

关于生活垃圾焚烧厂渗滤液处理的可持续性转型探析

文惠南

中山市北部公用环保能源有限公司, 中国·广东 中山 528400

摘要: 生活垃圾焚烧厂渗滤液处理正经历从传统“末端治理”向“过程协同”与“资源回收”的范式转变。本文系统剖析当前渗滤液处理体系中存在的三重结构性矛盾: 污染物复杂性与单元工艺局限性的矛盾、高能耗处理模式与碳中和目标的矛盾、副产物积累与系统闭环缺失的矛盾。基于此, 构建以“解耦—重构—再生”为核心的可持续治理框架, 强调通过前端污染物定向分离实现碳氮资源预富集; 以厌氧氨氧化 (Anammox) 技术为核心重构生物处理流程, 破解碳氮比失衡问题; 通过跨介质协同处置实现浓缩液、污泥等副产物的资源化与厂内代谢集成。本文进一步提出, 未来渗滤液处理系统应演进为“智慧能源—资源工厂”, 依托物质循环与能量优化, 实现从“成本中心”到“代谢节点”的角色重构, 为焚烧厂全面绿色转型提供系统性解决方案。

关键词: 渗滤液; 可持续处理; 三重矛盾; 厌氧氨氧化 (Anammox); 资源回收; 代谢闭环; 跨介质协同

Discussion on Sustainable Transformation of Leachate Treatment in Domestic Waste Incineration Plant

Wen Huinan

Zhongshan Northern Public Utilities Environmental Protection Energy Co., Ltd., China Guangdong Zhongshan 528400

Abstract: The treatment of leachate from municipal solid waste incineration plants is undergoing a paradigm shift from traditional "end-of-pipe treatment" towards "process synergy" and "resource recovery". This paper systematically analyzes three structural contradictions in the current leachate treatment system: the mismatch between pollutant complexity and unit process limitations, the conflict between high-energy consumption treatment modes and carbon neutrality goals, and the tension between by-product accumulation and the lack of system closure. Based on this, a sustainable governance framework centered on "Decoupling–Reconstruction–Regeneration" is constructed. This framework emphasizes the pre-enrichment of carbon and nitrogen resources through front-end targeted pollutant separation; the reconstruction of biological treatment processes with anaerobic ammonia oxidation (Anammox) technology as the core to address carbon-to-nitrogen ratio imbalance; and the resource utilization and in-plant metabolic integration of by-products such as concentrate and sludge through cross-media synergistic disposal. Furthermore, this paper proposes that future leachate treatment systems should evolve into "Smart Energy–Resource Factories", relying on material cycling and energy optimization to realize a role transformation from a "cost center" to a "metabolic node", providing systematic solutions for the comprehensive green transition of incineration plants.

Keywords: Leachate; Sustainable treatment; Triple contradiction; Anammox (Anammox); Resource recovery; Metabolic closed loop; Cross-media collaboration

1 引言: 从线性处理到循环代谢的范式转型

随着生活垃圾焚烧技术在我国城市固废处理体系中占据主导地位, 其伴生的渗滤液治理问题日益成为制约行业整体环境绩效的关键环节。传统渗滤液处理工艺多遵循“均质调节—生物降解—深度净化”的线性路径, 虽在污染物达标排放方面具有一定成效, 但其“以能耗换去除、以浓缩转移污染”的模式, 已难以适应“双碳”战略与循环经济背景下的可持续发展要求。因此, 有必要将渗滤液处

理系统从被动的“污染净化终端”重新定位为主动参与全厂物质流与能量流调控的“代谢节点”。

当前渗滤液处理实践中暴露出的诸多问题, 并非单一技术环节的不足, 而是源于系统性的结构矛盾。这些矛盾贯穿于工艺选择、运行控制乃至副产物处置的整个链条, 严重阻碍了处理系统向低碳化、高效化与资源化方向迈进。鉴于此, 本文试图超越对现有技术进行简单罗列与评价的传统思路, 转而从系统工程的视角, 识别并解析渗滤液处

理过程中的深层次矛盾。在此基础上, 提出一个涵盖“解耦—重构—再生”三个递进阶段的协同治理新框架, 旨在为推进渗滤液处理从“能源与资源净消耗型”向“能源与资源增益型”的根本转型, 提供理论支撑与技术路径参考。

2 渗滤液处理的三重根本矛盾与系统瓶颈分析

2.1 矛盾一：污染物复杂多样性与单元工艺有限靶向性之间的失配

生活垃圾焚烧厂渗滤液属于组分复杂、浓度波动显著的高强度有机废水, 含有高浓度氨氮、多元溶解性有机物、各类盐分、重金属及难降解腐殖类物质。此类多相态、多组分的“污染鸡尾酒”特性, 对处理工艺的广谱性与选择性提出了近乎矛盾的要求。

传统单元工艺多针对特定污染物设计, 在处理复合体系时易出现“非靶向消耗”或“副作用放大”现象。例如, 高级氧化工艺(如 Fenton 法) 依赖的羟基自由基具非选择性, 在复杂基质中易与氯离子等发生无效反应, 降低氧化剂利用率并可能生成毒性中间产物。此外, 基于硝化—反硝化的生物脱氮工艺在处理高氨氮、低碳氮比渗滤液时, 常因碳源不足而依赖外部投加, 增加运行成本与碳足迹。这种处理对象的复杂性与工艺有限针对性之间的结构性失配, 是制约效率提升与成本控制的首要矛盾。

2.2 矛盾二：高能耗处理模式与碳中和战略目标之间的冲突

现有主流渗滤液处理工艺本质属于能源与资源密集型过程。膜生物反应器需持续曝气维持运行; 纳滤与反渗透依赖高压泵实现分离; 高级氧化技术则消耗大量药剂或电能。这些过程直接或间接依赖化石能源, 使处理系统成为焚烧厂内的隐性能耗“黑箱”。

在“双碳”目标背景下, 将渗滤液视为需持续能量输入以“消灭”的废物, 采取“污染相态转移”策略, 显然与可持续发展理念相悖。该线性模式不仅未能根除污染, 反而使处理过程成为新的温室气体排放源, 形成“为治理污染而制造污染”的悖论, 严重背离碳中和战略方向。

2.3 矛盾三：副产物持续积累与系统代谢闭环缺失之间的矛盾

传统处理工艺在实现水质净化的同时, 产出化学污泥、膜滤浓缩液、蒸发结晶残渣等副产物, 其污染物浓度更高、成分更复杂、环境风险更大。例如, 反渗透浓缩液富含难降解有机物与高盐分, 直接回喷焚烧炉可能引发腐蚀、结焦及二噁英再合成风险; 化学污泥与蒸发残渣作为

危险废物的处置成本亦日益攀升。

当前处理体系普遍缺乏对副产物进行内部资源化循环或外部高值利用的有效设计, 导致“污染转移”现象突出, 水相污染问题转化为固相或浓缩液相的处理难题。这种末端处置路径的闭塞与副产物持续积累之间的矛盾, 暴露出传统线性模式在系统封闭性方面的缺陷, 阻碍了系统向“零废弃”循环代谢系统演进。

3 “解耦—重构—再生”协同治理框架的构建

为系统破解上述三重矛盾, 本文提出三级递进、前后协同的可持续治理框架, 强调整体系统中物质流的定向引导、能量流的优化配置与污染物的资源化转化。

3.1 第一级：解耦——前端污染物的定向分离与资源化预富集

本阶段核心目标是在处理流程起始端, 通过物理、化学或生物强化方法, 将混合污染物“解耦”为相对独立或易于后续处理的组分, 并为资源回收创造条件。

氨氮的主动分离与回收: 采用“高效氨吹脱—酸吸收”耦合工艺, 在生化处理前将大部分氨氮从渗滤液中分离。通过 pH 调节与气液传质优化, 氨氮以气相氨形式逸出, 经硫酸吸收后转化为高纯度硫酸铵溶液, 可作为农用肥料或烟气脱硝还原剂, 实现氮资源的闭环管理。此举可显著降低后续生物处理的氨氮负荷, 为应用节能型生物脱氮技术创造条件。有机物的精细化发酵调控: 发展“水解酸化定向发酵”技术, 通过精确控制 pH、温度、水力停留时间及微生物群落, 将复杂有机物主要转化为挥发性脂肪酸, 作为后续生物脱氮的优质内源碳源, 替代外购碳源, 降低运行成本与间接碳排放。同时, 保留部分高热值有机物进入产甲烷阶段, 保障系统能量回收。

3.2 第二级：重构——以自养脱氮为核心的主流工艺革新

本阶段旨在探析生物处理主流工艺, 应对高氨氮、低碳氮比渗滤液的核心挑战, 并大幅降低处理过程的能量与资源消耗。

技术内核: 部分亚硝化—厌氧氨氧化: 该组合工艺是当今污水生物脱氮领域的前沿方向。其原理是: 首先, 在限氧条件下通过部分亚硝化过程, 将约 50% 的进水氨氮精确转化为亚硝酸盐。随后, 在厌氧条件下, 厌氧氨氧化菌以剩余的氨氮为电子供体, 以亚硝酸盐为电子受体, 直接将两者转化为氮气。与传统的全程硝化—反硝化工艺相比, PN/A 工艺理论上可节省约 60% 的曝气能耗、100% 的

外加有机碳源,并能减少90%以上的剩余污泥产量,是一种极具碳减排潜力的自养脱氮技术。

工程化挑战与应对策略:尽管优势显著,但Anammox菌生长缓慢、对环境因子敏感,其工程化应用特别是在渗滤液这种复杂水质中,面临着稳定运行的挑战。针对此,可采取以下强化策略:

(1)与前端解耦单元深度耦合:确保进入PN/A系统的进水水质,特别是氨氮浓度、残留有机物及抑制物含量处于稳定且适宜的范围,这是工艺长期稳定运行的基础。

(2)高效生物量滞留技术:采用颗粒污泥反应器、移动床生物膜反应器或厌氧氨氧化生物滤池等构型,通过物理截留或生物膜附着方式,在反应器内滞留高浓度、高活性的功能微生物,以增强系统抗水质冲击负荷的能力。

(3)智能过程控制系统:集成氨氮、亚硝酸盐、pH、氧化还原电位等多参数在线传感器,开发先进的控制算法,实时动态调节曝气量、回流比等关键操作参数,精确维持部分亚硝化与厌氧氨氧化两个过程的动态平衡与高效协同。

3.3 第三级:再生——跨介质协同下的副产物代谢闭环

本阶段重点是将所有处理副产物重新定义为潜在“资源”,通过跨工艺、跨介质的协同处置,实现物质在焚烧厂系统内或更广泛工业生态链中的循环再生。

膜浓缩液的“燃料化/矿化”处置路径。燃料化路径:对浓缩液进行深度减量化处理,形成高热值、低水分的浓缩燃料浆,喷入焚烧炉主燃区实现能量回收,需优化喷射方式以控制腐蚀与结渣风险。

矿化/资源化路径:采用电化学活化过硫酸盐、催化湿式氧化等技术,将难降解有机物彻底矿化,残余浓盐水可探索用于烟气调质或飞灰稳定化。

化学污泥与残渣的建材化利用潜力:对含铁、铝化学污泥及蒸发结晶盐渣进行稳定化与无害化处理,研究其作为替代原料用于水泥熟料生产、陶粒制造或路基材料的可行性,推动其从“危险废物”向“建材资源”转变。

4 未来愿景:迈向智慧能源—资源工厂

前瞻性地看,生活垃圾焚烧厂的渗滤液处理车间应彻底突破其传统的功能边界,演进为一个高度集成、智能调控的“智慧能源—资源工厂”。其理想化特征主要体现在以下方面:能量自洽与正向输出:通过精细化厌氧消化产能、浓缩液燃料化回收热能、以及核心工艺(如PN/A)的深度节能,使处理系统自身产生的能量最大程度覆盖其运行能耗,并力争实现“能源中和”乃至“能源净输出”。

资源内循环与外联共生:在厂区层面,实现氮(以硫酸铵等形式)、碳(以VFAs等形式)、水(高品质回用水)等资源的内部循环利用;在区域层面,积极探索将回收的资源与农业施肥、其他工业生产过程(如化工原料)相衔接,融入更大范围的工业共生网络。

数字化与智能决策支撑:构建覆盖渗滤液处理全流程的数字孪生模型,依托物联网感知的实时数据与人工智能算法,实现进水水质波动的超前预测、工艺运行参数的动态优化、化学药剂投加的精准控制以及系统故障的智能诊断与预警,从而全面提升系统运行的鲁棒性、经济性与环境友好性。

5 结语

生活垃圾焚烧厂渗滤液处理已进入以可持续发展为核心的战略转型期。本文通过识别“污染物复杂性—工艺靶向性失配”“高能耗模式—碳中和目标冲突”“副产物积累—系统闭环缺失”三重根本矛盾,揭示了传统线性处理模式的内在局限。在此基础上,系统构建了“解耦—重构—再生”三位一体的协同治理新框架,其核心在于:通过前端定向分离实现污染物的解耦与资源预富集;通过以PN/A为核心的自养脱氮工艺重构主流处理流程,实现节能降耗;通过跨介质协同处置推动副产物资源化,完成系统代谢闭环。

这一范式转变的深层意义在于,将渗滤液处理从被动的“成本中心”重新定义为主动的“资源与能源回收枢纽”,使其深度融入焚烧厂乃至区域工业生态系统的物质能量代谢网络。未来研究应聚焦于:(1)开发适应渗滤液水质、抗冲击负荷能力强的PN/A工艺强化技术与稳定运行策略;(2)揭示跨介质协同处置过程中污染物的迁移转化规律与长期环境风险,建立安全控制标准;(3)运用生命周期评价与成本效益分析,对新范式进行全面的环境与经济绩效评估,为其规模化工程应用提供科学依据。从“末端治理”到“代谢闭环”的转变,不仅是技术路径的升级,更是发展理念的跃迁,将引领生活垃圾焚烧行业走向更高效、低碳、可持续的未来。

参考文献:

- [1] Lackner, S., Gilbert, E. M., Vlaeminck, S. E., et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences—an application survey. *Water Research*, 2014, 65: 1–23.
- [2] 王凯军, 郑盼盼. 面向碳中和的污水处理能源资源回收技术路径探讨. *中国给水排水*, 2021, 37(16): 1–8.
- [3] van Dijk, E. J., Haaksman, V. A., van Loosdrecht, M. C.

M., et al. Assessment of full-scale mainstream partial nitrification/anammox: from current challenges to future perspectives. *Science of The Total Environment*, 2022, 806: 150634.

[4] 郝晓地, 李季, 江瀚. 污水处理中磷回收技术与策略. 北京: 科学出版社, 2017.

[5] 李咏梅, 张一帆, 吴军. 垃圾渗滤液膜浓缩液处理技术: 挑战与资源化机遇. *环境工程学报*, 2023, 17(1): 1-15.

[6] Kartal, B., Kuenen, J. G., van Loosdrecht, M. C. M.

Sewage treatment with anammox. *Science*, 2010, 328(5979): 702-703.

[7] 陈珺, 王洪臣. 基于物质循环的污水处理厂能量自给技术研究进展. *环境科学学报*, 2020, 40(10): 3569-3581.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾渗滤液处理技术标准(征求意见稿). 北京, 2022.

作者简介: 文惠南(1981.05-), 男, 汉族, 广东省中山市, 助理工程师, 大学本科, 研究方向: 渗滤液处理技术方面。