

文章编号:1000-582X(2011)05-076-06

重庆地区太阳能建筑一体化应用的实测与分析

丁 勇, 连大旗, 李百战, 喻 伟

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要:根据重庆地区的气候特征和太阳能资源分布特点,提出了适于重庆地区的太阳能建筑一体化应用技术思路——太阳能辅助室内通风降温措施,即充分利用重庆地区夏季强烈的太阳辐射,强化“烟囱效应”,促进建筑内部自然通风,从而改善夏季室内酷暑闷热的热湿环境,达到节能目的,实现太阳能的被动式利用。通过实测分析,在太阳能的热作用下,室内产生了0.16~0.22 m/s的风速,同比提高14%~40%,同时室内平均温度比室外的平均温度降低2.6~3.4 ℃,有效改善了室内热环境舒适状态。

关键词:太阳能;建筑一体化;辅助通风;实测分析

中图分类号:TK519

文献标志码:A

Experiment and analysis of integrated application of solar energy and building in Chongqing

DING Yong, LIAN Da-qi, LI Bai-zhan, YU Wei

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: According to the characteristics of the climate and distribution of solar resource in Chongqing, the technology idea of integrated application of solar energy and building is proposed, which is suitable for Chongqing area, i. e. solar assisted indoor ventilation cooling measure, which takes full advantage of the strong solar radiation in summer and strengthens the “chimney effect” to promote natural ventilation inside the building, improve the summer indoor hot and humidity environment, save energy and achieve solar energy passive using. Experiments and analysis show that the 0.16~0.22 m/s indoor air speeds are produced by the thermal effect of solar energy, which is increased by 14%~40%. And the average indoor temperature is 2.6~3.4 ℃ lower than the outdoor average temperature, and the indoor thermal comfortable state is effectively improved.

Key words: solar energy; building integration; assisted ventilation; experiment and analysis

随着传统化石能源日趋枯竭和环境污染日益加剧,太阳能作为一种取之不尽、用之不竭、清洁环保的可再生能源,已成为当前国际能源开发利用的重点领域。在建筑领域中,太阳能技术应用主要有主

动式的太阳能光热、光电和被动式的太阳能通风降温、可控遮阳采光等,其应用规模和范围正在不断扩大。但如何把这些太阳能产品、构件或技术与当地的气候特点和地理特征等自然环境相结合,提出合

收稿日期:2011-02-19

基金项目:国家自然科学基金项目(50838009);国家“十一五”科技支撑重大项目课题(2006BAJ02A09, 2006BAJ02A13-4)

作者简介:丁勇(1975-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事可持续建筑环境与建筑节能研究,

(E-mail)dingyongqq@163.com.

理的太阳能建筑应用方案,实现与建筑的有机结合,使太阳能应用系统完美地融入建筑,形成太阳能建筑一体化,达到舒适、节能和美观相统一,已成为太阳能建筑应用领域的研究重点^[1-7]。

重庆市属于中国太阳能资源贫乏地区,目前太阳能技术应用规模较小,太阳能的应用措施基本为常规应用模式^[8-9],不适于当地的气候特征,无法实现高效利用,并且大都未与建筑形成一体化。因此,根据重庆地区的气候特征,提出合理的太阳能建筑一体化应用技术思路,并通过实验测试分析其应用效果,这将有助于在低成本投入的情况下实现对太阳能资源的高效应用,有效解决重庆地区可再生能源应用的拓展和资源的合理应用,实现更大范围的建筑节能。

1 重庆地区太阳能资源概述

重庆地区属亚热带季风性湿润气候,冬暖春早,夏热秋凉,云雾多、阴天多、雨季长、湿度大、霜雪少。年平均气温在 18℃ 左右,冬季最低气温平均在 6~8℃,夏季平均气温在 27~29℃,最高气温高达 43℃,俗有“火炉”之称。太阳年辐射总量为 3 400~4 180 MJ/m²,年日照时数 1 000~1 400 h,日照百分率仅为 25%~35%^[1],属于中国太阳能资源中第 4 类——太阳能贫乏地区。图 1 为重庆地区月总辐射^[10-11]。由图可知,重庆地区太阳能月总辐射分布极不平均,夏季总太阳辐射量最大,占了全年的 41%左右,达到 1 271 MJ/m²,其中 7 月份最大将近 500 MJ/m²,春季的太阳辐射量占到 30%左右,约为 874 MJ/m²,而秋季 9~11 月份占到 20%左右,冬季仅占 10%左右,其中 1 月份和 12 月份月总辐射不足 100 MJ/m²,和最大月份相差达到 400 MJ/m²。

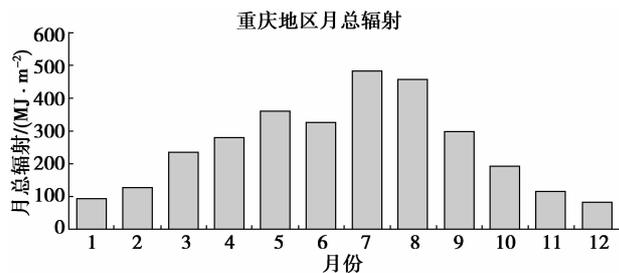


图 1 重庆地区月总辐射

由此可见,重庆地区的太阳能资源具有非常明显的季节性分布特征,其中夏季太阳辐射强度最大,占全年辐射量比例最高,而冬季受阴雨天的影响太阳辐射全年最低。因此,重庆地区的太阳能利用重

点在夏季,既适于太阳能热水器和太阳能光伏系统等主动式太阳能技术的应用,又适于太阳能通风降温、可控遮阳采光等被动式太阳能技术的应用。

2 重庆地区太阳能建筑一体化应用思路

目前重庆地区的太阳能应用形式主要有太阳能热水器和太阳能光伏系统,这两种形式均属于主动式应用,费用投入与常规产热、产电技术相比较,这必然会产生一定的经济增量,而对于重庆地区而言,由于本身资源情况较差,过多的经济增量会造成投资回收期过长,而使技术的经济性、适宜性变差。例如,重庆地区的光电系统的初投资在 2 500~3 500 元/W,投资回收期往往在 15~20 年。

考虑到太阳能热水器、太阳能光伏系统这些主动式技术在全年使用效率和经济性上的限制,重庆地区太阳能建筑一体化应用应更多的考虑低成本投入的被动式技术。其中,太阳能辅助通风降温技术就是充分结合建筑构造,利用太阳能的热作用,强化“烟囱效应”,从而促进建筑内部自然通风的产生,实现改善环境和节能降耗的目的^[12-16]。

该技术的原理是利用热空气形成的密度差,产生动力,促动气流流动,从而实现通风,工作原理如图 2 所示。作用原理可以表达为

$$p = gH(\rho_w - \rho_n) = \rho g H \beta (t_w - t_n), \quad (1)$$

式中: ρ 为标准状态下空气密度, 1.294 kg/m³; g 为重力加速度, 9.8 m/s²; H 为高差, m; β 为膨胀系数, 1/216; ρ_w 为室外空气密度, kg/m³; ρ_n 为室内空气密度, kg/m³; t_w 为室外空气温度, °C; t_n 为室内空气温度, °C。

从式(1)可以看出,室内外空气温差越大,进风口高度差越大,产生的热作用压力就越强^[17]。

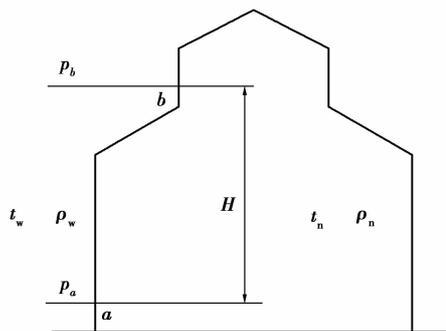


图 2 热压通风原理图

在重庆地区,夏季晴天多,太阳辐射强度大,充分利用夏季的太阳能资源,结合建筑结构的设计,形成室内外空气密度差,产生压力梯度,从而为空气流

动提供动力,促进自然通风,实现太阳能的被动式利用。这既可以改善“山城”居民夏季酷暑闷热的热湿环境,减少空调的开启时间,达到节能的目的,又不需要大量的初投资,并且不会产生附属设备对建筑外观的影响^[18-19]。同时,结合重庆地区夏季主导风向,形成良好的建筑风环境,有利于太阳能辅助通风降温技术的应用,达到强化室内自然通风效果。

3 应用实例及测试分析

根据上述技术思路,课题组在某节能示范楼建筑中设计了如图 3 所示的太阳能辅助通风装置。

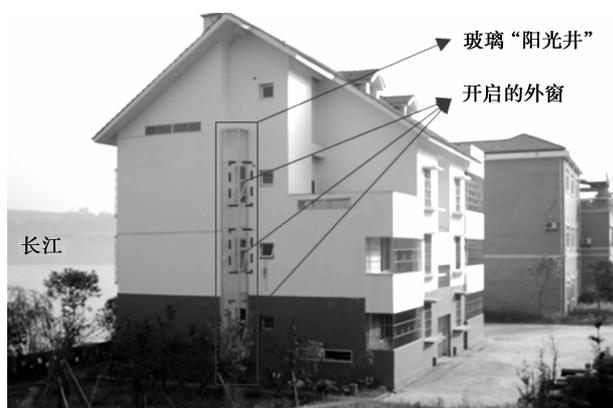


图 3 某节能示范楼

该建筑为板式建筑,东南朝向,一梯两户,共 3 层,高 14 m。结合建筑构造,在该建筑西南向外立面上,设置了“阳光井”。该“阳光井”尺寸为长 \times 宽 \times 高=850 mm \times 700 mm \times 9 000 mm,由两面玻璃构成,以便太阳辐射透入到“阳光井”内,加热井内空气,使“阳光井”内外空气产生密度差,形成“烟囱效应”,从而促动气流流动;“阳光井”中对应的每一楼层均设置有可向“阳光井”开启的外窗,在“阳光井”内气流流动的带动下,诱导房间内空气流入“阳光井”内,从而实现了室内自然通风。

3.1 测试介绍

为了测试该装置的实际效果,课题组在 2009 年 7 月对其产生的通风效果进行了实测。测试期间,天气酷暑闷热,室外最高空气温度达到 39.6 $^{\circ}$ C,太阳辐射强烈,在中午 12:00 达到 790 W/m²,日总辐射量达到 3 076 W/m²,是重庆地区夏季的典型天气状态。为反映热压通风效果,选取 2、3 楼为研究的测试楼层。在与“阳光井”直接连通的起居室内分别根据《GB/T 18204.13—2000 公共场所空气温度测定方法》和《GB/T 18204.15—2000 公共场所风速测定方法》的布点要求进行了现场测试点布置,测试布

点情况详见图 4、5,其中起居室内取对角线的三等分点作为温湿度和风速测点,并离地高度均为 1.5 m。测试仪器及测试测安排见表 1。测试期间 1 楼朝向“阳光井”的外窗关闭。

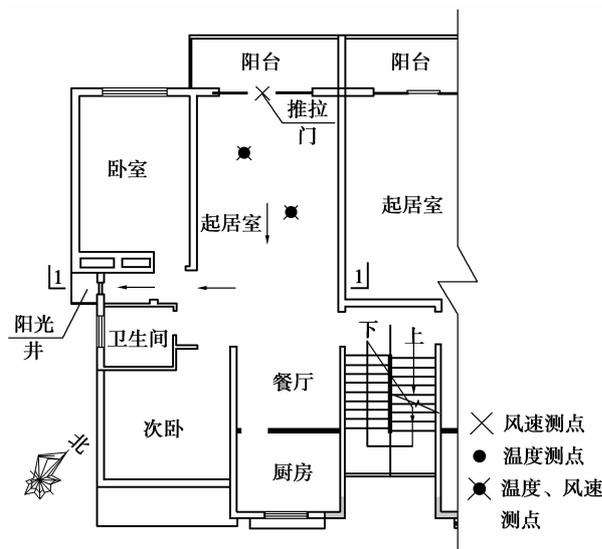


图 4 2、3 楼平面测试布点图

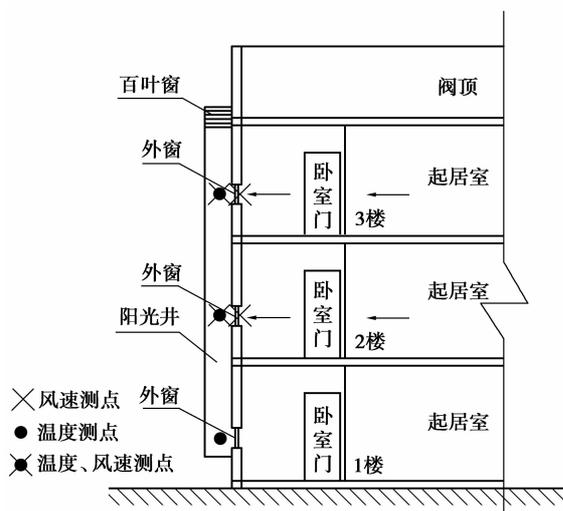


图 5 1-1 剖面测试布点图

3.2 测试效果分析

3.2.1 温度分析

由于“阳光井”朝向西南,在下午时受到太阳辐射最为强烈,从图 6 可以看出,在 8:00~12:00 之间,2 楼“阳光井”内温度略低于 3 楼,平均温差约为 0.3 $^{\circ}$ C,最大温差达到 0.5 $^{\circ}$ C;而在 12:00~18:00 之间,2 楼“阳光井”内温度明显低于 3 楼,平均温差约为 0.9 $^{\circ}$ C,最大温差达到 2.3 $^{\circ}$ C。由此可见,在太阳辐射的热作用下,“阳光井”内外空气产生密度差,从而促使气流流动形成“烟囱效应”,产生抽吸作用,进而诱导室内空气从开启的外窗流入“阳光井”内,

表 1 测试仪器及测试安排表

测试仪器	测试参数	型号	精度	量程	测试时间	测试时 间间隔	测点布 点数目	布置位置
温湿度自 动记录仪	温湿度	8829	$\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$), 湿度为 $\pm 3\%$	$-40\sim$ $85\text{ }^{\circ}\text{C}$	0:00~24:00	2 h	8 个	1~3 楼阳光井中心、2~3 楼 起居室、室外背阴处
风速仪	风速	testo425	$\pm (0.03\text{ m/s,}$ 5% 测量值)	0~20 m/s	9:00~21:00	2 h	8 个	2~3 楼阳光井中心及阳光井 进口(开启外窗处)、2~3 楼起 居室、2~3 楼推拉门处

再由“阳光井”顶部排出,促使室内形成自然通风,同时将新鲜空气诱导入室内,尤其是在下午,“阳光井”内 2、3 楼平均温差较上午增大了 3 倍。

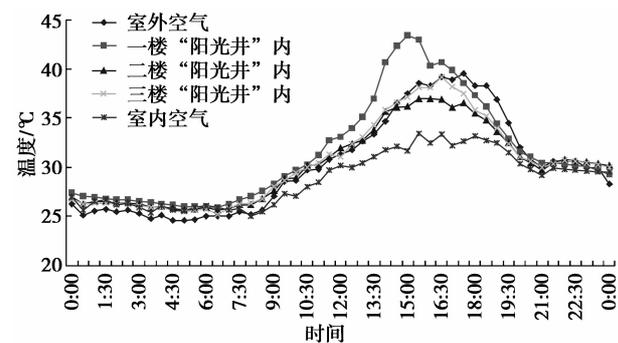


图 6 “阳光井”内温度与室内外温度的变化

分析图 6 中数据,“阳光井”内温度和室外温度都较室内温度高。测试期间,室外平均温度为 $33.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,2、3 楼“阳光井”内的平均温度分别为 32.7 和 $33.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,而 2、3 楼室内的平均温度分别为 30.1 和 $29.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过对比分析可以得到,室外平均温度比室内平均温度高 $3.4\sim 3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;“阳光井”内平均温度比室内平均温度高 $2.6\sim 3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过热压通风的计算公式(1)可以计算得到,此时室内外可形成的压力差为 $0.46\sim 0.62\text{ Pa}$,由此可见,该压力差形成了“阳光井”的“烟囱效应”,从而在室内起到了一定的通风效果。根据研究表明^[20],室内风速的提高,使室内可接受温度上限可提高到约 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,这比设计规范^[21]中夏季室内设计温度上限 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提高了约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,虽然测试期间室外温度在下午较高,最高温度达到 $39.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,但由于“阳光井”的烟囱效应强化了室内通风效果,从而使得 2、3 楼的室内平均温度仍然处于可接受范围。从而可明显缩短空调开启时间,达到节能降耗的目的。

3.2.2 风速分析

图 7、8 为“阳光井”中心及“阳光井”外窗、室内起居室和推拉门处风速变化曲线图,从图中可以看

出,在 $9:00\sim 12:00$ 之间,各测点处的风速均比较平稳,波动很小;在中午 $12:00$ 太阳辐射达到最大时,约为 790 W/m^2 ,各个测点的风速出现明显的拐点,风速开始增大;在下午“阳光井”接受太阳辐射量最多,形成的“烟囱效应”最强时,除了三楼室内风速和三楼“阳光井”进口风速外,其他测点的风速均达到最大。尤其是在推拉门处,这是由于推拉门所处的进风断面的面积较小,风速的变化较为灵敏。在傍晚,太阳落山后,各测点处的风速逐渐减小,并且波动平稳;由此可见,该“阳光井”充分利用了白天的太阳辐射,起到了很好的室内通风效果。

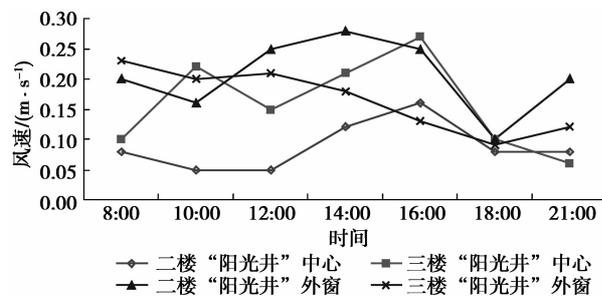


图 7 “阳光井”内和外窗处的风速变化曲线

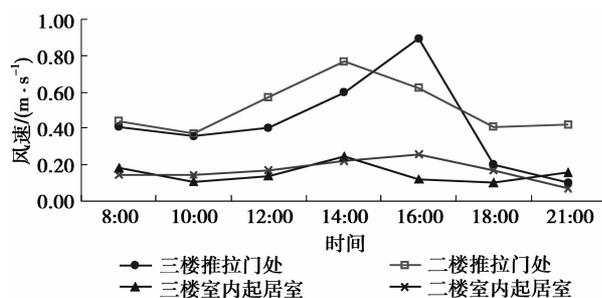


图 8 室内和推拉门处的风速变化曲线

在 2、3 楼的“阳光井”内截面和开启外窗的进风口面积分别相同的前提下,2 楼室内的平均风速上午为 0.15 m/s ,下午为 0.22 m/s ,增幅为 40% ;2 楼推拉门处的平均风速上午为 0.46 m/s ,下午为

0.60 m/s,增幅为30%。3楼室内的平均风速上午为0.14 m/s,下午为0.16 m/s,增幅约为14%;3楼推拉门处的平均风速上午为0.39 m/s,下午为0.56 m/s,增幅约为44%。由此可见,在太阳能辅助通风措施下,室内通风速度得到了明显提高,增幅达到了14%~40%,从而可明显改善室内热环境状态和空气品质。

4 结 语

通过分析重庆地区的气候特征、太阳能资源分布特点以及适于重庆地区的太阳能资源利用技术,研究提出了以太阳光能促进室内自然通风的太阳能建筑一体化应用技术思路。通过分析应用此技术的某工程实测数据,得到如下主要结论:

1)“阳光井”在太阳辐射的作用下,产生“烟囱效应”,可形成0.46~0.62 Pa压差,促进了室内自然通风,尤其是在下午比较明显。由此说明利用太阳能促进通风效果明显,实用性强;

2)该“阳光井”可促使室内产生0.16~0.22 m/s的风速,使得室内通风速度同比提高14%~40%,从而可使室内平均温度比室外的平均温度降低3.4~3.6℃。

3)通过上述测试研究表明,在重庆地区,结合到太阳能资源分布特征,充分利用夏季太阳能资源实现太阳能的被动式应用,为建筑提供辅助通风措施,具有明显的应用效果,可利用程度高。

通过上述测试分析可见,在重庆地区的气候特征和太阳能资源分布特点下,应该充分结合到资源分布与气候特征需要,采用低成本的被动技术。这类技术不仅投入小,而且应用效果明显,可有效加强夏季室内通风效果,改善热环境质量,是值得推广的应用技术措施。本测试仅针对一定尺寸的西南朝向“阳光井”进行了测试分析,在接下来的研究工作中,将对各种尺寸、朝向的“阳光井”进行进一步的优化分析,以找出相应的规律,并给出指导设计的建议。

参考文献:

[1] 丁勇,李百战,罗庆,等. 重庆市自然资源在改善室内热湿环境中的作用[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007,30(9):127-133.
DING YONG, LI BAI-ZHAN, LUO QING, et al. Effect of natural resource on improving indoor thermal environment in Chongqing[J]. Journal of Chongqing University; Natural Science Edition, 2007, 30(9): 127-133.

[2] 敖三妹. 太阳能与建筑一体化结合技术进展[J]. 南京

工业大学学报,2005,27(6):101-106.
AO SAN-MEI. Technology progress of building integrated with solar energy systems[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2005, 27(6): 101-106.

[3] 王崇杰,何文晶,薛一冰. 欧美建筑设计中太阳墙的应用[J]. 建筑学报, 2004, 51(8): 76-78.
WANG CHONG-JIE, HE WEN-JING, XUE YI-BING. The application of the sun wall in European and American architectural design[J]. Architectural Journal, 2004, 51(8): 76-78.

[4] 高辉,何泉. 太阳能利用与建筑的一体化设计[J]. 华中建筑, 2004, 22(1): 70-79.
GAO HUI, HE QUAN. Integrated design of solar energy utility and building[J]. Huazhong Architecture, 2004, 22(1): 70-79.

[5] 王国栋,王学志. 太阳热水系统与建筑结合的相关问题初探[J]. 中国建设动态:阳光能源, 2005, 5(1): 24-27.
WANG GUO-DONG, WANG XUE-ZHI. Research the correlative problems of solar heating water system unit buildings[J]. China Construction: Solar & Renewable Energy Sources, 2005, 5(1): 24-27.

[6] 谢空,白梅,邓康. 太阳能与建筑一体化设计体会[J]. 工业建筑, 2008, 38(2): 114-118.
XIE KONG, BAI MEI, DENG KANG. Cooperating design between solar energy and architecture[J]. Industrial Construction, 2008, 38(2): 114-118.

[7] HESTNES A G. Building integration of solar energy systems[J]. Solar Energy, 1999, 67(4/6): 181-187.

[8] 王松涛. 重庆可再生能源建筑应用全国示范城市建设获国家专项财政补助7000万元[EB/OL]. (2009-12-08) [2009-12-09] http://www.cq.xinhuanet.com/news/2009-12/08/content_18452829.htm.

[9] 韦秀丽,高立洪,高阳华,等. 重庆农村地区太阳能光热利用评价[J]. 南方农业, 2008, 2(7): 14-16.
WEI XIU-LI, GAO LI-HONG, GAO YANG-HUA, et al. The evaluation of the solar light and heat using in rural areas of Chongqing[J]. South China Agriculture, 2008, 2(7): 14-16.

[10] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.

[11] 中国气象科学数据共享服务网. 中国(1971-2000年)气候标准值[EB/OL]. <http://cdc.cma.gov.cn/shishi/climate.jsp?stprovid=重庆,中国气象局>.

[12] 王崇杰,薛一冰. 太阳能建筑设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

[13] 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 Energies Solaris Sinica*, 2009, 30(4): 460-464.
- [14] 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 analysis of natural ventilation enhanced by solar energy and ITS application in bioclimatic building[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(4): 568-570.
- [15] 苏醒,刘传聚,苏季平. 太阳能烟囱的通风效应及应用研究[J]. *能源技术*, 2005, 26(6): 245-247.
- SU XING, LIU CHAN-JU, SU JI-PING. The research on ventilation effect and the application of the solar energy chimney[J]. *Energy Technology*, 2005, 26(6): 245-247.
- [16] 左璐,郑源,周建华,等. 太阳能强化烟囱技术在强化室内自然通风中的研究进展[J]. *暖通空调*, 2008, 38(10):41-47.
- ZUO LU, ZHENG YUAN, ZHOU JIAN-HUA, et al. Review of study of solar chimney technology in strengthening indoor natural ventilation[J]. *Journal of HV&AC*, 2008, 38(10):41-47.
- [17] 江亿,林波荣,曾剑龙,等. 住宅节能[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [18] 丁勇,李百战,沈艳,等. 建筑平面布局和朝向对室内自然通风影响的数值模拟[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(1):90-95.
- DING YONG, LI BAI-ZHAN, SHEN YAN, et al. The influence analysis of the architectural design on natural ventilation effect[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(1): 90-95.
- [19] 李楠,李百战,沈艳,等. 住宅建筑自然通风对室内热环境的影响[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(7):36-42.
- LI NAN, LI BAI-ZHAN, SHEN YAN, et al. Impacts of natural ventilation on indoor thermal environment for residential housing[J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(7):36-42.
- [20] 沈艳. 重庆自然通风建筑室内热环境实测与模拟分析[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [21] 中华人民共和国建设部. GB/T 50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2004.

(编辑 郑洁)

(上接第75页)

- [9] 窦林名,何学秋. 冲击矿压危险预测的电磁辐射原理[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(2):427-431.
- DOU LIN-MING, HE XUE-QIU. Monitoring rock burst by electromagnetic emission[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(2): 427-431.
- [10] 肖红飞,何学秋,冯涛,等. 单轴压缩煤岩变形破裂电磁辐射与应力耦合规律的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(23):3948-3953.
- XIAO HONG-FEI, HE XUE-QIU, FENG TAO, et al. Research on coupling laws between EME and stress fields during deformation and fracture of coal and rock in uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(23): 3948-3953.
- [11] 窦林名,田京城,陆菜平,等. 组合煤岩冲击破坏电磁辐射规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(19): 3541-3544.
- DOU LIN-MING, TIAN JING-CHENG, LU CAI-PING, et al. Research on electromagnetic radiation rules of composed coal-rock burst failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 3541-3544.
- [12] 姚精明. 坚硬顶板条件下冲击矿压机理及其电磁辐射预测研究[D]. 北京:北京科技大学, 2009.
- [13] 赵本均. 冲击矿压及其防治[M]. 北京:煤炭工业出版社,1995.
- [14] 尹贤刚,李庶林,唐海燕,等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(s2):3383-3390.
- YIN XIAN-GANG, LI SHU-LIN, TANG HAI-YAN. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission[J]. *China Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(s2): 3383-3390.
- [15] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社,1996.

(编辑 郑洁)