

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.005

垃圾渗滤液深度处理及混凝污泥有机物释放研究

田夏迪^{1,2}, 张树军^{1,2}, 吕心涛^{1,2}, 曲之明^{1,2}, 谷鹏超^{1,2},
王佳伟^{1,2}, 郑冰玉^{1,2}

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124; 2. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 针对垃圾渗滤液厌氧氨氧化出水中有机物残留的问题,提出了“混凝—气浮—高级氧化”的无膜法工艺改造路线,并对混凝过程进行了深入研究;考察了混凝剂种类和投加量、pH等对有机物去除的影响,并进行中型正交试验;另外还分析了混凝前后有机物的变化以及压滤脱水后混凝污泥中有机物的释放规律。混凝工艺的最佳条件如下:pH=5.75、聚合硫酸铁(PFS)投加量为1 500 mg/L、聚丙烯酰胺(PAM)投加量为2 mg/L,在此条件下TOC、COD、UV₂₅₄和色度的去除率分别可达到79.84%、67.57%、88.55%和95.00%;中型正交试验结果表明,对混凝工艺影响最大的因素是pH,混凝工艺最佳条件与小试结果一致,证明该试验结果放大可信;三维荧光数据分析表明,混凝几乎去除了全部的腐殖酸;凝胶渗透层析(GPC)结果表明,处理后有机物的分子质量整体变小;另外,混凝污泥的有机物释放量较小且释放速率逐渐趋于稳定,污染物二次释放的风险较小。

关键词: 垃圾渗滤液; 无膜法; 混凝; 有机物深度去除

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0033-08

Advanced Treatment of Landfill Leachate Biochemical Effluent and the Release Characteristics of Organics from Coagulated Sludge

TIAN Xia-di^{1,2}, ZHANG Shu-jun^{1,2}, LÜ Xin-tao^{1,2}, QU Zhi-ming^{1,2}, GU Peng-chao^{1,2},
WANG Jia-wei^{1,2}, ZHENG Bing-yu^{1,2}

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100124, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Wastewater Resource, Beijing 100124, China)

Abstract: This paper proposed a non-membrane process consisting of coagulation, air floatation and advanced oxidation, and investigated the coagulation process, so as to solve the problem of organic residues in the effluent from anaerobic ammonia oxidation for treating landfill leachate. The effects of factors such as coagulant type, coagulant dosage and pH on the removal of organic matter were investigated, and an pilot-scale orthogonal test was carried out. In addition, the change of organic matter before and after coagulation and the release characteristics of organic matter in coagulated sludge after pressure filtration dehydration were also analyzed. The optimal coagulation process were as follows: the pH was 5.75, the dosage of polymerized ferric sulfate (PFS) was 1 500 mg/L and the dosage of polyacrylamide (PAM) was 2 mg/L. Under these conditions, the removal rates of TOC, COD, UV₂₅₄ and

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103); 北京市科技计划项目(Z181100005518003)

通信作者: 张树军 E-mail: 13810812776@163.com

chroma reached 79.84%, 67.57%, 88.55% and 95.00%, respectively. The pilot-scale orthogonal test results showed that pH was the most important factor affecting the coagulation process, and the optimal operating conditions were consistent with the bench-scale test results, which proved that the experimental results were reliable. The three-dimensional fluorescence data showed that coagulation removed almost all of the humic acid. The results of gel permeation chromatography (GPC) showed that the molecular weight of organic matter decreased after coagulation treatment. In addition, the amount of organic matter released from the coagulated sludge was small and the release rate gradually tended to be stable, indicating that the risk of pollutants secondary release was small.

Key words: landfill leachate; non-membrane process; coagulation; advanced removal of organics matter

垃圾渗滤液是生活垃圾卫生填埋场的产物,成分复杂,若处理不当会对填埋场周边环境产生极大的危害^[1]。垃圾渗滤液是典型的高COD和高氨氮废水^[2],传统的生化工艺很难达到较好的处理效果,为此学者们提出了如混凝、电化学、高级氧化、反渗透等深度处理工艺以保证渗滤液的达标排放^[3-5]。

湖北省某垃圾填埋场采用反硝化/短程硝化/厌氧氨氧化生物处理工艺,是国内第一个采用厌氧氨氧化工艺处理垃圾渗滤液的项目,截至目前已稳定运行5年。该项目中以厌氧氨氧化为核心的生物处理工艺可实现氨氮、TN、TP等污染物的有效去除,但为了满足《生活垃圾填埋场污染物控制标准》(GB 16889—2008)表2中COD的排放限值,深度处理工艺增设了反渗透(RO)处理单元。现有RO浓缩液直接回灌填埋场,导致进水中难降解有机物浓度和盐度逐年增加,对前端生化处理系统的稳定运行构成潜在的风险,因此该填埋场亟需对有机物深度处理单元进行工艺改造,以保障整体处理系统运行的稳定性。

膜处理工艺出水水质好,但不能将有机物彻底降解,产生的浓缩液处理又较为复杂昂贵,而且膜组需要频繁的清洗、维护、更换,导致成本增加。混凝法常作为垃圾渗滤液出水有机物处理的工艺选择,其优势在于经济实用、操作简单、运行管理方便等^[6-9]。为此,笔者提出“混凝—气浮—高级氧化”的无膜法工艺改造路线,其优势在于技术成熟、无浓缩液产生,从而解决浓缩液难处理的问题。重点考察了混凝工艺用于深度去除某垃圾渗滤液厌氧氨氧化出水中有机物的可行性,优化了混凝工艺的运行参数,并进行中型正交优化试验,同时对混凝

前后的有机物组分和分子质量进行了分析,并对混凝产生的污泥进行了有机物释放特性的探究,旨在为后期工程应用改造提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验进水

混凝试验的原水取自湖北省某垃圾渗滤液处理工程厌氧氨氧化工艺段的实际出水。水样呈黄褐色,COD浓度为800~1 500 mg/L,总氮浓度为40~100 mg/L,pH约为7.5~8.5。

1.2 试验方法

混凝过程包括快速搅拌混合、慢速搅拌混合和静置沉淀3个主要步骤,在快速搅拌混合初始阶段加入混凝剂,在慢速搅拌混合初始阶段添加助凝剂聚丙烯酰胺(PAM),随后静置沉淀。取处理前后的上清液水样进行水质分析。pH用1 mol/L的氢氧化钠溶液和盐酸调节。

混凝参数优化小试采用控制变量法,在1 000 mL配有机械搅拌器的有机玻璃烧杯混凝试验装置中进行,每次试验水样为1 000 mL。混凝中型正交优化试验采用三因素三水平的正交试验,试验装置为带机械搅拌装置的反应沉淀装置,每次试验水样为8 000 mL。

取混凝中型正交优化试验最佳工艺条件下的混凝前后水样,进行三维荧光测试和凝胶渗透层析(GPC),检测有机物的变化。采用小型板框压滤机对中试所得混合污泥进行脱水,不添加任何脱水药剂,取等量脱水后的泥饼分别浸泡在清水和滤液中,定期取样检测浸出液的TOC、COD、UV₂₅₄及色度等水质指标的变化,以考察脱水后污泥的有机物释放情况。

1.3 分析项目与方法

pH采用玻璃电极法测定,采用WTW便携式水质分析仪进行监测;TOC采用燃烧氧化-非分散红外吸收法测定;COD采用快速消解分光光度法测定;色度采用色度仪法测定。

三维荧光光谱采用Hitachi F-7000三维荧光光谱分析仪(日本Hitachi公司)测定;凝胶渗透层析(GPC)采用Shimadzu LC20高效液相色谱和HW-2000 GPC色谱工作站(日本Shimadzu公司)测试。

2 结果与讨论

2.1 混凝参数优化试验结果分析

2.1.1 pH的优化

pH是影响混凝效果的重要参数,不同的pH范围内,混凝剂水解产生不同形态和不同比例的产物,从而影响混凝效果,因此探究混凝工艺的最佳pH具有重要的意义。在本试验中,混凝剂采用聚合硫酸铁(PFS),投加量为1 500 mg/L,探究不同pH条件下混凝对有机物和色度的去除效果,结果见图1。

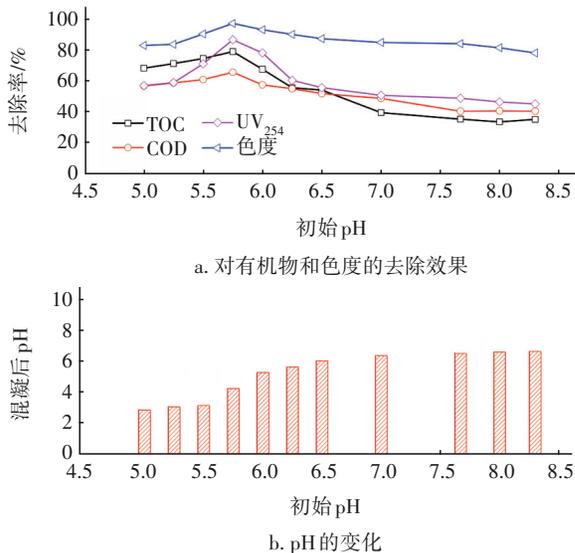


图1 pH对有机物和色度去除效果的影响及其在混凝前后的变化

Fig.1 Effect of pH on removal effect of organics and chroma and pH change before and after coagulation

由图1可知,以PFS为混凝剂,达到最佳有机物去除效果的初始pH为5.75,TOC、COD和UV₂₅₄的去除率分别为78.98%、65.63%和86.62%,而且在该pH下色度去除效果也达到最佳,去除率为97.16%。因此在该试验条件下最佳初始pH为5.75。同时,混凝后反应体系的pH均降低。梁聪等人^[10]的研究结果表明,pH过低或者过高均不利于混凝过程。但

是在本试验的pH范围即5.0~8.3内,PFS对有机物和色度的去除效果能保持在35.35%~78.98%和78.02%~97.16%范围内,说明PFS的适用范围较广。

2.1.2 混凝剂投加量的优化

有机物及色度去除效果、污泥沉降性能与PFS投加量的关系见图2。当PFS投加量由800 mg/L提升到1 500 mg/L时,TOC、COD、UV₂₅₄和色度的去除率分别由34.40%、40.13%、29.14%和60.69%升高至80.25%、63.87%、89.27%和97.80%;但是当PFS投加量由1 500 mg/L继续提高到1 600 mg/L时,对有机物和色度的去除效果提升不明显甚至略有下降,原因可能是过量的混凝剂导致脱稳的胶体发生电荷逆转而再次稳定,从而影响除污效果,污泥沉降比也有相似的变化规律。综合考虑,在该试验条件下混凝剂PFS的最佳投加量为1 500 mg/L。

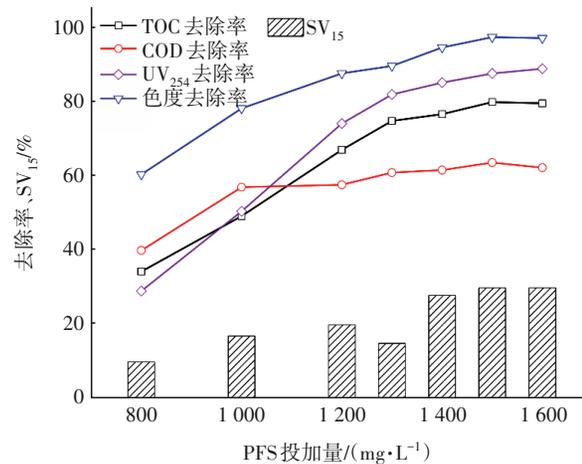


图2 PFS投加量对有机物和色度去除效果以及污泥沉降性能的影响

Fig.2 Effect of PFS dosage on removal effect of organics and chroma and sludge settling performance

2.1.3 助凝剂与混凝程序的优化试验

在初始pH为5.75、PFS投加量为1 500 mg/L的条件下进行了PAM和搅拌程序的优化试验,结果如图3所示。可以看出,在最佳初始pH和PFS投加量条件下,各个指标的去除率均较高且相对稳定,PAM投加量以及快速和慢速搅拌的时间分配对去除有机物和色度的影响不大,但是对污泥沉降性能有影响。污泥沉降比越高,产生的化学污泥就越多,后续处理成本就会增加。因此在保证有机物去除效果的前提下,综合考虑动力成本和污泥沉降性

能,确定最佳PAM投加量为2 mg/L,最佳搅拌混合工序为快速搅拌3 min 然后慢速搅拌7 min。

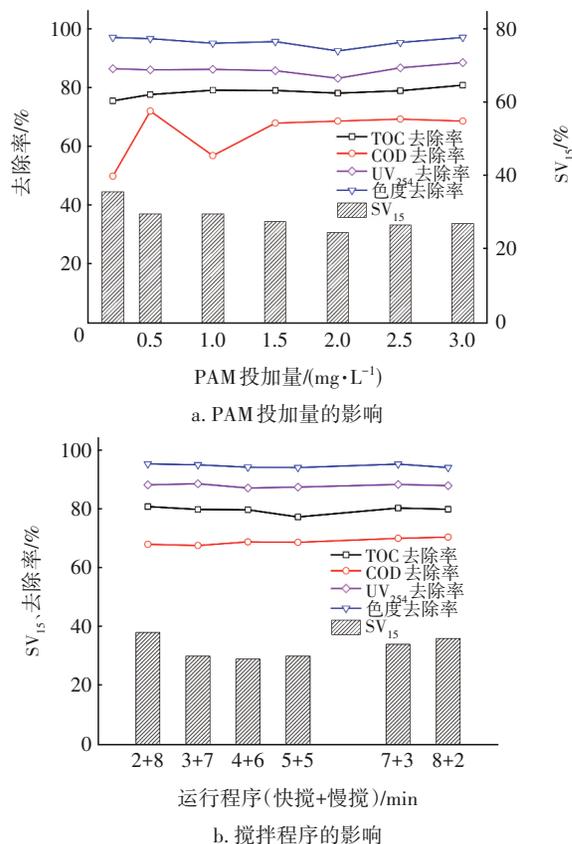


图3 PAM投加量与搅拌程序对有机物和色度去除效果以及污泥沉降性能的影响

Fig.3 Effect of PAM dosage and mixing procedure on removal effect of organics and chroma and sludge settling performance

综上,小试确定的最佳条件如下:初始pH=5.75,混凝剂PFS投加量为1 500 mg/L,助凝剂PAM投加量为2 mg/L,快速搅拌3 min 然后慢速搅拌7

min。在最佳条件下,对TOC、COD、UV₂₅₄和色度的去除率分别可达到79.84%、67.57%、88.55%和95.00%。

2.2 中型正交优化试验结果分析

由2.1节的小试结果可以看出,对混凝效果影响较大的因素主要是初始pH、PFS投加量、PAM投加量。为了进一步将试验结果应用在实际工程项目中,进行了中型规模的放大试验,同时设计正交试验考察初始pH、PFS投加量、PAM投加量的影响程度和最佳参数值,以为实际工程改造提供理论支持。

针对pH、PFS投加量、PAM投加量3个因素,以TOC、COD、UV₂₅₄和色度去除率为目的指标,设计三因素三水平正交试验,以L9的正交表进行试验研究,试验方案和结果如表1所示。对表1中的试验结果进行分析,结果如表2所示。其中,不论以TOC、COD、UV₂₅₄等有机物去除率为分析指标,还是以色度去除率为分析指标,影响程度最大的都是pH。以TOC去除率为分析指标时,影响因素主次排序为:pH>PFS投加量>PAM投加量,最佳因素水平为:pH=5.75、PFS投加量=1 800 mg/L、PAM投加量=1 mg/L;而以COD、UV₂₅₄和色度去除率为分析指标时,影响因素主次排序为:pH>PAM投加量>PFS投加量。但是由表2中的数据分析可知,在pH主因素确定的条件下,PFS投加量和PAM投加量两个因素不同水平之间差异很小。综合考虑各种因素,混凝正交试验的最佳组合为A2B2C2,即pH=5.75、PFS投加量=1 500 mg/L、PAM投加量=2 mg/L。中型正交试验结果与小试结果一致,这有利于进一步为工程应用提供理论支持。

表1 混凝正交优化中试方案及结果

Tab.1 Scheme and results of coagulation orthogonal optimization experiment

序号	因素			结果				
	A:pH	B:PFS投加量/(mg·L ⁻¹)	C:PAM投加量/(mg·L ⁻¹)	TOC去除率/%	COD去除率/%	UV ₂₅₄ 去除率/%	色度去除率/%	污泥沉降比/%
1	5	1 200	1	68.40	63.52	48.80	79.84	25
2	5	1 500	2	66.27	70.19	24.31	75.43	25
3	5	1 800	3	66.50	66.97	41.84	54.41	28
4	5.75	1 200	2	71.54	74.55	85.57	96.05	32
5	5.75	1 500	3	75.26	70.91	88.55	96.31	31
6	5.75	1 800	1	75.77	74.24	83.05	93.20	31
7	7.84	1 200	3	23.91	42.14	19.26	31.24	19
8	7.84	1 500	1	29.40	28.18	38.14	48.63	19
9	7.84	1 800	2	34.44	36.06	45.75	58.13	19

表2 混凝正交优化试验结果分析

Tab.2 Analysis of coagulation orthogonal optimization experiment results

%

分析指标	分析项目	A:pH	B:PFS投加量	C:PAM投加量	因素影响主次	最优水平
TOC去除率	水平1均值	67.06	54.62	57.86	A>B>C	A2B3C1
	水平2均值	74.19	56.98	57.42		
	水平3均值	29.25	58.91	55.22		
	极差	44.94	4.29	2.64		
COD去除率	水平1均值	66.89	60.07	55.32	A>C>B	A2B1C2
	水平2均值	73.23	56.43	60.26		
	水平3均值	35.46	59.09	60.01		
	极差	37.77	3.64	4.95		
UV ₂₅₄ 去除率	水平1均值	38.32	51.21	56.66	A>C>B	A2B3C1
	水平2均值	85.72	50.33	51.88		
	水平3均值	34.38	56.88	49.88		
	极差	51.34	6.54	6.78		
色度去除率	水平1均值	69.89	69.04	73.89	A>C>B	A2B2C2
	水平2均值	95.19	73.45	76.54		
	水平3均值	46.00	68.58	60.65		
	极差	49.18	4.87	15.88		

2.3 混凝前后有机物特性变化

2.3.1 三维荧光分析

测定垃圾渗滤液生化出水混凝深度处理前后水样的三维荧光光谱,分析溶解性有机物组分及含量的变化,结果如图4所示。

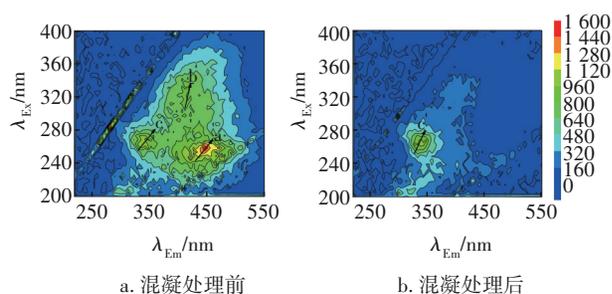


图4 混凝处理前后水样的三维荧光光谱变化

Fig.4 3D-EEMs of water samples before and after coagulation treatment

垃圾渗滤液厌氧氨氧化出水中主要的三维荧光峰分布在3个区域,其中,强度最大的荧光区域是a峰, $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=240\sim 260\text{ nm}/420\sim 480\text{ nm}$,对应的是紫外区类富里酸荧光峰,表征分子质量较低、荧光效率较高的有机物;b峰位置是 $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=300\sim 350\text{ nm}/380\sim 420\text{ nm}$,对应的是可见区类富里酸荧光峰,表征相对稳定的、分子质量较高的芳香性类富里酸物质;此外c峰位置是 $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=260\sim 280\text{ nm}/320\sim 350\text{ nm}$,对应的是类色氨酸荧光峰,与渗滤液中有机物降解代谢产物及微生物代谢产物有关^[11-12]。经过混

凝处理后,出水的a峰和b峰消失,只剩下c峰,c峰的位置没有变化,荧光强度略有降低,说明混凝工艺对此类色氨酸类物质即渗滤液中复杂有机物的代谢产物和微生物代谢产物的去除效果一般。但是a峰和b峰的消失说明混凝对垃圾渗滤液生化出水中紫外区和可见区的类富里酸类物质有较好的去除效果,而由混凝机理可知,该类难降解有机物并不是被降解和完全矿化,而是随着混凝剂的吸附沉降从水中去除。

2.3.2 有机物分子质量变化

对混凝前后的水样进行GPC分子质量分布的测试,以分析其中有机物的变化,结果如图5所示。采用窄分布聚乙二醇(PEG)标样组制作标准曲线和相对校正法确定分子质量。根据GPC的测试原理,出峰时间越早,分子质量越大^[13]。从图5可以看出,处理前两个峰的出峰时间分别是15.34和16.38 min,对应的数均分子质量(Mn)分别是2367和443;处理后两个峰的出峰时间分别为15.80和16.69 min,对应的Mn分别是1049和312。对比发现,处理后保留时间明显延后,大分子质量分布明显表现切边集中,而且峰面积比例变大,从13.56%提高到37.44%,处理后的分子质量整体变小。混凝工艺主要通过混凝剂和污染物之间的物理化学作用将污染物从水中分离,因此处理后分子质量变小的主要原因是去除了分子质量较大的物质。

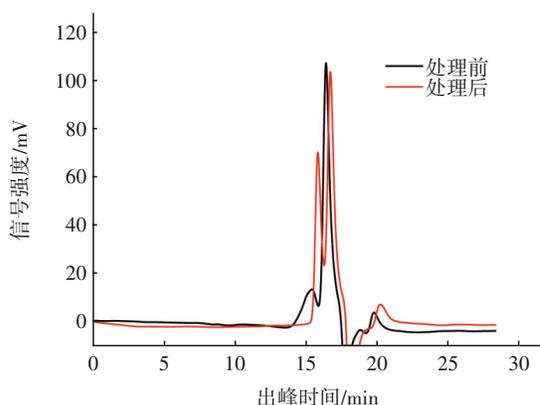


图 5 混凝处理前后样品 GPC 测试谱图

Fig.5 GPC results of samples before and after coagulation treatment

2.4 混凝后沉淀污泥的有机物释放规律

虽然混凝工艺对垃圾渗滤液生化出水中的有机物去除效果较好,但是有机物并不是被降解,而是被吸附沉降在产生的絮状污泥里,污泥的后续处理也是混凝工艺的考察重点。首先对中试沉淀的污泥进行板框压滤,然后分别浸泡在清水和滤液中,模拟考察混凝泥饼的有机物释放情况。由于未添加任何脱水药剂,压缩后污泥含水率相对较高,含水率由 99.9% 降为 65.7%,原污泥体积为 5 L,经过板框压滤后体积缩小为 0.2 L,体积压缩了 96%。压滤过程中滤液的水质变化如图 6 所示,可以看出,整个板框压滤过程中滤液的 TOC、COD、UV₂₅₄ 和色度等数据虽然有所波动,但均未发生明显变化,压滤过程并未出现污染物的二次释放。

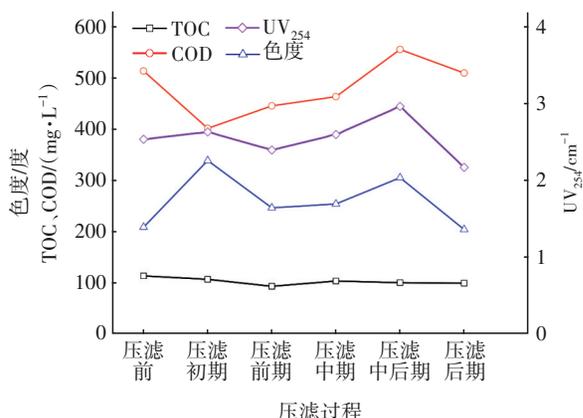
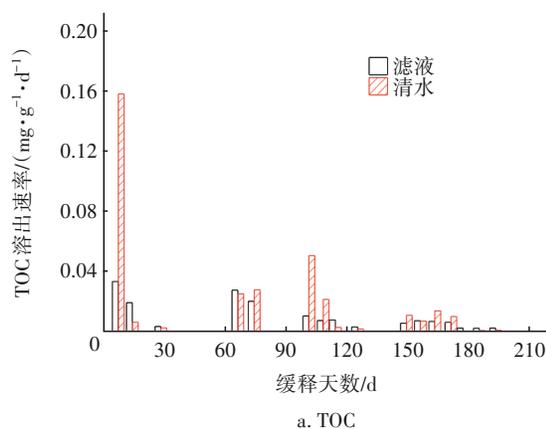


图 6 混凝污泥压滤过程中滤液的水质变化

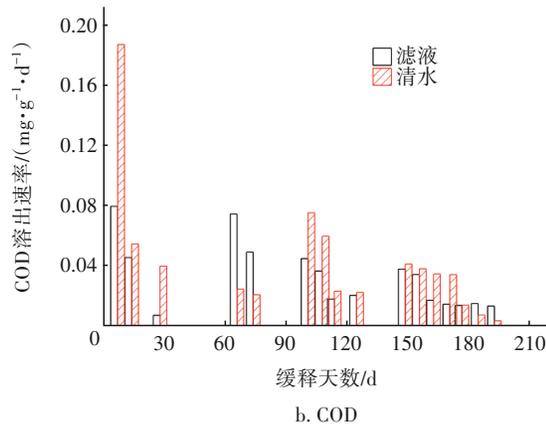
Fig.6 Water quality change of filtrate during pressure filtration of coagulation sludge

接着考察了压滤后混凝污泥中污染物的长期释放情况,结果如图 7 所示。可以看出,混凝污泥经

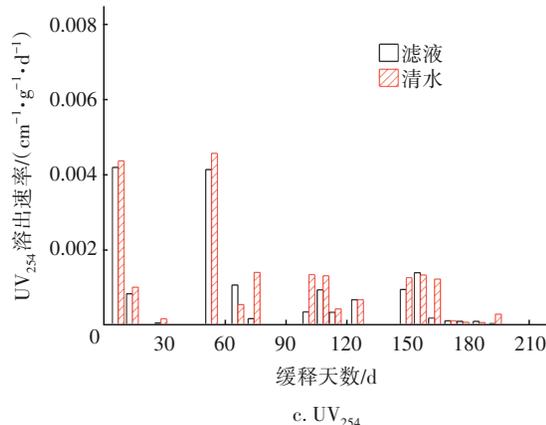
压缩后 TOC、COD、UV₂₅₄ 和色度的释放速率均随着时间的延长而变慢并最终趋于稳定。清水和滤液两组试验的 TOC 初始释放速率分别为 0.158、0.033 mg/(g·d), COD 初始释放速率分别为 0.188、0.080 mg/(g·d); 而经过 180 d 后释放速率降低并趋于稳定,第 195 天两组的 TOC 初始释放速率分别降至 0.001、0.002 mg/(g·d), COD 初始释放速率分别降至 0.003、0.001 mg/(g·d)。清水组和滤液组的 TOC 累积释放量分别为 3.09、1.93 mg/g, COD 累积释放量分别为 10.07、8.52 mg/g。



a. TOC



b. COD



c. UV₂₅₄

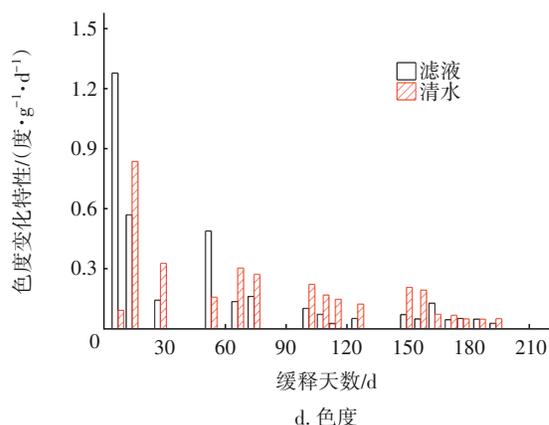


图7 压缩后的混凝污泥中污染物在清水和滤液中的释放速率

Fig.7 Release rate of pollutants in coagulation sludge after pressure filtration in clean water and filtrate

初始时刻,压缩后的污泥放入溶液中,由于存在浓度梯度差,吸附在污泥中的污染物开始向水中慢慢扩散溶解,初始释放速率较高,尤其是浸入清水组的污泥,初始时刻TOC和COD释放速率分别是滤液组的4.80和2.35倍,但后期清水组和滤液组的污染物释放均达到平衡,释放速率均降至很慢,区别不明显。对混凝前后的水质数据进行分析计算可得到混凝去除的有机物和色度折算每克干污泥的去除量,本试验条件下,混凝去除的TOC和COD量分别为82.66 mg/g干污泥和309.88 mg/g干污泥,此去除量远大于到达释放平衡阶段TOC和COD的累积释放量,TOC和COD的累积释放量占比分别为2.33%~3.74%和2.75%~3.25%,说明通过混凝去除的有机物二次释放造成严重污染的风险较小,可采取回填至垃圾填埋场的方式处理混凝产生的污泥。

3 结论

采用混凝工艺对垃圾渗滤液厌氧氨氧化出水中的有机物进行深度去除,参数优化小试得到的最佳混凝参数如下:pH=5.75、聚合硫酸铁投加量为1500 mg/L、PAM投加量为2 mg/L、快搅(250 r/min)3 min+慢搅(60 r/min)7 min;中型正交试验结果表明,对混凝工艺影响最大的因素是pH。三维荧光光谱分析表明,混凝工艺可有效去除垃圾渗滤液生化出水中的富里酸类大分子有机物,但对一些复杂有机物的代谢产物和微生物代谢产物等去除效果不明显;分子质量测试结果显示,混凝处理后分子质量整体变小。对混凝后产生的污泥进行板框压滤

脱水,并对泥饼进行污染物释放试验,结果显示,污染物释放量较小且释放速率趋于稳定,污染物二次释放的风险较小。混凝工艺是有效去除垃圾渗滤液生化出水中有机物的深度处理选择之一。

参考文献:

- [1] 蒋宝军,陈玉婷,刘卓驿. Cu₂O/氧化石墨烯催化氧化垃圾渗滤液的因素分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 110-113.
JIANG Baojun, CHEN Yuting, LIU Zhuoyi. Influencing factors of catalytic oxidation of landfill leachate by Cu₂O/graphene oxide[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 110-113 (in Chinese).
- [2] 施燕,张万筠,杨婉玲,等. 垃圾渗滤液污染物含量及分布规律研究[J]. 辽宁化工, 2019, 48(3): 201-204.
SHI Yan, ZHANG Wanjun, YANG Wanling, et al. Study on the content and distribution of pollutants in landfill leachate [J]. Liaoning Chemical Industry, 2019, 48(3): 201-204 (in Chinese).
- [3] 周文龙,汪晓军. 两级A/O-Fenton-BAF工艺处理垃圾渗滤液[J]. 中国给水排水, 2011, 27(10): 40-42, 46.
ZHOU Wenlong, WANG Xiaojun. Combined process of two-stage A/O, Fenton oxidation and BAF for treatment of landfill leachate [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(10): 40-42, 46 (in Chinese).
- [4] RENO S, GIVAUDAN J G, POULAIN S, et al. Landfill leachate treatment: review and opportunity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(3): 468-493.
- [5] DENG Y, ENGLEHARDT J D. Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment [J]. Waste Management, 2007, 27(3): 380-388.
- [6] 范爱军,陈振雄. 聚铁混凝法深度处理老龄垃圾渗滤液的工程应用运行分析[J]. 广东化工, 2011, 38(10):90-100, 107.
FAN Aijun, CHEN Zhenxiong. Operational analysis on advanced treatment of mature landfill leachate using polymeric ferric sulfate coagulation in a full-scale plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(10):90-100, 107 (in Chinese).
- [7] 丁家志,赵剑强,王莎,等. 垃圾渗滤液生化出水混凝实验研究[J]. 应用化工, 2018, 47(7): 1364-1368, 1372.

- DING Jiazhi, ZHAO Jianqiang, WANG Sha, *et al.* Experimental study of coagulation treatment to landfill leachate biochemical effluent [J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47 (7) : 1364-1368, 1372 (in Chinese).
- [8] 郭晓京, 胡兆吉, 刘康, 等. 垃圾渗滤液深度处理的混凝-UV-O₃组合工艺试验[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2019, 43(2): 151-156.
GUO Xiaojing, HU Zhaoji, LIU Kang, *et al.* Experimental study on the coagulation/UV/O₃ process used in advanced treatment of landfill leachate [J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2019, 43(2): 151-156 (in Chinese).
- [9] 尚爱安, 赵庆祥, 徐美燕, 等. 混凝在垃圾渗滤液处理中的作用研究[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(1): 50-52.
SHANG Ai'an, ZHAO Qingxiang, XU Meiyang, *et al.* Effect of coagulation on treatment of refuse landfill leachate [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20 (1): 50-52 (in Chinese).
- [10] 梁聪, 邓慧萍, 苏宇, 等. 聚合硫酸铁、硫酸铝强化混凝去除腐殖酸[J]. *净水技术*, 2006, 25(2): 27-31.
LIANG Cong, DENG Huiping, SU Yu, *et al.* Study on the enhanced coagulation effect of polyferric sulfate and aluminum sulfate for removal of humic acid [J]. *Water Purification Technology*, 2006, 25 (2) : 27-31 (in Chinese).
- [11] 吉芳英, 谢志刚, 黄鹤, 等. 垃圾渗滤液处理工艺中有机污染物的三维荧光光谱[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(10): 1783-1788.
- Ji Fangying, XIE Zhigang, HUANG He, *et al.* Three dimensional excitation-emission fluorescence spectra of dissolved organic matter in landfill leachates treatment process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(10): 1783-1788 (in Chinese).
- [12] 贾陈忠, 王焰新, 张彩香, 等. 垃圾渗滤液中溶解性有机物组分的三维荧光特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1575-1579.
JIA Chenzhong, WANG Yanxin, ZHANG Caixiang, *et al.* 3D-EEM fluorescence characteristics of different fraction of dissolved organic matter in landfill leachate [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32 (6): 1575-1579 (in Chinese).
- [13] 陈少华, 刘俊新. 膜生物反应器处理垃圾渗滤液的效能及有机污染物的分子量分布[J]. *科学通报*, 2006, 51(15): 1757-1763.
CHEN Shaohua, LIU Junxin. Efficiency and molecular weight distribution of organic pollutants of membrane bioreactor for landfill leachate treatment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (15) : 1757-1763 (in Chinese).

作者简介:田夏迪(1992-),女,河南周口人,硕士,工程师,主要研究方向为水处理技术、生物脱氮、生物电化学等。

E-mail:tianxiadi0520@163.com

收稿日期:2021-05-10

修回日期:2021-06-02

(编辑:刘贵春)

积极践行人与自然和谐共生理念

全面加强水生态文明建设