

工业污水处理污泥的无害化处置技术探讨

姜雪松

滨州市思源建设投资发展有限公司，山东滨州，256800；

摘要：工业污水处理过程中产生的污泥成分复杂，含有大量重金属、有毒有机物及病原菌，若处置不当会对生态环境和人体健康造成严重威胁。本文阐述工业污水污泥的危害特性，系统梳理当前主流的无害化处置技术，包括固化稳定化技术、热化学处理技术、生物处理技术等，分析各技术的原理、优势及应用局限，探讨不同技术的适配场景与优化方向，旨在为工业污泥的安全、高效处置提供技术参考，推动工业污泥资源化与无害化协同发展。

关键词：工业污水污泥；无害化处置；技术

DOI：10.64216/3104-9680.25.02.005

引言

工业污泥作为工业污水处理的副产物，富集了多种污染物，其无序堆放和简单填埋已引发土壤污染、地下水污染等系列环境问题。随着环保标准日趋严格，工业污泥无害化处置成为工业绿色发展的关键环节。目前各类处置技术在成本、效果等方面存在差异，亟需对现有技术进行整合分析，明确技术发展趋势，为解决工业污泥处置难题提供科学依据。

1 工业污水污泥的危害特性与处置原则

1.1 工业污水污泥的危害特性

工业污水污泥的危害源于其复杂的污染物组成，主要体现在三个方面。一是重金属污染，污泥中含有的铅、镉、汞、铬等重金属具有难降解性和生物富集性，进入土壤或水体后，会通过植物吸收、水生生物富集等途径进入食物链，逐级传递并放大浓度，最终富集于人体体内，危害神经系统、造血系统、肾脏等关键器官，引发慢性中毒、器官衰竭甚至遗传物质突变等严重后果。二是有毒有机物污染，化工、印染、制药等行业产生的污泥中含有多环芳烃、酚类、卤代烃、农药残留等物质，这类物质具有强致癌、致畸、致突变效应，不仅会破坏土壤微生态结构，抑制土壤酶活性与微生物群落多样性，还会污染水体，威胁水生生物生存，打破区域生态平衡的稳定性。三是病原微生物污染，部分工业污水处理环节会与生活污水污泥混合处理，导致工业污泥携带大量细菌、病毒、寄生虫卵等病原微生物，若未经妥善处置直接堆放或填埋，其携带的病原体随雨水冲刷渗入土壤和地下水，或通过扬尘传播，易引发群体性的公共卫生安全隐患。

1.2 工业污水污泥无害化处置原则

工业污水污泥无害化处置需遵循减量化、稳定化、无害化与资源化协同推进的原则。减量化是处置工作的前置环节，通过机械脱水、热力干化、低温冷冻脱水等技术手段降低污泥含水率与体积，大幅减少后续处置的运输成本、仓储占地面积，为规模化、集约化处理奠定基础；稳定化是核心过渡环节，通过物理固化、化学螯合、生物稳定等方法降低污泥中污染物的活性，抑制重金属离子溶出与有毒有机物分解转化，避免其在自然环境中二次释放造成持续性污染；无害化是最终目标环节，通过彻底去除或破坏污泥中的重金属、有毒有机物等有害物质，杀灭病原微生物，消除其对生态环境和人体健康的直接与潜在危害；资源化是提质增效环节，在确保污泥无害化达标的基础上，将其转化为建筑材料、有机肥料、生物质能源等可利用资源，实现变废为宝与循环发展，推动污泥处置从“末端治理”向“资源循环”转型。

2 工业污水污泥无害化处置主流技术

2.1 固化稳定化技术

固化稳定化技术是通过向污泥中添加固化剂和稳定剂，借助物理包裹和化学反应实现污染物的固定。固化剂多采用水泥、石灰、粉煤灰等胶凝材料，通过水化反应形成致密的固化体，将污泥颗粒与污染物牢牢包裹其中，大幅降低污染物迁移性；稳定剂包括磷酸盐、硫化物等，可与重金属离子发生螯合、沉淀反应，形成性质稳定的化合物。该技术操作流程简单、处理周期短，适用于重金属含量较高的工业污泥，但存在固化体体积增大、长期稳定性受环境酸碱度影响

有待验证等问题。

2.2 热化学处理技术

热化学处理技术是在高温条件下对污泥进行处理，实现有机物分解和污染物去除，主要包括焚烧、热解、气化等工艺。污泥焚烧技术是将脱水污泥送入焚烧炉，在 800-1000℃ 高温下，使有机物彻底燃烧分解，病原菌被杀灭，重金属被固化在灰烬中，同时可回收热能用于发电或区域供热。热解技术是在无氧或缺氧环境下，将污泥加热至 300-800℃，使其分解为生物油、可燃气体和炭渣，生物油可进一步精炼作为燃料，炭渣可用于土壤改良或制备活性炭。气化技术则是在高温气化剂作用下，将污泥转化为合成气，进一步提纯后可用于发电或化工原料生产。热化学处理技术减容率高、无害化彻底，但存在设备投资大、运行能耗高、易产生二噁英等持久性有机污染物的弊端。

2.3 生物处理技术

生物处理技术是利用微生物的代谢作用降解污泥中的有机物，降低污染物毒性，主要包括堆肥处理、蚯蚓处理、厌氧消化等工艺。堆肥处理是将污泥与秸秆、锯末等辅料混合，通过好氧微生物的发酵作用，使有机物分解转化为腐殖质，发酵过程中产生的高温可有效杀灭病原菌和虫卵，最终产物可作为有机肥用于园林绿化。蚯蚓处理是利用蚯蚓的吞食和代谢作用，分解污泥中的有机物，蚯蚓肠道中的微生物还能进一步降解有毒物质，同时蚯蚓粪具有良好的土壤改良效果，该技术绿色环保、成本较低，但处理周期长，受环境温度影响较大。厌氧消化技术是在无氧环境下，通过产甲烷菌等微生物的作用，将污泥中的有机物分解为甲烷和二氧化碳，甲烷可作为清洁能源，消化后的沼渣经过进一步处理可实现无害化利用。生物处理技术能耗低、无二次污染，适合处理有机物含量高的工业污泥，但对重金属等无机污染物的去除效果有限。

3 工业污水污泥无害化处置技术的优化方向

3.1 复合处置技术的研发与应用

单一处置技术难以兼顾无害化效果与资源化效益，复合处置技术成为突破现有技术瓶颈的核心发展趋势。该技术的核心逻辑在于通过工艺耦合，整合不同技术的优势，规避单一技术的短板，实现 1+1>2 的处置效能。例如，将固化稳定化技术与热化学处理技术结合，

先向污泥中投加水泥、粉煤灰等固化稳定剂，通过物理包裹与化学螯合作用固定重金属离子，再进行焚烧或热解处理，可有效降低热处理过程中重金属的挥发逸散风险，同时提升污泥的减容率与热能回收效率；将生物处理技术与化学淋洗技术结合，先用柠檬酸、EDTA 等高效淋洗剂去除污泥中的部分易迁移重金属，再进行好氧堆肥或厌氧消化处理，既能降低重金属对微生物活性的抑制作用，又能提高最终产物的安全性，为堆肥产品的土地利用或沼渣的资源化利用奠定基础。复合处置技术可整合各技术优势，弥补单一技术的不足，实现工业污泥的高效、安全处置。

3.2 资源化利用路径的拓展

在无害化处置的基础上，拓展多元化、高附加值的资源化利用路径，是降低处置成本、实现污泥处置可持续发展的关键举措。污泥经过不同无害化技术处理后，可转化为多种具有利用价值的产品，形成闭环式资源循环链条：污泥焚烧后的灰烬经无害化检测达标后，可作为制备水泥熟料的掺合料，或用于道路基层材料的生产，实现大宗固废的消纳；热解技术产生的生物油经过精炼提质，可作为燃料油替代化石能源，热解炭渣则可加工成高性能吸附剂，用于废水处理中的污染物吸附；厌氧消化产生的甲烷可提纯后作为民用燃气或发电燃料，消化后的沼渣经进一步处理可加工成有机肥料，用于园林绿化或农田土壤改良。同时，应加快制定污泥资源化产品的质量分级标准与应用技术规范，建立健全产品溯源体系，确保其在学习过程中的环境与生态安全，推动污泥资源化利用向产业化、规模化方向发展。

3.3 低成本高效处置技术的开发

当前工业污泥处置成本居高不下，设备投资、药剂消耗、能耗费用等因素制约了技术的大规模推广应用，开发低成本高效处置技术迫在眉睫。在药剂成本控制方面，可充分利用钢渣、矿渣、粉煤灰等工业废渣替代传统的水泥基固化稳定剂，这类工业废渣不仅来源广泛、价格低廉，还能通过水化反应与重金属离子发生螯合沉淀，达到稳定污染物的效果，同时实现废渣的协同处置；在能耗优化方面，需研发高效节能的热化学处理设备，通过优化炉膛结构、改进换热系统、调控工艺参数等方式，降低污泥干化与焚烧过程

中的能耗；此外，还可积极探索利用太阳能、生物质能等可再生能源驱动污泥干化和处理，例如搭建太阳能干化棚，利用太阳能热能降低污泥含水率，减少后续热处理的能耗投入，进一步压缩处置成本。

4 工业污水污泥无害化处置技术的发展趋势

4.1 智能化与精准化处置

随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的发展，工业污泥处置行业正逐步向智能化与精准化方向迈进。其核心在于构建“监测-分析-调控”的全流程智能管控体系：通过在污泥收集池、运输车辆、处理车间等全流程节点布设多参数传感器，实时监测污泥的成分、含水率、重金属含量、有机物浓度等关键参数，数据经物联网实时传输至云端大数据平台；借助机器学习算法，建立不同行业、不同污染类型污泥的处置工艺模型，为每一批次污泥匹配最优的处置方案与工艺参数；利用智能化控制系统，自动调节处理设备的运行状态，例如根据污泥含水率变化动态调整干化温度与时间，根据重金属含量精准优化固化稳定剂投加量与反应时长，实现处置过程的全流程精准调控，最大限度提升无害化效果与资源化利用率，同时降低人为操作误差带来的资源浪费与环境风险。

4.2 绿色低碳处置技术的推广

在“双碳”目标背景下，低能耗、低排放的绿色低碳处置技术将成为行业主流发展方向。一方面，低能耗的生物处理技术将得到进一步推广，例如优化好氧堆肥的智能通风系统与碳氮比物料配比，降低曝气过程的能耗损耗，或定向选育高效产甲烷菌剂，提升厌氧消化的产气效率，实现沼气能源的高效回收与利用；另一方面，余热回收型热化学处理技术将成为研发重点，通过改进焚烧炉、热解炉的换热结构，加装高效余热回收装置，回收处置过程中产生的高温烟气余热，用于污泥干化或周边居民区、工业园区供暖，实现能源的梯级循环利用；此外，基于太阳能、地热能、生物质能等可再生能源的污泥干化技术将加速落地，减少对煤炭、天然气等化石能源的依赖。同时，污泥处置全过程的碳排放核算体系将逐步完善，建立从污泥产生到最终处置的全生命周期碳排放台账，通过优化工艺路径、提高能源回收效率等方式，实现工业污泥处置的低碳化发展。

4.3 政策与标准体系的完善

完善的政策法规与标准体系是推动工业污泥无害化处置行业健康发展的重要保障。未来，相关部门需进一步细化污泥分类分级标准，按照工业门类、污染物种类与含量、危险程度等指标，将污泥划分为不同类别，制定差异化的处置技术路线与排放限值；加快出台污泥处置全过程的技术规范，明确从污泥产生、暂存、运输、储存到最终处置的各环节操作要求与环境风险防控措施；健全污泥资源化产品的质量标准与市场准入机制，规范产品的生产、检测、销售与应用流程。同时，需加强对污泥处置行业的全过程监管，建立全国统一的污泥转运联单制度与实时环境监测体系，利用卫星遥感、物联网溯源等技术手段，实现污泥流向的全程追踪，严厉打击非法倾倒、违规处置等违法行为；此外，还应建立健全市场化激励机制，通过税收减免、财政补贴、绿色信贷等方式，引导社会资本参与污泥处置项目的建设运营，推动工业污泥无害化处置行业向规范化、产业化、高质量方向发展。

5 结论

工业污水污泥无害化处置是保障生态环境安全的核心举措，固化稳定化、热化学处理、生物处理等主流技术在处理效率、成本控制与环保效能上各有优劣，需结合污泥成分特性与处置场景精准选择。复合处置技术研发、资源化路径拓展及低成本技术创新，是提升处置效率与综合效益的关键抓手。未来，随着智能化监测技术的深度应用和绿色低碳理念的全面渗透，工业污水污泥无害化处置将持续朝着高效、环保、可持续的方向进阶，为工业绿色转型与生态保护提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 张海生, 王红武. 工业污泥处理处置与资源化利用技术进展[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1589-1602.
- [2] 王丽娜, 刘勇, 周琪. 污泥固化稳定化技术在重金属污染治理中的应用[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 1085-1092.
- [3] 陈同斌, 郭松林, 黄启飞. 工业污泥热化学处理技术及发展趋势[J]. 环境工程学报, 2021, 15(2): 345-356.
- [4] 赵庆良, 任南琪, 王爱杰. 污泥生物处理技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022. 45(9): 25-26.