

文章编号:1007-9629(2021)02-0313-06

## 改性材料对生土砌块湿热性能的影响

杨 永<sup>1</sup>, 张 楠<sup>2</sup>, 张 磊<sup>1,3</sup>, 荣 辉<sup>1</sup>, 魏成娟<sup>4</sup>

(1. 天津城建大学 材料科学与工程学院, 天津 300384; 2. 承德石油高等专科学校, 河北 承德 067000;  
3. 天津城建大学 天津市建筑绿色功能材料重点实验室, 天津 300384;  
4. 天津市建筑科学研究院有限公司, 天津 300193)

**摘要:** 采用动态试验法和稳态平板法,研究了改性材料对生土砌块吸湿性能和导热系数的影响。结果表明:生土砌块的初始吸湿率、平衡含湿量和 60 h 吸湿率均随着相对湿度的增加而增加;当相对湿度为 40% 和 60% 时,复合改性生土砌块的平衡含湿量均大于石灰改性和水泥改性生土砌块;生土砌块的导热系数随着平衡含湿量的增加而增加;石灰改性和复合改性生土砌块的平衡含湿量、导热系数和干密度随着石灰掺量和纤维掺量的增加而降低;水泥改性生土砌块平衡含湿量随着水泥掺量的增加而降低,与导热系数和干密度的变化趋势相反。

**关键词:** 生土砌块; 改性; 吸湿率; 导热系数

**中图分类号:** TU502

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.012

## Influence of Modified Materials on Hygrothermal Properties of Raw Soil Block

YANG Yong<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>1,3</sup>, RONG Hui<sup>1</sup>, WEI Chengjuan<sup>4</sup>

(1. School of Materials and Engineering, Tianjin Chenjian University, Tianjin 300384, China; 2. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Building Green Functional Materials, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 4. Tianjin Research Institute of Building Science Co., Ltd., Tianjin 300193, China)

**Abstract:** The influence of modified materials on the moisture absorption and thermal conductivity of raw soil blocks was studied by dynamic test and steady-state flat plate method. The results show that the initial moisture absorption ratio, equilibrium moisture content and 60 h moisture absorption ratio increases with the increase of relative humidity. When the relative humidity is 40% and 60%, the equilibrium moisture content of composite modified raw soil block is greater than that of lime and cement modified raw soil blocks. The thermal conductivity of raw soil block increases with the increase of equilibrium moisture content. The equilibrium moisture content, thermal conductivity and dry density of lime modified and composite modified raw soil block increase with the increase of lime content and fiber content. The equilibrium moisture content of cement modified raw soil block decreases with the increase of cement content, which is opposite to the change trend of thermal conductivity and dry density.

**Key words:** raw soil block; modification; moisture absorption rate; thermal conductivity

生土材料是一种具有悠久历史的古老建材,因其具有明显的生态优势,吸放湿性能,以及可调节室内温度<sup>[1]</sup>等优点而被广泛应用,生土建筑在世界文

明发展的历程中做出了重要的贡献<sup>[2]</sup>. 尤其在人们普遍关注能源危机、零排放的今天,有良好保温隔热性能的生土材料具有广阔的发展前景<sup>[3]</sup>. 然而,传统

收稿日期:2019-10-23; 修订日期:2019-12-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1101002)

第一作者:杨 永(1975—),男,河北唐山人,天津城建大学讲师,硕士. E-mail: yangyong0381@126.com

通讯作者:张 磊(1979—),男,河南驻马店人,天津城建大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: zhanglei@tcu.edu.cn

生土材料强度低、变形大、耐水性差,致使生土建筑在耐水性、体积稳定性等方面不尽如人意<sup>[4]</sup>. 因此生土材料的改性已成为研究热点.

刘军等<sup>[5-6]</sup>研究了矿渣、粉煤灰、水泥等掺和料单掺与复掺对生土墙体材料力学性能的影响,结果表明单掺水泥对生土墙体材料力学性能改性效果较好,复掺掺和料的生土墙体材料与单掺时相比,其抗压强度、抗折强度、抗剪强度和收缩变形值均增加. 张波<sup>[7]</sup>研究发现淀粉也可用于生土改性,生土强度有一定的提高. Achenza 等<sup>[8]</sup>采用植物纤维与天然高分子化合物复掺改性生土材料,结果表明天然高分子化合物可改变生土的孔隙率与密度,复掺植物纤维和天然高分子化合物能有效改善生土材料的力学性能并使生土材料的耐水性有较大的提高. Ciancio 等<sup>[9-10]</sup>分别研究了石灰和水泥改性对生土材料微观结构、力学性能和耐水性的影响. 刘俊霞等<sup>[11]</sup>研究了不同改性材料对生土材料水分传输特性的影响,结果表明水泥的掺入改变了黄土颗粒表面状态和生土材料的孔结构,水泥改性生土材料的毛细吸收系数和初始吸水速率较未改性生土材料分别降低了 19.8% 和 25.3%.

上述研究表明,通过物理或化学方法改性可以改善生土材料的力学性能和耐水性,改变其水分传输特性,而在改性材料对生土导湿和导热性能影响方面的研究尚不够全面充分. 本文使用水泥、石灰、改性纤维对生土材料进行改性处理,研究生土砌块在不同湿度条件下的湿热性能,讨论了不同的改性

材料对其湿热性能的影响.

## 1 试验

### 1.1 原材料

生土采用陕西省北部榆林市绥德县黄土,其化学组成<sup>1)</sup>见表 1, XRD 图谱见图 1; 水泥选用天津冀东水泥有限公司生产的 P · O 42.5 级普通硅酸盐水泥,其技术性能指标见表 2; 石灰采用工业级生石灰,有效 CaO 含量为 56%; 植物纤维采用稻草秸秆纤维,先用铡草机铡成 2~3 cm,再用球磨机粉磨 15 min,长径比为 6 : 1; 砂为市售河砂,细度模量为 2.6.

表 1 生土的化学组成  
Table 1 Chemical composition of raw soil

							w/%
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
50.29	12.11	9.80	4.17	2.70	2.46	1.69	15.24

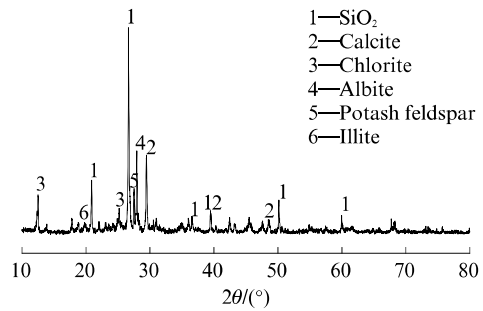


图 1 生土的 XRD 图谱  
Fig. 1 XRD pattern of raw soil

表 2 水泥技术性能指标  
Table 2 Cement technical specifications

Standard consistency water consumption (by mass)/%	Density/(g · cm <sup>-3</sup> )	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa		Specific surface area/(m <sup>2</sup> · kg <sup>-1</sup> )
		Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d	
28	3.08	170	225	25.9	48.6	5.1	8.5	365

### 1.2 生土砌块的制备

生土砌块采用压制成型工艺,尺寸为 200 mm × 200 mm × 5 mm,配合比见表 3,水固比为 0.12. 首先加入适当水将原状黄土陈化处理,实现胶结黏粒与砾石或砂砾均匀混合,降低生土的粒度. 取陈化好的黄土,按照表 3 所示配合比(加水量应除去陈化用水)加入其他材料,搅拌均匀后置于成型模具中,使用压力机匀速加压至 8 MPa,保压 4 s 后卸载脱模. 单掺水泥的生土砌块 Y-1~Y-5(对照试件 Y-0)采

用密封膜密封后进行标准养护;单掺石灰的生土砌块 Y-7~Y-9(对照试件 Y-6)采用密封膜密封养护;复掺水泥、石灰、纤维的生土砌块 Y-11~Y-13(对照试件 Y-10)采用喷水结合密封膜密封养护. 所有试件均养护至测试龄期.

### 1.3 生土砌块性能测试方法

湿热性能:采用动态试验法测定试件吸湿率,利用恒温恒湿试验箱制造稳定的恒温恒湿条件,箱体内的相对湿度通过通风换气进行控制. 温度恒定为

1)文中涉及的组成、水固比等均为质量分数或质量比.

表 3 生土砌块的配合比					
Table 3 Mix proportion of raw soil blocks					
w/%					
Specimen	Raw soil	Sand	Cement	Lime	Fiber
Y-0	100	0	0	0	0
Y-1	85	10	5	0	0
Y-2	75	20	5	0	0
Y-3	65	30	5	0	0
Y-4	60	30	10	0	0
Y-5	55	30	15	0	0
Y-6	70	30	0	0	0
Y-7	65	30	0	5	0
Y-8	60	30	0	10	0
Y-9	55	30	0	15	0
Y-10	55	30	10	5	0
Y-11	55	30	10	5	0.5
Y-12	55	30	10	5	1.0
Y-13	55	30	10	5	1.5

(25±1)℃,相对湿度 RH 设为 40%、60%、80%、98%。

利用热流法导热仪,采用稳态平板法测定试件的导热系数( $\lambda$ )。

利用氮吸附测试不同试件的毛细孔容积。

按照 GB/T 11969—2008《蒸压加气混凝土性能试验方法》测定试件的干密度。

使用 JSM-7800F 型场发射扫描电子显微镜对

试件进行微观分析。

2 结果与分析

2.1 生土砌块吸湿性能分析

2.1.1 不同相对湿度下生土砌块吸湿率与平衡含湿量

图 2 为生土砌块在不同相对湿度下的吸湿率。由于试验中 Y-0、Y-1、Y-2、Y-6 在相对湿度为 98% 的条件下进行性能测试时试块溃散,无法得到相应结果,其在相对湿度为 40%、60%、80% 状态下则未进行测试。当时间  $t=0$  时,测量不同相对湿度下的生土砌块吸湿率为初始吸湿率,当生土砌块内部的湿度与环境湿度达到平衡时,测得其平衡含湿量。由图 2 可以看出:生土砌块的初始吸湿率和平衡含湿量随着相对湿度的增加而增加;在相对湿度为 40% 和 60% 时,复合改性生土砌块的平衡含湿量均大于石灰改性和水泥改性生土砌块。由于水泥的掺入,黄土颗粒周围包裹大量的水泥水化产物,使黄土颗粒的吸湿性显著降低,故水泥改性生土砌块的平衡含湿量随着水泥掺量的增加而降低。同时,由于生土砌块在压制成型过程中加水量较低,当生土砌块处于较高的环境湿度条件下时,水泥会吸收水分继续水化,因此随着水泥掺量的增加,生土砌块的平衡含湿量有小幅增加。复合改性生土砌块的吸湿率随着稻

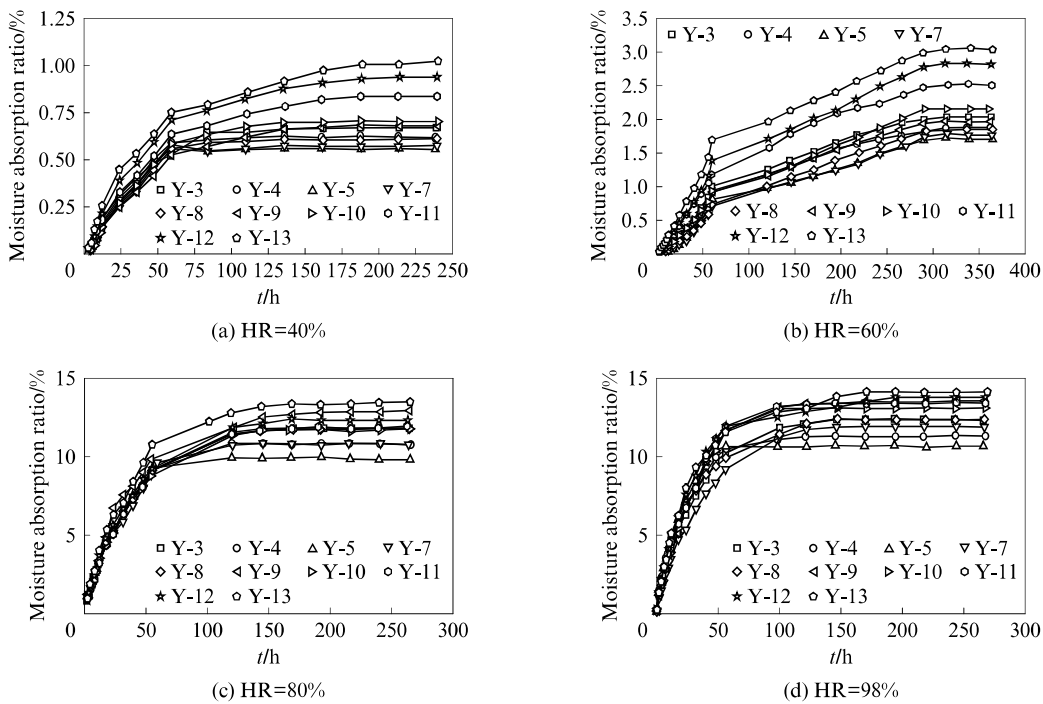


图 2 生土砌块在不同相对湿度下的吸湿率

Fig. 2 Moisture absorption ratio of raw soil blocks at different relative humidities

草纤维掺量的提高而增加,这是由于稻草纤维自身的吸湿性和导管传输作用及其与生土砌块基体的截面影响所致。

由图 2 还可知:当相对湿度为 40%时,生土砌块前 60 h 内吸湿率较低,各试件 60 h 吸湿率的平均值约为 55%,60 h 以后吸湿率平稳上升,125 h 后生土砌块的吸湿率基本不变,即 125 h 时达到吸湿平衡;当相对湿度为 60%时,各生土砌块在 300 h 时达到吸湿平衡,各试件 60 h 吸湿率的平均值约为 86%;当相对湿度为 80%时,各生土砌块在 120 h 时达到吸湿平衡,各试件 60 h 吸湿率的平均值约为 91%;当相对湿度为 98%时,吸湿速率快的试件在 60 h 以前就达到吸湿平衡,各试件 60 h 吸湿率的平均值约为 95%。

不同相对湿度下,对比同系列试件平衡含湿量可以发现,试件的平衡含湿量随着相对湿度的增加而增大。以复掺 1.5%纤维的改性试件 Y-13 为例:在相对湿度为 40%时,试件 Y-13 的平衡含湿量为 1.02%,在相对湿度为 80%时,试件 Y-13 的平衡含湿量增大至 13.42%,且当试件 Y-13 相对湿度为 98%时,达到平衡含湿量的时间较相对湿度为 60%时缩短了 160 h。

### 2.1.2 毛细孔含量对试样吸湿速率的影响

图 3 为生土砌块中小于 70 nm 的毛细孔容积。从图 3 看出:复合改性生土砌块的累积孔容积最高,其次为水泥改性生土砌块,最低为石灰改性生土砌块及其对照试件。分析复合改性生土砌块的毛细孔容积最高的原因:一是稻草秸秆纤维自身的孔隙性;二是水泥、石灰发生水化反应,生成水化硅酸钙凝

胶,细化了生土砌块的孔结构;三是水泥水化反应生成的凝胶具有凝胶孔,体积一般为水化硅酸钙凝胶体积的 28%左右,其尺寸大小为 0.5~10.0 nm,因此生土砌块的毛细孔容积随着水泥掺量的增加而增加。

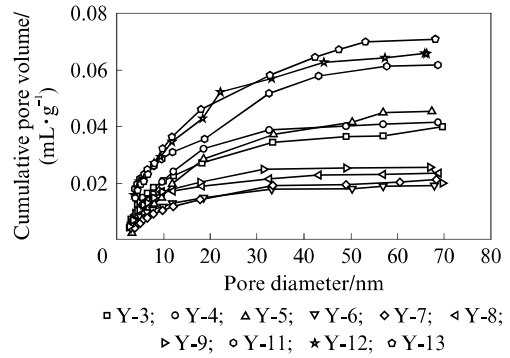


图 3 生土砌块中小于 70 nm 的毛细孔容积  
Fig. 3 Cumulative pore volume below 70 nm of raw soil blocks

### 2.2 生土砌块导热性能分析

表 4 为生土砌块导热系数( $\lambda$ )和干密度的测试结果。由于试验中 Y-0、Y-1、Y-2、Y-6 在相对湿度为 98%的条件下进行性能测试时试块溃散,无法得到相应结果,其在相对湿度为 40%、60%、80%状态下则未进行测试。图 4 为改性生土砌块的 SEM 图。由表 4 可见,水泥改性生土砌块的导热系数随水泥掺量增加而提高,当水泥掺量为 15%时,试件 Y-5 在干燥状态下的导热系数为 0.478 W/(m·K),较试件 Y-0 提高了 10.9%。这主要是因为干燥状态下水泥水化生成的水化产物填充在黄土颗粒之间,如图 4(a)所示,生土砌块的累计孔容积降低,从而导致其导热系数增大。

表 4 生土砌块导热系数和干密度  
Table 4 Thermal conductivity and dry density of raw soil blocks

Specimen	$\lambda$ /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )					Dry density/(kg·m <sup>-3</sup> )
	RH=0%	RH=40%	RH=60%	RH=80%	RH=98%	
Y-0	0.431					1.825
Y-1	0.437					1.876
Y-2	0.441					1.926
Y-3	0.457	0.473	0.649	0.908	0.915	2.026
Y-4	0.463	0.486	0.597	0.868	0.875	2.049
Y-5	0.478	0.491	0.583	0.814	0.829	2.074
Y-6	0.448					1.923
Y-7	0.439	0.458	0.606	0.855	0.872	1.875
Y-8	0.433	0.467	0.628	0.891	0.902	1.863
Y-9	0.428	0.469	0.656	0.918	0.924	1.828
Y-10	0.459	0.483	0.657	0.902	0.919	1.938
Y-11	0.443	0.473	0.663	0.918	0.932	1.888
Y-12	0.428	0.462	0.682	0.927	0.946	1.863
Y-13	0.399	0.455	0.698	0.958	0.967	1.831

掺入石灰后,因生成晶粒粗大的氢氧化钙(CH)而使生土砌块的密实度降低,如图4(b)所示,因此生土砌块导热系数下降,且石灰改性生土砌块的导热系数随石灰掺量增加而降低,当石灰掺量为15%时,试件Y-9在干燥状态下的导热系数为 $0.428\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,较同条件不掺石灰试件Y-6降低了4.5%。

复合改性生土砌块的导热系数随纤维掺量增加而降低,当纤维掺量为1.5%时,试件Y-13在干燥状态下的导热系数为 $0.399\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,较同条件不掺纤维试件Y-10降低了13.1%。这是因为纤维自身的多孔结构可提高生土砌块的累计孔容积,如图4(c)所示,从而降低了生土砌块的导热系数。

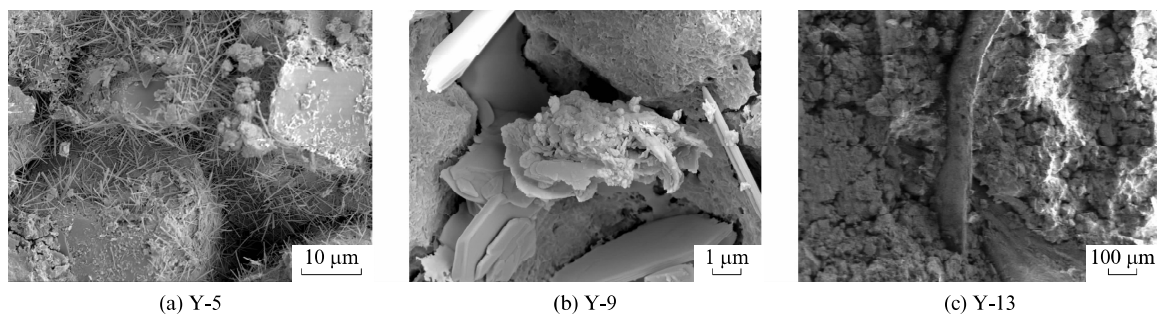


图4 改性生土砌块的SEM图  
Fig. 4 SEM micrographs of modified raw soil blocks

复合改性生土砌块的导热系数随着相对湿度的增大而增大,这主要是由于水的导热系数明显高于空气所致。当相对湿度由40%增加到60%时,达到吸湿平衡时生土砌块的导热系数增加速率最大;这是由于在完全干燥状态下,生土砌块内部热量传递主要是靠颗粒之间的热传导;当黄土颗粒吸收了水分后,水分子呈膜状附着在细小颗粒上,相应地增大了黄土颗粒之间的接触面积,热传导随之加快;平衡含湿量小于1%时,导热系数随平衡含湿量增加的变化不是很显著,当黄土颗粒表面吸附足够的水分时生土砌块的导热系数迅速增加。随着相对湿度的增加,生土砌块的平衡含湿量提高,材料内部的热传递主要通过水分的热对流进行,因此,随着相对湿度的增加,导热系数增幅降低并逐步趋于稳定。

### 3 结论

(1)生土砌块的初始吸湿率、平衡含湿量和60 h吸湿率随着相对湿度的增加而增加;当相对湿度为40%和60%时,复合改性生土砌块平衡含湿量大于石灰改性和水泥改性生土砌块;随着相对湿度的增加,同系列生土砌块的平衡含湿量增大。

(2)复合改性生土砌块的70 nm以下毛细孔容积最高,其次为水泥改性生土砌块,最低为石灰改性生土砌块。

(3)水泥改性生土砌块的导热系数随水泥掺量增加而增大,石灰改性和复合改性生土砌块的导热系数分别随着石灰和稻草秸秆纤维掺量的增加而降低,生土砌块的干密度和导热系数变化趋势基本相

同;生土砌块的导热系数随着相对湿度的增加而增加,当相对湿度由40%增加到60%,达到吸湿平衡时生土砌块的导热系数增加速率最大。

### 参考文献:

- [1] 阿肯江·托呼提,阿里木江·马克苏提,王墩.生土坯建筑抗震加固研究综述[J].新疆大学学报(自然科学版),2008,25(2):142-149,253.  
AKENJIANG Tokhuti, ALIMUJIANG Maksuti, WANG Dun. Review of researches on the seismic strengthening for adobe buildings [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2008, 25(2): 142-149, 253. (in Chinese)
- [2] 张波,王赞.汉中农村民居典型夯土墙营造技术解析及改进[J].安徽农业科学,2010,38(8):4327-4329,4383.  
ZHANG Bo, WANG Yun. Construction technique analysis and improvement of rammed earth wall of rural houses in Hanzhong [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(8): 4327-4329, 4383. (in Chinese)
- [3] MOREL J C, MESBAH A, OGGERO M, et al. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction [J]. Building and Environment, 2001, 36(10): 1119-1126.
- [4] 王捷,王逢睿,何真,等.基于生土材料微观结构性能的加固关键技术研究[J].新型建筑材料,2017,44(3):118-123.  
WANG Jie, WANG Fengrui, HE Zhen, et al. Research on key techniques of reinforcing microscopic structure and property based on raw soil [J]. New Building Materials, 2017, 44(3): 118-123. (in Chinese)
- [5] 刘军,袁大鹏,周红红,等.狗尾草对加筋土坯力学性能的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(4):720-723,733.

(下转第361页)