

河道淤泥固化处理技术在水环境治理中的应用

蓝 鹏 王金伟

江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘 要：河道底泥持续淤积富集氮磷、重金属污染物，是水体黑臭与内源富营养化的主要诱因，淤泥固化可实现底泥稳定处置与内源污染管控。本文分析河道淤泥理化污染特征，阐述淤泥淤积带来的水环境负面效应，对比原位、异位两类固化工艺原理，探讨传统固化材料与环保复合固化材料的适配差异及配比优化方案，结合黑臭水体整治、生态河道修复、防洪通航河道治理三类场景说明具体施工方式，梳理不同工况技术选型思路，可为同类河道底泥治理工程提供实操参考。

关键词：河道淤泥；淤泥固化；水环境治理；固化材料；底泥修复

引言：地表径流、生活排污长期汇入河道，造成底泥逐年淤积并累积各类污染物，常规清淤施工易扰动底泥引发二次污染，淤泥堆放处置也存在占地与渗漏风险。淤泥固化依靠胶凝改性实现淤泥固结与污染物封存，逐步成为内源污染治理主流技术。为理清该技术应用逻辑，本文从淤泥污染机理入手，分类介绍各类固化工艺运行模式，开展固化材料选型与配比适配分析，依托三类典型河道工况梳理现场施工流程，明确不同场景技术选用依据，推动固化技术规范落地应用。

1 河道淤泥特性及水环境治理关联机理

1.1 河道淤泥基本理化特性

城区及城郊河道淤积淤泥具备高含水、高黏性、低承载力的典型物理特征，常态淤泥含水率维持75%~92%，孔隙结构疏松，渗透性极差，原生淤泥无自主固结能力，受水流扰动极易悬浮扩散。化学组分层面，受生活面源、地表径流、管网溢流排污影响，表层0-30cm淤泥为污染富集层，氮、磷有机质累积量远超底层原状底泥，同时富集重金属铅、镉、铬及难降解芳香类有机物。相较于自然河湖底泥，城市河道淤泥粒径更细、胶体含量更高，污染物吸附结合稳定性弱，易受水环境水文条件变化发生解析释放，是河道内源污染的核心载体。

1.2 淤积淤泥对河道水环境的负面影响

长期淤积淤泥首要危害为诱发水体内源富营养化，静水、缓流工况下底泥氮磷持续向上覆水体释放，打破水体营养盐平衡，直接诱发藻类爆发、水体透光性下降。其次淤泥抬高河床高程，缩减河道过水断面，降低行洪排涝能力，改变原有水动力流场，削弱河道自净能力。除此之外，污染淤泥会破坏底栖生境，细颗粒淤泥覆盖卵石、砂石原生河床，阻隔底栖螺类、水生昆虫栖息繁衍，破坏河道水陆物质交换链条，逐步造成水生态

群落单一化，加剧河道黑臭常态化问题。

1.3 淤泥固化助力水环境治理核心机制

淤泥固化依托胶凝材料水化反应重塑淤泥土体结构，实现水环境长效控污修复。（1）土体固结减量化，固化剂与淤泥水分发生水化反应，消耗游离水体，降低淤泥含水率，提升土体密实度，从源头杜绝底泥受水流扰动悬浮扩散。（2）污染物钝化封存，固化生成水化硅酸钙、铝酸钙胶凝晶体，包裹固定重金属、有机污染物，阻断污染物水土迁移路径，降低污染物浸出风险。（3）河床基底改良，固化后底泥具备稳定力学强度，重塑硬质生态河床基底，恢复河道原有水动力条件，适配水生植被扎根生长，打通河道生态自愈链路，实现治标兼治本的水环境治理效果^[1]。

2 主流河道淤泥固化处理技术分类及工艺原理

2.1 原位淤泥固化技术

原位固化技术无需外运底泥，直接在河道淤积原位完成改性固结，适配城区小微河道、景观缓流河道施工，施工扰动范围小，是现阶段黑臭河道内源治理主流工艺，核心技术分为三类：（1）原位搅拌化学固化技术：依托长臂搅拌桩机、水下一体化搅拌设备，潜入河道表层0.5-2.0m污染淤泥层，通过高压注浆系统，将配比完成的液态固化浆液匀速注入淤泥内部，机械螺旋叶片横向、纵向双向切削拌合，使淤泥、水体、固化剂充分混合。工艺原理依托胶凝材料水化反应，生成水化钙铝凝胶、硅酸钙晶体，填充淤泥颗粒孔隙，胶结细碎黏粒，逐步提升原位底泥无侧限抗压强度，施工适配污染深度均匀、河床地势平缓河段。（2）真空预压原位脱水固化技术：属于物理固结类工艺，先在淤泥表层铺设土工排水板、密封膜，封闭河道局部施工水域，外接真空负压机组，形成密闭负压排水体系。依靠气压差抽出淤

泥内部游离水、孔隙结合水,压缩淤泥孔隙体积,实现淤泥自主密实固结,无需添加化学药剂,纯物理改性,多用于大面积轻度淤积农田河道、郊野自然河道。(3)原位生物生态固化技术:以微生物矿化、土著菌群代谢为核心原理,投放矿化菌剂、有机营养基质,刺激河道本土微生物代谢生成碳酸钙沉淀,粘结淤泥细颗粒,改良淤泥土体结构,固化酸碱度温和,不会改变河道原生底栖环境,多用于生态保育类管控河道。

2.2 异位淤泥固化技术

异位固化为先清淤外运、后场集中固化处理,适配通航主干道、高污染工业排污河道,淤泥外运后可分类处置,施工不受河道水位限制,工程可控性更强,常用三类实操工艺:(1)机械脱水改性固化工艺:清淤泥浆输送至固化场区后,先通过格栅筛分别除石块、杂草等杂质,投入调质药剂打散淤泥胶体结构,破除淤泥水分子吸附力,再经由板框压滤机、带式脱水机机械挤压,快速降低淤泥含水率至45%以下,辅以少量固化粉料拌合,完成土体定型固化,工艺机械化程度高,适配大批量市政河道淤泥处置。(2)复合型环保固化剂固化工艺:针对重金属、高氮磷污染淤泥专属工艺,以矿渣、粉煤灰工业固废为基底复配钝化组分,按既定掺量与脱水淤泥强制拌合,依靠离子交换、胶体包裹反应,稳定淤泥内部污染物质,同时完成土体固结,相较纯水泥固化,水化放热更低,土体开裂率更小。(3)热干化协同固化工艺:针对高有机质腐殖淤泥,采用低温热风干化脱去结合水,搭配无机胶凝粉料拌合固化,高温破坏有机质亲水基团,从结构上解决腐殖淤泥难固结、强度不达标的工程难题,多用于老旧城区重度腐殖淤积河道^[2]。

3 淤泥固化材料选型及水环境适配性优化

3.1 传统无机固化材料应用特性

现阶段河道工程常用传统固化材料以硅酸盐水泥、生石灰为主,材料采购便捷、固结成型速度快,适配常规河道淤泥加固施工,材料特性如下:(1)水泥固化材料:水化反应速率稳定,可快速提升淤泥土体抗压强度,适配通航、防洪河道高强度固化施工,但水化碱度偏高,易提升河床水体pH值,细颗粒淤泥拌合均匀度较差;(2)石灰固化材料:可改性淤泥胶体结构,降低淤泥塑性指数,原料造价低廉,仅适配低污染粉质淤泥,遇高有机质淤泥易出现土体开裂、固结失效问题。两类传统材料均无污染物钝化能力,施工后存在胶体离子溶出隐患。

3.2 水环境适配型环保固化材料分类

依托工业固废改性制备环保固化材料,适配管控类

水环境施工,规避水体次生污染,主流工程用材分为三类:(1)矿渣-粉煤灰复合固化料:依托工业冶金废渣复配制备,水化碱性温和,可依托离子交换吸附淤泥重金属,适配城市黑臭河道表层污染淤泥;(2)钙基改性生物固化料:添加植物基有机质调配而成,酸碱度贴近天然河道水体,不破坏河床原有酸碱环境,多用于生态保育河段原位固化;(3)靶向钝化复合固化料:添加磷基钝化组分,专门结合淤泥铅、镉重金属离子,固化稳定性更强,适配工矿排污河道重度污染淤泥处置。

3.3 基于水环境标准的固化配比优化要点

结合地表水水环境管控标准,固化材料配比需结合淤泥含水率、污染指标动态调整:(1)清水涵养河道:降低胶凝材料掺量,选用生物基固化料,掺量控制6%~10%,保障河床透水透气性;(2)内源污染河道:提升固废复合固化料掺量12%~18%,兼顾固结强度与污染物封存效果;(3)临水施工河段:优化水灰比,添加缓凝组分,减缓固化浆液水化速度,避免施工浆液外溢扩散,适配临水原位拌合施工^[3]。

4 淤泥固化技术在水环境治理中的具体应用

4.1 城市黑臭水体整治固化应用

城市内河、街区支渠属于封闭缓流黑臭水体,淤泥厚度集中0.6-2.0m,表层淤泥氮磷富集、有机质含量高,水体流动性差,清淤极易扰动底泥造成二次污染,工程优先选用原位固化工艺施工,适配城区狭小临水施工场地,具体现场应用要点如下:(1)施工前期预处理:施工前划定水域围挡分区,布设浮筒拦污帘阻隔水体悬浮物扩散,检测分区淤泥含水率、重金属含量、pH值,剔除水面漂浮杂物、水底硬质建筑垃圾,划分重度污染区、轻度污染区,差异化配置固化浆液,城区黑臭河道禁止使用高碱度纯水泥固化剂。(2)分区原位固化施工:轻度污染河段采用矿渣复合固化料,设计掺量8%-12%,采用长臂水下搅拌设备,搅拌深度控制1.2m以内,搅拌转速35r/min,单次拌合半径1.2m,搭接宽度0.3m,保证淤泥与固化料拌合均匀;重度污染河段采用磷基钝化复合固化剂,同步完成固结与重金属固定,注浆压力控制0.25-0.35MPa,避免高压注浆击穿淤泥层造成浆液外泄。(3)后期现场养护管控:临水原位固化完成后封闭水域7-10天,静置水化固结,禁止船只通航、水流扰动,固化体表层形成致密胶结层即可通水,无需外运处置淤泥,适配老旧城区无淤泥堆放场地的河道治理工程,是现阶段市政黑臭水体标配施工工艺。

4.2 流域生态涵养型河道底质修复应用

城郊生态涵养河道、滨水湿地、生态补水廊道,以

维持原生水生态基底为施工原则,不改变河床天然孔隙度、水土交融结构,禁用高强度化学固化工艺,全域采用低扰动生态固化技术,兼顾底泥固结稳定性与生境完整性,实操应用内容如下:(1)施工基底勘察界定:此类河道淤积厚度偏小,平均淤积深度0.3-0.8m,淤泥有机质含量高、污染程度低,河床原有砂石、水生根系基底完整,施工仅需加固表层浮泥,保留下层原状天然底泥,保障水体竖向渗透交换能力。(2)原位生物固化施工工艺:选用微生物矿化固化剂+有机营养基质组合材料,全域泼洒式施工,无需机械强力搅拌,依托河道土著脱硫菌、碳酸钙矿化菌群自主代谢粘结淤泥细颗粒,材料掺量仅4%-7%,水体pH波动值控制 ± 0.3 以内,不会损伤现有底栖生物、沉水植物根系。(3)分段适配施工管控:滨水浅滩区域采用表层薄层固化,固化厚度控制20-30cm,保证滩地透水透气;河道深水区采用点状固化加固,仅加固淤泥松散点位,保留天然淤泥软质底床,适配螺类、底栖鱼虾栖息繁衍,施工全程无泥浆外运、无化工材料残留,契合流域生态长效管控施工标准。结合河道水文周期开展养护管控,雨季严控岸坡水流冲刷力度,避免表层固化层剥离破损。该工艺施工工序简易,无需大型水上机械设备,施工扰民程度低,适配生态管控区限制性施工要求,适配市域生态廊道常态化底泥养护作业^[4]。

4.3 防洪通航复合型河道清淤固化应用

县域主干行洪河道、乡镇通航河道兼具排涝输水、小型船舶通航双重功能,对河床承载力、过水断面、岸坡稳定性要求极高,淤泥淤积量大、粒径混杂,含砂石、泥沙混合淤积物,工程统一采用清淤+异位集中固化一体化施工模式,现场标准化应用流程如下:(1)疏浚清淤作业管控:采用绞吸式挖泥船全域疏浚,按设计高程开挖河床,清理河床淤积淤泥,严控开挖超挖厚度不大于15cm,通航主航道淤泥全部外运,岸坡边缘局部淤泥原位加固,清理后的河床断面满足十年一遇行洪过

水标准。(2)后场异位分级固化处理:外运淤泥输送至岸边密闭固化堆场,分级处理施工:①航道基底回填淤泥:采用水泥-粉煤灰复合固化料,掺量15%-18%,固化28d无侧限抗压强度 $\geq 0.6\text{MPa}$,满足通航荷载;②岸坡回填覆土淤泥:优化水灰比,提升土体抗渗、抗冲刷性能,防止汛期岸坡滑移坍塌;③多余固化渣土破碎筛分,就地用作河道护坡垫层、便道填筑骨料。(3)临水衔接施工要点:河道岸坡新旧土体衔接位置,增设土工格栅配合固化淤泥填筑,弱化土体沉降差;汛期施工阶段,调整固化料缓凝配比,缩短固结成型时长,规避汛期水位上涨浸泡未固结淤泥,保障复合型河道水文运行安全,实现清淤、加固、资源化同步施工^[5]。

结束语:本文系统梳理河道淤泥固化相关机理、工艺类型、材料选配及工程应用模式,明确原位、异位固化技术各自适用边界,对比传统固化材料与环保型固化材料优劣,并针对三种典型河道治理场景给出对应的施工管控要点。当前固化技术仍存在高污染淤泥处理成本偏高、生态型固化强度不足等问题。后续可围绕工业固废基复合固化剂改良、智能化精准拌合施工开展深入研究,进一步降低工程成本,提升底泥长效稳定性,推动淤泥处置减量化、无害化与资源化协同发展。

参考文献

- [1]温浩.河道淤泥固化处理技术在水环境治理中的应用[J].湖南水利水电,2025(1):74-77.
- [2]沙鸥.土壤固化技术在某河道治理工程中的应用[J].区域治理,2026(8):0151-0153.
- [3]聂琪.淤泥固化技术在河道清淤疏浚治理中的应用[J].黑龙江水利科技,2025,53(11):106-109.
- [4]陈富.水环境治理工程施工中的河道清淤技术研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(1):150-153.
- [5]岑天碧.淤泥固化技术在河道清淤疏浚中的应用研究[J].水上安全,2025(12):97-99.