

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.199



开放科学(资源服务)标识码OSID:



# 非均匀吸放湿过程对建材导热系数的影响

李娟红<sup>a</sup>, 张鹏宇<sup>a</sup>, 王莹莹<sup>b</sup>

(西安建筑科技大学 a. 建筑设备科学与工程学院; b. 西部绿色建筑国家重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** 在针对含湿建材导热系数的研究中, 预测模型一般假设材料含湿均匀, 试验测量多采用均匀增湿方案, 但实际使用过程中, 受室内外湿度及气象条件影响, 造成吸放湿过程中湿组分非均匀分布, 相同含湿量下吸放湿过程中的材料导热系数存在差异。通过对孔隙特征不同的加气混凝土(AAC)、发泡水泥(FC)、红砖(RB)材料进行增减湿试验, 控制试件在试验环境中的放置时间获得质量含湿量不均匀的试件, 选择瞬态导热系数测量方案, 通过分析含湿多孔建材增/减湿全过程导热系数变化趋势, 研究非均匀湿分布材料导热系数变化特性。结果表明: AAC、FC、RB加湿过程导热系数相较于干燥状态下分别增长了279%、266%、106%。增减湿过程中, 含湿量相同的AAC导热系数差值范围约为-20.2%~63.4%, FC差值范围约为14.5%~53.3%, RB差值范围约为-18.0%~37.4%。

**关键词:** 湿组分; 非均匀分布; 多孔建筑材料; 导热系数

**中图分类号:** TU55.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)04-0163-10

## Influence of non-uniform moisture absorption and desorption on thermal conductivity of building materials

LI Juanhong<sup>a</sup>, ZHANG Pengyu<sup>a</sup>, WANG Yingying<sup>b</sup>

(a. School of Building Services Science and Engineering; b. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710054, P. R. China)

**Abstract:** At present, for the study of the thermal conductivity of building materials containing moisture, the prediction model generally assumes that the materials containing moisture are uniform, and the experimental measurement usually adopts the uniform humidification scheme. However, the indoor and outdoor humidity and meteorological conditions influence building materials in the process of actual use, causing the non-uniform distribution of moisture components in the process of moisture absorption and desorption, and the thermal conductivity of the materials is different under the same moisture content. In this paper, the moisture content of autoclaved aerated concrete (AAC), foam cement (FC) and red brick (RB) materials with different pore characteristics were tested by analyzing the changing trend of thermal conductivity in the whole process of

**收稿日期:** 2021-06-24

**基金项目:** 陕西省青年科技新星项目(2021KJXX-31); 国家自然科学基金(51878534、51590911)

**作者简介:** 李娟红(1996-), 女, 主要从事建筑热湿耦合传递研究, E-mail: 2985124710@qq.com。

王莹莹(通信作者), 女, 教授, E-mail: 1274296191@qq.com。

**Received:** 2021-06-24

**Foundation items:** Shaanxi Youth Science and Technology New Star Project (No. 2021KJXX-31); National Natural Science Foundation of China (No. 51878534, 51590911)

**Author brief:** LI Juanhong (1996-), main research interest: coupled heat and moisture transfer in buildings, E-mail: 2985124710@qq.com.

WANG Yingying (corresponding author), professor, E-mail: 1274296191@qq.com.

moisture-increasing and moisture-reducing, the changing characteristics of thermal conductivity in non-uniform moisture-distributing materials were studied. The results show that the thermal conductivity of AAC, FC and RB in the humidification process increases by 279%, 266% and 106%, respectively, compared with that in the dry state. The difference value of thermal conductivity of ACC with the same moisture content in humidification process is about  $-20.2\% \sim 63.4\%$ , the difference value of FC is about  $14.5\% \sim 53.3\%$ , and the difference value of RB is about  $-18.0\% \sim 37.4\%$ .

**Keywords:** wet components; uneven distribution; porous building materials; thermal conductivity

建筑材料导热系数的准确取值是建筑能耗预测准确、设备选择经济可靠的关键。目前,相关规范和设计手册一般仅给出建材在干燥状态下的导热系数<sup>[1-2]</sup>,实际使用过程中,多孔建材容易受到湿组分的侵入渗透,大量研究表明,建材含湿后导热系数变化显著<sup>[3-5]</sup>。

建立导热系数计算模型预测含湿材料导热系数是常用研究手段, Jin等<sup>[6]</sup>考虑潮湿样品中湿组分,利用分形理论推导出针对加气混凝土的三相(固、液、气)有效导热系数分型模型; Shen等<sup>[7]</sup>基于热电类比原理,建立了液相不和多孔介质有效导热系数(ETC)的通用模型; 马超<sup>[8]</sup>基于分形理论推导出考虑微尺度传热效应的液、气空间替换的固液气共存导热系数预测模型,引入迂曲度等空间结构参数,建立模型时的通用假设一般为多孔建材含湿均匀。计算模型的预测精度随含湿量变化会有所下降,多数学者选择通过制备含湿材料实测其导热系数变化,制备方法大致分为2种:使用液态水侵入多孔材料的浸泡法及使用水蒸气渗透多孔材料的恒湿箱法<sup>[9-12]</sup>。Boukhattem等<sup>[13]</sup>、Belkharchouche等<sup>[14]</sup>、Nguyen等<sup>[15]</sup>、Gao等<sup>[16]</sup>、Cao等<sup>[17]</sup>、Liu等<sup>[18]</sup>采用传统浸泡法制备了半饱和、饱和含湿材料, Khoukhi<sup>[19]</sup>、Yang等<sup>[20]</sup>的研究中采用恒温恒湿箱或自制恒湿设备维持多孔材料稳定的吸湿环境,制备含湿材料。通过以上试验方案能得到含湿饱和、稳定的含湿材料,材料内部湿分布均匀。

但实际工程使用中,建筑材料受室内外温、湿度变化动态影响,材料内部湿组分会增加和衰减,呈现沿湿接触方向上的非均匀分布,从而造成含湿多孔材料导热系数动态变化。在多孔材料均匀增湿方案的基础上,确定增减湿过程中非均匀含湿建材制备及导热系数测量方案,初步探究相同含湿量下非均匀含湿状态对多孔建材导热系数影响程度。

## 1 多孔建材增减湿试验

### 1.1 试验材料

选择材料首先考虑材料孔径特征,不同的孔径大小直接影响湿组分侵入材料的方式和速率,进而

影响含湿材料导热系数<sup>[21]</sup>。运用适当的增减湿方案,可得到在先增湿后减湿过程中不同材料湿组分的不同分布对材料导热系数的影响。湿组分侵入材料的不同方式直接决定湿组分在材料中的不同分布,选用孔径特征存在较大差异的加气混凝土(AAC)、发泡水泥(FC)、红砖(RB)等3种材料进行试验。

各材料均制作0.5~1 cm立方体颗粒各3~5块用于压汞实验,测量3种材料的孔隙率及孔径分布。各材料均制作60 mm×60 mm×50 mm标准试件各6块,每2块为1组,3组材料同时进行液态水侵入试验,测试完成后再进行干空气蒸发减湿试验。试验测量取平均值,各组减湿起点材料选用本组增湿稳定材料,保证质量含湿量连贯,各材料均用同一批次或同一块母材料制作标准试件。

### 1.2 试验仪器

使用高性能全自动压汞仪,型号为麦克9620,测试工作压力为3.45~429 919.74 kPa,测试孔径范围为2.90~361 727.08 nm。测试试件为近似1 cm<sup>3</sup>正方体材料颗粒,利用压汞仪可得出典型建筑材料的孔径分布、比表面积、比孔容积等基本参数。使用高性能全自动压汞仪,由小到大施加压力,使汞克服表面张力,侵入材料孔隙,以此测定孔隙率及孔径分布。

选用瞬态导热系数测试仪(TPS2200),用瞬态平面热源法测量材料导热系数,仪器导热系数测试范围为0.005~500 W/(m·K),精度优于3%。仪器探头产生平面圆形热场,测量被测试件的瞬间温度提升,计算出材料导热系数,短时间瞬间热场引起的材料湿迁移可忽略不计。

使用烘箱营造干燥环境,烘箱由德国Binder公司生产,型号为FD115,环境温度营造最高限值为230℃,最低限值比环境温度高5℃即可,可设置报警温度(即仪器不受控升温后提示操作者,防止损坏试件),温度控制精度为±2%。

### 1.3 试验方案

传统浸泡法一般直接浸没试件,获取液态水饱和、饱和的含湿材料,材料内部含湿均匀且含湿

状态点较少,并且未将增减湿过程相结合,无法得到相同含湿量下同组试件不同含湿状态及分布的导热系数差异。笔者采用不同于传统含湿材料的制备方法,并将增减湿过程相结合。

1.3.1 增湿试验方案 增湿过程中使用饱和含水海绵接触建筑材料上表面,从而获得持续稳定的液态水侵入速度和压力,通过控制海绵放置时间来控制试件的质量含湿量,经过预实验验证能够有效控制含湿材料质量含湿量的近似增长规律。同时对材料其他非接触面进行蜡封处理,控制液态水沿侵入方向迁移。用显微镜观察表面湿组分形态特征,并结合多孔材料的孔隙特征分析研究非均匀含湿多孔材料吸放湿全过程导热系数变化特性。如图 1 所示,随着试件与饱和含水海绵接触时间的增加,液态水侵入材料的深度增加,在不同阶段试件湿分布不同。增湿过程均在室温 25 °C 下进行,具体如下。

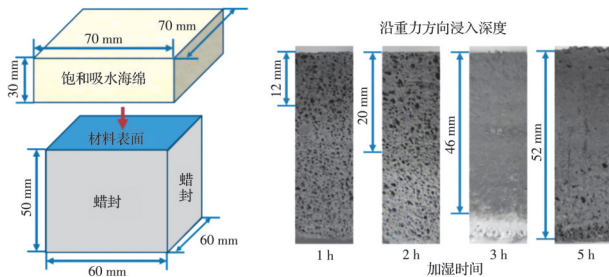


图 1 AAC 材料液态水侵入增湿过程

Fig. 1 Liquid water intrusion humidification process of AAC material

1)取各材料标准试件组各两块,在 105 °C 烘箱中烘干至质量稳定,连续 3 d 测得试块质量变化率小于 1%。覆膜冷却前记录材料干燥状态下的质量  $m_0$ 。

2)将烘干试块用 PE 保鲜膜包裹,冷却至室温,去除 PE 膜后用游标卡尺测量各试块的真实长度,并记录材料干燥状态下体积  $V$ ,并计算出干燥时试件的表现密度。

3)将各标准试块 5 个面进行蜡封处理,记录蜡封后试块质量,作为吸湿过程的质量起点  $m_1$ 。

4)用 70 mm × 70 mm × 30 mm 的海绵饱和吸收添加纯蓝墨水的去离子水,并放置在材料未蜡封表面上侧,每个增湿过程时长见表 1。

5)完成第  $i$  增湿过程设定的时间,称量含湿材料质量  $m_i$ ,测量材料导热系数。计算第  $i$  加湿过程材料含湿量  $u_i$ ,见式(1)。

$$u_i = \frac{m_i - m_1}{m_0} \quad (1)$$

式中: $u_i$ 为第  $i$  增湿过程材料质量含湿量; $m_i$ 表示第  $i$

表 1 各材料加湿过程及吸湿时间

Table 1 Humidification process and moisture absorption time of each material

加湿次数	吸湿时间		
	AAC	FC	RB
1	30 s	0.5 h	0.5 h
2	60 s	1 h	1 h
3	60 s	2 h	2 h
4	60 s	4 h	4 h
5	3 min	8 h	8 h
6	6 min		
7	12 min		
8	30 min		
9	45 min		
10	1 h		
11	1 h		

增湿过程材料的质量; $m_1$ 为同一材料干燥状态下蜡封后质量; $m_0$ 为同一试件干燥状态下的质量。

6)重复步骤 4)、步骤 5),进入第  $i+1$  加湿过程。

1.3.2 液态水侵入增湿截面方案 由于 AAC 试件高孔隙率、高透水的特点,且材料易于切割,切割过程中液态水蒸发可忽略不计,因此,无液态水直接流出现象,故加气混凝土材料 AAC 非常适合进行截面实验。共设置 1、2、3、5 h 四种加湿时间,每个增湿时间共测量 4 个部位的导热系数,分别为材料触湿表面及材料上层、中层、下层,通过调整探头中心位置达到测量不同区域导热系数的目的。每次完成加湿过程后,快速沿液态水侵入方向切开,可观察到液态湿组分在材料内部的空间不均匀分布。采用瞬态平面热源法测试被测材料的导热系数,通过调整瞬态平面热源法圆形探头中心位置,改变测试区域,从而得到沿湿组分侵入方向上的导热系数变化,测试过程如图 2 所示。将沿液态水浸

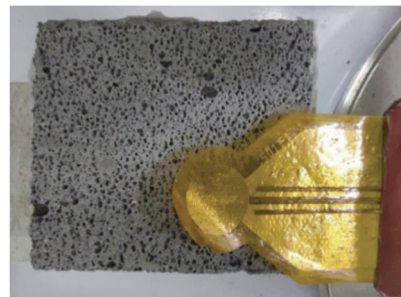


图 2 改变探头位置测量导热系数

Fig. 2 Change the probe position to measure the thermal conductivity

入方向 1.5~2 mm 的区域定义为顶部区域,2~3.5 mm 的区域定义为中部区域,3.5~5 mm 的区域定义为底部区域。

1.3.3 减湿试验方案 利用烘箱营造干空气环境,将含湿量稳定的材料移入 55 °C 的强制对流烘箱中,升高饱和和试件主体及材料内部湿组分温度,加快饱和和试件表面及内部湿组分蒸发,具体过程如下。

1) 试件经液态水浸入达到吸湿稳定,取该标准试件组重新放入鼓风机烘箱在 55 °C 进行烘干处理。每个减湿过程时长详见表 2,测试前将试件覆膜冷却至室温。

2) 每个减湿过程结束后,记录各阶段含湿材料质量  $m_i$ ,在室温下测量导热系数,计算第  $i$  减湿过程材料含湿量  $u_i$ ,如式(1)所示。

3) 重复步骤 1)、步骤 2),进入第  $i+1$  减湿过程。

表 2 各材料减湿过程及减湿时间

Table 2 Dehumidification process and time of each material

减湿次数	减湿时间			减湿次数	减湿时间
	AAC	FC	RB		
1	5 min	30 min	15 min	10	18 h
2	15 min	30 min	30 min	11	24 h
3	45 min	30 min	1 h	12	24 h
4	60 min	60 min	1 h	13	24 h
5	90 min	2 h	2 h	14	48 h
6	2 h	4 h	4 h	15	48 h
7	2 h	24 h	12 h	16	48 h
8	3 h	48 h	24 h	17	48 h
9	6 h		48 h	18	48 h

## 2 非均匀吸放湿对建材导热系数的影响

### 2.1 实验材料孔隙特征

用压汞仪测得 3 种材料的孔隙率及孔径分布,如图 3 所示。加气混凝土材料 AAC 孔径分布基本涵盖了所有孔径大小类型,主要以 10~1 000 nm 区间的过渡孔、毛细孔及大于 10 000 nm 的大孔为主,分别占总孔隙的 53.6% 和 45.2%。毫米级的宏观大型孔道可极大提高水蒸气吸收面积,同时为液态水提供毛细管流通道;过渡孔、毛细孔作为固体骨架渗透的主要通道。

发泡水泥材料 FC 主要以大于 10 000 nm 的大孔为主,占总孔隙的 71.7%。由于发泡水泥独特的

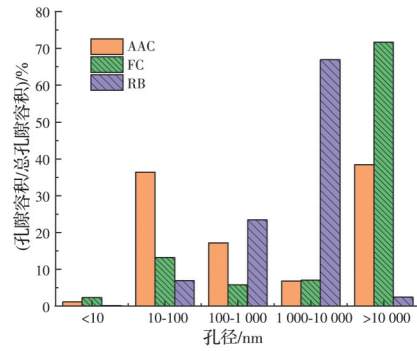


图 3 3 种材料不同孔径孔隙容积百分比

Fig. 3 Percentage of pore volume of three materials with different pore diameters

封闭气孔结构,使得样品总孔隙率较高,大孔占比较高,同时过渡孔、毛细孔较少,占总孔隙的 26.1%,导致材料 FC 固体骨架渗透阻力较大。

红砖材料 RB 主要以 1 000~10 000 nm 的大孔为主,占总孔隙的 66.9%,大孔孔径明显小于材料 AAC,使得材料 RB 大孔对湿空气的吸收作用弱化,作为毛细管流通道则不受影响。100~1 000 nm 的毛细孔占总孔隙的 23.5%,可作为固体骨架渗透作用的主要通道。3 种多孔建材总孔隙率见表 3。

表 3 3 种材料总孔隙率

Table 3 Total porosity of three materials %

AAC	FC	RB
63.382	77.289	40.961

### 2.2 非均匀增减湿过程中多孔建材质量含湿量及导热系数变化

如图 4 所示,在增湿、减湿过程中,材料 AAC 的导热系数变化大致可分为 3 个阶段。AAC 干燥导热系数为 0.213 W/(m·K),经过 11 次加湿,含湿量稳定时材料导热系数为 0.807 W/(m·K),增长了 279%。再经过 18 次减湿,减湿过程终此时材料导热系数为 0.194 W/(m·K),降低了 73.6%。在 AAC 增减湿过程中,导热系数均为前期变化剧烈,中期变化速率趋缓,后期基本趋于稳定。

增湿过程中,阶段 1 为加湿过程 1~2,材料导热系数由 0.213 W/m·K 增长至 0.519 W/(m·K),增长幅度为干燥状态下导热系数的 177%,占增湿过程导热系数增长的 63.9%。该过程液态湿组分接触 AAC 材料表面,多数通过毛细管流的方式深入材料内部,少数通过固体骨架渗透方式进入材料。液态湿组分渗透不及时、饱和等情况下,会在表面形成局部小型液桥,因此,该阶段导热系数增加迅速。

阶段 2 为加湿过程 3~9,材料导热系数由

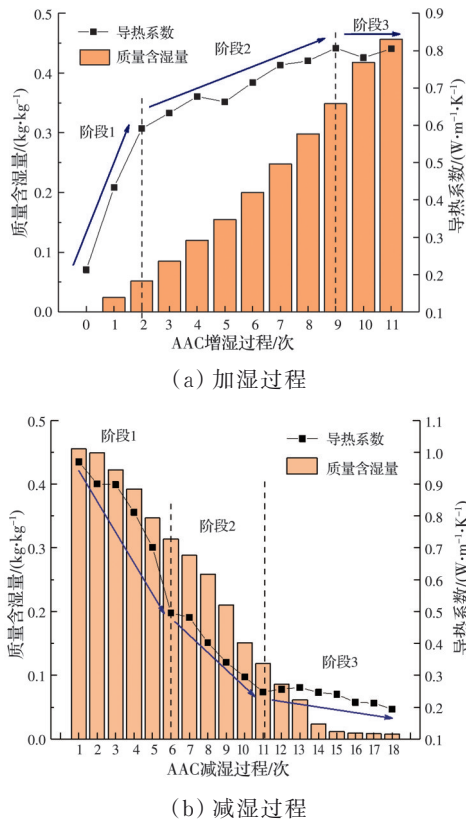


图 4 AAC 加湿及减湿过程导热系数及含湿量变化趋势  
Fig. 4 Variation trend of thermal conductivity and moisture content in humidification and dehumidification process of AAC

0.633 W/(m·K) 增长至 0.807 W/(m·K), 增长幅度为上过程结束时导热系数的 36.1%, 占增湿过程导热系数增长的 29.4%。该过程宏观孔洞中液态湿组分逐渐饱和, 固体骨架渗透速度小于液态湿组分补充速度, 造成表面湿组分组织形式逐步演化, 即小型液桥→零星水团→局部小液团→大型连通液桥→小型液坑→大型液坑→局部液膜。

阶段 3 为加湿过程 10~11, 材料导热系数由 0.781 W/(m·K) 增长至 0.805 W/(m·K), 含湿材料导热系数基本保持稳定。此时各宏观孔道中液态湿组分已趋于饱和, 固体骨架的细密气孔中湿组分饱和, 毛细作用微弱, 材料 AAC 表面形成稳定的局部或大型水膜。

减湿过程中, 阶段 1 为减湿过程 1~6, 材料导热系数由 0.807 W/(m·K) 降低至 0.496 W/(m·K), 占减湿过程导热系数降低的 52.3%。减湿前期材料 AAC 上层液态湿组分充足, 表面液态湿组分受热蒸发, 浅层湿组分通过固体骨架渗透, 快速返回材料表面或孔壁, 参与蒸发, 故该阶段导热系数下降迅速。

阶段 2 为减湿过程 7~11, 材料导热系数由 0.482 W/(m·K) 降低至 0.248 W/(m·K), 占减湿过程导热系数降低的 39.4%, 该过程材料 AAC 导热系数下降速度均匀。材料上层液态湿组分基本完全蒸发, 中层湿组分通过固体骨架渗透方式返回材料上层, 或直接在材料中层蒸发, 随膨胀空气溢散出材料。

阶段 3 为减湿过程 12~18, 材料导热系数由 0.257 W/(m·K) 降低至 0.194 W/(m·K), 占到减湿过程导热系数降低的 10.5%。该过程 AAC 材料导热系数下降趋缓直至稳定, 已经接近干燥状态下材料导热系数。此时, 材料中上层液态湿组分缓慢迁移蒸发, 底层蒸发水蒸气返回材料表面是该过程材料导热系数缓慢下降的原因。

截面实验中, 试件内湿分布如图 1 所示。材料加湿 1 h, 仅试件截面顶部区域有液态水浸入湿润现象; 加湿 2 h, 截面顶部、中部区域有液态水浸入湿润现象; 加湿 3 h, 截面顶部、中部、底部区域均有液态水浸入湿润现象; 加湿 5 h, 液态水已完全浸润整个材料, 材料截面导热系数变化如图 5 所示。

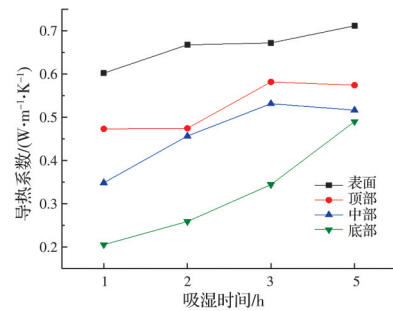


图 5 截面各部位导热系数随加湿时间的变化  
Fig. 5 The thermal conductivity of each part of the section changes with humidification time

由图 5 可见, 材料表面导热系数变化大致分为 3 个过程, 导热系数呈先增长 10.9%, 之后稳定缓慢增长 0.67%, 再增长 5.8% 的整体趋势。材料顶部导热系数变化滞后于材料表面, 即先稳定缓慢增长 0.3%, 之后迅速增长 22.6%, 再处于稳定波动状态; 材料中部导热系数变化不同于表面和顶部, 先迅速增长 34.5%, 之后趋于稳定; 材料底部导热系数变化则是持续增长 139%。

随着累计增湿时长的增长, 材料内部湿组分趋于均匀, 表面与底部材料导热系数逐渐接近。实际情况中, 由于湿组分浸入方向、时长等因素不同, 含湿材料内部导热系数沿浸入方向递减。材料顶部导热系数变化滞后于材料表面, 具体表现为表面导热系数增长, 顶部导热系数增长停滞; 表面导热系

数增长停滞,顶部导热系数增长。原因是测量时刻1至2,湿组分在表面积存,向下渗透浸入仍需持续的液态湿组分补充。造成表面导热系数快速增长,而顶部导热系数增长因迁入与迁出动态平衡,导热系数增长停滞。测量时刻2至3,湿组分进一步增多,表面湿组分获得浸入渗透动力,向下迁移。顶部湿组分增多,而表面湿组分仍持续增多,此时间段,材料表面导热系数增长停滞,顶部材料导热系数迅速增长。顶部材料导热系数增长第1次停滞是由于湿组分迁移停滞,湿组分暂时达到动态平衡。在测试时刻3至5,材料中部也出现导热系数增长停滞,原因是材料中部湿组分暂时动态平衡。材料底部一直处于导热系数增长状态,但随着累计加湿时间的增加,在之后的测试时刻材料底部出现导热系数增长停滞,由此可得随着浸入渗透行程的增加,导热系数增长、停滞过程拉长。

如图6所示,FC的导热系数变化在增湿、减湿过程中大致皆可分为两个阶段,FC干燥导热系数为 $0.11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,经过5次加湿,含湿量稳定时材

料导热系数为 $0.403 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,导热系数增长266%。再经过8次减湿,减湿过程终点材料导热系数为 $0.107 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,导热系数降低73.5%。FC增减湿过程导热系数变化均为前期变化较快,后期变化速率趋缓。

增湿过程中,阶段1为加湿过程1,材料导热系数由 $0.11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增长至 $0.246 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,增长幅度为干燥状态导热系数的123%,占增湿过程导热系数增长的46.4%,该阶段液态湿组分通过固体骨架渗透方式进入材料,渗透阻力明显大于材料AAC。液态湿组分渗透不及时、饱和等情况下,在材料表面形成零星液滴,导热系数增加迅速。

阶段2为加湿过程2~5,材料导热系数由 $0.271 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增长至 $0.403 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,占增湿过程导热系数增长的53.6%。由于液态湿组分只能通过固体骨架渗透方式进入材料,且渗透阻力明显大于材料AAC液态湿组分补充速度,容易造成液态湿组分在表面积累,液态湿组分形态特征快速演化,即零星液滴→小型液桥→小型液坑→大型液坑,表面湿组分组织形式演化明显快于材料AAC。

减湿过程中,阶段1为减湿过程1~4,材料导热系数由 $0.403 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 降低至 $0.177 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,占减湿过程导热系数降低的76.7%。由于发泡水泥特殊的表面微观特征,即封闭气孔造成的无宏观孔道、无固体骨架细密气孔结构。液态湿组分渗透速率低,通过毛细作用返回表面的速率低,液态湿组分多数积存在材料上层,减湿初期FC材料表面湿组分快速蒸发,材料导热系数快速下降。

阶段2为减湿过程5~8,材料导热系数由 $0.142 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 降低至 $0.107 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,占减湿过程导热系数降低的23.3%。由于发泡水泥特殊的封闭气孔结构,导致湿组分仅能通过固体骨架渗透方式缓慢上移参与蒸发,迁移阻力较大,减湿过程时间长。故该过程材料导热系数已经接近干燥状态下材料导热系数。

如图7所示,在增湿、减湿过程中,RB的导热系数变化大致可分为4个阶段。干燥状态下材料RB导热系数为 $0.851 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,经过6次加湿,含湿量稳定时材料导热系数为 $1.758 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,增长106%。再经过9次减湿,减湿过程结束时材料导热系数为 $0.719 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,降低63.19%。增减湿过程RB导热系数变化与AAC不同之处在于其中前期存在导热系数稳定阶段。

增湿过程中,阶段1为加湿过程1,材料导热系数由 $0.851 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增长至 $1.301 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,增长幅度为干燥状态下的52.9%,占增湿过程导热系

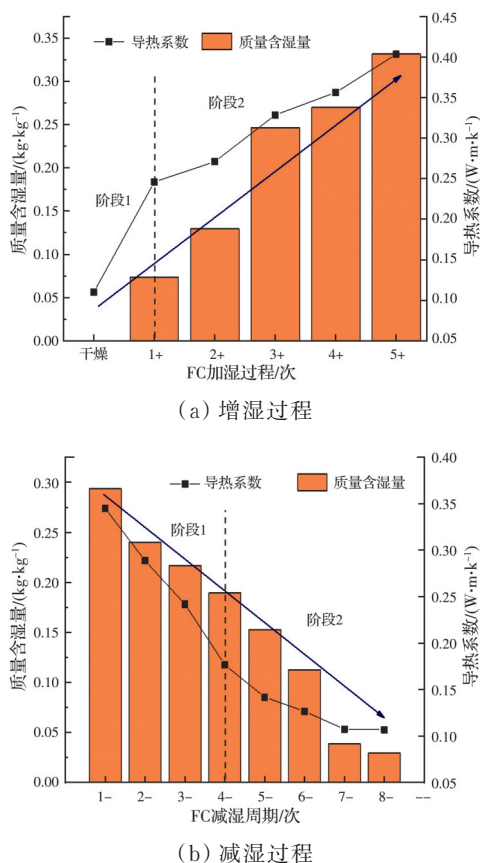


图6 增湿及减湿过程FC导热系数及含湿量变化趋势

Fig. 6 Variation trend of thermal conductivity and moisture content in humidification and dehumidification process of FC

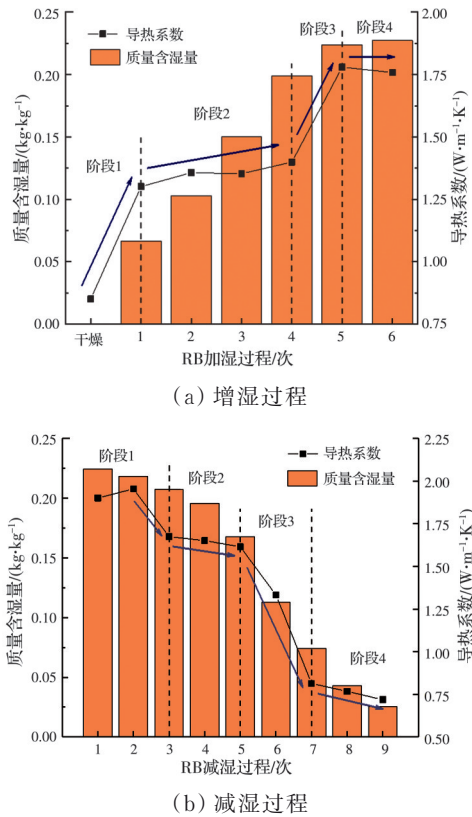


图7 增湿及减湿过程RB导热系数及含湿量变化趋势

Fig. 7 Variation trend of thermal conductivity and moisture content in humidification and dehumidification process of RB

数增长的49.6%。该过程液态湿组分多数通过毛细管流的方式深入材料内部,少数通过固体骨架渗透方式进入材料,液态湿组分渗透完全,材料微观表面无法观察到成规模的液态湿组分,因此导热系数增加较快。

阶段2为加湿过程2~4,材料导热系数由1.35 W/(m·K)增长至1.40 W/(m·K),占到增湿过程导热系数增长的10.8%。该过程材料上层孔道湿组分局部动态饱和,液态湿组分向下浸入,渗透速率基本等于液态水补充速率。表面液态湿组分积聚状态基本保持不变,导热系数增长趋缓。

阶段3为加湿过程4,材料导热系数由1.40 W/(m·K)增长至1.78 W/(m·K),占增湿过程导热系数增长的41.9%。该过程表面湿组分由连通液坑过渡为大型连通液坑,材料下层孔道液态湿组分趋于饱和,表面湿组分开始积聚,液坑规模不断扩大,向液膜态发展。

阶段4为加湿过程5,含湿材料RB导热系数基本保持稳定。此时各宏观孔道中液态湿组分已趋于饱和,固体骨架细密气孔中的湿组分饱和,毛细

作用微弱,材料RB表面形成稳定的局部或大型水膜。

减湿过程中,阶段1为减湿过程1~3,材料导热系数由1.90 W/(m·K)降低至1.674 W/(m·K),占到减湿过程导热系数降低的10.0%。减湿前期材料RB上层液态湿组分充足,表面液态湿组分受热蒸发,浅层湿组分通过固体骨架渗透,快速返回材料表面或孔壁,参与蒸发,由于毛细作用,测试区液态湿组分质量可能维持不变甚至上升,导致前两个减湿过程导热系数出现反常上升。减湿过程3,由于重力、行程等原因上层湿组分无法及时补充至材料表面,导热系数开始下降。

阶段2为减湿过程4~5,材料导热系数由1.651 W/(m·K)降低至1.615 W/(m·K),占减湿过程导热系数降低的2.9%。该过程材料表面湿组分蒸发,但又通过固体骨架向上渗透,得到内部湿组分的补充,测试区材料含湿状态几乎达到动态平衡,故材料导热系数下降速度缓慢。

阶段3为减湿过程6~7,材料导热系数由1.333 W/(m·K)降低至0.814 W/(m·K),占减湿过程导热系数降低的42.1%。该过程RB材料导热系数迅速下降,材料上层液态湿组分基本完全蒸发,中层湿组分通过固体骨架渗透方式返回材料上层,或直接在材料中层蒸发,随膨胀空气溢散。

阶段4为减湿过程8~9,材料导热系数由0.768 W/(m·K)降低至0.719 W/(m·K),占到减湿过程导热系数降低的3.91%。材料中上层液态湿组分基本蒸发完全,底层液态湿组分以固体骨架渗透方式上移,无法影响测试区材料含湿量,是该过程材料导热系数缓慢下降的原因。

### 2.3 增/减湿过程多孔建材湿组分分布示意图

增湿过程中,饱和吸水的海绵提供长时间稳定的液态水接触,液态湿组分受重力和毛细作用影响,总体沿重力向下浸入渗透。由于孔隙特征不同,各多孔建材浸入渗透速率各不相同。增湿过程初期,湿组分分布在材料表面浅层且较集中,中后期液态湿组分通过固体骨架渗透和毛细管流的方式浸入材料内部,内部湿分布随增湿时间的增长而逐渐趋于均匀。内部非均匀湿分布示意图如图8所示。

减湿过程初期,表面湿组分快速蒸发,浅层液态水返流,补充表层蒸发损失,在重力及毛细作用影响下,中下层液态水继续向下渗透浸入;减湿过程中期,表层浅层液态水持续蒸发,由于材料中层含湿量降低,返流作用不断减弱,材料内部微孔中的液态水开始蒸发,中下层液态湿组分分布趋于均

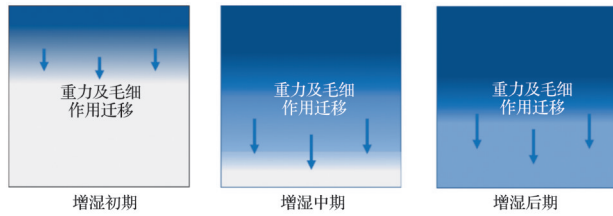


图 8 增湿过程多孔材料非均匀湿分布示意图

Fig. 8 Schematic diagram of non-uniform moisture distribution in humidification process of porous materials

匀。减湿过程后期,大型孔道内的液态水基本蒸发完毕,仅微小孔隙中液态湿组分内部蒸发。内部非均匀湿分布示意图如图 9 所示。

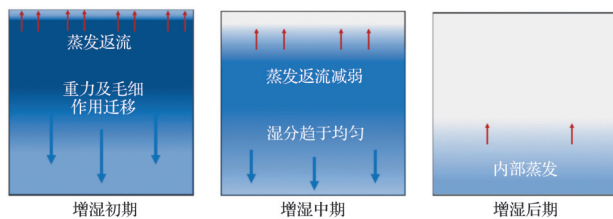


图 9 减湿过程多孔材料非均匀湿分布示意图

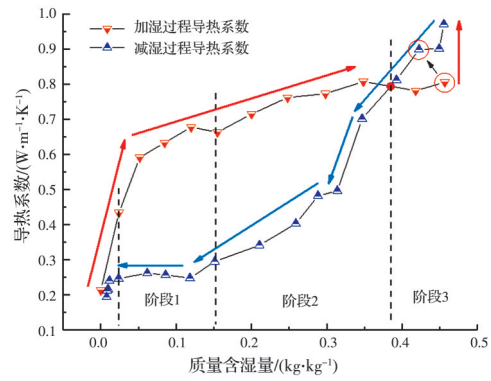
Fig. 9 Schematic diagram of non-uniform moisture distribution in the dehumidification process of porous materials

#### 2.4 增/减湿全过程多孔材料导热系数变化特性分析

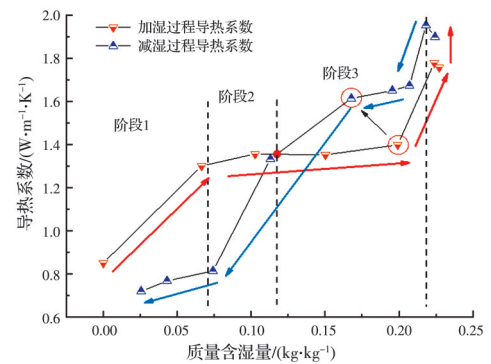
材料 AAC 与 RB 孔隙结构相似,孔径分布不同,故将二者一并讨论。如图 10 所示,增/减湿过程材料 AAC 与 RB 的导热系数变化可大致分为 3 个阶段,阶段 1 导热系数快速上升或降低,阶段 2 导热系数上升或下降速度趋缓,阶段 3 导热系数趋于稳定。

增、减湿过程中材料 AAC 和 RB 红色含湿状态点的质量含湿量及导热系数均相同。按照预期设想,如果含湿量下降,导热系数应随之下降,但减湿初期、增湿后期,AAC 和 RB 红色圆区域内的减湿状态点含湿量明显小于增湿状态点,但导热系数却分别高出 10.3% 和 13.4%。

阶段 3 材料 AAC 含湿量区间为 0.38~0.46 kg/kg, RB 含湿量区间为 0.118~0.227 kg/kg。减湿过程前期,由于表层液态水蒸发,湿组分返流上升带来液态水补充,流动性增强。增湿过程液态水均主要集中在中上层,但减湿过程浅层湿润且流动性更强,内部湿组分更均匀,故材料质量含湿量相同时,该阶段材料 AAC 和 RB 减湿过程导热系数高于增湿过程,导热系数最大增长约为 20.2% 和 18.0%。同时,由于材料 RB 峰值孔径小于材料 AAC,蒸发强度较小,返流作用持续时间更长,导热



(a) 材料 AAC



(b) 材料 RB

图 10 增减湿全过程材料 AAC 和 RB 相同质量含湿量下的导热系数

Fig. 10 Thermal conductivity of AAC and RB under the same mass moisture content in the whole process of increasing and decreasing humidity

系数反向增长持续时间更长。

阶段 2 材料 AAC 含湿量区间为 0.151~0.38 kg/kg, RB 含湿量区间为 0.07~0.118 kg/kg。减湿过程中经过长时间蒸发,浅层湿组分基本蒸发,中上层湿组分返流行程长且受重力作用无法返流至材料表面,由于迁移时间更久,湿组分已渗透进入材料骨架内部,流动受限,并且主要集中在材料中部;增湿过程中,湿组分分布在材料表面浅层且更加集中,并存在一定流动性。故材料质量含湿量相同时,该阶段增湿过程导热系数逐渐大于减湿过程,增湿过程材料 AAC 和 RB 导热系数分别高出减湿过程最大约 63.4% 和 37.4%。

阶段 1 材料 AAC 质量含湿量区间为 0.023~0.151 kg/kg,材料 RB 含湿量区间为 0.025~0.07 kg/kg。减湿过程后期,液态水主要分布在材料底部且较分散,流动性差,大型孔道内液态水蒸发完全,微小孔隙内液态水蒸发迁移缓慢。增湿过程液态水主要分布在材料表面浅层,大型孔道中液态水向骨架渗透,流动性较强。增湿过程导热系数增长



迅速,减湿过程基本保持稳定,故该阶段材料质量含湿量相同时,增湿过程导热系数逐渐大于减湿过程。

增/减湿过程发泡水泥材料FC导热系数变化可大致分为2个阶段,如图11所示。阶段1导热系数快速上升或降低,阶段2导热系数上升或下降速度趋缓。

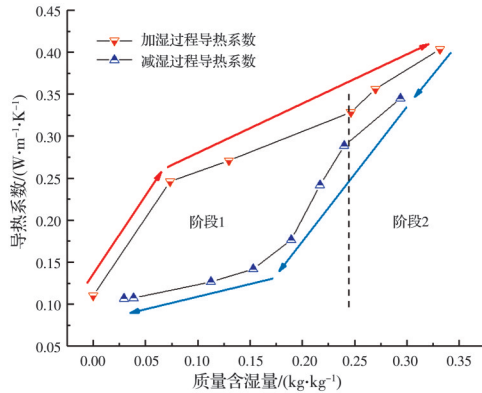


图11 增减湿全过程FC在相同质量含湿量下的导热系数  
Fig. 11 Thermal conductivity of FC under the same mass moisture content in the whole process of increasing and decreasing humidity

在质量含湿量相同时,材料FC液态水接触表面导热系数增湿过程始终大于减湿过程。阶段2质量含湿量区间为0.243~0.331 kg/kg,材料FC增湿过程与减湿过程导热系数平行变化。材料FC没有出现类似于材料AAC的导热系数反向增长现象,由于材料FC特殊的封闭气孔结构,阻碍了湿组分迁移。减湿过程中,表面湿组分蒸发迅速而无反流补充,质量降低,导热系数开始剧烈下降。导热系数由增湿过程结束时的0.403 W/(m·K)降低至减湿初期的0.345 W/(m·K),降低约14.5%。

阶段1质量含湿量区间为0.029~0.243 kg/kg,增湿与减湿过程导热系数差值先增大后减小。减湿过程中由于孔隙结构不利于湿组分迁移,湿组分分散在材料内部蒸发;增湿过程湿组分分布集中在表面浅层,非均匀分布导致相同质量含湿量下增湿过程导热系数更大。最大差值出现在质量含湿量0.12 kg/kg附近,增湿过程导热系数为0.271 W/(m·K),减湿过程导热系数为0.127 W/(m·K),降低约53.3%。

### 3 结论

针对加气混凝土、发泡水泥、红砖等多孔建材开展增/减湿过程中液态湿组分非均匀分布下导热系数变化特性研究,更加贴近多孔建材非均匀吸/

放湿的实际使用情况。首先得到3种材料的孔隙率和孔径分布,然后采用瞬态导热系数测试技术得到增减湿过程中非均匀分布下的导热系数变化特性。主要结论如下:

1)增减湿过程中3种材料存在质量含湿量相同的含湿状态点,导热系数变化与液态湿组分分布及流动性有关。

2)质量含湿量相同时,材料AAC与RB阶段1和阶段2增湿过程导热系数始终大于减湿过程;质量含湿量相同时,阶段3减湿过程导热系数高于增湿过程。减湿初期含湿量下降,相较增湿过程,导热系数反而增长。减湿初期、增湿后期,红色圆区域内的减湿状态点含湿量明显小于增湿状态点,但导热系数却分别高出10.3%和13.4%。

3)FC的封闭气孔结构不利于液态水返流蒸发,含湿量降低导致导热系数降低。相同含湿量下,材料增湿过程导热系数始终高于减湿过程。

4)相较干燥状态加湿后AAC、FC、RB导热系数,分别增长279%、266%、106%。增、减湿全过程中,AAC质量含湿量变化范围为0~0.457 kg/kg;FC为0~0.332 kg/kg;RB为0~0.227 kg/kg,质量含湿量相同时AAC导热系数差值范围约为-20.2%~63.4%;FC为14.5%~53.3%,RB为-18.0%~37.4%。

相同含湿量下,不同增/减湿过程中,不同含湿分布状态的多孔建材导热系数存在差异。需要考虑多孔建材的含湿状态及湿分布,以精准预测建筑在不同气候条件下的能耗。

### 参考文献

- [1] 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.  
Code for thermal design of civil building: GB 50176—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [2] 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Design standard for energy efficiency of public buildings: GB 50189—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [3] KONG F H, ZHANG Q L. Effect of heat and mass coupled transfer combined with freezing process on building exterior envelope [J]. Energy and Buildings, 2013, 62: 486-495.
- [4] XU Y G, LU M, JIA Z L. Effect of different initial moisture contents on the characteristics of coupled heat

- and moisture transfer of a reinforced concrete-EPS thermal insulation composite wall in Harbin [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 250/251/252/253: 3044-3049.
- [5] CAMPANALE M, DEGANELLO M, MORO L. Effect of moisture movement on tested thermal conductivity of moist aerated autoclaved concrete [J]. *Transport in Porous Media*, 2013, 98(1): 125-146.
- [6] JIN H Q, YAO X L, FAN L W, et al. Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 92: 589-602.
- [7] SHEN Y Q, XU P, QIU S X, et al. A generalized thermal conductivity model for unsaturated porous media with fractal geometry [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 152: 119540.
- [8] 马超. 多孔建筑材料内部湿分布及湿传递对导热系数影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- MA C. Research on effect of moisture distribution and transfer on thermal conductivity of porous building materials [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 黄津津. 含水量对轻质保温混凝土导热系数影响的实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- HUANG J J. Experimental study on the influence of moisture content on thermal conductivity of lightweight insulating concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese)
- [10] CHEN Z Q, SHI M H. Study of heat and moisture migration properties in porous building materials [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(1): 61-71.
- [11] BONACINA C, CAMPANALE M, MORO L. Analytical and experimental investigations on the heat transfer properties of light concrete [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2003, 24(5): 1407-1414.
- [12] SINGH A K, CHAUDHARY D R. Evaluation of heat and moisture transfer properties in a frozen-unfrozen water-soil system [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38(12): 2297-2303.
- [13] BOUKHATTEM L, BOUMHAOUT M, HAMD I H, et al. Moisture content influence on the thermal conductivity of insulating building materials made from date palm fibers mesh [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 811-823.
- [14] BELKHARCHOUCHE D, CHAKER A. Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(17): 7119-7125.
- [15] NGUYEN L H, BEAUCOUR A L, ORTOLA S, et al. Experimental study on the thermal properties of lightweight aggregate concretes at different moisture contents and ambient temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 151: 720-731.
- [16] GAO Y, DONG S Y, WANG C, et al. Effect of thermal intensity and initial moisture content on heat and moisture transfer in unsaturated soil [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102069.
- [17] CAO D F, SHI B, LOHEIDE S P, et al. Investigation of the influence of soil moisture on thermal response tests using active distributed temperature sensing (A-DTS) technology [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 173: 239-251.
- [18] LIU L L, CAI G J, LIU X Y. Investigation of thermal conductivity and prediction model of recycled tire rubber-sand mixtures as lightweight backfill [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118657.
- [19] KHOUKHI M. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 169: 228-235.
- [20] YANG W, LIU J P, WANG Y Y, et al. Experimental study on the thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under various hygrothermal environments [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 206: 109583.
- [21] HE Y P, DONADIO D, GALLI G. Morphology and temperature dependence of the thermal conductivity of nanoporous SiGe [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(9): 3608-3611.

(编辑 胡玲)