

文章编号:1673-0062(2013)04-0090-06

多孔介质墙体热湿耦合迁移实验方法

陈国杰^{1,2},刘向伟¹,陈友明^{1*},郭兴国³,张 冷¹

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;2. 南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001;
3. 南昌大学 建筑工程学院,江西 南昌 330031)

摘 要:多孔介质墙体热湿耦合迁移对建筑热工性能、建筑能耗及室内环境有着重要影响,实验是研究该过程的重要方法.分析了多孔介质墙体热湿耦合迁移实验研究中的两个关键问题.首先,概述了多孔介质材料内瞬态湿度测量方法,提出了一种造价低、使用便捷并准确可靠的方法.然后,分析了国内外研究者常用的三种实验方案,设计了一种新方案,并根据新方案搭建了一个足尺寸实验台,为多孔介质墙体实验研究及数学模型验证打下基础.

关键词:多孔介质材料;建筑墙体;热湿耦合迁移;实验方法

中图分类号:TU111 **文献标识码:**B

Experimental Method for Coupled Heat and Moisture Transfer in Porous Building Envelope

CHEN Guo-jie^{1,2}, LIU Xiang-wei¹, CHEN You-ming^{1*}, GUO Xing-guo³, ZHANG Ling¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract:The coupled heat and moisture transfer through porous building envelope has an important impact on the hydrothermal performance of building enclosure, energy consumption and indoor environment, for which experimental study is essential. Two key problems were investigated about the experimental study of coupled heat and moisture transfer in porous building envelope. After a straightforward review of methods for measuring moisture content of porous material, a convenient and inexpensive facility was proposed which can provide an exact result. Afterwards, three experimental study schemes were discussed, which were often adopted by researchers. And then a new scheme was proposed to the transient heat and mois-

收稿日期:2013-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078127;51208247;51178170);衡阳市社科基金资助项目(2012C03)

作者简介:陈国杰(1981-),男,湖南祁东人,南华大学机械工程学院讲师,博士研究生.主要研究方向:建筑热湿工程分析及建筑节能.*通讯作者.

ture transfer process in porous building envelope, which can be used to validate mathematical models more accurately, and on the basis of which a new full-scale experimental table was set up. This experimental table is a basis for studying the coupled heat and moisture transfer in porous building envelope and validating the mathematical model.

key words: porous material; building envelope; coupled heat and moisture transfer; experimental method

绝大部分建筑墙体都是多孔介质材料,多孔介质墙体热湿迁移及湿积累对建筑热工性能、建筑能耗及室内环境有着重要影响。高含湿量可引起金属腐蚀、木材腐烂,除了结构性错误,90%的建筑围护结构问题均与湿有关^[1]。水的导热系数是空气的25倍左右,冰的导热系数是液态水的4倍左右,多孔墙体含湿量微小的变化都将对其传热性能产生巨大影响。墙体高含湿量会导致室内空气含湿量升高,引发霉菌等微生物滋长,恶化室内环境。宜居温度下当空气含湿量为7 g/kg时,微生物浓度为400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右;当含湿量为15 g/kg时,微生物浓度迅速增为2 080 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右^[2]。

多孔介质墙体中湿过程可能为液态分子扩散、蒸汽扩散、表面扩散、毛细流及纯水力流动等机理中一种或多种的共同作用,再考虑热迁移过程以及热湿迁移两者间的耦合作用,多孔介质墙体热湿耦合迁移是个非常复杂的过程。主要研究方法有分析解法、数值解法及实验法。分析解法能提供精确解,物理意义明确,但对于复杂研究对象难以求解。数值方法通常需要相应实验予以验证。实验方法是实时监测特定条件下多孔介质中各部分(或位置)的温湿度情况,分析研究多孔介质中热湿迁移规律,实验法直观可靠,是得到材料物性参数、模型验证必不可少的一环。

多孔介质墙体热湿耦合迁移实验研究主要面对两个关键问题。其一,如何准确与便捷地测量墙体局部瞬态湿度;其二,如何设计更为有效的实验方案,减少材料的生产加工、使用时间等因素对研究准确性的影响。本文概述了国内外研究者对上述两个关键问题所做的工作,并分别提出了新的处理方法,并搭建了一个多孔介质墙体热湿耦合迁移足尺寸实验台。

1 局部含湿量测量概述

如何准确便捷地测得局部含湿量,关系到能否精确获得材料的热湿物性参数值,直接影响模型验证的准确性,是多孔介质材料热湿耦合迁移实验研究难点之一。国内外研究者开发了一系列

测量方法,如切片称重法、 γ 射线法、核磁共振法、X射线法、电容法以及电阻法等,原理各异,适用于不同研究背景下的不同研究对象。

切片称重法即维持多孔材料的一个含湿量状态足够久之后,迅速切出小片样品称重,干燥再称重,获得该状态下的含湿量值。切片称重法测量结果准确可靠,但对样品有破坏性,而且对许多建筑材料难以切片称量。 γ 射线法即把不同含湿量的样品放在 γ 射线源与检测器间, γ 射线从射线源发出,穿过被测样品,被检测器捕捉,将扫描结果与干样品的扫描结果相比较,得到样品的平均含湿量。 γ 射线法的缺点是成本与费用高,且对人体有危害。核磁共振法(NMR)即通过监测材料中的氢原子核数量来确定含湿量^[3]。核磁共振法的优点是测量时没有辐射危害,缺点是费用高,而且能测试的对象有限。X射线法即用X射线照亮被测物,当被测物中湿度变化时,X射线强度相应变化,从而形象地显示物体内部含湿量,X射线法成本高,不适用于建筑现场湿度测量^[4]。电容法与电阻法是根据多孔介质材料含湿量变化时引起的电容、电阻变化,通过一定的换算即可得到材料的含湿量,具有成本低优势,但测量准确性亟待提升,且传感器安装困难,难以准确校准。

2 一种新型测量方法

本文提出了一种可以同时测量多孔介质墙体局部温湿度的新方法,根据该方法组装的新测量设备使用便捷、造价低且测量结果准确。所如图1所示,主要由数据记录仪、传感探头及信号线组成,记录仪与传感探头采用电连接,可实时测量与记录传感探头处的温湿度。

一个传感探头是由包在塑料壳体内的一个相对湿度传感器和一个温度传感器组成。壳体为塑料材质中空圆柱体,能保护传感器以免受压损坏。壳体上有许多微小孔洞,壳体内传感器测得的温湿度值能较好反应壳体外墙体局部的温湿度值^[5]。

传感探头尺寸较小,直径约5 mm,长度约8 mm,可以便捷地用于足尺寸构件实验台或施工

现场,如图2所示。对于新建建筑,可在施工时预埋于墙体中,对已有建筑,可先在墙上打个小孔,再把传感探头埋入其中。该方法对墙体破坏较小,能方便地对建筑围护结构中含湿量进行现场测量。

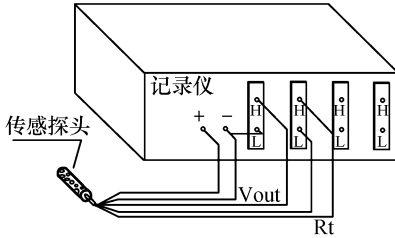


图1 新测量装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the new facility



图2 传感探头安装

Fig.2 Installation of sensor proble

参考材料的等温吸放湿曲线,根据测量值可求得墙体内含湿量值。相对湿度传感器输出电压信号(V_{out})随传感器部位温度变化而有所改变,可根据该信号与温度的变化关系,用温度传感器的电阻(R_t)信号来补偿相对湿度传感器的输出信号,提高测量的准确性。

3 热湿迁移实验方案概述

国内外研究者对多孔介质墙体材料所作实验研究方案可分为三类:1)材料热湿物性参数研究。材料与环境均处于精密控制稳态条件下,得到不同温湿度条件下材料热湿物性参考值。2)控制条件下热湿迁移过程研究。材料两侧环境为精密控制的稳态或瞬态状况,主要用于材料热湿迁移数学模型的验证。3)实际气候下热湿迁移过程研究。材料一侧为实际气候条件,另一侧为控制气候环境,用于实际气候条件下模型验证与材料

热湿耦合迁移性能研究。

3.1 物性参数实验研究

实验对象与环境均精密控制,测量实验对象热湿含量,得到特定对象特定稳态条件下的热湿属性,通过一系列此类实验即可得到一系列材料热湿属性值。

Yang 研究了加拿大 10 余种建筑材料的导热系数、等温吸放湿性能、水蒸气渗透系数、水吸收系数、液态水扩散系数及空气渗透系数等热湿属性^[6]。在控制温度与相对湿度环境下,Arambula 等通过定期测量样品含量测得多种材料内水蒸气迁移系数^[7]。李魁山等测试了 3 种保温材料与一些建筑结构材料的水蒸气渗透系数^[8]。

此类实验是在精密控制实验条件下对特定对象作的标定性研究,成本大耗时久,其意义侧重于湿物性参数参考值。

3.2 控制条件下热湿耦合迁移过程研究

实验对象两侧均为精密控制的空气环境,两侧温度梯度、湿度梯度或风速等作用足够长时间后,测试得到材料中温湿度场或热湿流量瞬态值。

Talukdar 等搭建了一个实验台,如图3所示,测试流动空气与多孔材料间的一维瞬态湿迁移^[9-10],测试材料为纤维保温层与云杉胶合板。真空泵从温湿度控制箱中抽取空气流经矩形风管,在测试材料上部提供稳定的对流空气流边界,测试材料置于一个由热塑聚碳酸酯塑料构成的容器中,四周处于绝热与不可渗透状态,确保湿迁移是一维的。实验结果与模型计算结果吻合良好。

该类实验主要用于迁移机理性分析及特定环境下的模型验证。不适用于实际气候下热湿迁移过程研究及相应的热湿数学模型验证。

3.3 实际气候下热湿耦合迁移过程研究

实验对象一侧为精密控制的空气环境,另一侧为实际气候环境,研究材料中热湿耦合迁移过程,以验证数值模型及研究实际气候下多孔介质材料的热湿迁移特性。

Desto 等搭建了一个实际气候下足尺寸构件轻质墙体热湿迁移实验台^[11],如图4所示。测试对象从外向内分别为外板、通风腔、纤维板套、木钉矿物棉及内装修层。层与层界面处设有温度、湿度和热流量传感器,共埋设了 57 个热电偶、18 个湿度传感器及 12 个热流传感器。研究了含湿源典型居室墙体的热湿迁移、有空气迁移时墙体的热湿迁移及空气流速对墙体湿迁移的影响。陈友明等搭建了一个实际气候条件下足尺寸构件墙体

热湿迁移耦合实验台,实验对象为水泥砂浆—红砖—水泥抹灰(发泡塑料壁纸)墙体,实验室内空

气控制为恒定的温湿度,通过布置在墙体内外外的温湿度传感器采集各位置的温湿度值^[12].

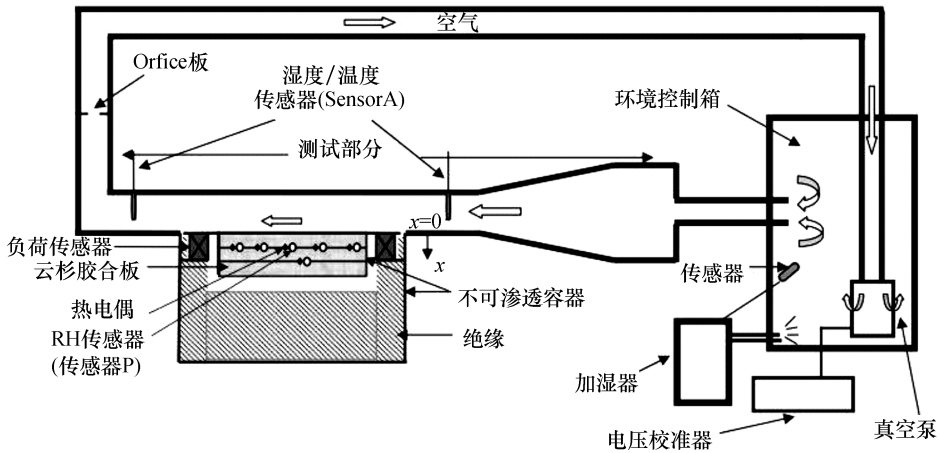


图3 控制条件下热湿迁移实验台

Fig.3 Experimental table under controlled conditions

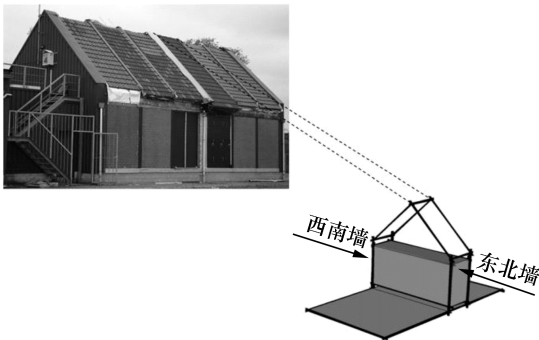


图4 实际气候下热湿迁移实验台

Fig.4 Experimental table under real conditions

实际环境影响因素众多,用这种方法难以准确验证数学模;材料的生产使用状况对其热湿迁移具有影响,该方法所得到的材料热湿迁移特性仅能体现出个性.

4 一种新型实验方案

综合以上方案2与方案3的优点,本文设计并搭建了一种新型实验台,同时实现控制条件下与实际气候下多孔介质热湿迁移实验研究,减少因材料的生产加工、使用时间等因素对热湿迁移研究及模型验证研究准确性的干扰.

所设计的实验台如图5所示,由2间实验房3面实验墙体组成,2间实验房内空气温湿度均可精密控制,实验房外为实际热湿气候环境.设置3

面实验墙,实验对象置于实验墙中,其中,墙1、2一侧为内侧为控制环境,外侧为实际热湿气候环境,墙3两侧均为控制环境.实验台能同时进行控制环境下与实际气候条件下实验研究研究,可增强两种条件下实验研究的互补性,提高模型验证及墙体热湿性能研究的准确性.

以墙体3为实验对象,控制两间实验房为不同的温湿度环境,即可实现控制环境下多孔介质墙体材料热湿耦合迁移实验研究.

设置墙体1与墙体3为相同实验对象,即原材料、生产厂家、加工时间与方式、使用时间等均相同,精密控制两间实验房室内温湿度,同时实现控制环境下与实际气候下某材料内热湿耦合迁移实验研究.用该实验研究结果验证数学模型,有助于提高数值模型的准确性.

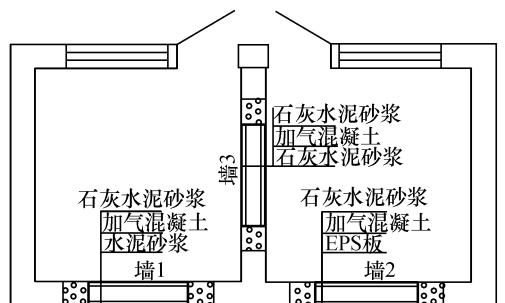


图5 实验台平面示意图

Fig.5 Schematic diagram of the new experimental table

5 实验台搭建

根据上述新型实验方案,搭建了新型足尺寸实验台.实验台位于湖南大学某屋顶,四周均空旷无遮挡,外观图如图6所示.实验台坐南朝北(即实验墙1,2外侧为南向),总尺寸(长×宽×高)为5 000 mm×2 600 mm×3 000 mm,东西两实验房尺寸规则相同分别命名为A、B室,设置三面1 000 mm×1 000 mm实验对象,分别编号为1,2,3号实验样品(以下简称样品).样品四周设置250 mm厚挤塑式聚苯乙烯(XPS)保温板,实现实验对象与其余墙体部分间的隔热隔湿,保证实验对象中的热湿迁移过程是沿厚度方向的一维过程.墙1,2外侧为实际气候环境,墙体3两侧均为控制环境.



图6 实验台外观图

Fig.6 External view of experimental table

沿厚度方向样品1由外向内为水泥砂浆(20 mm)-加气混凝土砌块(240 mm)-石灰水泥砂浆(20 mm),样品2为石灰水泥砂浆(20 mm)-加气混凝土砌块(240 mm)-石灰水泥砂浆(20 mm),样品3为EPS板(20 mm)-加气混凝土砌块(240 mm)-石灰水泥砂浆(20 mm).其中,加气混凝土砌块尺寸(长×宽×高)为600 mm×240 mm×200 mm.

室内外及样品中材料层界面处设有温湿度传感器.采用北京赛亿凌公司提供的温湿度变送传感器STh-Tw2HT10测量墙体外表面的温湿度.采用北京赛亿凌科技有限公司生产的铂电阻Pt-100测量墙体内部局部温度,其稳定性良好,测量误差为 $\pm(0.15+0.002|T|)$,其测量信号在无纸记录仪上直接显示为温度数据.采用四线方式连接铂电阻Pt100,以减少导线的电阻和接触电阻的影响,并在埋入墙体前校正.采用Honeywell公司生

产的HIH-4 000湿度传感器测量墙体内部局部空气相对湿度,输出电压信号,测量误差为 $\pm 3.5\%$.

由加湿器和除湿机控制实验房内空气湿度,由空调器控制温度.采用杭州松井SJ-382E除湿机,可控制的工作范围为20%~90%,精度可达到5%.采用杭州松井SJ-01除湿机,可控制的工作范围为40%~95%,精度可达到5%.温度由格力KFR-26GW/(26556)空调器控制.

多孔介质墙体足尺寸实验台实验样品尺寸大且施工复杂,为了避免搭建过程中传感器意外受损,样品内部每个位置的传感器均有备用.

6 结论

多孔介质墙体热湿迁移及湿积累对建筑热工性能、建筑能耗及建筑室内环境有着重要影响,实验法是关键的一种研究方法.本文概述了国内外研究者所作的工作,分析了墙体局部湿度测量问题与热湿迁移实验方案,并提出了新的处理方法.

针对材料局部湿度测量问题,提出了一种新的测量方法.该方法使用便捷与成本低,能同时测得局部相对湿度与温度,用温度信号补偿湿度信号,提高测量的准确性.

提出了一种新型实验方案,并基于新方案搭建了一个足尺寸试验台,可综合控制条件下与实际气候条件下两类实验的优点,同时实现控制环境下热湿迁移机理分析和实际环境下热湿迁移特性分析,有助于提高数值模型验证的准确性.高效的实验方法为多孔介质墙体热湿耦合迁移研究打下了基础.

参考文献:

- [1] Nofal M, Kumaran K. Biological damage function models for durability assessments of wood and wood-based products in building envelopes[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2011, 69(4): 619-631.
- [2] 郭兴国. 热湿气候地区多处墙体热湿耦合迁移特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [3] Van der Heijden G H A, Huinink H P, Pel L, et al. One-dimensional scanning of moisture in heated porous building materials with NMR[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2011, 208(2): 235-242.
- [4] Vikberg T, Oja J, Antti L. Moisture content measurement in scots pine by microwave and X-rays[J]. *Wood and Fiber Science*, 2012, 44(3): 280-285.
- [5] Chen G J, Liu X W, Chen Y M, et al. Development of ex-

- perimental study on coupled heat and moisture transfer in porous building envelope [J]. Journal of Central South University, 2012, 9(3): 669-674.
- [6] Yang W. Experimental study of hydrothermal properties for building materials [D]. Montreal: Concordia University, 2007.
- [7] Arambula E, Asce A M, Caro S, et al. Experimental measurement and numerical simulation of water vapor diffusion through asphalt pavement materials [J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2010, 22(6): 588-598.
- [8] 李魁山, 张旭, 韩星, 等. 建筑材料水蒸气渗透系数实验研究 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 288-291.
- [9] Talukdar P, Olutmayin S, Osanyintola O, et al. An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part I: Experimental facility and material property data [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(23/24): 4527-4539.
- [10] Talukdar P, Olutmayin S, Osanyintola O, et al. An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part II: Experimental, numerical and analytical data [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(25/26): 4915-4926.
- [11] Desta T Z, Langmans J, Roels S. Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes [J]. Building and Environment, 2011, 46(5): 1038-1046.
- [12] 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.