

超声波-树脂法提取活性污泥胞外聚合物的研究

龙腾锐 罗太忠 龙向宇 李金印 唐 然

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要 研究了超声波与树脂联合使用方法对活性污泥胞外聚合物(EPS)的提取效果。研究结果表明:超声波-树脂组合形式的提取效果最优,而超声波后置组合形式的细菌细胞破损程度较大;超声波-树脂法对不同来源的污泥都有较好的提取效果,提取得到的 EPS 量占污泥挥发分的8%~13%;与 EDTA 法、加热提取法相比较,超声波-树脂法具有提取效率高、化学污染小、细胞破损量小以及操作方便的优点。

关键词 EPS 超声波 树脂 活性污泥

Research on extraction of extracellular polymeric substances from activated sludge by ultrasonic and cation resin

Long Tengrui, Luo Taizhong, Long Xiangyu, Li Jinyin, Tang Ran

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Ultrasonic (US) method and cation resin (CR) method were combined to extract extracellular polymeric substances (EPS) from activated sludge, and to study the efficiency of the different combined extract methods. The research results showed that US-CR was the best than three different ways, US postposition processes such as CR-US or US-CR-US might lead more bacteriolysis. With advantages of easy manipulate and less pollution, US-CR was high efficient and secure extract method compared to heating method and EDTA method. US-CR could get better efficient from different sludge, the amount of EPS extracted was about 8% to 13% of the volatile matter of sludge.

Keywords: Extracellular polymeric substances; Ultrasonic; Cation resin; Activated sludge

0 引言

胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS)是一种复杂聚合物的混合物,由微生物的代谢产物、自溶物和从废水中吸附的有机物组成,它是活性污泥中除细胞和水分外的第三大类组成物质。EPS的组分及其物理化学性质同活性污泥的絮凝性与沉降性密切相关,也是影响污泥减容和资源利用的关键物质,因而成为当前的研究热点。

EPS提取是研究EPS的前提。提取EPS的方法较多,但目前还没有一种通用的提取方法。EPS

的提取方法可分为物理法和化学试剂法两大类,物理法主要有加热法、搅拌法、高速离心法、蒸汽法、超声波法等;化学试剂法有 pH 提取法、离子交换法、EDTA 法、甲醛-氢氧化钠法等。在这些方法中,超声波法与树脂法具有提取效率较高、提取引入的化学污染小等优点。本文将这两种方法联合用于 EPS 的提取,确定它们的优化组合形式,并将优化组合得到的提取方法与加热法、甲醛-氢氧化钠法、EDTA 法的 EPS 提取效果进行了比较与分析,从而为进一步研究 EPS 的组分与理化性质提供技术前提。

1 试验材料与方法

1.1 试验仪器与试剂

国家“十五”科技攻关项目(2004BA604A01)。

LXJ-II 型离心机(上海医用分析仪器厂), EBA21 型离心机(德国 HETTICH 公司), CY-5D 型超声波仪(宁波新芝科技有限公司), ZR4-6 混凝试验搅拌机。

所用试剂均为分析纯。缓冲液成分为 NaH_2PO_4 0.328 g/L; Na_2HPO_4 0.480 g/L; NaCl 0.526 g/L; KCl 0.075 g/L; NaOH 0.035 g/L。

1.2 活性污泥来源

本文主要采用实验室 SBR 培养的活性污泥进行研究。接种污泥来自重庆市唐家桥污水处理厂, 采用人工模拟的生活污水, 模拟污水的 $\text{COD}:\text{N}:\text{P}=100:5:1$, 运行过程中严格控制 SBR 系统的 DO 、 pH 、温度与 MLSS 。取样时间为曝气结束前。

此外, 本文还采用实验室生活污水小试装置的好氧颗粒污泥和水解酸化污泥, 以及唐家桥污水处理厂的污泥作为研究对象。唐家桥污水处理厂采用普通活性污泥工艺, 设计规模 6 万 m^3/d , 本研究取样为回流污泥, 样品用装有冰块的塑料箱保存, 在取样后 1 h 内运至实验室。

取样后立即测量样品的 MLSS 与 VSS , 此过程大约耗时 5 h。样品在提取前被置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 的冰箱内保存。

1.3 EPS 的提取

先将污泥样品在 6 000 r/min 的条件下离心分离 20 min, 弃去上清液, 补充适量 pH 为 7 的磷酸盐缓冲液, 使试验污泥的 VSS 为 6 000 mg/L。然后按下述三种方法分别提取 EPS。

(1) 超声波-树脂法: 超声波法作用频率为 21 kHz, 作用功率为 40 W, 作用时间为 2 min; 树脂法树脂用量为 80 g/gVSS, 搅拌速率为 500 r/min, 搅拌时间为 1 h。超声波法与树脂法的最优组合方式将在下文中讨论。

(2) 加热法: 将清洗后的污泥样品于 21 kHz, 40 W 下超声 2 min, 然后放入 80 $^{\circ}\text{C}$ 的水浴锅中加热 30 min, 再于 6 000 r/min 下离心分离 30 min, 取离心后的上清液用 0.22 μm 的滤膜过滤, 滤液即为 EPS 样品。

(3) EDTA 法: 取 5 mL 清洗后的污泥样品, 加入 2 mL 2% EDTA, 稀释至 10 mL, 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温振荡萃取 5 h, 再于 6 000 r/min 下离心分离 30

min, 取离心后的上清液用 0.22 μm 的滤膜过滤, 然后用切割相对分子质量为 10 000 左右的大分子透析膜在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下纯化 1 d 即得 EPS 样品。

1.4 EPS 各组分的测定

EPS 中的多糖含量采用硫酸-蒽酮法测量, 采用葡萄糖作为标准物质; 蛋白质与腐殖酸采用修正的 Folin 酚法测量, 分别采用牛蛋白血清与腐殖酸钠作为标准物质; DNA 采用二苯胺进行测量, 采用 2-脱氧-D 核糖作为标准物质。将多糖、蛋白质、腐殖酸与 DNA 四种组分之和表示为提取 EPS 的总量。

VSS 的测量: 将 100 mL 污泥于 3 000 r/min 下离心 20 min 后置入坩埚中, 先在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重, 然后在 600 $^{\circ}\text{C}$ 高温灼烧后称重计算得到。

2 试验结果与分析

2.1 超声波提取法与树脂提取法

超声波是一种物理能量形式, 它产生的强烈振动、高加速度、空化效应、搅拌等特殊作用可以使污泥絮体分散, 为 EPS 提取创造条件。笔者研究了外界环境与超声作用参数对好氧活性污泥 EPS 提取效果的影响, 以及不引起细菌细胞大量破损的超声波作用参数范围(由于篇幅所限, 数据未列出)。研究结论为:

(1) 超声波提取 EPS 过程宜在冰水浴中进行, 盛装容器宜采用硼酸玻璃容器, 超声波作用过程中不需要外加搅拌作用。

(2) 超声波提取 EPS 的最佳作用频率为 21 kHz, 作用时间不宜大于 3 min, 最佳作用功率的范围为 32~40 W。

树脂提取法是利用阳离子交换树脂的钠离子置换去除生物絮体中或者细菌和 EPS 之间键连的高价阳离子, 削弱 EPS 与细菌细胞的作用力, 然后用离心法将 EPS 从固相分离。笔者采用国产阳离子交换树脂提取了污泥絮体的 EPS, 研究了液相环境、分离手段与提取参数对好氧活性污泥 EPS 提取效果的影响。研究结果表明:

(1) 采用凝胶型阳离子交换树脂 001 $\times$ 7 能得到较好的提取效果。

(2) pH 对 EPS 的提取效率有重要的影响, 在 pH 为 5.8~7.8 的范围内能得到比较稳定的提取

效果,在离心后的补水过程中可采用 pH 为 7 的缓冲液或 pH 平衡下的蒸馏水。

(3)“中速离心+滤膜抽滤”的分离手段较高速离心分离能提取得到更多的腐殖酸。鉴于腐殖酸为 EPS 中的重要组分,认为“中速离心+滤膜抽滤”方法分离 EPS 更为适宜。

(4)树脂投加量为 80 g/g VSS、搅拌速率 500 r/min、提取时间为 1~3 h 的提取条件下得到的 EPS 量较高,并且不会引起细菌细胞的大量破损,可以认为这是一种适宜的提取方案。

研究中测量了实验室 SBR 培养的污泥与提取得到的 EPS 中蛋白质、多糖、腐殖酸与 DNA 的含量,以及葡萄糖-6-磷酸脱氢酶(G6PD)活性。研究中用 EPS 的蛋白质、多糖、腐殖酸与 DNA 之和表示 EPS 总量,以 EPS 的 G6PD 活性与污泥的 G6PD 活性的比值衡量提取过程产生的细胞破损。超声提取法与树脂提取法的 EPS 提取效果见表 1。由表 1 可知,树脂法的提取效果优于超声波法;两种方法提取的 EPS 中,蛋白质是主要成分、多糖与腐殖酸次之、DNA 再次之。本次研究的污泥絮体中,蛋白质、多糖、腐殖酸与 DNA 四者之和为污泥 VSS 的 80%,从这个方面来看,采用 EPS 中蛋白质、多糖、腐殖酸与 DNA 四者之和表示 EPS 的总量是合理的。从 G6PD 活性来看,声波法提取的 EPS 中 G6PD 活性占活性污泥总 G6PD 活性的 1.2%,树脂法提取的 EPS 中 G6PD 活性占活性污泥总 G6PD 活性的

6.7%,因此两种方法都没有引起活性污泥细菌细胞的大量破损。

2.2 超声波法与树脂法联合提取 EPS

在 EPS 常见提取方法中,搅拌法与高速离心分离法具有引入化学污染物少的优点,但提取效率较低;加热法虽然提取效率较高,但存在引起蛋白质变性与胞外酶活性丧失的不足;而其他方法,如 EDTA 法,甲醛-NaOH 法,对 EPS 有不同程度的化学污染,并会干扰 EPS 组分与性质的测量。相比而言,超声波法与树脂法具有提取效率高、操作方便、引入化学污染物少的优点。鉴于超声波法与树脂法提取 EPS 的作用机理不同,将两种方法组合使用可能会得到更好的提取效果。本文将两种方法联合使用提取 EPS,比较“超声波-树脂”、“树脂-超声波”与“超声波-树脂-超声波”三种组合方式对 EPS 的提取效果。

三种组合方式对 EPS 的提取效果见表 2,为说明超声波法在提取过程中的作用,以树脂法 EPS 的提取效果为参照对象。从表 2 可以看出,超声波与树脂法联用的 EPS 提取效果优于仅使用树脂法。从 EPS 总量来看,树脂超-声波法与超声波-树脂法的提取效果接近,超声波-树脂-超声波法的提取效果最好。从 EPS 组分来看,后置超声波(树脂-超声波)有利于提取腐殖酸;前置超声波(超声波-树脂)有利于提取蛋白质。笔者认为产生该现象的原因是:腐殖酸为疏水性有机酸,腐殖酸在絮体结构中通过高

表 1 活性污泥与提取 EPS 的成分与 G6PD 活性

项目	蛋白质/mg/gVSS	多糖/mg/gVSS	腐殖酸/mg/gVSS	DNA/mg/gVSS	四种物质之和/mg/gVSS	G6PD 活性/ $\mu\text{mol}/\text{min}$
污泥	366.7 $\pm$ 24.4	231.6 $\pm$ 10.2	132.5 $\pm$ 30.6	67.2 $\pm$ 10.0	798.0 $\pm$ 75.0	162.4 $\pm$ 26.1
EPS1	6.7 $\pm$ 2.1	5.7 $\pm$ 1.7	4.1 $\pm$ 0.6	0.9 $\pm$ 0.2	17.4 $\pm$ 3.0	1.9 $\pm$ 0.2
EPS2	54.7 $\pm$ 7.2	20.6 $\pm$ 3.3	15.0 $\pm$ 3.3	6.9 $\pm$ 1.2	95.2 $\pm$ 14.7	10.9 $\pm$ 1.8

注:①污泥为实验室培养的好氧活性污泥,SRT 为 15 d 左右;②EPS1 为超声波提取的 EPS,作用频率为 21 kHz,作用功率为 40 W,作用时间为 2 min;③EPS2 为阳离子交换树脂提取的 EPS,树脂投加量为 80 g/g VSS,搅拌速率为 500 r/min,作用时间为 1 h。

表 2 超声波与树脂法三种组合方式所提取的 EPS 组分与 G6PD 活性

项目	蛋白质/mg/gVSS	多糖/mg/gVSS	腐殖酸/mg/gVSS	DNA/mg/gVSS	四种物质之和/mg/gVSS	G6PD 活性/ $\mu\text{mol}/\text{min}$
树脂	54.2 $\pm$ 6.3	20.3 $\pm$ 3.0	11.9 $\pm$ 1.3	6.9 $\pm$ 0.9	93.3 $\pm$ 10.5	9.5 $\pm$ 0.9
树脂-超声波	54.1 $\pm$ 4.9	22.5 $\pm$ 1.4	15.5 $\pm$ 2.9	7.0 $\pm$ 0.7	99.1 $\pm$ 8.0	12.9 $\pm$ 1.2
超声波-树脂	59.2 $\pm$ 7.8	21.4 $\pm$ 1.3	13.1 $\pm$ 1.2	7.1 $\pm$ 0.8	100.8 $\pm$ 11.5	10.1 $\pm$ 1.0
超声波-树脂-超声波	60.1 $\pm$ 6.4	24.6 $\pm$ 1.7	15.9 $\pm$ 2.5	7.6 $\pm$ 0.9	108.2 $\pm$ 10.9	14.3 $\pm$ 1.1

注:①超声波提取的作用参数为:作用频率为 21 kHz,作用功率为 40 W,作用时间为 2 min;②树脂提取的作用参数为:树脂投加量为 80 g/g VSS,搅拌速率为 500 r/min,作用时间为 1 h。

表3 不同方法所提取的EPS组分与G6PD活性

项目	蛋白质/mg/gVSS	多糖/mg/gVSS	腐殖酸/mg/gVSS	DNA/mg/gVSS	总和/mg/gVSS	G6PD活性/ $\mu\text{mol}/\text{min}$
超声波-树脂	55.0 $\pm$ 6.0	21.9 $\pm$ 1.4	15.3 $\pm$ 2.9	4.8 $\pm$ 0.7	94.3 $\pm$ 8.0	10.1 $\pm$ 0.4
加热法	57.3 $\pm$ 7.8	20.7 $\pm$ 1.3	9.3 $\pm$ 1.2	3.7 $\pm$ 0.8	91.0 $\pm$ 11.5	1.4 $\pm$ 0.1
EDTA法	13.2 $\pm$ 6.4	3.3 $\pm$ 1.7	27.9 $\pm$ 2.5	2.6 $\pm$ 0.9	47.0 $\pm$ 10.9	20.7 $\pm$ 3.2*

注：*为提取EPS透析前的测量数据。

价阳离子桥联作用与疏水作用连接,阳离子交换树脂提取后,腐殖酸的高价阳离子桥联作用被破坏,但仍能通过弱的疏水作用连接,后置超声波的剪切作用与空化作用能破坏大分子间弱的作用力,促使这部分高分子向液相游离;而蛋白质由于氨基酸的成分复杂,具有亲水基团与疏水基团,以亲水性基团为主,并主要以高价阳离子桥联作用与氢键作用在絮体中连接,前置超声波有利于絮体分散,促进后续离子交换的反应,从而提取到较多蛋白质。

对于提取方法的评价须从提取效果与产生的破坏程度两个方面来进行。从提取EPS中G6PD活性来看,超声波-树脂法产生的细菌细胞破损程度略高于单独使用树脂法;而树脂-超声波法与超声波-树脂-超声波法产生细菌细胞破损程度分别比单独使用的树脂法高35.8%和50.5%。细胞破损程度越高说明提取的EPS受胞内物质污染的程度越严重,因此,在三种组合方式中,超声波-树脂法为最优的组合方案。

2.3 超声波-树脂法与其他提取方法的比较

加热提取法与EDTA法是目前EPS提取方法中比较常用的高效提取法。本文将超声波-树脂法与加热提取法、EDTA提取法的提取效果进行了比较,结果见表3。试验结果表明,超声波-树脂法的提取效果与加热提取法接近,并明显优于EDTA法。从EPS各组分来看,对于蛋白质的提取,加热提取法效果最好;对于多糖的提取,超声波-树脂法提取法效果最好;对于腐殖酸的提取,EDTA法最好。EDTA是一种螯合剂,它在螯合絮体中高价阳离子使EPS游离进入液相的同时,也能与EPS的部分大分子结合,干扰EPS组分的测定,使测量值偏低。因此EDTA法对EPS的提取效果偏低,这一方面与提取方法本身的提取效率较低有关,另一方面与EDTA法在提取过程中引入的化学污染有关。

从G6PD活性来看,EDTA法提取EPS的G6PD活性最高,说明该方法会导致细菌细胞破损;加热法提取的EPS中,G6PD活性最低,这是因为提取过程温度达80℃,导致蛋白质变性,使酶的活性丧失。综合而言,在上述三种提取方法中,超声波-树脂法具有提取效率高、化学污染小、细胞破损量小、且操作方便的优点,是一种高效可靠的提取方法。

2.4 超声波-树脂法对不同来源污泥的提取效果

为考察超声波-树脂法对不同来源污泥EPS的提取效果,本文以实验室生活污水小试装置的好氧颗粒污泥与水解酸化污泥,以及唐家桥污水处理厂的污泥为对象,研究超声波-树脂法对不同来源污泥EPS的提取效果,具体结果见表4。

表4 超声波-树脂法对不同来源污泥EPS的提取效果

项目	蛋白质/mg/gVSS	多糖/mg/gVSS	腐殖酸/mg/gVSS	DNA/mg/gVSS	总和/mg/gVSS
好氧颗粒污泥	52.3 $\pm$ 4.9	12.7 $\pm$ 2.3	23.6 $\pm$ 2.9	3.6 $\pm$ 0.4	88.6 $\pm$ 7.8
水解酸化污泥	34.3 $\pm$ 2.3	77.4 $\pm$ 5.8	6.0 $\pm$ 0.7	7.6 $\pm$ 1.1	125.3 $\pm$ 7.5
污水处理厂污泥	55.9 $\pm$ 4.5	9.8 $\pm$ 0.6	42.4 $\pm$ 9.0	4.4 $\pm$ 0.6	112.5 $\pm$ 12.6

好氧颗粒污泥与水解酸化污泥皆采用校区生活污水培养,然而由于处理工艺的生化环境、反应器形式以及运行参数的差异,导致从这两种污泥中提取得到的EPS的组分差异很大,水解酸化污泥EPS的多糖含量较高,而好氧颗粒污泥EPS的蛋白质与腐殖酸含量较高。唐家桥污水处理厂处理的污水为典型生活污水,其工艺为普通活性污泥法,该厂污泥EPS的腐殖酸含量明显高于其他污泥,这一点说明污水的性质对EPS的组分有重要影响。从EPS的总量来看,超声波-树脂法对不同来源污泥都有较好的EPS提取效果,提取的EPS数量可占污泥挥发分的8%~13%。

3 结论

超声波与树脂法两种方法的联合使用能在不引起细菌细胞大量破损的前提下,取得高效的提取效果;

全膜法在城市污水处理厂二级出水深度处理中的应用

杨树雄 陆善忠

(半岛环保科技有限公司, 上海 200030)

摘要 介绍了全膜法在大连泰山热电厂新建工程 2×135 MW火电机组锅炉补给水处理系统中的应用情况。工程采用超滤(UF)—反渗透(RO)—连续电去离子膜块(EDI)联合工艺对污水处理厂二级出水进行深度处理,介绍了工艺的设计、设备及运行情况,并对运行数据进行分析。经该工艺处理后的出水水质可满足设计要求,并能保证电厂超高压锅炉用水的长期安全、可靠运行。

关键词 全膜法 超滤 反渗透 EDI 锅炉补给水

1 工程概况

大连泰山热电厂是由中国电力投资公司和大连市建设投资公司共同出资兴建的热电联产项目,热电厂一期工程将安装 2×135 MW超高压中间再热抽汽供热发电机组,最终规模按 4×135 MW超高压中间再热抽汽供热发电机组规划兴建。

热电厂建成后,一期工程生产所需的工业用水量将达 2 万 m^3/d 。鉴于大连地区淡水资源匮乏的现状,市政不可能再批工业用水指标,必须考虑开发利用其他水源。按照大连市政府的指示,并经过详细调研论证,拟定采用大连马栏河污水处理厂二级出水,作为热电厂生产所需的工业用水水源。系统设计进水水质即污水处理厂二级出水水质见表1。

2 工艺流程及设计

2.1 工艺流程

在超声波与树脂的组合方式中,超声波-树脂法是最优的组合方式。对于同一污泥,超声波-树脂法与加热提取法、EDTA提取法相比较,具有提取效率高、化学污染小、细胞破损量小以及操作方便的优点。这表明超声波-树脂法是一种高效可靠的提取方法。对不同来源的污泥,超声波-树脂法都有较好的提取效果,提取得到的EPS数量可占污泥挥发分的 $8\% \sim 13\%$ 。

参考文献

- 1 Wilén B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties. *Water research*, 2003, (37): 2127~2139
- 2 王红武, 李晓岩, 赵庆祥. 胞外聚合物对活性污泥沉降和絮凝性的影响研究. *中国安全科学学报*, 2003, 13(9): 31~34

近年来,全膜法作为水处理中的一种前沿技术,可以将工业废水和生活污水处理后达到欧洲饮用水标准。所谓“全膜法”,即整个系统水净化的任务全部由膜组件来完成,其工艺流程为:超滤(UF)—反渗透(RO)—连续电去离子膜块(EDI)。其中,超滤与传统的预处理技术相比,出水水质更好,可以为下阶段处理设备反渗透膜提供最佳的保护;反渗透则是整个工艺中脱盐的核心,具有脱盐率高(对各种离子的去除率可达 98% 以上)、可自动控制等特点,极大地延长了传统离子交换设备的再生周期,减少了酸碱排放量;EDI除盐模块是深度除盐的有效设备。

本工程采用大连马栏河污水处理厂的二级出水作为电厂的供水水源,经预处理后浊度 ≤ 2 NTU。采用全膜法,工艺流程见图1。超滤系统回收率 90% ,

- 3 Goodwin J A S, Forster C F. A further examination into the composition of activated sludge surfaces in relation to their settlement characteristics. *Wat Res*, 1985, 19: 527~533
- 4 Dignac M F, Urbain V, Rybacki D, et al. Chemical description of extra cellular polymers; implication on activated sludge floc structure. *Wat Sci Tech*, 1998, 38: 45~53
- 5 Cadoret A, Conrad A, Block J C. Availability of low and high weight substrates to extracellular enzymes in whole and dispersed activated sludges. *Enzyme and Microbial Teehndogy*, 2002, 31 (1-2): 179~186
- 6 Huntley G. Higgins. The effects of physicochemical properties of secondary sludge on settling models. MS dissertation. Canada, 2001. 23~24

表 1 马栏河污水处理厂二级出水水质

项目	数值范围	项目	数值范围
全固体物/mg/L	421~1 055	OH ⁻ /mg/L	-
溶解固体物/mg/L	396~1 023	Na ₃ ²⁻ /mg/L	-
灼烧减量/mg/L	154~294	HCO ₃ ⁻ /mg/L	61.0~128
悬浮物/mg/L	4.5~32	CO ₂ /mg/L	-
浊度/NTU	2.07~5.32	SO ₄ ²⁻ /mg/L	53.5~350.8
电导率(25℃)/μS/cm	470~2 150	Cl ⁻ /mg/L	64~450
pH(25℃)	6.46~6.96	NO ₃ ⁻ /mg/L	35~120
总硬度/mmol/L	3~6.8	S ²⁻ /mg/L	0.009~0.017
总碱度/mmol/L	1~1.9	总 SiO ₂ /mg/L	10.8~26.34
Ca ²⁺ /mol/L	2~4.15	活性 SiO ₂ /mg/L	9.23~24.58
Mg ⁺ /mmol/L	0.7~1.6	胶体 SiO ₂ /mg/L	0.77~5.5
Na ⁺ /mg/L	45~138	总磷/mg/L	0.4~9.36
总铁/mg/L	0.18~1.24	COD _{Mn} /mg/L	3.84~11.8
Al ³⁺ /mg/L	0.017~0.038	COD _{Cr} /mg/L	14~59.2
NH ₃ -N mg/L	0.28~5.2	BOD ₅ /mg/L	4.14~9.13
Ba ²⁺ /mg/L	0.016~0.027	TOC/mg/L	4.7~8.2
Sr ²⁺ /mg/L	0.44~1.1	含油量/mg/L	0.08~1.04
Mn ⁴⁺ /mg/L	0.03~0.072	余氯/mg/L	0.02~1.2

一级反渗透回收率 75%，二级反渗透回收率 85%，EDI 回收率 95%。

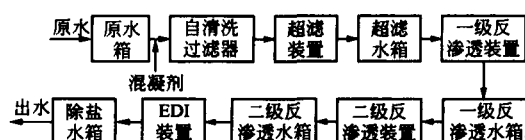


图 1 全膜法工艺流程

2.2 超滤系统

超滤系统包括加药系统、自清洗过滤器、膜组件、配套仪表、阀门、管系及本体组架以及清洗设备

等。超滤系统是反渗透单元的前处理设备。

2.2.1 超滤装置

超滤膜组件数量主要是根据产水通量来确定。超滤设备采用荷兰 NORIT 公司生产内压式 SXL 225UFC0.8 mm 的膜组件。该超滤膜由亲水性的聚醚砜与聚乙烯砜砜酮共聚物合成的中空纤维组成，超滤膜的孔径为 0.025~0.028 μm，膜组件长度 1.5 m，有效过滤面积 40 m²，截留相对分子质量为 150 000，产水净通量选择为 60 L/(m²·h)。

系统设置 3 套超滤装置，正常运行时的每套净出力为 255 m³/h，每套超滤配置 36 根直径 8 inch(1 inch=25.4 mm)膜组件，它们装在 9 根国产 FRP 膜壳中，同反渗透类似水平布置在同一支架上。

膜使用寿命在 3 年以上。在 3 年之内的任何时期，净出力达到保证值，预处理的水质其污染指数(SDI)≤2，达到了反渗透 SDI≤3 的进水条件。

每套超滤装置安装在一个框架上，每一列的进出水母管设阀门，以便清洗时与清洗液进出管相连接。每个超滤膜组件外壳产品水管都设取样阀和必须的检测表计，其数量及位置能有效监督、诊断并确定系统的缺陷。取样点集中设置，便于取样。框架上配备全部管道及接头，还包括所有的支架、紧固件、夹具等且框架的设计需满足当地的抗地震烈度要求。

2.2.2 控制系统

超滤系统的运行及反洗分别设置手动、半自动及自动控制，超滤装置的运行根据超滤水箱的水位自动控制运行。自动控制由工业计算机来完成。

7 Zhang X Q, Bishop P L, Brian K. Comparison of extraction methods for quantifying extracellular polymers in biofilms. *Wat Sci Tech*, 1999, 39(7):211~218

8 王红武,葛利云,马鲁铭,等.胞外聚合物加热法提取过程的优化.见:第三届全国环境化学学术大会论文集.福建,2005

9 罗曦,雷中方,张振亚,等.好氧/厌氧污泥胞外聚合物(EPS)的提取方法研究. *环境科学学报*, 2005, 25(12):1624~1629

10 李久义,左华,栾兆坤,等.不同基质条件对生物膜细胞外聚合物组成和含量的影响. *环境化学*, 2002, 21(6):546~551

11 康春莉,董德明,李忠华,等. EDTA 萃取法分离自然水体中生物膜胞外聚合物. *东北师大学报(自然科学版)*, 2003, 35(2):120~122

12 张丽丽,姜理英,方芳,等.好氧颗粒污泥胞外多聚物的提取及成分分析. *环境工程学报*, 2007, 1(4):127~130

13 Benetti A D. Composition, fate, and transformation of extracellular polymers in wastewater and sludge treatment processes. PHD dissertation, USA, 2002

14 Gaudy A F. Colorimetric determination of protein and carbohydrate. *Industrial Water and Waste*, 1962, 7:17~22

15 Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, et al. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of the Biological Chemistry*, 1951, 193:265~275

通讯处:400045 重庆大学 B 区三舍 916 室

E-mail: skyflyzq334@126.com

收稿日期:2007-09-24

修回日期:2007-12-21