

胶凝/生土复合材料的制备及热湿综合性能表征

张磊¹, 杨柳^{*1}, 桑国臣², 翟永超¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055; 2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 西安 710048)

摘 要: 以矿渣、石灰、水泥、石膏等胶凝材料作为改性剂来制备胶凝/生土复合材料, 采用防护热板法和等温吸放湿法测试了胶凝/生土复合材料的热湿性能。结果表明, 胶凝材料的种类和掺量对胶凝/生土复合材料的热湿性能影响显著。采用归一法对胶凝/生土复合材料进行热湿性能综合分析, 可知, 10% 石膏/生土材料具有最优的热湿综合性能, 这是由于石膏水硬化作用在生土材料中形成了起到骨架支撑作用的网状结构, 网状结构中存在的孔隙降低了材料的导热系数, 提升了其吸湿性能。

关键词: 生土; 胶凝材料; 复合材料; 导热系数; 吸放湿性能

中图分类号: TU 332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)03-0668-08

Preparation and characterization of hygrothermal comprehensive property for cementitious agent/soil composites

ZHANG Lei¹, YANG Liu^{*1}, SANG Guochen², ZHAI Yongchao¹

(1. College of Architecture, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Slag, lime, cement and gypsum were used as the cementitious agents to prepare the cementitious agent/soil composites. The hygrothermal properties of the cementitious agent/soil composites were investigated by guarded hot plate method and isothermal absorption and desorption method. The test results present that both cementitious type and content have significant effect on the hygrothermal properties of the cementitious agent/soil composites. Hygrothermal properties of the cementitious agent/soil composites were comprehensively analyzed by normalization method, the results show that 10% gypsum/soil composite has the best hygrothermal comprehensive property. The reason is that a mesh structure, which provides a structural supporting in the matrix, is formed by hydration of gypsum. The pores, which exist in the mesh structure, decrease the thermal conductivity of the cementitious agent/soil composites and increase the absorption property.

Keywords: soil; cementitious agent; composites; thermal conductivity; absorption and desorption property

建筑能耗主要包括建筑运行阶段冬季采暖和夏季空调能耗, 热性能优异的建筑材料能够提升建筑物抵御气候变化的能力, 降低建筑运行能耗^[1-2]。此外, 建筑材料的吸放湿性能能够应对环境湿度的变化并进行自发性调节, 以控制室内环境维持在较好的热舒适水平, 从而达到节能的效果。

与常规建筑材料相比, 生土材料的导热系数较低且具有一定的蓄热性, 使生土建筑具有冬暖夏凉

的明显特点。然而, 生土材料在强度和耐久性方面的缺陷严重制约了其在现代建筑中的应用和发展。如何在提高生土材料强度的前提下保持其特有的功能性, 是生土材料能够广泛推广应用的关键。针对这一问题, 国内外学者对生土材料的改性固化以及改性生土材料的性能特点进行了大量有益的探索。郑寒英、刘志华和王琴等分别采用植物纤维、粉煤灰、石膏和矿渣对生土材料进行改性并对其导热系

收稿日期: 2017-03-22; 录用日期: 2017-05-28; 网络出版日期: 2017-06-09 14:46

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170609.001>

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51325803); 国家自然科学基金(51678482)

通讯作者: 杨柳, 博士, 教授, 研究方向为建筑气候学及建筑节能 E-mail: yangliu@xauat.edu.cn

引用格式: 张磊, 杨柳, 桑国臣, 等. 胶凝/生土复合材料的制备及热湿综合性能表征[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 668-675.
ZHANG Lei, YANG Liu, SANG Guochen, et al. Preparation and characterization of hygrothermal comprehensive property for cementitious agent/soil composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 668-675 (in Chinese).

数进行了测试^[3-5]。Cagnon 等^[6]针对法国图卢兹地区的五种生土砖进行了热湿性能测试, 结果显示 5 种生土砖存在物理性质的差异。Nikiforova 等^[7]认为土壤类型直接影响着生土材料的导热系数。Maillard 等^[8]认为生土砖的原材料对其热性能影响很大。建筑材料的吸放湿性能表征了材料应对室内环境相对湿度变化的能力, 良好的吸放湿性能可以有效调节室内环境, 提升室内舒适水平。与生土材料的热性能研究相比, 目前对于生土材料吸放湿性能研究较少。闫增峰等^[9]对夯土墙体材料进行平衡含湿量的试验研究, 并与实心黏土砖和松木板进行了对比。尚建丽等^[10]对改性生土材料进行了平衡吸放湿试验, 研究发现, 石膏改性生土材料具有良好的湿性能。张磊等^[11]采用石灰、矿渣复掺的方式对生土材料进行改性, 得到了热湿综合性能最优的优化配方, 对生土材料的应用和推广具有现实意义。根据上述研究现状可以看出, 现有研究成果中生土材料的物理性质存在显著差异, 这是由矿物组成和化学组成差异决定的。因此在生土建筑建造之前, 针对拟选用生土材料进行物理性质分析能够对建筑的设计和建造过程进行直接指导。此外, 建筑材料的吸放湿是一个动态的过程, 而当前对生土材料湿性能的研究仅仅局限在对吸湿和放湿过程中平衡含湿量的计算, 研究方法过于简单, 未对材料的吸放湿过程进行深入研究, 且鲜有对生土材料热湿

性能的综合分析, 无法全面准确地评价生土材料对室内环境的调节能力, 制约了生土建筑的发展和生土材料的应用。

鉴于上述分析, 本研究针对新疆吐鲁番地区生土材料的物理性质进行研究, 采用矿渣、石灰、水泥和石膏等胶凝材料作为改性剂, 进行胶凝/生土复合材料的制备并对其进行热湿性能分析。结合胶凝/生土复合材料吸放湿过程的动态分析, 以导热系数、吸放湿速率、湿平衡时间和滞后值作为评价热湿性能的关键指标, 并以归一法为综合分析方法对胶凝/生土复合材料进行热湿综合性能评价, 以寻找热湿性能优秀且满足强度要求的胶凝/生土复合材料。此外, 对热湿综合性能最佳的胶凝/生土复合材料进行机制分析, 为生土材料在建筑领域推广提供理论支撑。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

本研究所用生土材料取自新疆吐鲁番地区, 其物理性质如表 1 所示。分别采用日本理学 D/max 2500 型 X 射线衍射分析仪和日本岛津 EDX-LE 能量色散型 X 射线荧光分析仪对生土材料进行矿物组分和化学组成分析, 如图 1 和表 2 所示。生土材料的矿物组成主要包含了石英、方解石、钙长石和钠长石; 其化学组成分析结果显示生土中 SiO₂、Al₂O₃ 和 CaO 总量接近 80%。

表 1 生土材料物理性质

Table 1 Physical properties of the soil

Value	Relative density/(g·cm ⁻³)	Liquid limit/%	Plastic limit/%	Plastic index/%
	2.68	23.7	18.2	5.5

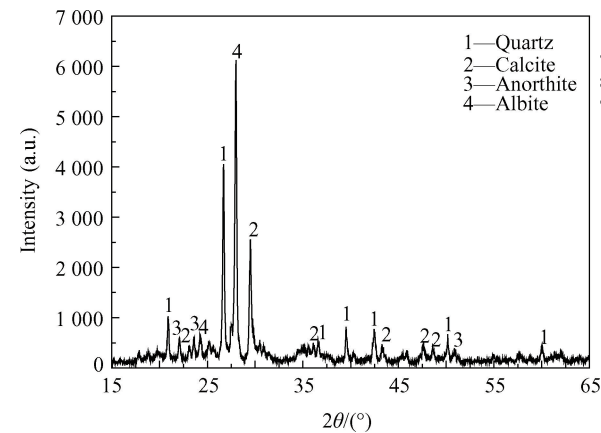


图 1 生土材料 XRD 谱图
Fig. 1 X-ray patterns of the soil

分别采用水泥、石灰、矿渣和石膏等胶凝材料作为改性剂进行胶凝/生土复合材料的制备, 水泥、矿渣和石膏的化学组分如表 3 所示, 改性剂掺量如表 4 所示。其中水泥(C)选用海螺水泥生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥; 石灰(S)选用惠民县宇阳建材有限公司的石灰粉, 其活性为 78%; 矿渣(SL)选用西安德龙粉体工程材料有限公司生产的超细矿渣粉; 石膏(SG)选用西安市西京新型建材有限公司生产的建筑石膏。

1.2 测试方法

依照 GB/T 10294—2008^[12]采用导热系数测定仪对胶凝/生土复合材料的导热系数进行测试, 测试流程如下: 按照表 4 所示的改性剂掺量, 采用日

表 2 生土的化学组成

Table 2 Chemical composition of the soil

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	ZrO ₂
Mass fraction/wt%	47.770	12.210	8.845	19.367	4.261	3.980	1.940	0.454	0.860	0.231	0.082

表 3 胶凝材料的化学组分

Table 3 Chemical composition of the cementitious agents

	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	K ₂ O
C	20.65	62.23	3.15	3.27	1.65	0.56	0.05	0.48	0.07	0.16	—
SL	34.11	40.20	1.65	10.50	4.36	5.18	—	—	4.36	0.48	—
SG	1.82	31.24	0.20	0.39	0.64	44.23	—	0.05	—	—	0.13

Notes: C—Cement; SL—Slag; SG—Gypsum.

表 4 胶凝/生土复合材料的改性剂掺量

Table 4 Stabilizer content in the cementitious agent/soil composites

Mass fraction of the cementitious agent/wt%			
	Low content	Medium content	High content
SL	6	8	10
S	6	8	10
C	5	7	9
SG	6	8	10

Note: S—Lime.

本岛津公司生产的 AUW120D 型精密电子天平进行称量,精密电子天平的最大量程为 200 g,精度为 0.1 mg,将生土材料与改性剂均匀混合,称量占混合材料质量分数为 13%的水,倒入混合材料中搅拌,直至混合材料干湿均匀;将混合材料倒入 300 mm×300 mm×150 mm 的模具中,采用液压力机压制成 300 mm×300 mm×50 mm 的板状试件;将试件放入北京和同创业科技有限责任公司生产的 101-2AB 型电热鼓风干燥箱中,在 105℃ 条件下烘干,当 24 h 内连续 3 次称量试件质量的变化小于总质量的 0.1%,即认为试件完全干燥;采用天津市润建仪器厂生产的 DRY-300F 导热系数测定仪对干燥完成的试件进行导热系数测试,该导热系数测定仪的测量范围为 0.02~1.00 W/(m·K),误差不大于 3%,将待测试件放置在导热系数测定仪的冷热板之间并夹紧,夹力控制在 40 N 左右;冷板温度设定为 15℃,热板温度设定为 35℃,测试稳定周期为 120 min,数据记录 60 min;根据记录的实验数据,采用下式计算试件的导热系数:

$$\lambda = (Ql)/(A\Delta T)$$

式中:λ 为试件的导热系数(W/(m·K));Q 为通过试件横截面积的热流(W/m²);l 为试件的厚度(m);A 为试件的横截面积(m²);ΔT 为冷板和热板之间的温差(℃)。

湿性能分析依照 GB/T 20312—2006^[13]采用等温吸放湿法,测试步骤如下:将用于导热系数测试的试件均匀切割成尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm 的小试件,将小试件放于温度设定为 105℃ 的鼓风干燥箱中进行干燥,当 24 h 内连续三次称量试件质量的变化小于总质量的 0.1%,即认为试件完全干燥;将干燥后的试件放入具有不同相对湿度的饱和溶液容器中,试件间隔 24 h 的 3 次连续称重质量差小于 0.1%时,认为试样达到湿平衡,对在每种湿度环境下达到平衡后的质量进行记录。将试件放置在下一相对湿度环境中。上述测试的相对湿度区间为 32.78%~97.30%,如表 5 所示。试样平衡含湿量具体计算如下:

$$\mu = (w - w_0)/w_0$$

式中:μ 为试样平衡含湿量(%);w₀ 为干燥状态下试样的质量(g);w 为吸放湿后的试样质量(g)。

微观形貌分析采用美国 FEI 公司 Quan-ta200 型扫描电子显微镜,观察距离为 10.0~10.5 mm。

2 结果与分析

2.1 胶凝/生土复合材料的导热系数

图 2 为不同掺量下胶凝/生土复合材料的导热系数测试值。可以看出,不同胶凝材料对胶凝/生土复合材料导热系数测试值的影响很大。矿渣/生

表 5 饱和盐溶液的相对湿度(25℃)

Table 5 Chemical solutions used for obtaining different relative humidity conditions (25℃)

	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	Mg(NO ₃) ₂	CoCl ₂	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
Relative humidity/%	32.78	43.16	52.89	64.92	75.29	84.34	97.30

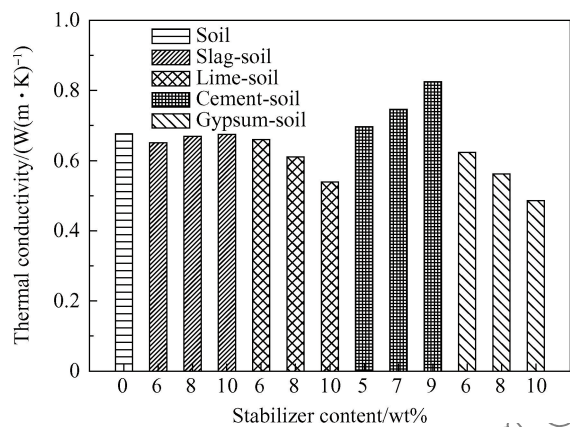


图2 胶凝/生土复合材料导热系数

Fig. 2 Thermal conductivity of cementitious agent/soil composites

土复合材料的导热系数与生土材料差别不大,且随着矿渣含量的增加,矿渣/生土复合材料的导热系数未发生明显的变化。这是由于矿渣的导热系数与生土材料的导热系数非常接近^[14],此外矿渣的玻璃体结构在常规环境下较为稳定,生土材料的微观结构未发生变化,因此矿渣/生土复合材料的导热系数未发生明显的变化。石灰/生土复合材料和石膏/生土复合材料的导热系数较生土材料明显降低,且随着石灰或石膏掺量的增加,导热系数逐渐减小。对于石膏/生土复合材料来说,一方面石膏的导热系数为 $0.33\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[15],明显小于生土材料的导热系数;另一方面石膏水硬化后形成网状结构^[10],其内部存在的孔隙进一步降低了材料的导热系数。过量石灰的掺入导致生土材料内部pH值升高,生土材料中黏土颗粒出现分散现象,导致生土材料内部孔隙率升高和导热系数降低^[16]。水泥/生土复合材料的导热系数较生土材料明显提高且随着水泥掺量的增加而逐渐增大。这是由于水泥水化生成的胶凝产物一方面对土体进行包裹并彼此衔接形成相对稳定的结构;另一方面对内部结构中存在的孔隙进行填充,大大提高了材料的密实度,进而提高了材料的导热系数^[17]。

2.2 胶凝/生土复合材料的吸放湿性能

等温吸放湿曲线能够客观准确地描述材料对水蒸气的吸收、储存和释放的能力^[18],图3为生土材料与中等掺量胶凝/生土复合材料的等温吸湿平衡曲线。可以看出,随着环境相对湿度的不断升高,生土材料与中等掺量胶凝/生土复合材料均能够在4天内与环境相对湿度达到平衡,说明生土材料和中等掺量胶凝/生土复合材料具有较好的吸湿性,

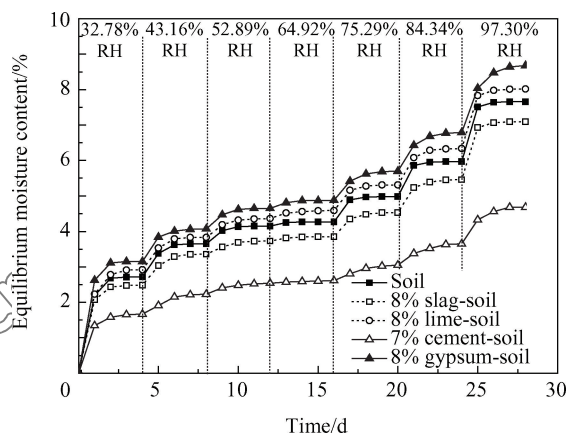


图3 中等掺量胶凝/生土复合材料的等温吸湿平衡曲线

Fig. 3 Adsorption equilibrium curves of the medium content cementitious agent/soil composites

能够迅速地应对环境湿度的变化,对室内湿环境环境进行自发性调节。在中等掺量条件下,石灰/生土复合材料和石膏/生土复合材料的平衡含湿量大于生土材料,而矿渣/生土复合材料和水泥/生土复合材料平衡含湿量小于生土材料。

由图3可以看出,不同胶凝/生土复合材料在低相对湿度(32.78%~43.16%)阶段和高相对湿度(75.29%~97.30%)阶段中的平衡吸湿量明显高于中相对湿度(52.89%~64.92%)阶段。生土材料和胶凝/生土复合材料均属于多孔介质,其吸湿过程包含了单分子吸附、多分子吸附和毛细凝结3个阶段^[19-20]:在低相对湿度条件下,空气中的水分子在分子力的作用下吸附至生土颗粒表面并形成一层水分子膜,此过程为单分子吸附过程^[21];随着相对湿度的增大,生土颗粒表面已经全部被水分子覆盖,只能依靠水分子之间的内聚力使水分子吸附在水膜的外层,即多分子吸附阶段^[20],由于水分子之间的内聚力很小,此阶段吸附的水分子极易获得动能而脱离成为自由水分子,因此中相对湿度条件下各胶凝/生土复合材料的平衡含湿量较小;随着相对湿度的继续增大,颗粒表面水分子膜厚度不断增加,直至材料内部孔隙被堵塞而形成弯月面,产生毛细凝结作用^[21],此时胶凝/生土复合材料的吸湿能力变得更强。

图4为胶凝/生土复合材料的等温吸放湿曲线及滞后值。可以看出,胶凝材料掺量对胶凝/生土复合材料平衡吸湿量的影响很大。由图4(a)可知,随着矿渣掺量的增大,矿渣/生土复合材料的平衡吸湿量逐渐减小,这是因为矿渣在常规状态下为稳

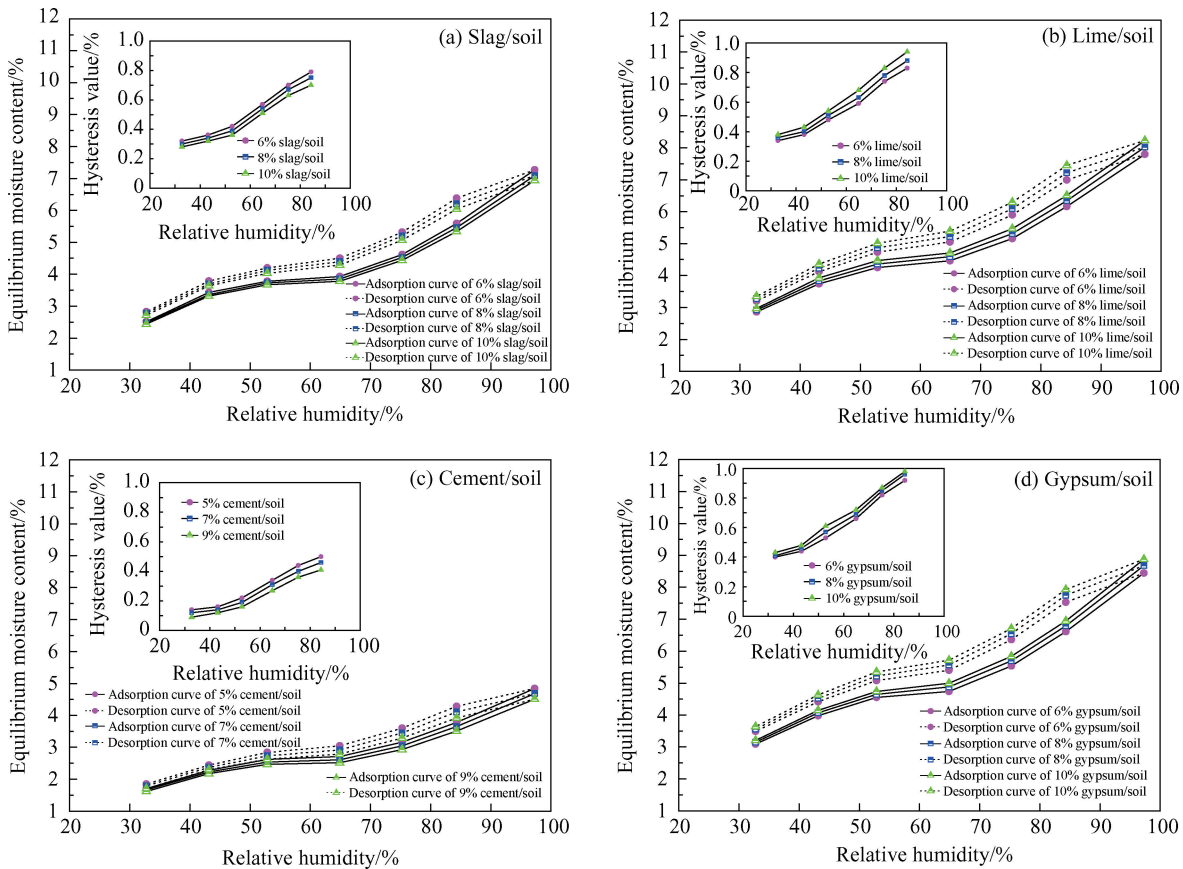


图 4 胶凝/生土复合材料等温吸放湿曲线及滞后值

Fig. 4 Absorption and desorption moisture curves and hysteresis values of cementitious agent/soil composites

定的玻璃体结构且与水不发生反应。所以矿渣在材料基体中起到填充孔隙的作用，降低了材料基体内的孔隙率和表面积，造成了平衡吸湿量的减小；图 4(b)表明，石灰/生土复合材料的平衡吸湿量随着石灰掺量的增大而增大，由于掺入过量的石灰造成石灰/生土复合材料基体中 pH 值增大，导致黏土颗粒发生分散，造成基体内孔隙的增多，提高了材料的吸湿性能；由图 4(c)可知，水泥的掺入造成了材料吸湿性能的显著降低，这是由于水泥水化胶凝产物的生成在很大程度上提高了材料的密实度，基体内孔隙的减少造成了材料平衡吸湿量的降低；图 4(d)表明，石膏的掺入能够有效提高石膏/生土复合材料的吸湿性，石膏水化硬化形成的网状结构增加了基体内存在的孔隙，进而提高了石膏/生土复合材料的吸湿性能。

此外，不同胶凝/生土复合材料的等温吸放湿曲线具有相同的特点，即吸湿曲线和放湿曲线之间存在差值，这一差值被称为滞后值。滞后现象产生的原因是生土材料内部的毛细凝聚作用^[22-23]，当材

料内部孔隙被毛细水阻塞时，水蒸气向外蒸发的通路被堵塞，延长了材料放湿的进程，进而产生了滞后现象^[24-25]，即生土材料的吸放湿过程是一类不可逆过程。

随着相对湿度的增大，胶凝/生土复合材料的滞后值逐渐增大。当等温放湿过程开始时，环境相对湿度逐渐减小，胶凝/生土复合材料内部存在的孔隙被毛细凝聚作用产生的凝聚液阻塞^[25]，阻止了水蒸气向外蒸发扩散^[24]，造成了放湿解吸的滞后现象；随着环境相对湿度的进一步降低，孔隙内部由水分子膜积聚形成的弯月面消失，材料内部的吸附水被释放至环境中，由于水分子的单分子吸附和多分子吸附是可逆的过程^[25]，因此这部分水分几乎全部被释放至环境中，表现为胶凝/生土复合材料的平衡含湿量显著降低，此时胶凝/生土复合材料的滞后值很小。

2.3 胶凝/生土复合材料的热湿综合性能

图 5 为胶凝/生土复合材料的抗压强度测试值。生土材料的抗压强度仅为 1.78 MPa，无法满

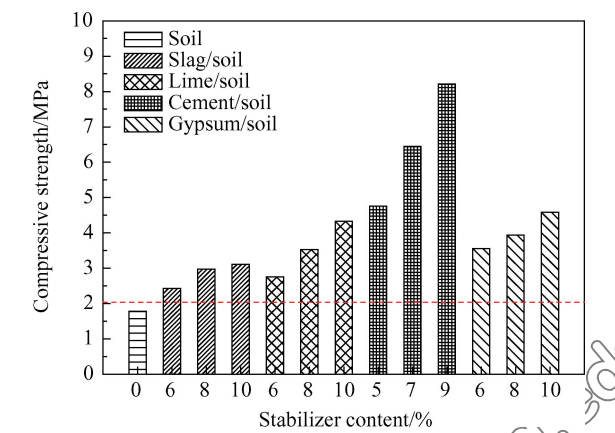


图5 胶凝/生土复合材料抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of cementitious agent/soil composites

足对于抗压强度不低于 2 MPa 的要求^[26]。胶凝/生土复合材料的抗压强度均能够满足强度要求, 其中水泥/生土复合材料的强度提高效果最明显, 9%水泥掺量下的水泥/生土复合材料抗压强度达到 8.21 MPa。在满足抗压强度的前提下, 对比分析不同胶凝/生土复合材料的热湿性能, 选择热湿综合性能最优的胶凝/生土复合材料用于工程实践, 对生土建筑的发展和工程应用具有指导意义。

为了对胶凝/生土复合材料的热湿性能进行综合分析, 对胶凝/生土复合材料的导热性能、吸湿性能和放湿性能进行归一化处理。由于人体舒适湿度范围为 40%~65%, 选取 52.89%相对湿度下吸湿平衡含湿量为 M_1 (吸湿性); 选取 52.89%相对湿度下滞后值为 M_2 (放湿性); 胶凝/生土复合材料导

热系数为 M_3 (热性能); 胶凝/生土复合材料的热湿综合性能为

$$M=M_1+(1-M_2)+(1-M_3)$$

表 6 为胶凝/生土复合材料热湿综合性能的计算值。可知, 在胶凝/生土复合材料中, 10%石膏/生土复合材料具有最优的热湿综合性能, 即 $M=2.0000$ 。

2.4 石膏/生土复合材料的微观形貌及改性机制

10%石膏/生土复合材料具有最优的热湿综合性能, 这是由其独特的微观结构所决定的。图 6 为生土材料和 10%石膏/生土复合材料的 SEM 图像。由图 6(a)可以看出, 生土材料存在大量的砂, 证实了生土材料的矿物组成中包含了石英。呈片层状结构的是黏土矿物, 黏土矿物的存在为生土材料提供了黏性。此外, 生土材料从整体上表现出分散的状态, 土颗粒彼此分离且无有效的连接, 使生土材料在强度方面存在缺陷。由图 6(b)可以看出, 石膏/生土复合材料在微观层面上显示出了一定的网状结构, 这部分网状结构来源于石膏的水硬化过程, 石膏浆体一方面对生土颗粒进行包裹, 另一方面在摩擦力、黏结力的作用下逐渐凝结形成晶体, 晶体颗粒长大并交错共生形成网状结构。这种独特的网状结构为生土提供了骨架支撑的作用, 提高了生土材料的抗压强度; 此外, 网状结构中存在的孔隙能够为石膏/生土复合材料提供理想的导热系数并且有效地吸附空气中的水分, 起到调节相对湿度的作用。

表 6 胶凝/生土复合材料的热湿综合性能

Table 6 Heat-moisture comprehensive performance of cementitious agent/soil composite materials

Materials	Hydric performance			Thermal property			Comprehensive performance
	Equilibrium moisture content/%	M_1	Hysteresis value/%	M_2	Thermal conductivity/($W\cdot m\cdot K$) ⁻¹	M_3	M
6% SL/soil	3.78	0.5771	0.42	0.5778	0.6509	0.4864	1.5129
8% SL/soil	3.73	0.5551	0.39	0.5111	0.6687	0.5390	1.5050
10% SL/soil	3.67	0.5286	0.36	0.4444	0.6745	0.5561	1.5281
6% S/soil	4.25	0.7841	0.48	0.7111	0.6599	0.5130	1.5600
8% S/soil	4.36	0.8326	0.51	0.7778	0.6107	0.3676	1.6872
10% S/soil	4.47	0.8811	0.54	0.8444	0.5392	0.1563	1.8804
5% C/soil	2.62	0.0661	0.22	0.1333	0.6963	0.6206	1.3122
7% C/soil	2.54	0.0308	0.19	0.0667	0.7463	0.7683	1.1958
9% C/soil	2.47	0.0000	0.16	0.0000	0.8247	1.0000	1.0000
6% SG/soil	4.55	0.9163	0.53	0.8222	0.6239	0.4066	1.6875
8% SG/soil	4.65	0.9604	0.57	0.9111	0.5617	0.2228	1.8265
10% SG/soil	4.74	1.0000	0.61	1.0000	0.4863	0.0000	2.0000

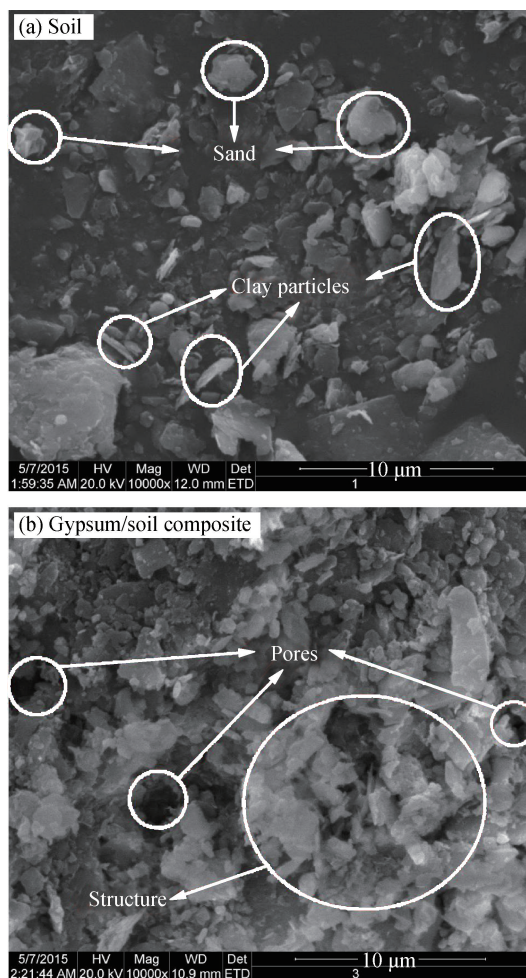


图6 生土材料及石膏/生土复合材料 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of soil and gypsum/soil composite

3 结 论

(1) 胶凝/生土复合材料导热系数测试结果表明, 胶凝材料的种类和掺量对导热系数测试值的影响很大。其中水泥的掺入显著提升了生土材料的导热系数, 水泥/生土复合材料的导热系数随着水泥掺量的增大而增大; 石灰和石膏的掺入降低了生土材料的导热系数, 且随着掺量的增加, 导热系数逐渐降低; 随着矿渣掺量的增加, 矿渣/生土复合材料的导热系数与生土材料差别不大。

(2) 胶凝/生土复合材料的平衡吸湿量随胶凝材料的掺量而变化, 其中水泥和矿渣的掺入降低了生土的吸湿性, 而石灰和石膏的掺入有利于提高生土的吸湿性。胶凝/生土复合材料平衡吸放湿曲线存在滞后值, 该滞后值源于材料内部孔隙的毛细凝聚作用。胶凝/生土复合材料滞回值随着相对湿度的增大而增大。

(3) 采用归一法对胶凝/生土复合材料热湿性能进行综合分析, 结果表明, 10%石膏/生土复合材料的热湿综合性能最佳。这是由于石膏水化硬化生成的网状结构为生土材料提供了骨架支撑作用, 一方面提升了材料的抗压强度; 另一方面网状结构中存在的孔隙降低了材料的导热系数且增强了材料的吸湿性。

参考文献:

- [1] NIROUMAND H, ALVAREZ J, SAALY M. Investigation of earth building and earth architecture according to interest and involvement levels in various countries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 1390-1397.
- [2] OBAFEMI A, KURT S. Environmental impacts of adobe as a building material: The north cyprus traditional building case [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2016, 4: 32-41.
- [3] 郑寒英, 刘家翔, 宋柯, 等. 不同改性材料对生土墙体材料性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2014(5): 62-66.
ZHENG H Y, LIU J Y, ZHU K, et al. The influence of modifiers on properties of raw soil wall materials[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2014(5): 62-66 (in Chinese).
- [4] 刘志华, 杨久俊, 陈兵. 磷石膏粉煤灰改性生土材料试验研究[J]. *粉煤灰综合利用*, 2016(1): 3-6+11.
LIU Z H, YANG J J, CHEN B. Experimental study on properties of modified raw soil material adding phosphogypsum and fly ash[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2016(1): 3-6+11 (in Chinese).
- [5] 王琴. 生土材料的改性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
WANG Q. Study on modification of raw soil material[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009 (in Chinese).
- [6] CAGNON H, AUBERT J, COUTAND M, et al. Hygrothermal properties of earth bricks[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 80: 208-217.
- [7] NIKIFOROVA T, SAVYTSKYI M, LIMAM K, et al. Methods and results of experimental researches of thermal conductivity of soils [J]. *Energy Procedia*, 2013, 42: 775-783.
- [8] MAILLARD P, AUBERT J. Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 63: 56-61.
- [9] 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).
- [10] 尚建丽, 麻向龙, 张磊. 改性生土材料吸放湿性能研究与结构分析[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3413-3417.
SHANG J L, MA X L, ZHANG L. Performance of humidity controlling of modified soil materials and structure analysis [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(12): 3413-3417 (in Chinese).
- [11] 张磊, 杨柳, 桑国臣, 等. 基于响应面法的石灰-矿渣/生土复合材料热湿综合性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5): 1095-1102.
ZHANG L, YANG L, SANG G C, et al. Heat & moisture comprehensive property for lime-slag/soil composite materials based on response surface methodology [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5): 1095-1102 (in Chinese).
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定—防护热板法: GB/T 10294—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Thermal insulation: Determination of steady-state thermal resistance and related properties—Guarded hot plate apparatus: GB/T 10294—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008 (in Chinese).
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 建筑材料及制品的湿热性能—吸湿性能的测定: GB/T 20312—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of hygroscopic sorption properties: GB/T 20312—2006 [S]. Beijing: China Standards Press, 2006 (in Chinese).
- [14] MILLS K C, YUAN L, JONES R T. Estimating the physical properties of slags[J]. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011, 111(10): 649-658.
- [15] 刘加平. 建筑物理(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU J P. Architecture physics (fourth edition)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009 (in Chinese).
- [16] CIANCIO D, BECKETT C, CARRARO J. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 59-65.
- [17] ASHOUR T, KORJENIC A, KORJENIC S, et al. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum[J]. Energy and Buildings, 2015, 104: 139-146.
- [18] 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).
- [19] 钟辉智. 多孔建筑材料热湿物理性能研究及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
ZHONG H Z. Study on characteristics of coupled heat and moisture in porous building materials[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011 (in Chinese).
- [20] RAHMAN A. The potentials of some stabilizers for the use of lateritic soil in construction[J]. Building and Environment, 1986, 21(1): 57-61.
- [21] ASHOUR T, GEORG H, WU W. An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(2-3): 293-303.
- [22] MCGREGOR F, HEATH A, FODDE E, et al. Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks [J]. Building and Environment, 2014, 75: 11-18.
- [23] INAGAKI S, FUKUSHIMA Y, DOI H, et al. Pore size distribution and adsorption selectivity of sepiolite[J]. Clay Minerals, 1990, 25(1): 99-105.
- [24] 陈启高. 多孔围护结构中湿度计算理论[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1984(3): 1-18.
CHEN Q G. Moisture calculated theory of porous building envelope[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 1984(3): 1-18 (in Chinese).
- [25] 彭昊. 建筑围护结构调湿材料理论和实验的基础研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
PENG H. Basic theoretical study and experiment on humidity controlling materials subjected to building envelope [D]. Shanghai: Tongji University, 2006 (in Chinese).
- [26] 琳恩·伊丽莎白, 卡萨德勒·亚当斯. 新乡土建筑-当代天然建造方法[M]. 吴春苑, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
ELIZABETH L, ADAMS C. Alternative construction: Contemporary natural building methods[M]. WU C Y, Translate. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005 (in Chinese).