

SDS、SDBS 胶团强化超滤 Cu^{2+} 的比较

牛菁^{1,2}, 曾光明^{1,2*}, 黄瑾辉^{1,2}, 方瑶瑶³, 李雪^{1,2}, 周春飞^{1,2}, 梁钟璇^{1,2}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082; 3. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:采用模拟含 Cu^{2+} 废水, 以阴离子表面活性剂 SDS 和 SDBS 胶团强化超滤分离 Cu^{2+} (Cu^{2+} 固定为 0.6 mmol/L), 通过对渗透通量、渗透浓度、去除率、富集率的比较, 从而得出 SDS、SDBS 分离效果的优劣. 结果表明, 添加 SDS 的渗透通量始终高于 SDBS [其中 SDS 平均渗透通量为 $29.92 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 而 SDBS 只有 $16.55 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 渗透浓度始终低于 SDBS, 当渗透液 Cu^{2+} 浓度接近为 0 时, SDBS、SDS 所需浓度分别为 2 mmol/L 和 6 mmol/L. SDS 的 Cu^{2+} 去除率和平均富集率高于 SDBS (SDS 平均去除率为 85.06%, 平均富集率为 4.18; SDBS 对应值分别为 69.05% 和 4.05). 此外, SDS 自身的平均富集率也高于 SDBS (SDS 为 3.89, SDBS 为 3.13). 由此可见, SDS 比 SDBS 更适合去除 Cu^{2+} .

关键词:胶团强化超滤 (MEUF); 十二烷基硫酸钠 (SDS); 十二烷基苯磺酸钠 (SDBS)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-2950-06

Comparison for Removing Cu^{2+} by Micellar-Enhanced Ultrafiltration with SDS and SDBS

NIU Jing^{1,2}, ZENG Guang-ming^{1,2}, HUANG Jin-hui^{1,2}, FANG Yao-yao³, LI Xue^{1,2}, ZHOU Chun-fei^{1,2}, LIANG Zhong-xuan^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Micellar-enhanced ultrafiltration was used to remove Cu^{2+} (Cu^{2+} was fixed at 0.6 mmol/L) from simulant aqueous solutions with SDS and SDBS as anionic surfactants respectively. Compare SDS and SDBS separation through permeate flux, permeate concentration, rejection and enrichment ratio. Experimental results show that the average permeate flux with SDS is always higher than that with SDBS [the average flux with SDS is $29.92 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, while that with SDBS is only $16.55 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], the permeate concentration of SDS is always lower than that with SDBS. When the permeate concentration of Cu^{2+} close to zero, 2 mmol/L and 6 mmol/L of SDBS and SDS are respectively required. Cu^{2+} rejection and enrichment ratio with SDS are always higher than those with SDBS (the average Cu^{2+} rejection and enrichment ratio with SDS are respectively 85.06% and 4.18, while those with SDBS are 69.05% and 4.05 respectively). Besides, the average enrichment ratio of SDS is also higher than that of SDBS (SDS is up to 3.89, while SDBS is 3.13). Therefore, SDS is more suitable than the SDBS for removal of Cu^{2+} .

Key words: micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF); sodium dodecyl sulfate (SDS); sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS)

胶团强化超滤 (micellar-enhanced ultrafiltration, MEUF) 是 20 世纪 80 年代兴起的, 基于表面活性剂独特的双亲分子结构的特性实现分离的新方法^[1,2]. 适宜的表面活性剂加入废水并调节其浓度形成胶团时, 多价的金属阳离子吸附或键合在阴离子表面活性剂的负胶团表面, 有机溶质倾向在胶团内部增溶或溶解, 胶团体积随之增大^[2-5]. 选用适宜的超滤膜过滤这些废水溶液, 便能有效截留胶团络合物, 实现重金属离子和有机物的分离. 而且 MEUF 具有能耗低、可多级实现高分离率、无毒、分离剂 (表面活性剂) 可生物降解和可同时去除非离子有机物和荷电离子等优点^[1,2].

MEUF 可以截留包括 Au^+ 、 Hg^+ 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、

Cd^{2+} 、 Cr^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 等在内的几乎所有的重金属离子和 NO_3^- 、 ClO_4^- 等酸根离子以及有机物^[6-16]. 但是比较不同类型的表面活性剂超滤去除重金属离子效果的研究鲜见报道.

本实验采用中空纤维超滤膜, 选取 2 种价廉易得不同类型的阴离子表面活性剂——十二烷基硫酸钠 (sodium dodecyl sulfate, SDS) 和十二烷基苯磺

收稿日期: 2010-01-06; 修订日期: 2010-04-08

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT0719); 国家自然科学基金项目 (50608028); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NECT-08); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07212-001-02)

作者简介: 牛菁 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为超滤在废水中的应用, E-mail: niuchen96@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zgming@hnu.cn

酸钠 (sodium dodecyl benzene sulfate, SDBS) 对 Cu^{2+} 进行超滤, 考察表面活性剂胶团特性的变化规律, 通过比较渗透通量、渗透浓度、去除率和富集率, 从而得到更适合处理重金属离子的表面活性剂以及剂量。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验采用的超滤膜为大连屹东膜工程设备有限公司生产的 JM1812-1 型中空纤维卷式超滤膜, 主要技术指标见表 1。

1.2 实验药品

硫酸铜 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 分析纯, 上海亭新化工试剂厂; SDS, SDBS, 分析纯, 天津密欧化学试剂开发中心, SDS 和 SDBS 的物化性质见表 2。去离子水, 美国 Labconco 公司生产的 90007-03 型纯水仪。

表 1 膜组件性能参数

Table 1 Characteristics of the used membrane module

外形尺寸 ($\phi \times L$)/mm	截留相对 分子质量	膜面积 /m ²	pH	膜材料	工作压力 /MPa	过滤速率 /L·(m ² ·h) ⁻¹	膜外径 /mm	膜内径 /mm
50 × 386	6 000	0.4	1 ~ 14	聚醚砜	0.15	0.5 ~ 5	1.2	0.8

表 2 SDS 和 SDBS 的物化性质

Table 2 Physical and chemical properties of SDS and SDBS

项目	SDS	SDBS
类型	硫酸酯盐型	磺酸盐型
化学式	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$	$\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S}$
临界胶团浓度 (CMC)	6.8 mmol/L	1.2 mmol/L
性质	良好的乳化、发泡性能, 去污力比肥皂好, 中性且耐硬水, 因此它们广泛用于家庭洗涤剂, 牙膏发泡剂	中性, 对水硬度较敏感, 不易氧化, 起泡力强, 去污力高, 易与各种助剂复配, 成本较低, 合成工艺成熟, 应用领域广泛
分子结构	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{O}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{O}}{\text{S}}}-\text{ONa}$	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_3\text{Na}$

1.3 实验方法

采用 SDS 和 SDBS 超滤去除含 Cu^{2+} 模拟废水, 控制压力为 0.14 MPa, 实验全程在室温下进行, 操作流程如图 1。配置 2 L 模拟废水: 称取一定量的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 然后添加实验所需的 SDS 或 SDBS, 用去离子水定容至 2 L, 搅拌均匀, 并静置待吸附完全后进行超滤, 浓缩液回流至余 500 mL 时记录渗透通量, 并接取渗透液和浓缩液水样各 100 mL。过滤完毕, 先通 5 L 自来水冲洗, 再先后通入 3 L 稀硝酸和氢氧化钠溶液清洗, 然后通入蒸馏水润洗, 最后通入去离子水测纯水通量, 确定纯水通量与新膜纯水通量相符, 可以恢复至 20 L/h。

测定渗透通量及渗透液和浓缩液中 SDS、SDBS、 Cu^{2+} 浓度。 Cu^{2+} 测定遵照 GB 7475, 采用原子吸收分光光度法 (AA700 原子吸收分光光度仪, 美国 PE 公司); SDS 和 SDBS 的测定遵照 GB/T 7494, 采用亚甲基蓝分光光度法 (UV-2550 可见紫外分光光度计, 日本岛津公司), 测量波长为 652 nm。

2 结果与讨论

实验中通过比较渗透通量、渗透浓度、去除率和

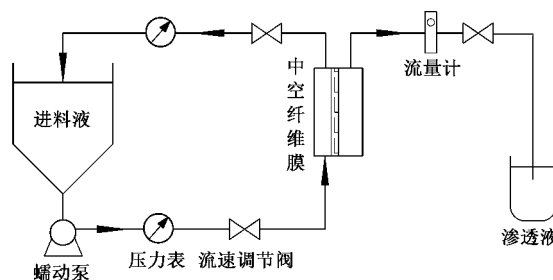


图 1 超滤操作流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of continuous ultrafiltration

富集率来评价分离效果的优劣:

$$\text{渗透通量 } J_i = \frac{Q_i}{A}$$

$$\text{去除率 } R = \frac{c_i - c_p}{c_i} \times 100\%$$

$$\text{富集率 } E = \frac{c_r}{c_i}$$

式中, J_i 为渗透通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; Q_i 为流量, L/h ; A 为膜面积, m^2 ; c_i 、 c_p 和 c_r 分别代表进料液、渗透液和浓缩液中表面活性剂或 Cu^{2+} 浓度, mmol/L 。

2.1 渗透通量比较

添加 SDS 的渗透通量高于 SDBS,而且随浓度的增加,差距有增大的趋势,如图 2 所示,SDS 的渗透通量有略微上扬的趋势.虽然质量传递模型表明渗透速率随料液浓度的增加按指数规律下降,但此处 SDS 胶团超滤的体系不符合质量传递模型的假设,主要是因为 SDS 胶团的形成是动态的^[17,18],随 SDS 浓度等因素而变化.SDS 浓度低于 CMC (6.8 mmol/L) 时不易形成胶团,从而很难在膜面沉积而堵塞于膜孔中,浓差极化作用和膜污染被显著削弱,没有引起通量的下降.当 SDS 浓度高时,SDS 会由球状变成棒状而容易透过膜^[19],导致通量有所微升.而 SDBS 的渗透通量急剧下降,其中 SDS 平均渗透通量为 $29.92 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,而 SDBS 只有 $16.55 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.当 SDBS 从 2 mmol/L 增加到 10 mmol/L,渗透通量则由 $25.42 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 下降为 $10.65 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,下降率高达 58.10%.因为 SDBS 的 CMC (1.2 mmol/L) 小于 SDS 的 CMC (6.8 mmol/L),SDBS (2 mmol/L) 时就能形成胶团,从而导致膜堵塞,这就需要深层次的清洗,降低膜污染.

随着超滤时间的推移,渗透通量随着超滤的进行都有不同程度的减小,这是由于:①采用的是截留液回流至进料液的超滤方式,因此随着超滤时间的递增,渗透液体积随之增加,进料液的体积不断减少,同时进料液中 SDS、SDBS 和 Cu^{2+} 浓度不断增加,造成溶液黏度不断增加;②随着时间的推移,渗透液体积增加,越来越多的 SDS 和 SDBS 胶团沉积在膜表面,堵塞膜孔,膜污染程度不断增加.但从图 3 可以看出,同为 2 mmol/L 时,SDS 在超滤过程中渗透通量始终高于 SDBS,SDBS 的渗透通量下降幅度高,这可能是因为 SDBS 的 CMC (1.2 mmol/L),容易形成胶团,表面活性比 SDS 强,易吸附在膜表面,使膜遭受污染而加大了渗透通量的降低,从而造成产水率低下.所以仅从渗透通量方面考虑,SDS 比 SDBS 更适宜于处理含 Cu^{2+} 废水.

2.2 渗透液的浓度比较

低浓度 SDBS 时渗透液中 Cu^{2+} 浓度接近为 0,而与此相对应的 SDS 超滤中仍有部分渗透 Cu^{2+} ,如图 4 所示.SDS 浓度为 2 mmol/L 时, Cu^{2+} 浓度由 0.6 mmol/L 降为 0.137 mmol/L,下降了 77.2%;而 SDBS 中 Cu^{2+} 浓度接近为 0,几乎全部被截留.这是由于 SDBS 的 CMC (1.2 mmol/L) 低于 SDS 的 CMC (6.8 mmol/L),表面活性剂浓度低于 CMC 时,由于无法形成胶团,因此不能有效截留溶液中的金属离子.不

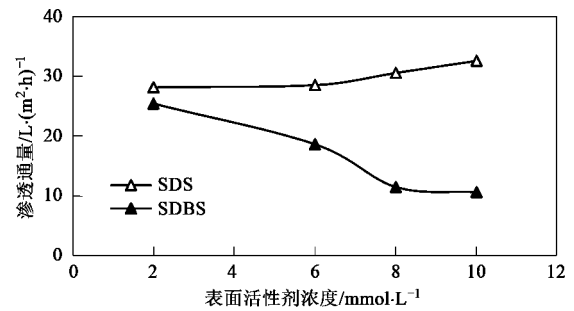


图 2 渗透通量的比较

Fig. 2 Comparison of permeate flux

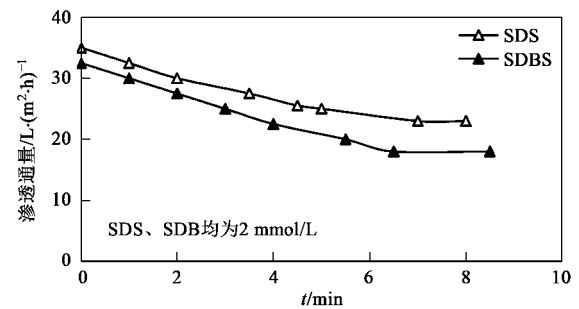


图 3 渗透通量随操作时间的比较

Fig. 3 Comparison of permeate flux with operating time

过可以看出当溶液中 SDS 浓度为 2 mmol/L,远低于 CMC 时对 Cu^{2+} 已有较大的去除率.可能是由于:① SDS、SDBS 单体在低于 CMC 时就生成了半胶团,半胶团吸附了 Cu^{2+} 并被膜截留,这样看来 SDS 临界胶团浓度可能是一个浓度范围而不是一个固定的值;②浓差极化作用使膜附近溶液的 SDS 浓度比主体溶液中高,虽然主体溶液中 SDS 浓度未达到 CMC,但膜附近溶液的 SDS 浓度已经达到或接近了 CMC,形成胶团从而吸附 Cu^{2+} ;③由于截留液回流至进料液的操作方式,截留液的浓度远高于进料液,高于 CMC,从而形成胶团,获得较高的去除率^[15-17].但从图 4 可以看到,随着 SDS、SDBS 浓度的增加,渗透液中 Cu^{2+} 浓度减小趋势变缓,去除率趋于稳定.出于经济的考虑,单纯提高表面活性剂浓度是没有必要的.由 SDBS 上升为 10 mmol/L 时渗透液 Cu^{2+} 浓度明显上升可以看出,这同样是由于 SDBS 浓度高时,SDBS 会由球状变成棒状而容易透过膜^[19],减小了对 Cu^{2+} 的截留.渗透液表面活性剂浓度均随进料液表面活性剂浓度的增加而升高,渗透液 SDS 浓度始终低于 SDBS,如图 5 所示.这说明 SDS 形成了更多的胶团用于去除 Cu^{2+} ,渗透液中表面活性剂含量低,这对于环境的二次污染就小.

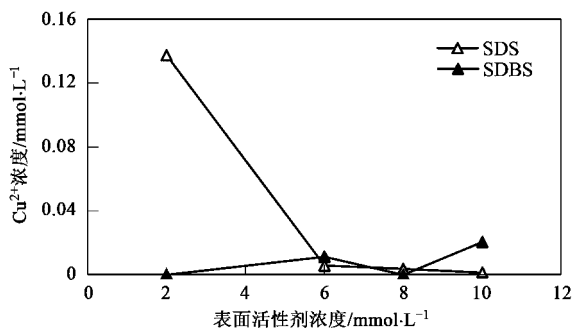
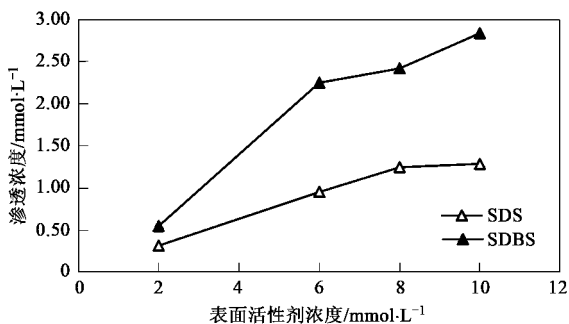
图 4 渗透液 Cu^{2+} 浓度的比较Fig. 4 Comparison of permeate concentration of Cu^{2+} 

图 5 渗透液表面活性剂浓度的比较

Fig. 5 Comparison of permeate concentration of SDS and SDBS

2.3 去除率比较

Cu^{2+} 去除率均随着进料液中表面活性剂浓度的升高而增加. SDBS 为低浓度 (2 mmol/L) 时对 Cu^{2+} 就已经能高效去除了, 去除率高达 98.13%, 而此时 SDS 对 Cu^{2+} 的去除率为 77.10%, 如图 6 所示. 这是因为 SDBS 的 CMC 低于 SDS, 在低浓度时就形成了胶团, 有效地截留了 Cu^{2+} . 当 SDS 从 2 mmol/L 增加到 6 mmol/L 时, Cu^{2+} 去除率从 77.10% 上升到 99.03%; 当进水 SDS 浓度高于 6 mmol/L, Cu^{2+} 的去除率趋于稳定. 导致此现象的原因也同样是半胶团的生成和浓差极化作用使 Cu^{2+} 在低于 CMC 时就有较大去除率, 随着 SDS 胶团的增多, Cu^{2+} 在胶团表面的吸附逐渐达到平衡, 去除率逐渐稳定.

从图 7 可以看出, SDS 的去除率始终高于 SDBS (SDS 平均去除率为 85.06%, SDBS 为 69.05%), 对环境造成的二次污染也小. SDS、SDBS 去除率一直趋于稳定. 这是因为虽然进料液中 SDS 不断增加, 溶液中 SDS 胶团数量不断增加, 但一部分由球状变为棒状透过膜而进入渗透液, 使得超滤膜对胶团的有效截留也一定, 因此进料液 SDS、SDBS 浓度对其

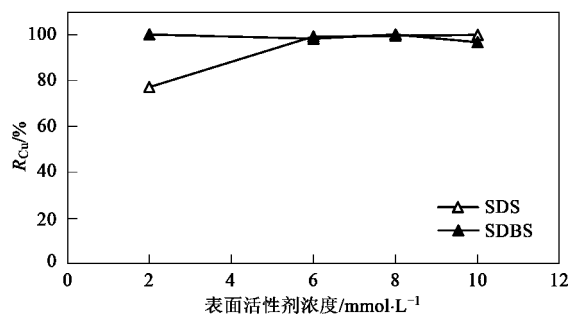
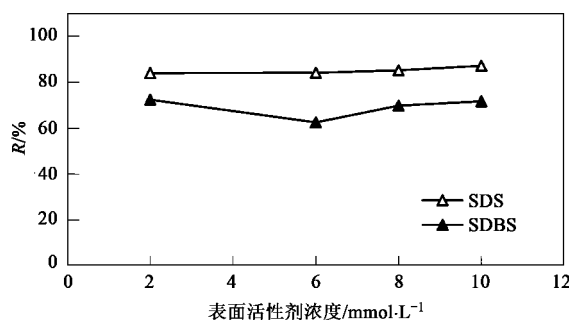
图 6 Cu^{2+} 去除率的比较Fig. 6 Comparison of rejection ratio of Cu^{2+} 

图 7 表面活性剂去除率的比较

Fig. 7 Comparison of rejection ratio of SDS and SDBS

自身去除率的影响不大.

综合图 6, 图 7 可以看出, 固定 Cu^{2+} 浓度为 0.6 mmol/L, 依次增大 SDS、SDBS, 即 SDS、SDBS 与 Cu^{2+} 比例依次增大, 当 SDS 为 6 mmol/L, Cu^{2+} 和 SDS 去除率分别为 99.03% 和 84.05%, 此时 $\text{SDS}/\text{Cu}^{2+} = 10$. 当 SDBS 为 2 mmol/L 时, Cu^{2+} 和 SDBS 去除率分别为 99.89% 和 72.33%, 此时 $\text{SDBS}/\text{Cu}^{2+} = 3.33$. 这个适宜比低于 SDS 与 Cu^{2+} 的比值, Cu^{2+} 去除率均很高, 而 SDBS 去除率却较低, 对环境造成二次污染. 所以去除 0.6 mmol/L 的 Cu^{2+} , 只要添加 6 mmol/L 的 SDS, 即 $\text{SDS}/\text{Cu}^{2+} = 10$, 满足废水去除标准.

2.4 富集率比较

对 Cu^{2+} 的平均富集率 SDS 高于 SDBS, 其中 SDS 为 4.18, SDBS 为 4.05, 如图 8 所示. 根据富集率的定义, 截留液中 Cu^{2+} 浓度与富集率成正比, 表明截留液 Cu^{2+} 浓度和 Cu^{2+} 富集率的变化趋势一致. 以进料液 SDS 浓度 6 mmol/L 为分界点, 渗透液 Cu^{2+} 浓度先上升然后少量下降, 这与图 4 所显示的渗透液 Cu^{2+} 浓度相对应. 随着进料液 SDS 浓度增加, 渗透液 Cu^{2+} 浓度一直是减少的. 这一结果也从另一个角度证实了上面的结论, 即一些未被 SDS 胶团吸附的 Cu^{2+} 吸附在膜面或者膜孔中, 渗透液

Cu^{2+} 浓度不能真实表征溶液中未被 SDS 胶团吸附的 Cu^{2+} 浓度.

SDS 的富集率始终高于 SDBS 的富集率,其中 SDS 平均富集率 3.89, SDBS 为 3.13. 对照图 9 与表 3 可以看出, SDS 和 SDBS 的富集率与进料液和截留液体积比 V_f/V_r 非常接近, SDS 的富集率与 V_f/V_r 更为接近. 这是因为膜的操作方式是截留液回流至进料液,在超滤过程中,只有水和很少一部分 SDS 通过超滤膜进入渗透液,几乎所有的 SDS 胶团都被超滤膜截留进入到截留液中^[16,20],渗透液中 SDS 与截留液中 SDS 相比非常小,基本可忽略不计,因此根据物料守恒公式, SDS 富集率基本等于进料液和截留液体积之比,但始终低于进料液与截留液体积之比.

综合图 8、图 9 可以看出, Cu^{2+} 与 SDS 富集率曲线变化趋势一致. 随进料液 SDS 的增加, Cu^{2+} 富集率缓慢上升;当进料液 SDS 浓度超过 6 mmol/L 时,富集率稍微下降,因为富集率与截留液中 Cu^{2+} 浓度成正比. 但 SDS、 Cu^{2+} 富集率始终低于进料液与截留液体积之比. 在进料液 SDS 浓度为 6 mmol/L 时 SDS 富集率达到最大值 4.36, 与 Cu^{2+} 富集率 4.96 相比有一定差距. 这说明有相当一部分 Cu^{2+} 未能被 SDS 胶团吸附,从而造成二者富集率的差异.

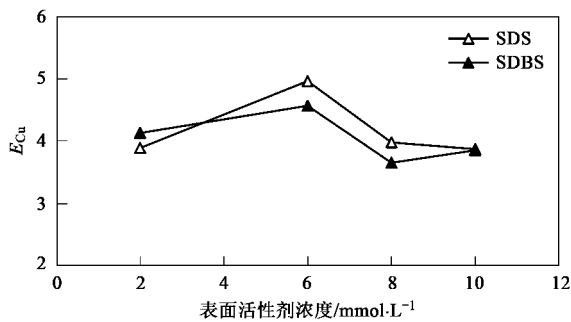


图 8 Cu^{2+} 富集率的比较

Fig. 8 Comparison of enrichment ratio of Cu^{2+}

表 3 富集率 E 和 SDS、SDBS 的 V_f/V_r
Table 3 Enrichment and V_f/V_r of SDS and SDBS

项目	浓度 / mmol·L ⁻¹			
	2	6	8	10
V_f/V_r (SDS)	5.00	5.26	4.21	4.08
E_{SDS}	4.15	4.36	3.53	3.51
$E_{\text{Cu-SDS}}$	3.89	4.96	3.98	3.87
V_f/V_r (SDBS)	4.35	4.88	3.85	4.17
E_{SDBS}	3.26	3.27	2.85	3.12
$E_{\text{Cu-SDBS}}$	4.13	4.57	3.65	3.86

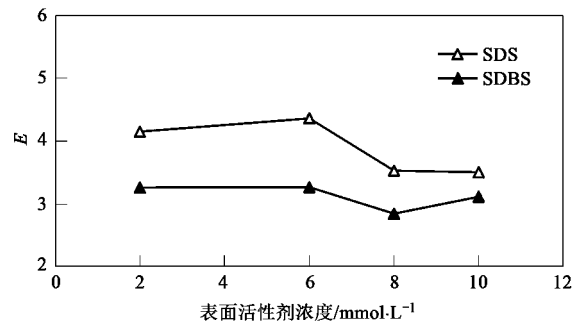


图 9 表面活性剂富集率的比较

Fig. 9 Comparison of enrichment ratio of SDS and SDBS

3 结论

(1) SDS 的渗透通量始终高于 SDBS,而且随浓度的增加,差距有增大的趋势,其中 SDS 平均渗透通量为 $29.92 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,而 SDBS 只有 $16.55 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. SDBS 表面活性比 SDS 强,易吸附在膜表面,使膜遭受污染而加大了渗透通量的降低,

(2) 渗透液 SDS 浓度始终低于 SDBS,当渗透液 Cu^{2+} 浓度接近为零时, SDBS、SDS 所需浓度分别为 2 mmol/L 和 6 mmol/L.

(3) 对胶团强化超滤截留 Cu^{2+} 效能的影响研究表明, Cu^{2+} 为 0.6 mmol/L,当 SDBS 为 2 mmol/L 时, Cu^{2+} 去除率达 98.13%,此时 $\text{SDBS}/\text{Cu}^{2+} = 3.33$;当 SDS 为 6 mmol/L 时, Cu^{2+} 去除率高达 99.03%,此时 $\text{SDS}/\text{Cu}^{2+} = 10$; SDS 的去除率高于 SDBS (SDS 平均去除率为 85.06%, SDBS 为 69.05%),对环境造成的二次污染也小.

(4) Cu^{2+} 平均富集率 SDS 高于 SDBS (SDS 为 4.18, SDBS 为 4.05), SDS 自身的平均富集率也高于 SDBS (SDS 为 3.89, SDBS 为 3.13).

(5) 综合考虑 4 个方面,以此得到更适合去除 Cu^{2+} 的表面活性剂为 SDS,处理 0.6 mmol/L 的 Cu^{2+} , SDS 的适宜用量为 6 mmol/L.

参考文献:

[1] 方瑶瑶,曾光明,黄瑾辉,等. MEUF 去除废水中的金属离子和溶解性有机物 [J]. 环境科学, 2006, 27(4): 641-646.

[2] Fillipi B R, Scamehorn J F, Christian S D, et al. Comparative economic analysis of copper removal from water by ligand-modified micellar enhanced ultrafiltration and by conventional solvent extraction [J]. Journal of Membrane Science, 1998, 145: 27-44.

[3] Juang R S, Xu Y Y, Chen C L. Separation and removal of metal ions from dilute solutions using micellar-enhanced ultrafiltration [J]. Journal of Membrane Science, 2003, 218: 257-267.

- [4] 肖进新, 赵振国. 表面活性剂应用原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 502-511.
- [5] Urbanski R, Goralska E, Bart H J. Ultrafiltration of Surfactant Solutions [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, **253**:419-426.
- [6] Baek K, Yang J W. Cross-flow micellar-enhanced ultrafiltration for removal of nitrate and chromate: competitive binding [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, **108**:119-123.
- [7] Purkait M K, DasGupta S, De S. Removal of dye from wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration and recovery of surfactant [J]. *Separation and Purification Technology*, 2004, **37**:81-92.
- [8] Baek K, Kim B K, Yang J W. Application of micellar enhanced ultrafiltration for nutrients removal [J]. *Desalination*, 2003, **156**:137-144.
- [9] Yurlova L, Kryvoruchko A, Kornilovich B. Removal of Ni(II) ions from wastewater by micellar enhanced ultrafiltration [J]. *Desalination*, 2002, **144**:255-260.
- [10] Liu C K, Li C W. Simultaneous recovery of copper and surfactant by an electrolytic process from synthetic solution prepared to simulate a concentrate waste stream of a micellar enhanced ultrafiltration process [J]. *Desalination*, 2004, **169**:185-192.
- [11] Baek K, Kim B K, Cho H J, *et al.* Removal characteristics of anionic metals by micellar-enhanced ultrafiltration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **99**:303-311.
- [12] Huang J H, Zeng G M, Xu K, *et al.* Removal of cadmium ions from aqueous solution via micellar-enhanced ultrafiltration [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2005, **1**:184-189.
- [13] Li C W, Liu C K, Yen W S. Micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) with mixed surfactants for removing Cu(II) ions [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**:353-358.
- [14] Aoudia M, Allal N, Djennet A, *et al.* Dynamic micellar enhanced ultrafiltration: use of anionic (SDS)-nonionic (NPE) system to remove Cr^{3+} at low surfactant concentration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2003, **217**:181-192.
- [15] Zeng G M, Xu K, Huang J H, *et al.* Micellar enhanced ultrafiltration of phenol in synthetic wastewater using polysulfone spiral membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, **310**(1-2):149-160.
- [16] Huang J H, Zeng G M, Xu K, *et al.* Removal of cadmium ions from aqueous solution via micellar-enhanced ultrafiltration [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2005, **15**(1):184-189.
- [17] Fang Y Y, Zeng G M, Huang J H, *et al.* Micellar enhanced ultrafiltration of cadmium ions with anionic-nonionic surfactants [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, **320**:514-519.
- [18] 张玉忠, 郑领英, 高从增. 液体分离膜技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 72-134.
- [19] Sadaoui B Z, Azoug C, Charbit G, *et al.* Surfactants for separation processes: enhanced ultrafiltration [J]. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 1998, **124**(8):695-700.
- [20] Xu K, Zeng G M, Huang J H, *et al.* Removal of Cd^{2+} from synthetic wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration with hollow fiber membrane [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, **294**:140-146.