

玻化微珠空心砌块热工性能模拟 及其用于建筑外墙的节能分析

崔双双¹, 汪姨平¹, 王旭², 陈伟宏², 李登科¹

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 为解决传统砌块材料导热系数大、吸湿率高的问题, 本研究制备了低吸湿率玻化微珠水泥基材料, 测试了标准养护室连续7 d吸湿量及吸湿后导热系数变化规律。同时, 基于一维稳态传热理论, 利用 ABAQUS 模拟了砌块热工性能, 并采用 ECOTECT 进行建筑的热分析。结果表明: 玻化微珠水泥基导热系数低, 可以大幅降低砌块内表面热流强度、内表面温度, 有效增加砌块的热阻, 提高砌块的热工性能, 并且可以有效降低潮湿环境的影响。玻化微珠砌块用于建筑外墙可以降低建筑能耗, 暖通空调系统(HAVC)负荷、围护结构得失热(FABRIC)值以及被动组分得失热, 且外墙吸湿后仍可以有效降低建筑能耗, 维持建筑舒适性。

关键词: 空心砌块; 热工性能; 玻化微珠; 建筑能耗

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0228-08

Thermal performance simulation of vitrified microbead blocks and energy saving analysis for their application in building facades

CUI Shuangshuang¹, WANG Yiping¹, WANG Xu², CHEN Weihong², LI Dengke¹

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: In order to solve the problems of high thermal conductivity and high moisture absorption of traditional block materials, the vitrified microbead cement-based material with low moisture absorption were prepared in this study, and the moisture absorption of standard curing room for 7 consecutive days and the change rule of thermal conductivity after moisture absorption were tested. At the same time, based on one-dimensional steady-state heat transfer theory, the thermal performance of the block was simulated by ABAQUS, and the thermal analysis of the building was conducted by ECOTECT. Test results show that the thermal conductivity of vitrified microbead cement is low, and it can significantly reduce the heat flux intensity and temperature on the inner surface of the block, as well as effectively increase the thermal resistance of the block, so as to improve the thermal performance of the block, and effectively reduce the influence of humid environments. The vitrified microbead block used for building exterior walls can reduce building energy consumption, as well as the heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) load, fabric gains and losses (FABRIC) value, and passive component heat gain and loss, and the exterior wall can still effectively reduce building energy consumption and maintain building comfort after moisture absorption.

Keywords: hollow blocks; thermal performance; vitrified beads; building energy consumption

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2022J01557); 福建省交通运输科技计划项目(YB202411)

第一作者简介: 崔双双(1983—), 女, 山西翼城人, 副教授, 博士, 研究方向: 钢筋混凝土结构抗震、抗倒塌。

东南沿海地区属于典型的热湿气候区,显著的风驱雨(WDR)现象易引起建筑外墙渗水、墙体材料劣化等问题,外墙受到水侵蚀时热工性能降低,其建筑能耗势必会受到影响,因此国内外学者针对热湿传递对建筑能耗的影响进行了大量研究。冯伟^[1]对煤矸石与复合保温砌块墙体进行了数值模拟,发现墙体含湿会影响建筑的能耗,且与建筑所在地区气候与季节密切相关。Nagy B 等^[2]对 5 种烧结页岩墙体进行了湿透过率研究,表明建筑外墙含湿率增加时会增加建筑能耗。龚光彩等^[3]分析了外墙吸湿对建筑全年总能耗的影响。Fang 等^[4]使用 CHM 模型计算混凝土外墙建筑能耗。袁天鹏等^[5]研究了围护结构吸湿过程对建筑能耗的影响。刘英^[6]研究了夏热冬冷地区的普通混凝土墙体,结果表明,考虑墙体传湿的影响时,建筑能耗增加了 2.76% ~ 6.28%。文哲琳^[7]研究了潮湿环境下不同墙体材料对建筑能耗的影响,结果表明,环境湿度增大,建筑的能耗也增加。

采用低吸湿率的外墙材料是降低环境对外墙性能影响的一种有效途径。玻化微珠具有导热系数小、吸湿率低等特点,可以有效降低材料的导热系数与吸湿量。基于此,本文制备了低吸湿率的玻化微珠保温砂浆,将其用于制备适用于热湿环境下使用的保温砌块,并采用 ABAQUS 研究了玻化微珠砌块热工性能,同时基于 BIM 技术探讨其用于建筑外墙对建筑能耗的影响。

1 玻化微珠保温砂浆基本性能

通过预试验研究不同掺量的玻化微珠对基体的抗压强度和导热系数的影响初步确定水泥基配合比,再通过正交试验研究水胶比、粉煤灰、砂胶比及玻化微珠对玻化微珠水泥基材料抗压强度和单位体积吸水量的影响,确定了玻化微珠水泥基的优选配合比^[8]:水胶比:0.375;砂胶比:0.1;粉煤灰掺量:30%;玻化微珠掺量:60%,减水剂 3.0‰。

1.1 吸湿试验

采用尺寸为 300 mm×300 mm×30 mm 的试块,标准养护(空气湿度:90%;温度:(20±2)℃) 28 d 后放入烘箱(温度:(65±5)℃),烘至恒重后放入标准养护室养护 7 d,每 24 h 测量其吸湿量,并测定其对应的导热系数与混凝土对比,试验结果见图 1、2。

1.1.1 单位体积吸湿量

由图 1 可知,随着在标养室内吸湿时间的增加,累计吸湿量不断增大,但玻化微珠水泥基材料的累计吸湿量与吸湿速度小于混凝土。玻化微珠水泥基后期吸湿速度较小,第 7 d 吸湿量 8.2 g,为混凝土的 48.3%。玻化微珠水泥基 7 d 累计吸湿量 185.8 g,为混凝土吸湿量的 62.4%。

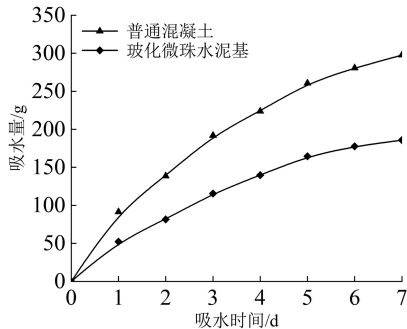


图 1 试块吸湿速度

Fig.1 Moisture absorption rate of test block

1.1.2 含水量对导热系数的影响

由图 2 可知,未吸湿时玻化微珠水泥基材料导热系数为 0.336 W/(m·K),是混凝土的 26.4%。随着吸湿时间增加,材料的导热系数增大,这是因为水的导热系数大于空气的导热系数,吸湿后填充了材料内部的微孔,故导热系数增大。由于玻化微珠水泥基吸湿速度小于混凝土,故受潮湿环境影响较小,热工性能稳定。7 d 吸湿后,玻化微珠水泥基导热系数增大 0.147 W/(m·K),增幅为混凝土的 44.3%;玻化微珠水泥基导热系数为 0.483 W/(m·K),仅为混凝土的 30.1%。由此可见,玻化微珠水泥基吸湿后仍具有较低的导热系数,受热湿环境影响较小,适用于制备潮湿环境下使用的保温砌块。

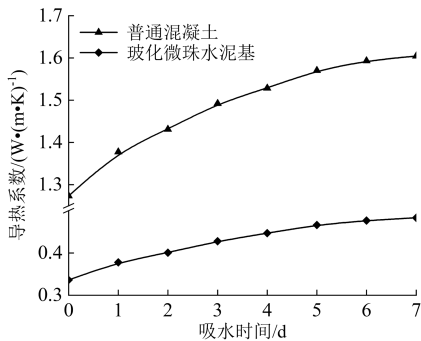


图 2 吸湿后导热系数的变化

Fig.2 Change of thermal conductivity after moisture absorption

1.2 比热容

比热容越大材料的吸热能力越强,更有利于维持室内环境的稳定,本次测试结果见表 1。

表 1 比热容测定结果

Tab.1 Determination of specific heat capacity

材料	J/(kg·K)		
	第一次测试 比热容	第二次测试 比热容	平均 比热容
混凝土	835	887	861
玻化微珠水泥基	956	874	915

通过比热容测定试验可知,玻化微珠水泥基材料的比热容比普通混凝土的高 54 J/(kg·K),这表明相同质量条件下,玻化微珠水泥基材料较普通水泥基材料的吸热能力更高、热稳定性更好,制备围护结构时,可以提高建筑室内热环境的稳定性。

1.3 密度

材料密度测定按照《建筑保温砂浆》GB/T20473-2021 的测试方法,试块的浇筑与养护按照 C2.2 条的方法制备^[9]。密度按式(1)计算。混凝土和玻化微珠水泥基的密度分别为 2 236、1 091 kg/m³。

$$\rho_0=\frac{m_0}{V}$$

(1)

式中, ρ_0 为干密度,kg/m³; m_0 为试件烘干后质量,kg; V 为试件体积,m³。

2 基于一维稳态传热理论砌块热工性能数值模拟

2.1 热工性能检测方法

通过控温箱-热流计法测量玻化微珠水泥基砌块的热工性能。利用控温箱控制围护结构内表面的环境稳定,然后利用热流计法测量围护结构的热量及外表面的温度,根据公式(2)(3)计算,得到围护结构的热阻与传热系数。

$$R=\frac{T_2-T_1}{CE}$$

(2)

$$K=\frac{1}{R_i+R+R_e}$$

(3)

式中, T_1 、 T_2 为围护结构表面温度,K; E 为热流计测量值,mV; K 为传热系数,W/(m²·K); R 为被

测墙体热阻,(m²·K)/W; R_i 为围护结构内表面换热阻,(m²·K)/W,本文取 0.11; R_e 为围护结构外表面换热阻,(m²·K)/W,本文取 0.04。

2.2 基本假定与数学模型

进行热工性能分析时,做以下假定^[10-11]:材料的导热系数不受温度影响保持恒定;热量仅在厚度方向传递即一维传热;砌块内空气当作实体,导热系数参照规范^[12],根据孔的厚度确定;忽略不同材料之间接触传热热阻;模拟夏季炎热地区环境温度,砌块两侧环境温度分别为 291.15、315.15 K。

为求解上述稳态方程,必须确定围护结构所有面的边界条件。边界热流密度已知,即式(4)。

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)=c$$

(4)

对于稳态热传递,其热平衡的数学模型如式(5)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0$$

(5)

采用 ABAQUS 模拟砌块热工性能时,砌块两侧表面对流换热系数恒定^[13],根据 GB 50176-93《民用建筑热工设计规范》^[12],内表面换热系数为 8.7 W/(m²·K),外表面换热系数为 23 W/(m²·K)。除对流换热外,砌块表面还与周围环境发生辐射换热^[14],辐射换热系数取 0.9。综上,内、外表面的边界方程满足式(6)(7)。

$$-k\frac{\partial T}{\partial \omega}\bigg|_{\omega=0}=h_i(t-t_i)+\varepsilon\sigma(t^4-t_i^4)$$

(6)

$$-k\frac{\partial T}{\partial \omega}\bigg|_{\omega=W}=h_e(t-t_e)+\varepsilon\sigma(t^4-t_e^4)$$

(7)

式中, ω 为砌块的厚度,m; h_e 为低温侧换热系数,W/(m²·K); h_i 为高温侧换热系数,W/(m²·K); k 为材料的导热系数,W/(m·K); T 为环境的温度,K; ε 为围护结构的发射率,0.9; t 为环境温度,K; t_i 为高温侧表面温度,K; t_e 为低温侧表面温度,K; σ 为斯蒂芬-波尔斯曼常数,5.68×10⁻⁸ W/(m²·K⁴)。

砌块的顶面、底面以及侧面均没有热损失,设置为绝热条件,边界方程满足式(8)(9)。

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0,L}=0$$

(8)

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{y=0,H}=0$$

(9)

式中, L 为围护结构的长度,m; H 为围护结构的高

度, m_0 。

通过 ABAQUS 后处理,按式 (10) 计算得到砌块的传热系数与热阻^[15-16]。

$$\overline{R}=\frac{\Delta t}{q}$$

(10)

式中, $\overline{R}$ 为砌块热阻, $(m^2 \cdot K)/W$; Δt 为砌块内、外表面温差, K ; q 为砌块表面热流强度, W/m^2 。

空心砌块存在空气间层非均一材质^[17],其当量导热系数按式 (11) 计算。

$$\lambda=\frac{lQ}{A(T_1-T_2)_e}=\frac{lq}{T_1-T_2}$$

(11)

式中, l 为砌块的厚度, m ; λ 为当量传热系数, $W/(m \cdot K)$; q 为热流强度, W/m^2 ; T_1 、 T_2 为表面温度, K 。

2.3 有限元建模与验证

为验证有限元模拟结果的准确性,对文献[14]的混凝土空心砌体(尺寸为 400 mm×200 mm×200 mm)进行有限元热分析。单元类型选择 DC3D8(八节点线性传热六面体),网格尺寸为 10 mm。

砌体的热阻按式 (10) 计算,通过有限元模拟得到该砌体热阻为 0.633 $(m^2 \cdot K)/W$,文献[14]中砌体试验测试热阻为 0.598 $(m^2 \cdot K)/W$,相差 0.036 $(m^2 \cdot K)/W$,误差仅为 5.85%。因此,采用 ABAQUS 模拟砌块热工性能,可以满足分析砌块热工性能的要求。

2.4 砌块类型及材料参数

为进行数值模拟,测定了混凝土与玻化微珠水泥基的密度 ρ (2 236、1 091 kg/m^3)、导热系数 k (1.273、0.326 $W/(m \cdot K)$)、比热容 c (861、915 $J/(kg \cdot K)$)。模拟了 4 种类型空心砌块,砌块尺寸为 390 mm×190 mm×190 mm 的长方体,砌块细部构造尺寸见表 2。

表 2 砌块构造参数

Tab.2 Parameters of block construction

砌块类型	孔腔形状	开孔数量	开孔尺寸/mm	开孔率/%
A	矩形	2	150×130 ² 、150×130 ²	52.6
B	圆形	2	$D=150$ 、 $D=150$	47.7
C	矩形	4	150×65 ² 、150×65 ² 、150×65、150×65	52.6
D	矩形	4	200×65、200×65、100×65、100×65	52.6

2.5 砌块热工性能数值模拟结果

图 3、4 为 A 类型玻化微珠砌块的有限元热模拟结果,4 种类型砌块热工性能模拟结果见表 3。

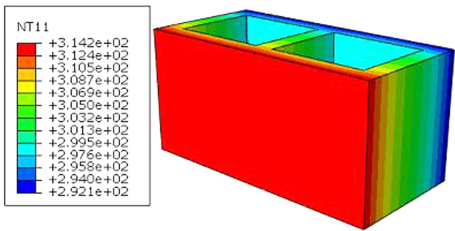


图 3 砌块温度云图

Fig.3 Temperature cloud map of the block

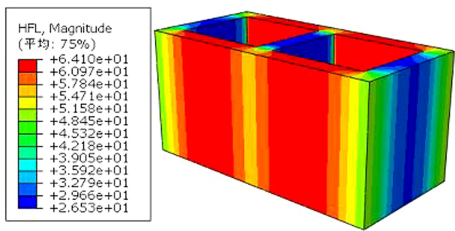


图 4 砌块热流密度云图

Fig.4 Block heat flux density cloud image

2.6 玻化微珠水泥基砌块热工性能分析

2.6.1 内表面温度

内表面温度能决定室内空气与围护结构对流换热效率,温度越高对流换热效率越高。采用玻化微珠水泥基的 4 种砌块类型的砌块内表面温度相比混凝土分别降低了 1.074、1.183、0.783、0.797 K,玻化微珠砌块内表面温度均小于混凝土砌块内表面温度,减少热量传递到室内,降低建筑能耗。

2.6.2 表面热流强度

热流强度指的是在稳定传热条件下,单位时间通过单位面积的热量,可以直观地反应砌块热工性能,热流强度越大砌块的热工性能越差。结果显示同类型砌块,玻化微珠砌块的表面热流强度均小于混凝土砌块,A、B、C、D 4 种类型砌块表面热流强度分别降低 45.0%、46.7%、44.3%、43.6%。通过对比发现,玻化微珠砌块热工性能优于混凝土砌块,最大可以降低 46.7%。

2.6.3 热阻

热阻可以反映热量通过砌块的遇到的阻力,热阻越大,相同时间内通过围护结构的热量就越

少。结果显示,相同类型的玻化微珠砌块热阻均比混凝土砌块热阻大,4 种砌块热阻分别增大 98.4%、107.3%、90.4%、89.0%,玻化微珠水泥基可以大幅提高砌块的热阻,增加围护结构的热工性能。

对比砌块的内表面平均温度、表面平均热流强度以及热阻发现,玻化微珠水泥基制备的空心砌块,各项性能均优于混凝土空心砌块。这是由

于玻化微珠水泥基材料的导热系数比混凝土小,相同壁厚情况下导热系数小热阻大,热量传递过程中遇到的阻力随之增加,因此采用玻化微珠水泥基的空心砌块具有优异的热工性能,能更好地维持建筑室内环境的稳定,并且可以降低建筑使用中的能耗。

表 3 砌块数值模拟结果
Tab.3 Numerical simulation results of blocks

砌块类型	材料	内表面温度/K	外表面温度/K	表面热流强度/(W·m ⁻²)	热阻/((m ² ·K)·W ⁻¹)
A	混凝土	293.382	313.313	108.491	0.184
	玻化微珠水泥基	292.308	314.077	59.634	0.365
B	混凝土	293.488	313.265	111.585	0.177
	玻化微珠水泥基	292.305	314.079	59.361	0.367
C	混凝土	292.751	313.774	80.478	0.261
	玻化微珠水泥基	291.986	314.304	44.854	0.497
D	混凝土	292.738	313.771	79.528	0.264
	玻化微珠水泥基	291.986	314.305	44.846	0.499

2.6 潮湿环境对砌块热工性能的影响

利用有限元模拟砌块热工性能变化时,假定在潮湿环境下,砌块厚度方向吸水时间均匀。以 A 型砌块为例,图 5 分别为砌块内表面平均温度、表面平均热流密度与热阻变化曲线。由图 5 可见,在相同的环境下,玻化微珠砌块的内表面平均温度、表面平均热流密度与热阻变化幅度大于混凝土砌块。因为玻化微珠水泥基热工性能优异,导热系数

低,在潮湿环境下,材料的导热系数变化幅度大于混凝土,故其热工性能变化幅度较混凝土砌块大。与混凝土砌块比,玻化微珠砌块经 7 d 吸湿后,内表面平均温度低 1.015 K,表面热流强度低 46.334 W/m²,为混凝土砌块的 60.98%;热阻高 0.130 (m²·K)/W,是混凝土砌块的 1.79 倍。因此,玻化微珠保温砌块具有优异的热工性能,应用于潮湿环境下,可以提高建筑的舒适性,降低建筑能耗。

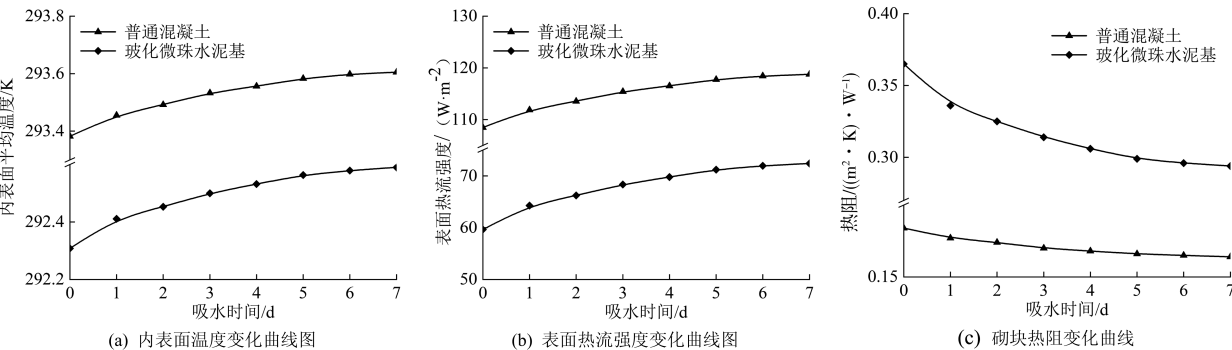


图 5 普通混凝土及玻化微珠水泥基热工性能

Fig.5 Thermal properties of ordinary concrete and vitrified microbead cement base

3 基于 BIM 技术的玻化微珠砌块建筑热分析

3.1 工程概况

选取福州沿海高温地区某多层住宅为研究对象,分析建筑能耗。该住宅地上建筑共 8 层,占地面积 970 m²,总建筑面积 5 800 m²,建筑首层为车库,顶层为阁楼,建筑总高度 22.15 m,整体采用框架填充墙结构。

3.2 自然气候特征

福州市位于我国东南沿海地区,雨热同期,气候潮湿多雨,春夏干湿差异不大。按中国建筑气候区划,福州市处于夏热冬冷地区。福州市年平均温度为 23~25 ℃,7~8 月最热气温达 33~38 ℃,最高温度为 41 ℃;1~2 月最冷温度为 6~10 ℃,年平均风速约为 2.6 m/s。

福州地区处于亚热带季风气候区,降雨主要集中在 3~9 月,雨量充足,年平均降雨日约 130~170 d,年降雨量约 900~2 100 mm。全年日照时长达 1 700~1 980 h,无霜期为 326 d。

3.3 建筑信息模型

图 6 为导入 Ecotect Analysis 的建筑热分析模型,外墙由 4 种常规类型砌块砌筑而成,砌筑砂浆与块体材料参数见表 4。

表 4 墙体材料热工参数			
Tab.4 Thermal parameters of wall materials			
材料	干密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)	比热/ (J·(kg·K) ⁻¹)
混凝土	1 900	1.100	861
水泥砂浆	1 900	0.930	1 050
玻化微珠 水泥基	1 019	0.336	915

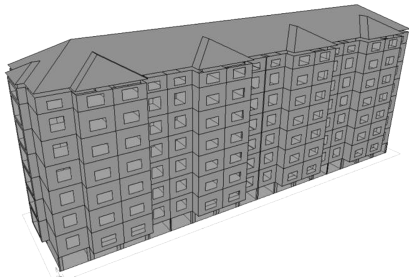


图 6 Ecotect Analysis 建筑模型

Fig.6 Architectural models by Ecotect Analysis

3.4 热分析

3.4.1 逐月能耗

逐月能耗指的是维持建筑各封闭空间舒适性(18~26 ℃)所消耗的能量,可以直观地展示为保持建筑内环境稳定所消耗的能量。结果显示,4 种类型混凝土砌块外墙建筑总能耗分别为 14 443、14 813、12 612、12 403 kWh,玻化微珠砌块建筑总能耗分别为 10 350、10 652、9 711、9 605 kWh,建筑能耗分别降低 28.3%、28.1%、23.0%、22.6%。

3.4.2 逐时得失热

逐时得失热是指建筑一天内不同时间得到或散失的热量,暖通空调系统(heating ventilation and air conditioning HVAC)负荷是空调系统为维持室内环境稳定舒适产生的能耗,围护结构得失热(fabric gains and losses FABRIC)指通过围护结构的热量。结果显示,4 种类型混凝土砌块外墙建筑 HVAC 负荷分别为 78.8、80.8、66.4、65.6 kWh,FABRIC 分别为 63.1、64.4、52.7、51.3 kWh;玻化微珠砌块建筑 HVAC 负荷分别为 61.2、62.6、49.7、48.9 kWh,FABRIC 分别为 47.6、48.1、36.8、36.0 kWh。建筑 HVAC 负荷与 FABRIC 分别降低 22.3%、22.5%、25.2%、25.5%与 24.5%、25.3%、30.2%、30.4%。

3.4.3 被动组分得失热

被动组分得失热能够展示逐日得失热的情况,表明各建筑部分(围护结构得失热、太阳直射辐射、人员与设备等)得失热所占的比例,其大小可以反映围护结构的热工性能。结果显示,4 种类型混凝土砌块外墙建筑得热分别为 57.1%、57.4%、52.1%、51.9%,失热分别为 15.3%、15.9%、13.1%、12.9%;玻化微珠砌块建筑得热分别为 50.1%、50.7%、43.7%、43.4%,失热分别为 12.7%、12.9%、10.5%、10.4%。建筑得失热分别降低 12.3%、11.7%、16.1%、16.4%与 16.9%、18.9%、19.8%、19.4%。

3.5 外墙吸水时间对建筑能耗影响规律

图 7~图 10 分别为 A 类型砌块建筑的能耗、HVAC 负荷、FABRIC 以及被动组分得失热随外墙吸水时间变化曲线,随着外墙吸水时间的增加,建筑能耗、HVAC 负荷、FABRIC 以及被动组分得失热均随之增大,这是因为外墙在潮湿环境中吸收了水分,而水的导热系数大、对流换热

效率高,外墙热工性能降低,从而增加了建筑能耗。由图可知,混凝土材料与玻化微珠水泥基材料的建筑外墙吸湿 7 d 后,建筑能耗分别为 15 980和 13 753 kWh,玻化微珠水泥基材料用于建筑外墙时能耗降低 16.2%;建筑的 HVAC 负荷与 FABRIC 分别降低了 15.8、7.7 kWh,降幅分别为 19.4%、11.5%;围护结构得失热占比分别降低了 8.0%、2.8%,降幅分别为 13.1%、17.2%。

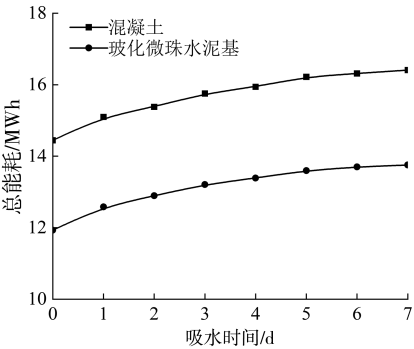


图 7 建筑能耗变化曲线

Fig.7 Change curve of building energy consumption

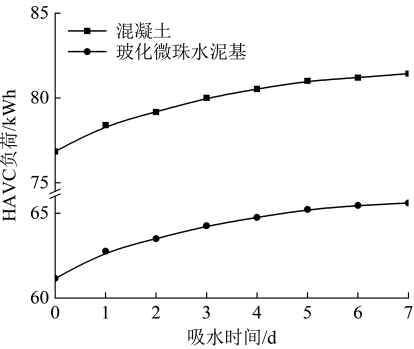


图 8 HAVC 负荷变化曲线

Fig.8 Change curve of HAVC load

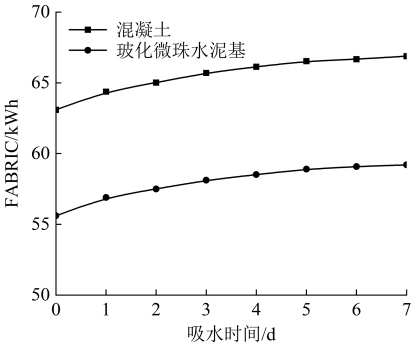
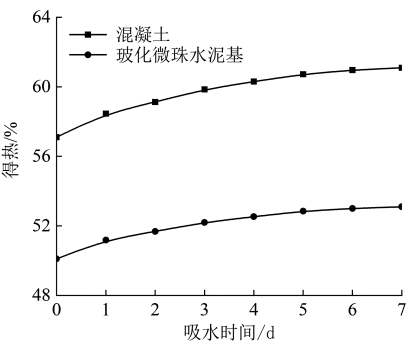
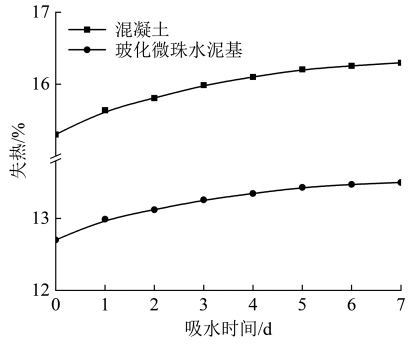


图 9 FABRIC 变化曲线

Fig.9 FABRIC change curve



(a) 得热



(b) 失热

图 10 围护结构被动得失热占比变化曲线

Fig.1 Change curve of passive heat gain and loss ratio of enclosure structure

4 结论

1)玻化微珠水泥基材料的导热系数与吸湿量远小于混凝土,分别为混凝土的 26.39%、63.94%。且玻化微珠水泥基可以有效减小水对材料保温性能的影响,吸湿 7 d 后,玻化微珠水泥基导热系数为 0.483 W/(m · K),为混凝土导热系数的 30.11%,导热系数增大 0.147 W/(m · K),增幅仅为混凝土的 44.3%。

2)玻化微珠砌块可以有效提高砌块热工性能,且在潮湿环境下工作性能优异。大幅降低砌块内表面热流强度、内表面温度,能够有效增加砌块的热阻;潮湿环境对玻化微珠砌块内表面温度、表面热通量以及热阻影响较小,可降低潮湿环境对砌块热工性能的影响。

3)玻化微珠保温砌块用于建筑外墙可以提高外墙的热工性能、降低建筑能耗,提高潮湿环境下外墙热工性能的稳定性。以 A 类型砌块为例,与混凝土砌块相比,玻化微珠建筑能耗降低 17.4%,HAVC 负荷降低 22.3%,FABRIC 降低 31.9%,围护结构得失热占比分别降低 12.3%、

17.0%;吸水时间增加会降低外墙的热工性能,增加建筑能耗。玻化微珠保温砌块可以有效降低潮湿环境对建筑能耗的影响,吸湿7 d后,建筑能耗降低16.2%,HVAC 负荷降低19.4%,FABRIC 降低11.5%,围护结构得失热占比分别降低了13.1%、17.2%。

参考文献:

[1] 冯伟. 复合砌块墙体二维热湿耦合传递特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.

[2] NAGY B,GALLARDO A Q,SZALAY Z. Life-cycle and hygrothermal based optimization of insulation filled masonry blocks [M]. Proceedings of the enviBUILD 2019, Bratislava, 2020:122-127.

[3] 龚光彩,王洪顺,刘永超,等. 内抹调湿砂浆外墙吸放湿特性及对负荷影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024,51(1):225-236.

[4] FANG A M,CHEN Y M,WU L. Modeling and numerical investigation for hygrothermal behavior of porous building envelope subjected to the wind driven rain[J]. Energy and Buildings,2021,231:110572.

[5] 袁天鹏. 高热高湿地区建筑外围护结构对建筑负荷的影响[D]. 济南:山东大学,2020.

[6] 刘英. 夏热冬冷地区整体建筑热湿耦合传递对室内热湿环境及能耗的影响研究[D]. 南昌:南昌大学,2020

[7] 文哲琳. 外围护墙体材料热湿特性及其对建筑供暖能耗的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[8] 崔双双,郭晓慧,罗天凤,等. 湿热环境下低吸水性玻化微珠保温砂浆配合比研究[J]. 福建理工大学学报,2024,22(3):213-218.

[9] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 建筑保温砂浆:GB/T 20473—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

[10] 卢志鹏. 固废再生模板砌块砌体基本力学性能及热工性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2023.

[11] 杨召通. 多排自保温混凝土复合砌块结构优化设计分析[D]. 西安:长安大学,2019.

[12] 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.

[13] AL-TAMIMI A S,AL-OSTA M A,AL-AMOUDI O S B,et al. Effect of geometry of holes on heat transfer of concrete masonry bricks using numerical analysis[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2017,42(9):3733-3749.

[14] AL-AWSH W A,QASEM N A A,AL-AMOUDI O S B,et al. Experimental and numerical investigation on innovative masonry walls for industrial and residential buildings[J]. Applied Energy,2020,276:115496.

[15] BAI G L,DU N J,XU Y Z,et al. Study on the thermal properties of hollow shale blocks as self-insulating wall materials[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2017,2017:9432145.

[16] DEL COZ DÍAZ J J,ÁLVAREZ-RABANAL F P,GENCEL O,et al. Hygrothermal study of lightweight concrete hollow bricks:a new proposed experimental-numerical method[J]. Energy and Buildings,2014,70:194-206.

[17] 苏宇峰,梁世英. 高孔洞率复合保温砌块设计及热工性能影响因素[J]. 建筑材料学报,2018,21(5):754-760.

(责任编辑:陈雯)