DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0653

流塑状淤泥干化－固化协作实施方法与成效

谈云志[1, 2, 3]，黄贤志[1, 3]，郑 爱[4]，吴 军[1, 3]，王 冲[1, 3]，明华军[1, 2*]

（1. 三峡大学 特殊土资源化利用宜昌市重点实验室，湖北 宜昌 443002；2. 三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌 443002；
3. 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室，湖北 宜昌 443002；4. 中国葛洲坝集团路桥工程有限公司，湖北 宜昌 443002）

摘要：针对现有流塑状淤泥处置过程干化与固化环节缺乏协调联动、导致成本过高的问题，提出一种基于磷石膏基胶凝材料的干化－固化协作实施方法。通过研发兼具快速吸水与缓凝水化特性的磷石膏基粉粒与团粒，实现“先干化后固化”的协同处理机制，并系统评估其力学性能、耐久性能、环境效应及经济环境效益。研究结果表明，流塑状淤泥（w＝110%）拌入 15%磷石膏基粉粒与 20%团粒，养护 28 d 后无侧限抗压强度达 4.84 MPa，黏聚力为 355.7 kPa，内摩擦角达 30.8°。经 10 次干湿循环或冻融循环后，强度仍分别保持在 3.6 MPa 和 3.3 MPa，损失率分别为 26.3%和 32.5%，满足固化土地基承载力要求（≥1.0 MPa）；可溶磷(氟)含量低于地表 II 类水排放限值。机制分析表明：高掺量磷石膏团粒通过快速局部吸水和缓慢水化形成类骨料结构，优化颗粒级配，实现骨架构建；低掺量磷石膏粉粒则通过快速吸水和缓慢水化生成针棒状钙矾石（AFt）及网状水化硅酸钙（C-S-H）凝胶，发挥核心胶结作用；二者协同实现了“干化－固化”过程的时序分离与效能整合，达成“一次性实施、两阶段完成”的技术目标。经济环境分析显示，该方案单位强度成本仅为水泥固化法的 63%，碳排放量降低 94%，兼具显著的经济与生态效益，具备重要推广价值。

关键词：土力学；淤泥；固化；磷石膏；团粒；水－力性能

中图分类号：U 43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2026)04－1228－13

第 一 作 者：谈云志（1979－），现任教授，主要从事特殊土土力学与资源化利用方面的研究工作。E-mail：yztan@ctgu.edu.cn

***通信作者**：明华军（1984－），现任副教授，主要从事特殊土土力学与资源化利用方面的研究工作。E-mail：hjming@ctgu.edu.cn

Methods and effectiveness of collaborative implementation in flowable sludge of drying and solidification

TAN Yunzhi[1, 2, 3], HUANG Xianzhi[1, 3], ZHENG Ai[4], WU Jun[1, 3], WANG Chong[1, 3], MING Huajun[1, 2*]

(1. *Yichang Key Laboratory of the Resources Utilization for Problematic Soils*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 2. *College of Hydraulic and Environmental Engineering*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 3. *Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 4. *China Gezhouba Group Road and Bridge Co., Ltd.*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*)

Abstract: In response to the challenge posed by the lack of coordinated linkage between the drying and solidification stages in the treatment process of existing flowable sludge, which results in excessively high costs, this study proposes a collaborative implementation method utilizing phosphogypsum-based cementitious materials. This approach seamlessly integrates drying and solidification through the development of phosphogypsum-based

收稿日期：2025－09－04；**修回日期**：2025－10－24

基金项目：国家自然科学基金联合基金项目（U24A20183）；国家大坝安全工程技术研究中心开放基金项目（CX2023B07）；宜昌市自然科学研究项目（A24－3－023）

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U24A20183), National Dam Safety Research Center (Grant No. CX2023B07) and Natural Science Foundation of Yichang (Grant No. A24－3－023)

powders and aggregates characterized by rapid water absorption and slow-setting hydration. Consequently, a “drying-first, solidification-later” mechanism is achieved, supported by systematic evaluations of mechanical properties, durability, environmental impacts, and both economic and ecological benefits. The results indicate that when 15% phosphogypsum-based powder and 20% phosphogypsum-based aggregates are incorporated into flowable sludge (with a water content of 110%) and cured for 28 days, the unconfined compressive strength (*UCS*) reaches 4.84 MPa, the cohesion is 355.7 kPa, and the internal friction angle is 30.8°. After undergoing 10 cycles of wetting-drying or freezing-thawing, the *UCS* remains at 3.6 MPa and 3.3 MPa, with loss rates of 26.3% and 32.5%, respectively, thereby meeting the bearing capacity requirements for solidified soil foundations (≥1.0 MPa). Additionally, the concentrations of soluble phosphorus and soluble fluorine comply with Class II surface water standards, ensuring environmental safety. Mechanistic analysis reveals that phosphogypsum-based aggregates, containing 80% phosphogypsum, form an aggregate-like structure through rapid local water absorption and slow hydration, optimizing particle gradation and facilitating skeleton construction. Meanwhile, the phosphogypsum-based powder, containing 15% phosphogypsum, generates needle-rod-shaped ettringite (AFt) and network-shaped calcium silicate hydrate (C-S-H) gel via the same rapid water adsorption and slow hydration mechanism, playing a crucial role in cementation. The synergy between these two components achieves temporal separation and efficiency integration in the “drying-solidification” process, ultimately realizing the technical goal of “one-time implementation, two-stage completion.” Economic and environmental analyses reveal that the unit strength cost of this method is only 63% of that of traditional cement-based solidification, while carbon emissions are reduced by 94%. This innovative approach demonstrates significant economic and ecological advantages, making it highly valuable for widespread application.

Key words：soil mechanics; sludge; solidification; phosphogypsum; aggregate; hydro-mechanical

First author: TAN Yunzhi (1979－), professor, is engaged in mechanics and resources utilization of problematic soils. E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

***Corresponding author:** MING Huajun (1984－), associate professor, is engaged in mechanics and resources utilization of problematic soils. E-mail: hjming@ctgu.edu.cn

1 引 言

河湖生态清淤过程中会生成巨量疏浚淤泥，统计显示，全国每年产生的疏浚淤泥总量已超过 10 亿 m^3[1]。此类淤泥含水率极高，呈流态状，力学性能差且难以直接利用；部分淤泥更含有重金属离子，存在污染周边环境的潜在风险[2]。传统上，疏浚淤泥处置主要依赖陆地填埋和海洋倾倒，不仅难以为继，更背离“生态优先、绿色发展”的环保理念。当前，国家倡导固废处置必须遵循“减量化、无害化、资源化和规模化”原则，以开拓可持续的发展路径[3]。

干化是实现“减量化”的前提；固化则是达成“无害化、资源化”的路径[4]。生态优先并非牺牲经济发展，低成本是保障“规模化”应用的关键。淤泥干化指通过物理方法(如自然晾晒法、板框压滤法、真空预压法等)分离淤泥中的自由水，使其脱湿至偏干状态。其中，自然晾晒法操作简单却严重受制于天气，需依赖连续晴天且脱水效率低下[5]；板框压滤法通过机械力挤压脱水，吴 敏等[1, 6-8]针对絮凝剂优化及脱水效果提升开展了系统研究，但该方法需临时建设处理站，成本高昂，市场调研显示，仅板框压滤环节，每吨疏浚湿淤泥的干化成本(不含堆场征收费)即达百元；真空预压法借助负压抽吸水分，蔡袁强[9]深入探究了淤泥真空预压固结机制与排水体防淤堵技术，但该方法存在成本高、效率低的局限。淤泥固化旨在通过化学方法将流塑态淤泥转变为硬化状态：章荣军等[10-11]采用石灰、水泥等无机胶凝材料实现固化；丁建文等[12-17]选用工业固废基固化剂；亦有研究采用高分子有机胶结材料[18]达成固化目标。本质上，淤泥干化与固化是相互关联的 2 个环节：干化是固化的起始阶段，固化是干化的延续进程，二者需统筹兼顾，不可机械割裂。鉴于淤泥干化降水可显著提升固化效果，X. S. Huang 等[19]采用絮凝、真空预压、固化剂等综合物理化学协同的理化复合法实现淤泥固化，但此类复合技术仍以传统手段为基础，导致整体处理成本居高不下。

当前淤泥的干化与固化环节分属不同部门管

理，且缺乏跨部门协作机制。以湖库疏浚淤泥为例：水利部门负责清淤作业，须将淤泥干化至预期状态(如经板框压滤形成含水率介于塑限与液限间的泥饼)，才能转运至指定弃土场填埋；待建设部门需用填料时，再将泥饼挖出进行固化处理[20]。值得注意的是，泥饼黏性大、不易打散，若直接掺入固化剂则难以均匀拌和，必须先行晾晒干燥，再经碾压破碎成粒，随后掺入固化剂充分拌和，最后喷水调整至最优含水率进行碾压成型——此过程中含水率先降后升，实质上造成资源浪费[21-22]。显然，因缺乏跨部门联动而将干化、固化拆分为两阶段实施，不仅增加工序复杂度，更显著推升成本，导致技术因市场竞争力不足而难以规模化推广[15]。此外，若淤泥初始含水率过高，即使大幅增加固化剂掺量也难获理想固化效果[16, 23]。何　俊等[24]采用水玻璃－碱渣－矿渣固化疏浚淤泥的研究表明：当含水率从110%降至 90%时，无侧限抗压强度仅微幅提升；继续降至 70%后，强度则呈显著跃升。由此可见，对疏浚淤泥而言，干化是固化不可或缺的前置步骤；否则固化剂用量过大、成本过高，终将制约技术推广应用。

磷石膏(phosphogypsum，PG)是磷化工产业中湿法生产磷酸的副产品，全国库存量高达 8.2 亿吨。这不仅占用大量土体资源，更是严重制约磷化工产业健康发展的大宗工业固废[25]。早在 2000 年，荀　勇[26]采用磷石膏替代部分水泥，用于加固软土，研究发现，磷石膏取代 5%～10%的水泥量，能显著提升固化软土强度。丁建文等[12]在水泥固化高含水率淤泥中添加磷石膏，发现磷石膏的掺入对水泥固化淤泥具有明显的增强效果。林宗寿和黄　赟[27]发现磷石膏、粒化高炉矿渣(Ground granulated blastfurnace slag，GGBS)与少量水泥或石灰混合，可制备低能耗磷石膏基免煅烧水泥，将其命名为磷石膏矿渣水泥[28]。采用磷石膏矿渣水泥替代常规无机胶凝材料进行淤泥固化，契合“生态优先、绿色发展”的环保理念。

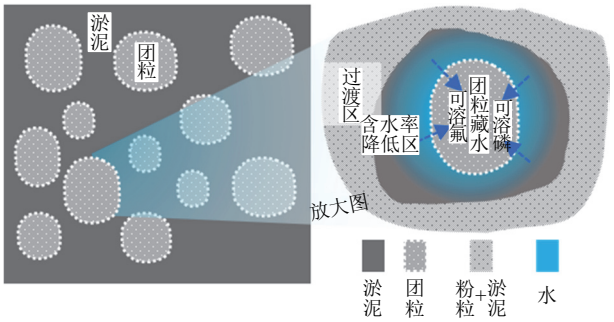
磷石膏粉末本身可以吸收淤泥中部分自由水，通过物理混合降低淤泥的整体含水率，但磷石膏矿渣水泥中磷石膏掺量过高后会显著削弱化学胶凝作用并增加磷、氟污染物浸出风险；掺量过低则不利于磷石膏规模化消纳。Y. Z. Tan 等[29]研究表明，将磷石膏、粒化高炉矿渣、水泥的干混物(磷石膏基粉粒)，经“压实－破碎－研磨－筛分”工艺制备的磷石膏骨料(磷石膏基团粒)，其磷石膏利用率高达 80%，28 d 龄期强度达 23.6 MPa，且磷、氟污染物浸出浓度符合地表水环境质量标准。

为此，本文构建了磷石膏基粉粒与团粒协作干化－固化淤泥的方法。该方法遵循“以廉价材料替代，处置流程优化”的整体思路：首先开展替代材料制备研究，随后实施干化－固化效果评价，最终进行经济可行性分析，为淤泥干化－固化协同实施提供可靠依据。

2　干化－固化协作实施的技术基础

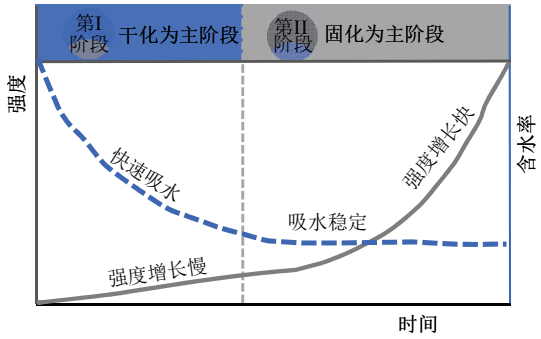
实现本文提出的磷石膏基粉粒与团粒系统促进流塑状淤泥干化－固化协作实施方法，需具备两大技术支撑：

(1) 能够营造“泥水局部分离”的微环境，确保磷石膏基粉粒固化剂主要发挥胶结作用，而非用于充填功能，如图 1(a)所示。流塑状淤泥的核心特征在于含水率极高，含有过量自由水，具体表现为淤泥颗粒呈类悬浮分散状。韩　爽等[17]基于膨胀珍珠岩的多孔吸水特性，实现了高含水率淤泥中自由水的局部分离，并证实该方法可有效提升固化效果；但膨胀珍珠岩成本较高(约 1200 元/t)。受此启发，同时为提升磷石膏掺量，本文提出采用磷石膏等固



(a) 分离泥水

(a) Separation of sludge particles and water



(b) 含水率与强度变化规律

(b) Variation of water content and strength with time

图 1　流塑状淤泥干化－固化协作实施的技术基础

Fig.1　Technical basis for the collaborative implementation in flowable sludge of drying and solidification

体废物制备多孔团粒，在达成磷石膏规模化消纳目标的同时，实现淤泥中自由水的低成本局部分离目标，为磷石膏基粉粒固化淤泥营造相对低含水率环境。具体实现思路如下：将大量磷石膏按质量比(80%)与少量粒化高炉矿渣(15%)、石灰(5%)混合，先经压实成块，再破碎成团，最终形成磷石膏基团粒[29]。该团粒由干粉压实而成，可有效吸附自由水。将团粒拌入淤泥后，团粒可有效吸附其周围自由水。同时，在吸水状态下，粒化高炉矿渣、石灰及部分磷石膏发生水化反应，生成钙矾石(AFt)和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶，将剩余磷石膏牢固胶结成整体，使团粒凝结硬化成高强度集料，从而改善淤泥级配，形成密实骨架。

(2) 可精准调控“先吸水后胶结”的全过程，如图 1(b)所示。换言之，固化剂需具备缓释能力，其水化反应需呈先缓后急的特性；否则将无法有效胶结淤泥颗粒，仅成为普通填充材料。S. H. Liu 等[30]发现，磷石膏基粉粒水化后强度呈先缓后增规律，恰好匹配“先吸水后胶结”的调控需求，故选用磷石膏基粉粒既作固化剂，又兼具吸水干化功能。磷石膏基粉粒以胶凝固化为主、吸附干化为辅；磷石膏基团粒则以吸水干化为核心、优化级配为补充。二者协同作用，实现流塑状淤泥干化－固化工序的高效协作。

3　磷石膏基粉(团)粒的制备与性能

3.1　磷石膏基粉粒

(1) 材料

磷石膏取自宜昌中孚化工有限公司堆场，相对密度为 2.0～2.5，粒径细小(＜1 mm)，自由含水率为 20%～30%；粒化高炉矿渣粉购自宜昌腾阔科技有限公司，主要成分见表 1；生石灰主要成分为氧化钙。采用激光粒度分析仪(干法)测定其颗粒分布，结果如图 2 所示。

表 1　原材料组分与含量

Table 1　Compositions and contents of raw materials

成分 (composition)	磷石膏 (phosphogypsum，PG)	矿渣(ground granulated blastfurnace slag，GGBS)
SO_3	48.4	6.6
CaO	38.4	40.5
SiO_2	8.4	30.9
K_2O	0.5	0.4
Fe_2O_3	0.6	0.7
TiO_2	0.14	1.1
SrO	0.3	0.5
CuO	0.01	0.01
Al_2O_3	–	14.7

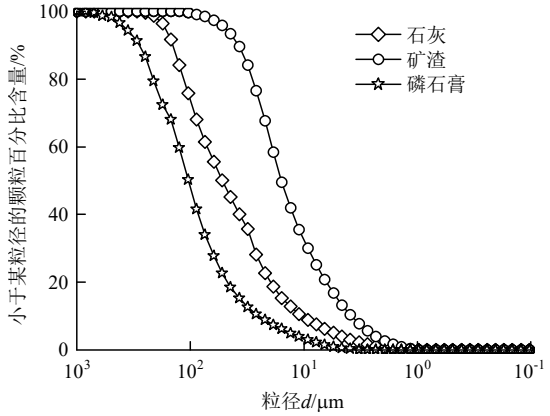


图 2　原材料的颗粒级配曲线

Fig.2　Particle size distribution of tested materials

(2) 制备方法

磷石膏基粉粒由干燥的磷石膏、粒化高炉矿渣与生石灰(Lime，Lm)按质量比 PG:GGBS:Lm=15:80:5 均匀拌和制得[16]。其制备流程为：先将各原材料分别干燥处理，继而按比例称重，投入搅拌机充分混合 10～12 min，制得磷石膏基粉粒。

(3) 基本特性

① 强度特征：磷石膏基粉粒水化后具备类硅酸盐水泥的胶凝特性。按水灰比为 0.31 浇筑直径 50 mm、高 40 mm 圆柱试样，经 28 d 标准养护后无侧限抗压强度达 32.6 MPa，展现出优异胶结性能。

② 固污能力：试验后取 30 g 破碎试样烘干，依据规范[31]，按 1:10 固液比加入去离子水浸出，可溶磷与可溶氟浸出浓度见图 3。即使浸泡 14 d，可溶磷浓度仅为 0.048 mg/L、可溶氟浓度仅为 0.125 mg/L，均远低于标准[32]规定的 II 类水排放限值，充分表明磷石膏基粉粒固污能力较强。

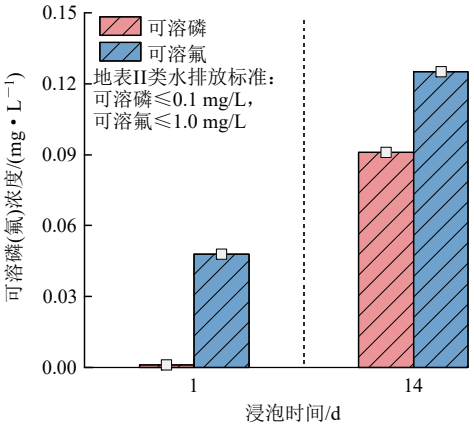


图 3　磷石膏基粉粒净浆的可溶磷(氟)浓度

Fig.3　Concentrations of soluble phosphorus and soluble fluorine in phosphogypsum-based powder

③ 吸水能力：每组称取磷石膏基粉粒约 35 g，共设 6 组。将粉粒置于水中充分搅拌，确保充分润湿。静置 30 min 后，用滤纸过滤分离粉粒，以纸巾吸干表面附着水，继而称重。通过计算水的质量占干粉粒质量的百分比得出吸水率，结果见表 2。

表 2　磷石膏基粉粒吸水率

Table 2　Water adsorption rates of phosphogypsum-based powder

编号(ID)	初始质量(initial mass)/g	30 min 后质量(mass after 30 min)/g	吸水率(absorption)/%	平均吸水率(average absorption)/%
No.1	27.26	43.17	58.36	57.5
No.2	33.17	52.97	59.69	
No.3	31.09	49.93	60.60	
No.4	34.24	53.51	56.28	
No.5	36.91	57.40	55.51	
No.6	37.87	58.54	54.58	

由表 2 可见，磷石膏基粉粒在 30 min 内即可实现约 57.5%的吸水率，表明该材料可高效快速干化流塑状淤泥，从而显著降低淤泥局部含水率。

3.2　磷石膏基团粒

(1) 制备材料与方法

磷石膏基团粒的组分与磷石膏基粉粒相同，但配比不同，体现规模化应用导向。通过增大磷石膏用量，质量比调整为 PG:GGBS:Lm＝80:15:5；其拌和工艺与磷石膏基粉粒一致。压实流程如下：首先，依据目标干密度(1.80 g/cm³)和试样尺寸(240 mm×115 mm×20 mm)，计算试样质量(993.6 g)；然后将试样一次性倒入压砖机模具腔内，加载压实成型；随后脱模，破碎成型试件；最终过筛分级，获得 3 种粒径范围的团粒：S 粒组(d≤2 mm)、M 粒组(2 mm＜d≤5 mm)和 L 粒组(5 mm＜d≤10 mm)。磷石膏基团粒制备过程见图 4。

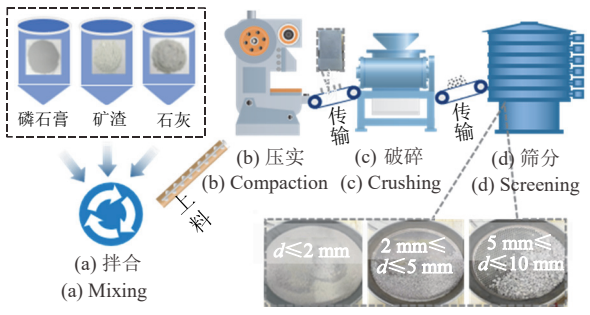


图 4　磷石膏基团粒制备过程

Fig.4　Preparation of phosphogypsum-based aggregates

(2) 基本特性

① 吸水能力：每组取磷石膏基团粒约 35 g，共 6 组，用湿布包裹团粒，每隔 24 h 称重一次，直至质量恒定，按水的质量与干团粒质量的百分比计算吸水率，结果见表 3。

表 3　磷石膏基团粒吸水率

Table 3　Water adsorption rates of phosphogypsum-based aggregates

编号 ID	初始质量(initial mass)/g	第 1 d 质量(mass after 1 d)/g	第 2 d 质量(mass after 2 d)/g	第 3 d 质量(mass after 3 d)/g	吸水率(absorption)/%	平均吸水率(average absorption)/%
No.1	28.6	30.2	31.47	32.85	14.86	14.14
No.2	24.5	26.79	27.66	28.25	15.31	
No.3	26.5	28.17	29.28	30.66	15.7	
No.4	25.5	26.1	27.93	29.02	13.8	
No.5	27	28.64	29.74	30.42	12.67	
No.6	25.4	26.73	27.93	28.57	12.48	

磷石膏基团粒吸水率为 12.48%～15.7%，平均吸水率达 14.14%，主要毛细吸水过程集中发生在第 1 d，这同时表明磷石膏基团粒同样具备快速吸水干化淤泥的能力。其饱和含水率根据相对密度(2.0～2.5)与干密度(1.80 g/cm³)估算约为 18.33%。尽管表面数据显示，磷石膏基团粒的吸水率低于磷石膏基粉粒的饱和含水率，但磷石膏基团粒的吸水是被吸收至团粒内部而非吸附于表面，真正实现了泥水局部分离。

② 强度特征：为防止磷石膏基团粒在直接浸水养护时发生分散，将团粒置于塑料整理箱内，采用空气雾化器持续通入雾化水养护 28 d，最终含水率约 13%。依据技术[33]开展筒压强度试验，结果如图 5 所示。

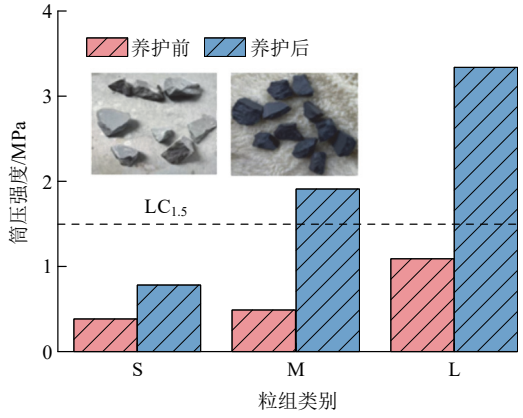
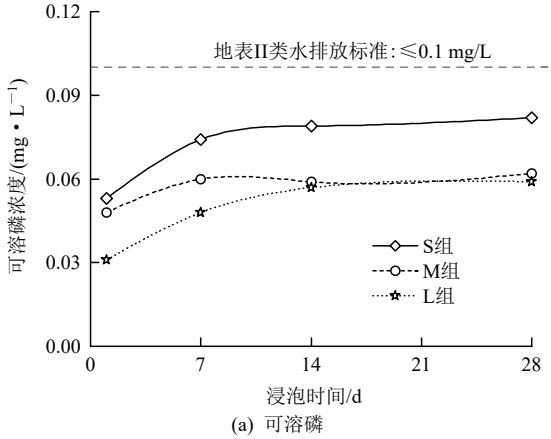


图 5　磷石膏基团粒的筒压强度

Fig.5　Cylinder compressive strengths of phosphogypsum-based aggregates

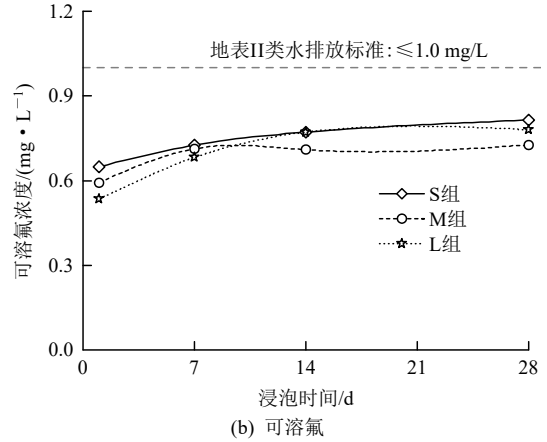
参考技术标准[33]，轻骨料依据抗压强度划分为 6 个等级。其中，低强度等级($LC_{1.5\sim2.5}$)主要用于非承重结构的保温层；中强度等级($LC_{3.0\sim4.0}$)多用于框架结构填充墙；高强度等级($LC_{5.0\sim6.0}$)则主要应用于桥梁构件和工业地坪。养护后，所制备的 M 粒组与 L 粒组磷石膏基团粒抗压强度均高于 $LC_{1.5}$，满足轻集料的最低强度等级要求。试验表明，当团粒尺寸小于 5 mm(即 S+M 组合)时，能显著提升固化淤泥的强度[15]。

③ 固污能力：将磷石膏基团粒破碎后过 3 mm 筛，取筛下部分进行干燥处理(烘箱温度 45℃，持续 12 h)。按 1:10 固液比配置溶液，参照规范[31]制备浸出液，测定其可溶磷(氟)浓度，结果如图 6 所示。



(a) 可溶磷

(a) Soluble phosphorus concentrations



(b) 可溶氟

(b) Soluble fluorine concentrations

图 6　磷石膏基团粒可溶磷(氟)浓度

Fig.6　Concentrations of soluble phosphorus and soluble fluorine in phosphogypsum-based aggregates

如图 6 所示，磷石膏基团粒浸泡 28 d 后，所有粒组的可溶磷最大浓度为 0.082 mg/L，可溶氟最大浓度为 0.814 mg/L。该数值虽高于磷石膏基粉粒净浆在 14 d 时的可溶磷/氟浓度，但低于标准[32]规定的 II 类水排放限值。磷石膏基团粒可溶磷(氟)浸出浓度高于磷石膏基粉粒，原因在于前者磷石膏掺量(80%)远高于后者(15%)。而原状磷石膏浸泡 28 d 后，其可溶磷、氟质量浓度趋于稳定，分别维持在 2.0 和 66.5 mg/L。可见，高掺量磷石膏制备成磷石膏基团粒，能有效固定并大幅降低其中的可溶磷、氟污染物。

4　干化－固化流塑状淤泥协作成效

4.1　淤泥基本性质

淤泥取自湖北省宜昌市鸦鹊岭某湖泊，基本理化性质见表 4，5；激光粒度法测得的颗粒分布如图 7 所示。

表 4　淤泥基本物理性质

Table 4　Basic physical properties of sludge

含水率(water content)/%	液限(liquid limit)/%	塑限(plastic limit)/%	塑性指数(plastic index)	相对密度(specific gravity)	有机质含量(organic matter content)/%	pH 值
53.4	56	23	33	2.6	4.0	6.3

表 5　淤泥的化学组成

Table 5　Chemical composition of sludge　　%

SO_3	CaO	SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	TiO_2	Al_2O_3
1.2	0.7	73.2	2.3	6.1	1.1	14.7

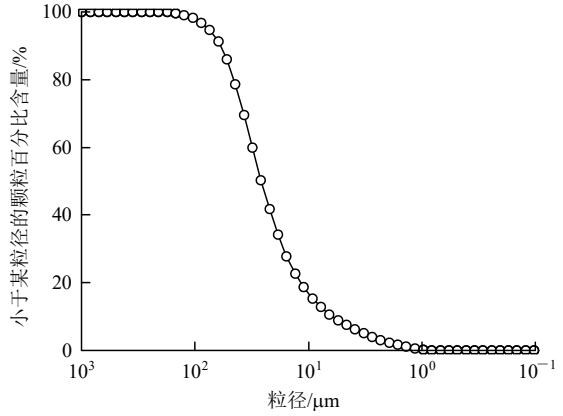


图 7　淤泥的颗粒级配曲线

Fig.7　Particle size distribution curve of sludge

4.2　试样制备与试验方法

(1) 无侧限抗压强度(*UCS*)试验

湿淤泥(含水率 110%)与磷石膏基粉粒按表 6 所示比例(15%)先行混合搅拌 5 min；随后掺入粒径小于 5 mm 的磷石膏基团粒，继续搅拌 5 min。将混合料分 3 次倒入直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱形模

表 6　磷石膏基粉(团)粒与淤泥的混合方案

Table 6　Mixing proportion of phosphogypsum-based materials and sludge

编号 ID	干淤泥(dry Sludge)/g	水(water)/g	磷石膏粉粒(PG-based powder)/g	磷石膏团粒(PG-based aggregates)/g	混合含水率(moisture content)/%
No.1	47.6	52.4	15	0	83.7
No.2	47.6	52.4	15	5	77.5
No.3	47.6	52.4	15	10	72.2
No.4	47.6	52.4	15	15	67.5
No.5	47.6	52.4	15	20	63.4

具中，每次倒入后置于振动台上振实 30 s 以排除内部气泡。最后用刮刀修整模具上沿的多余部分，立即覆盖保鲜膜密封，并转移至恒温恒湿养护箱(温度 25 ℃±0.5 ℃、相对湿度 95%±2%)中养护 24 h 后脱模。脱模后的试样用保鲜膜整体包裹，继续在相同温湿度条件下养护至预定龄期(7，14，90 d)。随后，采用 30 吨 MTS 压力试验机，以 1 mm/min 加载速率进行试验，每组制备 3 个平行样，试验结果取平均值。

(2) 直剪试验

直剪试验的试样混合比例及搅拌过程与无侧限抗压强度试验相同，但试样尺寸不同。待混合均匀后，分 3 层装填入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体模具中，每层均在振动台上振动 30 s。每层填充后，用刮刀沿模具边缘刮平，消除界面空隙。随后整平试样表面，立即覆盖保鲜膜，转移至恒温恒湿养护箱(温度 25 ℃±0.5 ℃、相对湿度 95%±2%)中养护 24 h 后脱模。用环刀(内径 61.8 mm、高度 20 mm)沿立方体试样中心切削，削除环刀外土体，立即以保鲜膜密封环刀试样，置于原养护环境养护至 28 d。最后开展剪切强度试验，法向应力为 100～400 kPa，剪切速率 0.8 mm/min。每组制备 3 个平行试样，结果取平均值。

(3) 干湿循环/冻融循环试验

将湿淤泥、磷石膏基粉粒与磷石膏基团粒按 100:15:20 的质量比混合搅拌，制样方法与养护条件均参照无侧限抗压强度试验标准执行。试样经 28 d 养护后，置于室温环境自然风干，随后浸水 12 h，即完成一次干湿循环。冻融循环根据湖北省气候特征，设定冻结温度－15 ℃(持续 12 h)与融化温度 20 ℃(持续 12 h)，构成一次冻融循环。分别进行 0，2，4，6，8，10 次干湿(冻融)循环后，观察并记录试样表面变化，随后开展无侧限抗压强度试验。

(4) 微观特征试验

取无侧限抗压强度试验后试样的中部，经液氮冻干处理，选取边长约 1 cm 的立方体碎块进行扫描电镜(SEM)和压汞法(MIP)测试。采用日本 SU3500 扫描电镜观测微观形貌，加速电压 15 keV，测试前表面镀金以防止电荷积聚影响成像质量；孔隙分布测试采用康塔压汞仪。

取抗压强度试验后的试样烘干、破碎，研磨至粒径≤0.75 mm 的粉末，用于 X 射线衍射(XRD)测试，分析生成物相，测试扫描范围为 5°～65°，扫描速度为 2°/步。

取抗压强度试验后的试样破碎，过 3 mm 孔径标准筛，收集筛下物置于 45 ℃烘箱中烘干 12 h。按固液比 1:10 配制浸出液，开展磷石膏基团粒中可溶磷及氟浓度的浸出试验。

4.3　干化－固化的协作效果

(1) 提高了抗压强度

磷石膏基粉(团)粒固化淤泥无侧限抗压强度如图 8 所示。显然，随着磷石膏基团粒掺量的增加，固化淤泥强度呈现显著增长趋势。相较于未掺加团粒的试样，当团粒掺量达到 20%时，固化淤泥 7 d 强度(2.24 MPa)提升了 2.8 倍，28 d 强度(4.84 MPa)提升了 3.2 倍，90 d 强度(5.94 MPa)提升了 1.4 倍。

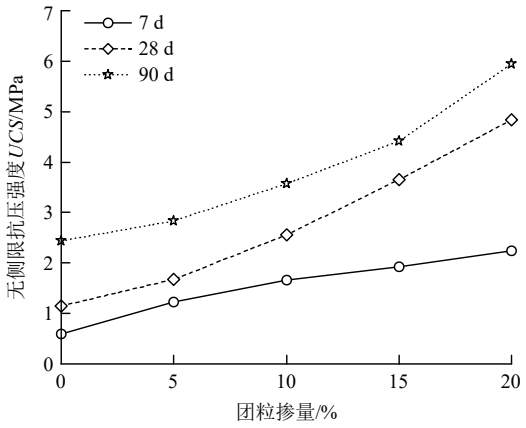


图 8　磷石膏基粉(团)粒固化淤泥的抗压强度

Fig.8　*UCS* values of sludge solidified with phosphogypsum-based materials

以 90 d 强度表征固化淤泥最终强度时，未掺加团粒的试样，7 d 强度仅达到最终强度的 24.14%，28 d 强度达到 46.86%；而掺加 20%磷石膏基团粒的试样，7 d 强度达到最终强度的 37.69%，28 d 强度则达到 81.46%。可见，磷石膏基固化剂处理淤泥的强度发展表现出显著的“先慢后快”特征，结合其

快速吸水的特性，有效满足了流塑状淤泥“干化－固化协作”实施的工程需求。同时，磷石膏基团粒的掺入，不仅显著提升了整体强度，还加速了强度发展进程，有利于促进淤泥与磷石膏的资源化利用进程。

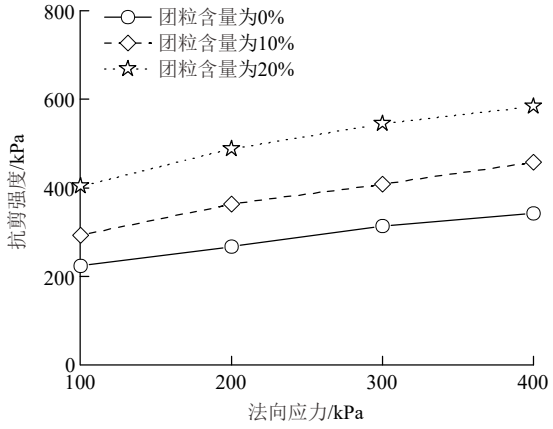
(2) 提高了抗剪强度

磷石膏基粉(团)粒固化淤泥的抗剪强度特征如图 9 所示。可以看出，当团粒掺量为 10%时，固化淤泥的黏聚力由 186.3 kPa 跃升至 246.1 kPa，增幅约 32%；内摩擦角提升至 25.7°，增幅约 34%。当团粒掺量增至 20%时，黏聚力飙升至 355.7 kPa，增幅达 91%；内摩擦角增至 34.2°，增幅约 49%。

理论上，磷石膏基团粒主要改善了固化淤泥的级配，仅能显著提高其内摩擦角；实际上，固化淤泥的黏聚力也得到显著提升。推测其原因，极有可能是团粒吸附了淤泥中的自由水，使其由 83.7%降至 63.4%(见表 3)，从而促使磷石膏基粉粒充分发挥胶结能力。

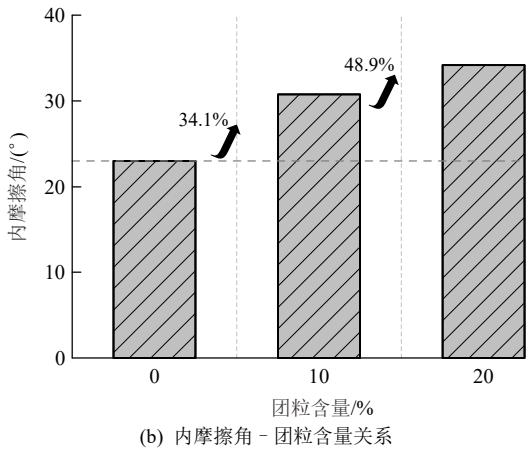
(3) 耐侯能力

干湿(冻融)循环试样的无侧限抗压强度变化规律如图 10 所示。随干湿循环次数增加，固化淤泥试样强度呈先增大后减小的趋势。强度由 4.83 MPa(干湿 0 次)增至峰值 5.34 MPa(干湿 2 次)，增幅达 10.5%；随后降至 3.56 MPa(干湿 10 次)，降幅为 26.3%。干湿循环 2 次时强度不降反升，与磷石膏基粉(团)粒持续水化有关[34]。随冻融循环次数的增加，固化淤泥试样强度持续下降。强度由 4.83 MPa(冻融 0 次)下降到 3.26 MPa(冻融 10 次)、降幅 32.5%。



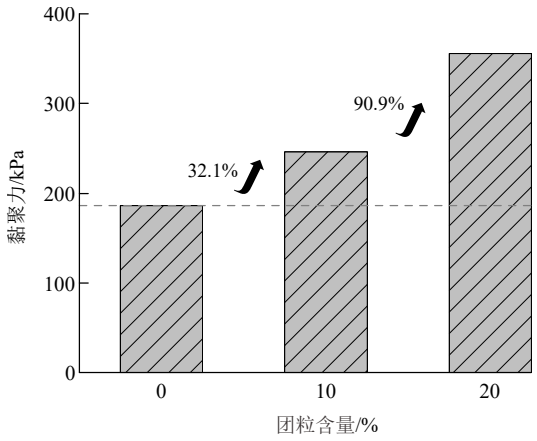
(a) 抗剪强度－法向应力曲线

(a) Shear strength-normal stress curves



(b) 内摩擦角－团粒含量关系

(b) Internal friction angle-aggregate content relationship



(c) 黏聚力－团粒含量关系

(c) Cohesion-aggregate content relationship

图 9　磷石膏基粉(团)粒固化淤泥的抗剪特性

Fig.9　Shear characteristics of sludge solidified with phosphogypsum-based materials

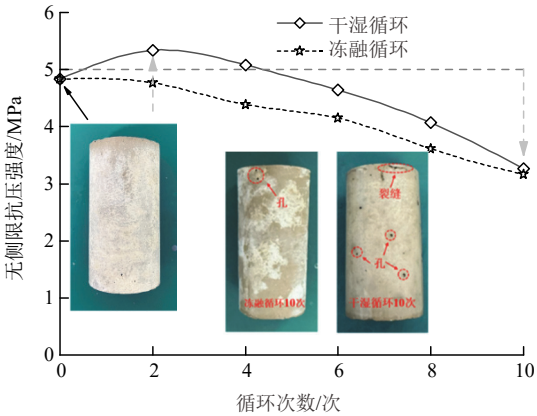


图 10　不同干湿(冻融)循环次数磷石膏基粉(团)粒固化淤泥强度演变规律

Fig.10　*UCS* evolution law of sludge solidified with phosphogypsum- based materials under different drying-wetting and freezing-thawing cycles

M. Wei 等[35]研究发现，硅酸盐水泥固化淤泥的抗干湿与冻融能力存在明显不足：当硅酸盐水泥掺量为 15%时，试样经 5 次冻融循环后强度损失率达 20%，经 5 次干湿循环后强度损失率达 37%。相比之下，磷石膏基粉(团)粒固化的淤泥不仅抗干湿循环能力显著增强，其抗冻融能力亦与前者持平。

5　讨　论

5.1　干化－固化机制

磷石膏基粉(团)粒通过物理－化学协同作用大幅提升淤泥固化效果，主要体现在 3 个方面：(1) 粉(团)粒通过物理吸附作用降低周边淤泥含水率，使淤泥颗粒间水膜相应变薄，颗粒相互靠拢，从而为磷石膏基粉粒的水化反应提供局部低含水率环境(见图 11)。

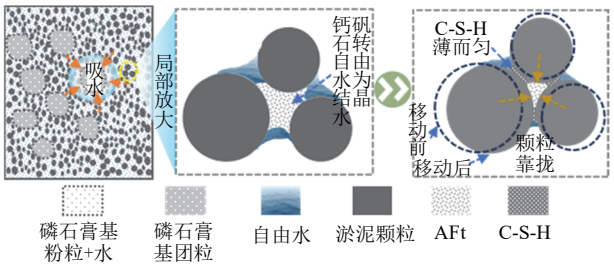


图 11　磷石膏基粉(团)吸水行为

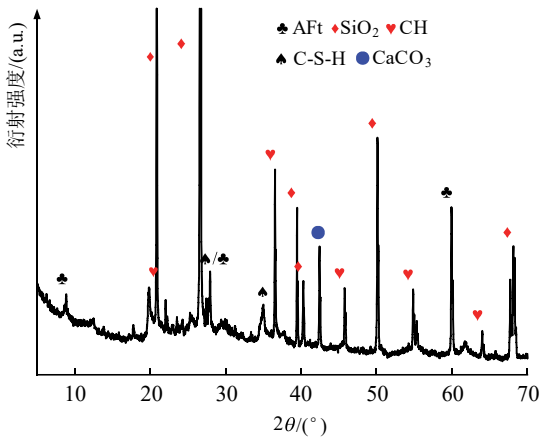
Fig.11　Water adsorption behavior of phosphogypsum-based materials

(2) 磷石膏基粉粒发生水化反应，生成 AFt 与 C-S-H，其反应式分别如下：

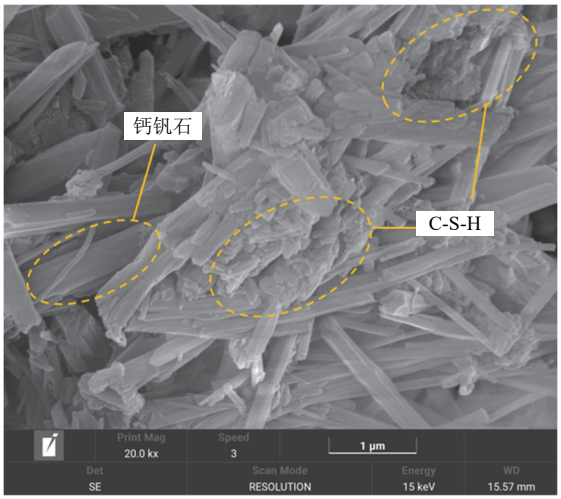
$$3CaO\cdot Al_2O_3+3CaSO_4\cdot 2H_2O+26H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O(\text{钙矾石})+886\ \text{J/g} \quad (1)$$

$$2(3CaO\cdot SiO_2)+6H_2O=3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O(\text{胶体})+3Ca(OH)_2(\text{晶体})+502\ \text{J/g} \quad (2)$$

XRD 衍射结果亦证实存在 AFt 和 C-S-H(见图 12(a)，其中，θ 是入射角，称为布拉格角或半衍射角)。其中，C-S-H 胶结淤泥颗粒；钙矾石则发挥双重功能：一方面充填淤泥颗粒间孔隙(见图 12(b))，另一方面通过转化自由水为结晶水实现脱水作用(式(1))。



(a) XRD



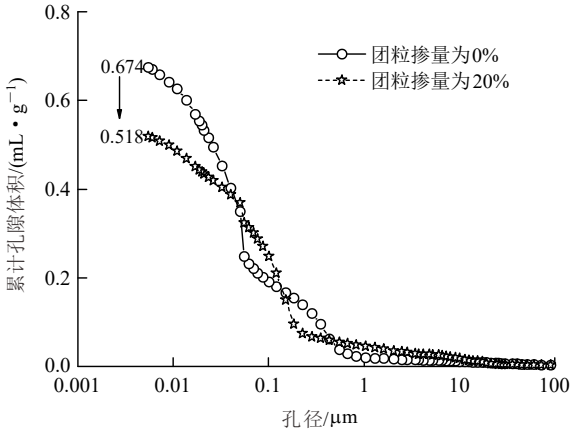
(b) SEM

图 12　磷石膏基粉(团)固化土的微观特性

Fig.12　Microscopic characteristics of sludge solidified with phosphogypsum-based materials

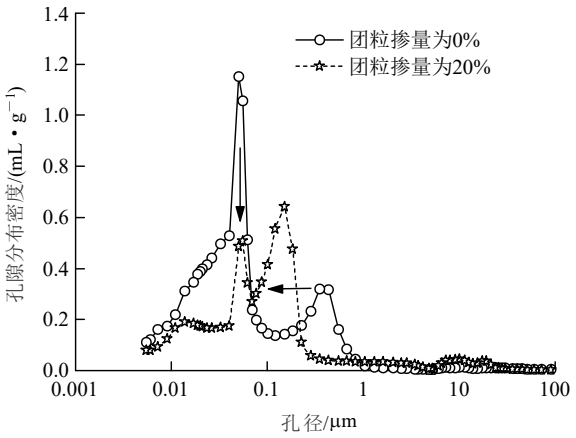
此外，掺入团粒还能增强固化淤泥的密实性。当团粒掺量为 20%时，单位质量孔隙体积由 0.674 mL/g 降至 0.518 mL/g(降幅约 23.1%)，如图 13(a)所示。同时，孔径 0.1～1 μm 范围内的孔隙明显收缩，0.01～0.1 μm 范围内的孔隙显著减少(见图 13(b))。这些变化充分表明，团粒能显著改善固化淤泥的孔隙结构，其效果优于仅使用磷石膏基粉粒固化。

(3) 磷石膏基团粒凝硬成集料，可形成骨架效应(见图 14(a))。此外，区别于级配碎石的光滑界面(见图 14(b))，团粒表面呈凹凸多孔结构(见图 14(c))，淤泥、磷石膏基粉粒与团粒之间通过水化产物形成嵌锁交联[18]，显著增强了接触面的摩擦阻力与胶结能力(见图 14(d)，(e))，为抗剪强度的提升奠定基础。同时，AFt 凭借其微膨胀特性与交织的晶体网络，兼具孔隙填充与强度提升的功效；其结构还能有效阻隔孔隙通道，抑制可溶磷、氟等污染物的浸出；



(a) 累计孔隙体积曲线

(a) Cumulative pore volume curves

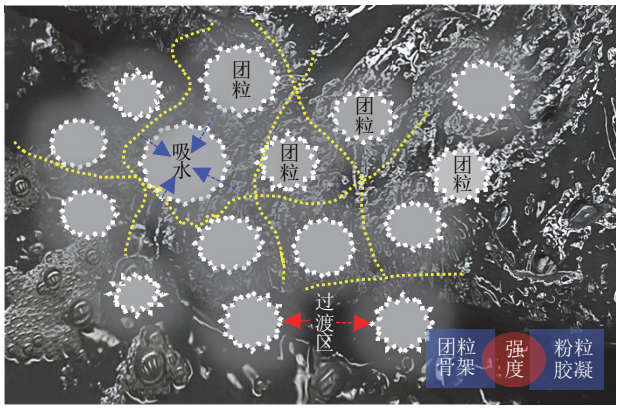


(b) 孔隙分布密度

(b) Pore-size distribution density curves

图 13　磷石膏基团粒固化淤泥的孔隙分布特征

Fig.13　Pore size distribution characteristics of sludge solidified by phosphogypsum-based materials



(a) 团粒骨架与粉粒胶凝

(a) Aggregates build skeleton，powder achieve cementation



(b) 碎石

(b) Crushed stone



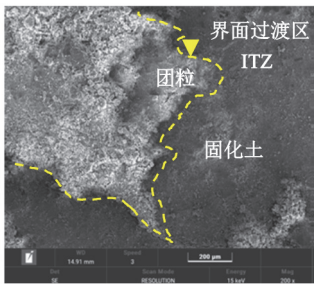
(c) 磷石膏基团粒

(c) Phosphogypsum-based aggregates



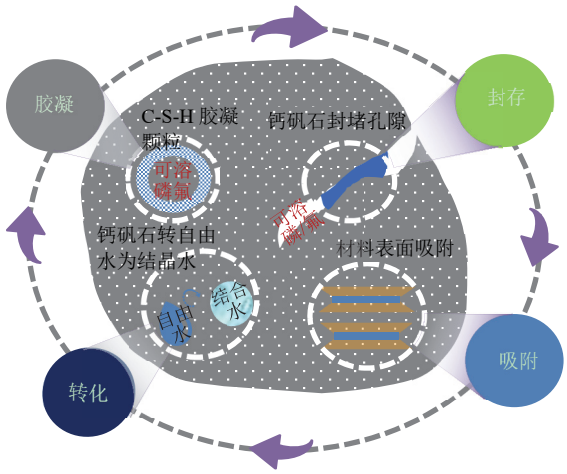
(d) 磷石膏基团粒凝硬体切面

(d) Section of the hardened specimen



(e) 磷石膏基团粒与固化土界面过渡区

(e) ITZ between aggregate and solidified soil



(f) 干化－固化效应

(f) Effects of drying and solidification

图 14　干化－固化协同机制

Fig.14　Synergistic mechanism in flowable sludge of drying and solidification

而 C-S-H 则通过胶结包裹作用，强化颗粒间的连接。两者协同作用，共同显著提升了固化淤泥的力学性能与固污能力(见图 14(f))。

5.2　经济和环境效益

选择固化剂需综合考量力学性能、经济成本与环境效益等关键因素。本文针对磷石膏基粉－团粒、普通硅酸盐水泥(OPC)两种固化淤泥方案，进行了经济性对比与碳排放评估。根据市场调研，主要原材料价格见表 7。

表 7　主要原材料价格

Table 7　Main raw material prices

序号 (No.)	材料类型 (material type)	成本(cost)/ (元·t^{-1})	补贴(subsidy)/ (元·t^{-1})
1	水泥	350	-
2	生石灰	400	-
3	粒化高炉矿渣	200	-
4	磷石膏	-	50
5	磷石膏基团粒	40	-
6	磷石膏基粉粒	170	-

基于磷石膏基粉－团粒和 OPC 固化底泥的配合比设计及固化效果。表 8 详细对比了 2 种方案的单位强度成本(元/MPa)。其中，通过在含水率 110%湿淤泥中掺入 30%普通硅酸盐水泥(OPC)，经 28 d 标准养护，开展 10 次干湿循环和 10 次冻融循环后，对应试样的无侧限抗压强度分别为 0.83 和 0.96 MPa。结果表明，磷石膏基粉(团)粒固化方案凸显出突出

表 8　固化剂单位强度成本

Table 8　Unit strength costs of curing agent

固化剂名称(name)	耐久性测试(test type)	每个试样总成本(total cost per sample)/元	无侧限抗压强度(*UCS*)/MPa	综合成本指数(unit strength cost)/(元 • MPa^{-1})
磷石膏基粉－团粒	干湿循环	0.022 2	3.56	0.006 2
磷石膏基粉－团粒	冻融循环	0.022 2	3.26	0.006 8
OPC	干湿循环	0.008 8	0.83	0.010 6
OPC	冻融循环	0.008 8	0.96	0.009 2

的经济优势，其单位强度成本显著低于传统 OPC 固化方案。该差异主要归因于磷石膏等工业副产物的成本优势，以及优化配合比实现的材料利用效率提升。

磷石膏基(团)粒和 OPC 生产和运输过程中产生的温室气体 CO_2 排放总量根据以下公式[16, 36-37]计算：

$$GHG_{\text{raw}} = \sum_{k=1}^{n} P_k (1 - R_k) \theta_k^{\text{f}} \tag{3}$$

$$GHG_{\text{sub}} = \sum_{k=1}^{m} (P_k R_k \theta_k^{\text{f}}) \tag{4}$$

式中：GHG_{raw} 为原材料(OPC)的温室气体 CO_2 排放量(kg • CO_2/t)；GHG_{sub} 为使用替代材料(磷石膏基粉－团粒)的温室气体 CO_2 排放量(kg • CO_2/t)；n 为原材料的种类数量；m 为替换材料的种类数量；P_{k} 为每类原材料与材料总质量的比例(kg/kg)，当采用替代材料时，该比例依据原始原材料计算；R_{k} 为每类替代材料的替代率；$\theta_{\text{k}}^{\text{f}}$ 为每类材料的 CO_2 排放率(kg • CO_2/t)，包含生产阶段 CO_2 的排放量 $\theta_{\text{k}}^{\text{p}}$ 和运输阶段 CO_2 的排放量 $\theta_{\text{k}}^{\text{t}}$，其中，$\theta_{\text{k}}^{\text{t}} = d_{\text{k}} G$，$d_{\text{k}}$ 为材料运输距离(km)，G 为每千米运输 1 吨材料的 CO_2 排放量(kg • CO_2/(t • km))。不同固化剂碳排放量对比见表 9。

表 9　不同固化剂碳排放量对比

Table 9　Comparison of carbon emissions from different curing agents

类型(type)	P_{k}/(kg • kg^{-1})	R_{k}/%	$\theta^{\text{p}}_{\text{k}}$/(kg • CO_2 • t^{-1})	G/(kg • CO_2 • t^{-1} • km)	d_{k}/km	$\theta_{\text{k}}^{\text{t}}$/(kg • CO_2 • t^{-1})	能量(energy)/(MJ • kg^{-1})
OPC	0.01	0	830	0.142	50	7.1	3.3
PG	0.01	52	5	0.142	20	2.8	–
GGBS	0.01	43	6	0.142	20	2.8	0.004 5
Lm	0.01	5	1 096	0.142	20	2.8	0.003

SUB-RAW(*SR*)指数用于比较替代材料和原材料的可持续性[16, 38]，其计算公式为

$$SR = \frac{\lg(EE_{\text{raw}}) - \lg(EE_{\text{sub}}) + \lg(GHG_{\text{raw}}) - \lg(GHG_{\text{sub}})}{2} \tag{5}$$

式中：EE_{raw} 为原材料能量(MJ/kg)，EE_{sub} 为替代材料能量(MJ/kg)。通过这种方式，可以获得 *SR* 指数的无量纲数值，该指数代表一个平均参数。正值表明替代材料相较于原材料在可持续性方面有所提高。

经计算，OPC 生产过程的 CO_2 排放量约为磷石膏基粉－团粒的 14 倍。当使用磷石膏基粉－团粒替代 OPC 固化淤泥时，*SR* 为 0.279，因此磷石膏基粉－团粒的二氧化碳排放量可忽略不计，利用磷石膏基粉－团粒代替 OPC 固化淤泥更有助于实现碳减排[16]。

6　结　论

传统处置模式采用分段式处理流程：先通过板框压滤等机械脱水形成泥饼后填埋，再对脱水淤泥进行物理破碎和二次化学固化后填筑。由于干化与固化环节相互分离，致使含水率需反复调节，额外增加了破碎、调水等多道工序，大幅抬升综合成本。本研究提出流塑状淤泥干化－固化协作方法，通过材料功能耦合与流程整合，消除冗余操作，从而显著降低资源消耗并提升经济性。得到如下主要结论：

(1) 磷石膏基粉粒以胶凝固化作用(生成 C-S-H 凝胶与钙矾石等水化产物)为主，辅以吸水干化；磷石膏基团粒则通过高效吸水干化(优化淤泥局部含水率)，同步调整颗粒级配构建骨架支撑，同时消纳大量磷石膏。二者功能互补，通过快速物理脱水与缓慢化学胶结的协同，实现流塑状淤泥的一体化实施和干化－固化协作成效。

(2) 在粉粒 15%、团粒 20%的掺量下，固化土 28 d 抗压强度达 4.84 MPa，其黏聚力与内摩擦角最高分别达 355.65 kPa 和 30.8°，满足低层及多层建筑地基处理的强度要求。经干湿循环作用后，固化土强度呈先升后降趋势，且随循环次数增加衰减显著加剧；试样表面裂隙加深、边缘剥落，孔隙数量明显增多。冻融循环则导致强度持续且加速劣化，内部冻胀应力引发微裂纹增多与胶凝物流失；其表面主要表现为孔隙扩大，但整体结构仍保持完整。总体而言，尽管干湿与冻融循环均显著削弱固化土耐久性，但与普通硅酸盐水泥固化土体相比，该材料仍表现出相对优良的耐久性能。

(3) 评估表明，磷石膏基粉(团)粒固化方案具有显著的经济优势，其单位强度成本远低于传统 OPC 固化方案；同时，该方案的二氧化碳排放量微乎其微，利用磷石膏基粉－团粒替代 OPC 固化淤泥，可

大幅降低碳排放。

参考文献(References)：

[1] 吴　敏，黄英豪，董道武. 淤泥板框压滤脱水效率影响因素研究[J]. 岩土工程学报，2025，47(增 1)：16－20.(WU Min，HUANG Yinghao，DONG Daowu. Influencing factors for dewatering efficiency of plate and frame filter pressing for sediment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2025，47(Supp.1)：16－20.(in Chinese))

[2] 丁建文，洪振舜，刘松玉. 疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J]. 岩土力学，2011，32(增 1)：280－284. (DING Jianwen，HONG Zhenshun，LIU Songyu，Study of flow-solidification method and fluidity test of dredged clays[J]. Rock and Soil Mechanics，2011，32(Supp.1)：280－284.(in Chinese))

[3] 张申奥，王勇伟，王利珏，等. 磷石膏与冶金污酸石膏渣处理处置研究进展[J]. 工程科学学报，2025，47(7)：1 494－1 514.(ZHANG Shen′ao，WANG Yongwei，WANG Lijue，et al. Research progress on comprehensive utilization of phosphogypsum and metallurgical acidic gypsum residue[J]. Chinese Journal of Engineering，2025，47(7)：1 494－1 514.(in Chinese))

[4] JIA Y，ZHANG J X，ZOU X M，et al. Investigation into the evolutionary behavior of completely solid waste materials high-sulfur quaternary cementitious systems in a high-alkali environment materials[J]. Construction and Building Materials，2025，474：140996.

[5] MAIERDAN Y，CUI Q，CHEN B，et al. Effect of varying water content and extreme weather conditions on the mechanical performance of sludge bricks solidified/stabilized by hemihydrate phosphogypsum，slag，and cement[J]. Construction and Building Materials，2021，310：125286.

[6] 吴　敏，黄英豪，董仕骏，等. 高分子絮凝剂对淤泥板框压滤脱水效果及影响机制[J]. 岩土工程学报，2025，47(3)：470－476.(WU Min，HUANG Yinghao，DONG Shijun，et al. Effects of polymer flocculant on dredged sediment by plate and frame filter press dewatering technology and its influence mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2025，47(3)：470－476.(in Chinese))

[7] 林小蔚，侯　豪，刘　环，等. 清淤泥浆脱水－固化一体化工艺效果和机制研究[J]. 岩土力学，2024，45(2)：443－453.(LIN Xiaowei，HOU Hao，LIU Huan，et al. Effect and mechanism of dredged mud by the integrated dewatering-curing process[J]. Rock and Soil Mechanics，2024，45(2)：443－453.(in Chinese))

[8] CUI Y，ZHU W，WU S L，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)：17 331－17 342.

[9] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机制与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报，2021，43(2)：201－225.(CAI Yuanqiang. Consolidation mechanism of vacuum preloading for dredged slurry and anti-clogging method for drains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2021，43(2)：201－225.(in Chinese))

[10] 章荣军，郑俊杰，程钰诗，等. 养护温度对水泥固化淤泥强度影响试验研究[J]. 岩土力学，2016，37(12)：3 463－3 471.(ZHANG Rongjun，ZHENG Junjie，CHENG Yushi，et al. Experimental investigation on effect of curing temperature on strength development of cement stabilized clay[J]. Rock and Soil Mechanics，2016，37(12)：3 463－3 471.(in Chinese))

[11] 谈云志，柯　睿，陈君廉，等. 偏高岭土增强石灰－水泥固化淤泥的耐久性研究[J]. 岩土力学，2020，41(4)：1 146－1 152.(TAN Yunzhi，KE Rui，CHEN Junlian，et al. Enhancing durability of lime-cement solidified sludge with metakaolin[J]. Rock and Soil Mechanics，2020，41(4)：1 146－1 152.(in Chinese))

[12] 丁建文，张　帅，洪振舜. 高含水率疏浚淤泥流动固化处理试验研究[J]. 水运工程，2009，(6)：30－34.(DING Jianwen，ZHANG Shuai，HONG Zhenshun. Experimental study on solidification in flowing state of dredged clay with high water content[J]. Port and Waterway Engineering，2009，(6)：30－34.(in Chinese))

[13] 丁建文，万　星，高洪梅，等. 赤泥磷石膏与水泥协同固化淤泥的力学特性与微观机制[J]. 岩土工程学报，2026，待刊.(DING Jianwen，WAN Xing，GAO Hongmei，et al. Mechanical behavior and microscopic mechanism of soft clay stabilized by red mud，phosphogypsum and cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2026，to be presses.(in Chinese))

[14] 王东星，许凤丽，泮晓华，等. GGBS-MICP 协同固化淤泥质砂土工程特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(5)：1 349－1 362.(WANG Dongxing，XU Fengli，PAN Xiaohua，et al. Study on the engineering properties of GGBS-MICP synergistic solidification of silty-sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(5)：1 349－1 362.(in Chinese))

[15] 谈云志，吴仙桥，吴　军，等. 磷石膏基团粒调控固化淤泥的物理力学性能[J]. 岩土力学，2025，46(6)：1 667－1 677.(TAN Yunzhi，WU Xianqiao，WU Jun，et al. Physical and mechanical properties of solidified sludge regulation with phosphogypsum-based aggregate[J]. Rock and Soil Mechanics，2025，46(6)：1 667－1 677.(in Chinese))

[16] 吴　军，张金生，谈云志，等. 磷石膏－矿渣－石灰固化底泥力学性能及微观机制[J]. 应用基础与工程科学学报，2024，32(5)：1 360－1 373.(WU Jun，ZHANG Jinsheng，TAN Yunzhi，et al. Mechanical properties and microscopic mechanism of phosphogypsum-slag-lime solidified sediment[J]. Journal of Basic Science and Engineering，2024，32(5)：1 360－1 373.(in Chinese))

[17] 韩　爽，谈云志，杨舒涵，等. 膨胀珍珠岩调控固化淤泥物理－力学性能的方法[J]. 岩土力学，2024，45(11)：3 324－3 332.(HAN Shuang，TAN Yunzhi，YANG Shuhan，et al，Method of using expanded perlite to regulate physico-mechanical properties of solidified sludge[J]. Rock and Soil Mechanics，2024，45(11)：3 324－3 332.(in Chinese))

[18] YAN J J，YAN W，SCHAFFŐNER S，et al. Effect of microporous

magnesia aggregates on microstructure and properties of periclase-magnesium aluminate spinel castables[J]. Ceramics International，2021，47(5)：6 540－6 547.

[19] HUANG X S，ZHANG R J，WU Z H，et al. Comparison between physicochemical combined method and conventional cement solidification method for treating heavy metal-contaminated slurry-like mud[J]. Journal of Cleaner Production，2025，523：146460.

[20] WU J，LUO Z Y，TAN Y Z，et al. Performance evaluation of waste phosphogypsum-based solidified sludge：From laboratory test to field application[J]. Materials Today Sustainability，2024，28：101013

[21] CHERNYSH Y，YAKHNENKO O，CHUBUR V，et al. Phosphogypsum recycling：A review of environmental issues，current trends，and prospects[J]. Applied Sciences，2021，11(4)：1 575.

[22] TIAN D Y，JIANG H，QIU Z D，et al. Synergy effects of phosphogypsum on the hydration mechanism and mechanical properties of alkali-activated slag in polysilicon sludge solidification[J]. Construction and Building Materials，2024，456：139386

[23] MAIERDAN Y，HAQUE M A，CHEN B，et al. Recycling of waste river sludge into unfired green bricks stabilized by a combination of phosphogypsum，slag，and cement[J]. Construction and Building Materials，2020，260：120666

[24] 何 俊，王小琦，石小康，等. 碱渣－矿渣固化淤泥的无侧限抗压强度与微观特征[J]. 应用基础与工程科学学报，2021，29(2)：376－386.(HE Jun，WANG Xiaoqi，SHI Xiaokang，et al，Unconfined compressive strength and microscopic characteristics of soft soil solidified with soda residue and ground granulated blast furnace slag[J]. Journal of Basic Science and Engineering，2021，29(2)：376－386.(in Chinese))

[25] 崔荣政，白海丹，高永峰，等. 磷石膏综合利用现状及“十四五”发展趋势[J]. 无机盐工业，2022，54(4)：1－4.(CUI Rongzheng，BAI Haidan，GAO Yongfeng，et al. Current situation of comprehensive utilization of phosphogypsum and its development trend of 14th five-year plan[J]. Inorganic Chemicals Industry，2022，54(4)：1－4.(in Chinese))

[26] 荀 勇. 含工业废料的水泥系固化剂加固软土试验研究[J]. 岩土工程学报，2000，22(2)：210－213.(XUN Yong. Test on strengthening soft soil with cementatory solidifying agent containing industrial waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2000，22(2)：210－213.(in Chinese))

[27] 林宗寿，黄 赟. 磷石膏基免煅烧水泥的开发研究[J]. 武汉理工大学学报，2009，31(4)：53－55.(LIN Zongshou，HUANG Yun. Investigation on phosphogypsum-base no-calcined cement[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2009，31(4)：53－55.(in Chinese))

[28] 林宗寿，黄 赟，水中和，等. 过硫磷石膏矿渣水泥与混凝土[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2015.(LIN Zongshou，HUANG Yun，SHUI Zhonghe，et al. Excess-sulfate phosphogypsum slag cement and concrete[M]. Wuhan：Wuhan University of Technology Press，2015.(in Chinese))

[29] TAN Y Z，SONG Z Y，MING H J，et al. Preparation and performance evaluation of high-strength phosphogypsum aggregates by compaction and hydration[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management，2024，26(1)：149－161.

[30] LIU S H，OUYANG J Y，REN J. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement[J]. Construction and Building Materials，2020，243：118226.

[31] 中华人民共和国行业标准编写组. HJ 557—2010 固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法[S]. 北京：中国环境科学出版社，2010.(The Professional Standards Compilation Group of People′s Republic of China. HJ 557—2010 Solid waste—Extraction procedure for leaching toxicity—Horizontal vibration method[S]. Beijing：China Environment Science Press，2010.(in Chinese))

[32] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京：中国环境科学出版社，2002.(The National Standards Compilation Group of People′s Republic of China. GB 3838—2002 Environmental quality standards for surface water[S]. Beijing：China Environment Science Press，2002.(in Chinese))

[33] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ/T 51—2019 轻骨料混凝土应用技术标准[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.(The Professional Standards Compilation Group of People′s Republic of China. JGJ/T 51—2019 Technical standard for application of lightweight aggregate concrete[S]. Beijing：China Architecture and Building Press，2019.(in Chinese))

[34] 何 俊，罗时茹，龙思昊，等. 不同吸水环境下碱渣固化淤泥毛细吸水和强度性质[J]. 材料导报，2024，38(9)：147－152.(HE Jun，LUO Shiru，LONG Sihao，et al. Capillary water absorption and strength of soft soil solidified with soda residue under different water environments[J]. Materials Reports，2024，38(9)：147－152.(in Chinese))

[35] WEI M，YANG Y，XIONG L X，et al. Cement-SG curing agent for solidification of mucky soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2023，82(6)：236.

[36] LETELIER V，ORTEGA J M，TARELA E，et al. Mechanical performance of eco-friendly concretes with volcanic powder and recycled concrete aggregates[J]. Sustainability，2018，10(9)：3 036.

[37] LETELIER V，ORTEGA J M，TREMIÑO R M，et al. The use of volcanic powder as a cement replacement for the development of sustainable mortars[J]. Applied Sciences，2020，10(4)：1 460.

[38] BONTEMPI E. A new approach for evaluating the sustainability of raw materials substitution based on embodied energy and the CO_2 footprint[J]. Journal of Cleaner Production，2017，162：162－169.