

河湖生态清淤底泥脱水处理技术研究

沈小林 王林酒

江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘要:生态清淤是河湖生态修复的重要手段,但底泥高含水率、细颗粒胶体特性导致脱水难度大。本文系统梳理了底泥物理化学特性与脱水需求,构建自然脱水、机械脱水、物化协同及新型复合脱水四类技术体系,分析了土工管袋、絮凝压滤、真空预压电热相变、洗脱及工厂化集成等典型技术的原理、优势与局限,并从底泥特性、工程规模、场地条件等维度提出技术选型建议,探讨脱水处理与资源化利用的衔接路径,为实现底泥减量化、稳定化、资源化提供技术参考。

关键词:生态清淤;底泥脱水;淤泥固化;资源化利用

引言:河湖生态清淤工程产生大量高含水率底泥,其细颗粒胶体结构与污染物赋存特性使脱水处理成为工程关键瓶颈。传统自然晾晒效率低,机械脱水受板结堵塞制约,单一技术难以兼顾效率、成本与环保要求。本文围绕生态清淤底泥脱水处理技术,从底泥特性出发,系统分类主流脱水技术并分析其适用性,结合工程场景提出选型策略,重点探讨脱水与资源化利用的协同路径,旨在为河湖底泥减量化处置与循环利用提供系统性技术支撑。

1 生态清淤底泥的基本特性与脱水需求

1.1 底泥的物理化学特性

生态清淤获取的河湖底泥是水体泥沙、有机质、污染物与微生物聚合形成的复杂胶体体系,具备区别于普通工程泥沙的特殊物理化学特性。物理层面,底泥颗粒粒径极细,以粉砂、黏土胶体颗粒为主,比表面积大,孔隙结构发达,天然含水率普遍处于80%~150%区间,孔隙水结合形式复杂,自由水、吸附水与毛细水共存,导致底泥流动性强、固结性差、渗透性极低。化学层面,底泥富集水体沉降的氮、磷、重金属及微量有机污染物,胶体颗粒表面带有负电荷,颗粒间静电斥力较强,难以自然沉降团聚。同时,底泥中腐殖质、微生物代谢产物等有机质会包裹颗粒,进一步稳定泥水混合体系,延缓自然脱水固结过程^[1]。另外,底泥理化特性受水域环境、季节变化、污染程度影响差异显著,不同河湖底泥的颗粒组成、有机质含量、污染物赋存状态各不相同,直接决定了后续脱水处理的难度与工艺适配性。

1.2 脱水的目的与技术挑战

生态清淤底泥脱水的核心目的是破除稳定的泥水胶

体体系,高效剥离底泥中多余水分,降低底泥含水率与流动性,实现底泥减量化、稳定化,为后续无害化处置与资源化利用奠定基础。通过脱水处理可大幅缩减底泥体积,减少堆场占用面积,降低清淤工程转运、存储成本,同时提升底泥密度,抑制底泥中污染物溶解释放,削减二次污染风险。当前底泥脱水处理面临多重技术挑战,首先细颗粒胶体结合水剥离难度大,常规自然晾晒仅能去除自由水,无法破除颗粒吸附的结合水,脱水效率极低。其次高有机质、高污染底泥易出现板结、黏壁、滤布堵塞等问题,严重影响机械脱水设备运行稳定性。此外,传统脱水工艺普遍存在脱水均匀性差、能耗偏高、药剂用量大的问题,易造成二次污染,且难以适配不同特性底泥的差异化处理需求,兼顾脱水效率、处理成本与生态环保的技术落地难度较高。

1.3 脱水处理的技术需求层次

结合生态清淤工程实际场景与底泥处理标准,底泥脱水处理技术可划分为基础达标、高效提质、绿色资源化三个核心需求层次。基础达标层次为底层需求,核心是满足工程处置基本要求,通过简易脱水方式将底泥含水率降至规范限值,实现底泥固液分离、体积减量,保障清淤工程顺利推进,适用于污染程度低、资源化需求弱的普通河湖底泥处理场景。高效提质层次为中端需求,聚焦解决传统脱水效率低、效果不均的问题,通过工艺优化、药剂适配、设备升级,提升结合水剥离能力,缩短脱水周期,提升底泥固结均匀度,适配大规模、工期紧张的清淤工程。绿色资源化层次为高端核心需求,以脱水与资源化协同为目标,在高效脱水的基础上,严控药剂残留、尾气尾水等二次污染,保留底泥有

效组分特性,使脱水底泥满足土壤改良、建材制备、路基填筑等资源化利用标准,实现底泥处置无害化、减量化、资源化三位一体的工程目标。

2 底泥脱水处理主要技术分类与原理

2.1 技术分类框架

基于脱水机理、工艺形式、设备类型与工程应用场景,底泥脱水处理技术可构建系统化分类框架,核心分为自然脱水、物理机械脱水、物化协同脱水、新型复合脱水四大类别。自然脱水技术以自然晾晒、干化、堆存脱水为主,依托自然风力、温度实现自由水挥发,工艺简单、成本低廉,但脱水效率低、受天气影响大,仅适用于小规模、低要求预处理场景。物理机械脱水包含压滤、真空、离心脱水等类型,通过外力强制挤压、负压吸附实现固液分离,脱水效率稳定,是当前工程主流技术。物化协同脱水以絮凝调理为核心,通过投加改性药剂破坏底泥胶体稳定性,辅助机械脱水,大幅提升细颗粒底泥脱水效果。新型复合脱水涵盖电热相变、真空预压、洗脱集成等创新技术,结合物理、热学、化学多重机理,解决高难度底泥脱水难题。

2.2 脱水机理的理论基础

底泥脱水的核心理论基础是破除泥水胶体稳定体系,打破水分与底泥颗粒的结合平衡,实现不同形态水分的分级剥离,依托胶体化学、土力学、流体力学与热工学多学科理论支撑。胶体化学理论是脱水核心依据,底泥胶体颗粒的静电斥力、水化膜效应是泥水稳定共存的关键,通过电荷中和、吸附架桥、网捕卷扫等作用,可破坏水化膜,促使细颗粒团聚絮凝,释放包裹的吸附水与毛细水。土力学理论聚焦底泥孔隙结构变化,通过外力施压、负压作用,压缩底泥孔隙体积,排出孔隙自由水,提升底泥密实度,实现固结脱水^[2]。流体力学理论指导固液分离过程,明确水分在多孔介质中的渗透、流动规律,为脱水设备参数优化、工艺流速控制提供依据。热工学理论则支撑电热相变脱水技术,通过热能改变水分相变状态,突破机械脱水无法剥离的结合水限制,各类理论相互协同,构成不同脱水技术的核心作用机理。

3 典型脱水处理技术分析

3.1 土工管袋脱水技术

土工管袋脱水技术是生态清淤工程中常用的原位、半原位脱水工艺,核心原理是利用高强度透水土工织物的筛分过滤特性,实现底泥泥水自然分离。施工时将调理后的稀浆底泥通过管道输送到土工管袋内,依托管

袋织物微孔结构,截留底泥固体颗粒,允许水分自由渗出,同时通过堆叠、加压方式提升脱水效率,逐步实现底泥固结干化。该技术工艺操作简单、设备投入少、施工便捷,无需大型成套机械设备,可适配河湖岸边、滩涂等复杂施工场地,且施工过程无噪音、无二次扬尘,生态适配性极强。但其脱水效率受天气、底泥特性影响显著,自然脱水周期长达数十天,仅能剥离自由水,最终底泥含水率偏高,难以实现深度脱水。同时高有机质细颗粒底泥易堵塞织物微孔,导致脱水速率持续下降,大规模工程应用中占地面积大,工期可控性较差,仅适用于中小型清淤工程的初步脱水处理。

3.2 絮凝调理与机械压滤技术

絮凝调理与机械压滤耦合技术是当前底泥深度脱水的主流工艺,适配各类高含水率、细颗粒河湖底泥处理。技术核心分为两步,首先通过投加无机、有机复合絮凝剂,对底泥胶体进行改性调理,中和颗粒表面负电荷,破坏水化膜,促使微小颗粒团聚形成大颗粒絮体,有效释放颗粒间结合水,解决细颗粒难沉降、易穿透滤材的问题。随后利用板框、隔膜压滤机等机械设备,通过高压静态挤压,强制排出絮体孔隙水分,实现固液高效分离。该技术优势突出,脱水效果稳定,可将底泥含水率降至60%以下,满足资源化利用基础标准,处理效率高、工期短,适配大规模清淤工程。但技术存在明显短板,絮凝药剂投加量控制难度大,过量药剂易造成水体二次污染,且压滤设备易出现滤布堵塞、设备磨损问题,运维成本较高,对底泥预处理均质化程度要求严苛。

3.3 真空预压与电热相变脱水技术

真空预压与电热相变脱水是针对高黏性、高有机质难脱水底泥的新型复合处理技术,突破了传统机械脱水的性能瓶颈。真空预压技术通过在底泥层铺设排水板与密封膜,形成密闭负压环境,利用持续真空负压吸力,排出底泥孔隙毛细水与自由水,同时促进底泥缓慢固结,适用于大面积堆场底泥原位脱水^[3]。电热相变脱水依托热传导、热辐射原理,通过电热设备对底泥进行低温加热,打破水分子与底泥颗粒的结合键,使难剥离的吸附水、结晶水发生相变汽化,实现深度脱水。两种技术耦合应用可互补短板,真空预压快速完成浅层脱水固结,电热相变彻底剥离残留结合水,大幅提升脱水深度。该技术脱水效果优异、适配性广,但能耗相对较高,设备配套复杂,施工工艺管控难度大,目前多应用于高污染、高黏度特殊底泥的精细化脱水处理。

3.4 底泥洗脱技术

底泥洗脱技术是集污染物去除与泥水分离于一体的复合型预处理脱水技术,区别于单一脱水工艺,可同步实现底泥净化与初步脱水。其核心原理是利用专用洗脱药剂与水流冲刷作用,打散团聚底泥颗粒,剥离颗粒表面吸附的氮、磷、重金属等污染物,同时优化底泥颗粒级配,改善底泥脱水性能。洗脱过程中,粗细颗粒分级沉降,粗大颗粒快速沉淀脱水,细颗粒经絮凝辅助沉降,有效降低底泥有机质与污染物含量,破除阻碍脱水的胶体稳定结构。该技术最大优势是预处理效果突出,可同步完成底泥净化改性,大幅降低后续深度脱水难度,避免高污染底泥脱水后存在二次释放风险,适配黑臭水体、重度污染河湖底泥处理。

3.5 工厂化工业化集成处理技术

工厂化工业化集成处理技术是规模化、标准化的底泥脱水处置模式,整合预处理、絮凝调理、深度脱水、废水处理、尾气管控等多单元工艺,实现底泥流水线式闭环处理。该技术将清淤底泥统一输送至专业处理厂区,经过筛分除杂、浓度调节、药剂调理、机械深度压滤、脱水干化等标准化工序,完成系统化脱水处理,同时对脱水产生的尾水、废渣、废气进行无害化处置。该技术自动化程度高、处理规模大、工艺稳定性强,脱水效果均匀可控,可稳定将底泥含水率控制在资源化标准范围内,且全程密闭作业,无二次污染,环保优势显著。同时可根据底泥特性智能调控工艺参数,适配不同类型底泥处理需求。

4 脱水处理的技术选择与工程应用

4.1 技术选择的考量因素

生态清淤底泥脱水技术的选型需结合工程实际,综合考量底泥特性、工程规模、场地条件、成本预算、环保标准五大核心因素。底泥基础特性是选型核心依据,高黏度、高有机质污染底泥优先选用洗脱预处理+机械压滤集成工艺,普通低污染底泥可采用土工管袋、简易压滤等低成本技术。工程规模与工期直接决定工艺模式,小规模零散清淤工程适配移动式简易脱水技术,大规模、长工期工程优先选用工厂化集成处理技术,保障处理效率与标准化程度^[4]。施工场地条件限制工艺选

型,岸边、滩涂开阔场地可采用土工管袋、真空预压技术,城区、狭小场地适合密闭式机械脱水工艺。同时需兼顾工程成本,平衡设备投入、药剂消耗、运维费用,在满足处理标准的前提下优选性价比工艺。

4.2 脱水处理与资源化利用的衔接

底泥脱水处理是资源化利用的前置核心工序,两者的高效衔接是实现底泥变废为宝、推进生态循环治理的关键。脱水处理并非单纯实现底泥减量化,更需根据资源化利用方向精准控制脱水指标、底泥纯度与组分特性,为后续资源化利用提供合格原料。针对土壤改良、园林绿化利用场景,脱水工艺需严控药剂残留,保留底泥有机质养分,将含水率调控至适宜覆土、种植的区间;针对建材制备、路基填筑场景,需通过深度脱水、改性调理,降低底泥含水率与压缩性,提升底泥密度与稳定性。通过优化脱水工艺参数、适配资源化需求,可打通底泥“清淤—脱水—处置—利用”全链条,彻底改变传统底泥填埋处置模式,降低工程治理成本,实现河湖生态治理与资源循环利用的双向赋能。

结束语

生态清淤底泥脱水处理是实现河湖底泥减量化、稳定化与资源化的核心环节。当前技术已从单一自然脱水发展为机械、物化、热学多机理耦合的复合体系,但仍面临高有机质底泥脱水难、药剂二次污染、能耗偏高等挑战。未来应重点推进脱水工艺智能化调控、绿色药剂研发及脱水—资源化全链条协同,结合区域底泥特性与处置需求精准选型,推动底泥从“被动处置”向“主动资源化”转变,助力河湖生态治理与资源循环利用协同发展。

参考文献

- [1] 郑好,徐民主,李立,等. 河湖底泥处理处置现状及系统性处理路线建议 [J]. 能源与环境,2020(5):94-96.
- [2] 刘存辉,王茵,张关超. 环保罩吸清淤脱水工艺对河道水质影响的研究 [J]. 中国水能及电气化,2023(12):6-13.
- [3] 王苗苗,罗文琦,王琦,等. 白洋淀清淤底泥改良制备绿化土技术研究 [J]. 水运工程,2022(z2):54-58,102.
- [4] 黄明康,谢志豪. 淤泥脱水固化技术在环保疏浚中的应用 [J]. 生物化工, 2021, 7(3):117-119.