



多孔调湿材料湿缓冲特性的实验研究

刘奕彪, 秦孟昊

(南京大学 建筑与城市规划学院, 南京 210093)

摘要:利用 NORDTEST 实验方法对中国长江中下游地区(以南京为例)多孔调湿材料的湿缓冲值(Moisture Buffer Value)进行测定,同时,研究湿缓冲值对建筑能耗及室内湿度的影响。实验结果显示,高湿度区间内材料的湿缓冲测定值较大,且不同材料的湿缓冲值存在较大差异。分析表明在长江中下游地区,使用具有吸放湿特性的建筑内表面材料可有效降低建筑能耗 10% 以上,同时,室内环境湿度也会得到一定程度的调节。

关键词:多孔调湿材料;湿缓冲值;湿缓冲值测定实验;建筑能耗

中图分类号:TU111.19 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)05-0129-06

Experimental analysis of the Moisture Buffering Properties of Different Porous Hygroscopic Materials

Liu Yibiao, Qin Menghao

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

Abstract: A series of experimental tests using NORDTEST method for evaluating the moisture buffering capacity of different porous hygroscopic materials have been carried out in the Yangtse River downstream area (Nanjing for example). The impact of MBV on building energy consumption and indoor humidity has also been investigated. The test results show that the MBV of porous hygroscopic materials is larger under higher humidity range, and there was obvious difference when using diverse materials. Research indicates that it may be possible to reduce up to 10% cooling energy consumption in the Yangtse River downstream area (hot and humid climate) in China, when applying hygroscopic materials with well-controlled HVAC systems. Meanwhile the indoor humidity can also be modulated to a certain extent.

Key words: porous hygroscopic materials; moisture buffer value; tests for MBV; energy consumption

多孔调湿材料在环境湿度做周期性变化的过程中具有对水蒸气“高吸低放”的能力,这种能力称为材料的湿缓冲能力^[1]。建筑室内各种多孔材料(墙

体内墙材料,家具和纺织品等)的湿缓冲作用是影响室内湿环境的重要因素。在目前多数建筑能耗计算中往往忽略这一因素对能耗的影响。然而,民用建

收稿日期:2015-06-16

基金项目:国家自然科学基金(51108229);博士学科点专项科研基金(2013009111005)

作者简介:刘奕彪(1987-),男,主要从事建筑材料湿缓冲特性研究,(E-mail)mg1136016@smail.nju.edu.cn。

秦孟昊(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)mqin@nju.edu.cn。

Received:2015-06-16

Foundation item: National Natural Science Foundation(No. 55108229); Research Fund for the Doctoral Program(No. 2013009111005)

Author brief: Liu Yibiao (1987-), main research interest: moisture buffering properties of builmaterials, (E-mail) mg1136016@smail.nju.edu.cn.

Qin Menghao(corresponding author), professor, (E-mail)mqin@nju.edu.cn.

筑室内多孔材料种类较多,表面积很大,对调节室内湿环境,缓冲或抑制相对湿度波动,降低潜热负荷和改善室内舒适性具有显著的影响。忽略室内材料的湿缓冲效应,将大大降低能耗计算的准确性。此外,我国长江中下游湿热地区在梅雨季节使用传统的空调除湿方式需要消耗大量的能源,而当今能源短缺形势严峻,这要求必须将提高室内环境舒适性的手段与建筑节能相结合。因此,充分利用多孔调湿材料的湿缓冲和湿调节能力对提高室内环境质量,降低建筑能耗和提高围护结构耐久性有重要的实际意义。

针对调湿材料的吸放湿特性,已有学者进行了研究。郑佳宜等^[2]采用有效湿渗透厚度模型模拟了周期性湿负荷作用下硅藻土基建筑材料对室内空气温湿度变化的影响;韩星等^[3]研究了调湿材料的作用原理并以已有研究数据为基础对不同种类调湿材料的吸湿性能曲线进行了对比分析;冉茂宇等^[4]利用封闭箱热作用法对调湿材料在周期性热湿作用下的吸放湿特性进行了测试和分析;黄子硕等^[5]通过实验得出不同建筑材料在恒温恒湿环境下吸放湿速度变化的规律。湿缓冲理论的提出着眼于多孔材料吸放湿现象对周围环境的影响,是传统的多孔建筑材料内热湿耦合传递^[6]研究的延伸和发展。Rode^[7]通过一系列研究全面确立了湿缓冲理论模型和数值计算方法,这些研究使湿缓冲以数值的形式呈现,加强了其客观性和实用性。

湿缓冲值的提出对研究多孔材料湿缓冲现象有着重要的理论价值。然而,其数学表达形式以及实验测定方法仍尚未完善,需要开展进一步的研究。Oasmaa 等^[8]利用“Round Robin Test”实验方法对建筑材料的湿缓冲值进行测定,规定了很多实验设置和测定方法的细节;Zhang 等^[9]提出“Chamber Test”概念,即利用高精度人工气候室测定不同材料的湿缓冲性能参数,并与计算机模拟结果进行对比验证。但这些湿缓冲值的测定方法没有考虑不同气候条件下的真实温湿度变化情况对材料湿缓冲值测定的影响。笔者以几种常见多孔调湿材料作为研究对象,基于调研数据对不同材料的湿缓冲值进行测定,并探讨其在建筑能耗计算和室内环境评价中的实际应用。

1 湿缓冲值的测定(NORDTEST 法)

1.1 湿缓冲值理论概述

湿缓冲值是指多孔材料暴露在作周期性变化的相对湿度中时,单位时间、单位面积、单位相对湿度

变化量内吸收或放出的湿量,其单位是 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{RH})$ 。与传统的湿特性参数相比,湿缓冲值最大的不同在于:其主要描述材料在相对湿度变化过程中的动态吸放湿能力,并在动态过程中测得。目前对于湿缓冲值的表征方法主要有两类:

1)湿扩散系数。当量化多孔材料的吸湿系数时,湿扩散率起关键的作用,因为它在确定典型动态吸放湿条件下材料的储湿能力方面非常重要。材料表面相对湿度变化周期内的穿透深度是表征上述储湿能力的一个重要参数。

2)有效含水量。即材料在给定的空气相对湿度和时间内吸放湿的总量。

1.2 实验设置

本研究使用 Carsten Rode 等人提出的湿缓冲值测定方法,即 NORDTEST 法来对长江中下游地区常用多孔调湿材料进行实验,测定其湿缓冲值相关参数。

实验选用 3 种建筑材料作为实验试件。它们分别为纤维水泥、硅藻泥和稻草板。其中,纤维水泥为目前常用的复合型建筑材料,而硅藻泥、稻草板为新型建筑材料,各试验材料基本性能如表 1 所示。

表 1 试验材料基本性能

Table 1 Basic properties of test materials

材料名称	容重/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	强度/ MPa
纤维水泥板	1 000	0.28	0.25	≥ 14.0
硅藻泥	700	0.70	0.13	≥ 1.0
稻草板	440	0.12	0.11	≥ 2.0

试件的尺寸均为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 。实验采用湿杯法(Cup Method)^[10],以装有饱和盐溶液的密封瓶为基本设置,通过两种饱和盐溶液来维持密封瓶内的相对湿度(相对湿度 33%的氯化镁饱和溶液和相对湿度 75%的氯化钠饱和溶液)。实验装置的基本构成如图 1:

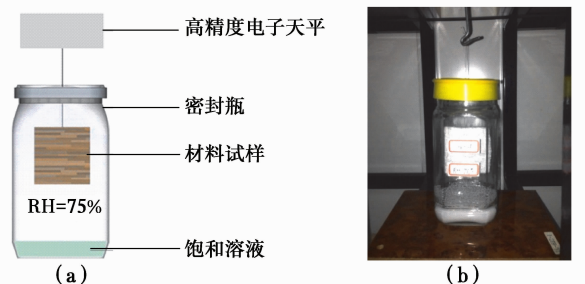


图 1 实验基本设置

Fig. 1 Experimental setup

1.3 实验流程及方法

本实验干燥器外部恒温恒湿环境条件由南京大学可持续建筑研究中心的高精度人工气候室控制,人工气候室的室内温度设定为恒定的 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,而相对湿度设定为恒定的 $60\% \pm 1.5\%$ (此为NORDTEST法的设定)。试样需要在温度 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $50 \pm 5\%$ 的条件下进行预处理,直到连续3 d内试样的重量变化不超过其总重量的5%,视为预处理完成,实验开始。

该实验的一个周期为24 h,分为两个阶段:

1)吸湿阶段:将已经达到平衡含湿量的调湿材料试样置于相对湿度75%的瓶内,每隔1 h用高精度电子天平对材料试样进行称重直至8 h后。

2)放湿阶段:快速将材料由相对湿度为75%的密封瓶取出,置于相对湿度为33%的密封瓶内,每隔2 h对材料试样进行称重直至16 h后。通过这一个实验周期,可以得到材料在吸湿阶段(前8 h)和放湿阶段(后16 h)分别的含湿量变化数据。

8 h的吸湿阶段与16 h的放湿阶段组成一个完整的材料吸放湿周期。以24 h为一个周期,该实验可重复多个周期,实验数据相对地趋于稳定。最后,根据测定的实验数据可以得到多个连续周期内材料的含湿量随时间变化的关系曲线。

1.4 实验结果及分析

基于实验数据,可以得到3种调湿材料在一段时间内的含湿量随时间变化的关系曲线,其变化趋势是由NORDTEST的实验方法来标定的,反映的是材料在两个恒定的相对湿度区间内吸放湿的整个过程。

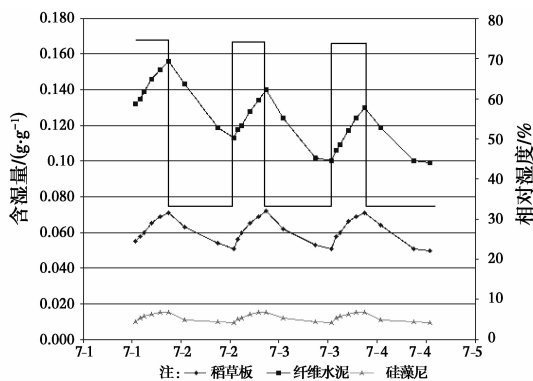


图2 3个周期内材料的含湿量变化曲线

Fig. 2 Curves of moisture content change in three periods

从图2中可以看出,在3个稳定周期内材料的含湿量随着时间变化的关系:

稻草板和硅藻泥在3个周期内的含湿量变化趋

势稳定,呈周期性循环,且每个循环的吸湿量和放湿量基本维持平衡;纤维水泥板的吸放湿循环呈阶梯状递减趋势,吸湿量明显高于放湿量。

湿缓冲值在实验中的计算方法可以简化为单位时间单位面积内材料含湿量的变化。根据实验数据,各调湿材料在吸湿和放湿过程中的湿缓冲值都可以计算得到,如表2。

表2 3个稳定周期内材料的湿缓冲值

Table 2 MBV of materials in three stable periods

		湿缓冲值(MBV)/ [g/(m ² · %RH) ⁻¹]			
		周期1	周期2	周期3	平均值
纤维水泥	吸湿	1.25	1.36	1.67	1.43
	放湿	2.20	2.14	1.72	2.02
硅藻泥	吸湿	0.35	0.35	0.41	0.37
	放湿	0.41	0.35	0.41	0.39
稻草板	吸湿	1.12	1.54	1.54	1.40
	放湿	1.47	1.47	1.68	1.54

由表2可知:

1)硅藻泥在吸湿和放湿阶段的湿缓冲值大致相同,对湿度变化反应较为敏捷,但吸湿、放湿量小,因此调湿作用有限。

2)总体来看,3种材料在放湿阶段的湿缓冲值均高于吸湿阶段。

2 针对热湿气候的湿缓冲值测定

利用NORDTEST法测定材料湿缓冲值选择的湿度区间为33%~75%,但这个区间的设定依据是北欧地区的气候条件,与热湿地区的真实湿度变化区间并不相同。探讨针对中国热湿气候地区材料的湿缓冲值的测定,需要对该气候类型下住宅温湿度情况进行调研作为研究依据。

2.1 实地调研

对南京地区的6处住宅(户型无重复)进行了梅雨季节^[10]为期两个月的实地调研,利用高精度温湿度仪器RC-4HA Data Logger(设定间隔时间为10 min)记录得到大量的温湿度数据信息;此外,还对每个住宅的住户进行详细的问卷调查。

根据调研住宅的实测温湿度数据,绘出一段时间内室内相对湿度的变化曲线。

图3较为清晰地呈现了热湿气候下(图中截取了7月8日到7月12日5 d内的数据作为典型代表)住宅室内相对湿度的变化情况。由图表和数据

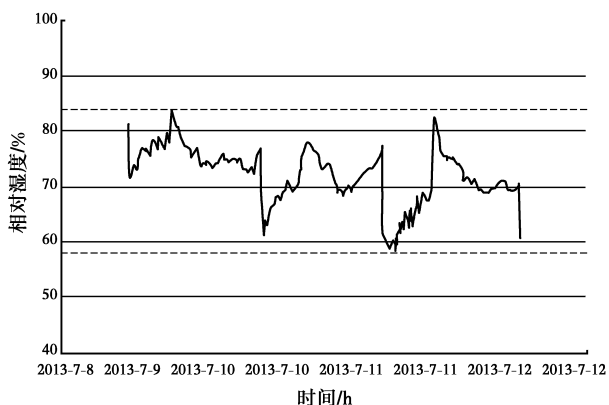


图 3 梅雨季节南京某住宅 5 d 内的室内相对湿度
Fig. 3 Indoor relative humidity of a house during five days of rainy season

可知:南京地区在梅雨季节室内相对湿度波动较为明显,相对湿度变化区间为 60%至 85%,平均相对湿度为 75%,属于典型的高温高湿气候。

2.2 实验设置

本研究选择 4 种调湿材料:纤维水泥板、石膏板、硅藻泥和稻草板进行测定。基于调研数据,为了更深入地探索适应热湿气候地区的测定方法,在高精度人工气候室的环境条件设定均不变的情况下,对 NORDTEST 法中的湿度区间设定进行了调整:将相对湿度区间临界值从原来的 33%~75%提高到 60%(溴化钠饱和溶液^[11])~85%(氯化钾饱和溶液^[11])。这个区间与调研中实际的湿度变化范围一致,使标定的相对湿度区间更接近热湿气候地区的真实状况,实验条件的模拟更为准确。

2.3 实验结果及分析

首先,得到材料含湿量随时间和相对湿度变化的关系曲线如图 4。

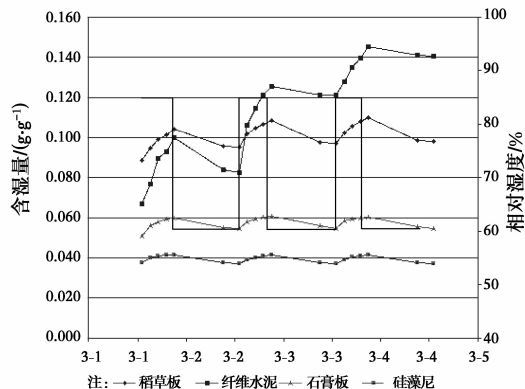


图 4 改进实验中三个周期内材料含湿量随相对湿度和时间的变化

Fig. 4 Curves of moisture content change in three periods for improved tests

根据该实验得到的新区间下 3 个周期内调湿材料的含湿量,可以计算得到区间调整后测定得到的调湿材料 MBV 值,记为 MBV_1 。

表 3 根据实验结果计算得到的热湿气候地区调湿材料的湿缓冲值

Table 3 MBV of different materials

		湿缓冲值(MBV_1)/ [$g/(m^2 \cdot \%RH)^{-1}$]			
		周期 1	周期 2	周期 3	平均值
石膏板	吸湿	0.48	0.32	0.30	0.37
	放湿	0.28	0.32	0.29	0.30
硅藻泥	吸湿	0.66	0.76	0.75	0.72
	放湿	0.75	0.75	0.76	0.75
稻草板	吸湿	1.21	1.02	0.97	1.07
	放湿	0.71	0.86	0.90	0.82
纤维水泥	吸湿	3.15	3.30	3.36	3.27
	放湿	3.02	3.32	3.35	3.23

NORDTEST 法和调整后的测定试验均使用纤维水泥、硅藻泥和稻草板 3 种材料作为对象,因此,将这 3 种经由不同测定试验得出的材料湿缓冲值做对比分析。

表 4 试验改进前后测定的湿缓冲值的对比

Table 4 The comparison of MBV before and after the improvement of tests

		33%至 75%	60%至 85%
硅藻泥	吸湿	0.37	0.72
	放湿	0.39	0.75
稻草板	吸湿	1.40	1.07
	放湿	1.54	0.82
纤维水泥	吸湿	1.43	3.27
	放湿	2.02	3.23

由两种测试方法得出的材料湿缓冲值数据,提出问题和结论:

1)从硅藻泥和纤维水泥的湿缓冲值看,调整湿度区间后测定值较高;但稻草板的湿缓冲值较调整前更低。因试样在实验过程中未发生膨胀或破损情况,稻草板在数值方面的反常,考虑可能因为稻草板的湿缓冲能力与其本身的内部结构(碎秸秆排列方式的差异、各部分孔隙率的不同、试样内部非匀质)有关^[12]。这表明在湿缓冲值测定实验中,材料试样的制备水平尚需提高。因此,在作数据分析和对比时,不考虑稻草板的实验结果。

2)从硅藻泥和纤维水泥的结果来看,相同材料

试件在湿度区间调整前后两次测定的湿缓冲值的差异明显;高湿度区间内测定的材料湿缓冲值较高。由此说明湿缓冲值的测定方法中关于湿度区间的设定对试验结果有直接影响,而研究对于湿度区间调整的探索是有意义的。

3 湿缓冲性能对建筑能耗以及室内环境的影响

3.1 湿缓冲值对于室内湿度的影响

湿缓冲值主要用于评价材料从一个相邻空间吸收和释放水分的能力。它在实际应用中可以用来估算房间内的湿平衡状态^[13],以下是一个计算示例:给定一个真实条件下的房间,该房间的尺寸为 4 m×5 m×3 m,房间的体积大约为 $V=60 \text{ m}^3$ 。设定房间内人的居住和活动每小时所释放的湿量为 $G=100 \text{ g}$ 。房间的四周被墙体包裹,取窗墙比 0.2 计算可得墙体和顶棚的表面积总和为 $A=63.2 \text{ m}^2$ 。假定房间没有通风,且空气的储湿忽略不计,那么下面就可以根据这些数据和实验所得到的 MBV 值来估算室内的相对湿度在一个工作日内(8 h)变化量^[14]。

在不考虑墙体表面有调湿材料的情况下,可以认为该房间的墙体与室内环境没有湿交换,即吸湿和放湿都为零。而如果墙体表面使用了调湿材料,以硅藻泥为例,根据上述针对热湿气候的实验方法测得的数据,稻草板的湿缓冲值为 $MBV=0.72 \text{ (g/m}^2 \cdot \Delta RH)$ 。假定所有室内湿源所释放的湿都被稻草板墙面材料所吸收,那么相对湿度的变化量就可以通过吸收的总湿量以及湿缓冲值计算出来。

$$\Delta RH = \frac{G \cdot \Delta t}{MBV \cdot A} = \frac{(100 \text{ g/h}) \cdot 8 \text{ h}}{0.72 \text{ g/(m}^2 \cdot \%) \cdot 63.2 \text{ m}^2} = 17.6\% \quad (1)$$

计算表明,在不考虑室内外湿交换的情况下,假定房间内湿源所释放的湿全部被由调湿材料覆盖的墙体所吸收,那么在 8 h 工作时间内,房间内的相对湿度变化量将达到 17.6%,这是非常可观的变化数值。由此可见,在没有其他调湿手段辅助或干预的情况下,建筑内表面多孔调湿材料的吸放湿作用对于房间内湿度调节有重要的影响。如果将多孔调湿材料规模应用于建筑内表面装饰,单靠其吸放湿特性也能实现对建筑室内环境的局部调节和适度改善。

3.2 湿缓冲值对于建筑能耗的影响

目前,南京地区并没有普遍使用单独的除湿机

等除湿手段,而是通过空调在调节温度的同时调节室内相对湿度,以达到室内环境舒适的要求^[15]。而为了估算 MBV 值对于能耗的影响,这里选择单独运行的除湿机作为计算的参照,而除湿机的除湿效率取决于每小时的除湿量。

除湿机的除湿量的计算式为

$$w = \rho \cdot (V_1 \cdot V_2) \cdot (x_1 - x_2) \cdot c \quad (2)$$

其中: ρ 代表空气密度(这里取 1.29 kg/m^3); V_1 代表除湿空间的体积; V_2 代表新风体积(这里取 1.1 m^3); X_1 代表除湿前的空气含水量(这里取 72% RH,查表得 0.01703 kg/kg 干空气); X_2 代表除湿后的空气含水量(稳定在 60% RH 左右,查表得 0.01065 kg/kg 干空气)。

根据式(2),可以计算出除湿机的除湿量为 1.01 kg/h 。

如果房间内不使用除湿机,而假定在这个相对湿度变化过程中,空气中的水分全部由墙体的调湿材料所吸收,那么由 MBV 值可以算出,当墙体使用硅藻泥作为装饰材料,室内相对湿度在 85% 时,若要相对湿度稳定在人体舒适的 50%,稻草板墙面所吸收的湿量为

$$G = A \cdot \% \Delta RH \cdot MBV = 63.2 \text{ m}^2 \cdot (85 - 50) \cdot 0.72 \text{ g/(m}^2 \cdot \%) = 1592.6 \text{ g} \quad (3)$$

根据资料,家用除湿机的功率为每平方米 20~30 W。上述实际算例所设定的房间的面积 20 m^2 ,即该房间若采用除湿机除湿,应选用 500 瓦左右功率的除湿机。根据式(2)和式(3)计算得到的结果,可以推算出在相同时间的同一房间内,假定调湿材料充分吸湿,则其效率相当于一个 500 W 左右的家用除湿机开启除湿 $1.59/1.01=1.6 \text{ h}$,所节省的电为 0.8 度电左右,占居民日均用电量的 1/10 左右,由此表明,使用硅藻泥作为建筑内表面装饰材料,其节能贡献率可达 10%。从这个角度来看,如果调湿材料的吸湿性能良好并且大面积使用,其对于节能的作用是显而易见的。

4 结 论

1) 利用 NORDTEST 法测定 3 种调湿材料湿缓冲特性相关参数并计算其各自的湿缓冲值。实验结果表明 3 种多孔调湿材料均具有一定的吸放湿能力和对于湿度变化的应答能力,且调湿过程呈周期循环。其中硅藻泥对于湿度变化反应最快,但湿缓冲值相比稻草板和纤维水泥较小,调湿作用有限。

2) 基于实际调研分析得出长江中下游地区梅雨

季节住宅室内相对湿度变化区间为 60%~85%，明显高于 NORDTEST 法设定的湿度区间值。笔者基于调研数据对湿缓冲值测定实验的湿度区间进行调整。结果显示，不同湿度区间内测定结果差异明显。湿度区间临界值越大，测定得到的湿缓冲值越大。因此，湿缓冲值的测定需考虑不同气候下相应的湿度变化区间这一实际因素。

3)在实验数据的基础上，提出 MBV 值在建筑能耗估算以及建筑室内湿环境评价方面的实际应用方法。通过实例分析得出高温高湿地区，选择合适的调湿材料可有效降低建筑能耗 10%左右，还可以对室内湿环境起到调节缓冲作用，提高舒适性。

参考文献：

[1] Peuhkuri R. Moisture dynamics in building envelopes [D]. Technical University of Denmark, 2003.

[2] 郑佳宜, 陈振乾. 硅藻土基调湿建筑材料的应用仿真模拟[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(4): 840-844.
Zheng J Y, Chen Z Q. Application simulation of diatomite based hygroscopic building materials [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(4): 840-844. (in Chinese)

[3] 韩星, 陈秋火. 调湿材料研究进展及吸放湿性能对比分析[C]// 上海市制冷学会 2013 年学术年会论文集, 2013.
Han X, Chen Q H. Research progress and comparative analysis on sorption and desorption performance of hygroscopic materials[C]// Shanghai City Institute of refrigeration 2013 Annual Symposium, 2013. (in Chinese)

[4] 冉茂宇, 袁炯炯. 调湿材料吸放湿性能的测试方法[J]. 暖通空调, 2006, 36(4): 10-16.
Ran M Y, Yuan J J. Test method for the performance of hygroscopic materials[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2006, 36(4): 10-16. (in Chinese)

[5] 黄子硕, 于航, 张美玲. 建筑调湿材料吸放湿速度变化规律[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 2: 024.
Huang Z S, Yu H, Zhang M L. Order of the absorption and desorption rate of hygroscopic building materials[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 2: 024. (in Chinese)

[6] Qin M, Belarbi R, Ait-Mokhtar A, et al. Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials [J]. Construction and building materials, 2009, 23 (2): 967-975.

[7] Rode C. Workshop on moisture buffer capacity[R].

Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark. 2003.

[8] Oasmaa A, Meier D. Norms and standards for fast pyrolysis liquids; 1. Round robin test[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2005, 73 (2): 323-334.

[9] Zhang H, Yoshino H, Hasegawa K. Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method [J]. Building and Environment, 2012, 48: 27-34.

[10] 刘京, 姜安玺, 李振海. 建材吸放湿条件下室内环境的实验及数值研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 33(10): 1362-1366.
Liu J, Jiang A X, Li Z H. Experimental and numerical studies on indoor environment under condition of hygroscopic building materials[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 33(10): 1362-1366. (in Chinese)

[11] 《大气科学辞典》编委会. 大气科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
The editorial board of < Atmospheric Science Dictionary >. Atmospheric science dictionary [M]. Beijing: Meteorological Press. 1994. (in Chinese)

[12] RR—OIM—0020 M V. 饱和盐溶液标准相对湿度值 [S]. 2000.
RR—OIM—0020 M V. Standard relative humidity of saturated solution [S]. 2000.

[13] Wadsö L. Studies of water vapor transport and sorption in wood [D]. Lund University, 1993.

[14] Abadie M, Mendonça K C. Moisture performance of building materials: From material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value concept [J]. Building and Environment, 2009, 44(2): 388-401.

[15] Rode C, Peuhkuri R H, Mortensen L H, et al. Moisture buffering of building materials [R]. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2005.

[16] 付强, 胡振杰, 段宝东, 等. 基于实测的温度湿度独立控制空调系统节能效果评估[J]. 暖通空调, 2014 (6): 107-111.
Fu Q, Hu Z J, Duan B D, et al. The energy efficiency assessment of temperature and humidity independent control air conditioning system based on measured data [J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2014 (6): 107-111. (in Chinese)