

文章编号:1007-9629(2022)02-0199-07

生土泡沫混凝土的制备及其性能

张磊^{1,2,*}, 赵倬跃¹, 张楠³, 荣辉^{1,2}, 岳昌盛⁴

(1.天津城建大学材料科学与工程学院,天津 300384; 2.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; 3.承德石油高等专科学校建筑工程系,河北承德 067000; 4.中冶建筑研究总院有限公司,北京 100088)

摘要:以生土、水泥、聚羧酸减水剂及自制微生物发泡剂为原材料,采用先预制气泡再与水泥浆体混合的方法,制备了不同密度等级的生土泡沫混凝土,研究了泡沫掺量对生土泡沫混凝土干密度、抗压强度、导热系数、吸水率及其孔结构的影响.结果表明:当水泥用量为 128.4~583.4 kg/m³,生土用量为 64.2~291.7 kg/m³,减水剂用量为 0.6~3.0 kg/m³,泡沫掺量为固体材料总质量的 6.1%~26.4% 时,制成了 300~1 200 kg/m³ 密度等级的生土泡沫混凝土,其抗压强度为 0.8~10.3 MPa,导热系数为 0.08~0.27 W/(m·K),吸水率为 6.5%~67.7%,满足泡沫混凝土的相关性能要求.

关键词:生土;微生物发泡剂;干密度;抗压强度;导热系数

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.013

Preparation and Performance of Raw Soil Foam Concrete

ZHANG Lei^{1,2,*}, ZHAO Zhuoyue¹, ZHANG Nan³, RONG Hui^{1,2}, YUE Changsheng⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Building Green Functional Materials, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. Department of Architecture and Civil Engineering, Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China; 4. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Using the raw soil and Portland cement, polycarboxylic series of water reducing agent and biological based foaming agent, the raw soil foam concrete with different density levels were prepared by pre-foam and mixed. The properties such as compressive strength, thermal conductivity, water absorption ratio and pore structure of raw soil foam concrete were investigated. The results show that when the cement content is 128.4–583.4 kg/m³, the raw soil content is 64.2–291.7 kg/m³, the water reducing agent content is 0.6–3.0 kg/m³ and the foam content is 6.1%–26.4% of solid material mass, the corresponding density grade of the raw soil foam concrete is 300–1 200 kg/m³, the compressive strength is 0.8–10.3 MPa, the thermal conductivity is 0.08–0.27 W/(m·K), and the water absorption ratio is 6.5%–67.7%. The raw soil foam concrete meets the relevant performance requirement for foam concrete.

Key words: raw soil; biological based foaming agent; dry density; compressive strength; thermal conductivity

生土是一种历史悠久的建筑材料,生土建筑具有能耗低、造价低、可调节室内温湿度等优点^[1].同时,生土也存在强度低、脆性大、耐水性差等缺点,导致生土建筑的抗震性差,易受侵蚀破坏^[2].长期以来,

国内外学者或采用了水泥、石灰等改性材料来改善夯土、生土砌块、生土砖等生土材料的物理、力学和耐久性能^[3-8],或采用各种天然可再生资源,如动植物纤维等来改善未烧制生土材料的机械、湿热和耐久

收稿日期:2020-10-15; 修订日期:2020-12-28

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2018YFD1101002)

第一作者(通讯作者):张磊(1979—),男,河南驻马店人,天津城建大学教授,硕士生导师,博士.E-mail:zhanglei@tcu.edu.cn

性能^[9-10]。然而,生土材料用作承重墙体材料时,在改性材料掺量(质量分数,文中涉及的掺量、泌水率、减水率等除特别说明外均为质量分数)较低的情况下,其强度和耐久性能提升有限。陈兵等^[11]研究发现,利用生土、水泥和微硅粉等制备的生土泡沫混凝土具有较好的物理力学性能和保温特性。这样不仅充分利用了农村生土材料的资源优势,而且泡沫混凝土作为填充用保温隔热材料,也避免了雨水和环境的侵蚀破坏,具有良好的应用前景。

本文采用自制微生物发泡剂、生土材料和适量改性材料,制备了不同密度等级的生土泡沫混凝土,研究了生土泡沫混凝土的孔隙分布、干密度、抗压强度、导热系数和吸水率,以期获得一种可以调节室内温湿度的生土泡沫混凝土。

1 原料与试验方法

1.1 原材料

生土:取自陕西省北部,主要化学组成包括 SiO_2 (52.5%)、 Al_2O_3 (14.6%)、 Fe_2O_3 (5.4%)和 CaO (4.8%)等,矿物组成有石英、钠长石和方解石等。水

泥:天津冀东水泥有限公司生产的P·O 42.5水泥。发泡剂:实验室自制的微生物发泡剂^[12-13],发泡倍数为15倍,1 h泌水率为48%,1 h沉降距为2 mm。减水剂:苏博特PCA-1型聚羧酸高性能减水剂,减水率为25%。

1.2 试验方法

1.2.1 生土泡沫混凝土的配合比设计

生土泡沫混凝土的配比见表1,其中水固比为0.35,减水剂掺量为0.5%(以水泥质量计),泡沫掺量以固体材料总质量计。确定生土泡沫混凝土中泡沫用量时,需要考虑搅拌过程中泡沫出现破裂的情况,通过调整系数 K 计算泡沫的实际使用量。

1.2.2 生土泡沫混凝土的制备

首先,将生土、水泥、聚羧酸减水剂和水按设计配合比加入搅拌机并搅拌均匀;其次,将微生物发泡剂高速搅拌制成泡沫,添加到水泥浆体中搅拌约2~3 min,泡沫均匀混入后停止搅拌;然后,将水泥浆体浇筑到边长为100 mm的立方体模具中,成型后在室温下养护1 d后脱模,试块放在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度95%以上的恒温恒湿养护箱中养护至规定龄期。

表1 A03-A12等级生土泡沫混凝土的配比

Table 1 Mix proportions of A03-A12 raw soil foam concretes

Serial No.	Target density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)			K	$w(\text{foam})/\%$
		Cement	Raw soil	Water reducing agent		
A12	1 200	583.4	291.7	2.9	3.4	6.1
A10	1 000	482.2	241.1	2.4	2.8	8.1
A09	900	431.8	215.9	2.2	2.6	9.5
A08	800	381.2	190.6	1.9	2.4	11.0
A07	700	330.6	165.3	1.7	2.0	11.6
A06	600	280.0	140.0	1.4	1.6	13.5
A05	500	229.4	114.7	1.1	1.8	17.8
A04	400	179.0	89.5	0.9	1.4	19.1
A03	300	128.4	64.2	0.6	1.4	26.4

1.2.3 生土泡沫混凝土性能的测试方法

(1)孔隙率测试:采用VHX-600E超景深显微镜拍摄生土泡沫混凝土试件的断面(见图1),再将拍摄的照片导入Image J软件中,通过二值化处理和Image J软件中内置的多种测试参数,可以得到孔隙率、孔径分布、平均孔径及孔形状因子。生土泡沫混凝土断面经二值化处理后如图2所示。

(2)干密度测试:按照GB/T 11969—2008《蒸压加气混凝土性能试验方法》进行。

(3)抗压强度测试:按照JG/T 266—2011《泡沫混凝土》进行,并采用UltimaIv型X射线衍射仪

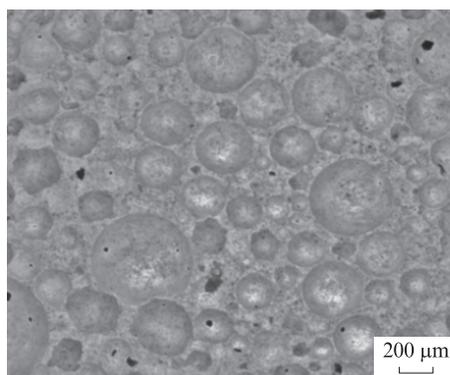


图1 生土泡沫混凝土的断面

Fig. 1 Cross section of raw soil foam concrete

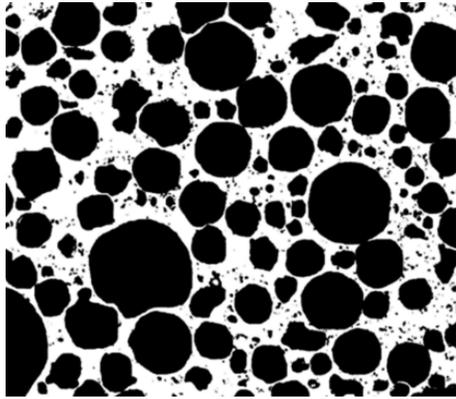


图2 二值化处理
Fig. 2 Binary processing

(XRD)对试样进行物相分析,采用JSM-7800F型场发射扫描电子显微镜(FESEM)进行微观分析.

(4)导热系数测试:采用HFM 436 Lambda型热流法导热仪进行测试.

(5)吸水率测试:按照JG/T 266—2011进行.

2 结果与分析

2.1 泡沫掺量对生土泡沫混凝土孔结构的影响

泡沫掺量对生土泡沫混凝土孔隙率的影响如图3所示.由图3可见:随着泡沫掺量的增加,生土泡沫混凝土的孔隙率逐渐增大;当泡沫掺量由6.1%增加至26.4%时,生土泡沫混凝土的孔隙率从45.8%提升至74.6%.

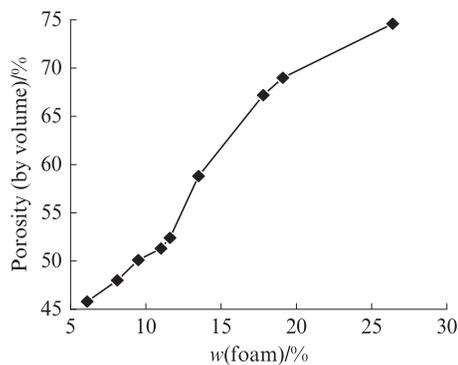


图3 泡沫掺量对生土泡沫混凝土孔隙率的影响
Fig. 3 Effect of foam content on porosity of raw soil foam concretes

泡沫掺量对生土泡沫混凝土平均孔径的影响如图4所示.由图4可见:随着泡沫掺量的增大,生土泡沫混凝土的平均孔径呈逐渐增大的趋势;当泡沫掺量由6.1%增加至26.4%时,生土泡沫混凝土的平均孔径由127 μm 增加到420 μm .这是因为随着泡沫掺量的增加,泡沫出现了聚集合并,从而导致气孔孔径增大.泡沫掺量直接影响生土泡沫混凝土的内部结

构,泡沫掺量降低,孔隙率减小,孔壁的厚度随之增大,可以为生土泡沫混凝土提供更好的力学性能^[14].

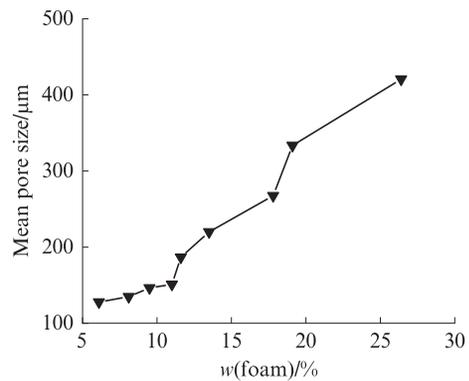


图4 泡沫掺量对生土泡沫混凝土平均孔径的影响
Fig. 4 Effect of foam content on mean pore size of raw soil foam concretes

泡沫掺量分别为19.1%、13.5%、11.0%、8.1%时,所制得生土泡沫混凝土的密度等级分别为400、600、800、1 000 kg/m^3 .不同密度等级生土泡沫混凝土的孔径分布如图5所示.由图5可见:生土泡沫混凝土的孔径分布近似遵循高斯分布,密度等级分别为400、600、800、1 000 kg/m^3 的生土泡沫混凝土拟合后的相关系数 R^2 分别为0.985、0.972、0.970和0.984;随着泡沫掺量的逐渐增加,生土泡沫混凝土的孔径分布曲线变宽,较大尺寸孔的出现频率和数量也随之增加.这是因为当泡沫掺量较大时,生土泡沫混凝土的总孔隙率增加,孔隙中连通孔的数量也增加所导致的.

2.2 泡沫掺量对生土泡沫混凝土性能的影响

2.2.1 干密度

图6为泡沫掺量对生土泡沫混凝土干密度的影响.由图6可见:随着泡沫掺量的增大,生土泡沫混凝土的干密度逐渐减小;当泡沫掺量从6.1%增加至26.4%时,生土泡沫混凝土的干密度从1 167 kg/m^3 降低至346 kg/m^3 ;随着泡沫掺量的增加,生土泡沫混凝土的干密度随着泡沫掺量的增加而降低的趋势逐渐放缓.这是因为搅拌过程中搅拌机叶片对泡沫产生挤压作用,泡沫掺量越高,受挤压泡沫的比例越高,导致生土泡沫混凝土中泡沫消泡的数量明显增加.

2.2.2 抗压强度

图7为泡沫掺量对生土泡沫混凝土抗压强度的影响.由图7可见:随着泡沫掺量的增大,生土泡沫混凝土的密度降低,孔隙率增大,孔壁厚度随之减小,抗压强度明显降低;泡沫掺量从6.1%增加至

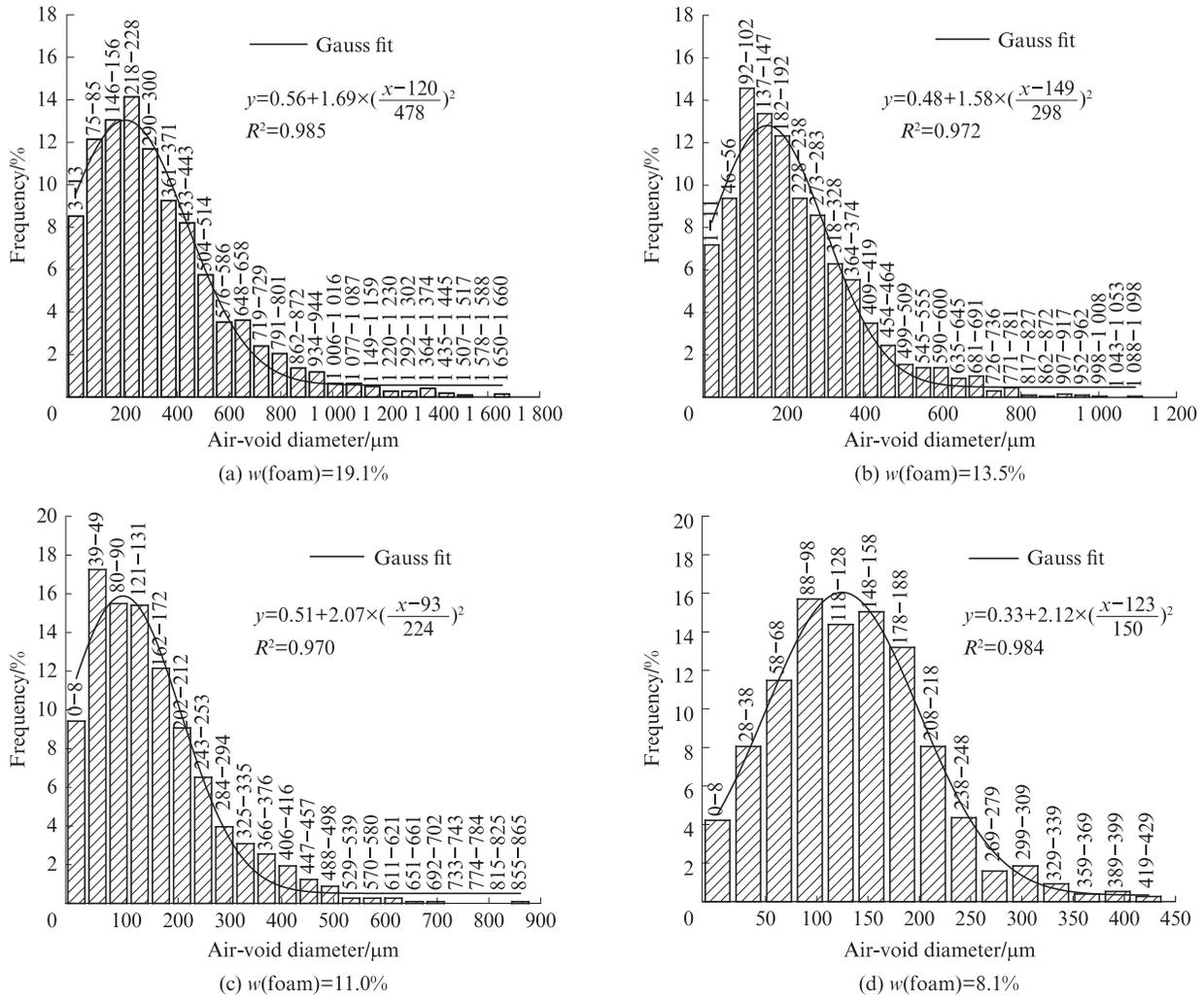


图5 生土泡沫混凝土的孔径分布图
Fig. 5 Pore size distribution of raw soil foam concretes

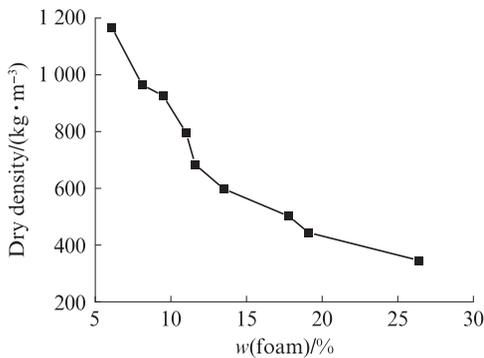


图6 泡沫掺量对生土泡沫混凝土干密度的影响
Fig. 6 Effect of foam content on dry density of raw soil foam concretes

26.4%，生土泡沫混凝土的抗压强度从10.3 MPa降至0.8 MPa；当泡沫掺量为13.5%时，生土泡沫混凝土的密度为598 kg/m³，28 d抗压强度达2.6 MPa，高于同密度等级加气混凝土的抗压强度(2.0 MPa)；与600 kg/m³等级生土泡沫混凝土相比，800 kg/m³等级生土泡沫混凝土所需的泡沫掺量仅减少2.5%，但抗

压强度却提高了77.0%，其抗压强度受泡沫掺量的影响更加明显。

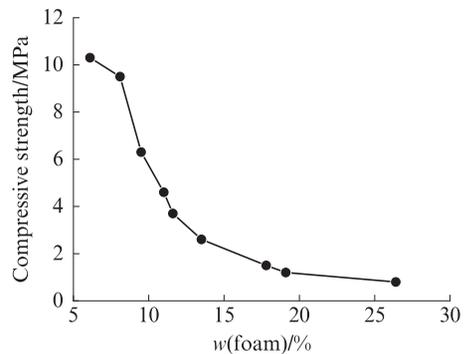


图7 泡沫掺量对生土泡沫混凝土抗压强度的影响
Fig. 7 Effect of foam content on compressive strength of raw soil foam concretes

生土作为一种散粒材料，呈现层片状，自然条件下结构疏松，难以提供力学性能。水泥作为胶凝材料掺入生土后，可以填补土颗粒之间的空隙，提供强

度,但试验设计泡沫混凝土试块内生土掺量较大,结构较纯水水泥水化产物松散。

图8为生土泡沫混凝土的XRD图谱。由图8可见,生土泡沫混凝土中生土的活性未被完全激发,生土主要起到填充作用。

图9为生土与泡沫混凝土的微观形貌。由图9可见:生土颗粒已充分分散,但水泥水化产物在泡沫作用下,未能形成完全连续的胶凝网络;生土泡沫混凝土中泡沫掺量增加,导致生土泡沫混凝土中孔隙分布不均匀,有害孔的数目增加,有害孔多由大尺寸的泡沫直接或间接组合而成,这使得结构内的胶结性能降低,直接影响了生土泡沫混凝土的耐久性和强度^[15]。未来试验可通过激发生土颗粒本身活性,用以

细化孔结构使其孔隙均匀,或优化胶凝物质含量、配比,以期得到力学性能更佳的生土泡沫混凝土。

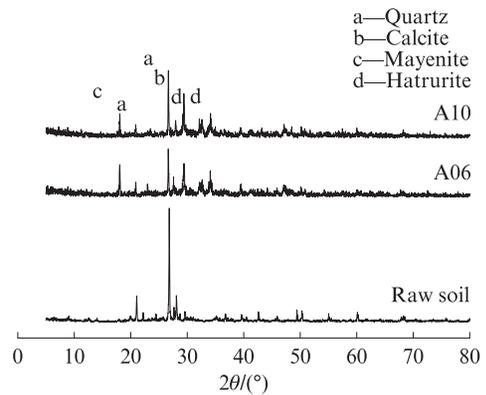


图8 生土泡沫混凝土的XRD图谱
Fig. 8 XRD patterns of raw soil foam concretes

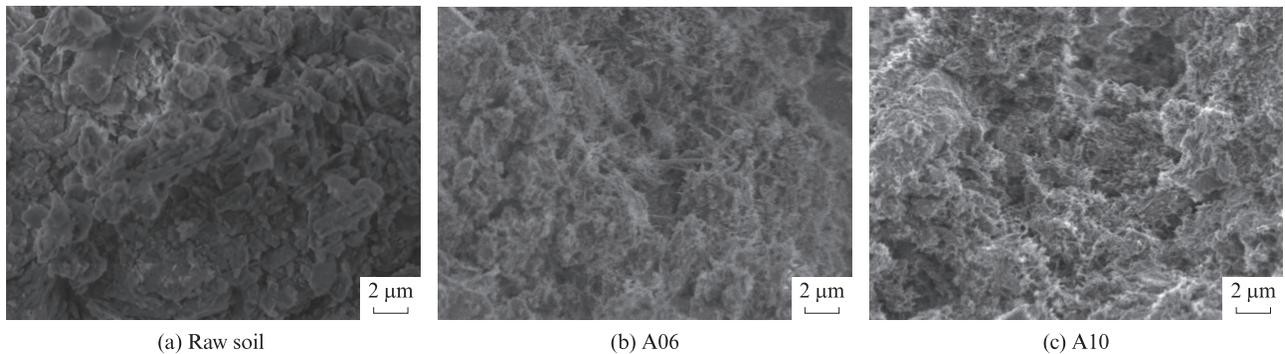


图9 泡沫混凝土微观形貌
Fig. 9 Micro-morphology of raw soil foam concretes

2.2.3 导热系数

泡沫掺量对生土泡沫混凝土导热系数的影响如图10所示。由图10可见:随着泡沫掺量的增大,生土泡沫混凝土的导热系数逐渐降低,试验结果与文献[16]一致;泡沫掺量从6.1%增加至26.4%,生土泡沫混凝土的导热系数从0.25 W/(m·K)降低到0.08 W/(m·K);当密度等级为500 kg/m³时,生土泡沫混凝土的导热系数为0.12 W/(m·K),满足规范要求。生土泡沫混凝土是由孔隙和固相材料所组成的,孔隙中充满空气,固相由水泥水化产物和生土颗粒二者胶结在一起所组成。气相的传热是由气体分子之间的碰撞实现,固相的热传递主要是通过分子或原子的热振动实现^[17-18]。由于固相的导热系数远大于气相,因此随着泡沫掺量的增加,生土泡沫混凝土的孔隙率增加,气相热传导占比逐渐增加,导热系数不断降低。水泥水化产物胶结生土颗粒所组成的固相结构又较纯水泥的水化产物结构更为松散,这也进一步降低了生土泡沫混凝土的导热系数。

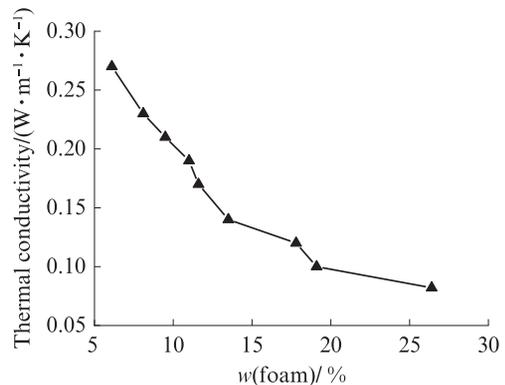


图10 泡沫掺量对生土泡沫混凝土导热系数的影响
Fig. 10 Effect of foam content on thermal conductivity of raw soil foam concretes

2.2.4 吸水率

泡沫掺量对生土泡沫混凝土吸水率的影响如图11所示。由图11可见:随着泡沫掺量的增大,生土泡沫混凝土的吸水率逐渐增加;当泡沫掺量为6.1%时,生土泡沫混凝土的干密度为1167 kg/m³,吸水率为6.5%;当泡沫掺量为19.1%时,生土泡沫混凝土

的干密度为 444 kg/m^3 , 吸水率为 26.4%; 当泡沫掺量增加至 26.4% 时, 生土泡沫混凝土的干密度为 346 kg/m^3 , 吸水率增加至 67.7%。生土泡沫混凝土中孔隙可分为 2 种: 一种是生土颗粒本身存在或堆积形成的微观孔, 这种微观孔本身具有较强的吸湿吸水能力, 随着泡沫掺量的增加, 生土占比降低, 这部分孔隙所占比例减少, 吸水率随之减低; 另一种是生物发泡剂引入的宏观孔, 随着泡沫掺量的增加, 其孔隙率随之增大。与图 3 对比可知, 当泡沫掺量低于 17.8% 时, 生土泡沫混凝土中气孔大多是被凝固的水泥石等固相材料所包围的封闭孔; 当泡沫掺量超过 19.1% 时, 大部分孔隙由封闭变成连通, 提高了宏观孔的吸水率。由图 5 可知, 随着泡沫掺量增加, 生土泡沫混凝土中生物发泡剂引入的宏观孔占比逐渐成为孔隙的主导因素, 致使其吸水率急剧增加。

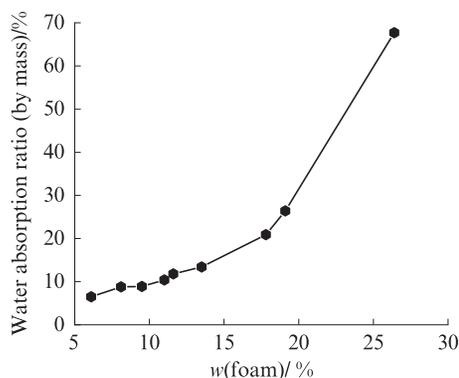


图 11 泡沫掺量对生土泡沫混凝土吸水率的影响

Fig. 11 Effect of foam content on water absorption ratio of raw soil foam concretes

3 结论

(1) 以生土、水泥、聚羧酸减水剂及自制微生物发泡剂为原材料, 采用先预制气泡后混合的方法, 成功制备出 $300 \sim 1200 \text{ kg/m}^3$ 密度等级的生土泡沫混凝土。随着泡沫掺量的增大, 生土泡沫混凝土的孔隙率逐渐升高, 平均孔径逐渐增大, 孔径分布近似遵循高斯分布。

(2) 当泡沫掺量从 6.1% 增加至 26.4% 时, 生土泡沫混凝土的干密度从 1167 kg/m^3 降低至 346 kg/m^3 , 抗压强度从 10.3 MPa 降至 0.8 MPa, 导热系数从 $0.27 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 降至 $0.08 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 吸水率从 6.5% 增加至 67.7%。

(3) 试验设计生土泡沫混凝土的力学性能优于相关国家标准要求, 导热系数低, 保温隔热性能好, 但其泡沫掺量大于 19.1% 时的吸水率有待进一步优化。

参考文献:

- [1] 刘俊霞, 吴晓博, 张茂亮, 等. 改性方法对生土材料水分传输特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):1012-1016.
LIU Junxia, WU Xiaobo, ZHANG Maoliang, et al. Influence of modification on characteristics of moisture transportation of earth materials [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6): 1012-1016. (in Chinese)
- [2] 余海燕, 程海平, 石峻尧, 等. 改性材料对生土物理力学性能的影响及作用机理[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5):1443-1449.
YU Haiyan, CHENG Haiping, SHI Junyao, et al. Effect of modified agent on the physical and mechanical properties of raw-soil and its action mechanism [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(5):1443-1449. (in Chinese)
- [3] 张磊, 桑国臣. 基于正交试验制备生土基复合墙体材料及其热湿综合性能分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):372-380.
ZHANG Lei, SANG Guochen. Hygrothermal comprehensive property of soil based composite wall materials prepared with orthogonal experimental design [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):372-380. (in Chinese)
- [4] 丁苏金, 杨鼎宜, 张磊蕾, 等. 水泥与矿渣对生土基粘结材料抗压强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8):2353-2357, 2364.
DING Sujin, YANG Dingyi, ZHANG Leilei, et al. Analysis on strength of modified raw soil bonding materials influenced by cement and slag [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(8):2353-2357, 2364. (in Chinese)
- [5] 柯书俊, 胡明玉, 李晔, 等. 新型生土材料的调湿性能及导热性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18):134-138.
KE Shujun, HU Mingyu, LI Ye, et al. Humidity-controlling performance and thermal conductivity of new raw soil materials [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(18): 134-138. (in Chinese)
- [6] CIANCIO D, BECKETT C, CARRARO J A, et al. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth [J]. Construction and Building Materials, 2014, 53:59-65.
- [7] KARIYAWASAM K K, JAYASINGHE C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105:519-527.
- [8] TARQUEN, CROWLEY H, PINHOR, et al. Displacement-based fragility curves for seismic assessment of adobe buildings in Cusco, Peru [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(2):759-794.
- [9] LABOREL-PRÉNERON A, AUBERT J E, MAGNIONT C, et al. Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review [J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 719-734.
- [10] IMANZADEH S, JARNO A, HIBOUCHE A, et al. Ductility analysis of vegetal-fiber reinforced raw earth concrete by mixture design [J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117829.
- [11] 陈兵, 胡华洁, 刘宁. 生土泡沫混凝土试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1):1-6.
CHEN Bing, HU Huajie, LIU Ning. Experimental research on

- immature soil-based foam concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(1):1-6. (in Chinese)
- [12] 张磊,张静,张颖,等.生物基发泡剂泡沫特征及其对泡沫混凝土性能的影响[J].*建筑材料学报*,2020,23(3):589-595.
ZHANG Lei, ZHANG Jing, ZHANG Ying, et al. Foam characteristics of biological based foaming agent and its effect on properties of foam concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3):589-595. (in Chinese)
- [13] 荣辉,张静,张磊,等.泡沫混凝土用生物基发泡剂的研制及其性能研究[J].*硅酸盐通报*,2020,39(1):90-95.
RONG Hui, ZHANG Jing, ZHANG Lei, et al. Preparation and performance of bio-based foaming agents for foam concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(1):90-95. (in Chinese)
- [14] 庞超明,王少华.泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响[J].*建筑材料学报*,2017,20(1):93-98.
PANG Chaoming, WANG Shaohua. Void characterization and effect on properties of foam concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(1):93-98. (in Chinese)
- [15] 朱明,王方刚,张旭龙,等.泡沫混凝土孔结构与导热性能的关系研究[J].*武汉理工大学学报*,2013,35(3):20-25.
ZHU Ming, WANG Fanggang, ZHANG Xulong, et al. Research on the relationship between pore structure and thermal conductivity of foamed concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(3):20-25. (in Chinese)
- [16] MA C, CHEN B. Properties of a foamed concrete with soil as filler [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 76:61-69.
- [17] AMRAN Y H, FARZADNIA N, ALI A A, et al. Properties and applications of foamed concrete; A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101:990-1005.
- [18] 陈贤瑞,卢都友,孙亚峰,等.超轻质泡沫地质聚合物保温材料的制备和性能[J].*建筑节能*,2015,43(6):57-60,77.
CHEN Xianrui, LU Duyou, SUN Yafeng, et al. Preparation and performance of ultra-light foam geopolymers as thermal insulating materials[J]. *Building Energy Efficiency*, 2015, 43(6):57-60, 77. (in Chinese)