

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.04.010

动力波吹脱-Fenton-SBR 组合工艺处理垃圾渗滤液

卓雄

(福州城市建设设计研究院有限公司,福建 福州 350001)

摘要: 老龄化垃圾渗滤液氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度极高,可生化性差,处理难度大。本研究采用物理化学和生物工艺相结合的方法处理老龄化垃圾渗滤液,动力波吹脱法去除 $\text{NH}_3\text{-N}$,Fenton 氧化法去除生物难降解化合物,A/O 型 SBR 法去除生物可降解成分,创新性地提出了一种动力波吹脱-Fenton-SBR 组合工艺。通过对实验条件的正交分析,确定了最佳的实验参数。结果表明,经动力波吹脱-Fenton-SBR 组合工艺处理处理后的垃圾渗滤液,其出水 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率最高可达 96.67%和 97.98%。相比现有的诸多工程实例,本研究提出的组合工艺处理成本低至 45.95 元/t,处理效果更好,成本更低。

关键词: 老龄化垃圾渗滤液;氨氮;动力波吹脱-Fenton-SBR 组合工艺

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)04-0365-07

Treatment of landfill leachate by dynamic wave stripping-Fenton-SBR combined process

ZHUO Xiong

(Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Aging landfill leachate has extremely high ammonia-nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) concentration, poor biodegradability and is difficult to process. Physicochemical and biological process were combined to treat aging landfill leachate. Dynamic wave stripping method was used to remove ammonia nitrogen, Fenton oxidation method was used to remove compounds that are not biodegradable, and finally A/O type SBR method was used to remove biodegradable components. A dynamic wave stripping-Fenton-SBR combined process was innovatively proposed. Through orthogonal analysis of experimental conditions, the best experimental parameters were determined. Results show that after dynamic wave stripping-Fenton-SBR combined process, the effluent COD and ammonia nitrogen removal rate can reach 96.67% and 97.98%. The cost of the combined process proposed is as low as 45.95 RMB/t, which has better treatment effect and lower cost compared with many existing engineering cases.

Keywords: aging landfill leachate; ammonia nitrogen; dynamic wave stripping-Fenton-SBR combined process

垃圾填埋是处理城市固体废物(MSW)最广泛使用的方法之一,全世界收集的这类废物中有高达 95%被弃置于填埋场^[1]。固体废物经堆填后,会发生物理化学和生物变化,导致一种被称为“渗滤液”的高浓度污染液体产生。稳定渗滤液的共同特点是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度高($\text{NH}_3\text{-N}$,3 000~5 000

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),化学需氧量 COD 浓度中等(5 000~20 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), BOD_5/COD 比值低(<0.1)。垃圾渗滤液的处理方法有物理法、化学法和生物法等。生物处理方法在处理较年轻的渗滤液时效率高,但在处理较年长的渗滤液时效率较低。老龄化垃圾渗滤液中的高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量也可能对活性

收稿日期: 2021-06-20

基金项目: 福建省建设科技研究开发项目(2016-K-46);福州市科研项目(2020-GX-19)

作者简介: 卓雄(1971—),男,福建福州人,高级工程师,研究方向:设计质量管理、技术管理。

污泥微生物有抑制作用。因此,通常需要物理化学和生物方法的结合来有效处理渗滤液^[2]。如何高效处理低碳氮比、高 NH₃-N 的老龄化垃圾渗滤液是业界亟待解决的难题。

氨吹脱是垃圾渗滤液中去除 NH₃-N 应用最广泛的处理方法^[3],NH₃-N 去除率处理效果达到 85%~95%,浓度范围为 220~3 260 mg·L⁻¹^[4]。化学氧化是一种被广泛研究的处理垃圾渗滤液的方法,目前主要聚焦于高级氧化技术(AOP)^[5],在这些工艺中,Fenton 氧化工艺是最佳的选择,因为工艺技术简单,没有传质限制(均质性),而且铁和过氧化氢成本廉价且无毒。但 Fenton 的工艺要求 pH 值较低,有必要合理调控实验参数^[6]。基于悬浮生长生物质的好氧生物工艺,如曝气氧化塘、常规活性污泥工艺和序批式反应器(SBR),已经得到了广泛的研究和采用^[7]。生物处理,通常是 SBR,是去除生物可降解的有机化合物最经济有效的方法^[8]。然而,由于污泥膨胀或分散的生长现象,活性污泥系统的废水中存在高浓度的悬浮物问题^[9]。传统空气吹脱法存在气液界面

反应不充分,氨转移速率慢以及装置易结垢等问题,实际分离效果欠佳^[10]。而当前业界广泛应用的“双膜”工艺,也因维护管理成本高、易造成二次污染等问题广遭诟病。

动力波吹脱技术引发高速旋转的液流和气流逆向剧烈碰撞,产生丰富的泡沫,从而达到高效气液分离的效果,已被冶金、精炼和化工等行业广泛应用于废气和废液处理^[11]。本研究采用物理化学和生物工艺相结合的方法处理老龄化垃圾渗滤液,利用动力波产生大量泡沫,增大气液界面的接触面积和频率,实现渗滤液中 NH₃-N 的快速分离,再利用 Fenton 高级氧化工艺去除难生物降解的化合物,提高渗滤液的可生化性能,最后,利用生物法实现 NH₃-N 的高效去除。

1 材料与方法

1.1 水源和水质

以福州市红庙岭垃圾渗滤液处理厂均质池出水为实验用水,水中 NH₃-N 占氮素污染物总量的 60%~85%,详细水质指标如表 1 所示。

表 1 均质池出水水质状况
Tab.1 Test water quality of landfill leachate

指标	pH	温度/℃	$\rho_{\text{TN}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{NH}_3\text{-N}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{BOD}_5} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{COD}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
测定值	7.8~8.4	10~30	800~1 200	500~1 000	300~600	2 000~4 000

1.2 实验试剂与仪器

1.2.1 实验试剂

实验涉及的药物均为国药集团化学试剂有限公司生产,纯度为分析纯,具体如下:氢氧化钠(NaOH)、盐酸(HCl)、硫酸铵((NH₄)₂SO₄)、亚硝酸钠(NaNO₃)、硝酸钾(KNO₃)、七水合硫酸亚铁(FeSO₄·7H₂O)、30%过氧化氢溶液(H₂O₂)。

1.2.2 实验仪器

SYQ-DXS-280B 不锈钢压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂);pHS-3C pH 计、JPBJ-608 溶解氧仪(上海雷磁仪器厂);DRB 200 COD 消解器、DR 900 多参数比色计、生化需氧量分析仪(美国 HACH 公司);BAS224S 电子天平(赛多利斯科学仪器有限公司);SB-998 氧气泵(中山松宝电器有限公司)

1.3 实验方法

图 1 为动力波吹脱中试装置示意图。其中,均质调节池体积为 40 L(L×B×H=500 mm×200 mm×400 mm)、反应循环水箱采用 PP 材质,体积为 108 L(L×B×H=900 mm×300 mm×400 mm),污水单次处理量定为 42 L,每次从排水管口收集待测水样,检测污水中 NH₃-N 和 COD 的去除效果。

空气吹脱流程:(1)调整均质调节池中垃圾渗滤液的温度并利用 HCl 和 NaOH 调节溶液的 pH;(2)启动污水泵,同时调节鼓风机风速控制气液比,空气与污水在波管中发生剧烈碰撞,实现 NH₃-N 吹脱效果;(3)吹脱后的污水在反应循环水箱进行强力搅拌;(4)用污水泵将搅拌后的渗滤液重新导入波管中,进行循环吹脱处理。

Fenton 过程按以下顺序步骤进行:取 400 mL 吹脱后排水管出水为 Fenton 处理原始水样,先用

足量 HCl 调节水样 pH 在 3 ~ 4, 然后加入一定量的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 H_2O_2 溶液, 并将此刻设为反应初始时间。一段时间后, 加入 NaOH 调节污水 pH=8, 静置沉淀 60 min。测量上清液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 含量。

生物处理过程: 生化反应器运行初期, 接种污

水厂曝气池污泥, 并用模拟废水对污泥依次进行一段时间的闷曝、间歇培养和连续培养处理。在连续培养阶段开始加入经 Fenton 氧化处理后的渗滤液, 并逐渐增加其投加量, 待系统运行稳定后, 考察各参数对反应器中污染物降解效果的影响。

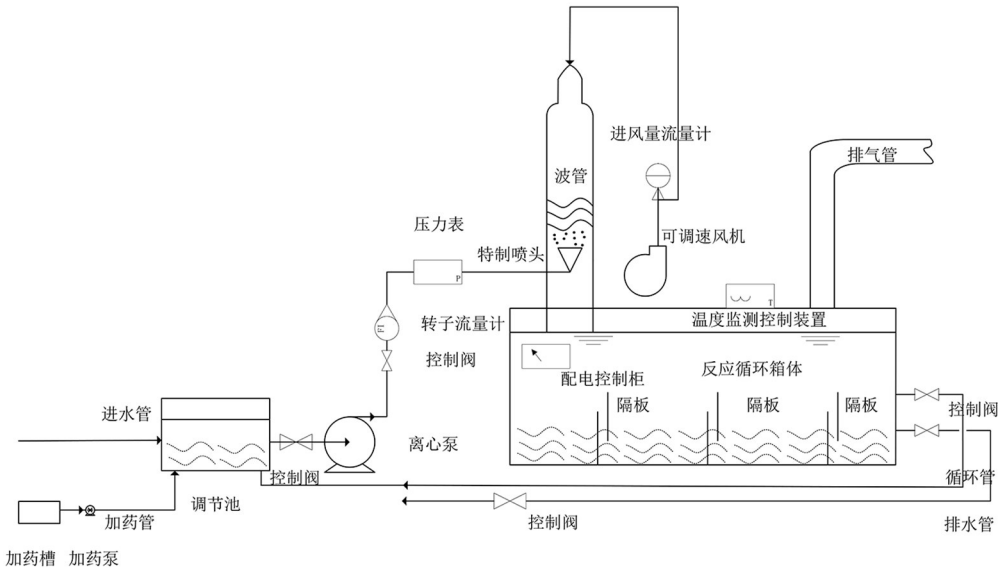


图 1 动力波吹脱试验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus of dynamic wave stripping

1.4 检测方法

COD、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量均通过哈希多参数比色计测量, 污水中 BOD_5 含量采用哈希生化需氧量分析仪检测。

2 动力波吹脱-Fenton-SBR 组合实验与分析

在联合处理工艺处理实验中, 垃圾渗滤液首先被送入动力波吹脱装置进行预处理以去除氨。从该单元流出的水在 Fenton 反应器中被氧化, 以去除难生物降解化合物。接着将动力波吹脱+ Fenton 氧化后的废水送至 A/O 型 SBR 反应器, 以提高有机物和总氮的去除效果。在最佳条件下对所有的处理单元进行系统集成实验, 在每道工艺结束时分别测定废水的 COD、 BOD_5 和 $\text{NH}_3\text{-N}$, 研究了联合处理的综合效率。

2.1 动力波吹脱强化预处理垃圾渗滤液

早期吹脱实验^[12]研究了渗滤液进水 pH、温度、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量以及反应时间和气液比对脱氮效率的影响。分析单因素试验结果得知, 动力波吹

脱技术具有脱氮迅速、适用温度和 pH 范围广等优点。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除主要发生在反应初始的 5 h 内, 反应体系中 pH、气液比和温度的上升有利于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除, 渗滤液中初始 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量对最终的脱氮效果影响不大。从正交试验结果可知, 各因素对脱氮效率的影响从小到大依次为初始 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量、进水 pH、气液比、水温。图 2 数据显示, 反应体系在水温为 25 ℃, 气液比为 129, 进水 pH=10.5 的环境中, 5 h 后 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率高达 91.25%~94.15%。

2.2 Fenton 氧化工艺降解动力波吹脱出水实验

经吹脱处理后, 渗滤液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 含量分别为 69~91 mg/L 和 1 211~1 293 mg/L, 难以直接进行生化处理。因此, 本研究引入 Fenton 氧化工艺进一步降低污水中污染物浓度, 增加污水的可生化性, 研究了初始反应时间、初始 pH、 H_2O_2 浓度、 Fe^{2+} 投加量等实验条件对 COD 去除效果的影响。结果如图 3 所示。

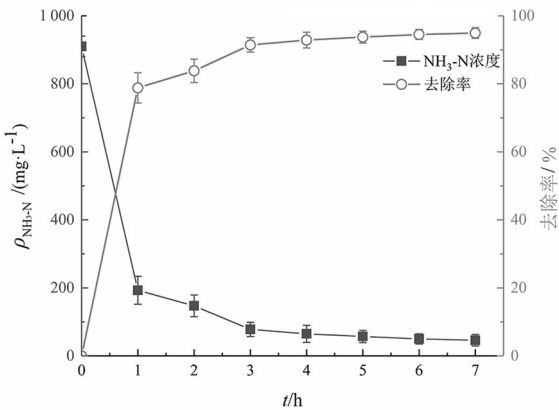
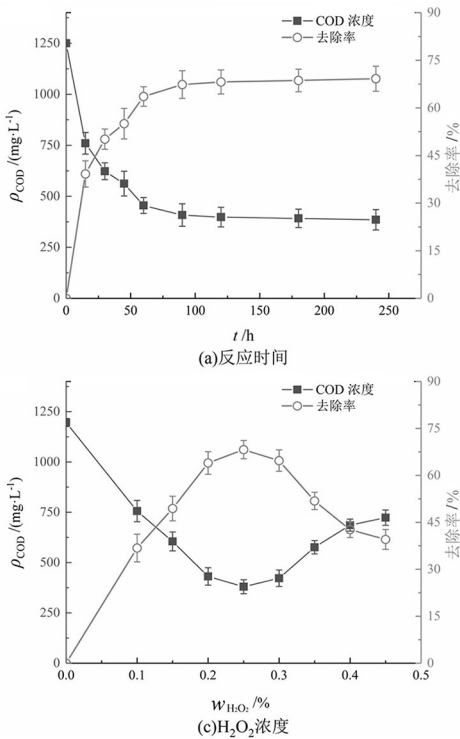


图 2 $\text{NH}_3\text{-N}$ 吹脱效率随时间的变化
Fig.2 Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ stripping efficiency with time



2.2.1 反应时间对 COD 去除效果的影响

调节反应器进水至 $\text{pH}=5$, 投加 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 H_2O_2 溶液, 控制污水中 Fe^{2+} 浓度和 H_2O_2 体积分数分别为 0.06 mol/L 和 0.25% , 研究不同作用时间 ($t = 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 \text{ min}$) 下反应体系中 COD 的去除效率。反应时间 (t) 对 COD 去除率的影响如图 3(a) 所示。

实验结果证明, Fenton 体系在前 1 h 内对 COD 有很好的氧化效果, 去除率高达 63.5%。1 h 后, COD 的去除率逐渐下降, 90 min 后, COD 去除率基本不随时间变化, 这归因于反应体系中 Fe^{3+} 的浓度随反应时间的增加而增大, 形成大量 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀, 阻碍了 COD 的进一步去除。结合经济效益, 确定最佳反应时间为 60 min。

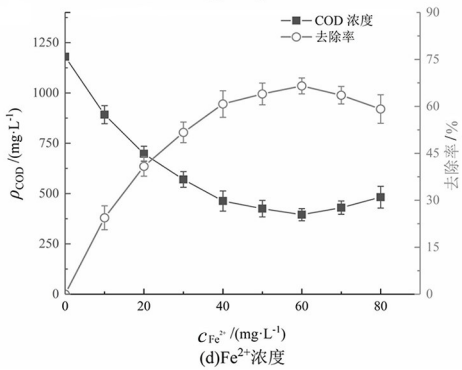
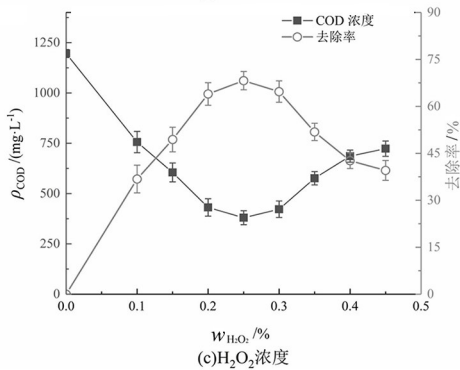
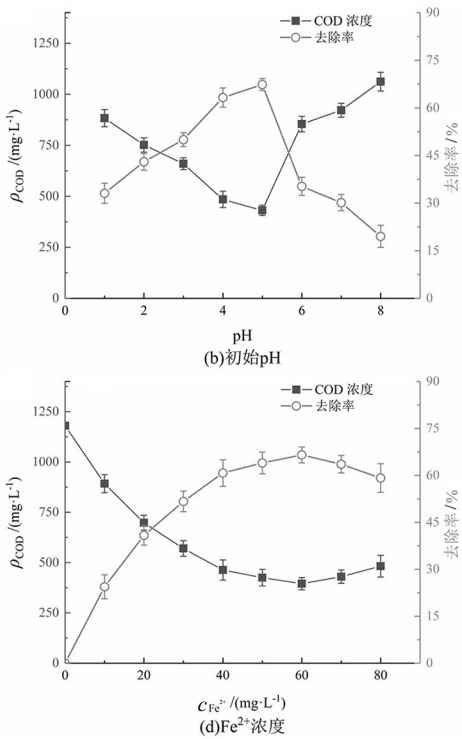


图 3 不同实验条件对 COD 去除率的影响
Fig.3 Influence of different experimental conditions on COD removal rate

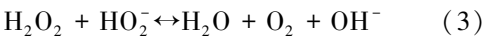
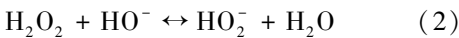
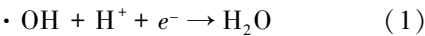
2.2.2 初始 pH 对 COD 去除率的影响

研究表明, 水中的 Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应能产生具有强氧化性的自由基 ($\cdot \text{OH}$)^[13]。研究发现, 适宜的酸性环境可以促进该反应的进行, 生成更多 $\cdot \text{OH}$ 以增强对 COD 的去除效果。

污水中 Fe^{2+} 浓度和 H_2O_2 体积分数分别保持在 0.06 mol/L 和 0.25% , 观察 60 min 后, 不同酸碱环境下 COD 的降解差异。结果如图 3(b) 所示, pH

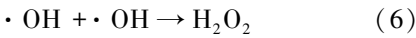
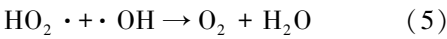
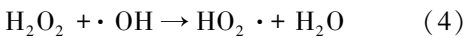
在 4~5 时, H_2O_2 迅速分解, 加之污水中存在较高浓度的 Fe^{2+} , 体系中存在大量 $\cdot \text{OH}$, COD 的降解效果较好, 去除率达到 60%~70%。pH 低于 4 时, Fenton 体系产生的 $\cdot \text{OH}$ 与 H^+ 大量结合, 如式(1), 致使 COD 的降解率逐渐降低。而当 $\text{pH}>5$ 时, 一方面, 溶液中 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的转化平衡被打破, 出现大量的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀; 另一方面, 碱性环境会抑制 $\cdot \text{OH}$ 的生成, 导致 COD 的去除率下降, 如式(2)、

式(3)因此确定 pH=5 为最佳反应 pH。



2.2.3 H₂O₂投加浓度对 COD 去除率的影响

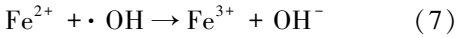
调整污水至 pH=5.0,Fe²⁺浓度为 0.06 mol/L,观察反应 1 h 后,不同 H₂O₂体积分数体系中 COD 的浓度变化。从图 3(c)中可知,COD 去除效率在 H₂O₂体积分数为 0.25%时出现峰值,去除率接近 70%。适当浓度的 H₂O₂有利于污水中·OH 的大量生成,但体系中过量 H₂O₂的存在易引发·OH 的重组,阻碍 COD 的降解过程,如式(4)~式(6)。



2.2.4 Fe²⁺投加量对 COD 去除率的影响

图 3(d)揭示了体系中 Fe²⁺含量与 COD 浓度之间的关系。调整污水 pH=5.0,H₂O₂体积分数为 0.25%,反应时间 1 h,逐渐加大 FeSO₄·7H₂O 的投加量,发现 FeSO₄·7H₂O 投加量为 0.06 mol/L 时,COD 的去除效果最好。当污水中 Fe²⁺浓度小于 0.06 mol/

L 时,增加 Fe²⁺的含量有利于 Fenton 反应的顺利进行,但当 Fe²⁺过量时,多余的 Fe²⁺会消耗体系中的部分·OH,如式(7),降低 COD 的去除率。



2.3 生物处理实验研究

传统 SBR 处理吹脱+Fenton 高级氧化处理能得到一个较好的 NH₃-N 去除效果,但出水中仍存在着较高浓度的 COD。因此,本研究采用改良的 A/O 型 SBR 技术,保证污泥浓度保持在 3 000 mg·L⁻¹的前提下,研究污水初始 pH、溶解氧和曝气时间对污染物去除的影响,探究出 A/O 型 SBR 的最佳曝气时间。

2.3.1 反应器曝气时间的确定

曝气时间是 SBR 工艺的一个重要参数,假使曝气时间不足,水中相关微生物的增值代谢会受一定程度的抑制。而太长时间曝气,会造成能源浪费,增加工程造价。考虑到工程造价,会造成能源浪费。图 4(a)、图 4(b)显示了 COD 和 NH₃-N 的去除率随曝气时间增加的变化情况。渗滤液中 NH₃-N 和 COD 在前 8 h 降解迅速,降解量与曝气时间呈正相关关系。

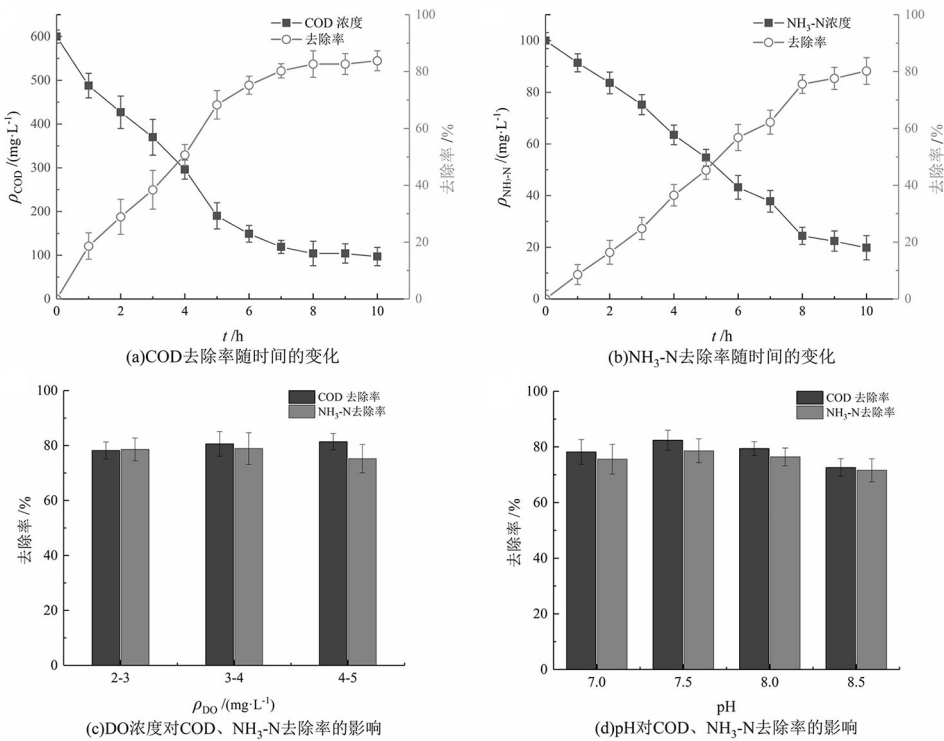


图 4 SBR 反应器中污染物去除率随曝气时间的变化及不同实验条件对 COD 和氨氮去除率的影响

Fig.4 Change of pollutant removal rate in SBR reactor with aeration time and influence of different experimental conditions on COD and ammonia-nitrogen removal rate

2.3.2 最佳 DO 浓度的确定

通过控制曝气泵流量的大小使得实验过程中的混合液 DO 浓度控制在 2~3 mg/L、3~4 mg/L 和 4~5 mg/L 范围内,并使用 HCl 和 NaOH 将 pH 控制在 6。图 4(c)显示了不同 DO 浓度对 COD 和 NH₃-N 去除率的影响。从图中可知,随着水中溶解氧量的上升,单位时间内 COD 的降解量也随之增加,并在 4~5 mg/L 时表现出最佳去除效果,去除率高达 81.4%;而 NH₃-N 的最适降解溶解氧量处于 3~4 mg/L。溶解氧量的进一步增加可能会诱导丝状菌发生膨胀,进而降低 NH₃-N 去除效率。综合考虑,判断处理的最佳溶解氧量为 3~4 mg/L。

2.3.3 最佳进水 pH 的确定

经动力波吹脱和 Fenton 氧化处理后的渗滤液进入生化池进行深度处理。实验中控制污水溶解氧保持 3~4 mg/L,用 HCl 和 NaOH 调节生化池的进水酸碱度分别为 7.0、7.5、8.0、8.5,以调查进

水 pH 对生物法降解 NH₃-N 和 COD 性能的影响。图 4(d)很好的反应出 NH₃-N 和 COD 的降解率均随 pH 的增大呈现出先增后减的趋势,并在 pH 为 7.5 时存在峰值,分别为 78.6%和82.4%。这归因于 pH 对微生物体内酶活性的影响,偏碱性的体系会抑制生物活性,降低处理性能。因此,确定体系的最适 pH 为 7.5。

2.4 集成实验与概预算分析

2.4.1 系统集成性实验与经济效益分析

各阶段污染物去除率如表 4 所示,渗滤液经系统性处理后,水中各项污染物指标均符合《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889-2008)的要求。

研究中涉及的动力波吹脱装置具有占地面积小、运营成本低、操作简单等特点。本研究计算了在最佳条件下处理 42 L(0.042 t)水样的吨水成本,成本构成详见表 5,其中电费和药品的价格来自于 2021 年电网和药品厂家的报价。

表 4 各阶段污染物去除率
Tab.4 Removal rate of pollutants in effluent for each treatment process

水质	$\rho_{\text{NH}_3-\text{N}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	NH ₃ -N 去除率/%	$\rho_{\text{COD}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	COD 去除率/%
垃圾渗滤液	991~1 084	—	2 135~2 168	—
动力波吹脱后的溶液	69~91	91.61~93.04	1 211~1 293	40.36~43.28
Fenton 氧化后的溶液	67~85	92.16~93.24	341~426	80.35~84.03
SBR 后的溶液	20~31	97.14~97.98	71~93	95.71~96.67

表 5 垃圾渗滤液处理成本明细
Tab.5 List of cost of landfill leachate treatment

用电与投药成本	耗电量与药品投加量	单价	总价/ 元	处理水量/ t	成本/ (元·t ⁻¹)
风机	0.40 kW·h	1.00 元/(kW·h)	0.40	0.042	9.52
离心泵	0.19 kW·h	1.00 元/(kW·h)	0.19	0.042	4.52
NaOH	0.20 kg	2.50 元/kg	0.50	0.042	11.90
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.46 kg	0.35 元/kg	0.16	0.042	3.81
H ₂ O ₂	0.17 L	2.00 元/L	0.34	0.042	8.10
HCl	0.42 L	0.38 元/L	0.16	0.042	3.81
乙酸钠	0.08 kg	2.30 元/kg	0.18	0.042	4.29

垃圾渗滤液的处理成本约为 55~100 元/t (不含折旧费)。根据表 5,动力波吹脱-Fenton-

SBR 组合工艺处理垃圾渗滤液的成本为 45.95 元/t,远低于目前平均处理成本水平。

3 结论

本课题先通过单因素实验分析渗滤液温度、pH、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度、吹脱时间以及气液比对脱氮性能的影响,利用正交实验优化各工艺参数,通过单因素实验确定 Fenton 反应最佳条件,再进行生物处理确定最佳工艺参数,为垃圾渗滤液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的高效分离及氮去除提供创新方法。所提出的组合工艺可有效降低运行成本,提高处理效果,减少二次污染,具有显著的环境效益、经济效益和社会效益。究结果表明:

1) 在温度 25°C , pH = 10.5, 气液比 129 的条

件下,动力波吹脱 5 h 后氨氮的预处理和分离效率达 90% 以上,COD 的去除率可达 68%。

2) 在初始 pH = 4, Fe^{2+} 投加量为 0.06 mol/L, 30% H_2O_2 投加量为 0.25% 的条件下,Fenton 氧化 1 h 后,COD 的去除率可达 80.35%~84.03%。

3) 在初始 pH 为 7.5, DO 为 3~4 mg/L 的条件下,A/O 型 SBR 工艺能有效降低渗滤液中的 COD 和氨氮浓度,出水氨氮浓度为 20~31 mg/L, COD 浓度为 71~93 mg/L。

4) 动力波吹脱-Fenton-SBR 组合工艺处理垃圾渗滤液的成本为 45.95 元/t,远低于目前平均处理费用水平。

参考文献:

- [1] LAGERKVIST A, CHEN H. Control of two step anaerobic degradation of municipal solid Waste (MSW) by enzyme addition [J]. Water Science & Technology, 2015, 27(2):47-56.
- [2] MÜLLER G T, GIACOBBO A, DOS SANTOS CHIARAMONTE E A, et al. The effect of sanitary landfill leachate aging on the biological treatment and assessment of photoelectrooxidation as a pre-treatment process [J]. Waste Management, 2015, 36:177-183.
- [3] LIU Z P, WU W H, SHI P, et al. Characterization of dissolved organic matter in landfill leachate during the combined treatment process of air stripping, Fenton, SBR and coagulation [J]. Waste Management, 2015, 41:111-118.
- [4] YUAN Q, JIA H, POVEDA M. Study on the effect of landfill leachate on nutrient removal from municipal wastewater [J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2016, 43:153-158.
- [5] HILLES A H, ABU AMR S S, HUSSEIN R A, et al. Optimization of leachate treatment using persulfate/ H_2O_2 based advanced oxidation process: case study: Deir El-Balah Landfill Site, Gaza Strip, Palestine [J]. Water Science and Technology, 2016, 73(1):102-112.
- [6] CHEN C, FENG H, DENG Y. Re-evaluation of sulfate radical based-advanced oxidation processes (SR-AOPs) for treatment of raw municipal landfill leachate [J]. Water Research, 2019, 153:100-107.
- [7] AZIZ S Q, AZIZ H A, YUSOFF M S, et al. Landfill leachate treatment using powdered activated carbon augmented sequencing batch reactor (SBR) process: optimization by response surface methodology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(1/2):404-413.
- [8] YONG Z J, BASHIR M J K, NG C A, et al. A sequential treatment of intermediate tropical landfill leachate using a sequencing batch reactor (SBR) and coagulation [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 205:244-252.
- [9] YAO J Q, LIU J Q, ZHANG Y J, et al. Adding an anaerobic step can rapidly inhibit sludge bulking in SBR reactor [J]. Scientific Reports, 2019, 9:10843.
- [10] KINIDI L, TAN I A W, ABDUL WAHAB N B, et al. Recent development in ammonia stripping process for industrial wastewater treatment [J]. International Journal of Chemical Engineering, 2018, 2018:1-14.
- [11] 李秋萍, 邵国兴, 程建伟. 湿式动力波洗涤器的工业应用 [J]. 化工装备技术, 2006, 27(1):17-20.
- [12] 蒋柱武, 王晟, 魏忠庆, 等. 中试规模动力波吹脱技术分离老龄化垃圾渗滤液中的高浓度氨氮 [J]. 环境工程学报, 2020, 14(11):3042-3052.
- [13] AHMED F N, LAN C Q. Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: a review [J]. Desalination, 2012, 287:41-54.