

原创研究型文章

# 新型生物基面板的热湿行为研究：实验与数值模拟

周亚苹<sup>1,\*</sup>, Abdelkrim Trabelsi<sup>2</sup>, 向莉<sup>1</sup>, Mohamed El Mankibi<sup>3</sup><sup>1</sup> 能源与动力工程学院, 长沙理工大学, 长沙市 410114, 中国<sup>2</sup> CETHIL, UCBL, University of Lyon, 69622 Villeurbanne, France<sup>3</sup> LTDS, ENTPE, University of Lyon, 69120 Vaulx-en-Velin, France\* 通讯作者: 周亚苹, [zyaping@csust.edu.cn](mailto:zyaping@csust.edu.cn)

## 引用格式

周亚苹, Trabelsi A, 向莉, El Mankibi M. 新型生物基面板的热湿行为研究: 实验与数值模拟. 清洁能源科学与技术. 2025; 3(1): 248. <https://doi.org/10.18686/cncest248>

Zhou Y, Trabelsi A, Xiang L, El Mankibi M. Investigation of hygrothermal behavior of a novel bio-based panel: Experiment and numerical simulation (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2025; 3(1): 248. <https://doi.org/10.18686/cncest248>

## 文章信息

收稿日期: 2024-10-20

录用日期: 2024-12-23

发表日期: 2025-01-02

## 版权信息



版权 © 2025 作者。

《清洁能源科学与技术》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/249>

**摘要:** 秸秆复合材料因其低碳足迹和良好的热湿性能, 正成为一种有前景的建筑替代隔热材料, 以促进节能和居住者的舒适度。然而, 秸秆复合材料在材料尺度和稳态条件下的热湿特性不足以全面评估其在实际使用条件下作为建筑构件的性能。本研究重点研究了稻草-海藻酸盐复合材料制成的新型生物基墙体的热湿性能。在不同边界条件下监测了墙内的温度和相对湿度分布。提出了确定液态水渗透率的反演分析方法。在动态测试中, 与热湿耦合传递 (CHM) 模型相比, 瞬态传热模型预测的温度分布误差更高, 低估了总热通量高达30.6%。此外, 在动态条件下, 与没有液态水输送的CHM模型预测的结果相比, 在28毫米、36毫米和64毫米的深度, 具有液态水输送功能的CHM模式的平均绝对误差分别降低了61%、57%和8%。在模拟通过壁的热传递和水分传递时, 蒸汽输送和液体输送似乎都是必不可少的。

**关键词:** 秸秆复合材料; 吸湿性材料; 液态水渗透率; 热湿耦合传递; 逆参数估计

## 1. 引言

建筑行业占总能耗和全球温室气体排放量的 30%–40% [1], 其中很大一部分与满足供暖和制冷需求直接相关, 以确保居住者的热舒适度。为了减少这种消耗, 在建筑围护结构中使用隔热材料被广泛认为是一种有效的策略, 可以增强建筑物的热惯性并提高其整体能源效率 [2]。传统的隔热材料, 如矿棉和聚苯乙烯, 主要来自不可再生资源, 在处置后会造成大量浪费, 对环境造成重大影响。为了应对这些挑战, 生物源材料 (如稻草、木材和羊毛) 目前在建筑行业中越来越受欢迎, 因为它们碳足迹低, 在整个生命周期内对环境的影响较小。生物源材料还具有良好的特性, 包括低密度、低导热性 [3,4] 和良好的水分缓冲能力 [5,6]。它们的高孔隙率使它们能够在孔隙中吸收和储存水分, 然后根据当时的气候条件释放水分。将生物源材料纳入围护结构可以实现低碳建筑, 并通过调节室内微气候为智能建筑环境的发展做出贡献。

农业秸秆, 如小麦、水稻和大麦, 全球产量达数十亿吨 [7]。由于焚烧和填埋的普遍做法, 秸秆的管理是一个有争议的问题。由于材料的低密度和低导热性, 稻草包结构已经实践了很长时间。秸秆复合材料, 其中秸秆纤维由替代粘合剂粘合, 包括聚酯纤维、合成树脂、无机胶凝材料和天然粘合剂, 目前正吸引着大量的研究工作 [8–11]。

许多研究已经调查和评估了秸秆复合材料的热和卫生性能。Ismail 等人 [12] 使用标准测试表征了麦秸复合材料的吸湿性能, 发现由于其高开孔率, 复

合材料具有高水蒸气渗透性。Javaid 等人 [13]使用保护热板法开发并表征了稻草复合材料的导热系数,发现其值较低,为  $0.023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 低于传统聚苯乙烯的导热系数。然而,评估通常在材料尺度和稳态条件下进行,这被认为不足以彻底评估秸秆复合材料作为建筑构件的热湿性能,因为它们在实际使用条件下受到动态热湿边界条件的影响 [14,15]。此外,由于长时间暴露在动态环境条件下,材料中积累的过多水分会导致材料和性能下降的问题。

为了确保室内微气候的稳定性并促进节能,必须在更现实的大规模条件下,如墙壁尺度,准确检查秸秆复合材料等生物源材料的热湿现象机制和热湿性能。气候室提供了一种受控的边界条件,其背景噪声比现实生活中的环境要低。Slimani 等人 [16]研究了在受控环境条件下木纤维隔热板的热湿行为。面板内的温度和相对湿度测量表明,水蒸气吸附伴随着液态水的重新分布。Latif 等人 [17]通过使用大型气候室比较了三种面板的热湿性能,即矿棉面板、木纤维面板和由木纤维和大麻石灰制成的仿生面板。结果表明,由生物源材料制成的木纤维和生物板比矿棉板具有更高的热惯性和卫生惯性。在静态和动态边界条件下,对大麻混凝土 [18]、椰枣混凝土 [19]和稻草混凝土 [20]在墙尺度上的热湿行为进行了实验分析。结果表明,生物源材料有助于缓解温度和相对湿度变化,并强调了传热和传热之间的实质性耦合效应。然而,具有高绝缘性能的天然粘合剂的秸秆复合材料的热湿行为仍然没有得到充分研究。由于秸秆复合材料独特的微观结构和孔径分布,这种材料的传热和传热特性可能与其他生物基材料和秸秆混凝土有显著不同。

描述多孔介质中热传递和水分传递的热湿模型通常用于模拟气候条件下生物基墙的热和热湿行为 [21,22]。各种热湿模型之间的主要区别在于水分迁移的驱动潜力,包括相对湿度、含水量、蒸汽压和毛细管压力。Kaoutari 和 Louahlia [23]开发了一个热湿耦合传递模型,用于描述具有结构材料和绝缘棒材料的双层墙中的热湿行为。研究发现,由于其较高的吸收能力,绝缘材料的水分通量变化比结构材料更为平缓。Mendes 等人 [24]研究了水分对传导负荷的影响,发现忽略模型中的水分传递会导致年热通量低估高达 59%,从而导致总能耗低估。蒸汽传输和液体传输在热湿模型中都起着重要作用,以确保通过生物基壁进行准确的水分行为预测。然而,在各种研究中,由于忽略了液体输运,这些模型通常被简化为单相模型 [25,26]。Alioua、Agoudjil、Boudenne 等人 [27]使用 Kunzel 模型比较了相对湿度阶跃变化下椰枣混凝土在有和没有液体转移的情况下的数值相对湿度 (RH) 分布。这些模型在吸附阶段显示出相对湿度值的偏差,在 3 厘米、7.5 厘米和 12.5 厘米的深度处,变化分别达到 3.8%、4%和 2.3%。使用部分浸渍的标准实验表征方法 (ASTM C1794-15) 估算模型所需的液态水转移性能。然而,标准测量有一定的局限性,例如易受人为错误和不连续测试的影响。此外,动态条件下的液体输送难以准确模拟,特别是对于高吸湿性材料,因此与瞬态测量获得的实验数据相比,会导致显著差异。因此,动态和连续测量方法已被用于表征液态水传递系数。

上述文献强调了传热和水分传递之间的高度耦合,以及考虑液态水传递的必要性,以便在壁尺度上准确模拟生物基材料的热湿行为。然而,低密度、低

导热性和高水分缓冲能力的秸秆复合材料的热湿行为仍未得到充分探索。此外，表征液态水转移的标准方法在捕获动态液体传输的能力方面受到限制，特别是对于高吸湿性材料。为了填补这一空白，本研究探索了由稻草-海藻酸盐复合材料制成的新型生物基隔热墙的热湿行为。在等温、非等温和动态等不同边界条件下，对新型秸秆复合墙体的热湿性能进行了实验评估。基于动态条件下的实验测量，提出了一种逆分析方法来识别液态水传递系数。此外，对瞬态传热（TH）模型、耦合传热和湿传递（CHM）模型以及耦合传热和湿气与液态水传输（CHMWL）模型的性能进行了比较，以深入了解耦合效应和液体传输对稻草-海藻酸盐复合材料热湿行为的影响。

## 2. 材料和方法

研究的总体框架如图 1 所示。

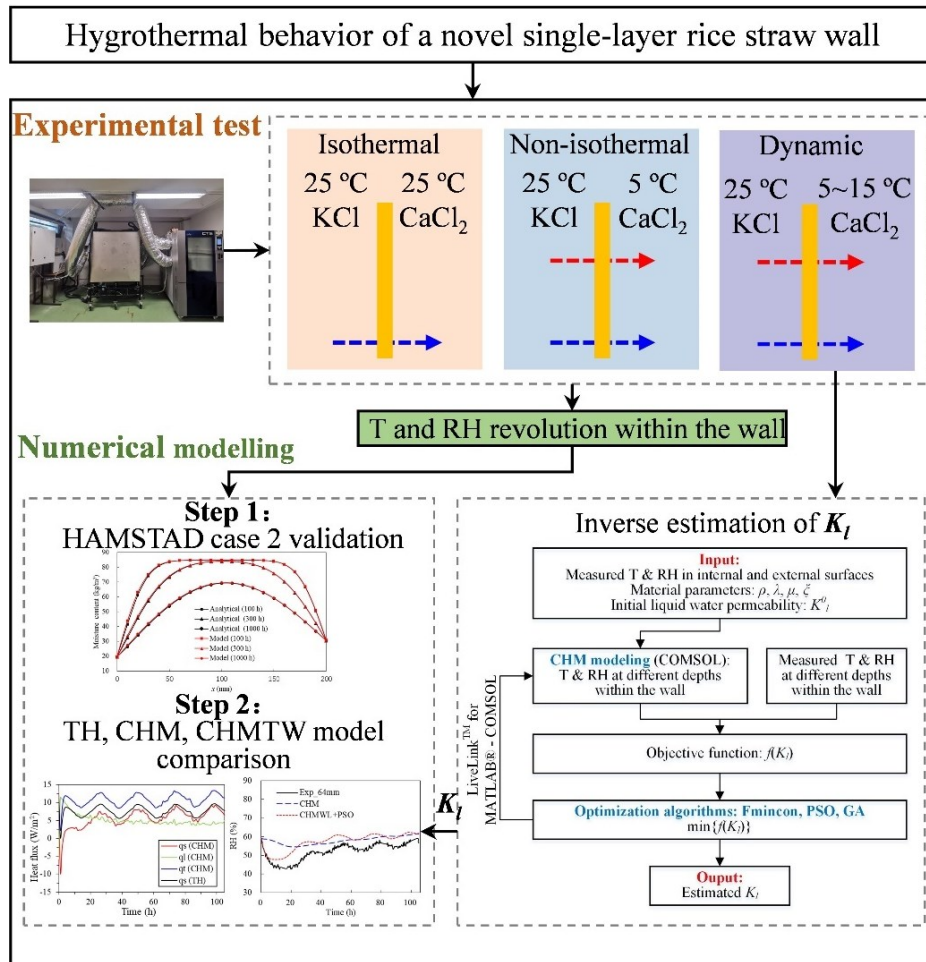


图 1. 研究的总体框架。

Figure 1. Overall framework of study.

### 2.1. 实验方法

#### 2.1.1. 试验墙和仪器

这项研究的重点是完全由生物源复合材料制成的单层墙，即使用海藻酸钠粘合的稻草。这种生物建筑材料具有优异的氢能和热性能，是一种可再生低碳材料，适合可持续发展。使用外部钙交联方法开发的含有 8wt%海藻酸钠的稻草配方因其优越的物理、热和卫生性能而被选中，这些性能在 [28]中已有测定。试验墙的尺寸为 50 × 50 × 8 cm，并使用木纤维隔热材料、耐汽硅和 PVC 薄膜与侧表面隔热，以确保通过墙厚度的单向传热和水分传递（见图 2）。



图 2. (a) 孔网和 (b) 试验墙。

Figure 2. (a) Hole network; (b) test wall.

复合材料的热湿性能已在表 1 中进行了表征和总结。具体而言，使用热线法在干燥状态下测量材料的热导率。材料的导热系数与其含水量呈线性关系，系数设置为 0.56 [29]。吸附等温线函数是吸附和解吸等温线平均值的 Guggenheim-Anderson-de Boer 拟合。根据干杯和湿杯的测量结果，假设水蒸气渗透率与相对湿度呈线性关系。

表 1. 稻草-海藻酸盐复合材料的热湿性能。

Table 1. Hygrothermal properties of rice straw–alginate composite material.

Variable	Value/formula	Unit
Dry density	$\rho_m = 124$	kg/m <sup>3</sup>
Mass specific heat capacity	$C_{p,m} = 1353$	J/kg/K
Thermal conductivity	$\lambda = 0.042 + 0.56 \frac{w}{1000}$	W/m/K
Sorption isotherm	$u = \frac{0.2978 \cdot \varphi}{(1 - 0.9560 \cdot \varphi)(1 - 0.9560 \cdot \varphi + 4.6027 \cdot \varphi)}$	kg/kg
Water vapor permeability	$\delta v = (6.69 \cdot \varphi + 1.44) \times 10^{-11}$	s

墙壁装有五个 SHT75 传感器（瑞士 Sensirion），用于记录测试墙壁内外表面以及三个不同深度的温度和相对湿度变化。SHT75 传感器的尺寸很小，为 3.1 × 5.1 × 19.5 mm，适合非侵入式放置在墙上，从而最大限度地减少对周围环境的干扰。温度和相对湿度测量的精度值分别为 ±0.5 °C 和 ±2%。为了在不损害墙壁完整性的情况下方便传感器的放置，仔细准备了钻孔，并使用硅酮密封胶密封了由此产生的开口（图 2）。为了减少测量的干扰，传感器与垂直面成 45° 倾斜。

### 2.1.2. 实验装置

位于 CETHIL-INSA 里昂实验室的实验设施旨在研究受控边界条件下建筑

围护结构组件的热湿行为 [16,30]。该设施由两个隔间组成，测试组件夹在隔间之间。隔室 1 由一个外部不锈钢隔室、一层 60 mm 的聚苯乙烯隔热层、四个连接到低温恒温器的热交换器和一个体积为 0.5 m<sup>3</sup> 的内部不锈钢隔室组成，因此从外表面到内表面提供了 1 m<sup>2</sup> 的交换表面。隔室 2 由 240 mm 多层薄隔热层、两层 40 mm 麻棉隔热层、一个与带有玻璃棉隔热管道的气候室相连的外部无污染隔室和一个从外到内表面面积为 0.5 m<sup>2</sup> 的内部无污染隔室内组成。低温恒温器允许根据安装在低温恒温器内部和隔室内的 PT100 传感器测量的温度进行内部和外部调节。本研究利用内部调节来控制 1 号舱的温度。隔室 2 连接到具有 Clima 温度系统 (CTS) 的气候室，该系统允许产生所需的温度和相对湿度。该腔室包含一个用于测量相对湿度的电容式探头和一个用于温度测量的 PT100 探头。在这项实验研究中，CTS 中没有使用相对湿度控制器，分别使用盐溶液和干燥剂实现了隔室 1 和隔室 2 中所需的相对湿度。风扇安装在距离塑料箱顶部 20 厘米的高度，以使隔间内的空气条件均匀。图 3 给出了实验装置的示意图。温湿度传感器安装在两个隔室中，以连续测量施加在测试壁上的热湿载荷。

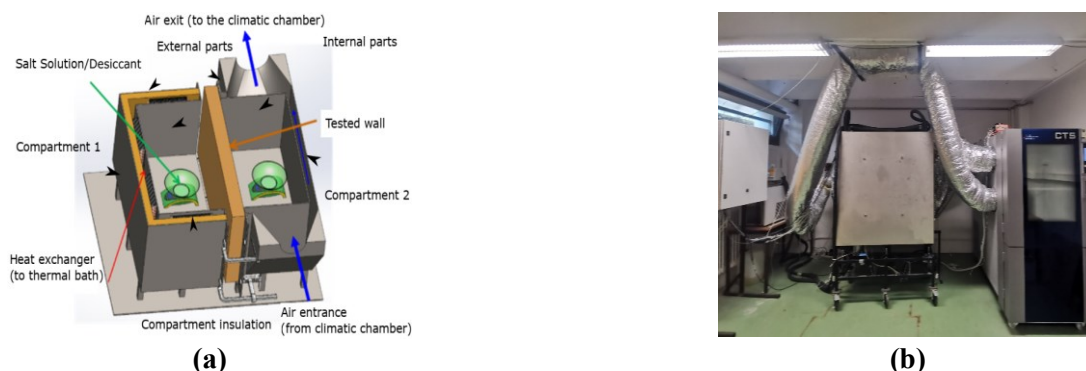


图 3. (a) CETHIL-INSA 里昂实验室实验装置示意图和 (b) 视图。

Figure 3. (a) Schematic diagram and (b) view of experimental setup at CETHIL-INSA Lyon laboratory.

### 2.1.3. 热湿试验条件

本研究进行了三项试验，即等温、非等温和动态试验。每次试验前，试验墙在室内条件下进行预处理，直至稳定。对于所有测试，将 1 号室的温度设置为 25 °C，分别使用饱和盐溶液（即氯化钾 (KCl)）和干燥剂（即氯化钙 (CaCl<sub>2</sub>)）调节 1 号室和 2 号室的相对湿度。根据 ISO 12571 标准 [31]，饱和 KCl 溶液和 CaCl<sub>2</sub> 干燥剂保持的相对湿度值约为 85%RH 和 40%RH。水蒸气被吸收或释放，直到达到平衡，从而稳定相对湿度。此外，平衡相对湿度在很大程度上与温度波动无关，这使其成为保持一致湿度的有效方法 [31]。

对于等温试验，将室 2 在 25 °C 的恒温下保持四天，以消除温度梯度。该试验允许研究水分转移和吸附对试验壁热行为的影响。对于非等温试验，将室 2 在 5 °C 的恒温下保持两天。温度、相对湿度和蒸汽压梯度从内侧到外侧方向相同。进行该试验是为了检查温度梯度对试验壁水分传输的影响。动态测试涉及 2 号舱内四天的温度变化。在 24 小时的循环中，温度在 5 °C 至 15 °C 之间波动，幅度为 10 °C。进行该试验是为了研究试验壁在更现实条件下的热湿行

为。

由于钻孔的不确定性，在完成所有测试后，通过破坏测试墙来测量传感器在墙内的实际深度。从墙的内侧到外侧的实际深度分别为 2.8 厘米、3.6 厘米和 6.4 厘米。

## 2.2. CHM 模型

基于质量和能量守恒，开发了传热和传质模型。生物源材料通常被视为多孔介质，由蒸汽和液体形式的空气和水组成。关键假设如下：（1）不考虑空气输送；（2）固相在宏观上被认为是均匀的、各向同性的和非反应性的；

（3）假设材料内部局部热量和水分平衡；（4）忽略了吸附和解吸之间的滞后现象；（5）假设吸湿能力与温度无关，并且（6）传热和水分传递被视为一维。

### 2.2.1. 湿平衡方程

在多孔材料中，水分传输被认为分为两个阶段，即水蒸气和液态水。根据质量守恒定律，水分传输方程为 [32]:

$$\rho_m \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla(g_v + g_l) \quad (1)$$

其中  $\rho_m$  为干密度， $u$ （单位 kg/kg）为质量含水量， $g_v$ （单位 kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)）为水蒸气透过率， $g_l$ （单位 kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)）为液态水透过率。

在该模型中，水蒸气转移用菲克定律描述，液态水转移用达西定律描述：

$$g_v = -\delta_p \frac{\partial P_v}{\partial x} \quad (2)$$

$$g_l = -K_l \frac{\partial P_c}{\partial x} \quad (3)$$

其中  $\delta_p$ （单位 kg/(m·s·Pa)）为水蒸气渗透率， $K_l$ （单位 kg/(m·s·Pa)）为液态水渗透率， $P_v$ （单位 Pa）为分蒸汽压， $P_c$ （单位 Pa）为毛细管压力。

为了便于计算，该模型采用相对湿度作为水分输送的驱动因素。因此，蒸汽压梯度可以推导出：

$$\frac{\partial P_v}{\partial x} = \frac{\partial(\varphi P_{v,sat})}{\partial x} = \varphi \frac{dP_{v,sat}}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} + P_{v,sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (4)$$

其中  $P_{v,sat}$  是实验温度下的饱和水蒸气压（单位为 Pa）， $\varphi$  是相对湿度。

与温度相关的饱和水蒸气压描述为 [33]:

$$P_{v,sat}(T) = 610.5 \exp\left(\frac{17.269T}{237.3 + T}\right) \quad (5)$$

根据开尔文方程，毛细管压力梯度可推导出 [34]:

$$\frac{\partial P_c}{\partial x} = \rho_l R_v \left( \ln(\varphi) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{T}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (6)$$

其中  $\rho_l$ （单位 kg/m<sup>3</sup>）是液态水密度， $R_v$ （单位 J/(kg·K)）是水蒸气气体常数， $T$ （单

位  $K$ ) 是热力学温度。

因此, 将方程 (4) 和 (6) 代入方程 (1), 水分传递方程如下:

$$\rho_m \xi \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \delta_p \varphi \frac{dP_{v,sat}}{dT} + K_l R_v \ln(\varphi) \right) \frac{\partial T}{\partial x} + \left( \delta_p P_{v,sat} + K_l \rho_l R_v \frac{T}{\varphi} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] \quad (7)$$

其中  $\xi = \partial u / \partial \varphi$  表示吸附等温线的斜率, 而  $u = f(\varphi)$ 。

### 2.2.2. 热平衡方程

考虑到汽化潜热远高于水蒸气和液态水的显热值, 因此在该模型中忽略了它们。材料的热守恒可以表示为:

$$(\rho_m C_{p,m} + w C_{p,l}) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \left( \delta_p \left( \varphi \frac{\partial P_{v,sat}}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + P_{v,sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right) \quad (8)$$

其中,  $\lambda$  (单位  $W/(m \cdot K)$ ) 是材料的导热系数,  $w$  (单位  $kg/m^3$ ) 是含水量,  $C_{p,m}$  (单位  $J/(kg \cdot K)$ ) 是材料质量比热容,  $C_{p,l}$  (单位  $J/(kg \cdot K)$ ) 是水的质量比热容,  $L_v$  (单位  $J/kg$ ) 是蒸发潜热。

### 2.2.3. 边界条件

在将 CHM 模型用于测试墙之前, 已在 HAMSTAD 基准案例 2 中进行了验证。内外侧的边界条件如下:

$$g_i = \beta_i (\varphi_i P_{sat,i} - \varphi_{surfi} P_{sat,surfi}) \quad (9)$$

$$g_e = \beta_e (\varphi_e P_{sat,e} - \varphi_{surfe} P_{sat,surfe}) \quad (10)$$

$$q_i = h_i (T_i - T) + L_v g_i \quad (11)$$

$$q_e = h_e (T_e - T) + L_v g_e \quad (12)$$

其中,  $g$  (单位  $kg/(m^2 \cdot s)$ ) 是边界处的蒸汽通量,  $q$  (单位  $W/m^2$ ) 是边界处的热通量,  $\beta$  (单位  $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ) 是边界处的蒸汽传递系数,  $h$  (单位  $W/(m^2 \cdot K)$ ) 是边界处的热传递系数, 忽略辐射。

考虑到对流热量和质量交换系数未知, 本研究测量了试验墙的表面温度和相对湿度, 并将其作为边界条件, 写为:

$$\varphi(x=0, t) = \varphi_i(t) \quad (13)$$

$$\varphi(x=L, t) = \varphi_e(t) \quad (14)$$

$$T(x=0, t) = T_i(t) \quad (15)$$

$$T(x=L, t) = T_e(t) \quad (16)$$

其中,  $L$  是试验墙的厚度,  $t$  是时间步长,  $i$  和  $e$  分别表示试验墙的内表面和外表面。

### 2.2.4. 求解方法

本研究使用 COMSOL Multiphysics 软件对传热和传湿方程进行建模, 该软

件是一种利用有限元法的模拟环境。COMSOL 建模工具已被广泛用于热湿研究 [21,22,35]。COMSOL 中的偏微分方程 (PDE) 模块表面可纳入传热和传湿方程，并建立它们之间的耦合关系。在该模块中，偏微分方程的一般表达形式如下：

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \Gamma = f \quad (17)$$

其中， $e_a$  是质量系数， $d_a$  是阻尼系数， $\Gamma$  是保守通量， $f$  是源项。

因变量  $u$  是温度和相对湿度。根据前面的定义，CHM 模型可以矩阵形式给出：

$$\begin{bmatrix} \rho_m C_{p,m} + w C_{p,l} & 0 \\ 0 & \rho_m \xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} \end{bmatrix} = \nabla \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \lambda + L_v \delta_p \varphi \frac{dP_{v,sat}}{dT} & \delta_p \varphi \frac{dP_{v,sat}}{dT} \\ \delta_p \varphi \frac{dP_{v,sat}}{dT} + K_l R_v \ln(\varphi) & \delta_p P_{v,sat} + K_l \rho_l R_v \frac{T}{\varphi} \end{bmatrix} \nabla \begin{bmatrix} T \\ \varphi \end{bmatrix} \right\} \quad (18)$$

### 2.2.5. 模型验证

HAMSTAD 基准案例 2 采用 200 毫米单保温层墙体来验证数值模型。假设情况下的温度始终为 20 °C。在 95% 的高相对湿度下初始化后，墙体暴露在较低相对湿度的边界条件下。内部和外部相对湿度值分别为 65% 和 45%。此外，传热系数和传湿系数分别假定为 25 W/(m<sup>2</sup>·K) 和 1.0 × 10<sup>-3</sup> s/m。表 2 列出了材料属性。由于温度梯度为零，墙壁中的含水量曲线可以通过解析求解，提供精确的解，而无需进行数值近似。模拟持续了 1000 小时，得到的结果是 100 小时、300 小时和 1000 小时的湿度曲线。

表 2. HAMSTAD 基准案例 2 中材料的热湿特性。

Table 2. Hygrothermal properties of material in HAMSTAD benchmark case 2.

Material property	Value/formula	Unit
Density, $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_m = 525$	kg/m <sup>3</sup>
Thermal conductivity, $\lambda$ (W/(m·K))	$\lambda = 0.15$	W/(m·K)
Specific heat capacity, $C_{p,m}$ (J/(kg·K))	$C_{p,m} = 800$	J/(kg·K)
Sorption isotherm, $w$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w = \frac{116}{\left(1 - \frac{1}{0.118} \ln \varphi\right)^{0.869}}$	kg/m <sup>3</sup>
Water vapor permeability, $\delta_v$ (kg/(m·s·Pa))	$\delta_v = 1 \times 10^{-15}$	kg/(m·s·Pa)
Moisture diffusivity, $D_w$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_w = 6 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup> /s

从图 4 中可以看出，CHM 模型得出的模拟结果与分析结果 [36] 有很好的 consistency。在 100 小时、300 小时和 1000 小时时，CHM 模型结果与分析解之间的最大相对误差分别为 5.4%、4.3% 和 2.9%。这些结果证明了 CHM 的有效性。



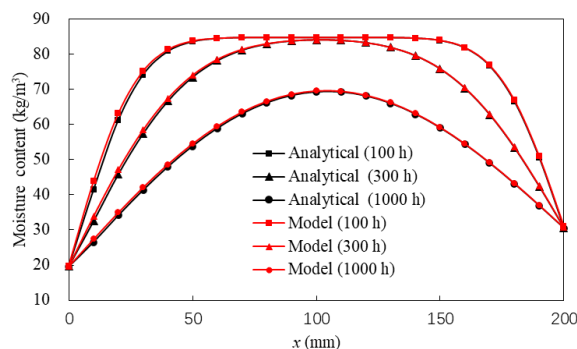


图 4. HAMSTAD 基准案例 2 的水分含量曲线。

Figure 4. Moisture content profiles for HAMSTAD benchmark case 2.

### 2.3. 液态水渗透性测定

测量液体传水系数的标准方法有一定的局限性，包括容易出现人为误差和测试不连续。此外，很难准确模拟动态条件下的液体传输，特别是对于吸湿性很强的材料，因此与瞬态测量获得的实验数据相比存在明显差异。因此，本研究提出了一种反参数估计方法，根据墙体尺度的动态测试来确定液体透水性。

#### 2.3.1. 逆向分析

在本研究中，液态水渗透性  $K_l$  被视为一种未知属性，需要根据动态条件下墙体三个深度的温度和相对湿度测量值来确定。 $K_l$  的逆向识别框架如图 5 所示。

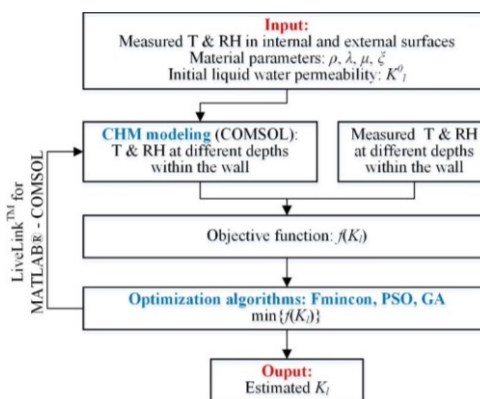


图 5. 参数估计工作流程。

Figure 5. Parameter estimation workflow.

请注意， $K_l$  的范围很广。中密度纤维板的  $K_l$  范围为 0 至  $1.17 \times 10^{-16}$  [37]。为简单起见，假定  $K_l$  是含水量的线性函数，如下所示：

$$K_l = (a \times w) \times 10^{-17} \quad (19)$$

其中， $w$  (单位  $\text{kg/m}^3$ ) 表示材料中的水分含量， $a$  表示待估算的无量纲参数，范围为 0 至 100。

为了评估不同的解决方案，本研究将多目标函数定义为测量结果（包括温度和相对湿度）与 CHM 模型模拟结果之间的平方误差之和：

$$f(a) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \left( \frac{y_{nl} - y_{nl}(a)}{\sigma_n} \right)^2 \quad (20)$$

其中,  $y_{nl}$  表示每个测量变量  $n$  (温度和相对湿度) 的  $l$  个数据点, 而  $y_{nl}(a)$  则表示直接 CHM 模型输入估计  $K_l$  计算出的变量。

因此, 可以通过最小化目标函数得到  $K_l$  的预期参数, 如下所示:

$$\min f(a) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \left( \frac{y_{nl} - y_{nl}(\theta)}{\sigma_n} \right)^2 \quad (21)$$

### 2.3.2. 优化算法

Fmincon 是 MATLAB 优化工具箱中的一种顺序二次编程算法, 用于求解每次迭代的二次编程子问题。它是一种流行的局部搜索方法, 可以找到标量非线性函数的约束最小值。这与常用的 Levenberg-Marquart 算法截然不同, 后者最小化的是平方和。因此, 我们选择 Fmincon 算法来代替 Levenberg-Marquart 算法, 因为它能够包含边界约束。在本研究中, Fmincon 选择了内点算法, 使用邻接敏感度来评估目标函数的梯度。本研究将最大迭代次数设为 10 次。

粒子群优化 (PSO) 算法是一种随机搜索方法, 其灵感来源于一些自然生物独特的社会行为, 如鸟群和鱼群的集体运动 [38]。在该算法中, 粒子由其位置和速度来描述。粒子的运动会受到其记忆以及所有粒子发现的最佳粒子的影响。这样, 所有粒子就可以共享合理解决方案的知识。

PSO 算法的超参数少, 收敛速度快。在 PSO 算法中, 每个粒子  $i$  的速度向量和位置向量分别用  $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}]$  和  $X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}]$  表示。粒子  $i$  将根据粒子  $i$  先前的最佳位置 (即  $pbest_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN}]$ ) 和整个种群中的最佳位置 (即  $gbest = [g_1, g_2, \dots, g_N]$ ) 的影响更新其速度和位置。向量  $V_i$  和  $X_i$  首先进行随机初始化, 然后根据以下公式进行更新:

$$V_i^{k+1} = \omega \cdot V_i^k + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_i - X_i^k) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest - X_i^k) \quad (22)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (23)$$

其中,  $\omega$  为惯性系数,  $c_1$  为个人学习系数,  $c_2$  为全局学习系数, 为平衡随机因素的影响, 本研究中将  $c_1$  和  $c_2$  一般设为相等, 而  $rand_1$  和  $rand_2$  为 0 至 1 之间的随机数。

遗传算法 (GA) 是一种由进化机制激活的随机全局搜索方法 [39]。与其他两种算法相比, 尽管目标函数存在不连续性、不规则性和噪声, 但遗传算法几乎不会陷入局部最优状态。GA 首先初始化一个种群, 即一组随机生成的个体。在每一代中, 通过评估目标函数对个体进行排序和选择。然后, 根据选择、交叉和突变产生新的个体。在本研究中, 种群大小和世代大小均设定为 10。

### 2.3.3. 绩效评估指标

为了利用不同优化算法得出的  $K_l$  估计值评估建模性能, 本研究采用了两个指标, 即平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) [40]:

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^N |\hat{y}_t - y_t|}{N} \quad (24)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (\hat{y}_t - y_t)^2}{N}} \quad (25)$$

其中,  $y_t$  为不同深度的实测温度或相对湿度,  $\hat{y}_t$  为不同深度的模拟温度或相对湿度,  $t$  为时间步长,  $N$  为最大时间步长。

### 3. 结果和讨论

#### 3.1. 实验分析

图 6 显示了等温条件下的温度、相对湿度和计算得出的部分蒸汽压。可以看出, 内部空气相对湿度稳定在 81%, 外部空气相对湿度先是迅速下降, 然后上升到 39% 几乎恒定的值。根据公式 (26) 确定, 从内部到外部的部分蒸汽压力梯度约为 13.6 hPa。

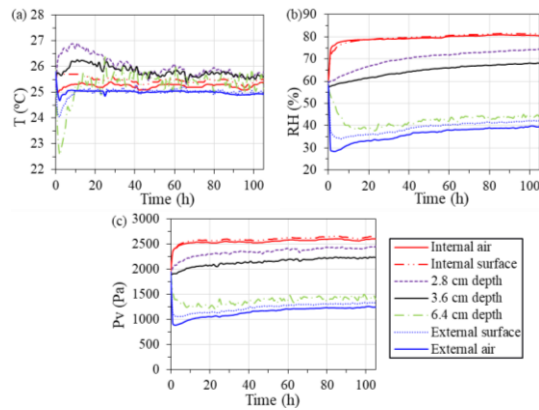


图 6. 在等温条件下, 内侧 2.8 厘米、3.6 厘米和 6.4 厘米深度的时间变化: (a) 温度、(b) 相对湿度和 (c) 部分蒸汽压。

**Figure 6.** Evolution in time at depths of 2.8 cm, 3.6 cm and 6.4 cm on internal side under isothermal condition: (a) temperature; (b) relative humidity; (c) partial vapor pressure.

$$P_v = RH/100 \times \text{Exp} \left( \frac{17.26 \times T}{237.5 + T} \right) \quad (26)$$

当内部空气相对湿度突然增大和外部空气相对湿度突然减小时, 试验墙特定深度的温度变化非常明显。值得注意的是, 在  $x=2.8$  厘米和  $x=3.6$  厘米处, 温度分别上升了约  $1.4^\circ\text{C}$  和  $0.7^\circ\text{C}$ 。相反, 在  $x=6.4$  厘米处, 温度急剧下降约  $3.2^\circ\text{C}$ 。放热现象是内部部分蒸汽压增加的结果, 导致材料吸收更多的水分。相反, 内热现象是由于外部水汽分压降低, 促使液态水蒸发并伴有吸热, 从而导致材料冷却。此外,  $x=2.8$  厘米和  $x=3.6$  厘米处的温度值略微超过了内部环境空气温度和外部环境空气温度, 而不是维持在两者之间。这是由于水蒸气在墙内凝结所致。这些结果表明, 湿气传导对试验墙内的传热动力学有重大影响。

响。

图 7 显示了非等温条件下的温度、相对湿度和计算得出的部分蒸汽压。内部空气相对湿度稳定在 75%，外部空气相对湿度先是迅速下降，然后逐渐上升到 53% 的近似恒定值。两个隔室的温度比相对湿度稳定得更快。内部和外部空气温度值分别为 24 °C 和 7 °C，温度梯度为 17 °C。蒸汽压力梯度为 17 hPa。热流和蒸汽流的方向是从内部流向外部。

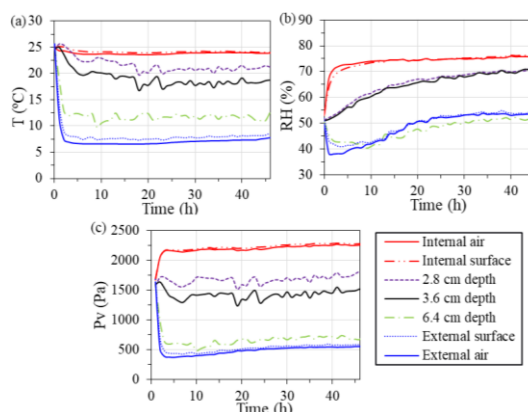


图 7. 在非等温条件下，内侧 2.8 厘米、3.6 厘米和 6.4 厘米深度的时间变化：**(a)** 温度、**(b)** 相对湿度和 **(c)** 部分蒸汽压力。

Figure 7. Evolution in time at depths of 2.8 cm, 3.6 cm and 6.4 cm on internal side under non-isothermal condition: **(a)** temperature; **(b)** relative humidity; **(c)** partial vapor pressure.

$x = 2.8$  厘米和  $x = 3.6$  厘米处的相对湿度值非常相似，这是因为  $x = 2.8$  厘米处较高的饱和蒸汽压抵消了部分水蒸气压的影响。如图 8 所示，比较了等温和非等温条件下试验壁内的水汽分压分布。可以看出，与等温试验相比，非等温试验产生的内表面与  $x = 2.8$  厘米之间的部分水蒸气压差要大得多。可能的解释是，在非等温条件下，由于温度较低，吸湿性增强，导致水蒸气凝结增加，分蒸汽压随之降低。这些结果表明，传热和传湿过程具有高度耦合效应，热流和湿流的方向一致有利于试验墙内的湿度再分布。值得注意的是，由于温度的影响，相对湿度梯度较小。

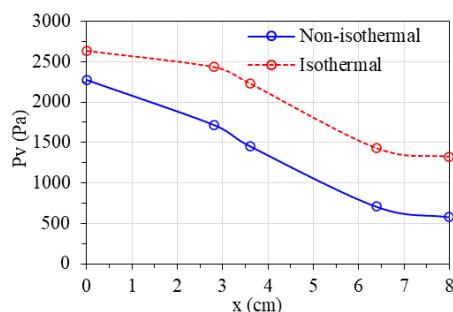


图 8. 稳定后等温和非等温条件下的部分蒸汽压力分布。

Figure 8. Partial vapor pressure distributions under isothermal and non-isothermal conditions after stabilization.

图 9 显示了动态条件下的温度、相对湿度和计算得出的部分蒸气压变化情况。内表面的温度变化紧跟外表面的温度变化，但有热相移。热相移是一个常用参数，用于评估材料在提供室内热舒适度方面的效果。它被定义为外部温度振荡从外表面传播到材料内表面所需的时间 [41]。热相移高的材料有助于营造舒适的室内环境。

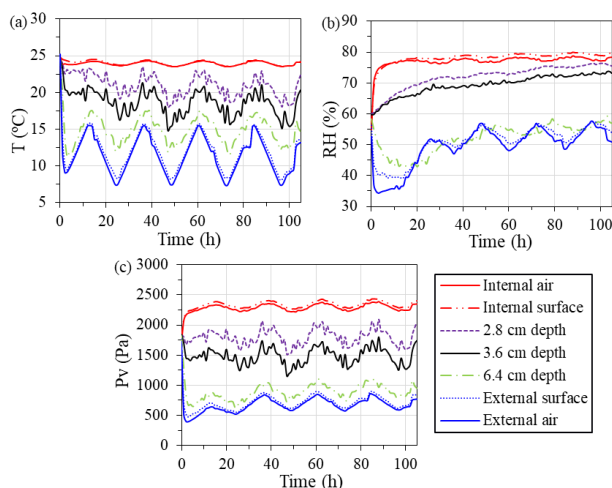


图 9. 在动态条件下，内侧 2.8 厘米、3.6 厘米和 6.4 厘米深度的时间变化：(a) 温度；(b) 相对湿度；(c) 部分蒸气压。

Figure 9. Evolution in time at depths of 2.8 cm, 3.6 cm and 6.4 cm on internal side under dynamic condition: (a) temperature; (b) relative humidity; (c) partial vapor pressure.

密度为  $124 \text{ kg/m}^3$  的 8 厘米稻草-海藻酸盐墙板的热相移时间约为 2.5 小时，与木纤维保温材料的热相移时间相当，后者在密度为  $160 \text{ kg/m}^3$  和厚度为 6 厘米时的热相移时间为 1.75 小时，在密度为  $150 \text{ kg/m}^3$  和厚度为 8 厘米时的热相移时间为 3 小时 [42]。这一结果表明，这种材料能有效提供室内热舒适度。

墙内的部分蒸汽压是含水量的可靠指标，受热循环的影响很大。从图 9 中可以看出，所有三个深度的部分蒸汽压都与相应的温度变化密切相关，即在加热阶段升高，而在冷却阶段降低。不过，在  $x = 2.8$  厘米和  $x = 3.6$  厘米处，相对湿度在最初上升后保持相对稳定。这些结果推测温度对多孔材料的吸湿行为有很大影响，进一步说明了温度对吸湿能力曲线的影响。两个深度的相对湿度的稳定性可以用与温度相关的饱和蒸汽压和材料的吸湿能力的共同作用来解释。具体来说，随着温度的升高，材料的吸湿能力减弱，导致水蒸气蒸发率增加，从而使相对湿度上升。不过，温度升高也会影响饱和蒸汽压，从而导致相对湿度降低。温度、吸湿能力和水蒸气饱和度之间的关系在调节墙内相对湿度的稳定性方面发挥了重要作用。

### 3.2. 数值分析

图 10 显示了在所有三种条件下试验墙内三个深度的实验结果与 CHM 模型和 TH 模型获得的数值结果的比较。可以看出，在所有三种条件下，CHM 模型

比 TH 模型更准确地预测了三个深度的温度变化, 这表明在模拟这种材料的热行为时应考虑水分传输。例如, 在动态条件下, TH 模型在深度为 2.8 厘米、3.6 厘米和 6.4 厘米时的最大误差分别为 3.5 °C、3.0 °C 和 1.9 °C, 而 CHM 模型的误差分别为 2.9 °C、1.4 °C 和 1.4 °C。图 11 显示了在动态条件下, CHM 模型预测的内表面显热流量、潜热流量和总热流量, 以及 TH 模型预测的显热流量。从模型间的比较来看, TH 模型比 CHM 模型高估了 11.3% 的显热通量。此外, 潜热通量占 CHM 模型预测的总热通量的 37.7%。因此, 与 CHM 模型相比, TH 模型低估了 30.6% 的总热流量。这种差异有可能导致在建筑节能模拟过程中低估通过墙壁传输的冷负荷。

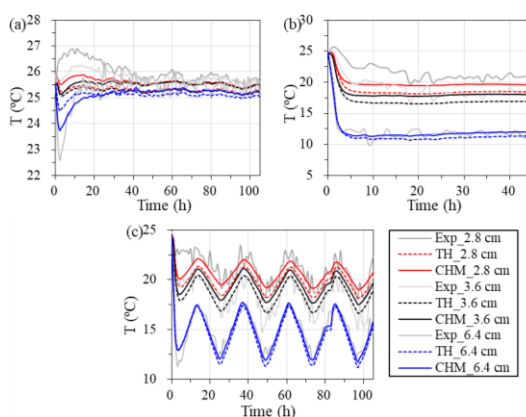


图 10. CHM 和 TH 模型预测的壁内温度变化: (a) 等温试验 (b) 非等温试验和 (c) 动态试验。

Figure 10. Temperature evolution within wall predicted by CHM and TH models: (a) isothermal test; (b) non-isothermal test; (c) dynamic test.

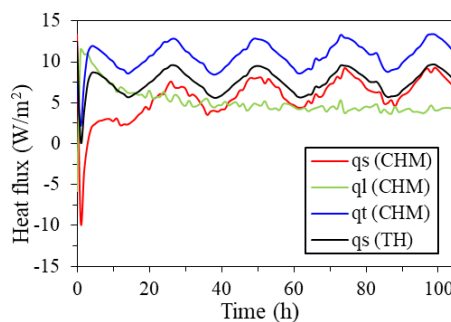


图 11. CHM 和 TH 模型预测的通过内表面的热通量。

Figure 11. Heat fluxes through interior surface predicted by CHM and TH models.

尽管 CHM 模型的结果比 TH 模型的结果有所改进, 但在  $x = 2.8 \text{ cm}$  和  $x = 3.6 \text{ cm}$  处的部分蒸汽压力和温度预测值仍与实验测量值存在差异,  $x = 6.4 \text{ cm}$  处的部分蒸汽压力和温度预测值略低于实验测量值,  $x = 3.6 \text{ cm}$  处的部分蒸汽压力和温度预测值略高于实验测量值。这表明壁面的实际响应比数值结果更快, 这可归因于几个因素, 包括壁面厚度上初始条件的异质性和 CHM 模型中的某些简化。造成差异的一个突出因素是 CHM 模型忽略了液态水的传输和水分吸附的滞后效应, 这增加了捕捉生物源材料的热湿行为的难度, 尤其是这种材料

具有高水分缓冲能力的特点。为了提高数值模拟的保真度，更好地了解生物材料在不同环境条件下的热湿性能，需要对水分迁移和吸附现象的建模进行进一步研究。

### 3.3. 有液体输送和无液体输送模型比较

表 3 显示了不同优化算法（即 Fmincon、PSO 和 GA）确定的液态水渗透率 ( $K_l$ )。可以看出，三种优化算法得到的  $K_l$  值相似。为了评估估计  $K_l$  值的有效性，将使用这些  $K_l$  值的模拟结果与忽略液体转移的 CHM 模型结果进行了比较。

表 3. 不同优化算法确定的液态水渗透率。

Table 3. Liquid water permeability determined by different optimization algorithms.

Optimization algorithm	Liquid water permeability, $K_l$ (kg/(m·s·Pa))
Fmincon	$3.4441 \times 10^{-16}$
PSO	$3.4071 \times 10^{-16}$
GA	$3.7176 \times 10^{-16}$

表 4 总结了 CHM 模型和 CHMWL 模型预测的温度和相对湿度误差。与之前的结果一致，不同优化算法确定的  $K_l$  对温度和相对湿度预测的影响可以忽略不计。此外，与忽略液态水传输的 CHM 模型相比，采用三种算法的 CHMWL 模型考虑了液态水传输，大大减少了所有深度相对湿度预测的误差。根据 MAE 指标，与 CHM 模型预测的误差相比，CHMWL 模型在 28 毫米、36 毫米和 64 毫米深度的误差分别减少了 61%、57% 和 8%。64 毫米深度的误差略有改善是因为相对湿度较低。在这一深度，水分传输主要由蒸汽压力驱动，同时伴有很小的毛细管压力。因此，采用线性函数作为含水量，可能会高估液态水的传输，从而导致相对湿度的预测误差。在各种模型中，温度误差的差异实际上并不显著。

表 4. 动态条件下有液态水转移和无液态水转移数值模型的性能比较。

Table 4. Performance comparison between numerical models with and without liquid water transfer under dynamic condition.

Parameter	Model	$x = 28 \text{ mm}$		$x = 36 \text{ mm}$		$x = 64 \text{ mm}$	
		MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
T (°C)	CHM	0.79	1.03	1.07	1.31	0.46	0.58
	CHMWL + Fmincon	0.83	1.08	0.99	1.22	0.51	0.66
	CHMWL + PSO	0.83	1.08	0.99	1.22	0.51	0.66
	CHMWL + GA	0.83	1.08	0.99	1.22	0.51	0.66
RH (%)	CHM	5.6	5.8	4.9	5.1	5.9	6.7
	CHMWL + Fmincon	2.3	2.4	2.1	2.4	5.4	5.8
	CHMWL + PSO	2.2	2.4	2.1	2.3	5.4	5.8
	CHMWL + GA	2.2	2.4	2.1	2.3	5.4	5.8

Note: CHMWL + Fmincon, CHMWL + PSO and CHMWL + GA denote models with liquid water permeability determined using Fmincon, PSO and GA optimization algorithms, respectively.

为了进行更直观的比较，图 12 展示了 CHM 模型和 CHMWL + PSO 模型预测的不同深度的相对湿度变化以及测量结果。可以看出，与 CHM 模型相比，CHMWL + PSO 模型预测的相对湿度曲线在深度为 28 毫米和 36 毫米时更接近实验曲线。此外，在深度为 64 毫米时，尽管 CHMWL + PSO 模型预测的相对湿度较高，但该模型仍能跟踪周期性波动。因此，可以得出结论，反向确定的液态水渗透率有助于数值计算。

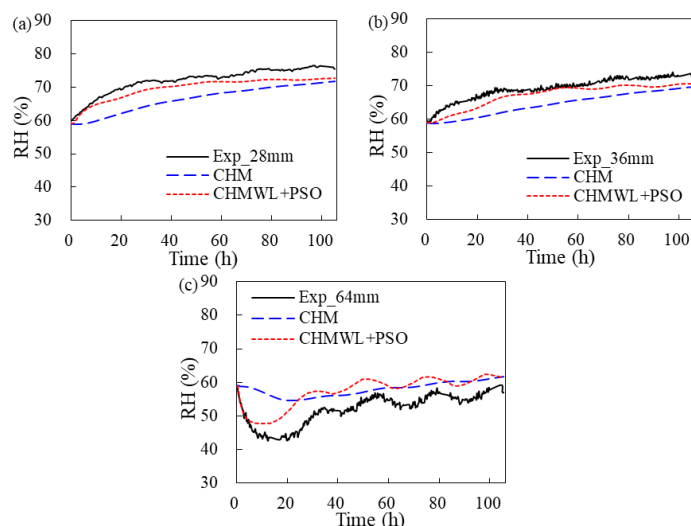


图 12. 在深度为 (a) 28 毫米、(b) 36 毫米和 (c) 64 毫米的动态条件下，CHM 和 CHMWL + PSO 模型预测的相对湿度比较。

Figure 12. Comparison of relative humidity predicted by CHM and CHMWL + PSO models under dynamic condition at depths of (a) 28 mm; (b) 36 mm; (c) 64 mm.

图 13 显示了 CHM 和 CHMWL + PSO 模型预测的通过内表面的显热通量 ( $q_s$ )。可以看出，这两个模型的显热通量差异较小，这与温度模拟的结果一致。图 14 显示了 CHMWL + PSO 模型预测的内表面水汽通量、液态水通量和总水汽通量，以及 CHM 模型预测的水汽通量。可以看出，CHWL + PSO 模型预测的水汽通量远高于 CHM 模型预测的水汽通量。

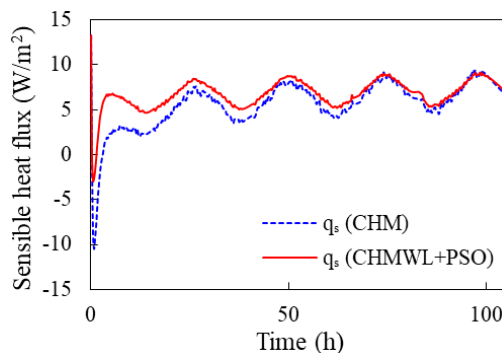
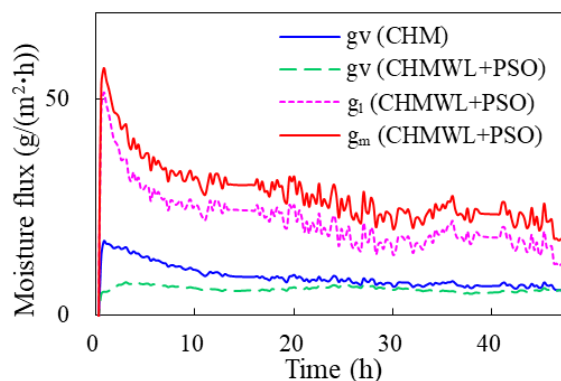


图 13. CHM 模型和 CHMWL + PSO 模型预测的通过内表面的感热通量 ( $q_s$ )。

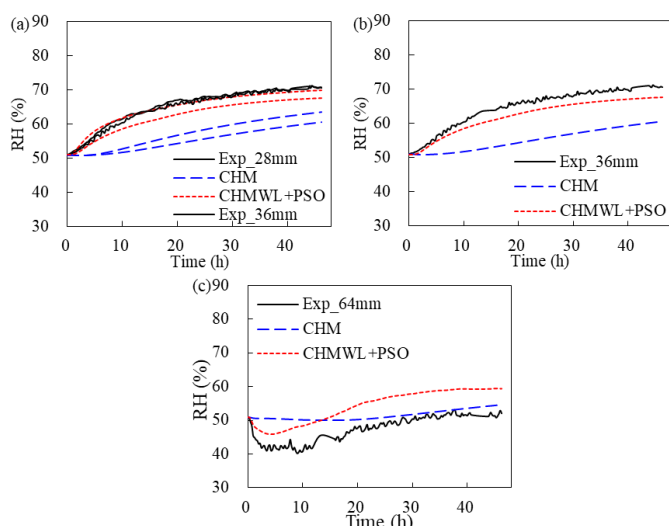
Figure 13. Sensible heat flux ( $q_s$ ) through interior surface predicted by CHM model and CHMWL + PSO model.





**图 14.** CHM 模型和 CHMWL + PSO 模型预测的通过室内表面的湿度通量。  
**Figure 14.** Moisture fluxes through interior surface predicted by CHM model and CHMWL + PSO model.

为了测试  $K_l$  的稳健性，还通过另一个实验对确定的  $K_l$  进行了进一步验证，在该实验中，墙壁处于非等温条件下。表 5 和图 15 显示了 CHM 和 CHMWL + PSO 模型模拟的温度和相对湿度结果。这些结果与之前的结果一致。从图 15 可以看出，在深度为 28 毫米和 36 毫米时，CHMWL + PSO 模型模拟的相对湿度曲线与 CHM 模型模拟的曲线相比更接近实验曲线，尤其是在瞬态时。这是一个有用的信息，因为在实际环境中，建筑围护结构通常会受到波动条件的影响，因此通常存在一个不稳定的过程。因此，在动态条件下确定的  $K_l$  可用来再现液态水在不同边界条件下在此类墙体中的传输。然而，假设  $K_l$  是含水量的线性函数，就很难完全描述在不同边界条件下液态水在墙壁厚度上的迁移。在今后的研究中，应选择适当的液态水渗透函数来模拟材料的实际湿度行为。



**图 15.** 在深度为 (a) 28 毫米、(b) 36 毫米和 (c) 64 毫米的非等温条件下，CHM 和 CHMWL + PSO 转移模型预测的相对湿度比较。  
**Figure 15.** Comparison of relative humidity predicted by CHM and CHMWL + PSO transfer models under non-isothermal condition at depths of (a) 28 mm; (b) 36 mm; (c) 64 mm.

**表 5.** 非等温条件下有液态水传输和无液态水传输数值模型的性能比较。

**Table 5.** Performance comparison between numerical models with and without liquid water transfer under non-isothermal condition.

Parameter	Model	$x = 28 \text{ mm}$		$x = 36 \text{ mm}$		$x = 64 \text{ mm}$	
		MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
T (°C)	CHM	1.69	1.97	1.03	1.38	0.50	0.62
	CHMWL + PSO	1.99	2.21	1.13	1.43	0.52	0.65
RH (%)	CHM	8.1	8.4	9.4	9.9	3.8	4.8
	CHMWL + PSO	0.9	1.0	2.4	2.5	6.6	6.8

#### 4. 结论和未来工作

本研究重点分析了由稻草和海藻酸钠制成的新型生物基材料的热湿行为。在等温、非等温和动态环境等不同条件下，对稻草海藻酸钠壁进行了实验和数值研究。CHM 模型的性能与 TH 模型的性能进行了比较。使用反演法估算了液态水渗透率，并考察了液态水迁移对热湿行为的影响。主要结论如下：

- (1) 传热和传湿过程的高度耦合效应以及热流和湿流的相同方向促进了试验墙内的湿度再分布。该材料提供的热相移约为 2.5 小时，与木纤维保温材料的热相移相当。
- (2) 纯传导模型不足以模拟和预测通过墙体的温度变化和热负荷。例如，与 CHM 模型相比，TH 模型低估了总热流量达 30.6%。
- (3) 液态水传输对于模拟通过墙体的水分传输至关重要。与 CHM 模型相比，CHMWL 模型在从内部到外部的 28 毫米、36 毫米和 64 毫米三个深度上的 MAE 分别降低了 61%、57% 和 8%。

这项研究仅限于单层生物墙和特定的环境条件。未来的工作应扩展到多层墙体系统，因为多层墙体系统更能代表真实世界的应用。此外，还应进行与传统墙体系统（如使用发泡聚苯乙烯和木纤维保温材料的墙体系统）的比较，以便更全面地评估生物基墙体在建筑业中的热湿性能和实用潜力。

**作者贡献：** 概念化，周亚苹；方法论，周亚苹和 AT；验证，周亚苹和 AT；写作—初稿准备，周亚苹和向莉；写作—审查和编辑，周亚苹和 AT；监督，AT 和 MEM；融资收购，周亚苹和 MEM。所有作者均已阅读并同意手稿的出版版本。

**致谢：** 作者感谢奥弗涅-罗纳-阿尔卑斯大区（Région Auvergne-Rhône-Alpes）提供的资助。此外，作者还要感谢中国国家留学基金管理委员会为其赴法学习提供的资助。

**利益冲突：** 作者声明没有潜在的利益冲突。

#### 缩略语

$C_p$	Specific heat capacity (J/(kg·K))	$\rho$	Density (kg/m <sup>3</sup> )
$D_w$	Moisture diffusivity (m <sup>2</sup> /s)	$\lambda$	Thermal conductivity (W/(m·K))

$g_v$	Water vapor transmission rate (kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa))	$\varphi$	Relative humidity (-)
$g_l$	Liquid water transmission rate (kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa))	$\delta_p$	Water vapor permeability (kg/(m·s·Pa))
$g_i$	Vapor flux at inner surface (kg/(m <sup>2</sup> ·s))	$\zeta$	Slope of sorption isotherm
$g_e$	Vapor flux at outer surface (kg/(m <sup>2</sup> ·s))	$\beta$	Liquid fraction
$K_l$	Liquid water permeability (kg/(·s·Pa))		
$L_v$	Latent heat of evaporation (J/kg)	TH	Thermal heat transfer
$P_c$	Capillary pressure (Pa)	CHM	Coupled heat-and-moisture transfer
$P_v$	Partial vapor pressure (Pa)	CHMWL	Coupled heat-and-moisture transfer with liquid water transport
$P_{v,sat}$	Saturated vapor pressure (Pa)		
$q_i$	Heat flux at inner surface (W/m <sup>2</sup> )		
$q_e$	Heat flux at outer surface (W/m <sup>2</sup> )		
$R_v$	Water vapor gas constant (J/(kg·K))		
$T$	Temperature (°C)		
$u$	Mass moisture content (kg/kg)		
$w$	Volumetric moisture content (kg/m <sup>3</sup> )		

## 参考文献

- Chen Y, Thomas Ng S. Factoring in embodied GHG emissions when assessing the environmental performance of building. *Sustainable Cities and Society*. 2016; 27: 244–252. doi: 10.1016/j.scs.2016.03.015
- Ramlee NA, Naveen J, Jawaid M. Potential of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) and sugarcane bagasse fibers for thermal insulation application – A review. *Construction and Building Materials*. 2021; 271: 121519. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121519
- Muthuraj R, Lacoste C, Lacroix P, et al. Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers: Elaboration and performances evaluation. *Industrial Crops and Products*. 2019; 135: 238–245. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.04.053
- Mati-Baouche N, De Baynast H, Lebert A, et al. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan. *Industrial Crops and Products*. 2014; 58: 244–250. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.04.022
- Nguyen DM, Grillet AC, Bui QB, et al. Building bio-insulation materials based on bamboo powder and bio-binders. *Construction and Building Materials*. 2018; 186: 686–698. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.153
- Viel M, Collet F, Lanos C. Development and characterization of thermal insulation materials from renewable resources. *Construction and Building Materials*. 2019; 214: 685–697. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.139
- Hassan SS, Williams GA, Jaiswal AK. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2018; 262: 310–318. doi: 10.1016/j.biortech.2018.04.099
- Liuzzi S, Rubino C, Martellotta F, et al. Characterization of biomass-based materials for building applications: The case of straw and olive tree waste. *Industrial Crops and Products*. 2020; 147: 112229. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112229
- Dušek J, Jerman M, Podlena M, et al. Sustainable composite material based on surface-modified rape straw and environment-friendly adhesive. *Construction and Building Materials*. 2021; 300: 124036. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124036
- Rojas C, Cea M, Iriarte A, et al. Thermal insulation materials based on agricultural residual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings. *Sustainable Materials and Technologies*. 2019; 20: e00102. doi: 10.1016/j.susmat.2019.e00102
- Romano A, Bras A, Grammatikos S, et al. Dynamic behaviour of bio-based and recycled materials for indoor environmental comfort. *Construction and Building Materials*. 2019; 211: 730–743. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.126
- Ismail B, Belayachi N, Hoxha D. Hygric properties of wheat straw biocomposite containing natural additives intended for thermal insulation of buildings. *Construction and Building Materials*. 2022; 317: 126049. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126049

13. Javaid A, Jain D, Kwatra N. Pre-treatment and its effect on the thermal conductivity of natural lignocellulosic rice straw stubble waste boards: Analysis vis a vis potential for the civil engineering applications. *Construction and Building Materials*. 2024; 445: 137903. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137903
14. Thomson A, Walker P. Durability characteristics of straw bales in building envelopes. *Construction and Building Materials*. 2014; 68: 135–141. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.041
15. Laborel-Préneron A, Ouédraogo K, Simons A, et al. Laboratory test to assess sensitivity of bio-based earth materials to fungal growth. *Building and Environment*. 2018; 142: 11–21. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.06.003
16. Slimani Z, Trabelsi A, Virgone J, et al. Study of the Hygrothermal Behavior of Wood Fiber Insulation Subjected to Non-Isothermal Loading. *Applied Sciences*. 2019; 9(11): 2359. doi: 10.3390/app9112359
17. Latif E, Lawrence RMH, Shea AD, et al. An experimental investigation into the comparative hygrothermal performance of wall panels incorporating wood fibre, mineral wool and hemp-lime. *Energy and Buildings*. 2018; 165: 76–91. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.028
18. Seng B, Magniont C, Gallego S, et al. Behavior of a hemp-based concrete wall under dynamic thermal and hygric solicitations. *Energy and Buildings*. 2021; 232: 110669. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110669
19. Chennouf N, Agoudjil B, Alioua T, et al. Experimental investigation on hygrothermal performance of a bio-based wall made of cement mortar filled with date palm fibers. *Energy and Buildings*. 2019; 202: 109413. doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109413
20. Rahim M, Douzane O, Tran Le AD, et al. Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelopes. *Energy and Buildings*. 2017; 139: 608–615. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.01.058
21. Alioua T, Agoudjil B, Chennouf N, et al. Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect. *Building and Environment*. 2019; 163: 106333. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106333
22. Dong W, Chen Y, Bao Y, et al. A validation of dynamic hygrothermal model with coupled heat and moisture transfer in porous building materials and envelopes. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32: 101484. doi: 10.1016/j.jobee.2020.101484
23. Kaoutari T, Louahlia H. Experimental and numerical investigations on the thermal and moisture transfer in green dual layer wall for building. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 53: 103946. doi: 10.1016/j.csite.2023.103946
24. Mendes N, Winkelmann F, Lamberts R, Philippi PC. Moisture effects on conduction loads. *Energy and buildings*. 2003; 35(7): 631–644.
25. Rouchier S, Busser T, Pailha M, et al. Hygric characterization of wood fiber insulation under uncertainty with dynamic measurements and Markov Chain Monte-Carlo algorithm. *Building and Environment*. 2017; 114: 129–139. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.12.012
26. Dubois S, McGregor F, Evrard A, et al. An inverse modelling approach to estimate the hygric parameters of clay-based masonry during a Moisture Buffer Value test. *Building and Environment*. 2014; 81: 192–203. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.06.018
27. Alioua T, Agoudjil B, Boudenne A, et al. Sensitivity analysis of transient heat and moisture transfer in a bio-based date palm concrete wall. *Building and Environment*. 2021; 202: 108019. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108019
28. Zhou Y, Trabelsi A, El Mankibi M. Hygrothermal properties of insulation materials from rice straw and natural binders for buildings. *Construction and Building Materials*. 2023; 372: 130770. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130770
29. Hagentoft CE. HAMSTAD—Final report: Methodology of HAM-modeling. Report R. 2002; 2 (8): 19–23.
30. Slimani Z. Experimental and numerical analysis of the hygrothermal behavior of highly hygroscopic walls (French). Lyon 1; 2015.
31. BS EN ISO 12571. Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of hygroscopic sorption properties. British Standards Institution; 2013.
32. Künzle HM. Simultaneous heat and moisture transport in building components, One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart. 1995; 65.
33. Branco F, Tadeu A, Simões N. Heat conduction across double brick walls via BEM. *Building and Environment*. 2004; 39(1): 51–58. doi: 10.1016/j.buildenv.2003.08.005
34. Liu X, Chen Y, Ge H, et al. Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China. *Energy and Buildings*. 2015; 93: 259–268. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.016

35. Fang A, Chen Y, Wu L. Transient simulation of coupled heat and moisture transfer through multi-layer walls exposed to future climate in the hot and humid southern China area. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 52: 101812. doi: 10.1016/j.scs.2019.101812
36. Hagentoft CE, Kalagasidis AS, Adl-Zarrabi B, et al. Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*. 2004; 27(4): 327–352. doi: 10.1177/1097196304042436
37. Trabelsi A, Slimani Z, Virgone J. Response surface analysis of the dimensionless heat and mass transfer parameters of Medium Density Fiberboard. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018; 127: 623–630. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.145
38. Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory, *Micro Mach, Hum. Sci*; 1995.
39. Whitley D. A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*. 1994; 4(2): 65–85. doi: 10.1007/bf00175354
40. Chai T, Draxler RR. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE), *Geoscientific Model Development Discussions*. 2014; 7(1): 1525–1534. doi: 10.5194/gmdd-7-1525-2014
41. Asan H. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*. 2006; 41(5): 615–620. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.02.020
42. Rafidiarison H, Mougél E, Nicolas A. Laboratory experiments on hygrothermal behaviour of real-scale timber walls. *Maderas Ciencia y tecnología*. 2012; (ahead): 0-0. doi: 10.4067/s0718-221x2012005000010

Article

# Investigation of hygrothermal behavior of a novel bio-based panel: Experiment and numerical simulation

Yaping Zhou<sup>1,\*</sup>, Abdelkrim Trabelsi<sup>2</sup>, Li Xiang<sup>1</sup>, Mohamed El Mankibi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

<sup>2</sup> CETHIL, UCBL, University of Lyon, 69622 Villeurbanne, France

<sup>3</sup> LTDS, ENTPE, University of Lyon, 69120 Vaulx-en-Velin, France

\* **Corresponding authors:** Yaping Zhou, zyaping@csust.edu.cn

---

**Abstract:** Straw composites, owing to their low carbon footprint and favorable hygrothermal properties, are becoming a promising alternative insulation material for buildings in order to promote energy saving and occupants' comfort. However, the heat and moisture characteristics of straw composites at the material scale and under steady-state condition are insufficient for a thorough assessment of their performance as a building component in actual service conditions. This study focused on the hygrothermal performance of a novel bio-based wall made with a rice straw–alginate composite material. The temperature and relative humidity profiles within the wall were monitored under various boundary conditions. The inverse analysis method was proposed to determine liquid water permeability. In a dynamic test, compared with the model of coupled heat-and-moisture transfer (CHM), the transient heat transfer model predicted temperature profiles with higher errors and underestimated total heat flux by up to 30.6%. Also, under the dynamic condition, the CHM model with liquid water transport showed decreased mean absolute errors by 61%, 57% and 8% at depths of 28 mm, 36 mm and 64 mm, respectively, compared with those predicted by the CHM model without liquid water transport. Both vapor transport and liquid transport seemed to be essential when modeling thermal transfer and moisture transfer through the wall.

**Keywords:** straw composite; hygroscopic material; liquid water permeability; coupled heat and moisture transfer; inverse parameter estimation