

## 试验研究

UASB+MBR+NF+RO 工艺处理电厂  
垃圾渗滤液的效果分析邵良成<sup>1</sup>, 叶剑娜<sup>2</sup>, 金海峰<sup>2</sup>, 汪文伦<sup>1</sup>

(1. 浙江千尧环境工程有限公司, 浙江 杭州 310000;

2. 煤科集团杭州环保研究院有限公司, 浙江 杭州 311201)

**摘要:**采用“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺处理某生活垃圾焚烧厂渗滤液, 工程规模为 250 m<sup>3</sup>/d, 以该电厂一年的污水处理监测数据为依据, 分析该工艺以及各处理单元(UASB、MBR 和膜系统)对垃圾渗滤液主要污染物的去除效果。结果表明:UASB 对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的平均去除率分别为 83.29 %、73.76 %、-0.29 %、21.04 %和 64.84 %; MBR 对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的平均去除率分别为 87.48 %、99.58 %、97.22 %、90.94 %和 34.65 %; 膜系统对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的平均去除率分别为 96.56 %、63.15 %、90.65 %、94.81 %和 98.18 %; “预处理+UASB+MBR+NF+RO”组合工艺对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的平均去除率分别为 99.93 %、99.96 %、99.74 %、99.65 %和 99.80 %, 出水平均水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 排放标准。

**关键词:**UASB+MBR+NF+RO; UASB; MBR; 膜系统; 去除率; 色度

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2018)04-0019-08

## EFFECT ANALYSIS OF TREATMENT OF LANDFILL LEACHATE FROM A MSW INCINERATION PLANT USING COMBINED USAB+MBR+NF+RO PROCESS

SHAO Liang-cheng<sup>1</sup>, YE Jian-na<sup>2</sup>, JIN Hai-feng<sup>2</sup>, WANG Wen-lun<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Qianyao Environmental Engineering Company Limited, Hangzhou 31000, China;

2. Hangzhou Environmental Protection Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Hangzhou 311201, China)

**Abstract:** A combined process of pretreatment + UASB + MBR + NF + RO was applied to treat the landfill leachate from a MSW Incineration Plant in Zhejiang Province. The designed scale was 250 m<sup>3</sup>/d. The removal efficiencies of main pollutants by this combined process and each treatment unit were analyzed based on one-year monitoring data of this plant. The results showed that the UASB process removed 83.29 % of COD, 73.76 % of BOD<sub>5</sub>, -0.29 % of NH<sub>3</sub>-N, 21.04 % of TP and 64.84 % of chromaticity, respectively. The MBR process removed 87.48 % of COD, 99.58 % of BOD<sub>5</sub>, 97.22 % of NH<sub>3</sub>-N, 90.94 % of TP and 34.65 % of chromaticity, respectively. The Membrane system process removed 96.56 % of COD, 63.15 % of BOD<sub>5</sub>, 90.65 % of NH<sub>3</sub>-N, 94.81 % of TP and 98.18 % of chromaticity, respectively. The combined process of pretreatment + UASB + MBR + NF + RO removed 99.93 % of COD, 99.96 % of BOD<sub>5</sub>, 99.74 % of NH<sub>3</sub>-N, 99.65 % of TP and 99.80 % of chromaticity, respectively. The effluent quality satisfied the Standard I-A of Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant.

**Key words:** UASB + MBR + NF + RO; UASB; MBR; Membrane system; Removal rate; Chromaticity.

目前我国城市生活垃圾的厨余物多、含水率高,其渗滤液具有以下的特点:水质成分复杂、水量和水质变化较大、污染物浓度较高、营养比例失调、可生化性不稳定和环境危害大等特点<sup>[1,2]</sup>。导致渗滤液对周围环境的污染问题日趋严重,其相应控制和治理也成为环境保护领域内的一项重大的研究课题之一。因此,采取实际、有效的工艺处理垃圾渗滤液是必不可少的。目前在垃圾渗滤液的处理上主要采用的设施有 UASB、MBR、反渗透膜以及它们之间的组合等,在此之前,UASB、MBR、反渗透膜单元处理工艺在污水处理上研究得到快速的发展。

在污水处理进程中,上流式厌氧污泥床反应器<sup>[3]</sup>(up-flow anaerobic sludge bed, UASB)在多种污水处理上得到广泛的应用,例如酿造<sup>[4]</sup>、制革<sup>[5]</sup>、化工<sup>[6]</sup>和垃圾渗滤液<sup>[7]</sup>等 COD(或者 BOD<sub>5</sub>)浓度较高的污水。UASB 处理污水的关键在于较高的可生化性和颗粒污泥的形成,优良的颗粒污泥能保持 UASB 中的污泥浓度,提高其处理负荷,充分发挥其性能<sup>[8]</sup>。刘子旭等人<sup>[9]</sup>研究表明,UASB 处理垃圾渗滤液的有机负荷可以高达 40 kg·COD/(m<sup>3</sup>·d),从而保证 COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 等的高效去除。

MBR 与传统的活性污泥消化处理对比,MBR 有较高的微生物截流,乐俊超研究表明<sup>[10]</sup> MBR 将使生物反应器里的微生物浓度从 3~5 g/L 提高到 15~30 g/L,从而保证氨氮、COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 等的去除,微生物 100% 的被分离等,并不会产生二次污染。有研究表明<sup>[11]</sup>,MBR 还能很好的去除烷烃、卤代烃、尧醇类等物质,但也可能会因碳源的不足、有机负荷过低而影响 MBR 脱氮除磷的效率。

近年来,反渗透膜在垃圾渗滤液处理的应用上也是一种趋势<sup>[12]</sup>,例如在北京、上海、浙江、重庆等城市也将反渗透膜应用到垃圾渗滤液的处理工艺上,例如郭健等人<sup>[13]</sup>利用反渗透膜处理垃圾渗滤液,并取得比较好的处理效果。左俊芳等人<sup>[14]</sup>的研究表明,反渗透膜处理垃圾渗滤液,出水水质稳定且能达到国家生活垃圾填埋场污染控制标准中的水污染物排放标准。因此,膜在垃圾渗滤液的处理上将是不缺少的装备之一。

由于垃圾发电厂的垃圾渗滤液中重金属溶出含量高、水质多变、COD、氨氮含量和色度高等特点,采用单一的污水处理设备将不能达到 GB16889-2008 标准规定的排放要求,所以目前都

采用混合式的污水处理工艺。例如,周岩等人<sup>[15]</sup>采用外置式 MBR+单级 DTRO 工艺处理垃圾渗滤液获得较好的出水结果。陈刚等人<sup>[16]</sup>采用均化池+膜生化反应器(MBR)+纳滤(NF)+反渗透(RO)主工艺处理垃圾渗滤液也获得比较好的出水水质。

结合以上研究报告,本文将对浙江省某垃圾焚烧电厂采用的“预处理+UASB+MBR+NF+RO”为主要工艺处理垃圾渗滤液近一年的运行数据进行分析,这将为类似的运行和管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 污水厂概况

浙江省某垃圾焚烧电厂的渗滤液处理项目,进水主要为垃圾焚烧电厂的垃圾渗滤液,处理规模为 250 m<sup>3</sup>/d。该项目的处理工艺主要以“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺为主体工艺流程,工艺流程如图 1 所示,原水经混凝反应沉淀池、调节池、UASB 罐、MBR 和 NF 及 RO 处理系统后达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》, (GB18918-2002)和《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889-2008)后排放进入市政管网。

### 1.2 运行条件

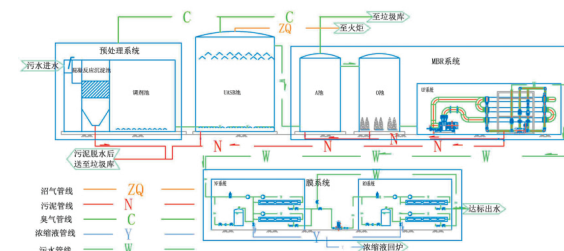


图 1 浙江省某城市垃圾渗滤液处理厂工艺总流程

工艺运行的 pH 值都控制在 6~9 之间,UASB 罐运行温度控制在 32~35 °C 之间,A/O-MBR 的运行温度控制在 25~28 °C 之间,其他设备按照说明书运行。除了采样检测以外,整套系统全自动化运行。该套工艺装置中的膜处理设备都是一备一用,工艺设备池容和相关的参数如表 1 所示。

表 1 USAB-MBR-NF-RO 系统主要反应池参数

项目	调节池	UASB	A/O 系统
V 有效/m <sup>3</sup>	2 688	2 122	2 250
HRT/h	240	192	216
项目	超滤系统	NF 系统	RO 系统
过滤通量/L/h·m <sup>2</sup>	63.81	18	14
总面积/m <sup>2</sup>	163.2	685.2	877.1
产率/%		85	80
工作压力/MPa	1.0~2.0	0.5~2.5	3~5

### 1.3 进水水质

本渗滤液处理系统装置建立在浙江省某垃圾发电厂内。处理水主要为该电厂垃圾库的生活垃圾渗滤液,渗滤液进水水质如表 2 所示。

表 2 废水水质

参数	COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	TP(mg/L)	SS(mg/L)	色度 \ 倍
浓度	20000~60000	10000~30000	1000~3000	50~150	8000~120000	5000~7000

### 1.4 分析方法

BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、氨氮、总磷和色度的测定方法均参照国标方法测定。其中 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、氨氮和总磷两天检测一次,色度每个月检测一次。在本工程运行的数据分析中,其中对工艺的划分如下:混凝反应沉淀池和调节池为预处理系统、UASB 系统、A/O 池和 UF 系统为 MBR 系统、NF 系统和 RO 系统为膜系统。在去除率的分析中,由于预处理系统的主要目的是调节污水的水质水量,以保证后续系统进水水质均匀,所以预处理系统对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率较低而忽略不计(本分析将其记为 0.00%),其他系统的结果分析如下。而对于色度的分析将对四个系统进行结果分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 COD 运行结果与分析

COD 运行结果图 2,各单元 COD 统计结果见表 3。从运行图和统计表中得出,UASB 系统、MBR 系统和膜系统对 COD 的去除率都能保持在 80% 以上,虽然有一定的波动,但是这波动都在误差范围之内。这是由于每天进水 COD 浓度不同,造成 COD 负荷等不同而引起。但是从总体的效果来看,这并不影响工艺系统对 COD 去除。

当进水 COD 浓度在 21 740 mg/L~48 820 mg/L 之间变化时,运行 pH 值在 6~9 之间,UASB 系统、MBR 系统和膜系统各自对 COD 的去除率分别为 83.29%、87.48% 和 96.56%,在各单元系统的相互作用下,该工艺的对 COD 的去除率达到 99.93%,工艺出水 COD 平均浓度为 23.61 mg/L。该工艺出水 COD 浓度达到 GB18918-2002 一级 A 标准( $\leq 50$  mg/L)。

### 2.2 BOD<sub>5</sub> 处理结果与分析

BOD<sub>5</sub> 运行结果图 3,各单元 BOD<sub>5</sub> 统计结果见表 4。从运行图和统计表中得出,UASB 系统和

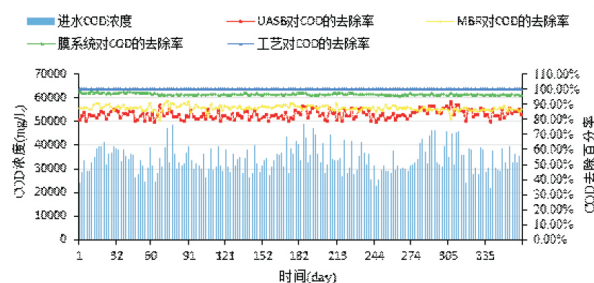


图 2 COD 进水浓度及其去除率

表 3 COD 统计结果

项 目	UASB 系统	MBR 系统	膜系统
进水浓度 (mg/L)	21740~48820	3657~8068	600.5~787.4
进水平均浓度 (mg/L)	34127.46	5584.34	688.58
去除率	77.77%~91.79%	79.73%~91.98%	95.36%~98.41%
平均去除率	83.29%	87.48%	96.56%
出水浓度 (mg/L)	3657~8068	600.5~787.4	12.1~29.8
出水平均浓度 (mg/L)	5584.34	688.58	23.61

膜系统对 BOD<sub>5</sub> 的去除率没有达到 80% 以上,相比较而言,UASB 的波动要小于膜系统,主要是由于各自对 BOD<sub>5</sub> 去除的原理不同而引起的变化;然而,MBR 系统却高达 99% 以上,处理效果比较稳定,而且几乎可以去除进水的 BOD<sub>5</sub>。但是从总体的效果来看,这并不影响工艺系统对 BOD<sub>5</sub> 去除。

当进水 BOD<sub>5</sub> 浓度在 10 122 mg/L~17 970 mg/L 之间变化,运行 pH 值在 6~9 之间时,UASB 系统、MBR 系统和膜系统各自对 BOD<sub>5</sub> 的去除率分别为 73.76%、99.58% 和 63.15%,在各单元系统的相互作用下,该工艺的对 BOD<sub>5</sub> 的去除率达到 99.96%,工艺出水 BOD<sub>5</sub> 浓度为 5.12 mg/L。该工艺出水 BOD<sub>5</sub> 浓度达到 GB18918-2002 一级 A 标准( $\leq 10$  mg/L)。

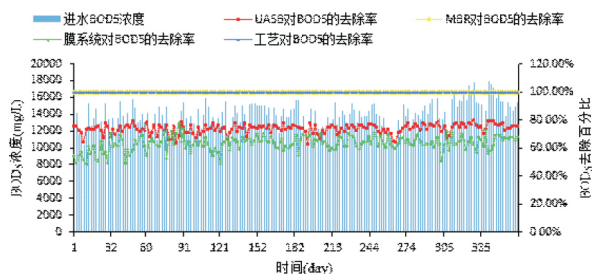


图 3 BOD<sub>5</sub> 进水浓度及其去除率



表 4 BOD<sub>5</sub> 统计结果

项 目	UASB 系统	MBR 系统	膜系统
进水浓度 (mg/L)	10122~17970	3016~3993	10.9~18.9
进水平均浓度(mg/L)	13808.8	3580.67	14.88
去除率	62.79%~79.79%	99.48%~99.70%	47.8%~77.61%
平均去除率	73.76%	99.58%	63.15%
出水浓度 (mg/L)	3016~3993	10.9~18.9	3.8~6.4
出水平均浓度(mg/L)	3580.67	14.88	5.12

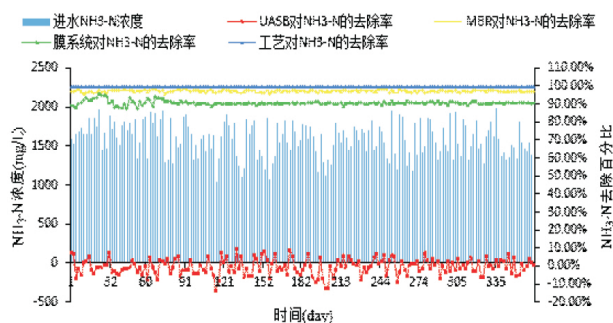
表 5 NH<sub>3</sub>-N 统计结果

项 目	UASB 系统	MBR 系统	膜系统
进水浓度 (mg/L)	1045.4~1978.5	1037.4~1996.0	23.9~68.8
进水平均浓度(mg/L)	1587.87	1591.12	43.4
去除率	-13.41%~9.53%	95.69%~98.45%	87.49%~95.31%
平均去除率	-0.29%	97.22%	90.65%
出水浓度 (mg/L)	1037.4~1996.0	23.9~68.8	2.1~5.9
出水平均浓度(mg/L)	1591.12	43.4	4.03

### 2.3 NH<sub>3</sub>-N 处理结果与分析

NH<sub>3</sub>-N 运行结果图 4, 各单元 NH<sub>3</sub>-N 统计结果见表 5。从运行图和统计表中得出, UASB 对 NH<sub>3</sub>-N 去除效率有低(-13.41%) 有高(9.53%), 这是由于厌氧生物对有机物的降解而引起 NH<sub>3</sub>-N 的变化, 总体趋势来说 NH<sub>3</sub>-N 在 UASB(-0.29%) 的出水浓度是略有升高。而 MBR 系统和膜系统对 NH<sub>3</sub>-N 去除效率都保持在 87% 以上, 这是因为 NH<sub>3</sub>-N 的去除主要在 MBR 系统进行, 膜系统主要是对未处理的氨氮进行膜过滤等不同的原理而出现的现象。但是从总体的效果来看, 这并不影响工艺系统对 NH<sub>3</sub>-N 去除。

当进水 NH<sub>3</sub>-N 浓度在 1045.4 mg/L~1978.5 mg/L 之间变化, 运行 pH 值在 6~9 之间时, UASB 系统、MBR 系统和膜系统各自对 NH<sub>3</sub>-N 的去除率分别为 -0.29%、97.22% 和 90.65%, 在各单元系统的相互作用下, 该工艺的对 NH<sub>3</sub>-N 的去除率达到 99.74%, 工艺出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度为 4.03 mg/L。该工艺出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度达到 GB18918-2002 一级 B 标准(≤8 mg/L)。

图 4 NH<sub>3</sub>-N 进水浓度及其去除率

### 2.4 TP 处理结果与分析

TP 运行结果图 5, 各单元 TP 统计结果见表 6。从运行图和统计表中得出, UASB 对 TP 的去除率波动较大, 而 MBR 系统和膜系统对 TP 的去除率都在 80% 以上, 相较于 UASB 和 MBR, 膜系统主要是利用膜过滤的原理对 TP 进行去除。对于生物反应器而言, 则由聚磷菌的浓度不同和运行原理等的不同, 而引起 TP 的差异变化。但是从总体的效果来看, 这并不影响工艺系统对 TP 去除。

当进水 TP 浓度在 70.0 mg/L~99.8mg/L 之间变化, 运行 pH 值在 6~9 之间时, UASB 系统、MBR 系统和膜系统各自对 TP 的去除率分别为 21.04%、90.94% 和 94.81%, 在各单元系统的相互作用下, 该工艺的对 TP 的去除率达到 99.64%, 工艺出水 TP 浓度为 0.30 mg/L。该工艺出水 TP 浓度达到 GB18918-2002 一级 B 标准(≤1mg/L)。

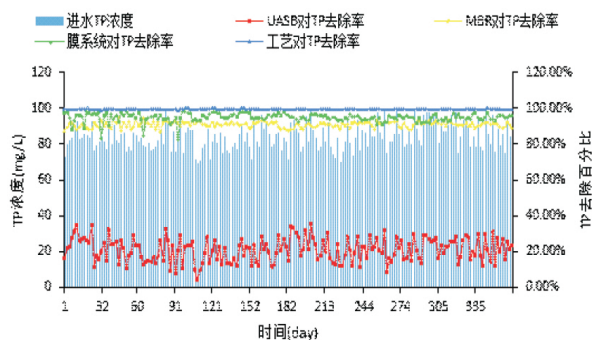


图 5 TP 进水浓度及其去除率

表 6 TP 统计结果

项 目	UASB 系统	MBR 系统	膜系统
进水浓度 (mg/L)	70.0-99.8	60.1-71.8	3.7-8.5
进水平均浓度(mg/L)	84.09	66.00	5.95
去除率	4.02%-35.63%	86.96%-94.56%	82.50%-98.40%
平均去除率	21.04%	90.94%	94.81%
出水浓度 (mg/L)	60.1-71.8	3.7-8.5	0.1-1.0
出水平均浓度(mg/L)	66.00	5.95	0.30

## 2.5 色度处理结果与分析

色度运行结果图 6,各单元 TP 统计结果见表 7。从运行图和统计表中得出,预处理系统主要是混凝沉淀池将污泥沉降后将色度去除;UASB 主要是对有机物的降解,从而将色度去除,去除率都在 70% 以上;相比较而言,MBR 的去除效率比膜系统要低,分别为 30% 以上和 98% 以上,由于 MBR 系统和膜系统主要是利用各自膜过滤的作用将色度去除,膜孔的大小将影响色度的去除。对于生物反应器而言,则由污染物质的浓度不同和运行原理等的不同,而引起色度的差异变化。但是从总体的效果来看,这并不影响工艺系统对色度的去除。

当进水色度浓度在 6 500 倍~7 500 倍之间变化,运行 pH 值在 6~9 之间时,预处理系统、UASB 系统、MBR 系统和膜系统各自对色度的去除率分别为 52.53%、64.84%、34.65% 和 98.18%,在各单元系统的相互作用下,该工艺的对色度的去除率达到 99.80%,工艺出水色度浓度为 14.15 倍。该工艺出水色度达到 GB18918-2002 一级 A 标准(30/50)。

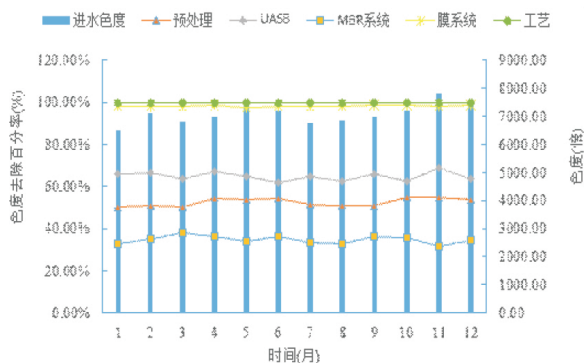


图 6 色度进水浓度及其去除率

表 7 色度统计结果

项 目	预处理系统	UASB 系统	MBR 系统	膜系统
进水浓度 (mg/L)	6500-7500	3192-3513.8	1043.1-1276.7	666.5-861.8
进水平均浓度(mg/L)	7100.00	3365.51	1182.64	772.54
去除率	50.12%-55.17%	61.77%-69.08%	31.80%-38.10%	97.60%-98.60%
平均去除率	52.53%	64.84%	34.65%	98.18%
出水浓度 (mg/L)	3192-3513.8	1043.1-1276.7	666.5-861.8	9.99-19.34
出水平均浓度(mg/L)	3365.51	1182.64	772.54	14.15

## 2.6 各工艺单元对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的去除率与能耗的结果与分析

本工艺的单元设备运行时间为 24 h 连续运行,各工艺单元对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度去除率的叠加图与其能耗见图 7,统计结果见表 8。从运行图和统计表中得出,MBR、膜系统、预处理系统、UASB 的耗电量是逐渐降低。MBR 系统的耗电量为 2803761 kW·h,是其最小耗电量 UASB 的 22.5 倍;是预处理系统的 7.24 倍;是预处理系统的 3.89 倍。其中 MBR 的耗电量主要是由曝气风机和外置式生化膜的用电量引起;UASB 主要是循环泵;预处理系统主要来自于污泥泵、潜水搅拌机;膜系统主要来自于压力泵等。

在各工艺单元的相互作用下,使得工艺对污染物质的处理行之有效。但是,从图 7 与表 8 中,工艺的用电量为 3 775 994 kW·h,并不是各个工艺单元用电量之和,其主要是因为工艺中对污泥和浓缩液的处理耗电量引起。本工程设计和运行时,都按照国家的相关标准进行,尽量节约每一份能源。

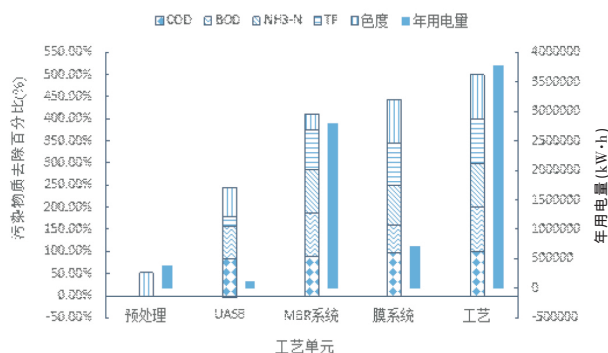
图 7 各工艺单元对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度去除率的叠加图及其能耗情况

表 8 各工艺单元对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 去除效果和能耗的统计结果

项 目	COD(%)	BOD(%)	NH <sub>3</sub> -N(%)	TP(%)	色度(%)	年用电量(kw/h)
预处理	0.00	0.00	0.00	0.00	52.53	387472.3
UASB	83.29	73.76	-0.29	21.04	64.84	124882.6
MBR 系统	87.48	99.58	97.22	90.94	34.65	2803761
膜系统	96.56	63.15	90.65	94.81	98.18	720786.8
工 艺	99.93	99.96	99.74	99.64	99.80	3775994

### 2.7 “预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺处理结果与分析

从图 2-6 中可以得到,“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP

和色度的去除率保持在 98%,运行结果比较稳定。从表 7 的统计结果看出,“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度平均去除率高达 99%以上,几乎可以达到 100%清除垃圾渗滤液中的污染物质。当工艺的运行 pH 值在 6~9 之间时,工艺对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的去除率见表 9,出水排放的 COD、BOD<sub>5</sub>、TP 和色度浓度都达到 GB18918-2002 一级 A 排放标准,而 NH<sub>3</sub>-N 浓度达到 GB18918-2002 一级 B 排放标准,均值达到浓度达到 GB18918-2002 一级 A 排放标准。可以取得良好的环境效益。

表 9 工艺结果统计以及《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级标准

项目/名称	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TP	色度
进水浓度	21740~48820(mg/L)	10122~17970(mg/L)	1045.4~1978.5(mg/L)	70.0~99.8(mg/L)	6500~7500(倍)
进水平均浓度	34127.46mg/L	13808.8 mg/L	1587.87 mg/L	84.09 mg/L	7100 倍
去除率	99.88%~99.96%	99.94%~99.97%	99.59%~99.89%	98.84%~99.88%	99.74%~99.86%
平均去除率	99.93%	99.96%	99.74%	99.64%	99.80%
出水浓度	12.1~29.8(mg/L)	3.8~6.4(mg/L)	2.1~5.9(mg/L)	0.1~1.0(mg/L)	9.99~19.34(倍)
出水平均浓度	23.61 mg/L	5.12 mg/L	4.03 mg/L	0.30 mg/L	14.15 倍
GB18918-2002 一级 A	≤50	≤10	≤5	≤0.5	≤30
GB18918-2002 一级 B	≤60	≤20	≤8	≤1	≤30

## 3 讨论

在“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺系统中,各处理工艺单元对污水的处理作用和效率不同,由于不同的处理机理和各工艺的相互作用,才使得“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺系统将如此高浓度的垃圾渗滤液变得如此清澈,并减少垃圾渗滤液的排放对环境的污染,促进环境的可持续发展。

首先,进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的平均浓度分别为 34127.46 mg/L、13808.8 mg/L、1587.87 mg/L 和 84.09 mg/L 的垃圾渗滤液,通过 UASB 工艺处理后,其对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率分别为 83.29%、73.76%、-0.29% 和 21.04%。在 2010 年,杨俊仕等人<sup>[7]</sup>利用改良的 UASB 处理甘薯燃料乙醇糟液的研究结果表明,在进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度分别为 36720~43890 mg/L、20200~24140 mg/L、480~620 mg/L 和 470~580 mg/L 的条件下,其工艺对 COD、BOD<sub>5</sub>、

NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率分别为 92~93%、94~96%、46~48.3% 和 52~55.8%。相比较而言,杨俊仕等人研究的甘薯燃料乙醇糟液的可生化性比垃圾渗滤液要好,难降解物质和毒性物质要比垃圾渗滤液要低,在不同的进水污染物质的浓度下,对 UASB 厌氧环境中微生物的毒害较低,更有利于产甲烷菌群(八叠球菌等)<sup>[18]</sup>等厌氧生物的生产 and 繁殖。同理,在 2012 年于鲁冀等人<sup>[19]</sup>利用改良的 UASB 处理玉米酒精废水的研究结果表明,在进水 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度分别为 5470 mg/L~7910 mg/L、46 mg/L~97mg/L 和 115 mg/L~187 mg/L 的条件下,其工艺对 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率也分别达到 80%、12% 和 20%。研究结果表明,UASB 在污水处理过程中是一个不可缺失的单元工艺,但想要达到较高的出水要求,还要与其他的工艺联合使用。

其次,进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的平均浓度分别为 5584.34 mg/L、3580.67 mg/L、1591.12

mg/L 和 66.00 mg/L 的垃圾渗滤液, 通过 MBR 工艺处理后, 其对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率分别为 87.48 %、99.58 %、97.22 % 和 90.94 %。在 2007 年, 曹斌等人<sup>[20]</sup>利用 MBR 系统处理城市生活污水的中试研究结果表明, 当进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度分别为 310 mg/L、131 mg/L、50 mg/L 和 8.3 mg/L 的条件下, 其工艺对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率分别为 91.3 %、97.7 %、98.6 % 和 88.4 %。从曹斌等人的研究结果得知, 本工艺对 COD 的去除率要低大约四个百分点左右, 分析其主要原因可能是两者工艺的溶解氧<sup>[21]</sup>不同而造成的差异。但是, 本工艺稳定运行一年的结果再一次印证了 MBR 处理工艺在污水处理上的重要作用。同理, 在 2015 年, 丁鹏元等人<sup>[22]</sup>通过 A/O 工艺对石化废水进行处理研究结果表明, 当进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度分别为 237.3±67.6、76.6±23.5、20.0±3.9 和 1.7±0.6 的条件下, 其工艺对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率分别为 68.8 %、93.5 %、95.0 % 和 80.0 % 左右。随着污水处理历史的进化, MBR 工艺在污水处理上一次一次得到污水处理工程师们的肯定和认可。

随着污水处理技术和材料学的发展, 膜处理工艺也在污水处理工程中开始崭露头角, 并成为污水处理工艺中的重要组成部分。最后, 在进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的平均浓度分别为 688.58 mg/L、14.88 mg/L、43.40 mg/L 和 5.95 mg/L 的垃圾渗滤液, 通过膜系统工艺处理后, 其对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率分别为 96.56 %、63.15 %、90.65 % 和 94.81 %。在 2011 年, 李忠亮<sup>[23]</sup>等人利用管式反渗透膜处理垃圾渗滤液也获得类似的研究结果, 其结果主要表现在对 COD 和 BOD<sub>5</sub> 的去除率上, 分别高达 95 % 和 97 %。随后在 2012 年, 曾晓岚等人<sup>[24]</sup>采用电混凝-反渗透工艺处理垃圾渗滤液的试验研究结果表明, 在反渗透进水 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度分别为 1750 mg/L、202.8 mg/L 和 28.3 mg/L 的条件下, 其工艺对 COD、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率分别为 95 %、90 % 和 98 %。同理, 在 2014 年, 范恩思等人<sup>[25]</sup>利用膜组合工艺在生活污水深度处理中的应用研究结果表明, 在在进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的浓度分别为 12~16 mg/L、2.4~4.6 mg/L、5.65~8.65 mg/L 和 0.36~0.38 mg/L 的条件下, 其工艺对 COD、

BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除率分别为 38.3 %、56.5 %、90 % 和 90 %。比较不同膜系统对污水的处理, 影响膜出水水质的主要因素是膜的性质、污染程度和清洗周期等<sup>[26, 27]</sup>问题造成。无论如何, 随着污水处理的进一步深化, 膜系统在污水处理工艺当中有着不可替代的作用。

色度是污水处理的控制指标之一, 主要反应的是污水颜色的色调和饱和度。在进水色度的平均浓度为 7 100 倍时, 预处理系统、UASB、MBR 系统和膜系统对色度的平均去除率分别为 52.53 %、64.84 %、34.65 % 和 98.18 %。在预处理系统中, 色度的去除主要来自于混凝反应沉淀池的作用, 本运行效果与沈耀良等人<sup>[28]</sup>的研究结果相一致; 在 UASB 池中, 微生物将有机物降解并将污水进行脱色是主要的方式之一, 同时污泥床的物理截流也是不能忽略的, 两者的双重作用使得 UASB 对色度的去除能到达 75 %~77 % 之间<sup>[29, 30]</sup>, 这与本运行结果相呼应; MBR 系统和膜系统中, 色度的主要去除方式是膜的过滤, 来自于霍贞<sup>[31]</sup>的研究表明, MBR 系统对色的去除效率为 36.4 %, 而袁维芳等人<sup>[32]</sup>研究结果显示, 膜系统对色的去除效率可以高达 95 % 以上, 本运行效果刚好是其数据的印证。

随着人民生活水平的提高和环境保护意识的增强, 污水处理工不可能是单一的处理单元就能完成。因此, 本工程项目采用“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺处理某电厂的垃圾渗滤液, 其在进水 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的平均浓度为 34127.46 mg/L、13808.8、1587.87、84.09 mg/L 和 7 100 倍, 以及 pH 值在 6~9 的条件下, 其对 COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的去除率分别为 99.93 %、99.96 %、99.74 %、99.65 % 和 99.80 %, 接近 100% 的去除效率。如此高效的处理工艺也有研究者做出相应的研究结果。例如, 在 2015 年, 班福忱等人<sup>[1]</sup>利用除渣机+预处理+调节池+厌氧反应器 UBF+中间池+一级反硝化硝化+外置式 MBR+纳滤膜+反渗透膜工艺处理垃圾渗滤液的研究结果表明, 在进水 COD、BOD<sub>5</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 的浓度分别为 60 000 mg/L、30 000 mg/L 和 2 000 mg/L 的条件下, 其工艺对 COD、BOD<sub>5</sub> 和 NH<sub>3</sub>-N 的去除率分别为 99.91 %、99.97 % 和 99.55 %, 在进水浓度相同的条件下, 对碳源和氮源的去除效果相似。随后, 在 2016 年, 蔡圃等人<sup>[33]</sup>采用“混凝+氨吹脱+上



流式厌氧污泥床 (UASB)+缺氧+两段接触氧化+MBR+活性炭过滤+RO”处理垃圾渗滤液,在进水 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的浓度分别为 5 500 mg/L 和 400 mg/L 的条件下,其出水结果表明:COD 的去除率高达 99.90%, $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率高达 99.81%。在 2006 年,张徵晟<sup>[34]</sup>在进水色度为 8 000 倍的情况下,利用生物处理+物化处理(UASB+WSBR+混凝+电解)的工艺,色度的去除效率高达 80%以上;在 2008 年,李丹丹<sup>[35]</sup>在进水色度为 6 300 倍的情况下,也获得 75.6%的色度去除效率。相比较而言,本工艺的进水 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度分别是蔡圃等人的 6 倍和 3 倍、色度为 7 100 倍的条件下,预处理-USAB-MBR-NF-RO 工艺 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和色度的去除率分别为 99.93%、99.96%和 99.80%。在高浓度的条件下,该工艺对污水处理效果并不低于蔡圃等人的研究成效,从而证明预处理+USAB-A/O-MBR-NF-RO 工艺是对蔡圃和班福忱等人的研究成果的运行验证。同时也证明该处理工艺对污水负荷变化的有着强大的适应能力。

在工艺能耗上,预处理系统、UASB、MBR 系统、膜系统和工艺的年用电量分别为:387472.32 kw·h、124882.56 kw·h、2803760.64 kw·h、720786.82 kw·h 和 3775994.50 kw·h,从运行的结果分析可知,MBR 主要对氨氮和总磷的去除都需要好氧和厌氧的交替循环,能耗量是比其他工艺单元要大。但是结合实际的运行和工艺的设计,可以将 MBR 系统的能耗进一步优化,从而达到节能减排的目的。

综上所述,通过“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺系统一年的运行结果分析表明,出水 COD、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和色度的平均浓度分别为 23.61 mg/L、5.12 mg/L、4.03 mg/L、0.30 mg/L 和 14.15 倍,其出水水质均到达 GB18918-2002 一级 A(均值,非均值为一级 B)的标准以上,且工艺处理效果稳定,取得了良好的环境效益。“预处理+UASB+MBR+NF+RO”工艺对垃圾渗滤液的处理可以获得稳定均匀的出水结果,有望在未来垃圾渗滤液和各行各业的污水处理上推广应用。

#### 4 结论

采用“预处理+UASB+MBR+NF+RO”组合工艺处理生活垃圾发电厂的渗滤液,对 COD、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 的去除率高达 99%以上,其出水平

均水质能达到 GB18918-2002 一级 A 标准的要求,有良好的环境效益。该工艺一年的运行结果表明,工艺运行稳定、出水水质较好和占地面积小等优点,可为未来我国的垃圾渗滤液处理提供运行效果评价的依据和提高运行效率的借鉴,也可以推广应用于其他类型的污水处理。

#### 参考文献

- [1] 班福忱, 韩雪, 姜亚玲. 生活垃圾焚烧厂垃圾渗滤液处理工程实例[J]. 水处理技术 2015(9):133-136.
- [2] Liu Z, Sun L, Li Y, et al. UASB start-up and treatment effect of landfill leachate with different concentrations [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering 2013;7(5):1621-1626.
- [3] Yang LP, Zheng XH, Luo HD, et al. Changes of sludge characteristic in start-up process of UASB treatment for highly sulfate-containing wastewater [J]. Environmental Science 2009;30 (12):3630-3638.
- [4] 刘寅, 赵庆, 杜兵. 某酱香型白酒生产企业废水处理工程设计 [J]. 给水排水 2017(2):63-67.
- [5] 王学川, 商跃美, 任龙芳. 制革废水生物处理技术的研究进展 [J]. 中国皮革 2016;45(3):51-54.
- [6] 楼铮铮, 陈建红, 林媛媛等. 化工废水处理系统 [P]. CN 206051804 U. 2017; 2017.
- [7] 陈舒涵, 李安婕, 王越兴等. 厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究[J]. 环境科学 2017;38(3):1137-1143.
- [8] 于勇, 丁然, 田秉晖等. 生物处理组合工艺用于制革废水处理 [J]. 环境工程学报 2017;11(6):3375-3380.
- [9] Liu Z, Sun L, Li Y, et al. Impact of UASB start-up and different HRT on treatment effect of old landfill leachate [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering 2013;7(2):483-488.
- [10] 乐俊超. 生活垃圾焚烧厂渗滤液处理方式与分析 [J]. 净水技术 2013;32(3):46-51.
- [11] 尹子华, 盛晓琳, 刘锐等. 多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究[J]. 环境科学 2016;37(9):3460-3465.
- [12] Yanyu W, Shaoqi Z, Fanghui Q, et al. Optimization of Fenton process for biorecalcitrant concentrated leachate of reverse osmosis (RO) by response surface methodological analysis [J]. 环境工程学报 2010;4(11):2494-2498.
- [13] 郭健, 邓超冰, 洗萍等. “微滤+反渗透”工艺在处理垃圾渗滤液中的应用研究[J]. 环境科学与技术 2011;34(5):170-174.
- [14] Zuo J, Song Y, Wang J. Application of DTRO technology in the treatment of landfill leachate [J]. Membrane Science & Technology 2011;31(2):110-115.
- [15] 周岩, 王黎加, 付友先等. 青岛市小涧西渗滤液处理扩容改造项目运行分析[J]. 给水排水 2017(2):33-35.
- [16] 陈刚, 胡啸, 熊向阳等. 沈阳市老虎冲生活垃圾渗滤液全量处理工艺设计[J]. 给水排水 2017(2):56-58.
- [17] Yang J, Zhou H, Guoxin LI, et al. Treatment of Wastewater from



著变化,只要在试剂配制完成后,绘制一条参考校准曲线,然后在每批次样品检测前做好空白试验,即可用参考校准曲线的回归方程代入计算未知样品的氨氮浓度,检测结果均能很好的满足检测要求,不影响检测结果的准确性。从而可省略了每批样品检测前均需绘制校准曲线的步骤,减轻实验人员的工作负担,提高检测分析工作效率。

后续研究由于重新配制了纳氏试剂及酒石酸钾钠溶液,造成氨氮校准曲线的线性回归方程有变化,样品检测结果有较大的差异。可能原因是,在配制酒石酸钾钠溶液时,加热煮沸以去除氨时,蒸发体积人为因素较大,以及两种试剂称取时不是很精确,造成较大的误差。另外配制试剂时的其他因素也会造成一定的影响。

建议重新配制纳氏试剂及酒石酸钾钠溶液时,需重新绘制校准曲线,以保证样品检测结果的准确性。

建议可按比例一次性配制一定量的纳氏试剂及酒石酸钾钠溶液,保证试剂用量,减少绘制校准曲线的次数,提高工作效率。

## 参考文献

- [1] 纪映,孙娟,乔丹丹等.纳氏试剂比色法测定污水中氨氮的优化研究[J].环境科学与管理,2017,42(5):123-125.
- [2] 封跃鹏,邱赫男,孙自杰.纳氏试剂分光光度法测定水中氨氮研究进展[J].环境科学与技术,2016,39(S2):348-352.
- [3] 邓翔宇.水质监测中氨氮测定的影响因素分析[J].资源节约与环保,2014(4):123-124.
- [4] HJ535-2009,水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法[S].

(上接第 26 页)

Alcohol Fuel Production with Sweet Potato by Combined Process[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology 2010;16(5): 730-733.

[18] Liu C, Ma JK, Wu G, et al. Analysis of methanogenic community of anaerobic granular sludge in a full-scale UASB treating avermectin wastewater[J]. Environmental Science 2010;31(3):725-730.

[19] 于鲁冀,王惠英,陈涛等.水解酸化-改良 UASB 工艺处理玉米酒精废水[J].环境工程学报 2012;6(11):3970-3974.

[20] Cao B, Huang X, Atsushi K. Pilot test on enhanced biological nitrogen and phosphorus removal by using A2/OMBR[J]. China Water & Wastewater 2007(03):22-26.

[21] Chen Y, Liu GH, Fan Q, et al. Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions [J]. Environmental Science 2015;36(7):2610-2616.

[22] 丁鹏元,初里冰,张楠等. O 池溶解氧水平对石化废水 A/O 工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 [J]. 环境科学 2015(2):604-611.

[23] 李忠亮.管式反渗透(CDRO)工艺处理垃圾渗滤液[J].工业水处理 2011;31(2):77-78.

[24] Zeng X, Han L, Ding W, et al. TREATMENT OF LANDFILL LEACHATE WITH ELECTROCOAGULATION-RO PROCESS [J].

Technology of Water Treatment 2012;38(9):64-66.

[25] 范恩思,张永丽,王帅.膜组合工艺在生活污水深度处理中的应用研究[J].中国给水排水 2014(3):76-79.

[26] 刘研萍,李秀金.处理垃圾渗滤液的反渗透膜污染研究[J].环境工程学报 2007;1(7):101-105.

[27] Zhou FF, Zhang HM, Fu ZM, et al. Combined MBR-RO process treating high strength wastewater [J]. Environmental Science 2009;30(6):1674-1680.

[28] 沈耀良,杨铨大,王宝贞.垃圾渗滤液的混凝--吸附预处理研究[J].中国给水排水 1999;15(11):10-14.

[29] 王学华,刘峰,赵军等. UASB 反应器对印染废水中碳、氮、硫的协同去除研究[J].环境科学学报 2016;36(10):3736-3744.

[30] 王学华,黄勇,王浩.印染废水水解酸化处理中填料式反应器与 UASB 反应器的比较[J].环境工程学报 2014;8(4):1521-1525.

[31] 霍贞. MBR 及后续工艺处理垃圾渗滤液的试验研究[D]:天津大学;2006.

[32] 袁维芳,汤克敏.反渗透法处理城市垃圾填埋场渗滤液[J].水处理技术 1997(6):333-336.

[33] 蔡圃,潘翠,陈煦等.生活垃圾填埋场渗滤液处理工程实例[J].水处理技术 2016(7):133-135.

[34] 张微晨.生活垃圾焚烧厂渗滤液处理工艺的研究 [D]:同济大学;2006.

[35] 李丹丹.混凝-Fenton 法处理垃圾渗滤液的研究 [D]:重庆大学;2008.