

文章编号:1671-6833(2021)04-0105-06

定形相变板材制备及相变墙体热工性能研究

刘瑞丽,高琼旻,马 静,王 薇

(河南工业大学 土木工程学院(建筑学院筹),河南 郑州 450001)

摘 要:实验制备了高性能定形相变板材,相变潜热高达 152.1 J/g,在 110℃ 高温下能保持固体形态无泄露。基于该板材热物性参数,搭建了装配式相变墙体模型,利用 ANSYS 软件模拟研究该墙体在某地区高温夏季的传热特性,对比该相变墙体与传统墙体内侧壁温变化和传热热负荷,结果表明:24 h 传热周期内相变板材可降低约 40% 的传热负荷;结合墙体的热阻、蓄热系数、热惰性指标等参数分析,发现相变板材可将墙体热阻、热惰性指标分别提升了 4.05%、16.7%;从空调耗电角度进行经济性评价,该墙体在一个制冷季节能为单户居民节约空调用电约为 31.32 元。

关键词:定形相变板材;装配式储能墙体;热工特性;建筑节能

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2021.04.016

0 引言

中国是世界能源消费大国,其中建筑能耗占全国总能耗的 30% 以上。2017 年全国总建筑面积已高达 630 亿平方米,非节能建筑占比达 99%^[1]。因此,大力发展建筑节能技术,尤其是对已有高能耗建筑进行升级改造,显得至关重要。

建筑围护结构的热工参数是建筑能耗的关键影响参数。现有的节能方式是在基层围护结构上增设保温隔热层,如轻质多孔材料、聚苯颗粒混合物砂浆等^[2],这些材料密度小、导热系数低,在一定程度上能增加墙体传热热阻,但其蓄热性能的提升仍难以满足节能要求^[3]。在温度不变或变化较小的情况下,相变材料能够通过相态变化吸收并暂存大量热量。将相变材料应用于建筑围护结构中,通过潜热的吸收或释放,可以改变墙体的传热特性,增加热惰性,降低建筑制冷或供暖负荷,因此,相变蓄能技术与建筑围护结构相结合是实现建筑节能的有效途径。涂航等^[4]将宏观封装的相变材料颗粒与混凝土混合,制备出储能墙体,降低了室内温度波动和冷热负荷。陈潇因等^[5]对比了相变墙体与普通墙体的传热性能,结果表明,石蜡类相变墙体蓄热能力更优,室内温度

波动幅值可控制在 ± 2.5 ℃。刘朋等^[6-7]模拟研究了相变墙体的温度衰减倍数、延迟时间等指标,结果表明,相变材料的加入有效提高了室内环境舒适性。上述研究已证实相变储能墙体可有效改善围护结构热工性能,从而降低建筑能源消耗。

但是,目前相变材料在建筑围护结构中并没有得到广泛应用,主要是因为相变材料面临易泄露、热导率低、热工参数不匹配、与建材混合技术不成熟等问题^[8]。在蓄热过程中相变材料转化为液态时,会发生流动和泄露。在建筑墙体中,现有相变材料的封装技术包括相变微胶囊、表皮物理封装等,技术成本较为复杂,工程应用较难推广。低热导率易引起相变材料潜热容利用效率低,难以发挥节能优势。现有热导提升技术多采用添加石墨法,效果有限^[9]。要发挥相变建筑最佳节能效果,需根据气候特点、房屋功能选取适宜的相变温度、潜热等热物性参数。相变材料与建筑材料的组合形式直接决定了相变储能建筑技术的可行性。现有相变墙体的搭建一般采用封装相变材料颗粒与建筑材料混合,如刘朋^[6]将砂浆混合相变材料构成节能型墙体抹灰层。田国华^[10]以石蜡基相变陶粒与砂浆按比例配合制备出相变储能砂浆。Pomianowski 等^[11]将微胶囊封装的石

收稿日期:2021-03-05;修订日期:2021-05-23

基金项目:河南工业大学科学研究基金(2018XTCX01);西部绿色建筑国家重点实验室开放研究基金(LSKF202113);河南省住房和城乡建设科技计划项目(HNJS-2020-K03)

通信作者:马静(1976—),女,河南郑州人,河南工业大学教授,博士,主要从事建筑设计及其理论、城市设计与绿色建筑研究,E-mail:1205243570@qq.com。

蜡加入混凝土制备出相变混凝土。为保证力学强度,上述混合式相变墙体须控制相变材料含量,因而导致此类墙体相变潜热容较低,节能效果有限,并且较难应用于已有高能耗建筑的节能改造。制备相变板材,将其作为独立层嵌入到围护结构的内部空隙或外层表面,构成装配式相变墙体^[12],可简化储能墙体的搭建工艺,能够解决高能耗建筑节能改造的技术难题^[13]。此类嵌入式相变墙体热工特性的研究多采用软件模拟,但高性能相变板材的成本较高,导致工程应用推广受限。针对上述问题,以某地高能耗建筑改造为背景,首先研究封装性能好、热导率高、相变潜热高的建筑板材的制备,基于该相变板材的热物性参数搭建相变墙体的传热模型,利用 ANSYS 软件模拟研究其传热特性,分析建筑热工参数和节能效果。

1 定形相变板材制备及热物性

1.1 定形相变板材制备

基于某地区夏季气温变化特性,本文选用高潜热工业级石蜡(相变点为 26.2 ℃,相变潜热为 201.6 J/g)为相变主体,高密度聚乙烯作为支撑材料,采用高温熔融融合法,设计出板材成形模具,制备定形相变板材。其中石蜡与高密度聚乙烯按照质量比为 4:1 进行混合。结合文献[14]中复合相变材料的热导提升技术,选用 3%(石蜡和高密度聚乙烯总质量的占比)的膨胀石墨作为导热增强剂添加至相变熔融混合液中。制备流程如图 1 所示。制备出的定形相变板材如图 2 所示。

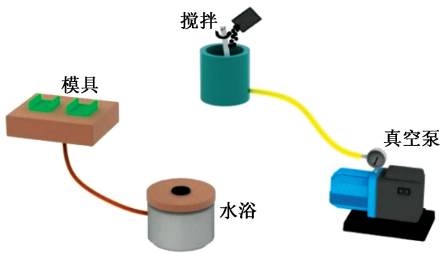


图 1 定形相变板材的制备过程

Figure 1 Preparation process of shaped PCMB



图 2 定形相变板材

Figure 2 Shaped PCMB

1.2 定形相变板材热物性表征

采用差式扫描量热仪(DSC)测试相变板材相变温度和潜热。安特热物性测量仪(Quikline TM30)测量热导率。嵌入式(尤其是外贴式)相变墙体需确保相变板材具有高度封装性、相态转变时无泄漏。因此,本文采用恒温加热-称重法测量封装性能。

1.3 热物性测量结果

相变参数测量结果如图 3 所示。由图 3 可知,制备的相变板材相变温度与石蜡相变基体保持一致,为 26.2 ℃,相变潜热较高为 152.1 J/g。相变板材的热物性测量结果如表 1 所示。由表 1 可知,相变板材热导率为 1.66 W/(m·K),约为热导强化前的 5 倍。封装性能测试结果如图 4 所示,该定形相变板材在发生相态变化时宏观上仍能保持固体形态,并且重量无变化,持续加热至 110 ℃时仍能保持原始形状,直至高温 120 ℃才呈现出液态。由此可知,该相变板材具有优良的热物性参数和高度封装性能,可应用于高温夏季。

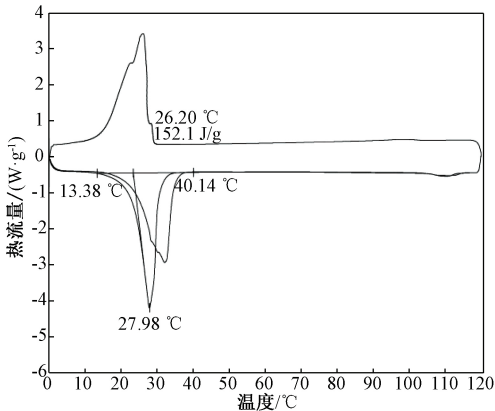


图 3 相变板材 DSC 测量曲线

Figure 3 DSC measurement curves of PCMB

表 1 相变板材热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of PCMB

密度/ (kg·m ⁻³)	相变温度/ ℃	相变潜热/ (kJ·kg ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
795	26.2	152.1	1.66

2 定形相变墙体热工特性分析

2.1 定形相变墙体模型

2.1.1 物理模型

现有建筑多采用砖混-水泥抹灰砂浆结构,为便于其建筑节能改造技术的实施,定形相变板材直接装配于墙体外侧,构建装配式储能墙体模型,不加相变板材的普通墙体作为对照模型。基于定形相变板材实测物性参数建立传热模型,如图 5

所示,各层材料厚度及热导率如表 2 所示。外界环境温度从当地气象站获取,以 2020 年年度最高温度所在周为例,选取 6 月 3 日 0 时到 6 月 6 日 0 时的考虑太阳辐射的综合空气温度作为计算用室外环境温度。

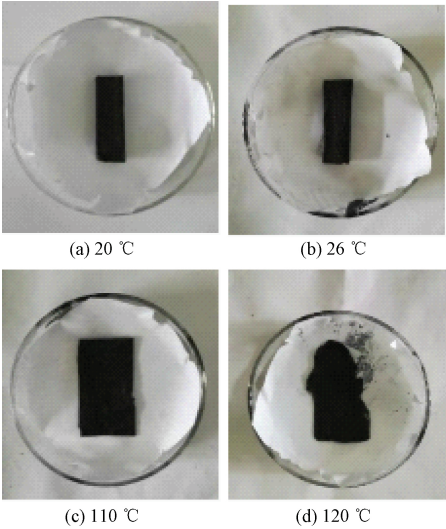


图 4 定形相变板材试样形态随温度变化

Figure 4 Shaped PCMB morphology changing with temperature

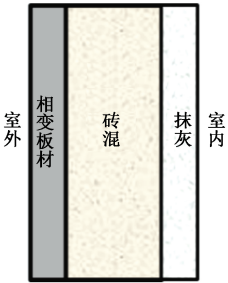


图 5 装配式定形相变墙体结构示意图

Figure 5 Prefabricated phase-change wall structure

表 2 相变墙体各层厚度及热导率

Table 2 Thickness and heat conductivity of PCM wall

墙体层	厚度/cm	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
相变板材	3	1.68
砖混	24	0.58
抹灰	3	0.93

2.1.2 数学模型及边界条件

假定室外各处的空气瞬时、均匀一致地发生变化,即将外界空气作为一个整体来考虑。本文采用显热容法对墙体结构建立热传递平衡方程的数学模型。

砖混/抹灰层导热方程为

$$\rho_1 c_2 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \tag{1}$$

式中: λ_1 、 ρ_1 、 c_2 分别为砖混/抹灰层的导热系数、

密度、比热容; τ 为时间; t 为温度。

相变层导热方程为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \dot{q} \tag{2}$$

式中: a 为相变层的热扩散系数, $a = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2}$, 其中 λ_2 、 ρ_2 、 c_2 分别为相变的传热量系数、密度、比热容; \dot{q} 为相变过程的吸热量。

墙体外侧表面边界条件:

$$-\lambda_2 \frac{\partial t}{\partial x} = h_{out}(t_{out} - t) \tag{3}$$

墙体内侧表面边界条件:

$$-\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} = h_{in}(t_{in} - t) \tag{4}$$

式中: h_{out} 为墙体外表面对流换热系数; t_{out} 为墙外温度; h_{in} 为墙体内部面对流换热系数; t_{in} 为墙内空气温度。

绝热边界:

$$\frac{\partial t}{\partial y} = 0, y = 0 \text{ mm}; \tag{5}$$

$$\frac{\partial t}{\partial y} = 0, y = 1\,000 \text{ mm} \tag{6}$$

初始条件:

$$t = t_0, 0 \text{ mm} \leq x \leq 300 \text{ mm}, \tau = 0 \text{ s}; \tag{7}$$

$$t_{in} = t_0, \tau = 0 \text{ s} \tag{8}$$

室内空气温度设定为恒温 25 °C,室内外壁面与空气自然对流系数 h_{out} 、 h_{in} 分别采用文献[3]数据 17.5 W/(m²·K)、5 W/(m²·K)。利用 ANSYS 软件模拟计算该储能墙体传热过程。

2.2 定形相变墙体热工特性

2.2.1 传热效果

该装配式相变墙体与普通墙体的网格划分如图 6 所示,墙体第 72 h 的温度云图如图 7 所示,内壁温度随室外空气温度的变化关系如图 8 所示。由图 8 可知,随室外温度波动,墙体内部壁面温度均发生波动,但相变墙体的温度波动较普通墙体滞后,如图 7 所示,同在第 72 h,相变墙体高温区主要集中在墙体外部区域,而普通墙体高温区已传递至墙体中间部位。图 8 中相变墙体在温度达到相变点 26.2 °C 时,温升速率开始降低,表明相变墙体的热惰性高于普通墙体,并且相变潜热在温升过程中发挥作用。同时,相变墙体内部壁面温度波动幅度明显低于普通墙体,在 48~72 h 内相变墙体波动幅值约为 0.8 °C,而普通墙体约为 1.5 °C,表明相变板材提升了墙体

的调温性能。

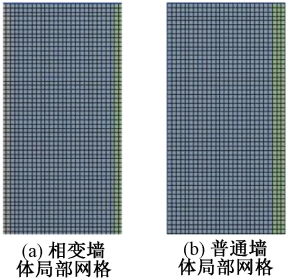


图 6 墙体局部网格

Figure 6 Mesh of local wall

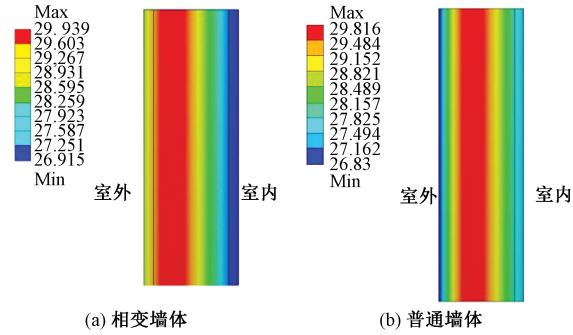


图 7 墙体 72 h 温度云图 (°C)

Figure 7 Temperature nephogram of wall at 72 h (°C)

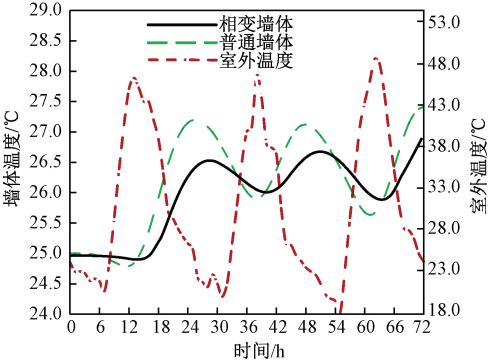


图 8 相变墙体与普通墙体随室外温度变化的关系

Figure 8 Relationship between phase-change wall and ordinary wall with outdoor air temperature

通过墙体向室内的传热量为空调热负荷的重要组成部分。分别计算两类墙体在 72 h 内向室内的传热量,结果如图 9 所示。由图 9 可知,在不同的传热周期内,加入相变板材层的墙体向室内传递的热负荷较低。在第 24、48、72 h 时,两类墙体累计传热量对比如图 10 所示。可以发现,初始 24 h 内相变墙体的传热量由 10.76 W/m² 降至 6.37 W/m²,降低了约 40%,表明相变墙体具有优良的隔热性能。

2.2.2 热工参数

热阻 R 、蓄热系数 S_{24} 、热惰性指标 D 等是衡量墙体传热特性的关键参数。基于墙体各层材料的物性参数,结合模拟结果,采用 GB/T50504《民

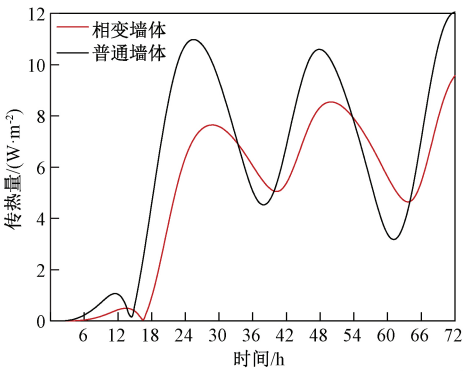


图 9 相变墙体与普通墙体向室内的传热量

Figure 9 Heat transfer of phase-change wall compared with ordinary wall

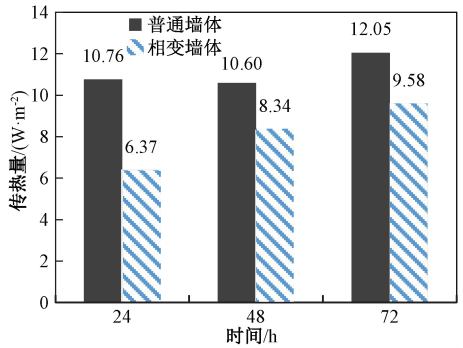


图 10 相变墙体与普通墙体 24、48、72 h 累计传热量

Figure 10 Heat transfer of phase-change wall compared with ordinary wall at 24 h, 48 h and 72 h

用建筑设计术语标准》^[15]中的公式进行计算。

$$R_i = \frac{1}{k_i} = \frac{\delta_i}{\lambda_i}; \tag{9}$$

$$S_{24} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c\rho}{Z}} = 0.51\sqrt{\lambda c\rho}; \tag{10}$$

$$D = \sum D_i = \sum R_i \cdot S_{24}。 \tag{11}$$

式中: i 为第 i 层材料; λ 为热导率; δ 为材料层的厚度; ρ 为密度; Z 为传热时长; c 为材料比热容。其中,相变材料在相变区间的比热容采用等效热容法计算,即将相变潜热折算成显热热容形式,为 $C_p + \delta(T)\Delta H$,采用式(12)所示的高斯分布曲线进行拟合。

$$\delta(T) = \frac{\exp(-(T - T_m)^2/(\Delta T)^2)}{\Delta T\sqrt{\pi}} = N\left(T_m, \frac{\Delta T}{\sqrt{2}}\right)。 \tag{12}$$

式中: T 为温度; T_m 为相变温度; $2\Delta T$ 为相变温度区间。

相变墙体热工参数的计算结果如表 3 所示。由表 3 可知,虽然相变板材自身热导率最高,但由于厚度的原因,相变板材的加入将墙体总热阻提升了约 4.0%。蓄热系数反映了谐波作用下材料

表面温度波动速率,由计算可知,相变板材的蓄热系数为 $34.12\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,明显高于砖混和抹灰层,表明相变板材的加入能提升总墙体的蓄热能力,降低墙体温度随环境温度的响应速率。总墙体的热惰性指标为 42.51,较普通墙体提升了 16.7%,表明相变板材的加入能够强化环境周期性温度波在墙体内部温度的衰减程度,提升墙体的热稳定性。

表 3 相变墙体热工参数

Table 3 Thermal parameters of PCM wall			
墙体层	热阻 ($\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$	蓄热系数 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	热惰性 指标
相变层	0.017 85	34.12	6.09
砖混	0.414 00	7.92	32.77
砂浆抹灰	0.032 20	11.31	3.64
总墙体	0.463 10		42.51

2.2.3 经济性评价

以单户 100 m^2 居民住宅在初始 24 h 墙体的传热量为例,层高取 2.7 m,单一房间外墙宽取 3 m,参考 GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》^[16],窗墙比取 0.35,则单户外墙总面积约为 36 m^2 。由上述 ANSYS 计算结果可知,相变墙体单位面积可降低热负荷约 4.39 W,则单户 1 h 可节约能耗约 158.04 W。考虑到居民住宅多采用家用空调器调节室内温度,根据空调市场调研报告,三级能效占比最高。假定居民用户空调能效约为 3.2,根据国标 GB 21455—2019《房间空气调节器能效限定值及能效等级》^[17],制冷季节空调制冷运行时长约为 1 366 h,按照居民用电每度 0.56 元,则整个制冷季节相变墙体可为单户节约空调耗电费用约为 31.32 元,表明相变板材有利于降低建筑使用能耗。

3 结论

实验研制获得了可装配式安装的高性能定形相变板材,相变潜热高,热导率得到大幅提升,封装性能好。基于该板材热物性参数,模拟研究相变储能墙体的传热特性,发现相变板材的加入可降低墙体内壁面温度波动幅度,削弱外界环境温度对室内温度的影响;可将围护结构热负荷降低约 40%;相变墙体热惰性指标提升了 16.7%,可有效改善墙体的热稳定性;从空调耗电角度分析节能效果,在整个制冷季节可为单户节约空调耗电费用约为 31.32 元。

参考文献:

[1] 刘晓燕,孙睿忆,赵海谦,等.严寒地区单体建筑太阳能-相变墙系统蓄热特性研究[J].热科学与技术,2020,19(5):436-443.

[2] 王新玲,余兴华,李娜.复合结构住宅轻质墙体的节能研究[J].郑州大学学报(工学版),2008,29(1):70-73.

[3] 邓燕.复合相变材料制备及建筑隔热性能研究[D].广州:广州大学,2019.

[4] 涂航,张航,刘丽辉,等.相变混凝土墙体的传热性能研究[J].储能科学与技术,2021,10(1):287-294.

[5] 陈满茵,方廷勇,胡浩威,等.不同蓄热墙体材料的吸放热特性模拟研究[J].安徽建筑,2019,26(11):193-196.

[6] 刘朋.相变储能建筑墙体热工性能及适用性评价研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.

[7] 刘朋,缪正坤,黄建恩,等.相变材料改善夏季墙体传热特性数值模拟研究[J].价值工程,2019,38(6):141-143.

[8] 夏利江,刘启一,叶东,等.相变粉煤灰多孔砖墙体热工性能数值研究[J].粉煤灰综合利用,2018,31(6):91-93.

[9] CHENG W L,LI W W,NIAN Y L,et al.Study of thermal conductive enhancement mechanism and selection criteria of carbon-additive for composite phase change materials[J].International journal of heat and mass transfer,2018,116:507-511.

[10] 田国华.相变储能建筑墙体传热特性及能耗影响研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.

[11] POMIANOWSKI M,HEISELBERG P,JENSEN R L,et al.A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM[J].Cement and concrete research,2014,55:22-34.

[12] 孙婉纯,冯锦新,张正国,等.相变储热技术用于被动式建筑节能的研究进展[J].化工进展,2020,39(5):1824-1834.

[13] 柴国荣.外贴式相变墙体节能效果分析[J].砖瓦,2015(1):9-12.

[14] LI W W,CHENG W L,XIE B,et al.Thermal sensitive flexible phase change materials with high thermal conductivity for thermal energy storage[J].Energy conversion and management,2017,149:1-12.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.民用建筑设计术语标准:GB/T 50504—2009[S].北京:中国计划出版社,2009.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国

国国家质量监督检验检疫总局.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.

[17] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.房间空气调节器能效限定值及能效等级:GB 21455—2019[S].北京:中国标准出版社,2020.

Study on Preparation of Shaped Phase Change Sheet and Thermal Performance of Phase Change Wall

LIU Ruili, GAO Qiongmin, MA Jing, WANG Wei

(School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Shape stabilized phase change materials board (PCMB) with high performance was prepared. Based on the tested thermal physical parameters of PCMB, phase change wall model was set up. Simulation analysis on the wall heat transfer characteristics in summer in Zhengzhou region was conducted by ANSYS software. Variation of indoor wall temperature and heat load in PCMB were compared with those of traditional wall. The wall thermal resistance, heat storage coefficient, thermal inertia index were analyzed. The results showed that the phase-change plate could significantly improve the thermal insulation performance of the wall, reduce the fluctuation of indoor temperature. Besides, the energy consumption analysis showed that the wall could save electricity for air conditioning.

Key words: shape stabilized phase change materials board; prefabricated energy storage wall; thermal performance; building energy saving

(上接第 104 页)

Research on Early-warning Method for Super High-rise Building Construction Considering Coupling Effect of Risk Factors

SHEN Yang¹, XU Lei¹, ZHENG Guanyu², ZHANG Chao¹, KUANG Zhiping³

(1.Shanghai Construction No. 1 Group Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 2.Shanghai Construction No. 7 Group Co., Ltd., Shanghai 200050, China; 3.Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200082, China)

Abstract: This paper focused on the early construction risk warning issue in the construction of super high-rise building, the potential failure of the system was studied according to the general state and radical state. Taking the load-bearing components of integral steel platform equipment as the key risk link, a construction risk early warning index system and method for super high-rise building were proposed. Firstly, based on the analysis of accident evolution path and failure mode considering the coupling effect of risk factors, the core indexes were proposed, combined with the monitoring conditions. Then, the early-warning index system including human, environment, equipment and fuse indexes, as well as the classification and determination criteria, are proposed. The way of reducing index was adopt to reflect the impact of multi-factor coupling effects, and applicable early-warning method was established. Finally, a project was chosen to carry out case analysis. The results showed that the method of considering the coupling effects of human and environment risk factors as a reduction of the equipment indexes could be used as effective basis for judging the risk status of the project, to establish a risk early-warning method suitable for the construction of super high-rise buildings. This method fully considered the coupling effects of risk factors, and obtained values of early-warning indexes and reduction coefficient table through finite element model calculations. It was feasible.

Key words: super high-rise building; construction risk; integrated scaffolding and formwork equipment with steel platform; coupling effect