

文章编号:2095-1922(2013)01-0116-05

## 相变材料在不同条件下节能效果的实验

张巨松<sup>1</sup>, 刘志鑫<sup>2</sup>, 黄灵玺<sup>1</sup>, 杨豹<sup>1</sup>, 门宇<sup>1</sup>, 张娜<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130061)

**摘要:**目的 推导相变材料节能率的计算式, 探讨不同环境温度、不同功率加热元件、不同相变材料掺量条件下相变材料的节能效果. 方法 根据相变材料节能特点, 建立节能测试系统, 通过升/降温实验, 对相变材料节能效果进行探讨. 结果 随着相变材料掺量的降低、环境温度的降低、加热元件功率的增大, 相变材料节能率降低. 相变材料掺量为 2 kg/m<sup>2</sup>、环境温度为 10.8 °C、加热元件功率为 25 W 时, 相变系统的节能率最高为 15.95%. 结论 推导出了相变材料节能率的计算式为  $\eta = \frac{t_z \cdot t_s^*}{t_z^* \cdot t_s} - 1$ ; 相变材料的节能效果与环境温度、供热速率及其掺量密切相关, 环境温度高、供热速率慢、掺量高其节能效果好.

**关键词:**相变材料; 节能率; 环境温度; 供热速率; 掺量

中图分类号: TU53 文献标志码: A

### Experimental Study on the Energy-Saving Effects of PCM in the Different Conditions

ZHANG Jusong<sup>1</sup>, LIU Zhixin<sup>2</sup>, HUANG Lingxi<sup>1</sup>, YANG Bao<sup>1</sup>, MEN Yu<sup>1</sup>, ZHANG Na<sup>1</sup>

(1. Material Science and Engineering Institute, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Chinese Ministry of Water Resources Northeastern Investigation, Design and Research Co., Ltd. Changchun, China, 130061)

**Abstract:** The calculation formula on energy-saving rate of phase change material (PCM) is derived, and the energy-saving effects of PCM in different environmental temperatures, different powers of heating elements and different dosages of PCM are discussed. According to energy-saving features of PCM, the testing and measuring system could be designed by myself, energy-saving effects of PCM could be discussed by the heating-up and heating-down experiments. The result indicated that the energy-saving rate of PCM was decreased as the environmental temperature falled down, the dosage of PCM decreased and the power of heating element increased. Its energy-saving rate reached 15.95%, which was the highest, when the dosage of PCM is 2 kg/m<sup>2</sup>, the environmental temperature is 10.8 °C and the power of heating element is 25 W. The calculation formula, which is  $\eta = \frac{t_z \cdot t_s^*}{t_z^* \cdot t_s} - 1$ , on energy-saving rate of PCM has been derived. The energy-saving effect of PCM is closely correlated with the environmental temperature, the dosage of PCM and the power of heating element. The high environmental temperature, the low heating rate and the high dosage of PCM are good at the energy-saving effect of PCM.

**Key words:** phase change material; energy-saving rate; environmental temperature; heating rate; dosage

随着经济的快速发展, 能源过度地开采与滥用导致能源过度供应与环境破坏的双重压力. 建

收稿日期: 2011-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50274025); 辽宁省教育厅科技攻关项目(11211004)

作者简介: 张巨松(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事新型保温节能材料、生态建筑材料研究.

建筑业作为用能大户,其能耗占社会总能耗的30%以上,现已提出节能65%的节能目标,促使建筑节能成为焦点问题.传统保温材料暴露出诸多问题,如有机保温材料的可燃性与毒性,无机保温材料的保温性与安全性.因此选择合理的建筑节能材料,是解决能源问题的重要措施之一.近年来,在建筑节能领域将相变材料与传统的建筑材料有机结合应用于建筑围护结构实现建筑节能备受关注.

相变储能材料,简称相变材料(Phase Change Materials, PCM),是利用材料自身状态的变化储存能量的一种材料,在相变温度范围内,相态发生变化时吸收或放出的能量称为相变潜热.相变材料是一种能够吸收或释放潜热的热功能材料,当环境温度高于相变温度时,相变材料发生相变吸收热量;当环境温度降至相变温度以下,相变材料发生相变释放热量,从而达到控温、储能的作用.通常,物质有固、液、气三态,而所谓相变是指当材料的状态发生变化,从一种状态转到另一种状态时,它是一个等温或近似等温的过程,同时伴有大量能量的吸收或释放,这就是相变储能材料研究的理论基础.相变材料的这种吸热和放热过程是自动的、可逆的、无限次的.

在储能技术的研究中,相对于物质温度变化时吸放的热量来讲,相变潜热要大得多.例如,冰-水的相变潜热为335 J/g,而水的显热吸收仅为4 J/(g·K).利用相变材料这种蓄热、放热作用,可以调整、控制物体周围环境的温度,这样能够在物体周围形成温度基本恒定的微气候,并且因其具有储能密度大、温度恒定、过程易控制等优点,成为最具世纪发展潜力、目前应用最多和最重要的材料,也成为国内外能源利用和材料科学方面研究的热点.

传统节能墙体结构本身具有保温隔热的节能效果,但实际应用还要依赖于墙体材料,对建筑余热、太阳能的储存和利用效率不高,建筑节能效果有限,更无法实现建筑创能.随着相变材料的使用功能的拓展,将相变材料引入建筑构成元素中,利用相变材料的潜热蓄热功能达到建筑调温、余热存储、辅助蓄热、太阳能蓄存等作用,成为目前非常受瞩目的建筑节能研究方向之一.

目前关于相变材料的研究很多,主要是针对于相变材料的制备与性能研究问题<sup>[1-3]</sup>,相变材

料的耐久性问题<sup>[4-7]</sup>,相变材料的经济性问题<sup>[8-9]</sup>,相变材料的实用化问题<sup>[10-13]</sup>.而对于相变材料是否节能、节能效果及其评价问题研究甚少.笔者通过查阅相关参考文献<sup>[14-15]</sup>,在前期工作的基础上<sup>[16-17]</sup>,针对上述问题,自行设计了节能测试体系,推导出了相变材料节能率的计算公式,对不同环境温度、不同功率加热元件、不同相变材料掺量条件下相变材料的节能效果进行了探讨,发现相变材料的节能效果与环境温度、供热速率及其掺量密切相关,环境温度高、供热速率慢、掺量高其节能效果好.

## 1 实验

### 1.1 实验材料与设备

实验材料:相变材料,相变温度为18~25℃,相变热为80 J/g,市售工业品;普通保温砂浆板,密度为400 kg/m<sup>3</sup>,导热系数为0.085 W/(m·K);膨胀珍珠岩类保温板,导热系数为0.060 W/(m·K),辽宁北奇保温材料有限公司生产.

实验设备:智能数据记录仪,型号JTR-08C,北京世纪建通技术开发有限公司生产;冰柜,型号BC/BD-233H,河南新飞电器有限公司制造.

节能实验箱:节能实验箱的长宽高为400 mm×300 mm×400 mm;实验箱顶部采用60 mm厚EPS板密封;箱体外围护层为50 mm膨胀珍珠岩类保温板;相变系统保温层为10 mm相变保温砂浆板,基准系统保温层为10 mm的普通保温砂浆板;实验箱底部采用锡纸板密封,并采用自制加热装置进行升温,目的是为了排除辐射传热,保证以传导、对流方式进行传热.

加热装置:加热装置的长宽高为510 mm×410 mm×300 mm;采用厚60 mm无机保温板制成;上端无盖;采用白炽灯泡作为加热元件.

实验测试装置示意如图1所示.

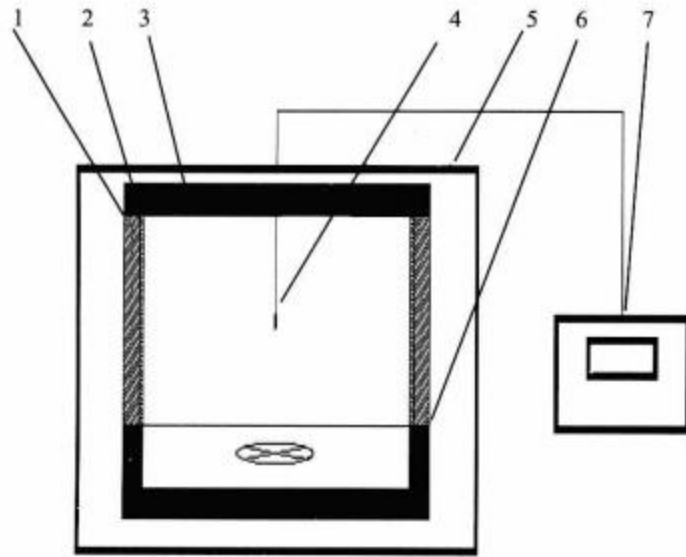
### 1.2 实验设计

(1)相变材料用量:实验设计了3种掺量,即0.5 kg/m<sup>2</sup>、1 kg/m<sup>2</sup>、2 kg/m<sup>2</sup>.

(2)环境温度:实验设计了3种环境温度,采用冰箱制冷实现,冰箱档位选定为“1档”、“2档”、“3档”,平均温度分别为10.8℃、3.6℃、-4.5℃.

(3)加热条件:自制加热装置,选用3种功率加热元件,即25 W、60 W、100 W白炽灯泡.





1. 外围护层;2. 保温层;3. 节能实验箱;4. 温感探头;5. 冰箱;  
6. 加热装置;7. 智能数据记录仪。

图1 实验测试装置示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of experimental test equipment

(4) 墙体热阻:实验设计墙体热阻为  $1.0 \text{ m}^2/(\text{W}\cdot\text{K}^{-1})$ 。

(5) 相变材料位置:以保温砂浆作为载体,将相变材料应用于墙体内表面,如图1所示。

(6) 舒适温度:根据《沈阳市民用建筑供热用热管理条例》规定,实验舒适温度设定为  $18 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 1.3 实验过程

首先,将实验箱放置于温度低于  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  的冰箱内保持足够长时间,使箱内温度与环境温度相一致;然后,对实验箱进行加热升温,记录箱内温度由  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  升至  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  的所需时间,即升温时间;最后,当观察到箱内的温度升高至  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  或略高于  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时,迅速停止加热,使体系开始降温,记录箱内温度由  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  降至  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  的所需时间,即降温时间。同时,利用智能数据记录仪监测实验箱内的温度变化情况,每隔  $0.5 \text{ min}$  记录1次。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 相变材料节能效果的评价

图2为相变材料掺量为  $2 \text{ kg/m}^2$ 、环境平均温度  $\theta$  为  $10.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、加热元件功率  $P$  为  $25 \text{ W}$  的条件下相变系统与基准系统的升降温曲线。由图2可见,相变系统升温时间  $t_s$  长于基准系统升温时间  $t_s^*$ ,相变系统舒适温度持续时间  $t_z$  长于基准系统舒适温度持续时间  $t_z^*$ 。这是由于相变材料加入所引起的。相变材料的加入增强了墙体蓄热能力,使得墙体的蓄热量增加、向内放热量增多,从而导致升温时间、舒适温度持续时间延长。

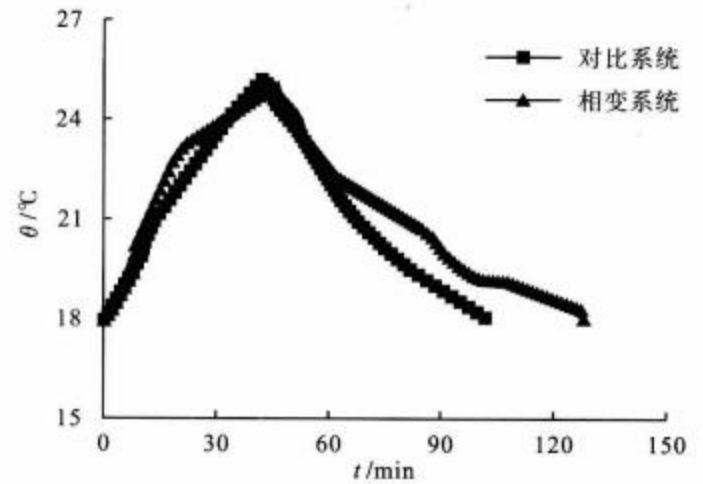


图2 相变系统与基准系统的升降温曲线

Fig. 2 The heating-up and heating-down curve of the phase-changing system and the standard system

基于实验结果,相变系统单位能耗维持舒适温度持续时间  $t_x$  与基准系统单位能耗维持舒适温度持续时间  $t_j$  分别为

$$t_x = \frac{t_z}{t_s \cdot P}, \quad (1)$$

$$t_j = \frac{t_z^*}{t_s^* \cdot P}. \quad (2)$$

根据节能率的概念<sup>[18]</sup>及实验结果,可得节能率  $\eta$  的计算式为

$$\eta = \frac{\frac{t_z}{t_s \cdot P} - \frac{t_z^*}{t_s^* \cdot P}}{\frac{t_z^*}{t_s^* \cdot P}} = \frac{t_z \cdot t_s^*}{t_z^* \cdot t_s} - 1. \quad (3)$$

由图2可知,  $t_s$  为  $45.5 \text{ min}$ ,  $t_z$  为  $127.5 \text{ min}$ ,  $t_s^*$  为  $42 \text{ min}$ ,  $t_z^*$  为  $101.5 \text{ min}$ 。由式(3)可得,实验条件下,相变材料的节能率  $\eta$  为  $15.95\%$ 。其意义在于,由于每平方米添加  $2 \text{ kg}$  相变材料,可使单位能耗维持“舒适温度的持续时间”延长  $15.95\%$ ,即节能率为  $15.95\%$ 。

### 2.2 不同环境温度下相变材料的节能率

图3为不同环境温度下相变材料的节能率。由图3可见,随着环境温度的降低,相变材料的节能率随之降低。这是由于环境温度的变化改变了热向外的动力。随着环境温度的降低,箱体内外温差增大,致使热向外的动力增大,导致相变材料向内放热量减少,向外放热量增多,从而使得相变材料的节能率随着环境温度的下降而降低。由此可见,相变材料的节能效果受环境温度变化影响,但在实际应用中环境温度为动态变化,应充分考虑其所带来的影响。

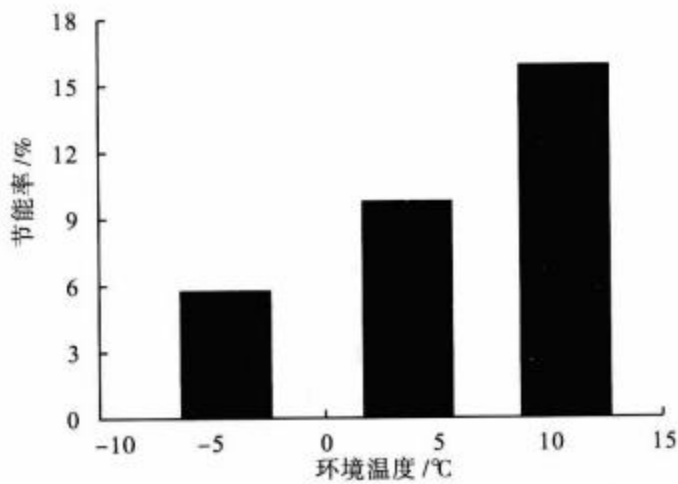


图 3 不同环境温度下相变材料的节能率

Fig. 3 The energy-saving rate of PCM in different environmental temperatures

### 2.3 不同功率加热元件下相变材料的节能率

图 4 为不同功率加热元件下相变材料的节能率. 由图 4 可见, 随着加热元件功率的增大, 相变材料的节能率降低. 这是由于相变材料与保温材料复合后, 其蓄热作用受到阻碍, 与达到舒适温度上限的时间长短有直接关系. 随着加热元件功率的增大, 加热速率增大, 箱内空气达到舒适温度上限的时间缩短, 因为环境处可动态条件下, 导致相变材料蓄热时间缩短, 相变材料的蓄热量减少, 从而使得相变材料的节能率随加热元件功率的增大而降低. 由此可见, 相变材料的节能效果与供热速率密切相关, 供热速率慢有利于其节能.

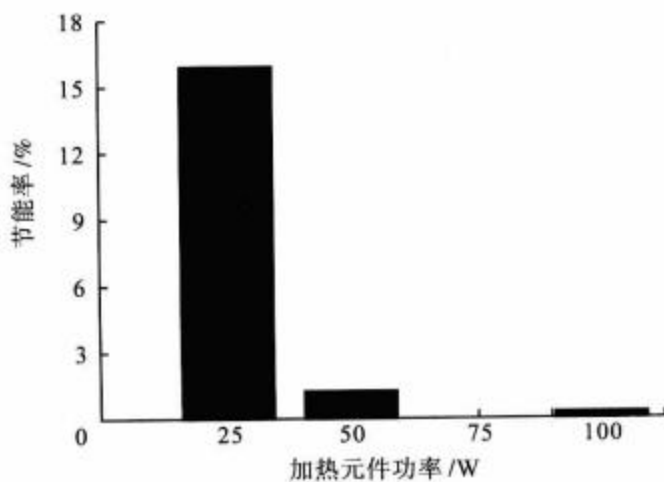


图 4 不同功率加热元件下相变材料的节能率

Fig. 4 The energy-saving rate of PCM in different powers of heating elements

### 2.4 不同相变材料掺量的节能率

图 5 为不同相变材料掺量的节能率. 由图 5 可见, 随着相变材料掺量的增加, 其节能率随之升高. 这是由于相变材料的潜热作用远高于砂浆的显热作用, 升温阶段的蓄热量与降温阶段释放出的潜热均远高于砂浆, 因此相变材料的掺量直接影响其蓄热量与放热量. 随着相变材料掺量的增

加, 相变材料的潜热总量增大, 导致其升温阶段的蓄热量增加, 降温阶段的放热量亦随之增加, 从而使得相变材料的节能率随着其掺量的增加而升高. 由此可见, 相变材料的节能效果与其掺量有直接关系. 掺量低, 节能效果差; 掺量高, 节能效果好, 但过多造成经济不合理.

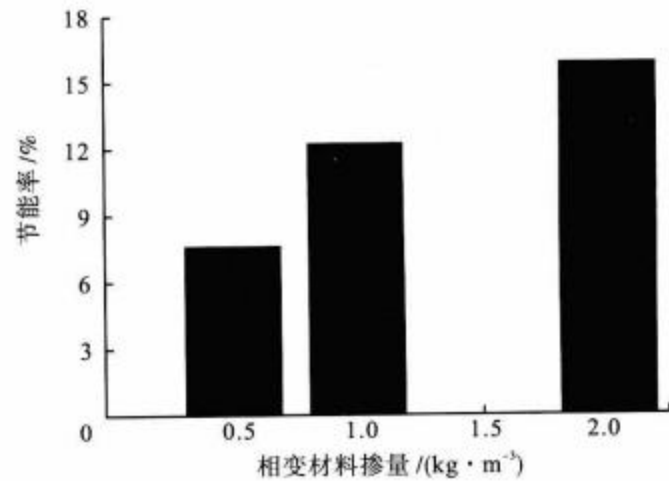


图 5 不同相变材料掺量的节能率

Fig. 5 The energy-saving rate of PCM in different dosages of PCM

## 3 结 论

(1) 根据节能率的概念和实验结果, 推导出了相变材料节能率的计算式为  $\eta = \frac{t_z \cdot t_s^*}{t_z^* \cdot t_s} - 1$ . 相变材料掺量为 2 kg/m<sup>2</sup>、环境平均温度为 10.8 °C、加热元件功率为 25 W 时, 每平方米添加 2 kg 相变材料, 相变系统的节能率  $\eta$  为 15.95%.

(2) 随着环境温度的降低, 相变材料的节能率降低. 相变材料的节能效果受环境温度变化影响, 但在实际应用中环境温度为动态变化, 应充分考虑其所带来的影响.

(3) 随着加热元件功率的增大, 相变材料的节能率降低. 相变材料的节能效果与供热速率密切相关, 供热速率慢有利于其节能.

(4) 随着相变材料掺量的增加, 其节能率随之升高. 相变材料的节能效果与其掺量有直接关系. 掺量低, 节能效果差; 掺量高, 节能效果好, 但过多造成经济不合理.

### 参考文献:

- [1] Krupa I, Mikova G, Luyt A S. Phase change materials based on low-density polyethylene/paraffin wax blends[J]. Eur Polym J, 2007, 43: 4695.
- [2] 张巨松, 吴晓丹, 朱林, 等. 相变温度在 19~26 °C 的复合相变材料的实验研究[J]. 沈阳建筑大学学报

- 报:自然科学版,2011,27(3):535-540.  
(Zhang Jusong, Wu Xiaodan, Zhu Lin, et al. Study on composite for material phase change of temperature from 19°C to 26°C [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011, 27(3): 535-540.)
- [3] Hadjieva M, Stovkov R, Filipova T Z. Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. [J] *Renewable Energy*, 2000(1):111-115.
- [4] Xavier P. Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2001, 44:2727-2737.
- [5] 何叶从,周杰,王厚华,等. 相变墙房间传热特性研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(10):1085-1090.  
(He Yecong, Zhou Jie, Wang Houhua, et al. Research on the performance of the phase change material wallboard room [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, 28(10):1085-1090.)
- [6] Cai Yibing. Thermal stability, latent heat and flame retardant properties of the thermal energy storage phase change materials based on paraffin/high density polyethylene composites [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34:2117.
- [7] Sumin K, Lawrence T D. High latent heat storage & high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets [J]. *Solar Energy Mater & Solar Cells*, 2009(2):136-139.
- [8] Sarl A. Thermal reliability test of some fatty acids as PCMS used for solar thermal latent heat storage applications [J]. *Energy Conversion & Management*, 2003:2277-2287.
- [9] Zhou Jianmin, Zhang Dong, Wu Keru. Experimental study and analysis on obtaining and energy storing composite material by direct incorporating organic phase change materials into porous granule [J]. *Energy Conservation Technology*, 2003, 21(6):5-7.
- [10] Ali K, Ahmet S. Capric-myristic acid/vermiculite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage [J]. *Solar Energy*, 2009(3):323-332.
- [11] Lu Hui, Zhang Xiong, Zhang Yongjuan. Preparation of fatty acid/expanded perlite/paraffin composite PCM and its application in building energy conservation [J]. *New Building Materials*, 2010, 2:21-28.
- [12] Amar M K, Mohammed M F. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials [J]. *Energy Conversion & Management*, 2004(2):263-275.
- [13] Lee T, Hawes D W, Banu D. Control aspects of latent heat storage and recovering in concrete [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2000, 62:217-237.
- [14] Ai Mingxing, Cao Liqiang, Guo Xiangyong, et al. Energy efficiency evaluation of phase change energy storage building materials [J]. *Construction Conserves Energy*, 2008, 36(4):40-43.
- [15] Yan Quanying, Lian Chen, Zhang Lin. Effect of phase change paraffin on thermal performance of cement wall [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(2):236-238.
- [16] Zhang Jusong, Wu Xiaodan, Zhu Lin. Study of a kind of phase change thermo-regulated mortar [J]. *Liaoning Building Material*, 2009(5):11-12.
- [17] 张巨松,金亮,吴晓丹. 相变材料发展及在建筑节能工程中的应用 [J]. *辽宁建材*, 2010(2):38-44.  
(Zhang Jusong, Jin Liang, Wu Xiaodan. Development and application of phase change material in energy efficient project of building [J]. *Liaoning Building Material*, 2010(2):38-44.)
- [18] Long Weiding. Proportion of energy consumption of building sector and target of building energy efficiency in China [J]. *Energy of China*, 2005, 27(10):23-27.

