

垃圾填埋场渗滤液污染控制工艺优化设计

缑高鹏

新疆准实检测有限公司，新疆 喀什 844000

[摘要]垃圾填埋场作为城市固体废弃物处理的重要设施，其产生的渗滤液因成分复杂、污染性强，若处置不当，会对地下水及生态环境构成严重威胁，此文围绕当前渗滤液处理技术的现存问题，从工艺流程、设备选型、运行参数等维度展开优化设计研究，通过剖析渗滤液特性与污染负荷，构建分阶段联合处理工艺体系，旨在增强处理系统效能与稳定性，为垃圾填埋场渗滤液治理提供技术支持。

[关键词]垃圾填埋场；渗滤液；污染控制；工艺优化；联合处理

DOI: 10.33142/ucp.v2i3.16721

中图分类号: X703

文献标识码: A

Optimization Design of Leachate Pollution Control Process for Landfill Sites

GOU Gaopeng

Xinjiang Zhunshi Testing Co., Ltd., Kashgar, Xinjiang, 844000, China

Abstract: As an important facility for the treatment of urban solid waste, landfills generate leachate with complex composition and strong pollution. If not disposed of properly, it can pose a serious threat to groundwater and ecological environment. This article focuses on the existing problems of leachate treatment technology and conducts optimization design research from the dimensions of process flow, equipment selection, and operating parameters. By analyzing the characteristics of leachate and pollution load, a staged joint treatment process system is constructed to enhance the efficiency and stability of the treatment system and provide technical support for the treatment of leachate in landfills.

Keywords: landfill site; leachate; pollution control; process optimization; joint processing

引言

伴随城市化快速推进，垃圾填埋规模不断扩大，渗滤液排放量急剧增加，这类污水中富集高浓度有机物、重金属及氮磷等污染物，传统单一处理技术难以满足长期稳定达标排放要求，面对处理效率低下、运营成本高昂等困境，亟需对现有处理工艺进行系统性优化，本文结合实际工程案例，深入分析影响渗滤液处理效果的核心要素，提出融合物理、化学、生物处理技术的综合优化方案，为实现渗滤液高效、经济、绿色处理提供理论与实践指导。

1 渗滤液特性分析与污染负荷识别

1.1 渗滤液成分特征及变化规律

垃圾填埋场渗滤液由降雨、垃圾分解产物与地表水相互作用形成，属于高浓度有机废水，成分繁杂且浓度波动剧烈，随填埋进程呈现显著阶段性变化，填埋初期，有机物分解旺盛，渗滤液中 COD 和 BOD₅ 浓度处于高位，BOD₅/COD 比值介于 0.4~0.6，可生化性良好，主要污染物为挥发性脂肪酸及小分子有机物，进入填埋中期，易降解物质逐步消耗，氨氮浓度开始攀升，BOD₅ 大幅下降，BOD₅/COD 比值降至 0.1~0.3，可生化性明显降低，难降解有机物、腐殖酸及其衍生物成为主导成分，填埋后期，渗滤液中有机物以高分子难降解物质为主，重金属、氯离子和盐分浓度持续升高，虽水质趋于稳定，但处理难度显

著加剧。

1.2 污染物分布及其危害性分析

渗滤液中污染物种类繁多，涵盖有机物(COD、BOD₅)、氮磷营养物质(NH₃-N、TN、TP)、重金属(Cr、Pb、Cd、Hg)、盐分(Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻)及持久性有毒有害物质，这些污染物对生态环境与人体健康威胁严重，COD 和 BOD₅ 源于有机废弃物分解，未经处理排放会大量消耗水体溶解氧，引发富营养化甚至水体黑臭，高浓度氨氮会增强水体毒性，危害水生生物并污染地下水，重金属渗入土壤或地下水后长期残留，通过食物链危及人体健康。部分难降解有机物具有“三致”特性，自然条件下难以降解，明确污染物类型与浓度，是制定精准污染控制策略、维护生态安全的关键前提。

1.3 渗滤液水质水量变化因素

渗滤液水质与水量受内外多重因素影响，呈现强烈时空变异性，降雨强度是关键外部诱因，雨季大量雨水渗入填埋区，致使渗滤液产量激增、污染物浓度稀释；旱季或有效覆盖条件下，渗滤液流量减少，污染物浓度相对浓缩，垃圾性质直接决定渗滤液污染程度，生活垃圾高有机质含量使早期渗滤液有机污染突出，工业固废混入则显著提升重金属风险，填埋工艺同样影响显著，卫生填埋相比简易填埋更易控制水质，分区填埋、填埋气回收等技术可有效

减缓污染物扩散,此外,垃圾龄期、压实程度、覆盖材料等参数也会改变渗滤液生成速率与水质构成,因此,持续监测水质水量动态变化,有助于优化调节与应急处理方案,提升处理工艺对复杂污染负荷的适应性。

2 现有渗滤液处理工艺存在的问题

2.1 单一处理技术适应性差

垃圾填埋场渗滤液因污染成分复杂、水质动态变化,单一处理技术难以实现稳定达标,物理化学处理方法,像混凝沉淀、活性炭吸附、反渗透等,虽能有效去除部分重金属和悬浮物,但在应对难降解有机物与氨氮时存在明显短板,且面临药剂消耗大、污泥产量高、膜组件易污染等问题,生物化学处理技术依靠微生物降解有机污染物,SBR、A/O、MBR等工艺对 BOD_5 和部分氨氮有一定处理效果,然而在处理低 BOD_5/COD 比值、高盐度、高毒性渗滤液时,系统抗冲击能力不足,易出现运行不稳定现象,厌氧-好氧处理流程还需长期调试维护,适应性较差,鉴于渗滤液在填埋不同阶段成分差异巨大,单一工艺仅能针对性处理某类污染物,缺乏协同处理效能,难以满足渗滤液处理的复杂需求,难以保障处理效果的稳定高效,已无法契合现代垃圾填埋场对渗滤液处理多元化、精准化的要求。

2.2 系统运行稳定性不足

渗滤液处理系统的稳定运行受多因素制约,水质水量波动是核心影响因子,渗滤液呈现明显的季节性与阶段性特征:雨季水量剧增,易使调节池与处理设备超负荷运转,拉低处理效率;污染物浓度的剧烈变化,如氨氮浓度飙升或 COD 值骤降,会破坏生化系统微生物群落结构,致使运行失衡,气温条件同样关键,低温环境下微生物代谢活性减弱,显著降低氨氮去除效果,膜分离单元在负荷剧烈波动时,反渗透膜易出现污染、通量下降等问题,需频繁清洗,影响系统连续作业,若缺乏有效的水质调节与缓冲措施,系统将频繁陷入停机检修困境,可见,增强系统对水质水量变化的耐受性,构建完备的调节与预处理体系,是优化渗滤液处理工艺的重中之重。

2.3 能耗与运行成本偏高

在渗滤液处理实践中,为确保出水水质达标,多段式处理流程成为标配,这直接导致系统能耗居高不下,以反渗透膜处理环节为例,高压泵持续运转维持过滤压力,其电能消耗占比超系统总量40%;而MBR等生化处理工艺中,曝气单元因长时间、大风量运行,同样成为耗电大户,此外,渗滤液所含的高浓度无机盐与有机毒性物质,使得絮凝剂、酸碱度调节剂等化学品消耗量巨大,成本控制压力显著,膜组件更换、污泥无害化处置及药剂采购,构成了运营成本的主要支出项,一旦系统运行出现波动,不仅需要增加人力巡检频次,设备维修频率也会随之上升,进一步加剧运维负担,特别是对于资金有限、专业人员不足

的中小型垃圾填埋场而言,高能耗、高成本的处理工艺带来的经济压力难以长期负荷,严重制约污染治理效能与项目可持续发展。

3 渗滤液污染控制优化工艺设计

3.1 预处理系统优化设计

预处理系统作为渗滤液处理流程的“先锋环节”,肩负着稳定水质水量、截留大颗粒污染物、减轻后续处理负荷的重任,为提升预处理效能,需对格栅、沉淀池、调节池等核心设施进行针对性优化,在格栅选型上,优先选用细格栅或回转式机械格栅,其自动清污功能可高效拦截大粒径悬浮物、塑料碎屑及纤维杂质,防止设备堵塞,沉淀池可引入斜板沉淀或气浮技术,借助重力沉降与浮力托举双重作用,强化悬浮物和胶体的分离效率,调节池设计需精准把控容积,确保能够容纳至少一日峰值渗滤液流量,抵御水量突变冲击,同时,在调节池内配置搅拌装置与 pH 在线监测设备,动态调节水质均匀性和酸碱度,为后续生化处理创造稳定条件,优化后的预处理系统,既能有效降低 COD 、 SS 等污染指标,又可延缓膜组件损耗,增强系统运行的安全稳定性与经济可行性。

3.2 主体工艺流程组合设计

面对成分复杂多变的垃圾填埋场渗滤液,构建“膜分离+生物脱氮+高级氧化”耦合处理流程成为污染控制优化的核心策略,膜分离技术中的超滤(UF)与反渗透(RO),凭借对有机物和无机盐的高效截留性能,成为渗滤液深度净化的关键环节,置于处理流程末端可保障出水达标排放或回用,生物脱氮单元采用A/O或AAO工艺,整合厌氧、缺氧、好氧反应器,能针对性去除氨氮、总氮等营养污染物;针对预处理后 BOD_5/COD 比值较低的情况,可投加乙酸钠等外源碳源强化脱氮效果,为攻克难降解有机污染物,引入Fenton反应、臭氧氧化或 UV/H_2O_2 等高级氧化技术(AOPs),于膜分离前设置氧化单元,将大分子有机物裂解,提升后续处理效率,通过预处理、生化处理、深度处理三级协同,实现污染物的阶梯式削减与全面净化。

3.3 智能控制与系统集成优化

为增强运行稳定性与精细化管理水平,现代渗滤液处理系统亟需引入智能化管理体系,以PLC或DCS为核心的智能控制系统,整合流量、水质、液位、温度等在线监测设备,实现对泵、风机、阀门及曝气系统等关键设备的自动化调控,借助传感器实时捕捉进水 COD 与 NH_3-N 浓度,系统可智能调节药剂投加量和曝气强度,保障出水水质持续达标,针对膜处理环节,嵌入膜污染预警功能模块,能够敏锐感知通量变化异常,精准规划清洗周期、选择清洗方案,有效降低意外停机风险,在系统架构设计中,模块化集成理念能够显著提升处理系统的维护便捷性与扩容灵活性,特别契合中小型填埋场分阶段改造升级的实际需求,数据管理平台的搭建则聚焦于历史数据回溯、能耗

优化分析及远程运维支持,为管理决策提供详实的数据支撑,通过构建“感知实时数据-智能分析诊断-科学决策规划-精准执行调控”的闭环管理体系,既实现了操作流程的智能化与精细化控制,又能有效降低系统运行能耗、提升经济效益,推动垃圾填埋场渗滤液处理向智慧化、绿色化方向稳步迈进

4 优化工艺工程应用与效果评估

4.1 工程实施条件与适用性分析

渗滤液处理优化工艺的实际应用成效,与工程现场条件紧密相连,工艺选型前,需全面考量填埋场的地形地貌、水文地质、渗滤液产出规模及地方排放标准,若填埋场地势低洼,渗滤液易于汇流收集,可降低泵送能耗,适合配置调节池与重力流布水设施;若场地分布零散或地势起伏复杂,则模块化处理设备更具优势,便于灵活布局且运行安全性更高,从处理规模来看,日处理量 100t 以下的小型填埋场,集成式膜-生化一体系统因占地紧凑、自动化程度高成为优选;日处理量超 500t 的大型填埋场,则需通过分区设置多级处理单元,搭配集中管控平台,强化系统冗余与抗冲击性能,此外,区域电价水平、药剂供应稳定性及环保监管严苛程度,均是工艺方案抉择的关键影响因素,于环保监管指标严苛的区域,宜优先采用反渗透与高级氧化协同工艺,该组合技术可深度净化渗滤液,保障出水水质达到 COD 低于 50mg/L、NH₃-N 低于 10mg/L 的高标准,契合地表 IV 类水质量要求,有效满足当地生态环境保护需求。

4.2 运行效果与处理效率评估

以东部某城市年处理 30 万 t 生活垃圾的填埋场为例,采用“格栅-调节池-A/O 生化-超滤-反渗透-臭氧氧化”组合工艺后,系统运行效能显著提升,处理前渗滤液平均 COD 浓度为 6500mg/L,氨氮浓度约 1200mg/L,经预处理及生化单元处理后,COD 降至 1500mg/L,氨氮降至 200mg/L;再通过膜处理与高级氧化工艺,出水 COD 稳定低于 40mg/L,氨氮低于 8mg/L,去除率分别达 99.4% 和 99.3%,持续满足《生活垃圾填埋污染控制标准》(GB 16889—2008)一级排放限值要求,系统连续运行 90 天内,出水指标波动幅度小于 10%,未出现因负荷波动导致的超标排放或设备停机情况,稳定性与抗冲击能力突出,膜组件通量维持在 18~22L/m²·h,膜污染控制效果理想,清洗周期延长至 20 天以上,体现出膜系统运行可控性强、维护周期长的技术优势。

4.3 经济性与可持续性对比分析

从经济性维度考量,尽管优化工艺的初期建设投入较

高,但其运行成本更具可控性,全生命周期成本优势显著,以文中所述项目为例,工程总投资约 1800 万元,其中膜处理系统与高级氧化装置占比达 40%。系统日常运行中,单位处理成本可控制在 12 元/吨,具体构成为:电费占 40%、药剂费用占 30%、膜组件更换及维护成本占 20%、人员成本不足 10%。相较于传统“混凝沉淀+SBR”处理模式,优化工艺的处理成本降低约 25%,此外,系统通过集成能耗监控与智能化操作平台,实现了按需投药、精准曝气及负荷自适应调节,有效减少了非必要能源消耗,在可持续性方面,优化工艺产生的浓缩液和污泥量较传统工艺减少 30%以上,显著降低了二次污染风险及后续处理负荷,部分项目中,反渗透产水可回用于场区道路冲洗或绿化灌溉,实现了水资源的循环利用,进一步提升了系统的绿色低碳水平,综上,渗滤液优化工艺不仅在处理效率与运行稳定性方面表现卓越,其在经济性和可持续性层面同样展现出良好的环境适应性与发展潜力,具备广泛的推广应用价值。

5 结语

垃圾填埋场渗滤液以污染物成分复杂、浓度高且动态变化显著的特性,对处理技术形成严峻挑战,通过搭建包含预处理、生物脱氮、膜分离及高级氧化技术的优化处理架构,并融合智能控制系统与工程化适配设计,不仅大幅提升了污染物去除效能与系统运行稳定性,还实现了运行成本的有效控制与环境风险的降低,兼具经济合理性与可持续发展潜力,这一优化工艺体系为垃圾填埋场渗滤液治理提供了科学有效的技术方案,对行业实践具有广泛的推广应用意义。

[参考文献]

- [1]庞震.存量垃圾填埋场污染分析及修复治理的策略探讨[J].清洗世界,2025,41(3):172-174.
- [2]覃建友,舒琳,谭秋燕,等.生活垃圾填埋场渗滤液监测现状和管理策略[J].低碳世界,2025,15(2):25-27.
- [3]徐颖.城市存量垃圾填埋场环境风险及其整治效果评估[J].低碳世界,2024,14(12):13-15.
- [4]姚光远,刘玉强,刘景财,等.生活垃圾填埋场污染控制标准修订内容解析[J].环境卫生工程,2024,32(1):42-48.
- [5]代先锋,袁玥.非正规垃圾填埋场污染治理技术及二次污染防治探讨[J].节能与环保,2024(9):31-37.

作者简介: 缙高鹏 (1982.4—), 毕业院校: 西安交通大学, 所学专业: 环境工程, 当前就单位: 新疆准实检测有限公司, 职务: 副总经理/授权签字人, 职称级别: 环境保护工程师。