

地聚合物固化淤泥质土：从微观机理到宏观性能

吴 昊¹, 张泽鹏¹, 宋卫民¹, 张 德², 程志强², 满 立³, 斯碧峰³, 张甲峰⁴

(1. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075; 2. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433;

3. 上海机场(集团)有限公司, 上海 200335; 4. 上海民航新时代机场设计研究院有限公司, 上海 200335)

摘 要: 淤泥质土广泛分布于中国沿海及内河流域, 其高含水率、低渗透性及弱结构性等不良工程特性, 已严重制约了基础设施建设的可持续发展。针对这一挑战, 通过土壤固化技术实现淤泥质土的资源化利用, 被视为潜在解决方案。然而, 传统无机固化剂(如水泥、石灰)在应用中存在高碳排放、能耗大以及有限的工业固废消纳能力等突出弊端, 已难以满足中国“双碳”目标下的绿色转型与可持续发展需求。在此背景下, 地聚合物作为一种富含硅铝酸盐工业固废(如矿渣、粉煤灰等)为前驱体, 在碱激发作用下形成的新型绿色胶凝材料, 凭借其近零碳排放、高反应活性以及显著的固废资源化特性, 为淤泥质土的高效利用与工业固废的协同处置提供了极具潜力的可持续发展解决方案。本文从多尺度视角出发, 系统性地综述了地聚合物固化淤泥质土的固化机理、宏观性能及其关键科学问题的研究进展。首先, 分析了中国不同地区淤泥质土的工程特性, 并从微观层面阐明了地聚合物的形成原理及其固化淤泥质土的微观机理; 随后, 探讨了地聚合物固化淤泥质土的宏观力学性能、耐久性能及其影响因素。本文旨在为开发高性能地聚合物基淤泥质土固化剂、提出高效的淤泥质土处置策略提供理论依据, 为推动淤泥质土的资源化利用与工业固废的协同处理提供实践参考。

关键词: 淤泥质土; 工业固废; 地聚合物; 机理; 性能

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)05-1699-26

网络出版时间: 2025-09-26



在中国沿海地区及众多江、河、湖泊地带, 淤泥质软土分布广泛。随着地下空间开发及基础设施建设的不断推进, 淤泥质土的体量持续攀升, 堆积问题愈发严峻。国务院办公厅于 2019 年推出了《“无废城市”建设试点工作方案》, 明确了将工程渣土和废弃淤泥列为重点处理对象, 旨在提升淤泥质土的高值化利用率^[1]。然而, 当前中国对淤泥质土的处理方式主要为海上倾倒、陆地吹填等, 这难免会造成地质灾害风险增加、生态环境污染、运输成本高昂等一系列问题^[2-4]。

为解决这些挑战, 各国学者正积极开发淤泥质土的高值化利用方法, 其中通过土壤固化将其应用于工程建设中成为最为有效的方法之一。土体固化法是将固化剂与待处理土体强制搅拌形成整体, 并利用物理-化学作用提升土体的微观和宏观性能^[5-6]。这种方法具有经济高效、效果优异等优点, 能有效实现

淤泥质土的资源化利用, 减少废料堆积。当前, 水泥基土壤固化剂在工程建设中扮演着举足轻重的角色。然而, 这一传统材料在生产过程中会产生巨大的能耗并且易对环境产生诸多不利影响, 尤其是温室气体的大量排放, 不符合低碳环保的可持续发展理念, 已成为制约其发展不容忽视的问题。据统计, 每生产 1 t 波特兰水泥便会释放约 1 t 的 CO₂, 全球每年水泥生产产生的温室气体排放量约 135 亿 t, 占全球每年建筑业温室气体排放总量的 7% 左右^[7-8], 且预计在未来 30 年内, 水泥的产量还会增加 4 倍^[9], 这将进一步加剧温室效应, 带来巨大的环境风险。此外, 水泥基材料在土壤固化中的应用也存在诸多问题。单掺水泥的固化土存在干缩较大、易开裂、耐久性差等问题^[10-11], 且水泥在固化淤泥质土的过程中, 土壤内所含有机会释放出腐殖酸破坏水泥的水化产物^[12-13], 最终导致土体固化效果不佳、

收稿日期: 2025-07-18。 修订日期: 2025-08-18。

基金项目: 上海市住房和城乡建设管理委员会科研项目(沪建科 2023-002-006)。

第一作者: 吴 昊(1980—), 男, 博士, 教授。

通信作者: 张 德(1990—), 男, 博士, 总工程师。

Received date: 2025-07-18. Revised date: 2025-08-18.

First author: WU Hao (1980—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: haoutk@csu.edu.cn

Correspondent author: ZHANG De (1990—), male, Ph.D., Chief Engineer.

E-mail: dez2021@163.com

稳定性较差。鉴于此,探索并开发一种绿色低碳、性能优异的胶凝材料以替代水泥基材料作为淤泥质土固化剂显得尤为迫切。这一研究方向不仅有助于减轻水泥生产过程中的环境负担,还可以为土壤固化技术提供更为环保、高效的新途径。近年来,地聚合物材料作为土壤固化剂的应用研究受到学者们的广泛关注,这主要得益于其作为一种绿色环保胶凝材料的独特优势,与传统的水泥和石灰基土壤固化剂相比,地聚合物具有力学性能优异、耐久性强、固化速度快、适应性强等优点,并且能大幅降低 CO_2 的排放量,减排幅度高达 45%~75%^[14–16]。这些特点使其在土壤改良、固废处理等领域展现出巨大的应用潜力。

地聚合物的概念最早由法国科学家 Davidovits^[17–18]提出,是一种以天然矿物、固废和人工硅铝化合物等为原材料,通过强碱作用和晶格重构等聚合作用所形成的具有三维网状结构的胶凝材料。地聚合物可以通过黏结土颗粒使土体形成更加密实的微观结构,增强土体的稳定性和力学性能。地聚合物的主要原材料为具有潜在活性的 Si–Al 化合物,这些化合物广泛存在于各种工业固废中,包括矿渣、粉煤灰、赤泥、尾矿渣等富含硅铝酸盐的矿物材料。这些固废在碱激发剂(如氢氧化钠、氢氧化钾、水玻璃等)的作用下,能够溶解并释出硅铝组分,进而发生聚合反应,形成类似于水泥的无机胶

凝材料。因此,易于在碱性溶液中溶解且富含 SiO_2 和 Al_2O_3 的火山灰质化合物都可以作为制备地聚合物的潜在前驱体材料。地聚合物的性能特点与其前驱体材料的选择和加工条件密切相关,不同的原材料和制备工艺会导致地聚合物在微观结构、化学成分和物理力学性能上存在显著差异。虽然存在这些差异,但是地聚合物仍表现出一些共同特性,包括高强、低收缩率、耐腐蚀、抗冻融破坏、耐高温等^[19–24]。这主要得益于地聚合物独特的化学键合方式和三维网络结构,使其具有更高的密实度和更稳定的力学状态。另外,制备地聚合物的原料来源广泛,且多为工业固废(表 1),这使其在工程中的应用具有显著的环保优势。2021 年,中国国家发展和改革委员会与多部门联合颁布了《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》^[25],旨在进一步提升大宗固废的综合利用水平,推进工业固体废弃物绿色、高效、高值化处理的发展目标。尽管碱激发剂在地聚合物制备或应用中过程存有潜在的环境风险(如碱溶液浸出),但通过原料优选(如选用具有碱激发特性的工业固废替代化学碱溶液)、工艺优化(如采用低浓度碱激发剂)等措施,可有效控制危害,其环境代价远低于全生命周期的减碳与固废资源化效益,符合绿色可持续性的发展方向。因此,基于固废协同处理的地聚合物技术,为淤泥质土的处置提供了新思路,为固废的资源化利用与绿色发展提供了新途径。

表 1 典型的可用于制备地聚合物的工业固废

Table 1 Typical industrial solid wastes that can be used to fabricate geopolymer

Name	Source	Basic characteristics
Blast furnace slag (slag)	A molten material formed during the blast furnace ironmaking process, primarily composed of silicates and aluminates	High glassy phase content, optimized calcium-silicon-aluminum ratio, and fine particle morphology; CaO can provide an alkaline environment, accelerate the depolymerization of the silicon-aluminum network, and promote the formation of C-(A)-S-H gel; SiO_2 and Al_2O_3 can form the [Si-O-Al] network backbone of geopolymers; Al_2O_3 acts as a network former, enhancing structural stability, but excessive content may delay the reaction; MgO can partially replace CaO, stabilizing the glassy phase structure, but crystalline MgO may cause expansion; Using slag alone may generate excessive C-S-H phases due to its high calcium content, reducing the proportion of characteristic geopolymeric structures
Fly ash	Fine ash collected from the flue gas of coal-fired power plants or industrial coal-fired boilers during combustion	Rich in reactive SiO_2 and Al_2O_3 (typically 60%–85% by mass fraction); the glassy phase is easily dissolved in an alkaline environment, providing the necessary silicon and aluminum monomers to form the $[\text{SiO}_4]^{4-}/[\text{AlO}_4]^{5-}$ network skeleton of geopolymers; Low-calcium fly ash (Class F) reacts slowly and requires strong alkali activation; High-calcium fly ash (Class C) has higher CaO content, which can accelerate the reaction but may lead to the coexistence of C-S-H gel and geopolymers; Unreacted fly ash particles can fill pores, improving the fluidity and compactness of the matrix
Desulfurization gypsum	A by-product of flue gas desulfurization (limestone-gypsum wet desulfurization process) in coal-fired power plants	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ content >90%, contains minor impurities; partially dissolves in alkaline environments to form ettringite (Aft), contributing to early strength. However, it cannot be used alone as a precursor and must be combined with slag, fly ash, etc. It can act as a micro-aggregate to fill geopolymer pores, enhancing density and reducing shrinkage. It can adjust reaction time to improve the workability of geopolymers. Excessive SO_4^{2-} inhibits the polycondensation of aluminosilicates, resulting in an incomplete geopolymer network structure and reduced durability

(Continued Table 1)

Name	Source	Basic characteristics
Coal gangue	Solid wastes generated during coal mining and washing processes	Mainly composed of silicate minerals, rich in SiO_2 and Al_2O_3 , with small amounts of Fe_2O_3 , CaO , K_2O , etc.; natural coal gangue has low reactivity, but its performance can be significantly improved by combining it with high-calcium materials; As a geopolymer precursor, it requires activation pretreatment (calcination + grinding); After calcination, it transforms into highly reactive amorphous metakaolin or similar active phases
Tailings slag	Waste materials that remain after the valuable minerals are extracted from mined ore during the mining process, containing ore slurry and dry sand	As a geopolymer precursor, it offers advantages such as abundant resources and low cost, but its applicability highly depends on the type and composition of the tailings; Some minerals in tailings slag (e.g., clay minerals, amorphous substances) possess certain potential pozzolanic or geopolymeric reactivity; However, activation + combination methods are required to meet geopolymer requirements; Priority should be given to tailings with high silicon and aluminum content ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 > 65\%$ by mass fraction) and low harmful impurities, and their heavy metal leaching behavior must be strictly tested.
Carbide slag	Calcium hydroxide residues from acetylene production	Mainly composed of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, which can serve as an auxiliary alkali activator and calcium source supplement in geopolymers; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ can react with CO_2 in the atmosphere to form CaCO_3 , contributing to the later strength of the material or enabling carbon sequestration; Carbide slag is low-cost, provides relatively mild alkalinity, offers higher operational safety, and poses a lower risk of efflorescence in the later stages; However, it has drawbacks such as low reaction efficiency, narrow optimal dosage, rapid setting, impurity effects, and potential adverse impacts on geopolymer durability due to high calcium content
Red mud	An industrial waste generated during the processing of bauxite into alumina using the Bayer process	High Fe_2O_3 content, low reactive SiO_2 and Al_2O_3 content, and contains a large amount of inert impurities; It can be combined with highly reactive materials to form a silico-aluminous precursor; Red mud primarily serves as a filler, provides some reactive components, and reduces costs; The high alkali content ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$) in red mud can reduce the dosage of external activators; It may contain trace amounts of natural radioactive elements, requiring evaluation of long-term stability and leaching risks in geopolymer solidified bodies to ensure environmental safety

近年来, 已有学者对地聚合物固化淤泥质土展开了一些研究工作, 取得了一定的研究成果。然而, 系统综述与分析全球相关研究, 尤其是聚焦于地聚合物固化淤泥质土微观机理与宏观性能的研究成果相对较少。鉴于此, 本文将系统总结相关研究成果, 基于淤泥质土的工程特性, 在微

观层面阐明地聚合物的形成机制及其固化淤泥质土的微观机理, 在宏观层面探究地聚合物固化淤泥质土的关键力学性能、耐久性能及其影响因素, 为高性能地聚合物基土壤固化剂的开发, 以及地聚合物固化淤泥质土的工程应用提供参考。图 1 为本文技术路线图。

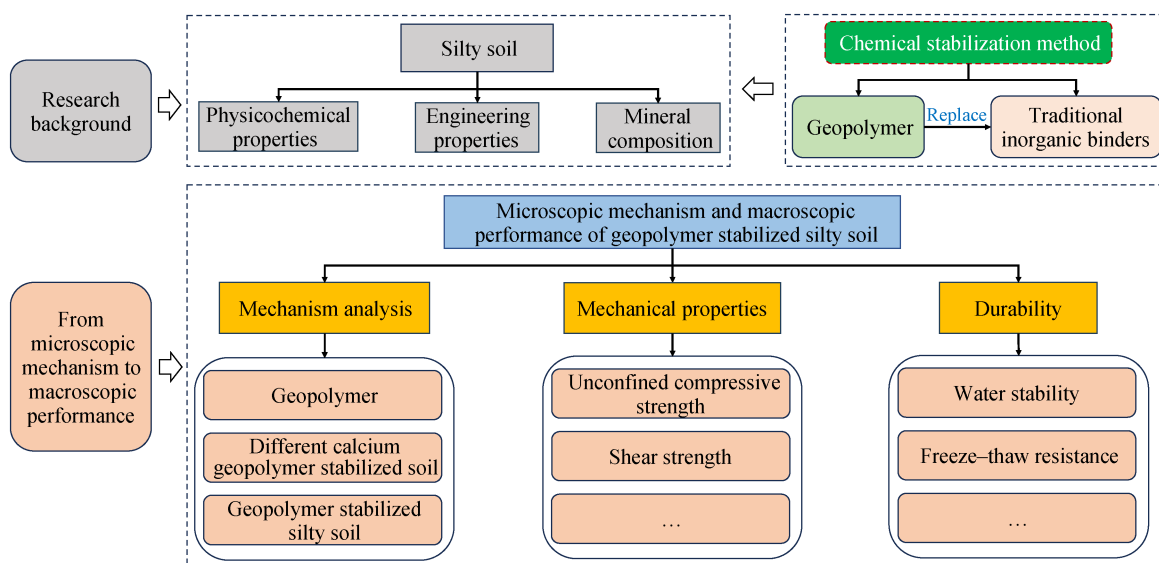


图 1 技术路线

Fig. 1 Protocol of the study

1 淤泥质土的物化性质及工程特性

中国地域辽阔，地质条件复杂，淤泥质土的性质呈现一定的区域差异(表 2)，但同时也具有一定的共性^[2, 26–27]。1) 高含水率和高孔隙比：天然含水率通常超过 40%(质量分数)，甚至高达 100%，远高于其液限；孔隙比在 1.0~1.5 之间，导致其高压缩性。2) 富含有机质和黏粒：有机质含量高降低了土体强度，高黏粒含量则会增加其塑性和黏性，导致其工程特性较差。3) 低渗透性和高触变性：细小孔隙和高含水率导致其渗透性差，排水固结缓慢；高触变性使得淤泥质土在受到动载荷扰动时，易发生液化，强度显著劣化。4) 不均匀沉降和低稳定性：淤泥质土在荷载作用下容易产生不均匀沉降和过大沉降，

甚至可能发生塑性变形，稳定性较差。淤泥质土的这些不良特性严重限制了其工程应用。

淤泥质土的矿物成分主要包括石英、高岭石、伊利石、绿泥石和长石等，这些矿物具有强分散性、亲水性和高阳离子交换容量，赋予了其独特的工程特性。表 3 汇总了中国部分地区淤泥质土的化学成分，其中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 是含量最高的氧化物，分别占 50%~70%和 10%~20%(质量分数)，反映了黏土矿物在淤泥质土中的占比很高；其他氧化物，如 Fe₂O₃，含量相对较少，通常占比低于 10%。

为了改善淤泥质土的工程性质，使其能够满足工程要求，学者们开展了大量的研究工作。目前，淤泥质土的主要处理方法和技术措施如表 4 所示。

表 2 中国部分地区淤泥质土的物理指标
Table 2 Physical indicators of silty soil in some regions of China

References	District	Water content/%	Plastic limit/%	Liquid limit/%	Plasticity index	Specific gravity	Void ratio
[28]	Shanghai	51.8	22.4	44.17	21.77	2.74	
[29]	Hefei	39.8	22.25	38.47	16.22	2.71	1.14
[30]	Panjin	40.2	22.1	36.5	14.4	2.69	
[31]	Qingdao Economic Zone	41.1	15.5	32.1	16.6	2.74	1.14
[32]	Nanjing	41.3	22.8	38.0	14.8	2.72	1.20
[33]	Taicang	43.3	24.1	40.7	16.6	2.73	1.20
[34]	Dongting Lake, Hunan	44.5	22.3	43.6	21.3	2.71	1.49
[35]	Haikou	49.6	24.3	44.9	20.6	2.70	
[36]	Guangzhou	50.2	27.1	42.6	15.4		1.35
[37]	Taizhou	54.0	23.6	45.8	22.2	2.75	1.43
[38]	Jiaozhou Bay, Qingdao	55		43		2.71	1.42
[39]	Jingzhou	55.3	29.2	54.2	25.0	2.65	

表 3 中国部分地区淤泥质土的化学成分
Table 3 Chemical constituents of silty soil in some regions of China

References	District	w/%				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
[30]	Panjin	59.51	15.00	6.27	1.19	1.19
[39]	Jingzhou	63.5	23.0	5.7	0.5	1.4
[40]	Taizhou	52.77	18.76	6.27	3.22	5.11
[41]	Nanjing	57.04	18.48	5.34	1.26	1.64
[42]	Suzhou	62.32	14.40	2.94	1.14	1.53
[43]	Hangzhou	72.33	17.16	4.49	1.32	1.21
[44]	Chengdu	46.94	16.66	0.82	2.48	16.01

w is mass fraction.

表 4 淤泥质土的处置方法^[45]
Table 4 Treatment methods of silty soil^[45]

Method	Classification	Primary treatment methods		
Physical methods	Replacement, drainage consolidation, mechanical compaction	Sand cushion method	Vacuum preloading, surcharge preloading	Dynamic compaction, vibroflotation
Chemical stabilization methods	Organic, inorganic, bio-enzyme, composite	Jet grouting method	Deep mixing pile method	Grouting method, mix-in-place grouting method

其中, 化学固化法因其效率高、适应性强、经济性好^[6]等优点而备受关注。然而, 传统无机固化剂在生产施工过程中所面临的高碳排放、高能耗等环境问题始终存在, 不符合低碳环保可持续性的发展理念。碱激发地聚合物固化技术作为一种新型的无机化学固化方法, 以其优异的工程性能和低碳环保的特点, 在淤泥质土改良领域展现出了广阔的应用前景。主要包括^[24, 46-49]: 1) 软基处理: 地聚合物柱、地聚合物墙等加固技术可有效改善软基的承载力, 减少地基沉降; 2) 填海造地: 地聚合物可用于固化海床淤泥, 提高填料的强度和稳定性; 3) 垃圾填埋场封场: 地聚合物可用于制备防渗层, 减少渗滤液的产生; 4) 在道路工程中的应用: 地聚合物可用于道路的快速修复与病害处治, 具有施工速度快、对交通影响小等优点; 5) 尾矿库治理: 地聚合物可用于固化尾矿, 减少重金属污染物的迁移和潜在的安全隐患。

2 地聚合物的形成原理

Davidovits 是最早系统研究地聚合物的学者之一, 其研究明确了地聚合物的概念范围, 阐明了其内部结构特征, 并提出了硅氧键和铝氧键在碱激发剂作用下断裂重组的形成机理^[17-18, 50]。这一经典理论为后续研究奠定了基础。随着研究的深入, 学者们对 Davidovits 提出的机理模型进行了不断拓展与完善^[51-55]。关于地聚合物的形成原理, 当前学术界比较公认的观点是: 地聚合物是一种以硅氧四面体 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 和铝氧四面体 $[\text{AlO}_4]^{4-}$ 为基本结构单元的无机聚合物材料, 这些四面体单元以离子键和共价键为主要连接、范德瓦耳键为补充连接, 形成复杂的硅-氧-铝三维网络状硅铝酸盐聚合物。

地聚合物的形成主要包括 4 个阶段(图 2)。

1) 溶解重构阶段: 在碱性溶液的诱导下, 硅铝酸盐

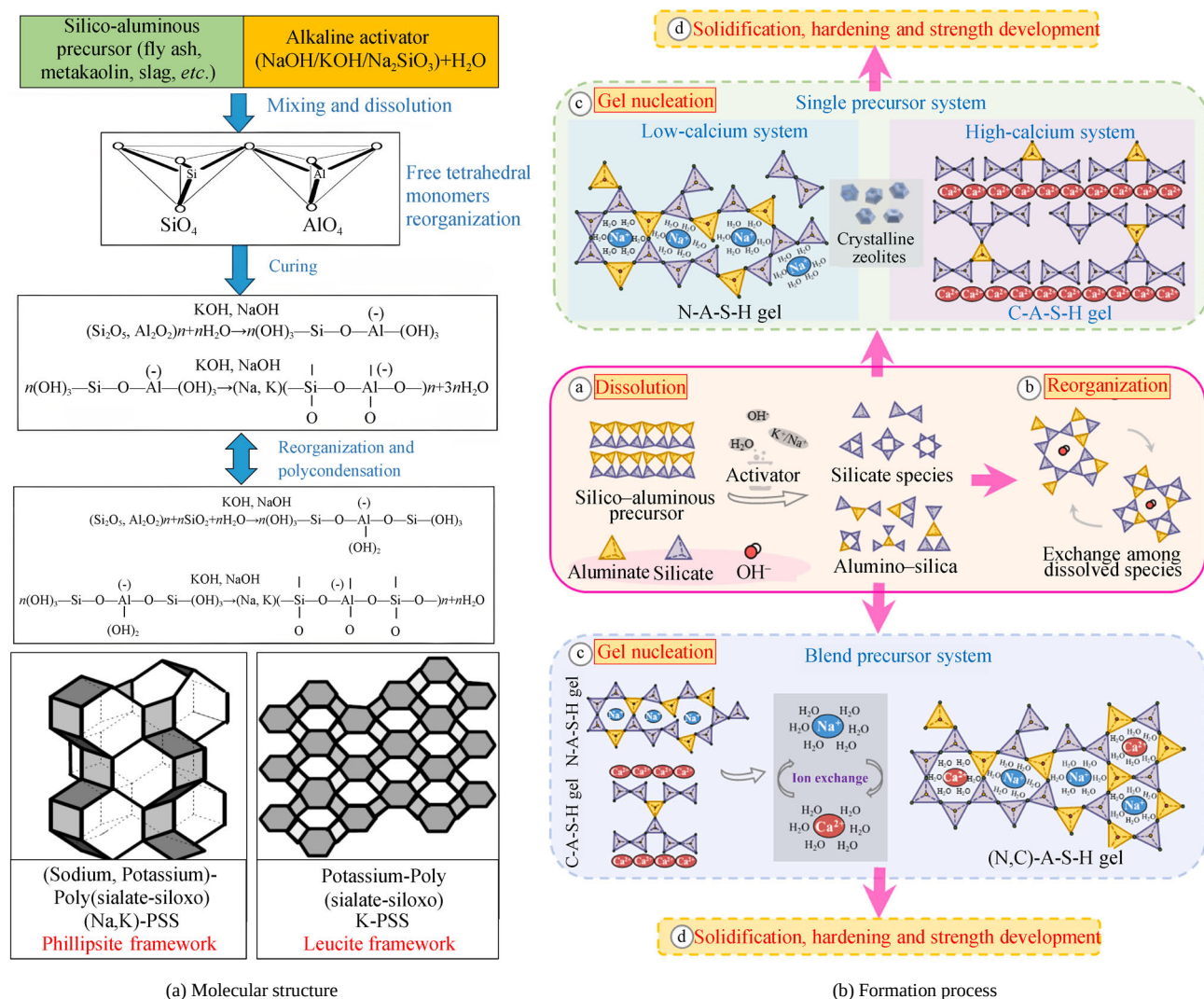


图 2 地聚合物的形成原理示意图^[18, 56-61]

Fig. 2 Schematic diagram of formation principle of geopolymer^[18, 56-61]

原料表面的硅铝物质快速溶解生成反应物前驱体, 即 $[\text{SiO}_4]^{5-}$ 和 $[\text{AlO}_4]^{4-}$ 游离单元, 成为地聚合物形成的初始反应物。2) 分散迁移阶段: 前驱体在溶液中发生扩散和迁移, 并通过共享氧原子逐渐聚集成核, 形成小的无定形凝胶地聚合物颗粒。这些凝胶颗粒在溶液中相互碰撞、凝聚, 形成更大的结构单元。3) 浓缩聚合阶段: 随着反应的进行, 溶液中的水逐渐蒸发或被固相吸收, 导致溶液浓度增大。这促使硅铝物质之间的缩聚反应加速, 形成更长的聚合物链和更大的三维网络结构, 地聚合物强度逐渐增大。4) 水化硬化阶段: 地聚合物在硬化过程中会继续吸收水分, 发生水化反应, 促进地聚合物结构进一步增强。

地聚合物的经验化学式为 $M_n[-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ 。其中, M 为碱金属元素, 如 Na^+ 、 K^+ 等; z 为硅铝摩尔比; n 为聚合度; w 为结合水的数目^[62]。反应体系中硅铝摩尔比($\text{Si} : \text{Al}$)、钠铝摩尔比($\text{Na} : \text{Al}$)、 Ca^{2+} 含量, 以及碱溶液种类和浓度等因素都会对地聚合物性能造成影响。

通过改变反应原料中的 $\text{Si} : \text{Al}$, 可以合成3种不同类型的地聚合物^[63]: 单硅-铝型(PS, $\text{Si} : \text{Al}=1:1$)、双硅-铝型(PSS, $\text{Si} : \text{Al}=2:1$)、三硅-铝型(PSDS, $\text{Si} : \text{Al}=3:1$), 如图3所示。研究表明, 当 $\text{Si} : \text{Al}$ 为3.0~3.8, $\text{Na} : \text{Al}$ 为1.0左右时, 制备的地聚合物通常可以获得较优的力学性能^[64]。例如, 水玻璃($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, n 为水玻璃模数)作为一种常用的地聚合物碱激发剂, 其模数变化将显著影响地聚合物反应体系中的 $\text{Si} : \text{Al}$ 和 $\text{Na} : \text{Al}$ 。当水玻璃模数由3.0降至1.0时, 碱溶液中的pH值增大, 溶液中溶出的低聚硅氧四面体基团不断增多, 使得聚合物强度增大; 而当模数继续下降时, 相对于高聚硅氧四面体基团而言, 虽然低聚硅氧四面体基团的比例会进一步增加, 但溶液中 SiO_2 的绝对含量会逐步降低, 最终导致反应产物数量减少, 地聚合物强度下降^[65]。

图4为通过扫描电子显微镜(SEM)和X射线衍射(XRD)试验获得的不同类型地聚合物微观特征及反应前后的物相变化。分析结果表明, 碱激发后地

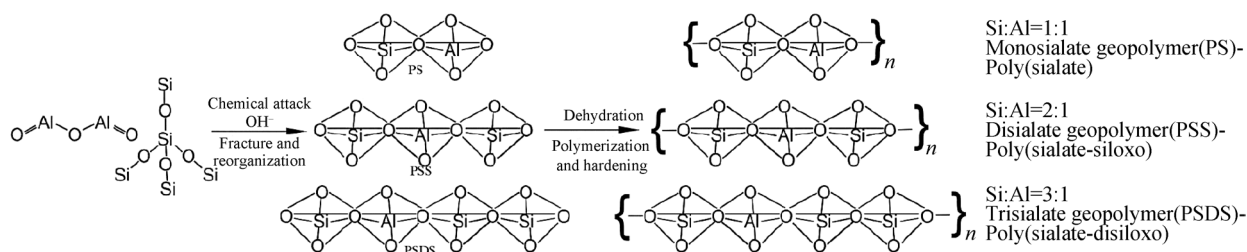


图3 不同 $\text{Si} : \text{Al}$ 地聚合物的形成与分子结构^[24, 63]

Fig. 3 Formation and molecular structures of geopolymer with different $\text{Si} : \text{Al}$ ratios^[24, 63]

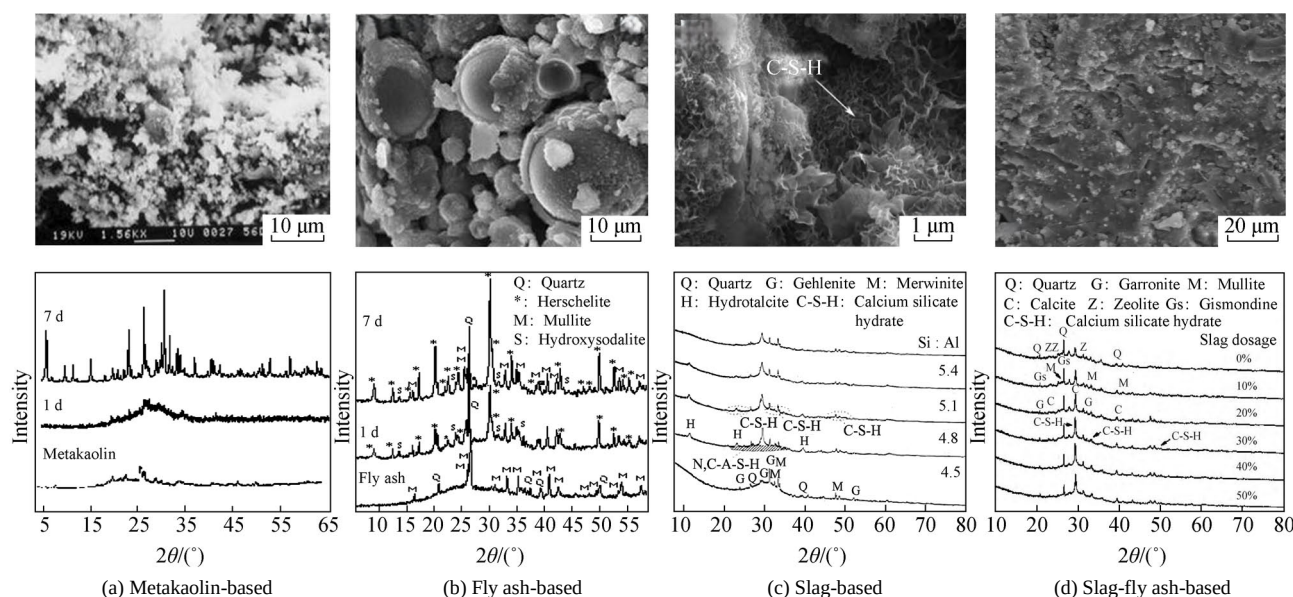


图4 不同类型地聚合物反应前后的SEM照片和XRD谱^[21, 66–67]

Fig. 4 SEM images and XRD spectra of different types of geopolymers before and after reactions^[21, 66–67]

聚合物中仍存在大量石英相, 说明石英在反应过程中具有较强的惰性^[68]; 反应产物中只有少数的硅铝酸盐凝胶相, 而没有明显的新结晶相生成, 表明地聚合物在反应前后物相变化不大。另外, 反应中可以看到具有晶相的沸石生长, 当沸石脱水后, 它可以与地聚合物的无定形相结合在一起^[69-71]。因此, 地聚合物也常被视为一种类沸石前驱体, 其与沸石的不同之处在于它是无定形的, 而沸石在自然界中是以晶态的形式存在的^[72-73]。由于地质聚合反应过程迅速且复杂、反应结晶程度低, 导致其反应机制的研究难度较大。当前研究所提出的反应机制主要包括氢键、静电作用、熵增效应、物理黏附等^[64, 74-79], 尚未形成统一的理论体系, 仍需深入研究。

3 地聚合物固化淤泥质土的反应机制与微观机理

3.1 不同钙系地聚合物固化土的反应机制

在地聚合物固化土的反应体系中, Ca^{2+} 含量的不同对反应过程、最终产物及其性能具有显著影响^[43]。这主要是因为 Ca^{2+} 具有较强的水硬活性, 可迅速地与溶液中的 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 和 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 产生反应, 生成 C-S-H(水化硅酸钙)和 C-A-S-H(水化硅铝酸钙)等凝胶物质。因此, 认识不同钙系地聚合物固化土的反

应机制对提升固化土力学性能与耐久性能具有重要研究价值。Adamiec 等^[80]和 Lothenbach 等^[81]根据铝硅酸盐原料中钙硅摩尔比($\text{Ca} : \text{Si}$)的不同, 将地聚合物划分为高钙、低钙和无钙 3 种体系, 各体系常用原料分别是矿渣、粉煤灰和偏高岭土。在工业固废中, 矿渣和粉煤灰来源广泛, 且两者中硅铝质成分的碱活性相对较高^[82], 因此目前以这两者为基体的地聚合物体现应用较多, 其典型化学成分组成如表 5 所示。

表 5 矿渣、粉煤灰的典型化学组成^[83]
Table 5 Typical chemical composition of slag and fly ash^[83]

Material	Mass fraction/%			
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
Slag	31-38	9-13	38-44	7-12
Fly ash	43-56	20-32	1.5-5.5	0.6-2.0

矿渣具有较高的碱度和较强的活性成分, 且早期活性易于被激发。与粉煤灰基地聚合物固化土不同, 高钙系的矿渣基地聚合物固化土的反应过程更为复杂, 主要包括水化反应、地质聚合反应和离子置换反应。碱激发矿渣的反应过程可分为破坏阶段和缩聚阶段^[84], 反应产物主要是 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶^[85-86]。图 5 展示了矿渣和粉煤灰两种碱激发材料的反应机理, 清晰地揭示了它们在反应过程中的区别与联系。

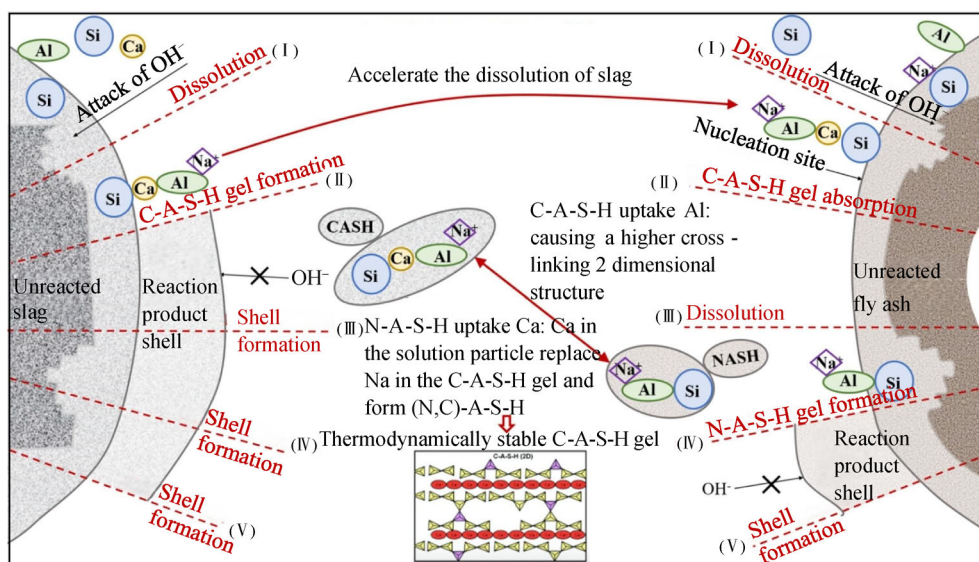


图 5 矿渣基与粉煤灰基地聚合物的反应机制^[87]

Fig. 5 Reaction mechanisms of slag-based and fly ash-based geopolymer^[87]

首先, 在 OH^- 的解离作用下, 矿渣中的 $\text{Si}-\text{O}$ 、 $\text{Al}-\text{O}$ 和 $\text{Ca}-\text{O}$ 键发生断裂, 并释放出 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 、 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 单体和 Ca^{2+} 。由于 $\text{Ca}-\text{O}$ 键的键能较弱,

因此在反应过程中 Ca^{2+} 最先释放, 其次是 $[\text{AlO}_4]^{5-}$, 最后是 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 。离子置换能力的排序为 $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$, 因此迅速生成的 Ca^{2+} 会与黏土

颗粒中的 Na^+ 、 K^+ 发生离子置换反应, 使离子双电层变薄, 土颗粒间黏聚力增强; 部分 Ca^{2+} 会与 OH^- 反应生成难溶的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀, 而大部分 Ca^{2+} 会与 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 之间发生水化反应生成 C-S-H 凝胶。随着反应的进一步进行, 反应体系中的 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 会替代 C-S-H 中桥接位置的 $[\text{SiO}_4]^{4-}$, 生成聚合度更高的 C-A-S-H 凝胶。此外, 在水化反应进行的同时还会发生缓慢的地质聚合反应并生成 N-A-S-H 凝胶, 与 C-(A)-S-H 凝胶的生成形成竞争关系, 通过控制地聚合物中 $\text{Ca}:\text{Si}$ 及 $\text{Na}:\text{Al}$ 可调节 2 种凝胶的比例。在已达到初凝状态的地聚合物中, 主要有 N-A-S-H 凝胶相、C-(A)-S-H 凝胶相和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 3 种反应产物, 若反应体系中存在剩余的 Ca^{2+} , 则会继续置换 N-A-S-H 中的 Na^+ 使其转变为 (N,C)-A-S-H 凝胶^[88]。最终, 多种凝胶物发挥协同固化作用填充淤泥质土孔隙并联合包裹土颗粒形成致密的微观结构, 在宏观上表现为土体整体性显著提升。

粉煤灰与矿渣相似, 同样富含硅、铝活性物质, 但其 Ca^{2+} 含量要明显小于矿渣, 属于典型的低钙地聚合物前驱体。因此, 粉煤灰基地聚合物的强度主要来源于地聚合物反应生成的三维水化硅铝酸钠凝胶(N-A-S-H), 且无论是采用什么类型的碱性激发剂, 碱激发粉煤灰形成的地聚合物胶凝材料均主要通过地质聚合反应生成三维网络结构的 N-A-S-H 凝胶^[89–90]。

综上所述, 矿渣基和粉煤灰基地聚合物固化土在发生聚合反应时存在较大差异, 它们各自在宏观

力学性能上也表现出不同的特点, 碱激发矿渣主要涉及钙的溶解反应及其与硅铝反应形成 C-(A)-S-H 凝胶, 而粉煤灰基地聚合物的强度则主要来源于地聚合物反应生成的三维水化硅铝酸钠凝胶(N-A-S-H); 由于矿渣具有更高的活性, 矿渣基地聚合物固化土通常具有更高的早期强度, 但其后期强度增长缓慢, 而粉煤灰基地聚合物固化土的强度则一直处于缓慢的增长状态。研究表明, 强碱环境对粉煤灰基地聚合物固化土反应具有促进作用, 而弱碱环境则更有利于矿渣基地聚合物固化土^[91]。提高养护温度对矿渣基地聚合物固化土的强度提升显著, 而对粉煤灰基地聚合物固化土则并不明显。此外, 还有一些学者研究了矿渣与粉煤灰的比例对矿渣-粉煤灰基复合地聚合物固化土强度的影响, 所得结论基本相似, 即认为掺少量的粉煤灰有利于固化土强度提升, 但掺量过高会降低其强度, 原因在于过多的粉煤灰被碱激发后反应生成结构十分稳定的硅铝酸盐(N-A-S-H), 较难与矿渣水化产物进一步发生二次水化反应, 从而降低了土颗粒间的黏聚性能和固化产物的稳定性。

3.2 地聚合物固化淤泥质土的微观机理

传统无机固化土主要是通过水泥、石灰等无机固化剂与土壤颗粒发生物理化学反应, 包括水解水化反应、火山灰反应、离子交换作用及碳化反应等, 生成具有胶凝特性的胶凝物质(如 C-S-H 凝胶)或膨胀性物质[如钙矾石(Aft)], 从而提高土体的密实度, 增强土体的强度和稳定性, 其反应过程及原理如图 6 所示。

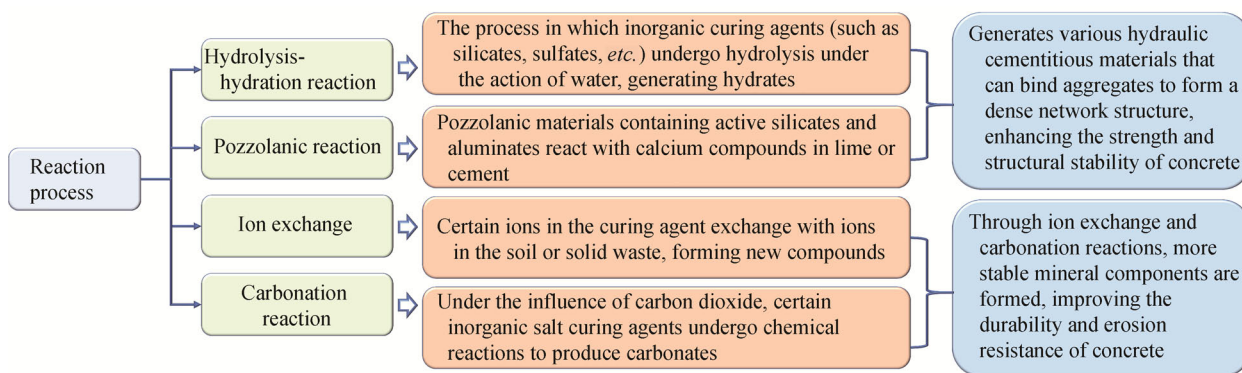


图 6 传统无机固化土反应过程及原理

Fig. 6 Reaction process and principle of traditional inorganic stabilized soil

地聚合物固化土则是利用碱激发剂(如氢氧化钠、水玻璃)与硅铝质原料(如矿渣、粉煤灰、偏高岭土)发生聚合反应, 生成具有三维网状结构的地聚合物凝胶, 以达到稳定土壤的目的。其固化过程以

化学键合为主, 最终形成稳定的硅铝酸盐结构。图 7 展示了地聚合物对淤泥质土的固化过程, 主要是矿渣、粉煤灰等硅铝质地聚合物前驱体以及淤泥质土中的 SiO_2 和 Al_2O_3 在碱激发剂作用下逐渐溶解

并发生结构破坏,随后通过重新聚合生成了大量的絮状凝胶物质,主要包括C-(A)-S-H和N-A-S-H^[92]。这些凝胶物质附着在玻璃体表面,一部分凝结硬化后构成聚合物骨架,另一部分则包裹土颗粒并填充土颗粒间的孔隙,形成团聚体。聚合物骨架承托和黏结土颗粒团聚体构成地聚合物固化土的空间结构

体系,以此提升土体的力学性能^[93-94]。另一方面,土颗粒表面的 Na^+ 、 K^+ 会与地质聚合水化产物中的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等发生等效吸附交换反应,随着吸附和交换持续进行,土颗粒团聚体逐渐增大,进一步增强了土体强度^[95]。这一过程不仅优化了土体的微观结构,还为其提供了更好的稳定性和承载能力。

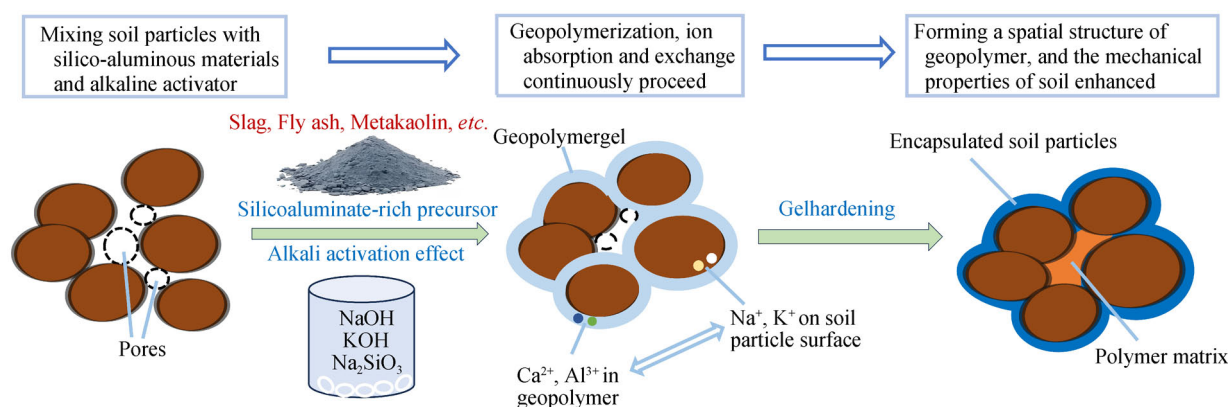


图7 地聚合物对淤泥质土的固化过程^[92]

Fig. 7 Stabilization process of geopolymer stabilized silty soil^[92]

由于淤泥质土富含有机质和可溶性盐以及“三高两低”的工程特性,其固化机理与一般类型土壤有所不同,主要原因在于:1) 高含水率的淤泥质土可以为固化剂的水化反应提供充足的水分,但容易导致固化土早期强度增长缓慢和后期收缩开裂,因此固化剂需要适应高含水量的环境,并能在土颗粒间形成有效的胶结;2) 淤泥质土中含有较多的细颗粒物质和有机质,土体呈弱酸性,水分不易浸润土颗粒表面,这可能会对固化过程产生一定的影响,固化剂需要与这些细颗粒和有机质产生有效反应,才能形成稳定的胶结体;3) 淤泥质土的微观结构较为复杂,含多种矿物和可溶性盐,固化剂需要通过激活土中某些成分(如活性硅铝、氯、硫等),然后反应形成具有胶结性的水化产物^[96]。因此,淤泥质土的固化需充分考虑其土质的特殊性。

值得注意的是,在地聚合物的形成过程中,水扮演着多重关键角色,与无机胶凝材料的水化作用不同,水在地聚合反应中并非反应物,而是作为反应介质、传递载体和工艺调控因素,这一特点正好能与高含水率的淤泥质土相适应。其主要作用包括:1) 促进原料的溶解与活化。水可以用于溶解碱激发剂,达到促进铝硅酸盐原料解聚成活性单体的目的。2) 作为离子迁移介质。溶解后的离子(Na^+ / K^+ 、 OH^- 、 SO_4^{2-})通过水介质扩散至原料颗粒表面,促进溶解反应的进行。3) 作为反应介质。溶解的活性硅铝物

种在水环境中发生缩聚反应,形成三维网络结构。

4) 质子传递体。缩聚反应释放的 H^+ 被水吸收,维持反应体系的电荷平衡。5) 调控流变性与工艺性:水含量直接影响浆体的流动性,使其具备浇筑、成型所需的可操作性。在最终硬化体中,大部分水不进入化学结构,而是作为游离水或结合水存在于土体孔隙中。随着反应进行,部分水会逐渐挥发,其残留量会直接影响材料的密实度。

由于淤泥质土富含的有机质会释放腐殖酸从而抑制水泥的水化反应,使水泥固化土的强度大大降低,因此水泥对淤泥质土的固化效果并不理想^[12-13, 97-101]。采用地聚合物固化淤泥质土时通过加入碱激发剂创造碱性环境,可以使部分有机质发生水解、结构改变等,从而降低其活性,减弱其对固化反应的阻碍作用;强碱性还可以中和有机质所释放的腐殖酸,缓解有机质对水化产物的破坏;地聚合物早期的快速反应,也有助于反应体系迅速形成聚合物网络骨架结构支撑起土壤颗粒,使得一部分有机质被及时地阻隔开而无法形成负面干扰作用,减少了其与未反应原料或反应产物的接触机会。此外,地聚合物对淤泥质土颗粒的界面有着深入的影响,它可以渗透到淤泥质土的强、弱结合水当中,不仅可以起到水泥的填充和包裹的作用,还能与淤泥质土颗粒界面的活性物质发生反应形成无机聚合物凝胶^[94]。此外,通过加入碱激发剂创造碱性环境,可以中和有机质所释放的腐

殖酸, 缓解有机质对水化产物的破坏^[102]。由于淤泥质土富含 SiO_2 和 Al_2O_3 , 其本身也能为地质聚合反应提供大量的硅铝活性物质, 在碱性环境下, 水的介质作用充分激发了淤泥质土中的活性矿物成分及地聚合物硅铝原料的潜在活性组分, 导致 $\text{Si}-\text{O}$ 键和 $\text{Al}-\text{O}$ 键断裂, 重新聚合生成水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶。随后, 土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与碱溶液中的 Na^+ 、 K^+ 等地聚合物阳离子通过平衡电荷产生了离子交换, 生成了大量的硅铝酸盐聚合物凝胶, 用以黏结土颗粒并填充孔隙, 进一步增强了土体的力学性能。

图 8 呈现了一些研究中关于地聚合物固化淤泥质土反应前后的 XRD 试验结果, 可以直观地反映地聚合物对原状淤泥质土的固化效果。通过观察反应前后的 XRD 谱, 可以发现固化土中的晶相组成与原状土基本一致, 表明地聚合物对淤泥质土的固化过程中未生成新的矿物。然而, 从各衍射峰的位置可以看出, 固化土中结晶相的数量有所增加, 与原状土相比, 石英、白云母和高岭石相关的峰值强度降低, 这是由于淤泥质土中的部分活性矿物参与了火山灰反应, 导致土颗粒间的黏聚力增强, 形成的絮凝胶体结构降低了 X 射线的反射强度。此外, 还可以发现淤泥质土固化之后的石英峰特征较为明

显, 表明石英晶体含量较高, 这也进一步说明石英在地质聚合反应过程中的活性很低, 因此固化土试样中残留了大量石英。使用粉煤灰基地聚合物固化淤泥质土时, 石英相的数量更加突出, 这表明粉煤灰晶体结构稳定性较强, 不易被碱激发剂溶蚀, 使得试样中仍然存在未反应的粉煤灰。在 $2\theta < 45^\circ$ 区域出现了无定形的连续弥散峰包, 表明地聚合物水化过程中产生了凝胶状的类沸石前驱体, 这些类沸石前驱体脱水后形成了与土壤颗粒紧密结合的无定形相^[94]。

从图 9 中 SEM 的结果可以观察到淤泥质土固化前后的微观形貌变化。原状土的微观结构多呈鳞片状, 土颗粒间的黏结较为松散、孔隙较多, 颗粒排列杂乱且离散性较大。相比之下, 经地聚合物固化后的土体微观形貌发生了显著变化, 出现了大量絮状凝胶产物, 土体结构特征由松散无序状态转变为紧密胶结与连续状态。随着养护龄期延长, 土颗粒间的孔隙逐渐减小、孔隙分布更加均匀, 土体结构密实度显著提高。同时, 颗粒表面所附着的白色絮状胶结物随着时间的推移逐渐增多, 固化土空间结构愈发致密, 且未观察到有机质分解水化产物的现象, 进一步证实了地聚合物对于原状淤泥质土具备良好的胶结和填充效果。

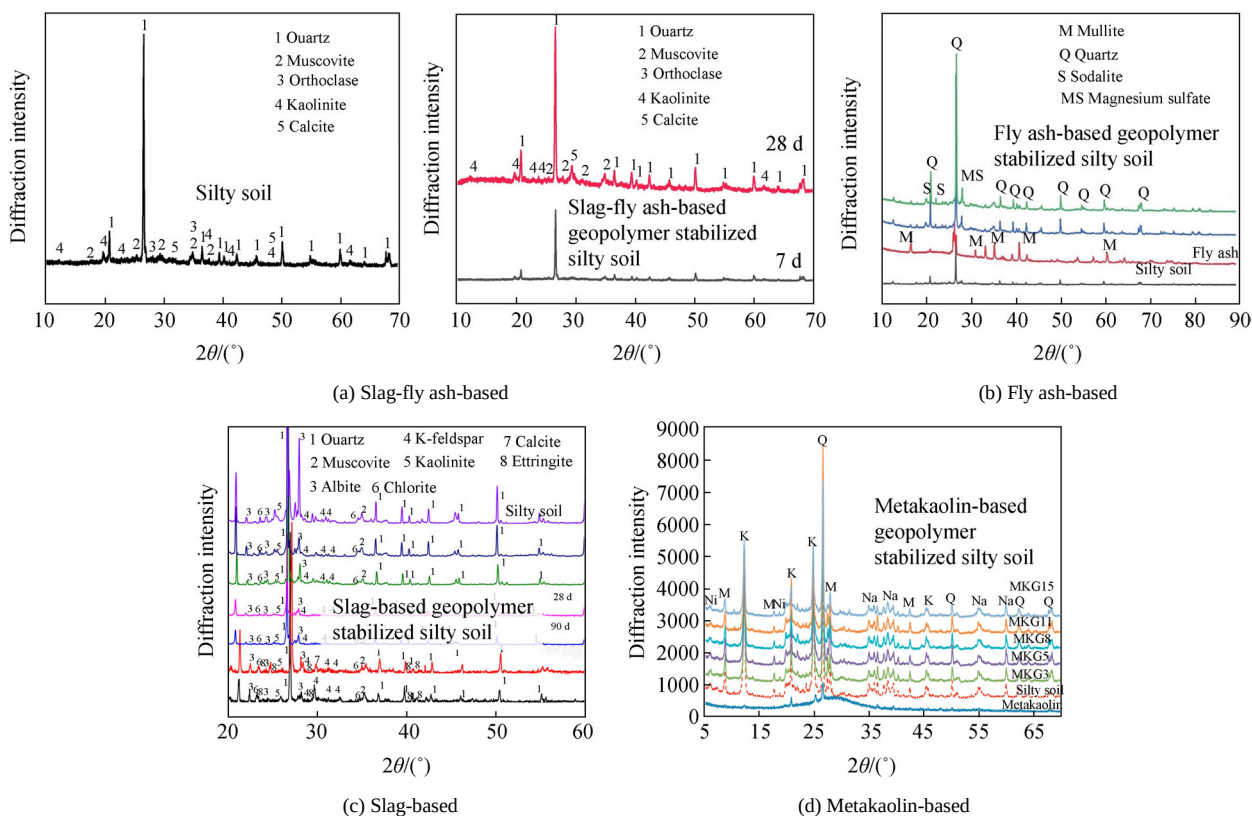


图 8 地聚合物固化淤泥质土前后的 XRD 谱^[22, 43, 103–104]

Fig. 8 XRD patterns of silty soil before and after geopolymer stabilization^[22, 43, 103–104]

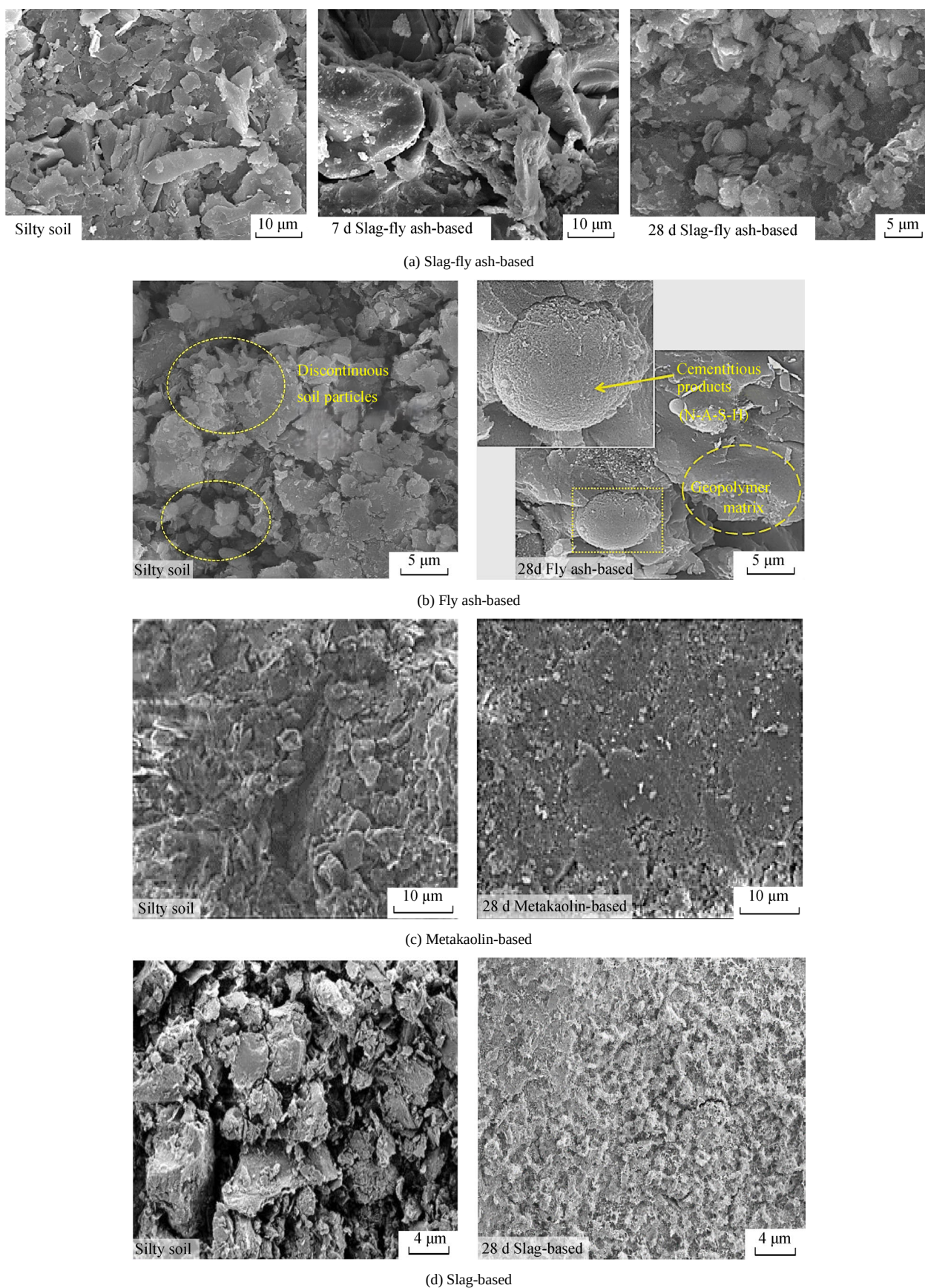
图 9 不同类型地聚合物固化淤泥质土前后的 SEM 照片^[22, 43, 103, 105]Fig. 9 SEM images of silty soil before and after geopolymer stabilization^[22, 43, 103, 105]

图 10 是通过压汞法(MIP)测试得到的淤泥质土和不同龄期地聚合物固化淤泥质土的微观结构特征。可以看出, 淤泥质土中含有直径为 $8\sim 50\ \mu\text{m}$ 的大晶体内孔隙和 $0.2\sim 6.0\ \mu\text{m}$ 直径的小晶体内孔隙, 地聚合物固化淤泥质土可使得土体中大孔体积比例显著降低, 而小孔体积比例有一定程度增加; 在固化早期, 固化土中 $80\sim 200\ \mu\text{m}$ 直径的孔体积表现出先增加后减小的趋势。这可能与早期 CaO 的水化作用有关, 导致固化土中产生了大量气孔。总体而言, 随着固化龄期的增长, 固化土大孔体积比例逐渐降低, 同时伴随小孔体积的持续增加。孔径随固化龄

期的增加而减小, 孔径分布向更小的孔径方向偏移。结合 SEM 试验结果可知, 反应产物随固化龄期逐渐填充固化土中的孔隙, 从而减小了孔径和体积。

另外, 固化土的总孔隙率持续下降, 但在后期固化阶段下降速率减缓。淤泥质土和地聚合物固化土的孔隙连通性随固化龄期的增加呈现先升高后降低的趋势。孔隙率的降低和微观结构的致密化表明, 在固化后期, 地聚合物的反应程度更高, 生成了更多的反应产物填充孔隙, 从而使淤泥质土形成更致密的微观结构。这些变化是固化土在后期固化阶段快速形成坚固结构的主要原因。

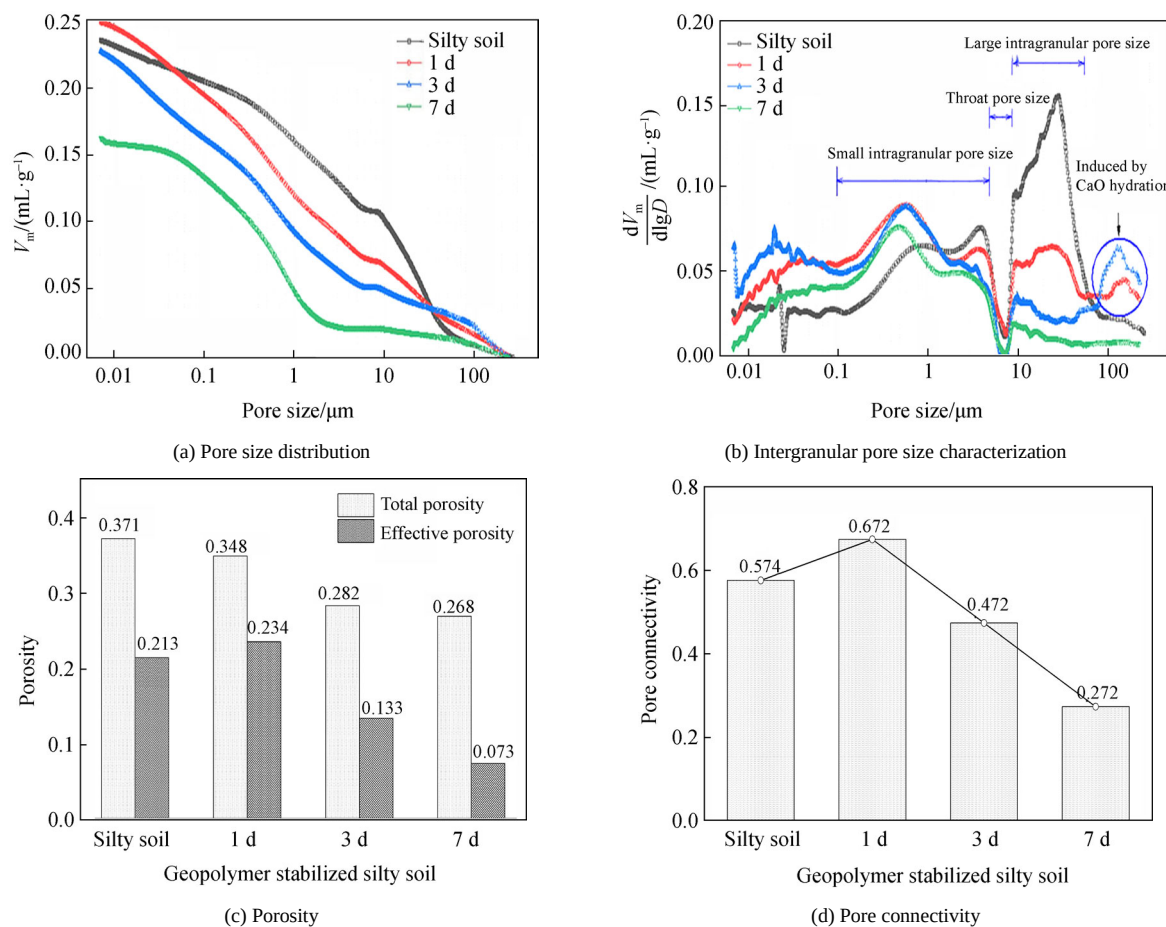


图 10 淤泥质土和不同龄期地聚合物固化淤泥质土的孔隙结构特征^[106]

Fig. 10 Pore structure characteristics of original and geopolymer-stabilized silty soil after various curing days^[106]

综上所述, 地聚合物固化淤泥质土是一个复杂的化学过程, 如图 11 所示, 主要以地质聚合反应为核心, 通过溶解、扩散、聚合和胶结等步骤生成具有胶凝作用的地聚合物凝胶[如 N-A-S-H 或 C-(A)-S-H], 从而黏结并包裹松散的土颗粒使其形成更加密实的土体结构。这一机制不仅为淤泥质土的固化提供了新思路, 有助于提升土体的力学性能

和耐久性能, 还具有环保和资源再利用的优势。采用地聚合物固化淤泥质土较传统无机固化剂的固化效果更好, 固化后的土体结构更加稳定, 对环境变化(如温度、湿度及化学侵蚀)的抵抗能力更强, 同时兼具更好的可持续性。因此, 地聚合物是一种优异的淤泥质土固化材料, 为其在工程中的应用提供了可靠的技术支持。

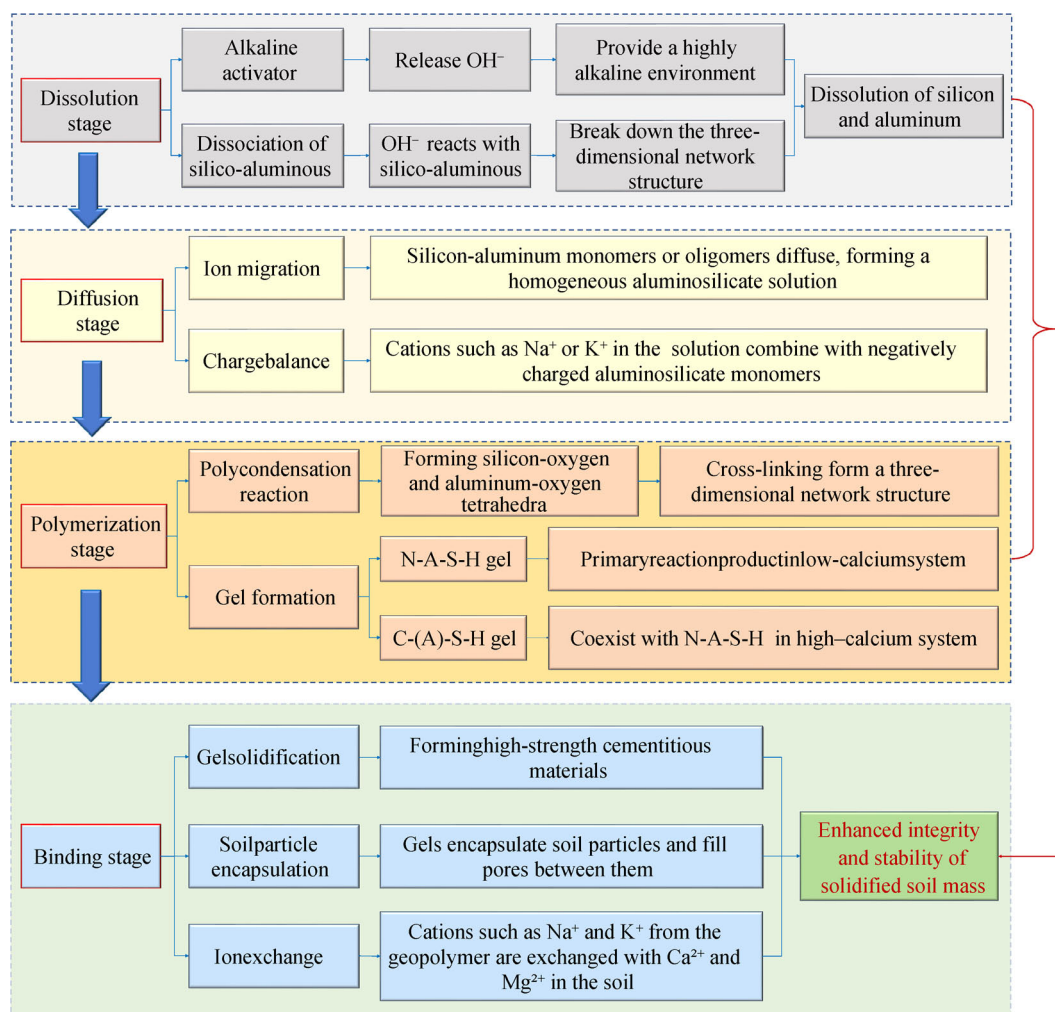


图 11 地聚合物固化淤泥质土反应过程及原理

Fig. 11 Reaction process and principle of geopolymer-stabilized silty soil

4 地聚合物固化淤泥质土的力学性能

固化淤泥质土在实际工程中的应用需要满足特定的力学性能要求，其性能的优劣对工程结构物的安全性和稳定性有至关重要的影响。表 6 总结了近年来全球地聚合物固化淤泥质土的部分强度试验结果，验证了地聚合物在提升土体力学性能方面的优势。研究表明，固化剂掺量对固化土强度影响最为显著，当固化剂的掺量为土体干质量的 20%~25% 时能达到较好的固化效果^[107-111]。钠基碱激发剂能更有效地溶解出前驱体中的 Si、Al 或 Ca，而钾基碱激发剂的溶解效果相对较差；其中，NaOH+Na₂SiO₃ 具有最好的激发效果，因为 NaOH 可以有效地调节 Na₂SiO₃ 的模数，并迅速溶解前驱体中的 SiO₂ 和 Al₂O₃，然后 Na₂SiO₃ 能结合单体并加速地质聚合反应的进程^[112]，从而获得更加致密和坚固的固化产物。对于碱溶液，4.5~15.0 mol/L 被认

为是 NaOH 和 KOH 较为合理的浓度范围，部分学者认为 8~12 mol/L 是最有效的浓度范围^[113-114]。因此，综合考虑安全性与经济性，许多研究都采用 8 mol/L 的 NaOH 和 KOH 制备碱溶液。碱激发剂与前驱体材料的比例也是影响固化土强度的重要因素，一些研究认为当碱激发溶液(NaOH+Na₂SiO₃ 的混合溶液)与前驱体质量比为 1.0 时，能获得最优的激发效果^[107, 115]。

另外，在前驱体材料中，矿渣比粉煤灰对固化土强度的贡献更大。在碱溶液激发下，粉煤灰中的 Si 和 Al 释放较慢，而矿渣中的 Ca 释放较快，反应速率也比 Si 和 Al 更大，因此矿渣对固化土早期强度的发展更加有利，而且可以缩短土体固化时间；较高的 NaOH 浓度可以从粉煤灰中浸出较多的 SiO₂ 和 Al₂O₃，提升固化土的后期强度，但是当粉煤灰掺量较高时，则会对强度产生不利影响。研究还表明，养护条件对地聚合物固化淤泥质土力学性能有一定

影响,适当升高养护温度有助于加快地聚反应进行最终提升土体力学性能;对含水率较大的淤泥质土,将

液限设置为土体的最佳含水率时,可以使得固化土获得较好的施工性能与固化强度^[108–109, 115]。

表 6 地聚合物固化淤泥质土无侧限抗压强度
Table 6 Unconfined compressive strength of silty soil stabilized with geopolymers

References	Precursor	Alkaline activator	Binder content/%	UCS/Mpa				Research conclusions
				3 d	7 d	14 d	28 d	
[29]	Slag	CaO+Na ₂ SiO ₃	22		0.99	1.15		UCS of stabilized soil increases with increased binder content; a critical water content exists: below it, UCS gradually decreases with an increasing content of organic matter; above it, organic matter has minimal effect on strength
[116]	Fly ash	NaOH+Na ₂ SiO ₃	30		5	10	12.5	Excess alkaline activator causes premature geopolymer precipitation, hindering strength development; increased curing temperature and longer duration enhance strength, but excessively high temperature/duration causes water loss, microcracks, and reduced strength
[117]	Slag, fly ash	NaOH	30		5.8			UCS of stabilized soil increases with rising curing temperature (25, 50, 80 °C); higher temperature and NaOH concentration accelerate geopolymerization, forming a denser matrix
[118]	Slag, fly ash	NaOH	20	0.42	1.00	1.50		Highest UCS of stabilized soil is achieved with 90% slag+10% fly ash, NaOH/precursor=0.15, water/binder=0.7; excess fly ash reduces strength; too much activator causes rapid setting, while insufficient activator fails to activate Si/Al, impairing strength development
[103]	Slag, fly ash	NaOH+Na ₂ SiO ₃	20		5.82		7.03	Factors influence on UCS: slag content> activator modulus> activator dosage (7 d); slag content>activator dosage> activator modulus (28 d); the optimal mix: slag content is 86.5%, modulus of activator is 0.84, activator dosage is 7.3%
[107]	Slag, fly ash	NaOH+Na ₂ SiO ₃ KOH+K ₂ SiO ₃	20	1.10	3.79	5.10	5.81	Na-based activators outperform K-based ones, and the optimal Na ₂ SiO ₃ :NaOH=70:30; slag enhances strength more effectively than fly ash due to its higher Ca ²⁺ content; 15% slag + 5% fly ash is the optimal precursor mix
[119]	Slag, fly ash	Carbide slag	15		0.085	0.84	1.48	Maximum UCS of stabilized soil is achieved with slag:fly ash:carbide slag=42:12:46; UCS increases with higher geopolymer content but at a diminishing rate; geopolymer-stabilized soil exhibits better water stability, wet-dry resistance, impermeability, and smaller deformation compared to lime-fly ash stabilized soil, more suitable for subgrade
[120]	Fly ash, carbide slag	NaOH+Na ₂ SiO ₃	35	0.32	0.61	0.85	1.21	High fly ash content requires high NaOH concentration to leach SiO ₂ and Al ₂ O ₃ ; optimal Na ₂ SiO ₃ :NaOH decreases as fly ash content increases; Excessive water content dilutes NaOH, reducing activation effect; strength is higher when water content equals the liquid limit; adding 7%–12% carbide slag improves strength significantly
[106]	Metakaolin	CaO+NaHCO ₃	15		0.85			UCS initially increases then declines with higher metakaolin and activator content; Excess activator produces excessive Ca(OH) ₂ , causing shrinkage/cracks, while overly high metakaolin content results in insufficient alkalinity and incomplete geopolymerization, impairing strength development
[121]	Metakaolin	Na ₂ SiO ₃	33		5.83	6.45	6.80	Metakaolin-based geopolymer-stabilized soil exhibits significantly improved mechanical properties (UCS, Young's modulus, failure strain) compared to cement- or lime-stabilized soil under the same conditions

何华^[122]的研究表明,在标准养护条件下养护 90 d 后,地聚合物固化淤泥质土的抗剪强度可高达 1.523 MPa,显著优于同等养护条件下的水泥固化土。

这验证了地聚合物在提升淤泥质土抗剪强度方面的潜力。Ghadir 等^[123]通过对比分析地聚合物固化淤泥质土与水泥固化淤泥质土的抗剪强度,进一步证实了

在相同前驱体掺量下,地聚合物固化土通常表现出更高的抗剪强度。此外,作为一种典型的黏性土,淤泥质土在不排水条件下的稳定性是工程设计中重点考量的因素。对此,Abdullah 等^[124]深入研究了地聚合物固化淤泥质土在固结不排水剪切试验中的应力-应变行为。研究表明,地聚合物的引入能够显著改变淤泥质土的初始状态,使其从准超固结状态转变为重度超固结状态。这种转变直接导致了地聚合物固化淤泥质土呈现出更显著的屈服面特征,并表现出更高的黏聚力、内摩擦角等关键抗剪强度指标。Luo 等^[121]研究发现,偏高岭土基地聚合物(MKG)固化淤泥质土的杨氏模量、无侧限抗压强度和破坏应变等力学指标均优于同条件下的水泥和石灰固化土。如图 12 所示,在 7 d 养护龄期时, MKG 固化土的杨氏模量和无侧限抗压强度均已达到较高水平,表明 MKG 固化土的

早期强度发展迅速,能够在较短时间内达到较强的稳定性,且相较于水泥和石灰固化土,其破坏应变更大,表明其具有更好的韧性和抗变形能力。胡勇等^[125]研究了采用矿渣-粉煤灰基地聚合物搅拌桩加固淤泥质土地基的可行性,并与水泥搅拌桩的固化效果进行了对比分析,试验结果如图 13 所示。结果表明,原状淤泥质土地基的承载力约为 10 kPa,水泥搅拌桩复合地基的承载力约为 55 kPa,而 30%碱含量的地聚合物搅拌桩复合地基的承载力达到了 70 kPa,桩土应力比达到了 11.28,是水泥搅拌桩的 1.34 倍。由此可知,地聚合物搅拌桩能显著提高淤泥质土地基的承载力和桩土应力比,其加固效果显著优于水泥搅拌桩。因此,地聚合物可以通过独特的碱激发与地质聚合过程重构土体骨架,显著提升淤泥质土的力学性能,为淤泥质土的处治与加固提供了新的解决方案。

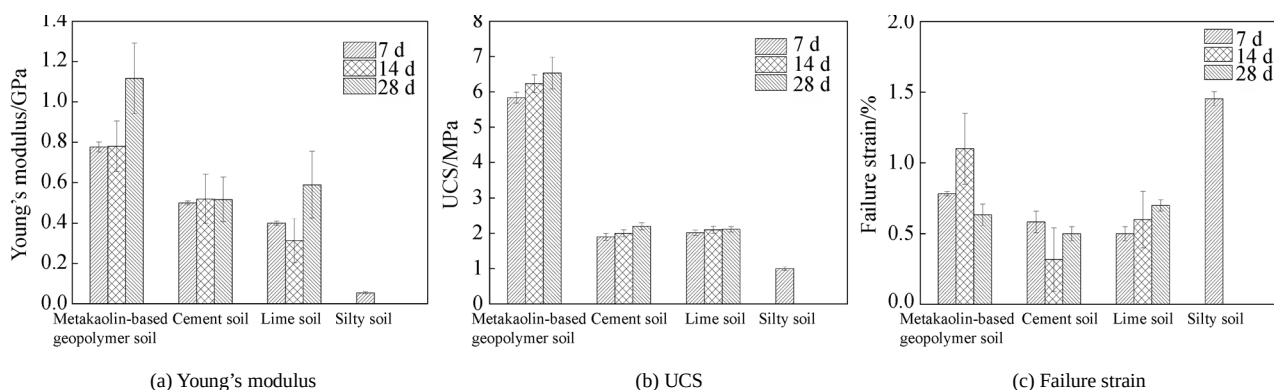


图 12 偏高岭土地基聚合物固化淤泥质土的力学性能试验结果^[121]

Fig. 12 Test results of mechanical properties of metakaolin-based geopolymer stabilized silty soil^[121]

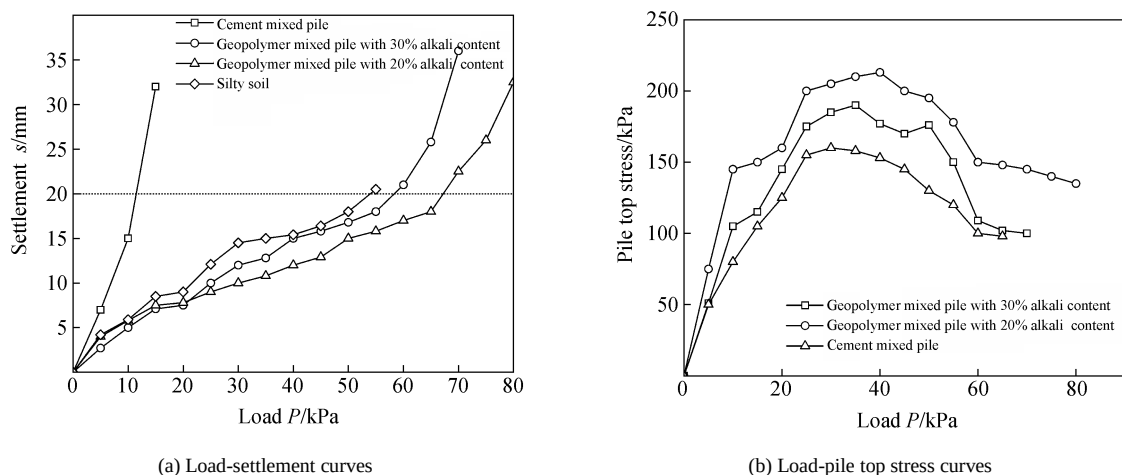


图 13 地聚合物搅拌桩加固淤泥质土地基试验结果^[125]

Fig. 13 Experimental results of geopolymer pile for consolidating silty soil foundation^[125]

综上所述,地聚合物固化淤泥质土在无侧限抗压强度、抗剪强度、地基承载力等方面均表现优异。

其力学性能受多重因素的影响,其中碱激发剂浓度、碱溶液模数、前驱体类型及掺量等因素通常存在最

优范围, 值得深入探究, 通过优化反应条件在一定程度上能进一步提升固化土的力学性能。因此, 地聚合物可以通过其独特的碱激发与地质聚合过程重构土体骨架, 显著提升淤泥质土的力学性能, 为淤泥质土的处治与加固提供了新的解决方案。

5 地聚合物固化淤泥质土的耐久性能

固化土耐久性能是指其抵抗物理或化学作用所产生的显著劣化的能力, 这直接决定了结构物的长期使用寿命。评价固化淤泥质土耐久性能的指标通常包括水稳定性、抗冻融循环性能、抗干湿循环性能以及耐化学腐蚀性能等, 这些指标反映了固化土对不同服役环境的适应能力。

5.1 水稳定性

研究人员通常采用水稳系数来量化评价固化土的水稳定性。水稳系数为试件在达到规定龄期前一天浸水 24 h 后测得的抗压强度与同龄期未浸水试

件的抗压强度之比。朱坤垵^[37]将粉煤灰、矿渣和电石渣按一定比例混合后固化淤泥质土, 并对比分析了原状土、二灰固化土和地聚合物固化土 28 d 龄期时的水稳定性。结果表明, 原状土的水稳定性最差, 二灰固化土次之, 其在 28 d 龄期的水稳系数仅为 0.62, 且试件表面有开裂现象; 而地聚合物固化淤泥质土在 28 d 龄期的水稳系数达到 0.86, 且试件表面保持完好。牛家栋等^[126]同样认为矿渣基地聚合物固化淤泥质土具有优异的水稳定性, 试验结果显示固化土 28 d 水稳系数高达 0.98。杨振甲等^[127]深入研究了矿渣-粉煤灰基地聚合物固化淤泥质土水稳定性随浸泡时间的变化情况, 试验结果如图 14 所示。结果表明, 随着浸泡时间的延长, 土体含水率逐渐增大, 其中原状土含水率最高, 水泥固化土次之, 而地聚合物固化土最低; 此外, 随着地聚合物胶凝材料掺量的增加, 固化土的强度损失率呈现下降趋势。

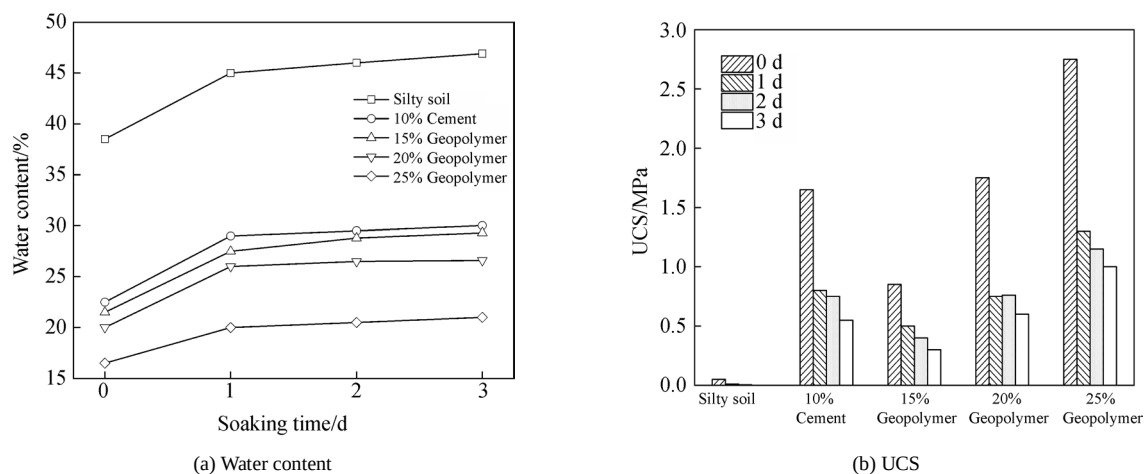


图 14 固化淤泥质土水稳定性试验结果^[127]

Fig. 14 Results of water stability of stabilized silty soil^[127]

5.2 抗冻融循环性能

冻融循环是导致土体结构破坏的重要因素, 主要是通过冰晶膨胀产生的冻胀力以及融化后的结构软化作用^[128]。由于地聚合物固化土可以显著降低土体的孔隙率, 尤其是大孔隙含量, 使得土体结构致密、亲水性减弱, 并限制了土体中自由水的储存空间和冰晶的生长, 从而提高了其抵抗冻融破坏的能力。同时, 地聚合物骨架的高强度和韧性使固化土能更好地抵抗冰晶膨胀产生的应力, 不易开裂, 即便在多次冻融循环后, 其内部结构仍能保持相对稳定, 力学性能衰减幅度较小。

柯睿等^[129]的研究表明, 水泥固化淤泥质土在承

受 6 次冻融循环(在 -24°C 冻 24 h、 25°C 融 24 h 后为 1 次循环周期)后便达到了承载能力的极限, 在此之后试样的各项力学指标显著下降, 破坏类型变为脆性破坏。而目前已有的关于地聚合物材料抗冻融性能的研究结果表明, 矿渣基地聚合物混凝土可以抵抗超过 300 次的快速冻融循环(试验遵循 ASTM C666 和 GB/T 50082—2009 的快速冻融法要求, 以相对动弹性模量降至 60% 为终止标准)^[130], 经 300 次冻融循环后其相对动弹性模量仍保持在 90% 左右, 质量损失较小; 此外, 掺 50% 矿渣的低钙粉煤灰基地聚合物混凝土可以抵抗 225 次的快速冻融循环。Sahoo 等^[131]研究对比了在冻融循环作用下, 矿

渣基地聚合物固化土、水泥固化土和石灰固化土在经受了 12 次循环后的强度损失率，结果分别为 48%、54%和 60%，在其他条件相同的情况下，矿渣基地聚合物固化土的强度损失率是最低的。陈忠清等^[104]通过室内试验研究了粉煤灰基地聚合物固化黏性土抗冻融性能的影响因素。结果表明，地聚合物固化土的抗冻融性能与聚合反应生成的富硅相凝胶产物有关，当原材料的硅铝比在 1.25~1.35 的范围时，地聚合物固化土的无侧限抗压强度较大、抗冻融性能较好。此外，增加地聚合物中矿渣含量有助于提高固化土的抗冻融性能，因为矿渣具有较高的活性，能缩短地聚合物的凝结时间，增强地聚合物固化土的力学性能，且当矿渣和引气剂共同使用时，固化土的抗冻融性能能得到进一步的提升^[132]。

地聚合物固化淤泥质土的抗冻融性能主要与地质聚合反应的程度有关，反应所生成的水化产物越多，土体密实度就越好，整体性越强，抗冻融循环能力亦越强。通过优化土固比、碱溶液浓度等参数能增强固化土的抗冻融性能。现阶段关于在冻融循环条件下地聚合物固化淤泥质土行为特征及其影响

因素的研究报道相对较少，系统性不强，仍有待进一步探究。

5.3 抗干湿循环性能

对于固化淤泥质土而言，由于其较高的含水率，极易引发干缩，过量的收缩变形则会导致土体开裂，最终失效^[133]。淤泥质土中普遍含有黏土矿物，在干湿循环作用下易发生体积变化。利用地聚合物固化淤泥质土，地聚合物固化产物能对土颗粒进行包裹和胶结，能有效抑制黏土矿物的膨胀与收缩特性，从而提升了固化土在干湿循环作用下的结构稳定性。

Adhikari 等^[134]报道了在干湿循环耐久性试验中，粉煤灰基地聚合物固化土的干湿循环稳定性要显著优于水泥固化土，其在经过 12 次干湿循环后表现出更少的质量损失和体积变化(表 7)。Sreelakshmi 等^[135]研究发现，粉煤灰基地聚合物固化淤泥质土的抗压强度从第 3 次干湿循环后开始下降，直到第 12 次干湿循环后所有试件均未产生过大的变形，质量损失率和体积改变量均在允许范围内；虽然持续的干湿循环作用会使固化土的力学性能劣化，但其强度仍显著高于原状土。

表 7 水泥固化土、地聚合物固化土在 12 次干湿循环后的试验结果^[134]
Table 7 Results of cement-stabilized soil and geopolymer-stabilized soil after 12 wet-dry cycles^[134]

Soil type	Binder type		Durability test result		Failure condition
			Soil loss/%	Volume change/%	
Silty soil	Inorganic binder	5% Cement	3.7	3.7	Failed after 11 cycles
		10% Cement	1.2	1.3	Did not fail
	Geopolymer	25% Fly ash, NaOH : Na ₂ SiO ₃ =0	1.4	2.1	Did not fail
		25% Fly ash NaOH : Na ₂ SiO ₃ =0.4	1.4	1.9	Did not fail
Silt	Inorganic binder	10% Cement		2.8	Failed after 2 cycles
		9% Cement + 9% Lime		6.7	Failed after 5 cycles
	Geopolymer	30% Fly ash, NaOH : Na ₂ SiO ₃ =0.4	8.6	2.5	Did not fail

5.4 耐化学腐蚀性能

土体在实际工程中易遭受有毒、有害化学成分的侵蚀进而造成土颗粒表面剥落、松散和破碎，使其强度降低。当暴露在硫酸盐或氯盐溶液侵蚀的环境下时，水泥固化土极易引发开裂等耐久性问题^[136]，原因在于水泥固化土中 C-A-H、Ca(OH)₂ 等水化产物会与 SO₄²⁻、Cl⁻ 反应生成膨胀性晶体，膨胀性晶体生成量过多则会产生过大的膨胀应力，从而造成土体内部结构破坏，连通孔隙增加，孔隙率提高，强度劣化^[137]。与此不同的是，地聚合物固化土则具备良好的抗 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 侵蚀能力，其在耐化学腐蚀方面相较于传

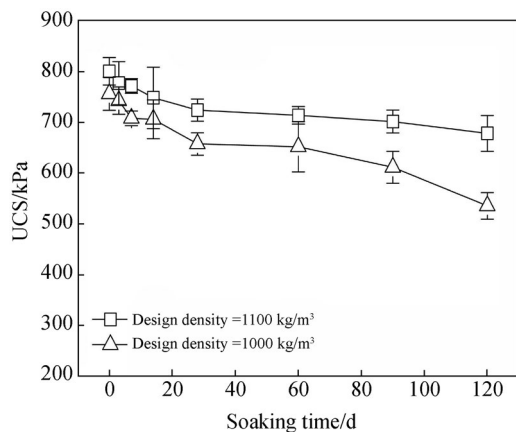
统无机固化土具有一定的优势性^[138-139]。

Jiang 等^[140]比较了矿渣基地聚合物固化土和水泥固化土在硫酸盐侵蚀环境下的耐久性能(图 15)。结果表明，地聚合物固化土能更好地抵抗硫酸盐侵蚀，地聚合物固化土的初始抗压强度大概在 750~800 kPa 之间，明显高于同期水泥固化土，且随着浸泡时间的延长强度缓慢下降。虽然水泥固化土的初期强度由于水化反应进程较快和水化产物的膨胀填充作用而有所增长，但是后期强度增长缓慢，并出现急剧的倒缩现象。

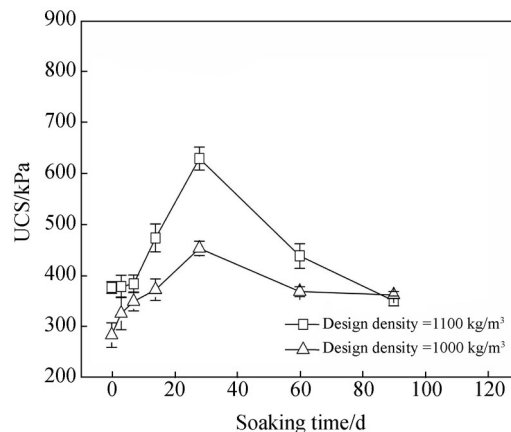
Yu 等^[141]对 Na₂SO₄ 溶液浸泡条件下，矿渣基地

聚合物固化淤泥质土与水泥固化淤泥质土的耐久性进行了对比分析。研究发现,地聚合物固化土在外观完整性、质量损失、干密度和强度方面都表现出更强的抗侵蚀能力。图 16 为 2 种固化土在 Na_2SO_4 溶液中浸泡 90 d 后的微观形貌,可以看出,2 种固化土体内均有 AFt 晶体生成,但却表现出不同的形态。地聚合物固化土中 AFt 晶体尺寸较小且无长棒

状,而水泥固化土中 AFt 晶体却呈现数条长棒状。由此可见,AFt 在土体中的生长形态是两者耐久性差异的关键因素。Odeh 等^[105]将粉煤灰基地聚合物固化淤泥质土分别浸泡于 NaCl 和 H_2SO_4 溶液中,28 d 后测试它们的强度损失率。结果表明,地聚合物固化土在 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的侵蚀作用下,其强度损失率分别小于 10% 和 38%。



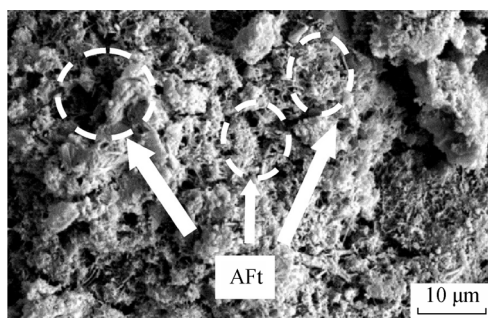
(a) Slag-based geopolymer stabilized soil



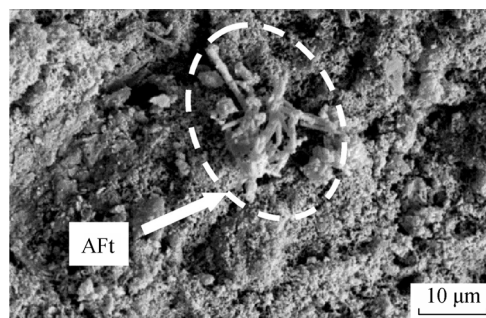
(b) Cement stabilized soil

图 15 不同浸泡时长下固化土的无侧限抗压强度^[140]

Fig. 15 Unconfined compressive strength of stabilized soil under various soaking duration^[140]



(a) Geopolymer-stabilized soil



(b) Cement-stabilized soil

图 16 固化土在 Na_2SO_4 溶液中浸泡 90d 后的 SEM 结果^[141]

Fig. 16 SEM results of stabilized soil after soaking in Na_2SO_4 solution for 90 days^[141]

地聚合物固化淤泥质土耐化学腐蚀性较好的原因主要是,当硅铝质原材料在碱性环境下被激活后,溶解生成的一系列 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等离子进入到土体孔隙溶液中,会与硫酸根离子反应形成 AFt。由于淤泥质土的高含水率和高孔隙比可以为 AFt 提供生长所需的空間,所以 AFt 可固定土体中的大量自由水,并填充孔隙,从而能有效地降低淤泥质土的含水率,使结构更加致密^[142],进而促进土体强度的发展。矿渣等物质在发生地质聚合反应后,生成的 C-(A)-S-H 等凝胶产物还能提高固化土对 Cl^- 的结合能力,可以更好地抵抗 Cl^- 的侵蚀作用。此外,地聚

合物在固化重金属方面也具有独特的优势,可以通过形成稳定的矿物相或化学键合来固定重金属离子,减少其迁移和释放^[143]。由此可知,地聚合物固化淤泥质土具备良好的抵抗化学物质侵蚀的能力和优异的环境适应性。由于土体的复杂性和特殊性,现阶段关于地聚合物固化淤泥质土耐久性能的研究还不够完善^[144],需要进一步厘清各因素对地聚合物固化淤泥质土耐久性能的影响规律、开展多因素耦合环境下固化土的耐久性能研究,使地聚合物能更好地应用于不同工程特性淤泥质土的固化,并满足不同工程的应用需求。

6 地聚合物与传统无机固化剂对比

从前述的传统无机固化剂与地聚合物对土壤的固化机理,以及地聚合物固化淤泥质土后较传统无机固化剂具有更好的固化效果、更加稳定的土体固化结构和更强的抵抗环境变化(如温度、湿度及化学侵蚀)能力,可以看出,地聚合物固化淤泥质土的优异力学性能和耐久性能并非偶然,而是其独特的无机聚合反应、致密微观结构形成以及稳定的化学键合等多重因素协同作用的结果。相较于传统无机固化淤泥质土,地聚合物固化淤泥质土的工程特性差异与优势主要体现在:

1) 工程特性。

地聚合物固化土的综合工程特性要显著优于传统无机固化土,这主要归因于地聚合物固化过程中C-(A)-S-H和N-A-S-H凝胶的形成,显著增强了土颗粒间的胶结作用,并形成了稳定且密实的三维网状硅铝酸盐结构。地聚合物固化土的弹性模量随养护时间的延长也显著提高,表现出较强的抵抗变形的能力;地聚合物固化土具有较低的孔隙率和较高的密实度,固化土的抗渗性能显著提升,其渗透系数可降低至 10^{-9} cm/s量级^[145];地聚合物固化土在冻融循环和干湿循环试验中表现出优异的稳定性,其强度损失率要显著低于传统无机固化土,软化系数更高,在水中或潮湿环境下能保持较好的结构完整性。

另外,地聚合物固化土还具有良好的化学稳定性,对酸、碱及盐类侵蚀具有较强抵抗能力,长期性能劣化风险相对较低,可避免因化学侵蚀导致的强度损失和膨胀破坏问题(水泥固化土易发生此类病害)。地聚合物体系还可以通过调整配合比(如碱激发剂模数、浓度)来适应不同含水率的淤泥质土,有时甚至无需或只需少量预脱水处理,提升了利用效率。

2) 环境适应性。

传统无机固化剂的应用效果主要依赖于其水解水化反应后生成的各种水硬性胶凝材料,其反应过程中所生成的水化产物大多属于自然界中非天然存在的矿物(C-S-H除外),如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、AFt、C-A-H等,这些活性矿物会在长期环境作用下发生相变,或与环境介质发生反应,最终导致固化土耐久性能下降^[146]。因此,无机固化后土体强度虽然较高,但易受环境因素(如冻融循环、干湿循环等)影响,造成长期性能不足。另外,无机固化土在应用上也存

在一定的局限性,对某些特殊土的处理效果不佳,尤其对有机质含量较高的土壤应用效果较差。

地聚合物固化土则依赖于地质聚合反应所形成的凝胶材料,其生成的凝胶产物种类多元且性质稳定,如C-(A)-S-H、N-A-S-H等。其整个反应体系中包含丰富的硅铝酸盐矿物,与地壳中富含的Si、Al元素丰度相匹配,这也从侧面反映出地聚合物固化土具备良好的环境适应性。因此,相较于传统无机固化土,地聚合物固化土具有更高的早期强度、更强的耐久性、更佳的体积稳定性及抗化学腐蚀能力,尤其在酸性、盐碱和潮湿环境中表现优异。此外,地聚合物固化土可适用于多种土壤类型(包括淤泥质土、高有机质土等)的处理,具有较好的适应性,且在高含水率条件下仍能保持较好的固化效果和长期性能。

3) 环境友好性与经济性。

传统无机固化材料在生产运输和施工过程中能耗高、碳排量大,存在环境污染问题。地聚合物固化土以工业固废为主要原料,具有低能耗、低碳排放的优势与资源再生利用的可持续性。地聚合物固化淤泥质土在使用过程中,不会释放有害物质,对土壤和地下水环境没有污染,并且地聚合物致密的网络结构能有效包裹、吸附或化学固定淤泥质土中可能存在的重金属离子,降低其浸出毒性和迁移性,减少二次污染风险。

虽然地聚合物中碱激发剂的成本相对较高,但其具有大宗利用廉价固废、对高含水率土适应性强(节省脱水成本)、早期强度高(缩短工期)、耐久性好(减少维护成本)等优点,在考虑全生命周期成本和环境效益时,显然比传统无机固化剂更具竞争力,尤其在固废资源丰富或环保要求较高的地区。另外,还可以选用具有碱激发特性的工业废料来代替化学碱激发剂,进一步提升其经济性。

7 结论与展望

7.1 结论

淤泥质土的有效处置和工业固废的高值化利用,是中国当前面临的两大严峻工程与环境挑战。本文系统综述了中国内外关于地聚合物固化淤泥质土的研究进展,分析了淤泥质土的工程特性,阐明了地聚合物形成原理及其固化淤泥质土的微观机理,并对固化土的力学性能与耐久性能进行了探讨,旨在为协同解决淤泥质土处置与工业固废高值化利用问题提供参考。主要结论如下:

1) 采用地聚合物固化淤泥质土并将其应用于工程建设, 是一种极具潜力的资源化利用方式, 能有效克服传统无机固化剂碳排放高、能耗大、固化效果不佳等弊端。这种处置方式不仅可以实现淤泥质土的高效与资源化利用, 还可以促进中国工业固废的大规模消纳, 展现出卓越的环境、经济与社会效益, 契合中国的可持续发展战略需求与“双碳”目标。

2) 地聚合物固化淤泥质土表现出优异的力学性能, 其抗压强度、抗剪强度、承载能力均较传统无机固化土有一定程度提升。传统无机固化淤泥质土主要依赖于水化产物填充孔隙, 形成相对松散的固化土体结构。而地聚合物以富硅铝酸盐矿物为前驱体, 在碱激发剂作用下发生复杂的地质聚合反应, 生成大量无定形或低结晶度的硅铝酸盐凝胶[如 C-(A)-S-H、N-A-S-H 等]。这些凝胶一部分凝结硬化构成聚合物骨架, 一部分包裹淤泥质土颗粒并充填土颗粒间的孔隙形成团聚体, 最终形成稳定的三维硅铝酸盐网络结构, 如同在土体内部构建了坚固的“钢筋骨架”, 从而改善了淤泥质土的整体性和稳定性。此外, 地聚合物网络中主要通过具有较高键合能的共价键(如 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$)连接, 使得固化土在承受外部荷载时, 具有更强的抵抗变形与破坏的能力。

3) 地聚合物固化淤泥质土在水稳定性、抗冻融循环性等关键耐久性能方面也表现出显著优势。这种性能提升是其独特微观结构与化学键结能力的宏观体现, 使得其在严苛环境下的长期服役潜力要优于传统无机固化土。这主要归因于, 地聚合物凝胶能将分散的淤泥质土颗粒牢固地胶结在一起, 形成更为稳定且致密的土颗粒团聚体。这种化学键稳定性使固化土在水环境中不易产生溶解或水化膨胀等劣化反应, 从而保持结构的完整和稳定。另外, 地聚合物的胶结作用能有效降低土体的孔隙率, 优化孔隙分布, 并将大量宏观孔隙转化为微孔或毛细孔, 从而降低固化土的水敏感性, 提升其密实度和抗侵蚀能力。

7.2 展望

1) 尽管当前地聚合物固化淤泥质土的试验研究已在宏观力学性能、微观结构特征及其影响因素方面取得了显著进展, 但对其微观固化机理的深层解析以及有机质含量对固化效果影响的系统研究仍有待加强。不同类型前驱体和碱激发剂种类与配比, 对地聚合物的反应进程、凝胶产物的性状及固化效果有决定性的影响, 未来研究应聚焦于探究地聚合

物与淤泥质土颗粒之间复杂的界面反应与键合机制, 利用先进表征技术分析不同体系下地聚合物凝胶的形成、演化及其与土颗粒的相互作用过程, 完善并丰富不同前驱体-激发剂体系下地聚合物固化淤泥质土的基础理论, 为其在各类工程领域的推广应用提供理论支撑。

2) 地聚合物固化淤泥质土的研究普遍侧重于单元地聚合物体系, 而针对二元或多元地聚合物固化土的研究尚显不足。考虑到中国幅员辽阔, 各地区淤泥质土的工程特性(如矿物组成、有机质含量、含水率等)存在显著差异, 单一的地聚合物体系难以普适。因此, 未来的研究应积极拓展多元地聚合物体系下淤泥质土固化的探索, 充分发挥不同地聚合物原料在性能和特点上的优势互补性, 根据地域特点和土质条件, 实现因地制宜地选择和配制最为理想的地聚合物固化材料, 以期实现最佳的固化效果与成本效益。

3) 当前, 地聚合物在土壤固化领域的应用仍面临缺乏统一试验方法、性能评价标准和工程设计规范的严峻挑战。这一现状严重制约了地聚合物固化土的质量控制、可靠性评估以及大规模工程实践。为解决这一问题, 当务之急是加速完善国家与行业层面的相关标准, 包括建立标准化的原材料检测方法、固化土力学与耐久性能测试规程、长期性能评价体系, 以及针对不同工程应用场景的设计与施工规范; 构建涵盖材料制备、性能检测、设计施工、质量验收的全生命周期标准化体系, 为该技术的规模化推广与应用提供技术保障。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发“无废城市”建设试点工作方案的通知 [EB/OL].[2018-12-29]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2019-01/21/content_5359620.htm.
- [2] 田洪圆, 邱敏, 孙秀丽. 关于淤泥质土的工程特性及其处理利用的综述[J]. 山西建筑, 2013, 39(24): 87–88.
TIAN Hongyuan, QIU Min, SUN Xiuli. Shanxi Archit, 2013, 39(24): 87–88.
- [3] 叶杨龙, 陶小明, 葛翔. 河湖淤泥特性及处置方式[J]. 化学工程与装备, 2022(12): 330–331.
YE Yanglong, TAO Xiaoming, GE Xiang. Chem Eng Equip, 2022(12): 330–331.
- [4] 陈彦霖. 疏浚淤泥的固化处理技术与资源化利用[J]. 中国设备工程, 2020(20): 11–12.
CHEN Yanlin. China Plant Eng, 2020(20): 11–12.
- [5] 季节, 梁霖, 韩秉烨, 等. 中国道路工程中土壤固化技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 47–66.
JI Jie, LIANG Ben, HAN Bingye, et al. J Traffic Transp Eng, 2023, 23(2): 47–66.
- [6] 罗正东, 章本本, 苏永华, 等. 地质聚合物固化土研究现状及展望[J].

- 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(6): 31–43.
- LUO Zhengdong, ZHANG Benben, SU Yonghua, et al. *J Civ Environ Eng*, 2024, 46(6): 31–43.
- [7] CABEZA L F, BARRENECHE C, MIRÓ L, et al. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2013, 23: 536–542.
- [8] ALI M B, SAIDUR R, HOSSAIN M S. A review on emission analysis in cement industries[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15(5): 2252–2261.
- [9] ASSI L, CARTER K, DEEVER E, et al. Sustainable concrete: Building a greener future[J]. *J Clean Prod*, 2018, 198: 1641–1651.
- [10] SUKMAK P, DE SILVA P, HORPIBULSUK S, et al. Sulfate resistance of clay-Portland cement and clay high-calcium fly ash geopolymer[J]. *J Mater Civ Eng*, 2015, 27(5): 04014158.
- [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): 1146–1152.
- TAN Yunzhi, KE Rui, CHEN Junlian, et al. *Rock Soil Mech*, 2020, 41(4): 1146–1152.
- [12] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- GUO Yin. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properties of stabilized soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [13] 梁仕华, 周锦程, 罗祺, 等. 有机质对水泥固化淤泥土的力学特性影响试验研究[J]. *广东工业大学学报*, 2019, 36(6): 86–91.
- LIANG Shihua, ZHOU Jincheng, LUO Qi, et al. *J Guangdong Univ Technol*, 2019, 36(6): 86–91.
- [14] PACHECO-TORGAL F, ABDOLLAHNEJAD Z, CAMÕES A F, et al. Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 30: 400–405.
- [15] YANG K H, SONG J K, SONG K I. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete[J]. *J Clean Prod*, 2013, 39: 265–272.
- [16] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement[J]. *J Clean Prod*, 2011, 19(9–10): 1080–1090.
- [17] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. *J Therm Anal*, 1989, 35(2): 429–441.
- [18] DAVIDOVITS J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials[J]. *J Therm Anal*, 1991, 37(8): 1633–1656.
- [19] DAVIDOVITS J. Recent progresses in concretes for nuclear waste and uranium waste containment[J]. *Concr Internat*, 1994, 16(12): 53–58.
- [20] LYON R E, BALAGURU P N, FODEN A, et al. Fire-resistant aluminosilicate composites[J]. *J Fire Mater*, 1997, 21(2): 67–73.
- [21] DUXSON P, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PROVIS J L, et al. Geopolymer technology: The current state of the art[J]. *J Mater Sci*, 2007, 42(9): 2917–2933.
- [22] ZHANG M, GUO H, EL-KORCHI T, et al. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 47: 1468–1478.
- [23] 张一敏, 焦向科, 陈铁军, 等. 一种类地聚合物水泥及其制备方法[P]. CN201110050194.2. 2012–12–19.
- [24] 余春松, 张玲玲, 郑大伟, 等. 固废地质聚合物研究及其应用进展[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(4): 529–546.
- YU Chunsong, ZHANG Lingling, ZHENG Dawei, et al. *Sci Sin Technol*, 2022, 52(4): 529–546.
- [25] 国家发展改革委, 科技部, 工业和信息化部, 等. 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见.[EB/OL].[2021–03–18]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content_5595566.htm.
- [26] 王君, 刘福臣. 对淤泥及淤泥质土定名的商榷[J]. *土工基础*, 2010, 24(3): 88–90.
- WANG Jun, LIU Fuchen. *Soil Eng Found*, 2010, 24(3): 88–90.
- [27] 阎长虹, 吴焕然, 许宝田, 等. 不同成因软土工程地质特性研究: 以连云港、南京、吴江、盱眙等地四种典型软土为例[J]. *地质论评*, 2015, 61(3): 561–569.
- YAN Changhong, WU Huanran, XU Baotian, et al. *Geol Rev*, 2015, 61(3): 561–569.
- [28] 姜文澜, 钱建固, 叶源新, 等. 上海结构性软黏土本构模型与试验验证[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(5): 1431–1436.
- JIANG Wenlan, QIAN Jiangu, YE Yuanxin, et al. *Chin J Undergr Space Eng*, 2021, 17(5): 1431–1436.
- [29] 黄祥祥. 合肥滨湖淤泥质土的固化配方优化及力学特性研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.
- HUANG Xiangxiang. Research for optimization of solidification formula and mechanical properties of the siity soil of Binhu in Hefei[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021.
- [30] 何记潼. 辽东湾盘锦港地区淤泥质土工程特性分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2021.
- HE Jitong. Analysis on the engineering characteristics of silt soil in Panjin port area of Liaodong Bay[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2021.
- [31] 吴燕开, 胡晓士, 胡锐, 等. 烧碱激发钢渣粉在淤泥质土中的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(12): 2187–2194.
- WU Yankai, HU Xiaoshi, HU Rui, et al. *Chin J Geotech Eng*, 2017, 39(12): 2187–2194.
- [32] 侯晓亮, 赵晓豹, 李晓昭, 等. 南京河西地区软土地层特征及工程特性研究[J]. *地质论评*, 2011, 57(4): 600–608.
- HOU Xiaoliang, ZHAO Xiaobao, LI Xiaozhao, et al. *Geol Rev*, 2011, 57(4): 600–608.
- [33] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 江苏太仓浅部淤泥质土层的工程地质特征[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(4): 43–47.
- ZHANG Yun, XUE Yuqun, WU Jichun, et al. *Hydrogeol Eng Geol*, 2010, 37(4): 43–47.
- [34] 陈启宏. 洞庭湖区淤泥质土水泥土强度特性研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- CHEN Qihong. Experimental study on cement-soil strength properties of silt soil in Dongting Lake area[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.
- [35] 任军昊. 海口海湾相淤泥质土改良后力学特性及微观机理研究[D]. 海口: 海南大学, 2023.
- REN Junhao. Study on mechanical properties and microcosmic mechanism of Haikou gulf facies muddy soil after improvement[D]. Haikou: Hainan University, 2023.
- [36] 刘伟, 陈凌伟, 张庆华, 等. 广州南沙区软土分布特征及工程性质[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(1): 94–99.
- LIU Wei, CHEN Lingwei, ZHANG Qinghua, et al. *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2022, 39(1): 94–99.
- [37] 朱坤垠. 淤泥质土固化及路用性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- ZHU Kunlong. Study on solidification of mucky soil and road performance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [38] 鄢兆伦, 陈学良, 高孟潭, 等. 青岛胶州湾淤泥(质)土动力特性试验研究[J]. *世界地震工程*, 2014, 30(4): 261–268.
- YAN Zhaolun, CHEN Xueliang, GAO Mengtan, et al. *World Earthq Eng*, 2014, 30(4): 261–268.

- [39] 蔡磊. 工业固废协同渣土改性淤泥质软土的力学特性试验研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021.
- CAI Lei. Experimental study on mechanical properties of silty soft soil modified by industrial solid waste and residual soil[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021.
- [40] 徐日庆, 王旭, 文嘉毅, 等. 浅层淤泥质土固化剂[C]//2019 年全国无机硅化物行业协会年会暨会员大会论文集. 桂林, 2019: 88–93.
- [41] 徐红, 罗国煜. 粉煤灰处理软土地基的试验研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 286–290.
- XU Hong, LUO Guoyu. J Eng Geol, 2001, 9(3): 286–290.
- [42] 郑军, 阎长虹, 夏良斌, 等. 苏州阳澄湖地区淤泥质粘土工程地质特性探讨[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 592–596.
- ZHENG Jun, YAN Changhong, XIA Liangbin, et al. J Eng Geol, 2006, 14(5): 592–596.
- [43] 周恒宇. 不同钙系地聚合物固化淤泥质软土力学特性及耐久性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- ZHOU Hengyu. Investigation of mechanical properties and durability of different calcium-based geopolymer stabilized silty soft soil[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021.
- [44] 吴王正. 淤泥质土的固化改良及其作用机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- WU Wangzheng. Study on the solidification improvement of silty soil and its action mechanism[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [45] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127–146.
- ZHENG Gang, GONG Xiaonan, XIE Yongli, et al. China Civ Eng J, 2012, 45(2): 127–146.
- [46] 李珍, 韩炜, 邵晓妹. 地质聚合物在材料领域的应用及其发展方向[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4): 93–96.
- LI Zhen, HAN Wei, SHAO Xiaomei. J Yangtze River Sci Res Inst, 2008, 25(4): 93–96.
- [47] XIA M, MUHAMMAD F, ZENG L H, et al. Solidification/stabilization of lead-zinc smelting slag in composite based geopolymer[J]. J Clean Prod, 2019, 209: 1206–1215.
- [48] 彭小芹, 杨涛, 王开宇, 等. 地聚合物混凝土及其在水泥混凝土路面快速修补中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(2): 205–210.
- PENG Xiaoqin, YANG Tao, WANG Kaiyu, et al. J Southwest Jiaotong Univ, 2011, 46(2): 205–210.
- [49] BOUGUERMOUH K, BOUZIDI N, MAHTOUT L, et al. Stabilization of flotation wastes resulting from the treatment of Pb/Zn ore based on geopolymers[J]. Mater Lett, 2018, 227: 221–224.
- [50] Davidovits J, Davidovics M. Ultra-high temperature tooling material[J]. Geo Tool Mater, 1991, 36(2): 1939–1949.
- [51] VAN DEVENTER J S J, PROVIS J L, DUXSON P, et al. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products[J]. J Hazard Mater, 2007, 139(3): 506–513.
- [52] SUN W, ZHANG Y S, LIN W, et al. *In situ* monitoring of the hydration process of K-PS geopolymer cement with ESEM[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(6): 935–940.
- [53] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A, SOBRADOS I, et al. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes[J]. Microporous Mesoporous Mater, 2006, 91(1–3): 111–119.
- [54] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(10): 1984–1992.
- [55] PROVIS J L, DUXSON P, VAN DEVENTER J S J, et al. The role of mathematical modelling and gel chemistry in advancing geopolymer technology[J]. Chem Eng Res Des, 2005, 83(7): 853–860.
- [56] TU W L, ZHANG M Z. Multiscale microstructure and micromechanical properties of alkali-activated concrete: A critical review[J]. Cem Concr Compos, 2024, 152: 105664.
- [57] PROVIS J L, BERNAL S A. Geopolymers and related alkali-activated materials[J]. Annu Rev Mater Res, 2014, 44: 299–327.
- [58] PALOMO A, KRIVENKO P, GARCIA-LODEIRO I, et al. A review on alkaline activation: New analytical perspectives[J]. Mater Constr, 2014, 64(315): e022.
- [59] CASTILLO H, COLLADO H, DROGUETT T, et al. State of the art of geopolymers: A review[J]. e-Polymers, 2022, 22(1): 108–124.
- [60] WANG Y-S, ALREFAEI Y, DAI J-G. Silico-aluminophosphate and alkali-aluminosilicate geopolymers: A comparative review[J]. Front Mater, 2019, 6: 106.
- [61] QAIDI S, NAJM H M, ABED S M, et al. Fly ash-based geopolymer composites: A review of the compressive strength and microstructure analysis[J]. Materials, 2022, 15(20): 7098.
- [62] LIEW Y M, HEAH C Y, MOHD MUSTAFA A B, et al. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review[J]. Prog Mater Sci, 2016, 83: 595–629.
- [63] DAVIDOVITS J. Geopolymer chemistry and sustainable development[C]//Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions, Geopolymer 2005 Conference, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 2005: 9–15.
- [64] KHALE D, CHAUDHARY R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review[J]. J Mater Sci, 2007, 42(3): 729–746.
- [65] 曹德光, 苏达根, 宋国胜. 低模数硅酸钠溶液的结构及其键合反应特性[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(8): 1036–1039.
- CAO Deguang, SU Dagen, SONG Guosheng. J Chin Ceram Soc, 2004, 32(8): 1036–1039.
- [66] 刘泽, 周瑜, 孔凡龙, 等. 碱激发矿渣地质聚合物微观结构与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(6): 1830–1834.
- LIU Ze, ZHOU Yu, KONG Fanlong, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2017, 36(6): 1830–1834.
- [67] 孔凡龙, 刘泽, 张俱嘉, 等. 矿渣-粉煤灰地质聚合物性能与微观结构的研究[J]. 电子显微学报, 2016, 35(3): 229–234.
- KONG Fanlong, LIU Ze, ZHANG Jujia, et al. J Chin Electron Microsc Soc, 2016, 35(3): 229–234.
- [68] LEE N K, LEE H K. Reactivity and reaction products of alkali-activated, fly ash/slag paste[J]. Constr Build Mater, 2015, 81: 303–312.
- [69] XU H, VAN DEVENTER J S J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals[J]. Int J Miner Process, 2000, 59(3): 247–266.
- [70] PALOMO A, BLANCO-VARELA M T, GRANIZO M L, et al. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin[J]. Cem Concr Res, 1999, 29(7): 997–1004.
- [71] Provis J L, Van Deventer J S J, Lukey G C. A conceptual model for solid-gel transformations in partially reacted geopolymeric systems[M]//Singh J P, Bansal N P, Kriven W M. Ceramic Transactions Series: Vol. 165. 1st ed. Wiley, 2006: 47–70.
- [72] ZHANG B, MACKENZIE K J D, BROWN I W M. Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate[J]. J Mater Sci, 2009, 44(17): 4668–4676.
- [73] YAN H, CUI X M, JIN M, et al. The hydrothermal transformation of solid geopolymers into zeolites[J]. Microporous Mesoporous Mater,

- 2012, 161: 187–192.
- [74] MATSIMBE J, DINKA M, OLUKANNI D, et al. Geopolymer: A systematic review of methodologies[J]. *Materials*, 2022, 15(19): 6852.
- [75] ZHOU S Q, LU C H, ZHU X Y, et al. Upcycling of natural volcanic resources for geopolymer: Comparative study on synthesis, reaction mechanism and rheological behavior[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 268: 121184.
- [76] ZHANG B F, GUO H Z, YUAN P, et al. Geopolymerization of halloysite via alkali-activation: Dependence of microstructures on precalcination[J]. *Appl Clay Sci*, 2020, 185: 105375.
- [77] 荀小伟, 肖亚雄, 张佰发, 等. 碱激发地聚物的反应机理、性能与应用的研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2023(6): 83–90.
- XUN Xiaowei, XIAO Yaxiong, ZHANG Baifa, et al. Multipurp Util Miner Resour, 2023(6): 83–90.
- [78] 陶文宏, 付兴华, 孙凤金, 等. 地聚合物胶凝材料性能与聚合机理的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2008, (04): 730–735+739.
- TAO Wenhong, FU Xinghua, SUN Fengjin, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2008, (04): 730–735, 739.
- [79] SHI C J, JIMÉNEZ A F, PALOMO A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement[J]. *Cem Concr Res*, 2011, 41(7): 750–763.
- [80] ADAMIEC P, BENEZET J C, BENHASSAINE A. Pozzolan reactivity of silico-aluminous fly ash[J]. *Particuology*, 2008, 6(2): 93–98.
- [81] LOTHENBACH B, SCRIVENER K, HOOTON R D. Supplementary cementitious materials[J]. *Cem Concr Res*, 2011, 41(12): 1244–1256.
- [82] JIAO X K, ZHANG Y M, CHEN T J, et al. Geopolymerisation of a silica-rich tailing[J]. *Miner Eng*, 2011, 24(15): 1710–1712.
- [83] 刘景锦, 罗昊鹏, 雷华阳, 等. 碱激发地质聚合物固化软土的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(2): 565–574.
- LIU Jingjin, LUO Haopeng, LEI Huayang, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2023, 42(2): 565–574.
- [84] LI C, SUN H H, LI L T. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements[J]. *Cem Concr Res*, 2010, 40(9): 1341–1349.
- [85] PUERTAS F, PALACIOS M, MANZANO H, et al. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2011, 31(12): 2043–2056.
- [86] BROUGH A R, ATKINSON A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars Part I. Strength, hydration and microstructure[J]. *Cem Concr Res*, 2002, 32(6): 865–879.
- [87] SUN B B, YE G, DE SCHUTTER G. A review: Reaction mechanism and strength of slag and fly ash-based alkali-activated materials[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 326: 126843.
- [88] 郭晓璐, 施惠生, 夏明. 不同钙源对地聚合物反应机制的影响研究[J]. *材料研究学报*, 2016, 30(5): 348–354.
- GUO Xiaolu, SHI Huisheng, XIA Ming. *Chin J Mater Res*, 2016, 30(5): 348–354.
- [89] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A, CRIADO M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model[J]. *Cem Concr Res*, 2005, 35(6): 1204–1209.
- [90] CRISTELO N, GLENDINNING S, FERNANDES L, et al. Effect of calcium content on soil tabilizedon with alkaline activation[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 29: 167–174.
- [91] 崔潮, 彭晖, 刘扬, 等. 矿渣掺量及激发剂模数对偏高岭土基地聚物常温固化的影响[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(4): 535–542.
- CUI Chao, PENG Hui, LIU Yang, et al. *J Build Mater*, 2017, 20(4): 535–542.
- [92] PARTHIBAN D, VIJAYAN D S, KODA E, et al. Role of industrial based precursors in the stabilization of weak soils with geopolymer—A review[J]. *Case Stud Constr Mater*, 2022, 16: e00886.
- [93] HUANG J X, KOGBARA R B, HARIHARAN N, et al. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 305: 124685.
- [94] YAO J L, QIU H J, HE H, et al. Application of a soft soil stabilized by composite geopolymer[J]. *J Perform Constr Facil*, 2021, 35(4): 04021018.
- [95] XIANG J C, LIU L P, HE Y, et al. Early mechanical properties and microstructural evolution of slag/metakaolin-based geopolymers exposed to karst water[J]. *Cem Concr Compos*, 2019, 99: 140–150.
- [96] 熊浩. 滨海相沉积淤泥质土固化配方优化及应用性能研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- XIONG Hao. Optimization of solidification formula and application performance of coastal ediment silty soil[D]. Chengdu: Xihua University, 2022.
- [97] 刘景锦, 罗昊鹏, 雷华阳, 等. 碱激发地聚物固化海相淤泥质软土抗压强度及固化机制研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(7): 2745–2754.
- LIU Jingjin, LUO Haopeng, LEI Huayang, et al. *J Railw Sci Eng*, 2024, 21(7): 2745–2754.
- [98] 杨斌财, 刘维正, 余勇, 等. 初始含水率和有机质对水泥土强度影响规律试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(10): 3798–3808.
- YANG Bincai, LIU Weizheng, YU Yong, et al. *J Railw Sci Eng*, 2023, 20(10): 3798–3808.
- [99] 王朝辉, 张同浩, 问鹏辉, 等. 多源固废基浇筑式固化淤泥质土组成设计及性能调控[J/OL]. *复合材料学报*, 2025: 1–15. (2025–05–30). <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250530.002>.
- WANG Chaohui, ZHANG Tonghao, WEN Penghui, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2025: 1–15. (2025–05–30). <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250530.002>.
- [100] ZHU J F, TAO Y L, XU R Q, et al. Investigation on the optimal formulation and mechanism of marine organic silt improved with magnesium-cement-based stabilizer[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 341: 127233.
- [101] TREMBLAY H, DUCHESNE J, LOCAT J, et al. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement[J]. *Can Geotech J*, 2002, 39(3): 535–546.
- [102] 谈云志, 柯睿, 陈君廉, 等. 碱溶液预降解淤泥有机质的效果与机制讨论[J]. *岩土力学*, 2020, 41(5): 1567–1572.
- TAN Yunzhi, KE Rui, CHEN Junlian, et al. *Rock Soil Mech*, 2020, 41(5): 1567–1572.
- [103] 李胜, 张红日, 王桂尧, 等. 基于响应面法的碱激发地聚物固化淤泥质土试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(12): 4438–4448.
- LI Sheng, ZHANG Hongri, WANG Guiyao, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2023, 42(12): 4438–4448.
- [104] 陈忠清, 朱泽威, 吕越. 粉煤灰基地聚合物加固土的强度及抗冻融性能试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 100–108.
- CHEN Zhongqing, ZHU Zewei, LV Yue. *Hydroge Eng Geol*, 2022, 49(4): 100–108.
- [105] ODEH N A, AL-RKABY A H J. Strength, Durability, and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil[J]. *Case Stud Constr Mater*, 2022, 16: e00988.
- [106] WANG S N, SU J, WU Z J, et al. Silty clay stabilization using metakaolin-based geopolymer binder[J]. *Front Phys*, 2021, 9: 769786.

- [107] YAGHOUBI M, ARULRAJAH A, DISFANI M M, et al. Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil[J]. *Soils Found*, 2018, 58(3): 716–728.
- [108] LORENZO G A, BERGADO D T. Fundamental parameters of cement-admixed clay: New approach[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2004, 130(10): 1042–1050.
- [109] HORPIBULSUK S, RACHAN R, SUDDEEPONG A. Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay[J]. *Constr Build Mater*, 2011, 25(4): 1521–1531.
- [110] BUSHRA I, ROBINSON R G. Effect of fly ash on cement admixture for a low plasticity marine soil[J]. *Adv Civ Eng Mater*, 2013, 2(1): 608–621.
- [111] POURAKBAR S, HUAT B B K, ASADI A, et al. Model study of alkali-activated waste binder for soil stabilization[J]. *Int J Geosynth Ground Eng*, 2016, 2(4): 35.
- [112] PHOO-NGERNKHAM T, MAEGAWA A, MISHIMA N, et al. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 91: 1–8.
- [113] NEMATOLLAHI B, SANJAYAN J. Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer[J]. *Mater Des*, 2014, 57: 667–672.
- [114] RIOS S, RAMOS C, VIANA DA FONSECA A, et al. Mechanical and durability properties of a soil tabilized with an alkali-activated cement[J]. *Eur J Environ Civ Eng*, 2019, 23(2): 245–267.
- [115] CRISTELO N, GLENDINNING S, FERNANDES L, et al. Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil tabilizedon[J]. *Acta Geotech*, 2013, 8(4): 395–405.
- [116] SUKMAK P, HORPIBULSUK S, SHEN S L. Strength development in clay–fly ash geopolymer[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 40: 566–574.
- [117] SUKPRASERT S, HOY M, HORPIBULSUK S, et al. Fly ash based geopolymer tabilizedon of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications[J]. *Road Mater Pavement Des*, 2021, 22(2): 357–371.
- [118] 吴俊, 征西遥, 杨爱武, 等. 矿渣-粉煤灰基地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 647–655.
WU Jun, ZHENG Xiyao, YANG Aiwu, et al. *Rock Soil Mech*, 2021, 42(3): 647–655.
- [119] 徐日庆, 朱坤垵, 黄伟, 等. 淤泥质土固化及路用性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(3): 167–174.
XU Riqing, ZHU Kunlong, HUANG Wei, et al. *J Hunan Univ Nat Sci*, 2022, 49(3): 167–174.
- [120] PHETCHUAY C, HORPIBULSUK S, ARULRAJAH A, et al. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer[J]. *Appl Clay Sci*, 2016, 127–128: 134–142.
- [121] LUO Y P, MENG J H, WANG D F, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructure of metakaolin based geopolymer stabilized silty clay[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 316: 125662.
- [122] 何华. 地聚合物处理软土地基性能与应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
HE Hua. Study on performance and application of geopolymer in soft soil foundation treatment[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [123] GHADIR P, ZAMANIAN M, MAHBUBI-MOTLAGH N, et al. Shear strength and life cycle assessment of volcanic ash-based geopolymer and cement stabilized soil: A comparative study[J]. *Transp Geotech*, 2021, 31: 100639.
- [124] ABDULLAH H H, SHAHIN M A, WALSKE M L. Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag[J]. *Soils Found*, 2019, 59(6): 1906–1920.
- [125] 胡勇, 王观次, 王倩. 基于模型试验的地聚物搅拌桩加固淤泥质土地基承载变形特征研究[J]. *广东土木与建筑*, 2022, 29(7): 21–24.
HU Yong, WANG Guanci, WANG Qian. *Guangdong Archit Civ Eng*, 2022, 29(7): 21–24.
- [126] 牛家栋, 杜运兴, 张自成, 等. 矿渣基地聚物流态盾构固化土的性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(6): 2176–2185.
NIU Jiadong, DU Yunxing, ZHANG Zicheng, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2024, 43(6): 2176–2185.
- [127] 杨振甲, 何猛, 吴杨, 等. 矿渣-粉煤灰地聚合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. *Bull Chin Ceram Soc*, 2022, 41(2): 693–703, 724.
- [128] 郑娜, 马巍, 郝慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 132–137.
ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. *J Glaciol Geocryol*, 2015, 37(1): 132–137.
- [129] 柯睿, 汪洪星, 谈云志, 等. 冻融循环对固化淤泥土力学性质的影响[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(8): 136–139.
KE Rui, WANG Hongxing, TAN Yunzhi, et al. *J Changjiang River Sci Res Inst*, 2019, 36(8): 136–139.
- [130] FU Y W, CAI L C, WU Y G. Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2011, 25(7): 3144–3148.
- [131] SAHOO S, PRASAD SINGH S. Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 328: 127078.
- [132] TIAN L Y, HE D P, ZHAO J N, et al. Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review[J]. *Rev Adv Mater Sci*, 2021, 60(1): 1–14.
- [133] 范公俊. 固化淤泥的收缩性质及其控制措施研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
FAN Gongjun. Study on the shrinkage property and shrinkage control of solidified dredged material[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [134] ADHIKARI B, KHATTAK M J, ADHIKARI S. Mechanical and durability characteristics of flyash-based soil-geopolymer mixtures for pavement base and subbase layers[J]. *Int J Pavement Eng*, 2021, 22(9): 1193–1212.
- [135] SREELAKSHMI S, HUCHEGOWDA B K, CHITHALOORI S, et al. Strength and durability behaviour of geopolymer-stabilized soil[M]//*Geotechnical Characterization and Modelling*. Singapore: Springer Singapore, 2020: 585–591.
- [136] RAJASEKARAN G. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays[J]. *Ocean Eng*, 2005, 32(8–9): 1133–1159.
- [137] DAY R W, ROLLINGS R S, BURKES J P, et al. Sulfate attack on cement-stabilized sand[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2000, 126(10): 944–946.
- [138] 贾艳涛, 张云升, 张文华. 矿渣基地聚合物材料的制备、特性及机理研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(7): 120–125.
JIA Yantao, ZHANG Yunsheng, ZHANG Wenhua. *J Wuhan Univ Technol*, 2009, 31(7): 120–125.

- [139] JEREMIAH J J, ABBEY S J, BOOTH C A, et al. Geopolymers as alternative sustainable binders for tabilizedon of clays: A review[J]. *Geotechnics*, 2021, 1(2): 439–459.
- [140] JIANG N J, DU Y J, LIU K. Durability of lightweight alkali-activated ground granulated blast furnace slag (GGBS) stabilized clayey soils subjected to sulfate attack[J]. *Appl Clay Sci*, 2018, 161: 70–75.
- [141] YU B W, DU Y J, JIN F, et al. Multiscale study of sodium sulfate soaking durability of low plastic clay stabilized by reactive magnesia-activated ground granulated blast-furnace slag[J]. *J Mater Civ Eng*, 2016, 28(6): 04016016.
- [142] AHMED A, ISSA U H. Stability of soft clay soil tabilized with recycled gypsum in a wet environment[J]. *Soils Found*, 2014, 54(3): 405–416.
- [143] 徐子芳, 杨政, 邹小童, 等. 煤系废物地聚合物稳定/固化重金属离子效果研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(3): 812–818.
- XU Zifang, YANG Zheng, ZOU Xiaotong, et al. *Acta Sci Circumstantiae*, 2015, 35(3): 812–818.
- [144] 章定文, 王安辉. 地聚合物胶凝材料性能及工程应用研究综述[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(5): 13–38.
- ZHANG Dingwen, WANG Anhui. *J Archit Civ Eng*, 2020, 37(5): 13–38.
- [145] 张玮, 赵霞, 李燕. 地聚合物在软土地基处理中的性能及应用[J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 2021, 37(5): 74–77.
- ZHANG Wei, ZHAO Xia, LI Yan. *J Kunming Metall Coll*, 2021, 37(5): 74–77.
- [146] KALPOKAITĖ-DIČKUVIENĖ R, BALTUŠNIKAS A, LEVINSKAS R, et al. Incinerator residual ash–Metakaolin blended cements: Effect on cement hydration and properties[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 206: 297–306.

作者贡献声明：

吴 昊：概念构思，方法论，调查研究，数据分析，撰写、审阅与编辑

张泽鹏：调查研究，数据分析，撰写初稿

宋卫民：提供资源，方法论，审阅与编辑

张 德：概念构思，监督指导，经费获取，审阅与编辑

程志强：提供资源，监督指导，审阅与编辑

满 立：提供资源，经费获取

斯碧峰：提供资源，调查研究

张甲峰：提供资源，监督指导

Geopolymer-Stabilized Silty Soil: From Microscopic Mechanisms to Macroscopic Performance

WU Hao¹, ZHANG Zepeng¹, SONG Weimin¹, ZHANG De², CHENG Zhiqiang², MAN Li³, SI Bifeng³, ZHANG Jiafeng⁴

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Shanghai Highway and Bridge Group Corporation Limited, Shanghai 200433, China; 3. Shanghai Airport Authority, Shanghai 200335, China; 4. Shanghai Civil Aviation New Era Airport Design and Research Institute Corporation Limited, Shanghai 200335, China)

Extend Abstract

Silty soil, prevalent across China's coastal regions and inland river basins, significantly impedes sustainable infrastructure development due to its problematic engineering characteristics like high water content, low permeability, and weak structure. To overcome this challenge, soil stabilization technique for the beneficial reuse of silty soil is regarded as a potential solution. However, conventional inorganic binders like cement and lime come with substantial drawbacks, *i.e.*, high carbon emissions, considerable energy consumption, and limited capacity for industrial solid waste assimilation. These increasingly conflict with China's "dual carbon" goals for green transformation and sustainable growth. In this context, geopolymer as a novel type of green cementitious material formed through alkali activation using silicon-aluminum-rich industrial solid wastes (such as slag and fly ash) as precursors offers a highly promising sustainable solution. With near-zero carbon emissions, high reactivity, and remarkable waste valorization properties, it enables both the efficient utilization of silty soil and the synergistic disposal of industrial solid waste. This review systematically represents the research progress on the stabilization mechanisms, macroscopic properties, and key scientific issues of geopolymer-stabilized silty soil from a multi-scale perspective. This review aims to provide a theoretical basis for developing high-performance geopolymer-based silty soil solidifiers and proposing efficient silty soil disposal strategies, while offering practical references for promoting the resource utilization of silty soil and the synergistic treatment of industrial solid waste.

First, the physicochemical properties and engineering characteristics of silty soil in different districts of China are analyzed. It is indicated that although the properties of silty soil exhibit certain regional variations, they all share adverse engineering characteristics such as high water content, high void ratio, high thixotropy, low permeability, and low stability. These unfavorable properties severely limit their engineering applications. As a novel inorganic chemical stabilization method, alkali-activated geopolymer stabilization technology has demonstrated broad application prospects in the field of silty soil improvement due to its excellent engineering performance and low-carbon, environmentally friendly features.

In terms of microscopic mechanisms, this review introduces the formation principles of geopolymers, including their reaction processes, strength formation mechanisms, and differences among various types of geopolymers. The reaction mechanisms of different calcium-based geopolymer-solidified soils are revealed. The results show that the strength of low-calcium geopolymer-stabilized soil primarily stems from the N-A-S-H gel with a three-dimensional network structure, while the reaction process of high-calcium geopolymer-stabilized soil is more complex, resulting in diverse cementitious products. Subsequently, the microscopic mechanism of geopolymer-stabilized silty soil is analyzed in detail. Specifically, silicon-aluminum-rich geopolymer

precursors such as slag and fly ash, as well as SiO_2 and Al_2O_3 in the silty soil, gradually dissolve and undergo a structural destruction under the action of alkali activators. This is followed by repolymerization, generating a large amount of flocculent gel substances, primarily C-(A)-S-H and N-A-S-H. These gel substances adhere on the surface of vitreous bodies, with some condensing and hardening to form a polymer skeleton, while others encapsulate soil particles and fill the pores between them, forming aggregates. The polymer skeleton supports and binds the soil particle aggregates, constituting the spatial structural system of geopolymer-stabilized soil, thereby enhancing its mechanical properties. The mechanisms behind the superior performance of geopolymer-stabilized silty soil are further explained by microanalytical methods.

In terms of macroscopic properties, the results of some strength tests on geopolymer-stabilized silty soil conducted globally in recent years are systematically summarized. Geopolymer-stabilized silty soil exhibits significant advantages over cement-stabilized soil in terms of unconfined compressive strength, shear strength, and foundation bearing capacity. Its mechanical properties are affected by multiple factors, among which alkali activator concentration, modulus of alkali solution, precursor type, and dosage are studied for their patterns. Optimizing reaction conditions can further enhance the mechanical properties of stabilized soil to some extent. Moreover, geopolymer-stabilized silty soil also demonstrates excellent durability, with significant improvements in water stability, freeze–thaw resistance, wet-dry cycle resistance, and chemical corrosion resistance, compared to cement-based materials. It exhibits a desirable environmental adaptability. Geopolymers can reconstruct the soil skeleton through their unique alkali activation and geopolymerization processes, significantly enhancing the mechanical properties and durability of silty soil, thereby providing a solution for the treatment and reinforcement of silty soil.

Summary and prospects Utilizing geopolymers to stabilize silty soil and applying it in engineering construction represents a highly promising approach for resource utilization. This method enables efficient and sustainable use of silty soil and promotes large-scale consumption of industrial solid waste in China, demonstrating exceptional environmental, economic, and social benefits. Geopolymer-stabilized silty soil exhibits excellent mechanical properties, with improvements in compressive strength, shear strength, and bearing capacity, compared to conventional inorganic stabilized soil. In addition, it also shows significant advantages in key durability aspects such as water stability and freeze–thaw resistance. This performance enhancement is a macroscopic reflection of its unique microstructure and chemical bonding capabilities.

Although the existing experimental research on geopolymer-stabilized silty soil has made significant progress in macroscopic mechanical properties and microstructural characteristics, the in-depth analysis of its microscopic stabilization mechanisms and systematic studies on the influence of organic matter content on stabilization effects still require a further attention. Moreover, research on stabilized silty soil predominantly focuses on single-component geopolymer systems, while studies on binary or multicomponent geopolymer-stabilized soil remain insufficient. The application of geopolymers in soil stabilization still faces severe challenges, such as the lack of unified testing methods, performance evaluation standards, and engineering design specifications. Future research should focus on investigating the complex interfacial reactions and bonding mechanisms between geopolymers and silty soil particles, actively expanding exploration of silty soil stabilization under multicomponent geopolymer systems, and accelerating the establishment of design and construction specifications for geopolymer-stabilized soil in various engineering applications. Building a full-lifecycle standardized system can provide a technical assurance for the large-scale promotion and application of this technology.

Keywords silty soil; industrial solid waste; geopolymer; mechanism; performance