

清淤泥浆脱水-固化一体化工艺效果和机制研究

林小蔚^{1,2}, 侯 豪^{1,2}, 刘 环^{1,2}, 季 浪^{1,2}, 谈正伟^{1,2}, 朱 伟^{1,3}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 疏浚工程中清淤泥浆的含水率通常非常高, 常采用先脱水为泥饼再进行固化的方法, 处理效率相对较低。为此选择普通硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥作为固化材料, 结合絮凝材料和板框压滤技术, 对太湖清淤泥浆进行脱水-固化一体化工艺研究。通过比阻试验和固化试验等手段, 分析了该工艺中泥浆的脱水性能、固化效果的变化规律以及固化材料的损失情况。此外, 还基于一体化工艺试验中泥浆的基本性质变化, 讨论了固化材料流失的途径以及对泥浆脱水性能的影响机制。研究结果表明, 采用脱水-固化一体化工艺能够改善清淤泥浆的粒径、压缩性, 从而提高脱水特性, 并且在工艺过程中固化材料的流失在 9% 以内, 由于脱水泥饼性质更好, 后续同样能够实现良好的固化效果。实际工程应用中, 采用脱水固化一体化工艺可以提升泥浆处理的效率。

关 键 词: 清淤泥浆; 脱水; 固化; 泥处理; 泥利用

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 02-443-11

Effect and mechanism of dredged mud by the integrated dewatering-curing process

LIN Xiao-wei^{1,2}, HOU Hao^{1,2}, LIU Huan^{1,2}, JI Lang^{1,2}, TAN Zheng-wei^{1,2}, ZHU Wei^{1,3}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. College of Environment, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In dredging projects, the water content of dredged mud is typically very high. The conventional method of dewatering and curing into mud cake has relatively low treatment efficiency. To address this issue, a study was conducted on the integrated dewatering-curing process of Taihu dredged mud. Ordinary Portland cement and calcium sulfoaluminate cement were chosen as curing materials, along with flocculants and plate and frame press filter technology. The study analyzed the dewatering performance of the slurry, the pattern of curing effect changes, and the loss of curing materials through specific resistance tests and curing tests. The pathway of curing material loss and its impact on the dewatering performance of the mud were discussed based on the fundamental property changes observed during the integrated process experiments. The results demonstrated that the integrated dewatering-curing process can enhance the dewatering characteristics by improving the particle size and compressibility of the dredged mud. The loss of curing material during the process was found to be less than 9%. The dewatering mud cake exhibited improved properties, resulting in effective curing effects. In practical engineering applications, the use of the integrated dewatering-curing process can enhance the efficiency of mud treatment.

Keywords: dredged mud; dehydration; solidification; mud treatment; mud utilization

1 引 言

近年来, 我国每年都进行河流、湖泊和水库的清淤工程, 产生的淤泥超过 1 亿 m^3 ^[1], 这对改善水

质起到了重要作用。然而大量清淤淤泥的后续处理和处置问题成为了制约工程实施的关键问题。在现有的环保清淤工程中, 常采用水力清淤的方式产生泥浆, 其含水率通常在 400%~1 000%^[2]之间。经过

收稿日期: 2023-02-20

录用日期: 2023-05-23

基金项目: 江苏水利科技项目 (No. 2021009); 国家重点研发项目 (No. 2022YFC3202700)。

This work was supported by the Hydraulic Science and Technology Project of Jiangsu Province (2021009) and the National Key Research and Development Program of China (2022YFC3202700).

第一作者简介: 林小蔚, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: lxw04026514@126.com

通讯作者: 朱伟, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与环境工程方面的研究。E-mail: weizhu863@126.com

板框压滤脱水处理后,泥饼的含水率一般在 55%~60%之间,初步满足了渣土外运的要求^[3]。但如果要进行堆填或利用,就需要进行额外的固化处理,利用水泥水化反应将淤泥中过量的水分转化为水化产物从而增加强度。

为了提高脱水效率,在进行板框压滤之前,常使用絮凝材料改善泥浆的过滤性质,并添加石灰增强絮团的刚度以防止过滤过程中絮团变形过大而阻碍过滤^[4]。然而,一些学者发现使用石灰会导致压滤水的碱性过高^[5],因此进行了替代石灰的材料研究。研究发现,某些种类的水泥同样具有增加絮团刚度的效果可以作为石灰的替代品^[6]。基于水泥的固化效果,提出了一种设想,即在絮凝后的清淤泥浆中加入水泥类固化材料,再进行脱水处理。这种方法可以通过固化材料促进泥浆脱水,同时减少了后续固化时脱水泥饼和固化材料的混合步骤。

已有部分学者对这种脱水-固化一体化的工艺进行了研究。例如,李世汭等^[7]通过组合聚合氯化铝(polyaluminum chloride,简称 PAC)、聚丙烯酰胺(polyacrylamide,简称 PAM)和环保固化剂进行室内泥浆处理试验,发现固化剂的使用可以减小聚合氯化铝和聚丙烯酰胺的用量,同时保持相同的脱水效率;郑耀林等^[8]通过使用絮凝材料联合固化材料处理预先调理的吹填泥浆,确定了最佳絮凝材料掺量和吹填地基强度增长规律;王东星等^[9]使用真空预压与不同絮凝-固化联合法处理超高含水率的疏浚泥浆,显著提高了泥浆的脱水效果和淤泥的不排水抗剪强度;肖涵等^[10]则使用石灰与水泥进行絮凝-固化联合处理淤泥浆提高效率。通过上述研究可以发现,目前关于板框压滤与絮凝及固化联合处理疏浚泥浆的研究较少,且固化材料的加入对泥浆絮凝脱水的具体影响和效果尚未得到充分研究。

在泥浆脱水性能方面,研究指出,泥浆的絮凝效果受到泥浆 Zeta 电位的影响^[11],泥浆处理工程中常用铝盐和铁盐来降低泥浆 Zeta 电位以实现絮凝作用。泥浆颗粒的粒径对脱水效率也有一定影响,Skouteris^[12]、Hu^[13]、Wu^[14]等通过试验研究发现,泥浆颗粒粒径越大,脱水效率越高。此外,一些学者研究了淤泥絮团的压缩性对脱水性能的影响,发现靠近过滤介质附近的泥皮会压缩降低渗透性,从而导致泥浆后续脱水缓慢^[15]。已有学者通过在淤泥中加入稻壳粉、石膏等材料来降低淤泥的压缩性,提升脱水能力^[16-17]。

本文通过室内板框压滤试验,研究泥浆粒径、Zeta 电位、比阻值、絮团压缩性、固化强度、固化

材料流失等参数的变化情况,探讨一体化工艺中固化材料的效果。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

选用淤泥为太湖梅梁湾白旆堆场淤泥,其物理性质见表 1,颗粒级配组成见表 2。在堆场采样得到含水率为 56.7%的淤泥,试验时加入自来水调制成含水率为 1 000% (相当于清淤浓度 10%) 的泥浆。絮凝材料为阳离子聚丙烯酰胺(cationic polyacrylamide,简称 CPAM),固化材料为普通硅酸盐水泥(ordinary Portland cement,简称 OPC,强度为 32.5 MPa)及中性固化材料硫铝酸盐水泥(sulphoaluminate cement,简称 SAC,强度为 32.5 MPa),其成分见表 3。

表 1 淤泥的基本性质

Table 1 Basic properties of mud

土粒相 对密度	初始含水率 / %	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	有机质含量 / %
2.68	50.1	32.0	21.1	10.9	5.06

表 2 淤泥颗粒级配组成

Table 2 Particle grading composition of mud

土类	粒径分布范围 / mm	含量 / %
砂粒	0.075~2.000	11.05
粉粒	0.005~0.075	72.30
黏粒和胶粒	<0.005	16.65

表 3 固化材料成分组成

Table 3 Composition of curing material

材料	SiO ₂ / %	Al ₂ O ₃ / %	Fe ₂ O ₃ / %	CaO / %	SO ₃ / %
SAC	3~10	28~41	1~3	35~46	8~15
OPC	20~24	5~9	2~4	63~67	—

2.2 试验方法

针对泥浆脱水性能、脱水效果、固化效果及固化材料损失 4 个方面进行试验,具体内容见表 4。

表 4 试验参数设置

Table 4 Experimental parameter setting

试验种类	试验内容	固化材料 种类	固化材料 添加量/%	固化材料 添加顺序
脱水性能试验	比阻、Zeta 电位、 粒径、压缩性、 板框脱水曲线	OPC, SAC	0.0, 2.5, 5.0, 10.0	—
脱水效果试验	泥饼密度、 贯入强度	OPC, SAC	0.0, 2.5, 5.0, 10.0	—
固化效果试验	无侧限抗压强度	OPC, SAC	0.0, 2.5, 5.0, 10.0	先掺, 后掺
固化材料损失 试验	固化材料损失率	OPC, SAC	2.5, 5.0, 10.0	先掺

其中絮凝材料及固化材料添加量均以泥浆的干土质量计算, 固化材料掺量为 0% 时, 即只使用絮凝材料进行调理。固化材料添加顺序上先掺是指在脱水前的泥浆中掺入, 后掺是指在脱水泥饼中掺入。

试验流程: ①先在泥浆加入 0.1% CPAM 搅拌 1.5 min, 再加入固化材料搅拌 2.5 min, 使其充分混合均匀后进行脱水性能试验; ②经过上述调理的泥浆通过小型板框压滤机进行压滤试验, 得到脱水后的泥饼, 对泥饼进行含水率、密度、贯入强度等试验; ③模拟实际回填碾压的工艺对泥饼进行重塑击实, 经过养护后进行无侧限抗压强度试验; ④对板框压滤过程中产生的压滤余水以及对滤布进行清洗产生的清洗水进行元素分析, 确定固化材料损失程度。

比阻试验: 比阻是评价泥浆过滤脱水性能的重要指标, 使用布氏漏斗仪, 参照 Ruth 和 Carman 理论^[18], 可得到比阻 (specific resistance to filtration, 简称 SRF)。

Zeta 电位试验: 泥浆在经过处理并搅拌均匀后, 抽取 30 mL 的混合液体, 使用 Zetasizer Nano 分析仪采用流动电位法进行测定^[19]。

粒度分析试验: 使用激光粒度仪测定调理泥浆的絮团粒径, 将小于该粒径的颗粒数量占比达 50% 的粒子直径 D_{50} 作为特征粒径^[20]。

絮体压缩性试验: 对堆积在过滤介质上的泥皮使用不同的压力测定其变形, 得到泥皮的压缩性指数, 间接反映絮团的刚度^[21]。

板框压滤脱水试验: 采用室内的小型板框压滤机对泥浆进行脱水试验, 最大进料压力为 0.5 MPa, 压榨最大压力为 1.2 MPa, 脱水中实测压滤脱水排水量-时间曲线, 并得到脱水泥饼^[22]。

泥饼性质测定试验: 使用袖珍式贯入仪实测贯入强度, 使用烘干法实测泥饼的含水率^[23]。

无侧限抗压强度试验: 脱水泥饼在脱出后放置 1 d 进行击实制样, 方法参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[24]中的轻型击实试验, 单位击实功为 592.2 kJ/m³, 击实放置 24 h 后脱模, 在恒温 (温度 20 °C ± 2 °C) 恒湿 (湿度 95%) 养护箱中养护, 养护龄期达到 7、14、28 d 时进行无侧限抗压强度试验。

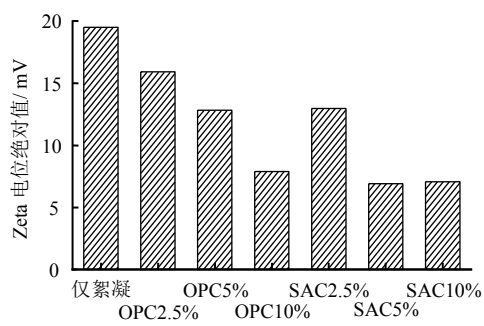
固化材料损失试验: 通过实测泥浆脱除水分中的钙离子浓度可间接推定固化材料在余水中的残余量; 在滤布上附着的固化材料通过 10% 浓度乙酸对板框滤布进行 24 h 浸泡进行回收。钙离子浓度使用电感耦合等离子光谱发生仪 (inductively coupled

plasma spectrometer, 简称 ICP) 进行测定^[25]。

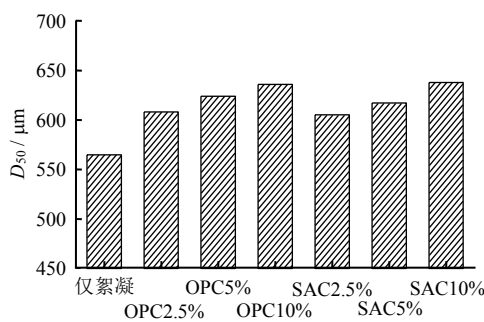
3 结果

3.1 固化材料对脱水性能的影响

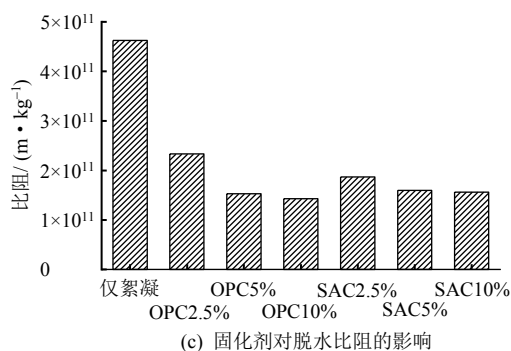
经共同调理后泥浆的 Zeta 电位、絮团粒径、泥浆脱水比阻及絮体压缩性如图 1 所示。泥浆中的颗粒通常带有负电荷, 这导致溶液中的正电荷在颗粒表面形成一个双电层结构, 包括紧密层和扩散层。



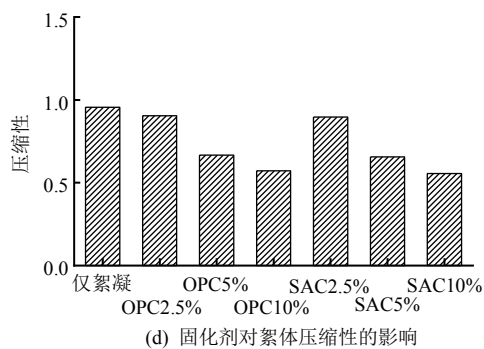
(a) 固化剂对 Zeta 电位的影响



(b) 固化剂对絮团大小的影响



(c) 固化剂对脱水比阻的影响



(d) 固化剂对絮体压缩性的影响

图 1 絮凝材料与固化材料的耦合对脱水性能的影响
Fig.1 Influence of coupling of flocculating material and curing material on dehydration capacity

当颗粒移动时,紧密层和扩散层中的一些离子会随之一同移动。因此,扩散层中存在一个抽象的边界,边界内的离子与颗粒一起形成一个整体并共同运动,边界上的电位称为 Zeta 电位。由于颗粒间的扩散层是相互重叠的,因此重叠部分会导致颗粒间存在渗透斥力。

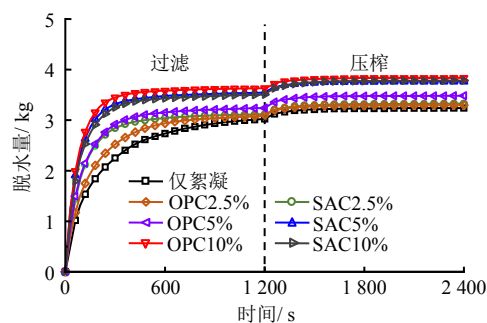
一般认为 Zeta 电位过高会增加颗粒排斥力而不易絮凝^[19]。从图 1(a)可以看出,两种固化材料的掺入都可降低 Zeta 电位的绝对值,且随着掺加量的增加减少量也会增加。其中 SAC 水泥对泥浆 Zeta 电位值的调整更为明显,在 5%掺量下效果要明显好于 OPC。图 1(b)是絮凝后的絮团中值粒径大小,主要表现泥浆经过絮凝材料及固化材料调理后絮凝团粒大小。可以看出,两种固化材料的加入均会使絮团的中值粒径增大,增大范围在 7%~13%之间,对于过滤具有一定促进作用。图 1(c)是调理后的比阻,代表单位质量物料在一定压力下通过单位过滤面积时的阻力。一般认为比阻小于 1.0×10^{11} m/kg 为容易过滤,比阻在 $1 \times 10^{11} \sim 9 \times 10^{11}$ m/kg 之间为中等过滤难度,而比阻大于 10^{12} m/kg 为难过滤^[26]。只加絮凝材料的一组,比阻为 4.5×10^{11} m/kg 左右,属于中等过滤难度,过滤阻力偏大。加入固化材料后比阻显著下降,但各组之间差异较小,均向接近 1.0×10^{11} m/kg 的方向减少,两种固化材料对比阻的降低效果显示出较为一致的规律。图 1(d)絮体的压缩性指数指泥浆絮团颗粒在面对外力作用下产生变形的能力,在持续的过滤压力下泥皮发生较大的变形,会降低泥皮(由絮团堆积形成的半固相物质)的透水性而阻碍过滤的进一步进行^[27]。从试验结果来看,掺入固化材料后絮团的压缩性指数都有下降,最大下降幅度可达到 40%。

板框脱水试验结果如图 2 所示。图 2(a)展示了过滤-压榨曲线,其中过滤阶段泥浆主要受到进料泵传递的压力和滤布阻拦的影响,土体颗粒在滤布上进行过滤脱水,而压榨阶段受到两侧板壁的压力,浓泥中的土颗粒受到更多的压力,孔隙水压力逐渐减小,类似土力学固结过程。曲线的上升段斜率反映了过滤速率,最终脱水量反映了过滤和压榨的效果。可以观察到,在加入固化材料后,过滤速率和过滤效果明显提升,其中 OPC10%组和 SAC5%组效果最好。

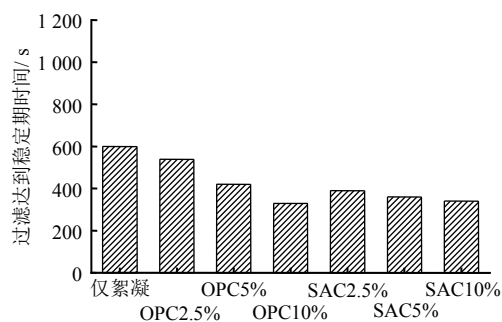
将过滤完成时间定义为过滤阶段脱水量基本稳定时(变化量小于 1%)的时间,并在图 2(b)中进行了整理。可以看出,固化材料的加入缩短了过滤时间。相比仅使用絮凝材料的试验组,加入 OPC 的过

滤时间减少了 10%~45%,而加入 SAC 的过滤时间减少了 35%~43%。过滤时间的减少在实际应用中能够提高工作效率。

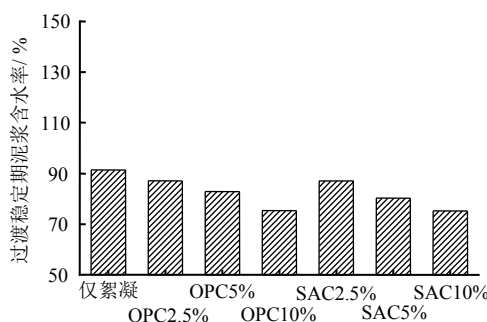
图 2(c)展示了过滤稳定时淤泥的计算含水率。相对于仅使用絮凝材料的试验组,加入固化材料后过滤含水率普遍下降,下降幅度为 5%~18%。图 2(d)展示了板框压榨完成后的泥饼含水率。可以



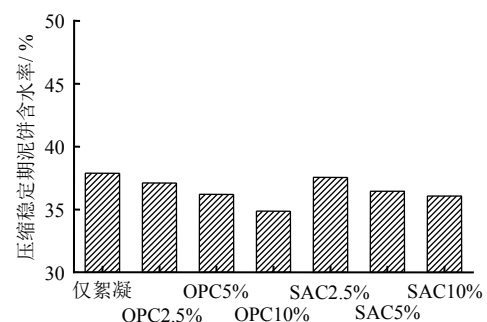
(a) 板框过滤-压榨脱水量曲线



(b) 板框过滤完成时间



(c) 过滤完成淤泥含水率



(d) 压榨完成泥饼含水率

图 2 絮凝材料与固化材料的耦合对脱水效果的影响
Fig.2 Influence of coupling of flocculating material and curing material on dehydration effect

发现加入固化材料后, 泥饼含水率随固化材料的加入呈下降趋势, 且下降幅度为 3%~8%。与过滤泥浆含水率的下降趋势相比, 压榨含水率的降幅要小一些。结合图 2(a)可以看出, 在整个脱水过程中, 过滤阶段的脱水量占主体部分, 经过过滤后的泥浆已经初步减量化, 因此压榨脱水量在整体脱水量中占比较小。因此, 过滤过程在泥浆脱水效率和效果的好坏中起着重要的作用。

3.2 脱水泥饼的性质变化

图 3(a)显示了压滤结束时泥饼的贯入强度。可以观察到, 仅使用絮凝材料的试验组泥饼的强度最小, 随着固化材料的加入, 泥饼的强度明显增加。OPC 试验组的泥饼强度增加了 11%~44%, SAC 试验组的泥饼强度增加了 6%~13%。

图 3(b)展示了泥饼的密度, 固化材料对泥饼密度的影响与强度类似。其中, OPC 试验组的泥饼密度增加了 1%~11%, SAC 试验组的泥饼密度增加了 1%~6%。

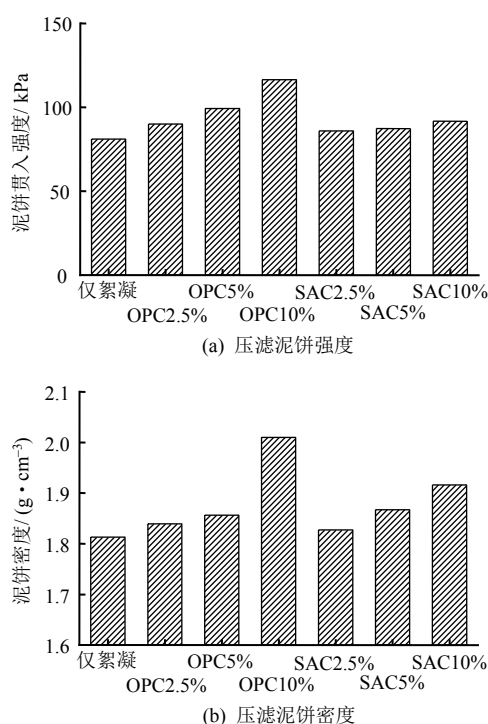


图3 脱水-固化一体化工艺下泥饼的性质变化
Fig.3 Property change of mud cake under integrated dewatering-curing process

3.3 重塑土的力学性质

固化淤泥在用作填土材料时, 回填后的强度是一个重要考虑因素, 而无侧限抗压强度是评估淤泥固化效果的一般性指标。图 4(a)、4(b)显示了脱水-固化一体化工艺产生的泥饼经过击实和养护后的强度。可以观察到, 仅通过絮凝材料脱水的试验组在

压实后的强度都小于 50 kPa, 无法满足大多数填土工程的规范要求。而在泥浆中添加固化材料后, 泥饼在压实后的强度明显增加, 并且随着固化材料的掺入量增加而显著增加。在本次试验中, 掺入量最大的 10%试验组中, SAC 组的无侧限抗压强度可达到 300 kPa, OPC 组的无侧限抗压强度可达到 400 kPa, 均能够满足填土工程规范要求。

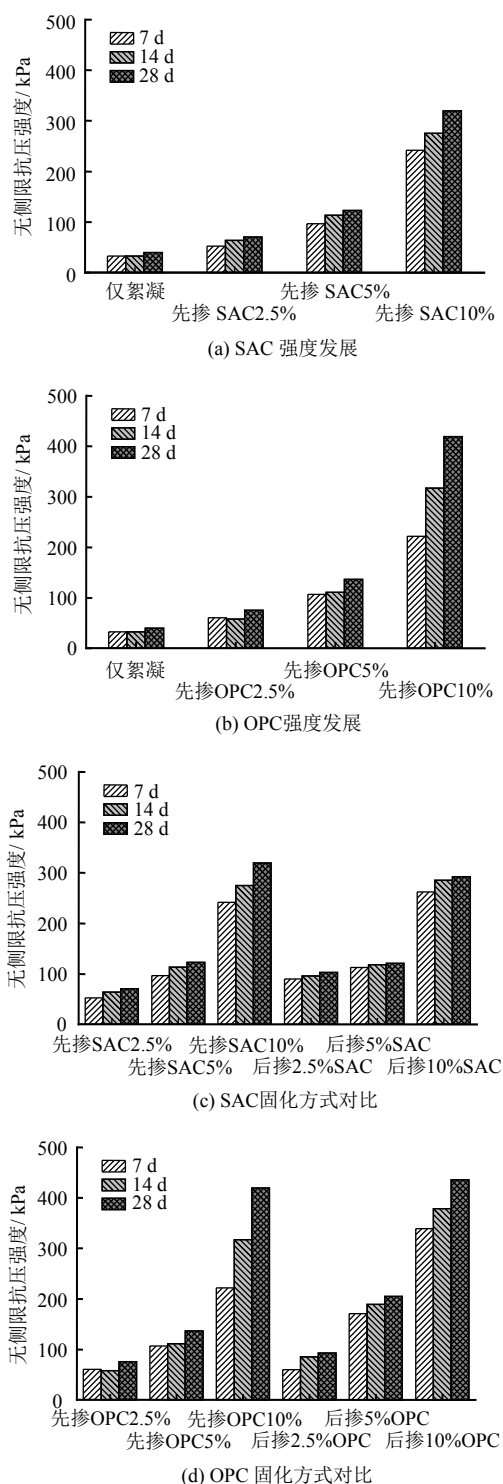


图4 脱水-固化一体化工艺对重塑土强度的影响
Fig.4 Influence of integrated dewatering-curing process on strength of treated mud

针对仅使用絮凝材料进行压滤脱水后的泥饼,使用传统的水泥固化方法进行了后掺-击实试验组的研究(向泥饼中添加相同种类和数量的固化材料)。试验结果如图 4(c)、4(d)所示。

从试验结果可以观察到,相对于后掺方法,先掺方法的强度明显降低。特别是对于具有早期凝结效果的 SAC 组而言,脱水-固化一体化方法的强度与传统水泥固化方法的强度差异随着掺量和龄期的增加而减小。例如,在 2.5%掺量下,经过 7 d 养护的强度减小幅度为 71.3%;而在 10%掺量下,经过 28 d 龄期的强度甚至增加了 8.6%。OPC 组的两种方法也呈现出类似的趋势。在 2.5%掺量下,经过 7 d 养护的强度减小幅度为 47.4%;而在 10%掺量下,经过 28 d 龄期的强度减小幅度为 3.9%。通过对比 SAC 组和 OPC 组的试验结果,可以发现在龄期较短时,OPC 组的强度减小更为显著,但随着龄期的增加,强度差异逐渐减小。

3.4 固化材料的损失量

由于脱水-固化一体化工艺中固化材料在泥浆处理过程中提前加入,随着脱水过程的进行,固化材料会随着水分的脱除而流失,这进一步导致后续强度的降低。为了定量研究脱水-固化一体化工艺对固化材料的直接损失以及对后续强度的间接损失,使用质谱仪对泥浆处理过程中压滤水和滤布上的钙离子浓度进行测量。由此可以计算出压滤水和滤布上流失的固化材料的质量,并将流失固化材料的质量与初始掺入固化材料的质量进行比较,从而得出流失固化材料占初始掺入量的比率,如图 5 所示。

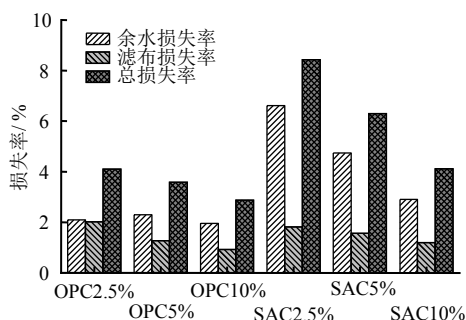


图 5 耦合脱水时固化材料的损失

Fig.5 Loss of curing materials in integrated dewatering-curing process

从结果来看,固化材料的损失主要发生在余水中,损失范围在 2%~7%之间,而在滤布上的损失范围在 1%~2%之间,总的损失率在 3%~8%之间。损失率与固化材料的掺入量呈反比关系,即掺入量越多,损失的比例越小。如果使用 10%的掺入比例,

总的损失率将在 3%~4%之间。对比两种固化材料的损失率,SAC 组的损失率更高。

4 讨论

4.1 固化材料的掺入对脱水性能的影响

影响泥浆在过滤阶段脱水性能的主要因素有两个,即絮团粒径和絮体压缩性。絮团粒径的大小影响着泥浆脱水过程中排水通道的大小,颗粒较大的絮团通常具有更大的排水通道^[12]。在图 6(a)中,大絮团的堆积状态会形成较大的孔隙,当这些孔隙相互连通时,就形成了过滤排水通道。而在图 6(b)中小絮团(或单颗粒)的堆积情况下,絮团之间的孔隙较小,难以形成连通的排水通道。絮体压缩性代表着絮团的抗变形能力,压缩性越大的泥饼变形越大,容易破坏排水通道^[16],如图 6(c)所示。

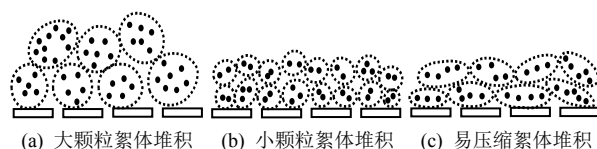


图 6 絮体性质对堆积影响

Fig.6 Influence of floc properties on floc accumulation

在图 1(a)中,固化材料的掺入显著降低了 Zeta 电位。由于 OPC 和 SAC 水泥中含有大量的 Ga^{2+} 、 Al^{2+} 等金属阳离子,这些阳离子会明显增加水体中的离子浓度与价位,与黏土颗粒表面阴离子吸引产生双电层厚度也会由此减小,从而导致 Zeta 电位降低^[28]。双电层的减小使得泥浆中小颗粒之间的相互斥力减小,有利于更好地凝聚形成更大的絮团(见图 1(b)),从而在过滤脱水过程中获得更好的效果。另一方面,固化材料的加入降低了絮团的压缩性(见图 1(d)),固化材料颗粒与水化产物如钙矾石通过离子吸引与土颗粒相结合,对絮团或絮团表面起到了胶结、加固的作用^[29]。絮团的增大和絮团压缩性减小是促进过滤脱水效果的主要原因。

在压榨脱水阶段,过滤形成的浓泥主要依靠外力固结进行脱水。根据土力学中的渗透性分析,一些研究表明固化材料的掺入会导致土体的渗透性下降,水泥用量增大,渗透系数会减小^[30]。这是因为水化水和反应产生的钙矾石和 C-H-S 凝胶会改变孔隙的结构和水分的形态,从而导致渗透性降低^[31]。然而,水化反应和水化产物的形成是一个较长的过程,通常会持续数天或数月。而一体化工艺中的板框压榨过程的时间一般在 0.5~2.0 h 之间,在这个时间范围内,水化反应及其产物仍处于初步阶段。

因此,在压榨时间段内水化反应对渗透系数的影响尚未完全体现,主要是固化材料颗粒的填充导致渗透系数减小。在压榨初期,由于絮凝材料和固化材料的掺入,浓泥的整体含水率较高,絮团之间的孔隙较大且连通,固化材料通过离子吸引与絮团结合附着在絮团表面,尚未对絮团间的孔隙造成较大堵塞,因此渗透性受到的影响较小。随着压榨的进行,浓泥中的土颗粒逐渐固结受到有效应力的作用,含水率和孔隙率下降,水化产物逐渐填充了泥饼颗粒之间的孔隙,从而导致脱水性能的一定减弱。此外,土体的压缩模量会随着固化材料的掺入和固结作用的发展而逐渐增大,压缩模量的增大会提高土体的固结脱水效果,可以和渗透性的降低达到互补的作用^[32-33]。从前文中的压榨阶段脱水曲线可以看出,固化材料的掺入对土体的固结脱水效果影响相对较小,这表明这种充填产生的渗透系数减小并未达到明显影响脱水效果的程度。

4.2 一体化工艺中重塑土强度影响因素

与传统泥浆处理工艺相比,脱水-固化一体化工艺的泥饼在重塑土强度方面表现出下降的趋势。为了分析两种工艺下重塑土强度的差异,可以从重塑击实作用和固化材料后续的水化胶结作用两个方面进行讨论。

在重塑击实作用方面,本文使用脱水-固化一体化工艺产生的泥饼进行重塑击实。影响击实强度的主要因素是泥饼的含水率。增加泥饼的含水率会增加土颗粒表面的润滑作用,使得土的内摩擦角降低,土颗粒更容易移动,因此在外力作用下更容易击实。然而,如果含水率过高,会导致土颗粒间的薄膜水变得更厚,自由水会填充土体空隙,从而导致密实度下降。结合图 2(d)中泥饼的含水率,可以发现随着固化材料掺入量的增加,泥饼的含水率减小,更接近最优含水率。因此,在先掺入固化材料的条件下,泥饼的重塑击实效果更好。而在后续水化胶结作用方面,由于固化材料的先掺入,脱水-固化一体化中的固化作用在一定程度上会因为前期的压滤和重塑而受到破坏。然而,在固化材料后掺入的条件下,固化材料没有随着脱水而流失,也没有因为重塑而破坏前期的水化产物。因此,后掺在后续的保护过程中的水化胶结作用更强。

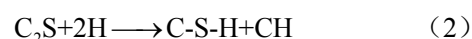
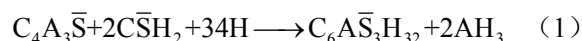
通过对以上两种强度差异的分析,并结合图 4(c)及图 4(d),可以推断,相较于传统淤泥处理工艺,脱水-固化一体化工艺固化材料部分随滤液流失及重塑的破坏损失了一部分水化反应的强度。然而,由于脱水后泥饼的含水率更接近最优含水率,在重

塑过程中更加密实,提高了部分强度。此外,密实的土体也促进了后续的水化过程填充空隙,使得脱水-固化一体化工艺的重塑土能够接近传统工艺的固化强度。

4.3 一体化工艺中固化材料的损失

固化材料的损失首先需要考虑固化材料在脱水-固化一体化工艺中各阶段的反应状态。通常水泥在与水开始接触形成水泥浆体后,水泥中的矿物就会发生反应形成水化产物。试验中选取 SAC、OPC 两种水泥,水化反应速度不同。

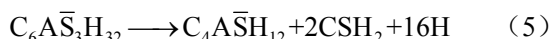
SAC 水泥的主要水化成分为无水硫铝酸钙($3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$, 简称 $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$)及硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 简称 C_2S)。 $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ 由于水化速率较快,对水泥早期的强度贡献更大。SAC 水泥水化时, $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ 会与石膏发生反应,石膏含量不同,反应也有所不同,其主要水化的化学反应方程式为^[34-35]



当石膏含量充分时,SAC 水泥的氢氧化铝凝胶会继续与氢氧化钙及石膏发生反应,生成钙矾石:



当石膏含量不足时,则是会有低硫型水化硫铝酸钙产生:



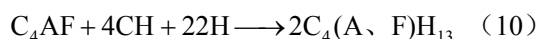
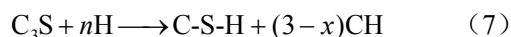
特别的,当石膏不足且水分充足的条件下,硅酸二钙会充分水化生成低硫型水化硫铝酸钙、硅铝酸钙及氢氧化铝凝胶:



本文中使用的 SAC 中石膏含量在 8%~15%,属于石膏偏少的情况。在早期阶段,当 SAC 加入泥浆中时,可以将其视为大量水的水化条件。结合之前提到的化学反应,可以认为 SAC 首先与石膏发生反应,生成细针状的钙矾石。钙矾石会部分附着在絮凝体颗粒上,从而减小絮凝体的压缩性。随着水化反应的进行,逐渐生成氢氧化铝凝胶、低硫型水化硫铝酸钙以及少量的硅铝酸钙。这些胶结产物将絮凝体颗粒相互连结,并使钙矾石与土颗粒的结合更加紧密。随着脱水的进行,泥饼中的水分减少,

此时的水化过程基本上不再产生硅铝酸钙。最终,泥饼中的水化产物主要包括低硫型水化硫铝酸钙、氢氧化铝凝胶以及少量的钙矾石和硅铝酸钙^[36]。

OPC 的主要水化成分为硅酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 简称 C_3S)、硅酸二钙 ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 简称 C_2S)、铝酸三钙 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 简称 C_3A) 和铁铝酸四钙 ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 简称 C_4AF), 反应速度由快到慢可以排列为 C_3A 、 C_4AF 、 C_3S 、 C_2S , 其主要水化的化学反应方程式为^[37]



硅酸盐水泥各成分的水化特性见表 5。

表 5 硅酸盐水泥各矿物水化特性
Table5 Hydration characteristics of Portland cement minerals

矿物成分	水化速率	水化热	强度发展	
			早期	晚期
C_3S	较快	中	大	大
C_2S	慢	最小	小	大
C_3A	最快	最大	大	小
C_4AF	仅次于 C_3A	大	小	小

根据上述反应方程式,可以推断出,在 OPC 加入泥浆后,会与水反应生成钙矾石,并随后生成水化铝酸钙或水化铁酸钙,以及水化生成的凝胶。这些反应中,钙矾石和凝胶起到主要的影响作用。这些产物共同作用使部分土颗粒相互连接,促进了后续的脱水过程。在经过板框机后,这几种矿物继续进行水化反应,钙矾石在泥饼内形成交叉搭接的网络结构,而凝胶则胶结土颗粒及钙矾石等水化物,形成较为紧密的整体结构,从而产生强度^[38]。综上所述,可以看出,OPC 在耦合固化技术中的微观机制与 SAC 相似,如图 7 所示。

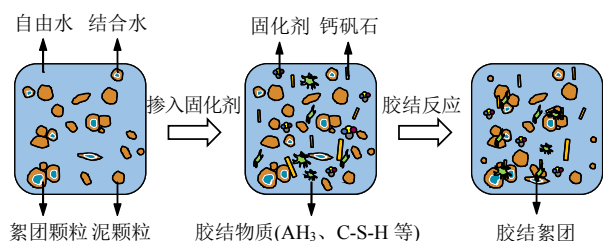


图 7 脱水-固化一体化工艺微观机制图

Fig.7 Micro mechanism of integrated dewatering-curing process

脱水-固化一体化工艺中,固化材料直接加入泥浆时,水泥颗粒的大小通常在 $7 \sim 200 \mu\text{m}$ 之间,可以通过滤布(孔径约 $18 \mu\text{m}$)发生逸失。当水泥颗粒遇水后,会产生微溶效应,释放出一些离子(如 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 OH^-),这些离子会随着余水一起流出。同时,根据固化材料的水化过程和作用机制,两种水泥在早期水化中生成的钙矾石颗粒的粒径基本在 $100 \mu\text{m}$ 以下,而氢氧化铝凝胶或其他凝胶的粒径较大,因此会被截留在泥饼内部。滤布中固化材料的损失也可以归因于一部分钙矾石小晶体随着滤液排出或被阻截在滤布孔隙中。

4.4 脱水-固化一体化工艺的优劣分析

工艺的效益方面,与传统泥浆处理工艺相比,脱水-固化一体化工艺明显提高了脱水的效率和效果。从效率上来看,其可以减少单框压滤的时间,从而提高工作效率。而在效果上,其能够显著降低脱水泥饼的含水率,产生明显的减容效果,即泥饼体积大幅减少。此外,脱水泥饼的强度增加和减容效果的改善也方便了后续的转运。在固化效果方面,先掺入相较后掺入固化材料有一定的减小,但强度基本在同一等级,在高掺量及长时间养护时两者强度相差较小,例如在泥浆中加入 10% 掺量固化材料,养护 28 d 强度的减少幅度在 9% 以内。相较于强度的减小,一体化工艺节省了泥饼与固化材料混合的工艺环节,对于实际施工来说仍具有一定的价值。

工艺的余水污染方面,目前,通常参考《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)^[39]来评估处理工艺的余水污染,包括有机物、营养盐、重金属和酸碱度等因素的安全标准。水泥类固化材料主要由无机盐组成,不会引入额外的有机物、氮、磷和重金属等污染物。因此,特别关注水泥类固化材料的添加是否会导致压滤余水的 pH 值升高。根据标准要求,余水排放的 pH 值不能超过 10。本研究采用了脱水-固化一体化工艺,并使用了 OPC 和 SAC 进行处理,得到的压滤余水的 pH 值如图 8 所示。研究表明,在传统工艺中使用石灰处理得到的余水,其 pH 值通常会达到 12 以上。而在本研究中,OPC 组的压滤余水 pH 值在 $9.8 \sim 11.2$ 之间,SAC 组的压滤水 pH 值在 $9.3 \sim 9.7$ 之间。两种固化材料的添加会导致压滤余水的 pH 值升高,但相较于使用石灰的情况,这种情况有所改善,在后续进行 pH 值调节时具有一定的优势。这主要归因于两种水泥熟料的比例较低,并且水化产物的生成会消耗水泥中的氢氧化钙。此外,虽然 SAC 通常被认为是一种中性固化材料,其水化产物不会影响 pH 值的变化,

但在试验中 SAC 处理组的压滤水 pH 值仍然会增加, 这主要是由于水泥未完全水化, 中间产物影响酸碱度导致的。

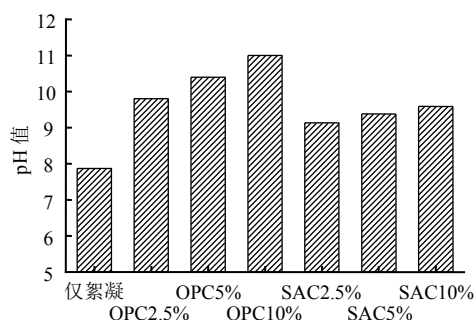


图8 固化材料的掺入对压滤余水 pH 值的影响

Fig.8 Influence of the addition of curing materials on the pH value of pressure filtration residual water

工艺的适用性方面, 一般认为泥浆中细颗粒(如黏土、粉土颗粒)的含量和有机物的含量对于泥浆脱水有直接影响。本文中采用的脱水-固化一体化工艺处理的对象是太湖清淤淤泥, 具有较高的含水率、黏土成分和有机质含量, 属于较难脱水的淤泥。所采用的脱水工艺可以达到深度脱水效果的板框压滤脱水, 这是一种常用的脱水方法。虽然各地的泥浆性质存在差异, 但固化材料对于改善脱水的原理并没有本质上的影响, 而固化效果的基本原理是水化反应和水分转化。在前期脱水效果相近的情况下, 联合方法的固化效果也会有较好的一致性。因此, 脱水-固化联合工艺具有广泛的适用性。

5 结 论

(1) 脱水-固化一体化工艺对于泥浆脱水有着明显的改善作用, 主要原因是固化材料能够增大絮体的粒径、减小絮团的压缩性。

(2) 在泥浆中水泥颗粒阳离子交换、钙矾石对絮体的加固、水化反应产物与黏土颗粒絮团的结合是脱水-固化一体化工艺的基本原理。

(3) 脱水-固化一体化工艺与在泥饼中后掺固化材料的工艺在 10% 掺量 28 d 养护的条件下得到的压实回填土强度差异不大, 基本小于 9%。

(4) 在泥浆中掺入固化材料会在压滤余水及机械中产生 4%~9% 的固化材料损失, 但从脱水效率的提升、工艺的简化以及综合效果来看, 在掺量较高时这一损失是可接受的, 工程中可根据实际情况选择固化材料。

参 考 文 献

[1] 朱伟, 张春雷, 刘汉龙, 等. 疏浚泥处理再生资源技术

的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39-41.

ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, LIU Han-long, et al. The status quo of dredged spoils utilization[J]. **Environmental Science & Technology**, 2002, 25(4): 39-41.

[2] 王其松, 严军, 邓家泉. 绞吸式挖泥船产量优化研究[J]. 水运工程, 2013, 38(3): 48-55.

WANG Qi-song, YAN Jun, DENG Jia-quan. On high yield of cutter suction dredger[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2013, 38(3): 48-55.

[3] 吴思麟, 朱伟, 刘既明, 等. 环保疏浚泥处理工程泥性质变化规律及问题分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2290-2296.

WU Si-lin, ZHU Wei, LIU Ji-ming, et al. Change laws of mud property and problems in typical environmental dredging treatment projects[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(12): 2290-2296.

[4] 张育新, 康勇. 絮凝剂的研究现状及发展趋势[J]. 化工进展, 2002, 22(11): 799-804.

ZHANG Yu-xin, KANG Yong. Review of the present status and development of flocculation agents[J]. **Chemical Industry and Engineering Progress**, 2002, 22(11): 799-804.

[5] 应梅娟, 赵振凤, 崔希龙, 等. 脱水污泥石灰处理工艺分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(18): 13-16.

YING Mei-juan, ZHAO Zhen-feng, CUI Xi-long, et al. Process analysis for lime treatment of dewatered sludge[J]. **China Water & Wastewater**, 2011, 27(18): 13-16.

[6] 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(14): 17331-17342.

[7] 李世汭, 陈文峰, 夏新星, 等. 低碱性环保固化剂调理淤泥的板框压滤脱水试验研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 46-51.

LI Shi-mi, CHEN Wen-feng, XIA Xin-xing, et al. Experimental study on dewatering of plate-and-frame filter press for sludge treatment with a low-alkaline environmental modifier[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2023, 40(3): 46-51.

[8] 郑耀林, 章荣军, 郑俊杰, 等. 絮凝-固化联合处理超高含水率吹填淤泥浆的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3107-3114.

ZHENG Yao-lin, ZHANG Rong-jun, ZHENG Jun-jie, et al. Experimental study of flocculation-solidification combined treatment of hydraulically dredged mud at extra high-water content[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019,

- 40(8): 3107-3114.
- [9] 王东星, 唐奔锴, 伍林峰. 疏浚淤泥化学絮凝-真空预压深度脱水效果评价[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3929-3938.
- WANG Dong-xing, TANG Yi-kai, WU Lin-feng. Evaluation on deep dewatering performance of dredged sludge treated by chemical flocculation-vacuum preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(12): 3929-3938.
- [10] 肖涵, 董超强, 章荣军, 等. 生石灰对理化复合法处理淤泥浆效率的影响研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2): 214-222.
- XIAO Han, DONG Chao-qiang, ZHANG Rong-jun, et al. Effect of quicklime on solidification efficiency of mud slurry treated by physicochemical composite method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.2): 214-222.
- [11] SIM K, LEE J, LEE H, et al. Flocculation behavior of cellulose nanofibrils under different salt conditions and its impact on network strength and dewatering ability[J]. **Cellulose**, 2015, 22(6): 3689-3700.
- [12] SKOUTERIS G, SAROJ D, MELIDIS P, et al. The effect of activated carbon addition on membrane bioreactor processes for wastewater treatment and reclamation—a critical review[J]. **Bioresource Technology**, 2015, 185(11): 399-410.
- [13] HU Y S, WANG X C, SUN Q Y, et al. Characterization of a hybrid powdered activated carbon-dynamic membrane bioreactor (PAC-DMBR) process with high flux by gravity flow: operational performance and sludge properties[J]. **Bioresource Technology**, 2017, 223(1): 65-73.
- [14] WU S L, ZHU W, CHEN Y L, et al. Pore characteristics of cake and its effect on cake filtration[J]. **Separation Science and Technology**, 2021, 56(4): 789-799.
- [15] WAKEMAN R J. Separation technologies for sludge dewatering[J]. **Journal of Hazardous Materials**, 2007, 144(3): 614-619.
- [16] ZHU Cheng, ZHANG Pan-yue, WANG Hong-jie, et al. Conditioning of sewage sludge via combined ultrasonication-flocculation-skeleton building to improve sludge dewaterability[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2018, 40(1): 353-360.
- [17] ZHAO Y Q. Involvement of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in water treatment sludge dewatering: a potential benefit in disposal and reuse[J]. **Separation Science and Technology**, 2006, 41(12): 2785-2794.
- [18] 斯瓦罗夫斯基, 朱企新. 固液分离[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 1990: 257-285.
- Swarowski, ZHU Qi-Xin. Solid-liquid separation[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 1990: 257-285.
- [19] MORFESIS A, JACOBSON A M, FROLLINI R. Role of Zeta (ζ) potential in the optimization of water treatment facility operations[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2009, 48(5): 2305-2308.
- [20] 杜佳芮, 闵凡路, 姚占虎, 等. 海水侵入条件下泥水盾构泥浆及泥膜性质变化试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(7): 1182-1188.
- DU Jia-rui, MIN Fan-lu, YAO Zhan-hu, et al. Experimental study of property change of slurry and filter cake of slurry shield under seawater intrusion[J]. **Tunnel Construction**, 2018, 38(7): 1182-1188.
- [21] 罗茜, 徐新阳. 关于过滤理论与滤饼可压缩性的探讨——第二部分 滤饼的可压缩性及比阻[J]. 过滤与分离, 1999, 9(2): 3-10.
- LUO Qian, XU Xin-yang. Discussion on filtration theory and compressibility of filter cake—part II compressibility and specific resistance of filter cake[J]. **Journal of Filtration & Separation**, 1999, 9(2): 3-10.
- [22] 许金泉, 程文, 耿震. 隔膜式板框压滤机在污泥深度脱水中的应用[J]. 给水排水, 2013, 49(3): 87-90.
- XU Jin-quan, CHENG Wen, GENG Zhen. Application of the diaphragm type plate and frame filter press on advanced sludge dewatering[J]. **Water & Wastewater Engineering**, 2013, 49(3): 87-90.
- [23] 施斌, 刘志彬, 蔡奕. 超微型贯入仪的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2005, 27(8): 1211-1215.
- SHI Bin, LIU Zhi-bin, CAI Yi. Development of the super mini-penetrometer and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 27(8): 1211-1215.
- [24] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical test methods[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [25] 李艳苹, 潘献辉, 刘小骐. ICP-AES 法测定海水中钾、钠、钙、镁、锂、锶、锰[J]. 中国给水排水, 2010, 26(4): 86-88.
- LI Yan-ping, PAN Xian-hui, LIU Xiao-qi. Determination of K, Na, Ca, Mg, Li, Sr and Mn in seawater by ICP-AES[J]. **China Water & Wastewater**, 2010, 26(4): 86-88.
- [26] 鹿雯, 张登峰, 胡开林, 等. 阳离子表面活性剂对污泥

- 脱水性能的影响和作用机制[J]. 环境化学, 2008, 27(4): 444-448.
- LU Wen, ZHANG Deng-feng, HU Kai-lin, et al. Effect and mechanism of cationic surfactants on sludge dewaterability[J]. **Environmental Chemistry**, 2008, 27(4): 444-448.
- [27] 吴思麟, 朱伟, 闵凡路, 等. 泥浆真空抽滤泥水分离中堵塞机制及规律性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1530-1537.
- WU Si-lin, ZHU Wei, MIN Fan-lu, et al. Clogging mechanism and effect of cake permeability in soil-water separation using vacuum filtration[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(8): 1530-1537.
- [28] 李敏, 宗栋良. 混凝中 Zeta 电位的影响因素[J]. 环境科技, 2010, 23(3): 9-11.
- LI Min, ZONG Dong-liang. Influence factors on Zeta potential in coagulation[J]. **Environmental Science and Technology**, 2010, 23(3): 9-11.
- [29] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817-2822.
- DING Jian-wen, ZHANG Shuai, HONG Zhen-shun, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high watercontent by adding cement and phosphogypsum synchronously[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2817-2822.
- [30] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.
- TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 549-554.
- [31] 顾正维, 孙炳楠, 董邑宁. 黏土的原状土、重塑土和固化土渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 505-508.
- GU Zheng-wei, SUN Bing-nan, DONG Yi-ning. Testing study of permeability of the original clay, recomposed clay and improved clay with stabilizer ZYDT-1[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(3): 505-508.
- [32] 陶然, 王荣, 范衍琦, 等. 超高含水率水泥固化泥炭土压缩模量和固结系数研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(1): 60-67.
- TAO Ran, WANG Rong, FAN Yan-qi, et al. Investigation of compression modulus and consolidation coefficient of cement solidified peat with ultra high water content[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2022, 41(1): 60-67.
- [33] 袁俊平, 詹斌, 陈胜超, 等. 含水率和压实度对路基填土力学特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 98-102.
- YUAN Jun-ping, ZHAN Bin, CHEN Sheng-chao, et al. Effects of water content and compaction degree on mechanical characteristics of roadbed[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2013, 11(2): 98-102.
- [34] 黄士元, 邬长森, 杨荣俊. 混凝土外加剂对硫铝酸盐水泥水化历程的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2011, 38(1): 7-12.
- HUANG Shi-yuan, WU Chang-sen, YANG Rong-jun. Effects of concrete additives on the hydration process of sulfoaluminate cement[J]. **China Concrete and Cement Products**, 2011, 38(1): 7-12.
- [35] HARGIS C W, TELESKA A, MONTEIRO P J M. Calcium sulfoaluminate (Ye'elimite) hydration in the presence of gypsum, calcite, and vaterite[J]. **Cement and Concrete Research**, 2014, 65(10): 15-20.
- [36] 梁仕华, 冯德奎. 硫铝酸盐水泥协同垃圾焚烧副产物固化浓缩液 污泥的强度和水稳定性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1453-1468.
- LIANG Shi-hua, FENG De-luan. Experimental study on strength and water stability of concentrated solution sludge solidified with sulfoaluminate cement collaborating waste incineration by-products[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(6): 1453-1468.
- [37] 李林香, 谢永江, 冯仲伟, 等. 水泥水化机制及其研究方法[J]. 混凝土, 2011, 33(6): 76-80.
- LI Lin-xiang, XIE Yong-jiang, FENG Zhong-wei, et al. Cement hydration mechanism and research methods[J]. **Concrete**, 2011, 33(6): 76-80.
- [38] 陈瑞敏, 简文彬, 张小芳, 等. CSFG-FR 协同作用改良淤泥固化土性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1020-1030.
- CHEN Rui-min, JIAN Wen-bin, ZHANG Xiao-fang, et al. Experimental study on performance of sludge stabilized by CSFG-FR synergy[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(4): 1020-1030.
- [39] 国家环境保护局. GB 8978—1996 污水综合排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- National Environmental Protection Agency. GB 8978—1996 Integrated wastewater discharge standard[S]. Beijing: China Standard Press, 1998.