

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.019



# 西安办公建筑相变蓄热通风技术的 季节适宜性研究

刘江<sup>1</sup>, 杨柳<sup>1</sup>, 刘衍<sup>1</sup>, 侯立强<sup>1</sup>, 董宏<sup>2</sup>, 刘加平<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院; 西部绿色建筑国家重点实验室, 西安 710055;

2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

**摘要:**以西安地区一栋典型办公建筑为例,运用 EnergyPlus 数值模拟软件研究了相变蓄热通风技术在过渡季节和炎热季节的应用情况。采用日累计降温幅度  $\Delta T$  和降温潜力百分比  $J$  两个指标对其降温效果进行评价,分析了相变材料充分发挥相变潜能时室外干球温度的日气温特征,并基于 ASHRAE 55 热舒适模型评价了该技术对室内热环境的改善情况。结果表明:当室外干球温度最大值高于相变区间上限值  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,最低温度低于相变区间下限值  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且日平均温度处于相变区间范围内时,相变蓄热通风技术能够充分发挥相变蓄能作用;该技术在过渡季节的应用效果优于炎热季节,与夜间自然通风技术相比,该技术可使整个过渡季节室内空气温度降温幅度提高  $14\%$ ,室内操作温度满足 ASHRAE 55 标准的  $80\%$ ,可接受温度范围的小时数提高  $8\%$ ,而整个炎热季节室内空气温度降幅只提高  $5.6\%$ ,室内操作温度满足 ASHRAE 55 标准的  $80\%$ ,可接受温度范围的小时数仅提高  $1\%$ 。

**关键词:**夜间通风;相变蓄热;数值模拟;季节适宜性;建筑节能

**中图分类号:**TU111.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)01-0150-10

## Study on seasonal suitability of phase change heat storage coupled with night ventilation in an office building in Xi'an

Liu Jiang<sup>1</sup>, Yang Liu<sup>1</sup>, Liu Yan<sup>1</sup>, Hou Liqiang<sup>1</sup>, Dong Hong<sup>2</sup>, Liu Jiaping<sup>1</sup>

(1. School of Architecture; State Key Laboratory of Green Building in Western China School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, application potential of phase change heat storage coupled with night ventilation technology in transition and hot seasons were investigated using EnergyPlus, based on a typical office building in Xi'an. Two factors, daily cumulative cooling amplitude ( $\Delta T$ ) and percentage of cooling potential ( $J$ ), were introduced to evaluate its cooling effect. The characteristics of outdoor dry-bulb temperature were examined when the technology realized its best cooling potential. The performance of the technology on improving the indoor thermal environment was also analyzed based on the standard ASHRAE

**收稿日期:**2018-07-19

**基金项目:**陕西省重点研发计划(2017ZDXM-SF-076);陕西省自然科学基金(2017JQ5005);中国博士后科学基金(2018T111026)

**作者简介:**刘江(1991-),男,主要从事绿色建筑与建筑节能研究,E-mail:1045079585@qq.com。

刘衍(通信作者),男,副教授,E-mail:liuyan@xauat.edu.cn。

**Received:**2018-07-19

**Foundation item:** Shaanxi Province Key Research and Development Plan (No. 2017ZDXM-SF-076), Natural Science Foundation of Shaanxi Provincial (No. 2017JQ5005); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018T111026)

**Author brief:** Liu Jiang (1991-), research interests: green building and building energy, E-mail: 1045079585@qq.com. Liu Yan (corresponding author), associate professor, E-mail: liuyan@xauat.edu.cn.

55 Adaptive Comfort Model. The results indicate that the technology can obtain excellent application effect when the maximum of outdoor dry-bulb temperature exceeds the upper limit of the phase change range  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  and its minimum is less than the lower limit of the phase change range  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  and its average is in the phase change range. The application effect of this technology in transition season is superior to that in hot season. Compared with night natural ventilation technology, the cooling amplitude in transition season and hot season by using the technology are increased by 14% and 5.6%, respectively, and the number of hours meets ASHRAE 55 standard 80% acceptability limit in transition and hot seasons are increased by 8% and 1%, respectively.

**Keywords:** night ventilation; phase change heat storage; numerical simulation; seasonal suitability; building energy conservation

中国2017年施行的《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)首次提出将相变材料复合在墙体内侧以增强墙体的热稳定性<sup>[1]</sup>。结合夜间自然通风的相变蓄热通风技术更能显著改善建筑室内热环境状况,提高人体热舒适度<sup>[2]</sup>。近年来,关于相变蓄热通风技术的研究取得了显著的成果。在理论研究方面,林坤平等<sup>[3]</sup>研究了结合夜间通风的相变墙体热设计方法,提出了夏季结合夜间通风的相变墙房间热性能的理论模型;孔祥飞等<sup>[4]</sup>利用热焓法建立了相变蓄热墙物理模型并进行数值模拟,从蓄热量、延迟性和熔化过程三方面研究了相变墙体内壁面与室内空气之间对流换热系数对相变蓄热通风技术的影响规律。在实验研究方面,李百战等<sup>[5]</sup>和白音夫等<sup>[6]</sup>建立建筑缩尺模型对相变蓄热通风技术的调温效果进行研究,获得了相变蓄热通风技术对轻质建筑夏季室内热环境的影响规律。在产品研发方面,冯国会等<sup>[7]</sup>研发了一种新型相变蓄热墙,墙体上设有室外/室内两套通风口,可分别满足夜间/白天的通风需求;谢静超等<sup>[8]</sup>以石蜡为相变储能材料,石膏为基础材料,制备了一种新型石膏基储能构件并对其在北京地区过渡季节的应用效果进行模拟研究。关于相变蓄热通风技术本课题组也开展了相关研究:张璞等<sup>[9-10]</sup>利用固/液混合石蜡封装在铝罐中作为蓄热体,放置于西安的一栋高层建筑中,对比研究了不同相变温度的石蜡对室内热环境的改善情况;刘衍等<sup>[11-12]</sup>采用CFD方法研究了蓄热通风技术对建筑室内热环境的影响规律,并通过EnergyPlus数值模拟软件分析了相变蓄热通风技术在中国西部不同气候区夏季使用的适宜性情况。

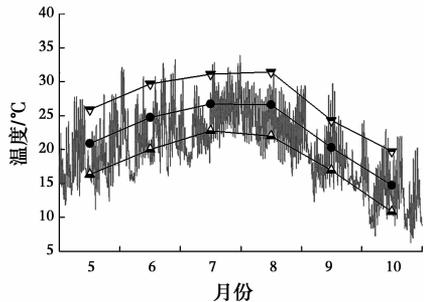
但目前关于相变蓄热通风技术的研究主要以该技术在炎热季节的应用为前提,针对该技术在过渡季节应用的研究还相对较少,而建筑实际运行时都

需同时考虑过渡季节和炎热季节房间的降温问题,因此,相变蓄热通风技术在设计时应综合考虑其在过渡季节和炎热季节的应用。林坤平等<sup>[13]</sup>通过数值模拟分析了相变蓄热通风技术在中国不同气候区夏季的应用效果,说明了该技术在中国不同地区使用的优点和局限性,但是没有考虑该技术在过渡季节的应用情况。本文以西安地区典型办公建筑为例,研究分析相变蓄热通风技术在过渡季节和炎热季节应用效果的差异性。

## 1 相变材料的选择

相变材料应用在建筑中时,应具有较大的相变潜热、稳定的化学性能以及适宜当地气候特征的相变温度(PCT)<sup>[14]</sup>,除此之外,还应考虑其与建筑的结合方式、布置位置、相变材料用量、造价等因素,同时,应尽量避免相变材料过冷现象对应用效果的影响<sup>[15]</sup>。相变材料为建筑中应用较为广泛的脂肪酸类有机相变材料,该类相变材料具有储能密度大、相变温度范围广、不易发生相分离及过冷现象、价格低廉和绿色环保等优点。为了选择适宜过渡季节和炎热季节气候特征的相变温度,对西安地区过渡季节和炎热季节气候特征进行了分析。通常情况下西安地区11月15日至3月15日为采暖期,其前/后一段时间内(3月16日至4月30日/11月1日至11月14日)室内不存在降温需求。因此,将5月1日至6月30日和9月1日至10月31日共计4个月定义为过渡季节,将7月1日至8月31日共计2个月定义为炎热季节。图1所示为西安地区过渡季节和炎热季节的室外空气干球温度分布情况,从图1可以看出,室外空气干球温度月最高温度平均值在 $20\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;月平均温度值在 $15\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,月最低温度平均值在 $11\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,室外空气干球温度波动范围主要集中在 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,以月平均温

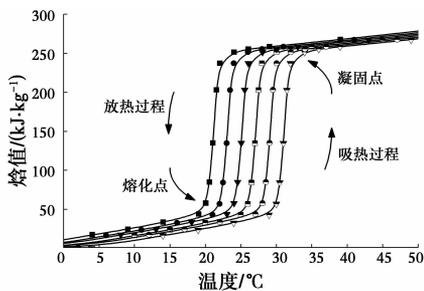
度以及两个季节室外空气干球温度的主要波动范围为参考依据,初步挑选了相变潜热相同、相变温度呈阶梯变化的 6 种脂肪酸类有机相变材料,相变温度分别为 21、23、25、27、29、31 °C,相变潜热值均为 219 kJ/kg<sup>[16]</sup>,6 种相变材料相变区间分别为 19~23、21~25、23~27、25~29、27~31、29~33 °C,焓温曲线如图 2 所示。



注: — 室外空气干球温度 —▲— 月最低温度平均值  
—●— 月平均温度 —▼— 月最高温度平均值

图 1 西安地区室外气候分析

Fig. 1 Analysis of outdoor climate in Xi'an



注: —●— PCT21 —▲— PCT27 —▼— PCT23  
—●— PCT29 —▲— PCT25 —▼— PCT31

图 2 6 种不同相变材料焓温曲线图

Fig. 2 Enthalpy-temperature graph of six different PCMs

## 2 数值模拟

### 2.1 建筑模型

选取西安地区 1 栋典型办公建筑作为模拟对象,建筑模型和标准层平面如图 3 所示,该建筑层高 3.6 m,建筑面积 2 031 m<sup>2</sup>,相变材料布置于所有房间外墙、内墙和天花板内侧,相变层厚度为 20 mm,建筑材料热物性性能计算参数及围护结构构造如表 1 和表 2 所示,分析对象为图 3 虚线框所示房间。

表 1 建筑材料热物性性能计算参数

Table 1 Thermophysical properties of building materials

名称	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
水泥砂浆	0.93	1 800	1.05

续表 1

名称	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
钢筋混凝土	1.74	2 500	0.92
灰砂砖	1.10	1 900	1.05
聚氨酯保温板	0.027	30	1.38
EPS	0.042	30	1.38
相变材料	0.20	860	1.62

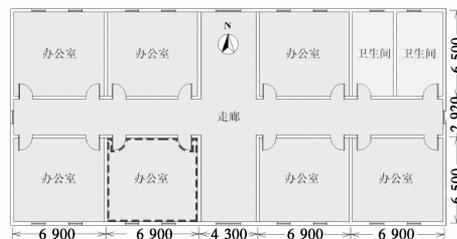
表 2 办公建筑围护结构构造

Table 2 Construction of the office building

围护结构	构造(由外到内)
屋顶	30 mm 水泥砂浆, 50 mm 聚氨酯保温板, 130 mm 钢筋混凝土, 20 mm 水泥砂浆
外墙	20 mm 水泥砂浆, 50 mm EPS, 370 mm 灰砂砖, 20 mm 水泥砂浆或者 20 mm 相变材料
内墙	20 mm 水泥砂浆, 200 mm 灰砂砖, 20 mm 水泥砂浆或者 20 mm 相变材料
楼板	5 mm 水泥砂浆, 100 mm 钢筋混凝土, 5 mm 水泥砂浆或者 20 mm 相变材料
地板	50 mm EPS, 200 mm 钢筋混凝土, 12 mm 水泥砂浆
窗户	3 mm 玻璃, 13 mm 空气层, 3 mm 玻璃, 太阳得热系数为 0.513



(a) 办公建筑模型



(b) 标准层平面图

图 3 西安地区典型办公建筑

Fig. 3 A typical office building model in Xi'an

### 2.2 模拟参数设置

能耗模拟软件 EnergyPlus<sup>[17]</sup> 由美国能源部和伯克利国家实验室共同开发,能够用于相变围护结

构传热计算。数值模拟时间步长设置为 3 min,空间离散常数设置为 3,差分算法选择全隐一阶格式(Fully Implicit First Order),外表面对流换热采用 DOE-2 算法,内表面对流换热采用 TARP 算法<sup>[18]</sup>,计算模块如图 4 所示。由于 EnergyPlus 目前还不能对相变材料过冷现象进行模拟,因此,模拟过程未考虑相变材料的过冷现象。

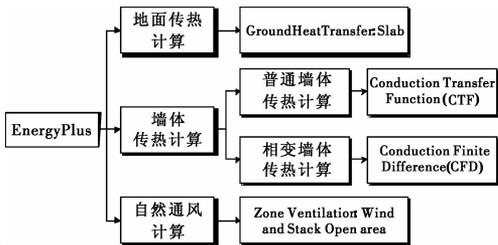


图 4 数值模拟求解模块

Fig. 4 Numerical simulation solution module

模拟时间为 1 月 1 日—12 月 31 日,所用逐时气象数据为 EnergyPlus 自带的典型年气象数据(CSWD 气象文件)<sup>[19]</sup>。夜间窗户全部开启进行自然通风,自然通风时间为 20:00—8:00,为了尽可能模拟真实条件下白天 8:00—20:00 时间段内窗户的开启情况,白天通风条件设置为室内外温差大于 2℃,且室内温度高于 18℃时开启窗户进行自然通风。室内人员逐时在室率、照明功率密度情况和电器设备功率密度情况均按照《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)<sup>[20]</sup>进行设置,如图 5 所示。

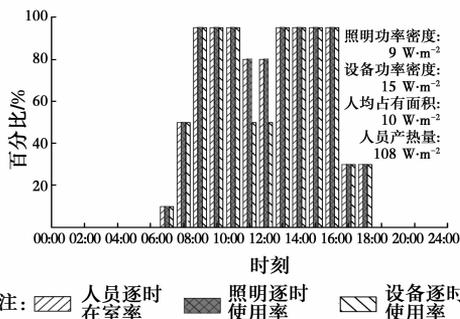


图 5 人员、照明和设备情况时间表

Fig. 5 People, lighting and equipment running schedule

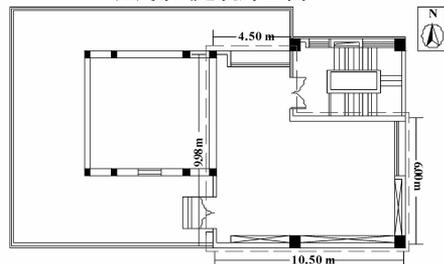
### 2.3 数值模拟验证

对西安建筑科技大学 1 栋办公建筑进行了现场热环境测试,并依据实际建筑建立了数值模型,通过数值模拟结果与实测结果的对比,验证了数值模拟方法的可靠性和准确性。为排除人员活动等因素造成的误差,该建筑测试是在无人员、照明和设备等内热源的条件下进行的,模拟时同样不考虑室内热扰的影响。

该建筑外立面和二层平面布置如图 6 所示,测试房间如图 6(b)虚线框所示,测试分为室内部分和室外部分,室内测试参数为室内空气干球温度、相对湿度,测试仪器为自记式温度块;室外测试参数为室外空气干球温度、相对湿度、太阳辐射、风速等,测试仪器为小型气象站,测试仪器的布置依据《建筑热环境测试方法标准》(JGJ/T 347—2014)<sup>[21]</sup>,仪器布置如图 7 所示。测试时间为 2017 年 7 月 15 日至 7 月 21 日,测试仪器每隔 10 min 记录一次数据。



(a) 测试建筑外立面



(b) 测试建筑二层平面图

图 6 现场测试建筑

Fig. 6 The field testing building



图 7 现场测试仪器情况

Fig. 7 Testing instruments

模拟时将测试期间的室外空气干球温度和太阳辐射等气象数据替代原有气象文件中的相应数据。建筑围护结构本身具有一定的蓄热能力,因此,当天的室内温度同时受前几日的影,为了保证比较分析的准确性,选取 7 月 17 日—21 日的数据作为分析对象,室内空气干球温度模拟值与实测值对比如图 8 所示,从图中可以看出:室内空气干球温度模拟值与实测值变化趋势基本一致,温度最高值、最低值及其出现的时间十分吻合。为了更进一步对实验测试与数值模拟结果进行对比,采用相对误差分析方

法对结果进行定性分析。其中,最大相对误差 RME(见式(1))为 2.95%,平均相对误差 RAE(见式(2))为 0.96%。因此,综合上述结果,数值模拟值与实验测试值具有高度一致性,进而验证了数值模拟方法的可靠性和准确性。

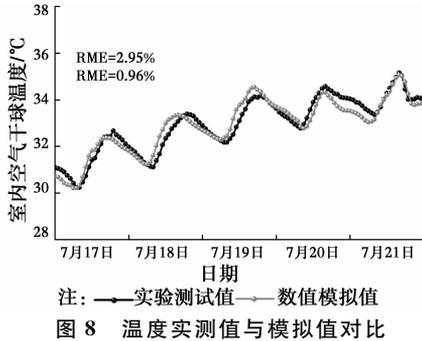


图 8 温度实测值与模拟值对比

Fig. 8 The contrast of indoor air temperature between simulated results and experimental data

$$\text{RME} = \text{Max} \left( \left| \frac{x_{\text{sim}} - x_{\text{exm}}}{x_{\text{exm}}} \right| \times 100\% \right) \quad (1)$$

$$\text{RAE} = \text{Average} \left( \left| \frac{x_{\text{sim}} - x_{\text{exm}}}{x_{\text{exm}}} \right| \times 100\% \right) \quad (2)$$

式中:RME 为最大相对误差; $x_{\text{sim}}$  为数值模拟值; $x_{\text{exm}}$  为实验测试值;RAE 为平均相对误差。

### 3 评价指标 $\Delta T$ 和 $J$ 的定义

为了评价相变蓄热通风技术和夜间自然通风技术在白天 8:00—20:00 人员在室内期间的降温效果,提出了室内温度“日累计降温幅度” $\Delta T$ (见式(3)),作为上述两种技术白天应用效果评价的指标,并定义每个月日累计降温幅度之和为  $\sum \Delta T_{\text{月}}$ ,整个过渡季节日累计降温幅度之和为  $\sum \Delta T_{\text{过渡}}$ ,整个炎热季节日累计降温幅度之和为  $\sum \Delta T_{\text{炎热}}$ 。

$$\Delta T = \int_{8:00}^{20:00} (t_{\text{in}} - t_{\text{x}}) dt \quad (3)$$

式中: $t_{\text{in}}$  为既未采用夜间自然通风技术,也未采用相变蓄热通风技术房间的室内空气温度(参考组), $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{\text{x}}$  为采用相变蓄热通风技术或者夜间自然通风技术时房间的室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。显然, $\sum \Delta T$  越大,相应技术降温效果越好。

同时,为了评价相变蓄热通风技术与夜间自然通风技术相比所具有的降温潜力,定义“降温潜力百分比” $J$ (见式(4))作为评价指标。

$$\text{降温潜力百分比}(J) = \frac{\sum \Delta T_{\text{相}} - \sum \Delta T_{\text{夜}}}{\sum \Delta T_{\text{夜}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\sum \Delta T_{\text{相}}$  为相变蓄热通风技术取得的“日累计降温幅度” $\Delta T$  之和; $\sum \Delta T_{\text{夜}}$  为夜间自然通风技术取得的“日累计降温幅度” $\Delta T$  之和。

## 4 相变蓄热通风技术适宜性分析

采用 EnergyPlus 分别模拟了相变蓄热通风技术、夜间自然通风技术以及既无相变蓄热通风也无夜间自然通风技术(参考组)情况下房间的空气温度和操作温度。比较分析了 6 种潜热相同,相变温度不同的相变材料对相变蓄热通风技术降温效果的影响,并对过渡季节该技术充分发挥相变潜能时的室外气温特征进行了分析;同时,以夜间自然通风技术为参考,分别从降温潜力和热舒适评价两方面,研究了相变蓄热通风技术在过渡季节(5 月 1 日至 6 月 30 日和 9 月 1 日至 10 月 31 日)以及炎热季节(7 月 1 日至 8 月 31 日)的适宜性情况。

### 4.1 相变温度对相变蓄热通风技术降温效果的影响

图 9(a)、(b) 分别为过渡季节和炎热季节典型周内,分析房间南墙内侧布置 6 种不同相变材料时内壁面温度的对比。通过图 9(a) 可发现:过渡季节典型周相变温度为  $25^{\circ}\text{C}$  的相变材料对墙体内壁面温度的调节效果较好,其内壁面温度波幅最小;当布置其他 5 种相变材料时,其内壁面温度最大波幅达  $2.5^{\circ}\text{C}$ ,6 月 15 日和 16 日内壁面温度明显高于  $26^{\circ}\text{C}$ , $21^{\circ}\text{C}$ 、 $23^{\circ}\text{C}$ 、 $29^{\circ}\text{C}$ 、 $31^{\circ}\text{C}$  这 4 种相变材料对应的内壁面温度在 6 月 17 日和 18 日甚至达到  $28^{\circ}\text{C}$ ,而相变温度为  $25^{\circ}\text{C}$  的相变材料对应的内壁面温度仍能维持在  $25^{\circ}\text{C}$  左右。这意味着典型周内相变温度为  $25^{\circ}\text{C}$  的相变材料对降低室内空气温度的能力显著优于其他 5 种相变材料。通过图 9(b) 炎热季节典型周南墙内壁面温度变化情况可以发现: $21^{\circ}\text{C}$ 、 $23^{\circ}\text{C}$ 、 $25^{\circ}\text{C}$  和  $27^{\circ}\text{C}$  这 4 种相变材料所对应的南墙内壁面温度曲线几乎重合,表明这 4 种相变温度较低的相变材料对典型周南墙内壁面温度的调节能力基本相同;相变温度为  $29^{\circ}\text{C}$ 、 $31^{\circ}\text{C}$  的相变材料对典型周南墙内壁面温度的调节能力均优于前面 4 种相变材料,这表明炎热季节典型周相变温度较高的相变材料更能发挥相变蓄能作用,但相变温度为  $29^{\circ}\text{C}$  的相变材料较  $31^{\circ}\text{C}$  的相变材料降温效果更好,其南墙内壁面温度更低基本保持在  $29\sim 30^{\circ}\text{C}$  内,温度最大波幅仅有  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。为了选择最适宜的相变温度,还需对整个过渡季节和炎热季节的降温效果进行定量分析。

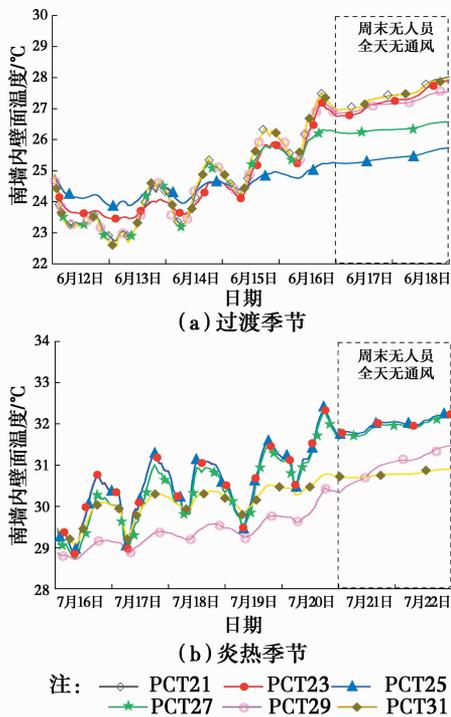


图 9 典型周南墙内壁面温度

Fig. 9 Interior surface temperature of south wall in a typical week

不同相变温度对相变蓄热通风技术累计降温幅度的影响如图 10 所示。相变温度对于过渡季节相变蓄热通风技术累计降温幅度影响较为显著,而对于炎热季节,该技术累计降温幅度影响较小。过渡季节累计降温幅度  $\sum \Delta T_{\text{过渡}}$  随着相变温度的增加呈现出先增后降的趋势,且在 25 °C 时取得最大值。根据图 1 室外气候条件可知,过渡季节室外空气干球温度昼夜差大,且月平均温度略低于 25 °C,因此,相变温度为 25 °C 的相变材料在夜间能够很好地蓄冷。炎热季节累计降温幅度  $\sum \Delta T_{\text{炎热}}$  呈现出随相变温度的升高而增加的趋势,但增幅不明显。相变温度为 29 °C 时该技术取得最大值,当相变温度继续增加到 31 °C 时,  $\sum \Delta T_{\text{炎热}}$  保持不变。通过图 1 室外气候分析可知,炎热季节月最高温度平均值达 32 °C,月平均温度高于 26 °C,月最低温度平均值高于 23 °C,且大部分时间段全天温度均在 25 °C 以上,这说明炎热季节夜间室外温度大部分时间均处于较高温度,所以,相变温度较低的相变材料在夜间仍然为液态,无法凝固蓄冷,而相变温度较高的相变材料在夜间虽能实现部分凝固,但由于炎热季节昼夜温差较小,即使全天温度刚好处于相变温度区间内,相变材料仍将很难充分发挥相变蓄能作用。所以,炎热

季节随着相变温度的增加降温幅度  $\sum \Delta T_{\text{炎热}}$  也相应增加,但增幅较小。综上可知,相变温度对相变蓄热通风技术应用效果有较大影响,由于过渡季节和炎热季节室外气候存在显著的差异性,所以,导致该技术在过渡季节和炎热季节取得最大降温幅度时的相变温度不同。对于自由运行建筑而言,过渡季节和炎热季节室内均存在降温需求,所以,相变温度的选择宜以实现该技术在两个季节综合降温效果最好的原则进行挑选。因此,以过渡季节和炎热季节该技术累计降温幅度之和的最大值为依据对相变温度进行挑选,通过对 6 种不同相变温度下两个季节该技术累计降温幅度之和的对比分析发现:当相变温度为 25 °C 时,过渡季节和炎热季节该技术累计降温幅度之和最大(2 898 °C · h),因此,本文相变材料相变温度选择为 25 °C。

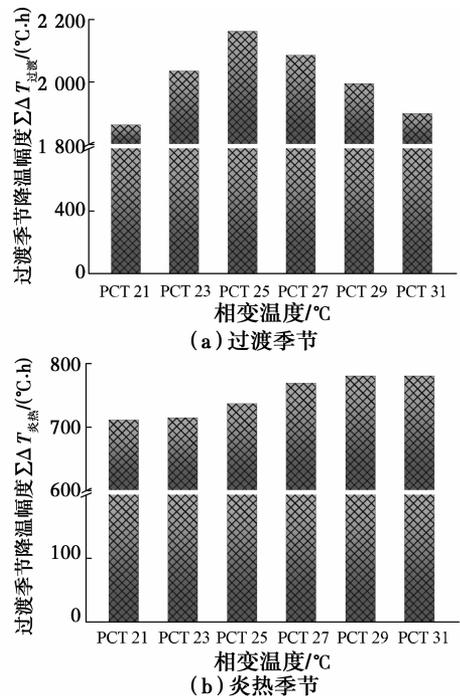


图 10 相变温度对  $\sum \Delta T_{\text{过渡}}$  和  $\sum \Delta T_{\text{炎热}}$  的影响

Fig. 10 Influence of PCT on  $\sum \Delta T_{\text{过渡}}$  and  $\sum \Delta T_{\text{炎热}}$

#### 4.2 日气温特征对相变蓄热通风技术降温效果的影响

图 11 为相变温度为 25 °C 时,过渡季节和炎热季节相变蓄热通风技术日累计降温幅度  $\Delta T$  曲线图。从图中可以看出,过渡季节大部分天数该技术日累计降温幅度高于炎热季节,过渡季节其平均值达到 18 °C · h,最高值达到 33.9 °C · h;而炎热季节其平均值仅为 12 °C · h,最大值也仅有 20 °C · h,这表明该技术应用在过渡季节时具有更大的降温优

势。为了提炼出能够准确代表该技术充分发挥降温潜能时室外日气温所具有的特征,对过渡季节日累计降温幅度超过平均值  $18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  所对应天数的室外日气温特征进行了统计分析,符合要求的天数共计 49 d,主要分析室外干球温度的最大值、平均值、最低值以及昼夜温差的分布情况。通过分析发现,每日室外干球温度最大值高于  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  的天数占总天数的 88%,超过  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  的天数占 67%,每日室外干球温度平均值处于相变区间的比例为 61%,每日室外干球温度最低值低于  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  的天数占 86%,低于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的天数占 71%,昼夜温差高于  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的天数占 77%。通过以上数据可以得出较为保守的结论:当室外干球温度最高值大于相变区间上限值  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低温度低于相变区间下限值  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且日平均温度处于相变区间范围内时,该技术能取得较好的应用效果。为了验证该结论的可靠性,对 5 月 5 日和 9 月 20 日这 2 d 相变蓄热通风技术取得较大“日累计降温幅度”时相变蓄热房间和参考组房间室内空气温度以及室外干球温度进行了分析。

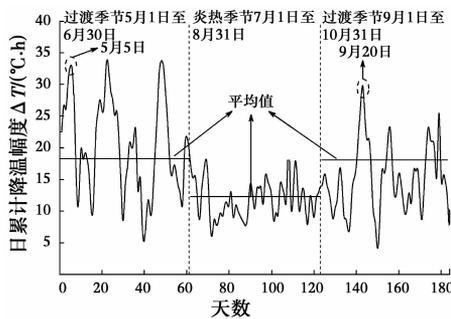


图 11 过渡季节和炎热季节日累计降温幅度值

Fig. 11 The values of  $\Delta T$  in transition and hot seasons

从图 12 可以发现,5 月 5 日和 9 月 20 日相变蓄热通风房间室内空气温度均低于参考组房间室内空气温度,在 8:00—20:00 期间室内空气峰值温度比参考房间约低  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这表明所选取的 2 d 内,相变材料均很好地发挥了相变蓄能作用。通过观察室外空气温度可以发现,这 2 天室外干球温度波动范围均能够覆盖相变区间( $23\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),其平均值接近相变温度( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),最高值均比相变区间上限值( $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ )高  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低值均比相变区间下限值( $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ )低  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;另外,5 月 5 日室外干球温度昼夜温差达到  $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,9 月 20 日达到  $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;这些气候特征均符合总结出的相变蓄热通风技术充分发挥相变潜能时所具有的日气温特征。因此,实际应用中可通过本文总结出的日气温特征对相变材料是否能够充分发生相变进行粗略地判断。

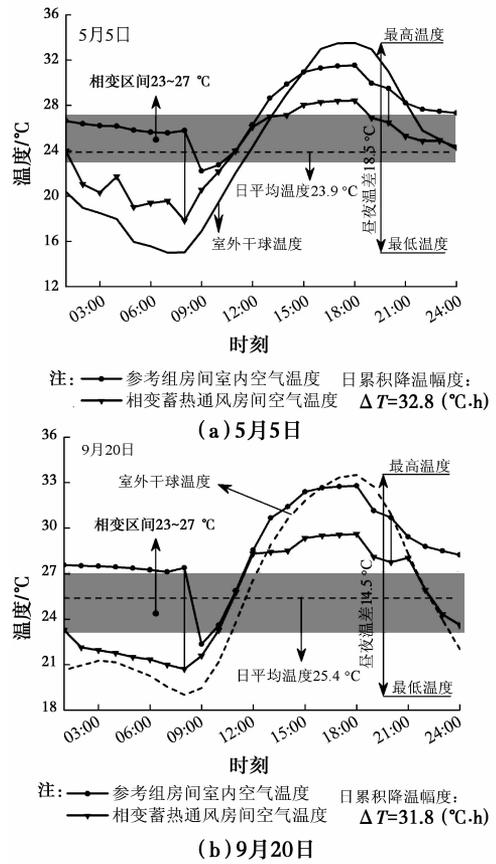


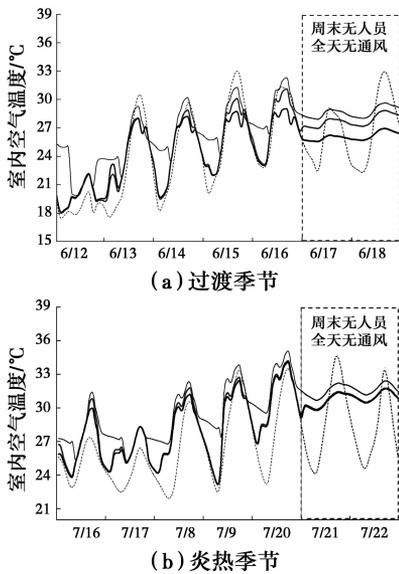
图 12 室外日气温特征分析

Fig. 12 Analysis of the outdoor daily temperature

### 4.3 相变蓄热通风技术与夜间自然通风技术降温潜力对比

图 13(a)、(b)分别为相变温度  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  下过渡季节和炎热季节典型周室内空气温度。从图 13(a)可以看出:和夜间自然通风技术相比,过渡季节相变蓄热通风技术降温优势明显,最大可使白天室内空气温度在夜间自然通风技术基础上下降  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时可以发现,两种技术下室内空气温度在夜间通风时段基本相同,且与室外空气干球温度接近,这说明过渡季节夜间通风效果较好,能够及时降低室内空气温度使相变材料凝固蓄冷,同时带走凝固过程释放的热量;而炎热季节,该技术的降温优势显著减弱,和夜间自然通风技术相比,该技术下白天室内空气温度最大仅下降  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过图 13(b)可以看出,两种技术下夜间室内空气温度基本相同,且高于相变区间下限值  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,室外空气干球温度昼夜温差相对较小,部分天数昼夜温差仅有  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且最低温度高于  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这种情况下相变材料在夜间将不能充分凝固蓄冷,所以,该技术在白天未能发挥相变蓄能的作用。这种情况在整个炎热季节较为常见,炎热季节通常昼夜温差较小,全天室外空气温度均保持在较高水平,夜间室外空气温度甚至高于相变区间下限

值,同时由于实际应用中相变材料往往存在过冷现象,因此在这种气候特征下相变材料在夜间将很难实现凝固蓄冷。此时,可考虑在夜间低温时段采用机械通风设备对相变材料进行通风降温,使其充分凝固蓄冷。对于空调房间,则可以考虑在夜间低谷电价时段开启空调对相变材料进行降温蓄冷,进而实现减少白天空调使用的时间。但实际应用中需要对这种方式的可行性进行论证,由于设计不当或者相变材料储能效果差等问题,这种方式可能起不了节能的作用反而增加经济成本。



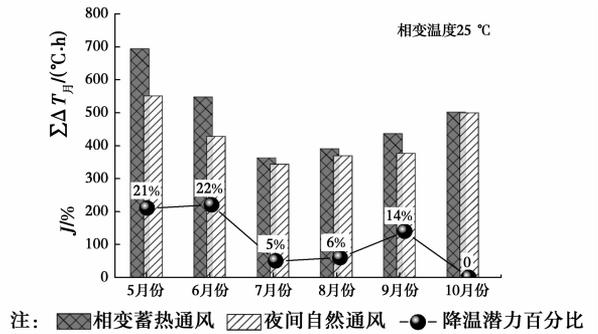
注: .....室外干球温度 相变温度25 °C —— 参考组  
—— 夜间自然通风 —— 相变蓄热通风

图 13 典型周室内空气温度

Fig. 13 Indoor air temperature of a typical week

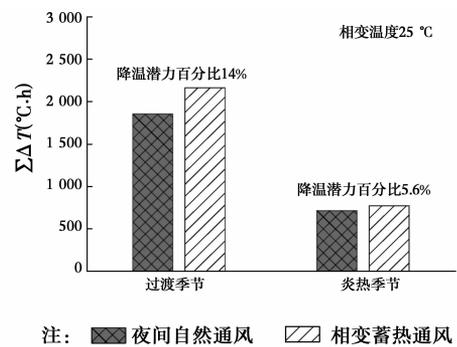
图 14 所示为相变蓄热通风技术和夜间自然通风技术 5 月份—10 月份每月日累计降温幅度之和  $\sum \Delta T_{月}$  的对比。与夜间自然通风技术相比,采用相变蓄热通风技术,5、6 月份日累计降温幅度之和  $\sum \Delta T_{月}$  均有显著提升,降温潜力百分比  $J$  能够达到 20% 左右,9 月份降温潜力百分比  $J$  达到 14%,7、8 月份  $\sum \Delta T_{月}$  降温潜力百分比  $J$  均只有 5% 左右,10 月份两种技术降温效果一样,降温潜力百分比  $J$  为 0,10 月份室外月平均温度为 15 °C,最高温度平均值也只有 20 °C,因此,相变温度为 25 °C 的相变材料在 10 月份整个时间段内几乎完全处于凝固状态。此时,相变材料等同于常规材料,已不能起到调节室内空气温度的作用,但从人体热舒适角度考虑,10 月份已不存在降温需求。图 15 为整个过渡季节降温幅度  $\sum \Delta T_{过渡}$  和整个炎热季节降温幅度  $\sum \Delta T_{炎热}$  的对比。过渡季节采用相变蓄热通风技术能够取得较好

的应用效果,整个过渡季节降温潜力百分比  $J$  能够达到 14%,而整个炎热季节该技术降温能力有限,降温潜力百分比  $J$  仅有 5.6%。



注: ▨ 相变蓄热通风 ▨ 夜间自然通风 ● 降温潜力百分比  
图 14 不同月份降温幅度  $\sum \Delta T_{月}$  对比

Fig. 14 Comparisons of  $\sum \Delta T_{月}$  in different months



注: ▨ 夜间自然通风 ▨ 相变蓄热通风  
图 15 过渡和炎热季节  $\sum \Delta T$  对比

Fig. 15 Comparisons of  $\sum \Delta T$  in transition and hot seasons

#### 4.4 相变蓄热通风房间室内热环境评价

通过降温幅度对相变蓄热通风技术在过渡季节和炎热季节的应用效果进行了分析,降温幅度只是从降温潜力的角度说明该技术的应用效果,对于自由运行房间,还应根据人体热舒适的需求分析该技术对室内热环境的改善情况。因此,采用 ASHRAE 55 标准热舒适模型<sup>[22]</sup>对过渡季节和炎热季节室内热环境进行评价。

如图 16 所示,参考组房间和夜间自然通风房间相比,过渡季节和炎热季节采用相变蓄热通风技术后,室内操作温度均有所下降,但过渡季节室内操作温度偏离热舒适范围较小,而炎热季节室内操作温度偏离热舒适范围较远。图 17(a)、(b)分别为过渡季节和炎热季节室内操作温度不满足人体热舒适温度范围的小时数。与参考组比较,夜间自然通风和相变蓄热通风两种技术均能改善过渡季节室内热环境,但相变蓄热通风技术优势更为明显,可使室内操作温度不满足 ASHRAE 55 标准的 80%,可接受温度范围的时间在夜间自然通风技术的基础上降低 8%,不满足标

准 90%可接受温度范围的时间降低 18%。而炎热季节相变蓄热通风技术与夜间自然通风技术相比,室内操作温度不满足 ASHRAE 55 标准的 80%和 90%,可接受温度范围的时间仅降低 1%,这主要由于炎热季节室外温度相对较高,已远远超出人体热舒适温度范围,采用该技术虽可使室内操作温度有所下降,但仍然无法达到人体热舒适温度范围。

### 5 结论

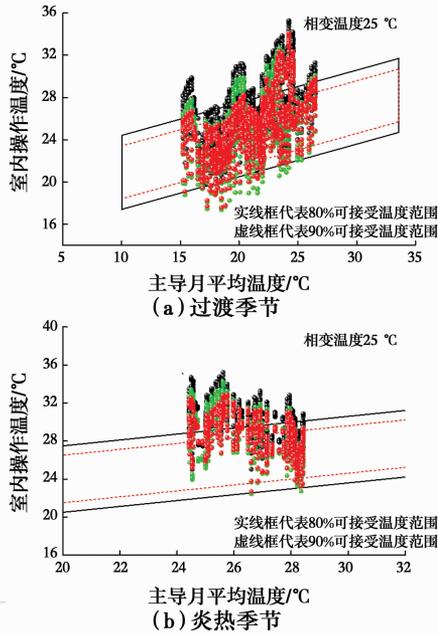
运用数值模拟的方法,比较分析了西安地区典型办公建筑相变蓄热通风技术在过渡季节和炎热季节的应用情况,得到以下结论:

1)与夜间自然通风技术相比,相变蓄热通风技术可使过渡季节的降温幅度  $\sum \Delta T_{过渡}$  提高 14%,炎热季节的降温幅度  $\sum \Delta T_{炎热}$  提高 5.6%。

2)与夜间自然通风技术相比,相变蓄热通风技术能够显著改善过渡季节室内热环境状况,可使室内操作温度不满足 ASHRAE 55 标准的 80%和 90%,可接受温度范围的时间分别降低 8%和 18%,而炎热季节室内操作温度不满足 ASHRAE 55 标准的 80%和 90%,可接受温度范围的时间均只能降低 1%,因此,炎热季节需考虑主动式降温技术。

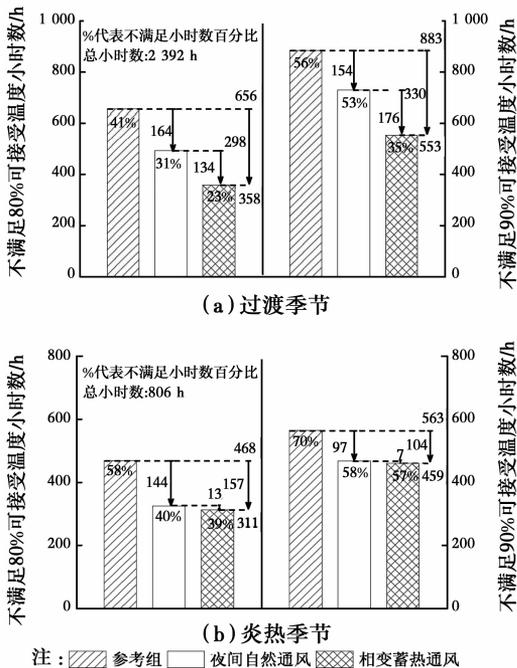
3)当室外干球温度最大值高于相变区间上限值 3℃,最低温度低于相变区间下限值 3℃,且日平均温度处于相变区间范围内时,相变蓄热通风技术能取得较好的应用效果。

4)相变蓄热通风技术更适合应用在过渡季节,炎热季节较高的室外气候条件不利于相变蓄热通风技术的应用,实际应用中相变温度的选择宜根据过渡季节室外气候条件进行设计。



注: ● 参考组 ● 夜间自然通风 ● 相变蓄热通风  
图 16 室内热舒适评价

Fig. 16 Thermal comfort evaluation



注: ▨ 参考组 □ 夜间自然通风 ▩ 相变蓄热通风  
图 17 室内热舒适不满足小时数

Fig. 17 Number of hours not meet thermal comfort during the occupancy period

### 参考文献:

[ 1 ] 民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.  
Code for thermal design of civil building:GB 50176-2016 [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2016. (in Chinese)

[ 2 ] SOUAYFANE F, FARDOUN F, BIWOLE P H. Phase Change Materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review[J]. Energy and Buildings, 2016, 129:396-431.

[ 3 ] 林坤平, 张寅平, 江亿. 夏季“空调”型相变墙热设计方法[J]. 太阳能学报, 2003, 24(2):145-151.  
LIN K P, ZHANG Y P, JIANG Y. Simulation and designing of PCM wallboard room combined with controlled night ventilation in summer[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(2):145-151. (in Chinese)

[ 4 ] 孔祥飞, 刘少宁, 钟俞良, 等. 相变蓄能墙多因素热特性分析及优化研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(8):40-46.  
KONG X F, LIU S N, ZHONG Y L, et al. Multivariate thermal performance analysis and optimization for phase change thermal storage wallboard[J]. Building Science, 2016, 32(8):40-46. (in Chinese)

- [5] 李百战, 庄春龙, 邓安仲, 等. 相变墙体与夜间通风改善轻质建筑室内热环境[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3):109-113.  
LI B Z, ZHUANG C L, DENG A Z, et al. Improvement of indoor thermal environment in light weight building combining phase change material wall and night ventilation [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental, 2009, 31(3):109-113. (in Chinese)
- [6] 白音夫, 徐龙, 廖星宇, 等. 相变材料与夜间自然通风改善帐篷室内热环境研究[J]. 制冷与空调, 2014(5): 556-559.  
BAI Y F, XU L, LIAO X Y, et al. Natural temperature control materials energy saver and natural ventilation in night to improve the tent thermal environment [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2014(5):556-559. (in Chinese)
- [7] 冯国会, 韩淑伊, 刘馨, 等. 相变墙房间夏季夜间通风效果实验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(4):693-697.  
FENG G H, HAN S Y, LIU X, et al. Experimental study on night ventilation effect in a phase change wall room in summer [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2013, 29(4):693-697. (in Chinese)
- [8] 崔娜, 谢静超, 刘加平, 等. 石膏基相变储能构件的数值模拟分析[J]. 化工学报, 2014, 65(Sup1):328-335.  
CUI N, XIE J C, LIU J P, et al. Numerical simulation analysis of gypsum-based phase change energy storage component [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2014, 65(Sup1):328-335. (in Chinese)
- [9] 张磊, 杨柳, 张璞. 高校宿舍楼夜间蓄热通风性能实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(5):749-753.  
ZHANG L, YANG L, ZHANG P, Experiment research on the regenerative night ventilation performance of university dormitory [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(5):749-753. (in Chinese)
- [10] 张璞. 夜间通风相变储能材料的适宜性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
ZHANG P. Suitability of phase change materials for night ventilation cooling technique [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] LIU Y, YANG L, HOU L Q, et al. A porous building approach for modelling flow and heat transfer around and inside an isolated building on night ventilation and thermal mass [J]. Energy, 2017, 141:1914-1927.
- [12] LIU J, LIU Y, YANG L, et al. Annual energy saving potential for integrated application of phase change envelopes and HVAC in Western China [J]. Procedia Engineering, 2017, 205:2470-2477.
- [13] 林坤平, 张寅平, 江亿. 中国不同气候地区夏季相变墙房间热性能模拟和评价[J]. 太阳能学报, 2003, 24(1): 46-52.  
LIN K P, ZHANG Y P, JIANG Y. Simulation and evaluation on the thermal performance of PCM wallboard rooms located in various climate regions of china in summer [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(1): 46-52. (in Chinese)
- [14] SAFFARI M, GRACIA A D, FERNÁNDEZ C, et al. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings [J]. Applied Energy, 2017, 202:420-434.
- [15] 杨柳, 乔宇豪, 刘衍, 等. 建筑相变蓄热及夜间通风技术研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63:629-640.  
YANG L, QIAO Y H, LIU Y, et al. Review of phase change heat storage and night ventilation technology of buildings [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63:629-40. (in Chinese)
- [16] MURUGANANTHAM K. Application of phase change material in buildings: field data vs EnergyPlus simulation[D]. Arizona State University, 2010.
- [17] The U. S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office. Energyplus [EB/OL]. 2018-01-10. <https://www.energyplus.net>.
- [18] EnergyPlus. EnergyPlus version 8.6 documentation; engineering reference [Z]. U. S. Department of Energy, 2016.
- [19] The U. S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office. Energyplus [EB/OL]. 2018-01-10. <https://www.energyplus.net/weather>.
- [20] 公共建筑节能设计标准:GB 50189—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Design standard for energy efficiency of public buildings: GB 50189-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [21] 建筑热环境测试方法标准:JGJ/T 347—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Standard of test methods for thermal environment of building:JGJ/T 347-2014[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [22] Thermal environmental conditions for human occupancy: ASHRAE Standard 55-2013; [S]. Atlanta: America Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc, 2013.