

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.05.002

# 相变材料在集装箱建筑夏季隔热中的性能研究

郭娟利<sup>a,b</sup>, 杨心悦<sup>c</sup>, 刘刚<sup>a,b</sup>, 徐贺<sup>c</sup>

(天津大学 a. 建筑学院; b. 天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室; c. 国际工程师学院, 天津 300072)

**摘要:**集装箱无蓄能围护结构箱体能耗和室内温度波动都较大,传统的围护结构设计方法无法将室内温度有效维持在舒适的温度区间内。将相变储能技术合理地应用于集装箱围护结构设计中能够大大提升其热工性能并有效地调整室内的温度波动。以微胶囊相变材料为例,通过利用 Design Builder 软件模拟分析法研究建筑内扰、相变层设计等影响参数对其调温性能的影响规律,分析相变材料在集装箱箱体复合围护结构中的适应性设计方法,可知集中在白天使用的集装箱建筑采用厚 30 mm、相变点为 29 °C 的相变复合墙体能够有效提高建筑夏季热舒适度,得出集装箱相变复合围护结构优化设计方法及对室内热舒适的影响规律,为相变材料在集装箱建筑中的设计应用及评价方法提供了理论支持。

**关键词:**集装箱建筑;相变墙体;舒适度评价;隔热性能

**中图分类号:** TU55+1.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2021)05-009-09

## Study on the performance of phase change materials in thermal insulation of container buildings in summer

GUO Juanli<sup>a,b</sup>, YANG Xinyue<sup>c</sup>, LIU Gang<sup>a,b</sup>, XU He<sup>c</sup>

(a. School of Architecture; b. Institute of Building Physics and Ecology; c. Tianjin International Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

**Abstract:** The energy consumption of the container that has no energy storage enclosure is large and its indoor temperature fluctuates greatly. The traditional enclosure design method cannot effectively maintain the indoor temperature in a comfortable temperature range. Application of phase change energy storage technology in the design of retaining structure of the container building can greatly improve its thermal performance and effectively adjust indoor temperature fluctuations. Taking the microcapsule phase change material as an example, the influence of parameters such as building internal disturbance and phase change layer design on temperature regulation performance was studied by using Design Builder software simulation analysis method. After analyzing the adaptive design method of phase change materials in the composite enclosure structure of container box, it is found that the phase change composite wall with 30 mm thick and phase change point of 29 °C can effectively improve the thermal comfort of the building in the summer. In addition, the optimal design method of phase change composite retaining structure and its influence on indoor thermal comfort are obtained. This study provides the theoretical support for the

**收稿日期:** 2020-11-02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51708394)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51708394).

**作者简介:** 郭娟利(1983—),女,副教授,博士,主要从事建筑技术研究,(E-mail)guojuanli@tju.edu.cn。

**通讯作者:** 刘刚,男,教授,(E-mail)lg@mike@163.com。

application of phase change materials in container building design and evaluation.

**Keywords:** container building; phase change (PCM) wall; comfort evaluation; thermal insulation performance

集装箱建筑结构坚固、灵活多变、用途广泛,在建造效率、经济性等方面有较大的潜力。据统计资料显示,中国生产的标准集装箱占世界产量的 95%,仅 2018 年上半年,我国金属集装箱产量达 5 748.3 万  $\text{m}^3$ ,累计增长 32.5%<sup>[1]</sup>。大多数集装箱建筑来源于废旧的货运集装箱箱体的拼接和改造,围护结构大多为单层铁皮加保温隔热材料(如,一定厚度的聚氨酯),围护结构保温隔热、隔声性能差,热惰性低,储热能力差,导致其受所在地域气候影响很大,造成建筑制冷采暖能耗高、室内温度波动大,远远不能满足人们正常的居住使用需求。

相变材料(phase change material)因其特有的物化性质,能够利用物质相变过程中的吸放热储存大量潜热,成为优于传统显热储能材料的物质,目前已有大量研究将相变材料用于建筑领域<sup>[2]</sup>,相变材料主要分为无机和有机 2 种。无机相变材料又称为无机水合盐,通常以  $(\text{M}_n\text{H}_2\text{O})$  表示。主要包括结晶水合盐、熔融盐等,利用晶型之间的转变来进行吸热或放热<sup>[3]</sup>。由于在使用过程中容易出现过冷和相分离,应用受到局限<sup>[4]</sup>。常用的有机相变材料包括石蜡相变材料、生物质相变材料等,化学性质稳定和很多材料兼容性高,目前已在较多领域实现工程应用。将相变材料与传统建筑围护结构复合进行合理应用,能够有效提高围护结构热工性能,降低建筑能耗,并通过储存释放室内能量这一过程调整室内热环境。相变材料与传统围护结构复合研究已成为目前建筑节能设计的热点之一。王源霞等<sup>[5]</sup>采用相变蓄能墙体,结合通风,测试结果表明,相变蓄能墙体的应用提高了围护结构蓄热性能,改善了室内温湿度环境。杨晟等<sup>[6]</sup>分析了复合相变混凝土墙体和普通混凝土墙体在受到相同热扰动时的温度分布及液相率变化曲线,研究了复合相变材料中石墨含量的百分比对导热性能的影响。杨晟等<sup>[7]</sup>制备并分析了泡沫石墨、石蜡复合相变储热材料的热性能,研究了将该复合材料用作墙体围护结构时的隔热和调温性能。Lee 等<sup>[8]</sup>提出将相变材料与绝缘材料混合在一起,以纤维素为载体材料将相变材料附着在墙体上,提高了既有建筑墙体的蓄热能力。研究表明,复合相变储热材料能够有效地利用昼夜温差进行储热放热,可明显降低室内温度波动和温度最大值,从而提高室内人体的舒适度,具有较好的调温隔热效果。Guarino 等<sup>[9]</sup>构建了多层 PCM 蓄热墙体并通过实验测试证明多层相变墙体具有更好的节能保温效果。

将 PCM 应用于建筑围护结构能够大大改善其热工性能。但含 PCM 的围护结构,PCM 物性参数对墙体热性能的影响规律相比于常物性材料墙体有很大的区别<sup>[10]</sup>,目前将相变材料应用于具有特殊外围护结构以及使用特性的集装箱建筑中研究很少。文中采用 Design Builder 模拟软件分析方法研究适用于集装箱办公建筑的相变材料复合墙体,得出集装箱建筑相变墙体设计方法及优化方案,并利用数据分析对比的方法对相变墙体的热工性能进行评估,为集装箱相变墙体设计提供思路指导。

## 1 集装箱建筑隔热性能

集装箱外围护结构大多为导热系数高的薄铁皮,在夏季吸收大量太阳辐射,围护结构设置相变材料后,这部分热量被相变材料所吸收,夜晚室外气温下降,相变材料在气温降低至相变温度后,材料状态改变,部分热量释放至室内,使夜间气温上升,不适用于夜间居住的建筑类型。因此,文中主要研究微胶囊石蜡相变材料在 20 尺 ICC 标准集装箱围护结构中的设计应用,建筑类型为办公室、教室、展览馆等集中在白天使用的公共建筑。微胶囊封装是指将相变材料包裹在微型胶囊结构中。Schossig 等<sup>[11]</sup>、尚建丽等<sup>[12]</sup>以石蜡作为相变材料用微胶囊封装,实验均证明微胶囊石蜡相变材料具有较好的蓄热能力和耐久性能,可在建筑物中使用。

### 1.1 模型建立和参数设置

Design Builder 是 Energyplus 公司开发的动态能耗模拟计算软件,操作界面具有可视化的优势,处理界面直观高效,生成的数据文件可以结合统计软件进行数据处理。文中选取 Design Builder 作为建筑能耗模拟软件。选取 20 ft 集装箱作为模拟的标准模型,围护结构均采用聚氨酯内保温,墙体保温厚度 60 mm,屋顶和地面保温厚度 80 mm,如图 1 所示。用于建筑领域的相变材料除相变形式、相变温度等要求,还需具有高储能、易封装、安全等性能,保证其与围护结构良好结合,避免出现漏液现象。模拟气象参数来自北京地区,气象文件选取清华大学《中国建筑热环境分析专用气象数据库》的 CSWD 格式气象文件<sup>[13]</sup>。

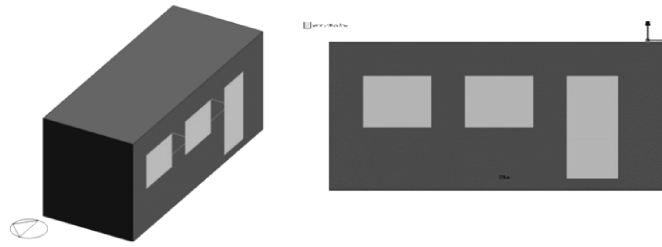


图 1 集装箱建筑几何模型轴测图与南立面正视图

Fig. 1 Container building geometric model isometric view and south elevation front view.

根据《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》<sup>[14]</sup>对围护结构构造的要求,设置围护结构材料热物性参数如表 1 所示。模拟完成后采用 Design Builder Results Viewer 进行数据可视化处理。

表 1 模拟围护结构材料热物性参数

Table 1 Thermal property parameter setting of building envelope.

项目	构造材料	导热系数/ ( $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ )	比热容/ ( $kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ )	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	厚度/ (mm)
集装箱 立面构造	轻质保护涂层	0.29	1	1250	5
	20%镍不锈钢	16	0.48	8000	2
	硬木板	0.08	2	600	10
选取保温 材料	EPS (聚苯乙烯)	0.04	1.4	15	60
	PUR (聚氨酯)	0.026	1.59	35	60
	相变材料	0.2	1.97	235	—
	混凝土	1.4	0.84	2100	—

### 1.2 建筑内扰对围护结构隔热性能的影响

相变墙体设计需要考虑内扰对隔热性能的影响,建筑内扰为除室外气候环境等外扰以外,能够提高建筑冷负荷、影响室内温度的因素,包括人体新陈代谢、设备散热等。综合考虑办公建筑常用设备能耗及人员密度,选取建筑内扰为  $10 W/m^2$  左右,同时选取  $20 W/m^2$ 、 $30 W/m^2$  作为对比工况,根据办公空间使用特点,人员和设备产生的热扰时间段设置为 8:00—18:00,模拟得到建筑内扰  $10 W/m^2$ 、 $20 W/m^2$ 、 $30 W/m^2$  时不同围护构造的室内温度波动情况,分别绘制曲线图,如图 2 所示。可以看出,在该温度范围内 PCM27、PCM35 无法进行能量储存与释放,其保温隔热性能与普通材料无太大差别。相变温度为  $29^\circ C$ 、 $31^\circ C$ 、 $33^\circ C$  时都表现出相变储能特性。相变温度为  $29^\circ C$  时,室内温度可控制在  $31^\circ C$  左右,调温效果最好。

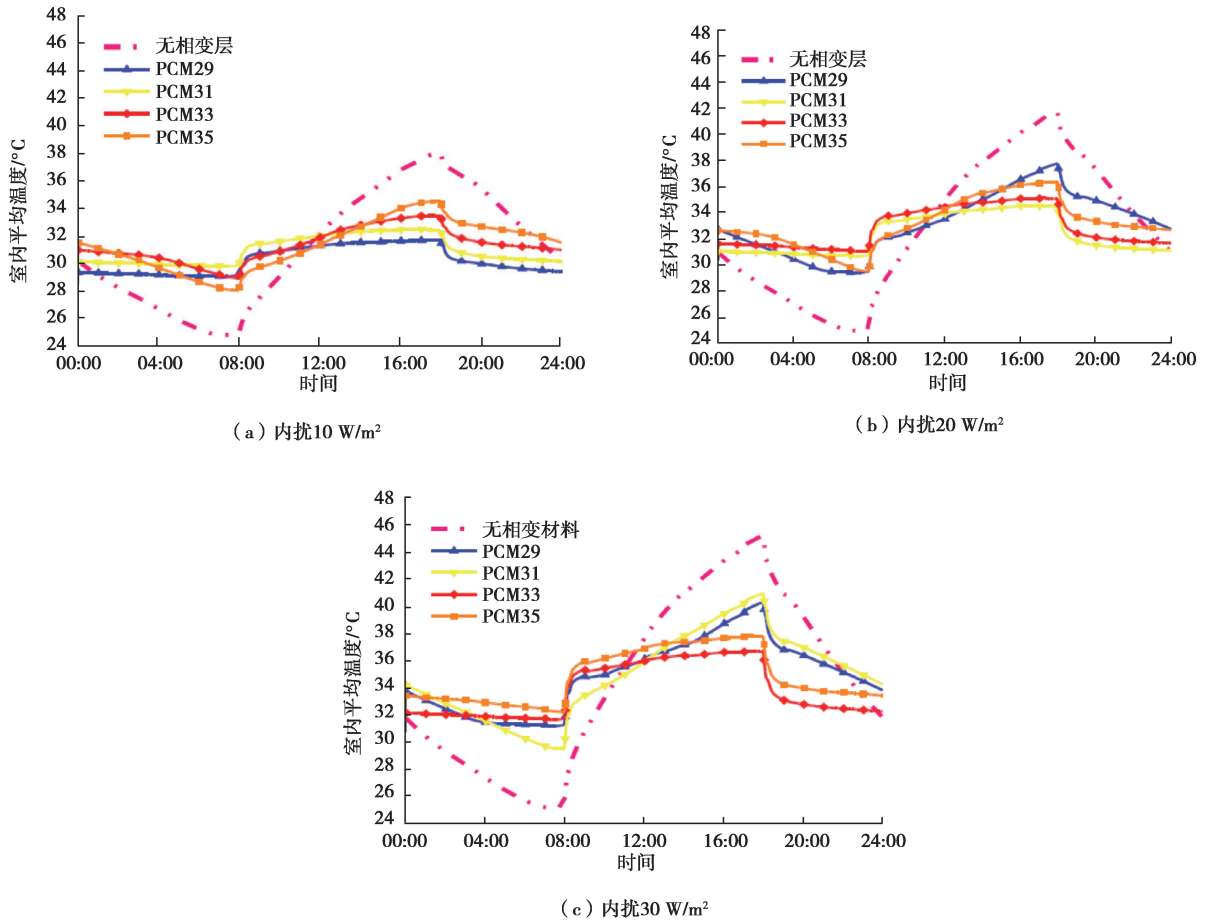
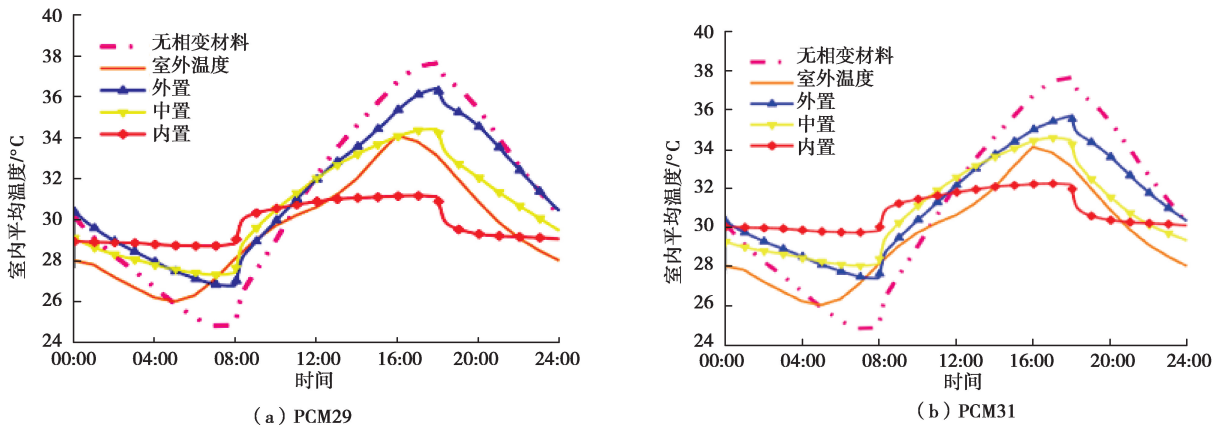


图 2 内扰为 10 W/m²、20 W/m²、30 W/m² 时不同墙体构造对应的室内平均温度

Fig. 2 The indoor average temperature corresponding to different wall structures with internal disturbance of 10 W/m², 20 W/m², 30 W/m²

### 1.3 相变层位置对隔热性能的影响

模拟 30 mm 厚相变材料相对于聚氨酯保温层的位置对围护结构整体隔热性能的影响。相变层位置设置为保温层内侧、中间和外侧。选取 3 种不同相变点的相变材料进行模拟(PCM29、PCM31、PCM33),模拟结果如图 3 所示,以 PCM29 为例,相变层内置能够将室内温差控制在 2 °C 左右,而中置和外侧只能将室内温差控制在 7 °C 左右,温度波动仍很大。由模拟结果可知,相变层设置于保温层的内侧室内温度波动最小,围护结构隔热性能最优。



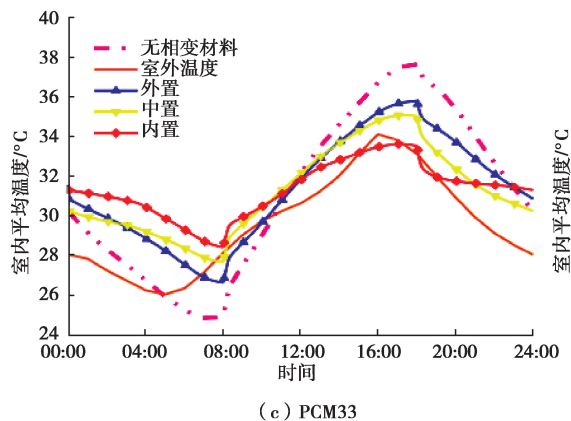


图 3 PCM29、PCM31、PCM33 下不同相变层相对位置对应的室内平均温度(°C)

Fig. 3 The indoor average temperature corresponding to the different relative position of PCM29(°C)

### 1.4 相变层厚度对隔热性能的影响

通过模拟不同相变层厚度下室内温度变化情况,分析厚度对相变墙热工性能的影响,并确定适用于集装箱建筑的最佳相变层厚度。选取无相变层和相变材料 PCM29 不同厚度(10、20、30、50、70、90 mm)进行模拟,得到不同相变层厚度下室内平均温度变化趋势,如图 4 所示。可以看出,相变层厚度为 10 mm 时,由于相变材料较少,在温度升高后全部融化,无法储存更多能量,室内平均温度在下午 14:00 后开始迅速升高。厚度为 20 mm 时,在下午 16:30 时室内温度也有上升的趋势。因此,对于大多 8:00—18:00 间使用的办公建筑来说,相变材料厚度需至少达到 30 mm 才能储存足够热量,使室温维持在一定范围内。当厚度大于 30 mm 后,对室内温度调节效果没有显著提升,材料厚度对隔热效果的影响变小,因此对于集装箱办公建筑来说 30 mm 厚的相变材料最合适。

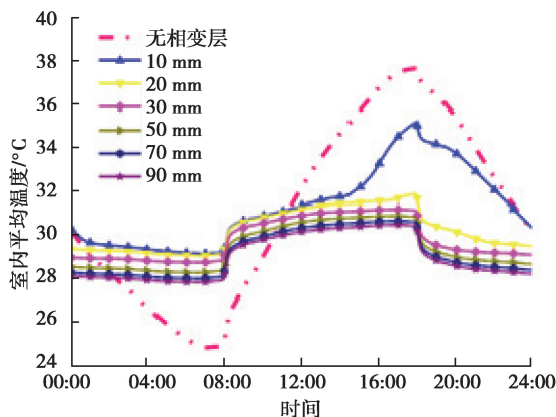


图 4 不同相变层厚度对应的室内平均温度(°C)

Fig. 4 Average indoor temperature corresponding to the thickness of different phase change layers(°C)

综上所述,将相变层布置在保温层内侧,可以更好地调控室内温度波动,提升集装箱建筑室内热舒适度。对于内扰为 10 W/m<sup>2</sup> 的集装箱办公建筑,相变材料复合围护结构最佳设计方案为 50 mmPUR+30 mm PCM29 的内保温。

## 2 集装箱相变复合围护结构设计因素优先性分析

采用 Design Builder 软件模拟,可知建筑内扰、相变材料的相变温度、位置以及厚度对相变墙体隔热性能有一定的影响。采用相关性矩阵研究不同影响因素与围护结构隔热效果的相关性及其权重,进而确定相变

墙体设计时需考虑的因素主次。汇总不同影响因子对应的室内日间最高温,使用 SPSS 软件汇总进行相关性分析,得到对应的相关性矩阵,如表 2 所示。

表 2 多因素相关性矩阵  
Table 2 Multi-factor correlation matrix





影响因素	室内热扰	相变温度	相变层位置	相变层厚度	最高温度
室内热扰	1.0	0.07	0.15	-0.012	0.78
相变温度	0.074	1.0	-0.13	-0.36	0.34
相关性 相变层位置	0.15	-0.13	1.0	0.39	-0.32
相变层厚度	-0.012	0.36	0.39	1.0	-0.20
最高温度	0.78	0.34	-0.32	-0.20	1.0

进一步分析相关性矩阵,根据相关性对不同影响因素进行排序,从大到小依次为建筑内扰、相变温度、相变层位置以及相变层厚度,对应的相关性数据为 0.78、0.34、-0.32 以及 -0.20,计算得到不同影响因素对围护结构隔热性能贡献率为 47%、21%、20%与 12%。相变层的设计应参照该贡献率,遵循该次序进行设计。

### 3 相变墙优化方案评价方法

根据《民用建筑热工设计规范》<sup>[15]</sup>,分析建筑室内表面温度、室内平均温度与过热度实数 IDCT,对比无保温材料、相同厚度 90 mmPUR 内保温、60 mmPUR+30 mm 混凝土以及 60 mmPUR+30 mmPCM 相变墙最优设计方案,对相变墙热工性能进行评估。不同墙体构造如表 3 所示。

表 3 不同墙体构造  
Table 3 Different wall structures

保温隔热层	无	90 mm		
		90 mmPUR	60 mmPUR 30 mmCON	60 mmPUR 30 mmPCM
构造截面				
厚度/m	0.012	0.107	0.107	0.107
传热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	4	0.265	0.379	0.361

#### 3.1 夏季房间内表面温度

规范要求夏季设计日内表面温度低于室外温度最高值,采用 Design Builder 模拟集装箱建筑在不同墙体构造时的夏季设计日东、西墙体和屋顶的内表面最高温度,并且根据室外最高温度计算围护结构内表面温差,相关数据如图 5 和图 6 所示。

从图 5、图 6 模拟计算结果可知,采用 90 mm 聚氨酯保温的墙体热惰性较差,内表面最高温度相对于 60 mm 聚氨酯保温构造仅降低 1℃ 左右。采用 30 mm 混凝土+60 mm 聚氨酯保温的围护结构内表面最高温度分别较无保温时降低 13.5%、14.4%、12.4%。采用 30 mmPCM29+60 mm 聚氨酯保温的墙体内表面最高温度分别较无保温时降低 19.3%、19.3%、15.2%,对比可知,采用相变层的墙体内表面温度降幅较大,并且相同厚度下,相变材料重量远比混凝土轻。

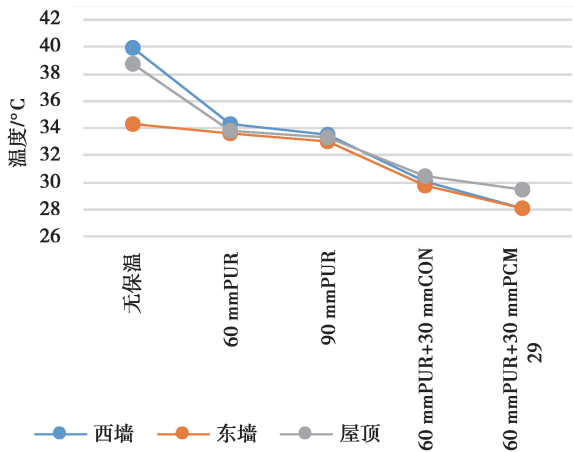


图 5 不同构造对应的最高内表面温度  
Fig. 5 Maximum internal surface temperature for different structure

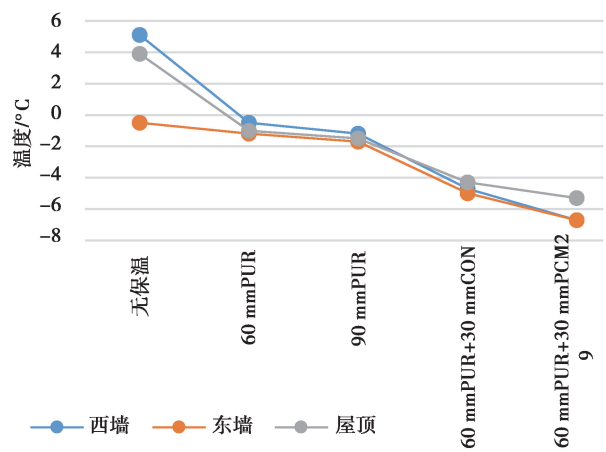


图 6 不同构造墙体内部表面与室外最高温度相对差值  
Fig. 6 Relative difference between maximum internal surface temperature and outdoor maximum temperature

### 3.2 夏季室内平均温度

墙体构造还对室内热环境有较大影响。分析不同墙体构造对夏季设计日室内温度的影响,计算温度数据绘制成曲线,如图 7 所示。

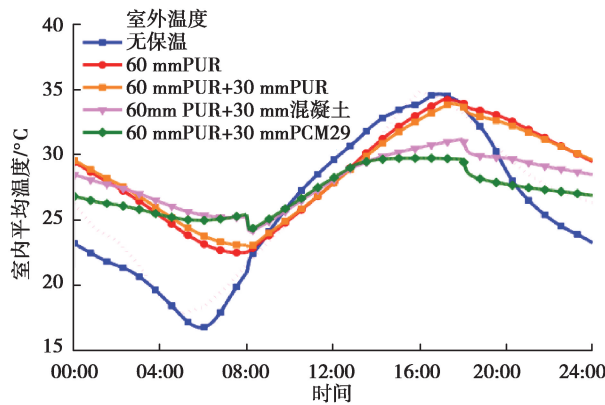


图 7 夏季设计日不同构造对应的室内平均温度(°C)  
Fig. 7 The average indoor temperature corresponding to different structures on the summer design day(°C)

计算使用 30 mm 厚、相变温度 29 °C 的相变材料室内平均温度可以维持在 27 °C 左右,与同等厚度聚氨酯内保温墙体和混凝土构造相比分别降低 1.4 °C、1.3 °C。进一步研究发现,采用 30 mm 和 PCM29 相变层的墙体构造的围护结构温度调控效果与 130 mm 混凝土墙体构造近似,重量仅为 130 mm 混凝土的 1/40,可提高室内的有效使用面积。

### 3.3 过热度时数

累计日室内温度不舒适度  $I_{DCT}$  是室内平均温度与室内平均综合温度超出舒适度阈值部分对时间的积分,采用的参数是室内空气温度和恒定的温度阈值<sup>[16]</sup>。用  $I_{DCT}$  能够直观比较不同围护结构下建筑的热舒适以及围护结构隔热性能。

$$I_{DCT} = \int (T_{in} - T_{out}) d\tau, (t_{in} > t_a), \tag{1}$$

$$I_{DC} = \int (T_z - T_{out}) d\tau, (t_z > t_a), \tag{2}$$

式中:  $t_d$  为人体热舒适度上限, 计算选取  $t_d$  为  $28\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_z$  为室内综合温度,  $^\circ\text{C}$ , 用于评价人体热感觉;  $t_{in}$  为室内干球温度,  $^\circ\text{C}$ 。

图 8 显示, 相对于无保温构造, 使用 PUR 层保温构造墙体对应的夏季隔热效果并不理想, 虽然过热平均温度降低, 过热度变化不大。而相变墙体  $I_{DCT}$  降低 55%, 大大提升了被动式集装箱建筑的室内热舒适度, 改善了集装箱建筑围护结构的夏季隔热效果。

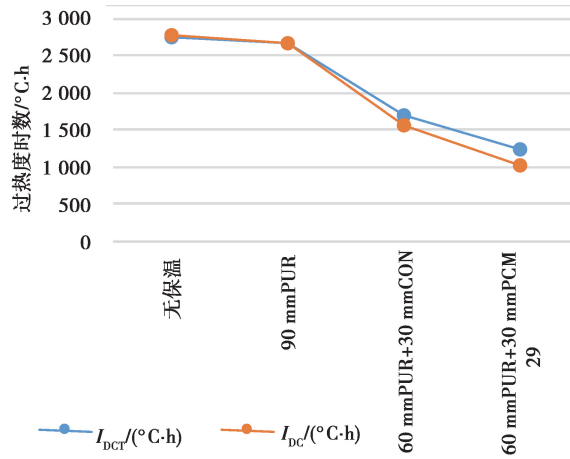


图 8 不同墙体构造过热度时数

Fig. 8 Overheating hours of different wall structures

### 3.4 重量和造价

计算采用相变材料的墙体构造密度为混凝土密度的 1/10, 在提高墙体隔热效果的同时大大降低了建筑整体重量, 满足了集装箱建筑对强度和移动性的要求。因而对于集装箱建筑夏季隔热效果的改善, 相变材料均显著优于传统保温材料与混凝土, 是解决集装箱办公建筑围护结构夏季隔热问题的理想构造。此外, 不考虑生产施工造价, 60 mm 聚氨酯 + 30 mm 相变材料复合墙体价格在 120 元/ $\text{m}^2$  左右, 保温效果相似的 130 mm 混凝土价格为 36.4 元/ $\text{m}^2$ 。

## 4 结 论

通过模拟分析发现, 仅使用聚氨酯保温材料, 集装箱建筑墙体热惰性差, 过热时长增加。相变材料是解决集装箱办公建筑夏季隔热的理想隔热材料。通过合理设计相变材料复合传统围护结构, 可达到更优的室内被动式调温效果, 不仅降低了室内平均温度, 同时也大大减少过热时长。研究成果为废旧集装箱改造用于办公建筑提供了理论基础和技术支持。

### 参考文献:

- [1] 博思数据研究中心. 2018—2023 年中国金属集装箱市场分析与投资前景研究报告[M]. 北京: 博思数据研究中心, 2018.  
Booz Data Research Center. 2018—2023 China metal container market analysis and investment prospects research report[M]. Beijing: Booz Data Research Center, 2018. (in Chinese)
- [2] 倪海洋, 朱孝钦, 胡劲, 等. 相变材料在建筑节能中的研究及应用[J]. 材料导报, 2014, 28(21): 100-104.  
Ni H Y, Zhu X Q, Hu J, et al. Research and applications of phase change materials on energy saving in buildings[J]. Materials Review, 2014, 28(21): 100-104. (in Chinese)
- [3] 黄香. 有机复合相变储能传热材料合成及特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.  
Huang X. Synthesis and characteristics of organic composite phase change materials for thermal energy storage with enhanced heat transfer[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. (in Chinese)
- [4] 纪旭阳, 金兆国, 梁福鑫. 相变材料在建筑节能中的应用[J]. 功能高分子学报, 2019, 32(5): 541-549.  
Ji X Y, Jin Z G, Liang F X. Application of phase change materials in building energy conservation[J]. Journal of Functional Polymers, 2019, 32(5): 541-549. (in Chinese)



- [5] 王源霞. 太阳能通风结合相变墙体在夏热冬暖地区的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
Wang Y X. Adaptation of solar ventilation combined with phase change wallboard in hot summer and warm winter region[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] 杨颖, 张盼. 建筑用新型复合相变材料储能过程的热性能研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(1): 120-122, 125.  
Yang Y, Zhang P. Thermal performance study on energy storage of new composite phase change materials used in building envelope[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(1): 120-122, 125. (in Chinese)
- [7] 杨晟, 许勇铁, 由英来. 泡沫石墨/石蜡复合相变储热材料的调温隔热性能[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(4): 547-550.  
Yang S, Xu Y T, You Y L. Thermal insulation and control performance of phase change heat storage graphite foam-paraffin composite[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2012, 30(4): 547-550. (in Chinese)
- [8] Lee K O, Medina M A, Sun X Q, et al. Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls[J]. Solar Energy, 2018, 163: 113-121.
- [9] Guarino F, Athienitis A, Cellura M, et al. PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solarium in cold climates[J]. Applied Energy, 2017, 185(1): 95-106.
- [10] 张源, 戴晓丽. 相变温度对相变蓄能墙体热性能影响特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 671-677.  
Zhang Y, Dai X L. Influencing characteristics of phase change temperature on thermal performance of phase change energy storage wall[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2018, 39(6): 671-677. (in Chinese)
- [11] Schossig P, Henning H M, Gschwander S, et al. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005, 89(2/3): 297-306.
- [12] 尚建丽, 李乔明, 王争军. 微胶囊相变储能石膏基建筑材料制备及性能研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(12): 2140-2144.  
Shang J L, Li Q M, Wang Z J. Performance tests of microencapsulated gypsum-based phase change building material[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(12): 2140-2144. (in Chinese)
- [13] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 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.  
Climatic Data Center, National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration; Department of Building Technology and Science, Tsinghua University. Special meteorological data set for thermal environment analysis of buildings in China[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准 JGJ 26—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for energy efficiency of residential buildings in severe cold and cold zones. JGJ 26—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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, 2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil building. GB 50176—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [16] 宋媛, 于航, 唐寅, 等. 建筑用相变材料热性能测试与评价综述[J]. 暖通空调, 2019, 49(4): 56-64.  
Song Y, Yu H, Tang Y, et al. Review of thermal performance testing and evaluation for phase change materials applied to buildings[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2019, 49(4): 56-64. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)