

古创, 聂林锋, 桂宏桥, 等. 精馏脱氮工艺在生活垃圾焚烧发电厂渗滤液处理的试验[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 136-143.

Gu C, Nie L F, Gui H Q, et al. Experiment of distillation denitrification process for leachate treatment in household waste incineration power plant[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 136-143.

精馏脱氮工艺在生活垃圾焚烧发电厂渗滤液处理的试验

古创^{1,*}, 聂林锋², 桂宏桥², 陈方方¹, 樊星¹, 赵亮林³

(1. 光大环境科技<中国>有限公司, 江苏南京 211007; 2. 光大环保能源<江阴>有限公司, 江苏无锡 214400; 3. 光大环保能源<苏州>有限公司, 江苏苏州 215101)

摘要 【目的】针对生活垃圾焚烧发电厂渗滤液高氨氮、难处理的特性, 本文探究了负压精馏脱氮技术的应用效果与优化策略, 以为工程应用提供理论支持和技术指导。【方法】本试验构建了脱碳-脱氮双塔协同的负压精馏试验系统, 以江苏省某焚烧厂厌氧出水(氨氮质量浓度为 1 600~2 200 mg/L)为对象, 系统考察温度(80~100 ℃)、压力(-0.05~-0.03 MPa)、pH 值(8.0~10.5)等操作参数对氨氮去除效果的影响, 并通过正交试验优化工艺参数。【结果】在综合考虑处理效率及能耗因素得到最优条件(温度为 100 ℃、压力为-0.05 MPa、pH 值为 9.5)下, 系统氨氮去除率>90.6%, 出水氨氮质量浓度稳定在 100~150 mg/L; 同步实现碱度去除 60%~70%、硬度去除 35%~50%; 回收的 10%~15% 氨水可用于烟气脱硝, 实现资源化利用。【结论】负压精馏脱氮技术能有效处理高氨氮渗滤液, 具有脱氮效率高、资源回收潜力大的优势。多因素耦合作用中, pH 影响最显著, 温度次之。本技术虽需结合深度处理才能达到一级 A 排放标准, 但已大幅降低氮污染负荷, 具备良好的工程应用前景。

关键词 渗滤液 负压精馏脱氮 角钢塔板 氨水 资源化利用

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0136-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.014

Experiment of Distillation Denitrification Process for Leachate Treatment in Household Waste Incineration Power Plant

Gu Chuang^{1,*}, Nie Linfeng², Gui Hongqiao², Chen Fangfang¹, Fan Xing¹, Zhao Lianglin³

(1. Everbright Environmental Protection <China> Co., Ltd., Nanjing 211007, China;

2. Everbright Environmental Protection Energy <Jiangyin> Co., Ltd., Wuxi 214400, China;

3. Everbright Environmental Protection Energy <Suzhou> Co., Ltd., Suzhou 215101, China)

Abstract [Objective] The characteristics of leachate from municipal household waste incineration power plants, which features high ammonia nitrogen concentration and is difficult to treat, are addressed in this paper. The application efficacy and optimization strategies of vacuum rectification for nitrogen removal are investigated to provide theoretical support and technical guidance for its engineering application. [Methods] A dual-tower (decarbonization and denitrification) collaborative experimental system for vacuum rectification was constructed in this experiment. The anaerobic effluent from an incineration plant in Jiangsu Province (with an ammonia nitrogen mass concentration of 1 600-2 200 mg/L) was used as the research subject. The effects of operating parameters—including temperature (80-100 ℃), pressure (-0.05 - -0.03 MPa), and pH value (8.0-10.5)—on ammonia nitrogen removal efficiency were systematically investigated. Process parameters were subsequently optimized through orthogonal experiments. [Results] Under the optimal conditions, which were determined by comprehensively considering treatment efficiency and energy consumption

[收稿日期] 2025-09-21

[通信作者] 古创(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事垃圾渗滤液及有机固废处理等工作, E-mail: guch@cebvironment.com.cn。

(temperature of 100 °C, pressure of -0.05 MPa, pH value of 9.5), the ammonia nitrogen removal rate of the system exceeded 90.6%, and the effluent ammonia nitrogen mass concentration was stably maintained at 100-150 mg/L. Concurrently, a 60%-70% removal of alkalinity and a 35%-50% removal of hardness were achieved by the process. Furthermore, the 10%-15% ammonia water that was recovered could be utilized for flue gas denitrification, enabling resource utilization. [Conclusion] Vacuum rectification technology for nitrogen removal is proven to be effective in treating high-ammonia-nitrogen leachate, offering the advantages of high removal efficiency and significant potential for resource recovery. Among the coupled multi-factor effects, pH is found to be the most significant influencing factor, followed by temperature. Although this technology is required to be integrated with advanced treatment processes to meet the grade A discharge standard, the nitrogen pollution load is substantially reduced, and excellent prospects for engineering application are demonstrated.

Keywords leachate vacuum denitrification by vacuum rectification angle tray aqueous ammonia resource utilization

随着城市化进程加速,生活垃圾焚烧发电技术被广泛应用,但其产生的渗滤液因成分复杂、污染物浓度高,含有大量有机物、氨氮、重金属及微生物,已成为行业可持续发展的关键环境瓶颈^[1]。未经有效处理的渗滤液会对水体和土壤造成严重污染,威胁生态与人类健康^[2]。现有处理工艺如生物法、膜分离法等虽有一定效果,但普遍存在处理效率低、运行成本高且易产生二次污染等问题,难以满足高浓度氨氮废水的高效处理需求,亟须开发新型高效处理技术。

负压精馏脱氮技术基于氨氮在水溶液中的解离平衡特性,通过加碱调节 pH 值至 9.0 以上,使铵离子(NH₄⁺)转化为游离氨,再在负压条件下(-0.08~-0.03 MPa)于 60~100 °C 低温沸腾,利用氨的高挥发性实现气液分离。塔顶氨气冷凝后可回收为氨水^[3],塔底排出净化液,具有脱氮效率高(>90%)、可实现资源化利用、低温运行与抗结垢等优势。本研究通过中试试验,探究该技术在渗滤液处理中的应用可行性及效果,分析温度、压力、pH 等参数对脱氮效率的影响,确定最佳工艺参数,并针对工程化应

用中的问题提出设备改进与工艺优化策略,为技术在生活垃圾焚烧发电厂渗滤液应用推广提供理论支撑与实践指导。

1 设计水质

1.1 渗滤液特性分析及来源

生活垃圾焚烧发电厂渗滤液中的污染物主要包括有机物、氨氮、钙镁硬度、碱度及氯离子等^[4],其中氮的形态分布如表 1 所示。由表 1 可知,渗滤液中总氮以氨氮为主,质量浓度为 1 000~2 500 mg/L,占总氮比例达 75%~90%,其主要来源于垃圾中蛋白质等有机氮的快速氨化(分解为 NH₄⁺),且此时硝化反应尚未启动;有机氮质量浓度为 100~500 mg/L,占总氮比例为 10%~20%,主要来自未完全分解的垃圾有机物(如厨余垃圾中的蛋白质、核酸);硝酸盐氮(NO₃⁻-N)与亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)质量浓度较低,分别为 5~30 mg/L 与 1~10 mg/L,占总氮比例均不足 3%,垃圾储存坑内微量空气进入系统(如通风系统),但停留时间短,导致硝化作用微弱,NO₂⁻-N 作为硝化中间产物难以累积^[5-6]。

表 1 渗滤液中氮的形态

Tab. 1 Forms of Nitrogen in Leachate

氮形态	质量浓度/(mg·L ⁻¹)	占总氮的比例	核心特征
氨氮	1 000~2 500	75%~90%	主导形态,来自垃圾中蛋白质等有机氮的快速氨化(分解为 NH ₄ ⁺),尚未启动硝化
有机氮	100~500	10%~20%	来自未完全分解的垃圾有机物(如厨余垃圾中的蛋白质、核酸)
NO ₃ ⁻ -N	5~30	<3%	少量存在,因储存坑有微量空气进入系统(如通风系统),但停留时间短,硝化作用微弱
NO ₂ ⁻ -N	1~10	<2%	微量,硝化中间产物,因硝化不充分,累积量低

本试验所用渗滤液取自江苏省某生活垃圾焚烧发电厂渗滤液处理系统的厌氧出水。该项目的渗滤液处理系统采用“预处理+厌氧+两级硝化/反硝化+超滤(UF)+软化+反渗透(RO)”,该工艺中的预处

理采用“过滤器+竖流式沉淀池”对渗滤液中的大颗粒悬浮物进行去除,厌氧系统采用改进型的内循环厌氧(IC)反应器,对化学需氧量(COD)的去除率达到 95%以上。具体试验用水水质如表 2 所示。

表 2 精馏脱氮系统设计进出水水质
Tab. 2 Design Influent and Effluent Quality for
Nitrogen Removal by Distillation

项目	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	碱度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硬度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值
设计进水	1 900	12 000	2 000	6.0~7.5
设计出水	≤ 150	$\leq 6\ 000$	$\leq 1\ 300$	7.0
平均去除率	$\geq 92\%$	$\geq 50\%$	$\geq 35\%$	—

1.2 试验装置

本文针对垃圾渗滤液高硬度、高碱度、易结垢的处理难题,设计了处理规模为 $0.5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的“脱碳-脱氮双塔协同”工艺系统,集成角钢塔板、蒸汽汽提与负压控制技术,构建闭环运行的高效低耗处理工艺。该系统核心由脱碳塔、脱氮塔、氨回收塔及配套的抽真空、换热与自动化控制装置组成,通过工艺耦合实现反应、分离与资源回收的协同优化。

脱碳塔与脱氮塔均采用 316L 不锈钢立式圆柱形结构(直径为 350 mm、总高为 8.0 m),内置 12 块间距为 500 mm 的角钢塔板,协同共用负压系统与蒸汽资源;氨回收塔则通过喷淋吸收工艺(直径为 200 mm、总高为 6.0 m)将氨气转化为 10%~15% 氨水溶液回用于烟气脱硝,残余尾气经臭气处理系统达标排放。自动化控制系统采用可编程逻辑控制器(PLC)分布式架构,通过温度、压力、液位等传感器实时采集数据,结合比例-积分-微分(PID)控制器与模糊逻辑控制策略,自动调节蒸汽阀门、真空泵频率等,确保各单元稳定运行,同时具备故障诊断、历史数据存储与远程监控功能,显著降低人工干预强度。

角钢塔板作为工艺核心创新点,其倒置“V”形结构(栅缝宽度为 5~8 mm)、错层安装(相邻塔板错开 90°)设计,实现了传质效率与防堵性能的突破。工作时,气体经角钢侧面整流后与塔板垂直接触,压力损失仅 $\leq 500 \text{ Pa}$,远低于传统筛板压力损失($1\ 200 \sim 1\ 600 \text{ Pa}$);上升气流通过栅缝时形成“轴向(60%)+径向(40%)”双方向流动,气泡平均破碎次数达传统筛板塔的 2.3 倍,破碎后气泡直径缩小至 $500 \sim 800 \mu\text{m}$,气液接触比表面积增大至 $1\ 200 \sim 1\ 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$,湍流动能较常规填料塔高 40%~60%,最终使默弗里板效率稳定在 72%~88%,显著优于传统筛板(20%~30%)与填料塔(30%~

40%)^[7]。防堵性能方面,角钢塔板 $0.3 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 的液相流速可避免积液,直角结构减少滞留死角,30 d 连续运行后结垢厚度 $< 1 \text{ mm}$,低于传统填料塔结构厚度(3~5 mm);且其 $> 90\%$ 的开孔率与 15~20 mm 当量直径的栅缝,从根本上杜绝微晶堵塞风险^[8],年清理频次从传统筛板塔的 24 次降至 12 次,运维成本降低 50% 以上。此外,角钢塔板采用 316L 不锈钢材质,加工简单且刚度强,增加了使用寿命长,经济性优势显著。

双塔协同工艺通过资源共享与流程优化,进一步放大角钢塔板的技术优势。脱碳塔作为预处理单元,利用脱氮塔顶部含氨蒸汽(温度为 $90 \sim 105 \text{ }^\circ\text{C}$ 、氨质量分数 $> 80\%$)与渗滤液逆向传质^[9],在 $80 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 与负压条件下,促使碳酸氢根离子(HCO_3^-)转化为碳酸根离子(CO_3^{2-})并与钙离子(Ca^{2+})、镁离子(Mg^{2+})生成碳酸盐沉淀^[10],硬度去除率 $\geq 35\%$,碱度去除率 $\geq 50\%$,为脱氮塔消除结垢隐患;塔顶除沫器(除沫效率 $> 99\%$)与冷凝装置将含氨蒸汽含水率降至 $< 5\%$,含氨蒸汽(纯度 $> 95\%$)在氨回收塔中被吸收塔吸收形成质量分数为 10%~15% 的氨水。脱氮塔以焚烧厂汽轮机二次抽汽(0.25 MPa , $150 \text{ }^\circ\text{C}$)为汽提动力,脱氮塔顶部含氨蒸汽作为脱氮塔热源循环使用。在相同温度与负压条件下,推动 NH_4^+ 与氢氧根离子(OH^-)反应生成氨气(NH_3),吨水渗滤液的蒸汽消耗量为 $80 \sim 100 \text{ kg}$,氨氮去除率 $> 90.6\%$ (进水质量浓度为 $1\ 600 \sim 2\ 200 \text{ mg/L}$ 、出水质量浓度为 $100 \sim 150 \text{ mg/L}$),满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2024)表 2 标准;塔底废水经换热装置预热脱碳塔进水后外排,进一步降低能耗。与传统单塔工艺相比,该协同设计使蒸汽消耗量减少 20%~30%,真空泵配置数量减半,整体处理效率提升 10%~15%,为高难度渗滤液处理提供了高效、稳定、经济的技术方案。

1.3 工艺流程及主要运行参数

厌氧出水经提升泵输送至预处理单元,预处理单元依次通过自清洗过滤(去除 1 mm 以上大颗粒物)与换热单元(与脱氮塔产水进行间壁换热);换热后废水从顶部进入脱碳塔,与底部进入的含氨蒸汽逆流接触,在 $90 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-0.05 \sim -0.03 \text{ MPa}$ 条件下,碱度物质解析为二氧化碳(CO_2),并与

Ca²⁺、Mg²⁺反应生成碳酸盐沉淀,实现硬度与碱度同步去除^[11],塔顶除沫冷凝装置抑制气液夹带;脱碳后渗滤液进入脱氮塔,与上升蒸汽逆流接触,氨氮高效转移至气相,脱氮后清液排入后续处理系统。工艺流程如图1所示。

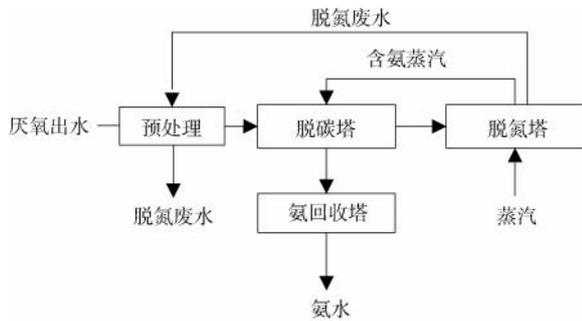


图1 蒸氨工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Distillation Denitrification

该工艺通过“功能解耦”设计,让脱碳塔专司防垢预处理,脱氮塔聚焦氨氮脱除,从根源上分离结垢风险点;同时,脱碳塔采用“一用一备”冗余配置,可实现在线清洗切换,保障系统连续运行。脱除的氨气在氨回收塔内与水(H₂O)反应生成质量分数为10%~15%氨水,回用于焚烧厂烟气脱硝,践行“以废治废”的循环经济理念。精馏脱氮系统的设计指标和运行参数如表3所示。

2 结果和讨论

负压精馏脱氮技术通过调控温度、压力和pH等操作参数,强化氨氮从液相向气相的传质过程,实现高氨氮废水的高效脱氮。本研究针对氨氮质量浓度为1 600~2 200 mg/L的高氨氮废水,系统考察了温度(80、90、100℃)、压力(-0.03、-0.05 MPa)及pH值(8.0~10.5)对氨氮去除效果的影响,结果如下。

表3 精馏脱氮系统主要设计和运行参数

Tab. 3 Main Design and Operation Parameters of the Distillation Denitrification System

单元名称	运行参数	设计指标	备注
脱碳塔	操作温度:80~100℃	碱度去除率≥50%	一用一备,确保清洗时不中断系统运行
	操作压力:-0.05~-0.03 MPa	硬度去除率≥35%	
	停留时间:1.5 h	氨氮去除率≥70%	
脱氮塔	操作温度:90~100℃	氨氮去除率≥80%	采用逆流接触强化传质
	操作压力:-0.05~-0.03 MPa	出水氨氮质量浓度≤150 mg/L	
吸收塔	操作温度:85~95℃	氨回收率≥94%,氨水质量分数为10%~15%	氨水用于焚烧厂烟气脱硝,实现资源化利用
换热系统	进水温度:45℃	能耗降低≥20%	利用余热,降低系统整体能耗
	出水温度:85℃		
	换热效率≥85%		

2.1 不同操作条件对精馏脱氮效果的影响

2.1.1 温度对精馏脱氮的影响

为探究温度对精馏脱氮效果的影响,在压力为-0.05 MPa、pH值为9.5及其他条件恒定的情况下,考察了80、90℃和100℃3个温度条件下的氨氮去除率。

试验结果显示,温度对氨氮去除率具有显著影响。80℃时,氨氮平均去除率仅为89.9%。此温度下氨氮挥发度较低,游离氨从液相向气相的传质速率缓慢,导致分离效率不高。当温度升至90℃时,氨氮平均去除率提高至93.5%。温度升高增强了氨氮的挥发性能,促进了游离氨向气相的转移,增大了气液传质推动力,从而提升了去除率。温度进一步升高至100℃时,氨氮平均去除率达到94.4%,接

近峰值。此时气液传质更为充分,精馏塔的分选效率显著提高。然而,当温度继续升高至120℃时,氨氮平均去除率升至95.01%。80、90、100、120℃时蒸汽能耗分别为89、97、100、116 kg/t。本项目有生物和膜系统等处理工艺可以确保氨氮稳定达标,因此,综合考虑氨氮去除率与能耗等因素,本试验条件下精馏脱氮的最佳温度值为90~100℃。在此范围内,既能保证较高的氨氮去除率,又能避免能耗过高,也能避免因温度过高引发的负面影响。具体如图2所示。

2.1.2 压力对精馏脱氮的影响

在温度维持在90℃、pH值保持在9.5的条件下,降低系统压力(即增强负压)显著促进氨氮脱除。当压力从-0.03 MPa降至-0.05 MPa时,去除

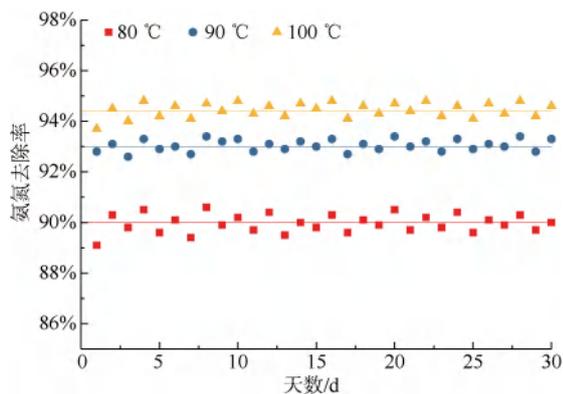


图 2 不同温度条件氨氮的去除率

Fig. 2 Ammonia Nitrogen Removal Efficiency under Different Temperature Conditions

率由 91.5% 提升至 94.2%。负压环境可降低水的沸点, 促使废水在较低温度下产生蒸汽, 同时打破气液相间氨的平衡, 推动液相氨持续向气相扩散。在 -0.03 MPa 下, 传质驱动力较弱, 部分氨氮难以脱除; 而在 -0.05 MPa 下, 传质阻力减小, 脱氮效果更佳。进一步降低压力 (如至 -0.06 MPa) 虽可使去除率微增至 94.5%, 但真空泵能耗急剧上升, 经济性下降。因此, -0.05 MPa 为兼顾脱氮效率与运行成本的最优压力。具体如图 3 所示。

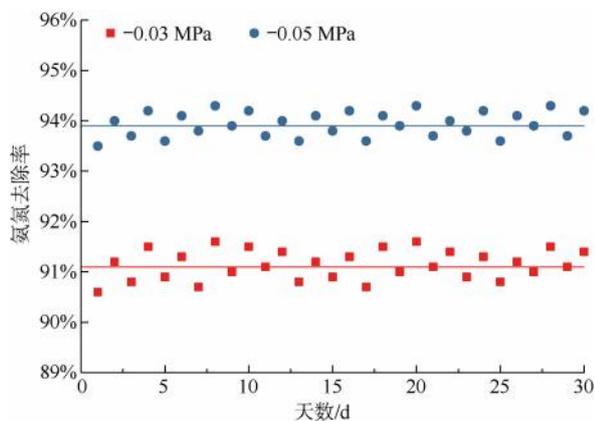


图 3 不同压力条件氨氮的去除率

Fig. 3 Ammonia Nitrogen Removal Efficiency under Different Pressure Conditions

2.1.3 pH 对精馏脱氮的影响

在温度为 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 、压力为 -0.05 MPa 的条件下, pH 升高对去氨氮除率的影响呈“快速上升后趋于平稳”的趋势。当 pH 值从 8.0 升至 9.5 时, 去除率由 89.8% 显著提升至 94.0% 左右; pH 值继续升至 10.5 时, 仅增至 95.1%。其机理: 氨氮以 NH_4^+ (离子

态) 和 NH_3 (分子态) 共存, 二者比例受 pH 调控。低 pH 下 NH_4^+ 占主导, 难挥发; 随 pH 升高, OH^- 与 NH_4^+ 反应生成 NH_3 ($\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$), 促进分子态氨释放。pH 值为 9.5 时, 分子态氨占比已超 90%, 继续提高 pH 对形态转化贡献有限。此外, pH 值 > 10.5 会加剧设备腐蚀, 增加加药成本和设备防腐成本。因此, 推荐控制 pH 值为 9.5。具体如图 4 所示。

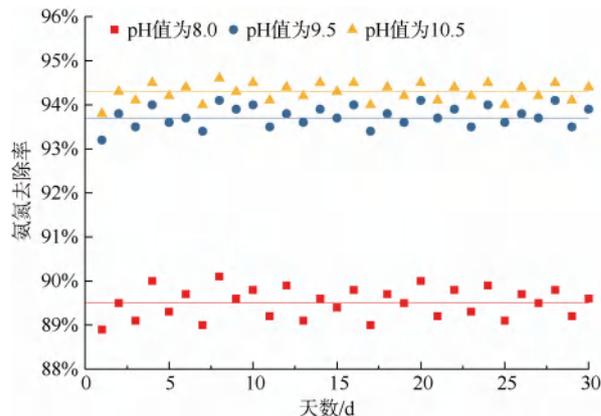


图 4 不同 pH 值条件氨氮的去除率

Fig. 4 Ammonia Nitrogen Removal Efficiency under Different pH Values Conditions

2.1.4 多因素耦合作用下的氨氮去除效果

实际运行中, 温度、压力与 pH 存在协同效应。正交试验分析表明, 各因素对氨氮去除率的影响权重为 pH (贡献率为 42%) $>$ 温度 (贡献率为 35%) $>$ 压力 (贡献率为 23%)。在最优参数组合 (温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、压力为 -0.05 MPa 、pH 值为 9.5) 下, 系统对进水氨氮质量浓度为 $1\ 600 \sim 2\ 200 \text{ mg/L}$ 的渗滤液, 平均去除率达大于 90.6%, 出水氨氮质量浓度稳定在 $100 \sim 150 \text{ mg/L}$ 。

考虑渗滤液系统污染物种类较多, 不是单一技术能够处理达标排放, 本试验研究的出水虽无法直接达标排放, 但已大幅降低后续处理负荷, 具备良好的工程适用性, 通过与膜生物反应器 (MBR)、RO 等技术耦合即可实现达标排放, 验证了双塔负压精馏脱氮系统的有效性与稳定性。

2.2 试验结果分析

2.2.1 氨氮去除效果分析

针对去除率和能耗的对比, 在温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、压力为 -0.05 MPa 、pH 值为 9.5 的条件下, 通过对精馏脱氮处理前后渗滤液中氨氮浓度的监测, 评估其

脱氮性能。进水氨氮平均质量浓度为 1 800 mg/L, 经处理后质量浓度降至 ≤ 150 mg/L, 平均去除率 $\geq 91.7\%$ (图 5)。结果表明, 精馏脱氮技术在去除渗滤液氨氮方面具有高效性, 能显著降低氮污染负荷。

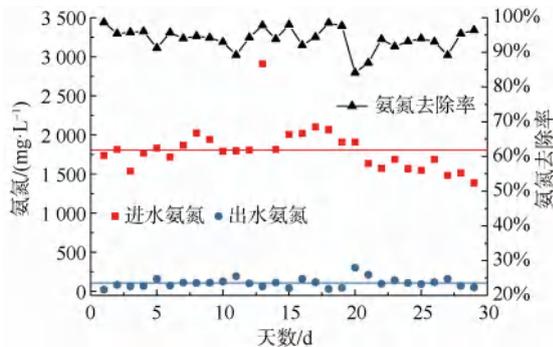


图 5 进出水氨氮及其去除率

Fig. 5 Ammonia Nitrogen in Influent and Effluent and the Removal Rates

氨氮去除率启动周期较常规生化系统快。处理初期, 精馏塔内气液传质尚未达到最佳状态, 去除率约 70%^[12]。随时间延长, 在 0.5 h 后操作条件逐渐稳定, 传质效果增强, 去除率迅速上升达到 90% 以上, 此后增长趋势放缓, 稳定在 94.5% 以上。

2.2.2 碱度及硬度去除效果分析

在精馏脱氮过程中, 碱度与硬度的去除是影响系统稳定性和出水水质的重要因素。本研究对碱度与硬度在负压精馏过程中的行为进行了系统分析, 旨在揭示其去除机制及对脱氮效果的影响。针对去除率和能耗的对比, 在温度为 100 °C、压力为 -0.05 MPa, pH 值为 9.5 的条件下, 通过对精馏脱氮处理前后渗滤液中碱度和硬度浓度的监测, 评估其脱氮性能。

渗滤液中碱度主要来源于碳酸氢盐、碳酸盐及氢氧化物等缓冲物质。在负压精馏过程中, 随着温度升高和压力降低, 部分碱性物质随氨氮一同挥发进入气相, 从而实现碱度的部分去除。试验数据显示, 在温度为 90~100 °C、压力为 -0.05 MPa 的条件下, 碱度去除率可达 60%~70% (图 6)。碱度的去除有助于降低渗滤液的缓冲能力, 减少后续处理过程中 pH 调节的难度, 同时有利于游离氨的生成与挥发, 从而间接提升氨氮的去除效率。

渗滤中的硬度主要由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等二价阳离子构成。在负压精馏过程中, 这些离子本身不挥发。因此, 硬度无法通过气液传质直接去除。然而, 随着

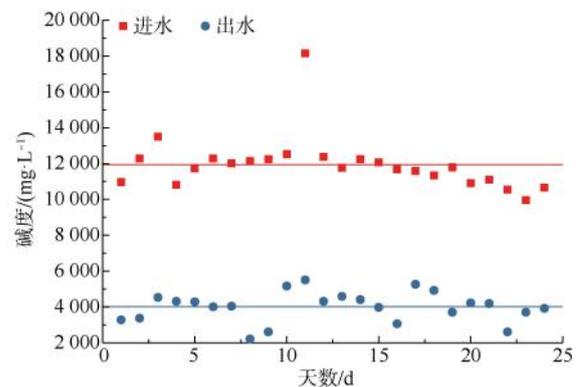


图 6 进出水碱度

Fig. 6 Alkalinity in Influent and Effluent

温度升高, 部分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 会与渗滤液中的 CO_3^{2-} 、硫酸根等离子结合生成难溶性沉淀 (如碳酸钙、碳酸镁、硫酸钙等), 在精馏塔塔板、塔底或管道内沉积, 从而间接实现部分硬度去除。结果表明, 在温度为 90~100 °C 时, 总硬度去除率为 35%~50% (图 7)。尽管去除率不高, 但沉淀物的生成可能引起设备结垢, 需定期清洗或采取防垢措施。

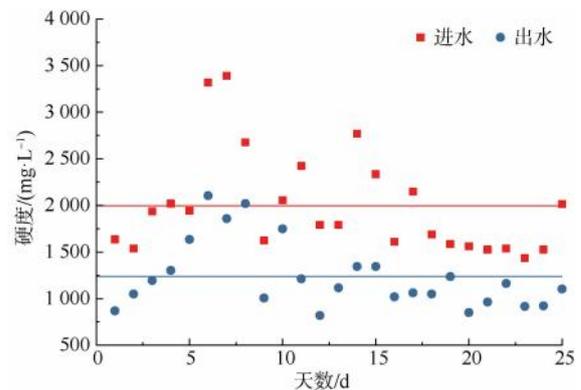


图 7 进出水硬度

Fig. 7 Hardness in Influent and Effluent

碱度的去除有助于提升系统 pH 调控的灵活性, 促进游离氨的生成, 从而提高氨氮的脱除效率; 而硬度的去除虽有限, 但其沉淀行为可能导致设备运行效率下降, 增加维护成本。因此, 在实际工程应用中, 应综合考虑碱度与硬度的变化对系统运行的影响, 合理调控操作参数, 以实现高效、稳定的脱氮效果。

2.2.3 运行过程中存在问题应对措施

在运行过程中发现, 随着运行时间的延长, 脱碳塔与脱氮塔的塔板均出现不同程度的结垢现象。由于渗滤液首先进入脱碳塔, 其结垢现象尤为显著, 且

上部塔板的结垢程度较底部更为严重。针对此问题,本研究在每层塔板上部设计在线化学原位清洗(CIP)喷淋装置,该装置既可用于酸洗,也可作为水力消泡装置。考虑到腐蚀等因素,精馏塔塔体及塔板均采用 SUS316 不锈钢材质,对酸清洗剂的选择进行了系统调研,最终选用腐蚀性较低的柠檬酸作为主要清洗药剂^[13]。

在精馏过程中,渗滤液中的表面活性剂及有机物等易起泡物质会产生大量泡沫,影响脱碳塔和脱氮塔的正常运行。由于含硅类消泡剂过量使用可能对 RO 膜造成污染,本研究选用无硅类消泡剂,其具有高效的消泡性能与良好的化学稳定性。适量添加该消泡剂可有效抑制泡沫生成,确保精馏过程的稳定运行。

3 结论

3.1 成果总结

在工艺参数优化方面,通过单因素试验与正交试验耦合分析,明确了精馏脱氮技术处理高氨氮渗滤液的最佳操作条件:温度为 90~100 °C、压力为 -0.05~-0.03 MPa、pH 值为 9.5。在此参数下,系统对进水氨氮质量浓度为 1 600~2 200 mg/L 的渗滤液处理效果显著,氨氮去除率稳定在 90.6% 以上,出水氨氮质量浓度降至 150 mg/L 以下,同步实现 60%~70% 碱度、35%~50% 硬度的去除,大幅降低了渗滤液的污染负荷与后续处理难度。从技术优势来看,相较于传统生物脱氮技术,该技术突破了渗滤液碳氮比(C/N)限制与可生化性制约,以处理量为 500 m³/d 为例,生化处理系统占地面积需要约 1 300 m²,而精馏脱氮工艺占地面积仅约 420 m²,若采用精馏脱氮技术作为主要的脱氮单元,可降低占地面积 65% 以上^[12],且运行稳定性高;对比吹脱法等物理化学技术,其通过负压低温(60~90 °C)运行降低能耗,同时创新性实现氨氮资源化,将污染物转化为 10%~15% 质量分数的氨水,回用于焚烧厂烟气脱硝,践行“以废治废”的循环经济理念,兼具环境效益与经济效益。在工程应用保障方面,针对试验中发现的塔板结垢与泡沫夹带问题,提出“在线柠檬酸 CIP+无硅消泡剂+水力消泡”的组合解决方案,结合角钢塔板(90°结构、低积液设计)与 PLC 分布式自控系统(实时监控温度、压力、氨氮浓度等参数并智能调节),有效提升了系统抗干扰能力与运

行稳定性,形成了可落地的工程技术方案。

3.2 研究的创新点与局限性

研究针对高氨氮、高碱度垃圾渗滤液处理的结垢与高能耗难题,创新开发“脱碳-脱氮双塔协同”工艺,核心通过功能解耦实现渗滤液的高效处理:脱碳塔专项完成碱度去除与结垢前驱体削减,脱氮塔则在负压环境下达成氨氮高效吹脱。工艺集成高效角钢塔板强化气液传质,耦合能量梯级利用技术大幅降低系统比能耗,同时将副产物氨氮回收制备氨水,用于焚烧厂烟气脱硝过程,构建污染物资源化与“以废治废”的闭环体系,配套的在线化学 CIP 喷淋装置与泡沫抑制策略进一步保障了处理过程稳定性。

当前研究局限于中试试验尺度,工程化应用面临三大核心瓶颈:设备放大效应与流体力学挑战显著,工业级氨精馏塔高度达 15~30 m,塔径扩大易引发气液分布不均、“沟流”或“壁流”问题,导致塔板效率下降与出水水质波动,工况波动下系统鲁棒性不足,对自动化调控提出更高要求;长期运行中,塔板背面等“自清洁”盲区垢层累积将衰减处理性能,高浓度氯离子在高温与化学清洗交替作用下,对 316 L 不锈钢设备形成点蚀与应力腐蚀威胁,设备可靠性需强化评估;单一精馏工艺无法满足一级 A 排放标准,其与上下游工艺的协同衔接及全流程技术经济性评估尚不完善,亟待实现从“单元操作”到“系统工程”的整合跨越。

3.3 对未来研究的展望

本文核心贡献在于构建了融合“脱碳-脱氮双塔协同”工艺、角钢塔板与智能控制的高效低耗渗滤液处理系统,为生活垃圾焚烧厂渗滤液处理提供了创新性技术方案。针对渗滤液高氨氮、高碱度、高硬度的特性,本研究系统阐明其负压精馏传质规律并优化关键操作参数,通过功能解耦设计(脱碳塔防垢预处理、脱氮塔专注氨氮脱除)与热集成技术,从源头降低结垢风险与能耗。尤为重要的是,该系统实现了难降解氨氮向高纯度氨水的高效转化,且氨水可直接回用于焚烧厂烟气脱硝,开创“以污治污、变废为宝”的资源化新模式,为渗滤液处理提供了兼具污染物减量环境效益与资源回收经济价值的技术路径。

尽管该研究取得较大进展,但技术从中试试验走向规模化应用仍存挑战,未来需从技术集成与工

程放大双向发力。技术层面应聚焦精馏单元与生物处理、膜分离的耦合机制,构建多技术协同体系,结合计算流体力学(CFD)及工况建模软件(Aspen Plus)等模拟解析传质微观机理,研发新型抗垢塔板与耐蚀材料,并引入过程分析技术(PAT)与机器学习构建智能调控平台。工程层面需通过中试验证塔径扩大等设备放大效应及系统抗负荷波动鲁棒性,夯实产业化基础。上述研究的推进将加速技术规模化落地,实现污染物去除与资源利用双重目标,为垃圾焚烧产业绿色发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 房新昌, 马良, 田彬彬, 等. 厌氧-好氧-缺氧 SBBR 工艺对垃圾渗滤液深度脱氮处理的试验[J]. 净水技术, 2024, 43(4): 121-127.
Fang X C, Ma L, Tian B B, et al. Experiment of advanced treatment with anaerobic-aerobic-anoxic SBBR processes for landfill leachate denitrification [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 121-127.
- [2] 李晓云, 陈峰, 王炳胜, 等. 垃圾焚烧厂渗滤液回用脱除氮氧化物装置工艺及应用[J]. 环境卫生工程, 2025, 33(3): 114-116.
Li X Y, Chen F, Wang B S, et al. Process and application of leachate injection for NO_x reduction in municipal solid waste incineration plants [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2025, 33(3): 114-116.
- [3] 赵举浪. 新型余热焦化蒸氨工艺的应用分析[J]. 广州化工, 2023, 51(16): 123-126.
Zhao J L. Application analysis of a new type of waste heat coking ammonia distillation process [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51(16): 123-126.
- [4] 杨韬, 张瑞娜, 曹瑞杰. 生活垃圾焚烧厂渗滤液水质的季节性差异及其处理特性分析[J]. 净水技术, 2022, 41(9): 79-85.
Yang T, Zhang R N, Cao R J. Effects of seasonal variation on leachate characteristics of municipal solid waste incineration plant and treatment efficiency of combined process [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9): 79-85.
- [5] 张秋钰, 邵梓涵, 鲁明会, 等. 垃圾渗滤液中氮循环细菌与氮元素变化分析[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(4): 22-25.
Zhang Q Y, Shao Z H, Lu M H, et al. Analysis of nitrogen cycling bacteria and nitrogen elements in landfill leachate [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(4): 22-25.
- [6] 庞香蕊, 黄启飞, 汪群慧, 等. 准好氧填埋渗滤液中氮转化机理[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 90-94.
Pang X R, Huang Q F, Wang Q H, et al. The transformation mechanism of nitrogen in semiaerobic landfilling leachate [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 90-94.
- [7] 从海峰. 新型精馏塔内件结构开发与能量集成优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Cong H F. Development of novel internals and energy integration process in distillation columns [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [8] 张露, 高小键, 姚政, 等. 天然气处理厂精馏塔堵塞成因及防治对策研究[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(2): 8-14.
Zhang L, Gao X J, Yao Z, et al. Study on the causes of the blockage and countermeasures of distillation column in natural gas treatment plant [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2022, 51(2): 8-14.
- [9] 汪东, 江洋洋, 陈曦, 等. MDEA-PZ 脱碳工艺模拟与优化[J]. 能源化工, 2023, 44(6): 63-67.
Wang D, Jiang Y Y, Chen X, et al. MDEA-PZ carbon capture process simulation and optimization [J]. Energy Chemical Industry, 2023, 44(6): 63-67.
- [10] 张利, 马小龙, 李平, 等. 高钙镁气田水中碳酸钙结垢行为研究与趋势预测[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 401-407.
Zhang L, Ma X L, Li P, et al. Scaling behavior and scaling potential prediction of calcium carbonate in gas field water with high calcium and magnesium contents [J]. Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2021, 47(4): 401-407.
- [11] 杨守联. 汽提脱氨技术在高氨氮废水处理中的应用[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(18): 123-125, 129.
Yang S L. Application of stripping deamination technology in high ammonia nitrogen wastewater treatment [J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(18): 123-125, 129.
- [12] 陈方方, 古创, 孔芹, 等. 精馏脱氮处理垃圾填埋场渗滤液工程案例[J]. 中国给水排水, 2025, 41(2): 110-114.
Chen F F, Gu Chuang, Kong Qin, et al. Engineering case of landfill leachate treatment by distillation denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(2): 110-114.
- [13] 张金山, 谢冰, 夏志先, 等. 不同类型清洗剂对垃圾渗滤液 MBR 反应器膜污堵的清洗效果[J]. 净水技术, 2020, 39(s2): 96-100.
Zhang J S, Xie B, Xia Z X, et al. Cleaning effects of different cleaning agents on membrane fouling of landfill leachate MBR reactor [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(s2): 96-100.