DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0513

膨润土调控磷石膏基粉粒干化－固化流态淤泥的作用机制

谈云志[1, 2]，谢金墉[1]，陈红凤[1, 3*]，罗曾严[1, 2]，明华军[1, 3]，王 冲[1, 2]，吴 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 防灾减灾湖北省重点实验室，湖北 宜昌 443002；3. 三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌 443002）

摘要：磷石膏、矿渣和石灰组成的磷石膏基粉粒固化淤泥已被广泛研究，但仍存在固化早期水化慢、后期强度低的问题，主要原因是淤泥高含水率降低了固化效果。以磷石膏基粉粒为基础，选用膨润土为调控剂，借助钙矾石“转水”、“膨胀”独特性，采用宏微观分析技术相结合的方法，研究固化淤泥的水－力性能，评价膨润土的调控效果。研究发现，膨润土显著降低了固化淤泥试样的自由水，养护 28 d 和 90 d 后，含水率均降低了 10%；同时，固化淤泥养护后期的力学性能提升明显，养护 90 d 强度达到 3.8 MPa，是 14 d（1.9 MPa）的 2 倍。SEM 和 XRD 结果表明，养护 90 d 的固化淤泥中针棒状钙矾石与硅酸钙、铝酸钙等胶结物形成了致密网状交织结构；MIP 结果亦证实，固化淤泥中大孔径（＞10 μm）孔隙几乎消失，说明钙矾石的膨胀挤压作用显著充填了大孔隙。钙矾石的转水和膨胀作用加速了早期胶凝作用，提升了养护后期强度。采用膨润土调控的固化淤泥综合成本指数仅为铝酸三钙调控的 6.51%。可见，采用低成本、易溶解的膨润土作为磷石膏基粉粒固化淤泥的“调控剂”是可行的。研究成果有助于拓宽特殊土的应用范围，同时促进淤泥、磷石膏两大固废的协同消纳。

关键词：土力学；疏浚淤泥；膨润土；钙矾石；磷石膏；干化－固化

中图分类号：TU 43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2026)03－0892－11

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

***通讯作者**：陈红凤（1990－），现任副教授，主要从事黏土矿物污染修复方面的研究工作。E-mail：chenhongfeng@ctgu.edu.cn

Mechanism of bentonite in regulating the drying-solidification of fluid sludge using phosphogypsum-based powder

TAN Yunzhi[1, 2], XIE Jinyong[1], CHEN Hongfeng[1, 3*], LUO Zengyan[1, 2], MING Huajun[1, 3], WANG Chong[1, 2], WU Jun[1, 2]

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

Abstract: The phosphogypsum-based material, composed of phosphogypsum, slag, and lime, used for solidifying

收稿日期：2025－07－17；**修回日期**：2025－10－22

基金项目：国家自然科学基金联合基金项目（U24A20183）；宜昌市自然科学研究项目（A24－3－023）

Supported by the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U24A20183) and Natural Science Foundation of Yichang (Grant No. A24－3－023)

sludge has been extensively studied. However, it still encounters challenges such as slow early-stage hydration and low long-term strength due to the high water content of sludge, which weakens stabilization efficiency. This paper employs phosphogypsum-based powder combined with bentonite as a regulating agent, capitalizing on the unique water conversion and expansion properties of ettringite. A combination of macro-performance tests and micro-characterization techniques was utilized to investigate the hydro-mechanical properties of the stabilized sludge and to evaluate the effectiveness of bentonite. The results demonstrate that bentonite significantly reduces the free water content in the solidified sludge, achieving a 10% reduction after both 28 and 90 days of curing. Additionally, bentonite enhances the mechanical properties of the solidified sludge during the curing process. The strength of the solidified sludge after 90 days of curing reaches 3.8 MPa, which is double that achieved after curing14 days (1.9 MPa). Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) results indicate the formation of a dense, interwoven network of needle-like ettringite alongside cementitious hydration products (e.g., calcium silicate hydrate, calcium aluminate hydrate) in the samples cured for 90 days. Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) results further confirm the near disappearance of large pores (＞10 μm), suggesting that the expansive filling effect of ettringite significantly reduces macroporosity. The water conversion and expansion driven by ettringite accelerate early-stage cementitious formation and enhance long-term strength. Moreover, the comprehensive cost index of bentonite-solidified sludge is only 6.51% of that of tricalcium aluminate. Therefore, utilizing low-cost, readily soluble bentonite as a regulating agent in phosphogypsum-based sludge stabilization is a viable option. This study provides a sustainable strategy for the synergistic utilization of dredged sludge and phosphogypsum, thereby broadening the application scope of special soils.

Key words: soil mechanics; dredged sludge; bentonite; ettringite; phosphogypsum; drying-solidification

First Author: TAN Yunzhi (1979－), professor, is engaged in research on the mechanics of special soils and the resource utilization of special soils. E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

***Corresponding Author:** CHEN Hongfeng (1990－), associate professor, is engaged in research on the remediation related to clay minerals. E-mail: chenhongfeng@ctgu.edu.cn

1 引 言

河湖疏浚产生大量淤泥，大部分采用海抛和陆地填埋处置，占处理总量的 70%～80%[1]；少部分经处理后用作覆盖填埋场层、修筑路基等[2]。疏浚淤泥呈流态状，含水率高(2～3 倍液限值)，即使经过机械脱水处理，含水率仍高达 80%[3]；表现出高压缩和低强度特点，无法直接用作工程填料。含水率需降至塑限值附近，才可达到预期的压实效果和承载能力[4]；否则，需掺入大量固化剂处置。然而，淤泥含水率高，仅靠掺入固化剂，效果甚微。如：何 俊等[5]采用水玻璃－碱渣－矿渣固化疏浚淤泥，发现含水率从 110%降至 90%时，无侧限抗压强度仅略微增加；继续降至 70%时，强度才出现大幅增加。究其原因，是过量自由水阻碍了水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)、钙矾石(AFt)等胶结物的形成，导致淤泥颗粒胶结时间长[6-7]。另一方面，淤泥中自由水蒸发后，增加了淤泥固化体孔隙度，特别是大孔隙明显增加，降低了淤泥固化体承载能力，也为污染物滤出提供了通道[8]。因此，流态淤泥要固化，必先经历干化。

淤泥干化方法主要有 2 种：一是自然晾晒，需来回翻转，且要连续晴天，但淤泥表层易干，黏性大，翻晒效率低；二是板框压滤，需建立专门处理站，压滤成泥饼，继续作填埋处置。因缺乏跨部门、跨地区协作，淤泥处置大都是干化和固化过程分而治之，导致处置成本过高而缺乏市场竞争力。

近年来，采用磷石膏、矿渣、生石灰/水泥组成的固化剂已用于淤泥固化。磷石膏中的 SO_4^{2-} 和少量生石灰/水泥配合，可激发矿渣发生类似水泥的碱激发反应[9-10]，形成 C-S-H，C-A-H 等胶结物，实现了诸如磷石膏的低活性固废资源化利用。研究表明，磷石膏基过硫酸盐水泥胶凝材料净浆强度达 40～60 MPa，可与硅酸盐水泥媲美[11]。吴 军等[12]采用石灰配合磷石膏、矿渣固化河湖底泥，发现养护 28 d

时固化淤泥试样强度达到 1.53 MPa，优于同掺量硅酸盐水泥；且其单位强度成本仅为硅酸盐水泥的 59.1%。可见，采用磷石膏基粉粒固化淤泥不仅有良好的强度效果，且有明显的经济价值。

目前，相关团队已就磷石膏基胶凝材料固化淤泥开展了有益探索，特别是在工业固废协同水泥/石灰固化淤泥方面取得了创新性成果。石修松等[13]研究了非均质固化渣土的压缩与微观结构特性；丁建文等[14]提出了磷石膏、赤泥与水泥结合固化淤泥的方法，证实了掺入磷石膏提升了复合固化土的应变、无侧限抗压强度；王文翀等[15]研究了减水剂对流态固化淤泥流动性的影响，拓宽了淤泥固化土在狭窄区域的回填利用；吴 敏等[16]分析了淤泥板框压滤脱水效率对淤泥固化的影响；黄英豪等[17]研究了 7 种大宗工业固废与水泥协同固化淤泥的效果，明确了磷石膏、高炉矿渣协同/替代部分水泥固化淤泥的可行性。以上成果为本研究的开展提供了良好的理论基础与参考依据，充分验证了工业固废磷石膏、高炉矿渣组成的固化剂用于固化淤泥的可行性。但其固化方法也存在不足，表现为淤泥含水率高，需耗费大量固化剂，同时早期胶结物形成速率慢，后期强度提升幅度小，限制了固化淤泥的工程应用。

硫酸盐(石膏)与硅酸盐水泥中的铝酸三钙反应，可形成 AFt[18]。AFt 具有“膨胀”特性，易导致水泥混凝土后期发生胀裂[7, 19]。同时，生成 1 mol 的 AFt 可将 32 mol 自由水转化为结晶水，其“转水”能力较强。据此，混凝土领域中都视 AFt 为有害之物，作者试图“依势而为”。拟借助 AFt 的“转水”、“膨胀”特点，用“转水”降低淤泥的含水率，用“膨胀”充填淤泥颗粒间孔隙，实现持续实施“干化－固化”流态淤泥。但需要精准调控 AFt 的生成量和生成时间，否则量大引起淤泥固化体隆起开裂，量少则承载能力不足。受固化剂组分、含量影响，AFt 生成不可控，根本原因是活性 Al 不足，其是决定 AFt 形成速率和结构特征的关键[20]。通过添加铝酸三钙可实现精准调控 AFt 形成，但制备成本极高(约 2 万元/t)，无法规模化用于推广。因此，亟需寻求成本低廉、来源广泛的“供铝剂”。

自然环境中广泛分布的黏土(高岭土、膨润土等)，富含铝硅酸盐矿物(高岭石、蒙脱石)，其中 Al_2O_3 含量占 20%～40%，成本是工业铝源的 1/10[21]。黏土矿物结构由硅氧四面体和铝氧八面体组合而成，表面具有断键的羟基活性位点，酸/碱溶液浸泡下均可溶解释放出活性 Al 组分(Al^{3+}/$Al(OH)_4^-$)[22]。为此，论文提出以磷石膏基粉粒(磷石膏、矿渣、石灰混合物)为基础，引入膨润土调控磷石膏基粉粒干化－固化流态淤泥的方法。通过开展固化淤泥的水－力性能试验，评价膨润土调控磷石膏基粉粒固化流态淤泥的效果；结合压汞(MIP)、X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)等测试技术，揭示膨润土促进 AFt，C-A/S-H 凝胶生成的机制，研究结论可为疏浚淤泥、磷石膏的低成本处置提供科学指导。

2　研究方案

2.1　试验材料

(1) 磷石膏基粉粒。磷石膏基粉粒是由二水磷石膏(PG)、高炉粒化矿渣(GGBS)、石灰(L)磨细过 200 目筛后，按照特定干质量比(PG:GGBS:L = 20:75:5)均匀混合而成。磷石膏基粉粒的质量配比参照谈云志等[23]确定的最优配比。其中：磷石膏(PG)取自中孚化工集团有限公司堆场，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 质量分数约占 90%，球磨后过 80 目筛，密封保存备用；粒化高炉矿渣购自湖北宜昌腾阔新材料科技有限公司，含氧化钙 40.5%、氧化铝 14.7%、氧化硅 30.9%；石灰主要成分为氧化钙，质量分数大于 95%。参考谈云志等[23]研究成果，磷石膏基粉粒造粒后可溶性磷、氟在浸泡 21 d 的溶出浓度分别低于 0.1 和 0.8 mg/L，低于《地表水环境质量标准》(GB 3838－2002)中的 III 类水排放标准(可溶性磷排放标准 0.2 mg/L，可溶性氟排放标准 1.0 mg/L)。可见，磷石膏基粉粒中磷、氟浸出风险较低。

(2) 淤泥。试验用淤泥取自宜昌市鸦鹊岭镇某池塘，呈黑色、流塑状。初始含水率 53.4%、液限 56%、塑限 23%，有机质含量 4.0%、pH = 6.3，粒径小于 0.075 mm 的细粒质量占 31.3%；主要成分含氧化硅(73.2%)、氧化铝(14.7%)、氧化铁(6.1%)。

(3) 膨润土。本文选取了易获取的工程材料高岭土和膨润土，比较二者在饱和石灰水浸泡下高岭石和蒙脱石的溶解差异。相同 pH 条件下，饱和石灰水中蒙脱石和高岭石随浸泡时间增加的离子溶出浓度变化如图 1 所示。综合比较，早期蒙脱石与高岭石 Si，Al 溶出量基本一致；浸泡时间大于 72 h 后，蒙脱石溶出量高于高岭石。因此，本研究选择以膨润土作为供 Al 剂。试验用钠基膨润土购自河北宗润矿产品有限公司，主要成分蒙脱石含量可达 80%～90%。

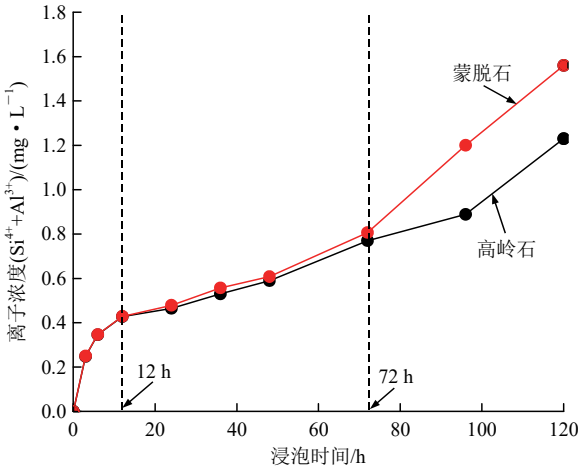


图 1　饱和石灰水中蒙脱石和高岭石随浸泡时间增加的离子浓度变化

Fig.1　Changes in ion concentration of montmorillonite and kaolinite in saturated limewater with increasing soaking time

2.2　试验方案

(1) 膨润土溶出试验。考虑到磷石膏基粉粒是碱性水化体系，故选择碱性溶液溶出膨润土。按照固液比 1∶20，将膨润土与饱和石灰水混合搅拌均匀。即称取 300 g 膨润土浸入 6 000 mL 饱和石灰水中，并充分打散；再装入塑料桶密封，置于 25 ℃恒温环境中保存，每天搅拌 1 次。浸泡到预定时间(1，7，14，30，60，120，180 d)，取清液 50 mL，经 0.45 μm 孔径滤膜过滤后，采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定浸出液中的 Si^{4+}，Al^{3+}浓度。同时，用梅特勒 pH 计测定浸出液 pH 值。

(2) 固化淤泥强度试验。将淤泥调配到流态，含水率约为 1.5 倍液限(约 90%)。参考前期研究结论，磷石膏基粉粒与流态淤泥的相对质量比维持不变(磷石膏基粉粒∶流态淤泥 ＝20∶100)[23]，再按照膨润土与流态淤泥质量比(2∶100，3.5∶100，5∶100，6.5∶100，8∶100)掺入膨润土。将三者混合均匀搅拌 5～6 min，倒入 40 mm × 40 mm × 40 mm 三联塑料模具，并置于振动台振动 10～15 min，刮掉超出模具的部分；包上塑料保鲜膜置入养护箱内(20 ℃ ± 2 ℃；*RH*≥95%)，养护到预期时间(7，28，90 d)后脱模。按照 ASTM D2166 标准开展无侧限抗压强度(*UCS*)试验，试验机最大载荷 300 kN、载荷分辨率 0.1 N、位移分辨率 0.01 mm，加载速率 0.2 mm/min，每次 3 个平行试样测试。

(3) 含水率试验。*UCS* 试验结束后，取试样中间破碎部分测定含水率。考虑到 AFt 的结晶水超过 70 ℃便受热失水[18]，故设定烘干温度 50 ℃，烘干至恒重，测定试样含水率。

(4) 微观试验。*UCS* 试验结束后，取试样中间部分，用液氮冻干法预处理后，选取边长约 1 cm、断面平整的小块体，做表面镀金处理，防止电荷积聚影响图像质量；采用日本 SU3500 扫描电镜观察微观形貌(SEM)，试验加速电压为 15 keV。选择部分试样磨细后，用于 X-射线衍射分析(XRD)。

3　膨润土的调控成效

3.1　干化成效

不同膨润土掺量和不同养护龄期的含水率变化如图 2 所示。

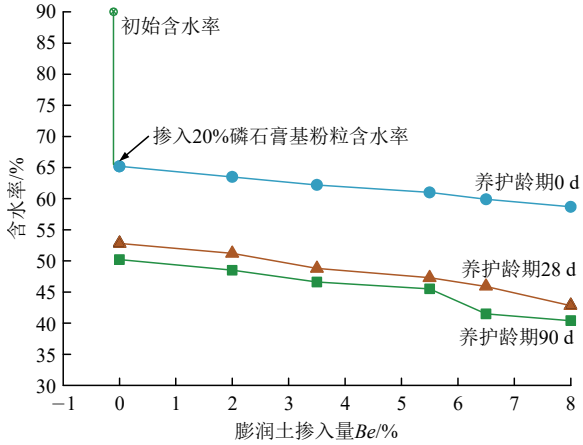


图 2　不同膨润土掺量和不同养护龄期的含水率变化

Fig.2　The variation of moisture content with different bentonite admixtures and curing ages

总体而言，固化淤泥试样的含水率随膨润土掺量和养护龄期的增加而增加，膨润土调控磷石膏基粉粒干化淤泥效果较明显。掺入 20%磷石膏基粉粒的淤泥试样含水率明显降低，从初始的 90%降至 65%。且试样养护过程中缠绕有保鲜膜，可排除蒸发失水。由此可推测，磷石膏基粉粒固化淤泥的转水效果主要是磷石膏基粉粒的吸水作用，以及 AFt 形成过程中将自由水转化为结晶水两方面的作用，且固水效果可持续较长时间(90 d)。

为验证以上“转水”推测，选取养护 90 d、膨润土掺量 8%的试样，开展 XRD 分析(见图 3)和热重分析(见图 4)，鉴别其生成物及含量。由 XRD 图谱可知，干化－固化试样中除明显的石英衍射峰外，还有胶结物 C-S/A-H 和 AFt 的衍射峰。证实了掺入膨润土，促进了 AFt 等胶结物的形成。

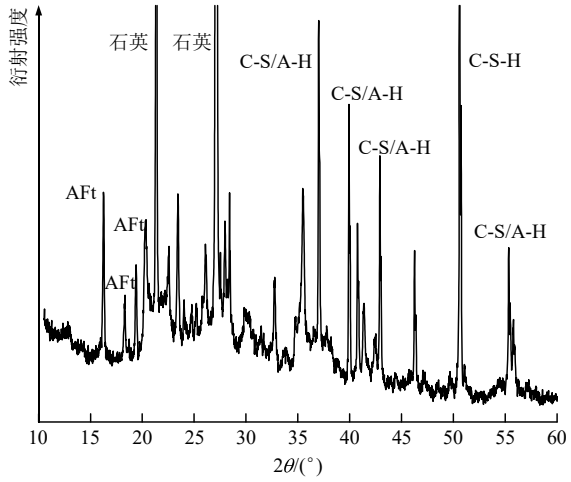


图 3　膨润土掺量 8%、养护 90 d 的固化淤泥 XRD 衍射谱

Fig.3　The XRD pattern of the solidified sludge with 8% bentonite content and cured for 90 days

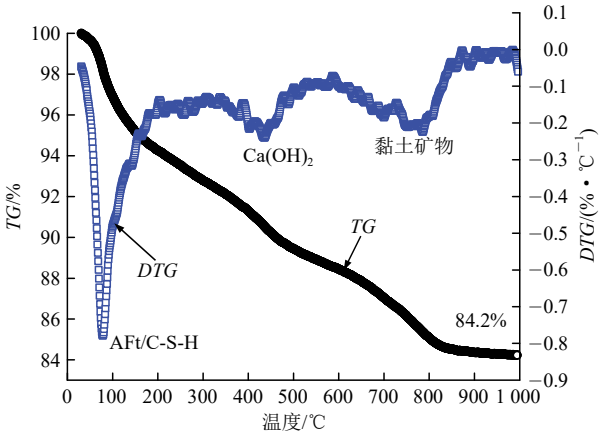


图 4　膨润土掺量 8%、养护 90 d 的固化淤泥热重损失质量(*TG*)和微分热重损失(*DTG*)曲线

Fig.4　Curves of thermogravimetric (*TG*) and derivative thermogravimetric (*DTG*) of the solidified sludge with 8% bentonite content and cured for 90 days

固化淤泥试样总质量损失量 15.8%(室温～1 000 ℃)，主要为结晶水和结构羟基水。其中，在 60 ℃～200 ℃范围内，质量损失 5.67%，主要是热作用下水化产物 AFt 和(或)C-S-H 发生了脱水[24]；在 400 ℃～500 ℃范围内，质量损失 1.25%，主要是 $Ca(OH)_2$ 分解所致[25]；在 700 ℃～800 ℃范围内，质量损失 1.98%，可能是黏土矿物羟基脱水[25]。

3.2　固化成效

固化淤泥试样养护 28 d 后的应力－应变曲线如图 5 所示。在膨润土掺量为 2%的条件下，破坏曲线无明显脆性破坏，呈延性破坏；应变增加至 1.5%～2.0%时，应力达到峰值，随后缓慢下降。以上结果表明，掺入膨润土既提高了固化淤泥的刚度，又适度增强了延展性，有利于抵抗变形破坏。

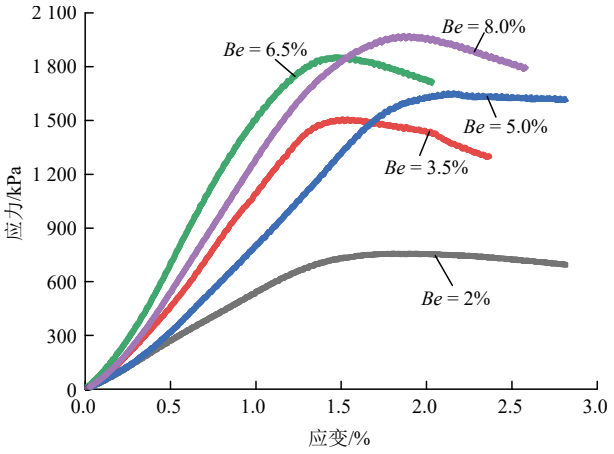


图 5　不同膨润土掺量下、养护 28 d 的固化淤泥应力－应变曲线

Fig.5　Stress-strain curves of solidified sludge with different bentonite contents and cured for 28 days

固化淤泥的无侧限抗压强度见图 6，满足标准[26]中强度等级 1.0 MPa 要求。

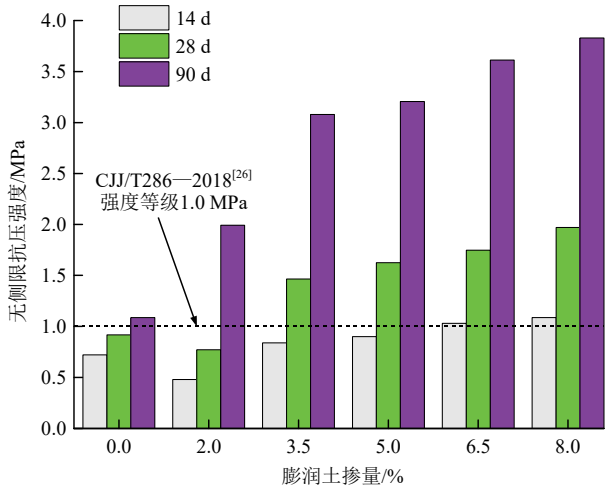


图 6　不同膨润土掺量固化淤泥的无侧限抗压强度

Fig.6　The unconfined compression strength of solidified sludge with different bentonite content

随膨润土掺量继续增加，掺量大于 3.5%后，固化体强度明显增加，尤其是养护 28 d 和 90 d 条件下的固化体强度显著增加。充分说明适当掺量的膨润土确实可提升淤泥固化体强度，特别是养护后期强度增加明显。而膨润土 2%掺量下形成的淤泥固化体，养护早期强度低于掺量为 0%的固化体。推测其原因是膨润土含量较低，淤泥含水率大，溶解释放的活性 Al 水化形成的胶凝产物含量低，导致养护早期强度低。此外，膨润土具有良好吸水膨胀特性，也会引起固化体强度降低[4]。

4　分析与讨论

4.1　膨润土的 Si^{4+}，Al^{3+}溶出规律

膨润土浸泡于饱和石灰水溶液(pH≈12.5)中，浸出液的 pH 变化见图 7(右 *Y* 轴)；Si^{4+}，Al^{3+}溶出情况见图 7(左 *Y* 轴)。

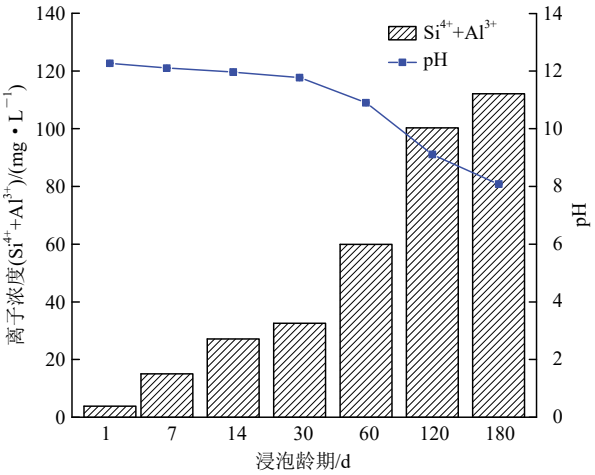


图 7　饱和石灰水浸泡液随时间增加的 pH 变化和膨润土的 Si^{4+}，Al^{3+}溶出浓度

Fig.7　The pH and Si^{4+} and Al^{3+} leaching concentrations from bentonite in saturated lime water over time

已有研究表明，pH＞12 时，膨润土开始溶解[27]；本文结果也表明，饱和石灰水 pH＞12 时膨润土开始溶出 Si^{4+}，Al^{3+}，但溶解浓度随浸泡时间增加，具有滞后性。浸泡 0～28 d，Si^{4+}，Al^{3+}溶出量少且速率慢，溶解量由 3.8 mg/L 增至 32.6 mg/L；浸泡 28～180 d，Si^{4+}，Al^{3+}大量溶出，溶解速率加快，至 180 d 时溶出量为 112.1 mg/L。Si^{4+}，Al^{3+}溶出趋势与浸出液 pH 变化高度一致。

膨润土中 Si^{4+}，Al^{3+}溶出规律受蒙脱石分子结构影响较大。S. Yokoyama 等[28]证实，在强碱环境下，蒙脱石开始从边缘表面分段溶解，后期边缘表面积增大引起结构塌陷(见图 8)，溶解速率增大。

随浸泡时间增加，蒙脱石表现出的“滞后”溶出特点，可以加速 AFt 形成，填充淤泥失水后的孔隙，恰好可以补充磷石膏基粉粒固化淤泥后期的强度提升需求，实现磷石膏基粉粒错位干化－固化(早期干化为主、后期固化为主)流态淤泥的需求。

4.2　膨润土溶出物的胶结性能

膨润土调控的固化淤泥试样(膨润土掺量为 0%，2%，8%)的 XRD 谱线如图 9 所示。

固化淤泥主要组成是石英、C-S/A-H 和 AFt。由于石英特征峰较强，掩盖了 AFt 的衍射峰，因此单独列出 15°～19°(2θ)的特征衍射峰(见图 9(b))。随养护龄期和膨润土掺量增加，AFt 衍射峰峰强逐渐增强，说明膨润土不断发生离子交换，进而与其他阴离子结合生成水化产物[29]；养护 28 d 时固化淤泥试样的无侧限抗压强度增加明显，特别是养护 90 d 的强度增长更显著(见图 6)。以上结果充分说明，AFt 的形成与膨润土溶解在时间上有一定滞后性，证实了前期提出的错位固化猜想。AFt 衍射峰的偏移可能是受其他离子影响，进入到 AFt 层间或晶体结构内。

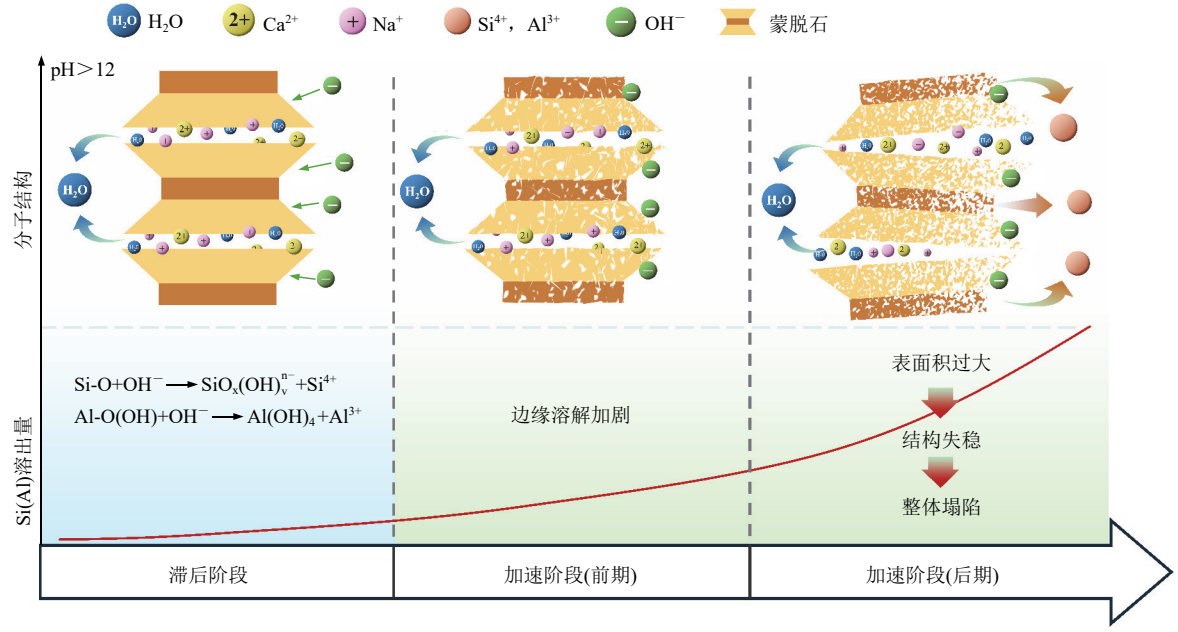
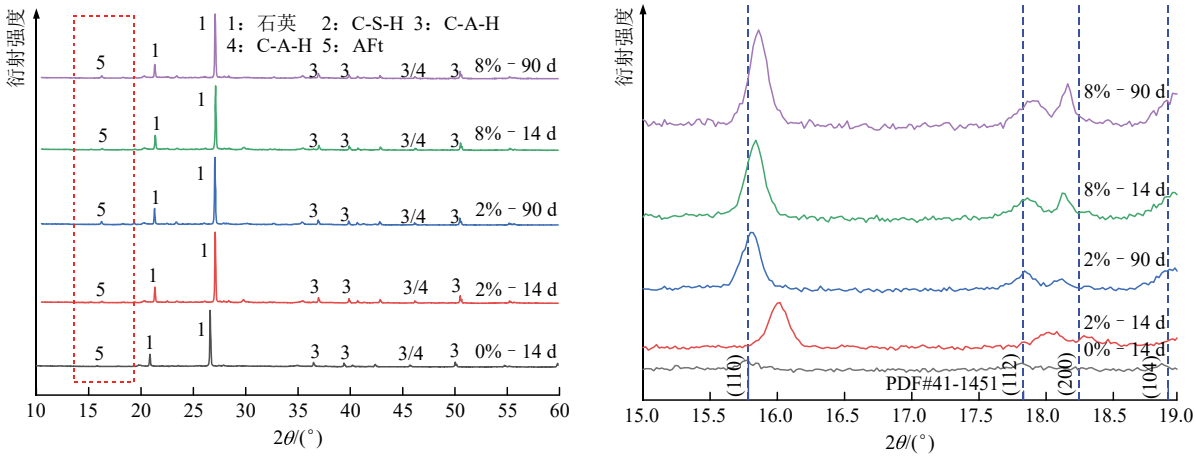


图 8　蒙脱石溶解致结构坍塌过程

Fig.8　Schematic diagram of dissolution-induced structural collapse of montmorillonite



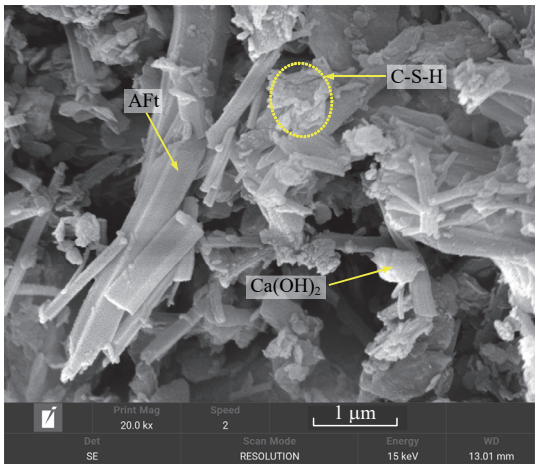
(a) XRD 全图谱　　(b) XRD 局部放大图谱

(a) The XRD pattern in the range　　(b) The XRD pattern in the range

图 9　不同膨润土掺量和养护龄期固化淤泥试样的 XRD 谱线

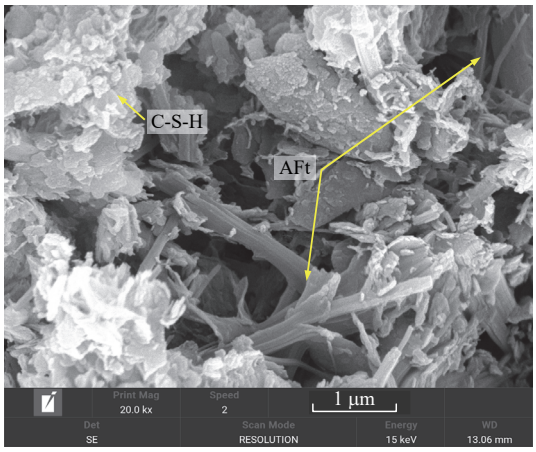
Fig.9　XRD pattern of the solidified sludge with different bentonite content and curing age

膨润土掺量 2%，8%、养护龄期 14，90 d 的固化淤泥试样微观形貌，如图 10 所示。淤泥固化体中存在大量 AFt，C-A/S-H，这些水化产物增强了颗粒界面接触摩擦力，将内部颗粒串联成紧密的整体[12, 23]。



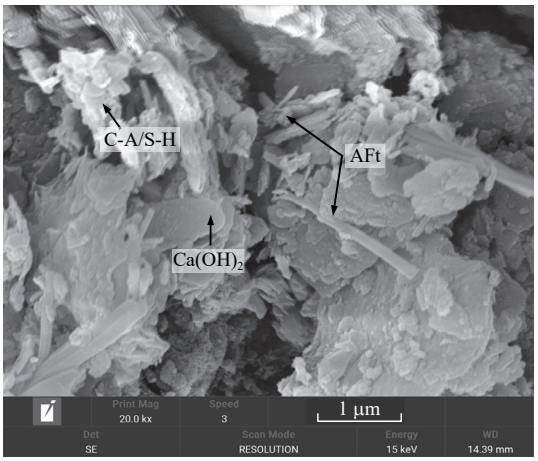
(a) *Be* = 8%，养护 14 d 的 SEM 图像

(a) The SEM image with *Be* = 8%，cured for 14 days



(b) *Be* = 8%，养护 90 d 的 SEM 图像

(b) The SEM image with *Be* = 8%，cured for 90 days



(c) *Be* = 2%，养护 90 d 的 SEM 图像

(c) The SEM image with *Be* = 2%，cured for 90 days

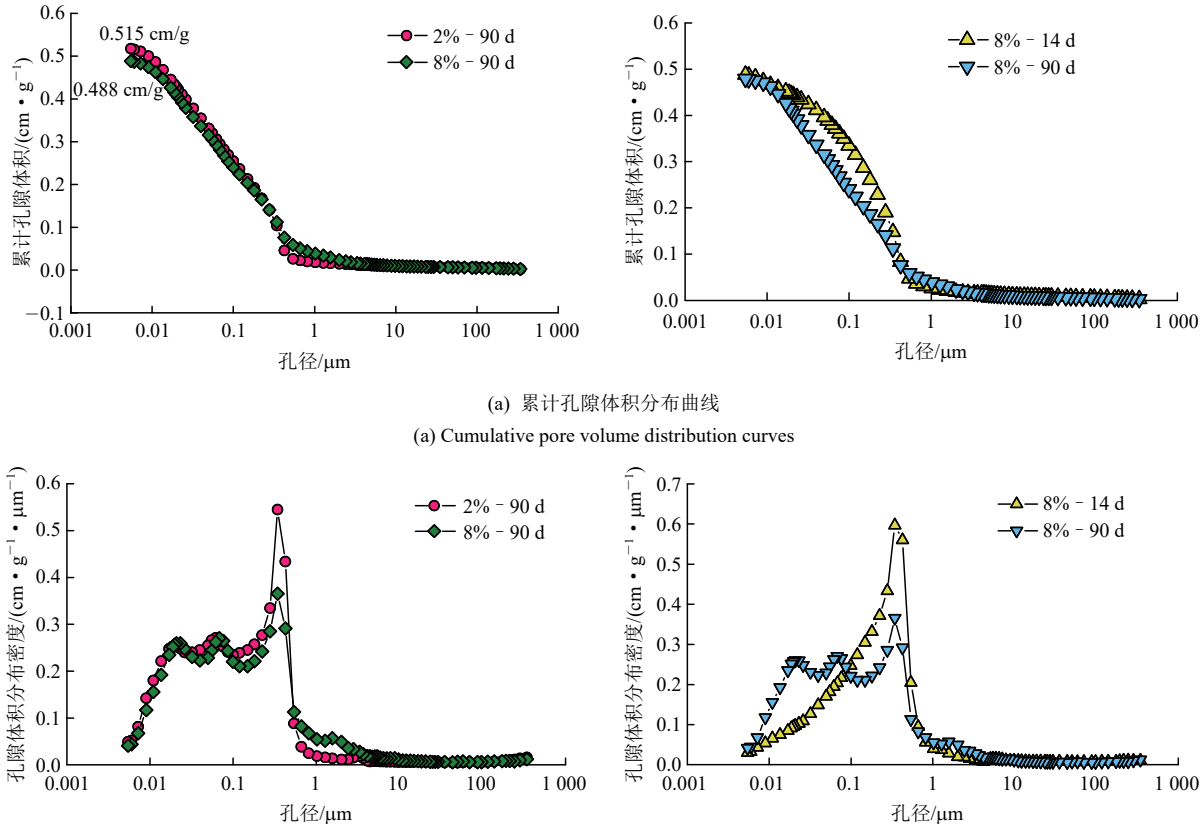
图 10　不同膨润土掺量和不同养护龄期下固化淤泥 SEM 图像

Fig.10　SEM images of solidified sludge under different bentonite dosages and curing ages

相同掺量下，随养护龄期增加，土颗粒与水化产物交错，较多的针棒状 AFt 相互搭接，其上交织附着 C-S-H，C-A/S-H 等胶结物及片状的 $Ca(OH)_2$，形成了致密的网状结构覆盖于土颗粒表面，有效填充了孔隙并增强了界面间的结合[7]，从而使固化淤泥内部结构更加密实。

4.3　膨润土的填充性能

固化淤泥的孔隙分布特征如图 11 所示。膨润土 8%掺量固化试样，随着养护龄期增加，累计孔隙体积从 0.488 mL/g 降低至 0.478 mL/g。此外，相同龄期(90 d)时，增加膨润土掺量后，累计孔隙体积从 0.517 mL/g 降低至 0.488 mL/g，表明固化体内部孔隙度减小。孔隙分布密度也证明，随掺量和养护龄



(a) 累计孔隙体积分布曲线

(a) Cumulative pore volume distribution curves

(b) 孔隙体积分布密度曲线

(b) Pore volume distribution density curves

图 11　不同膨润土掺量下和养护时间下固化淤泥的孔隙分布特征

Fig.11　The pore distribution characteristics of solidified sludge with different bentonite contents and curing times

期增加，出现峰值左移以及孔隙分布密度降低，均说明固化体中孔隙度降低[30]。整体上看，这与强度的增长规律高度契合。

4.4　膨润土的调控机制

膨润土调控磷石膏基粉粒固化淤泥演化过程如图 12 所示。固化淤泥的微观结构呈现“低孔隙－强胶结”特征，与宏观力学性能变化吻合。膨润土调控磷石膏基粉粒干化－固化淤泥的过程分为 3 个阶段：

(1) 初始阶段(0～7 d)：磷石膏水解释放 Ca^{2+}与 SO_4^{2-}；石灰与水迅速反应生成 $Ca(OH)_2$，显著提升体系的 pH 值，形成强碱性环境。强碱性环境有两大作用：一是促使淤泥中有机质(如腐殖酸)发生皂化反应[31]，降低有机质对胶结物水化反应的抑制作用；二是激发高炉粒化矿渣的玻璃体解离，释放 Na^+，K^+，Ca^{2+}等离子，以及 SO_4^{2-}，AlO_2^- 组分，为形成 C-A/S-H，AFt 等胶结物提供基础。

(2) 中期阶段(8～28 d)：膨润土中蒙脱石发生阳离子交换，促进 Si^{4+}和 Al^{3+}溶出，且 Al^{3+}进一步发生水合反应，形成 6 配位的 $Al(OH)_6^{3-}$ 和 4 配位的 $Al(OH)^{4-}$。体系中的硅酸盐则与 $Al(OH)^{4-}$通过聚合反应形成 C-A/S-H 胶结物；同时，部分 $Al(OH)_6^{3-}$ 与 Ca^{2+}和 SO_4^{2-} 则发生水化反应生成 AFt[18]。在此基础上与仍在持续中的火山灰反应相配合，填充孔隙并增强颗粒间胶结。

(3) 长期阶段(28 d～)：水化产物持续生成并致密化淤泥固化体，形成“低孔隙－强胶结”的微观结构，宏观表现为强度持续增长。

5　经济成本比较

根据高炉粒化矿渣和生石灰、铝酸三钙和膨润土的价格或磷石膏的补贴(见表 1)，计算膨润土与铝酸三钙调控固化淤泥的成本。

选择用综合成本指数(P)评价经济效益[32]。本论文中铝酸三钙调控的试样平均质量 104.63 g，依据质量比(淤泥:磷石膏基粉粒:铝酸三钙 ＝100:20:5)计算各组份质量，分别为 83.7，16.74，4.19 g。膨润土调控的试样平均质量 102.37 g，根据质量比(淤泥:磷石膏基粉粒:膨润土 ＝100:20:8)计算，各组份质量分别为 79.98，16.0，6.4 g。

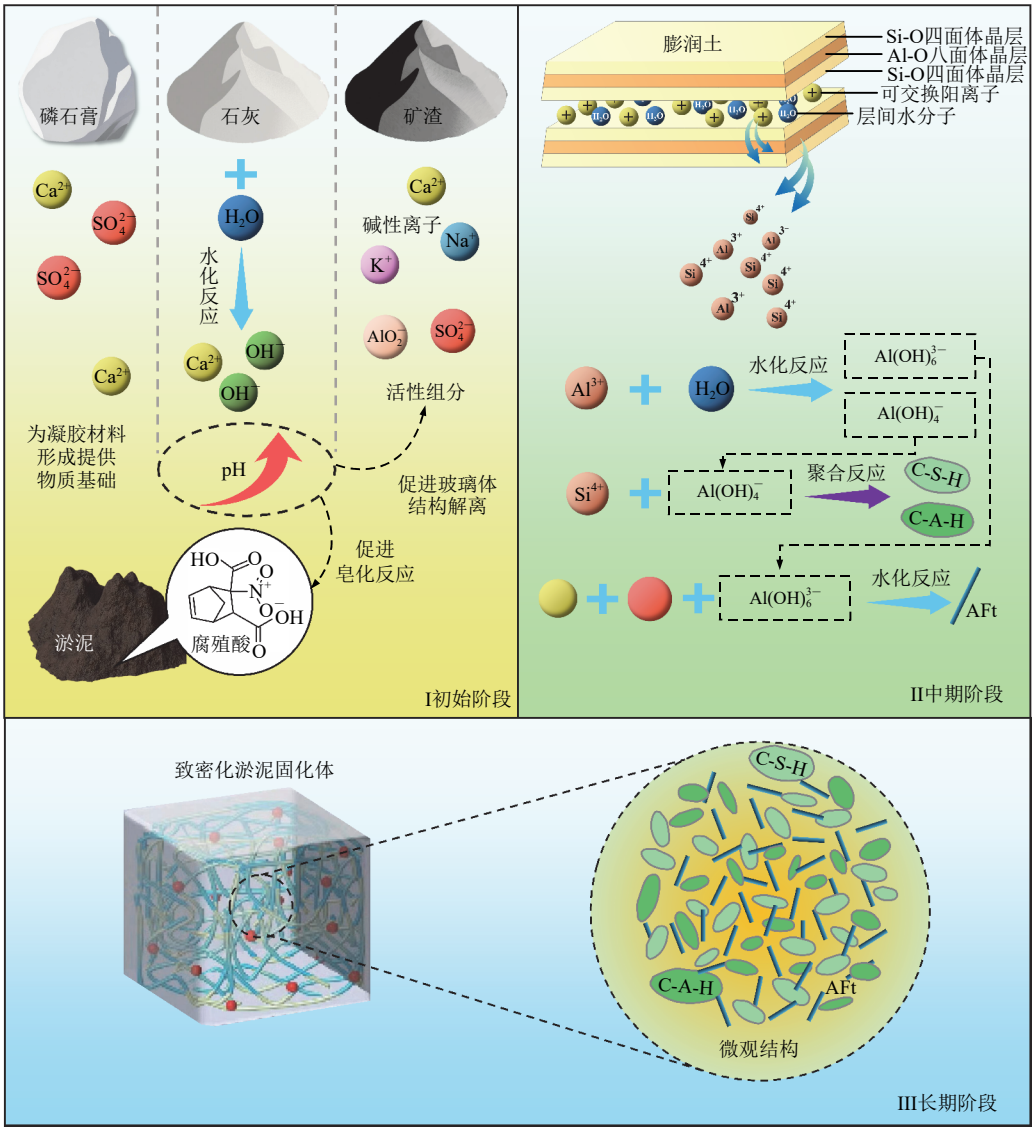


图 12　膨润土的调控机制

Fig.12　The regulated mechanism of bentonite

表 1　材料成本

Table 1　The cost of materials

序号(No.)	材料类型 (type of materials)	成本(cost)/ (元 • t^{-1})	补贴(subsidy)/ (元 • t^{-1})
1	生石灰	400	–
2	高炉粒化矿渣	200	–
3	磷石膏	–	50
4	铝酸三钙	22 000	–
5	钠基膨润土	360	–
6	磷石膏基粉粒	160	–

表 2　固化淤泥试样成本与成本指数

Table 2　Cost and cost index of solidified silt samples

试样类型 (type of sample)	成本(cost)/ (元 • t^{-1})	养护 28 d 强度 (strength after curing 28 d)/MPa	综合成本指数 (comprehensive cost index)/ (元 • MPa^{-1})
铝酸三钙组	0.094 9	2.47	0.038 4
膨润土组	0.004 9	1.97	0.002 5
膨润土组	0.004 9	1.97	0.002 5

根据表 1 中组分价格，铝酸三钙或膨润土调控试样的成本指数如表 2 所示。

膨润土调控的综合成本指数仅为铝酸三钙调控的 6.51%。可见，膨润土调控磷石膏基粉固化淤泥的经济效益十分显著。

6　结　论

论文以磷石膏基粉粒作为固化淤泥的固化剂，膨润土为供“Al”的调控剂，采用宏观性能测试分析固化淤泥的水－力性能，微观表征技术揭示固化淤泥的微观特征，阐明 AFt 在固化淤泥中独特的“转水”、“膨胀”作用，揭示膨润土调控磷石膏

基粉粒固化淤泥的作用机制。主要结论和建议如下：

(1) 膨润土浸泡于饱和石灰水中，其 Si^{4+}，Al^{3+} 溶出速率表现出先缓慢(0～30 d，累积溶解量为 32.6 mg/L)和后加速(30～180 d，累积溶解量为 112.1 mg/L)的趋势。表明膨润土中蒙脱石溶解具有滞后性，该特性恰好满足固化淤泥后期强度增长需求。

(2) 固化淤泥强度随膨润土掺入量呈现“先抑后扬”变化规律。养护时间达 28 d 后，固化淤泥的强度显著提升，延展性增强；在膨润土掺量 8%条件下，固化淤泥养护 90 d 的强度是 28 d 的 2 倍。证实膨润土促进了固化后期水化胶凝产物的生成。

(3) 微观结构特征表明，掺入膨润土后生成大量水化产物 C-S/A-H 和 AFt；针棒状 AFt 与凝胶态 C-S/A-H 交织填充孔隙，形成了致密网状结构，显著降低了固化体孔隙度。

(4) 膨润土调控固化淤泥后期强度的综合成本指数仅为铝酸三钙的 6.51%，经济效益显著，具有推广应用的市场优势。

综上，膨润土调控磷石膏基粉粒固化淤泥既具有明显的强度效果，又具有良好的经济效益，用于替代硅酸盐水泥，可推动特殊土在路基工程中的应用，同时消纳了工业固废。必须指出的是，尽管本文结合宏、微观技术手段阐明了膨润土作为调控剂协同磷石膏固化淤泥的作用效果与机制，但固化剂、淤泥成分复杂，还需对比添加铝酸三钙作为调控剂的固化效果，进一步剥离和量化膨润土在固化淤泥中的贡献和微观机制。同时，笔者团队前期虽验证了磷石膏中可溶性磷和氟的浸出风险，但固化淤泥用于路基工程，在长期的自然环境(冻融、干湿交替变化)中仍存在缓慢浸出风险，还需进一步评估磷石膏固化淤泥的污染物浸出风险，以提升膨润土协同磷石膏基粉粒固化淤泥的应用范围。

参考文献(References)：

[1] 钟石明，李栋伟，王红旗，等. 固化淤泥土的力学特性试验研究[J]. 科学技术与工程，2023，23(16)：7 016－7 024.(ZHONG Shiming，LI Dongwei，WANG Hongqi，et al. Experimental research on the mechanical properties of solidified silt[J]. Science Technology and Engineering，2023，23(16)：7 016－7 024.(in Chinese))

[2] 程冠军，程　钰. 污泥填筑路基的路用性能初步研究[J]. 工程建设与设计，2020，19(3)：155－157.(CHENG Guanjun，CHENG Yu. Preliminary study on road performance of sludge filled subgrade[J]. Construction and Design for Project，2020，19(3)：155－157.(in Chinese))

[3] 张春雷，汪顺才，朱　伟，等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. 岩土力学，2008，29(增 1)：567－570.(ZHANG Chunlei，WANG Shuncai，ZHU Wei，et al. Influence of initial water content on cement solidification effect of dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics，2008，29(Supp.1)：567－570.(in Chinese))

[4] WEI M，YANG Y，XIONG L，et al. Cement-SG curing agent for solidification of mucky soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2023，82(6)：1－19.

[5] 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))

[6] PU S，ZHU Z，SONG W，et al. Mechanical and microscopic properties of cement stabilized silt[J]. KSCE Journal of Civil Engineering，2020，24(8)：2 333－2 344.

[7] HUA S，WANG K，YAO X，et al. Effects of fibers on mechanical properties and freeze-thaw resistance of phosphogypsum-slag based cementitious materials[J]. Construction and Building Materials，2016，121：290－299.

[8] CONTESSJ S，DALCONI M C，CALGARO L C，et al. Cement-stabilized contaminated soil：understanding Pb Retention with XANES and raman spectroscopy[J]. The Science of the Total Environment，2021，752：141 826－141 837.

[9] LI J C，CHANG J，WANG T，et al. Effects of phosphogypsum on hydration properties and strength of calcium aluminate cement[J]. Construction and Building Materials，2022，347：128 398－128 406.

[10] 林宗寿，刘丽娟，章　健. 过硫磷石膏磷渣水泥的开发研究[J]. 武汉理工大学学报，2020，42(3)：17－22.(LIN Zongshou，LIU Lijuan，ZHANG Jian. Studies in excess-sulfate phosphogypsum-slag cement[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2020，42(3)：17－22.(in Chinese))

[11] 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，2020，243：118 226.

[12] 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理[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))

[13] 石修松，杨　健，万　星，等. 非均质固化渣土的压缩特性与微观结构分析[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2024，54(5)：1 170－1 181.(SHI Xiusong，YANG Jian，WANG Xing，et al. Analysis on compression characteristics and microscopic structure of heterogeneously stabilized lumpy soils[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition)，2024，54(5)：1 170－1 181.(in Chinese))

[14] 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理[J]. 岩土工程学报，2025，https：//link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250418.1435.002 (DING Jianwen，WANG 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，2025，https：//link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250418.1435.002.(in Chinese))

[15] 王文翀，黄英豪，王　硕，等. 减水剂对流态固化淤泥流动性的影响试验研究[J]. 岩土工程学报，2024，46(8)：1 605－1 612.(WANG Wenchong，HUANG Yinghao，WANG Shuo，et al. Experimental study on influence of plasticizer on fluidity of convection solidified silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2024，46(8)：1 605－1 612.(in Chinese))

[16] 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))

[17] 黄英豪，毛帅东，章明智，等. 不同工业废渣－水泥协同固化淤泥力学强度与微观机理[J]. 材料导报，2025，https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20250722.1040.010.(HUANG Yinghao，MAO Shuaidong，ZHANG Mingzhi，et al. Mechanical strength and microscopic mechanism of different industrial waste-cement co-curing sludges[J]. Materials Review，2025，https：// link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20250722.1040.010.(in Chinese))

[18] HONORIO T. Thermal conductivity，heat capacity and thermal expansion of ettringite and metaettringit: effects of the relative humidity and temperature[J]. Cement and Concrete Research，2022，159：106 865－106 979.

[19] 陈友伦. 磷石膏轻集料混凝土界面胶结性能研究[硕士学位论文][D]. 宜昌：三峡大学，2023.(CHEN Youlun. Study on interface cementation performance of phosphogypsum lightweight aggregate concrete[M. S. Thesis][D]. Yichang：China Three Gorges University，2023.(in Chinese))

[20] EVA S，LENKA K，JOZEF K，et al. Structural and spectroscopic characterization of ettringite mineral-combined DFT and experimental study[J]. Journal of Molecular Structure，2015，1100：215－224.

[21] CHIPERA S J. Baseline studies of the clay minerals society source clays：powder X-ray diffraction analyses[J]. Clays and Clay Minerals，2001，49(5)：398－409.

[22] GRIM R E. Applied clay mineralogy[M]. New York：McGraw-Hill，1962：7－31.

[23] 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))

[24] 刘崇熙. 钙矾石脱水过程中晶体结构的演变[J]. 长江科学院院报，1989，6(3)：60－67.(LIU Chongxi. The evolution of the crystal of ettringite during dehydration[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute，1989，6(3)：60－67.(in Chinese))

[25] MICHEL F M，BARRON V，TORRENT J，et al. Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links among structure，composition，and magnetism[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences，2010，107(7)：2 787－2 792.

[26] 中华人民共和国行业标准编写组. CJJ/T 286—2018 土壤固化剂应用技术标准[S] 北京：中国建筑工业出版社，2018.(The Professional Standards Compilation Group of People′s Republic of China. CJJ/T 286—2018 Standard for application of soil stabilizer[S]. Beijing：China Architecture and Building Press，2018.(in Chinese))

[27] MASCARIN L，VALENTINI L，ARTIOLI G，et al. Dissolution-precipitation kinetics during c_3s hydration：A holographic interferometry study[J]. Cement Concrete Research，2023，173：107 252－107 261.

[28] YOKOYAMA S，KURODA M，SATO T，Atomic force microscopy study of montmorillonite dissolution under highly alkaline conditions[J]. Clays and Clay Minerals，2005，53(2)：147－154.

[29] AHMD S，BARBHUIYA S A，ELAHI A，et al. Effect of pakistani bentonite on properties of mortar and concrete[J]. Clay Minerals，2011，46(1)：85－92.

[30] LI J Z，LIN H J，LIU J K，et al. Macro-micro characteristics of geopolymer-stabilized saline soil in seasonal frozen soil region[J]. Case Studies in Construction Materials，2023，19：2 496－2 511.

[31] BU H，YUAN P，LIU H，et al. Effects of complexation between organic matter (OM) and clay mineral on OM pyrolysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2017，212：1－15.

[32] ZHANG J，ZHANG J，WU C，et al. Comprehensive quantitative evaluation of the future mining：a comparison of socio-economic benefits and eco-environmental impacts[J]. Ore Geology Reviews，2023，162：105 727－105 735.