

## 复合调湿砂浆调湿与霉菌抑制性能的评价方法

谢华慧, 龚光彩<sup>†</sup>, 吴懿, 刘永超, 王颖娟

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为制取一种室内被动式湿度控制材料, 选用海泡石、木质纤维、膨胀珍珠岩、硅藻泥为骨料, 调制一种新型复合调湿砂浆。以不同配比复合调湿砂浆为对象, 通过实验筛选出综合性能最优的配比, 并将最优配比的复合调湿砂浆应用到室内墙体以进行性能测试。以长沙地区某宿舍楼的两个房间为实验对象, 其中一个房间的墙内表面材料为复合调湿砂浆, 另一房间的墙内表面材料为普通水泥砂浆, 分别测试一月和四月的室内温湿度分布, 分析复合调湿砂浆对房间温湿度分布的影响。同时以实际湿缓冲性能来评价该复合调湿砂浆的调湿性能, 并对比评估两个房间的霉菌生长风险。一月和四月的研究表明, 抹有新型调湿砂浆的内墙具有较佳的湿度控制能力, 比抹有普通砂浆的房间相对湿度低6%~14.3%, 含湿量低0.3~3.1 g/kg·干空气。在一月份, 普通砂浆比复合调湿砂浆霉菌滋生风险高四倍; 四月回南天季节, 复合调湿砂浆288 h监测中仅6.5 h出现霉菌滋生风险, 且明显低于普通房间, 是一种有效且低成本的新型调湿环保材料。

**关键词:**调湿材料; 微观结构; 实际湿缓冲性能; 霉菌抑制; 评估方法

**中图分类号:** TB383.4

**文献标志码:** A

## Evaluation on Hygroscopicity and Mold Inhibition Performance of Composite Hygroscopic Material

XIE Huahui, GONG Guangcai<sup>†</sup>, WU Yi, LIU Yongchao, WANG Yingjuan

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** This paper proposed a passive composite hygroscopic material to control indoor humidity based on field experiment. A series of aggregates including wood fibre, sepiolite, expanded perlite and diatom ooze were mixed at different ratios to make an optimal composite hygroscopic material for further experiment. Two testing rooms, which were attached with conventional cement mortar(Room 1) and composite hygroscopic material(Room 2), respectively, were built to conduct comparison experiments(mainly testing temperature and humidity) in January and April in 2017 in Changsha, Hunan. The hygroscopic performances were evaluated by the practical Moisture Buffer Value, and performances of indoor environment mold inhibition of two rooms were also analyzed. The results showed that in the two tested seasons, Room 2 outperformed in hygroscopicity than Room 1, where the relative humidity was lower by 6%–14.3% and moisture content was lower by 0.3–3.1g/kg·a. In the cold Jan–

\* 收稿日期:2017-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378186), National Natural Science Foundation of China(51378186); 国家科技支撑计划项目(2015BAJ03B00), National Key Technology Support Program(2015BAJ03B00); 国际合作与交流专项项目(2010DFB63830), The International Science and Technology Cooperative in Project of China(2010DFB63830)

作者简介:谢华慧(1982—), 女, 湖南衡阳人, 湖南大学高级工程师, 博士研究生

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email:gcgong@hnu.edu.cn

uary, the risk of mold growth in Room 1 was about 4 times higher than that in Room 2, while in humid April, the risk rate of mold growth in Room 2 was only about 2% (6.5 h in monitored 288 h), which was obviously lower than that in Room 1. The newly studied composite hygroscopic material was found to be efficient and practical in controlling indoor humidity.

**Key words:** hygroscopic materials; microstructure; practical moisture buffer value; mold inhibition; evaluation method

空气相对湿度是与人们生活、生产密切相关的重要环境参数之一<sup>[1]</sup>。室内湿度过低或过高,会引起室内人员不适,给流行性感病毒、细菌、尘螨等微生物提供了较佳的生长环境,间接引起居住者呼吸道疾病、过敏、疲劳、头痛等健康问题<sup>[2]</sup>。湿度过高引起建筑湿积累,会增加建筑能耗<sup>[3-4]</sup>,造成建筑材料的腐朽和破坏<sup>[5]</sup>,破坏建筑围护结构性能,影响建筑使用寿命<sup>[6]</sup>。

目前调湿材料以原材料吸湿性能和热湿耦合研究为主。姜洪义等<sup>[7]</sup>对沸石和硅藻土的孔径分布、比表面积以及吸放湿性能进行了研究,结合其吸/放湿曲线分析微观形貌与材料调湿性能差异的关系。郭兴国等<sup>[8]</sup>以空气含湿量和温度为驱动势建立多层墙体的瞬态热湿耦合传递方程。陈友明等<sup>[9]</sup>对建筑围护结构热湿耦合传递特性进行了试验分析。刘向伟等<sup>[10]</sup>建立了多孔介质墙体热湿与空气耦合传递非稳态模型。Nambiar 等<sup>[11]</sup>对泡沫混凝土吸湿特性与组成成分和孔隙结构关系进行了分析。Ng 等<sup>[12]</sup>研究了无机纳米吸附剂的孔隙结构特性与吸水性能之间关系。2004年,欧盟 HAMSTAD 项目<sup>[13]</sup>研究了导热系数、平衡含湿率、水蒸气渗透系数、吸水系数、湿扩散率和气流特性等湿热性能测试方法。2004~2005年, NORDTEST 项目<sup>[14]</sup>明确了调湿材料的定义、性能和测试方法,提出以缓冲值 MBV (moisture buffering value) 定义调湿材料的调湿性能,并将缓冲值分级。刘奕彪等<sup>[15]</sup>对多种多孔原材料进行了湿缓冲测试。杨骏<sup>[16]</sup>采用实验和模拟分析了新型相变蓄能与硅藻泥混合材料对建筑室内热湿环境的影响。

本文针对我国南方地区冬季湿冷和春季回南气候特点,探讨选取多种节能环保的吸湿材料,通过一系列试验,制取一种能调节室内湿度的复合调湿砂浆,减少高湿环境对人体和墙体影响,以提高室内空气品质。

## 1 原理

与热传递理论相似,湿扩散系数定义为材料的吸放湿能力:

$$b_m = \sqrt{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} / P_s} \quad (1)$$

式中,  $b_m$  为湿扩散系数,  $\text{kg}(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$ ;  $\delta_p$  为蒸汽渗透系数,  $\text{kg}(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ;  $\rho_0$  为材料干密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u$  为材料含湿量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;  $\varphi$  为相对湿度;  $P_s$  为饱和蒸气压,  $\text{Pa}$ 。

在湿环境周期作用下,材料含水量变化符合谐波变化,通过傅里叶分析预测材料含水量:

$$G(t) = \int_0^t g(t) dt = b_m \cdot \Delta P \cdot h(\alpha) \sqrt{t_p / \pi} \quad (2)$$

$$h(\alpha) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2(n\pi\alpha)}{n^3} \approx 2.252 [\alpha(1-\alpha)]^{0.535} \quad (3)$$

式中,  $G(t)$  为材料含水量,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $t_p$  为时间周期,  $24 \text{ h}$ ;  $g(t)$  为湿流密度的时间函数,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\alpha$  为高湿条件下吸湿时间,  $\text{h}$ 。

湿缓冲值为吸放湿性能指标,可以表示为:

$$MBV_{\text{ideal}} = G(t) / \Delta RH \quad (4)$$

式(2)~(3)代入式(4):

$$MBV_{\text{ideal}} = 2.252 \frac{[\alpha(1-\alpha)]^{0.535} \cdot b_m \cdot \Delta P}{\Delta RH} \sqrt{t_p / \pi} \quad (5)$$

归一简化方程为:

$$MBV_{\text{ideal}} = 1.27 [\alpha(1-\alpha)]^{0.535} \cdot b_m \cdot \Delta P \cdot \sqrt{t_p} \quad (6)$$

$MBV_{\text{ideal}}$  为理想湿缓冲值,  $\text{g}/(\text{m}^2\%RH)@8/16\text{h}$ 。

实际湿缓冲性能实验中,湿负荷包括三部分:

$$G(t) = G_b(t) = \Delta G_0(t) + \Delta G_w(t) \quad (7)$$

式中,  $G_b(t)$  为房间内湿负荷;  $\Delta G_0(t)$  为室外内湿差引起的逐时湿负荷;  $\Delta G_w(t)$  为墙体内部湿传递。实际湿缓冲值可以表示为:

$$MBV_{\text{practical}} = \frac{G(t) \cdot t_p}{A_s \cdot \Delta RH} \quad (8)$$

式中,  $A_s$  为调湿材料使用面积,  $\text{m}^2$ 。

实际湿缓冲值为室内材料湿度调节性能等级划分提供参考依据,根据测试值,材料实际湿缓冲性能分为 5 个等级(见表 1),分别表示对房间湿度调节

性能的 5 种状态。

表 1 实际湿缓冲值等级划分<sup>[14]</sup>

湿缓冲等级	湿缓冲值/(g/(m <sup>2</sup> % RH)@8/16h)
调湿能力可忽略	0~0.2
调湿能力受限	0.2~0.5
调湿能力可调节	0.5~1.0
调湿能力好	1.0~2.0
调湿能力极好	>2.0

## 2 试 验

### 2.1 试验对象

新型复合调湿砂浆实验示范房位于湖南省长沙市宁乡县(见图 1)某公司宿舍楼五层,选用两个面积大小和户型一致的房间,朝向均为北向.房间 1 墙体内表面为普通砂浆抹面,房间 2 墙体内表面为复合调湿砂浆抹面,测试房间建筑尺寸为 3.0 m(长)×3.6 m(宽)×3.2 m(高),内墙复合调湿砂浆面积为 40.8 m<sup>2</sup>,测试房间墙体构造形式见表 2.



图 1 测试房间所在大楼外立面

Fig.1 The tested building

表 2 两种组合墙体构造形式

墙体	墙体类型	墙体结构(由内侧到外侧)
房间 1	外墙	水泥砂浆 20 mm,页岩空心砖 240 mm,水泥砂浆 20 mm
	内墙	水泥砂浆 20 mm,页岩空心砖 190 mm,水泥砂浆 20 mm
房间 2	外墙	水泥砂浆 20 mm,页岩空心砖 190 mm,水泥砂浆 20 mm
	内墙	水泥砂浆 20 mm,页岩空心砖 190 mm,调湿砂浆 20 mm

#### 2.1.1 原材料

木质纤维、海泡石、膨胀珍珠岩都具有价格便宜、无毒、安全、环保等特点<sup>[17]</sup>,作为保温骨料,具有很好的吸附性能,性能参数见表 3.本文选用木质纤维、120 目海泡石、膨胀珍珠岩、硅藻泥、聚丙烯纤维、可再分散乳胶粉、42.5 级普通硅酸盐水泥,按不同配比制取试块.

表 3 保温骨料性能参数表<sup>[18]</sup>

保温骨料	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	吸附总孔容/(mL·g <sup>-1</sup> )	脱附总孔容/(mL·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
木质纤维	3.000	0.010 3	0.011 22	13.733	86
膨胀珍珠岩	2.851	0.009 1	0.009 89	12.77	76
120 目海泡石	125.83	0.319 0	0.319 69	10.14	277.5

#### 2.1.2 试验配合比

实验配比如表 4 所示,A 组为基准材料,木质纤维、120 目海泡石、膨胀珍珠岩按体积 1:2:4 比例混合;B 组硅藻泥替代(按质量比)50%水泥,聚丙烯纤维掺入量分别为 A 组含量(按质量计)的 10%、30%、70%;C 组中木质纤维、120 目海泡石、膨胀珍珠岩按体积比例 1:1:4 混合,硅藻泥替代(按质量比)50%海泡石.由于保温骨料质量不均匀,实验的用水量,会有小幅度的波动,视实际情况而定.

表 4 实验用砂浆配比

试块	木质纤维/mL	120 目海泡石/mL	膨胀珍珠岩/mL	聚丙烯纤维/g	可再分散乳胶粉/g	水泥/g	硅藻泥/g
A-1	17	34	68	3	4	100	-
B-1	17	34	68	0.3	4	50	50
B-2	17	34	68	0.9	4	50	50
B-3	17	34	68	2.1	4	50	50
C-1	17	17	68	3	4	100	45

#### 2.1.3 复合调湿砂浆的制备

为保证骨料、增强纤维、改性组分及胶凝组分充分均匀搅拌,且不影响骨料破损,采用多级搅拌方法.进行机械搅拌前,先进行人工预搅拌,使原材料充分均匀混合,然后与水泥一起加入搅拌机搅拌 1 min,再加入适量的水,搅拌 3 min.

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 材料的微观形貌

选用美国 FEI 公司 QUANTA 200 型环境电子显微镜(ESEM)观察和研究物质微观形貌.测试取表面平整未有断裂、尺寸小于 1 cm<sup>2</sup> 块状试样.在不同放大倍率下,能清晰观察到试块内部毛绒状的木质纤维、纤维状的海泡石以及多孔结构的膨胀珍珠岩.

从图 2(a)(b)(c)中可以看到,电镜 1 000 倍放大下,可以看到调湿材料内部纤维类物质,这些纤维表面在材料调湿中起到了很好的疏散作用.但随着聚丙烯纤维含量的增加而交织成一个更加密实的网状结构,把海泡石、木质纤维、硅藻泥笼括在其中,提高了复合材料的力学性能.从图 2(d)(e)中可以看出,电镜 500 倍照片中,均能更加清晰观察到蜂窝状膨胀珍珠岩,而 A-1 具有比 C-1 更多大孔径空洞,更加有利于水分子的吸附.

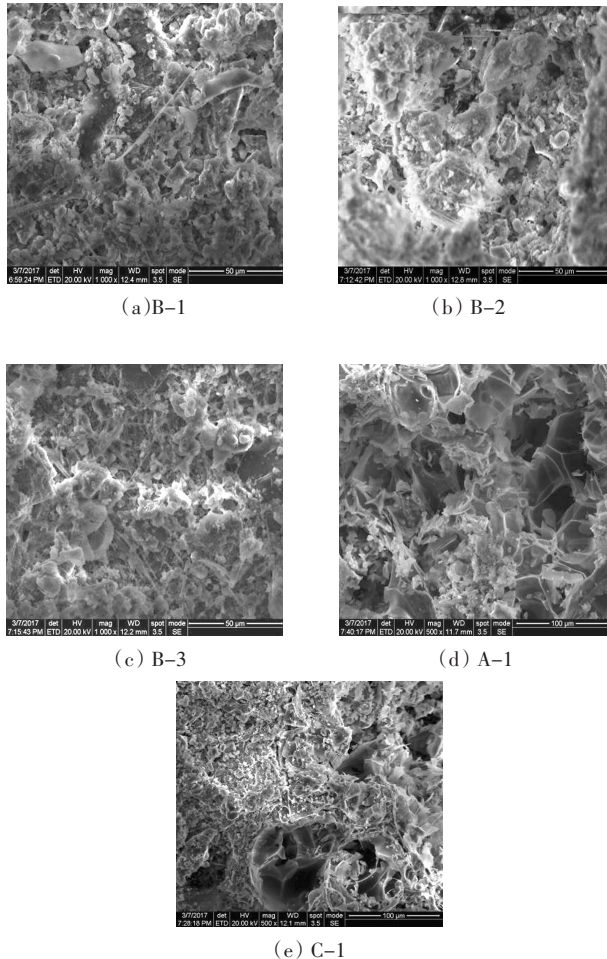


图 2 环境扫描电镜图

Fig.2 Scanning electron microscope photos of specimens

根据标准 GB/T 20473《建筑保温砂浆》和 GB/T 9779《复层建筑涂料》,对材料选型配比的外观质量和初期干燥抗裂性进行优化选择.五组试块成型后,B-1、B-2 试块出现易碎现象,后续试验中被剔除.

### 2.2.2 孔结构测试

根据 ISO15901《用压汞法和气体吸附法评价材料的孔径分布和孔隙率》要求,采用双气路氮吸附 BET 法测定复合调湿砂浆的比表面积,采用 BJH 法测定孔容积、孔径及孔径分布.选用美国麦克仪器公司 ASAP2020 M+C 型自动比表面积与孔径分析仪.对试样进行预处理时,预处理温度不能过低否则无法去除吸附水和其他分子,也不能过高,否则容易引起羟基间的缩聚脱水或发生烧结导致孔和表面的变化.样品重量为 0.134 5 g,脱气时间 1 h,脱气温度 120 ℃,保证试样干净后放入分析仪进行测试.

根据电镜照片分析,选取试块 A-1、B-3、C-1 进行比孔结构测试,结果如表 5 所示.结果表明,A-1 试块比表面积比 B-3、C-1 大两倍,因而 A-1 试块具有更多的吸附位与空间容纳吸附剂.A-1 试块在孔径分布上,也表现出了良好的内部孔格局,10 ~ 50 nm 段的孔径数量最多.B-3 以微孔居多,孔径分布尤其以小于 10 nm 微孔居多,形成的比表面积和孔容最小.C-1 微孔和大孔居多,大孔在吸附过程中只起到通道作用.

### 2.2.3 等温氮吸附/脱附

取 10 g 左右的复合调湿砂浆试块进行氮吸附实验,氮吸附/脱附曲线如图 3 所示.三个试块等温氮吸附曲线均为 IV 型,在吸附与脱附过程中均出现了滞后环,试块内部发生了毛细凝聚现象.其中 A-1 的滞后环最小,吸附量较大,吸附和脱附性能较好,调节性能较好,B-3 的滞后环最大,吸附量较小,调节性能较差.因而选取 A-1 作为室内调湿材料进行深入研究.

表 5 内部孔构造

Tab.5 Pore distribution of specimens

试块	比表面积 $/(m^2 \cdot g^{-1})$	孔容 $/(mL \cdot g^{-1})$	平均孔径 $/nm$	各段孔径分布比例/%							
				<6 nm	6~8 nm	8~10 nm	10~12 nm	12~16 nm	16~20 nm	20~50 nm	>50 nm
A-1	33.331	0.101 60	12.2	15.75	13.17	5.86	6.82	10.18	13.70	16.91	17.61
B-3	7.656	0.021 87	11.43	22.81	18.65	6.70	7.35	7.97	9.27	12.07	15.18
C-1	11.434	0.026 90	9.41	27.27	8.97	2.42	2.51	2.93	9.26	12.04	34.60

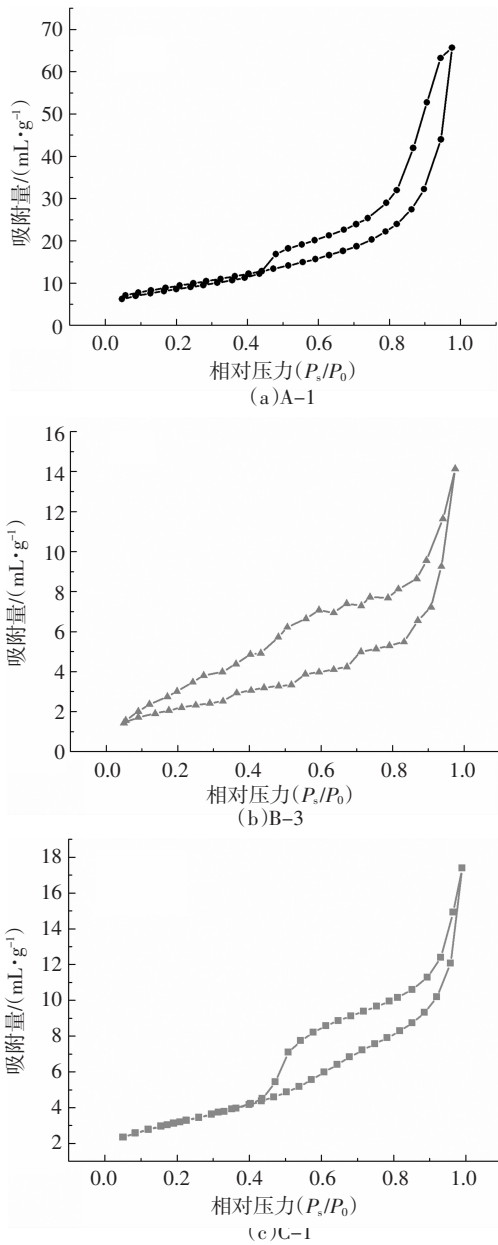


图 3 试块吸附脱附性能曲线

Fig.3 The adsorption-desorption curve of specimens

2.2.4 力学性能测试

根据规范 GB/T 5486.2《无机硬质绝热制品试验方法力学性能》，钢质有底模具制备试块尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm。根据 GB50203《砌体工程施工质量验收规范》要求，进行复合调湿砂浆试块制作和养护。根据内部孔构造的分析，选取性能较优的

A-1 和 C-1 进行热力学及力学性能分析，两者相差不大。由表 6 可知，A-1 的抗折抗压能力优于 C-1。从抗折试验断面（见图 4）中可以看出，C-1 号断面较为平整。

表 6 力学性能测试  
Tab.6 Testing of mechanical property

试块	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa
A-1	5.0	17.93
C-1	4.4	15.21



(a)A-1 (b)C-1

图 4 断裂面

Fig.4 Showing of the fracture surfaces

2.2.5 材料的热工性能测试

根据规范 GB 10294《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》要求测试导热系数。本实验用的 DRM-1 型导热系数仪采用电脉冲法、DRCD-3030 采用内部双试件测定装置，试块尺寸为 300 mm×300 mm×30 mm。根据测试结果显示，A-1 和 C-1 的导热系数分别为 0.115 和 0.113，两组复合调湿砂浆均符合保温材料要求。

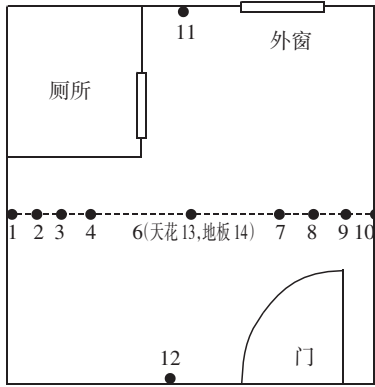
2.2.6 实际湿缓冲性能测试

根据各性能测试，选用 A-1 配比复合调湿砂浆应用到室内，复合调湿砂浆施工时要求避免重击以免破坏孔隙结构。实际湿缓冲值测试在施工完成后冬季 3 个月干燥环境后进行，以减少墙体初始含水量对测试的影响。测试时间选在冬季湿冷和回南天季节。现场在墙面、天花、地面均布置温度传感器，测试房间布点及安装图见图 5，采用 48 通道无纸记录仪和温湿度自计仪记录和存储实验数据，室外空旷处设温湿度自计仪，墙体材料的热工参数见表 7。测试房间门窗密封性能较好，关闭门窗，以减少室外参数对室内湿度影响，温湿度 0.5 h 记录时间一次。

表 7 墙体材料的热工参数

Tab.7 Thermal parameter of wall

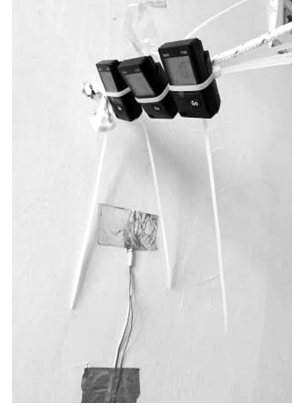
材料名称	厚度/mm	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	蓄热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比热/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热惰性指标 D
水泥砂浆	20	0.930	11.30	1800	1.05	0.24
页岩空心砖	240	0.580	7.87	1400	1.05	3.28
调湿砂浆	20	0.115	2.45	654	1.05	0.80



(a)测试房间布点图( $h = 1.5\text{ m}$ )



(b)热电偶安装



(c)温湿度自计仪

图5 测试布点及安装

Fig.5 Distribution of testing points

### 3 结果与讨论

#### 3.1 房间的湿缓冲性能测试

##### 3.1.1 冬季空调模式(一月)

由图6可见,室外温度维持 $4 \sim 6\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $95\% \sim 99\%$ 之间,属于典型的南方湿冷气候.考虑居住建筑实际情况,冬季采用分体空调,为测试复合调湿砂浆的作用,增加超声波蒸发器独立控制湿度.冬季时,早上8:30开始开启加湿器和空调,加湿器16:30停止工作,加湿8 h,非加湿16 h,加湿器室内产湿率 $G = 100\text{ g/h}$ .

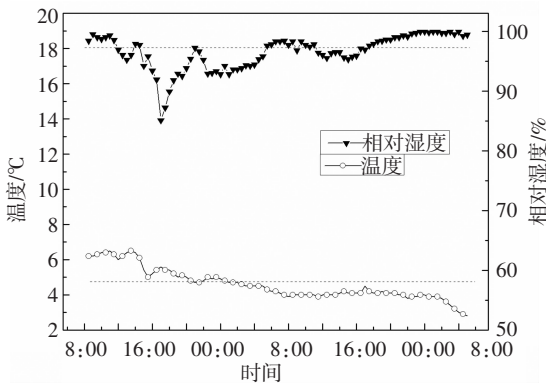


图6 室外温湿度(一月)

Fig.6 Variation of outdoor temperature and humidity (January)

由图7可以看出,室内温度在14:00基本达到稳定,温度持续在 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 左右.图8和图9可以看出,加湿器停止工作后,普通砂浆房间的相对湿度和空气含湿量不再降低,但复合调湿砂浆房间的相对湿度和空气含湿量逐渐降低,最终达到平衡,相对湿度

减少了 $12.5\%$ ,空气含湿量减少了 $2\text{ g/kg}\cdot\text{干空气}$ ,比普通砂浆房间相对湿度低 $14.3\%$ ,含湿量低 $3.1\text{ g/kg}\cdot\text{干空气}$ .

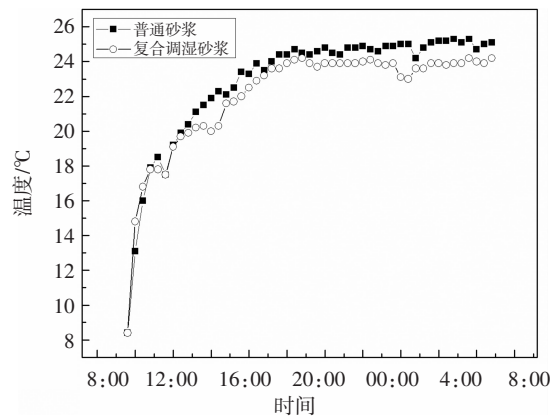


图7 房间中心温度(一月)

Fig.7 Temperature comparison of room centre (January)

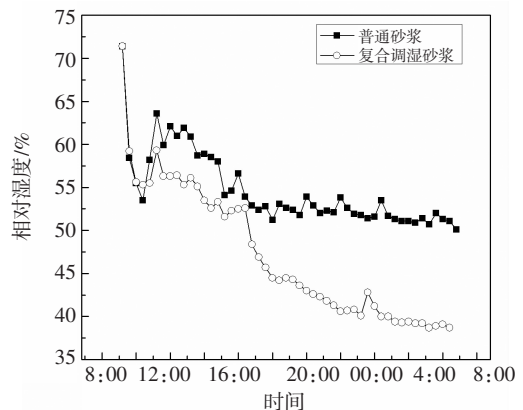


图8 房间中心相对湿度(一月)

Fig.8 Relative humidity comparison of room centre (January)

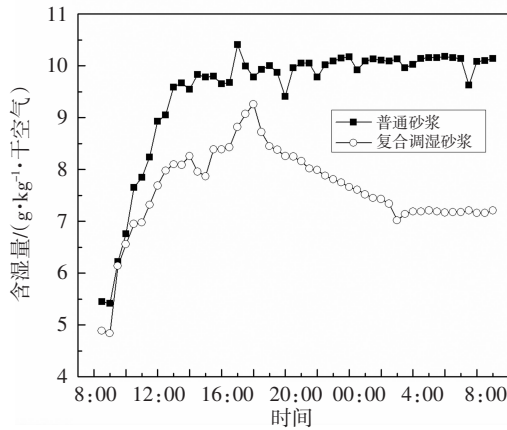


图 9 房间中心空气含湿量(一月)

Fig.9 Air moisture comparison of room centre (January)

3.1.2 春季回南天(四月)

图 10 为回南天季节室外温湿度曲线,室外平均温度 15.5 °C,相对湿度 84.5%,舒适性较差.从图 11 可以看出,复合调湿砂浆保温性能较好;图 12 和图 13 可以看出,复合调湿砂浆材料能控制室内相对湿度在 60%~70%,比普通砂浆房间低 6%~10%,空气含湿量低 0.3~0.5 g/kg·干空气.

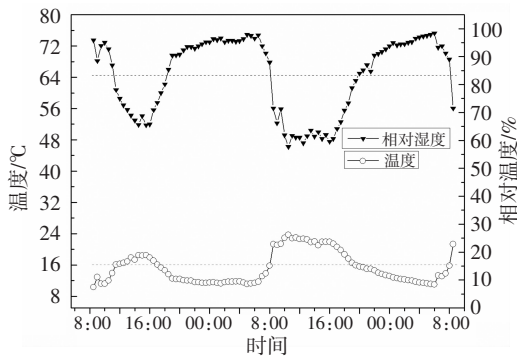


图 10 室内外各时刻温湿度(四月)

Fig.10 Variation of outdoor temperature and humidity (April)

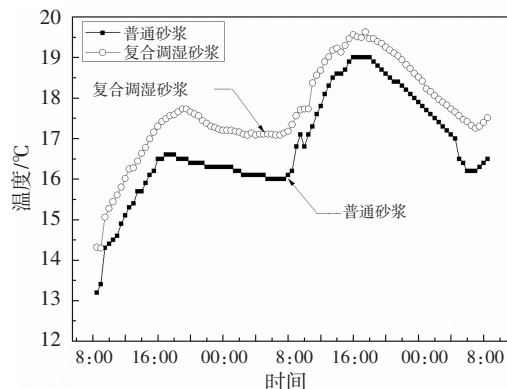


图 11 房间中心点温度对比(四月)

Fig.11 Temperature comparison of room centre (April)

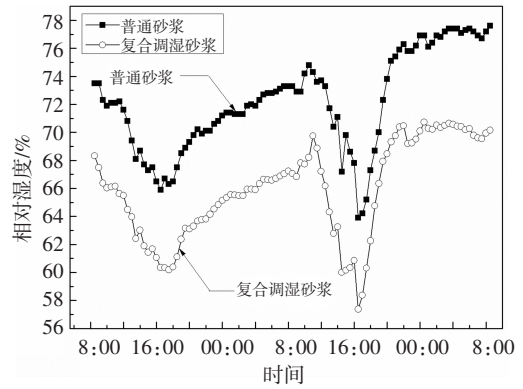


图 12 房间中心点相对湿度对比(四月)

Fig.12 Relative humidity comparison of room centre (April)

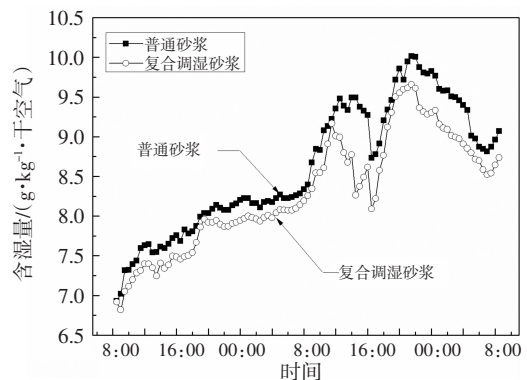


图 13 房间中心点相对湿度对比(四月)

Fig.13 Air moisture comparison of room centre (April)

3.1.3 湿缓冲性能

通过测试房间内空气温度和相对湿度的变化情况,来计算房间的湿缓冲值.由于测试房间施工完成后三个月才进行测试,假设墙体内部不同材料间湿平衡对房间室内湿度分布影响较少,可以忽略.根据实际湿缓冲性能计算(见表 8),两种材料四月实际湿缓冲性能比一月更好,普通砂浆调湿能力较差,而复合调湿砂浆具有较好且稳定的调湿性能.

表 8 实际湿缓冲性能结果

Tab.8 Testing of practical moisture buffering value

房间	内墙材料	干密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	MBVpractical/(g/(m <sup>2</sup> %RH)@8/16h)	
			一月	四月
房间 1	普通砂浆	2033.2	0.2	0.55
房间 2	复合调湿砂浆	654	0.85	0.89

3.2 霉菌抑制性能评估

室内霉菌生长主要条件包括孢子、温湿度、氧气、养分.从理论上来看,控制霉菌生长必要条件中的任何一项都能有效抑制其滋生,其中控制室内湿度是预防和控制霉菌的最有效方法.ASHRAE 将相对湿度为 80%时材料所对应的含湿量作为预防霉菌滋生的临界含湿量.Adan 等<sup>[19]</sup>研究表明,要有效控制霉

菌生长,材料的相对湿度必须低于 80%.Cornick 和 Dalglish 根据霉菌生长的临界温湿度提出了霉菌生长风险评估指标:

$$RHT80_i = \sum_{k=1}^n (RH - RH_X) \times (T - T_X) \quad (9)$$

式中  $RHT80_i$  为累计  $i$  天的霉菌生长风险评估指标; $RH$  为材料的相对湿度,%; $i$  为天数; $RH_X$  为霉菌滋生临界相对湿度,取 80%; $T$  为材料温度,°C; $T_X$  为霉菌滋生的临界温度,取 0 °C.当  $RH \leq RH_X$  时,取  $RH - RH_X = 0$ ;当  $T \leq T_X$  时,取  $T - T_X = 0$ .

不同朝向墙体分析过程类似,本研究以北外墙为例进行分析.一月昼夜温差不大,选典型日为基准评估霉菌生长风险,四月回南天昼夜温差变化较大,以 12 d 为基准评估室内霉菌生长风险.一月室内外界湿度变化如图 14、图 15 所示,房间 2 的相对湿度控制在 80%左右,而房间 1 相对湿度在 90%左右.四月室内外界湿度变化如图 16、图 17 所示,房间 1 室内温度和相对湿度受室外参数变化影响较大,在 80%上下波动,而房间 2 室内温度和相对湿度受室外参数变化影响较小,在 65%左右波动.

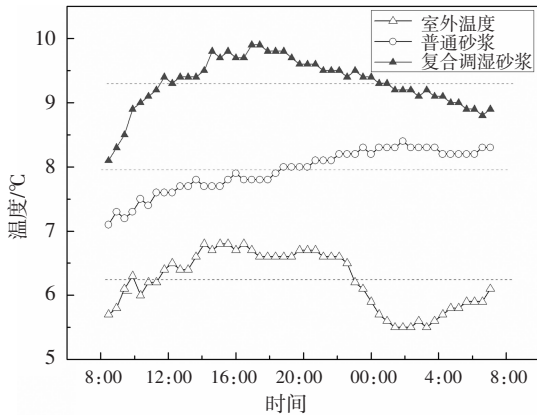


图 14 一月典型日室内外界温度变化

Fig.14 Temperature variation of the typical day in January

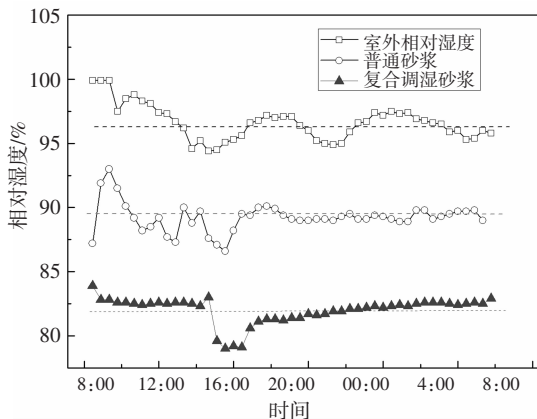


图 15 一月典型日室内外界相对湿度变化

Fig.15 Relative humidity variation of the typical day in January

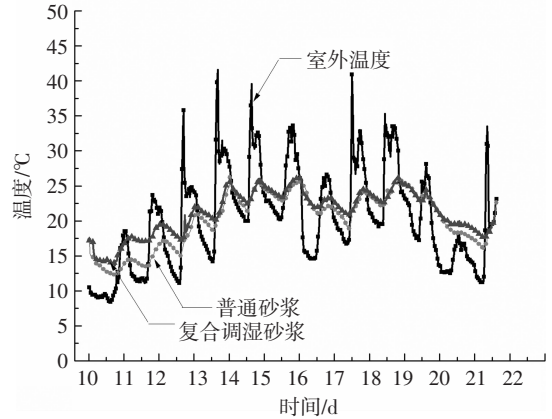


图 16 四月回南天室外温度变化

Fig.16 Temperature variation of the typical day in April

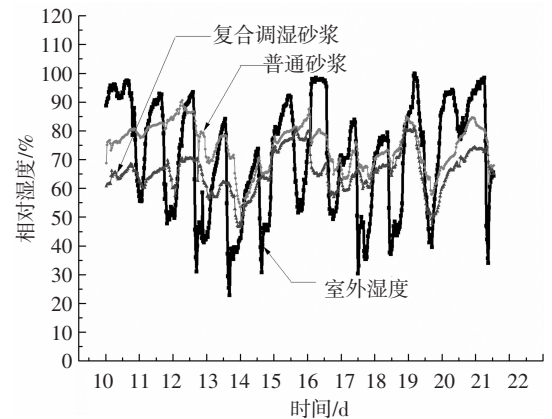


图 17 四月回南天室外相对湿度变化

Fig.17 Relative humidity variation of the typical day in April

根据表 9,一月属于湿冷季节,普通砂浆房间典型日出现霉变风险是复合调湿砂浆房间的四倍,且典型日里相对湿度均大于 80%.四月回南天季节,在连续 288 h 监测中,复合调湿砂浆房间只有 6.5 h 出现相对湿度大于霉菌滋生临界相对湿度值,霉菌生长风险远低于普通房间.

表 9 霉菌抑制评估指标

典型 房间	Tab.9 Evaluation index of mold inhibition			
	一月 $RHT80_1$	四月 $RHT80_{12}$	一月 $RH \leq 80\% (h)$	四月 $RH \leq 80\% (h)$
房间 1	3 510	9 277	24	81
房间 2	871	98	22	6.5

### 4 结论

本研究旨在制取一种新型复合调湿砂浆,以调节室内湿环境并控制霉菌生长,提高室内舒适性.考虑材料的实用性、产地、价格成本以及微观性能等,经过不同配比选型,通过测试分析材料的成分差异、



孔隙直径大小、比表面积高低对调湿性能的影响,选取一组最优配比复合调湿砂浆进行室内环境测试。

1) 制取的复合调湿砂浆具有较高的比表面积(33.331 m<sup>2</sup>/g),且孔径主要集中在中孔范围内,等温氮吸附曲线均为IV型,滞后环较小,吸附量最大,氮吸附和脱附性能好。

2) 一月湿冷季节,实测复合调湿砂浆调湿性在空调模式下,相对湿度减少了12.5%,空气含湿量减少了2 g/kg·干空气,比普通砂浆房间相对湿度低14.3%,含湿量低3.1 g/kg·干空气。四月回南天时,复合调湿砂浆材料能控制室内相对湿度在60%~70%,比普通砂浆房间低6%~10%,空气含湿量低0.3~0.5 g/kg·干空气。

3) 一月湿冷季节,普通砂浆房间典型日出现霉菌变化风险是复合调湿砂浆房间的四倍;四月回南天季节,复合调湿砂浆房间霉菌滋生风险远低于普通砂浆房间。

本文中的复合调湿砂浆原材料均为常见的环保材料,价格低廉,制作简便。试验表明,该复合调湿砂浆是一种可以替代传统砂浆的新型复合调湿砂浆。

## 参考文献

- [1] BOMBERG M, BROWN W. Building envelope design through environmental control—Part 1: Heat, air and moisture interactions[J]. Construction Canada, 1993, 2(1): 116—119.
- [2] 谭和平, 钱杉杉, 孙登峰, 等. 室内环境中有害有机物污染现状及标准研究[J]. 中国测试, 2015, 41(1): 1—5.  
TAN H P, QIAN S S, SUN D F, et al. Study on the pollution status and standards of indoor organic compounds[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(1): 1—5. (In Chinese)
- [3] 葛凤华. 室内环境品质与暖通空调[D]. 吉林: 吉林大学环境与资源学院, 2004: 2—10.  
GE F H. IEQ and HVAC[D]. Jilin: College of Environment and Resources, Jilin University, 2004: 2—10. (In Chinese)
- [4] 徐玉党, 刘纯青. 浅谈动态空调热湿环境与节能[J]. 制冷与空调, 2005, 5(1): 75—78.  
XU Y D, LIU C Q. The curt talking of dynamic air-conditioning hot and humid climates and energy efficiency [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2005, 5(1): 75—78. (In Chinese)
- [5] ANDRADE C, SARRIA J, ALONSO C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering [J]. Cement & Concrete Research, 1999, 29(8): 1249—1259.
- [6] BOMEHAG C G, SUNDELL J, BONINI S, et al. Dampness in buildings as a risk factor for health effects, EUROEXPO: a multi-disciplinary review of the literature (1998—2000) on dampness and mite exposure in buildings and health effects[J]. Indoor Air, 2004, 14(4): 243—257.
- [7] 姜洪义, 王一萍, 万维新. 沸石、硅藻土孔结构及调湿性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(6): 30—33.
- JIANG H Y, WANG Y P, WAN W X. Research of pore-structure and humidity-control performance about zeolite and diatomite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25(6): 30—33. (In Chinese)
- [8] 郭兴国, 陈友明, 张乐. 一种新型木结构墙体的热湿性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(12): 18—21.  
GUO X G, CHEN Y M, ZHANG L. Analysis of the hygrothermal performance of a new timber structure wall [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(12): 18—21. (In Chinese)
- [9] 陈友明, 邓永强, 郭兴国, 等. 建筑围护结构热湿耦合传递特性实验研究与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(4): 11—16.  
CHEN Y M, DENG Y Q, GUO X G, et al. Experimental study of coupled heat and moisture transfer performance through building envelope [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(4): 11—16. (In Chinese)
- [10] 刘向伟, 陈国杰, 陈友明. 墙体热、湿及空气耦合传递非稳态模型及验证[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 152—156.  
LIU X W, CHEN G J, CHEN Y M. Modeling of the transient heat, air and moisture transfer in building walls [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 152—156. (In Chinese)
- [11] NAMBIAR E K K, RAMAMURTHY K. Sorption characteristics of foam concrete [J]. Cement & Concrete Research, 2007, 37(9): 1341—1347.
- [12] NG E P, MINTOVA S. Nanoporous materials with enhanced hydrophilicity and high water sorption capacity[J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2008, 114(1): 1—26.
- [13] ROELS S, CARMELIET J, HENS H, et al. Interlaboratory comparison of hygric properties of porous building materials[J]. Journal of Building Physics, 2004, 27(4): 307—325.
- [14] BERIT T. Moisture buffering of building materials[M]. Danmarks: Danmarks Tekniske Universiteti, 2005: 15—20.
- [15] 刘奕彪, 秦孟昊. 多孔调湿材料湿缓冲特性的实验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5): 129—134.  
LIU Y B, QIN M H. Experimental analysis of the moisture buffering properties of different porous hygroscopic materials[J]. Journal of Civil. Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(5): 129—134. (In Chinese)
- [16] 杨骏. 多孔调湿材料对室内热湿环境的影响[D]. 南京: 南京大学建筑与城市规划学院, 2015: 3—12.  
YANG J. Moisture effects of porous hygroscopic materials on indoor hygrothermal conditions [D]. Nanjing: School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, 2015: 3—12. (In Chinese)
- [17] 方萍, 吴懿, 龚光彩. 膨胀玻化微珠的显微结构及其吸湿性能研究[J]. 材料导报, 2009, 23(10): 112—114.  
FANG P, WU Y, GONG G C. Study on the microstructure of expanded and vitrified small balls and its sorption performance [J]. Materials Review, 2009, 23(10): 112—114. (In Chinese)
- [18] 吴懿. 调湿材料性能及其评价方法的研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2016: 2—12.  
WU Y. Research on the performance and evaluation methodology of hygroscopic material [D]. Changsha: College of Civil engineering, Hunan University, 2016: 2—12. (In Chinese)
- [19] ADAN O, EINDHOVEN T. On the fungal defacement of interior finishes[J]. Technische Universiteitindhoven, 1994, 25(3): 154—168.