

综述论文

DOI: 10.63221/ecsp.v2i02.1-6

亮点:

- 系统综述碱激发污泥资源化研究进展, 梳理核心技术体系。
- 阐明多场耦合预处理与重金属稳定化关键作用机制。
- 指明现存瓶颈, 提出工程化与标准化发展方向。

*通讯作者邮箱:

man200177@163.com

英文引用: Chen Shoukai et al., 2026. A Review on Resource Utilization of Sludge via Alkali Activation. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (02), 1-6.

中文引用: 陈守开等., 2026. 碱激发污泥资源化利用研究综述. 工程科学与实践, 2 (02), 1-6.

稿件处理节点:

接收	2026 年 5 月 14 日
修订	2026 年 5 月 19 日
接受	2026 年 5 月 21 日
发表	2026 年 5 月 26 日

基金资助:

河南省重点研发专项(261111231200);河南省自然科学基金(262300421362);河南省自然科学基金(262300421965);河南省科技攻关项目(262102320104);河南省科技攻关项目(262102320132)。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

碱激发污泥资源化利用研究综述

陈守开^{1,*}, 孙鲁予², 孙缔英², 李广辉³, 蒋岩初³, 荣幸¹¹ 华北水利水电大学, 郑州 450046² 河南水利与环境职业学院, 郑州 450008³ 河南水谷创新科技研究院有限公司, 郑州 450000

摘要 碱激发污泥资源化利用是实现固废低碳处置与建材绿色转型的重要路径。本文系统综述了碱激发污泥在预处理与反应活性、材料性能优化、固化/稳定化应用及环境效益等方面的研究进展。机械-热-化学多场耦合预处理可使污泥活性硅铝组分浸出浓度显著提升, 最优工艺下碱激发试样 28 d 抗压强度可达 25.4MPa; 碱激发污泥基胶凝材料经配合比调控, 抗压强度最高可达 57.8MPa, 部分体系碳减排比例较传统水泥超 40%; 碱激发地聚物凭借物理包裹、化学吸附与离子络合等多重机制, 在污泥固化与重金属稳定化方面展现出优于传统水泥的潜力。当前研究仍面临预处理通用性差、长期耐久性研究不足、固化机理认识不深及标准体系缺失等挑战。未来需深化多学科交叉研究, 构建从微观机制到工程应用的全链条技术体系, 推动碱激发污泥技术的规模化与标准化发展。

关键词: 碱激发技术; 污泥资源化; 预处理; 固化/稳定化

A Review on Resource Utilization of Sludge via Alkali Activation

Chen Shoukai^{1,*}, Sun Luyu², Sun Diying², Li Guanghui³, Jiang Yanchu³, Rong Xing¹¹ North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China² Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450008, China³ Henan Shuigu Innovation Technology Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China

Abstract The resourceful utilization of sludge through alkali activation is an important path to achieve low-carbon disposal of solid waste and the green transformation of building materials. This paper systematically reviews the research progress of alkali-activated sludge in pretreatment and reaction activity, material performance optimization, solidification/stabilization applications, and environmental benefits. Mechanical-thermal-chemical multi-field coupling pretreatment can significantly increase the leaching concentration of active silicon and aluminum components in sludge, and the 28-day compressive strength of alkali-activated specimens can reach 25.4 MPa under the optimal process. Through mix proportion regulation, the maximum compressive strength of alkali-activated sludge-based cementitious materials can reach 57.8 MPa, and the carbon emission reduction ratio of some systems exceeds 40% compared with traditional cement. Alkali-activated geopolymers, with multiple mechanisms such as physical encapsulation, chemical adsorption, and ion complexation, show superior potential in sludge solidification and heavy metal stabilization compared to traditional cement. Current research still faces challenges such as poor universality of pretreatment, insufficient long-term durability studies, shallow understanding of solidification mechanisms, and the absence of a standard system. In the future, it is necessary to deepen interdisciplinary research, build a full-chain technology system from micro-mechanism to engineering application, and promote the large-scale and standardized development of alkali-activated sludge technology.

Keywords: Alkali-activation technology; Sludge resource utilization; Pretreatment; Solidification/stabilization

1. 引言

随着城镇化与工业化快速发展,污泥产量持续增长,传统填埋、焚烧、堆肥等处置方式存在资源浪费、二次污染、碳排放高等问题,亟需低碳高效的资源化新技术。碱激发技术以富硅铝固废为前驱体,通过碱性激发形成高性能胶凝体系,具有低碳、高强、重金属稳定化效果好等优势,为污泥资源化利用提供了重要路径。近年来,国内外在碱激发污泥预处理改性、反应活性提升、胶凝材料制备、固化/稳定化及环境效益等方面取得系列进展,展现出在建材、土体稳定、污染修复等领域的应用潜力。但目前仍存在预处理通用性差、长期耐久性不足、固化机理不清晰、标准体系缺失等瓶颈,制约技术规模化应用。基于此,本文系统梳理碱激发污泥资源化利用的相关研究成果,重点剖析预处理技术优化、胶凝材料性能调控、固化稳定化机制及环境效益,总结现有研究的核心结论与关键瓶颈,明确未来研究方向,为该技术的工程化落地与标准化发展提供理论参考与技术支持。

2. 碱激发污泥的预处理技术与反应活性研究

污泥预处理是提升碱激发反应活性、保障固化体力学性能与结构稳定性的关键环节,现有研究主要围绕机械活化、热活化、化学改性及多手段耦合活化展开,已形成相对系统的技术体系。Wang 等^[1]对市政污泥进行机械-热耦合活化研究,通过球磨与煅烧协同处理,揭示不同工艺参数对污泥反应活性的影响规律,结果表明,在 750℃煅烧 1h 并配合 5min 球磨的条件下,污泥中铝、硅离子浸出浓度最高,碱激发试样 28d 抗压强度可达 25.4MPa,单位强度碳排放低至 4.1 kg·t⁻¹·MPa⁻¹,实现反应活性提升与低碳效益的统一。MohsinAli^[2]在综述中指出,850℃煅烧可显著提高污泥灰(SSA)的非晶相含量与火山灰反应活性,煅烧后污泥灰与飞灰、炉渣、红泥等辅助前体复配,可促进 N-A-S-H 与 C-A-S-H 凝胶生成,直接决定材料强度与耐久性;未煅烧污泥因有机质含量高、硅铝组分晶相稳定,反应活性低,难以满足工程应用要求。杨静等^[3]针对铝污泥提出低温煅烧预处理思路,350℃煅烧后的铝污泥灰在碱激发作用下,可促进水化铝酸钙(C-A-H)与水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶生成,与高温煅烧相比,低温处理大幅降低能耗,更适合工业化推广。Zhang 等^[4]从污染修复角度,采用碱修饰与氮掺杂协同处理

污泥基生物炭,使生物炭表面粗糙度提高、孔隙结构优化、电子转移能力增强,用于激活过氧单硫酸盐降解有机污染物时,5 次循环后降解率仍保持 90.7%,为污泥在环境治理领域的应用提供了新的预处理路径。

当前污泥预处理技术已由单一活化向多场耦合活化方向发展,机械活化与热活化结合、化学改性与元素掺杂协同成为主流,核心目标是破坏污泥稳定晶相、分解有机质、释放活性硅铝组分,提高碱激发反应程度。但现有研究仍存在明显不足:不同类型污泥的最优预处理参数不统一,缺乏通用技术标准;预处理过程的能耗、成本与环境影响分析不足,难以支撑规模化应用;预处理对污泥中重金属、有机污染物的迁移转化机制尚不明确,部分处理方式可能增加污染物释放风险,这些问题均需在后续研究中重点解决。

3. 碱激发污泥基胶凝材料的性能优化研究

碱激发污泥基胶凝材料以污泥或污泥灰为主要前驱体,在碱激发剂作用下形成胶凝体系,可部分或全部替代硅酸盐水泥,用于混凝土、砂浆、固化土等制品,其性能优化主要围绕配合比设计、掺合料协同、激发剂选型等方面开展。

3.1 配合比与掺合料协同优化研究

Chen 等^[5]以制革污泥为原料制备碱激发复合水泥(AACC),系统研究污泥掺量与碱当量对材料工作性、水化进程及抗压强度的影响,结果表明,污泥掺量为 20%-40%时可提高早期抗压强度,20%掺量组 3d 强度较对照组提高 6.58%;过量污泥会抑制水泥水化,降低后期强度;碱当量为 9%时,材料抗压强度达到最大值 37.4MPa。崔祎菲等^[6]以碱激发矿渣替代水泥制备超高性能碱激发混凝土(UHPAAC),探讨水玻璃模数与碱当量的影响,结果显示,水玻璃模数 1.5、碱当量 6%为最优配比,试样 7d 抗压强度超过 100MPa,达到 28d 强度的 80.2%-92.4%,抗氯离子渗透性能优于传统超高性能混凝土,且碳排放与能耗显著降低。肖惊等^[7]采用正交试验优化碱激发矿渣-粉煤灰-污泥灰地聚物配合比,确定污泥灰掺量 10%、水胶比 0.5、水玻璃模数 1.1、液固比 0.4 为最优方案,28d 抗压强度达 54.4MPa,抗折强度达 7.75MPa,并明确水胶比对工作性与力学强度的影响权重最高,如图 1 所示为地聚物反应原理。贺盛等^[8]将污泥灰与偏高岭土复掺制备胶砂,发现偏高岭土

掺量 12%、碱掺量 5% 时, 试样抗压强度最高为 57.8 MPa, 并建立抗压强度与孔隙率、无害孔占比的二元线性模型, 为材料性能预测提供支撑。

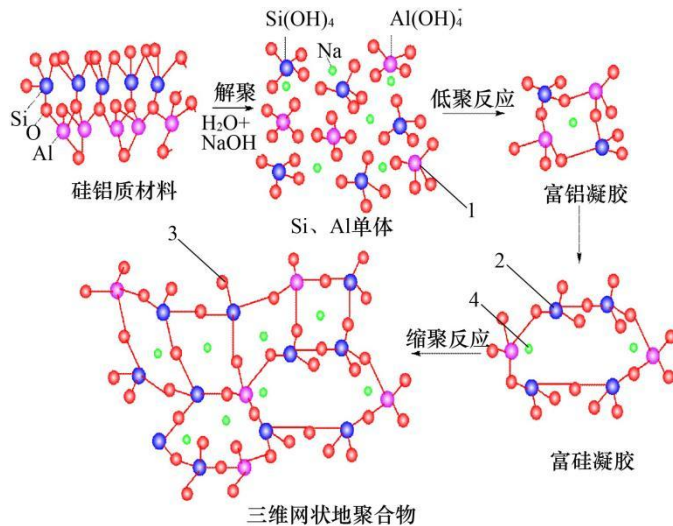


图 1 地聚物反应原理^[7](1-Al; 2-Si; 3-O; 4-Na.)

3.2 激发剂选型与改性优化研究

在碱激发剂选择上, NaOH 与 Na_2SiO_3 复合激发的应用最为广泛, 其激发效果优于单一碱组分, 可平衡反应速率与体积稳定性, 避免碱度过大导致开裂、收缩增大等问题。牛昆等^[9]针对碱激发海水海砂混凝土韧性差、干燥收缩大的问题, 引入 PVA 纤维改性, 纤维体积掺量 2.0% 时, 极限弯曲承载力提升 151.30%, 28d 干燥收缩率降低 34.62%; 微观分析表明, 海水海砂与纤维的协同作用可优化界面结合, 提高裂缝扩展过程中的能量耗散。冯德銮等^[10]研究碱激发矿粉/垃圾焚烧飞灰固化浓缩液污泥的动态力学响应, 结果表明, 飞灰掺量 15%-20% 时, 试样动态强度与动力增长因子显著提高; 过量飞灰会抑制 N-A-S-H 凝胶生成, 但可形成封闭气孔, 缓解应力集中, 抑制裂缝扩展, 提高抗冲击性能。

3.3 研究现状与局限

总体来看, 碱激发污泥基胶凝材料的性能优化已取得丰富成果, 明确了污泥掺量、碱当量、水胶比、掺合料种类等关键因素的影响规律, 形成一系列实验室最优配合比。但研究仍存在明显局限: 多数试验在标准养护条件下开展, 针对冻融、腐蚀、干湿循环等实际工程环境的长期耐久性能研究不足; 材料体积稳定性、收缩开裂、长期强度衰减等问题尚

未得到有效解决; 不同来源污泥成分差异大, 性能优化方案通用性差, 难以形成标准化制备工艺。

4. 碱激发技术在污泥固化/稳定化中的应用研究

固化/稳定化是实现污泥无害化、减量化、资源化的重要手段, 传统水泥固化存在强度低、水稳性差、重金属浸出风险高等缺陷, 碱激发地聚物凭借胶凝效率高、结构致密、稳定化效果好等优势, 成为替代传统水泥的理想材料, 相关研究主要集中在固化机理、性能提升、污染物控制等方面。

4.1 固化机理与基础性能研究

戴君等^[11]系统总结碱激发地聚物固化市政污泥的研究进展, 指出激发剂类型、前驱体种类及掺量是影响固化体无侧限抗压强度的关键因素; 如图 2 所示为碱激发地聚物胶凝材料对污泥中重金属离子固定机制示意图, 地聚物可通过物理包裹、化学吸附、离子络合与沉淀等多重作用稳定污泥中重金属, 降低浸出毒性, 为污泥低碳固化提供理论依据。邓景文等^[12]采用碱激发粉煤灰-炉渣协同水泥固化水库清淤底泥, 确定粉煤灰 7.5%、炉渣 12.5%、氢氧化钙 0.75% 为最优掺量, 固化体 28d 无侧限抗压强度为 2.856MPa, 对 Pb、As 等 6 种重金属固化率均超过 90%。彭玉丽等^[13]研究碱激发固化疏浚淤泥的工程特性, 结果表明, 碱激发可显著提高固化土强度, 3-7 d 为强度快速增长期; 碱含量存在最佳阈值, 过量添加会导致性能下降。

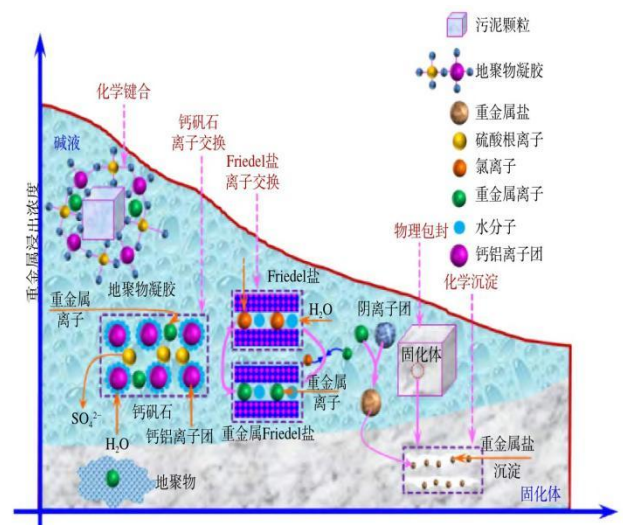


图 2 碱激发地聚物胶凝材料对污泥中重金属离子固定机制示意^[11]

4.2 混凝土材料制备及工程应用相关研究

在建材制备与工程应用领域, 韩立炜等^[14]研究碱激发黄河泥沙基材料的渗透性能, 发现氢氧化钙掺量与渗透系数满足三次多项式关系, 拟合优度 R^2 达 0.95; 碱激发可使孔径由小孔向微孔转变, 小孔分形维数与渗透系数呈负相关, 为防渗工程应用提供支撑。陈守开等^[15]以制革污泥与粉煤灰复配制备碱激发再生混凝土, 结果表明, 碱当量为 9% 时水化反应最充分, 抗压强度与劈拉强度最高, 孔隙率与大孔占比最低, 验证了制革污泥资源化制备混凝土的可行性。贺盛等^[16]研究碱激发粉煤灰-市政污泥混凝土的抗冻融性能, 发现粉煤灰与碱激发体系可缓解污泥对混凝土抗冻性的劣化作用, 粉煤灰掺量 10%、碱当量 4% 时, 冻融循环下质量损失、强度损失最小, 服役寿命可达 16a 以上。张娟等^[17]采用热活化污泥与煤矸石复掺制备地聚物, 900℃ 焙烧 45min 的污泥以 40% 掺量取代煤矸石时, 试样抗压强度达 39.8MPa, 证实高温活化可显著提升污泥反应活性, 为污泥与煤矸石协同利用提供早期技术参考。

4.3 研究现状与现存问题

碱激发技术在污泥固化与稳定化中已逐步由实验室研究向工程应用过渡, 基本明确固化机理与主要影响因素, 实现污泥无害化与资源化协同处置。但仍存在若干关键问题: 固化机理研究多停留在宏观性能与微观形貌关联分析, 分子层面的反应路径、离子迁移与键合机制尚不清晰; 针对重金属-有机物复合污染等复杂污泥体系的固化研究较少, 难以满足实际处置需求; 固化体在酸雨、地下水浸泡等长期环境作用下的稳定性与重金属再溶出风险研究不足, 限制工程推广。

5. 碱激发污泥资源化利用的环境效益与可持续性研究

在低碳发展要求下, 碱激发污泥技术的环境效益与可持续性成为研究重点, 现有研究主要从碳排放、能耗、资源循环、污染控制等维度开展评价。Wang 等^[1]测算表明, 机械-热耦合活化碱激发污泥材料的单位强度碳排放最低, 与传统水泥材料相比碳减排效果显著, 符合绿色建材发展方向。MohsinAli^[2]认为, 污泥灰基碱激发材料可有效降低建材碳足迹, 是水泥的环保替代材料, 但仍面临重金属浸出风险、环境耐久性不足、配合比设计缺乏标准化等挑战, 需进一步完善。Zhang 等^[4]制备的碱修饰氮掺杂污泥基生物炭, 可高效激活过硫酸盐降解有机污染物,

在 pH=3-9 范围内保持高活性, 为工业废水处理与污泥协同利用提供新思路。Chen 等^[5]指出, 将制革污泥用于碱激发建筑材料, 可减少废弃物处置带来的污染与资源消耗, 推动建材行业低碳转型与绿色发展, 为特殊工业固废资源化提供可复制路径。在污染控制与生态修复方面, 贺盛等^[16]研究表明, 碱激发粉煤灰-市政污泥混凝土可改善抗冻融性能, 降低质量与强度损失, 延长结构服役寿命, 提高工程可持续性。

现有研究充分证明碱激发污泥技术具备良好环境友好性, 在碳减排、固废协同利用、污染控制等方面优势明显, 但可持续性评价体系仍不完善: 多数研究仅计算实验室阶段的碳排放与能耗, 缺少原料开采、生产、运输、应用、废弃全生命周期评价; 环境效益量化标准不统一, 研究间可比性差; 技术经济性分析不足, 激发剂成本、预处理成本等因素制约规模化应用, 亟需开展环境-经济-技术综合评价。

6. 总结

本文系统综述了碱激发污泥资源化利用技术的研究进展, 主要结论如下:

(1) 碱激发污泥资源化是固废低碳处置与建材绿色转型的重要路径, 污泥预处理、胶凝材料优化、固化稳定化及环境效益是研究核心, 明确技术体系与应用价值。

(2) 机械-热-化学多场耦合预处理是提升污泥反应活性的关键, 可高效释放活性硅铝组分, 低温煅烧、元素掺杂等工艺兼顾活化效率与低能耗需求。

(3) 碱激发污泥基胶凝材料性能优化成效显著, 经配合比、激发剂调控, 抗压强度可达 30-55MPa, 部分达超高性能水平, 耐久性良好且低碳优势突出。

(4) 碱激发地聚物固化稳定化效果优于传统水泥, 通过物理包裹、化学吸附、离子络合多重机制稳定重金属, 固化率超 90%, 适配路基、防渗等工程场景。

(5) 该技术环境友好性突出, 可实现污泥减量化、无害化、资源化, 降低建材碳足迹, 契合“双碳”战略, 但全生命周期评价体系尚不完善。

未来研究应重点关注以下方面: 一是构建分类化、低能耗的预处理技术体系, 解决通用性差、标准缺

未来研究应重点关注以下方面：一是构建分类化、低能耗的预处理技术体系，解决通用性差、标准缺失的问题；二是引入 XRD-Rietveld 精修、SEM-BSE 灰度分析、ITZ 微区定量等先进表征，揭示分子 - 界面

尺度固化机理；三是强化复杂环境下材料长期耐久性与体积稳定性研究，提升工程服役可靠性；四是拓展海洋工程、污染修复等多元应用场景，推动技术规模化、标准化落地。

参考文献

- [1] WANG B, WEI G Q, DONG B Q, et al. Alkali-activation effect on reaction kinetics and microstructure of mechano-thermally treated sewage sludge [J]. Construction and Building Materials, 2026, 514: 145490.
- [2] ALI M. Valorization of sewage sludge ash in alkali-activated materials: A comprehensive review of material properties, reactivity, and future sustainable applications [J]. Chemosphere, 2025, 391: 144724.
- [3] 杨静, 程成, 任昱杰, 等. 碱激发铝污泥灰涂层材料水化特性与耐酸腐蚀特性[J]. 环境工程, 2025, 43(1): 195-203.
- [4] ZHANG Y J, PENG S L, ZHANG S Y, et al. Alkali modification and nitrogen doping synergistically regulate sludge-derived biochar for persulfate activation and organic pollutant degradation [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers(Taiwan Region, China), 2026, 182: 106569.
- [5] CHEN S, LIU B, NGUYEN V M P, et al. Impact of Alkali-Activated Tannery Sludge-Derived Geopolymer Gel on Cement Properties: Workability, Hydration Process, and Compressive Strength [J]. Gels, 2025, 11 (5): 339.
- [6] 崔祎菲, 刘梦华, 张益聪, 等. 超高性能碱激发混凝土的性能及环境影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(5): 1689-1702.
- [7] 肖惊, 唐旭光, 李灵杰, 等. 碱激发矿渣-粉煤灰-污泥灰地聚合物基本性能研究[J]. 工程建设, 2025, 57(10): 46-52.
- [8] 贺盛, 杨红涛, 韦海浪, 等. 碱激发污泥灰-偏高岭土胶砂孔结构与强度关系[J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2023, 48(6): 1340-1351.
- [9] 牛昆, 徐建光, 冯海暴, 等. PVA 纤维对碱激发海水海砂混凝土韧性特征与收缩性能的影响机制[J/OL]. 复合材料学报, 2026.
- [10] 冯德奎, 郑钧升, 罗志城, 等. 碱激发矿粉/垃圾焚烧飞灰固化浓缩液污泥的动态力学响应试验研究[J/OL]. 土木工程学报, 2026.
- [11] 戴君, 雷志娟, 陈亿煌, 等. 碱激发地聚物胶凝材料固化/稳定化市政污泥研究进展与评述[J]. 广州建筑, 2025, 53(12): 108-120.
- [12] 邓景文, 吴旭. 碱激发粉煤灰-炉渣协同水泥固化水库清淤底泥试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(7): 23-27.
- [13] 彭玉丽, 黄志亮. 碱激发固化疏浚淤泥的工程特性研究与微观机理分析[J]. 四川环境, 2025, 44(3): 131-141.
- [14] 韩立炜, 郭瑞斌, 杨延伟, 等. 黄河泥沙基碱激发材料渗透性能研究[J]. 人民黄河, 2025, 47(10): 154-160.
- [15] 陈守开, 于泽一, 卢鹏, 等. 碱激发制革污泥再生混凝土力学性能及微观特性[J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2025, 46(6): 119-125, 136.
- [16] 贺盛, 夏鑫, 覃志笛, 等. 碱激发下粉煤灰-市政污泥固废基混凝土抗冻融性能[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(3): 277-286.
- [17] 张娟, 张明旭, 徐子芳, 等. 污泥煤矸石复合制备地质聚合物及其性能研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 122-125.