the heat pump to the building envelope [J]. Energy and Buildings, 2008, 40 (10): 1799-1804.
- [12] HIDEO ASADA, ELISA C BOELMAN. Exergy analysis of a low temperature radiant heating system [J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2004, 25 (3): 197-209.
- [13] 李震, 江亿, 刘晓华. 湿空气处理的焓分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 97-102.
- LI ZHEN, JIANG YI, LIU XIAO-HUA. Exergy analysis in humid air processes [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2005, 35 (1): 97-102.
- [14] CHENQIN REN, NIANPING LI, GUANGFA TANG. Principle of exergy in HVAC and evaluation of evaporative cooling schemes [J]. Building and Environment, 2002, 37 (11): 1045-1055.
- [15] A BEJAN. Advanced Engineering Thermodynamics [M]. New York: John Wiley & Sons, 1988.

(编辑 胡英奎)

(上接第 100 页)

- [8] ZHU N, MA Z J, WANG S W. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review [J]. Energy Convection and Management, 2009, 50 (12): 3169-3181.
- [9] KIM YU-MIN, KIM SOO-YOUNG, SHIN SUNG-WOO, et al. Contribution of natural ventilation in a double skin envelope to heating load reduction in winter [J]. Building and Environment, 2009, 44 (11): 2236-2244.
- [10] KWANG HO LEE A, RICHARD K STRAND. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney [J]. Energy and Buildings, 2009, 41 (6): 615-621.
- [11] SOMPOP PUNYASOMPUN, JONGJIT HIRUNLABH, JOSEPH KHEDARI, et al. Investigation on the application of solar chimney for multi-storey buildings [J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2545-2561.
- [12] ATHIENITIS A K, LIU C, HAWES D, et al. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage [J]. Building and Environment, 1997, 32(5): 405-410.
- [13] 翟晓强, 王如竹. 太阳能强化自然通风理论分析及其在生态建筑中的应用 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 568-570.
- ZHAI XIAO-QIANG, WANG RU-ZHU. Theoretical analytics of natural ventilation enhanced by solar energy and its application in bioclimatic buildings [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25 (4): 568-570.
- [14] 章熙民, 任泽霏, 梅飞鸣. 传热学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [15] 卢敬彦. 太阳能通风技术实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2008.
- [16] 李安桂, 郝彩侠, 张海平. 太阳能烟囱强化自然通风实验研究 [J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 460-464.
- LI AN-GUI, HAO CAI-XIA, ZHANG HAI-PING. Experimental study on solar chimney for natural ventilation [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2009, 30 (4): 460-464.

(编辑 胡英奎)