

# 海相淤泥轻质固化土的原位化学 发泡法制备与性能表征

李正昊, 姜尧, 陈双, 徐亮, 樊传刚, 李家茂

(安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽马鞍山 243032)

**摘要:**以矿物基胶凝材料为固化剂、铝粉膏为发泡剂,采用原位发泡法制备海相淤泥轻质固化土,研究固化剂掺量(1:10~1:4)、发泡剂掺量(0.025%~0.100%)及水灰比(0.6~1.2)对试样无侧限抗压强度、容重、吸水率、软化系数等性能指标的影响规律,并借助X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)等表征技术,探讨材料的微观结构演变过程与固化机理。结果表明:提高固化剂掺量可促进铝粉的发气反应,形成更发达的孔隙结构,使材料容重降至 $0.75\text{ t/m}^3$ 的同时,无侧限抗压强度提升至 $1.06\text{ MPa}$ ;而增加发泡剂掺量和提高水灰比则会导致材料容重和无侧限抗压强度同步下降。在最优配比条件下(固化剂掺量为1:4、发泡剂掺量为0.100%、水灰比为1.0),28 d试样表现出优异的综合性能,无侧限抗压强度为 $1.06\text{ MPa}$ 、容重为 $0.75\text{ t/m}^3$ 、软化系数为0.84。性能提升的主要原因在于,固化剂水化反应生成的水化硅酸钙(C—S—H)和钙矾石(Aft)等交织成网状结构,既可有效黏结颗粒又可合理调控孔隙分布,从而实现了轻质化与力学性能的协同强化。本研究为填海造陆工程中软土地基加固材料的研发提供了重要参考。

**关键词:**海相淤泥; 固化土; 胶凝材料; 无侧限抗压强度; 容重; 原位发泡; 地基沉降; 固废利用

**中图分类号:** TU 528.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24181



## Preparation and Properties Characterization of Lightweight Solidified Soil of Marine Silt by In-situ Chemical Foaming Method

LI Zhenghao, JIANG Yao, CHEN Shuang, XU Liang, FAN Chuangang, LI Jiamao

(School of Materials Science & Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** Using mineral-based cementitious material as a curing agent and aluminum powder paste as a foaming agent, light-weight solidified soil dredged marine silt were prepared by in-situ foaming method. The influence law of curing agent content (1:10~1:4), foaming agent content (0.025%~0.100%), and water-to-binder ratio (0.6~1.2) on the unconfined compressive strength (UCS), bulk density, water absorption, softening coefficient of the samples were systematically investigated. The microstructural evolution and solidification mechanism were analyzed with X ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. The results show that increasing the curing agent content promotes the gas-generating reaction of aluminum powder, forming a more developed pore structure. This achieves a reduction in the bulk density to  $0.75\text{ t/m}^3$  while improving the UCS to  $1.06\text{ MPa}$ . However,

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 安徽高校协同创新项目(GXXT-2019-028)

作者简介: 李正昊(2000—),男,安徽合肥人,硕士生,主要研究方向为轻质固化土的制备与性能表征。

通信作者: 李家茂(1979—),男,河南商丘人,博士,副教授,主要研究方向为绿色胶凝材料。

引文格式: 李正昊,姜尧,陈双,等.海相淤泥轻质固化土的原位化学发泡法制备与性能表征[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2025,42(5):490-497,509.

higher foaming agent content and water-to-binder ratio lead to a simultaneous decrease in both bulk density and UCS. Under the optimal mix proportion (curing agent content of 1:4, foaming agent content of 0.100%, and water-to-binder ratio of 1.0), the 28 d sample exhibits excellent comprehensive performances, with a UCS of 1.06 MPa, bulk density of  $0.75 \text{ t/m}^3$ , and softening coefficient of 0.84. The enhanced performance is attributed to the formation of a network structure composed of hydration products such as calcium silicate hydrate (C—S—H) and ettringite (AFt), which effectively bonds particles while regulating pore distribution, thereby achieving a synergistic optimization of lightweight characteristics and mechanical properties. This study provides important insights for the development of soft soil stabilization materials in land reclamation engineering.

**Keywords:** marine silt; stabilized soil; cementitious materials; unconfined compressive strength; bulk density; in-situ foaming; foundation settlement; solid waste utilization

近年来,我国沿海地区经济快速发展、人口持续增长,土地资源短缺已成为制约该区域可持续发展的关键因素<sup>[1-2]</sup>。采用淤泥吹填联合真空预压的人工填海造陆技术,虽可有效拓展海洋空间资源,但形成的陆域存在地基稳定性不足的问题<sup>[3-4]</sup>。目前主要通过排水固结、土体加固、真空预压法、强夯法、冷热处理等软基处理方法应对,但这些方法普遍存在成本高、工期长等缺点<sup>[5-7]</sup>。采用固化材料处理软弱土质可显著缩短施工周期,新型无机/生物酶土壤固化剂与软土复合形成的固化土具良好力学性能和遇水稳定性。然而,当填海造陆区上部固化层(含建设设施)的容重大于下部未固化淤泥时,易引发地基失稳塌陷和不均匀沉降,进而导致沿海道路路基与桥梁桩基出现“桥头跳车”现象<sup>[8-10]</sup>。通过将固化土改良为轻质固化土,使其密度低于下部未固化淤泥,可实现从重质地基向轻质地基的转化,从而有效缓解上述问题<sup>[11-13]</sup>。作为一种新型岩土工程材料,轻质固化土能够显著改善软土力学性能,提高地基承载能力并有效控制沉降变形<sup>[14-17]</sup>。该材料的研发既符合国家海洋强国战略对海洋资源高效利用与品质提升的要求,也为行业突破技术瓶颈、发展新型软基处理工艺提供新途径。

目前,轻质固化土主要采用物理发泡工艺制备,通过在掺入固化剂的淤泥中混合表面活性剂类发泡剂经物理发泡形成的稳定泡沫来实现<sup>[18-19]</sup>。该方法可获得孔隙分布均匀的轻质固化土,但存在泡沫粒径调控困难、结构稳定性不足等缺陷,易引发孔结构塌陷及贯通孔隙问题。化学发泡方法通过掺入碳酸盐类、铝粉等发泡剂,利用其与水和胶凝材料中的组分反应产生气体( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ 等),在浆体中形成闭孔或连通孔隙结构,从而制备多孔轻质材料<sup>[20-22]</sup>。然而,该方法目前主要应用于轻质建材领域<sup>[23]</sup>,针对

淤泥轻质固化土的应用研究仍较为有限。陈梦义等<sup>[24]</sup>基于P·O52.5水泥、一级粉煤灰、河砂及石英粉组成的胶凝体系,采用铝粉为发泡剂制备混凝土的研究表明,适量碱性物质可促进铝粉发气反应并加速浆体水化,从而增加气孔率并改善孔结构稳定性,实现干密度降低与力学性能提升的协同优化。但邓琪丰等<sup>[25]</sup>研究发现,以疏浚淤泥为原料、P·O42.5水泥为固化剂、铝粉为发泡剂制备的淤泥固化土中未能形成气孔结构。本研究基于矿物基复合胶凝材料(pH低于P·O42.5水泥的水化产物),采用铝粉发泡剂和原位发泡技术制备轻质淤泥固化土,探究铝粉掺量、固化剂比例及水灰比对材料孔隙结构、力学性能和水稳定性的影响规律,以开发力学性能可控与工程性能优异的轻质固化土制备工艺。

## 1 实验材料与过程

### 1.1 实验材料

海相淤泥样品采自浙江省台州市,经测定其基本物理性质为:湿密度为  $1.7 \text{ g/cm}^3$ 、含水率为 71.4%、塑限为 27.93%、液限为 36.12%、有机质含量(质量分数)为 8.62%。这些参数特征表明该土样属于典型的高含水率、高有机质含量的滨海软土。所用固化剂为安徽省融工博大环保技术材料研究院有限公司生产的MS-W-S3型矿物基复合胶凝材料,其比表面积为  $421.77 \text{ m}^2/\text{kg}$ ,具备优异的水化活性。发泡剂选用山东三品铝业科技有限公司生产的GLS-65型铝粉膏,该产品发气性能稳定,尤其适用于轻质材料的制备。

采用美国赛默飞世尔公司生产的X射线荧光光谱仪(X Intellipower<sup>TM</sup> 3600)对海相淤泥及淤泥固化剂主要原料的化学成分进行测试,结果如表1所示。

表1 主要实验原料的化学组成

w/%

Tab. 1 Chemical composition of the main experimental raw materials

w/%

原料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	其他
海相淤泥	59.72	19.15	5.86	4.34	3.42	2.98	4.53
淤泥固化剂	26.25	13.26	0.90	43.98	0.42	6.07	9.12

## 1.2 实验过程

### 1.2.1 样品制备

按表2所示配合比精确称取海相淤泥、淤泥固化剂、发泡剂和水等原料,采用砂浆搅拌机将各组分充分搅拌混合,确保物料均匀分布。将混合均匀的浆体注入40 mm×40 mm×160 mm三联试模后,利用铝粉在密闭模具内发生的原位发泡反应制备试样。待发泡反应完成后,将试样置于标准养护箱(20℃,

相对湿度不低于95%)中静置至完全硬化,经钢丝锯修整后制得标准尺寸的轻质淤泥固化土试样。脱模后的试样在标准养护条件下养护至3, 7, 28 d等不同龄期,用于后续力学性能及其他物理性能测试表征。表2中固化剂掺量定义为固化剂质量与浆体总质量之比;水灰比为泥浆中水分质量与(淤泥与固化剂)总质量之比;发泡剂掺量按发泡剂质量占泥浆总质量的百分比计算。

表2 轻质淤泥固化土试样的配合比

Tab. 2 Mix proportion of lightweight solidified silt soil specimens

试样	固化剂掺量	水灰比	w(发泡剂)/%
1 <sup>#</sup>	1:8	0.6, 0.8, 1.0, 1.2	0.100
2 <sup>#</sup>	1:8	1.0	0.025, 0.050, 0.075, 0.100
3 <sup>#</sup>	1:4, 1:6, 1:8, 1:10	1.0	0.100

### 1.2.2 测试表征

采用德国布鲁克公司生产的AXSD8型X射线衍射仪(X ray diffractometer, XRD)对原料与固化土体试样进行物相分析,采用日本JEOL公司JSM-6490LV型场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)表征试样微观形貌。材料吸水性能采用饱和浸水增重法测定,力学性能采用美国MTS系统公司EXCEED™系列微机电子万能试验机测试,重点考察试样在不同养护龄期下的无侧限抗压强度和软化系数等关键力学性能参数。

## 2 结果与分析

选取无侧限抗压强度、容重、吸水率及软化系数4个指标综合评价轻质淤泥固化土的工程性能:抗压强度表征承载能力;容重反映轻质化特性;吸水率表征孔隙水敏感性;软化系数表征水稳定性。这些指标从力学、轻质和耐久性三方面评估材料在填海工程中的应用价值。

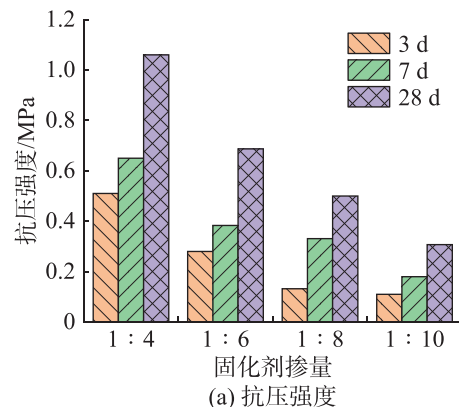
### 2.1 固化剂掺量对轻质淤泥固化土性能的影响

固定水灰比为1.0、发泡剂掺量为0.100%,研究固化剂掺量(1:10~1:4)对轻质淤泥固化土性能的影响。

#### 2.1.1 无侧限抗压强度和容重

图1为固化剂掺量对轻质淤泥固化土试样无侧

限抗压强度和容重的影响规律。从图1可看出:当固化剂掺量由1:10增至1:4时,试样性能显著优化。固化剂掺量为1:4时,试样综合性能最优,3 d无侧限抗压强度为0.51 MPa,而28 d无侧限抗压强度提升至1.06 MPa、容重降至0.75 t/m<sup>3</sup>;相较于固化剂掺量为1:10的试样,其28 d无侧限抗压强度提高了0.75 MPa,容重降低了0.27 t/m<sup>3</sup>。这种性能提升源于两方面:一方面,增加的固化剂通过加速水化反应促进C—S—H凝胶等水化产物的生成,直接构建了更致密的胶凝网络结构,使抗压强度获得显著提升;另一方面,固化剂掺量的增加,体系碱度持续升高,加速铝粉的产气反应并提升气体释放效率,通过调控气泡分布形成均匀稳定的多孔结构,使材料容重得到显著降低。



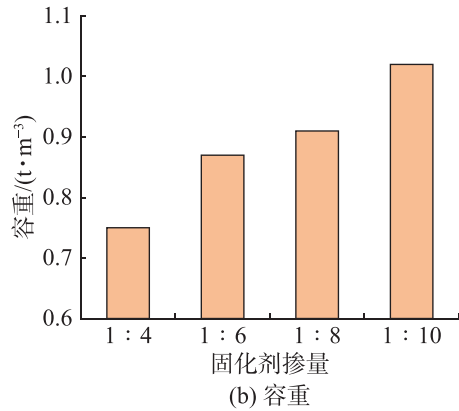


图1 固化剂掺量对试样无侧限抗压强度和容重的影响规律  
Fig. 1 Effect law of curing agent content on the unconfined compressive strength and bulk density of specimens

### 2.1.2 软化系数

图2为固化剂掺量对轻质淤泥固化土试样软化系数的影响规律。

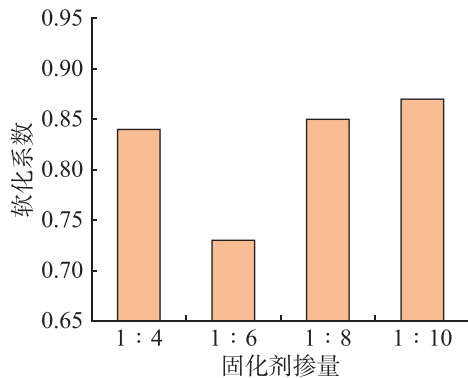


图2 固化剂掺量对试样软化系数的影响规律  
Fig. 2 Effect law of curing agent content on the softening coefficient of specimens

从图2可看出:随着固化剂掺量从1:4降至1:10,软化系数呈先降后升的变化趋势,并在掺量为1:10时达到峰值0.87。当固化剂掺量(1:4)较高时,充分的水化反应会生成大量水化产物,从而形成致密的基体结构。在此条件下,铝粉发泡产生的气泡能够被胶凝产物有效包裹,形成封闭孔隙结构,使试样呈现出较低的吸水率和较强的耐水性。随着固化剂掺量降低,胶凝产物生成不足导致基体结构疏松,铝粉发泡形成的孔隙未能被完全包裹,形成相互连通的孔隙结构,促使水分渗透并显著降低强度。当固化剂掺量过低时,胶凝反应显著减弱,此时孔隙形成主要受铝粉发泡过程控制。由于缺乏足够胶凝产物的挤压作用,气泡得以均匀分散并形成独立微孔结构(孔径小且分布均匀)。虽然这种条件下的试样总孔隙率较高,但由于微孔结构更趋近“闭孔”特征,能有效抑制水分渗透,从而使软化系数回升。

## 2.2 发泡剂掺量对轻质淤泥固化土性能的影响

综上分析,固化剂掺量1:10时试样的软化系数达到峰值,但其抗压强度未能满足工程要求(0.4~1.6 MPa)。鉴于固化剂掺量1:8试样的软化系数(0.85)仅次于最优值且力学性能达标,选定该掺量作为基准参数,同时固定水灰比1.0,探究发泡剂掺量(0.025%~0.100%)对轻质淤泥固化土性能的影响规律。

### 2.2.1 无侧限抗压强度和容重

图3为发泡剂掺量对轻质淤泥固化土无侧限抗压强度和容重的影响规律。从图3可看出:随发泡剂掺量的增加,试样无侧限抗压强度下降,掺量为0.025%时,3 d和28 d无侧限抗压强度分别达到0.39, 1.36 MPa的峰值,容重最高为1.28 t/m<sup>3</sup>;相较于掺量为0.100%的试样,其3 d和28 d无侧限抗压强度分别提高0.26, 0.86 MPa,容重提高0.37 t/m<sup>3</sup>。这种现象源于:发泡剂掺量增加会促进气泡生成,提高气泡密度,导致孔隙率升高和气泡合并,从而降低试样强度;同时,铝粉发泡过程会消耗体系中的氢氧根离子,与胶凝反应形成竞争,抑制了C—S—H和C—A—S—H凝胶的生成,进一步导致抗压强度下降;而孔隙率的增加也使得材料容重呈梯度下降。

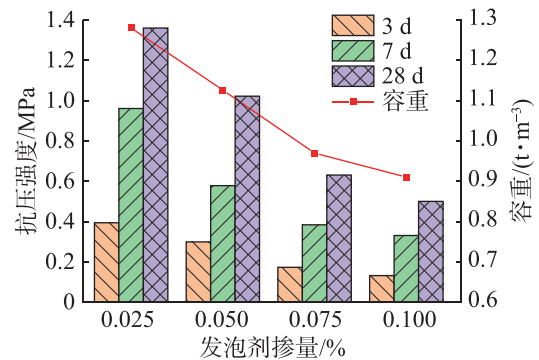


图3 发泡剂掺量对试样无侧限抗压强度和容重的影响规律

Fig. 3 Effect law of foaming agent content on the unconfined compressive strength and bulk density of specimens

### 2.2.2 吸水率和软化系数

图4为发泡剂掺量对轻质淤泥固化土试样吸水率和软化系数的影响规律。从图4可看出:随着发泡剂掺量的增加,试样吸水率呈现先上升后下降的趋势,而软化系数则呈现先下降后上升的趋势。当发泡剂掺量为0.025%时,试样吸水率最低(23.67%),而软化系数达最大(0.88)。这主要是因为当发泡剂掺量为0.025%~0.075%时,随着掺量的增加,试样内部孔洞尺寸增大且毛细孔数量增多,导致吸水率显

著提高而软化系数降低。当发泡剂掺量增至 0.100% 时, 淤泥泥浆内部气泡密度超过临界阈值, 部分气泡孔壁破裂逸散至泥浆表面, 未逸出气泡在泥浆内部重构形成壁厚增大的闭孔结构, 从而使吸水率降低且软化系数提高。朴春爱等<sup>[26]</sup> 在研究发泡混凝土的孔结构时也观察到类似现象。这一结果表明通过调控发泡剂掺量可以有效优化轻质淤泥固化土的孔隙结构, 进而改善其吸水性和耐水稳定性。

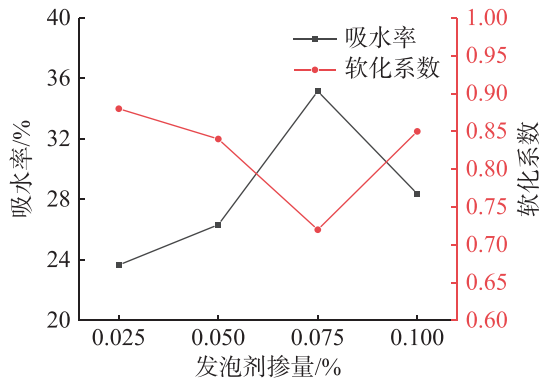


图4 发泡剂掺量对试样吸水率和软化系数的影响规律

Fig. 4 Effect law of foaming agent dosage on the water absorption rate and softening coefficient of specimens

### 2.3 水灰比对轻质淤泥固化土性能的影响

根据 2.2 节实验结果, 当发泡剂掺量为 0.025% 时, 试样表现出最佳的强度与软化系数, 但其容重 ( $1.28 \text{ t/m}^3$ ) 超出轻质材料设计阈值范围 ( $0.6\sim 1.0 \text{ t/m}^3$ ); 而发泡剂掺量 0.100% 的试样在保持次优软化系数 (0.85) 的同时, 容重 ( $0.97 \text{ t/m}^3$ ) 满足工程要求。据此选定固化剂掺比 1:8、发泡剂掺量 0.100% 时, 研究水灰 (0.6~1.2) 对轻质淤泥固化土性能的影响。

#### 2.3.1 无侧限抗压强度和容重

图 5 为水灰比对轻质淤泥固化土试样无侧限抗压强度和容重的影响规律。从图 5 可看出: 试样的无侧限抗压强度随着水灰比的增大而逐渐降低, 当水灰比为 1.2 时, 容重降至最低  $0.85 \text{ t/m}^3$ , 3 d 和 28 d 无侧限抗压强度分别为 0.13、0.32 MPa; 而水灰比为 0.6 时, 容重最高达  $1.19 \text{ t/m}^3$ , 3 d 和 28 d 无侧限抗压强度分别为 0.59、1.46 MPa, 显著高于高水灰比 (1.2) 试样。水灰比增大导致浆体黏度降低, 虽有利于气泡初始分散与膨胀, 但过大的水灰比会削弱浆体对气泡的稳定作用, 促使气泡合并趋势加剧并形成孔径较大的连通孔结构。这种连通孔可能具有较低的有效孔隙率, 但其大孔径特征显著降低了固相物质的填充密度, 使容重随水灰比增大而持续降低。同时, 水灰比增大会显著稀释胶凝材料浓度, 导致水化

反应程度下降和水化产物生成量减少, 形成疏松多孔的结构, 削弱试样抗压强度。此外, 过量水分引发的浆体黏度降低会加剧气泡合并趋势, 形成大孔径缺陷, 减少胶凝骨架的有效承载面积, 进一步降低试样的力学性能。

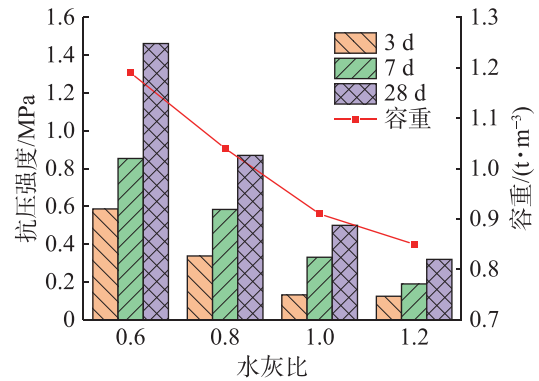


图5 水灰比对试样无侧限抗压强度和容重的影响规律

Fig. 5 Effect law of water-cement ratio on the unconfined compressive strength and bulk density of specimens

#### 2.3.2 吸水率和软化系数

图 6 为水灰比对轻质淤泥固化土试样吸水率和软化系数的影响规律。

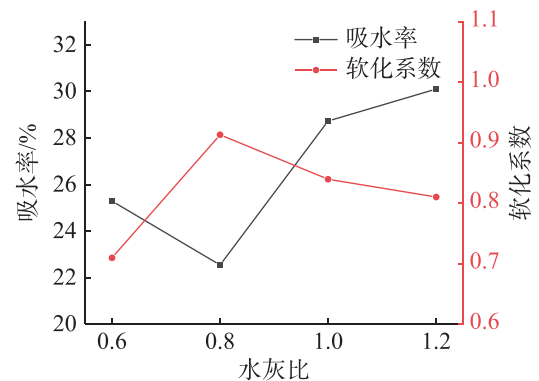


图6 水灰比对试样吸水率和软化系数的影响规律

Fig. 6 Effect law of water-cement ratio on the water absorption rate and softening coefficient of specimens

从图 6 可看出: 随着水灰比增大, 试样吸水率呈现先下降后逐渐增加的趋势, 软化系数则呈现相反变化趋势。水灰比为 0.8 时, 试样吸水率最低 (22.54%), 而软化系数最高 (0.91)。随水灰比的升高, 浆体黏度达到理想区间, 促进气泡均匀分散并形成高闭孔率结构, 这种结构能有效阻断水分渗透通道, 显著降低吸水率; 同时, 致密的水化产物骨架与均匀分布的闭孔结构协同增效, 大幅提升了材料的抗水侵蚀性能, 从而使软化系数明显提高。当水灰比超过临界值时, 过量自由水蒸发后形成连续的孔隙通道网络, 促使吸水率随连通孔隙比例的增加而持续上升。这种相互连通的孔

隙结构作为水分迁移的主要通道, 会显著增加试样吸水后的内部孔隙水压力, 进而加速微裂纹萌生与扩展, 最终导致试样力学性能的降低。由此表明: 合理控制水灰比既能提升轻质淤泥固化土的致密度, 还能有效改善其耐水性。

综合试验结果分析表明: 当采用固化剂掺量 1:4、水灰比 1.0、发泡剂掺量 0.100% 的优化配比时, 材料展现出最佳的综合性能, 其 28 d 无侧限抗压强度达 1.06 MPa、容重  $0.75 \text{ t/m}^3$ 、软化系数 0.84, 充分体现了该配比方案在力学强度、轻质特性与耐久性三者之间的协同优化效果。

### 3 讨论

基于固化剂、发泡剂掺量及水灰比对材料性能的影响规律, 考虑到发泡剂与水灰比在阈值范围内未引起显著微观结构变化, 探讨固化剂掺量对水化产物生成和孔隙结构的影响机制, 通过分析水化产物含量、孔隙特征与力学性能的关联性, 建立宏观性能与微观结构的定量关系。

#### 3.1 XRD 分析

图 7 为淤泥原料和 28 d 龄期不同固化剂掺量 (恒定水灰比 1.0、发泡剂掺量 0.100%) 轻质淤泥固化土试样的 X 射线衍射图谱。由图 7 可看出: 3 种 (固化剂掺量=1:4, 1:6, 1:8) 试样均出现明显的石英和钠长石的衍射峰; 同时出现钙矾石和水化硅酸钙的衍射峰, 且随着固化剂掺量的增加, 其衍射峰强度显著增强。这是因为随着固化剂掺量的增加, 固化剂通过水化反应生成更多的水化产物, 显著提升了试样的无侧限抗压强度。

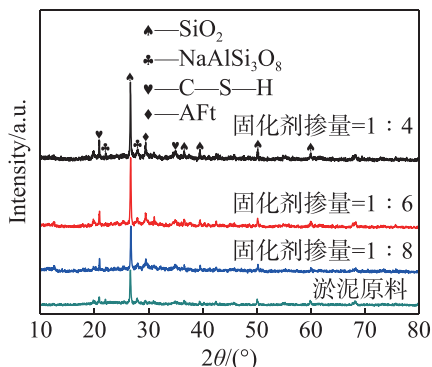
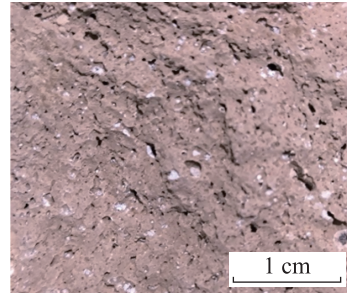


图 7 淤泥与轻质淤泥固化土试样的 XRD 图谱

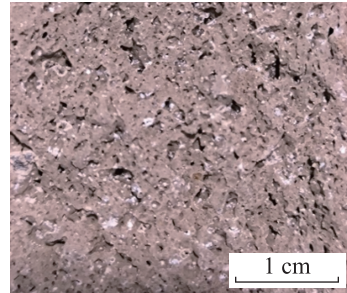
Fig. 7 XRD patterns of silt and lightweight solidified silt soil specimens

#### 3.2 宏观与微观形貌分析

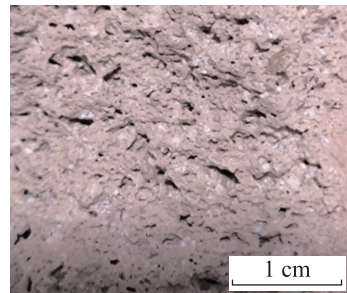
图 8, 9 分别为轻质淤泥固化土试样 (28 d 龄期) 的宏观和显微形貌。



(a) 固化剂掺量 1:8



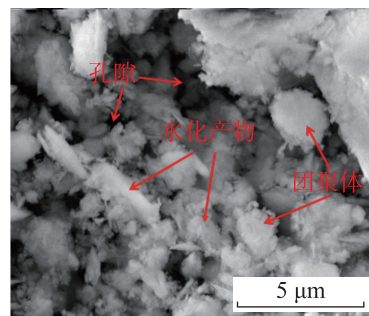
(b) 固化剂掺量 1:6



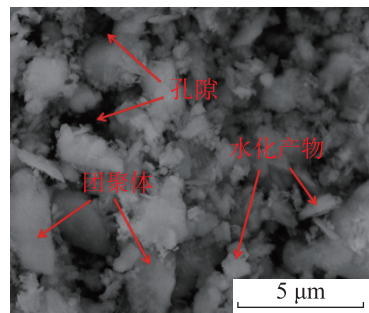
(c) 固化剂掺量 1:4

图 8 轻质淤泥固化土试样 (28 d 龄期) 的宏观形貌

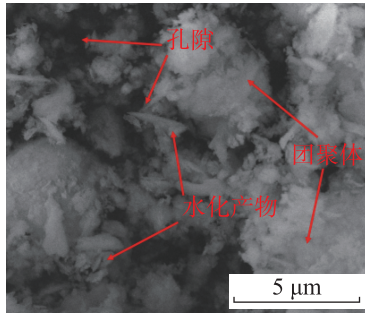
Fig. 8 Macroscopic morphology of 28-day lightweight silt solidified soil specimen



(a) 固化剂掺量 1:8



(b) 固化剂掺量 1:6



(c) 固化剂掺量1:4

图9 轻质淤泥固化土试样(28 d龄期)的微观形貌

Fig. 9 Microscopic morphology of 28-day lightweight silt-solidified soil specimen

图8显示:固化剂掺量显著影响试样的致密度,试样内部气孔主要为闭孔结构,呈圆形或扁平状且分布均匀;随着固化剂掺量的增加,气孔的平均孔径逐渐增大,在固化剂掺量为1:4时达到最大。虽然增大孔径可降低容重,但大孔隙会形成应力集中点,在外部荷载作用下易诱发裂纹扩展,从而降低试样强度。此外,固化剂掺量增加同时会促进水化反应生成更多的凝胶物质,这一增强效应有效抵消了孔隙增大的不利影响,最终使试样强度保持上升趋势。图8结果还显示,发泡剂铝粉在泥浆中呈现高度分散状态,所生成的气泡分布均匀且尺寸一致。原位发泡过程中气泡生成速率稳定,其分布均匀性可通过式(1)所示的分散度函数定量表征。这种优异的分散特性与可控的发泡过程协同作用,共同实现了材料孔隙结构的精确调控。

$$U = \frac{\sum_{k=1}^M \left| n_k - \frac{N}{M} \right|}{N} \cdot \sqrt{M} \quad (1)$$

其中:  $U$  为分散度,其值越小表示气泡分布越均匀( $0 < U \leq 0.6$  为均匀分布的区间);  $M$  为子区域数量;  $n_k$  为第  $k$  个子区域中的实际气泡数量;  $N$  为气泡总数量;  $N/M$  为每个子区域中气泡的期望数量。经计算可知,固化剂掺量为1:6时,  $M$  为27个,  $N$  为4916个,  $N/M$  为182,分散度为0.22,且整体分散度在0.2~0.6范围,气泡分布较为均匀。

图9微观形貌分析表明:试样主要由片状、网状和絮状结构组成。不同固化剂掺量试样的水化产物均以C—S—H凝胶为主。随固化剂掺量的增加,絮状和胶状产物明显增多,这些水化产物不仅强化了淤泥颗粒之间的黏结作用,还通过填充孔隙和包裹淤泥颗粒形成致密团聚体,从而显著提高了基体的密实程度。

## 4 结论

以台州海相淤泥为主要原料,采用矿物复合凝胶材料为固化剂、铝粉膏为发泡剂制备轻质淤泥固化土试样,研究固化剂掺量(1:10~1:4)、发泡剂掺量(0.025%~0.100%)和水灰比(0.6~1.2)对轻质淤泥固化土性能的影响,并通过微观测试揭示其固化机理,得出如下主要结论:

1) 各组分掺量对材料性能的影响呈现规律性变化:固化剂掺量增加使试样无侧限抗压强度显著提升,容重相应降低,软化系数则呈先降后升的非线性变化特征;发泡剂掺量增加导致试样无侧限抗压强度和容重均缓慢下降,吸水率呈先升后降趋势,软化系数则呈相反变化趋势;水灰比增大使试样无侧限抗压强度和容重同步降低,吸水表现为率先降后升,而软化系数变化趋势与之相反,当水灰比超过0.6时,材料仍保持0.8以上的高软化系数,显示出优异的耐水性。

2) 当采用固化剂掺量1:4、发泡剂掺量0.100%、水灰比1.0的配比时,试样综合性能最优,其28 d无侧限抗压强度达1.06 MPa、容重为0.75 t/m<sup>3</sup>、软化系数为0.844。该性能参数完全满足《现浇泡沫轻质土技术规程》(CECS 249:2008)中对减荷轻质土的技术要求(容重 $\geq 0.50$  t/m<sup>3</sup>,强度 $\geq 0.60$  MPa),表明该配比方案具备良好的工程实用价值。

3) 轻质淤泥固化土中钙矾石(AFT)和水化硅酸钙(C—S—H)凝胶的特征衍射峰强度随固化剂掺量增加而明显增强,反映了水化产物的持续积累过程。尽管固化剂掺量增加导致平均孔径扩大并且容重降低,但大量生成的C—S—H凝胶通过有效填充孔隙及增强颗粒团聚作用,抵消了孔径结构变化带来的不利影响,最终使试样的无侧限抗压强度随掺量的增加而持续提高。

### 参考文献:

- [1] 李瑞,陈宇,曹印,等.填海工程的海湾动力地貌效应:以芝罘湾为例[J].海洋通报,2024,43(5):582-594.  
LI R, CHEN Y, CAO Y, et al. Bay dynamic geomorphological effects of reclamation projects: a case study of the Zhifu Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2024, 43(5):582-594.
- [2] 蒋小翼,刘季昀.应对海平面上升海岸实体保护国家实践的国际法律问题及启示[J].中国软科学,2023(4):1-10.  
JIANG X Y, LIU J Y. Legal issues for state practices of protecting physical coasts in response to sea level rise and

- their implications[J]. *China Soft Science*, 2023(4):1-10.
- [3] KUMAGAI T, MAI T T T, BAI K, et al. Land reclamation management utilizing artificial intelligence for estimating soil properties[J]. *Geotechnical Engineering*, 2023, 54(3):67-77.
- [4] ZHANG H, LI Y T, JIANG W, et al. Marine environment numerical simulation of morphological planning of land reclamation[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2022, 236(4):996-1011.
- [5] 汪焕玲. 沿海地区道路软基处理设计[J]. *科学技术创新*, 2022(36):115-118.  
WANG H L. Design of soft foundation treatment for roads in coastal areas[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2022(36):115-118.
- [6] ZHANG W. Soft soil foundation treatment of hydraulic fill site based on vibration boosting drainage consolidation method[J]. *Archives of Civil Engineering*, 2024,70(3):431-444.
- [7] 陈盛原, 叶华洋, 张伟锋, 等. 水泥搅拌桩联合堆载排水固结法加固软基的效果评价[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(14):5743-5750.  
CHEN S Y, YE H Y, ZHANG W F, et al. Effect evaluation of cement mixing pile combined with stacked drainage consolidation method for reinforcing soft soil foundation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(14):5743-5750.
- [8] SHI D H, GAN S L, ZURADA J, et al. Research on the causes of earthwork foundation pit collapse based on fault tree and Bayesian network[C]//*Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Proceedings of the 57th Hawaii International Conference on System Sciences*. 2024:1070-1079.
- [9] AIMAR M, CIVERA M, CHIAIA B, et al. Dynamic measurements for assessing bridge response to foundation [M]//*Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability*. London: CRC Press, 2024:1592-1600.
- [10] SHAO S J, CHEN F, SHAO S. Collapse deformation evaluation method of loess tunnel foundation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(5):1289-1300.
- [11] 何帅, 黄玲玉. 基于就地固化技术的整条路基穿越水塘的道路施工方法[J]. *公路*, 2024, 69(6):61-64.  
HE S, HUANG L Y. Road construction method of the whole subgrade crossing the reservoir based on the in situ curing technology[J]. *Highway*, 2024, 69(6):61-64.
- [12] LI Z, ZHAO G F, DENG X F, et al. Further development of distinct lattice spring model for stability and collapse analysis of deep foundation pit excavation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 144:104619.
- [13] 王林峰. 路桥工程桥头跳车原因分析与处理措施[J]. *工程建设与设计*, 2024(13):98-100.  
WANG L F. Reason analysis and treatment measures of bridge bump in road and bridge engineering[J]. *Construction & Design for Engineering*, 2024(13):98-100.
- [14] HU Q Z, LI Z T, MA Q, et al. Strength tests and mechanism of composite stabilized lightweight soil using dredged sludge[J]. *Materials*, 2025, 18(2):348.
- [15] LI P, LIU X Y, DONG K, et al. Red mud and fly ash modified foamed lightweight soil reinforced by fiber for engineering applications: strength properties and microscopic mechanism[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 22:e04368.
- [16] MITAT Ö. Strength characteristics of lightweight soil with waste modified expanded polystyrene particles[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 442:137635.
- [17] 吴桑云. 深化陆海统筹研究, 服务海洋强国建设:《中国陆海统筹战略研究》书评[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(2):214.  
WU S Y. Deepening land-sea coordination research to serve the construction of a maritime power: *A Book Review of China's Land-Sea Coordination Strategy Research*[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(2):214.
- [18] LI Y Z, JIANG J J, HUANG H Y, et al. Comparative study of the foaming behavior of ethylene-vinyl acetate copolymer foams fabricated using chemical and physical foaming processes[J]. *Materials*, 2024, 17(15):3719.
- [19] YANG S Z, WANG X J, LI J W, et al. A hierarchical strengthening path for chemical foaming: the transformation toward sustainable high-performance foamed material derived from solid waste[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12(23):8792-8805.
- [20] 刘贺, 卢都友, 陈捷, 等. 物理发泡法制备结构-保温一体化碱激发多孔材料[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(9):118-121.  
LIU H, LU D Y, CHEN J, et al. Preparation of structure thermal insulation integrated alkali-activated porous materials by physical foaming method[J]. *New Building Materials*, 2017, 44(9):118-121.
- [21] ZHANG X H, ZHANG X, LI X H, et al. Slurry rheological behaviors and effects on the pore evolution of fly ash/metakaolin-based geopolymer foams in chemical foaming system with high foam content[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 379:131259.