

生土基改性建筑材料的综合力-热-湿性能研究

张雪武, 方从严, 连 芸

(芜湖职业技术学院建筑工程学院, 安徽 芜湖 241001)

摘要:以生土建筑材料作为研究对象, 利用水泥、石灰、矿渣、粉煤灰和石膏对生土建筑材料进行改性, 研究生土基改性建筑材料的力学性能、热性能和湿性能, 建立生土基改性建筑材料的综合力-热-湿性能评价体系。结果表明, 在最优含水率 13% 下, 生土基改性建筑材料的力学性能大幅提高, 石膏/生土建筑材料具有较好的保温性能, 粉煤灰/生土建筑材料具有较好的湿性能, 水泥/生土建筑材料具有最好的综合力-热-湿性能。

关键词:生土建筑材料; 改性; 综合力-热-湿性能; 评价体系

中图分类号: TU502

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0087-05

Study on comprehensive force-thermal-humidity performance of raw soil-based modified building materials

ZHANG Xuewu, FANG Congyan, LIAN Yun

(Construction Engineering College, Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241001, China)

Abstract: With raw soil building materials as the research object. Soil building materials were modified by cement, lime, gypsum, fly ash and slag, were studied on mechanical property, humidity property and thermal property of raw soil-based modified building materials to establish the comprehensive force-thermal-humidity performance evaluation system. Results showed that while optimum moisture content is 13%, mechanical property of raw soil-based modified building materials increased efficiently. Gypsum/raw soil building materials have good thermal insulation property, fly ash/raw soil building materials have good humidity property; and cement/raw soil building materials have the best comprehensive force-thermal-humidity performance.

Key words: raw soil building materials; modified; comprehensive force-thermal-humidity performance; evaluation system

生土建筑具有便于自建、就地取材、技术简单、建筑内部热环境适宜居住, 保温隔热、节约资源, 材料能循环使用, 是一种绿色的、可持续的建筑模式^[1-3]。在我国对于生土建筑的认识已经具有 7 000 多年的历史, 其研究成果丰富^[4-5]; 但是由于 20 世纪 50 年代, 欧洲国家对生土建筑材料的限制使用, 导致其相关研究一度消失^[6-7], 目前随着低碳经济成为建筑材料可持续发展的主题, 具有无毒、取材方便、加工简单、可回收利用等优点的生土建筑材料被重新关注^[8]。由于生土建筑材料的力学性能相对于胶凝材料的力学性能较低, 影响其在现代建筑领域应用^[9-11], 所以相关学者关注利用胶凝材料或碱激发材料对生土建筑材料进行改性, 研究生土基改性建筑材料, 以达到提高

其力学性能的目的^[12-13]。然而现代建筑不仅要求建筑材料具有优良的力学性能, 而且要求建筑材料具有良好的热性能与湿性能, 以满足绿色建筑的原则, 所以关注生土基改性建筑材料的力学性能, 而忽视其热性能与湿性能, 极大的限制了生土建筑材料的进一步发展与应用。如何分析生土基改性建筑材料的力学性能、热性能与湿性能, 建立生土基改性建筑材料的综合力-热-湿性能评价体系, 是本研究的目的。

本研究以生土建筑材料作为研究对象, 利用胶凝材料, 即水泥、石灰、矿渣和石膏, 以及碱激发材料粉煤灰对其进行改性, 制备水泥/生土建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料。

收稿日期: 2016-08-26

修改稿日期: 2016-12-29

基金项目: 安徽省高等职业教育创新发展行动计划基金资助(2015—2018 年); 基于校企共建的结构检测与实验生产性实训基地建设基金资助(XM-2); 安徽省教育厅专项基金资助项目(2014tszy041, 2014sjjd035; 2013jyxm316)

作者简介: 张雪武(1968—), 女, 工学硕士, 副教授, 高级工程师, 主要从事建筑材料性能研究。E-mail: zhuxuewu@163.com

分析各种生土基改性建筑材料的力学性能、热性能和湿性能,建立综合力-热-湿性能评价体系,为进一步发展生土基建筑材料提供一定的理论基础和技术支持。

1 实验

1.1 材料

生土(粉土,新疆维吾尔自治区),水泥(42.5级普通硅酸盐水泥,安徽海螺水泥股份有限公司),石灰粉(活性为78%,南京溧水长乐铝业化工有限公司),渣粉(超细矿渣粉,南京柏阳化工有限公司),石膏(建筑石膏,江苏徐州苏新建材有限公司),粉煤灰(Ⅱ级,南京化电粉煤灰有限公司)。

1.2 实验仪器

AUW120D型精密电子天平(精度0.000 01 g,日本岛津公司),CENTER304/309型热电偶(台湾群特公司),101-2AB型电热鼓风干燥箱(天津泰斯特仪器有限公司),YAW-2000型全自动压力试验机(邦亿精密量仪(上海)有限公司),JTRG-III型建筑材料热流计式导热仪(北京世纪建通技术开发有限责任公司),DVS Intrinsic型动态水分吸附分析仪(英国SMS公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 制备方法

①将生土过筛后,置于101-2AB型电热鼓风干燥箱中烘干处理,依据前期大量试验基础上^[14-15],在力学性能方面获得水泥、石灰粉、渣粉、石膏和粉煤灰对生土改性的最优掺量,按质量分数为5%的水泥、8%的石灰、12%的矿渣、12%的粉煤灰和8%的石膏分别与处理后的生土拌合均匀,获得生土基改性建筑材料,即水泥/生土建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料。②将水泥/生土建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料分别以不同含水率,即8%、10%、13%、16%、18%,在一定压实能量下,压制成型。

1.3.2 性能测试

力学性能测试方法利用YAW-2000型全自动压力试验机对尺寸为50 mm×50 mm×50 mm的生土建筑材料和五种生土基改性建筑材料进行抗压强度的测试。其测试方法为样品放置于载物台上,利用液压施加载荷,记录样品承受的载荷,

并且除以接触面积,获得样品的抗压强度,每个样品测试3次。

热性能测试方法利用JTRG-III型建筑材料热流计式导热仪对尺寸为300 mm×300 mm×50 mm的生土建筑材料和五种生土基改性建筑材料进行导热率的测试。其测试方法为将样品表面刮平后,其表面与冷板、热板能充分接触,利用游标卡尺和四点法精确测量出样品厚度,输入厚度参数,同时根据冷板、热板的温度差,测量样品的导热率,每个样品测试3次。

湿性能测试方法利用DVS Intrinsic型动态水分吸附分析仪对尺寸为10 mm×10 mm×10 mm的生土建筑材料和五种生土基改性建筑材料进行动态水分吸附的测试。其测试方法为样品放置于载物台上,利用载气(氮气与空气)以一定相对湿度流过样品,使用高度灵敏稳定的数字微天平SMSUltraBalanceTM通过检测材料质量的增加/减少从而获得水蒸气的吸附/脱附曲线,快速测量样品中水分增加和损失,每个样品测试3次。

1.3.3 综合力-热-湿性能评价

由于生土建筑材料或生土基改性建筑材料的力学性能测试结果单位为MPa,生土建筑材料或生土基改性建筑材料的湿性能测试结果单位为%,生土建筑材料或生土基改性建筑材料的热性能测试结果单位为W/(m·K),所以生土基改性建筑材料的力学性能测试结果、湿性能测试结果和热性能测试结果不能简单地直接进行代数计算,所以需要力学性能测试结果、湿性能测试结果和热性能测试结果分别进行归一化处理后,再进行代数计算^[16]。综合力-热-湿性能按式(1)进行计算,表示生土建筑材料或生土基改性建筑材料的综合力-热-湿性能的优劣。

$$J = \alpha J_1 + \beta J_2 + \chi J_3 \quad (1)$$

式中: J 为生土建筑材料或生土基改性建筑材料的综合力-热-湿性能; J_1 为生土建筑材料或生土基改性建筑材料的力性能,即选取生土建筑材料或生土基改性建筑材料的抗压强度,经归一化处理; J_2 为生土建筑材料或生土基改性建筑材料的热性能,即考虑导热系数与热性能呈现相反的关系,所以选取生土建筑材料或生土基改性建筑材料的导热系数相反数,经归一化处理; J_3 为生土建筑材料或生土基改性建筑材料的湿性能,即考虑人体舒适相对湿度范围40%~60%,所以选取生土建筑材料或生土基改性建筑材料在相对湿度为40%、50%和60%的平均动态平衡含湿量,经归

一化处理； α 、 β 和 χ 分别为力学性能、热性能和湿性能的权重。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

由于生土建筑材料、水泥/生土建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料均在相同的压实能量下压制成型，所以其含水率的不同，必然导致密实度不同。本研究以抗压强度作为生土建筑材料或生土基改性建筑材料力学性能的主要指表，见表 1。

表 1 生土基改性建筑材料的抗压强度
Tab. 1 Compressive strength of raw soil-based modified building materials MPa

生土基改性建筑材料	含水率				
	8%	10%	13%	16%	18%
生土建筑材料	1.67	1.77	1.95	1.54	1.48
水泥/生土建筑材料	3.71	4.88	6.57	5.63	4.45
石灰/生土建筑材料	3.45	3.96	4.09	3.35	2.86
矿渣/生土建筑材料	2.33	2.75	3.41	3.03	2.62
粉煤灰/生土建筑材料	2.23	2.44	2.82	2.34	2.11
石膏/生土建筑材料	2.06	2.33	2.52	2.18	1.96

从表 1 可以看出，分别以不同含水率，即 8%、10%、13%、16%、18% 制备生土建筑材料或生土基改性建筑材料，生土基改性建筑材料的抗压强度均高于生土建筑材料。其原因为水泥/生土建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料均是由于胶凝材料的加入，提高了生土基改性建筑材料的胶凝性，导致抗压强度提高；而粉煤灰/生土建筑材料是加入碱激发材料，其含有的活性物质（如 SiO_2 、 Al_2O_3 等）水化形成硅氧四面体和铝氧四面体，并与生土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 SO_4^{2-} 生成钙矾石，形成网状骨架结构，同时粉煤灰的漂珠效应提高了其在生土分散性和充填性，从而提高了抗压强度。进一步分析表 1 还可以看出，生土基改性建筑材料的最优含水率与生土建筑材料的最优含水率基本一致，即含水率 13%，说明生土中少量掺杂水泥、石灰、矿渣、粉煤灰或石膏，对生土基改性建筑材料的最优含水率影响较小。在最优含水率 13% 的条件下，五种生土基改性建筑材料的抗压强度顺序为水泥/生土建筑材料 > 石灰/生土建筑材料 > 矿渣/生土建筑材料 > 粉煤灰/生土建筑材料 > 石膏/生土建筑材料，说明水泥/生土建筑材料的力学性能最好。

2.2 热性能

根据上述力学性能测试结果，以最优含水率 13% 制备土建筑材料或生土基改性建筑材料，本研究以导热率的相反数作为生土建筑材料或生土基改性建筑材料热性能的主要指表，见表 2。

表 2 生土基改性建筑材料的导热率
Tab. 2 Thermal conductivity of raw soil-based modified building materials $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

生土基改性建筑材料	导热率
生土建筑材料	0.163
水泥/生土建筑材料	0.191
石灰/生土建筑材料	0.210
矿渣/生土建筑材料	0.182
粉煤灰/生土建筑材料	0.186
石膏/生土建筑材料	0.172

从表 2 可以看出，生土建筑材料的导热率最小，仅为 $0.165 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，说明生土建筑材料的导热性能较差、保温性能较好。而水泥/生土建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料的导热率均大于生土建筑材料的导热率，说明水泥、石灰、矿渣、粉煤灰和石膏的加入，虽然提高了生土建筑材料的力学性能，但是破坏了生土材料多孔结构，导致保温性能降低。在最优含水率 13% 的条件下，五种生土基改性建筑材料的导热率顺序为石灰/生土建筑材料 > 水泥/生土建筑材料 > 粉煤灰/生土建筑材料 > 矿渣/生土建筑材料 > 石膏/生土建筑材料，其中石膏/生土建筑材料的导热率较小，这是因为石膏是无机多孔材料，其具有较为丰富的孔结构，保温性能较好。

2.3 湿性能

根据上述力学性能测试结果，以最优含水率 13% 制备土建筑材料或生土基改性建筑材料，本研究以动态平衡含湿量作为生土建筑材料或生土基改性建筑材料湿性能的主要指表，见表 3，其中 Ab 为吸湿过程、De 为放湿过程。

从表 3 可以看出，在不同的相对湿度（即 40%、50% 和 60%）下，生土建筑材料的动态平衡含湿量远远大于水泥/生土建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料的动态平衡含湿量，从而进一步说明水泥、石灰、矿渣、粉煤灰和石膏的加入，破坏了生土材料多孔结构，使其湿性能大幅降低。在最优含水率 13% 的条件下，五种生土基改性建筑材料的动态平衡含湿量顺序为粉

煤灰/生土建筑材料>石灰/生土建筑材料>水泥/生土建筑材料>石膏/生土建筑材料>矿渣/生土建筑材料,其中粉煤灰/生土建筑材料的动态平衡含湿量较高,这是因为粉煤灰是碱激发材料,与生土形成的网状骨架结构,其湿性能强于胶凝材料形成的结构。

2.4 综合力-热-湿性能

根据表 1、表 2 和表 3 可以看出,水泥/生土

建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料对比于生土建筑材料,其力学性能、热性能和湿性能均发生较大变化。为了获得综合力-热-湿性能较好的生土基改性建筑材料,依据 1.3.3 综合力-热-湿性能评价,其中 α 、 β 和 χ 均为 1 进行计算,具体计算结果见表 4。

表 3 生土基改性建筑材料的动态平衡含湿量

Tab. 3 Dynamic equilibrium moisture content of raw soil-based modified building materials

相对湿度 /%	生土基改性建筑材料											
	生土建筑材料		水泥/生土建筑材料		石灰/生土建筑材料		矿渣/生土建筑材料		粉煤灰/生土建筑材料		石膏/生土建筑材料	
	Ab	De	Ab	De	Ab	De	Ab	De	Ab	De	Ab	De
40	4.022	4.043	2.479	2.509	2.637	2.688	2.372	2.372	2.766	2.829	2.394	2.454
50	4.463	4.547	2.774	2.825	3.059	3.12	2.663	2.804	3.214	3.297	2.697	2.808
60	4.736	4.809	2.958	3.029	3.172	3.255	2.794	2.844	3.453	3.422	2.889	2.939

表 4 生土基改性建筑材料的综合力-热-湿性能

Tab. 4 Comprehensive force-thermal-humidity performance of raw soil-based modified building materials

生土基改性建筑材料	力学性能		热性能		湿性能		综合性能	
	抗压强度 /MPa	J_1	导热率 / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	J_2	动态平衡含湿量 /%	J_3	J	
生土建筑材料	1.95	0.297	0.163	-0.776	4.407	4.466	1.000	0.521
水泥/生土建筑材料	6.57	1.000	0.191	-0.910	2.737	2.788	0.623	0.713
石灰/生土建筑材料	4.09	0.623	0.210	-1.000	2.956	3.021	0.674	0.296
矿渣/生土建筑材料	3.41	0.519	0.182	-0.867	2.610	2.673	0.595	0.248
粉煤灰/生土建筑材料	2.82	0.429	0.186	-0.886	3.144	3.182	0.713	0.256
石膏/生土建筑材料	2.52	0.384	0.172	-0.819	2.660	2.734	0.608	0.172

从表 4 可以看出,在最优含水率 13%、相对湿度 40%~60%、 α 、 β 和 χ 均为 1 的条件下,水泥/生土建筑材料具有较好的综合力-热-湿性能,即 $J=0.713$,远高于生土建筑材料的综合力-热-湿性能,而石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料的综合力-热-湿性能远低于生土建筑材料的综合力-热-湿性能。

3 结论

以生土建筑材料作为研究对象,利用水泥、石灰、矿渣、粉煤灰和石膏对其进行改性,制备水泥/生土建筑材料、石灰/生土建筑材料、矿渣/生土建筑材料、粉煤灰/生土建筑材料和石膏/生土建筑材料,并对生土基改性建筑材料的力学性能、热性能和湿性能进行分析,建立其综合力-热-湿性能评价体系,可以得到以下结论:

(1)在最优含水率 13%的条件下,五种生土基改性建筑材料的抗压强度顺序为水泥/生土建筑材料>石灰/生土建筑材料>矿渣/生土建筑材料>粉煤灰/生土建筑材料>石膏/生土建筑材料,说明水泥/生土建筑材料的力学性能最好。

(2)在最优含水率 13%的条件下,五种生土基改性建筑材料的导热率顺序为石灰/生土建筑材料>水泥/生土建筑材料>粉煤灰/生土建筑材料>矿渣/生土建筑材料>石膏/生土建筑材料,其中石膏/生土建筑材料的导热率较小。

(3)在最优含水率 13%的条件下,五种生土基改性建筑材料的动态平衡含湿量顺序为粉煤灰/生土建筑材料>石灰/生土建筑材料>水泥/生土建筑材料>石膏/生土建筑材料>矿渣/生土建筑材料,其中粉煤灰/生土建筑材料的动态平衡含湿量较高。

(4)水泥/生土建筑材料具有最好的综合性能,

其不仅具有良好力学性能,而且具有一定的保温性能和调节相对湿度性能。

参考文献 References

- [1] 王毅红,梁健,张项英,等.我国生土结构研究综述[J].土木工程学报,2015,48(5):98-106.
WANG Yihong, LIANG Jian, ZHANG Xiangying, et al. Review of raw-soil structure in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(5): 98-106.
- [2] 阿肯江·托呼提,沙吾列提·拜开依,曹耿.土坯砌体单轴受压本构模型研究[J].工程力学,2012,29(12):295-315.
TUOHUTI Akenjiang, BEKEY Sawulet, CAO Geng. Study on uniaxial compression constitutive models of adobe masonry[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 295-315.
- [3] 尚建丽,刘加平,赵西平.低能耗夯实粗粒土建筑特性的试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2003,35(4):325-328.
SHANG Jianli, LIU Jiaping, ZHAO Xiping. Test study on construction performance of energy saving material[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2003, 35(4): 325-328.
- [4] 王军,吕东军.走向生土建筑的未来[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2001,33(2):147-151.
WANG Jun, LÜ Dongjun. To the future of the immature soil buildings[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., (Natural Science Edition), 2001, 33(2): 147-151.
- [5] 阿肯江·托呼提,沙吾列提·拜开依,曹耿,等.土坯砌体抗压强度试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(3):290-295.
TUOHUTI Akenjiang, BEKEY Sawulet, CAO Geng, et al. Experimental study on compressive strength adobe masonry[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(3): 290-295.
- [6] 刘俊霞,张磊,杨久俊.生土材料国内外研究进展[J].材料导报,2012,26(12):14-17.
LIU Junxia, ZHANG Lei, YANG Jiujun. International advances in raw soil materials[J]. Materials Review, 2012, 26(12): 14-17.
- [7] JAYASINGHE C, KAMALADASA N. Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls[J]. Construction and Building Materials, 2007(21): 1971-1976.
- [8] BURROUGHS S. Soil property criteria for rammed earth stabilization[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 20(3): 264-273.
- [9] 黄金胜,陶忠,陆琨.云南生土结构土坯砌体的力学性能试验研究[J].昆明理工大学学报,2008,33(1):60-64.
HUANG Jinsheng, TAO Zhong, LU Kun. Experiment on mechanical properties of adobe masonry of earth architecture in Yunnan province[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2008, 33(1): 60-64.
- [10] DEĞIRMENCI N. The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization[J]. Construction and Building Materials, 2008(22): 1220-1224.
- [11] 黄金胜,陶忠,陆琨,等.云南农村居民生土建筑土坯砌体的力学性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2008,30(1):94-98.
HUANG Jinsheng, TAO Zhong, LU Kun, et al. Experiment on mechanics characteristics of adobe masonry of rural houses in Yunnan province[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(1): 94-98.
- [12] ACHENZA M, FENU L. On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction[J]. Materials and Structures, 2006, 39(1): 21-27.
- [13] 王毅红,王春英,李先顺,等.生土结构的土料受压及受剪性能试验研究[J].西安科技大学学报,2006,26(4):469-473.
WANG Yihong, WANG Chunying, LI Xianshun, et al. Experiment on shear properties and compressive properties of earth material of raw-soil structure[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2006, 26(4): 469-473.
- [14] 刘军,褚俊英,赵金波,等.掺和料对生土墙体材料力学性能的影响[J].建筑材料学报,2010,13(4):446-451.
LIU Jun, CHU Junying, ZHAO Jinbo, et al. Effect of admixtures on mechanical properties of raw clay material for wall[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4): 446-451.
- [15] 刘军,盛国东,刘宇.固化剂掺量对生土墙体材料性能的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(3):517-521.
LIU Jun, SHENG Guodong, LIU Yu. Effects of the dosage of solidified agent on the performance of raw soil materials for wall[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2010, 26(3): 517-521.
- [16] 尚建丽,张浩,熊磊,等.基于均匀设计优化制备癸酸-棕榈酸/SiO₂复合相变材料[J].材料工程,2015,43(9):94-102.
SHANG Jianli, ZHANG Hao, XIONG Lei, et al. Optimized preparation of decanoic-palmitic acid/SiO₂ composite phase change materials based on uniform design[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(9): 94-102.

(编辑 桂智刚)