

粉煤灰基地聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究

陈忠清, 朱泽威, 吕越

Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil

CHEN Zhongqing, ZHU Zewei, and LYU Yue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析

Mechanical properties and mechanism analyses of rice husk ash geopolymer solidified soil

易富, 管茂成, 李军, 杜常博 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 94-101

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115

砂土地基冲击碾压加固效果影响因素的试验研究

Laboratory investigation on influencing factors of improvement effect of rolling dynamic compaction on sand

陈忠清, 朱文韬, 吕越, 黄曼, 李明东 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 128-134

基于圆弧主应力迹线的黏性土主动土压力分析

An analysis of active earth pressure of cohesive soil based on the layering of principal stress traces

王佳宇, 曹文贵, 王雨波, 张慧姐 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 81-88

基于主应力旋转的黏性填土挡墙土压力

The earth pressure of retaining wall with cohesive fill based on principal stress rotation

王恒利, 邹正盛, 刘京敏, 王新宇 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 64-71

冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化

Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action

杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 57-65



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111045

陈忠清, 朱泽威, 吕越. 粉煤灰基地聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 100-108.
CHEN Zhongqing, ZHU Zewei, LYU Yue. Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 100-108.

粉煤灰基地聚物加固土的强度及 抗冻融性能试验研究

陈忠清^{1,2}, 朱泽威¹, 吕越^{1,2}

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000;
2. 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 粉煤灰基地聚物作为一种低碳胶凝材料, 在地基处理中的应用越来越受到关注。但是目前关于碱激发胶凝材料加固土在冻融极端气候条件下的工程特性尚不清楚, 有必要进一步开展冻融循环条件下加固土的强度、变形特征及其影响因素研究。通过室内试验研究了原材料硅铝比、碱激发剂模数及碱溶液浓度对粉煤灰基地聚物固化土的强度与抗冻融性能的影响及微观机理。结果表明: 地聚物加固土的无侧限抗压强度在碱激发剂模数增大及碱溶液浓度减小条件下, 表现出降低趋势, 而与原材料硅铝比之间在 1.15 ~ 1.35 范围内呈现出正相关变化趋势, 28 d 地聚物加固土的无侧限抗压强度最高可达 8.98 MPa; 当硅铝比在 1.25 ~ 1.35 范围、碱溶液浓度为 5.42 ~ 22.78 mol/L 时, 28 d 地聚物加固土能够抵御 1 次以上冻融循环, 最高可达 6 次; 地聚物加固土表现出最佳的抗冻融性能与聚合反应生成的凝胶数量多且以富硅相为主相关, 而表现出抗压强度高则与聚合反应生成的凝胶数量多且以富铝相为主相关。研究成果将为粉煤灰地基地聚物加固土配合比设计提供技术参考, 促进碱激发胶凝材料在地基处理中的应用。

关键词: 地基处理; 粉煤灰基地聚物; 黏性土; 冻融循环; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0100-09

Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil

CHEN Zhongqing^{1,2}, ZHU Zewei¹, LYU Yue^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

Abstract: As a low-carbon cementitious material, the application of fly ash based geopolymer in ground improvement has attracted more and more attention. However, the engineering characteristics of the soil stabilized by alkali activated cementitious material under the freezing-thawing extreme climate conditions are not clear. It is necessary to further study the strength, deformation characteristics and their influencing factors of the improved soil under the freezing-thawing cycle. Several laboratory tests are carried out to investigate the effects of the ratio of silicon to aluminum in raw material (Si/Al), modulus of alkali-activator and alkali solution concentration on the unconfined compressive strength (UCS) and the freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer

收稿日期: 2021-11-16; 修订日期: 2021-12-23

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY22D020001)

第一作者: 陈忠清(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地基处理及固体废弃物资源化研究。E-mail: q_chen_yk@163.com

stabilized soil, and the corresponding micro mechanism. The results show that (1) the UCS of geopolymer stabilized soil decreases with the increasing alkali-activator modulus and the decreasing alkali solution concentration, while increases with the Si/Al value in the range of 1.15 to 1.35, and the unconfined compressive strength of 28 d geopolymer stabilized soil can reach 8.98 MPa. (2) When the Si/Al value changes from 1.25 to 1.35 and the alkali solution concentration is within the range of 5.42 to 22.78 mol/L, the 28 d geopolymer stabilized soil can resist more than one (up to 6) freezing-thawing cycle. (3) The best performance of the freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil is mainly related to large number of Si-rich aluminosilicate gel generated by polymerization, while the highest compressive strength is related to the amount of Al-rich aluminosilicate gel generated by polymerization. The research results will provide technical reference for the mix design of soil stabilization with fly ash based geopolymer, and promote the application of alkali activated cementitious material in ground improvement.

Keywords: ground improvement; fly ash based geopolymer; cohesive soil; freezing-thawing cycle; unconfined compressive strength

法国学者 Davidovits^[1] 在 20 世纪 70 年代提出一种新的无机硅铝酸盐胶凝材料——地聚物 (geopolymer)。地聚物可利用粉煤灰、矿渣等富含硅铝的固体废物通过碱激发制备而成,且研究表明生产地聚物所产生的二氧化碳排放量一般比普通硅酸盐水泥低 60%~80%^[2]。与直接掺入粉煤灰改善土体力学性质的传统地基处理方法相比^[3-4],将粉煤灰碱激发生成地聚物,作为普通硅酸盐水泥的替代物及其在软土地基处理中的应用受到越来越多的关注^[5]。

国外在 21 世纪初最早开始了碱激发胶凝材料加固不同类型地基的试验研究。比如: Cristelo 等^[6]进行了低钙粉煤灰地质聚合物加固砂质黏土地基的室内配比和现场试验研究,证实了地质聚合物在软土地基加固领域(尤其是高压喷射注浆法)的良好应用前景,并得到地聚物加固土养护 28 d 的强度低于水泥土的强度,但 90 d 强度超过水泥土的强度,且仅达到养护 365 d 强度的 40%~60%。Cristelo 等^[7]进一步研究得到碱激发条件下低钙粉煤灰对软土地基的长期加固有利,而高钙粉煤灰则有利于软土地基加固土的短期强度增长。Sargent 等^[8]、Teing 等^[9]、Al-Rkaby^[10]、Corrêa-Silva 等^[11]分别开展了碱激发胶凝材料加固软弱冲积土、残积土、砂土及黏性土的试验研究,均表现出明显的加固效果。Corrêa-Silva 等^[12]进一步研究了磨粒高炉渣碱激发胶凝材料固化软弱冲积土的应力应变行为,得到加固土的前期固结压力明显增大,并表现出典型的水泥土应力应变关系特征。

近些年国内学者也陆续开展了碱激发胶凝材料加固地基的相关研究。比如:孙秀丽等^[13]通过碱激发

粉煤灰和矿粉固化疏浚淤泥,常温养护下 28 d 的抗压强度达到 12 MPa。王东星等^[14]开展了养护龄期、激发剂类型及掺量多种因素影响下碱激发 F 级低钙粉煤灰固化淤泥的抗压强度、化学组分及微观特征等研究。俞家人等^[15]分析了矿渣碱激发胶凝材料固化软黏土过程中碱激发剂模数和掺量对固化效果的影响。吴俊等^[16]利用矿渣-粉煤灰地质聚合物固化淤泥质黏土,分析了硅铝原材料之比、固体激发剂与原材料比及水灰比对固化土抗压强度的影响。王伟齐等^[17]以电石渣和原状灰为原料,在聚羧酸硅酸钠、硫酸钠及三乙醇胺复合碱激发条件下开展了固化海相软土的试验研究。可以看到,现有的国内外研究侧重于不同类型碱激发胶凝材料加固不同软弱地基的效果,以及加固土的化学与力学行为特征,而关于冻融循环条件下碱激发胶凝材料加固土的行为特征及其影响因素研究还鲜有报道。

目前已有少量关于地聚物混凝土抗冻融性能的研究报道,得到矿渣基地聚物混凝土可以抵抗超过 300 次的快速冻融循环^[18],掺 50% 矿渣的低钙粉煤灰基地聚物混凝土可以抵抗 225 次的快速冻融循环^[19],并指出地聚物混凝土的抗冻融性能与原材料的硅铝比^[20-21]、钠铝比^[20-21]、模数^[22]等因素有关。为充分把握碱激发胶凝材料加固土在冻融极端气候条件下的工程特性,有必要进一步开展冻融循环条件下碱激发胶凝材料加固土的强度、变形等变化特征及其影响因素研究。本文以低钙粉煤灰为主要原料,以氢氧化钠和硅酸钠为碱激发剂制备地聚物,进行黏性土加固的室内试验研究,分析不同原材料硅铝比、碱激发剂

模数及碱溶液浓度对地聚物加固黏性土的无侧限抗压强度(UCS)与抗冻融性能的影响,并基于扫描电镜(SEM)、X射线能谱(EDS)和红外光谱(FTIR)等测试手段进行微观影响机理的分析。研究将为粉煤灰基地聚物在地基处理实际应用过程中配合比的合理设计提供技术参考。

1 试验材料及仪器设备

试验用土为取自浙江绍兴某建筑工地的黏性土,取样深度为 5 m,其基本物理性质指标如表 1 所示,颗粒级配曲线及 XRD 结果分别如如图 1 和图 2(a)所示。土的化学组分测试结果显示,其主要化学成分含量为: SiO₂ 为 63.40%, Al₂O₃ 为 18.11%, CaO 为 2.29%, Fe₂O₃ 为 7.79%, MgO 为 2.37%, TiO₂ 为 1.11%。

粉煤灰(FA)来源于浙江绍兴市某热电厂,为 N 级

表 1 试验用土的主要物理性质指标

Table 1 Main physical properties of the test soil

天然含水率w/%	液限w _L /%	塑限w _p /%	液性指数I _L	塑性指数I _p
43.0	45.0	22.5	0.91	22.5

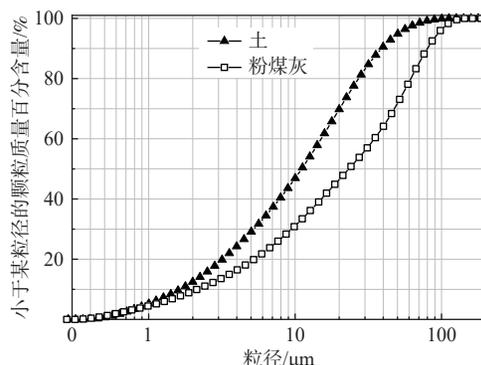


图 1 试验材料的级配曲线

Fig. 1 Grain size curves of the test materials

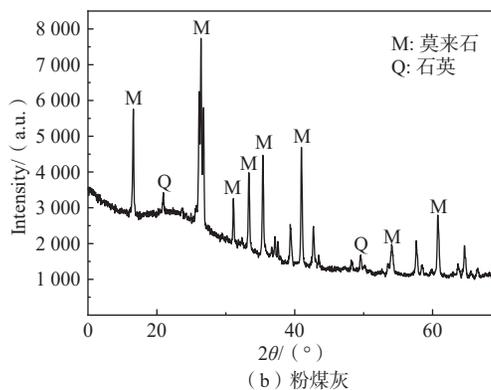
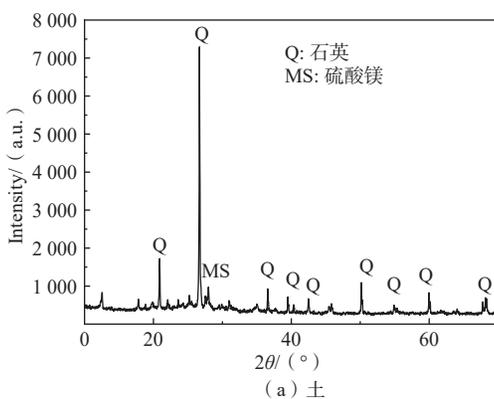


图 2 粉煤灰及试验用土的 XRD 图

Fig. 2 XRD results of the fly ash and test soil

低钙粉煤灰^[23],其主要化学组分测试结果显示: SiO₂ 为 46.11%, Al₂O₃ 为 38.17%, CaO 为 4.30%, Fe₂O₃ 为 3.83%, MgO 为 0.12%, TiO₂ 为 1.98%。粉煤灰的颗粒粒径分布如图 1 所示, XRD 测试结果如图 2(b)所示。

试验采用的碱激发剂由市售工业水玻璃和氢氧化钠溶液配制而成,其中水玻璃中 SiO₂ 质量分数为 29.84%、Na₂O 为 13.36%,水玻璃模数(SiO₂/Na₂O 摩尔比)为 2.11,氢氧化钠为分析纯,纯度为 95%~99%。

1.1 仪器设备

无侧限抗压强度试验采用 UTM5000 型 60 t 电子伺服万能材料试验机,微观分析采用 JSM-6360 LV 型扫描电子显微镜,物相分析采用 Empyrean 型 X 射线衍射仪,官能团和元素成键分析采用 NEXUS 型傅里叶变换红外光谱仪。

2 试验方案

2.1 配合比设计

试验所用粉煤灰中的二氧化硅质量分数为 46.11%、氧化铝为 38.17%;所用水玻璃中的二氧化硅质量分数为 29.99%、氧化钠为 13.75%。通过水玻璃调整原材料的硅铝比(Si/Al),通过固体氢氧化钠调整碱激发剂的模数(M),通过添加水调整地聚物混合物的水固比(L/S),计算公式如下:

$$n(\text{Si}) = \frac{m_1 \times 0.4611 + m_2 \times 0.2999}{60} \quad (1)$$

$$n(\text{Al}) = 2 \times \frac{m_1 \times 0.3817}{102} \quad (2)$$

$$\text{Si/Al} = \frac{n(\text{Si})}{n(\text{Al})} = \frac{n(\text{SiO}_2)}{2n(\text{Al}_2\text{O}_3)} \quad (3)$$

$$M = \frac{n(\text{SiO}_2)}{n(\text{Na}_2\text{O})} \quad (4)$$

$$M = \frac{m_2 \times 0.2999/60}{m_2 \times 0.1375/62 + m_3/(2 \times 40)} \quad (5)$$

$$L/S = \frac{m_2 \times (1 - 0.2999 - 0.1375) + m_4}{m_1 + m_2 \times (0.2999 + 0.1375) + m_3} \quad (6)$$

式中: m_1 ——粉煤灰的质量;

m_2 ——水玻璃的质量;

m_3 ——固体氢氧化钠的质量;

m_4 ——外加水的质量。

试验配比方案如表 2 所示。A 表示粉煤灰与碱激发剂质量比, B 表示水玻璃溶液与氢氧化钠溶液质量比, C 表示氢氧化钠溶液的浓度, 粉煤灰与湿土质量之比 (F/S) 均为 20%。

表 2 试验分组
Table 2 Test groups

组号	Si/Al	M	L/S	C/(mol·L ⁻¹)	A	B
A1	1.15	1.0	0.3	4.66	2.17	0.67
A2	1.15	1.2	0.3	3.25	2.25	0.71
A3	1.15	1.4	0.3	2.20	2.32	0.75
A4	1.15	1.6	0.3	1.40	2.38	0.78
A5	1.15	1.8	0.3	0.76	2.42	0.80
B1	1.20	1.0	0.3	7.42	1.90	0.97
B2	1.20	1.2	0.3	5.09	1.97	1.05
B3	1.20	1.4	0.3	3.57	2.07	1.15
B4	1.20	1.6	0.3	2.27	2.12	1.23
B5	1.20	1.8	0.3	1.25	2.18	1.29
C1	1.25	1.0	0.3	11.00	1.69	1.29
C2	1.25	1.2	0.3	8.10	1.78	1.46
C3	1.25	1.4	0.3	5.42	1.86	1.65
C4	1.25	1.6	0.3	3.50	1.93	1.80
C5	1.25	1.8	0.3	1.92	1.98	1.94
D1	1.30	1.0	0.3	15.89	1.52	1.64
D2	1.30	1.2	0.3	11.53	1.62	1.95
D3	1.30	1.4	0.3	8.09	1.70	2.26
D4	1.30	1.6	0.3	5.28	1.76	2.56
D5	1.30	1.8	0.3	2.94	1.81	2.86
E1	1.35	1.0	0.3	22.78	1.38	2.02
E2	1.35	1.2	0.3	17.05	1.48	2.51
E3	1.35	1.4	0.3	12.23	1.56	3.04
E4	1.35	1.6	0.3	8.13	1.62	3.61
E5	1.35	1.8	0.3	4.61	1.67	4.23

2.2 试样制备

(1) 将氢氧化钠固体、水玻璃、水根据试验计算配比在烧杯中混合, 使用磁力搅拌器搅拌至溶液澄清备用。

(2) 将烘干后的黏性土粉碎, 加水搅拌 8~10 min, 制成含水率为 43% 的重塑土, 然后依次加入粉煤灰、

碱激发剂, 并搅拌 15min 至充分混合。

(3) 将搅拌后的地聚物加固土分 3 层填入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 模具中并压实, 用刮刀刮去表面土后将模具用铝箔包裹置于烘箱中养护 24 h, 养护温度为 80 °C^[24]。

(4) 将试样脱模, 放入密封袋, 并在标准养护温度下养护 28 d。

2.3 冻融循环试验

参照规范 ASTM D 560—03^[25] 开展地聚物加固土的冻融循环试验, 具体试验过程为:

(1) 将养护 28 d 的加固土试样放置在湿毛巾上 24 h, 每 12 h 调换试样方向, 充分吸水后放入冰箱 (-15 °C) 中 24 h。

(2) 冻期结束后用不锈钢刷刷去试样表面碎屑, 称量碎屑质量。

(3) 加水漫过湿毛巾, 将 1 次冻期后的试样放置在密闭容器中融化 24 h, 每 12 h 调换试样方向, 融化阶段结束后进入下一次冻期。

(4) 冻融 1 次为 1 个循环, 达到 12 次循环或试样质量损失超 5% 时停止试验。

同样参照规范 ASTM D 560—03 进行地聚物加固土的吸水量测试, 分别得到标准养护下的吸水量和毛细水吸水量。

3 试验结果与分析

3.1 无侧限抗压强度

不同试验条件下地聚物加固土养护 28 d 的无侧限抗压强度如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在 Si/Al 相同条件下, 地聚物加固土的强度总体上表现出随着碱激发剂模数的增大 (意味着碱溶液浓度减小) 而降低; 在 Si/Al=1.35 条件下, 当 $M>1$ 时, 地聚物加固土的强度明显较大。在 M 相同条件下, 地聚物加固土的强度总体上表现出随着 Si/Al 的增大而升高, 且当 Si/Al>1.30 时强度快速增长; 当 $M=1.2$ 时, 碱溶液浓度为 17.05 mol/L 的地聚物加固土 (E2 组) 强度最高, 达到 8.98 MPa, 而当碱溶液浓度再提高至 22.78 mol/L 时 (E1 组), 强度发生下降。

3.2 冻融循环次数及吸水量

地聚物加固土的冻融循环次数如表 3 所示, 其中不同 Si/Al 条件下吸水量与冻融循环数随模数变化曲线如图 4 所示。

从表 3 和图 4 可以发现: (1) 标准养护条件下的吸水质量远小于冻融条件下的毛细水吸水质量; (2) 不

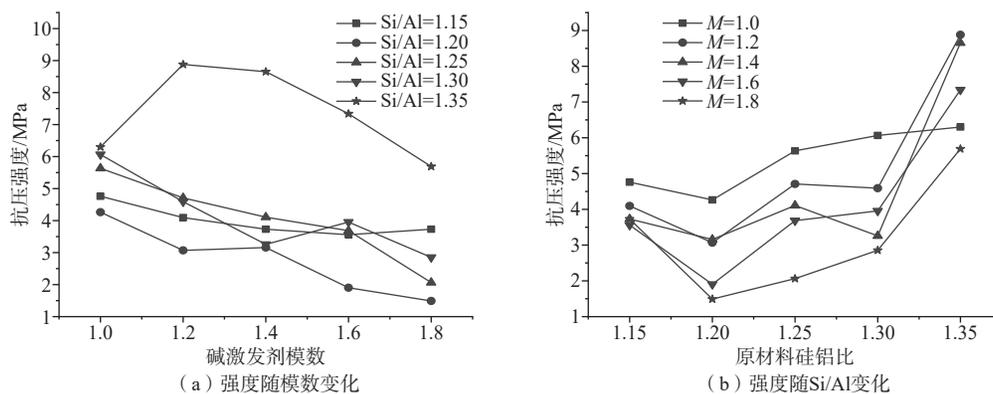


图 3 地聚物加固土 28 d 无侧限抗压强度变化曲线

Fig. 3 Variations of the unconfined compressive strength of geopolymer stabilized soil after 28 days of curing

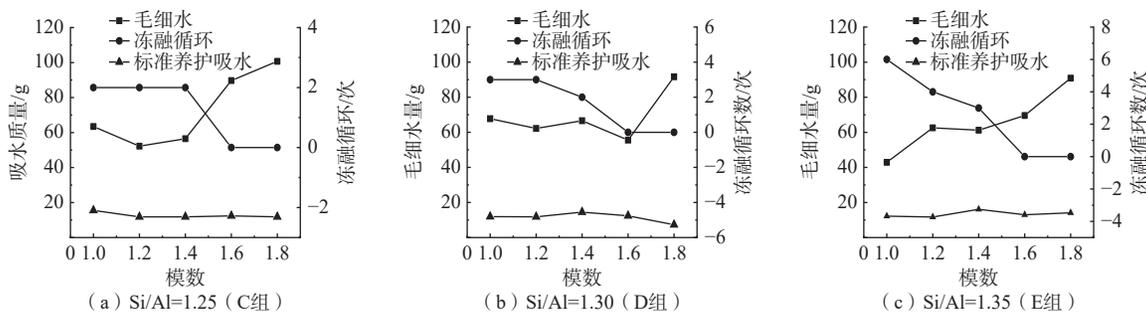


图 4 吸水量与冻融循环数随模数变化曲线

Fig. 4 Variations of water absorption and freezing-thawing cycles with modulus

表 3 地聚物加固土的冻融循环次数

Table 3 Freezing-thawing cycles of different groups

组号	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3
冻融循环次数	2	2	2	3	3	2	6	4	3

注: 其余试验组的冻融循环次数均小于2次。

同硅铝比呈现出随着水玻璃掺量增多吸水量减少的规律; (3) C、D、E 组试样在前 3 个模数(1.0, 1.2, 1.4) 的毛细水质量相差不大, 后 2 个模数吸水质量增多, 较为不同的是 E 组模数为 1.0 时吸水质量最少; (4) 比较吸水量与冻融循环次数曲线, 毛细吸水量与冻融循环数具备良好的相关性, 呈毛细水吸水量增多抗冻循环数下降规律。

3.3 XRD

B1 组 ($A=1.90$) 与强度最优的 E2 组 ($A=1.48$) 地聚物加固土的 XRD 结果如图 5 所示。由图 5 可以看出: (1) 在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的 2θ 之间 B1、E2 上弥散的凸起说明物相的无定形态, 加固土样品特征峰多为土中的石英(Quartz), 新生成物质主要为方钠石(Sodalite), 是由莫来石(Mullite)在碱性环境下反应生成的^[26]; (2) 在不同水玻璃模数与碱溶液浓度条件下, 地聚物加固土的 XRD 结果基本一致。

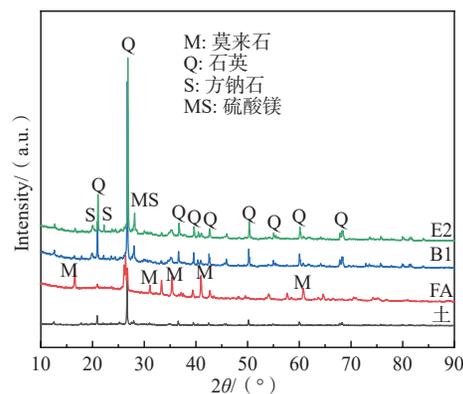


图 5 地聚物加固土的 XRD 图

Fig. 5 XRD results of geopolymer stabilized soil

3.4 SEM-EDS

B1 组 ($A=1.90$)、E1 ($A=1.38$) 与 E2 组 ($A=1.48$) 地聚物加固土的 SEM 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, B1 组加固土中存在较多分散的土颗粒及形态完整的球状粉煤灰颗粒。E1、E2 组加固土中地聚物凝胶明显多于 B1 组。由此可得, 随着碱激发剂掺量的增大, 提高了加固土中地聚物凝胶的生成量, 使得粉煤灰、土颗粒在凝胶的作用下胶结, 分散的颗粒(土、粉煤灰)减少, 团聚体增多, 以及团聚体体积增大。

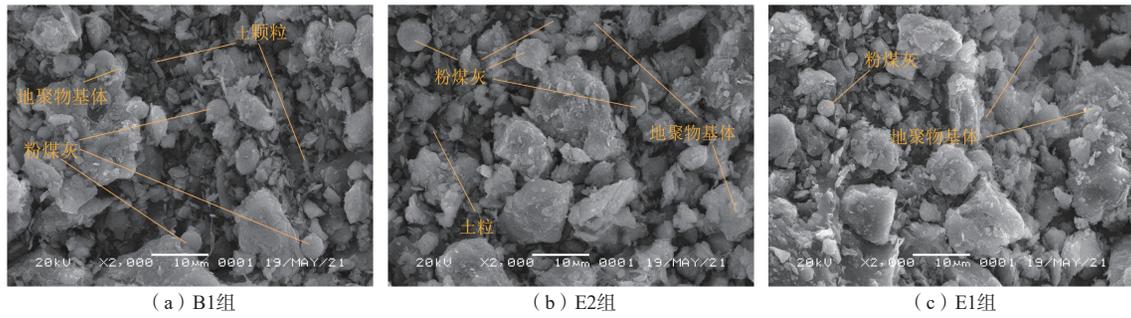


图 6 地聚物加固土的 SEM 图

Fig. 6 SEM results of geopolymer stabilized soil

B1 组 ($A=1.90, C=7.42 \text{ mol/L}$)、E1 组 ($A=1.38, C=22.78 \text{ mol/L}$) 与 E2 组 ($A=1.48, C=17.05 \text{ mol/L}$) 地聚物加固土中凝胶中的元素占比情况如图 7 所示。从图 7 可以看出, B1 组比 E2 组掺入的水玻璃量更少, 但

其凝胶中硅铝元素比(2.56)却比 E2 组(2.07)更大, 说明 B1 组粉煤灰溶出的铝元素明显少于 E2; 与 E2 组水玻璃掺量相同的 E1 组凝胶中硅铝比为 2.16, 也稍大于 E2 的硅铝比。可见, E 组生成了富铝相凝胶, 而 B1 组和 E1 组则生成了富硅相凝胶。B1 组由于氢氧化钠溶液的浓度较低, 使得地聚反应环境的 pH 较低, 硅铝玻璃体的 Si-O-Si、Si-O-Al 解聚量少, 导致生成低聚状态的 $[\text{SiO}_4]^-$ 四面体和 $[\text{AlO}_4]^-$ 较少; E1 组则由于氢氧化钠溶液浓度过高, 影响了铝元素的溶出^[27]。

3.5 FTIR

地聚物加固土(E2 组)、粉煤灰(FA)及粉煤灰地聚物(FG)^[28](强度最优组, 其碱溶液浓度为 10 mol/L) 的 FTIR 结果如图 8 所示。

从图 8(a)(b)可以看出, $520 \sim 778 \text{ cm}^{-1}$ 段的 3 个吸收峰只在含土的试样组中, 主要由 Al-O-Al、Si-O-Al 引起; 粉煤灰在 1104 cm^{-1} 的 Si-O-Si、Si-O-Al 伸缩振动峰来自其无定形铝硅玻璃体^[29]; 粉煤灰的振动峰 1104 cm^{-1} 移至粉煤灰地聚物的 1030 cm^{-1} 。地聚物曲线特征峰从粉煤灰的 1104 cm^{-1} 向 1030 cm^{-1} 的低波数偏移主要是形成了一种新的富铝凝胶相^[30]。硅铝玻璃体的 Si-O-Si、Si-O-Al 解聚生成低聚状态的 $[\text{SiO}_4]^-$ 四面体和 $[\text{AlO}_4]^-$ 四面体, 再发生缩聚反应。

从图 8(c)(d)可以看出, 不同组地聚物加固土与试验用土的 FTIR 结果曲线主要区别在 $1000 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 段的波峰位置; E2 组地聚物加固土的特征峰更接近粉煤灰地聚物的特征峰 1030 cm^{-1} , 表现出强度最高, 此时凝胶中的硅铝比越接近于 2, 铝溶出量越多; B1 组和 E1 组地聚物加固土的特征峰则更偏向土的特征峰 984 cm^{-1} , 表现出强度相对较低, 地聚物凝胶的生成量较少, 此时地聚物凝胶中的硅铝比大于 2, 铝溶出量相对较低。但从冻融循环试验的结果来看, 过高的氢氧化钠溶液浓度 (22.78 mol/L) 生成的富硅相凝胶有利于增强体系的抗冻融能力。

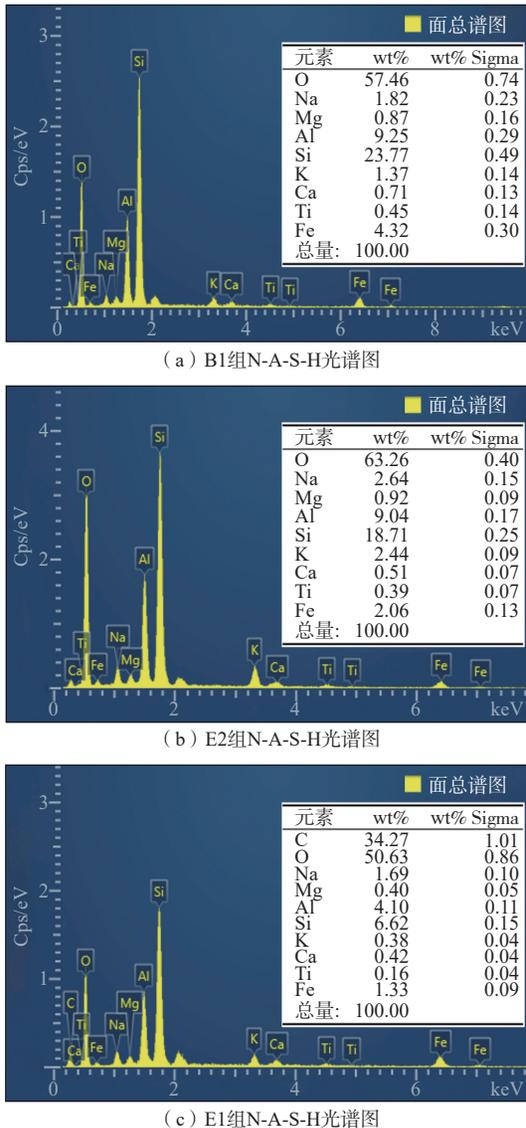


图 7 地聚物加固土中凝胶的 EDS 图谱

Fig. 7 EDS results of gel in geopolymer stabilized soil

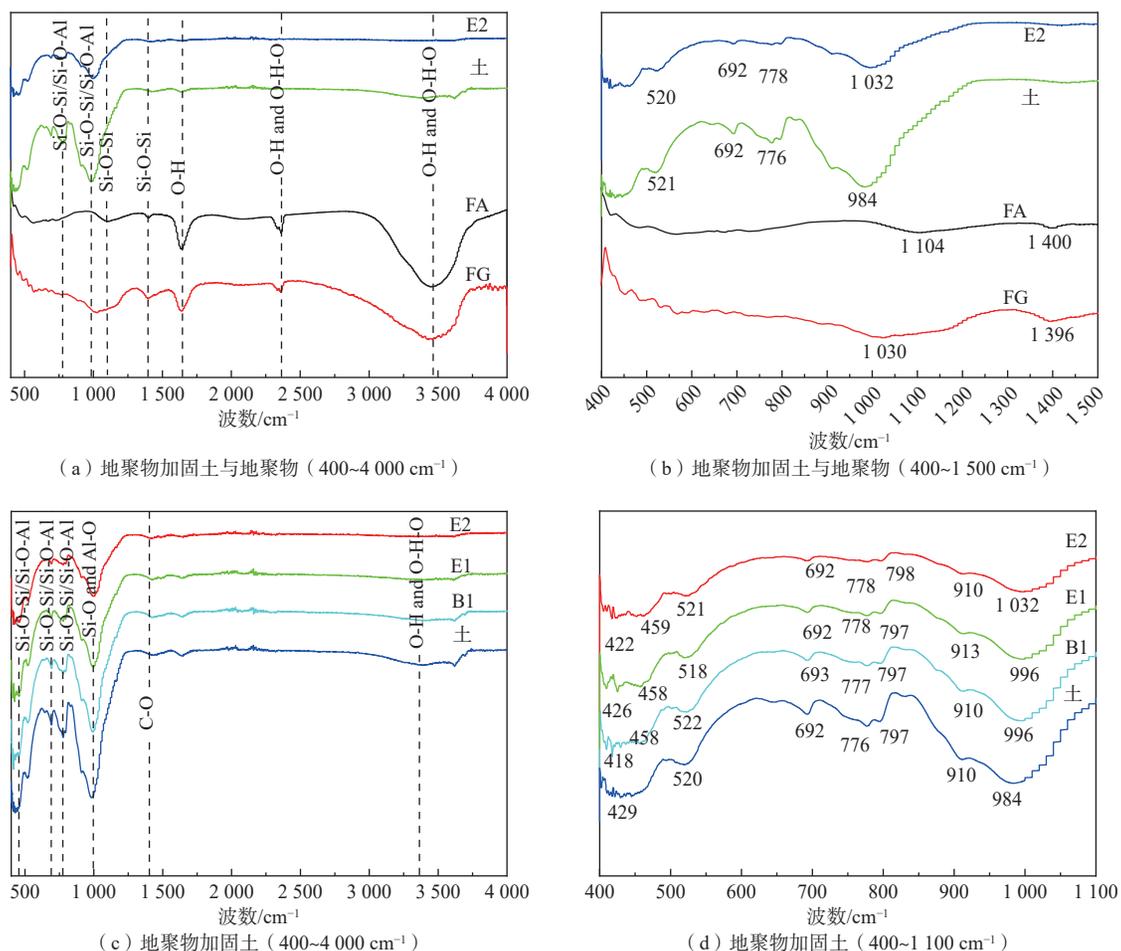


图 8 地聚物加固土、地聚物及原材料的 FTIR 结果

Fig. 8 FTIR results of geopolymer stabilized soil, geopolymer and test materials

4 结论

(1) 随着碱激发剂模数增大, 碱溶液浓度减小, 地聚物加固土的强度总体上表现出降低趋势, 而在模数一定条件下, 原材料硅铝比在 1.15 ~ 1.35 范围内越大, 地聚物加固土强度越大, 28 d 地聚物加固土的无侧限抗压强度最高可达 8.98 MPa。

(2) 当硅铝比在 1.25 ~ 1.35 范围时, 碱溶液浓度为 5.42 ~ 22.78 mol/L 的地聚物加固土能够抵御 1 次以上冻融循环, 最高为 6 次, 且相同硅铝比条件下抗冻融能力相近。

(3) 碱溶液浓度低于 7.42 mol/L 时, pH 环境不足以裂解更多的 Al-O, 导致低强度, 硅铝比低于 1.25 时, 地聚物凝胶生成量不足, 地聚物加固土内部团聚体较少, 结构松散, 在冻融过程中易吸入更多的毛细水后, 并在冻胀作用下裂解。

(4) 在硅铝比同为 1.35 条件下, 碱溶液浓度达到 17.05 mol/L 时生成富铝相凝胶, 对地聚物加固土强度

的提升帮助更大, 而当碱溶液浓度达到 22.78 mol/L 时则生成富硅相凝胶, 地聚物加固土强度有所下降, 但通过降低加固土的吸水量, 有助于提升加固土的抗冻融循环能力。

参考文献 (References) :

[1] (法)约瑟夫·戴维德维斯. 地聚合物化学及应用[M]. 王克俭, 译. 北京: 国防工业出版社, 2011: 3 - 6. [DAVIDOVITS J. Geopolymer chemistry & applications [M]. WANG Kejian, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 3 - 6. (in Chinese)]

[2] DUXSON P, PROVIS J L, LUKEY G C, et al. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete' [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(12): 1590 - 1597.

[3] 刘之葵, 郭彤, 王剑. 粉煤灰和二灰对桂林红黏土力学性质的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(3): 86 - 92. [LIU Zhikui, GUO Tong, WANG Jian. Effect of the fly ash and lime fly ash on the mechanical properties of

- red clay in Guilin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(3): 86 – 92. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 林彤. 粉煤灰加固软土地基的室内配方试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(增刊1): 76 – 78. [LIN Tong. Experimental study of formula indoor of fly ash improving soft foundation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 30(Sup 1): 76 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [5] NWONU D C. Exploring soil geopolymer technology in soft ground improvement: A brief excursion[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(6): 1 – 20.
- [6] CRISTELO N, GLENDINNING S, TEIXEIRA PINTO A. Deep soft soil improvement by alkaline activation[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2011, 164(2): 73 – 82.
- [7] CRISTELO N, GLENDINNING S, FERNANDES L, et al. Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 167 – 174.
- [8] SARGENT P, HUGHES P N, ROUAINIA M, et al. The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils[J]. *Engineering Geology*, 2013, 152(1): 96 – 108.
- [9] TEING T T. Effects of alkali-activated waste binder in soil stabilization[J]. *International Journal of GEOMATE*, 2019, 17(59): 82 – 89.
- [10] AL-RKABY A H J. Evaluating shear strength of sand-gbfs based geopolymer composite material[J]. *Acta Polytechnica*, 2019, 59(4): 305 – 311.
- [11] CORRÊA-SILVA M, ARAÚJO N, CRISTELO N, et al. Improvement of a clayey soil with alkali activated low-calcium fly ash for transport infrastructures applications [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, 20(8): 1912 – 1926.
- [12] CORRÊA-SILVA M, MIRANDA T, ROUAINIA M, et al. Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122017.
- [13] 孙秀丽, 童琦, 刘文化, 等. 碱激发粉煤灰和矿粉改性疏浚淤泥力学特性及显微结构研究[J]. *大连理工大学学报*, 2017, 57(6): 622 – 628. [SUN Xiuli, TONG Qi, LIU Wenhua, et al. Study of microstructure and mechanical properties of dredged silt solidified using fly ash and slag stimulated by alkali[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2017, 57(6): 622 – 628. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 活性MgO-粉煤灰固化淤泥耐久性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4675 – 4684. [WANG Dongxing, WANG Hongwei, ZOU Weilie, et al. Study of durability of dredged sludge solidified with reactive MgO-fly ash[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4675 – 4684. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 364 – 371. [YU Jiaren, CHEN Yonghui, CHEN Geng, et al. Mechanical behaviour of geopolymer stabilized clay and its mechanism[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 364 – 371. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 吴俊, 征西遥, 杨爱武, 等. 矿渣-粉煤灰基地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 647 – 655. [WU Jun, ZHENG Xiyao, YANG Aiwu, et al. Experimental study on the compressive strength of muddy clay solidified by the one-part slag-fly ash based geopolymer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 647 – 655. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王伟齐, 孙红, 葛修润. 碱激发作用下海相软土固化研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(7): 2248 – 2255. [WANG Weiqi, SUN Hong, GE Xiurun. Solidification of marine soft soil under alkali excitation[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(7): 2248 – 2255. (in Chinese with English abstract)]
- [18] FU Y W, CAI L C, WU Y G. Freeze-thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(7): 3144 – 3148.
- [19] ZHAO R D, YUAN Y, CHENG Z Q, et al. Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 474 – 483.
- [20] 谢凌君. Si/Al、Na/Al对偏高岭土基地聚物抗冻及抗渗性能的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. [XIE Lingjun. The influence of Si/Al and Na/Al on freeze-thaw resistance and permeability of metakaolin based geopolymer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [21] TIAN L Y, HE D P, ZHAO J N, et al. Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review[J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2021, 60(1): 1 –

- 14.
- [22] 毛明杰, 李瑞文, 杨秋宁, 等. 冻融作用下粉煤灰地聚物混凝土性能劣化研究[J]. *非金属矿*, 2020, 43(2): 48 – 50. [MAO Mingjie, LI Ruiwen, YANG Qiuning, et al. Study on deterioration of fly ash geopolymer concrete under freeze-thaw[J]. *Non-Metallic Mines*, 2020, 43(2): 48 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [23] American Society for Testing and Materials. Standard specification for fly ash: ASTM C 618—19[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2019.
- [24] 贾屹海. Na-粉煤灰地质聚合物制备与性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009. [JIA Yihai. Synthesis and characterization of fly-ash-based Na-geopolymer[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [25] American Society for Testing and Materials. Standard test method for freezing and thawing of compacted cement soil mixtures: ASTM D 560—2003[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2003.
- [26] 王华, 张强, 宋存义. 莫来石在粉煤灰碱性溶液中的反应行为[J]. *粉煤灰综合利用*, 2001, 14(5): 24 – 27. [WANG Hua, ZHANG Qiang, SONG Cunyi. Reaction behavior of mullite in alkaline solution of fly ash[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2001, 14(5): 24 – 27. (in Chinese)]
- [27] REES C A, PROVVIS J L, LUKEY G C, et al. In situ ATR-FTIR study of the early stages of fly ash geopolymer gel formation[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2007, 23(17): 9076 – 9082.
- [28] 魏威, 高彦斌, 陈忠清, 等. 室温碱激发低钙粉煤灰地质聚合物配比试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(12): 3889 – 3896. [WEI Wei, GAO Yanbin, CHEN Zhongqing, et al. Experimental study on proportion of room temperature alkali-activated low-calcium fly ash geopolymer[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(12): 3889 – 3896. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 侯云芬, 王栋民, 李俏, 等. 水玻璃性能对粉煤灰基矿物聚合物的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(1): 61 – 64. [HOU Yunfen, WANG Dongmin, LI Qiao, et al. Effect of water glass performance on fly ash-based geopolymers[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 36(1): 61 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [30] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A, SOBRADOS I, et al. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2006, 91(1/2/3): 111 – 119.

编辑: 张明霞