

# 敦煌莫高窟地仗层仿真试块等温吸湿性能实验研究

赵欢<sup>1</sup>, 闫增峰<sup>1</sup>, 毕文蓓<sup>1</sup>, 孙立新<sup>1,2</sup>, 王旭东<sup>3,4</sup>, 张正模<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100044;  
3. 敦煌研究院 保护研究所, 甘肃 敦煌 736200; 4. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**敦煌莫高窟地仗层是人工加筋土, 土料选自于窟前西水沟的澄板土, 加筋材料为植物草结、麻纤维和棉纤维。为了定量地研究窟内热湿环境, 确定莫高窟窟内地仗层的热湿物理性质参数是一项基本工作。地仗层的吸湿特性可以用等温吸湿曲线表征。由于敦煌莫高窟的不可复制性决定了从敦煌莫高窟窟内取地仗层实验几乎是不可能的, 因此, 本次测试以敦煌研究院提供的仿真试样为研究对象。本文首次实验研究了地仗层仿真试块的等温吸湿过程, 利用计算机软件进行了曲线拟合分析, 得到了莫高窟地仗层的等温吸湿曲线函数关系式, 为量化地研究莫高窟窟内热湿环境奠定了科学基础。

**关键词:**莫高窟; 地仗层; 等温吸湿曲线; 含湿量

中图分类号: TU119.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0704-04

## Study on the moisture absorption isotherms of the simulation test block in Mogao Grottoes' plaster in Dunhuang

ZHAO Huan<sup>1</sup>, YAN Zengfeng<sup>1</sup>, BI Wenbei<sup>1</sup>, SUN Lixin<sup>1,2</sup>, WANG Xudong<sup>3,4</sup>, ZHANG Zhengmo<sup>3</sup>

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. Tech., Xi'an 710055, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100044, China;

3. Conservation Institute, Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China;

4. School of Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Mogao Grottoes' plaster is artificial reinforced earth, selected from plate soil in the West Ditch in front of Grottoes. Reinforced materials include plant knots, fibrilia and cotton fibers. It is fundamental work to determine the thermal and moisture properties of Mogao Grottoes' plaster for evaluating the indoor thermal and moisture environment of Mogao Grottoes. The moisture absorption isotherms of plaster are important for studying the moisture absorption process of Mogao Grottoes' plaster. Experiments have first been conducted to study the moisture absorption process of the simulation test block in Mogao Grottoes' plaster. By using the commercial software to do the work of curve fitting, this paper process the formula of the moisture absorption isotherms of Mogao Grottoes' plaster. The work helps lay the foundation of dynamic modeling of the indoor thermal and moisture environment of Mogao Grottoes.

**Key words:** Mogao Grottoes; plaster; moisture absorption isotherms; moisture content

敦煌莫高窟坐落于甘肃省敦煌市鸣沙山东麓的西壁上, 是中国也是世界上现存规模最大、保存最为完好的佛教艺术宝库<sup>[1]</sup>。莫高窟地仗层是壁画能够长久保存的重要介质, 为了量化地开展莫高窟窟内热湿环境研究, 本文首次通过实验研究了地仗层仿真试块的等温吸湿过程。

等温吸放湿曲线描述的是在一定温度和相对湿度条件下材料平衡含湿量与环境相对湿度的关系, 反映了在一定温度及相对湿度环境下材料在平衡状态下贮存水分的能力, 它是材料自身吸湿

能力强弱的表现。材料在不同湿平衡状态下的湿容量只与材料本身的成分、结构有关。等温吸湿曲线是多孔材料最重要的湿物理性质之一, 是研究和获得墙体传湿过程中有关特征参数、传递系数的基础。因此, 等温吸湿曲线是进行墙体湿过程动态分析的基础<sup>[2]</sup>。从目前掌握的文献来看, 墙体的一些非常基本的热湿物理性能参数大多仍是空白, 对敦煌莫高窟地仗层热湿物性参数的量化研究在国内外还是首次开展, 只有通过实验手段才能获得这些参数。由于敦煌莫高窟的不可复

制性决定了从敦煌莫高窟窟内取地仗层实验几乎是不可能的, 因此本文测试以敦煌研究院提供的仿真试样为研究对象, 重点研究三类地仗层仿真试块的等温吸湿曲线.

1 实验测试

1.1 实验装置和材料

本实验根据 ISO12571-2013<sup>[3]</sup> 的规定, 在等温条件下, 使材料样品在不同的湿度环境中达到平衡状态, 测出在该湿度下的平衡含湿量, 将离散点进行曲线拟合得出该材料的等温吸放湿曲线. 确定材料等温吸湿曲线通常采用静态试验法<sup>[4]</sup> 获得材料的等温吸湿曲线, 该法是将干燥后的多孔材料置于一定相对湿度的恒温环境中, 且空气保持静止状态, 待材料吸湿达到平衡后得到该材料在某种相对湿度环境下的平衡量. 根据不同相对湿度下材料的吸湿量绘制得到材料的等温吸湿曲线. 该方法由于受空气压力变化影响较小, 其测试精度相对较高, 但测试周期较长. 静态实验法的基本实验装置为干燥皿, 在干燥皿中利用饱和盐溶液的方法<sup>[5-6]</sup> 取得不同的环境相对湿度. 利用饱和盐溶液获取一定相对湿度环境的方法, 在一定环境温度条件下, 饱和盐溶液上表面接触的密闭空间可以保持一定的相对湿度. 饱和盐溶液选用分析纯的固体盐和蒸馏水配制. 由于温度、湿度都是水分迁移的驱动力, 为了保证干燥皿内相对湿度的精确性, 干燥皿环境温度控制为  $25 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 不同饱和盐溶液在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时对应的相对湿度见表 1<sup>[3]</sup>.

表 1 饱和盐溶液上方空气的平衡相对湿度/ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 1 Equilibrium relative humidities( $\varphi$ ) above various saturated solutions/ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

名称	分子式	相对湿度
氯化锂	LiCl	11.3
氯化镁	MgCl <sub>2</sub>	32.78
碳酸钾	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43.16
硝酸镁	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52.89
氯化钠	NaCl	75.29
氯化钾	KCl	84.34
硝酸钾	KNO <sub>3</sub>	93.58

敦煌莫高窟地仗层是人工加筋土, 土料选自于窟前西水沟的澄板土, 加筋材料为植物草结、麻纤维和棉纤维<sup>[7]</sup>. 由于敦煌莫高窟的不可复制性决定了从敦煌莫高窟窟内取地仗层实验几乎是不可能的, 因此本次测试以敦煌研究院提供的仿真试样为研究对象, 依次编号为 A、B、C. A、B 类

试块由颜料层、薄石灰层、细泥层(细麻纤维)、粗泥层(加麦草)构成, 其中 B 类试块粗泥层内掺杂有石灰; C 类试块由颜料层、薄石灰层、细泥层(加棉纤维)构成. 在实验室中对敦煌研究院提供的试块进行加工, 测试平衡湿度的试件尺寸均为  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ .

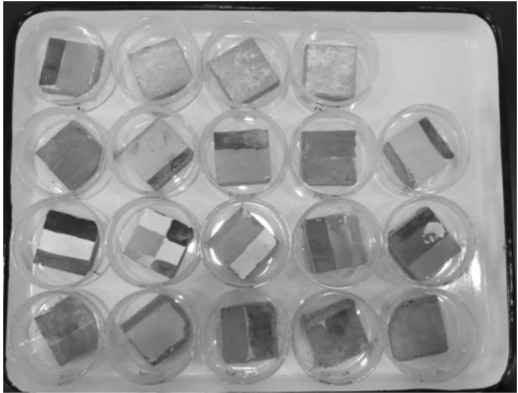


图 1 地仗层仿真试块

Fig. 1 The simulation test block of Mogao grottoes' mural plaster

1.2 实验过程

将地仗层仿真试块放入无盖的称量杯中, 放在  $70^{\circ}$  的恒温烘箱中烘干至恒重, 自然冷却后取出, 用光电式天平( $0.1\text{ mg}$ ) 称量其质量, 将干燥后装有试块的称量杯依次放置于具有不同相对湿度的干燥皿中带孔的隔板上, 隔层下面放置不同饱和盐水溶液为干燥皿中创造稳定的相对湿度环境. 室内环境温度保持  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 试块在干燥皿中进行湿交换, 当质量恒定不变即达到平衡状态, 周期称量试块在每种湿度环境下达到平衡后的质量并记录. 达到平衡的时间约为三周.

整过实验过程中将试块放在城有 7 种不同饱和溶液的干燥皿内吸湿, 使试块在干燥皿中充分的吸湿达到平衡状态. 7 种不同的饱和盐溶液上方空气平衡相对湿度从小到大变化, 其范围为  $11.3\% \sim 93.58\%$ , 具体见表 1. 通过试块吸湿平衡质量和对应的相对湿度环境得到试块的等温吸湿曲线. 实验过程中用温湿度记录仪对干燥皿环境空间中的温湿度进行监控. 实验室中测试试块吸附平衡含湿量的时间持续了 1 个多月, 从 2016 年 8 月 31 日到 10 月 17 日.

2 实验结果与分析

根据不同相对湿度条件下实验结果计算试块的平衡含湿量. 在某相对湿度条件下材料的平衡含湿量为  $u\text{ (kg/kg)}$  其具体计算如下式<sup>[8]</sup>.

$$u = \frac{m_w - m_d}{m_d} \tag{1}$$

式中： $m_d$ 为试块在绝干状态下的质量，kg； $m_w$ 为试块达到吸湿平衡时的质量，kg。

等温吸湿曲线是一条连续的曲线，然而条件限制只能获得有限个相对湿度下试块的平衡含湿量，因此需要对测试得到的平衡含湿量和对应相对湿度进行拟合分析从而获得试块的连续等温吸湿曲线。描述建筑材料的等温湿平衡曲线有多种分析表达形式，本文采用 Peleg 模型<sup>[9]</sup>进行拟合分析，其表达式为

$$u = a\varphi^b + c\varphi^d \tag{2}$$

式中： $\varphi$ 为环境的平衡相对湿度，%； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 为曲线拟合的系数。

美国国佛罗里达太阳能中心 (Florida Solar Energy Centre) 建立常用建筑材料平衡含湿量曲线数据库时采用了 Peleg 模型进行分析<sup>[10]</sup>，FSEC 的数据库涵盖了广泛的建筑材料并被广泛应用。闫增峰等<sup>[11]</sup>在生土围护结构的等温吸湿性能的实验研究中证明了对于夯土墙运用表达式(2)得到的拟合结果与实验结果非常吻合，拟合相关率很好。敦煌莫高窟地仗层材料的物理性质类似于夯土材料，因此本研究采用上式对地仗层仿真试块的平衡含湿量曲线进行拟合分析。利用 ORIGIN 计算机软件拟合分析出试块吸湿质量随相对湿度变化的曲线，得到平衡含湿量曲线和函数表达式。试块拟合等温吸湿平衡曲线结果见图 2—图 4。

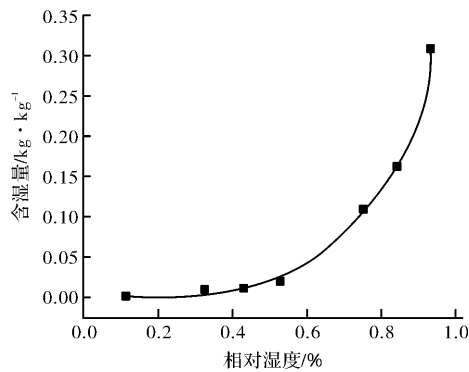


图 2 A 试块的等温吸湿平衡曲线

Fig. 2 The moisture absorption isotherms of Block A

表 2 等温吸湿平衡曲线拟合方程

Tab. 2 Fitting equations of moisture absorption isotherms

试件	拟合关系式	拟合相关率
A	$u = 0.319\ 51\varphi^{3.921\ 86} + 24.086\ 61\varphi^{90.063\ 77}$	0.998\ 27
B	$u = 0.017\ 5\varphi^{1.391\ 24} + 0.481\ 51\varphi^{25.506\ 44}$	0.999\ 94
C	$u = 0.009\ 58\varphi^{1.003\ 1} + 0.019\ 87\varphi^{10.332\ 52}$	0.994\ 02

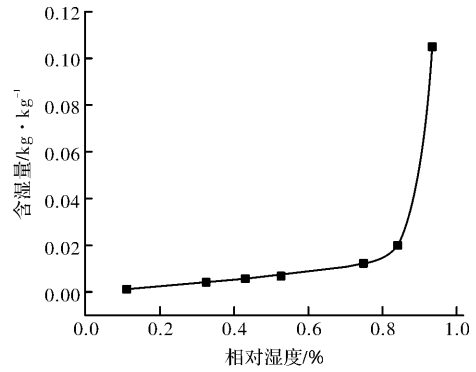


图 3 B 试块的等温吸湿平衡曲线

Fig. 3 The moisture absorption isotherms of Block B

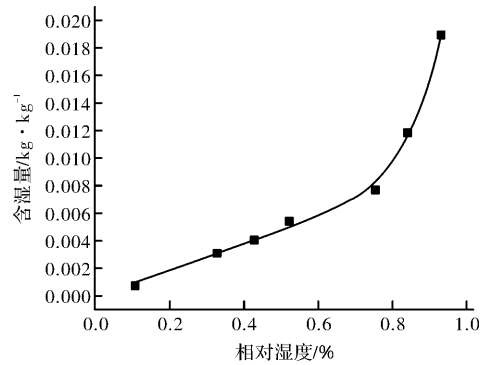


图 4 C 试块的等温吸湿平衡曲线

Fig. 4 The moisture absorption isotherms of Block C

从图 2—图 4 可以看出，拟合模型拟合误差小，实验结果与方程相关性好，拟合相关率均大于 99%，最小的拟合相关率也达到了 0.994。拟合结果验证了试块的平衡含湿量符合方程(2)式。此外，比较三类试块的拟合相关率，还可以明显看出，拟合相关率从大到小的次序为：B>A>C。

在等温条件下，莫高窟地仗层仿真试块的平衡含湿量随相对湿度变化呈幂指数变化。在相对湿度较低的区域，试块的质量变化较平缓，而在相对湿度较高的区域，试样的质量变化较明显。这表明在高湿的条件下，地仗层更容易吸湿。

比较图 2—图 4 可知，三种材料等温吸湿曲线相似，但是含麻纤维和麦草的试块的平衡湿容量明显高于加棉纤维的试块的平衡湿容量。而含麻纤维、麦草且含石灰的的试块的平衡湿容量明显低于含麻纤维和麦草但不含石灰的试块的平衡湿容量。

### 3 结论

(1) 本文首次通过实验研究测试了地仗层仿真试块的等温吸湿曲线，结果表明它们可以作为地仗层热湿传递基础数据，从而分析热湿耦合作用下壁体内的热湿迁移过程，平衡含湿量曲线函数

关系式对窟内热湿环境研究也具有参考价值。

(2)本文首次实验验证了敦煌莫高窟地仗层试块的平衡含湿量与相对湿度的关系符合方程(2)式的形式,拟合相关率均大于99%。

(3)实验数据表明,在等温条件下莫高窟地仗层仿真试块的平衡含湿量随相对湿度变化呈幂指数变化。在相对湿度较低的区域,试块的质量变化较平缓,而在相对湿度较高的区域,试块的质量变化较明显。这表明在高湿的条件下,地仗层更容易吸湿,不利于壁画的保护。

(4)比较图2—图4可知,在相同的环境条件下三类试块等温吸湿曲线相似,但是含麻纤维和麦草的试块的平衡湿容量明显高于加棉纤维的试块的平衡湿容量,而含麻纤维、麦草且含石灰的的试块的平衡湿容量明显低于含麻纤维和麦草但不含石灰的试块的平衡湿容量。这表明含有麦草和麻纤维的地仗层对洞窟内热湿环境具有较强的吸湿能力,增加石灰可以降低地仗层的吸湿性能。该研究结果对于揭示莫高窟洞窟内的热湿环境奠定了实验基础。

(5)根据文献<sup>[11]</sup>和实验结果比较可知地仗层平衡湿容量明显低于夯土墙,在低湿区表现尤为明显,说明通过人工加筋改良,莫高窟墙体地仗层具有更强的稳定性,更有利于壁画的保护。

## 参考文献 References

- [1] 樊锦诗. 敦煌莫高窟的保护与管理[J]. 敦煌研究, 2000(1): 1-4.  
FAN Jinshi. The protection and management of Dunhuang Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2000 (1): 1-4.
- [2] 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 Qingqing, CHEN Zaikang. 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.
- [3] ISO. Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of hygroscopic sorption

- properties:ISO 12571:2013(E)[S]. Switzerland, ISO International Organization for Standardization, 2013.
- [4] Standard test methods for water vapor transmission of materials: ASTM E96/E96M-16 [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.
- [5] GREENSPAN L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions[J]. Journal of Research National Bureau of Standards, 1997, 81A(1): 89-96.
- [6] 裴清清. 建筑围护结构动态吸放湿特性辨识方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 1998.  
PEI Qingqing. A study of identification method of dynamic moisture absorption and desorption characteristics of building envelope. [D]. Changsha: Hunan University, 1998.
- [7] 张明泉,张虎元,曾正中. 莫高窟地仗物质成分及微结构特征[J]. 敦煌研究, 1995 (3): 23-28.  
ZHANG Mingquan, ZHANG Huyuan, ZENG Zhengzhong. The material composition and microstructure characteristics in mural plaster of the Mogao Grottoes [J]. Dunhuang Research, 1995 (3): 23-28.
- [8] 雷柯夫 A. B. 建筑热物理理论基础[M]. 任兴季, 张志清, 译. 北京: 科学出版社, 1965.  
LUIOV A. B. Theoretical basis of building thermophysics[M]. REN Xingji, ZHANG Zhiqing, Translated. Beijing: Science Press, 1965.
- [9] PELEG M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms[J]. Journal of Food Process Engineering, 1993, 16(1): 21-27.
- [10] TYE R P. Relevant moisture properties of building construction materials, manual on moisture control in buildings[M]. Philadelphia: America Society for Testing and Materials Publication, 1994: 35-53.
- [11] 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), 2004, 35(4): 347-349, 353.  
YAN Zengfeng, LIU Jiaping, WANG Runshan. Experimental study of moisture absorption isotherms of adobe building materials[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2004, 35(4): 347-349, 353.

(编辑 沈波)