酸化超滤法和螯合超滤法回收再利用 SDS 胶团

李雪, 曾光明*, 黄瑾辉, 许柯, 方瑶瑶, 曲云欢
(湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 以含 Cd^{2+} 的浓缩废液为对象, 考察了不同的酸化剂、螯合剂、pH 值、操作模式对 Cd^{2+} 的分离、SDS 胶团的回收和再利用效果的影响. 结果表明, 酸化超滤法最适宜的回收条件为: 硫酸作为酸化剂, pH 值为 1.0, 间歇式操作, 此条件下, 浓缩废液中 Cd^{2+} 分离率和 SDS 胶团回收率分别为 98.0% 和 58.1%, 回收的 SDS 胶团再次应用到 MEUF 中处理含 Cd^{2+} 废水, Cd^{2+} 去除率仍有 80.2%; 螯合超滤法最适宜的回收条件为: EDTA 作为螯合剂, 不控制 pH 值(pH= 4.4), 间歇式操作, 此条件下, Cd^{2+} 分离率和 SDS 胶团回收率分别为 90.1% 和 60.5%, 再次应用到 MEUF 中处理含 Cd^{2+} 废水, Cd^{2+} 去除率达到 79.4%.

关键词: 胶团强化超滤; 十二烷基硫酸钠(SDS); 回收; 酸化; 螯合; 表面活性剂
中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0469-06

Recovery and Reuse of SDS by Ultrafiltration with Acid or Chelator

LI Xue, ZENG Guang-ming, HUANG Jin-hui, XU Ke, FANG Yao-yao, QU Yun-huan
(College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The retentate stream containing Cd^{2+} was chosen for the investigation. Effects of acid reagent, chelator, pH and operation mode on separation of Cd^{2+} and recovery of SDS, as well as efficiency of reclaimed SDS were investigated. The optimum conditions in acidification were obtained: H_2SO_4 as acid reagent, pH = 1.0, operation mode of batch. Under these conditions, separation of Cd^{2+} and recovery of SDS are 98.0% and 58.1%, respectively. And the efficiency of reclaimed SDS for removing Cd^{2+} is 80.2%. In chelation, the optimum conditions were investigated: EDTA as chelator, uncontrolled pH (pH= 4.4) and operation mode of batch. Under these conditions, separation of Cd^{2+} and recovery of SDS are 90.1% and 60.5%, respectively. And the efficiency of reclaimed SDS for removing Cd^{2+} is 79.4%.

Key words: micellar-enhanced ultrafiltration; sodium dodecyl sulfate (SDS); recovery; acidification; chelation; surfactant

胶团强化超滤(micellar-enhanced ultrafiltration, MEUF) 是一种表面活性剂和超滤相结合的技术, 用于处理低浓度的金属离子和溶解性有机物废水[1]. 与传统的超滤相比, MEUF 技术的成本降低了很多, 而且更能有效地去除水中的金属离子和溶解性有机物[2~4]. 此方法处理废水后的有害物质重金属离子和表面活性剂集中在超滤浓缩液中, 及时处理回收其中的表面活性剂, 可以避免对环境造成二次污染. 常用的阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS) 在 MEUF 去除金属离子过程中占有很大比例, 若在不破坏其胶团性质的前提下回收, 就能直接再利用到新的 MEUF 中, 大大降低 MEUF 成本和回收成本. 国内尚鲜见有关回收 MEUF 浓缩废液中表面活性剂的报道, 国外也处于初级阶段. 此前研究大部分采用沉淀法, 利用电解质[5,6] 或 KI[7] 将浓缩废液中的金属离子沉淀, 或是降温沉淀其中的表面活性剂胶团[8], 但这些方法产生的金属和表面活性剂的混合沉淀物的分离比较困难, 回收率低, 对胶团分子有一定的破坏, 回收后的胶团再利用远不及第一次的效果[8], 因此鲜有报道提到 MEUF 浓缩废液中胶团的回收率和再利用的处理效果. 本研究采用在高浓度 SDS 和 Cd^{2+} 浓缩废液中加强酸或螯合剂后超滤的方法回收 SDS 胶团, 考察不同的酸化剂、螯合剂、pH 值、操作模式对 Cd^{2+} 的分离和 SDS 胶团的回收率的影响, 从而得出适宜的 SDS 回收条件, 并将回收的 SDS 胶团直接再利用到新的 MEUF, 测定其效果.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验采用的超滤膜为天津膜天膜工程技术有限工程公司生产的 UFOS503 型中空纤维超滤膜, 性能参数见表 1.

1.2 实验药剂

十二烷基硫酸钠(SDS), 购于天津市科密欧化学试剂开发中心; $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 购于上海金山亭

收稿日期: 2008-03-09; 修订日期: 2008-05-10
基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50425927, 50225926); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020532017); 高等学校优秀青年教学科研奖励计划项目; 长江学者和创新团队发展计划项目; 国家自然科学基金项目(50608028); 2005 年湖南省教育厅科学研究项目
作者简介: 李雪(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为胶团强化超滤在废水处理方面的应用, E-mail: gina0131@163.com
* 通讯联系人, E-mail: zgming@hnu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

新化工试剂厂. 酸化试剂: 硫酸(纯度> 98.0%) 、盐酸(最小浓度: 35.0%) 、硝酸(最小浓度: 60.0%) 均购于株洲化工厂, 加蒸馏水配成 3 mol/L溶液; 螯合剂: 乙二胺四乙酸二钠(EDTA) 、酒石酸($C_4H_6O_6$) 、柠檬酸($C_6H_8O_7$) 均购于天津市大茂化学试剂厂; 以上药剂全部为分析纯.

表 1 膜组件性能参数

Table 1 Characteristics of the used membrane module

外形尺寸 (直径× 长)/ mm	MWCO (相对分子质量)	膜面积 /m^2	工作压强 /MPa	产水量 /$L\cdot h^{-1}$	外径 /mm	内径 /mm	膜材料
50× 386	6000	0.3	0~ 0.12	25~ 30	1.2	0.8	聚丙烯腈

1.3 实验方法

模拟处理过含 Cd^{2+} 的 MEUF 浓缩液废水, 作为进料液, 静置 0.5 h, 加入酸化试剂或螯合剂, 调 pH 值, 定容至 5 L, 使 SDS 浓度为 3 CMC(临界胶团浓度, 6.47 g/L) , Cd^{2+} 浓度为 100 mg/L, 搅拌, 静置 3 h 后过超滤膜. 本实验采用间歇式操作模式, 并对 2 种操作模式进行了比较. 间歇式操作流程如图 1 所示, 经蠕动泵的抽吸, 进料液由下向上进入超滤膜, 经过滤膜后的浓缩液回流至进料罐与进料液混合继续过膜, 连续通水 20 min 左右至进料罐中只有浓缩液且体积为 400 mL 止. 连续式操作流程如图 2 所示, 过膜后的浓缩液不回流, 通水至进料液全部过膜为止, 此时浓缩液体积为 400 mL 左右. 此膜运行稳定时纯水的渗透通量为 20 L/($m^2\cdot$h) . 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, 最后通入蒸馏水润洗, 渗透通量可以恢复至 20 L/($m^2\cdot$h) . 取样以后的 SDS 用亚甲基蓝分光光度法测定(UV-2550 分光光度计, 日本岛津公司) . Cd^{2+} 用原子吸收分光光度法测定(AA700 型原子吸收分光光度仪, 美国 PE 公司) .

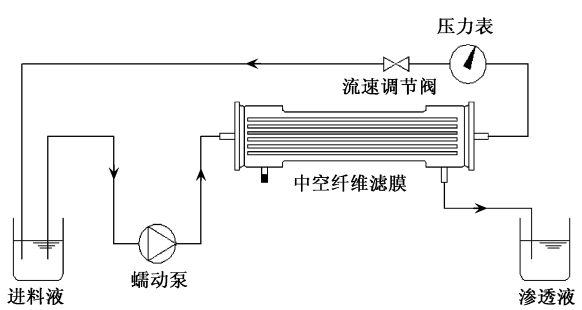

图 1 间歇式超滤流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of batch ultrafiltration

2 结果与讨论

常规的 MEUF 是向低浓度的含 Cd^{2+} 废水中加入浓度大于临界胶团浓度的 SDS, 使其形成胶团, 通过胶团的静电作用吸附 Cd^{2+} . 用孔径小于胶团直径的超滤膜过滤废水, 极少量的未被胶团吸附的 Cd^{2+} 和未形成胶团的 SDS 分子进入到渗透液, 携带着 Cd^{2+} 的胶团被截留进入到浓缩液端口, 通过不断的富集, 浓缩液中含有高浓度的 Cd^{2+} 和 SDS 胶团[9~12] . 本实验的目的是将浓缩废液中被静电吸附的 Cd^{2+} 从 SDS 胶团解吸, 通过超滤膜, 实现两者的分离. 因此影响 SDS 胶团回用效果的关键因素是 Cd^{2+} 的分离率.

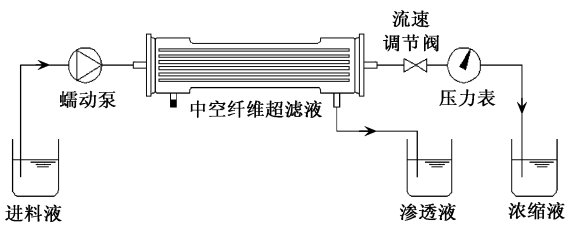

图 2 连续式超滤流程示意

Fig. 2 Schematic diagram of continuous ultrafiltration

在酸化法或螯合法的实验中, Cd^{2+} 的分离率 R 和 SDS 的回收率 R_0 是根据式(1) 和(2) 来计算的.

$$R = \frac{c_{Mp} V_p}{c_{Mi} V_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{c_{SDSr} V_r}{c_{SDSi} V_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中, c_{Mi}、c_{MP} 分别代表实验进料液和渗透液 Cd^{2+} 浓度(mg/L) , c_{SDSi}、c_{SDSr} 分别代表进料液和浓缩液中 SDS 浓度(g/L) , V_i、V_p、V_r 分别代表 MEUF 原液、渗透液和浓缩液的体积(L) .

2.1 酸化超滤法

2.1.1 Cd^{2+} 的分离

用盐酸、硝酸、硫酸分别将进料液的 pH 值调成 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0, pH 值不控制时为 6.4, 间歇式操作通过超滤膜后测渗透液中 Cd^{2+} 的浓度, 结果如图 3.

由图 3 可知, 随着 pH 值的升高 Cd^{2+} 的分离率

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

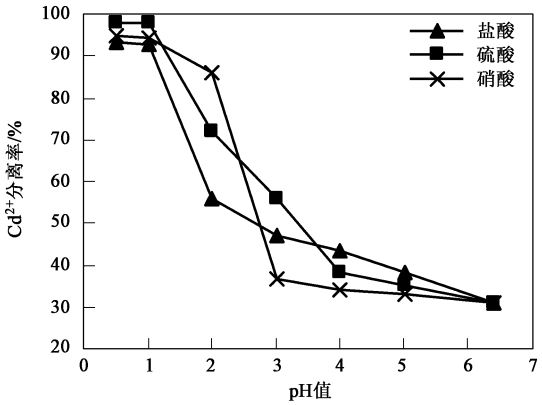

图 3　3 种酸在 pH 0.5~6.4 条件下 Cd^{2+} 分离率比较

Fig. 3　Comparison of separation of Cd^{2+} on pH value 0.5-6.4 with different acid

下降. 金属离子在 SDS 胶团上的吸附主要靠它们之间的静电引力作用, 随着溶液中 pH 值降低到强酸性范围, 吸附在胶团表面的 Cd^{2+} 被 H^+ 置换下来. 接着在超滤过程中, 解离的 Cd^{2+} 通过了滤膜到渗透液中, 而 SDS 胶团远大于超滤膜的孔径, 被膜截留在浓缩液中, 从而达到 Cd^{2+} 和 SDS 胶团的分离. pH= 1.0 条件下, 3 种酸对 Cd^{2+} 分离率都达到 90.0% 以上, 其中硫酸达到 98.0%, 可能是由于 SDS 与硫酸有同根离子 SO_4^{2-}, 可以促进 H^+ 的置换作用. pH= 0.5 条件下, Cd^{2+} 的分离率达到最高值, 但仅比 pH= 1.0 时高 0.2% ~ 0.4%, 说明 H^+ 在溶液中已经过量, 没有更多的 Cd^{2+} 可以被置换下来. pH= 2.0 条件下, Cd^{2+} 分离率都有了大幅度的下降, 其中盐酸下降得最快, 降到 56.1%. pH< 2.0 条件下, 3 种酸对 Cd^{2+} 分离率的促进效果为: 硫酸> 硝酸> 盐酸.

2.1.2　SDS 胶团的回收

酸化后的浓缩废液经超滤后, 与 Cd^{2+} 分离的 SDS 胶团进入浓缩液. 通过测定浓缩液中 SDS 的浓度, 得出回收率, 如表 2.

表 2　3 种酸在 pH 0.5~6.4 条件下 SDS 胶团回收率比较/%

Table 2　Comparison of recovery ratio of SDS colloid on pH value 0.5-6.4 with different acid/%

pH	硫酸	盐酸	硝酸
0.5	42.8	40.1	39.7
1	58.1	54.9	54.1
2	65.7	64.8	64.1
3	68.3	65.5	66.3
4	48.5	49.2	47.6
5	46.4	45.3	46.0
6	45.6	43.4	45.2

由表 2 可知, SDS 的回收率随着 pH 值的升高先增加后减少, 相同 pH 值下使用 3 种酸的差异不大. pH= 0.5 条件下 SDS 回收率都在 50.0% 以下, 原因是强酸环境下 SDS 酸化水解的程度加强. SDS 在强酸环境下不稳定, 发生以下反应[13]:

$$C_{12}—O—SO_3Na + H^+ \rightarrow C_{12}—O—SO_3H + Na^+$$

$$C_{12}—O—SO_3H + H_2O \rightarrow C_{12}—OH + H_2SO_4$$

随着反应的进行, 系统内不断生成正十二醇, 不利于回收更多的 SDS 胶团. 过低的 pH 环境下, 超滤膜的膜孔扩大, 少量的 SDS 胶团进入到渗透液, 因此 pH 调到 0.5 不可取. pH= 2.0 和 pH= 3.0 条件下, SDS 回收率达到了 65.7% ~ 68.3%, 除了少量的被酸化水解和吸附到膜面, 仍有一部分到了渗透液当中. 在 pH 值较低的情况下, 进料液中存在大量游离的 H^+, 由于 H^+ 体积小, 容易接近带负电荷的 SDS 胶团表面, 插入到 SDS 胶团的带电离子头基之间, 中和胶团电荷, 降低 ε 电位, 减弱胶团中离子间的静电排斥力[14], 促使溶液中更容易生成胶团, 因此更多胶团被膜截留, SDS 的回收率就相对较高. 随着 pH 的升高, 进料液中 H^+ 不断减少, SDS 胶团中离子头基间的静电排斥力随之增强, 溶液中形成的胶团相对减少, 从而使 SDS 的回收率降低. 在 pH> 4.0 条件下, H^+ 的量进一步减少, 其对胶团的形成基本无影响, SDS 的回收率变化很小. 3 种酸中回收率最高的是硫酸, pH= 3.0 条件下达到最高为 68.3%.

2.1.3　间歇式和连续式运行的比较

在 MEUF 过程中进料液连续式操作过膜时间短, 节能, 但浓缩比低, 所需膜面积大[15]. 将间歇式和连续式做比较, 固定硫酸作为酸化剂, 在 pH 1.0 ~ 6.4 范围内, 对比 2 种运行方式条件下 Cd^{2+} 的分离效果和 SDS 的回收率, 如图 4 和图 5 所示.

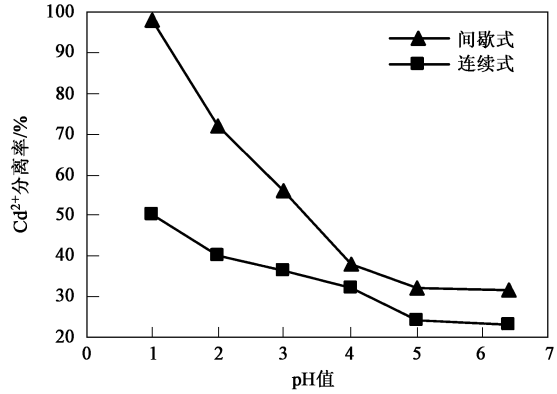

图 4　间歇式与连续式 Cd^{2+} 分离率比较

Fig. 4　Comparison of separation of Cd^{2+} with batch process and continuous process

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

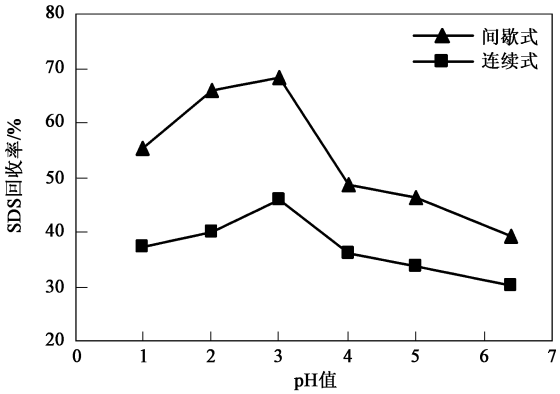

图 5 间歇式与连续式 SDS 胶团回收率比较

Fig. 5 Comparison of recovery ratio of SDS colloid with batch process and continuous process

间歇式运行的 Cd^{2+} 分离率和 SDS 回收率均明显高于连续式运行条件下的. 2 种方式运行条件下, Cd^{2+} 的分离率都是随 pH 值的升高而降低的, 间歇式运行的最高可以达到 98.0%, 而采用连续式运行的 Cd^{2+} 分离率最高只有 50.1%; SDS 的回收率随着 pH 值的上升先增加后减少, 在 pH= 3.0 条件下到达峰值, 间歇式的为 68.3%, 连续式的为 45.9%, 相差 12.4%. 原液进入中空纤维超滤膜为错流态, 要达到相同倍数的浓缩比, 采用间歇式可以将浓缩端口的通量调至连续式的 2 倍. 流体以较高速度通过膜装置, 在膜表面形成高度湍流状态, 膜面因液体的湍流增强膜面的横向剪切力, 可有效减轻 SDS 胶团吸附堆积在膜表面产生浓差极化, 从而回收更多的 SDS 胶团, 也更利于 Cd^{2+} 的分离.

2.1.4 SDS 胶团的再利用

取 pH= 1.0 和 pH= 2.0 条件下回收的 SDS 胶团浓缩液各 400 mL, 加 NaOH 溶液将 pH 值调至 6.4, 加入浓度 50.0 mg/L 的 $Cd(NO_3)_2$ 溶液 600 mL, 间歇式操作过超滤膜, 渗透液 Cd^{2+} 的去除率分别为 80.2% 和 78.7%, 而新鲜的 SDS 胶团第 1 次使用到 MEUF 过程中, 金属离子的去除率为 99.0%[16~18], 基本达到了回用的目的. 比较 2 种 pH 值条件下的 SDS 再利用的效果, pH= 1.0 的更好.

综合考虑以上因素, 选择硫酸作为酸化试剂, 将 pH 调至 1.0, 间歇式运行是酸化法回收 SDS 胶团的最佳条件. 另外, 进入渗透液的大量 Cd^{2+} 还可用电解法进行回收[19].

2.2 螯合超滤法

2.2.1 Cd^{2+} 的分离

在进料液中分别加入与 Cd^{2+} 等摩尔浓度的 EDTA、柠檬酸和酒石酸溶液, 分别用 HNO_3 或 NaOH 溶液将其 pH 值调至 1.0、2.0、3.0、5.0、6.0 和 8.0, pH 值不控制为 4.4, 间歇式操作. 如图 6 所示, 加入了 EDTA 的进料液 Cd^{2+} 分离率明显高于使用柠檬酸和酒石酸的. 金属离子在 SDS 胶团上的吸附主要靠它们之间的静电引力作用, 螯合剂能够与众多金属离子形成带负电荷的配合物, 因此利用螯合剂改变 Cd^{2+} 电性, 从而将 Cd^{2+} 从带负电荷的 SDS 胶团上解吸下来, 通过超滤处理, SDS 胶团被膜截留在浓缩液中, 而螯合剂-镉的尺寸远小于膜的孔径, 通过膜进入到渗透液中, 达到将 SDS 胶团和 Cd^{2+} 分离的目的.

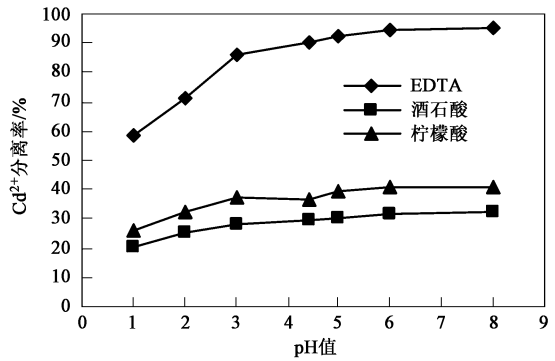

图 6 3 种螯合剂在 pH 1.0~ 8.0 条件下 Cd^{2+} 的分离率比较

Fig. 6 Comparison of separation of Cd^{2+} on pH value 1.0-8.0 with different chelator

pH 值一定情况下, 螯合剂-镉的稳定常数 EDTA > 柠檬酸> 酒石酸[20,21], 柠檬酸-镉的稳定性略高于酒石酸-镉的, 但都远远低于 EDTA-镉的稳定性. 随着 pH 值的升高, 添加了柠檬酸和酒石酸的进料液 Cd^{2+} 分离率都有小幅度提高, 酒石酸最高为 32.6%, 柠檬酸为 41.1%, 处理效果都不理想. 添加了 EDTA 的进料液 Cd^{2+} 分离率逐渐增加, 且增加的幅度由大到小, pH= 5.0 时, 达到 92.1%, 此后分离率变化很小. 在不同的 pH 值条件下, EDTA-镉的形式和分布各不相同, 主要为以下 2 种反应(K 为稳定常数)[22]:

$$Cd^{2+} + Y^{4-} \rightarrow CdY^{2-} \quad K_{CdY^{2-}} = 10^{16.46}$$

$$Cd^{2+} + HY^{3-} \rightarrow CdHY^{-} \quad K_{CdHY^{-}} = 10^{2.9}$$

如图 7 所示, pH< 3.0 条件下, 溶液中 Cd^{2+} 主要以 $CdHY^-$ 形式存在; pH> 3 条件下, 主要以 CdY^{2-} 形式存在. 随着 pH 值的逐渐升高, CdY^{2-} 的形式随之增多, $CdHY^-$ 减少, $K_{CdY^{2-}} > K_{CdHY^-}$, CdY^{2-} 的稳定性比 $CdHY^-$ 强, Cd^{2+} 更容易从 SDS 胶团中解吸出来, 所以 Cd^{2+} 的分离率增加. pH> 5 条件下, 溶液中

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Cd^{2+} 约 100% 以 CdY^{2-} 形式存在, 所以 Cd^{2+} 的分离率也变化很小.

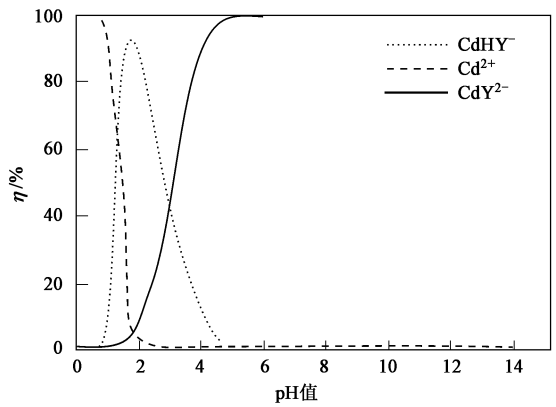

图 7　pH 对 Cd-EDTA 形式的分布影响

Fig. 7　Effect of pH value on the Cd-EDTA species

2.2.2　SDS 胶团的回收

使用柠檬酸和酒石酸 Cd^{2+} 的分离率效果不好, 回收的 SDS 胶团再利用效果会受影响, 因此只选择 EDTA 作为螯合试剂, 研究 pH 值对其回收 SDS 胶团的影响.

由图 8 可知, SDS 胶团的回收率随着 pH 值的升高先增加后减少, 减小幅度小于酸化法. pH < 2.0 时, 部分 SDS 被酸化水解, 降低了回收率, 在 pH 较低的情况下, 进料液中存在大量游离的 H^+, 由于 H^+ 体积小, 容易接近带负电荷 SDS 胶团的表面, 插入到SDS 胶团的带电离子头基之间, 中和胶团电荷, 降低 ε 电位, 减弱胶团中离子间的静电排斥力, 促使溶液中更容易生成胶团, 原理同酸化法回收 SDS 胶团一致. pH = 2.0 条件下达到最大值 64.7%, 低于酸化法最大值 68.3%.

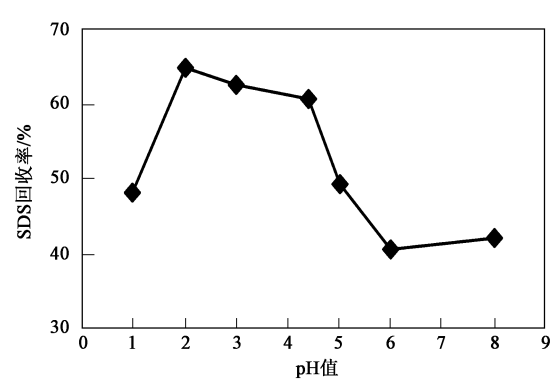

图 8　pH 值对 SDS 胶团回收率的影响

Fig. 8　Effect of pH value on recovery ratio of SDS colloid

2.2.3　SDS 胶团的再利用

取 pH = 3.0 和不控制 pH 值条件下回收的 400 mL 的 SDS 胶团浓缩液, 分别用 NaOH 溶液将 pH 值调至 6.4, 再加浓度为 50.0 mg/L 的 $Cd(NO_3)_2$ 溶液 600 mL, 间歇式操作过膜, 渗透液中 Cd^{2+} 的去除率达到 80.9% 和 79.4%, 和初次使用 SDS 的金属离子去除率相比, 达到回用效果. 从降低调节 pH 方面的经济成本考虑, 选择不控制 pH 值. 综合考虑 Cd^{2+} 的分离率, SDS 的回收率, 选择 EDTA 作为螯合剂, 不控制 pH 值为最佳.

3　结论

(1) 酸化超滤法回收 MEUF 浓缩废液中的 SDS 胶团, Cd^{2+} 的分离率随着 pH 值的升高而减小, SDS 回收率随着 pH 值的升高先增加后减少. pH 值为 1, 硫酸作为酸化剂, 间歇式操作过超滤膜, 为最适宜条件. 回收的 SDS 胶团再次应用到 MEUF 中处理含 Cd^{2+} 废水, Cd^{2+} 去除率仍有 80.2%.

(2) 螯合超滤法回收 MEUF 浓缩废液中的 SDS 胶团, Cd^{2+} 的分离率随着 pH 值的升高而增加, SDS 回收率随着 pH 值的升高先增加后减少. 不控制 pH 值, EDTA 作为螯合剂, 间歇式操作过超滤膜, 为最适宜条件. 回收的 SDS 胶团再次应用到 MEUF 中处理含 Cd^{2+} 废水, Cd^{2+} 去除率达到 79.4%.

(3) 比较 2 种操作模式 Cd^{2+} 分离率和 SDS 胶团的回收率, 间歇式操作明显优于连续式操作.

(4) 酸化超滤法和螯合超滤法回收 MEUF 浓缩废液中的 SDS 胶团, 基本上都不会破坏 SDS 胶团的结构, 所要求的药剂和实验设备简易, 是一种高效节能低成本的处理方法, 具有较好的发展前景.

参考文献:

[1] Zeng G M, Xu K, Huang J H, *et al*. Micellar enhanced ultrafiltration of phenol in synthetic wastewater using polysulfone spiral membrane [J]. J Membr Sci, 2008, **310**(1-2): 149-160.

[2] Tung C C, Yang Y M, Chang C H. Removal of copper ions and dissolved phenol from water using micellar-enhanced ultrafitration with mixed surfactants[J]. Water Management, 2002, **22**(7): 695-701.

[3] 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.

[4] 华耀祖. 超滤技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 9-10.

[5] Akita S, Castillo L P, Nii S, *et al*. Separation of Co(Ⅱ)/Ni(Ⅱ) via micellar-enhanced ultrafiltration using organophosphorus acid extractant solubilized by nonionic surfactant [J]. J Membr Sci, 1999, **162**(1-2): 111-117.

[6] Juang R S, Xu Y Y, Chen C L. Separation and removal of metal ions

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

from dilute solutions using micellar-enhanced ultrafiltration [J]. J Membr Sci, 2003, **218**(1-2): 257-267.

[7] Purkait M K, DasGupta S, De S. Removal of dye from wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration and recovery of surfactant [J]. Sep Purif Technol, 2004, **37**(1): 81-92.

[8] Zhang W H, Daniel C W, Tsang, *et al*. Removal of Pb and MDF from contaminated soils by EDTA- and SDS-enhanced washing [J]. Chemosphere, 2007, **66**(11): 2027-2028.

[9] Gargi G, Prashant K, Bhattacharya. Hexavalent chromium ion removal through micellar enhanced ultrafiltration[J]. J Chem Eng, 2006, **119**(1): 45-53.

[10] Azoug C, Sadaoui Z, Charbit F, *et al*. Removal of Cadmium from Wastewater by Enhanced Ultrafiltration using Surfactants [J]. J Chem Eng, 1997, **75**(4): 743-750.

[11] Huang Y C, Batchelor B, Koseoglu S S. Cross Flow Surfactant-based Ultrafiltration of Heavy Metals from Waste Streams [J]. Sep Sci Technol, 1994, **29**(15): 1979-1998.

[12] Liu C K, Li C W. Combined electrolysis and micellar enhanced ultrafiltration (MEUF) process for metal removal [J]. Sep Purif Technol, 2005, **43**(1): 25-31.

[13] 滕弘霓, 孙艳芝, 周帆, 等. pH 及有机小分子物质对 SDS/CTAB/H_2O 系统双水相性质的影响[J]. 化学研究与应用, 2002, **14**(06): 689-692.

[14] 刘灿明, 王日为. 无机及分析化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002. 20-28.

[15] 刘茉娥. 膜分离技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998. 377-390.

[16] 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, 2007, **294**(1-3): 140-146.

[17] Francesco F, Marina P, Ida D M, *et al*. Removal of heavy metals by surfactant-enhanced ultrafiltration from wastewaters [J]. Desalination, 2007, **207**(1-3): 125-133.

[18] 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.

[19] Reiller P, Lemordant D, Hafiane A, *et al*. Extraction and Release of Metal Ions by Micellar-enhanced Ultrafiltration: Influence of Complexation and pH [J]. J Colloid Interf Sci, 1996, **177**(2): 519-527.

[20] 谢丹, 徐仁扣, 蒋新, 等. 有机酸对 Cu Pb Cd 在土壤表面竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(3): 704-710.

[21] Hojeong K, Kitae B, Julia L, *et al*. Comparison of Separation Methods of Heavy Metal from Surfactant Micellar Solutions for the Recovery of Surfactant [J]. Desalination, 2006, **191**(1-3): 186-192.

[22] 许晓文, 杨万龙, 李一峻, 等. 定量分析化学[M]. 天津: 南开大学出版社, 2005. 68-79.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net