

活性污泥减量化与资源化利用的集成技术研究

苗张明 朱佳浩 杨 灵

宁波市城市排水有限公司 浙江 宁波 315040

摘要：本文围绕活性污泥处理难题，展开减量化与资源化利用集成技术研究。针对活性污泥产量大、成本高、风险大与资源浪费等问题，阐述减量化和资源化利用在环保、资源回收与经济发展上的必要性。深入分析生物、物理、化学减量化技术及生物能源转化、有机肥料生产技术，搭建集成技术体系。通过案例证实，该体系在污泥减量、资源回收及提升污水处理厂效益上效果显著，为行业可持续发展提供助力。

关键词：活性污泥；减量化；资源化利用；集成技术

引言

污水处理对保障生态环境意义重大，活性污泥法作为主流处理技术，应用广泛。但污水处理过程中活性污泥大量产生，处理成本高昂，且带来严重的环境风险与资源浪费，制约了行业的可持续发展。在此背景下，研究活性污泥减量化与资源化利用集成技术迫在眉睫。这不仅有助于解决当前污水处理行业的困境，还契合资源节约型、环境友好型社会的建设需求，对环境工程领域的发展具有重要的理论与实践价值。

1 活性污泥处理面临的挑战

1.1 产量大，处理成本高

随着污水处理需求的增长，污水处理厂的规模不断扩大，活性污泥的产生量也随之大幅增加。活性污泥的处理过程涉及多个环节，包括污泥的浓缩、脱水、稳定化以及最终处置等，每个环节都需要消耗大量的能源和资源。在污泥脱水环节，通常需要添加絮凝剂等化学药剂来提高脱水效果，这不仅增加了药剂成本，还可能对环境造成二次污染。此外，污泥的运输和填埋处置也需要支付高昂的费用。

1.2 环境风险高

活性污泥中含有大量的有机物、病原体、重金属以及持久性有机污染物等有害物质。如果这些污泥得不到妥善处理，其中的有害物质会随着污泥的堆放、填埋或农用等途径进入土壤、水体和大气环境，对生态环境和人类健康构成潜在威胁。污泥中的病原体可能引发传染病的传播，重金属会在土壤中积累，导致土壤质量下降，影响农作物的生长和品质，进而通过食物链危害人体健康。此外，污泥在厌氧分解过程中会产生甲烷等温室气体，加剧全球变暖。

1.3 资源浪费严重

尽管活性污泥中含有有害物质，但同时也蕴含着丰

富的有机碳、氮、磷等营养物质以及能源物质。传统的活性污泥处理方式往往侧重于污染物的去除和污泥的减量，忽视了其中资源的回收与利用，导致大量有价值的资源被浪费。例如，污泥中的有机碳可以通过生物转化为生物能源，如甲烷、氢气等；氮、磷等营养物质可以用于生产有机肥料，实现资源的循环利用。然而，在实际处理过程中，这些资源大多未能得到有效利用，不仅造成了资源的浪费，还增加了对外部资源的依赖。

2 活性污泥减量化与资源化利用的必要性

2.1 环境保护的需求

随着人们环保意识的不断提高，对水环境质量和生态安全的要求也越来越严格。活性污泥作为污水处理的副产物，如果不能得到妥善处理，将对环境造成严重污染。通过实现活性污泥的减量化与资源化利用，可以有效减少污泥的产生量，降低污泥对环境的潜在危害，同时回收其中的资源，减少对自然资源的消耗，从而实现环境保护与资源利用的双赢。例如，采用生物减量化技术可以降低污泥的产量，减少污泥的处理处置量；通过资源化利用技术将污泥转化为生物能源或有机肥料，可以减少对化石能源的依赖，降低温室气体排放，保护生态环境。

2.2 资源回收与再利用的需求

在资源日益短缺的背景下，实现资源的回收与再利用已成为社会可持续发展的必然趋势。活性污泥中蕴含的丰富营养物质和能源物质，是一种潜在的宝贵资源。通过开发和应用有效的资源化利用技术，可以将这些资源转化为可利用的产品，实现资源的循环利用。生物能源转化技术可以将污泥中的有机物质转化为生物甲烷、生物氢气等清洁能源，替代传统的化石能源；有机肥料生产技术可以将污泥中的氮、磷等营养物质转化为有机肥料，用于农业生产，提高土壤肥力。

2.3 经济可持续发展的需求

污水处理行业作为基础设施产业，其可持续发展对于经济的稳定增长至关重要。活性污泥处理成本高的问题，严重制约了污水处理厂的经济效益和运营稳定性。通过实现活性污泥的减量化与资源化利用，可以降低污泥处理成本，同时通过资源回收创造经济效益。采用减量化技术可以减少污泥的处理量，降低处理成本；资源化利用技术可以将污泥转化为有价值的产品，实现资源的增值。

3 活性污泥减量化与资源化利用的集成技术

3.1 生物减量化技术

3.1.1 解偶联代谢技术

解偶联代谢技术是通过添加解偶联剂，破坏微生物细胞内的质子电化学梯度，使电子传递与ATP合成过程解偶联，从而导致微生物在消耗有机底物的同时，无法合成等量的细胞物质，实现污泥的减量化^[1]。常见的解偶联剂包括2,4-二硝基苯酚、羰基氰-对-三氟甲氧基苯胺等。当微生物处于解偶联代谢状态时，其代谢途径会发生改变，部分有机底物会通过异化代谢途径被氧化分解，释放出能量，但这些能量无法用于细胞的生长和繁殖，而是以热能的形式散失。解偶联代谢技术具有操作简单、减量化效果显著等优点，但解偶联剂的毒性和残留问题限制了其在实际工程中的应用。

3.1.2 隐性生长技术

隐性生长技术是利用微生物内源呼吸过程中产生的水解酶，将细胞内的有机物质分解为小分子物质，供其他微生物利用，从而实现污泥的减量化。在污水处理系统中，微生物在生长过程中会积累一定量的内源性物质，当外界营养物质不足时，微生物会启动内源呼吸，利用这些内源性物质维持生命活动。隐性生长技术通过控制污水处理系统的运行条件，如溶解氧、污泥停留时间等，促进微生物的内源呼吸和隐性生长，达到污泥减量化的目的。与其他生物减量化技术相比，隐性生长技术具有对微生物群落结构影响小、不引入外源物质等优点，但减量化效果相对较弱，需要与其他技术相结合，以提高污泥减量化效率。

3.2 物理减量化技术

3.2.1 污泥热水解技术

污泥热水解技术是在高温高压条件下，使污泥中的细胞结构被破坏，胞内物质释放出来，从而改善污泥的脱水性能和可生物降解性，实现污泥的减量化。在热水解过程中，污泥中的蛋白质、多糖等大分子有机物会发生水解反应，生成小分子有机物，如氨基酸、单糖等。

这些小分子有机物更容易被微生物利用，从而提高了污泥的生物降解率。此外，热水解还可以使污泥中的水分更容易被分离出来，降低污泥的含水率。污泥热水解技术具有处理效率高、减量化效果显著等优点，但该技术需要消耗大量的能源，设备投资和运行成本较高。

3.2.2 超声波处理技术

超声波处理技术是利用超声波的空化效应、机械效应和热效应，破坏污泥中的细胞结构，释放胞内物质，实现污泥的减量化。当超声波作用于污泥时，会在污泥中产生大量的微小气泡，这些气泡在超声波的作用下迅速膨胀和破裂，产生强烈的冲击波和微射流，对污泥中的细胞结构造成破坏^[2]。超声波处理技术可以提高污泥的可生物降解性，促进微生物对污泥中有机物质的分解和利用，从而达到污泥减量化的目的。该技术具有操作简单、处理效果好、无二次污染等优点，但处理成本相对较高，且对设备的要求较高。

3.3 化学减量化技术

3.3.1 臭氧氧化技术

臭氧氧化技术凭借臭氧的强氧化性，实现污泥减量化。在处理污泥时，臭氧既能破坏污泥细胞结构，释放胞内物质，又能将其氧化为二氧化碳和水等无机物。这一过程涉及直接、间接两种氧化反应，前者由臭氧与有机物直接反应，后者依靠臭氧分解产生的羟基自由基来快速氧化有机物。该技术反应速度快，减量化效果显著。然而，其缺点也较为突出，臭氧制备成本高昂，并且作为强氧化剂，会对设备和管道产生一定程度的腐蚀，在实际应用中需综合考量成本与设备维护等问题。

3.3.2 芬顿氧化技术

芬顿氧化技术是利用亚铁离子和过氧化氢反应产生的羟基自由基，氧化分解污泥中的有机物质，实现污泥的减量化。在芬顿反应中， Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应生成羟基自由基和氢氧根离子，羟基自由基具有极强的氧化性，能够迅速氧化分解污泥中的有机物。芬顿氧化技术具有反应条件温和、处理效果好等优点，但该技术会产生大量的含铁污泥，需要进行后续处理，增加了处理成本。

3.4 资源化利用技术

3.4.1 生物能源转化技术

在活性污泥资源化利用进程中，生物能源转化技术可将污泥内有机物质经生物转化，生成甲烷、氢气等生物能源。其中，厌氧消化技术最为常用。在无氧环境下，特定微生物菌群分阶段协作，依次完成水解、酸化、产乙酸和产甲烷步骤，将污泥中的有机物质分解为甲烷和二氧化碳。为进一步提升厌氧消化效率，可对污

泥进行热水解、超声波处理等预处理,破坏污泥细胞结构,让胞内物质得以释放,增强污泥的可生物降解性。同时,优化厌氧消化反应器的温度、pH值、有机负荷等运行参数,也能显著提高甲烷产量。此外,借助发酵技术可将污泥转化为生物氢气^[3]。生物氢气燃烧效率高且无污染,在未来能源领域极具应用潜力。

3.4.2 有机肥料生产技术

有机肥料生产技术致力于将污泥转变为农业生产可用的有机肥料。污泥富含丰富的有机物质,以及氮、磷、钾等关键营养元素,具备极高的资源化潜力。在生产过程中,需对污泥开展稳定化处理,堆肥和厌氧发酵是常用手段。以堆肥为例,微生物分解污泥中的有机物,堆体温度上升,既能杀灭病原体,又能将有机物转化为腐殖质等肥料成分。为优化堆肥质量,可加入木屑、秸秆等调理剂,调控堆体碳氮比与通气性,让污泥更好地转化为安全、稳定、优质的有机肥料。

3.5 集成技术体系

3.5.1 减量化与资源化利用的协同集成

在活性污泥处理领域,减量化与资源化利用的协同集成至关重要。依据污泥性质和处理要求,能将各类技术灵活组合。如先用热水解等物理减量化技术预处理污泥,破坏细胞结构,提升其可生物降解性,后续采用厌氧消化等生物能源转化技术,将污泥有机物转化为生物能源,达成减量化与资源回收,提升经济和环境效益。同样,把生物减量化技术和有机肥料生产技术结合,既能降低污泥产量,又能产出高品质有机肥料,助力活性污泥处理行业的高效、可持续发展。

3.5.2 多技术组合的集成模式

多技术组合集成模式,通过优化搭配各类减量化与资源化利用技术,构建完整的活性污泥处理系统。不同技术协同发力,提升处理效能。以解偶联代谢、超声波处理与厌氧消化技术组合为例,解偶联代谢技术降低污泥产量,超声波处理增强污泥可生物降解性,厌氧消化则将污泥有机物转化为生物能源,达成高效减量化与资源化。此外,依据污泥特性和处理要求,灵活搭配化学、物理与生物减量化技术,能够量身定制个性化活性污泥处理方案,助力污泥处理提质增效。

4 集成技术的应用案例

4.1 某污水处理厂的实践

某污水处理厂采用了活性污泥减量化与资源化利用的集成技术,对污泥进行处理处置。该污水处理厂的设计处理规模为10万吨/日,原污泥产量较大,处理成本较

高。为了解决这一问题,该厂首先采用了污泥热水解技术对污泥进行预处理,将污泥加热至150℃,保持30分钟,使污泥中的细胞结构被破坏,胞内物质释放出来。经过热水解预处理后,污泥的可生物降解性得到了显著提高^[4]。然后,将热水解后的污泥送入厌氧消化反应器进行厌氧消化,在厌氧条件下,微生物将污泥中的有机物质分解为甲烷和二氧化碳等气体。产生的甲烷气体通过收集和净化后,用于发电,实现了生物能源的回收利用。厌氧消化后的污泥经过脱水处理后,再进行堆肥处理,制成有机肥料,用于农业生产。

4.2 技术应用效果分析

通过采用活性污泥减量化与资源化利用的集成技术,该污水处理厂取得了显著的效果。在污泥减量化方面,经过热水解和厌氧消化处理后,污泥的产量相比原来减少了约30%,降低了污泥的处理处置量,减轻了对环境的压力。在资源化利用方面,通过生物能源转化技术,实现了甲烷气体的回收利用,每年可发电约1000万千瓦时,降低了污水处理厂的能耗成本。同时,通过有机肥料生产技术,将污泥转化为有机肥料,每年可生产有机肥料约5000吨,实现了资源的循环利用,创造了一定的经济效益。此外,该集成技术体系的应用还提高了污水处理厂的运行稳定性和管理水平,为污水处理行业的可持续发展提供了有益的借鉴。

结束语

本文提出的活性污泥减量化与资源化利用集成技术体系,为污水处理行业污泥处置困境提供系统性方案。但受技术发展局限,部分技术在实际应用中存在运行成本高、处理效果不稳定等问题。后续应从基础理论和工程应用等多维度,持续开展深入研究,通过工艺革新降低成本,增强技术稳定性,加速技术推广落地,助力污水处理行业实现绿色、可持续发展。

参考文献

- [1]马雪雨,唐玉朝,蔡丽丽,等.低热-NaOH联合处理破解浓缩活性污泥释放碳源的试验研究[J].安全与环境工程,2024,31(1):240-248,270.
- [2]张登宇,黄豫.污泥处置与利用研究[J].黑龙江环境通报,2021,34(1):10-11.
- [3]周恭训.活性污泥的综合利用及发展方向[J].善天下,2021(6):249-250.
- [4]巩有奎,彭永臻.不同DO下亚硝态氮氧化菌硝化系统N₂O减量化研究[J].环境污染与防治,2020,42(5):565-568.