



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2407853

引用格式:路维,李飞,王金安,等.疏浚淤泥固化机理及水稳性[J].科学技术与工程,2025,25(21):9052-9060.

Lu Wei, Li Fei, Wang Jin'an, et al. Solidification mechanism and water stability of dredged silt[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(21): 9052-9060.

## 疏浚淤泥固化机理及水稳性

路维<sup>1</sup>, 李飞<sup>2,3</sup>, 王金安<sup>1,2,3</sup>, 史燕南<sup>4,5\*</sup>

(1. 北京科技大学天津学院, 天津 301830; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;

3. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 4. 浙江广川工程咨询有限公司, 杭州 310020;

5. 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 杭州 310020)

**摘要** 随着中国河道清淤疏浚工程的开展,产生了大量疏浚淤泥,淤泥的处理处置逐渐引起了人们的高度重视,采用固化技术处理是解决疏浚淤泥困扰的有效方式之一。以浙江北白荡的疏浚淤泥为研究对象,通过X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析固化产物,并利用X射线断层扫描成像技术(X-ray computed tomography, X-CT)、压汞(mercury injection porosimetry, MIP)试验等手段,对淤泥固化土的孔隙率和孔隙结构进行定量分析,同时探索其在浸水条件与干湿循环条件下的力学变化规律和固化机理。研究表明:固化土中方解石含量随着固化剂掺量的增加而增加,普通砂掺量的增加,提升了土体内部中小孔隙率,但总体孔隙率呈降低的趋势;水稳性试验结果显示,固化淤泥土强度和稳定性随着固化剂含量增加都得到了明显提高,随砂掺量增加呈现先增大后减小趋势。

**关键词** 淤泥; 固化土; 孔隙率; 水稳性

中图分类号 TU44; 文献标志码 A

## Solidification Mechanism and Water Stability of Dredged Silt

LU Wei<sup>1</sup>, LI Fei<sup>2,3</sup>, WANG Jin-an<sup>1,2,3</sup>, SHI Yan-nan<sup>4,5\*</sup>

(1. Tianjin College, University of Science and Technology Beijing, Tianjin 301830, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. State Key Lab of Education Ministry for High Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China;

5. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Conservancy Disaster Prevention and Mitigation, Hangzhou 310020, China)

**[Abstract]** With the implementation of river dredging projects in China, a large amount of dredged silt has been generated. The treatment and disposal of silt have gradually attracted great attention. Using solidification technology is one of the effective ways to solve the problems caused by dredged silt. Taking the dredged silt from Beibaidang in Zhejiang as the research object, the solidified products were analyzed through X-ray diffraction (XRD), and the porosity and pore structure of the solidified silt soil were quantitatively analyzed by means of X-ray computed tomography (X-CT) and mercury intrusion porosimetry (MIP) tests. Meanwhile, it explores the mechanical variation laws and solidification mechanism of the soil under soaking and dry-wet cycling conditions. The research shows that the calcite content in the solidified soil increases with the increase of the solidifying agent dosage. The increase of ordinary sand dosage improves the small and medium-sized porosity inside the soil, but the overall porosity shows a decreasing trend. The results of water stability tests indicate that the strength and stability of the solidified silt soil are significantly improved with the increase of the solidifying agent content, and they first increase and then decrease with the increase of sand dosage.

**[Keywords]** silt; solidified soil; porosity; water stability

河道是水资源的载体、行洪的重要通道、生态环境的组成部分,是关系着人类生存、生活和生产的一种最基本自然资源,同时也是水生物、陆生物相互依赖的纽带,自然景观的依托。为提升水环境,清淤疏浚成为河道治理的常用方法之一。此

外,航道、港口工程疏浚、地下工程建设以及暴雨泥石流等都将产生大量的泥浆,淤泥的处理技术与处置方法的开发以及其物理力学特性的探寻一直是备受关注的热点问题和亟须解决的工程难题。

大量研究表明,采用石灰、水泥等对淤泥进行

收稿日期: 2024-10-22 修订日期: 2025-04-16

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2602605); 天津市教科研计划(2024KJ126)

第一作者: 路维(1988—),女,汉族,吉林人,硕士,副教授。研究方向: 岩土工程。E-mail: tjxyluwei@163.com。

\* 通信作者: 史燕南(1988—),女,汉族,浙江人,硕士,高级工程师。研究方向: 岩土工程。E-mail: 602721407@qq.com。

加固处理后的固化土可作为建筑材料,学者们对此开展了大量的研究。Merri<sup>[1]</sup>发明了一种液体固化剂,其掺量为干土重的0.01%时,28 d抗压强度约为3.65 MPa。Cui<sup>[2]</sup>等指出使用无机调理剂生石灰处置淤泥可以达到很好的脱水效果,但是存在余水和干化淤泥碱性过高的缺陷。沈政等<sup>[3]</sup>研究表明以5%水泥+2%粉煤灰为固化剂配比对滩涂土进行处理后,可作为路基土。孙阳等<sup>[4]</sup>指出氯氧镁水泥固化淤泥早强显著,但14 d后无侧限抗压强度会有所下降,且相同水氯比下,MgO掺量越高,生成的产物越多,无侧限抗压强度越大。杨振甲等<sup>[5]</sup>研究表明矿渣-粉煤灰基地聚物地质聚合产物为无定形地聚物凝胶、水化硅酸钙、水化铝酸钙等,增强了土颗粒之间的胶结并且填充了孔隙,提高了固化淤泥的力学性能和路用性能。章荣军等<sup>[6-7]</sup>、王文军等<sup>[8]</sup>、丁建文等<sup>[9]</sup>采用水泥对高液限、高含水率淤泥进行固化处理,提出了淤泥强度预测模型。龙开荃等<sup>[10]</sup>提出了适合抢险救灾、应急道路抢通等淤泥快速固化剂——复合型早强土壤固化剂。虽然在淤泥加固处理方面的研究十分全面,但是其研究大多都针对特定条件开展,研究具有单一性与针对性,而对于黏土类型与固化剂类型对加固后的淤泥强度影响研究尚为空白。

在耐久性研究方面,较于之前采用单纯的石灰、水泥等材料也取得了重大的进步,在建设工程、市政工程、水利工程、农业工程均有所利用<sup>[11-16]</sup>。已有研究主要关注正常环境中固化淤泥相关特性,对复杂环境作用关注较少,并且在应用的过程中逐渐暴露出不足:例如固化土稳定性差,干湿循环后容易开裂;由于土质不同,固化效果不尽如人意。现以湖荡疏浚淤泥为研究对象,以普通砂作为对比组,通过改变其掺量和粒径来调节固化淤泥的强度,以提高固化淤泥的固化效果,并结合X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、压汞测试(mercury injection

porosimetry, MIP)、X射线断层扫描(X-ray computed tomography, X-CT)来研究固化土的微观形态和孔隙结构,探索水泥、石灰、粉煤灰、三乙醇胺等组成的复合固化剂固化机理,通过浸泡试验和干湿循环试验寻找具有良好水稳性淤泥固化的技术途径,为淤泥固化土在水利、市政、建筑等行业工程中应用提供科学依据和参考。

## 1 试验材料与制备

### 1.1 试验材料

淤泥的粒度、相对密度、含水率是反映淤泥物理性质的主要指标,含水率高低和粒度与固化剂选型有密切关系,此外湖荡疏浚淤泥为高含水率的浮泥或流泥,具有流动性,自身强度极低,只有在含水率降到一定程度,土体才具有一定的强度等特点。因此对采集的湖区淤泥进行了重塑土的力学性能试验,旨在了解清淤底泥在堆泥场的渗透及强度特性。

浙江省北白荡平均淤积深度在0.34~0.75 m范围内,平均淤积厚度约0.50 m。现场采样时,主要采集其岸边3~5 m处0~50 cm的淤泥,部分地区淤泥有分层情况,整体呈灰色流塑状,取样后直接封装于PVC桶,防止淤泥失水。实验参数如表1和表2所示。

由表1可知,底泥的粒径主要以粉粒、黏粒及胶粒组成,以细颗粒为主。黏粒和胶粒很细,具有较大的比表面积和活性,能够把大量的水分和矿物质吸附在土颗粒周围,因此黏粒和胶粒含量高的土颗粒层其结合水厚,土体含水率高,孔隙比大,土质松软,强度低的特征。含水率间接反映沉积物的疏松程度,而疏松度也往往会影响固结效果。由表2可知,淤泥的渗透系数较小,表现为微透水,整体物理指标表现为高含水率、高液限、高压缩性、低强度的超软土,固疏浚吹填的固结性能较差。

表1 疏浚淤泥重要物理指标统计表

Table 1 Statistical table of important physical indicators of dredged silt

含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	土粒相对密度	土粒组成/%		
					0.075~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm
97.6	53.2	28.3	24.9	2.72	60.0	15.0	25.0

表2 疏浚淤泥的渗透、固结、直剪指标统计表

Table 2 Statistical table of permeability, consolidation and direct shear indexes of dredged silt

渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )		固结		直剪			
水平	垂直	固结系数0.1~0.2		快剪		固快	
		压缩系数/MPa <sup>-1</sup>	压缩模量/MPa	凝聚力/kPa	摩擦角/(°)	凝聚力/kPa	摩擦角/(°)
4.2×10 <sup>-7</sup>	1.4×10 <sup>-7</sup>	0.935	2.53	6.0	5.6	12.0	13.8

针对疏浚淤泥含水率高、孔隙比大、可压缩性强及强度低的特点,尝试引入高吸水性、高膨胀性的材料,进行水化反应,填充于土颗粒或土团粒孔隙间,提高土体密实性,从而提高强度。

### 1.2 固化方案

淤泥固化属于土壤固化范畴,固化剂种类非常丰富,常用的有水泥、石灰、粉煤灰等无机类胶凝材料,其中水泥(硅酸三钙、硅酸二钙)及粉煤灰通过水化、离子交换以及碳酸化反应,生成碳酸钙、硅铝酸盐胶凝物质,起到连接土颗粒与填充孔隙的作用,使得土体的整体稳定性与强度得到提高;石灰和氢氧化钠加入可提高土体的 pH,可促进淤泥质土中黏粒的硅、铝物质溶于水中,与氢氧化钙发生化学反应,其生产的水化物可大幅提高固化土的强度;此外三乙醇胺作为一种早强剂,可以缩短无机类材料水解水化过程的潜伏期,促进铝酸三钙的硬化,提高土体的早期强度;掺入硅酸钠的目的主要有两点:一是硅酸钠溶于水后,可提供与生石灰类似的碱性环境;二是硅酸钠溶于水后可作黏合剂,增强土颗粒间的黏结能力,从而可提高土体抗压强度。

根据前期固化剂配合比试验最终确定 PO42.5 硅酸盐水泥、二级粉煤灰、石灰、三乙醇胺等材料为主要固化剂。以水泥 27 份、石灰 11.85 份、粉煤灰 39 份、三乙醇胺 0.15 份、氢氧化钠 3 份、硅酸钠 19 份等为复合固化剂,各成分占比如表 3 所示。

表 3 固化剂主要成分及占比

Table 3 The main components and proportions of the solidifying agent

成分	含量/%	其他要求
水泥	25 ~ 35	42.5 硅酸盐水泥
粉煤灰	30 ~ 50	二级
CaO	10 ~ 15	含量 75% 以上
三乙醇胺	0.2 ~ 0.5	分析纯

### 1.3 试样制备

将淤泥土风干、碾碎,过 2 mm 方孔筛后用搅拌机搅匀,配制成含水率为 70% 的样品,将不同种类、不同掺比的固化剂分别加入泥样中,缓慢加入水,直至水灰比为 0.5。然后进行搅拌,先低速搅拌 60 s,静置 90 s 后,用铲刀将搅拌叶片上及杯壁上的试样刮入锅中,再快速搅拌 60 s,采用振动法(分 3 层,每层各振动 1 min)或静力压实法成型。试件成型完毕后,用湿布覆盖表面,以防水分蒸发。在室温为 22 °C 左右静置 1 d 后脱模,在标准养护条件下养护 7 d,恒温:(20 ± 2) °C,恒湿:相对湿度 90% 以上。

## 2 淤泥固化土微观性质分析

由于目前对淤泥固化土的微观机理缺乏系统性认识,为了深入探讨其微观固化机制,引入 X 射线衍射技术对物质成分进行相对定量分析,并采用扫描电镜和压汞试验对孔隙率及孔隙结构进行定量评估,以全面掌握淤泥固化土的微观成分及孔隙特征。

### 2.1 XRD 测试结果分析

为了探究加入固化剂和骨架基体材料前后的成分变化,以前期复合固化剂、普通砂(S)为基础,试样含水率配制至 40%,采用重型击实进行制样,配制原状土(G0)、固化剂掺量 8%(G8)、固化剂掺量 15%(G15)和固化剂掺量 8% + 普通砂掺量 5%(G8S5)、固化剂掺量 8% + 普通砂掺量 10%(G8S10)、固化剂掺量 8% + 普通砂掺量 15%(G8S15)等 6 种固化土。通过 XRD 对样品 G0、G8、G15、G8S5、G8S10 和 G8S15 进行物相分析。

X 射线衍射图谱的分析主要是对衍射峰的识别。图谱中的衍射峰形状、强度及  $2\theta$  均反映了矿物的晶体结构,因此可用于矿物种类的鉴定及相对含量的计算。根据结果(如表 4 和图 1 所示)可知,固化

表 4 XRD 测试结果

Table 4 The results of XRD test

物相	含量/%					
	G0	G8	G15	G8S5	G8S10	G8S15
刚玉	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
石英	37.07	37.19	35.85	37.86	36.60	37.45
斜长石	14.47	16.22	15.75	13.90	14.86	15.05
正长石	4.08	3.70	3.96	4.82	5.50	5.61
方解石	—	3.01	4.08	2.53	2.49	2.10
非晶型物质	34.37	29.88	30.36	30.89	30.55	28.42

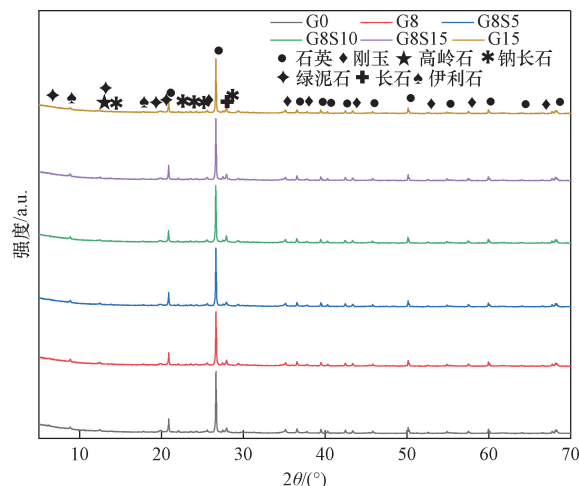


图 1 G0、G8、G15、G8S5、G8S10 和 G8S15 的 XRD 分析结果  
Fig. 1 The XRD analysis results of G0, G8, G15, G8S5, G8S10 and G8S15

土主要矿物相包括刚玉(铝氧化物, corundum)、石英(二氧化硅, quartz)、斜长石(钙铝硅酸盐复合物, microcline intermediate 1)、正长石(钙铝硅酸盐复合物, orthoclase)、方解石(碳酸钙, calcite)及少量非晶态物质(amor),同时可观察到其衍射图谱的弥散峰并不明显。原状土与不同固化土的基本矿物相成分大致相似,但存在微小差异,例如固化剂主要成分为CaO,导致方解石随着固化剂掺量的增加而整体上升。然而,随着砂含量的增加,方解石的相对含量则有所下降。方解石通常呈现针状或絮状,覆盖于土体表面或填充土骨架的孔隙,从而显著提升固化土的强度。

观察图1可知,3个实验组的XRD谱线基本重叠,原状土与固化土的主要物相均为伊利石(白云母),石英(20.86°、26.65°和60.12°),少量斜方钙沸石(8.86°、22.05°和51.14°),还有非晶态物相,但弥散峰不明显。掺入固化剂后,虽没有新的物相产生,随着固化剂掺量的增加,29.35°处碳酸钙峰逐渐明显,初步判断这是由于固化剂与黏土矿物形成的,因此从实验现象可知,随着固化剂掺量的增加,固化土强度应随之增长。而对比G8、G8S5、G8S10和G8S15,随着普通砂掺量增加,XRD图谱则几乎没有区别。

## 2.2 X-CT 测试结果分析

采用德国YXLON公司生产的YCT Precision型号X射线断层扫描仪(X-CT)对固化土样品进行微结构分析。X-CT设备的最大管功率320 W,像素数量10 242 pixel,样品外径≤140 mm,有效扫描高度200 mm,放大倍率1.6~200倍。

通过X-CT扫描G0、G8、G15和G8S15四种固化土,统计结果如表5所示,3D微结构如图2所示。

针对X-CT无损扫描图像进行三维重构,并以灰度值统计孔隙、裂缝及缺陷体积率,统计范围为 $1.61 \times 10^{-33} \sim 53.2 \text{ mm}^3$ ,由结果可知,样品G0、G8、G15和G8S15的孔隙率分别为2.34%、1.24%、2.35%和1.21%,从层片剖视图也可以看出,样品G8和G8S15中存在较多细小裂纹,而样品G0和G15中除细小裂纹外,还存在较多的孔洞结构,应该主要由于成型时所致。样品G0、G8、G15和G8S15

表5 X-CT分析统计结果

Table 5 Statistical results were analyzed by X-CT

编号	总体素	表面积/ mm <sup>2</sup>	等密 度面	材料体积/ mm <sup>3</sup>	缺陷体积/ mm <sup>3</sup>	孔隙率 /%
G0	$5.44 \times 10^6$	$1.68 \times 10^4$	221	$4.58 \times 10^4$	1 095	2.34
G8	$3.44 \times 10^6$	$1.88 \times 10^4$	266	$5.51 \times 10^4$	692	1.24
G15	$5.01 \times 10^6$	$1.95 \times 10^4$	290	$4.20 \times 10^4$	1 008	2.35
G8S15	$3.16 \times 10^6$	$1.75 \times 10^4$	280	$5.19 \times 10^4$	637	1.21

中均存在白色物质,根据X-CT原理可知白色是密度较高的物质,根据配比判断应该为普通砂,其中G8S15中均匀分布的白色物质最多,样品G0、G8和G15中白色点状物质较少,且多为大颗粒状。由此可知,骨架基体材料的引入在一定程度上可提高黏土的固化程度,固化剂与砂复掺固化土的强度和耐久性高于单一固化土。

## 2.3 MIP 测试结果分

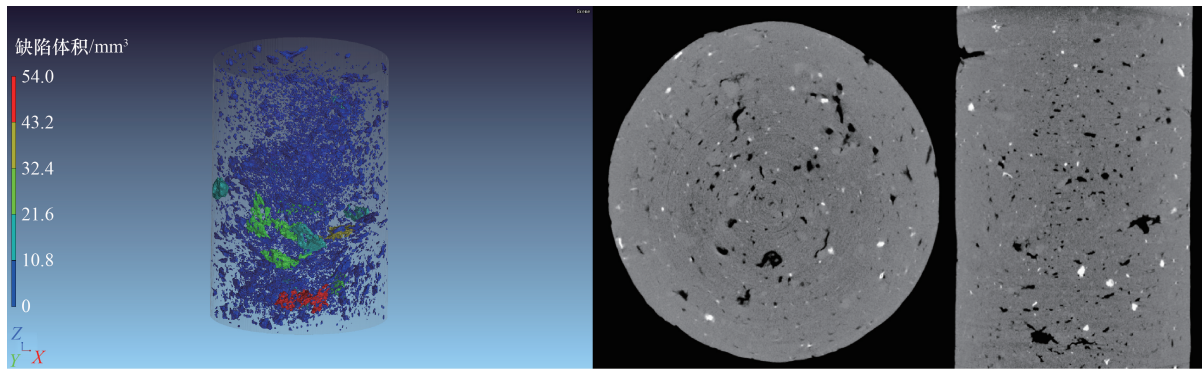
通过观察固化土的X-CT微结构分析时发现,固化土的强度和耐久性会受到普通砂掺入量的影响。为探究其影响机理,进行不同掺入量下普通砂机械性能对比试验研究。配制原状土(G0)、固化剂掺量8%(G8)、固化剂掺量8%+普通砂掺量5%(G8S5)、固化剂掺量8%+普通砂掺量10%(G8S10)和固化剂掺量8%+普通砂掺量15%(G8S15)等5种固化土,按成型时上、中、下切样。采用Auto pore IV 9520压汞仪对G0、G8、G8S5、G8S10和G8S15的孔隙结构进行分析,结果如图3和表6所示。

由图3和表6可知,G0的孔隙率最低,加入8%的固化剂后,孔隙率反而增大了14.1%,同时添加固化剂和普通砂相较于G8样品的孔隙率低,且随着骨架基体材料(普通砂)掺量的增加,孔隙率呈降低的趋势,G8S15的孔隙率相较于G8降低了3.3%;而相比G0,平均孔径随着固化剂或普通砂的掺入有所增加。压实成型的固化土中存在大量中孔和大孔以及裂缝,固化剂的引入并未显著改善固化土的微观结构,但降低了中、大孔的分布密度,最可积孔径有所减小,表明土壤性质已发生变化。固化剂与水发生反应生成水化产物,形成了包裹淤泥

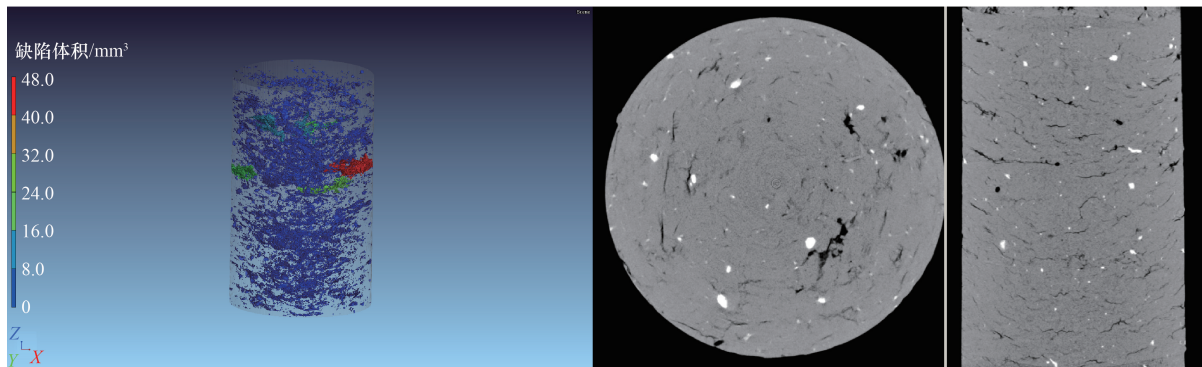
表6 压汞测试结果

Table 6 The results of MIP test

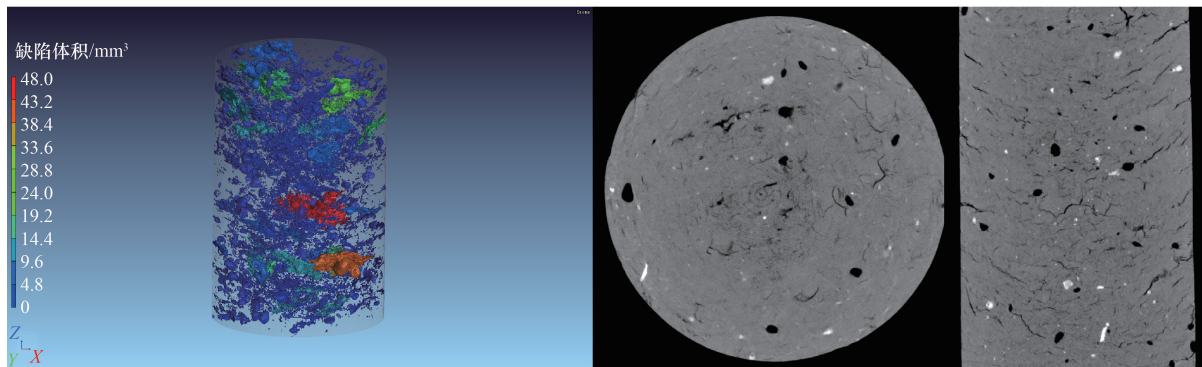
序号	样品 编号	孔隙率/ %	平均孔径/ nm	比表面积/ (g·m <sup>-2</sup> )
1	G0 上	30.9	44.41	16.042
2	G0 中	24.2	40.63	12.463
3	G0 下	23.8	41.10	12.101
4	G8 上	41.5	47.36	23.833
5	G8 中	40.7	46.71	23.472
6	G8 下	38.9	40.79	24.603
7	G8S5 上	38.2	43.79	22.401
8	G8S5 中	40.2	45.65	23.352
9	G8S5 下	38.9	41.76	24.591
10	G8S10 上	38.4	40.56	24.696
11	G8S10 中	37.9	43.95	21.793
12	G8S10 下	38.3	44.95	21.758
13	G8S15 上	36.3	45.90	20.554
14	G8S15 中	37.2	44.62	21.028
15	G8S15 下	37.1	45.76	20.476



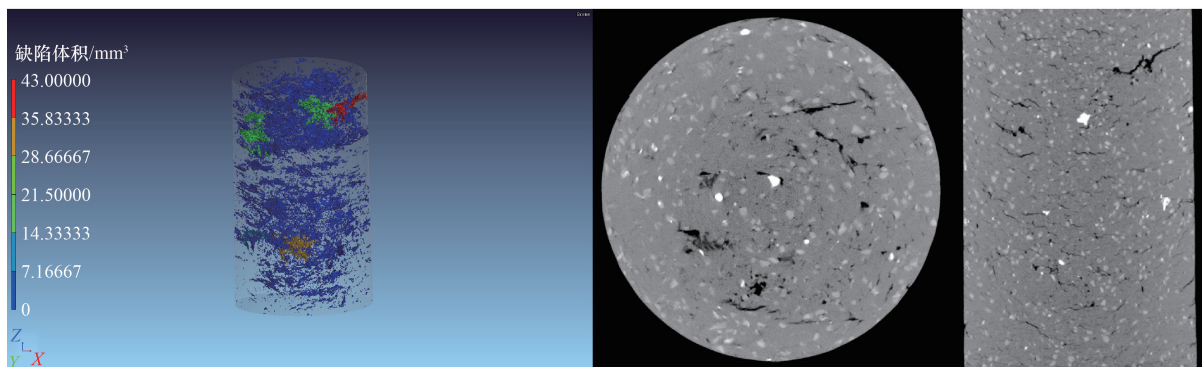
(a) G0号样品



(b) G8号样品



(c) G15号样品



(d) G8S15号样品

图2 X-CT 微结构分析(三维重构、俯视图、正视图)

Fig. 2 Microstructure analysis of X-CT (3D reconstruction, top view, front view)

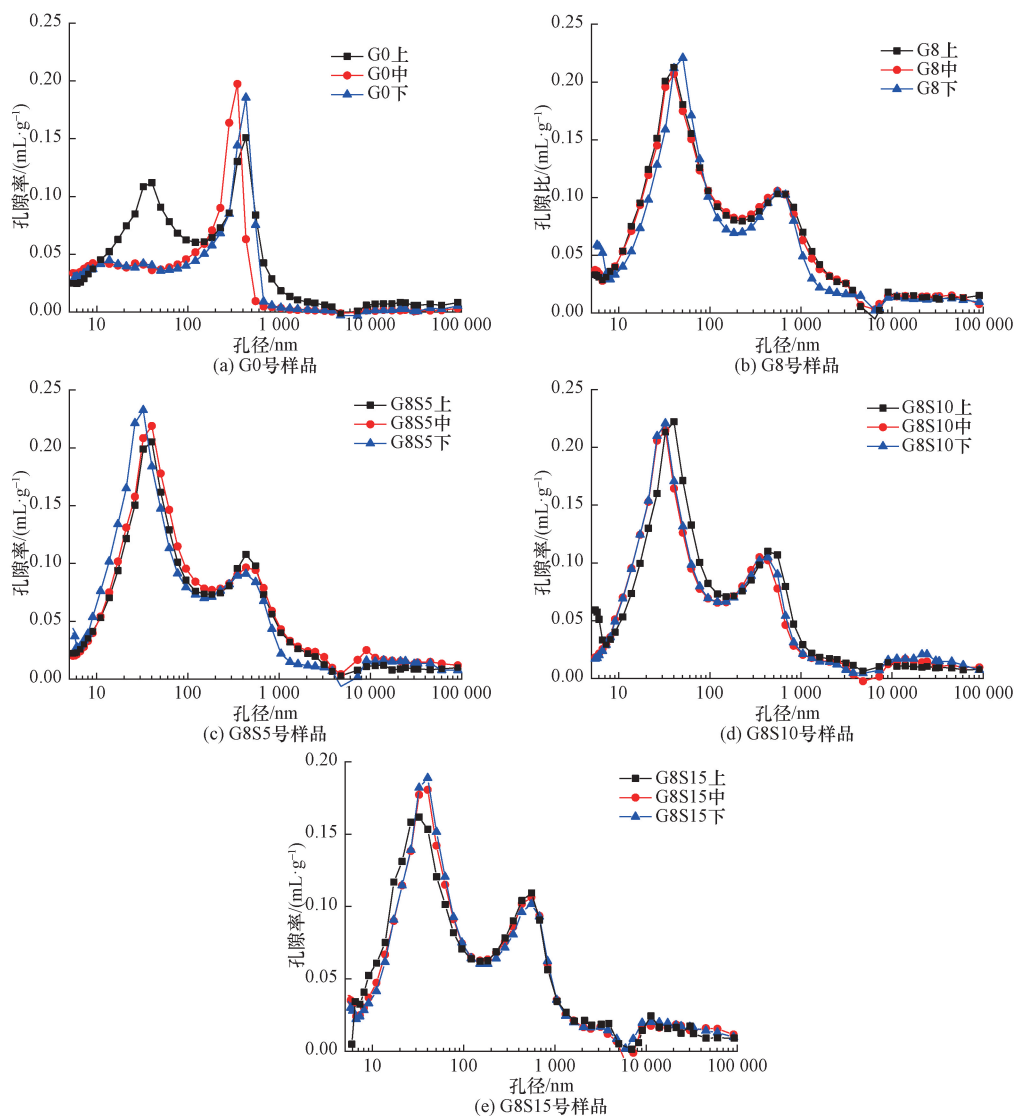


图3 G0、G8、G8S5、G8S10和G8S15孔径分布

Fig. 3 The pore size distributions of G0, G8, G8S5, G8S10 and G8S15

颗粒的明显骨架结构。G8中部分水化产物膨胀可能导致裂隙的形成,从而显著增加孔隙率;而G8S5、G8S10和G8S15固化土的骨架间由普通砂填充,相较于G0样品的孔隙率有所上升,但相比G8样品则略有降低。总体来看,骨架结构的形成对增强强度是有利的。

### 3 淤泥固化土水稳性试验研究

浙江省地处中国东部沿海长江三角洲南翼,河网密布,梅汛期降雨充沛,台风影响频繁,限制了一般固化土的推广和应用,如何改善因季节、雨量、周期性气温等因素导致的固化土耐久性低的问题,是研究的重点。因此模拟长期浸水环境、干湿循环环境,开展水稳性试验。

#### 3.1 浸水试验

为确定浸泡天数,前期进行了1~14 d浸泡的

强度损失率测试,结果显示经过1 d浸泡后,强度损失已接近30%。因此,为了提高实验效率,接下来的试验将采用养护7 d、浸泡1 d,并结合不同固化剂和砂掺量的固化土进行研究。

由不同配比的实验结果可知,1 d浸泡强度损失已接近30%,因此为了加快试验进度,采用养护7 d、浸泡1 d、不同固化剂掺量和砂掺量的固化土来进行下一步试验。

具体配比如下:①固化剂8%(G8);②固化剂10%(G10);③固化剂15%(G15);④固化剂20%(G20);⑤固化剂8%+普通砂15%(粒径=0.5~1 mm)(G8S15);⑥固化剂8%+普通砂20%(粒径=0.5~1 mm)(G8S20),不同配比实验结果如表7和图4、图5所示。

由不同配比的实验结果可知,浸泡1 d后,强度均有所损失,各固化土的强度损失率为4.93%~30.83%;

表7 不同配比的固化土强度、含水率等指标统计

Table 7 Statistical table of indicators such as strength and moisture content of solidified soil with different proportions

固化土	无侧限抗压强度/kPa		强度损失率/%	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	
	浸泡前	浸泡1 d后		浸泡前	浸泡1 d后
G8S10	1 503.04	1 062.25	29.33	1.83	1.81
G8S15	1 563.96	1 133.24	27.54	1.91	1.86
G8S20	1 100.33	761.09	30.83	1.89	1.89
G8	944.02	735.40	22.10	1.82	1.81
G10	1 245.05	1 040.24	16.45	1.95	1.82
G15	1 928.26	1 743.99	9.56	1.90	1.80
G20	2 555.67	2 429.64	4.93	1.90	1.84

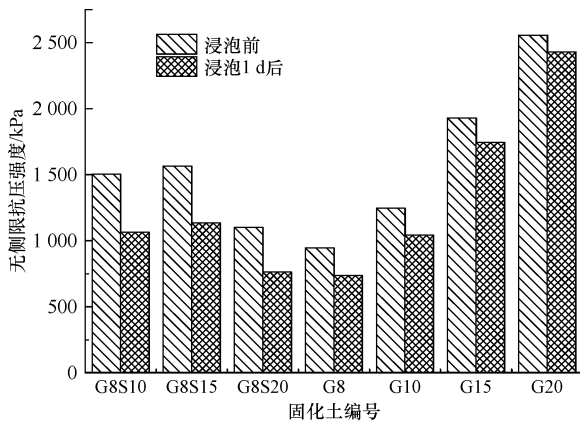


图4 不同配比下浸泡前后的固化土强度

Fig. 4 The strength of solidified soil before and after soaking under different proportions

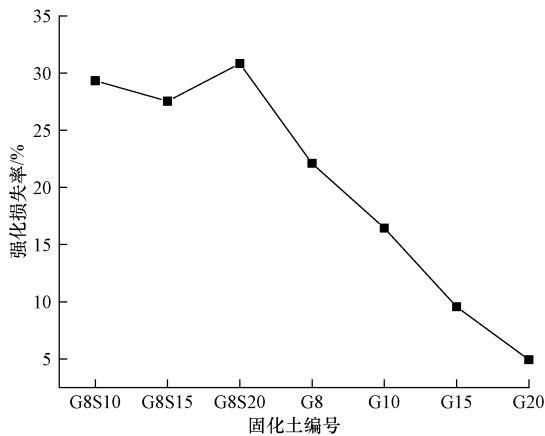


图5 不同配比下的固化土强度损失率

Fig. 5 The strength loss rate of solidified soil under different proportions

总体上可以看出,随着固化剂、骨架基体材料(普通砂)掺量的增加,无侧限抗压强度有所增加,浸泡前后的强度损失相应减少,G8、G10、G15、G20 固化土强度损失率为 4.93% ~ 22.10%;加入骨架基体材料(普通砂)后,G8S10、G8S15、G8S20 相对未加入骨架基体材料(普通砂)(G8)的强度增加了 16% ~

66%;但浸泡 1 d 后,G8S10、G8S15、G8S20 的无侧限抗压强度损失率高达 27.54% ~ 30.83%,相比未加入骨架基体材料的初始浸泡强度损失率更大,主要由于骨架基体材料(普通砂)的加入增加了土体内部中小孔隙率,导致浸水后水分顺着小孔隙在土体内部均匀分布,强度损失增大;而单纯固化剂的加入,虽然平均孔隙率较高,但孔径相对较大,浸水 1 d 可能未完全渗透土体内部,因此初期浸水的强度损失率较小。这一点证实了 MIP 测试结果。此外,浸泡前后密度呈现降低趋势。

### 3.2 干湿循环试验

养护 7 d 后进行干湿循环试验。采用低温干燥和浸水方式,40 °C 烘箱中烘干 24 h、蒸馏水浸泡 24 h 为 1 个干湿循环周期,研究不同干湿循环周期(1、5、8、10、15 个)下,观察固化土前后变化情况,最后一次循环后沥水 1 h 后称重,并进行无侧限抗压强度试验。试验研究表明随着循环周期的增长,固化土质量损失的越多,15 个干湿循环周期内的固化土,质量损失变化率与循环周期基本呈现三次方关系,决定系数 R<sup>2</sup> 接近于 1,拟合较好,如式(1)所示。

$$\beta = -0.0008444 - 3.7653n - 0.2124n^2 + 0.00359n^3 \quad (1)$$

式(1)中:β为干湿循环前后质量变化率,% ;n为干湿循环周期,次。其一个周期的分析数据如表 8 所示。

强度测试结果如表 8 及图 6 和图 7 所示,可以看出,干湿循环 1 周期后,强度均有所损失。G8 强度损失最严重,为 29.87%,G8S15、G8S20 相对损失率有所减少,但依然超过 10%;随着固化剂的增加,无侧限抗压强度有所增加,浸泡前后的强度损失相应减少,G8、G10、G15、G20 固化土强度损失率为 7.73% ~ 29.87%;干湿循环 1 周期后,密度有所降低。

表8 不同配比的固化土强度、含水率等指标统计

Table 8 Statistics of solidified soil strength, moisture content and other indexes of different proportions

固化土	无侧限抗压强度/kPa		强度损失率/%	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	
	循环前	干湿循环 1 周期后		循环前	干湿循环 1 周期后
G8S10	1 503.04	1 279.03	14.90	1.83	1.81
G8S15	1 563.96	1 371.07	12.33	1.91	1.75
G8S20	1 100.33	925.29	15.91	1.89	1.71
G8	944.02	662.03	29.87	1.82	1.66
G10	1 245.05	979.24	21.35	1.95	1.70
G15	1 928.26	1 648.94	14.49	1.90	1.72
G20	2 555.67	2 358.15	7.73	1.90	1.77

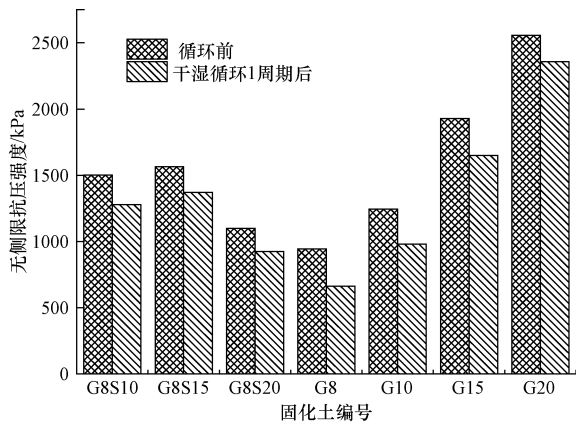


图6 不同配比下浸泡前后的固化土强度

Fig. 6 The strength of the stabilized soil before and after soaking under different proportions

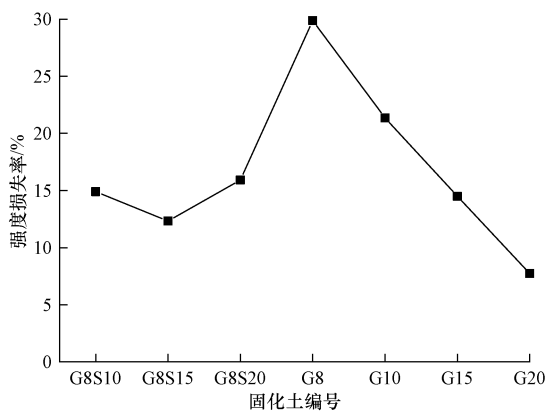


图7 不同配比下的固化土强度损失率

Fig. 7 The strength loss rate of solidified soil under different proportions

由试样初始强度可知,在固化剂掺量一定时,固化淤泥无侧限抗压强度随砂掺量的增加呈现先增加后减小的趋势,说明砂掺量存在最优值,结合微观结构分析可知,掺入砂料后,固化淤泥形成了较密实的骨架,强度提高,但超过一定量后固化淤泥土的破坏形式凸显为脆性剪切破坏,强度反而降低。另外,由浸泡试验和干湿循环试验可知,随着固化剂掺量的增加,固化淤泥稳定性得到了提高,结合微观结构分析可知,这是由于方解石的含量增加提高了固化淤泥的耐久性。

## 4 结论

疏浚淤泥固化处理及资源化利用已成为国际环境岩土工程领域的研究热点。基于目前固化土遇水易软化问题,选取浙江省北白荡疏浚淤泥为研究对象,通过引入水泥、粉煤灰、石灰、三乙醇胺作为主固化剂。采用 X-CT 定性分析固化土的微观结构,同时利用 MIP 定量分析固化土的孔隙结构和孔

隙率,筛选出合适的固化土配比进行水稳性耐久性试验,为湖荡堤防加固或今后类似工程提供技术参考。主要结论如下。

(1)通过 MIP 和 X-CT 等测试手段掌握固化土孔隙结构和孔隙率的变化情况,结果表明,骨架基体材料均匀分布在固化土体中,在固化剂掺量较小的情况下,可相对提高固化土密实度。另外,压实成型的固化土中存在较多的中、大孔及裂缝,但固化剂的加入减少了固化土中的中、大孔分布,最可积孔径减小,即减少了大于 100 nm 的有害孔隙,说明土性质已经发生改变,固化剂与水反应生成水化产物,包裹淤泥颗粒,形成明显的骨架结构,刚性骨架材料的支撑使得单位截面上的应力增强,有利于固化土强度增加。

(2)针对固化土遇水易软化等问题,提出采用浸水和干湿循环下的无侧限抗压强度试验研究,结果表明,经过浸泡/干湿循环后,无侧限抗压强度均呈现下降趋势,但总体上试验前后的固化土分别随着固化剂掺量的增加而增加。对于 G8、G8S10、G8S15、G8S20 来说,G8S10 的强度在水稳试验前后均表现良好,且相比 G8S15 更具经济性,优势突出。

## 参 考 文 献

- [1] Merri E. Chemical soil stabilization; US, 5000789 [P]. 1990-05-11.
- [2] Cui Y, Zhu W, Wu S, et al. The role of lime in dredged mud dewatered by a plate and frame filter press and potential substitutes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(3): 1-12.
- [3] 沈政,陈龙,陈永辉,等. 滩涂地区软土就地固化技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6815-6822.  
Shen Zheng, Chen Long, Chen Yonghui, et al. Solidification technology of soft soil in beach area[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(16): 6815-6822.
- [4] 孙阳,刘文化,李吴刚,等. 氯氧镁水泥固化淤泥力学性能试验与微观机理研究[J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(3): 313-320.  
Sun Yang, Liu Wenhua, Li Wugang, et al. Mechanical properties experiment and micro-mechanisms study of solidified sludge with magnesium oxychloride cement[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63(3): 313-320.
- [5] 杨振甲,何猛,吴杨,等. 矿渣-粉煤灰地聚物固化淤泥力学性能和路用性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 693-703, 724.  
Yang Zhenjia, He Meng, Wu Yang, et al. Mechanical properties and road performance of slag-fly ash geopolymer stabilized sludge [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2): 693-703, 724.
- [6] 章荣军,郑少辉,郑俊杰. 低掺量水泥固化高含水率黏土强度特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 101-106.  
Zhang Rongjun, Zheng Shaohui, Zheng Junjie. Strength characteristics of high water content clay stabilized with low dosage of cement

- [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(10): 101-106.
- [7] Zhang R J, Santos A M, Tan T S, et al. Strength of high water-content marine clay stabilized by low amount of cement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2013, 139(2): 2170-2181.
- [8] 王文军, 袁飞飞, 蒋建良, 等. 高含水率吹填淤泥固化土强度特性及预测模型[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 461-467.  
Wang Wenjun, Yuan Feifei, Jiang Jianliang, et al. Strength characteristics and prediction model of solidified soil from high water content dredged silt[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 461-467.
- [9] 丁建文, 刘铁平, 曹玉鹏, 等. 高含水率疏浚淤泥固化土的抗压试验与强度预测[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 55-60.  
Ding Jianwen, Liu Tiejing, Cao Yupeng, et al. Compression test and strength prediction of solidified soil from high water content dredged silt [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 55-60.
- [10] 龙开荃, 方祥位, 申春妮, 等. 复合型早强土壤固化剂固化淤泥强度特性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 309-318.  
Long Kaiquan, Fang Xiangwei, Shen Chunni, et al. Strength characteristics of composite early strength soil stabilizer solidified silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1): 309-318.
- [11] 秦玉禹, 秦子鹏, 黄煌, 等. 水泥与粗颗粒工程弃土复合固化改良淤泥土试验研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12): 5076-5087.  
Qin Yuyu, Qin Zipeng, Huang Huang, et al. Experimental study on composite solidification and improvement of silt soil by cement and coarse particle engineering spoil[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(12): 5076-5087.
- [12] 钱晓彤, 陈庚, 李锋. 一种自修复固化土的抗拉强度试验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3770-3775.  
Qian Xiaotong, Chen Geng, Li Feng. Experiment on tensile strength of a self-healing solidified soils[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3770-3775.
- [13] 李丽华, 毛望, 裴尧尧, 等. 酸性干湿循环下赤泥-石灰固化镉铅污染土性能[J]. 有色金属工程, 2024, 14(5): 135-142.  
Li Lihua, Mao Wang, Pei Yaoyao, et al. Performance of red mud-lime solidified cadmium and lead contaminated soil under acidic dry-wet cycles [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(5): 135-142.
- [14] 陈锐, 张星, 朱月. 钢渣水泥基地聚合物固化湿软黄土力学特性与微观机制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 55-61.  
Chen Rui, Zhang Xing, Zhu Yue. Mechanical properties and microscopic mechanism of steel slag-cement based geopolymer solidified wet and soft loess[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(6): 55-61.
- [15] 陈文峰, 夏新星, 李世汭. 菌渣改良淤泥固化土及其促进黑麦草的生长[J]. 环境工程, 2022, 40(7): 116-122, 68.  
Chen Wenfeng, Xia Xinxing, Li Shimin. Improvement of sludge solidified soil with mushroom residue and Its promotion of ryegrass growth[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(7): 116-122, 68.
- [16] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1273-1277, 1298.  
Li Yipeng, Li Ting. Solidification mechanism and research progress of soil stabilizers[J]. Materials Review, 2020, 34(S2): 1273-1277, 1298.