

碱激发地聚合物固化淤泥质软土的研究进展

李英杰¹, 程岗², 卞宇轩¹, 胡世聪¹, 姜铭钰¹, 袁玉通¹, 邵建文^{1,3*}

1. 鲁东大学, 水利土木学院, 山东 烟台, 264025

2. 山东九宏建设集团有限公司, 山东 烟台, 264025

3. 山东省河口海岸与核环境重点实验室, 山东 烟台, 264025

摘要: 以沿海地区淤泥质软土为研究对象, 淤泥质软土具有高含水率、低承载力及易变形等特点, 给工程建设与地基处理带来了较大挑战。针对传统固化材料在环境影响及工程适用性方面存在的问题, 本文系统梳理了碱激发地聚合物固化淤泥质软土的相关研究进展。通过对国内外文献的归纳与分析, 从制备工艺、力学性能、微观结构演化、工程应用及环境效益等方面进行了综述, 探讨了影响固化效果的主要因素及其作用机制。在此基础上, 总结了当前研究中存在的问题, 并对未来研究方向进行了展望, 以期为基础地聚合物固化淤泥质软土的工程应用与技术发展提供参考。

关键词: 碱激发地聚物; 淤泥质软土; 固化; 力学性能; 微观机理

Research progress on alkali-activated geopolymers for solidification of mucky soft soil

Yingjie Li¹, Gang Cheng², Yuxuan Bian¹, Shicong Hu¹, Mingyu Lou¹, Yutong Yuan¹, Jianwen Shao^{1,3*}

1. School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

2. Shandong Jiuhong Construction Group Company Limited, Yantai 264025, China

3. Shandong Key Laboratory of Estuary and Coast & Nuclear Environment, Yantai 264025, China

Abstract: Mucky soft soil is widely distributed in coastal areas and is characterized by high water content, low bearing capacity, and high deformability, which pose significant challenges to engineering construction and foundation treatment. To address the environmental concerns and engineering limitations associated with traditional stabilizing materials, this paper systematically reviews the research progress on alkali-activated geopolymers for the stabilization of mucky soft soil. Through a comprehensive analysis of domestic and international literature, the preparation process, mechanical properties, microstructural evolution, engineering applications, and environmental benefits of alkali-activated geopolymer-stabilized soft soil are summarized. The major factors influencing stabilization performance and their underlying mechanisms are discussed. Furthermore, current research challenges are identified, and future research directions are proposed. This review aims to provide references for the engineering application and technological development of alkali-activated geopolymers in mucky soft soil stabilization.

Keywords: Alkali-activated geopolymer; Mucky soft soil; Stabilization; Mechanical properties; Micro-mechanism;

沿海地区广泛分布着淤泥质软土, 该类土体通常具有高含水率、高压缩性、低渗透性及低剪切强度等特点, 工程性质较差, 易导致地基沉降和稳定性问题^[1-2]。因此, 在工程建设过程中通常需要采取有效的地基处理措施以改善其工程性能。长期以来, 水泥因其成本较低、施工工艺成熟而被广泛应用于软土固化处理^[3]。然而, 传统水泥生产过程中存在能耗高、碳排放量大以及潜在环境污染

等问题,在“双碳”目标背景下,其可持续发展受到一定限制^[4]。因此,开发绿色低碳、高效环保的新型固化材料已成为软土处理领域的重要研究方向。

碱激发地聚物是一种以矿渣、粉煤灰等富含铝硅成分的工业固体废弃物为前驱体,在碱性激发剂作用下形成的新型胶凝材料,其通过地质聚合反应生成具有三维网状结构的凝胶产物,从而赋予材料较高的力学强度和良好的耐久性能^[5]。与传统水泥相比,碱激发地聚物不仅能够有效降低碳排放,还可实现工业固废资源化利用,因此在软土固化领域展现出良好的应用前景。



图1 研究框架图

Fig. 1 Diagram of research framework

近年来,国内外学者围绕碱激发地聚物固化淤泥质软土开展了大量研究,并在力学性能提升、微观作用机制揭示以及工程应用评价等方面取得了较为丰富的成果。研究表明,前驱体材料类型、碱激发剂种类及掺量等因素均会对固化效果产生显著影响。同时,借助扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)等微观表征技术,研究人员对地聚物固化软土的作用机制进行了深入探讨。然而,目前相关研究仍存在研究对象分散、影响因素复杂、作用机理认识尚不统一以及工程应用评价体系有待完善等问题,不同研究成果之间也缺乏系统的归纳与比较分析。

基于此,本文对国内外碱激发地聚物固化淤泥质软土的研究成果进行了系统梳理与总结。围绕原材料组成与配比设计、固化性能特征、微观作用机制、工程应用及环境效益等方面开展综述分析,研究框架如图1所示。通过归纳现有研究进展,分析当前研究存在的问题,并对未来发展方向进行展望,以为碱激发地聚物固化淤泥质软土的理论研究与工程应用提供参考。

1 制备工艺

1.1 材料配比设计优化

吴维江^[6]等研究发现在碱激发固化淤泥质软土试验中,生石灰与硅酸钠掺配比取0.8:1.0固化效果最优。对CaO和 Na_2SiO_3 来说,在研究各自单独处理步骤的同时还需要对其组合方式、先后次序等等进行研究,应该先将生石灰配成溶液并不断搅拌直至向其中慢慢加入硅酸钠溶液为止,并在地聚物反应过程中相互协调共同发挥作用。Mostafa^[7]的研究表明,采用适配的复合掺配方案可有效提升水泥基体强度。此外,需要注意的是:碱激发剂溶液要在用之前1h配好,避免因结晶而影响使用。

将淤泥质软土土样烘干、碾压,并使用2.0 mm筛过筛,然后称取相应质量的淤泥质软土。并称取一定质量的水泥以及矿渣和粉煤灰,充分混合,加水搅拌,直至均匀。闷料结束后,将粉煤灰和矿渣混合物依次加入定量的碱激发剂溶液和预留的水,并充分搅拌,得到碱激发地聚物。然后,将土样分别加入碱激发地聚物和水。试样制备前,需将试模内壁擦拭干净,并涂抹一层薄薄的凡士林。试模装满后,轻轻敲击直至土体中无气泡冒出,随后用平口刀沿试模顶面将土样刮平,并用保鲜膜覆盖,完成制样操作。试样需在25℃的环境中静置24小时。拆模后,立即将试样放入温度为

40℃、相对湿度为98%的养护箱里，完成材料配比^[8]。

1.2 宏观性能

1.2.1 物理性能

淤泥质软土通常具有较高的天然含水率和较大的孔隙比，呈现流塑状态，工程性质较差。碱激发地聚物掺入后，土体的物理性质得到明显改善。地聚反应过程中，部分自由水参与反应并被消耗，同时生成的大量凝胶产物填充于土颗粒之间及孔隙内部，使土体结构逐渐趋于致密化，从而降低土体含水率并改善其整体稳定性。

表1列出了不同固化体系下软土含水率及平均干密度的变化情况。与未固化土相比，碱激发地聚物固化土的干密度均有所提高。这主要是由于地聚反应生成的胶凝产物将松散土颗粒胶结为整体结构，并填充部分孔隙空间，从而提高土体密实程度。当固化剂掺量继续增加时，部分研究发现干密度可能出现增长趋缓甚至略有下降的现象，这与固化剂自身密度、孔隙结构演化及反应程度有关。

表1 淤泥质软土含水率，土质平均干密度情况

Table 1 Moisture content and average dry density of mucky soft soil

| 土样类型 | 含水率 (%) | 固化剂类型 | 固化剂掺量 (%) | 干密度 (g/cm ³) |
|---------------------------|---------|----------|-----------|--------------------------|
| 淤泥质软土 ^[9] | 61 | 未固化 | 0 | 1.30 |
| 海相软黏土 ^[10] | 50 | OPC 水泥 | 10 | 1.22-1.30 |
| 海相软黏土 ^[10] | 70 | OPC+石膏 | 15 | 1.24 |
| 海洋软土 ^[11] | 55-65 | 粉煤灰-地聚物 | 10 | 1.45 |
| 软黏土 ^[12] | 60 | GGBS 地聚物 | 15 | >1.50 |
| 底灰地聚物固化软土 ^[13] | 30-40 | 底灰地聚物 | 15 | 1.5-1.7 |

此外，碱激发地聚物还能够显著改善土体的渗透性能。研究表明，反应生成的 N-A-S-H 凝胶和 C-(A)-S-H 凝胶能够有效填充原有孔隙，降低孔隙连通性，阻碍水分迁移通道的形成，使土体渗透系数明显降低。随着养护龄期延长，凝胶产物持续生成，孔隙结构进一步优化，土体的抗渗能力得到进一步提升。

1.2.2 力学性能

力学性能是评价软土固化效果的重要指标，其中无侧限抗压强度（UCS）被广泛用于表征固化土的承载能力和加固效果。现有研究表明，碱激发地聚物能够显著提高淤泥质软土的抗压强度，其提升幅度受到前驱体种类、碱激发剂掺量、养护条件以及龄期等因素的共同影响^[14]。

随着地聚物掺量增加，体系中参与反应的活性硅铝组分增多，可生成更多具有胶结作用的凝胶产物，从而增强土颗粒间的黏结作用，提高整体结构强度。由表2可知，与原状淤泥质软土相比，地聚物固化土的抗压强度和抗剪强度均得到明显提高。其中，FA-GGBS 地聚物和 GGBS 地聚物体系均表现出较好的增强效果，部分配比条件下其强度甚至可达到或超过传统水泥固化土水平。

表2 淤泥质软土的平均抗拉强度、抗压强度和抗剪强度

Table 2 Average tensile strength, compressive strength and shear strength of mucky soft soil

| 固化体系 | 固化剂掺量 (%) | 温度 (°C) | 抗压强度 | 抗剪强度 |
|----------------------------|-----------|---------|---------|--------|
| 原状淤泥质软土 ^[9] | 0 | 20 | 30-80 | 10-20 |
| 水泥固化软土 ^[10] | 10 | 20 | 100-300 | 30-60 |
| FA-GGBS 地聚物 ^[9] | 5 | 20 | 80-150 | 20-40 |
| FA-GGBS 地聚物 ^[9] | 10 | 25-40 | 150-400 | 40-80 |
| GGBS 地聚物 ^[12] | 15 | 20 | 200-500 | 50-100 |

除抗压强度外，抗剪强度也是评价固化效果的重要参数。碱激发地聚物生成的凝胶产物能够包

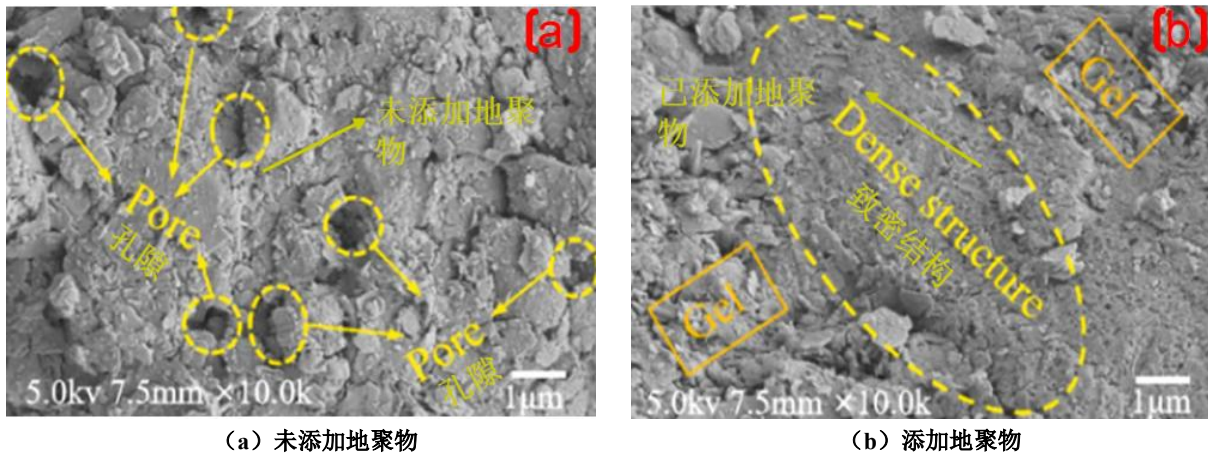
裹土颗粒并形成连续的胶结网络结构，提高颗粒间的咬合作用和黏聚作用，从而显著提高土体的抗剪能力。研究表明，随着固化剂掺量增加，土体黏聚力和内摩擦角均呈现不同程度的增长趋势，表明固化后的土体具有更好的稳定性和抗变形能力。

养护龄期同样是影响力学性能的重要因素。随着养护时间延长，地聚反应持续进行，越来越多的凝胶产物生成并填充土体孔隙，使微观结构逐渐致密化。因此，固化土强度通常呈持续增长趋势，其中早期阶段增长较快，后期增长速率逐渐减缓并趋于稳定。

1.3 微观机理

1.3.1 孔隙大小分布

学者们普遍认为碱激发地聚物固化淤泥质软土后，土体中大孔隙数量明显减少，而小孔隙比例增加，孔隙率显著降低，增强了淤泥质软土的力学特性，淤泥质软土在天然状态下，颗粒排列松散、孔隙粗大，添加地聚物后，孔隙结构在反应过程中发生了变化，胶凝物质使得软土颗粒结构和发生重塑^[15]。固化淤泥质软土微观 SEM 图像如图 2 所示。



(a) 未添加地聚物

(b) 添加地聚物

图 2 添加与未添加地聚物的样品的微观形貌对比^[13]

Fig. 2 Comparison of micro-morphology between untreated and geopolymer-stabilized specimens

1.3.2 化学键合与相互作用

碱激发地聚物固化淤泥质软土过程中存在复杂的化学键合作用。反应初期，矿渣、粉煤灰等先驱体中的 Si-O-Si 键和 Si-O-Al 键在强碱环境下发生断裂，释放出活性硅铝组分。随着反应进行，溶解产物发生缩聚反应，逐渐形成 N-A-S-H 凝胶和 C-(A)-S-H 凝胶等胶凝产物，并生成大量 Si-O-Si 和 Si-O-Al 等化学键。这些化学键具有较高的稳定性，能够构建地聚物三维网络结构，提高土颗粒间的胶结作用和整体结构强度。

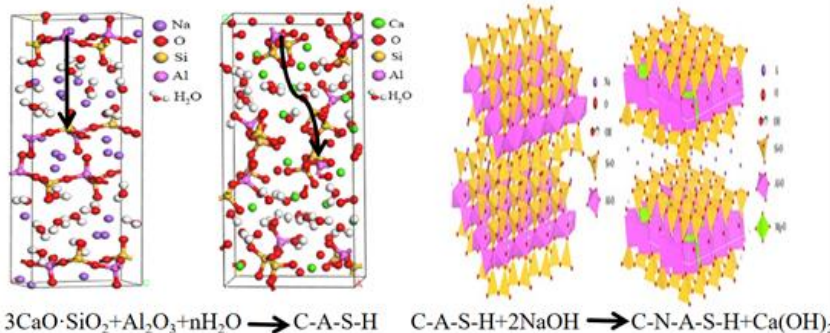


图 3 材料 C-A-S-H 与软土中的典型蒙脱石、伊利石在纳米尺度上的界面特性 错误!未找到引用源。

Fig. 3 Interface characteristics of material C-A-S-H with typical montmorillonite and illite in soft soil at nanoscale

此外，黏土矿物与凝胶产物之间还存在界面相互作用。Tian^[16]等利用分子动力学模拟研究了

C-A-S-H 凝胶与蒙脱石、伊利石等黏土矿物之间的界面特性, 结果表明凝胶产物可通过静电作用、氢键作用等方式与矿物表面形成稳定结合, 从而增强颗粒间的黏结能力, 为淤泥质软土加固机理研究提供了分子层面的理论依据, 其化学反应机理与界面特性演化过程如图3所示。

2 应用现状及环境评价

2.1 应用现状

近年来, 碱激发地聚物固化技术逐渐由室内试验研究向工程应用验证阶段发展, 在沿海软土地基处理、道路工程路基加固以及工业固废资源化利用等领域表现出良好的应用潜力^[17]。研究表明, 利用矿渣、粉煤灰等工业固体废弃物制备地聚物固化剂, 不仅能够显著提高软土强度和稳定性, 还可实现固废资源化利用和降低碳排放。

由表3可知, Wu^[18]等以杭州软土为研究对象, 采用粉煤灰-矿渣基地聚物进行固化处理, 在最优配比条件下, 固化土28 d无侧限抗压强度达到2.0 MPa; 当地聚物掺量提高至25%时, 经8次干湿循环后强度仍保持1.6 MPa, 表现出良好的耐久性能。进一步研究发现, 当矿渣含量达到90%时, 28 d无侧限抗压强度可提高至7.20 MPa。Kua^[19]等针对海相软黏土开展研究, 结果表明经6次干湿循环后固化土强度基本保持稳定, 能够满足工程应用要求。上述研究表明, 碱激发地聚物在软土地基处理和道路工程领域具有较好的应用前景。

表3 碱激发地聚物固化软土典型应用研究案例

| 研究对象 | 固化体系 | 主要结果 |
|------------------------|-----------|------------------|
| 杭州地区软土 ^[18] | 粉煤灰矿渣基地聚物 | 28d UCS 达 2.0MPa |
| 河岸软土 ^[19] | 矿渣粉煤灰基地聚物 | 强度显著提高 |
| 海相软黏土 ^[20] | 粉煤灰矿渣基地聚物 | 6次干湿循环满足工程 |

2.2 环境评价

碱激发地聚物以矿渣、粉煤灰等工业固体废弃物为主要原料, 可减少天然资源消耗并降低二氧化碳排放。与传统水泥相比, 其生产过程中无需大量石灰石煅烧, 具有较好的减排效果。相关研究表明, 地聚物体系的碳排放量明显低于普通硅酸盐水泥体系, 具有良好的环境效益, 如表4所示。

表4 地聚物与普通水泥体系碳排放对比

| 材料体系 | CO ₂ 排放量 |
|-------------------------|--------------------------------|
| 普通硅酸盐水泥 ^[21] | 0.66~0.82kgCO ₂ /kg |
| 地聚物胶凝材料 | 0.16kgCO ₂ /kg |
| 减排幅度 | 75%~80% |

3 结论

(1) 既有研究表明, 碱激发地聚物能够显著改善淤泥质软土的工程性能, 其增强作用不仅体现在宏观力学指标的提升, 还源于复杂的地聚合反应机理。在强碱环境下, 矿渣、粉煤灰等前驱体中的活性硅铝组分不断溶解并发生缩聚反应, 生成N-A-S-H凝胶和C-(A)-S-H凝胶等胶凝产物。这些凝胶通过填充孔隙、包裹土颗粒以及构建连续三维网络结构, 实现了土体由松散结构向致密结构的转变, 从而提高了土体的抗压强度、抗剪强度及耐久性能。与此同时, 工业固体废弃物的资源化利用进一步增强了其工程应用价值和可持续发展潜力。

(2) 目前研究主要集中于单一环境因素作用下的性能分析, 对于海洋环境中硫酸盐侵蚀、氯盐侵蚀、温度变化及循环荷载等多因素耦合作用下的长期耐久性研究仍相对不足, 其性能退化机制和

寿命预测理论尚不完善。近年来有研究尝试建立地聚物固化淤泥质土微观结构演化与宏观力学性能之间的关联关系,为揭示固化增强机制提供了新的研究思路。未来可结合同步辐射 X 射线衍射(SR-XRD)、高分辨透射电镜(HR-TEM)及核磁共振(NMR)等先进表征技术,进一步揭示凝胶产物与黏土矿物界面的作用机制,并结合分子动力学模拟和宏观本构模型构建多尺度、多场耦合分析方法,为长期服役性能预测提供理论支撑。

(3) 碱激发地聚物固化技术不仅具有显著的环境效益,更体现出资源循环利用与绿色基础设施建设相结合的发展优势。通过将矿渣、粉煤灰等工业副产物转化为高附加值胶凝材料,实现了固体废物资源化利用与软土地基改良的协同发展。从“双碳”战略视角来看,该技术兼具降低碳排放、减少天然资源消耗和提升工程耐久性的多重优势,有望推动传统地基处理技术向低碳化、绿色化和可持续化方向转型,为未来滨海地区基础设施建设和生态环境保护提供新的技术路径。

(4) 目前碱激发地聚物固化软土的生命周期评价研究仍主要依赖国外数据库,针对我国沿海地区尤其是烟台地区工程特点的本土化评价体系尚不完善。未来应建立适用于我国滨海软土工程的生命周期评价数据库,完善碳排放核算方法和环境效益评价体系,为碱激发地聚物固化技术的大规模工程应用及低碳发展提供数据支撑。

参考文献

- [1] 彭文杰.淤泥质土水泥搅拌桩复合地基承载性能数值模拟分析[J].建筑技术,2026,57(9):1058-1062..
- [2] 王冬冬,张帅伟,宋新江,等.基于响应面法的矿渣-电石渣-脱硫石膏固化淤泥质土力学性能研究[J].硅酸盐通报,2026,45(2):582-591.
- [3] 李宏远.淤泥质土软弱地层深基坑地下连续墙施工关键技术研究[J].建筑机械,2026,(2):316-320.
- [4] Wu H, Song H, Sun X, et al. Geo-environmental properties and microstructural characteristics of sustainable limestone calcined clay cement (LC3) binder treated Zn-contaminated soils[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2023, 24(10): 898-911.
- [5] 罗璟瀚,刘红梅,张佰发,等.基于华南富黏土矿物工程渣土原料的酸激发地聚物制备及其性能调控[J].矿物学报,2025,45:1-14.
- [6] 吴维江,谷雷雷,王盛年,等.工业固废基地聚物固化河道疏浚土力学特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2025,45(3):643-651.
- [7] Bernal S A, Provis J L. Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97(4): 997-1008.
- [8] 黄志浩,郭浩喆,卜红玲,等.低品位高烧失硅藻土用于制备碱激发地聚物材料的机理研究[J].矿物学报,2022,42(5):631-639.
- [9] Salimi M, Ghorbani A. Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers[J]. Applied Clay Science, 2020, 184: 105390.
- [10] Wu J, Liu L, Deng Y, et al. Use of recycled gypsum in the cement-based stabilization of very soft clays and its micro-mechanism[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(3): 909-921.
- [11] Yaghoubi M, Arulrajah A, Disfani M M, et al. Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay[J]. Applied Clay Science, 2019, 167: 33-42.
- [12] Chowdary B, Ramanamurty V, Pillai R J. Fiber reinforced geopolymer treated soft clay—An innovative and sustainable alternative for soil stabilization[J]. Materials today: proceedings, 2020, 32: 777-781.
- [13] Ji Z, Ismail M A M, Kong D, et al. An orthogonal experimental study on low-activity bottom ash based geopolymers for soft clay stabilization[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025: 05601.
- [14] 杨松,杨长虹,李登峰,等.偏高岭土-矿渣地聚物混凝土收缩及抗压性能试验研究[J].建筑结构, 2025, 55(8): 124-130+123.
- [15] 蒋光荣,李发项,韦禹琛.碱激发水泥固化软土的强度性能评价与微观机理研究[J].水利技术监督,2025,(3):150-153
- [16] Wu D, Cao K, Chen K, et al. Interfacial characteristics and mechanical behavior of geopolymer stabilizers with clay mineral: A molecular dynamics study[J]. Applied Clay Science, 2024, 250: 107286..

- [17] 吴昊,张泽鹏,宋卫民,等.地聚合物固化淤泥质土:从微观机理到宏观性能[J].硅酸盐学报,2026,54(5):1699-1724.
- [18] Wu D, Zhang Z, Chen K, et al. Experimental investigation and mechanism of fly ash/slag-based geopolymer-stabilized soft soil[J]. Applied sciences, 2022, 12(15): 7438.
- [19] Dingwen Z, Libin F, Songyu L, et al. Experimental investigation of unconfined compression strength and stiffness of cement treated salt-rich clay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2013, 31(4): 360-374.
- [20] Yaghoubi M, Arulrajah A, Disfani M M, et al. Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay[J]. Applied Clay Science, 2019, 167: 33-42.
- [21] Turner L K, Collins F G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete[J]. Construction and building materials, 2013, 43: 125-130.

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202510451001), 山东省自然科学基金青年基金 (ZR2024QE185)

¹ **第 1 作者简介:** 李英杰 (2004-), 男, 本科在读, 研究方向: 固废资源化利用。E-mail: yingjieLi@163.com。

***通讯作者简介:** 邵建文 (1992-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 固废资源化利用。E-mail: jwshao@ldu.edu.cn。