

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.01.013

水泥改性生土材料热湿性能及周期性边界下墙体温湿度分布特性

张磊^{1,2}, 桑国臣¹, 崔晓玲¹, 韩玮霄¹, 郭晓宁¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安建筑科技大学 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了揭示周期性边界下生土墙体温湿度分布特性, 实验制备水泥改性生土材料并测试其热湿性能, 建立一维非稳态热湿耦合传递模型, 分别以吐鲁番夏至日和冬至日气象数据为室外边界条件, 对冬夏两季水泥改性生土墙体内部温湿度进行数值求解。结果表明: 水泥改性生土材料具有良好的吸湿性, 水泥掺量的增加能够提升材料的吸湿能力, 但是对水蒸气透过性不利。夏季, 水泥改性生土墙体对环境温湿度波动衰减效果明显, 0.3 m 厚水泥改性生土墙体具有理想的隔热和调湿性能。然而, 减小墙体厚度会导致冬季墙体内壁面温度显著降低, 需考虑必要的保温处理。

关键词: 水泥改性生土墙体; 热湿性能; 周期性热边界; 热湿耦合分析; 墙体温湿度分布

中图分类号: TU111.19

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)01-0096-09

Hygrothermal properties of cement stabilized earth material and both temperature and relative humidity distribution of wall under periodic boundary conditions

ZHANG Lei^{1,2}, SANG Guochen¹, CUI Xiaoling¹, HAN Weixiao¹, GUO Xiaoning¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to reveal the thermo-hygric performance of the earth wall under periodic boundary conditions, the cement stabilized earth specimens are prepared for hygrothermal properties measurements. The 1-D unsteady coupled heat and moisture transfer model is developed and numerically solved to obtain the temperature and relative humidity inside cement stabilized earth wall when meteorological data of winter solstice and summer solstice in Turpan are used as the outdoor boundary conditions. The results show that cement stabilized earth material has good hygroscopicity. Increasing cement content has a positive effect on hygroscopicity and a negative effect on permeability for water vapor. In summer, cement stabilized earth wall damps obviously the outdoor air temperature and relative humidity fluctuation, and cement stabilized earth wall with 0.3 m thickness has an ideal thermal insulation and moisture controlling. However, decreasing thickness of wall leading to lower temperature of inner wall in winter and the insulation technical should be considered.

Key words: cement stabilized earth wall; hygrothermal properties; periodic boundary; coupled heat and moisture analysis; temperature and relative humidity distribution inside wall

生土建筑具有冬暖夏凉、绿色环保的特点, 这种古老的建筑形式至今仍在某些地区(如新疆吐鲁番)被广泛采用。然而, 强度和耐久性方面的性能缺陷

严重制约了生土材料在现代建筑中的应用^[1]。针对这一问题, 既有研究通过改性固化提升生土材料的力学性能, 取得了丰富的研究成果^[2-6]。其中, 以水

收稿日期: 2021-02-02; 网络出版日期: 2021-05-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210513.1716.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52008337); 省部共建西部绿色建筑国家重点实验室开放基金资助项目(LSKF201912); 陕西省重点研发计划(重点产业创新链)资助项目(2020ZDLNY06-05)

通信作者: 张磊, 男, 博士, 副教授, 研究方向为建筑热工与建筑热环境。E-mail: zhanglei0124@xaut.edu.cn

泥为代表的胶凝材料对生土材料力学性能的提升效果尤为明显^[7-8]。由于全社会对健康建筑的迫切需求,生土建筑优异的热湿性能逐渐受到关注。Zhang 等^[9]测试分析了水泥改性生土材料导热系数随水泥掺量的变化规律,结果表明水泥的掺入对生土材料导热系数影响有限。杨永等^[10]和马军涛等^[11]分别对水泥改性生土材料的导热系数和吸湿速率进行试验测试,系统分析了碳化、浸水以及冻融过程对水泥改性生土材料导热系数的影响规律。

目前,研究人员大多单一研究水泥改性生土材料的热性能或湿性能,针对水泥改性生土材料热湿综合性能及其对墙体热工性能的影响还较少关注,尤其是室外气候周期性波动下水泥改性生土墙体内部温湿度分布特征尚不清晰,给生土建筑室内热环境的量化分析带来困难。然而,生土墙体内部温湿度分布计算涉及到热湿耦合迁移的复杂问题,且生土材料导热系数随含湿量的变化明显^[12]。针对以上问题,本研究以新疆吐鲁番生土材料为研究对象,结合作者在前期研究中获得的关于水泥改性生土材料表观密度对抗压强度的影响规律,确定水泥改性生土材料表观密度,分析水泥掺量对其热湿性能的影响规律,确定水泥改性生土材料热湿性能参数。建立一维非稳态热湿耦合传递模型,对水泥改性生土墙体热湿迁移过程进行数值求解,确定周期

性边界条件下墙体内部温湿度分布特征。以上研究成果为生土建筑室内热环境及空调采暖能耗的量化分析提供理论依据。

1 试验

1.1 试验材料

生土材料取自新疆吐鲁番市亚尔乡,其颗粒分布曲线见图 1,其化学组分见表 1,其物理性质、矿物组分见文献[13]。水泥选用海螺水泥有限公司生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥,其化学组分见表 1,其物理性质见表 2。

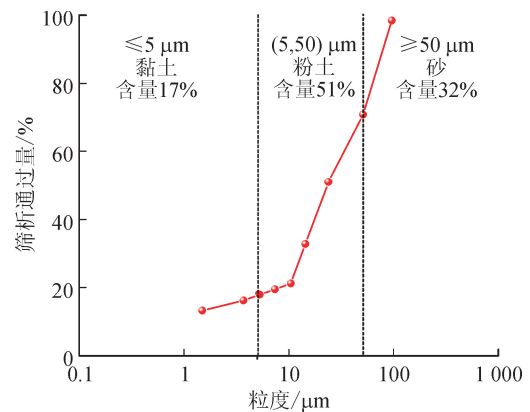


图 1 生土材料颗粒分布曲线

Fig. 1 Grain size distribution of raw earth

表 1 生土材料及水泥化学组分

Tab. 1 Chemical composition of the earth material and the Portland cement

材料 类型	组分含量/%											
	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	K ₂ O	ZrO ₂
生土材料	47.77	19.37	8.85	12.21	4.26	0.46	0.00	3.98	0.23	0.86	1.94	0.08
水泥	20.65	62.23	3.15	3.27	1.65	0.76	0.05	0.48	0.07	0.16	0.00	0.00

表 2 水泥物理性质

Tab. 2 Physical property of the Portland cement

单位:MPa

28 天抗拉强度		28 天抗压强度	
测试值	标准值	测试值	标准值
9.0	≥6.5	48.8	≥42.5

1.2 水泥改性生土材料的制备

在前期研究中,作者试验分析了水泥改性生土材料抗压强度随表观密度的变化规律^[9]。结果表明,当表观密度为 1 900 kg/m³时,水泥改性生土材料抗压强度能够达到 3 MPa 以上,能够满足工程结构安全需要。因此,本研究以生土材料为基材、水泥为改性剂,表观密度控制在 1 900 kg/m³,水泥掺量

分别为生土材料质量的 3%、5%、7%和 9%,制备两种尺寸的水泥改性生土材料试件(50 mm×50 mm×25 mm和 100 mm×100 mm×15 mm)。

将水泥与生土材料进行混合,通过手动搅拌 5 min 使得材料混合均匀。向混合料中掺入混合料总质量 13%的水,通过手动快速搅拌 5 min,使混合材料达到充分润湿且干湿均匀。将混合材料倒入对应尺寸的钢制模具中,使用 NYL-60 型压力试验机(无锡建筑材料仪器机械厂生产)水泥改性生土试件压制成型。

1.3 材料性能测试

1.3.1 等温平衡含湿量

基于 GB/T 20312-2006《建筑材料及制品的湿热性能-吸湿性能的测定》^[14]对水泥改性生土材料的

等温平衡含湿量进行测试。

1) 将尺寸为 50 mm×50 mm×25 mm 的待测试件置于鼓风干燥箱中,在 105 ℃ 温度下持续干燥,当 24 h 内连续 3 次称量试件质量变化小于总质量的 0.1%,即认为试件完全干燥。

2) 将完全干燥的待测试件依次放入不同相对湿度的容器中,见图 2。

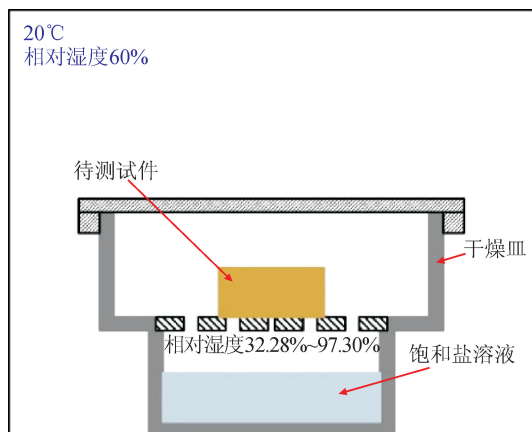


图 2 等温平衡含湿量测试示意图

Fig. 2 Process of equilibrium moisture content test

3) 每隔 24 h 将试件取出称重,当连续 3 次称重质量变化小于 0.1% 时,认为试件达到湿平衡,并将试件放置于下一相对湿度环境中。上述测试流程的相对湿度区间为 32.28%~97.30%,见表 3。

表 3 饱和盐溶液的相对湿度(25 ℃)

Tab. 3 Relative humidity of different saturated

salt solutions (25 ℃)

单位: %

溶液	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	Mg(NO ₃) ₂	CoCl ₂	KCl	K ₂ SO ₄
相对湿度	32.78	43.16	52.89	64.92	84.34	97.30

等温平衡含湿量 β 的计算为:

$$\beta = (\omega - \omega_0) / \omega_0 \quad (1)$$

式中: ω_0 为干燥状态下水泥改性生土试件的质量, g; ω 为达到湿平衡状态下水泥改性生土试件的质量, g。

1.3.2 透湿系数

基于 GB/T 17146-2015《建筑材料及制品水蒸气透过性能试验方法》^[15] 中的湿法试验对水泥改性生土材料的湿流量进行测试。

1) 将尺寸为 100 mm×100 mm×15 mm 的待测试件置于温度为 23±5 ℃、相对湿度为 50±5% 的环境中,每隔 24 h 进行称重且连续 3 次测量试件质量变化在 5% 以内,即认为试件达到恒重。

2) 将待测试件密封于装有 K₂SO₄ 饱和溶液的试验杯上,试件下表面距饱和盐溶液液面 15 mm。

3) 将测试组件置入恒温恒湿箱(LRH-70)中,恒温恒湿箱设定温度为 23±0.1 ℃,设定相对湿度为 50±1%。

4) 连续称量测试组件的质量,直至测试组件最末一次测量间隔的质量变化率小于近 5 次称量间隔质量变化率平均值的 5%。

5) 以时间为自变量、组件质量为因变量,对测试组件质量测试结果进行线性回归,其斜率即为水泥改性生土试件的湿流量 G 。

水泥改性生土材料的透湿系数 δ 按下式计算:

$$W = \frac{G}{A \times p_s \times (RH_1 - RH_2)} \quad (2)$$

$$\delta = W \times d \quad (3)$$

式中: W 为透湿率, kg/(s·m²·Pa); G 为湿流量, kg/s; A 为试件外露面积, m²; p_s 为测试温度下饱和蒸汽压, Pa; RH_1 为试验杯内相对湿度, %; RH_2 为恒温恒湿箱内相对湿度, %; d 为试件厚度, m。

1.3.3 导热系数

采用 Hot disk TPS-2500S 型导热系数仪对不同含湿量的水泥改性生土试件导热系数进行测试(试件尺寸为 50 mm×50 mm×25 mm),测试流程如下。

1) 将待测试件置于鼓风干燥箱中,105 ℃ 温度下持续干燥,直至 24 h 内连续 3 次称量试件质量变化小于总质量的 0.1%,即认为试件完全干燥。

2) 将完全干燥的待测试件依次置入相对湿度为 32.28%~97.30% 的容器中,直至试件达到湿平衡。

3) 对在不同相对湿度环境中达到湿平衡的试件进行导热系数测试,每组测试重复 3 次并取平均值,以保证测试的准确。

1.3.4 孔隙结构

采用 TriStar 3000 比表面积与孔隙度分析仪对水泥改性生土材料的比表面积和孔隙结构进行测试。基于 GB/T 208-2014《水泥密度测定方法》^[16],采用李氏瓶对水泥改性生土材料的密度进行测试,按式(4)对水泥改性生土材料孔隙率进行计算。

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (4)$$

式中: ρ_0 为表观密度, kg/m³; ρ 为密度, kg/m³。

2 性能测试结果分析

2.1 等温平衡吸湿量

图 3 为水泥改性生土材料等温平衡吸湿量随环境相对湿度的变化曲线。由图 3 可以看出,随着环境相对湿度的增大,材料基体内外两侧的水蒸气压力差逐

渐增大,水泥改性生土材料等温平衡吸湿量逐渐提高。在任一相对湿度环境中,不同水泥掺量的试件均能够在3~4 d达到吸湿平衡,说明水泥改性生土材料对环境相对湿度变化具有较高的敏感度,能够“自发地”对建筑环境进行湿度调节。此外,随着水泥掺量的增加,水泥改性生土材料等温平衡吸湿量逐渐增大,说明水泥的掺入能够有效提升生土材料对建筑湿环境的调节能力。针对这一结果,本研究对水泥改性生土材料比表面积和孔隙结构进行测试,结果见表4。

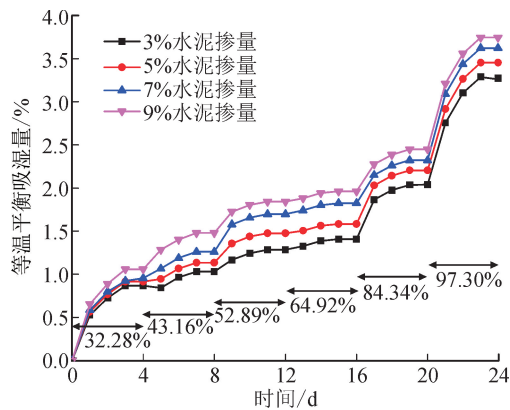


图3 水泥改性生土材料等温平衡吸湿曲线

Fig. 3 Evolution of equilibrium moisture content for cement stabilized earth brick

表4 水泥改性生土材料比表面积与孔隙结构

Tab. 4 Specific surface area and pore structure for cement stabilized earth brick

水泥掺量/%	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	微孔孔容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	介孔孔容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/nm
3	11.176 1	0.000 438	0.024 238	9.531 2
5	11.794 9	0.000 731	0.026 580	9.189 3
7	12.426 6	0.001 051	0.027 092	8.779 2
9	13.685 8	0.001 053	0.029 917	8.004 1

由表4可以看出,随着水泥掺量的增加,水泥改性生土材料的比表面积逐渐增大。作为影响材料吸湿能力的关键因素之一,比表面积越大,材料的吸湿能力越强,表现为等温平衡吸湿量越大^[17]。此外,随着水泥掺量的增加,水泥改性生土材料的微孔孔容和介孔孔容逐渐增大,且平均孔径逐渐减小,说明水泥的掺入提升了材料基体的密实度,将存在于基体内部的大孔分别转化为介孔和微孔,从而提升了材料基体的比表面积。

2.2 透湿系数

表5为不同水泥掺量下水泥改性生土材料的透湿系数和孔隙率测试值。随着水泥掺量的增加,水泥改性生土材料基体内部孔径逐渐减小的同时,基

体内部的孔隙率逐渐降低,水泥改性生土材料透湿系数也逐渐减小。说明水泥的掺入造成材料基体致密性的有效提升,基体内部大孔逐渐转化为介孔和微孔的同时,基体内部的孔隙含量降低,造成水蒸气透过材料基体的能力受到抑制。

表5 水泥改性生土材料透湿系数和孔隙率

Tab. 5 Water vapour permeability and porosity of cement stabilized earth brick

水泥掺量/%	3	5	7	9
透湿系数/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	3.36×10^{-11}	2.97×10^{-11}	2.56×10^{-11}	2.12×10^{-11}
孔隙率/%	23.67	22.62	22.04	21.71

2.3 导热系数

图4为水泥改性生土材料在不同相对湿度环境达到吸湿平衡后的导热系数测试值。随着环境相对湿度的增大,水泥改性生土材料含湿量逐渐升高(见图3),试件由固-气两相(材料基体和空气组成)转变为固-气-液三相(材料基体、空气和水组成)。由于水的导热系数约为 $0.599 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (20°C),远大于空气的导热系数(约为 $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$),因此,水泥改性生土材料导热系数随环境相对湿度的升高而显著增大。此外,与前期研究中不同水泥掺量下水泥改性生土材料导热系数较为接近的研究结果不同^[9],在一定相对湿度环境达到吸湿平衡后,随着水泥掺量的增加,水泥改性生土材料导热系数逐渐增大,这是因为高水泥掺量的水泥改性生土材料具有更加优异的吸湿能力。

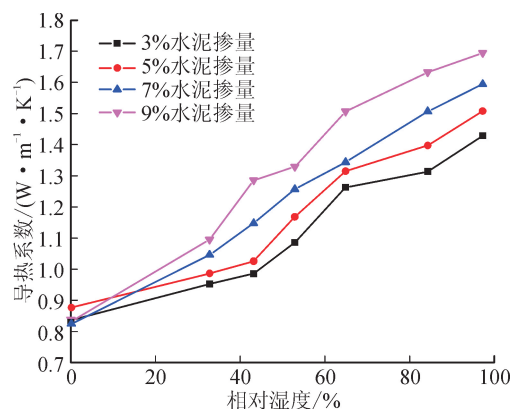


图4 不同相对湿度环境吸湿饱和和水泥改性生土材料导热系数

Fig. 4 Thermal conductivity of cement stabilized earth brick saturated at different relative humidities

3 水泥改性生土墙体温湿度分布

3.1 物理模型假设

本研究拟对水泥改性生土墙体热湿传递过程进

行数值求解,着重分析沿墙体厚度方向的热湿度分布特性,故对基本物理模型做以下假设。

1) 墙体内部固-液-气相均为连续介质,且处于热力学平衡状态。

2) 墙体材料为各向同性,密度、透湿系数等基本物性参数为常数。

3) 墙体内部气体视为理想气体。

4) 墙体热湿传递过程为沿墙体厚度方向的一维传递过程,不考虑墙体蓄热和吸湿滞后效应。

3.2 墙体热湿耦合传递模型及边界条件

本研究以温度 T 和相对湿度 φ 作为热湿传递驱动势,在 Künzel 热湿耦合传递模型的基础上^[18],考虑含水率对墙体材料导热系数的影响,建立水泥改性生土墙体热湿传递控制方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + L_v \delta \frac{\partial^2 (\varphi P_{\text{sat}})}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \xi D_w \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \delta \frac{\partial^2 (\varphi P_{\text{sat}})}{\partial x^2} \quad (6)$$

式中: ρ 为墙体材料表观密度, kg/m^3 ; C_p 为墙体材料定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ_{eff} 为墙体材料有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; L_v 为水的气化潜热, J/kg ; ξ 为墙体材料等温吸湿曲线斜率; D_w 为液态水扩散系数, m^2/s ; P_{sat} 为饱和水蒸气分压力, Pa 。

水泥改性生土材料外表面($x=l$)边界条件为:

$$-\delta \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=l} = h_{\text{me}} (\rho_{v,e} - \rho_{v,x=l}) \quad (7)$$

$$-\left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} + L_v \delta \frac{\partial (\varphi P_{\text{sat}})}{\partial x} \right) \Big|_{x=l} = \quad (8)$$

$$h_{\text{ce}} (T_e - T_{x=l}) + L_v h_{\text{me}} (\rho_{v,e} - \rho_{v,x=l})$$

水泥改性生土材料内表面($x=0$)边界条件为:

$$-\delta \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{\text{mi}} (\rho_{v,x=0} - \rho_{v,i}) \quad (9)$$

$$-\left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} + L_v \delta \frac{\partial (\varphi P_{\text{sat}})}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = \quad (10)$$

$$h_{\text{ci}} (T_{x=0} - T_i) + L_v h_{\text{mi}} (\rho_{v,x=0} - \rho_{v,i})$$

式中: h_{me} 、 h_{mi} 分别为墙体外、内表面的质交换系数, m/s ; h_{ce} 、 h_{ci} 分别为墙体外、内表面的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $\rho_{v,e}$ 、 $\rho_{v,i}$ 分别为室外、室内水蒸气密度, kg/m^3 ; $\rho_{v,x=0}$ 、 $\rho_{v,x=l}$ 分别为墙体内、外表面水蒸气密度, kg/m^3 。

3.3 模型系数的确定

求解水泥改性生土墙体热湿传递控制方程,需要对偏微分方程组中的系数项进行确定,涉及墙体材料热湿性能参数和湿组分的传递性能参数。对水泥改性生土材料力学-热湿性能进行综合分析,1 900 kg/m^3 表观密度、3% 水泥掺量下,水泥改性生

土材料抗压强度能够满足结构安全要求,同时具有较低的导热系数和良好的透湿性。因此,本研究选取 1 900 kg/m^3 表观密度、3% 水泥掺量下水泥改性生土材料热湿性能参数,确定热湿传递控制方程及其边界条件的模型系数。

3.3.1 有效导热系数 λ_{eff}

基于本研究中水泥改性生土材料导热系数随含湿量变化规律,对水泥改性生土材料导热系数测试值进行线性拟合,确定有效导热系数 $\lambda_{\text{eff}} = 0.8355 + 20.211w (R^2 = 0.903)$ 。

3.3.2 等温吸湿曲线斜率 ξ

等温吸湿曲线斜率的确定需要对水泥改性生土材料等温吸湿曲线进行数学表达。目前,常见的建筑材料等温吸湿曲线分析表达式主要包括 BET 方程^[19]、Peleg 方程^[20]、Henderson 方程^[21] 和 Caurie 方程^[22]。本研究基于上述方程,对水泥改性生土材料等温平衡吸湿量测试结果进行非线性拟合,拟和结果见表 6。

表 6 水泥改性生土材料等温平衡吸湿量拟和公式

Tab.6 Fitting formula for equilibrium moisture content of cement stabilized earth brick

公式名称	公式表达式	R^2
BET	$w = \frac{0.026\varphi}{(1 + 3.863\varphi)(1 - 0.0084)}$	0.994
Peleg	$w = 0.018\varphi^{0.753} + 0.019\varphi^{0.691}$	0.999
Henderson	$w = \left[\frac{\ln(1-\varphi)}{-475.4} \right]^{0.695}$	0.981
Caurie	$w = \exp(-5.577 + 2.152\varphi)$	0.959

由表 6 可以看出,Peleg 方程对水泥改性生土材料等温平衡吸湿曲线的拟和效果最好($R^2 = 0.999$)。因此,本研究采用 Peleg 拟和公式确定水泥改性生土材料等温平衡吸湿曲线斜率,进行墙体内部温湿度分布计算。

3.3.3 其他系数

水蒸气蒸发潜热 L_v 为^[23]:

$$L_v = (2500 - 2.4T) \times 10^3 \quad (11)$$

饱和水蒸气分压力 P_{sat} 为^[24]:

$$P_{\text{sat}} = 610.5 \times \exp\left(\frac{17.269T}{237.3 + T}\right) \quad (12)$$

液态水扩散系数 D_w 为^[25]:

$$D_w = \frac{D_v \varphi \varphi_{v,\text{sat}}}{R_v T \rho_L} \quad (13)$$

水蒸气扩散系数 D_v 为^[26]:

$$D_v = \delta R_v T \quad (14)$$

根据 Lewis 关系式,质交换系数 h_m 以对流换热

系数 h_c 的形式表达^[26]:

$$h_m = \frac{h_c}{\rho_a C_p} \quad (15)$$

水蒸气密度 ρ_v 为^[27]:

$$\rho_v = \frac{P_{\text{sat}} \varphi}{R_v (T + 273)} \quad (16)$$

3.4 模型验证

采用 HAMSTAD-benchmark 2 实例^[28] 对本研究提出的热湿耦合传递模型进行验证。该实例描述了一个 200 mm 厚各向同性材料层的等温干燥过程,材料层初始温度和初始相对湿度分别为 20 ℃ 和 95%,室外相对湿度为 45%,室内相对湿度为 65%,模拟时间为 1 000 h。

图 5 为本研究中热湿耦合传递模型模拟值与 HAMSTAD-benchmark 2 实例的对比。由图 5 可知,在模拟时长为 100 h、300 h、1 000 h 条件下,本研究模拟结果与 HAMSTAD-benchmark 2 实例具有很好的吻合度,说明本研究中提出的模型能够准确分析墙体内部的热湿迁移过程。

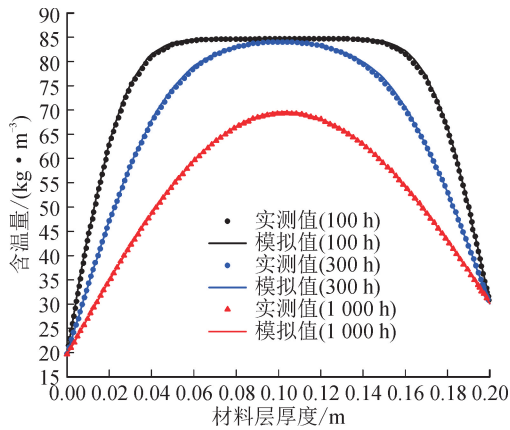


图 5 材料层内部含湿量对比分析

Fig. 5 Comparison of moisture contents inside the construction

3.5 墙体温湿度分布计算结果

采用 COMSOL Multiphysics 对 0.5 m 厚水泥改性生土墙体内部温湿度分布进行数值计算,室外计算边界分别选取《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中新疆吐鲁番冬至日和夏至日气象数据,并将室外空气温度和相对湿度逐时值近似表达为以 24 h、12 h、8 h、6 h 为周期的谐波叠加形式。

夏季室外气候条件为:

$$\begin{aligned} T = & 34.75 + 3.13 \sin\left(\frac{\pi}{12}t + 0.39\right) + \\ & 1.22 \sin\left(\frac{\pi}{6}t + 0.85\right) + 0.04 \sin\left(\frac{\pi}{4}t - 0.48\right) + \\ & 0.16 \sin\left(\frac{\pi}{3}t - 0.57\right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\varphi = 24.83 + 3.65 \sin\left(\frac{\pi}{12}t + 0.29\right) +$$

$$3.18 \sin\left(\frac{\pi}{6}t + 0.77\right) + 2.18 \sin\left(\frac{\pi}{4}t - 0.94\right) +$$

$$0.94 \sin\left(\frac{\pi}{3}t + 0.04\right)$$

(18)

冬季室外气候条件为:

$$T = -10.00 + 4.99 \sin\left(\frac{\pi}{12}t + 0.54\right) +$$

$$1.50 \sin\left(\frac{\pi}{6}t + 0.07\right) + 0.43 \sin\left(\frac{\pi}{4}t - 0.42\right) +$$

$$0.02 \sin\left(\frac{\pi}{3}t + 0.52\right)$$

(19)

$$\varphi = 67.13 + 19.73 \sin\left(\frac{\pi}{12}t + 0.40\right) +$$

$$5.79 \sin\left(\frac{\pi}{6}t + 0.06\right) + 2.58 \sin\left(\frac{\pi}{4}t + 0.63\right) +$$

$$2.75 \sin\left(\frac{\pi}{3}t + 0.58\right)$$

(20)

采用吐鲁番地区居民热中性温度(夏季 27.97 ℃、冬季 20.08 ℃)和平均湿感觉为 0 的相对湿度(夏季 33.9%、冬季 49.8%)为室内边界条件^[29],对水泥改性生土墙体在室外周期性边界条件下的温湿度分布进行数值计算。

3.5.1 夏季计算结果

图 6 表征了夏季典型气候下水泥改性生土墙体内部温度分布特性(0.0 m 为墙体内壁面,0.5 m 为墙体外壁面)。图 7 为墙体内部各位置的温度波动范围和对室外温度波幅的衰减率。

由图 6 和图 7 可以看出,在室外气候周期性波动作用下,墙体外壁面温度波动显著,24 h 内温度波幅达到 7.71 ℃。由于水泥改性生土墙体具有良好的热惰性,随着室外温度波进入墙体深度的不断增加,墙体内部温度波幅显著减小。在墙体厚度为 0.3 m 处(距墙体外壁面 0.2 m),24 h 内温度波幅仅为 1.61 ℃,对室外温度波的衰减率达到 80%。随着墙体厚度的进一步增大,室外温度波对墙体的热作用进一步减弱,墙体厚度为 0.2 m 处(距墙体外壁面 0.3 m)的温度波幅仅为 0.69 ℃。

因此,室内一侧 0.2 m 厚墙体层内部温度可近似为稳态,将墙体厚度由 0.5 m 减小至 0.3 m,能够在保证墙体隔热性能的同时,有效降低建造成本、增加室内有效使用面积。

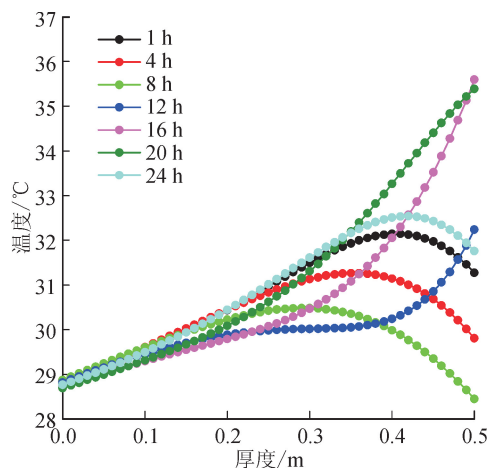


图 6 夏季水泥改性生土墙体温度分布曲线

Fig. 6 Temperature curve inside cement stabilized earth wall in summer

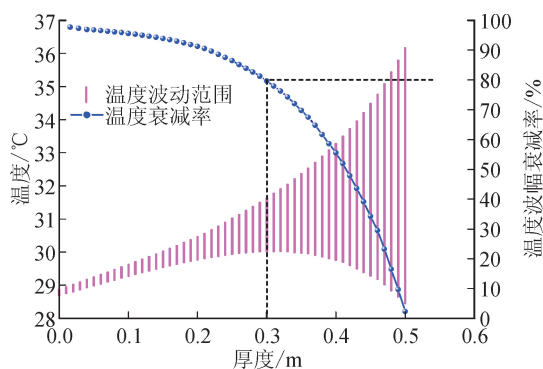


图 7 夏季水泥改性生土墙体温度波动范围及衰减率

Fig. 7 Temperature range and damping rate inside cement stabilized earth wall in summer

图 8 和图 9 分别为夏季典型气候条件下,水泥改性生土墙体内部相对湿度分布及对室外环境相对湿度波动的衰减特性。

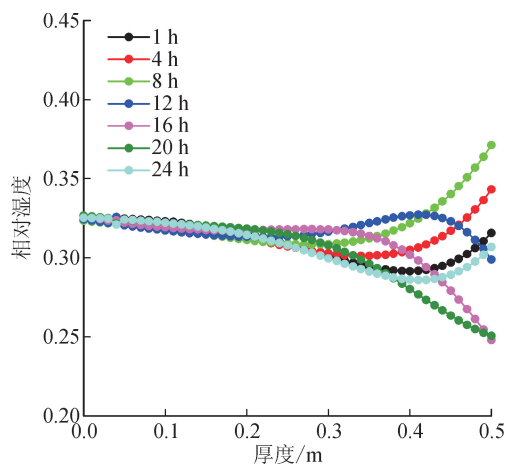


图 8 夏季水泥改性生土墙体相对湿度分布曲线

Fig. 8 Relative humidity curve inside cement stabilized earth wall in summer

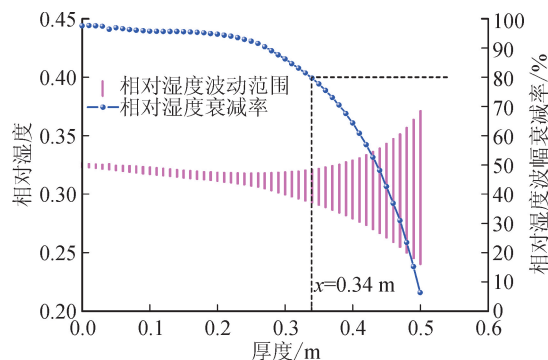


图 9 夏季水泥改性生土墙体相对湿度波动范围及衰减率

Fig. 9 Relative humidity range and damping rate inside cement stabilized earth wall in summer

由图 8 和图 9 可以看出,由于水泥改性生土材料具有良好的吸湿性,在室外环境相对湿度周期性波动作用下,靠近室外侧墙体层(0.4~0.5 m)的内部相对湿度波动明显。然而,随着环境相对湿度波动作用向墙体内部继续发展,水泥改性生土墙体对相对湿度波动的衰减作用突显。在墙体厚度为 0.34 m 处(距墙体外壁面 0.16 m),24 h 内相对湿度波幅仅为 2.85%,对环境相对湿度波动衰减率接近 80%。

因此,在新疆吐鲁番夏季典型气候条件下,0.3 m 厚水泥改性生土墙体能够具有理想的隔热和调湿性能。

3.5.2 冬季计算结果

图 10 和图 11 分别为冬季典型气候作用下,24 h 内水泥改性生土墙体内部温度和相对湿度分布曲线。

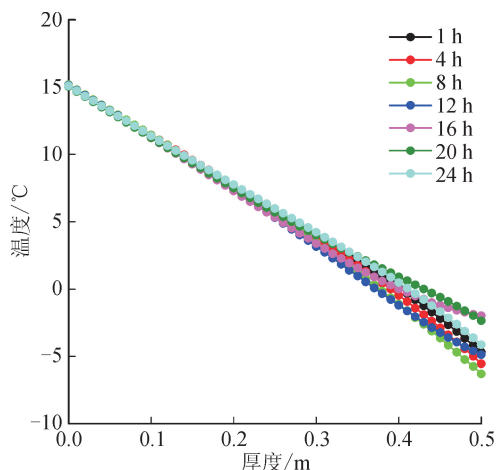


图 10 冬季水泥改性生土墙体温度分布曲线

Fig. 10 Temperature curve inside cement stabilized earth wall in winter

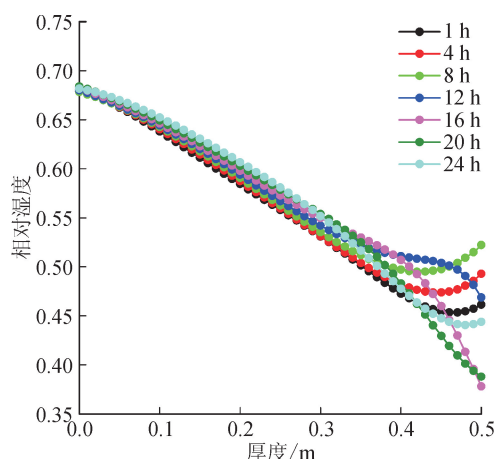


图 11 冬季水泥改性生土墙体相对湿度分布曲线

Fig. 11 Relative humidity curve inside cement stabilized earth wall in winter

由图 10 和图 11 可知,墙体内部各位置温度和相对湿度波动幅度明显小于夏季,且各时刻墙体内部各位置温度近似呈线性分布,说明该结果与采用冬季室外日平均温度计算墙体内部温度分布结果相差不大。此外,水泥改性生土墙体温度分布曲线具有较大的斜率,减小墙体厚度将会导致墙体内壁面温度显著降低,导致冬季采暖能耗升高的同时,容易对居住者造成冷辐射,降低居住热舒适水平。因此,在采用轻薄型生土墙体构件建造生土民居的实际工程中,应考虑对生土外墙进行必要的保温处理。

4 结 论

本文以新疆吐鲁番地区生土材料为基材,制备水泥改性生土材料并对其热湿性能参数进行实验测试,通过建立一维非稳态热湿耦合传递模型并数值求解,分析了冬夏两季水泥改性生土墙体在室外气候周期性波动下的墙体内部温湿度分布特性。主要结论为如下。

1) 水泥改性生土材料具有良好的调湿能力,水泥的掺入增大了材料比表面积以及微孔和介孔孔容,提升了材料的吸湿能力。但是,水泥改性生土材料孔隙率随水泥掺量的增大而降低,抑制了水蒸气的透过性。

2) 由于水泥的掺入提高了生土材料的吸湿能力,因此,随着环境相对湿度的增大,高水泥掺量下水泥改性生土材料导热系数提升效果更为明显。

3) 夏季典型气候下,水泥改性生土墙体对室外温度和相对湿度波动衰减作用显著,0.3 m 厚水泥改性生土墙体能够具有理想的隔热和调湿性能。

4) 冬季典型气候下,水泥改性生土墙体内部温度和相对湿度波动幅度明显小于夏季,且减小墙体

厚度将会导致墙体内壁面温度显著降低,需考虑对生土外墙进行必要的保温处理。

参考文献:

- [1] SAMEH S H. Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65: 362-373.
- [2] 刘俊霞,海然,张茂亮,等. 植物纤维增强生土材料结构与性能[J]. 建筑材料学报,2016,19(6):1068-1072.
LIU Junxia, HAI Ran, ZHANG Maoliang, et al. Structure and properties of stabilized earth materials modified by plant fiber[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 1068-1072.
- [3] 钱觉时,尹道道,郁东兴,等. 聚羧酸减水剂对改性生土材料性能的影响[J]. 建筑材料学报,2019,22(3):378-384,400.
QIAN Jueshi, YIN Daodao, YU Dongxing, et al. Effect of polycarboxylate water reducing agent on performance of modified adobe[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 378-384, 400.
- [4] 沈万岳. 基于正交试验的生土改性材料最优配合比及其改性机理研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(11):3712-3716.
SHEN Wanyue. Research on optimum mix proportion and modification mechanism of raw soil materials based on orthogonal tests[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11): 3712-3716.
- [5] ZAK P, ASHOUR T, KORJENIC A, et al. The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 179-188.
- [6] 张磊,杨柳,麻向龙,等. 冻融循环作用下改性生土材料强度特性研究[J]. 硅酸盐通报,2016,35(7):2094-2100.
ZHANG Lei, YANG Liu, MA Xianglong, et al. Strength characteristic of stabilized earth material under freezing and thawing cycle[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(7): 2094-2100.
- [7] KARIYAWASAM K K G K D, JAYASINGHE C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 519-527.
- [8] TOURÉ P M, SAMBOU V, FAYE M, et al. Mechanical and hurothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB)[J]. Journal of Building Engineering, 2017, 13: 266-271.
- [9] ZHANG Lei, GUSTAVSEN A, JELLE B P, et al. Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks

- [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 504-511.
- [10] 杨永,张楠,张磊,等.改性材料对生土砌块湿热性能的影响研究[J].建筑材料学报,2021(2):313-317,361.
YANG Yong, ZHANG Nan, ZHANG Lei, et al. Influence of modified materials on hygrothermal properties of raw soil block [J]. Journal of Building Materials, 2021(2): 313-317, 361.
- [11] 马军涛,王大广,陈浩,等.复杂环境下水泥改性生土砌块的导热系数及抗压强度分析[J].新型建筑材料,2019,46(12):113-116.
MA Juntao, WANG Daguang, CHEN Hao, et al. Analysis of thermal conductivity and compressive strength of cement modified raw soil blocks in complex environment[J]. New Building Materials, 2019, 46 (12): 113-116.
- [12] 刘大龙,赵辉辉,刘向梅,等.不同含水率下生土导热系数测试及对建筑能耗的影响[J].土木建筑与环境工程,2017,39(1):20-25.
LIU Dalong, ZHAO Huihui, LIU Xiangmei, et al. Thermal conductivity test of adobe materials with different moisture content and its effect on building energy consumption[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2017, 39(1): 20-25.
- [13] 张磊,桑国臣.基于正交试验制备生土基复合墙体材料及其热湿综合性能分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):372-380.
ZHANG Lei, SANG Guochen. Hygrothermal comprehensive property of soil based composite wall materials prepared with orthogonal experimental design [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 372-380.
- [14] 中国国家标准化管理委员会.建筑材料及制品的湿热性能-吸湿性能的测定:GB/T 20312-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [15] 中国国家标准化管理委员会.建筑材料及制品水蒸气透过性能试验方法:GB/T 17146-2015[S].北京:中国质检出版社,2016.
- [16] 中国国家标准化管理委员会.水泥密度测定方法:GB/T 208-2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [17] LIUZZI S, HALL M R, STEFANIZZI P, et al. Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate [J]. Building and Environment, 2013, 61: 82-92.
- [18] KÜNZEL H M, KIESSL K. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1997, 40 (1): 159-167.
- [19] IEA Annex 24. Heat air and moisture transfer through new and retrofitted insulated envelope parts[M]. IEA, 1996.
- [20] PELEG M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms[J]. Journal of Food Process Engineering, 1993, 16(1): 21-37.
- [21] HENDERSON S M. A basic concept of equilibrium moisture [J]. Agricultural Engineering, 1952, 33: 29-32.
- [22] CAURIE M. A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods[J]. International Journal of Food Science + Technology, 1970, 5(3): 301-307.
- [23] 周淑贞,张如一,张超.气象学与气候学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [24] BRANCO F, TADEU A, SIMÕES N. Heat conduction across double brick walls via BEM[J]. Building and Environment, 2004, 39(1): 51-58.
- [25] VALEN M S. Moisture transfer in organic coatings on porous materials[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [26] 王莹莹.围护结构湿迁移对室内热环境及空调负荷影响关系研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
WANG Yingying. Research on the effect of the palisade structure moisture transfer on the indoor thermal environment and air-conditioning load[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [27] 廉乐明,李力能,吴家正.工程热力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [28] HAGENTOFT C E. HAMSTAD-Final report; methodology of HAM-modeling, Report R-02: 08 [R]. Gothenburg, Department of Building Physics, Chalmers University of Technology, 2002.
- [29] 任艺梅,杨柳,郑武幸.吐鲁番地区民居人体适应性热舒适评价研究[J].暖通空调,2017,47(8):109-115.
REN Yimei, YANG Liu, ZHENG Wuxing. Adaptive thermal comfort evaluation for residential buildings in Turpan[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(8): 109-115.

(责任编辑 王绪迪)