

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.012

聚电解质强化超滤处理低浓度含 Cd^{2+} 废水效能

李雪¹, 贺黎¹, 冯冲凌², 罗琨¹, 廖兴盛¹, 刘铜¹

(1. 长沙学院 生物与环境工程学院, 湖南 长沙 410022; 2. 中南林业科技大学 环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 分别采用聚丙烯酸(PAA)和壳聚糖(CTS)作为聚电解质,研究了聚电解质强化超滤法处理含 Cd^{2+} 重金属废水,并考察了聚电解质浓度、pH值、共存离子对截留率、渗透性能和膜污染的影响。结果表明,对于 20 mg/L 的含 Cd^{2+} 废水,当 PAA、CTS 浓度为 100 mg/L 时去除效果最好,对 Cd^{2+} 的去除率分别为 90.1% 和 91.6%,对 PAA 和 CTS 的去除率分别为 71.5% 和 69.4%。pH 值对 Cd^{2+} 的去除影响较大, Cd^{2+} 去除率随着 pH 值的上升而明显增加,PAA 和 CTS 的去除率则无明显变化。在 PAA 溶液中,4 种共存离子对 Cd^{2+} 的去除影响程度排序为 $\text{Na}^+ > \text{Cu}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$;在 CTS 溶液中,对 Cd^{2+} 的去除影响程度排序则为 $\text{Cu}^{2+} > \text{Na}^+ \approx \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ 。聚电解质浓度越高,产生的膜污染越严重,而且投加 CTS 的膜污染更严重。

关键词: 聚电解质; 超滤; Cd^{2+} ; 聚丙烯酸(PAA); 壳聚糖(CTS); 膜污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0070-07

Treatment Performance of Ultrafiltration on Low Concentration Wastewater Containing Cd^{2+} Enhanced by Polyelectrolyte

LI Xue¹, HE Li¹, FENG Chong-ling², LUO Kun¹, LIAO Xing-sheng¹, LIU Tong¹

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China; 2. Institute of Environmental Science and Engineering Research, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Ultrafiltration was enhanced by polyelectrolyte for the treatment of heavy metal wastewater containing Cd^{2+} by using polyacrylic acid (PAA) and chitosan (CTS) as polyelectrolytes, and effects of polyelectrolyte concentration, pH value and coexisting ions on rejection rate, permeability and membrane fouling were explored. For the treatment of wastewater with Cd^{2+} concentration of 20 mg/L, the best removal performance was obtained when PAA and CTS concentrations were both 100 mg/L, removal efficiencies of Cd^{2+} were 90.1% and 91.6%, respectively, and removal efficiencies of PAA and CTS were 71.5% and 69.4%, respectively. pH value had an obvious effect on Cd^{2+} removal, and the removal efficiency of Cd^{2+} increased sharply with the increase of pH value. However, no obvious change of PAA and CTS removal efficiencies was observed. In PAA solution, the influence of four coexisting ions on the removal of Cd^{2+} in descending order was $\text{Na}^+ > \text{Cu}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, while the order was $\text{Cu}^{2+} > \text{Na}^+ \approx \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ in CTS solution. Higher polyelectrolyte concentration would lead to more serious

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709285); 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3564、2020JJ4643); 湖南省教育厅科学研究重点项目(17A233); 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(18B406、18B415)

通信作者: 冯冲凌 E-mail: ddukepet@163.com

membrane fouling, and the membrane fouling was more serious when CTS was added.

Key words: polyelectrolyte; ultrafiltration; Cd²⁺; polyacrylic acid (PAA); chitosan (CTS); membrane fouling

随着经济建设的快速发展,由此带来的重金属废水对环境的压力持续增加,成为对环境污染最严重和对人类危害最大的工业废水之一。聚电解质强化超滤(PEUF)是一种将聚电解质与超滤膜分离工艺耦合的新型水处理方法。1985年 Nature 上报道了 Spivakov 等^[1]以水溶性聚电解质键合溶液中的重金属离子,通过收集超滤后重金属的浓缩液,实现对水溶液中微量重金属的测定。在此启发下,国内外学者开发了以水溶性聚电解质-超滤耦合过程来分离水溶液中的重金属,并围绕这一方法展开了大量的研究工作^[2-4]。该方法原理为:在重金属溶液中投加水溶性聚电解质,利用其官能团键合相反电荷离子,再通过截留分子质量小于聚电解质的超滤膜阻挡其通过,从而实现重金属离子和水的分离。该方法可实现目标离子的低压超滤,大大提高了截留效果,克服了传统膜分离法能耗偏高,而超滤膜仅适于分离大分子污染物的局限性^[5]。

本研究采用聚砜超滤膜,分别以聚丙烯酸(PAA)和壳聚糖(CTS)为聚电解质,结合超滤去除废水中的 Cd²⁺,讨论了聚电解质投加量、pH 值、共存离子对去除率、渗透性能和膜污染的影响,同时优化了 PEUF 工艺处理低浓度含 Cd²⁺ 废水的工艺参数,多手段评价了该过程中的膜污染情况。

1 实验材料与方法

1.1 试剂与仪器

聚丙烯酸(PAA)、壳聚糖(CTS)、Cd(NO₃)₂·4H₂O 均为分析纯。

实验采用截留分子质量为 10 ku 的 ZU503-22 型中空纤维超滤膜,纯水通量为 16 L/(m²·h),有效过滤面积为 0.3 m²,膜材质为聚砜,pH 值适用范围为 1~14,温度适用范围为 5~45 ℃。

1.2 实验过程

配制一定浓度的含 Cd²⁺ 模拟废水 3 L,加入单一聚电解质进行充分搅拌,取样待测,静置 30 min 后加入进料罐中。经小型超滤实验机蠕动泵的抽吸(调节操作压力至 0.03 MPa),料液进入超滤膜,经过滤后的浓缩液回流至进料罐与进料液混合并继续过膜,持续至进料罐中只有 400 mL 浓缩液,实验终

止,将进料罐和渗透液端口的液体进行取样,待测。超滤流程示意图见图 1。在超滤实验中,每隔 10 s 读取 1 次渗透通量,每隔 20 s 收集 50 mL 渗透液测定黏度。每组实验完毕,对膜进行清洗至纯水通量恢复到 15 L/(m²·h)。渗透液中 Cd²⁺ 浓度采用原子吸收分光光度法测定,浓度范围为 0~1 mg/L。聚丙烯酸浓度采用浊度法测定^[6],浓度范围为 0~24 mg/L;壳聚糖浓度采用分光光度法测定^[7],浓度范围为 4~40 mg/L。测定样品时,将含有该物质的水样稀释到相应浓度范围内再进行检测。

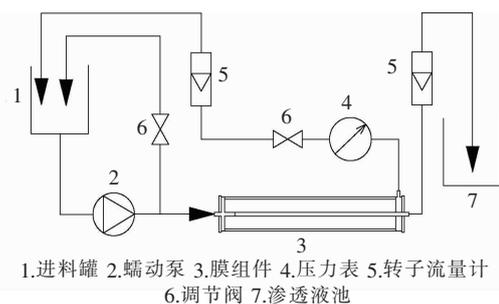


图 1 超滤流程示意

Fig. 1 Flow chart of ultrafiltration

1.3 分析项目及方法

实验中 Cd²⁺、CTS 和 PAA 的去除率 R 根据式(1)计算:

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_p 为渗透液中 Cd²⁺、聚电解质浓度,mg/L; C_f 为进料液中 Cd²⁺、聚电解质浓度,mg/L。

膜污染阻力根据式(2)、(3)计算:

$$J_w = \frac{\Delta P}{\mu_m R_m} \quad (2)$$

$$J = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_f)} \quad (3)$$

式中: J_w 、 J 分别为膜的纯水通量和膜渗透通量,L/(m²·h); R_m 、 R_f 分别为膜固有阻力和污染阻力,m⁻¹; ΔP 为操作压力,Pa; μ_m 、 μ 分别为蒸馏水、渗透液的黏度,Pa·s。

膜阻力测试步骤:先将蒸馏水过超滤膜进样,待渗透通量稳定后,记录纯水通量和压力表读数,并测定蒸馏水的黏度,根据式(2)可得出超滤膜的固有

阻力 R_m ;接着进行料液超滤实验,通过测定超滤过程的渗透通量、压力和对应时刻渗透液的黏度,根据式(3)计算出膜的总阻力($R_m + R_f$),最后计算出膜的污染阻力 R_f 。

2 结果与讨论

2.1 PEUF 处理低浓度含 Cd^{2+} 废水的效能

2.1.1 聚电解质浓度的影响

溶液中聚电解质浓度对 Cd^{2+} 去除率的影响如图2所示($C_{Cd^{2+}} = 20 \text{ mg/L}$ 、 $P = 0.03 \text{ MPa}$)。由于 Cd^{2+} 的粒径远小于膜孔径,当水样中没有聚电解质时,理论上 Cd^{2+} 将全部透过膜孔进入渗透液,而实验数据表明,部分 Cd^{2+} 被膜截留,主要是依靠超滤膜本身的吸附作用。可以看出,随着 PAA/CTS 投加量的增加, Cd^{2+} 去除率先从 40.3% 显著增加到最大值 92.2%/91.6%,然后趋于稳定。当溶液中 PAA 达到 120 mg/L 或 CTS 达到 100 mg/L 时, Cd^{2+} 去除率不再随聚电解质浓度的增加而上升。在低浓度聚电解质溶液中,随着其浓度升高,络合位数量急剧增加,与溶液中游离的 Cd^{2+} 迅速形成 $Cd(\text{II}) - \text{PAA}$ 或 $Cd(\text{II}) - \text{CTS}$ 大分子络合物^[8],该络合物尺寸远大于超滤膜孔径而被截留, Cd^{2+} 截留率明显增加。达到一定浓度后再继续增加聚电解质浓度,络合位数量达到饱和甚至过量, Cd^{2+} 截留率趋于平稳。

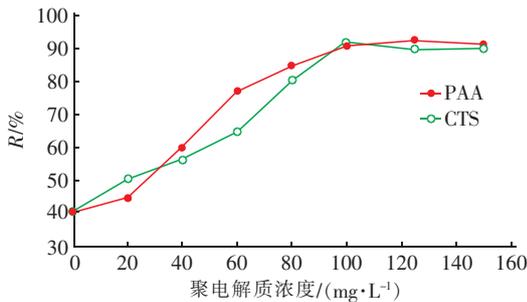


图2 聚电解质浓度对 Cd^{2+} 去除率的影响

Fig.2 Effect of polyelectrolyte concentration on Cd^{2+} removal

如果只考虑 Cd^{2+} 的去除率则不能保证出水不会造成二次污染。因此,聚电解质的去除率也是评价的重要性能之一。聚电解质的添加对其自身去除率的影响见图3($C_{Cd^{2+}} = 20 \text{ mg/L}$ 、 $P = 0.03 \text{ MPa}$)。可以看出,聚电解质去除率随着其添加量的增加先上升后下降,聚电解质浓度升高,稳定的络合物被超滤膜截留,这与 Cd^{2+} 去除率的变化趋势是一致的。此外,聚电解质具有一定分子质量分布,低分子质量部分可能透过超滤膜。随着溶液中聚电解质浓度的

增大,溶液黏度也增大,由于浓差极化和膜污染的影响,部分低分子质量的聚电解质单体可以有效地吸附在膜表面,使得渗透液中浓度减小。

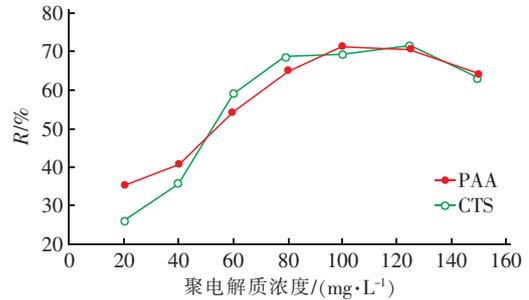


图3 聚电解质浓度对超滤膜去除聚电解质的影响

Fig.3 Effect of polyelectrolyte concentration on its removal

2.1.2 pH 值的影响

pH 值对 Cd^{2+} 去除率的影响见图4($C_{Cd^{2+}} = 20 \text{ mg/L}$ 、 $C_{CTS} = 100 \text{ mg/L}$ 、 $C_{PAA} = 100 \text{ mg/L}$ 、 $P = 0.03 \text{ MPa}$)。

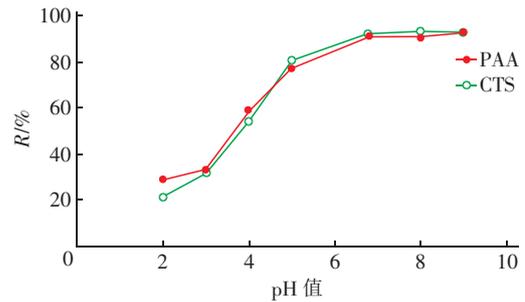


图4 pH 值对 Cd^{2+} 去除率的影响

Fig.4 Effect of pH on removal of Cd^{2+}

由图4可以看出, Cd^{2+} 去除率随着溶液 pH 值的升高而升高。当 pH 值在 2~9 范围内时,添加 PAA 实验组的 Cd^{2+} 去除率从 27.3% 增加到 92.2%,添加 CTS 实验组的 Cd^{2+} 去除率从 20.1% 增加到 91.4%,增幅很大。无论是胶团强化超滤(MEUF)还是 PEUF,pH 值直接影响表面活性剂/聚电解质与金属离子的键合行为,改变金属离子的超滤截留特性^[9]。当 pH 值较低时,溶液中含有大量的 H^+ ,络合位质子化程度较高,与游离的金属阳离子存在较强的竞争,导致 Cd^{2+} 截留率较低。随着 pH 值的增加, H^+ 数量减小,游离络合位浓度升高,与金属离子的络合程度增大,金属离子截留率升高^[10]。PAA 在酸性条件下对 Cd^{2+} 的去除效率非常低,大量 H^+ 的存在导致聚丙烯酸难以电离形成 COO^- 与 Cd^{2+} 反应,导致 Cd^{2+} 去除率持续偏低。CTS 与金属离子的键合主要是通过分子中的羟

基、胺基等活性基团的络合作用来实现的,在强酸性环境中,一方面, $-\text{NH}_2$ 生成了带正电荷的 NH_3^+ ,降低了一 NH_2 的配位能力,而且同电荷离子的排斥作用阻碍了 Cd^{2+} 向 CTS 分子链靠近;另一方面,溶液中大量的 H^+ 会在 NH_3^+ 周围聚集,使得 CTS 大分子趋于卷曲,从而降低对 Cd^{2+} 的键合^[11]。

值得注意的是,pH 值为 2 时渗透通量在 0.5 min 内迅速由 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降至 $5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,pH 值为 3 时则由 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降至 $7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,整个过程膜通量衰减率达到 70% 以上,膜污染较严重。这可能是由于在较强酸性环境中,聚电解质分子中大多数羧酸基团与氢离子结合,使聚电解质电荷减少甚至失去电性,分子间和分子内几乎没有斥力,分子链柔软而易于形成胶团结构,从而堵塞膜孔而造成膜污染^[12]。当 pH 值超过 8 时,可以观察到溶液中有少量沉淀析出,因此渗透液中游离的 Cd^{2+} 同样减少。

pH 值对电解质去除率的影响如图 5 所示($C_{\text{Cd}^{2+}} = 20 \text{ mg/L}$ 、 $C_{\text{CTS}} = 100 \text{ mg/L}$ 、 $C_{\text{PAA}} = 100 \text{ mg/L}$ 、 $P = 0.03 \text{ MPa}$)。可以看出,随着 pH 值的升高,去除率呈波动变化,但变化趋势没有 Cd^{2+} 去除率那么明显。当 pH 值为 3 时,对 PAA 和 CTS 的去除率达到最高值,分别为 80.0% 和 73.6%。在低 pH 值的溶液中,无论是 PAA 还是 CTS,去除率相对来说比较高,这与 Cd^{2+} 去除率的变化趋势相反,这是因为大量的 H^+ 和聚电解质分子中的羧酸基团结合,使聚电解质电荷减少甚至失去电性而易于形成胶团结构,胶团粒径大于膜孔,不容易透过超滤膜^[13-14]。

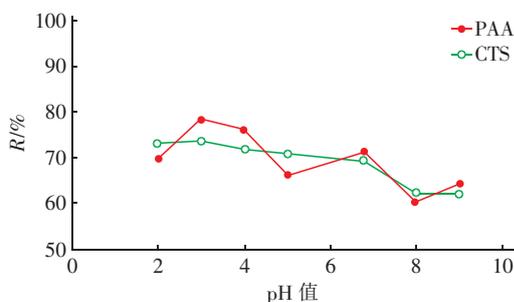


图 5 pH 值对聚电解质去除率的影响

Fig. 5 Effect of pH on removal of polyelectrolyte

2.1.3 共存离子的影响

在实际废水中,不仅含有目标离子,往往存在多种其他离子,某些离子强度的增加,迫使双电层压缩^[15],从而减弱目标金属离子与聚电解质之间的静

电作用,这在一定程度上会影响络合剂的处理效能。因此,本实验分别选取 10 mg/L 的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 加入 20 mg/L 的 Cd^{2+} ,聚电解质浓度为 100 mg/L 。超滤后,在 PAA 溶液中共存 10 mg/L 的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 时,对 Cd^{2+} 的去除率分别为 62.5%、89.2%、74.4%、67.3%;在 CTS 溶液中,共存上述离子时,对 Cd^{2+} 的去除率分别为 69.7%、88.4%、69.8%、62.8%。

可以看出,在 PAA 溶液中,4 种离子对 Cd^{2+} 去除率的影响程度排序为 $\text{Na}^+ > \text{Cu}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$;在 CTS 溶液中,4 种离子对 Cd^{2+} 去除率的影响程度排序为 $\text{Cu}^{2+} > \text{Na}^+ \approx \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ 。鉴于离子强度对聚电解质有较大的影响,而这些离子在实际废水处理过程中又不可避免地存在,因此,在评价聚电解质的处理能力时,要适当考虑离子强度的影响,以实现目标离子的有效去除。

2.2 PEUF 处理低浓度含 Cd^{2+} 废水的膜污染

2.2.1 聚电解质浓度的影响

本实验每 10 s 记录 1 次渗透通量读数,每 30 s 测定 1 次膜污染阻力。图 6 反映了聚电解质 CTS 浓度对渗透通量和膜污染阻力的影响($C_{\text{Cd}^{2+}} = 20 \text{ mg/L}$ 、 $P = 0.03 \text{ MPa}$);图 7 反映了聚电解质 PAA 浓度对渗透通量和膜污染阻力的影响。可以看出,无论是 CTS 还是 PAA,随着超滤时间的增加,渗透通量的变化趋势是相似的,都是在初期 ($< 60 \text{ s}$) 有一个较快的下降过程,然后下降变慢,并逐步趋于稳定,反应末期则渗透通量又开始快速下降。在超滤初期,聚电解质分子在被超滤膜截留下来的过程中会逐步沉积在膜表面,使得膜表面及邻近区域的浓度大于进料液中的浓度而形成浓度梯度,阻碍进料液通过超滤膜。聚电解质的浓度越高则渗透通量衰减越明显。本实验中造成膜污染的物质主要是大分子的聚电解质。在超滤过程中,CTS 溶液引起渗透通量的减小较为明显,以 100 mg/L 为例,渗透通量从初始的 $14.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 下降到 $6.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而 PAA 溶液组的渗透通量从 $14.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 下降到 $10.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。随着反应的进行,膜表面的 CTS 浓度逐渐升高,导致膜孔变小甚至堵塞,使膜污染阻力和浓差极化阻力增大,膜渗透通量明显降低。PAA 超滤过程中渗透通量随时间变化较小,由于所形成的络合物对浓差极化的贡献不同,所引起的膜污染也就不同^[16-18]。

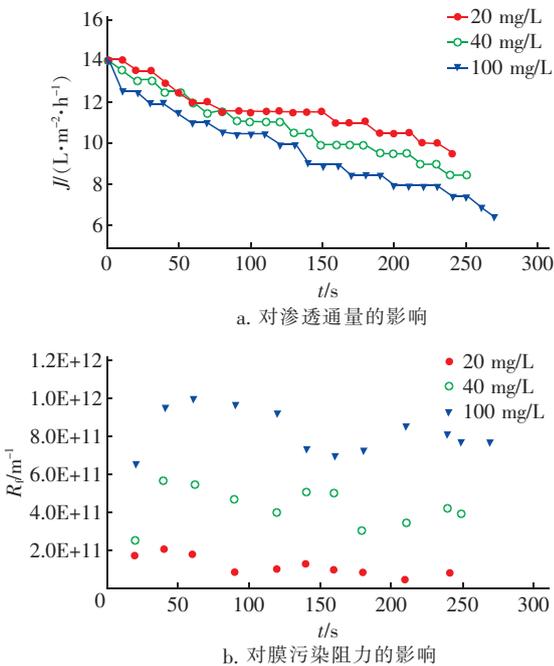


图 6 CTS 浓度对渗透通量和膜污染阻力的影响
Fig. 6 Effect of CTS concentration on permeation flux and

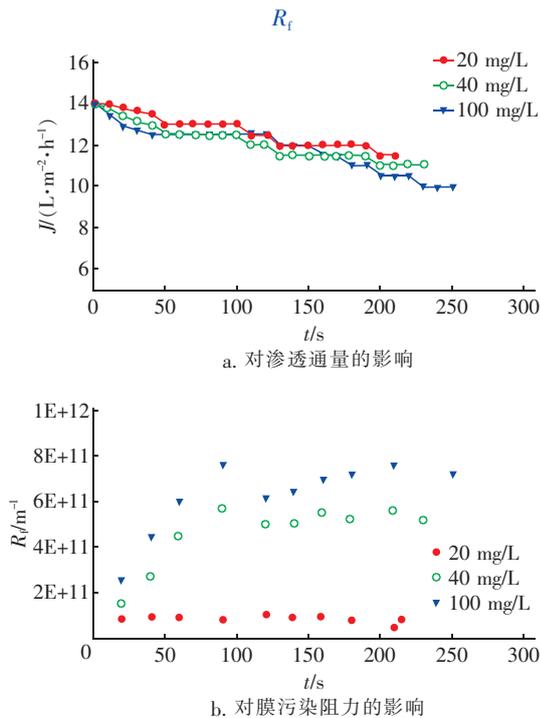


图 7 PAA 浓度对渗透通量和膜污染阻力的影响
Fig. 7 Effect of PAA concentration on permeation flux and

随着聚电解质用量的增加, PEUF 的渗透通量逐渐减小, 膜污染阻力随之增加。在一组 PEUF 实验中, 膜污染阻力变化过程分为 3 个阶段: 首先急剧

上升, 然后小幅度下降, 最后再上升, 在 40 mg/L 和 100 mg/L 的两组实验中表现得尤为明显。这是因为, 聚电解质在膜面附近区域由于浓差极化而开始聚集, 其直径与膜孔径相近, 容易堵塞在膜孔中, 引起第 1 个阶段膜渗透通量的迅速下降和膜污染阻力的迅速增大; 随着反应的进行, 当膜面聚电解质浓度增加, 逐渐生成直径比膜孔径大的聚集体, 此时通过筛分原理被膜截留, 膜渗透通量和膜污染阻力维持在一个较平稳阶段, 并没有随着聚集体的继续形成而加剧变化; 反应进行到最后, 更多的聚集体形成, 膜的渗透通量和膜污染阻力开始了第 3 阶段的迅速上升。100 mg/L 的 CTS 溶液组, 膜污染阻力最高达到 $1.01 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ (60 s), 同一浓度的 PAA 溶液组, 膜污染阻力最高可达 $7.68 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ (90 s)。

2.2.2 滤饼层的微观结构

图 8 是扫描电镜下放大 3 000 倍的膜表面照片。可以看出, 新的未被污染的膜表面平整, 有大量均匀的孔隙结构。而受到污染的膜表面有块状物质, 堵塞了有效的膜表面孔隙。

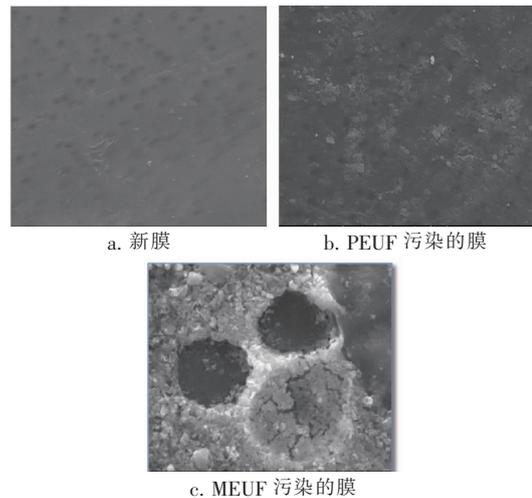


图 8 膜表面扫描电镜照片

Fig. 8 SEM images of surfaces of clean membrane and fouled membrane

图 8(b)、(c)是 Cd²⁺ 去除率相近且在相同控制条件下的 PEUF 和 MEUF 实验后的膜片。结合对比两组实验的渗透通量, 整个超滤过程中, 采用 PAA 的渗透通量下降了不到 30%, 采用 CTS 的渗透通量下降了 50% 左右; 而同一台设备在相同操作压力下, 投加十二烷基硫酸钠的 MEUF, 渗透通量下降了 70% ~ 80%。由此可见, PEUF 的膜面污染物堆积较 MEUF 过程少, 渗透通量的衰减也较少。

3 结论

PEUF对低浓度含Cd²⁺废水的处理效果较显著。向Cd²⁺浓度为20 mg/L的废水投加100 mg/L的PAA或者CTS,超滤后对Cd²⁺的去除率分别可达90.1%和91.6%,对PAA和CTS的去除率分别可达71.5%和69.4%,且产生的膜污染较小,膜渗透性佳,较经济适宜。但该工艺不适于处理未经预处理的强酸性废水,强酸性条件下,对Cd²⁺的去除率明显下降。共存离子对该工艺影响较大,添加PAA的实验组,以Na⁺的影响最为显著;添加CTS的实验组,以Cu²⁺的影响最为显著。总体比较,添加PAA的PEUF膜通量衰减更小,膜污染阻力较低。

参考文献:

- [1] SPIVAKOV B Y, GECKELER K E, BAYER E. Liquid-phase polymer-based retention—the separation of metals by ultrafiltration on polychelators[J]. *Nature*, 1985, 315(6017):313–315.
- [2] LI X, HE S B, FENG C L, *et al.* Non-competitive and competitive adsorption of Pb²⁺, Cd²⁺ and Zn²⁺ ions onto SDS in process of micellar-enhanced ultrafiltration[J]. *Sustainability*, 2018, 10(1):92.
- [3] 沈悦啸, 王利政, 莫颖慧, 等. 微滤、超滤、纳滤和反渗透技术的最新进展[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(22):1–5.
SHEN Yue Xiao, WANG Lizheng, MO Yinghui, *et al.* State-of-art of microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis technologies[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(22):1–5 (in Chinese).
- [4] HUANG Y, DU J, ZHANG Y, *et al.* Batch process of polymer-enhanced ultrafiltration to recover mercury(II) from wastewater[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 514:229–240.
- [5] KRYVORUCHKO A P, YURLOVA L, KORNILOVICH B. Purification of water containing heavy metals by chelating-enhanced ultrafiltration[J]. *Desalination*, 2002, 144(1):243–248.
- [6] 梁兆燕, 朱越, 程终发, 等. 浊度法测定循环水中聚丙烯酸[J]. *工业水处理*, 2014, 34(4):76–78.
LIANG Zhaoyan, ZHU Yue, CHENG Zhongfa, *et al.* Determination of polyacrylic acid in circulating water by turbidity method[J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(4):76–78 (in Chinese).
- [7] 张雪娇, 齐暑华, 刘春叶, 等. 茚三酮显色法测定壳聚糖含量[J]. *化学研究与应用*, 2015, 27(3):407–411.
ZHANG Xuejiao, QI Shuhua, LIU Chunye, *et al.* Determination of chitosan with ninhydrin coloration method[J]. *Chemical Research and Application*, 2015, 27(3):407–411 (in Chinese).
- [8] 曾坚贤, 郑立锋, 孙霞辉, 等. 聚合物强化超滤技术分离Hg²⁺和Cd²⁺的研究[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(6):780–785.
ZENG Jianxian, ZHENG Lifeng, SUN Xiahui, *et al.* Separation of Hg²⁺ and Cd²⁺ by using polymer-enhanced ultrafiltration[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(6):780–785 (in Chinese).
- [9] LI X, ZENG G M, HUANG J H, *et al.* Simultaneous removal of cadmium ions and phenol with MEUF using SDS and mixed surfactants[J]. *Desalination*, 2011, 276(1/3):136–141.
- [10] 牟雨希. 水溶性聚合物强化超滤工艺对原水中镉离子的去除研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
MU Yuxi. Removal of Cadmium in Raw Water by Enhanced Water-soluble Polymer Ultrafiltration Process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [11] 李艳玲, 吴立波, 王薇, 等. 聚合物强化超滤处理含铜废水[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(4):695–698.
LI Yanling, WU Libo, WANG Wei, *et al.* Removal of copper ions from aqueous solutions using polymer-enhanced ultrafiltration[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(4):695–698 (in Chinese).
- [12] DASGUPTA J, SIKDER J, MANDAL D. Modeling and optimization of polymer enhanced ultrafiltration using hybrid neural-genetic algorithm based evolutionary approach[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 55:108–126.
- [13] 廖兴盛, 李雪, 曾光明, 等. 胶团强化超滤法同时去除废水中Cd²⁺和亚甲基蓝[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(7):60–63.
LIAO Xingsheng, LI Xue, ZENG Guangming, *et al.* Simultaneous removal of Cd²⁺ and methylene blue by micellar enhanced ultrafiltration[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(7):60–63 (in Chinese).
- [14] LLANOS J, PEREZ A, CANIZARES P. Copper recovery by polymer enhanced ultrafiltration (PEUF) and

(下转第83页)