

文章编号:1007-9629(2023)08-0931-08

两种坡缕石基复合调湿材料的热湿性能测定与比较

冯琳, 赵蕾*, 亓家伟, 王飞

(西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 鉴于调湿材料的热湿物性决定着其热湿传递行为, 研制了 2 种新型坡缕石基复合调湿材料——坡缕石基亚麻纤维材料(FP)和坡缕石基木质纤维材料(WFP), 全面测量了这 2 种复合调湿材料的水蒸气渗透系数、等温吸附曲线和湿扩散率等关系到其吸放湿能力和热湿传递特征的物性参数, 探究了材料厚度和相对湿度上下限对复合调湿材料湿缓冲值的影响。结果表明: 材料越厚, 相对湿度区间越高, 复合调湿材料的吸放湿能力就越强; 厚度为 2.5 cm 的 FP 和 WFP 的湿缓冲值分别达到 2.83、3.11 g/(m²·%)。

关键词: 复合调湿材料; 热湿性能; 湿缓冲能力; 湿渗透深度

中图分类号: TU599

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.014

Tests and Comparison of Hygrothermal Properties of Two Kinds of Palygorskite-Based Composite Humidity Control Materials

FENG Lin, ZHAO Lei*, QI Jiawei, WANG Fei

(School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In view of the fact that the hygrothermal properties of humidity control materials determine their heat and moisture transfer behavior, two new palygorskite-based composite humidity control materials, namely palygorskite based flax fiber material (FP) and palygorskite based wood fiber material (WFP) were developed. The water vapor permeability coefficient, isothermal adsorption curve, moisture diffusivity and other physical parameters related to the moisture absorption and release capacity and heat and humidity transfer characteristics of two materials were measured. The influence of humidity control material thickness and upper and lower limits of relative humidity on the moisture buffer value were explored. The results show that the thicker the composite humidity control material, the higher the relative humidity range, the stronger its moisture absorption and desorption ability. The moisture buffer values of FP and WFP with a thickness of 2.5 cm reach 2.83, 3.11 g/(m²·%), respectively.

Key words: composite humidity control material; hygrothermal property; moisture buffer capacity; moisture penetration depth

室内热湿环境直接影响人体热舒适感和建筑围护结构的寿命, 相对湿度过高会对人体产生不良影响, 使围护结构受潮、发霉等^[1-3]。通过被动技术来改善室内热湿环境、调节相对湿度已得到研究和关注。被动式建筑室内不敷设湿缓冲材料时相对湿度较

高, 影响建筑的耐久性、房屋的寿命和空调能耗^[4]。胡明玉等^[5]研究表明, 敷设有 C₃N₄(g相)-TiO₂/硅藻土/泥炭藓复合调湿材料可以降低实验小室的湿度波动幅度。

单一的天然材料吸放湿能力较差, 多种材料复

收稿日期: 2022-10-15; 修订日期: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878535)

第一作者: 冯琳(1996—), 男, 甘肃天水人, 西安建筑科技大学硕士生。E-mail: fenglin@xauat.edu.cn

通讯作者: 赵蕾(1971—), 女, 陕西西安人, 西安建筑科技大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zhaolei@xauat.edu.cn

合改性可以提高湿缓冲能力. 胡明玉等^[6]通过改性海泡石黏土,使其吸湿速率变大,吸湿能力变强. 制备复合调湿材料时主要依据原材料吸放湿能力的强弱,兼顾其美观性、强度和易获取程度. 鉴于天然坡缕石不仅是建筑中常用的隔热绝音的优秀材料,且具有良好的吸湿能力^[7];亚麻纤维因内部结构疏松而具有优秀的水分输送能力^[8];木质纤维是一种絮状有机物,能够吸附自身质量6~8倍的水分^[9]. 本文以坡缕石为基材,以石膏为黏结剂,同时添加亚麻纤维或木质纤维,制备得到2种生物质复合调湿材料. 依据 ISO 12571: 2021《Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of hygroscopic sorption properties》和 ASTM C1498—2004a(R2016)《Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials》,全面系统地测定这2种材料的热湿物性参数和湿缓冲能力,比较了它们在湿行为方面的差异和优劣,旨在为调控建筑室内温湿环境提供可靠的实测数据.

1 试验

1.1 样品制备

坡缕石(P308)和石膏(ZT303),购于河北灵寿县德航矿产品公司,其中坡缕石的主要成分为 $(Mg, Al)_5[(OH)_2(Si, Al)_8O_{20}] \cdot 8H_2O$,呈白色粉末状;石膏的主要成分为二水硫酸钙($Ca_2SO_4 \cdot 2H_2O$),呈淡红色粉末状. 亚麻纤维(Y-500)和木质纤维(H-1000),购于河北石家庄市创盛建材科技公司,其中亚麻纤维主要取自亚麻的茎叶部分;木质纤维是有机灰色絮状纤维物质,由天然可再生木材经化学处理、机械加工而成,木质纤维含量(质量分数)不小于99%. 由于较小的亚麻纤维碎片吸湿能力更强,更易与其他材料充分混合成型^[10],力学强度更高,故将亚麻纤维研磨成0.1~0.5 mm的粉末. 上述4种原材料的实物照片见图1. 采用扫描电子显微镜(SEM)观察其微观结构,SEM照片见图2.

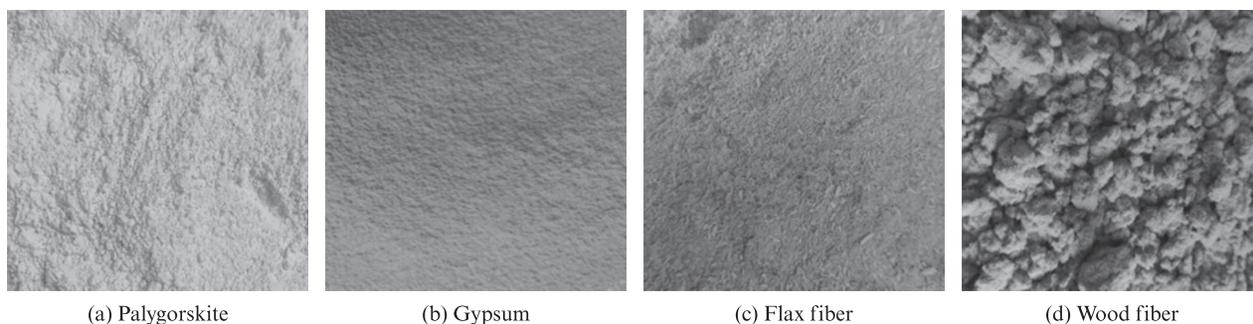


图1 4种原材料的实物照片
Fig. 1 Physical photos of four kinds of raw materials

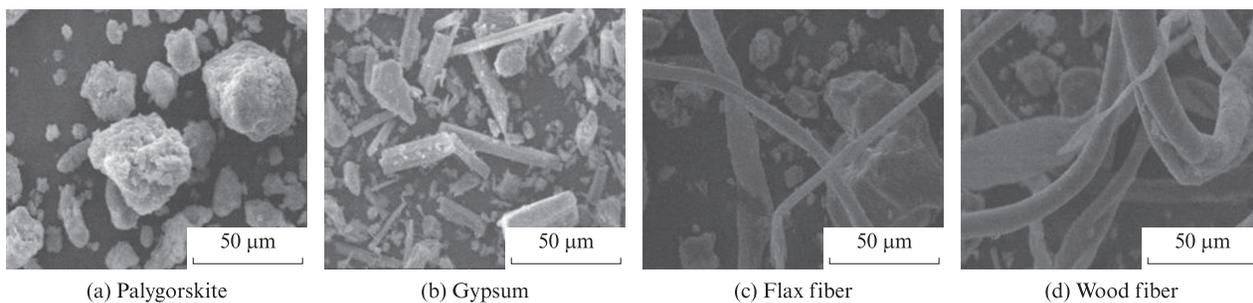


图2 4种原材料的SEM照片
Fig. 2 SEM images of four kinds of raw materials

采用SEM分析坡缕石和石膏的粒径分布,采用高性能比表面积及微孔分析仪(BPD-PM)测试4种原材料的孔径,结果见表1、2. 先将石膏、坡缕石与亚麻纤维或木质纤维按质量比10:9:1进行混合,再使用旋转桨式搅拌机充分搅拌,使之混合均匀,依照 ISO 12571: 2021 要求,制成直径为10 cm、厚度为

1 cm的圆柱形坡缕石基麻纤维材料(FP)和坡缕石基木质纤维材料(WFP)试样,其外观见图3. 先将试样在105℃下烘干48 h,测量其干重;再将其置于23℃且相对湿度(φ)为33%的环境中,测量并记录其质量,直至达到恒定. 使用全自动真密度及孔隙率分析仪(BSD-TD-K)测量FP和WFP的孔隙率(n)分别

为(42±1.4)%和(45±1.7)%,相应的真密度(ρ_{re})分别为(2 370±30)、(2 385±35) kg/m³.

表1 坡缕石和石膏的粒径分布

Table 1 Particle diameter distribution of palygorskite and gypsum

Material	Particle diameter distribution/%					
	0-10 μm	10-20 μm	20-30 μm	30-40 μm	40-50 μm	50-60 μm
Palygorskite	24.0	45.0	17.0	8.0	0	6.0
Gypsum	38.5	39.0	11.0	6.5	5.0	0

表2 4种原材料的孔径

Table 2 Pore size of four kinds of raw materials

Material	Average pore/nm	Most available pore/nm
Gypsum	9.040 3	3.953 6
Palygorskite	9.717 1	4.154 1
Flax fiber	14.482 3	1.802 5
Wood fiber	33.566 4	4.154 8



(a) FP



(b) WFP

图3 2种坡缕石基复合调湿材料试样外观

Fig. 3 Appearance of two kinds of palygorskite-based composite humidity control materials

1.2 试验理论与方法

1.2.1 热物性参数的测定

使用热扩散系数测定仪 LFA-467 (精度: ±0.01 mm²/s) 和 NETZSCH STA 449F3 型差示扫描量热仪 (精度: ±0.05%), 在室温下测定干燥且冷却的 FP 和 WFP 试样的热扩散率 (α , m²/s) 和比定压热容 (c_p , J/(kg·K)). 根据式(1)确定试样的热物性参数.

$$\rho c_p = \frac{\lambda}{\alpha} \quad (1)$$

式中: ρ 为试样密度, kg/m³; λ 为试样的导热系数, W/(m·K).

1.2.2 水蒸气渗透系数和汽阻因子的测定

表3为饱和盐溶液与相对湿度对应表. 利用表3所示的饱和盐溶液, 使干、湿杯中的相对湿度分别保持在 12% 和 97%. 根据 ISO12571:2021, 用干、湿杯法测量试样对水蒸气的渗透性. FP 和 WFP 试样分别被蜡封装在干、湿杯的顶部, 保持试样内表面与饱和盐溶液液面间存在 3 cm 厚的空气层; 将干、湿杯放入 23 °C、相对湿度 54% 的密闭箱中, 装置示意图见图4. 用 Navigato 天平 (精度 ±0.01 g) 测量试样质量, 直至质量变化稳定. 由式(2)、(3)间接测得试样的水蒸气渗透系数 (δ , kg/(m·s·Pa))^[11-13].

$$g_v = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{l}{\frac{\Delta P_v}{g_v/A} - (Z_{p,in} + Z_{p,out} + Z_{p,air})} \quad (3)$$

式中: g_v 为水蒸气的质量流量, kg/s; Δm 为试样的质量变化量, kg; Δt 为时间间隔, s; l 为试样厚度, m; A 为透过水蒸气的试样表面积, m²; ΔP_v 为试样两侧水蒸气分压力差, Pa; $Z_{p,air}$ 为空气层的水蒸气阻力, $Z_{p,air} = \frac{d_a}{\delta_a}$, 其中 d_a 为盐溶液与试样之间空气层的厚度, m, δ_a 为空气中的水蒸气扩散系数, 一般取为 2×10^{-10} kg/(Pa·m·s); $Z_{p,in}$ 、 $Z_{p,out}$ 分别为试样内、外表面的水蒸气阻力, (Pa·m·s)/kg.

表3 饱和盐溶液与相对湿度对应表

Table 3 Corresponding table of saturated salt solutions and corresponding relative humidity formed

Saturated salt solution	φ /%	Error /%	Saturated salt solution	φ /%	Error /%
LiCl	12.33	±0.51	NaCl	75.36	±0.13
MgCl ₂ ·6H ₂ O	32.90	±0.17	KCl	84.65	±0.27
NaBr	53.49	±0.22	K ₂ SO ₄	97.42	±0.47

根据测量结果, 采用式(6)计算 FP 和 WFP 的汽阻因子 (μ):

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (6)$$

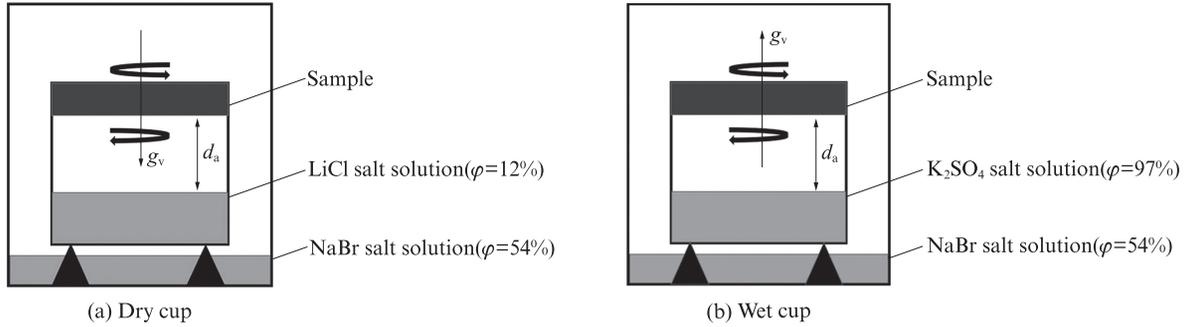


图4 水蒸气渗透系数的测量装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring device for water vapor permeability coefficient

1.2.3 等温吸附线和湿扩散率的测定

采用DVS动态吸附法,测量试样在23℃且相对湿度为33%、54%、75%、85%和95%环境中的含水量(质量分数).采用式(7)计算各相对湿度下试样的平衡含水量(w , kg/m²),得到等温吸附线.

$$w = \frac{m - m_0}{V} \quad (7)$$

式中: m_0 和 m 分别为试样的初始质量和动态质量,kg; V 为试样的体积,m³.

根据式(8)计算试样的湿扩散率(D_w , m/s),以了解蒸汽压梯度作用下材料内部的水蒸气传输速率.

$$D_w = \frac{\delta p_{\text{sat}}}{\partial w / \partial \varphi} \quad (8)$$

式中: p_{sat} 为饱和水蒸气压力,Pa; $\partial w / \partial \varphi$ 为吸附等温线的斜率,kg/m³.

1.2.4 湿缓冲能力的测定

调湿材料在动态热湿环境中的湿行为由其湿缓冲能力决定.迄今,湿缓冲能力主要用于计算稳定环境状态下的湿缓冲值——理想湿缓冲值(η_{id} , g/(m²·%))^[13-14]和ISO 24353: 2008《Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation》规定的动态试验测量得到的实际湿缓冲值(η_{pra} , g/(m²·%))2种方法得到.

(1) 理想湿缓冲值(η_{id})和湿渗透深度($d_{p,1\%}$)

η_{id} 可以反映周围环境中空气湿度发生变化时材料的吸放湿能力^[15-16],其计算表达式为:

$$\eta_{\text{id}} = \frac{G(t)}{\Delta \varphi} \approx 0.00568 p_{\text{sat}} \cdot b_m \cdot \sqrt{t} \quad (9)$$

式中: $G(t)$ 为材料的湿积累量,g/m²; $\Delta \varphi$ 为吸放湿过程周围环境湿度上下限差值,%; b_m 为湿溢出率, $b_m =$

$\sqrt{\frac{\delta \cdot \partial w / \partial \varphi}{p_{\text{sat}}}}$,反映材料表面相对湿度突然变化时与周围

环境的湿交换能力,kg/(m²·Pa·s^{1/2}); t 为周期时长,s.

通常以 $d_{p,1\%}$ (m),即含水率变化幅度不超过表面振幅1%的深度^[16]为参考值,来确定试样厚度,其计算表达式为:

$$d_{p,1\%} = 4.61 \sqrt{\frac{D_w \cdot t}{\pi}} \quad (10)$$

(2) 实际湿缓冲值(η_{pra})和材料厚度(l)

依照ISO 24353: 2008,将2种试样以12 h/12 h的时长交替置于相对湿度为53%/75%和75%/95%的环境中,并将密封箱置于恒温箱内,保证温度稳定在(23±1)℃,以测定试样的湿缓冲能力. η_{pra} 的计算表达式为:

$$\eta_{\text{pra}} = \frac{\Delta m}{S \cdot \Delta \varphi} \quad (11)$$

式中: S 为试样与周围环境的湿交换面积,m².

鉴于试样厚度会影响其湿缓冲值,且已有研究表明试样厚度越大,湿缓冲值(η)越高^[17],本试验制作了0.5、1.0、1.5、2.5 cm这4种厚度的圆柱形FP和WFP试样.各试样只保留1个底面进行吸放湿试验,其余各面均采用铝箔纸密封,在保证各试样湿交换面积(S)相同的条件下,测试其 η_{pra} .

2 结果与讨论

2.1 导热系数、热扩散率和比定压热容

FP和WFP的导热系数(λ)、热扩散率(α)和比定压热容(c_p)见表4.

2.2 水蒸气渗透系数和汽阻因子

湿杯和干杯质量的动态变化曲线如图5所示.由图5可见:FP的干杯和湿杯质量变化分别在第6 d和第9 d达到恒定,WFP的干杯和湿杯质量变化分别在第9 d和第7 d达到恒定;2种试样的干杯质量均随时间推移而增加,而湿杯质量随时间推移而减小.这是因为密封箱内的相对湿度在干杯中较高,水蒸气会通过试样扩散到干杯中;而湿杯反之.

表4 FP和WFP的热物性参数
Table 4 Thermophysical parameters of FP and WFP

Sample	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\alpha \times 10^8/(m^2 \cdot s^{-1})$	$c_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
FP	0.10-0.02	5.41-5.43	1360-1380	1437
WFP	0.11-0.13	6.96-6.98	1140-1160	1536

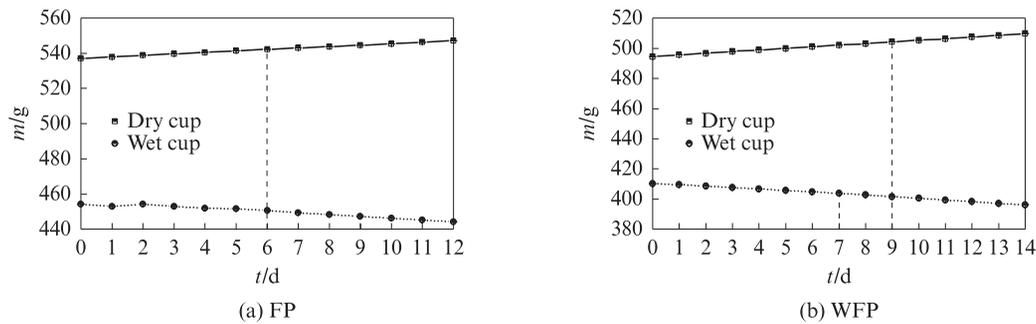


图5 干杯和湿杯质量的动态变化曲线

Fig. 5 Dynamic mass variations of dry and wet cups

FP和WFP的水蒸气渗透系数(δ_p)和汽阻因子(μ)见表5.

表5 水蒸气渗透系数和汽阻因子
Table 5 Water Vapor permeability coefficient and resistance factor

Sample	$\delta_p \times 10^{11}/(kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1})$		μ	
	Dry cup	Wet cup	Dry cup	Wet cup
FP	1.12	1.73	16.76	11.64
WFP	1.60	1.84	12.55	10.87

由表5可见:采用干杯法测得的2种试样的水蒸气渗透系数均小于湿杯法,采用前者测得的FP和WFP的水蒸气渗透系数较后者小35.2%和10.7%;采用干杯法和湿杯法测得的WFP的汽阻因子均小于FP.直观上是因为WFP的水蒸气渗透系数大于FP;从材料角度分析,WFP和FP的孔隙率分别为(45.0±1.7)%和(42.0±1.4)%,平均孔径分别为33.5664、14.4823 nm,较大的孔隙率和孔径使WFP的水蒸气运输能力较强,导致WFP的水蒸气渗透系数高于FP.

2.3 等温吸附线和湿扩散率

对比多种平衡含水量(w)与相对湿度(φ)的关联式^[15-16]后,选用式(12)拟合二者的关系.

$$w = \exp(a \cdot \varphi^b + c \cdot \varphi^d) \quad (12)$$

式中: a 、 b 、 c 和 d 为待定系数,通过多元回归分析确定.

表6列出了 w 与 φ 拟合曲线中的待定参数 a 、 b 、 c 和 d 的值.

图6为FP和WFP的等温吸附曲线.由图6可见,FP和WFP这2种材料的吸附曲线非常接近,在5

表6 拟合曲线中的待定系数 a 、 b 、 c 和 d 的值

Table 6 Values of undetermined coefficient a , b , c and d of fitted curves

Sample	a	b	c	d
WFP	0.449±0.132	5.899±3.189	5.031±0.155	0.174±0.361
FP	0.437±0.326	3.378±2.666	5.009±0.339	0.154±0.059

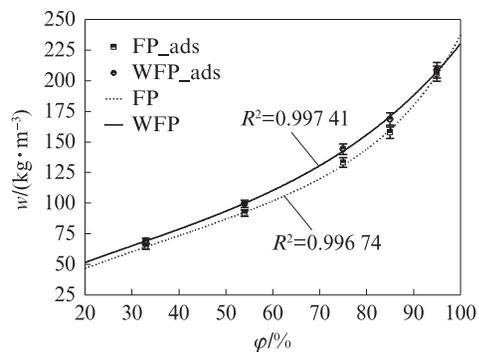


图6 FP和WFP的等温吸附曲线

Fig. 6 Isothermal adsorption curves of FP and WFP

种相对湿度下,WFP的平衡含水量(WFP_{ads})比FP的平衡含水量(FP_{ads})高1.28%~11.90%,相应的平衡含水量差值为2.68~11.33 kg/m³.这可能由于尽管FP和WFP的基材一致,但木质纤维的平均孔径远大于亚麻纤维,较大的孔径可能更有利于水蒸气的运输,从而导致2种材料平衡含水量有所不同.其他学者在研究油菜秸秆混凝土和大麻石灰混凝土时也有类似现象发生^[17].由图6还可见,当相对湿度达到95%以上时,FP和WFP二者的吸湿曲线已接近重合,均有显著的毛细冷凝现象发生,故等温吸湿曲线出现垂直渐近线.

图7为FP和WFP的湿扩散率和吸附曲线斜率随相对湿度的变化曲线.由图7(a)可见,FP和

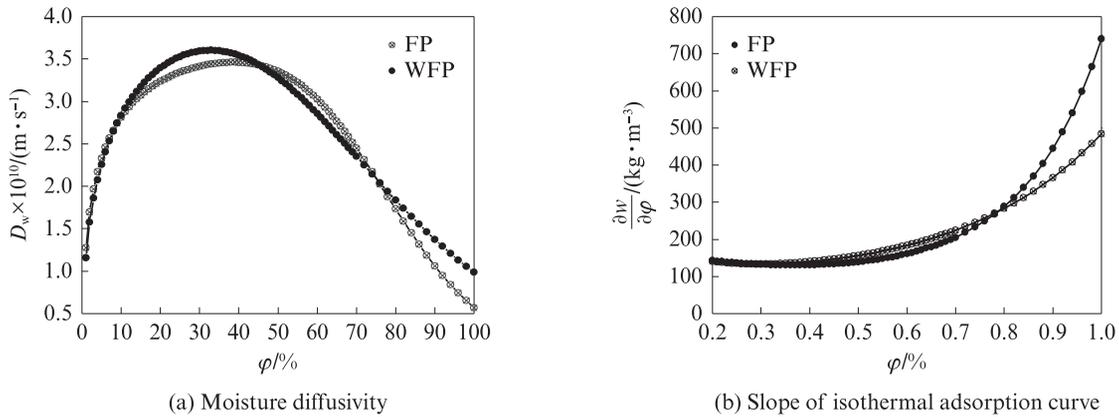


图7 FP和WFP的湿扩散率和吸附曲线斜率随相对湿度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of moisture diffusivities and slopes of isothermal of isothermal adsorption curves vs. relative humidity of FP and WFP

WFP这2种材料的湿扩散率(D_w)曲线很接近,均呈现先增后减的规律.这是由于两者的等温吸附曲线斜率(图7(b))及水蒸气渗透系数(表5)比较接近,且当相对湿度较低时(对于FP, $\phi \leq 42\%$;对于WFP, $\phi \leq 31\%$),水蒸气扩散主导湿传递过程,而当相对湿度较高时(对于FP, $\phi > 42\%$;对于WFP, $\phi > 31\%$),发生了毛细冷凝,从而使液态水的运输成为主导,材料内部形成湿阻,且相对湿度越高,湿阻越大.这与Liuzzi等^[18]研究橄榄纤维黏性石膏时的现象类似.

2.4 湿缓冲能力

2.4.1 理想湿缓冲值和湿渗透深度

依据式(9)、(10)计算得到FP和WFP试样的 η_{id} 分别为4.41、4.53 g/(m²·%), $d_{p,1\%}$ 分别为1.42、1.38 cm;WFP的 η_{id} 略高于FP,而 $d_{p,1\%}$ 略低于FP.

2.4.2 试样厚度及相对湿度区间对实际湿缓冲值的影响

4种厚度(0.5、1.0、1.5、2.0 cm)的FP和WFP

试样在相对湿度区间为54%~75%和75%~95%下的 η_{pra} ,见图8.由图8可见:(1)无论哪种厚度,2种试样的 η_{pra} 均小于其 η_{id} .试样越厚,相应的 η_{pra} 也越大.当试样厚度由1.5 cm增至2.5 cm时,FP的 η_{pra} 增大15%,WFP的 η_{pra} 增大29%.(2)FP和WFP在相对湿度区间为75%~95%下的 η_{pra} 较相对湿度区间54%~75%大,即在高湿环境中它们具有更强的湿缓冲能力.这可以通过它们的平衡含水量随着相对湿度增加而快速增加来解释(图(6)).图9、10为厚度为2.5 cm的FP和WFP试样在吸放湿过程中的质量变化曲线.由图9、10可见:随着时间的延长,2种试样的质量变化曲线均逐渐抬升,即吸湿曲线和放湿曲线存在一定差别,表明材料的吸放湿量受周围空气环境湿度和材料本身初始含水量影响.此外,试样的厚度超过 $d_{p,1\%}$ 后, η_{pra} 仍增加,说明实际湿渗透深度大于 $d_{p,1\%}$.可见, η_{pra} 必须综合考虑材料的实际厚度和所处环境的湿度.

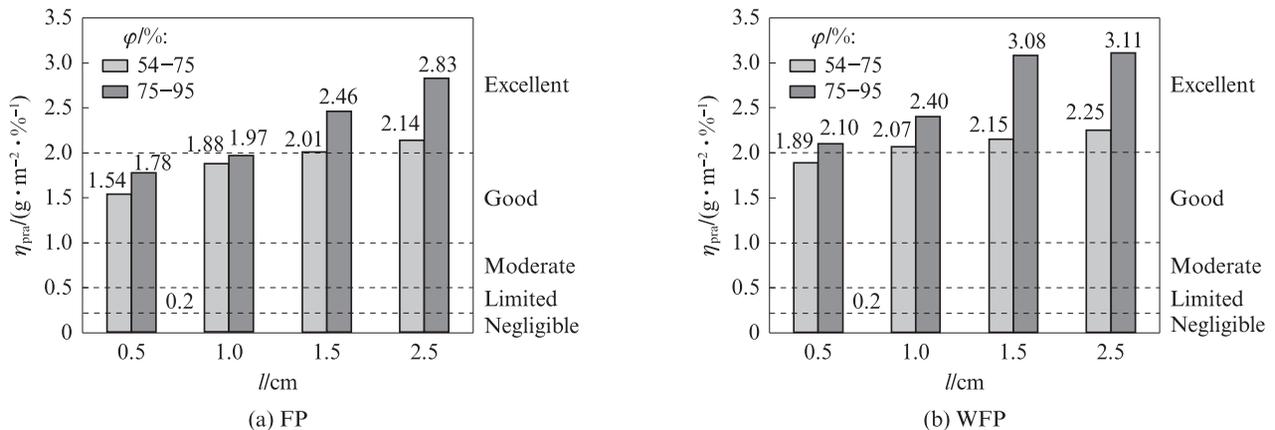


图8 不同厚度试样的实际湿缓冲值

Fig. 8 η_{pra} of samples of different thicknesses

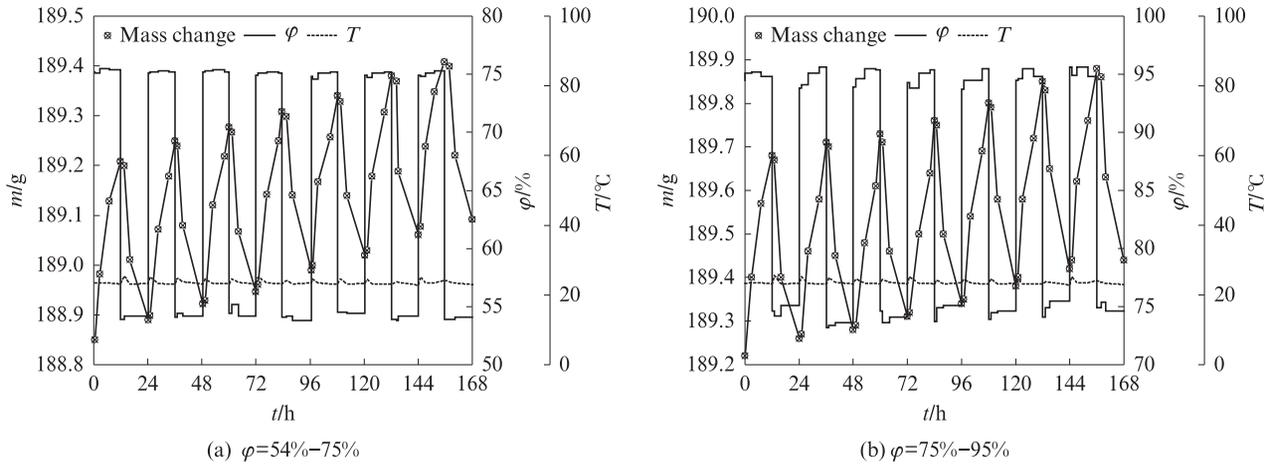


图9 阶跃变化的相对湿度环境中2.5 cm厚的FP试样的吸放湿量变化

Fig. 9 Moisture adsorption and desorption quantity of FP sample of 2.5 cm thick in the environment with alternative step change in relative humidity

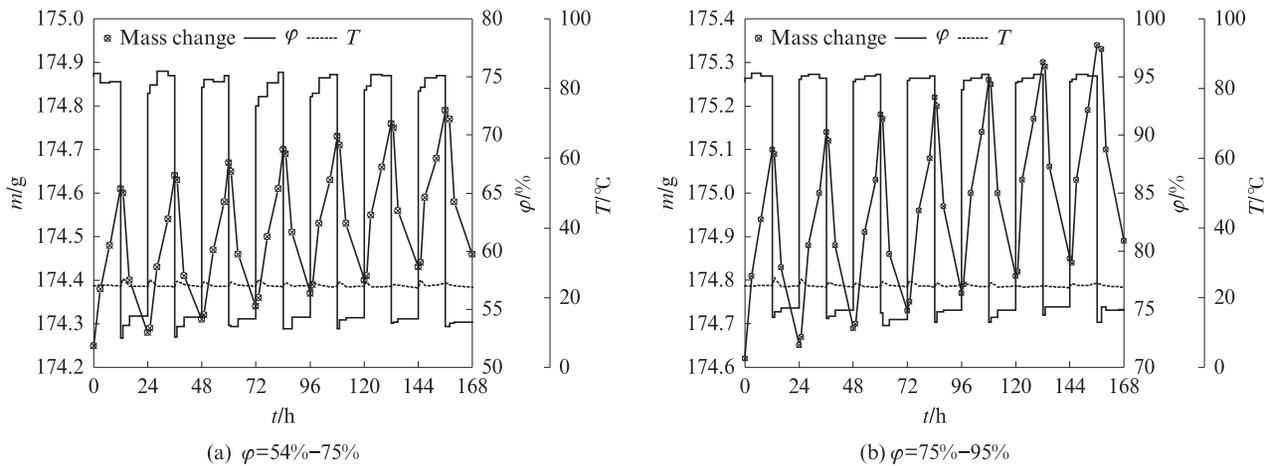


图10 阶跃变化的相对湿度环境中2.5 cm厚的WFP试样的吸放湿量变化

Fig. 10 Moisture adsorption and desorption quantity of WFP sample of 2.5 cm thick in the environment with alternative step change in relative humidity

2.4.2 湿缓冲性能对比

表7为各种材料的湿缓冲值(η)^[17]和厚度.由表7可见:混凝土的 η 值只有0.35 g/(m²·%),而麻石灰混凝土(HLC)和油菜秸秆石灰混凝土(SLC)的 η 值分别达到2.02、2.59 g/(m²·%),FP和WFP的 η 值更高,说明植物纤维的添加的确能够改善混凝土的湿缓冲能力;FP和WFP不仅表现出“优秀”的湿缓冲能力,而且材料厚度最薄.因此本试验研发的调湿材料FP和WFP在经济性和工程实践上均是比较理想的.

表7 各种材料的湿缓冲值和厚度

Table7 Moisture buffering values and thicknesses of various materials

Material	$\eta / (g \cdot m^{-2} \cdot \%^{-1})$	l / cm	Material	$\eta / (g \cdot m^{-2} \cdot \%^{-1})$	l / cm
Gypsum	0.26		SLC	2.59	7.0
Concrete	0.35		FP	2.83	2.5
HLC	2.02	7.0	WFP	3.11	2.5

3 结论

(1)研发了2种新型生物基材料——坡缕石基亚麻纤维材料(FP)和坡缕石基木质纤维材料(WFP),并测定了其热湿物性参数.与FP相比,WFP的孔隙率更大,水蒸气渗透系数、平衡含水量和湿扩散率均较高.

(2)WFP和FP越厚,其实际湿缓冲值(η_{pra})越大;当材料厚度大于湿渗透厚度($d_{p,1\%}$)时, η_{pra} 仍会增加,但增幅小于材料厚度小于 $d_{p,1\%}$ 时. $d_{p,1\%}$ 只可作为一个估计值供工程实践参考.

(3)WFP的吸放湿性能优于FP,同等厚度下,前者的 η_{pra} 比后者高;2种坡缕石基复合材料在高相对湿度下的 η_{pra} 均高于低相对湿度下的 η_{pra} ;当相对湿度区间为75%~95%时,FP和WFP的湿缓冲能力评价等级均达到“优秀”,湿缓冲能力更强.

参考文献:

- [1] HAVERINEN-SHAUGHNESSY U, TOIVOLA M, ALM S, et al. Personal and microenvironmental concentrations of particles and microbial aerosol in relation to health symptoms among teachers [J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2007, 17(2): 182-190.
- [2] DALES R E, BURNETT R, ZWANENBURG H. Adverse health effects among adults exposed to home dampness and molds [J]. *American Review of Respiratory Disease*, 1991, 143(3): 505-509.
- [3] LANGMANS J, KLEIN R, ROELS S. Hygrothermal risks of using exterior air barrier systems for highly insulated light weight walls: A laboratory investigation [J]. *Building and Environment*, 2012, 56: 192-202.
- [4] MLAKAR J, ŠTRANCAR J. Temperature and humidity profiles in passive-house building blocks [J]. *Building and Environment*, 2013, 60: 185-193
- [5] 胡明玉,周侠,鄢升,等. 硅藻土/泥炭藓基负载 $g-C_3N_4-TiO_2$ 的光催化调湿性能 [J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6): 1234-1241.
HU Mingyu, ZHOU Xia, YAN Sheng, et al. Photocatalytic humidity-controlling performance of $g-C_3N_4-TiO_2$ loaded on diatomite/sphagnum composite [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6): 1234-1241. (in Chinese)
- [6] 胡明玉,付超,吴琼,等. 海泡石黏土建筑调湿材料的性能及机理研究 [J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(3): 408-413, 432.
HU Mingyu, FU Chao, WU Qiong, et al. Properties of sepiolite clay as humidity-controlling building materials and its humidity controlling mechanism [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(3): 408-413, 432. (in Chinese)
- [7] 胡景波. 建筑调湿材料湿缓冲能力及其影响因素的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
HU Jingbo. Study on moisture buffer capacity of building hygroscopic materials and its influencing factors [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese)
- [8] MOUDOOD A, RAHMAN A, ÖCHSNER A, et al. Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(7): 323-339.
- [9] 凌黎. 木质纤维素生产加工工艺管理系统 V1.0 [R]. 宿州: 宿州市辉腾再生资源利用有限公司, 2017.
LING Li. Lignocellulose production and processing process management system V1.0 [R]. Suzhou: Suzhou Huiteng Renewable Resources Utilization Co., Ltd., 2017. (in Chinese)
- [10] PEUHKURI R. Moisture dynamics in building envelopes [D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2003.
- [11] SANDBERG P I. Byggnadsdelars fuktbalans i naturligt klimat [D]. Sweden: Lund University, 1973.
- [12] RODE PEDERSEN C. Combined heat and moisture transfer in building constructions [D]. Denmark: Technical University of Denmark, 1990.
- [13] RODE C, PEUHKURI R. The concept of moisture buffer value of building materials and its application in building design [C] // 8th International Conference and Exhibition on Healthy Buildings 2006. Lisbon: [s.n.], 2006: 57-62.
- [14] RODE C, PEUHKURI R H, MORTENSEN L H, et al. Moisture buffering of building materials [R]. Denmark: Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2005.
- [15] ANDERSON R B. Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller equation [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1946, 68(4): 686-691.
- [16] DENT R W. A multilayer theory for gas sorption: Part I: Sorption of a single gas [J]. *Textile Research Journal*, 1977, 47(2): 145-152.
- [17] RAHIM M, DOUZANE O, LE A D T, et al. Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102: 679-687.
- [18] LIUZZI S, RUBINO C, STEFANIZZI P, et al. Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 24-32.