

# 高 DOM 渗滤液厌氧 - 好氧 - 混凝处理工艺

刘智萍<sup>1</sup>, 方 芳<sup>1</sup>, ABDULHUSSAIN A Abbas<sup>1, 2</sup>, 郭劲松<sup>1\*</sup>, 姜佩言<sup>3</sup>

1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045

2. 巴士拉大学工程学院, 伊拉克 巴士拉

3. 重庆大学建筑设计研究院, 重庆 400045

**摘要:** 采用厌氧 - 好氧 - 混凝工艺, 对垃圾焚烧厂高 DOM 渗滤液进行处理, 当进水  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  平均值为 10 800 mg/L 时, 出水  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  平均值可达 208 mg/L; 同时, 着重针对各工艺单元出水 DOM 不同分子质量分布区间的  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  以及 DOM 组成成分的变化进行了研究. 结果表明: 该处理工艺对 DOM 分子质量 < 50 ku 的有机物去除率均可达到 94.7% 以上, 而对分子质量 < 2 ku 的有机物的去除率可达 99.0%; 对渗滤液 DOM 组成成分 (腐殖酸 (HA)、富里酸 (FA) 和亲水性有机质 (HyI)) 的去除率均达到 90.0% 以上, 表明该组合工艺用于处理垃圾焚烧厂渗滤液是可行的.

**关键词:** 垃圾焚烧厂; 渗滤液; 组合工艺; 溶解性有机物 (DOM); 分子质量分布; DOM 组分

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1001 - 6929(2010)08 - 1081 - 05

## Anaerobic-Aerobic-Coagulation Treatment Process for Leachate with High DOM

LIU Zhi-ping<sup>1</sup>, FANG Fang<sup>1</sup>, ABDULHUSSAIN A Abbas<sup>1, 2</sup>, GUO Jin-song<sup>1</sup>, JIANG Pei-yan<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China

2. Faculty of Engineering, Basrah University, Basrah, Iraq

3. Institute of Architecture and Design, Chongqing University, Chongqing 400045, China

**Abstract:** In this study, incineration leachate with high dissolved organic matter (DOM) was treated by combined process anaerobic-aerobic-coagulation. The leachate average effluent  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  of the combined process was 208 mg/L when the average influent  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  was 10 800 mg/L. The changes of  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  corresponding to different molecular weight (MW) distributions of DOM and the DOM fractions in each process unit were also investigated. The results showed that the  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  removal efficiency was larger than 94.7% when the DOM MW was less than 50 ku, and the removal efficiency could reach 99.0% when the MW was less than 2 ku. The removal efficiencies of DOM fractions, humic acid (HA), fulvic acid (FA) and hydrophilic (HyI) exceeded 90.0% using the same combined process. It demonstrated that the combined process was feasible for the treatment of incineration leachate.

**Key words:** waste incineration plant; leachate; combined treatment process; dissolved organic matter (DOM); MW distribution; DOM fractions

垃圾焚烧厂渗滤液具有高  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 、较高  $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$  以及较高  $\rho(\text{BOD}_5) / \rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  值, 并带有强烈的恶臭, 一般呈黄褐色或灰褐色. 目前对垃圾焚烧厂渗滤液处理的研究主要集中于物化处理、高级氧化及膜处理等方法的运用, 其费用较高<sup>[1-4]</sup>. 因

此, 寻找经济可行的焚烧厂渗滤液处理工艺成为当务之急.

溶解性有机物 (Dissolved Organic Matter, DOM) 是指能通过 0.45  $\mu\text{m}$  的滤膜后仍保留在水体中的有机物, 其广泛存在于土壤、水体和沉积物中. DOM 是含有各种复杂官能团的有机化合物, 水体中 DOM 的组成与质量对生物地球化学循环中营养元素活化、重金属和有机污染物迁移、转化, 以及水生生态都有重要影响. 垃圾渗滤液中 DOM 含量高、成分复杂<sup>[5-7]</sup>, 大多数渗滤液处理工艺出水中残余的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  物质主要是分子质量较小一类的 DOM 物质<sup>[8]</sup>, 其对于渗滤液处理的工艺选择、处理效果及可行性具

收稿日期: 2009 - 11 - 21 修订日期: 2010 - 04 - 17

基金项目: 教育部科学研究重大项目 (308020); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07104 - 002)

作者简介: 刘智萍 (1973 -), 女, 重庆人, 讲师, liulqs@sohu.com.

\* 责任作者: 郭劲松 (1963 -), 男, 四川射洪人, 教授, 博士, 主要从事水污染控制与治理研究, guo0768@vip.sohu.com

有重要影响<sup>[9-11]</sup>. 如何选择经济、有效的处理工艺来消除小分子 DOM 物质的影响, 成为渗滤液处理的关键所在. 现有研究大多以确定渗滤液处理工艺的最佳运行条件为主, 少数学者对渗滤液中 DOM 的去除进行了一定的研究<sup>[12-14]</sup>.

笔者根据焚烧厂渗滤液的水质特性, 采用厌氧-好氧-混凝处理工艺对其进行处理, 研究了该组合工艺对渗滤液的去除效果, 分析了渗滤液 DOM 在各处理工段分子质量分布区间的变化以及各工艺单元对渗滤液 DOM 三组分腐殖酸(HA)、富里酸(FA)和亲水性有机质(HyI)的去除效果, 以期从物质变化角度合理选择工艺提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

#### 1.1.1 焚烧厂渗滤液处理工艺

渗滤液处理工艺采用厌氧-好氧-混凝组合工艺, 其进、出水量为 1.25 L/d. 工艺中的厌氧和好氧段反应均在 8 L 的塑料桶中进行, 混合液体积为 5 L, HRT 为 4 d.

其中, 厌氧段采用序批式厌氧反应器(ASBR), 在密闭塑料桶中进行. 系统 $\rho(\text{MLSS})$ 为 9~13 g/L, 运行周期为 24 h, 包括进水、搅拌、沉降和出水. 好氧段采用序批式好氧反应器(SBR),  $\rho(\text{MLSS})$ 为 5.4 g/L,  $\rho(\text{DO})$ 为 3~4 mg/L. 运行周期也为 24 h, 包括进水、静置、曝气(好氧)、沉降和出水.

混凝剂采用  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , 用 NaOH 或浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$  调节渗滤液 pH 为 5 后, 加入  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  溶液 600 mg/L 和 2 mL 0.1% 聚丙烯酰胺(PAM), 快速搅拌 2 min 再慢速搅拌 15 min, 静置 1 h 后取上清液测定

$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ .

#### 1.1.2 DOM 分子质量分布

分子质量分布采用超滤法, 通过氮气加压(0.20 MPa)和逐级过滤的方式进行<sup>[15]</sup>, 截留分子质量分别为 100, 50, 10, 4 和 2 ku. 测试各分子质量滤膜出水的 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ , 采用差值法表示各分子质量分布区间的有机质含量. 试验中, 各工艺单元出水水样均做 3 次分子质量分布重复试验, 各分子质量分布区间取样 50 mL. 文中数据为多次测试的平均值.

#### 1.1.3 DOM 组分分离

按照 THURMAN 等<sup>[16-17]</sup>提供的腐殖酸和富里酸的分离净化方法, 对渗滤液水样进行测试. 分离出的 3 类溶解性有机质为腐殖酸(HA)、富里酸(FA)和亲水性有机质(HyI). 以 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 表征三组分中的有机物含量.

#### 1.1.4 试验仪器和测试指标

混凝采用上海华岩仪器设备有限公司的 ZR46 六联混凝搅拌器; 分子质量分布采用上海原子核应用物理研究所研制的 SCM-300 超滤杯, HM 平板膜及 0.45  $\mu\text{m}$  玻璃纤维膜; 组分分离设备采用保定兰格恒流泵有限公司生产的蠕动泵以及玻璃过滤柱等.  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 采用 HACH 法测试;  $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 采用纳氏试剂比色法.

### 1.2 试验水质

试验用水取自重庆同兴垃圾焚烧发电厂, 它是西部第一座以 BOT 方式运作的垃圾焚烧发电项目, 处理规模为 1 200 t/d, 于 2005 年 3 月正式投入运行. 试验进水水质见表 1.

表 1 试验进水水质

Table 1 Characteristics of the influent in the experiment

项目	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ / (mg/L)	$\rho(\text{BOD}_5)$ / (mg/L)	$\rho(\text{BOD}_5) / \rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ / (mg/L)	pH
范围	9 870 ~ 11 950	5 210 ~ 6 130	0.49 ~ 0.53	389 ~ 451	5.62 ~ 5.93
平均值	10 800	5 395	0.50	427	5.95

## 2 试验结果与分析

### 2.1 各工艺单元处理效果

焚烧厂垃圾渗滤液厌氧-好氧-混凝处理各工艺单元出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ ,  $\rho(\text{BOD}_5)$ 和 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 如表 2 所示.

由表 2 可知, 进水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ ,  $\rho(\text{BOD}_5)$ 和 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 平均值分别为 10 800, 5 271 和 427 mg/L, 经过渗滤液组合工艺处理后, 出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ ,

$\rho(\text{BOD}_5)$ 和 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 分别为 208, 35.8 和 12.0 mg/L, 去除率平均值分别为 98.1%, 99.4% 和 97.2%. 其中, SBR 工艺对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ,  $\text{BOD}_5$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率平均值分别为 94.3%, 97.5% 和 97.0%. 可见, SBR 为该组合工艺中去除  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ,  $\text{BOD}_5$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的主要单元. 混凝对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  和  $\text{BOD}_5$  的去除有一定效果, 其单元去除率分别为 37.0% 和 56.1%, 但对  $\text{NH}_3\text{-N}$  没有明显的去除效果. 厌氧对

污染物的去除效果也较好,其 COD<sub>Cr</sub>和 BOD<sub>5</sub>的单元去除率分别为 46.7%和 48.0%。可以看出,尽管厌氧在整个处理工艺中对有机物绝对含量的去除贡

献比 SBR 工艺小,但厌氧对难降解及不溶性大分子有机物具有较好的处理功效,能为好氧工艺更好地发挥去除有机物的作用奠定基础<sup>[18]</sup>。

表 2 渗滤液进水及各工艺单元出水水质

Table 2 COD<sub>Cr</sub> and NH<sub>3</sub>-N concentration of the influent and effluent in each treatment process unit

工艺单元	COD <sub>Cr</sub>		BOD <sub>5</sub>		NH <sub>3</sub> -N	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
进水 ρ/(mg/L)	9 870 ~ 11 950	10 800	5 732 ~ 6 518	6 271	389 ~ 451	427
厌氧出水	ρ/(mg/L)	5 527 ~ 6 214	5 760	2 895 ~ 3 421	3 262	372 ~ 428
	单元去除率/%	42.1 ~ 54.3	46.7	44.2 ~ 53.6	48.0	4.9 ~ 5.7
SBR 出水	ρ/(mg/L)	286 ~ 354	330	74.2 ~ 106	81.6	10.3 ~ 15.6
	单元去除率/%	93.6 ~ 95.4	94.3	96.5 ~ 97.8	97.5	95.8 ~ 97.6
混凝出水	ρ/(mg/L)	195 ~ 223	208	31.7 ~ 52.1	35.8	10.3 ~ 15.7
	单元去除率/%	32.0 ~ 39.0	37.0	46.0 ~ 63.2	56.1	0
总去除率/%	97.7 ~ 98.4	98.1	99.3 ~ 99.5	99.4	96.3 ~ 97.8	97.2

对比《污水综合排放标准》(GB8978—1996),厌氧-好氧-混凝工艺处理焚烧厂渗滤液整套工艺出水中, COD<sub>Cr</sub>和 BOD<sub>5</sub>均达到三级排放标准, NH<sub>3</sub>-N达到一级排放标准。

### 2.2 各工艺单元中 DOM 不同分子质量区间 ρ(COD<sub>Cr</sub>)的变化特点

各处理工艺单元 DOM 不同分子质量区间 ρ(COD<sub>Cr</sub>)变化见表 3。由表 3 可知,渗滤液原液经过

0.45 μm 膜过滤后,由于细小的颗粒态有机物、细菌和细胞碎片等被截留,原水 ρ(COD<sub>Cr</sub>)由 10 800 mg/L降至 8 438 mg/L,有机物截留率为 22.0%。进水 DOM 中,分子质量在 2 ku 以上的有机物 ρ(COD<sub>Cr</sub>)为 1 475.8 mg/L,约占进水总 ρ(COD<sub>Cr</sub>)的 13.7%,为进水总 DOM 的 17.5%。分子质量 < 2 ku 的有机物 ρ(COD<sub>Cr</sub>)为 6 962.2 mg/L,占进水总 ρ(COD<sub>Cr</sub>)的 64.5%,为进水总 DOM 的 82.5%。

表 3 渗滤液 DOM 在处理工艺单元各分子质量区间 ρ(COD<sub>Cr</sub>)的变化

Table 3 COD<sub>Cr</sub> Changes of DOM in different MW ranges for the effluent of each treatment process unit

项目	分子质量/ku						0.45 μm 膜 过滤后	
	≥100	50 ~ <100	10 ~ <50	4 ~ <10	2 ~ <4	<2		
进水 ρ(COD <sub>Cr</sub> )/(mg/L)	26.1	19.5	357.6	302.4	770.2	6 962.2	8 438.0	
厌氧	出水 ρ(COD <sub>Cr</sub> )/(mg/L)	122.0	170.8	353.8	97.6	183.0	4 441.0	5 368.2
	单元去除率/%	-367.4	-775.9	1.1	67.7	76.2	36.2	
SBR	出水 ρ(COD <sub>Cr</sub> )/(mg/L)	26.1	34.7	8.7	21.7	43.4	78.2	212.8
	单元去除率/%	78.6	79.7	97.5	77.8	76.3	98.2	
混凝	出水 ρ(COD <sub>Cr</sub> )/(mg/L)	18.6	26.6	6.8	16.0	33.0	73.0	174.0
	单元去除率/%	28.7	23.3	21.8	26.3	24.0	6.6	
总去除率/%	28.7	-36.4	98.1	94.7	95.7	99.0	97.9	

表 3 显示,厌氧出水 DOM 分子质量在 50 ku 以上的 ρ(COD<sub>Cr</sub>)较进水出现了增加,这是由于厌氧工艺的水解发酵阶段可以将大分子不溶性复杂有机物水解成溶解性有机物;同时,微生物在降解污染物时通过细胞裂解、细胞膜扩散、合成代谢损失等方式向周围环境中释放出溶解性物质<sup>[19]</sup>。分子质量 < 10 ku 的 ρ(COD<sub>Cr</sub>)在各分布区间均有所降低。

SBR 对各分子质量分布区间有机物的去除效果都比较明显,尤其对分子质量 < 2 ku 的有机物的去除效果最好,去除率达到 98.2%。该结果与曹占峰等<sup>[20]</sup>的结论基本一致,这主要是由于好氧微生物大

量利用 DOM 合成自身细胞物质或进行新陈代谢,使有机物得以有效去除。

混凝对分子质量在 2 ku 以上的有机物去除效果相对较好,去除率基本在 20% 以上,而对分子质量 < 2 ku 的有机物去除率仅为 6.6%。这主要由于混凝作用可以通过电中和与矾花吸附将大分子质量的有机物去除,对由挥发性脂肪酸及其衍生物构成的小分子质量有机物吸附效果很差<sup>[17-21]</sup>;同时,由于经历了厌氧和 SBR 工艺,混凝工段进水中各分子质量分布区间 ρ(COD<sub>Cr</sub>)已经较低,因此造成了混凝单元去除率不高。

总的来说,该组合工艺对渗滤液中分子质量分布  $< 50$  ku 的有机物去除效果较好,几乎在 95% 以上;但以  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  表示的分子质量分布  $< 2$  ku 的 DOM 仍然占出水总 DOM 的 42%。以  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  表示的 DOM 由进水的 8 438 mg/L 降至出水的 174 mg/L,去除率达到 97.9%。说明该工艺对焚烧厂渗滤液 DOM 具有较好的去除效果。

### 2.3 各工艺单元中渗滤液 DOM 组分变化特点

将渗滤液中 DOM 分离成腐殖酸(HA)、富里酸(FA)和亲水性有机质(HyI)三组分。通过比较 3 类物质质量浓度在各工艺单元的变化,进一步从物质变化角度进行表述,为合理选择工艺提供依据。DOM 各组分  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  在不同工艺单元的变化见表 4 及图 1。

表 4 组合工艺对渗滤液 DOM 组分中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除效果

Table 4 The  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  removal effect of DOM fractions by the combined process

组分	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}}) / (\text{mg/L})$		$\text{COD}_{\text{Cr}}$ 去除率 / %
	进水	出水	
HA	65.8	5.3	91.9
FA	5 687.9	63.4	98.9
HyI	2 465.9	120.3	95.1

由表 4 可知,进水中 HA 的  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  较少,仅占总 DOM 的 0.8%,而 FA 和 HyI 是进水 DOM 的主要组成部分,其  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  分别占 DOM 总量的 69.2% 和 30%,二者总量为进水总  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  的 80%。因此去除 FA 和 HyI 两部分成为处理工艺是否合理的关键。

DOM 中的 HA 和 FA 的基本结构为芳环以及醛或酮缩聚结构,均含有羧基( $-\text{COOH}$ )、羟基( $-\text{OH}$ )等的复杂有机物,但 HA 较 FA 具有更高的

聚合度;相对而言,HyI 主要由小分子质量有机物组成<sup>[22]</sup>。经过厌氧处理,图 1 中的 FA 和 HyI 均有不同程度的下降,其单元去除率分别为 31.0% 和 56.3%,但 HA 的  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  由 65.8 mg/L 增至 235.3 mg/L,这与分子质量分布的分析结果相似,即在厌氧去除有机物的同时,进水基质中的不溶性有机物转化为溶解性物质,并且由于微生物细胞的解体也会释放出一些溶解性物质,而这些物质的分子质量均较大<sup>[23]</sup>,因此造成了厌氧出水中 HA 的  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  增加。

经过 SBR 工艺后,HA,FA 和 HyI 的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  单元去除率分别达到 68.6%,97.8% 和 82.1% (见图 1),去除效果较好,并且由图 1 还可以看出,SBR 对 FA 和 HyI 的去除能力大于 HA。HA 中主要是难降解的大分子质量有机物,这类物质难以通过生物降解作用去除,主要由活性污泥生物吸附并通过排泥的方式将其浓度降低<sup>[24]</sup>,因此其  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率相对较低。分子质量相对较小的 FA 和 HyI 则可通过活性污泥将其中可生物降解物质进行吸收并转化为自身物质或者进行新陈代谢,从而达到降解污染物的目的。

混凝对渗滤液中 HA 的去除比较彻底,这主要是因为混凝对大分子质量物质有较好的去除效果。FA 和 HyI 在混凝工艺中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率相对较低,分别为 27.5% 和 37.5% (见图 1)。BOUWER 等<sup>[22]</sup>指出,HyI 的平均分子质量小于 FA 和 HA,其主要由大量简单化合物和少量复杂化合物组成。这些物质多为亲水性,并呈中性,所以混凝的电性中和与吸附等作用对小分子质量物质去除效果有限。在混凝进水中,FA 的本底浓度比 HyI 小,因此,混凝对 FA 的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率相对最小。

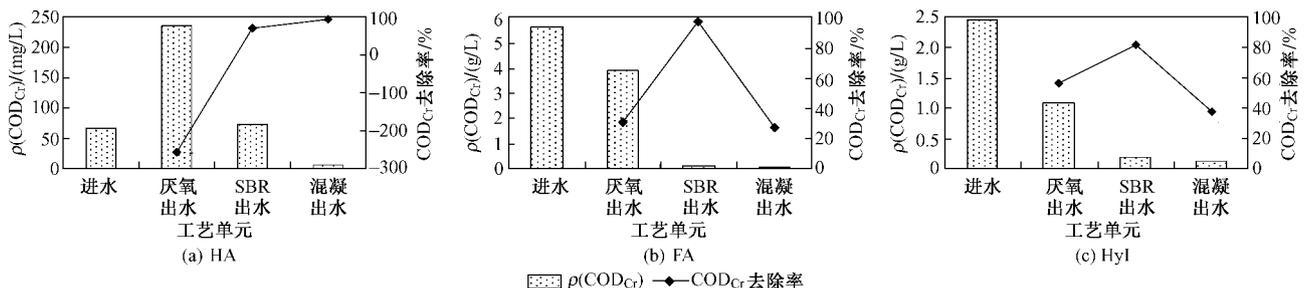


图 1 组合工艺对渗滤液 DOM 三组分的处理效果

Fig. 1 Removal effect of DOM fractions HA, FA and HyI in the leachate treated by the combined process

由表 4 可知,该组合工艺对 HA,FA 及 HyI 总的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率分别达到了 91.9%、98.9% 和 95.1%,

但出水 DOM 中总  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  仍然较高,并以分子质量相对较小的 FA 和 HyI 为主,二者  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  总和

达到 183.7 mg/L,其中,HyI 超过出水总 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 的 60%。结合分子质量分布情况表明,该处理工艺对渗滤液 DOM 三组分有较好的去除效果,所选处理工艺合理可行。

结合渗滤液排放标准和 3.1 节中组合工艺对焚烧厂渗滤液的处理效果,为满足较高渗滤液排放标准,后续应采用以去除小分子质量 FA 和 HyI 为主的纳滤膜工艺,以进一步提高渗滤液出水水质。

### 3 结论

a. 采用厌氧-好氧-混凝工艺处理焚烧厂渗滤液,进水总 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 平均值为 10 800 mg/L,出水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 平均值为 208 mg/L,总去除率为 98.1%;进水中以 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 表示的 DOM 为 8 438 mg/L,出水为 174 mg/L, $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 去除率为 97.9%。

b. 该工艺对以 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 表示的分子质量 < 50 ku 的 DOM 去除效果较好,但出水中以 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 表示的分子质量 < 2 ku 的 DOM 所占比例仍然较高,为 42%。

c. 该工艺对渗滤液中 DOM 三组分 HA,FA 和 HyI 的去除效果均较好,分别为 91.9%、98.9% 和 95.1%。但出水中 HyI 的 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 仍然较高,约为出水总 DOM 的 60%。

d. 通过 DOM 分子质量分布和组分变化的分析,验证了该焚烧厂渗滤液处理工艺的选择是合理的。同时,为满足较高渗滤液排放标准,后续应采用以去除小分子质量 FA 和 HyI 为主的纳滤膜工艺。

#### 参考文献 (References):

- [1] 周新宇. 上海江桥生活垃圾焚烧厂渗滤液处理工程改扩建方案[J]. 给水排水, 2008, 34(9): 35-38.
- [2] 胡晨燕, 李光明, 周仰原, 等. 电解生活垃圾焚烧厂渗滤液氨氮的动力学研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(4): 656-660.
- [3] 邵立明, 何品晶, 康瑾. pH 和负压对生活垃圾焚烧厂渗滤液蒸发处理的影响[J]. 环境工程学报, 2007, 1(2): 108-111.
- [4] 宋灿辉, 吕志中, 方朝军. 生活垃圾焚烧厂垃圾渗滤液处置技术[J]. 环境工程, 2008(S1): 148-150.
- [5] 何品晶, 冯军会, 瞿贤, 等. 生活垃圾焚烧厂贮坑沥滤液的污染与可处理特性[J]. 环境科学研究, 2006, 19(2): 86-89.
- [6] 胡焰宁. 垃圾焚烧发电厂垃圾渗滤液处理工艺的研究[J]. 环境工程, 2004, 22(5): 30-32.
- [7] 方芳, 刘国强, 郭劲松, 等. 三峡库区填埋场和焚烧厂渗滤液水质季节性差异[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 43-47.
- [8] 陈少华, 刘俊新. 垃圾渗滤液中有机物分子质量的分布及在 MBR 系统中的变化[J]. 环境化学, 2005, 24(2): 153-157.
- [9] LEENHEER J A, CRÖUE J P. Characterizing aquatic dissolved organic matter[J]. Environ Sci Technol, 2003, 37(1): 18A-26A.
- [10] LI S, ZHANG X J, FAN X J, et al. Organic matter of various molecular weight fractions in source water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(3): 327-331.
- [11] THOMTON S F, BRIGHT M I, LEMER D N, et al. Attenuation of landfill leachate by UK Triassic sandstone aquifer materials: 2. sorption and degradation of organic pollutants in laboratory columns[J]. J Contaminant Hydrol, 2000, 43(3/4): 355-383.
- [12] ZHANG L, LI A, LU Y, et al. Characterization and removal of dissolved organic matter (DOM) from landfill leachate rejected by nanofiltration[J]. Waste Manage, 2009, 29(3): 1035-1040.
- [13] ZHANG C, WANG Y. Removal of dissolved organic matter and phthalic acid esters from landfill leachate through a complexation-flocculation process[J]. Waste Manage, 2009, 29(1): 110-116.
- [14] ZHENG Z, ZHANG H, HE P, et al. Co-removal of phthalic acid esters with dissolved organic matter from landfill leachate by coagulation and flocculation process[J]. Chemosphere, 2009, 75(2): 180-186.
- [15] KANG K H, SHIN H S, PARK H. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications[J]. Water Res, 2002, 36(16): 4023-4032.
- [16] THURMAN E M, MALCOLM R L. Preparative isolation of aquatic humic substances[J]. Environ Sci Technol, 1981, 15(4): 463-466.
- [17] CHRISTENSEN J B, JENSEN D L, GRØN C, et al. Characterization of the dissolved organic carbon in landfill leachate-polluted groundwater[J]. Water Res, 1998, 32(1): 125-135.
- [18] 高锋, 李晨. 厌氧消化与 SBR 组合工艺处理城市垃圾渗滤液[J]. 环境工程, 2008, 26(6): 33-35.
- [19] 余萍, 于鑫, 戴启宏, 等. 废水生物处理出水中溶解性微生物产物的形成机制与特征[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(5): 352-355.
- [20] 曹占峰, 何品晶, 邵立明, 等. SBR 法处理垃圾填埋场新鲜渗滤液的试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(2): 33-36.
- [21] 韩芸, 杨永哲, 刘可, 等. 垃圾渗滤液及处理出水的有机物 MW 分布[J]. 中国给水排水, 2006, 22(1): 88-91.
- [22] BOUWER E J, CROWE P B. Biological processes in drinking water treatment[J]. J AWWA, 1988, 80(9): 82-92.
- [23] 董春娟, 吕炳南. 污水生物处理中的溶解性微生物产物 (SMP) [J]. 中国给水排水, 2004, 20(1): 22-25.
- [24] 方芳, 刘国强, 郭劲松, 等. 活性污泥法对水溶性腐殖酸的去除效能与机制研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2266-2270.

(责任编辑:潘凤云)