

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.021

# 青岛小涧西垃圾渗滤液浓缩液全量化处理工程实践

夏正启<sup>1</sup>, 占美丽<sup>2</sup>, 刘赞贤<sup>3,4</sup>, 张凯<sup>5</sup>, 闫清云<sup>5</sup>, 苗平平<sup>5</sup>,  
葛文龙<sup>5</sup>, 吕宝鹏<sup>3,4</sup>, 卞荣星<sup>6</sup>

(1. 青岛水务集团, 山东 青岛 266000; 2. 青岛市固体废弃物处置有限责任公司, 山东 青岛 266000; 3. 青岛洁源环境有限公司, 山东 青岛 266300; 4. 青岛小涧西渗滤液处理有限公司, 山东 青岛 266300; 5. 中企国云环保科技有限公司, 北京 100071; 6. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 浓缩液是垃圾渗滤液处理过程产生的残余液,是实现垃圾渗滤液全量化处置的关键。针对青岛小涧西浓缩液处理工程在运行过程中存在的预处理不稳定、设备结垢,蒸发浓液产生量大、干化系统起沫无法结晶等问题,采用深度絮凝+化学软化预处理工艺可保证后端MVR蒸发及干化系统稳定运行,浓缩液处理能力明显提升,产浓率下降,连续稳定运行周期增加,干化系统恢复结晶减量能力。可见,采用“深度絮凝+化学软化+碳化硅膜+MVR蒸发+干化减量+焚烧协同”的工艺路线可实现渗滤液全量化处置。

**关键词:** 垃圾渗滤液浓缩液; 深度絮凝; 蒸发结晶; 全量化处置

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0126-06

## Full Quantitation Disposal Practice of Landfill Leachate Concentrate in Xiaojianxi, Qingdao

XIA Zheng-qi<sup>1</sup>, ZHAN Mei-li<sup>2</sup>, LIU Zan-xian<sup>3,4</sup>, ZHANG Kai<sup>5</sup>, YAN Qing-yun<sup>5</sup>,  
MIAO Ping-ping<sup>5</sup>, GE Wen-long<sup>5</sup>, LÜ Bao-peng<sup>3,4</sup>, BIAN Rong-xing<sup>6</sup>

(1. Qingdao Water Group, Qingdao 266000, China; 2. Qingdao Solid Waste Disposal Co. Ltd., Qingdao 266000, China; 3. Qingdao Jieyuan Environment Co. Ltd., Qingdao 266300, China; 4. Qingdao Xiaojianxi Leachate Treatment Co. Ltd., Qingdao 266300, China; 5. Zhongqi Guoyun Environmental Protection Technology Co. Ltd., Beijing 100071, China; 6. College of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** The concentrate is the residual liquid generated from landfill leachate treatment process, which is the key to the full quantitation disposal of landfill leachate. Aiming at the problems of unstable pretreatment, equipment scaling, large amount of evaporation concentrate, and non-crystallization of drying system in Qingdao Xiaojianxi concentrate treatment project during operation, the deep flocculation and chemical softening pretreatment process is used to ensure the stable operation of the follow-up MVR evaporation and drying system. Thus the leachate concentrate treatment capacity is

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52000112); 中国博士后科学基金资助项目(2022M711747)

通信作者: 刘赞贤 E-mail: 476297530@qq.com

significantly improved, the concentration yield is reduced, the continuous stable operation cycle is increased, and the crystallization reduction ability of the drying system is restored. It shows that the full quantitation disposal of leachate concentrate can be achieved by adopting the process of deep flocculation, chemical softening, silicon carbide film, MVR evaporation, drying reduction, and coordinated incineration.

**Key words:** leachate concentrate; deep flocculation; evaporating crystallization; full quantitation disposal

生活垃圾填埋和焚烧产生的渗滤液是处置难题<sup>[1-2]</sup>。预处理+生化处理+膜处理是目前生活垃圾渗滤液处置的主要技术<sup>[3-4]</sup>。生活垃圾渗滤液在膜滤处理过程中会产生约20%~30%的膜浓缩液<sup>[5]</sup>,呈棕黑色,具有成分复杂,难降解,有机污染物含量高,色度和硬度高,总氮和氨氮含量高,并含有重金属离子,无机盐含量高,有毒性,可生化性差<sup>[5]</sup>等特点,因此垃圾渗滤液全量化处置的关键在于浓缩液的处理<sup>[6]</sup>。

目前,常用的渗滤液浓缩液处理方法有回灌法、蒸发法、混凝法以及高级氧化法等。机械式蒸汽再压缩技术(MVR)能够在节能降耗的基础上实现浓缩液的蒸发减量,是目前浓缩液处置的主要技术之一。但实际工程中因存在结垢、堵塞等问题,致使MVR设备清洗频繁,很难稳定运行,且最终产生超浓液的安全处置是MVR蒸发工艺亟需解决的关键问题<sup>[7-9]</sup>。

## 1 工程概况与浓缩液处理发展历程

青岛市小涧西生活垃圾处置园区承担着市南区、市北区、李沧区、城阳区及崂山区生活垃圾的处置任务,主要建设项目包括垃圾填埋场一、二期,垃圾焚烧发电一、二期,垃圾生化处理厂,厨余垃圾处理厂以及渗滤液处理厂。小涧西渗滤液处置项目位于小涧西生活垃圾处置园区内,主要负责处理园区内除焚烧二期外生活垃圾处置设施产生的渗滤液,设计总处理规模为1 700 m<sup>3</sup>/d,分两期建设,主体工艺为MBR+DTRO。膜浓缩液产生量为500 m<sup>3</sup>/d,就地处置。

2018年,该项目浓缩液处理系统设计采用“预处理+MVR蒸发+酸碱洗气+干化”工艺(见图1),设计处理规模为500 m<sup>3</sup>/d。预处理采用混凝沉淀工艺,投加烧碱、混凝剂、助凝剂去除混合液中大量微粒、悬浮物、钙镁及胶体,但实际运行过程中发现混

凝后沉淀效果差,无法实现有效分离,故后端浓缩液中含有大量钙镁盐和有机物,引发设备结垢和起沫问题,致使蒸发效率降低,最低月日均处理量仅为200 m<sup>3</sup>/d;蒸发产浓率高,最高可达到40%,浓缩液无法实现就地全量化处置。

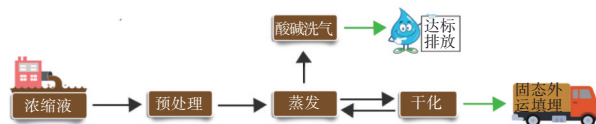


图1 2018年浓缩液处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of concentrated leachate treatment process in 2018

为进一步去除浓缩液中的钙镁离子,缓解设备结垢现象,提升浓缩液处理效率,2021年实施了浓缩液处置效率提升技术改造工程,采用“化学软化+碳化硅膜分离+板框压滤”工艺对浓缩液进行预处理(见图2)。

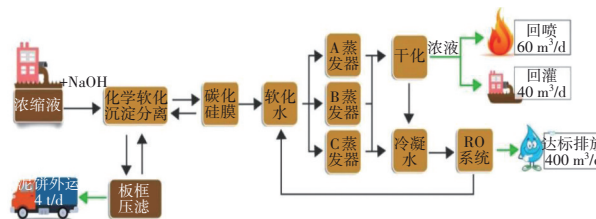


图2 2021年浓缩液处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of concentrated leachate treatment process in 2021

浓缩液采用氢氧化钠化学软化后,MVR进水中钙镁离子去除率均达到90%以上,缓解了蒸发设备结垢问题。同时,根据多种MVR蒸发设备的运行特点,增设板式强制循环蒸发器,利用其易于清洗、产能回升快的优点,弱化设备结垢对处理效能产生的负面影响。至此,浓缩液蒸发系统包括2套卧式降膜蒸发系统(500 m<sup>3</sup>/d)和1套板式强制循环蒸发系统(200 m<sup>3</sup>/d)。干化系统为列管式强制循环蒸发系

统,设计处理能力为100 m<sup>3</sup>/d。

2023年为进一步去除浓缩液中的有机物,缓解干化系统起沫现象,降低母液产生量,对絮凝工段进行了技术改造,在浓缩液处置效率提升技术改造基础上,选用深度絮凝处理工艺降低浓缩液的有机物含量,稳定碳化硅膜的运行状况,改善蒸发系统的性能,实现母液减量。最终项目采用“深度絮凝+化学软化+碳化硅膜分离”作为去除有机物和钙镁离子的预处理工艺,采用“深度絮凝+化学软化+碳化硅膜+MVR蒸发+干化减量+焚烧协同”作为现场浓缩液全量化处置工艺(见图3),实现预处理能力稳定达到500 m<sup>3</sup>/d、浓缩液全量化处置能力达到700 m<sup>3</sup>/d的目标。

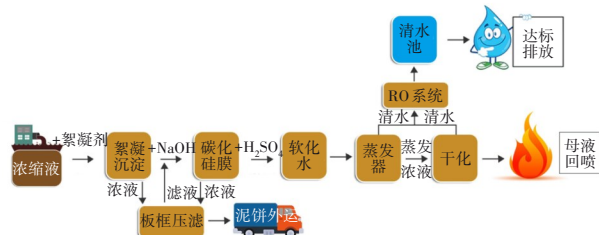


图3 2023年浓缩液处理工艺流程

Fig.3 Flow chart of concentrated leachate treatment process in 2023

## 2 浓缩液全量化处置改造前运行现状

### 2.1 预处理运行不稳定

浓缩液预处理系统采用化学软化工艺,主要去除浓缩液中的钙镁离子,但浓缩液水质复杂,有机物含量高,影响后续碳化硅膜设备的稳定运行,导致钙镁离子去除效果不稳定。碳化硅膜设备生产效能仅发挥60%,钙镁离子去除率在40%~90%之间频繁波动。

### 2.2 蒸发系统设备清洗难度大

蒸发系统中换热设备多,有机垢与无机垢复合导致换热面结垢速度快、清洗难度大,严重影响蒸发设备的处置效率,设备单次洗机时间最高达到15 d,且高难度洗机容易造成换热面受损,影响蒸发系统的连续运行。

### 2.3 蒸发浓液量大

浓缩液中的有机物富集后,与无机垢附着于换热器表面会影响换热效果,相同量的浓缩液处置后,产生的蒸发浓液远高于设计约定的25%。

### 2.4 干化系统运行起沫,蒸发浓液无法减量

干化系统用于处理蒸发系统排出的浓液,实现蒸发浓液的再次减量和结晶盐的析出。干化系统运行一段时间后,有机物高度富集,在气水分离室上部空间引发严重的起沫现象,产生的泡沫极易被抽离进入高速旋转的蒸汽压缩机,导致压缩机出现喘振、振动和位移超限等现象,甚至损坏压缩机。以上限制了干化设备对蒸发浓液的处理性能,浓液无法减量,盐分无法析出,最终产生大量的超浓液无处置路由。

综上,该项目2021年虽然进行了浓缩液处理效率提升,浓缩液处理系统中虽增设了化学软化除硬措施,但仍无法有效降低浓缩液中的有机物浓度,致使有机物高度富集,对整套工艺造成了多方面的影响,设备整体运行困难。因此,在预处理系统需增设专门的有机物去除措施,进一步实现浓缩液蒸发、干化后的减量。

## 3 对策与措施

### 3.1 深度絮凝预处理

为去除浓缩液中的有机物,缓解干化系统起沫现象,降低母液产生量,结合工程现场的实际情况,确定采用深度絮凝处理作为浓缩液预处理去除有机物的工艺。深度絮凝技术是一种基于新型絮凝剂(SC-101L)的絮凝工艺,该新型絮凝剂是无机-有机共价键型絮凝剂,具有结构稳定、有机物去除率高的特点。

深度絮凝单元设置絮凝反应罐及絮凝沉淀池,主要设计参数:设计加药量6 mL/L;反应终点pH为4~5.5;絮凝反应罐容积为5.0 m<sup>3</sup>,配套立式桨叶搅拌器,HRT为10 min;絮凝沉淀池容积为122.0 m<sup>3</sup>,水力负荷为0.94 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),HRT为4 h。

### 3.2 化学软化+碳化硅除硬工艺

为降低浓缩液中钙镁离子浓度,减缓蒸发设备结垢风险,结合工程现场的实际情况,确定采用化学软化处理。其原理是向水中加入氢氧化钠、碳酸钠等物质与浓缩液中的钙镁离子反应,生成钙镁沉淀物,从而降低水中的钙镁离子达到软化效果。生成的沉淀物采用碳化硅膜进行泥水分离。碳化硅膜过滤系统是一种错流过滤形式的流体分离过程,泥水混合物在膜管内高速流动,在压力驱动下含小分子物质的澄清液沿与之垂直方向透过膜层,含大

分子成分的泥水被截留,从而实现泥水的固液分离。

3.3 改造后工艺流程

改造后工艺流程如图 4 所示。

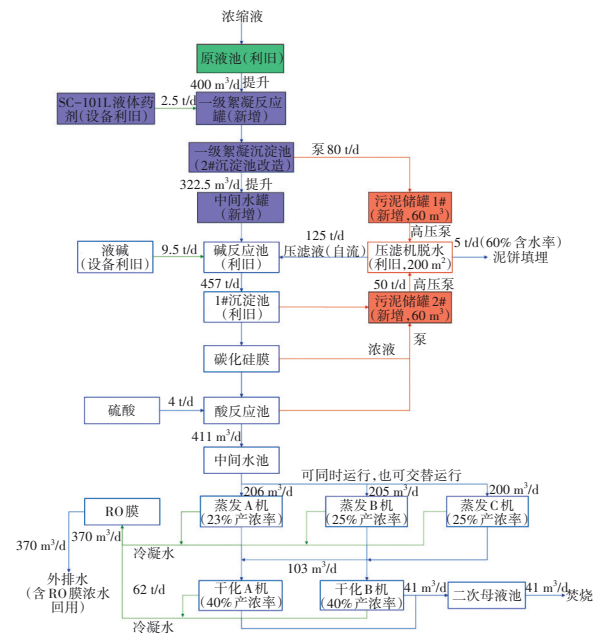


图 4 深度絮凝+化学软化+碳化硅膜除硬工艺流程

Fig.4 Process flow diagram of enhanced flocculation, chemical softening+ hardness removal using silicon carbide film

浓缩液从原液池提升至絮凝反应罐,反应罐内投加絮凝剂(SC-101 L 液体絮凝剂),反应后进行泥水分离,上清液至碱反应池进行软化处理,经软化的上清液进入碳化硅膜设备截留悬浮物,清水进入酸反应池,调节 pH 至 5~6 后进入蒸发系统浓缩,浓缩后清液排放,浓液则进入干化系统。浓液在干化系统进一步浓缩后,清液排放,循环液采用离心机固液分离,分离后盐泥在园区内处置,而最终无法浓缩的超浓液则运至焚烧厂协同处理。

同时,预处理深度絮凝及碳化硅膜软化产生的污泥定期排放至相应的污泥储罐,经板框压滤脱水后,泥饼外运处置,压滤液回流至碱反应池。

4 全量化运行结果分析

4.1 深度絮凝运行情况

2023 年 1 月—5 月,针对 COD 去除进行了技术改造。采用深度絮凝后,浓缩液出水 COD 变化如图 5 所示。可以看出,浓缩液经深度絮凝处理后 COD 为 528~705 mg/L, COD 平均去除率约 50%,出水色度明

显降低;深度絮凝沉淀池污泥沉降效果较好,出水较为清澈,可降低后续碳化硅膜设备的处理压力。

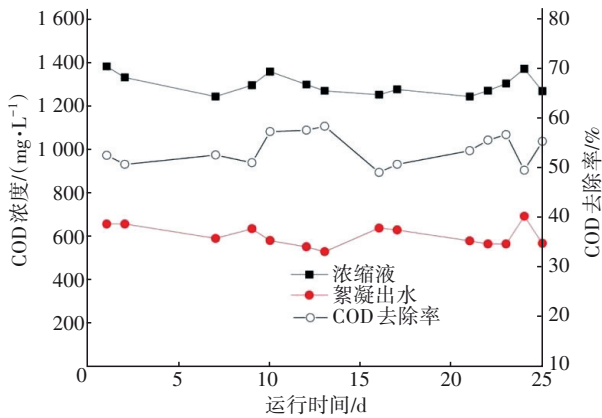


图 5 深度絮凝进、出水 COD 变化  
Fig.5 Changes of COD in influent and effluent after deep flocculation

4.2 碳化硅膜系统运行情况

浓缩液经深度絮凝和化学软化处理后进入碳化硅膜软化系统,碳化硅膜设备运行稳定(见表 1)。由表 1 可知,处理量由改造前(2023 年 1 月前,仅有化学软化)的 377 m³/d 提高到改造后(化学软化+深度絮凝)的 452 m³/d,达到设计流量;平均产水率从 76% 提升至 90%,提升了 14 个百分点;化学清洗频率由 1.35 次/d 降至 0.97 次/d,降低了 28%。由此可见,经过深度絮凝预处理后,碳化硅膜软化工艺的整体运行稳定性提高。

表 1 碳化硅除硬运行平均值数据

Tab.1 Operation data for hardness removal using silicon carbide

时间	运行时间/(h·d <sup>-1</sup> )	处理量/(m³·d <sup>-1</sup> )	碳化硅产水率/%	液碱投加浓度/%	碳化硅清洗频率/(次·d <sup>-1</sup> )	出水平均 SS/(mg·L <sup>-1</sup> )
2021 年 11 月—2022 年 12 月		377	76	1.83	1.35	
2023 年 4 月	19	452	90	2.52	0.97	680

4.3 蒸发系统运行情况

浓缩液经过两次预处理后进入蒸发系统,以板式蒸发系统为例,其设计处理能力为 200 m³/d。蒸发系统处理量、蒸发浓液产生情况及蒸发系统换热效率对比分别见表 2、3。

增加深度絮凝处理后,蒸发系统的处理水量提升了 30.3%;产浓率由改造前的 26% 降至 21%。蒸发设备因结垢引发的衰减周期由 20 d 增加为 45 d。

同时,分析蒸发系统的换热器换热温升,可以看出,一、二效换热器温升分别从 2.9、4.4℃升高到 3.6、5.0℃。此结果可以从侧面说明板换结垢得到缓解,降低了蒸发系统的能源消耗。由此可见,经过深度絮凝预处理后,蒸发系统的处理能力得到明显提升。

表 2 蒸发系统处理量及蒸发母液产生情况

Tab.2 Data for evaporation system treatment capacity and evaporation mother liquor generation

项目	处理量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产浓量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产浓 率/%
运行平均值(2022 年 1 月—9 月)	142	36.92	26
运行平均值(2023 年 4 月)	185	38.85	21
运行最大值(2023 年 4 月)	231	55.44	24

由改造前后卧式蒸发器管束结垢对比可以看

表 4 2023 年 4 月干化系统处理量、产浓情况

Tab.4 Treatment capacity and concentrated leachate generation for drying system in Apr. 2023

项目	干化 A 机			干化 B 机			综合产 浓率/%
	处理量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产浓量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产浓率/%	处理量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产浓量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产浓率/%	
平均值	49.1	20.5	40.8	48.7	19.2	39.4	40.1
最大值	83.0	46.8	56.4	72.0	45.0	62.5	59.4

由表 4 可以看出,干化系统在恢复正常使用后,处理蒸发浓液时泡沫能得到有效控制,处理量达到设计值,产浓率为 40.8%,实现了蒸发母液减量;同时,干化系统的循环液电导率升至 40×10<sup>4</sup> μS/cm 后,有盐分析出(见图 6)。可见,通过深度絮凝去除浓缩液中有有机物,不仅缓解了循环液中有有机物富集现象,解决了设备起沫问题,还促进了结晶盐的成核和析出,有效降低了超浓液的产生量。

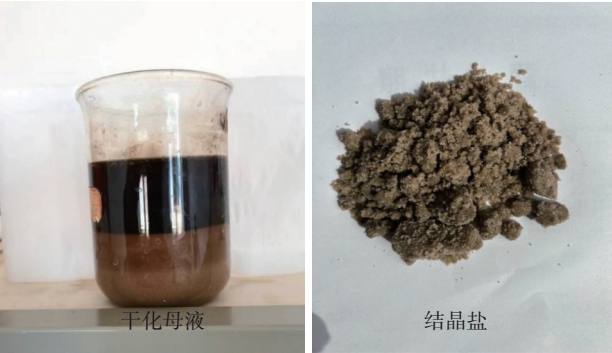


图 6 干化系统干化母液及分离后的结晶盐

Fig.6 Drying mother liquor caused by drying system and separated crystalline salt

4.5 工艺运行成本

综合运行数据,改造前浓缩液年均单位处理总

出,进行深度絮凝工艺改造后,蒸发器结垢得到明显改善,改造前容易在蒸发器加热管上结垢,形成的垢密实,呈黑棕色,难以在线清洗,需停机清理。改造后管束结垢松散,呈灰白色,易于清理,有效降低了劳动强度,延长了运营时间。

表 3 改造前后蒸发系统换热效率对比

Tab.3 Comparison of heat transfer efficiency of evaporation system before and after renovation ℃

项目	一效板换温升	二效板换温升
改造前洗机后一周平均值 (2022 年 1 月—9 月)	2.9	4.4
改造后洗机后一周平均值 (2023 年 4 月)	3.6	5.0

4.4 干化系统运行情况

经过两次预处理后,干化系统处理量、产浓情况见表 4。

成本为 263.74 元/m<sup>3</sup>,深度絮凝改造完成后,需要额外增加絮凝剂、碱液等耗材费用,燃料动力以及污泥处置、设备折旧维修等费用(见表 5),新增运行成本为 31.58 元/m<sup>3</sup>,总计运行成本为 295.32 元/m<sup>3</sup>。

表5 深度絮凝+化学软化预处理新增运行成本

Tab.5 New operating costs for deep flocculation and chemical softening pre-treatment

项目		单价	数量	费用
直接材料	SC-101L	1 800 元/t	1 237.5 t/a	222.75 万元/a
	氢氧化钠 (液体)	1 300 元/t	1 715 t/a	222.95 万元/a
	氨基磺酸 (固体)	4 100 元/t	16.5 t/a	6.77 万元/a
	次氯酸钠 (10%液体)	650 元/t	29.7 t/a	1.93 万元/a
	燃料及动力			2.40 万元/a
电		0.8元/(kW·h)	3×10 <sup>4</sup> kW·h/a	2.40 万元/a
污泥处置		300 元/t	1 825 t/a	60.23 万元/a
折旧		80 万元	8 a	10.00 万元/a
维修			投资 3.0%	2.4 万元/a
其他管理			运行成本 10%	46.92 万元/a
合计				576.35 万元/a
新增成本		按处理规模 500 m <sup>3</sup> /d, 每年 运行 365 d		31.58 元/m <sup>3</sup>

## 5 结论与建议

① 采用“深度絮凝+化学软化”后,COD去除率约50%,钙镁硬度去除率可达到80%以上,碳化硅膜设备产水率提升了14个百分点,蒸发系统处理量提升了30.3%,产浓率由35%降至21%,蒸发设备因结垢引发的衰减周期由20 d增加为45 d左右,换热器的换热效率得到提升,干化处理量达到100 m<sup>3</sup>/d,超浓液产率为40.8%,有盐分析出。

② 全量化改造完成后,经工程运行验证,浓缩液处理能力由200 m<sup>3</sup>/d提升至450 m<sup>3</sup>/d,浓缩液经蒸发和干化系统处置,外运超浓液量由180 m<sup>3</sup>/d降至50 m<sup>3</sup>/d,可实现园区渗滤液和浓缩液就地全量化处置。

③ “深度絮凝+化学软化”预处理工序新增运行成本31.58元/m<sup>3</sup>,浓缩液全量化处置运行成本为295.32元/m<sup>3</sup>。

## 参考文献:

- [1] 姚光远,何晶晶,刘玉强,等.生活垃圾填埋场主要环境问题及污染控制标准修订必要性初探[J].环境卫生工程,2020,28(4):1-5,10.  
YAO Guangyuan, HE Pinjing, LIU Yuqiang, *et al.* Primary discussion on the main environmental problems and necessity of revising pollution control standard of MSW landfill [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(4): 1-5, 10 (in Chinese).
- [2] 向锐,雷国元,徐亚,等.填埋场环境下HDPE膜老化特性及其对周边地下水污染风险的影响[J].环境科学研究,2020,33(4):978-986.  
XIANG Rui, LEI Guoyuan, XU Ya, *et al.* Aging behaviors of HDPE geomembrane in landfill environment and its impact on pollution risk of surrounding groundwater [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(4): 978-986 (in Chinese).
- [3] TENG C Y, ZHOU K G, PENG C H, *et al.* Characterization and treatment of landfill leachate: a review [J]. Water Research, 2021, 203: 117525.
- [4] MOJIRI A, ZHOU J L, RATNAWEERA H, *et al.* Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview [J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2021, 11(1): 66-96.
- [5] ZHANG Q, TIAN B, ZHANG X, *et al.* Investigation on characteristics of leachate and concentrated leachate in three landfill leachate treatment plants [J]. Waste Management, 2013, 33(11): 2277-2286.
- [6] 张亚通,朱鹏毅,朱建华,等.垃圾渗滤液膜截留浓缩液处理工艺研究进展[J].工业水处理,2019,39(9):18-23.  
ZHANG Yatong, ZHU Pengyi, ZHU Jianhua, *et al.* Evolution of the treatment for membrane filtration concentrate of landfill leachate [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(9): 18-23 (in Chinese).
- [7] 康立刚.蒸发技术在膜过滤浓缩液处理中的应用[J].中国环保产业,2016(1):44-46.  
KANG Ligang. Application of evaporating technology in treatment of concentrated solution of membrane filter [J]. China Environmental Protection Industry, 2016 (1): 44-46 (in Chinese).
- [8] 艾恒雨,孟棒棒,李娜,等.我国垃圾渗滤液膜浓缩液处理现状与污染控制建议[J].环境工程技术学报,2016,6(6):553-558.  
AI Hengyu, MENG Bangbang, LI Na, *et al.* Treatment status and pollution control suggestions for membrane concentrated leachate in China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(6): 553-558 (in Chinese).
- [9] 杨爱军.超高压卷式反渗透在垃圾渗滤液膜浓缩液减量化中的应用研究[J].膜科学与技术,2023,43(4):154-158.  
YANG Aijun. Research on application of ultra-high pressure roll-type reverse osmosis in reduction of landfill leachate membrane concentrate [J]. Membrane Science and Technology, 2023, 43(4): 154-158 (in Chinese).

作者简介:夏正启(1975-),男,山东青岛人,硕士,主要研究方向为污水处理、渗滤液及浓缩液处理。

E-mail:476297530@qq.com

收稿日期:2024-01-02

修回日期:2024-02-27

(编辑:衣春敏)