

冻融循环下硅质聚苯板体系保温性能研究

郭书源, 赵敏, 武昕

(西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 对硅质聚苯板体系进行不同含湿量的冻融循环耐久性试验, 结果表明: 硅质聚苯板体系随着冻融循环次数的增长, 导热系数不断增大, 保温性能不断降低, 其中 50 次冻融循环后导热系数的平均增长率为 99.4%; 随着硅质聚苯板保温体系含湿量的不断增加, 导热系数降低速度加快, 其中浸水 4h 的试样在 50 次冻融后的导热系数增长率为 124.67%; 硅质聚苯板体系增加防水措施后, 导热系数增长率为 44.85%。因此, 建议在使用硅质聚苯板体系作为建筑外墙外保温体系时增加防水工艺。

关键词: 冻融循环; 含湿量; 硅质聚苯板体系; 导热系数

中图分类号: TU55 1.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0273-06

Study on heat-insulated property of silicon polystyrene board under freeze-thaw cycles

GUO Shuyuan, ZHAO Min, WU Xin

(School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Freeze-thaw cycles durability tests of silicon polystyrene board system with different moisture content, are carried out. The experimental results show that the The number of freezing-thawing cycles increased caused the thermal conductivity of silicon polystyrene board system increased, The average growth rate of thermal conductivity after 50 freezing-thawing cycles was 99.4%; with the continuous increase of moisture content in the thermal insulation system of silicon polyphenylene board, the thermal conductivity decreases rapidly. The thermal conductivity growth rate of the sample soaked for 4h after 50 freezing-thawing cycles is 125%. The thermal conductivity of silicon polyphenylene board system increased by 44% after adding waterproof measures. Therefore, it is suggested to add water-proof technology when using silicon polyphenylene board system as the external insulation system of building external walls.

Key words: freeze-thaw cycles; moisture content; silicon polystyrene board system; thermal conductivity

随着我国城镇化水平的不断推进, 建筑规模逐步增大, 建筑节能减排问题迫在眉睫, 各种新型保温材料应运而生^[1-3]。保温材料通常指导热系数低于 $0.14 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 能有效减缓热流速率的单一或复合材料^[4-5]。硅质聚苯板是近年来研制成功的一种新型保温阻燃材料, 试验结果表明^[6,7]硅质聚苯板具有抗拉性强、防火性能好、保温性能好等特性。

目前硅质聚苯板多用于寒区的外墙外保温材料中, 且大部分处于季冻区, 冻融循环会导致保温材料内部空隙增大, 含湿量增加, 从而导致保温性能降低, 因此冻融循环下硅质聚苯板体系保温性能研究是亟待研究的问题。

对于保温体系的保温性能研究, 孙立新^[8]等通

过 HAM(湿热耦合)模型分析软件, 得出抹面层水蒸气和液态水对岩棉板保温系统整体含湿量的影响规律。汪恩良^[9]等研究了冻融效应对 XPS 板导热系数、吸水率、应力-应变关系等的影响规律。Surasani 等^[10]研究了多孔介质的传热规律, 并总结温度效应在多孔介质中的变化规律。Mydin^[11]通过拆分法研究泡沫混凝土的导热规律, 并通过试验验证其合理性。Li 等^[12]通过保温材料耐久性试验得出复合混凝土墙体保温性能的影响规律。Zheng 等^[13]通过保温性能耐久性试验, 提出从外加剂方面提高玻化微珠混凝土耐久性。吴雁等^[14]通过实例的分析和计算证明自然通风方案和保温材料的选择会对室内温度造成影响。丁杨等^[15]对不同保温材料进行多场耦合循环作用试验, 得出

收稿日期: 2020-01-21

修改稿日期: 2020-03-25

第一作者: 郭书源(1989—), 男, 硕士生, 研究方向为建筑材料分析. E-mail: suprat@163.com.

通信作者: 赵敏(1970—), 女, 教授, 研究方向为建筑材料分析、岩土工程、岩土工程测试与技术. E-mail: zhaominxait@163.com.

不同保温材料的导热系数损失规律. 以上对不同保温材料的保温性能展开相关研究, 但针对硅质聚苯板保温性能的研究却很少, 因此探究冻融循环对硅质聚苯板保温体系的保温性能研究尤为重要.

本文对不同含湿量的硅质聚苯板体系进行冻融循环试验, 对试验前后硅质聚苯板保温体系的导热系数进行测试, 并针对测试结果进行改良和验证, 为今后的硅质聚苯板设计和施工提供参考.

1 试验设计

1.1 设计依据

硅质聚苯板体系保温性能不同含湿量的冻融循环试验根据《外墙外保温工程技术规程》(JGJ144-2004)中的耐候性试验方法设计^[16].

1.2 试样制备

在硅质聚苯板体系使用过程中, 饰面层和抹面层的掉落对于硅质聚苯板保温体系保温性能的影响较低; 在饰面层和抹面层掉落以后, 硅质聚苯板直接会受到自然因素的影响, 因此在制备硅质聚苯板体系过程中仅使用硅质聚苯板与粘接砂浆粘结的方式制作硅质聚苯板体系.

(1) 硅质聚苯板的制备

建材市场出厂的整块硅质聚苯板的尺寸为 $650\text{ mm} \times 650\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 本试验采用的试样尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 用锋利的钢锯齿将整块板分割成试样用尺寸, 误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内.

(2) 粘结砂浆制备

聚合物砂浆与水按 $4:1$ 的比例混合均匀, 静置 3 min 后需再次搅拌均匀, 粘结砂浆应做到随做随用, 并在在 2 h 内使用完毕.

(3) 硅质聚苯板保温体系试件制备

使用整面粘结法制备硅质聚苯板保温体系试样. 用抹灰刀将制备好的粘结砂浆涂抹在硅质聚苯板试件上, 涂抹均匀, 并置于温度 $(10 \sim 28)^{\circ}\text{C}$, 湿度 $(50 \pm 10)\%$ 的养护箱内养护 48 h . 对于增加防水措施的硅质聚苯板体系将憎水剂与水按 $1:5$ 的比例搅拌均匀, 将混合均匀的憎水剂喷涂在硅质聚苯板上, 浆制备好的试样置于温度 $(10 \sim 28)^{\circ}\text{C}$, 湿度 $(50 \pm 10)\%$ 的养护箱内养护 48 h . 然后测试每块试样的初始导热系数. 试样的制备过程如图 1 所示.

1.3 试验仪器设备

冻融循环机: 上海多禾试验设备有限公司生产的 DHTC-010-40 环境试验箱, 温度范围: $-40 \sim -180^{\circ}\text{C}$, 温度波动度 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$. 可以实现每分钟



(a) 制备粘接砂浆



(b) 制备好的硅质聚苯板保温体系试样

图 1 试样制备

Fig. 1 Sample preparation

2°C 的升降温度.

导热系数仪: 北京世纪建通环境技术有限公司生产的 JTRG-III 导热系数测试仪. 该设备的测试范围为 $0.02 \sim 0.8\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 相对误差 $\leq \pm 3\%$. 热板和冷板的温度分别设定在 5°C 和 40°C 左右.

恒温水箱: 金坛区西城新瑞仪器厂生产的 HH-600 恒温水箱, 温度控制范围: 室温 -99°C , 控制精度 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$.

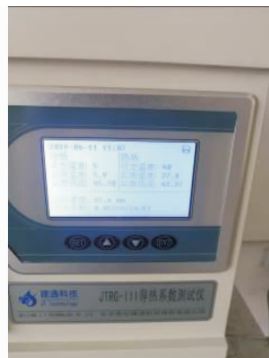
试验仪器如下图 2 所示.

1.4 试验方案

本次试验样品的含湿量通过浸水时长来控制, 为了测试含湿量的影响, 选取浸水时长分别为 2 h 、 3 h 及 4 h . 试样的冻融循环温度设定的冷冻温度为 -20°C , 融化温度为 30°C , 冻融循环周期定为 50 次. 具体试验步骤如下:



(a) 冻融循环机



(b) 导热系数仪



(c) 恒温水箱

图2 试验仪器

Fig. 2 Test Instruments

(1) 试样增湿

将分好类的试样完全浸没在 30°C 的恒温水箱中,根据增湿量的不同,控制三组试样的浸水时长分别为 2 h、3 h 及 4 h.

(2) 试样冻融循环

将完成增湿操作的试样放入冻融循环机内进行冻融循环试验.首先试样在冻融循环机 -20°C 环境中冷冻 12 h,然后调整冻融循环机温度,使试样在 30°C 环境中融化 12 h.

(3) 测试导热系数

依次进行不同含湿量试样的冻融循环试验,每一次循环完成后进行硅质聚苯板保温体系试样导热系数的测试.

2 冻融循环试验结果及分析

2.1 冻融循环次数对保温性能的影响

通过不同次数冻融循环试验,记录硅质聚苯板体系试样在不同冻融循环次数下导热系数的变化情况,以浸水 2 h 数据为例,试验数据如下图 2.1 所示.

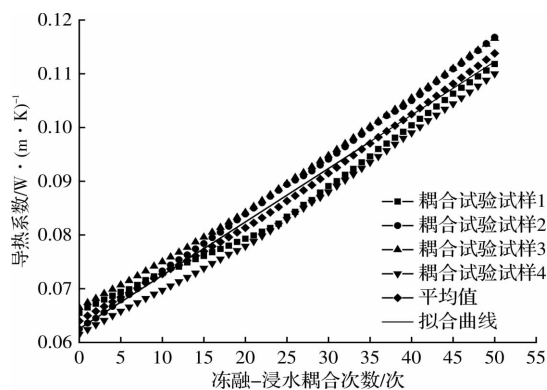


图3 冻融循环次数对保温性能影响

Fig. 3 Influence of freeze-thaw cycles on thermal insulation performance

由图3可知,随着冻融循环次数的不断增加,硅质聚苯板体系的导热系数稳定增长,这表明硅质聚苯板保温体系在含湿量一定的情况下,冻融循环

对硅质聚苯板体系保温性能有明显的损伤.这是由于硅质聚苯板是由含有阻燃硅质液体覆盖的聚苯乙烯颗粒经预热发泡而形成的,硅质聚苯颗粒间会存有少量的孔隙,在冻融循环试验过程中,水分会逐渐进入硅质聚苯板的孔隙.常压状态下水的导热系数要远大于空气的导热系数,随着水分的进入,硅质聚苯板体系的导热系数会逐步增加.

随后在冻融的过程中,孔隙间水分的体积会因为冻融循环而发生变化,造成硅质聚苯板的孔隙变大;孔隙变大后硅质聚苯板颗粒间的联结性降低,最终引起硅质聚苯板的尺寸发生变化.变大的硅质聚苯板导热系数增大,使得硅质聚苯板保温体系保温性能降低.反复的冻融循环造成硅质聚苯板孔隙的水分频繁的在固-液两种状态下转换,水分不断进入聚苯颗粒之间,导致硅质聚苯板吸水速率增大,因此在季冻区需要考虑冻融循环带来的破坏.

由图3可以得出,硅质聚苯板体系导热系数变化经历两个阶段:第一阶段,经历25次冻融循环之后,硅质聚苯板保温体系导热系数增加 $0.0223 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右,增长率为 34.84% ;第二阶段,经历25-50次冻融循环试验次数之后,硅质聚苯板保温体系导热系数增加 $0.0275 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右,增长率 42.96% ,经历50次冻融循环后,试样的导热系数平均增长率为 77.82% .造成硅质聚苯板保温体系的保温性能随冻融循环次数的提高而不断衰减的原因是:在冻融循环试验初期,水的冻融体积变化对硅质聚苯板产生的影响较小,随着冻融循环试验的不断进行,硅质聚苯板的孔隙变化逐步增大,硅质聚苯板的聚苯颗粒间的胶结力被逐渐破坏,从而导致硅质聚苯板的导热系数变化比试验初期变化更加剧烈.

2.2 含湿量对保温性能的影响

为研究含湿量对硅质聚苯板体系保温性能的影响,对不同含湿量的硅质聚苯板体系进行50次冻融循环试验,试验结果如下图4所示.

由图4的(a)、(b)、(c)图可以看出随着硅质聚苯板体系的含湿量增加,硅质聚苯板体系的导热系数呈现不同的增长趋势,其中(a)图中的浸水时长为2 h下的试样导热系数增长趋势较为缓慢,浸水时长为4 h下的硅质聚苯板体系导热系数增长最快.这是因为随着浸水时长的增长,硅质聚苯板颗粒间的含湿量增加.冻融循环的过程是硅质聚苯板体系内水分冻融和迁移的过程.硅质聚苯颗粒间的水分在低于 0°C 时,凝结成冰晶,导致颗

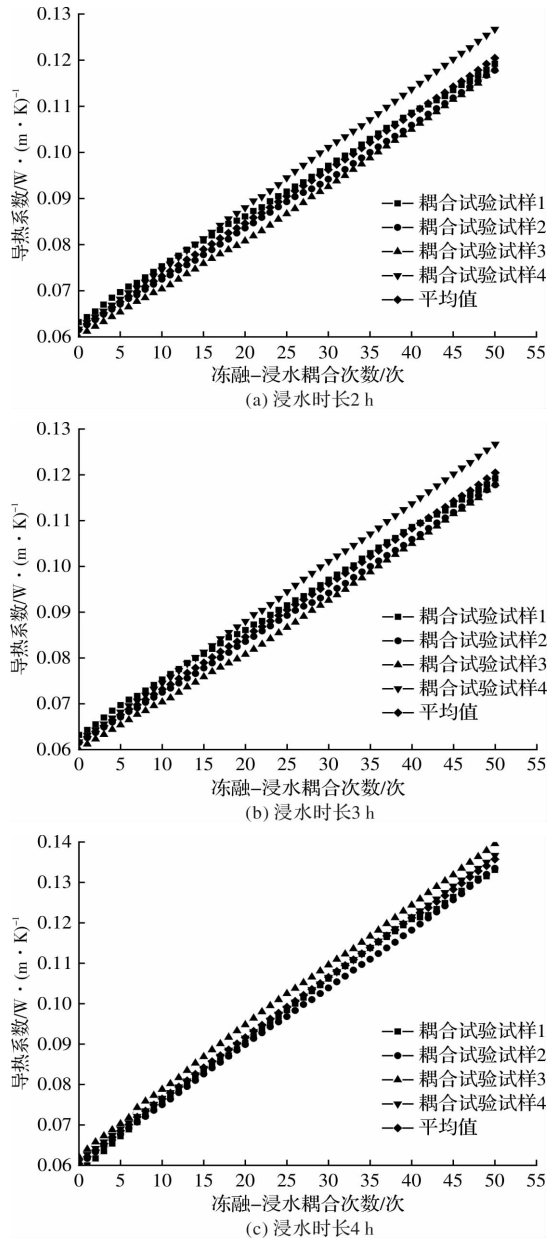


图4 含湿量对保温性能影响

Fig. 4 Influence of moisture content on thermal insulation performance

粒间的孔隙度增加;在高于 0°C 时,冰晶融化,水分转化为液态.反复冻融循环的过程,造成颗粒间的孔隙增大,导致颗粒间的胶结程度降低,硅质聚苯板尺寸增大,从而导致硅质聚苯板体系保温性能降低.并且硅质聚苯板孔隙中的水分含湿量的增大加剧了这一损伤过程.

由图4可得,浸水2h的四个样本导热系数增长曲线呈现先缓慢后增快的趋势,经历50次冻融循环后,硅质聚苯板体系平均导热系数增长 $0.0498 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,增长率为 77.82% ;浸水3h的四个样本导热系数比浸水2h样本的导热系数增速快,硅质聚苯板体系平均导热系数增长 $0.0598 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,增长率为 95.62% ;浸水4h的四个样本保温性能损

伤明显加快,试样平均导热系数增长 $0.0753 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,增长率为 124.67% .三种含湿量的试样50次冻融循环后平均导热增长率为 99.54% .

通过上述数据表明,含湿量的增大会加剧冻融循环对硅质聚苯板体系保温性能的劣化.

2.3 保温性能损伤拟合分析

为总结不同含湿量及冻融循环次数与硅质聚苯板保温体系导热系数的相关规律,使用相关数据处理软件对相关参数进行数据处理,如下图5所示.

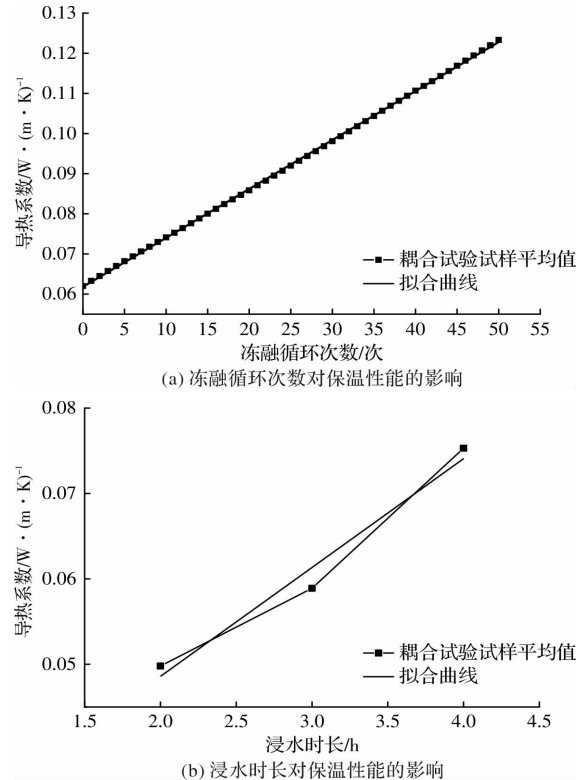


图5 保温性能损伤拟合

Fig. 5 Fitting analysis of thermal insulation performance damage

如上图所示,冻融循环损伤试验拟合公式如下式(1)~(2).

$$\lambda = 0.00122n + 0.06181 \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数; n 为冻融循环次数.

$$\Delta\lambda = 0.01275H + 0.02308 \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为导热系数增量; H 为浸水时长.

2.4 改良措施结果分析

为研究防水措施能否减少冻融循环对硅质聚苯板体系保温性能的损伤,对增加防水后的硅质聚苯板体系进行浸水2h、冻融循环周期为50次的耐久性试验.试验数据如下图6所示.

对比图4(a)与图6,可以发现增加防水措施后的硅质聚苯板体系导热系数增速明显放缓,说明防水措施能够有效的抵挡水分进入硅质聚苯板颗粒间的孔隙,从而有效的减缓颗粒间水分反复冻

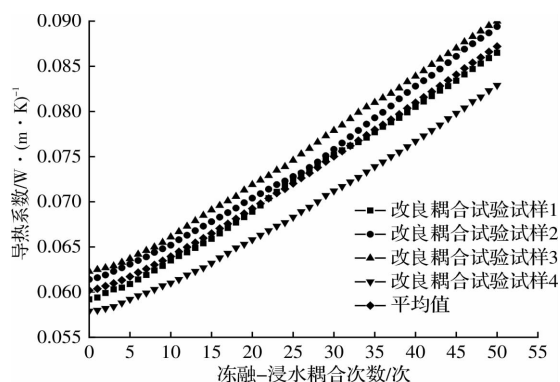


图6 改良硅质聚苯板体系冻融循环试验
Fig. 6 Test of freeze-thaw cycle of modified silicon polystyrene board

融过程造成的颗粒间的胶结能力减弱的问题。冻融循环前期由于憎水剂的作用,恒温水箱中的水分很少进入硅质聚苯颗粒间的孔隙,导致硅质聚苯板体系导热系数增速缓慢。随着冻融循环次数的增加,憎水剂表面开始出现细小裂隙,会有部分水分缓慢进入硅质聚苯板颗粒间的孔隙,造成保温性能下降速度增大。

由图6可得,浸水2h的四个样本导热系数增长曲线呈现先缓慢后增快的趋势,经历50次冻融循环后,硅质聚苯板体系平均导热系数增长0.027 W/(m·K),增长率为44.85%,低于导热系数增长率77.82%的未增加防水措施的相同试验条件的硅质聚苯板体系。

3 结论

本文通过硅质聚苯板体系在不同含湿量的冻融循环耐久性试验,得出以下几点结论。

1)冻融循环会对硅质聚苯板体系保温性能造成损伤,50次冻融循环周期的导热系数平均增长率为99.4%;

2)含湿量的增长加剧了冻融循环对硅质聚苯板体系保温性能的破坏程度,浸水时长4h的试样50次冻融循环后的导热系数增长最为明显,为125%;

3)防水措施能有效降低冻融循环对硅质聚苯板体系保温性能的劣化程度,增加防水措施的硅质聚苯板体系50次冻融循环后的导热系数增长率仅为44.85%。

参考文献 References

[1] 邸芃,巨斌.寒冷地区装配式建筑外围护结构节能设计研究[J].新型建筑材料,2018,45(1):5-8,36.

DI Peng, JU Bin. Study on the design of energy-saving for the outer envelope structure of prefabricated buildings in cold region[J]. New building materials, 2018, 45(1):5-8,36.

[2] XIA D Z. A New Energy Saving Roofing Insulation Board System of Polyphenylene Foam Concrete [J]. Key Engineering Materials, 2013, 531-532:421-424.

[3] 张泽平,李珠,董彦莉.建筑保温节能墙体的发展现状与展望[J].工程力学,2007(S2):121-128.

ZHANG Zeping, LI Zhu, DONG Yanli. Development and prospects of heat preserving and energy conservation wall system in buildings[J]. Engineering Mechanics, 2013, 531-532:421-424.

[4] 伍林,杨贺,易德莲.保温材料的技术现状和发展趋势[J].山西建筑,2005,31(19):1-2.

WU Lin, YANG He, YI Delian. Present situations and development trend of techniques of thermal insulation materials[J]. Shanxi architecture, 2005, 31(19):1-2.

[5] 孙志坚,孙玮.国内绝热保温材料现状及发展趋势[J].能源工程,2001(4):26-28.

SUN Zhijian, SUN Wei. Current status and development of thermal insulating materials in China[J]. Energy engineering, 2001, (4):26-28.

[6] 殷明.冻融循环对外墙保温板与结构层粘结性能的影响[D].西安工业大学,2017.

YIN Ming. The adhesive effect of exterior wall insulation board layer and structure under freeze-thaw cycles[D]. Xi'an Technological University, 2017.

[7] 陈现景,李红菊,刘建志,等.外墙保温材料的燃烧性能研究[J].山东工业技术,2019(03):120+163.

CHEN Xianjing, LI Hongju, LIU Jianzhi, et al. Study on combustion performance of external wall insulation materials[J]. Shandong Industrial Technology, 2019 (03):120+163.

[8] 孙立新,闫增峰,冯驰.抹面层湿特性对岩棉外保温系统含湿量的影响[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(01):72-77.

SUN Lixin, YAN Zengfeng, FENG Chi. Research on HAM model simulation of moisture content of stone wool ETICS with different base coat moisture performance[J]. Journal of Xi'an University of Architecture

- & technology(Natural Science Edition),2018,50(01): 72-77.
- [9] 汪恩良,靳婉莹,刘兴超,等.冻融条件下XPS板吸水特性及力学性能研究[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(1):47-52.
- WANG Enliang, JIN Wanying, LIU Xingchao, et al. Study on water absorption characteristics and mechanical XPS boards under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39 (1):47-52.
- [10] SURASANI V K, METZGER T, TSOTSAS E. Consideration of heat transfer in pore network modelling of convective drying[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(9/10):2506-2518.
- [11] MYDIN A O. Modelling of transient heat transfer in foamed concrete slab[J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2013, 8(30):326-343.
- [12] LI F L, CHEN H N, FENG X Z, et al. Durability of concrete for thermal insulation composite wall[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013 (438/439): 314-317.
- [13] ZHENG X H, LI Z, LIU Y Z, et al. Durability research of thermal insulation glazed hollow bead concrete[J]. Advanced Materials Research, 2013 (369/640): 350-353.
- [14] 吴雁,余跃进.对夏热冬冷地区墙体保温与隔热的探讨[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2001(03):287-289.
- WU Yan, YU Yuejin. Research for the heat preservation and heat insulation of wall in the area where it is hot in summer and cold in winter[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & technology(Natural Science Edition), 2001(03):287-289.
- [15] 丁杨,周双喜,王中等.多场耦合循环作用下屋面保温材料耐候性能[J].建筑材料学报,2019,22(04):638-644,650.
- DING Yang, ZHOU Shuangxi, WANG Zhongping, et al. Weathering resistance of roofing insulation materials under multi field coupling cycles [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(04):638-644+650.
- [16] 中华人民共和国建设部.民用建筑节能设计标准:JGJ144-2004[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Design standards for energy conservation in civil buildings:JGJ144-2004[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2004.

(编辑 桂智刚)