



基于低碳地聚物的长江下游疏浚砂固化块体 力学性能和干缩特性试验研究^{*}

冯 明¹, 江朝华¹, 孙建伟², 谢兆飞³

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京市江宁区赵村水库管理所, 江苏 南京 211155; 3. 江苏省灌云县水利局, 江苏 连云港 222299)

摘要: 长江下游疏浚砂主要为超细砂(细度模数 0.1~0.5), 粒径小、颗粒级配不均, 工程利用困难。以长江下游疏浚砂为主要原料, 用碱活化低碳地聚物替代普通水泥制备人工块体, 开展力学性能和干缩特性试验研究。采用短切纤维解决碱活化体系造成的易收缩开裂问题。试验结果表明: 1) 在激发剂 Na_2O 摊量为 5%、模数为 1.0 时, 块体 28 d 抗压和劈裂抗拉强度分别为 48.20、6.43 MPa, 后期强度不倒缩。2) 玄武岩和聚丙烯纤维均能明显抑制块体的线性干缩。玄武岩纤维增强力学性能的能力强于聚丙烯纤维, 能够使块体微观结构更致密、整体性更强。

关键词: 疏浚砂; 地聚物; 干燥收缩

中图分类号: U 614

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0018-06

Experimental study on mechanical properties and drying shrinkage characteristics of dredged sand blocks in lower reaches of the Yangtze River based on low-carbon geopolymers

FENG Ming¹, JIANG Chao-hua¹, SUN Jian-wei², XIE Zhao-fei³

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhaocun Reservoir Management Office of Jiangning District, Nanjing 211155, China;

3. Water Conservancy Bureau of Guanyun County, Lianyungang 222299, China)

Abstract: The dredged sand in the lower reaches of the Yangtze River is mainly ultra-fine sand (with a fineness modulus of 0.1-0.5), with small particle size and uneven particle gradation, which can be hardly used in engineering. With dredged sand in the lower reaches of the Yangtze River as the main raw material, we replace ordinary cement with alkali-activated low-carbon geopolymers to prepare artificial blocks and test their mechanical properties and drying shrinkage characteristics. Moreover, we use chopped fibers to solve the problem of easy shrinkage and cracking caused by the alkali activation system. The test results show that: 1) When the content of the activator Na_2O is 5%, and the modulus is 1.0, the compressive strength and splitting tensile strength of the blocks after 28 days are 48.20 and 6.43 MPa, respectively, and the strength does not shrink in the later period. 2) Both basalt and polypropylene fibers can significantly inhibit the linear drying shrinkage of the blocks. Basalt fibers have stronger mechanical properties than polypropylene fibers, which can make the microstructure of blocks more compact and more integrated.

Keywords: dredged sand; geopolymer; drying shrinkage

收稿日期: 2022-04-17

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600200); 广西重点研发计划项目(2021AB22114)

作者简介: 冯明(1999—), 男, 硕士研究生, 从事航道疏浚废弃物固化研究工作。

近年来, 随着国家节约资源、环境保护、长江大保护等政策发布实施, 天然砂石材料面临严重短缺和枯竭。随着长江南京以下 12.5 m 深水航道全线贯通, 下游航道维护要求提高, 2021 年长江江苏段维护性疏浚达 1 703 万 m³。长期以来大量疏浚砂被抛入深槽, 直接危害生态环境, 且给防洪带来隐患。疏浚砂的合理处置和资源化利用, 对保护环境、缓解天然砂石短缺具有重要意义。此外, 传统混凝土材料所使用的水泥为高能耗、高污染材料, 与现有生态理念不符。新型低碳地聚物材料是利用粉煤灰、矿渣等硅铝质原料经过碱激发形成, 具有凝结硬化快、早期强度高、耐酸碱腐蚀、耐高温等特性, 在水运、工程修复及高强材料等领域具有广阔的应用前景。

目前, 利用地聚物材料固化疏浚废弃物的研究尚处于起步阶段。Slimanou 等^[1]用偏高岭土固化贝加亚港疏浚工程的挖沙底泥废弃物, 其中 15wt% 的挖沙底泥废弃物掺入经过煅烧的偏高岭土中形成的地聚物, 抗压强度达到 22 MPa, 且化学稳定性好; Lirer^[2]将疏浚砂土与粉煤灰结合, 制备了一种具有一定力学性能的地聚物基质, 用疏浚砂土制成的复合材料微观结构比用普通砂的更致密, 具有更好的力学性能。此外, 碱活化地聚物材料体

系会产生显著的干缩, 引起材料的不均匀变形, 导致有害开裂的形成^[3], 这些有害裂缝严重降低结构的承载能力、影响地聚物材料的耐久性。

本研究以长江下游的航道疏浚超细砂为主要原料、以水玻璃+氢氧化钠为复合碱激发剂、以矿粉基低碳地聚物胶凝材料替代普通水泥制备人工块体, 揭示激发剂 Na₂O 掺量和模数对块体力学性能影响规律, 并以短切纤维解决碱活化胶凝材料干缩大、易开裂的问题, 为航道整治疏浚废弃物的资源化利用提供有效的途径。

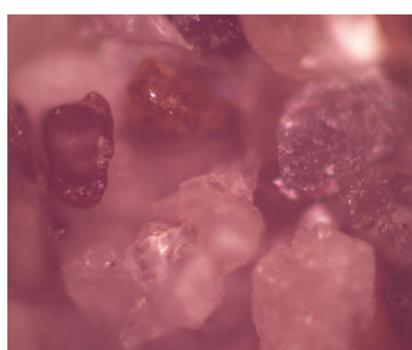
1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验用长江下游的疏浚砂, 主要氧化物组成见表 1, 砂样细度模数 0.1~0.5, 属于超细砂。采用偏光显微镜进行砂样颗粒形貌分析, 砂样呈现透明或半透明形态, 颗粒独立, 颗粒之间无黏结。试验所用矿粉的主要氧化物组成见表 1, 激发剂为水玻璃+氢氧化钠复合激发剂, 氢氧化钠为固体片状、纯度为 99.8%; 玄武岩纤维长度 6 mm、密度 2.7 g/cm³; 聚丙烯纤维长度 12 mm、密度 0.91 g/cm³; 减水剂为聚羧酸高效减水剂, 减水率为 25%。试验材料见图 1。

表 1 疏浚砂、矿粉主要氧化物组成

材料	组成/%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃
疏浚砂	63.73	14.33	4.82	8.54	3.42	2.70	1.36	0.658	0.04
矿粉	42.00	16.00	-	40.00	-	-	-	-	-



a) 疏浚砂颗粒形貌



b) 玄武岩纤维



c) 聚丙烯纤维

图 1 试验材料

1.2 试验方法

1.2.1 试样制备

试验配合比为：每立方米地聚物砂浆中含有矿粉 566 kg、疏浚砂 1 132 kg，水胶比 0.5，减水剂为矿粉质量的 0.8%。试验开始前，配备一定浓度的 NaOH 溶液，冷却后用 NaOH 溶液和水玻璃分别配备模数 0.5、1.0、1.5 的复合激发剂溶液，改变 Na₂O 掺量依次为矿粉质量的 3%、4%、5%、6%。依照方案，首先将矿粉、复合激发剂、水、减水剂加入水泥胶砂搅拌机内搅拌 1.5 min，随后铲掉搅拌机叶片上的黏结料，加入疏浚砂继续搅拌 2 min。将搅拌完成的地聚物砂浆加入试模中，在混凝土振动台上先振动 1.5 min，然后添加满物料，再次震动 2 min，以减少浆体中的气泡。成型后需在试模表面覆盖一层薄膜，养护至规定龄期脱模。

在经由上述方案确定的最优 Na₂O 掺量和水玻璃模数下，采用外掺法，添加胶砂体积分数依次为 0.1%、0.2%、0.3% 的玄武岩纤维和聚丙烯纤维，研究纤维对地聚物固化疏浚砂块体的力学性能和干缩特性的影响。试验开始前，需先将疏浚砂和纤维预混，再按前述相关步骤进行。

1.2.2 测试方法

按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》进行力学试验，采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 三联试模。24 h 后脱膜，室温 (25~30 °C，湿度 65%) 养护至规定龄期，分别进行抗压强度和劈裂

抗拉强度试验。

按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》进行干燥收缩试验，采用 40 mm×40 mm×160 mm 三联试模。试验所用比长仪的位移传感器，精度为 0.001 mm。24 h 后脱膜，室温养护至规定龄期，以脱模时间作为收缩测试的零点，测定其在不同阶段的收缩变形。

2 试验结果和讨论

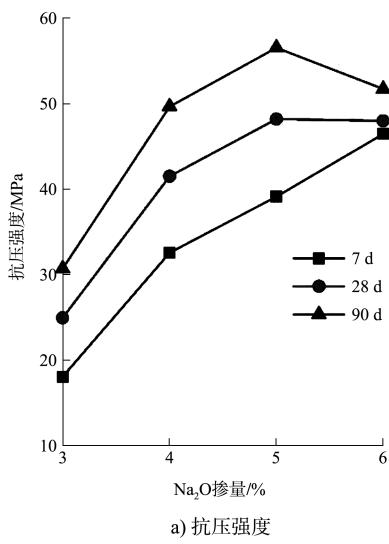
2.1 力学性能试验结果

2.1.1 Na₂O 掺量对力学性能的影响

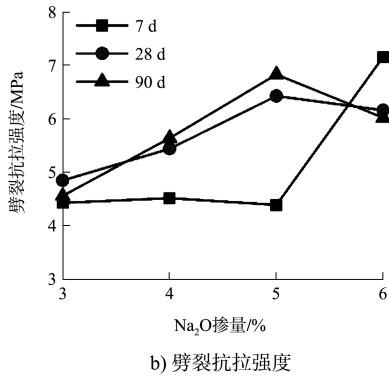
矿粉基地聚物固化疏浚砂块体的力学性能试验结果见表 2。由表 2 可知，Na₂O 掺量 5%、模数 1.0 时，90 d 抗压和劈裂抗拉强度均达到峰值，分别为 56.53 和 6.83 MPa。图 2 为模数 1.0 时块体各龄期力学性能和 Na₂O 掺量的关系，可以看出：1) 随着 Na₂O 掺量增加，各龄期的抗压和劈裂抗拉强度总体呈现增长趋势，这是由于 Na₂O 掺量的增加导致碱浓度偏高，较高的碱浓度有利于硅铝质原料的溶解，使块体强度显著提高。2) 当 Na₂O 掺量由 5% 增加到 6%，7 d 抗压和劈裂抗拉强度分别提高 18.7%、63.1%，90 d 抗压和劈裂抗拉强度反而分别降低 8.5%、11.9%，主要原因是高掺量 Na₂O 虽然促进了体系前期的水解和凝结硬化，然而由于凝结速率过快导致部分硅铝材料还未得及完全溶解，使后期力学性能变差，易发生早凝现象^[4]。

表 2 块体在不同 Na₂O 掺量和模数下的力学性能试验结果

Na ₂ O 掺量/%	水玻璃 模数	抗压强度/MPa			劈裂抗拉强度/MPa		
		7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
3	0.5	20.18	30.78	33.83	4.35	4.68	4.46
3	1.0	18.03	24.93	30.70	4.43	4.85	4.56
3	1.5	12.48	21.00	23.31	3.44	4.53	4.62
4	0.5	24.12	40.96	42.73	4.41	4.34	4.51
4	1.0	32.55	41.50	49.65	4.52	5.44	5.64
4	1.5	23.91	29.89	39.85	4.81	4.87	4.68
5	0.5	32.90	42.86	52.50	4.24	3.89	4.04
5	1.0	39.11	48.20	56.53	4.39	6.43	6.83
5	1.5	42.11	51.48	53.14	5.30	5.86	5.42
6	0.5	32.52	47.83	54.35	5.57	4.54	6.14
6	1.0	46.44	47.99	51.70	7.16	6.16	6.02
6	1.5	43.12	50.53	56.12	5.96	6.11	6.32



a) 抗压强度



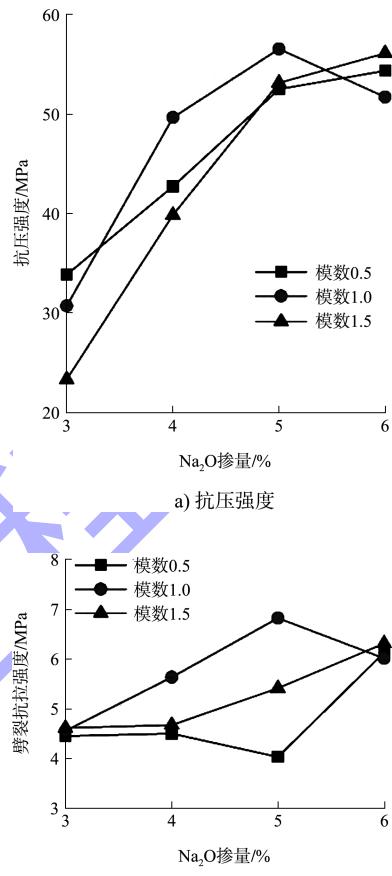
b) 剪裂抗拉强度

图 2 模数 1.0 时块体各龄期力学性能和 Na₂O 掺量的关系

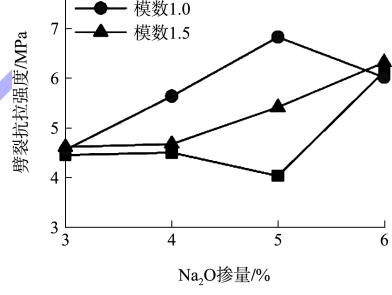
2.1.2 水玻璃模数对力学性能的影响

水玻璃模数等于激发剂中 SiO₂ 和 Na₂O 的摩尔比值, Na₂O 掺量相同时, 模数越大则激发剂中硅元素含量越多。图 3 为 Na₂O 掺量和模数对块体 90 d 力学性能的影响, 由图 3 可知: 1) 当 Na₂O 掺量为 4%、5% 时, 模数为 1.0 块体的 90 d 抗压和劈裂抗拉强度最大。这说明体系中适量的硅元素有利于材料的缩聚反应, 能够增加产物中三维网状胶凝结构的数量、提高块体的强度^[5]。但是模数为 1.5 时, 力学性能反而降低, 这是因为过量的硅元素会抑制体系前期的解聚反应, 使得大量未反应的矿粉颗粒残留于块体中充当填料, 其他学者在偏高岭土^[6] 和粉煤灰^[7] 地聚物的研究中也有类似结论。2) 当 Na₂O 掺量为 3% 时, 由于碱掺量不够, 硅铝材料前期解聚程度不够, 模数变大反而进一步抑制了解聚反应, 导致抗压强度随着模数增加而降低。3) 当 Na₂O 掺量为 6% 时, 由于

碱掺量过多, 易发生早凝现象, 此时模数对力学性能的影响程度要远低于 Na₂O 掺量对力学性能的影响程度。



a) 抗压强度



b) 剪裂抗拉强度

图 3 块体 90 d 力学性能和 Na₂O 掺量、模数的关系

2.1.3 纤维掺量对力学性能的影响

综合力学性能和经济因素, 选取 Na₂O 掺量 5%、模数 1.0 为对照组, 向对照组中添加体积掺量 0.1%、0.2%、0.3% 的玄武岩纤维(BF) 和聚丙烯纤维(PPF), 力学性能试验结果见图 4。从图 4 可以看出: BF 能显著增强块体的力学性能且抗压和劈裂抗拉强度都随着纤维掺量增加而增大; 相比之下, PPF 掺量的增加略微提升了块体早期抗压强度, 但是对抗压强度长期发展具有不利影响, 且随着掺量增多, 长期抗压强度下降越严重, 甚至产生倒缩。主要原因有两点: 一是 PPF 在体系中分散的不均匀性或者纤维掺量过多致使出现纤维“团聚”现象, 使得块体内部产生了薄弱区, 进而降低了块体的抗压强度; 二是由于 PPF 的疏水性导致与基体不能紧密接触, 夹带了空气进入,

导致块体强度下降^[8]。

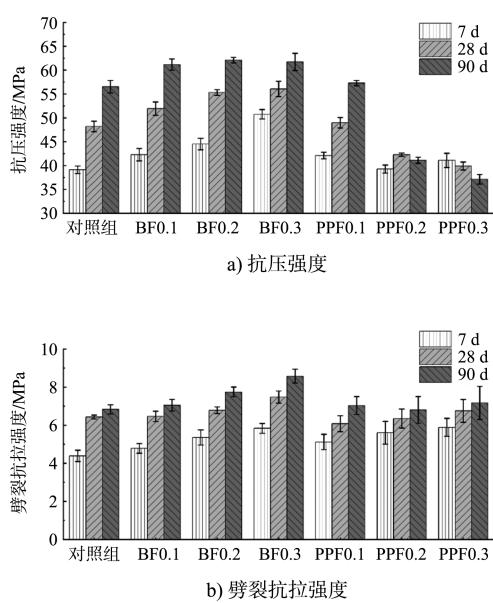


图 4 纤维掺量对力学性能的影响

图 5 为 BF 和 PPF 掺量对地聚物固化疏浚砂的 90 d 块体密度的影响。由于 PPF 的密度比地质聚合物浆料低, 且 PPF 易携带大量空气, 造成地质聚合物复合材料密度降低。当 PPF 掺量由 0.1% 增加至 0.2% 时, 块体密度降低约 6.3%。与 PPF 不同, BF 掺量的增加, 对复合材料密度的演变有积极的影响。BF 良好的亲水性增加了材料基质的接触面积, 在体系中也起着微集料的作用。同时, BF 在体系中的三维乱向分布能够传递应力降低干缩, 在一定程度上可以阻塞毛孔使微观结构更加致密。

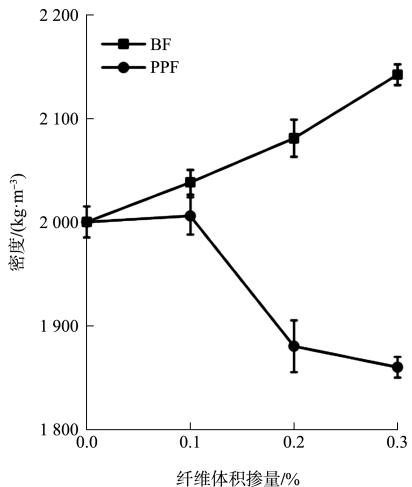


图 5 纤维掺量对 90 d 试块密度的影响

2.2 干缩抑制试验结果和分析

碱活化材料在反应的过程中, 由于毛细孔失水, 使得干湿带间产生高毛细压力, 导致裂缝的产生, 这是干燥收缩的主要原因。纤维在体系中散乱的无定向分布, 起到了桥接和缝合这些微小裂缝的作用, 进而降低了干缩值。图 6 为添加玄武岩和聚丙烯纤维对块体线性干缩值的影响。在对照组中, 未掺入纤维, 干缩值在 30 d 后趋于稳定, 120 d 干缩值达 0.65 mm/m。图 6a) 中, BF0.1、BF0.2、BF0.3 组的 120 d 干缩值分别为 0.54、0.44、0.39 mm/m, 与对照组相比, 分别降低了 16.9%、32.3%、40.0%。图 6b) 中, 很小百分比的 PPF 能显著抑制块体的干缩, PPF0.1 组的 120 d 干缩值为 0.36 mm/m, 比对照组降低 44.6%。

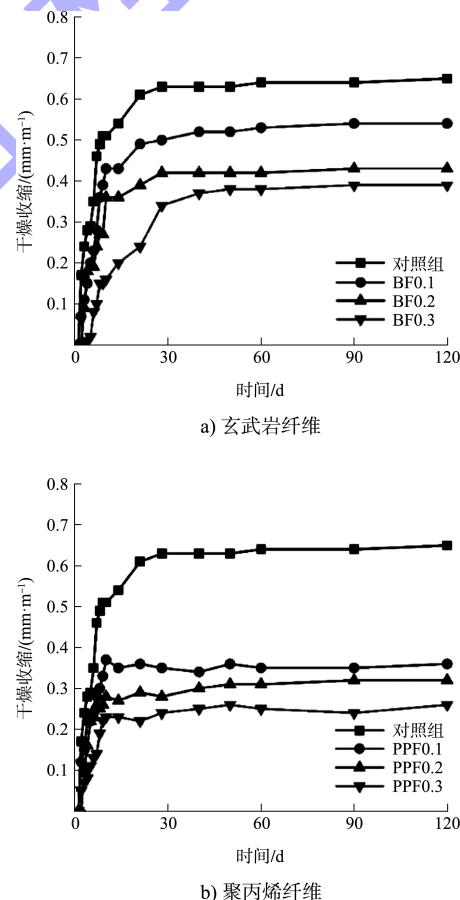


图 6 纤维掺量对块体干燥收缩值的影响

2.3 技术环境评价

按照使用时砌筑墙体的受力情况, 砌块可分为承重结构用 L 类砌块和非承重结构用 N 类砌块。根据 GB/T 8239—2014《普通混凝土小型砌块》,

L类砌块的线性干燥收缩值应不大于0.45 mm/m, N类砌块的线性干燥收缩值应不大于0.65 mm/m。本技术方案中, 在激发剂Na₂O掺量5%、水玻璃模数1.0的条件下, 对照组和BF0.1组能够满足N类砌块的线性干缩要求, BF0.2、BF0.3、PPF0.1组能满足L类砌块线性干缩要求, 且均具有较高的力学性能。PPF0.2、PPF0.3组的干缩值进一步降低, 但由于PPF自身的易“团聚”现象和疏水性, 极易导致块体后期力学性能下降(表3)。

表3 纤维对地聚物固化疏浚砂的技术参数

编号	玄武岩纤 维掺量/%	聚丙烯纤 维掺量/%	线性干缩值/ (mm·m ⁻¹)	90 d 抗压 强度/MPa	90 d 剪拉 强度/MPa
对照组	0	0	0.65	56.53	6.83
BF0.1	0.1	0	0.54	61.17	7.05
BF0.2	0.2	0	0.43	62.10	7.75
BF0.3	0.3	0	0.39	61.73	8.58
PPF0.1	0	0.1	0.36	57.29	7.04
PPF0.2	0	0.2	0.32	41.09	6.80
PPF0.3	0	0.3	0.26	37.12	7.17

近年来, 国内对砂石能源开采加以限制, 供需矛盾突出, 原材料价格上涨。用低碳地聚物替代普通水泥固化疏浚砂, 将其制作成护面砖、压载块等港航、水工领域的人工块体, 能够有效解决疏浚砂堆积和抛填问题, 实现废弃疏浚砂的高附加值利用; 同时有效使用矿粉等硅铝质工业废渣, 降低了水泥使用量, 减小水泥生产运输过程中的碳排放和能源消耗, 为碳达峰、碳中和贡献力量。

3 结论

1)以长江下游超细疏浚砂为主要原料, 矿粉基低碳地聚物胶凝材料替代普通水泥, 制备人工块体, 在Na₂O掺量5%、模数1.0时, 28 d抗压和劈裂抗拉强度分别为48.20和6.43 MPa, 90 d抗压和劈裂抗拉强度分别为56.53和6.83 MPa。

2)Na₂O掺量和水玻璃模数是影响试块力学性能的重要因素。试块强度随着Na₂O掺量增加而增大, 但是掺量过高时, 砂浆凝结速率过快, 后期

强度会降低; 在同一Na₂O掺量下模数反映体系中硅元素含量, 适量的硅元素有利于材料的缩聚反应、提高强度, 硅含量过多会抑制材料的解聚和聚合、强度反而降低。

3)短切纤维的掺加解决了碱活化材料易干缩开裂的难题。随着玄武岩纤维掺量的增加, 试块的抗压和劈裂抗拉强度都呈现增大趋势, 对应线性干缩值不断降低。聚丙烯纤维能显著抑制干缩, 但掺量增加不利于长期抗压强度的发展。通过添加短切纤维, 本试验方案中的块体能够满足工程应用要求, 同时兼具显著的环境效益, 为疏浚废弃物的建材资源化利用提供基础和借鉴。

参考文献:

- [1] SLIMANOU H, BOUGUERMOUH K, BOUZIDI N. Synthesis of geopolymers based on dredged sediment in calcined and uncalcined states [J]. Materials letters, 2019, 251: 188-191.
- [2] LIRER S, LIGUORI B, CAPASSO I, et al. Mechanical and chemical properties of composite materials made of dredged sediments in a fly-ash based geopolymer [J]. Journal of environmental management, 2017, 191: 1-7.
- [3] 赵人达, 王永宝, 原元, 等. 地聚物混凝土收缩研究综述 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(6): 1695-1702.
- [4] 章定文, 王安辉. 地聚合物胶凝材料性能及工程应用研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 13-38.
- [5] 杨达, 卢明阳, 宋迪, 等. 地质聚合物水泥的研究进展 [J]. 材料导报, 2021, 35(S1): 644-649.
- [6] STEVESON M, SAGOE-CRENTSIL K. Relationships between composition, structure and strength of inorganic polymers-Part 1-Metakaolin-derived inorganic polymers [J]. Journal of materials science, 2005, 40(8): 2023-2036.
- [7] 童国庆, 张吾渝, 高义婷, 等. 碱激发粉煤灰地聚物的力学性能及微观机制研究 [J]. 材料导报, 2022, 36(4): 129-134.
- [8] FARHAN K Z, JOHARI M A M, DEMIRBOĞ A R. Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: a review [J]. Journal of building engineering, 2021, 44: 102628.