

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.002

# 基于消毒剂制备目标的渗滤液膜浓缩液处理

颌亚玮, 刘浩东, 樊丞越, 严嘉明, 刘宏远  
(浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 生活垃圾焚烧厂的渗滤液经膜深度处理后,产生的膜浓缩液中含有高浓度的难生物降解有机物、成分复杂的盐分和重金属,处置不当会造成严重的环境污染。针对膜浓缩液高盐分,尤其是氯离子浓度高的特点,进行了“混凝沉淀+纳滤+电解”组合工艺制备含氯消毒剂的研究。结果表明,该组合工艺可以回收70%~80%的膜浓缩液,并将其制备成有效氯含量约为0.40%的消毒剂;同时,对COD和总硬度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)的去除率分别可达99.35%、78.43%。该工艺能够实现膜浓缩液的回收利用,所制备的消毒剂可用于厂区敞开式循环冷却水消毒。

**关键词:** 垃圾渗滤液; 膜浓缩液; 混凝沉淀; 纳滤; 电解; 消毒剂

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0007-07

## Leachate Membrane Concentrate Treatment Based on Disinfectant Preparation Targets

XIE Ya-wei, LIU Hao-dong, FAN Cheng-yue, YAN Jia-ming, LIU Hong-yuan  
(College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** The leachate membrane concentrate from a domestic waste incineration plant, which is produced by the nanofiltration/reverse osmosis process, is a kind of wastewater containing high concentration of non-biodegradable organic matter, complex salts, and heavy metals. Considering the high salinity of the membrane concentrate, particularly the elevated concentration of chloride ions, we conducted a study on producing chlorine-containing disinfectant through the integrated process of “coagulation and precipitation + nanofiltration + electrolysis”. The results showed that 70%–80% of the membrane concentrate could be recovered by the combined process and prepared into a disinfectant containing 0.40% effective chlorine. The removal rates of COD and total hardness (expressed in terms of  $\text{CaCO}_3$ ) were 99.35% and 78.43%, respectively. This process can facilitate the recycling of membrane concentrate and the disinfectant can be utilized for treating the open circulating cooling water in the plant.

**Key words:** waste leachate; membrane concentrate; coagulation and precipitation; nanofiltration; electrolysis; disinfectant

生活垃圾焚烧之前的储存过程通常会产生垃圾渗滤液,其受当地气候、生活水平、垃圾收运效率、垃圾分类情况等因素影响,污染物成分复杂。《生活垃圾填埋场污染物控制标准》(GB 16889—

2008)推荐采用“预处理+生物处理+深度处理”工艺处理垃圾渗滤液,目前膜技术在深度处理中应用最为广泛<sup>[1]</sup>。但膜处理过程会产生占垃圾渗滤液处理水量15%~30%的膜浓缩液<sup>[2]</sup>,它是一种可生化性

通信作者: 刘宏远 E-mail: lhyzyy@qq.com

差、盐分浓度高、重金属组成复杂的高浓度有机废水,电导率通常在30 mS/cm以上,处理难度大,处置不当会对环境造成严重损害<sup>[3-4]</sup>。

膜浓缩液的常见处理方法有回喷焚烧、蒸发、回灌以及高级氧化<sup>[5]</sup>等。回喷焚烧法是将膜浓缩液经过高压泵雾化后回喷至垃圾焚烧炉进行高温分解<sup>[6]</sup>,但膜浓缩液中含有的氯化物、硫酸盐会对焚烧系统和烟气处理系统造成腐蚀。蒸发法通过加热膜浓缩液使其水分蒸发、体积减小以达到去除污染物、回收盐分的目的,但膜浓缩液对蒸发设备腐蚀严重,运行费用较高。回灌法是一种将膜浓缩液重新注入垃圾储坑或垃圾填埋场的方法,在回灌中未被降解的有机物、盐分会不断积累,影响后续渗滤液处理系统的稳定运行<sup>[7]</sup>。高级氧化法通过生成具有强氧化性的自由基使目标污染物分解、矿化,具有反应迅速、氧化效率高等优点,其包括光化学法、臭氧氧化法、Fenton氧化法、电化学氧化法等,光化学法处理透光性较差的膜浓缩液时限制较大;臭氧氧化法由于臭氧分解速度很快、溶气效率低,单独处理膜浓缩液时效果较差,为达到处理效果往往需要投加过量的臭氧;Fenton氧化法需要添加化学药剂以保证反应在酸性条件下进行,反应条件苛刻、控制难度大、药剂成本高<sup>[4-7]</sup>。目前大部分利用高级氧化法处理膜浓缩液的研究仍处于实验室阶段。

针对膜浓缩液的高电导率特别是含有高浓度氯离子的特点,笔者研究了“混凝沉淀+纳滤+电解”工艺制备有效氯并用于焚烧厂循环冷却水系统消毒的可行性。在“双碳”战略背景下,膜浓缩液的资源化处理,对于实现渗滤液的“零排放”意义重大。

## 1 技术路线与试验方法

### 1.1 技术路线

拟采用“混凝沉淀+纳滤+电解”组合工艺处理垃圾渗滤液膜浓缩液,通过回收氯离子制备含氯消毒剂。其中,混凝沉淀能够去除膜浓缩液中的部分有机污染物,降低纳滤的污染物负荷;利用纳滤膜的截留特点,处理污染物的同时保留氯离子;采用无隔膜电解法制备有效氯,并探究氯化物转化机理。

主要研究:混凝剂种类和投加量、初始pH以及助凝剂投加量对混凝沉淀效果的影响;纳滤的过滤效果,以及阻垢剂投加量对阻垢效果的影响;电流密度、极板间距、初始pH和电解时间对有效氯生成

的影响。

### 1.2 膜浓缩液来源及水质

浙江省某生活垃圾焚烧厂的垃圾渗滤液处理工艺为“混凝沉淀+UASB+A/O+MBR+纳滤+反渗透”。反渗透单元产水水质满足《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)中敞开式循环冷却水系统补充水的要求,浓缩液产量在180 m<sup>3</sup>/d左右,呈深棕色,无明显恶臭。膜浓缩液的COD为1 513 mg/L,UV<sub>254</sub>为14.62 cm<sup>-1</sup>,TN为2 097 mg/L,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>为1 982 mg/L,氯化物(以Cl<sup>-</sup>计)为5 548 mg/L,总硬度(以CaCO<sub>3</sub>计,下同)为3 537 mg/L,电导率为32 500 μS/cm,pH为7.53。

### 1.3 试验装置和方法

#### 1.3.1 混凝烧杯试验

取试验水样200 mL于250 mL烧杯中,置于六联搅拌器上,并向烧杯中加入相应的混凝剂,投加量范围为200~2 400 mg/L,以300 r/min快速搅拌30 s后,再向烧杯中加入定量的助凝剂,继续快速搅拌30 s。随后将搅拌速率降至100 r/min,10 min后停止搅拌。搅拌完成后静置30 min,取上清液进行水质指标检测,混凝效果以COD去除率为参考指标。

#### 1.3.2 纳滤试验

纳滤(NF)膜材质为哌嗪聚合物,膜元件的最低脱盐率为98.0%(脱盐率基于以下标准测试条件:MgSO<sub>4</sub>为2 000 mg/L,0.48 MPa,25 °C,pH=8,回收率为15%)。经过混凝处理后,膜浓缩液的Langelier饱和指数(LSI)为1.5,表明存在结垢倾向;Ryznar稳定指数(RSI)为5.52,有结垢趋势<sup>[8]</sup>,需投加阻垢剂保证纳滤系统的正常运行。由于膜浓缩液温度通常在30 °C左右,因此试验中将膜浓缩液温度调节至28~30 °C。采用错流过滤,进水压力为0.60 MPa。

#### 1.3.3 电解回收试验

电解回收单元包括恒压恒流电源、电化学反应器、磁力搅拌器三个主要单元。恒压恒流电源恒流范围为0~10 A,恒压范围为0~30 V。电化学反应器主体是圆柱形的玻璃反应杯,底部设置电极片间距调节装置,极板采用商用镀钛电极。

#### 1.3.4 组合工艺试验

将上述单体工艺耦合,进行组合工艺的连续试验。试验装置见图1,进水流量为2 L/h,沉淀时间设定为30 min,NF膜通量下降5%后进行反冲洗,电解反应器的水力停留时间(HRT)设定为60 min。

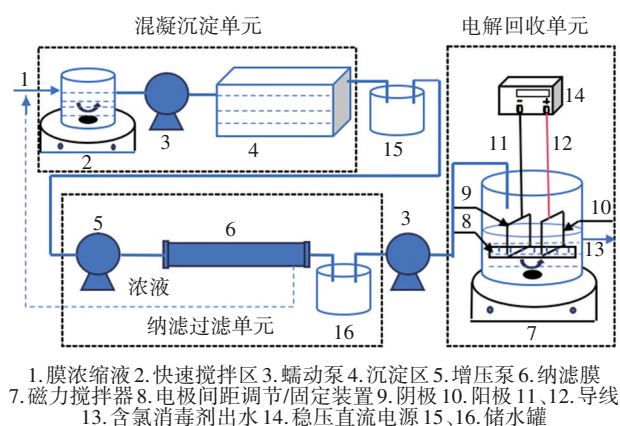


图1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental set-up

#### 1.4 分析方法

pH、电导率、COD、 $UV_{254}$ 、TN、总硬度、氯化物等指标依照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定,有效氯的检测依照《含氯消毒剂卫生要求》(GB/T 36758—2018)。试剂均采用分析纯或优级纯。

用膜比通量  $J_t/J_0$  衡量阻垢效果,计算公式如下:

$$J_t/J_0 = \frac{m_t/\Delta t}{m_0/t_0} \quad (1)$$

式中:  $J_t$  为  $t$  时刻膜通量,  $m^3/(\min \cdot m^2)$ ;  $J_0$  为初始膜通量,  $m^3/(\min \cdot m^2)$ ;  $m_t$  为  $t$  时刻后的  $\Delta t$  分钟内膜产水质量, g;  $m_0$  为初始  $t_0$  分钟内膜产水质量, g。

通过有效氯电流效率(有效氯实际生成量和理论生成量的比率)计算氯化物的转化效率,即:

$$EF = \frac{C \times V}{I \times t \times 1.323} \times 100\% \quad (2)$$

式中: EF 表示电流效率, %; C 表示有效氯浓度, g/L; V 表示电解液体积, L; I 表示电流, A; t 表示时间, h; 1.323 表示每安时电流的有效氯理论产量, g/(A·h)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 混凝效果

#### 2.1.1 混凝剂种类的影响

选用氯化铁、聚合氯化铝、硫酸铝、氯化铝进行试验,4种混凝剂的最佳混凝效果见图2。氯化铁对COD的最佳去除率为67.15%,3种铝系混凝剂对COD的最佳去除率在40%左右。这主要是由于  $Fe^{3+}$  的水解常数为  $2.5 \times 10^{-3}$ , 较  $Al^{3+}$  更容易水解和形成多核络合物。此外,氯化铁形成的絮体相较于铝系混凝剂更加密实,沉淀速度更快,有助于更好地实现固液分离。混凝结束后,投加氯化铁的溶液pH低

于投加铝系混凝剂的,随着溶液pH的下降,腐殖酸的质子化作用和溶解性增强,使其更容易被吸附到沉淀中<sup>[9]</sup>。因此氯化铁对有机物的去除效果优于铝系混凝剂,同时引入的氯离子在电解回收中能够较好地去除。在后续的单因素影响试验中,采用  $FeCl_3$  作为混凝剂进一步优化混凝处理的相关参数。

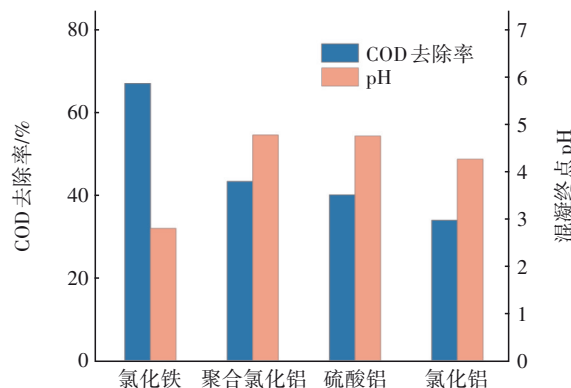


图2 不同混凝剂的最优混凝效果

Fig.2 Optimal Coagulation effect of different coagulants

#### 2.1.2 单因素分析

##### ① 氯化铁投加量的影响

氯化铁投加量对污染物去除效果的影响见图3。氯化铁投加量为1600 mg/L时,COD去除率最高为67.15%。 $UV_{254}$  的去除规律与COD相似,表明膜浓缩液中的有机物可能以含有双键或苯环的不饱和和烃类有机物为主。氯化铁对总氮的去除率低于10%,这主要是因为膜浓缩液中的总氮是以难于形成共沉淀或吸附的硝酸盐氮为主。总硬度的去除率较低,这是由于总硬度的去除主要依靠碱性条件下形成的碳酸盐和氢氧化物沉淀,而氯化铁的投加会降低溶液pH,不利于此类沉淀的形成。

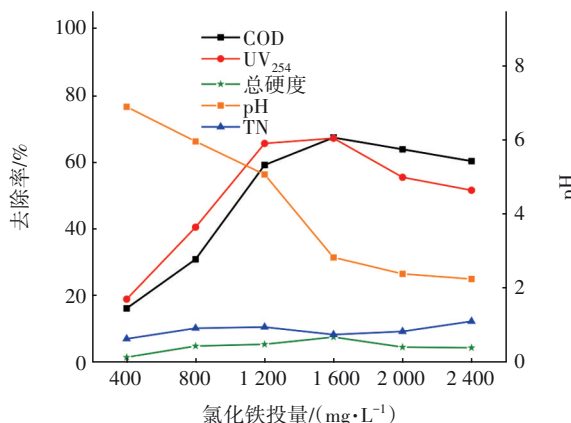


图3 氯化铁投加量的影响

Fig.3 Influence of ferric chloride dosage



## ② 初始pH

初始pH对混凝效果的影响见图4。初始pH为7时COD的去除率最高达到62.36%。这是因为pH过低时,铁离子与有机物会形成无法从体系中脱除的溶解性金属有机络合物,影响混凝效果<sup>[10]</sup>;pH过高时,铁离子倾向于形成无定形的氢氧化物沉淀,其具有吸附其他可溶性物质的能力,但这类氢氧化物随着pH的升高携带的正电荷减少,电中和作用减弱,导致COD的去除率下降<sup>[11-12]</sup>。

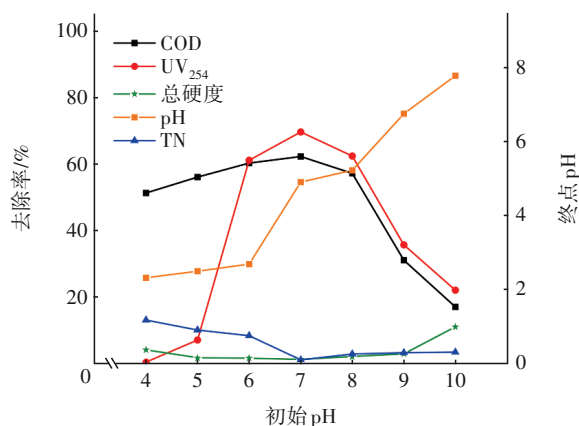


图4 初始pH的影响

Fig.4 Influence of initial pH

## ③ 助凝剂投量的影响

当助凝剂PAM的投加量为0~10 mg/L时,COD去除率均在60%左右,助凝剂投加量对混凝效果影响不大。PAM作为高分子有机物,理论上可以通过吸附架桥作用形成较大的絮体,提高絮体对有机物的吸附作用并改善絮体沉降性能,但膜浓缩液为高盐废水,含有大量的一价阳离子(如Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>等),这会抑制絮体间的凝聚,且高盐对絮体的沉降产生不利影响<sup>[13]</sup>,因此在后续的试验中不再添加助凝剂。

根据以上分析,确定最优的混凝方式为:将膜浓缩液pH调至7后再投加1 600 mg/L氯化铁。此时的出水pH为2.3,电导率为33 500 μS/cm,COD为637 mg/L,TN为1 933 mg/L,总硬度为3 152 mg/L,UV<sub>254</sub>为4.836 cm<sup>-1</sup>。

## 2.2 纳滤效果

为保证纳滤膜的稳定运行,将混凝沉淀出水pH调节至7后进行纳滤,结果如表1所示。纳滤对COD、总硬度、UV<sub>254</sub>、氯化物的去除率分别为63.89%、66.91%、81.14%和0.85%,表明纳滤膜具有较好的有机物截留效果以及较高的氯离子透过率。但滤

后水中仍存在一定浓度的钙、镁离子,可能是因为料液高盐、高温的条件下,纳滤膜对钙、镁离子的截留率下降,通常在70%~80%甚至更低<sup>[14]</sup>。但剩余的硬度对于后续的电解处理单元并无太大影响,还有助于提高电流效率<sup>[15]</sup>。

表1 纳滤膜处理效果

Tab.1 Nanofiltration membrane treatment effect

项目	pH	电导率/(μS·cm <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	总硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	UV <sub>254</sub> /cm <sup>-1</sup>	氯化物/(mg·L <sup>-1</sup> )
进水	7.01	33 500	637	3 152	4.836	5 548
出水	7.10	31 300	230	1 043	0.912	5 501

阻垢剂投加量对膜通量的影响如图5所示,最佳投加量为6 mg/L。渗滤液的成分复杂,含有大量的有机物以及致垢离子Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等,膜表面易出现有机-无机复杂污染物,适量的阻垢剂能够有效缓解污染层中的无机盐结垢,减缓膜污染速度<sup>[16]</sup>,增加纳滤膜高通量运行时间。

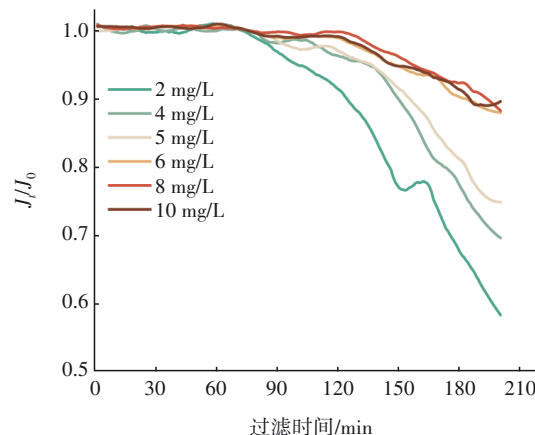


图5 阻垢剂投加量对膜通量的影响

Fig.5 Effect of antiscalant dosage on membrane flux

## 2.3 电解回收效果

### 2.3.1 电解影响因素

#### ① 电流密度

当电流密度为10、20、30、40、50 mA/cm<sup>2</sup>时,有效氯含量分别为0.16%、0.25%、0.29%、0.34%和0.35%,氯化物去除率分别为16.12%、30.32%、32.41%、34.41%和34.60%,即有效氯含量和氯化物去除率随着电流密度的增加而升高,但在电流密度超过40 mA/cm<sup>2</sup>后,两者增加不明显。电流密度能够控制电化学反应速率,随着电流密度的增加,阴阳极之间产生的电子数量增多,促进了氯离子向有效氯转化。但当电流密度超过极限后,电

化学氧化效果主要受传质控制,而不是电流密度。因此,确定最佳电流密度为40 mA/cm<sup>2</sup>。

## ② 极板间距

当极板间距为1、2、3、4、5 cm时,有效氯含量分别为0.34%、0.36%、0.35%、0.33%和0.30%,氯化物去除率分别为34.41%、33.91%、26.20%、23.18%和16.73%,即有效氯含量随极板间距增大先升高后降低,极板间距为2 cm时有效氯含量达到最大。极板间距小则体系电阻小,发热少,同时对流和扩散的传质效果好,有利于有效氯的生成。但是极板间距为1 cm时,有效氯含量略低于2 cm的,这是由于极板间距过小会加速电极的钝化,电流效率下降速度加快,有效氯生成量减少。因此,确定最佳的电极间距为2 cm。

## ③ 电解时间

电解时间对有效氯回收的影响见图6。在前60 min有效氯含量的增加速率最快,60 min时有效氯含量达到了0.39%,同时有35%左右的氯化物被去除。之后随着电解时间的增加,虽然氯化物去除率逐渐增大,但有效氯含量增加缓慢。这是由于电解会产生大量的热,随着电解时间增加,体系温度升高,氯气的溶解度降低,加快了其逸出。此外,阴极表面生成的氢氧根会和水中的钙、镁离子反应,在电极表面生成白色垢层,减少极板有效面积,影响电解效率,因此电解时间应控制在60 min以内。

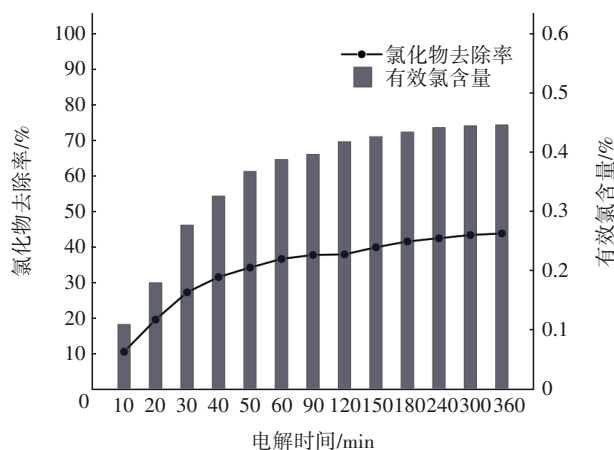


图6 电解时间对氯化物去除和有效氯含量的影响

Fig.6 Effect of electrolysis time on chloride removal and effective chlorine content

## ④ 初始pH

当初始pH为3、5、7、9、11时,有效氯含量分别为0.38%、0.37%、0.39%、0.36%和0.34%,氯化物

去除率分别为33.62%、35.13%、36.85%、34.19%和28.21%。可见,在pH为7时氯化物去除率和有效氯含量均达到最大值。初始pH会影响氯离子在溶液中的存在形态,强酸条件下氯气的溶解度降低、逸散速度加快,而强碱条件下溶液中强氧化性的ClO<sup>-</sup>转化为氧化能力明显较弱的ClO<sub>3</sub><sup>-</sup>。在弱碱性条件下,会形成Cl<sup>-</sup>→Cl<sub>2</sub>→ClO<sup>-</sup>→Cl<sup>-</sup>的循环,ClO<sup>-</sup>浓度减少,不利于有效氯浓度的提高。

## ⑤ 总硬度、COD对电流效率的影响

将纳滤膜进水与出水进行电解对比,60 min后有效氯电流效率、总硬度、COD变化见图7。电解60 min后纳滤进水和出水的有效氯电流效率分别为13.26%、35.71%。相同电解时间内,未经纳滤处理的膜浓缩液有效氯电流效率下降速率更快,COD和总硬度下降更多。在整个体系中,有机物相较于氯化物更易被氧化,过多的有机物会竞争电子从而影响有效氯电流效率。未经纳滤处理的膜浓缩液硬度较高,硬度导致的极板表面结垢速度加快,导致电流效率下降,有效氯生成速率减慢。

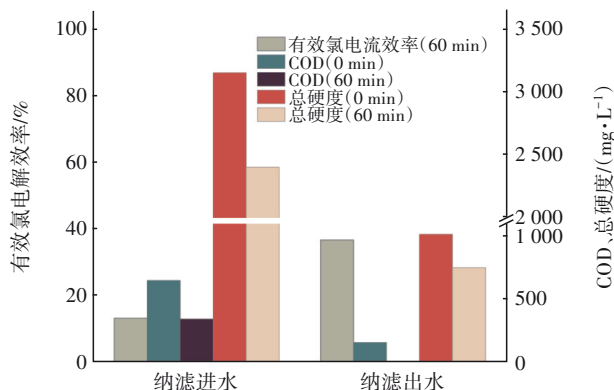
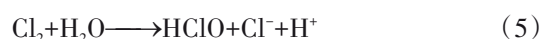


图7 总硬度、COD对电流效率的影响

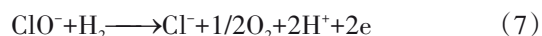
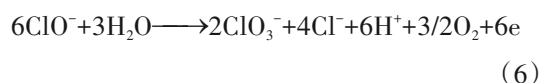
Fig.7 Influence of total hardness and COD on current efficiency

## 2.3.2 有效氯回收机理

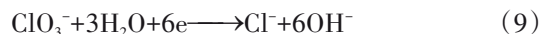
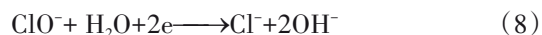
在电流作用下,膜浓缩液中的氯化物被氧化为次氯酸根等强氧化性物质,使膜浓缩液转化为含有一定浓度有效氯的含氯消毒剂。次氯酸根作为有效氯的主要成分,其生成的主反应包括阳极反应、阴极反应、电解液反应,分别如式(3)~(5)所示:



阳极副反应为:



阴极副反应为:



主反应受到电荷转移的控制,电流密度的增加以及极板间距的减少能够提高体系内的电流,提高氯气的生成效率,反应生成的氯气、氢气从极板向外扩散,可以加强传质,促进有效氯的生成。副反应主要受到传质控制,未从极板扩散的次氯酸根会在阳极再次被氧化,在阴极也会发生还原反应,最终造成电流损失,因此通过连续流试验加强传质可以在一定程度上控制副反应,提高有效氯的含量。

## 2.4 连续流试验

在各单元均为最优条件下进行连续流试验。混凝单元:氯化铁投加量为1 600 mg/L,沉淀时间为30 min,混凝会产生占处理体积20%~30%、含水率>99%的污泥,因此膜浓缩液体积会减小20%~30%。混凝结束后,将膜浓缩液pH调节至7,后续处理单元不再改变pH。纳滤单元:进水压力为0.60 MPa,阻垢剂投加量为6 mg/L,回收率在75%左右。电解回收单元:电流密度为40 mA/cm<sup>2</sup>,极板间距为2 cm,水力停留时间为60 min。最终制得含氯消毒剂占膜浓缩液体积的70%~80%左右。

工艺连续流试验结果如表2所示。对COD、总硬度、氯化物的总去除率分别为99.35%、78.43%和29.90%,有效氯含量为0.40%。出水有效氯含量较静态试验更高,这是因为动态连续流试验能够提高有效氯在体系中的传质速率,降低副反应的影响。硬度的去除主要是由于其在阴极表面以及反应器内形成氢氧化物沉淀,而为了防止垢层固化在阴极表面腐蚀电极,可以通过每60 min的倒极实现表面污染物的自清除,减少酸性清洗剂的使用。

表2 组合工艺处理效果

Tab.2 Combined process treatment effect

项目	COD	总硬度	氯化物
膜浓缩液	1 530	3 537	5 548
混凝出水	740	3 152	6 550
纳滤出水	220	1 033	6 500
电解出水	10	763	3 889

对组合工艺进行能耗与药耗核算,结果如表3所示。膜浓缩液制备含氯消毒剂的成本为0.413元/L,成品次氯酸钠的成本为0.44元/L,该组合工艺在经济上存在一定的可行性。

表3 组合工艺的成本分析

Tab.3 Cost analysis of combined process

元·L<sup>-1</sup>

项目	能耗	药耗	其他
混凝沉淀	0.082 5	0.004 48	0.071
纳滤	0.072 0	0.004 08	0.086
电解	0.092 3	0.000 70	—
总和	0.246 8	0.009 20	0.157

## 3 结论

① 采用“混凝沉淀+纳滤+电解”组合工艺能够将膜浓缩液制备成有效氯含量约为0.40%的消毒剂,为渗滤液膜浓缩液的资源化处理提供了新的思路。同时,利用倒极可以有效减少极板结垢,稳定电流效率,保证实际应用中工艺的可持续性。

② 组合工艺能够有效去除垃圾渗滤液膜浓缩液中的污染物,减少含氯消毒剂的杂质。经处理后,对COD、总硬度、氯化物的去除率分别为99.35%、78.43%、29.90%,最终工艺出水COD、总硬度、氯化物分别为10、763、3 889 mg/L。

## 参考文献:

- [1] 李长海,张雅潇,普建国,等. 生物法+膜法工艺处理垃圾焚烧电厂渗滤液[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2):104-109.  
LI Changhai, ZHANG Yaxiao, PU Jianguo, et al. Treatment of leachate from waste incineration power plant by biological and membrane process [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 104-109 (in Chinese).
- [2] 丁西明,马冬杰,康建邨,等. 老龄化垃圾填埋场渗滤液全量化处理工程实例[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12):90-94.  
DING Ximing, MA Dongjie, KANG Jiancun, et al. Engineering examples of full quantitative treatment of leachate from an aging landfill [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12):90-94(in Chinese).
- [3] CHEN L, LI F, HE F, et al. Membrane distillation combined with electrocoagulation and electrooxidation for the treatment of landfill leachate concentrate [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 291:

- 120936.
- [4] 秦浩,马长永. 生活垃圾渗滤液膜浓缩液全量化处理工艺应用分析[J]. 环境卫生工程, 2023, 31(2): 108-112.
- QIN Hao, MA Changyong. Analysis on the application of full quantization treatment process of domestic waste leachate membrane concentrate [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2023, 31(2): 108-112 (in Chinese).
- [5] 肖玉. 混凝联合高级氧化技术处理渗滤液膜浓缩液的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
- XIAO Yu. Study on the Treatment of Membrane Concentrated Leachate by Coagulation Combined with Advanced Oxidation Technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022(in Chinese).
- [6] 吴子涵,任旭,肖玉,等. 上海市某垃圾焚烧厂渗滤液膜浓缩液回喷焚烧后的固相物质转化特性[J]. 环境工程学报, 2019, 13(8):1949-1958.
- WU Zihan, REN Xu, XIAO Yu, *et al.* Transformation properties of solid matters produced by membrane concentrate spraying into incinerators in a waste incineration power plant of Shanghai City [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1949-1958(in Chinese).
- [7] TALALAJ I A, BIEDKA P. Impact of concentrated leachate recirculation on effectiveness of leachate treatment by reverse osmosis [J]. Ecological Engineering, 2015, 85: 185-192.
- [8] 韩雪. 阻垢剂对水处理纳滤工艺的影响[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- HAN Xue. Effects of Scale Inhibitors on the Nanofiltration Process for Water Treatment [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020 (in Chinese).
- [9] 许晶. 填埋场垃圾渗滤液膜浓缩液处理技术研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2017.
- XU Jing. Study of the Landfill Leachate Membrane Concentrates Treatment Method [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017(in Chinese).
- [10] 孙越,张聪慧,白皓,等. 混凝-异相Fenton工艺处理渗滤液纳滤浓缩液研究[J]. 中国环境科学, 2023, 43(3):1197-1207.
- SUN Yue, ZHANG Conghui, BAI Hao, *et al.* Study on leachate nanofiltration concentrate treated by a coagulation-heterogeneous Fenton process [J]. China Environmental Science, 2023, 43(3): 1197-1207 (in Chinese).
- [11] DAYARATHNE H N P, ANGOVE M J, ARYAL R, *et al.* Removal of natural organic matter from source water: review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: 101820.
- [12] 赖鹏,赵华章,倪晋仁. 硫酸铁混凝剂处理焦化废水A/O工艺出水的研究[J]. 中国环境科学, 2008, 28(3):215-219.
- LAI Peng, ZHAO Huazhang, NI Jinren. Study on treatment of effluent from A/O coking wastewater treatment system by ferric sulphate coagulant [J]. China Environmental Science, 2008, 28(3): 215-219 (in Chinese).
- [13] NAZIA S, SAHU N, JEGATHEESAN V, *et al.* Integration of ultrafiltration membrane process with chemical coagulation for proficient treatment of old industrial landfill leachate [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 412: 128598.
- [14] 张玉凤. 聚酰胺复合纳滤膜制备及其在工业废水处理中的应用[D]. 北京:北京化工大学, 2019.
- ZHANG Yufeng. Preparation of Polyamide Composite Nanofiltration Membrane and Its Application in Industrial Wastewater Treatment [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019 (in Chinese).
- [15] 刘忆玲. 掺杂电极无隔膜电解制备次氯酸钠及其催化性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2018.
- LIU Yiling. Study on Doping Electrode without Membrane for Sodium Hypochlorite Preparation and Its Catalytic Performance [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018 (in Chinese).
- [16] 颀亚玮,余文庆,樊丞越,等. 给水处理纳滤膜阻垢剂性能评价[J]. 中国给水排水, 2024, 40(3):23-30.
- XIE Yawei, YU Wenqing, FAN Chengyue, *et al.* Performance evaluation of nanofiltration membranes scale inhibitors for drinking water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(3): 23-30 (in Chinese).

作者简介:颀亚玮(1988-),男,甘肃天水人,博士,副教授,主要从事水处理技术研究。

E-mail:xyw@zjut.edu.cn

收稿日期:2024-01-17

修回日期:2024-03-03

(编辑:李德强)