

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.017



加气混凝土湿物理性质的测定

冯驰^{1,2}, 俞溪³, 王德玲⁴

(1. 中国建筑科学研究院 北京 100013; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室 广州 510641;
3. 清华大学 建筑设计研究院有限公司 北京 100083; 4. 中国建筑设计院有限公司 北京 100044)

摘要:分析建筑围护结构的热湿过程有着重要意义,而材料的物理性质是完成分析必不可少的参数。对中国常用多孔建筑材料而言,其湿物理性质并不完备。在20~25℃下,依据ISO和ASTM标准,通过平衡吸放湿实验、压力平板实验、蒸汽渗透实验、毛细吸水实验和真空饱和实验,对中国产B07级加气混凝土进行了测试,得到了包括等温吸放湿曲线、保水曲线、蒸汽渗透系数、液态水扩散系数、吸水系数、毛细饱和含湿量和真空饱和含湿量在内的所有湿物理性质。

关键词:加气混凝土;水分;储存函数;传递系数

中图分类号:TU111.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)02-0125-07

Measurements on the Hygric Properties of Autoclaved Aerated Concrete

Feng Chi^{1,2}, Yu Xi³, Wang Deling⁴

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China;
3. Architectural Design and Research Institute of Tsinghua University Co. Ltd, Beijing 100083, P. R. China;
4. China Architecture Design Group, Beijing 100044, P. R. China)

Abstract: It is important to analyze the hygrothermal processes of building envelopes and the material properties are critical in the analysis. The hygric properties of the commonly used porous building materials in China are insufficient. Measurements on the B07-level autoclaved aerated concrete are carried out at 20~25℃ based on ISO and ASTM standards of static gravimetric tests, pressure plate tests, cup tests, capillary absorption tests and vacuum saturation tests. All the hygric properties have been obtained, including sorption isotherms, the water retention curve, the vapor permeability, the liquid diffusivity, the capillary absorption coefficient, as well as the capillary and vacuum saturated moisture content.

Keywords: autoclaved aerated concrete; moisture; storage function; transport coefficient

建筑围护结构的热湿过程对建筑的耐久、能耗和室内环境有着非常重要的影响^[1-3]。在分析建筑围护结构的热湿过程时,目前世界上较为先进的分

析方法是将热量、空气和湿分(Heat-Air-Moisture, HAM)的储存与传递进行综合而非孤立的分析。欧美学者对此提出了多种数学模型,并已开发出了较

收稿日期:2015-11-30

基金项目:国家自然科学基金(51508542);华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题(2016ZB19)

作者简介:冯驰(1986-),男,博士,主要从事建筑环境与围护结构热湿过程研究,(E-mail) fengchi860602@gmail.com.

Received:2015-11-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51508542); Foundation of State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology (No. 2016ZB19)

Author brief: Feng Chi (1986-), PhD, main research interest: hygrothermal process of built environment and building envelope, (E-mail) fengchi860602@gmail.com.

为方便易用的软件,如 WUFI 和 Delphin 等。

无论采用何种模型来进行 HAM 分析,材料的物理性质都是必不可少的参数。在 HAM 分析中涉及到的物理性质可以分为 3 类^[4]:基本物理性质(如密度、孔隙率等)、热物理性质(如导热系数、比热等)和湿物理性质(如蒸汽渗透系数、等温吸放湿曲线等)。在 20 世纪 90 年代到本世纪初,欧美国家通过 IEA Annex 14^[5]、IEA Annex 24^[6] 和 ASHRAE 1018RP^[7] 等大型国际或地区项目,对大量常用建筑材料进行了测试,建立了包括上述各类物理性质的较为全面的基础数据库。

中国的常用建筑材料物理性质基础数据库主要由《民用建筑热工设计规范》GB 50176^[8] 和《建筑材料热物理性能与数据手册》^[9] 构成。其涵盖范围主要是基本物理性质和热物理性质,而湿物理性质只有蒸汽渗透系数一项,缺失了等温吸放湿曲线、保水曲线、液态水扩散系数、吸水系数、毛细饱和含湿量和真空饱和含湿量等大量重要的湿物理性质。此外,在中国数据库中,蒸汽渗透系数被设定为常数,但事实上其值是材料含湿量的函数^[10]。由此可见,在常用建筑材料的湿物理性质方面,中国尚有欠缺,有待进一步完善。

20 世纪 80 年代、90 年代,中国就有学者对建筑材料湿传递系数进行了研究^[11-13]。后续又不断有学者对材料的蒸汽渗透系数和等温吸放湿曲线进行实验研究^[14-17]。这些成果为中国基础数据库的完善增砖添瓦,但仍存在三方面的问题:一是测试的方法不够统一;二是测试材料的种类和数量仍相当有限;三

是对针对每种材料测试的物理性质不全面。就测试方法而言,可通过重复性实验^[18]和再现性实验^[19]进行研究,并制定标准加以统一。就材料的种类和数量而言,需要不断积累,无法一蹴而就。对于第 3 个问题,则要求对同一批次的材料一次性测试完其所有湿物理性质,以保证各性质之间的融合性。近年来,中国已有学者开始全面、系统地研究各种湿物理性质的测试方法^[4]。

本文以一种加气混凝土为例,参照国际标准和欧美国家的经验,首次测试了中国产建筑材料的全部湿物理性质。其方法和结果将为完善中国常用建筑材料物理性质基础数据库奠定重要基础。

1 材料与方 法

所用材料为加气混凝土。根据 GB 11968—2006《蒸压加气混凝土砌块》标准,其密度为 B07 级,强度为 A5.0 级。测试温度为 20~25 ℃,具体温度因各实验而异,波动不超过 1 ℃。

试件干重的确定方法参考 ISO 12570^[20] 标准。在 70 ℃ 的电热鼓风干燥箱中将试件加热 1 周后用电子天平称量。每次称量完成后,将试件放回干燥箱,待 2~3 d 后再次称量。当连续 3 次称量结果的相对波动不超过 0.1% 时,取 3 次的平均值作为干重。

使用数显游标卡尺测量试件尺寸,读数精确至 0.01 mm。每个方向上至少测量 2 次后取平均值。

各实验的基本信息如表 1 所示。具体的实验原理和方法可参考相关标准和作者之前的研究^[4, 18]。下面简单介绍各实验的步骤。

表 1 湿物理性质测试的基本信息

Table 1 Basic information of the measurements on hygric properties

实验	参考标准	测试性质	实验温度/℃	试件尺寸	试件数量	称量精度/mg
平衡吸放湿实验	ISO 12571 ^[21] ASTM C1498 ^[22]	等温吸放湿曲线	25.0	4 cm×4 cm×2 cm	32 (4×8)	0.1
压力平板实验	ISO 11274 ^[23] ASTM C1699 ^[24]	保水曲线	24.5	5 cm×5 cm×1 cm	5	1
蒸汽渗透实验	ISO 12572 ^[25] ASTM E96 ^[26]	蒸汽渗透系数	25.0	直径 12 cm 厚度 3 cm	18 (3×6)	1
毛细吸水实验	ISO 15148 ^[27]	吸水系数、毛细饱和含湿量、 液态水扩散系数	22.5	8 cm×6 cm×4 cm	5	1
真空饱和实验	ASTM C1699 ^[24] ASTM C642 ^[28]	真空饱和含湿量	24.4	5 cm×5 cm×1 cm	5	1

1.1 平衡吸放湿实验

将8种饱和盐溶液置于8个干燥器中,以营造干燥器内稳定的相对湿度环境。具体的盐溶液和对应的环境相对湿度见表2。将烘干的试件放入干燥器中进行吸湿实验,每个干燥器中各有4个试件。待试件吸湿达到平衡后,称量得到各自的湿重。再将试件放入较低相对湿度下的干燥器进行放湿实验,获得平衡时的湿重。

根据试件的干重和湿重,计算得到在吸湿和放湿过程中,各相对湿度下的质量比含湿量 u ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。再分别对吸湿过程和放湿过程的数据进行拟合,得到等温吸湿曲线和等温放湿曲线。

表2 平衡吸放湿实验使用的饱和盐溶液及对应的环境相对湿度

Table 2 Saturated salt solutions used for static gravimetric tests and the corresponding ambient RH

饱和盐溶液	$\varphi / \%$	饱和盐溶液	$\varphi / \%$
LiCl	11.3	NaCl	75.3
MgCl ₂	32.8	KCl	84.3
K ₂ CO ₃	43.2	KNO ₃	93.6
NaBr	57.6	K ₂ SO ₄	97.3

1.2 压力平板实验

将浸水24h的微孔瓷盘置于压力容器中,瓷盘上覆盖高岭土与蒸馏水的混合物(质量比1:1)约2~3mm。用1层致密绸布覆盖高岭土后,将5个毛细饱和(详见2.4节)的试件平放于绸布上,轻压试件使其略微陷下。连接好微孔瓷盘的出水口,密封好压力容器,缓慢向内施压,直到压力稳定在100kPa。待不再有水从压力导管中流出后(耗时约1周),恢复容器内的气压,迅速取出试件称重并密封。更换高岭土和绸布,再将试件放回,进行更高压力下的测试。重复上述过程,直到完成200、300、500、1000和1200kPa下的测试。

根据试件的干重和湿重,计算得到不同压力下的质量比含湿量 u ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$),再进一步拟合,得到材料的保水曲线。

1.3 蒸汽渗透试验

将试件用蜡密封在碗状玻璃容器的口处,内装干燥剂或饱和盐溶液以控制内部的相对湿度。再将容器连同试件置于乘有饱和盐溶液的干燥器内,每个干燥器中放置3个容器进行平行测试。具体的工况设置参见表3。经过一段初始时间(约1周)后,每3~4d将密封容器及试件取出称重,然后放回干燥器继续实验。当连续称重7次后,结束实验。迅速从密封容器的口处取出试件,砸碎并测定中央处的质量比含湿量 u ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

表3 蒸汽渗透实验的工况设置

Table 3 Test conditions for vapor diffusion tests

试件预处理方式	玻璃容器内	$\varphi_1 / \%$	干燥器内	$\varphi_2 / \%$
烘干后在 φ_1 下吸湿	无水 CaCl ₂	0	饱和 K ₂ CO ₃ 溶液	43.2
	饱和 K ₂ CO ₃ 溶液	43.2	饱和 KCl 溶液	84.3
	饱和 KCl 溶液	84.3	饱和 K ₂ SO ₄ 溶液	97.3
在 $\varphi = 100\%$ 下吸湿后 在 φ_2 下放湿	无水 CaCl ₂	0	饱和 K ₂ CO ₃ 溶液	43.2
	饱和 K ₂ CO ₃ 溶液	43.2	饱和 KCl 溶液	84.3
	饱和 KCl 溶液	84.3	饱和 K ₂ SO ₄ 溶液	97.3

根据试件尺寸、两侧的相对湿度以及测得的湿流密度,计算得到试件在该工况下的蒸汽渗透系数 δ_v ($\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)。再根据试件的含湿量,拟合得到蒸汽渗透系数随含湿量变化的函数。

1.4 毛细吸水实验

在盛水的密封箱内安置一个浅水槽,水槽中放入金属托架后再注入蒸馏水。调节注入的水量,使水面高度高于托架上缘约3~5mm。将干燥试件除

底面(8cm×4cm的一个面)外的其余各面用不透气的薄膜包裹,顶部开两个小孔以平衡气压。将包裹好的试件逐一放入托架上,使其通过毛细作用吸水。盖上密封箱的盖子,以减弱内部的水分蒸发,方便控制水温。每隔一段时间,打开密封箱的盖子,从托架上取出试件,用湿润的毛巾拭去表面的游离水后称重,再放回使其继续吸湿,直到采集到足够多的数据点。

根据试件的尺寸、干重及各称量时刻的湿重,计算得到试件底面毛细吸水的量与时间平方根的关系,进而求取吸水系数 A_w ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}$)、毛细饱和含湿量 w_{cap} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)和液态水扩散系数 D_l ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.5 真空饱和实验

将试件直立放入真空干燥器中。开启真空泵,使得干燥器内的气压小于 2 kPa。持续 3 h 以彻底排出空气。保持真空泵开启,通过导管往干燥器内缓慢注入蒸馏水,直到淹没试件并高于其上缘 5 cm。关闭真空泵,让试件浸水 24 h 后将其取出,分别在水下和空气中称重。

根据试件的干重及其在水下和空气中的湿重,计算得到其真空饱和含湿量 w_{vac} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

2 结果与讨论

2.1 平衡吸放湿实验

平衡吸放湿实验所得结果如图 1 所示。根据实测结果拟合得到的等温吸湿曲线和等温放湿曲线分别为式(1)和式(2)。

$$u = \ln[(100\varphi + 1)^{0.00165} / (1 - \varphi)^{0.0086}] + 1.66 \times 10^{-44} \exp(100\varphi) \quad (R^2 > 0.99) \quad (1)$$

$$u = \ln[(100\varphi + 1)^{0.0027} / (1 - \varphi)^{0.01117}] - 4.31 \times 10^{-44} \exp(100\varphi) \quad (R^2 = 0.99) \quad (2)$$

式中: u 为质量比平衡含湿量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; φ 为相对湿度。

需要指出的是,等温吸放湿曲线在理论上应该过原点。式(1)和式(2)虽不严格符合,但当 $\varphi = 0$ 时, u 已为 10^{-44} 数量级,可以忽略不计。

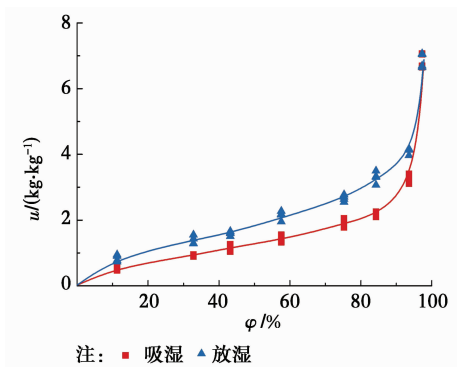


图 1 加气混凝土的等温吸放湿曲线
Fig. 1 The sorption isotherms of autoclaved aerated concrete

2.2 压力平板实验

压力平板实验所得结果如图 2 所示。根据实测

结果拟合得到的保水曲线可用式(3)表示:

$$u = 0.0918 \cdot \exp(-p/37.669) + 0.479 - 0.23p \quad (R^2 = 0.94) \quad (3)$$

式中: u 为质量比平衡含湿量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; p 为压力, kPa。

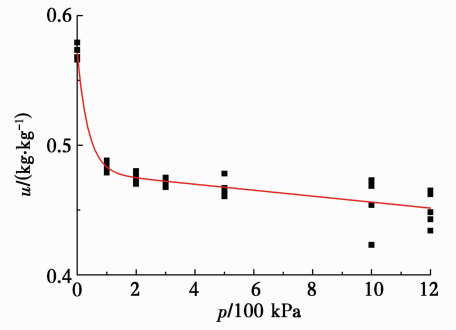


图 2 加气混凝土的保水曲线
Fig. 2 The water retention curve of autoclaved aerated concrete

2.3 蒸汽渗透试验

蒸汽渗透实验所得结果如图 3 所示。根据实测结果拟合得到的蒸汽渗透系数随含湿量变化的曲线可用式(4)表示。

$$\delta_v = 8.38 \times 10^{-5} + 8.82 \cdot u^{3.31} \quad (R^2 = 0.92) \quad (4)$$

式中: δ_v 为蒸汽渗透系数, $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{Pa}^{-1}$; u 为质量比含湿量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

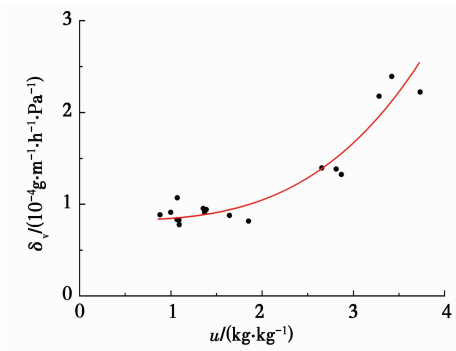


图 3 加气混凝土的蒸汽渗透系数
Fig. 3 The vapor permeability of autoclaved aerated concrete

2.4 毛细吸水实验

毛细吸水实验的结果如图 4 所示。对第 1 阶段(快速吸水阶段)的数据进行线性拟合,所得直线的斜率即为吸水系数 A_w , 其平均值为 $0.086 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}$, 标准差为 $0.009 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}$ 。再对第 2 阶段(缓慢吸水阶段)的数据进行线性拟合,该直线与第 1 阶段拟合直线的交点所对应的含湿量即

为毛细饱和和含湿量 w_{cap} , 其平均值为 $335.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 标准差为 $5.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

就目前的技术水平而言, 材料的液态水扩散系数需通过 NMR 图谱^[29-30]、X 射线衍射图谱^[31-32] 和伽马射线衰减图谱^[33-34] 等非破坏性手段才能准确测得。受实验条件限制, 本文未能进行上述实验。但根据毛细吸水实验的结果, 材料的液态水扩散系数可以用 Künzel^[35] 提出的方法加以估算。代入本文实测数据后, 可得

$$D_l = 2.52 \times 10^{\frac{w}{111.9}-10} \quad (5)$$

式中: D_l 为液态水扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; w 为质量体积比含湿量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

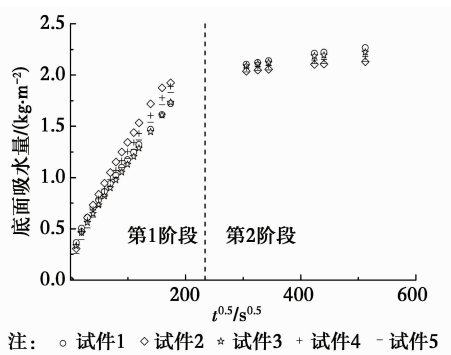


图4 加气混凝土毛细吸水实验的结果示意图

Fig. 4 Results of capillary absorption tests on autoclaved aerated concrete

2.5 真空饱和实验

在真空饱和实验中, 试件在空气中称得的湿重与干重之差即为水分质量; 而试件在空气中和水中称得的湿重之差即为试件所受浮力, 进而可知试件体积。用试件中的水分质量除以体积, 即为真空饱和和含湿量 w_{vac} , 结果平均值为 $732.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 标准差为 $1.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

需要指出的是, 通过真空饱和实验, 还可获得(开孔)孔隙率 Φ 、表观密度 ρ_{bulk} 及骨架密度 ρ_{matrix} 。用真空饱和和含湿量除以水的密度, 即为孔隙率, 平均值为 73.4% , 标准差为 0.2% 。表观密度可用试件的干重除以试件体积得到, 平均值为 $687.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 标准差为 $4.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。骨架密度可用表观密度除以孔隙率得到, 平均值为 $2583.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 标准差为 $7.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。孔隙率、表观密度及骨架密度虽不属于材料的湿物理性质, 但也是重要的基本参数, 因此一并涵盖到本文中。

3 结论

在 $20 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 首次通过平衡吸放湿实验、压

力平板实验、蒸汽渗透实验、毛细吸水实验和真空饱和实验, 测试了中国产 B07 级加气混凝土的所有湿物理性质。

1) 该加气混凝土的等温吸湿曲线和等温放湿曲线可以分别表达为 $u = \ln[(100\varphi + 1)^{0.00165} / (1 - \varphi)^{0.0086}] + 1.66 \times 10^{-44} \exp(100\varphi)$ 和 $u = \ln[(100\varphi + 1)^{0.0027} / (1 - \varphi)^{0.01117}] - 4.31 \times 10^{-44} \exp(100\varphi)$ 。

2) 保水曲线为 $u = 9.18 \cdot \exp(-p/37.669) + 0.479 - 0.23p$ 。

3) 蒸汽渗透系数为 $\delta_v = 8.38 \times 10^{-5} + 8.82 \cdot u^{3.31}$ 。

4) 液态水扩散系数为 $D_l = 2.52 \times 10^{\frac{w}{111.9}-10}$ 。

5) 吸水系数为 $0.086 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}$ 。

6) 毛细饱和和含湿量为 $335.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 真空饱和和含湿量为 $732.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(致谢: 比利时荷语鲁汶大学(K. U. Leuven)的 Hans Janssen 教授、华南理工大学的张宇峰教授和吴晨晨、蒋超硕士对本研究给予了大力支持, 在此深表感谢!)

参考文献:

- [1] HUIJBREGTS Z, SCHELLEN H, VAN SCHIJNDEL J, et al. Modelling of heat and moisture induced strain to assess the impact of present and historical indoor climate conditions on mechanical degradation of a wooden cabinet [J]. Journal of Cultural Heritage, 2015, 16(4): 419-427.
- [2] HARRESTRUP M, SVENDSEN S. Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture [J]. Building and Environment, 2015, 85: 123-133.
- [3] PIETRZYK K. A systemic approach to moisture problems in buildings for mould safety modelling [J]. Building and Environment, 2015, 86: 50-60.
- [4] 冯驰. 多孔建筑材料湿物理性质的测试方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
FENG C. Study on the test methods for the hygric properties of porous building materials [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [5] HENS H. IEA Annex 14: Condensation and energy, Volume 3; Catalogue of material properties [R]. 1991.
- [6] KUMARAN M K. IEA Annex 24: Heat, air and

- moisture transfer in insulated envelope parts. Final Report, Volume 3, Task 3: Material Properties [R]. 1996.
- [7] KUMARAN M K. A thermal and moisture transport property database for common building and insulating materials, final report from ASHRAE research project 1018-RP [R]. 2002.
- [8] 民用建筑热工设计规范:GB 50176—93[S]. Thermal design code for civil building; GB 50176—93 [S]. (in Chinese)
- [9] 周辉,钱美丽,冯金秋,等. 建筑材料热物理性能与数据手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010. ZHOU H, QIAN M L, FENG J Q, et al. Handbook of thermal properties and data for building materials [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 冯驰,冯雅,孟庆林. 加气混凝土蒸汽渗透系数的变物性取值方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(5): 132-136. FENG C, FENG Y, MENG Q L. Approach to determine value of variable vapor permeability of autoclaved aerated concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(5): 132-136. (in Chinese)
- [11] 归柯庭,韩吉田. 用恒热流法测定多孔介质的热质迁移特性参数[J]. 计量学报, 1995, 16(4): 252-256. GUI K T, HAN J T. Measurement of heat and mass transport properties of porous media with the constant heat flux [J]. Acta Metrologica Sinica, 1995, 16(4): 252-256. (in Chinese)
- [12] 韩吉田,施明恒,虞维平,等. 同时测定含湿多孔介质热湿迁移特性的参数估计法[J]. 计量学报, 1995, 16(2): 153-160. HAN J T, SHI M H, YU W P, et al. A parameter estimation method for simultaneously measuring heat and mass transport properties of moist porous media [J]. Acta Metrologica Sinica, 1995, 16(2): 153-160. (in Chinese)
- [13] 付丰,孔祥谦,王金忠. 借助反问题方法实现质扩散系数的快速测量[J]. 上海机械学院学报, 1988, 10(2): 63-66, 80. FU F, KONG X Q, WANG J Z. An inverse problem method for the transient measurement of mass diffusivity [J]. Journal of Shanghai Institute of Mechanical Engineering, 1988, 10(2): 63-66, 80. (in Chinese)
- [14] 闫增峰,刘加平,王润山. 生土围护结构的等温吸湿性能的实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2003, 35(4): 347-349, 353. YAN Z F, LIU J P, WANG R S. Experimental study of moisture absorption isotherms of adobe building materials [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2003, 35(4): 347-349, 353. (in Chinese)
- [15] 李魁山,张旭,韩星,等. 建筑材料等温吸放湿曲线性能实验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(1): 81-84. LI K S, ZHANG X, HAN X, et al. Experimental research of isothermal sorption curve of building materials [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(1): 81-84. (in Chinese)
- [16] 裴清清,陈在康. 几种常用建材的等温吸放湿线试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 1999, 26(4): 96-99. PEI Q Q, CHEN Z K. An experimental study on isothermal moisture absorption and desorption processes of some common-used building materials [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 1999, 26(4): 96-99. (in Chinese)
- [17] FENG C, JANSSEN H, WU C, et al. Validating various measures to accelerate the static gravimetric sorption isotherm determination [J]. Building and Environment, 2013, 69: 64-71.
- [18] FENG C, JANSSEN H, FENG Y, et al. Hygric properties of porous building materials; Analysis of measurement repeatability and reproducibility [J]. Building and Environment, 2015, 85: 160-172.
- [19] ROELS S, CARMELIET J, HENS H, et al. HAMSTAD work package 1: final report-moisture transfer properties and materials characterisation, EU Contract GRD1-1999-20007 [R]. 2003.
- [20] 2000(E) Hygrothermal performance of building materials and products-determination of moisture content by drying at elevated temperature; ISO 12570 [S].
- [21] 2000(E) Hygrothermal performance of building materials and products-determination of hygroscopic sorption properties; ISO 12571[S].
- [22] Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials; ASTM C1498-04a[S].
- [23] 1998(E) Soil quality-determination of the water retention characteristic-laboratory methods; ISO 11274 [S].
- [24] Standard test method for moisture retention curves of porous building materials using pressure plates; ASTM C1699-09[S].
- [25] 2001(E) Hygrothermal performance of building materials and products-determination of water vapour

- transmission properties: ISO 12572[S].
- [26] Standard test method for water vapor transmission of materials: ASTM E96-00[S].
- [27] 2002(E) Hygrothermal performance of building materials and products-determination of water absorption coefficient by partial immersion: ISO 15148 [S].
- [28] Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete: ASTM C642-13[S].
- [29] MACMILLAN B, VELIYULIN E, LAMASON C, et al. Quantitative magnetic resonance measurements of low moisture content wood [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(11): 2158-2162.
- [30] HEIJDEN G V D. NMR imaging of moisture inside heated porous building materials [D]. Eindhoven University of Technology, 2011.
- [31] ROELS S, CARMELIET J. Analysis of moisture flow in porous materials using microfocus X-ray radiography [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(25): 4762-4772.
- [32] UTAKA Y, HIROSE I, TASAKI Y. Characteristics of oxygen diffusivity and water distribution by X-ray radiography in microporous media in alternate porous layers of different wettability for moisture control in gas diffusion layer of PEFC [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(15): 9128-9138.
- [33] MEDHAT M E. Application of gamma-ray transmission method for study the properties of cultivated soil [J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, 40(1): 53-59.
- [34] PRIYADA P, RAMAR R, SHIVARAMU. Determining the water content in concrete by gamma scattering method [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 63: 565-570.
- [35] KÜNZEL H M. Simultaneous heat and moisture transport in building components [R]. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 1995.

(编辑 王秀玲)