

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

工程建设余泥渣土高效利用技术与展望

孙晓辉^{1, 2}, 张明^{3, 4, 5}, 陈湘生^{1, 2}, 陈长卿^{4, 5}, 董紫君^{1, 2}, 陈佛赐^{4, 5}, 韩志豪^{1, 2}

1) 深圳大学土木与交通工程学院, 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 广东深圳 518060; 2) 深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造重点实验室, 广东深圳 518060; 3) 中国建筑国际集团有限公司, 香港 999077; 4) 中国建筑工程(香港)有限公司, 香港 999077; 5) 中国建筑土木工程有限公司, 香港 999077

摘要: 为提升城市工程建设余泥渣土的绿色高效处理处置能力, 探讨了城市工程建设中产生的巨量余泥渣土的高效资源化利用技术与未来的研究方向. 提出构建余泥渣土的物相分离-资源转化耦合理论方法, 基于材料体系研发、工艺-技术-评估方法构建和智能化装备开发, 建立了余泥渣土的绿色高效资源化利用成套技术, 解决巨量余泥渣土的处理处置难题, 指出余泥渣土的未来研究可在规模化处理处置、功能化工程利用和固废基先进材料研究3个层次开展. 提出了余泥渣土基城市水土耦合利用概念, 基于地聚物基固化-介孔功能化调控, 将余泥渣土转化为透水、透气且具备催化、固碳和污染去除等功能的先进填筑材料, 在处理处置余泥渣土的同时, 产生水土污染治理的环境正效应. 本研究可为工程建设余泥渣土处理处置难题提供新的解决思路, 对城市生态环境治理具有重要意义.

关键词: 岩土工程; 环境工程; 固废资源化; 余泥渣土; 水土耦合利用; 地聚物技术; 智能化装备
中图分类号: X799 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3724/SP.J.1249.2025.06678

Efficient utilization technology and research prospects for waste slurry and soil from engineering construction

SUN Xiaohui^{1, 2}, ZHANG Ming^{3, 4, 5}, CHEN Xiangsheng^{1, 2}, CHEN Changqing^{4, 5},
DONG Zijun^{1, 2}, CHEN Foci^{4, 5}, and HAN Zhihao^{1, 2}

1) State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Shenzhen Key Laboratory of Green, Efficient, and Intelligent Construction of Underground Metro Station, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

3) China State Construction International Holdings Limited, Hong Kong 999077, P. R. China

4) China State Construction Engineering (Hong Kong) Limited, Hong Kong 999077, P. R. China

5) China Construction Civil Engineering Co. Ltd., Hong Kong 999077, P. R. China

Abstract: To enhance the green and efficient treatment and disposal of waste slurry and soil generated during urban engineering construction, we explore the key technologies for their high-efficiency resources utilization and outline future research directions. A coupling theoretical method for phase separation and resource utilization of waste slurry and soil is proposed. Based on the development of material systems, the establishment of process-technology-

Received: 2025-03-18; **Accepted:** 2025-09-15; **Online (CNKI):** 2025-10-23

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52422004, 52179108); Shenzhen Science and Technology Innovation Funding Project (KCXFZ20211020164013020)

Corresponding author: Professor CHEN Xiangsheng (xschen@szu.edu.cn), academician of Chinese Academy of Engineering.

Citation: SUN Xiaohui, ZHANG Ming, CHEN Xiangsheng, et al. Efficient utilization technology and research prospects for waste slurry and soil from engineering construction [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(6): 678-687. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<http://journal.szu.edu.cn>



evaluation methods, and the advancement of intelligent equipment, a complete set of green and efficient resource utilization technologies has been developed to address the large-scale treatment and disposal challenges of waste slurry and soil. Future research on waste slurry and soil can be conducted at three levels: large-scale disposal and treatment, functional engineering utilization, and the development of advanced materials derived from solid waste. Furthermore, a concept of soil-water coupled utilization based on waste slurry and soil is introduced. By employing geopolymer-based solidification and mesoporous functional regulation, waste soil can be transformed into advanced filling materials with permeability, breathability, and multifunctional such as catalysis, carbon sequestration, and pollutant removal. While achieving the treatment and disposal of waste slurry and soil, this approach also generates positive environmental effects for soil and water pollution control. This study provides new solutions to the treatment and disposal challenges of waste slurry and soil in engineering construction and has significant implications for the management of urban ecological environments.

Key words: geotechnical engineering; environmental engineering; solid waste resource utilization; waste slurry and soil; soil-water coupled utilization; geopolymer technology; intelligent equipment

工程建设余泥渣土是城市基础设施建设过程中(如土方开挖、盾构掘进和基坑施工等)产生的固液混合物^[1],包括盾构渣土/泥浆、工程废弃泥浆和基坑渣土等(表 1),是中国城市中产生量最大、价值最低且最难利用的固体废物之一。在国际上,多个国家已在余泥渣土的处理与资源化方面取得了显著进展。例如,近年来日本的余泥渣土年排放量在 $1.3 \times 10^8 \sim 1.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源化利用率为 68.8%^[2];美国的余泥渣年排放量为 3.25 亿 t,资源化利用率已达到 70%^[3]。与之相比,中国每年余泥渣土的排放量达数十亿 t,大量渣土堆积导致堆场滑坡、水体污染和土地占用等严峻的城市环境以及土地资源与生态安全问题,严重制约无废城市建设^[4-6]。例如,2015-12-20,广东省深圳市光明区发生了渣土填埋场滑坡事故^[7],滑坡体积超过 270 万 m^3 ,造成 30 多栋建筑被摧毁,经济损失达 8.81 亿元。随着中国基础设施建设的快速推进,城市余泥渣土的排放量不断增加,而资源化利用率处于较低水平。以北京、上海、广州和深圳为例(请扫描论文右下角二维码查看补充材料图 S1),这些城市每年产生的

工程建设余泥渣土排放量约为 0.75 亿 ~ 1.07 亿 t,占城市固废总量的 70% 以上,但主要以外运堆填处置为主,资源化利用率不足 30%(全国不足 5%)^[8]。因此,余泥渣土的规模化处理与处置已成为中国各大城市亟待解决的重要问题。

余泥渣土成分复杂、性质差异显著,且现有处理装备水平有限,同时,受城市挖填需求时空错位、处理成本高、利用模式单一等多重因素影响,当前城市余泥渣土的资源化利用率仍然低下^[9-10]。据深圳市生态环境局固体废物污染环境防治信息公告,2023 年深圳市建筑垃圾产生量为 8 963 万 t,其中工程渣土和工程泥浆产生量达 8 108 万 t,针对大量的建筑垃圾,目前通过综合利用厂处置 3 393 万 t,固定消纳场处置 3 万 t,回填/土地平整 608 万 t,跨区域平衡处置 4 959 万 t。大量的余泥渣土仍需外运处置,且长期的跨区域平衡处置也难以继。实际上,城市中基础设施建设对各类材料(如充填材料、回收骨料、建材和路基填料等)的潜在需求仍然巨大。理论上,余泥渣土具备在滨海城市建设中完全消纳的可能性,被广泛应用于基础设施、道路工程

表 1 工程建设余泥渣土的常见分类

Table 1 Common classifications of waste soils

分类	来源	主要成分	物理特性
盾构渣土/泥浆	盾构机掘进过程中产生	原生地层土砂石、地下水、泡沫剂和膨润土等添加剂	含水率高,流塑性强,颗粒组成复杂,呈流态或半流态,具黏性和触变性
工程废弃泥浆	地下工程施工(钻孔灌注桩和地下连续墙等)中循环泥浆废弃排出	水、膨润土和羧甲基纤维素等泥浆材料、钻屑	含水率高,黏度大,稳定性差,易沉降分层,呈高流动性浆状
基坑渣土	基坑开挖过程中直接产生的土体	开挖区域原生地层土体(黏土、粉土、砂和岩屑等)	含水率较低,块状或碎块状,强度较高,不具流动性,性质接近原状土

和海洋填埋等领域。但限于技术、利用模式等因素,资源化潜力未得到充分释放。其中,所需要的条件包括技术是否满足要求,标准及评估方法是否完备,以及处理成本是否符合市场需求等。因此,开展余泥渣土绿色高效资源化利用技术创新,使其在基础设施建设中得到规模化处理处置和生态化利用,是解决城市余泥渣土问题和保障城市良好生态环境的出路之一。

1 工程科学问题及挑战

当前常见的工程建设余泥渣土资源化利用及处

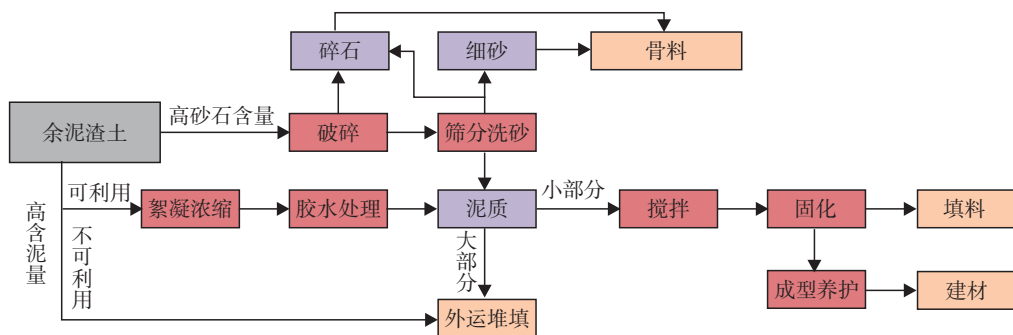


图1 工程建设余泥渣土现有处理处置路径

Fig. 1 Existing disposal and treatment paths of waste slurry and soil in engineering construction.

当前余泥渣土资源化利用及处置的主要技术挑战如下:

1) 高效资源化利用理论落后。当前,泥质资源化处理的主要路径是将泥质脱水处理,进一步外运处置^[11]。若进行填料和建材资源化利用,还需对泥质进行破碎、加水、加固化剂和搅拌等步骤,成本较高,制约泥质资源化前景。因此,需突破余泥渣土高效资源化利用的理论方法,为大幅提高资源化利用效率、降低利用成本提供理论指导。

2) 低碳化和规模化利用产品体系不足。针对余泥渣土的主要泥质成分,当前一般采用水泥基材料对其固化,形成填料和建材等产品。然而,这种方式能耗高、产品性能低、成本高,难以满足大规模处理需求,可应用的工程场景有限^[12]。因此,需突破这一工程技术瓶颈,开发低成本、低碳化、功能化的泥质产品体系。

3) 高效利用工艺的标准及评估方法缺乏。对于当下有限的泥质产品,缺乏相应的高效生产工艺、利用标准及环境安全评估方法,阻碍了相关产品的大规模利用。因此,亟需开发能够在基础设施

置路径见图1。对于砂石含量较高的渣土,可通过初步筛分获得碎石和细砂。细砂经过进一步清洗和分离后,可作为混凝土或砂浆的骨料,在工程中加以利用。高含泥量的余泥渣土和泥砂分离后的泥浆,经过絮凝、浓缩和过滤等工艺脱水,形成以黏粒为主的脱水泥饼。目前,针对脱水泥饼主要是通过破碎、加水、搅拌和添加土体改性材料的方式,形成陶粒、砌块、路基填土、回填土和种植土等产品加以利用^[7-8],而大部分泥质由于性质差、产品性能低、处理工艺复杂、成本高,只能进行外运堆填处理。

建设(如路用、充填和建材等)中规模化利用的工艺、标准及评估方法^[13]。

4) 处理装备适应性差,处理效率低下。当前装备主要以筛分和压滤脱水为主,分选出的碎石及细砂品质参差不齐,且装备智能化程度低,不具备泥质同步资源转化功能。因此,亟需开发自适应余泥渣土性质变化的智能化、模块化、集成化物相分离-资源转化耦合装备系统。

2 资源化利用技术

2.1 分离-固化耦合的高效资源化理论方法

对于低含砂率的渣土以及泥砂分离后的余泥,可在固液分离的同时实现泥质同步固化,有效避免后续的泥饼破碎、加水和搅拌等重复环节。SUN等^[13]提出在泥浆环境中构建工业固废(矿渣和粉煤灰等活性固废)地聚物反应,利用活性固废材料反应所产生的低聚态凝胶,耦合凝聚剂的凝聚作用,调控余泥的凝聚、脱水和固化过程,实现余泥的固液分离强化和泥质同步固化,具体请扫描论文末页

右下角二维码查看补充材料图S2。泥质可固化为具备不同力学强度等级的材料,以满足不同类型的资源化利用。分离-固化耦合方法中主要包含以下3方面内容:

1) 凝聚。不少学者采用了传统絮凝剂、石灰等凝聚方法,泥质在力学性能的发展、污染物的稳定方面具有缺陷^[14-15]。SUN等^[13]在高含水率泥浆环境下构建地聚物反应,耦合絮凝剂和地聚物凝胶的双重功能,强化余泥颗粒的双电层压缩与动态成核,促进地聚物低聚态凝胶-余泥颗粒凝聚体生长,从而直接加速泥浆的固液分离。此外,泥质和地聚物低聚态凝胶的凝聚过程中,同步网捕、吸附重金属等污染物,实现污染物的同步控制^[16],使分离后的水分得到净化。

2) 脱水。压滤是常见的余泥脱水方式,通过石灰和氧化剂等脱水是常见的调理方法^[11, 17]。为进一步提高凝聚体的压滤脱水性能,SUN等^[18]通过在地聚物基凝聚-固化调理的余泥中构建气相排水边界,在颗粒絮凝体表面形成气相附着层,实现水分沿气相边界高效迁移,使絮凝体的压滤脱水量提升。引气型排水边界可形成多相界面水分迁移通道,并进一步与地聚物凝胶形成气-液-固耦合多相界面,可有效阻隔凝聚体中吸附的污染物向外迁移,同步实现了余泥脱水强化与污染截留。

3) 固化。泥浆环境中地聚物反应困难,主要原因在于其对元素物质的量比^[19-20]、碱度^[21-22]和水玻璃模数^[23-24]等反应条件敏感。在高含水率余泥的地聚物固化反应微环境中引入缓释前驱体,在高含水率泥浆环境中构建出适宜活性固废发生地聚物反应的微环境,可解决泥浆环境中地聚物反应受阻的问题。通过离子交换作用进行界面电荷调控,可抑制高吸附性黏土矿物界面对地聚物反应所需离子的吸附作用,进而解决地聚物固化受到高吸附性黏土矿物抑制的工程难题^[25]。

2.2 余泥渣土多场景资源利用的材料产品体系

本研究主要探讨以规模化利用、多场景适用为主要开发方向的余泥渣土材料产品体系。

1) 多种固体废弃物协同利用的地聚物基凝聚-固化低碳胶凝材料,具体材料成分组成见表2。以余泥的地聚物基分离-利用理论方法为基础,开发出系列凝聚-固化胶凝材料,使余泥渣土实现规模化利用。其中,针对地聚物基固化成分,综合选取多源工业固废(如矿渣、粉煤灰、钢渣和锰渣等),

表2 凝聚-固化胶凝材料组成

Table 2 Flocculation-solidification cementitious material composition

组成	材料
活性成分	地聚物基固废(矿渣、粉煤灰、钢渣和锰渣等)
激发成分	碱性固废(电石渣和赤泥等)、NaOH和硅酸钠等
絮凝成分	聚丙烯酰胺和聚合氯化铝等

并考虑混合泥浆的快速高效凝聚,选取铝系、铁系或高分子絮凝剂与固化成分协同复配,形成多固废协同的地聚物基凝聚-固化胶凝材料体系,用于泥浆的凝聚-脱水-固化一体化处理。与传统水泥基材料体系相比,地聚物基凝聚-固化胶凝材料的浆体流动性更优越,达到25~40 cm,且其密实度比水泥基材料体系高6.3%~18.9%^[13]。需要指出的是,工业固废中的金属氧化物具有催化潜力,可与地聚物基固化余泥渣土中的介孔-大孔体系结合,从而进一步增强材料的污染控制功能。

2) 地聚物基功能化泥质产品。工程建设中填料利用是大规模消纳、利用泥质的主要途径之一,但常规泥质流态填料功能单一,应用场景有限^[26-27]。通过对地聚物基絮凝-固化调理的泥浆进行高聚物(如泡沫剂和凝聚剂等)调控,开发地聚物基柔性泥浆材料、超轻质流态填料、水下不分散填料和可胀缩填料(请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S3),实现防水、隔振、大变形自适应和膨胀充填等功能,强度可超过2 MPa,满足回填工程的要求^[24]。通过电荷调控泡沫界面,对轻质泡沫泥浆进行开-闭孔调控,可构建轻质化、功能化的材料产品体系,拓展泥质材料在特殊工程、海洋修复和生态修复等领域的应用场景^[28-32]。

3) 余泥渣土路基的水盐主动运移加筋材料。余泥渣土在路用中具有巨大的消纳潜力^[33-35]。为克服泥质高液限、高塑性指数导致水稳定性差等问题,使泥质具备作为路基填料的可能性,路基中水汽迁移通道的构建尤为重要。在聚乙烯醇交联体中植入吸水毛细纤维和土工筋材,可开发出具有快速吸水 and 定向导水功能的新型土工合成材料。该加筋材料的交联体从路基填筑体中快速吸水,使水分迁移至毛细纤维,再利用蒸发吸力驱动水分沿毛细纤维导出,实现水分多界面间的主动定向迁移^[36],如图2所示。并协同力学加筋作用和化学固化处理,解决余泥渣土填筑体的湿化软化问题,从而拓展余泥渣土的路用场景。

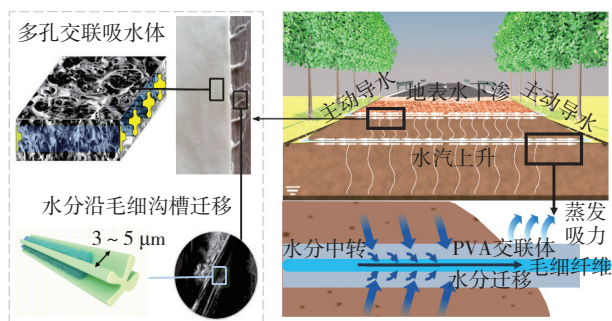


图2 主动吸水-高分子土工合成材料及其水分运移机理

Fig. 2 Active water-absorbing polymer geosynthetic materials and their moisture migration mechanism.

2.3 保障规模化利用的高效工艺、计算及评估方法

工程建设的路用、充填和建材利用是余泥渣土消纳的3个主要路径,为保障其规模化利用,应建立和匹配相应的高效处理工艺、设计计算及评估方

法.主要包括以下方面:

1) 高效利用工艺和模式.本研究基于地聚物基凝聚-固化理论方法,构建如图3所示的余泥渣土高效处理工艺.泥砂分离后的泥浆经过地聚物基凝聚-固化处理,直接得到流态可固化填料,进一步压滤脱水后,可形成碾压式填料或建材化原料.通过超高压脱水-成型技术和固化时程调控,可在工程现场或集中处理厂直接形成可用的砌块或再生颗粒,处理后制品的强度可达8~11 MPa,满足不同工程应用的需求^[18].溢流或压滤后的尾水可用于循环清洗粗细骨料.其中,碱性成分具有促进泥块崩解等正向作用.不具备现场建材成型的压滤泥饼,可以直接转运至集中处理中心进行成型.在此过程中,由于泥饼具有建材利用价值而无需额外处置费,集中处理厂无需对其进一步破碎、加水、加药和搅拌等,省去大量材料和处理费,从而形成工程现场处理-集中厂处理结合的高效资源化新模式.

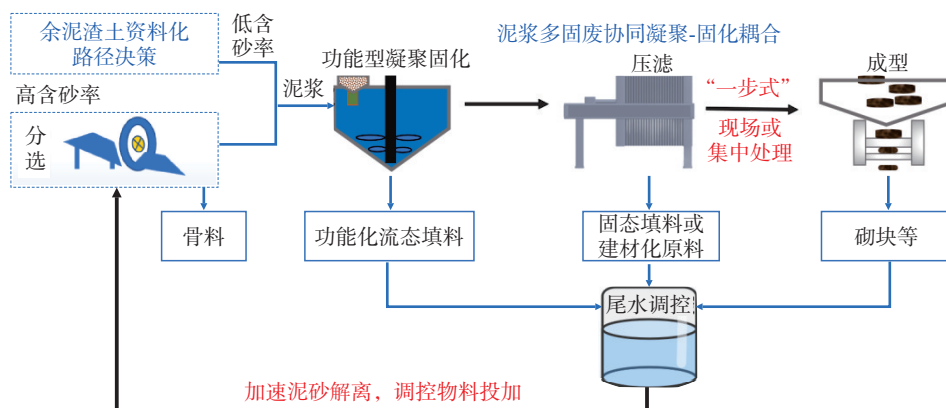


图3 高效分离-利用耦合工艺

Fig. 3 Treatment process coupling efficient separation and resource utilization.

2) 设计及计算方法.在余泥渣土的路用设计及计算方面,不少学者也开展了卓有成效的工作^[37-39].针对加筋-吸水土工合成材料加筋的余泥渣土路基填筑体,SUN等^[40]推导出流固耦合、横观各向同性、多层物理约束和水分主动迁移条件下的路基结构应力-应变场的解析解,并进一步开发了路基性能计算软件,为路基服役性能评估提供理论依据.为保障余泥渣土基产品在工程建设中作为功能化填料或建材规模利用,学者们在余泥渣土的现场处理、流态充填材料的制备、碾压工艺的技术要求以及建材制备标准等方面展开了深入研究^[41-43].

3) 污染及生物毒性评估方法.考虑到多源余泥渣土中含有不同类型和浓度污染物(内源污染物如有机污染物和重金属等;外源污染物如施工外加

剂),尚应对余泥渣土基产品的环境风险、生物毒性进行评估.参考MARIANI等^[44]的研究,可建立基于发光细菌的生物毒性评估方法和环境风险评价标准等,从而保障其进行填料或建材的安全利用.

2.4 智能化、集成化的分离-利用耦合装备

为提升当前装备的处理效率,通过智能感知、识别和处理余泥渣土的理化特征,开发智能感知-功能型固化耦合装备,对促进余泥渣土处理产业的发展具有积极意义.

1) 余泥渣土理化特征智能感知技术.余泥渣土的智能感知方面研究进展较为缓慢,而在建筑垃圾和生活垃圾的智能分拣领域,已有较多研究成果^[45-47].基于此,可建立一种点云-图像-近红外光谱融合技术,通过三维点云分析的渣土中砂石颗粒

快速重建分析技术,达到颗粒形状特征秒级感知,从而实现分离后砂石颗粒的粒径、级配和含泥量等特征的快速识别.并可基于近红外光谱分析的固化配比方案自决策技术,实现分离过程中泥质的同步高效固化,如图4所示.

2) 物相分离-资源转化耦合装备. 现有物相分离装备多为现场拼装,进而建设相应的基础配套设施. 基于前述地聚物基凝聚-固化耦合理论方法和工艺,文献[48]提出并开发了物相分离-资源转化

耦合装备,该装备包含智能中控、振动筛分、泥砂分离、泥浆凝聚-固化耦合、压滤固液分离、挤压成型和清水循环功能,可将各类余泥渣土(如盾构渣土和桩基泥浆等)直接转化为碎石、细砂、泥质流态填料(不压滤)、泥质固态填料(压滤)和泥质砌块(进一步成型),这些泥质资源化产品可根据工程需求进行自由配置. 该装备具有较高的处理能力,余泥渣土的处理量可达300~500 m³/d,装备特征请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S4.

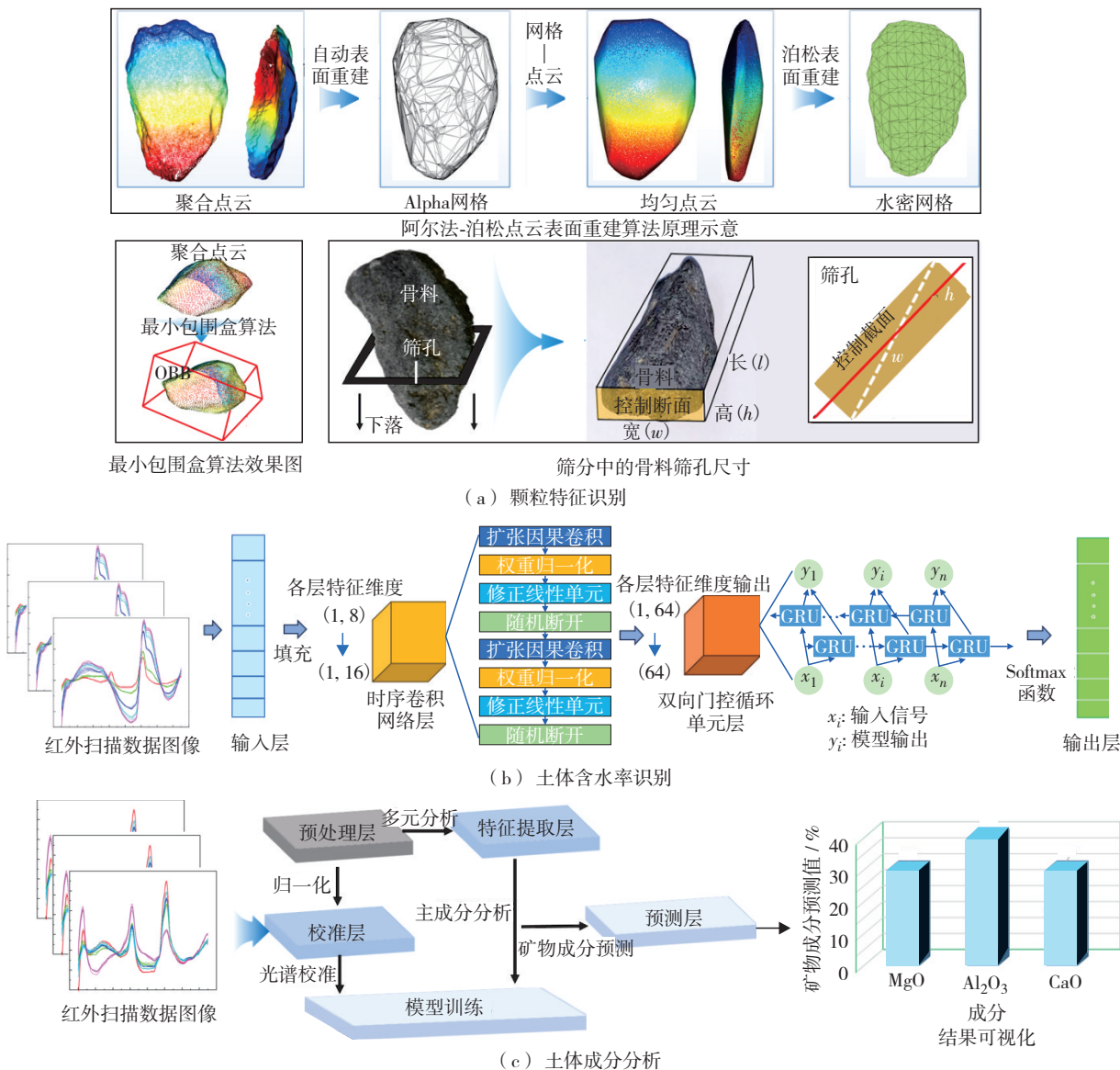


图4 余泥渣土的理化特征智能识别分析

Fig. 4 Intelligent identification and analysis of characteristics of waste slurry and soil.

2.5 余泥渣土高效利用研究方向探讨

2.5.1 未来研究方向

余泥渣土的研究应始终聚焦于高效处理、处置及资源化利用,并结合当前工程需求和研究发展.

基于工程实际需求和科研趋势,建议未来从3个层面开展研究(请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S5):

1) 面向大规模处理-处置,解决最为紧迫的工

程需求, 并从充填、路用、建材和海洋修复等具备大规模消纳潜力的工程场景出发, 研究相关规模化利用技术, 促进产业发展;

2) 面向复杂工程需求, 开发具备轻质、减隔震、防水和溃缩等各类特殊功能需求的各类余泥渣土基材料, 解决实际工程难题;

3) 面向储能、催化和固碳等科技前沿需求, 引领、探索先进固废基功能材料, 并促进先进新材料的工程化.

2.5.2 城市余泥渣土基多场景水土耦合利用概念

在余泥渣土的资源化利用中, 基于多源工业固

废协同的地聚物固化和界面功能化调控, 利用固废中的元素掺杂或活性氧在介孔材料中的吸附活化, 可形成介孔-大孔协同的余泥渣土基催化功能材料. 该功能材料作为污染控制和生态修复的重要载体, 不仅能够在河(海)岸工程和路基填(浇)筑等众多工程场景中得到应用, 还可同时作为水土环境治理的功能介质而产生环境正效应, 使余泥渣土的应用场景大幅扩展. 余泥渣土基多场景水土耦合利用概念见图5, 涉及固废处理处置、生态修复、功能材料和岩土工程交叉学科, 具有丰富的学科内涵和外延, 具有独立发展成为水土耦合修复学科的潜力.

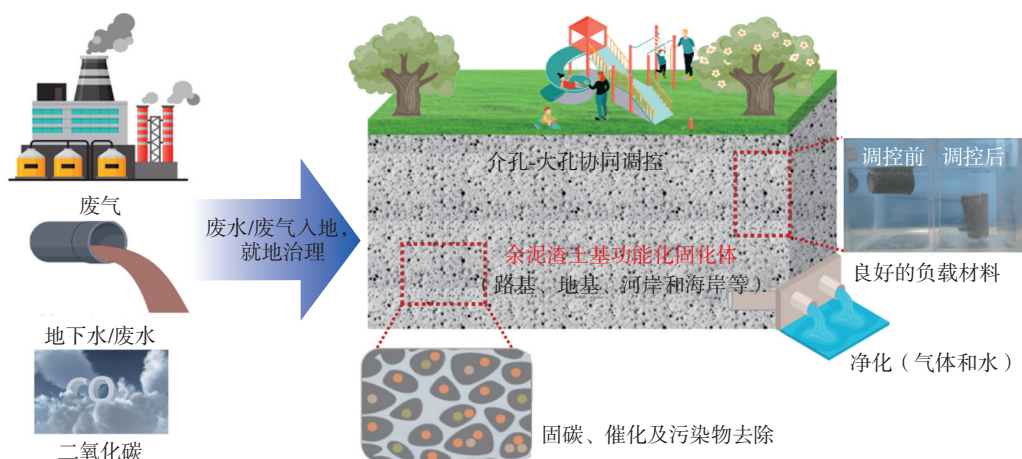


图5 余泥渣土基多场景水土耦合利用概念

Fig. 5 Multi-scenario water-soil coupling catalysis concept.

3 结论及建议

围绕城市工程建设余泥渣土处理处置这一紧迫需求, 从理论方法、产品体系、工艺标准和智能装备等方面, 探讨了行业内的共性技术难题. 同时, 结合当前研究进展, 对未来的研究方向与应用前景进行了展望, 得到如下结论和建议:

1) 在工程层面, 通过构建地聚物基凝聚-固化耦合理论方法和工艺装备, 将盾构渣土、桩基泥浆和基坑渣土等按照工程需求直接转化为碎石、细砂、泥质流态填料、泥质固态填料和泥质砌块等, 具有全量资源化潜力, 为余泥渣土的规模化利用提供了技术基础. 同时, 城市巨量余泥渣土的处理处置不仅受到技术因素影响, 还涉及政策、管理及模式等多方面因素. 因此, 需探索并构建新型处理模式, 开辟新型处理处置场景. 本研究提出的凝聚-固化耦合工艺, 能够形成工程现场和集中处理厂协同处理的新模式.

2) 在研究层面, 建议从面向大规模消纳的处理处置成套技术、面向复杂工程需求的功能化材料、面向科技前沿的先进固废基材料等3个层面分层次开展, 研究应以大规模消纳为需求牵引、以前沿探索为科技驱动, 系统推进对余泥渣土处理与处置技术的研究与应用.

3) 基于多源工业固废协同的地聚物固化和界面功能化调控, 余泥渣土基材料也可成为污染控制和生态修复的重要载体, 不仅能够在河(海)岸工程和路基填(浇)筑等众多工程场景中得到利用, 还可同时作为水土环境治理的功能介质, 进而产生环境正效应, 具备融入城市环境保护、生态修复的极大潜力.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52422004, 52179108); 深圳市科技创新计划资助项目(KCXFZ20211020164013020)

作者简介: 孙晓辉(sunxiaohui@szu.edu.cn), 深圳大学教授、博士生导师. 研究方向: 环境岩土工程与固废资源化利用.

引文: 孙晓辉, 张明, 陈湘生, 等. 工程建设余泥渣土高效利用技术与展望[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(6): 678-687.

参考文献 / References:

- [1] 杨涛, 闫美美, 刘帅磊, 等. 地下工程渣土的再生固化土力学性能试验研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2023, 40(5): 578-587.
YANG Tao, YAN Meimei, LIU Shuailei, et al. The mechanical properties of recycled solidified soil from underground construction spoils [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(5): 578-587. (in Chinese)
- [2] 黄桐, 寇世聪, 赵玉龙, 等. 日本余泥渣土管理经验与启示[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(5): 61-67.
HUANG Tong, KOU Shicong, ZHAO Yulong, et al. Management experience and enlightenment of Japan's residual mud and soil [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(5): 61-67. (in Chinese)
- [3] 李思文, 王毅, 李师. 国外余泥渣土的处置方法及其借鉴作用[J]. 中国土地, 2020(12): 44-46.
LI Siwen, WANG Yi, LI Shi. The disposal methods of foreign construction waste soil and the reference value [J]. China Land, 2020 (12): 44-46. (in Chinese)
- [4] YANG Fangshen, CAO Taibo, ZHANG Tingrong, et al. An implementation framework for on-site shield spoil utilization: a case study of a metro project [J]. Sustainability, 2023, 15(12): 9304.
- [5] ZHAO Dongping, WEN Sixun, HE Qi, et al. *In-situ* dehydration test of shield spoil in mudstone and pebble soil composite stratum [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(1): 93-105.
- [6] CAO Wei, ZHAO Jun, JIANG Zheyuan, et al. Reuse of abandoned shield residues stabilized by a sustainable binder: assessment of strength, durability, and environmental properties [J]. Buildings, 2023, 13(3): 738.
- [7] 高杨, 卫童瑶, 李滨, 等. 深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 129-138, 147.
GAO Yang, WEI Tongyao, LI Bin, et al. Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flow slide on December 20th, 2015 in Shenzhen, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 129-138, 147. (in Chinese)
- [8] 朱考飞, 张云毅, 薛子斌, 等. 盾构渣土的环境问题与绿色处理[J]. 城市建筑, 2018(29): 108-110.
ZHU Kaofei, ZHANG Yunyi, XUE Zibin, et al. Research on forecasting method of schooling need based on living space [J]. Urbanism and Architecture, 2018 (29): 108-110. (in Chinese)
- [9] WU Silin, LI Xiaodao, JIANG Pengming, et al. Dewatering characteristics of waste slurry from pipe jacking based on improved vacuum filtration method [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2022, 130: 104727.
- [10] CHEN Gang, LI Wei, YANG Fangsheng, et al. Study on resourceful treatment and carbon reduction intensity of metro shield slag: an example of a tunnel interval of Shenzhen Line 13 [J]. Buildings, 2023, 13(11): 2816.
- [11] 郭卫社, 王百泉, 李沿宗, 等. 盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望[J]. 隧道建设中英文, 2020, 40(8): 1101-1112.
GUO Weishe, WANG Baiquan, LI Yanzong, et al. Status quo and prospect of harmless disposal and reclamation of shield muck in China [J]. Tunnel Construction, 2020, 40 (8): 1101-1112. (in Chinese)
- [12] 朱伟, 钱勇进, 王璐, 等. 盾构隧道渣土与泥浆的分类与处理利用技术及主要问题[J]. 隧道建设中英文, 2021, 41(S2): 1-13.
ZHU Wei, QIAN Yongjin, WANG Lu, et al. Classification, treatment, and utilization techniques of shield tunnel abandoned Soil and related issues [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 1-13. (in Chinese)
- [13] SUN Xiaohui, CHEN Ziyi, GUO Keyu, et al. Geopolymeric flocculation-solidification of tail slurry of shield tunnelling spoil after sand separation [J]. Construction and Building Materials, 2023, 374: 130954.
- [14] ZHANG Rongjun, DONG Chaoqiang, LU Zhan, et al. Strength characteristics of hydraulically dredged mud slurry treated by flocculation-solidification combined method [J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116742.
- [15] LIN Jieli, LI Jiesen, ZUO Lei, et al. Processing system of rapid dehydration, solidification/stabilization and resource reuse for silt of river and lake [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 199(4): 042042.
- [16] SUN Xiaohui, HAN Zhihao, CHEN Xiangsheng, et al. Heavy metal retention mechanism in geopolymer-based flocculation-solidification of waste engineering spoil: migration characteristic and sodium dodecyl sulfate enhancement [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(1): 115148.
- [17] 谢亦朋, 张聪, 阳军生, 等. 盾构隧道渣土资源化再利用技术研究及展望[J]. 隧道建设中英文, 2022, 42(2): 188-207.
XIE Yipeng, ZHANG Cong, YANG Junsheng, et al.

- Research and prospect on technology for resource recycling of shield tunnel spoil [J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(2): 188-207. (in Chinese)
- [18] SUN Xiaohui, CHEN Ziyi, SUN Zongbo, et al. High-efficiency utilization of waste shield slurry: a geopolymeric flocculation-filtration-solidification method [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 387: 131569.
- [19] DINH H L, LIU Jiarui, DOH J H, et al. Influence of Si/Al molar ratio and ca content on the performance of fly ash-based geopolymer incorporating waste glass and GGBFS [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134741.
- [20] CHEN Shikun, ZHANG Yajun, YAN Dongming, et al. The influence of Si/Al ratio on sulfate durability of metakaolin-based geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120735.
- [21] NATH S K, KUMAR S. Role of alkali concentration on reaction kinetics of fly ash geopolymerization [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 505: 241-251.
- [22] PRATAP B, MONDAL S, HANUMANTHA RAO B. NaOH molarity influence on mechanical and durability properties of geopolymer concrete made with fly ash and phosphogypsum [J]. *Structures*, 2023, 56: 105035.
- [23] WANG Wanli, FAN Chengcheng, WANG Baomin, et al. Workability, rheology, and geopolymerization of fly ash geopolymer: role of alkali content, modulus, and water-binder ratio [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 367: 130357.
- [24] SIVASAKTHI M, JEYALAKSHMI R, RAJAMANE N P. Effect of change in the silica modulus of sodium silicate solution on the microstructure of fly ash geopolymers [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 102939.
- [25] SUN Xiaohui, ZHANG Haibin, HAN Zhihao, et al. Mechanism of geopolymeric solidification in shield-tunnelling slurry from diverse sources: the role of bentonite adsorption in influencing the reaction process [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 431: 136627.
- [26] 黄锐, 刘国强, 朱祐增, 等. 基于城市顶管废土的可控低强度材料 (CLSM) 及性能影响因素研究 [J]. *隧道建设中英文*, 2021, 41(增刊2): 346-352.
- HUANG Rui, LIU Guoqiang, ZHU Youzeng, et al. Controlled low strength materials based on pipe jacking waste soil and their property influencing factors [J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(Suppl. 2): 346-352. (in Chinese)
- [27] MAHAMAYA M, JAIN S, DAS S K, et al. Engineering properties of cementless alkali activated CLSM using ferrochrome slag [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(3): 04022441.
- [28] SUN Xiaohui, LIU Wenhao, CHEN Xiangsheng, et al. Sustainable solutions: transforming waste shield tunnelling soil into geopolymer-based underwater backfills [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 445: 141363.
- [29] 深圳大学, 中国建筑工程(香港)有限公司, 中国建筑国际集团有限公司, 等. 一种压电材料用于渣土筛分与降解污染物的方法: CN202411516277. X [P]. 2025-01-21.
- Shenzhen University, China State Construction Engineering (Hong Kong) Limited, China State Construction International Holdings Limited. A piezoelectric material for slag soil screening and pollutant degradation: CN202411516277. X [P]. 2025-01-21. (in Chinese)
- [30] 深圳大学, 中铁十四局集团有限公司, 中铁十四局集团大盾构工程有限公司. 一种降低淤泥污染物扩散的淤泥处理方法: CN202410222631. 1 [P]. 2025-01-21.
- Shenzhen University, China Railway 14th Bureau Group Co. Ltd., China Railway 14th Bureau Group Shield Tunnel Engineering Co. Ltd. A method for reducing the diffusion of pollutants in sludge: CN202410222631. 1 [P]. 2025-01-21. (in Chinese)
- [31] 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 深圳大学, 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 一种可释放氧气的功能型轻质砌块及其制备方法: CN202311018449. 6 [P]. 2024-04-30.
- China Railway 14th Bureau Group Shield Tunnel Engineering Co. Ltd., Shenzhen University, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd. A functional lightweight block capable of releasing oxygen and its preparation method: CN202311018449. 6 [P]. 2024-04-30. (in Chinese)
- [32] 深圳大学. 地聚物基功能型泥浆及其制备方法和应用: CN202211419255. 2 [P]. 2023-08-18.
- Shenzhen University. Geopolymer-based functional slurry and its preparation method and application: CN202211419255. 2 [P]. 2023-08-18. (in Chinese)
- [33] 方春林. 工程建设废弃泥浆资源化利用试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- FANG Chunlin. Experimental study on resource utilization of abandoned MUD in engineering construction [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [34] 陈伟, 乐绍林, 高文波, 等. 海相疏浚淤泥流动固化的作用机制和微观结构分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S1): 3114-3122.

- CHEN Wei, YUE Shaolin, GAO Wenbo, et al. Solidification mechanism and microstructural investigations on flow-solidified marine dredged sludge [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 3114-3122. (in Chinese)
- [35] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 280-284.
- DING Jianwen, HONG Zhenshun, LIU Songyu. Study of flow-solidification method and fluidity test of dredged clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Suppl. 1): 280-284. (in Chinese)
- [36] SUN Xiaohui, CHEN Ziyi, CHEN Fan, et al. Enhanced drainage performance of PVF-wicking geosynthetics: development and experimental assessment [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2024, 52(4): 562-573.
- [37] 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固软弱土的试验与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- CAI Guanghua. Experimental and application studies on soft soil carbonated and stabilized by reactive magnesia [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [38] 侯娟, 张孟喜, 韩晓, 等. 单个高强土工格室作用机理的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 26-30.
- HOU Juan, ZHANG Mengxi, HAN Xiao, et al. Mechanism of a high-strength geocell using FEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Suppl. 1): 26-30. (in Chinese)
- [39] 杨爱武, 袁腾云, 杨少朋, 等. 干湿循环与初始静偏应力耦合作用下城市污泥固化土动力累积变形特性[J]. 工程地质学报, 2022, 30(1): 117-126.
- YANG Aiwu, YUAN Tengyun, YANG Shaopeng, et al. Dynamic-triaxial cumulative deformation characteristics of municipal sludge solidified soil under the coupling action of dry-wet cycle and initial static deviator stress [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1): 117-126. (in Chinese)
- [40] SUN Xiaohui, HAN Jie, FEI Jianbo, et al. Geosynthetic-stabilized flexible pavements: solution derivation and mechanistic-empirical analysis [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(4): 468-478.
- [41] 韦童, 崔皓, 季璇, 等. 盾构渣土泥饼消纳现状与资源化前景分析[J]. 广州建筑, 2023, 51(3): 117-120.
- WEI Tong, CUI Hao, JI Xuan, et al. Analysis on the current situation of shield dregs and mud cake consumption and the prospects of resource utilization [J]. Guangzhou Architecture, 2023, 51(3): 117-120. (in Chinese)
- [42] WANG Dengfeng, MIN Fanlu, LYU H, et al. Recycling waste sand from slurry shield tunneling: a sustainable filter aid for waste slurry dehydration [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 383: 135387.
- [43] ZHANG Cong, LIU Xu, FU Jinyang, et al. Evaluating the feasibility of muck from slurry shield tunnels as a growth medium for landscaping [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2022, 72(5): 455-462.
- [44] MARIANI L, GRENNI P, BARRA CARACCIOLO A, et al. Toxic response of the bacterium *vibrio fischeri* to sodium lauryl ether sulphate residues in excavated soils [J]. Ecotoxicology, 2020, 29(7): 815-824.
- [45] AHMED KHAN H, NAQVI S S, ALHARBI A A K, et al. Enhancing trash classification in smart cities using federated deep learning [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 11816.
- [46] MA Wanqi, CHEN Hong, ZHANG Wenkang, et al. DSYOLO-trash: an attention mechanism-integrated and object tracking algorithm for solid waste detection [J]. Waste Management, 2024, 178: 46-56.
- [47] NAHIDUZZAMAN M, AHAMED M F, NAZNINE M, et al. An automated waste classification system using deep learning techniques: toward efficient waste recycling and environmental sustainability [J]. Knowledge-Based Systems, 2025, 310: 113028.
- [48] 深圳大学. 一种智能化废弃渣土多功能资源化处理方法及其系统: CN202310631943.3[P]. 2024-09-24. Shenzhen University. A multifunctional resource utilization treatment method and system for intelligent waste slag soil: CN202310631943.3 [P]. 2024-09-24. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】



补充材料