

工艺参数对电去离子技术浓缩分离含镍离子溶液的影响

王玉珍^{1,2}, 王建友¹, 吴志强¹, 卢会霞¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 300071, 天津; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用浓缩室填充树脂的强化电去离子(EDI)对含 Ni^{2+} 溶液进行了浓缩分离, 从中研究了工作电压、淡化室隔板厚度、原水浓度及组分对 EDI 分离性能的影响. 结果表明, 在 15 V 电压下, EDI 以增强传质模式运行可在较低能耗下获得高质量的出水; 电压增大使淡水室内发生水解离而产生结垢, 影响 EDI 的稳定运行. 淡化室隔板由 3 mm 增至 5 mm 时, 膜堆电阻增大, 分离效率降低. 对于含 Ni^{2+} 为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NiSO_4 原水, 在优化条件下, 浓、淡水出水中 Ni^{2+} 浓度分别为 $11\ 031$ 和 $2.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ni^{2+} 的浓缩倍数达 223. 对于含 Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 各 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的双组分原水, EDI 对 Cu^{2+} 有更好的浓缩效果. 实验结束时, 浓水出水中 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度分别为 $3\ 258$ 和 $4\ 690 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓缩倍数分别为 130 和 187; 淡水出水中 Ni^{2+} 及 Cu^{2+} 浓度分别为 4.71 和 $3.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

关键词: 电去离子; 镍离子; 浓缩; 离子交换树脂

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0114-06

Influences of Operation Parameters on Concentration and Separation of Nickel-Containing Solution by Electrodeionization Process

WANG Yuzhen^{1,2}, WANG Jianyou¹, WU Zhiqiang¹, LU Huixia¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The enhanced electrodeionization(EDI) in the dilute and concentrate chambers filled with ion exchanges resins was adopted for the concentration and separation of nickel-containing solution. The influences of operation voltage, partition thickness of the dilute chamber, feed concentration and composition on separation performance were examined. The results show that the EDI process operating under the enhanced mass transfer mode at applied stack voltage of 15V could ensure high quality effluent with lower energy consumption. As the voltage increased, significant water decomposition occurred in the dilute compartments, resulting in scaling problem and unstable operation. When the partition thickness of dilute chambers increased from 3mm to 5mm, the separation performance of the EDI process decreased as the stack resistance increased. Under the optimized conditions, for the Ni^{2+} feed concentration of $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the Ni^{2+} concentration of the outlet concentrate and dilute was $11\ 131$ and $2.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, i. e., the concentration ratio of higher than 223. However, when the feed solution contained Ni^{2+} and Cu^{2+} with the same concentration of $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the concentration effect of Cu^{2+} was better than that of Ni^{2+} . At the end of the experiment, the concentration of Ni^{2+} and Cu^{2+} in the concentrate effluent was $3\ 258$ and $4\ 690 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ while that in the dilute effluent was 4.71 and $3.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively.

Keywords: electrodeionization; nickel ion; concentration; ion exchange resin

收稿日期: 2011-08-29. 作者简介: 王玉珍(1985—),女,硕士生;王建友(通信作者),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA06Z330);天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFSH01800).

网络出版时间: 2012-02-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120229.1442.002.html>

电去离子(EDI)技术,通过在离子交换膜之间填充混床离子交换树脂,在直流电场作用下可实现无机离子连续、高效的纯化或浓缩分离,分离效率显著大于传统电渗析(ED),且可避免使用酸碱药剂再生树脂。近年来,EDI在纯水制备领域得到广泛应用,在含重金属离子水体处理领域亦日益受到关注。

目前所见的报道多针对重金属离子浓度低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液进行研究,处理对象一般为 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 等^[1-3]。本课题组以解决 EDI 内部的结垢及回收重金属离子为目的,用 Ni^{2+} 浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液来模拟重金属废水,并对 EDI 的运行工艺、构型、所用树脂比例及粒径等进行了优化,由此开发出了一种浓缩室填充树脂的强化 EDI 模型^[4-8]。在此基础上,本文对影响 EDI 分离性能的主要因素,即工作电压、淡水室隔板厚度、原水 Ni^{2+} 浓度及原水组分进行了考察,研究了原水中不同离子在树脂的选择吸附能力及其对分离性能的影响,以期 EDI 技术尽早在重金属离子废水的深度处理和资源化回用中获得应用奠定基础。

1 实验

1.1 材料与试剂

离子交换膜:EDI 专用低渗透离子交换膜,浙江千秋环保水处理有限公司生产。

离子交换树脂:大孔型 D072 强酸和 D296 强碱性树脂,南开大学化工厂生产,粒径为 $0.7 \sim 0.8 \text{ mm}$ 。

$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 及 $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:分析纯,天津市文达稀贵试剂化工厂生产。

去离子水:自制,电导率为 $12 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

组装膜堆前,将树脂和膜分为两组:一组将树脂和膜依次浸入 0.5 和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Ni_2SO_4 溶液中各 48 h ,以使阳树脂和阳离子交换膜充分转型为 Ni^{2+} 型,阴树脂和阴离子交换膜转型为 SO_4^{2-} 型;另一组按同样方法将树脂和膜用 Cu_2SO_4 溶液浸泡,使其分别转型为 Cu^{2+} 型和 SO_4^{2-} 型。

1.2 EDI 工作构型

膜堆采用一级两段结构,每段 2 个膜对,如图 1 所示。根据前期研究结果^[4,7],淡化室和浓缩室中分别填充阴、阳树脂体积比为 $4:6$ 及 $6:4$ 的大孔混床离子交换树脂。浓水闭路循环,正、负电极室的内侧均设有极室保护室,并在其中通以同样的电极水。

隔板规格为 $100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,PP 材质,有效膜面积为 158.44 cm^2 。

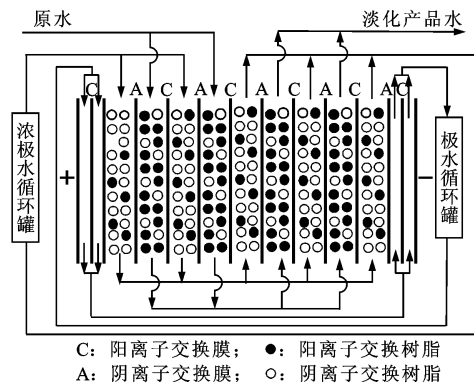


图1 EDI工作构型示意图

EDI 淡水罐与浓水循环罐中的原水均由 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 与去离子水配制,极水为 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 溶液。浓、淡、极水流量分别为 25 、 25 和 $15 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

EDI 淡水、浓水出水管路上分别设有在线 pH 计、电导率仪和电阻率仪,以进行常规水质监测。采用北京普析通用仪器有限公司 TAS-996 型原子吸收分光光度计,以火焰原子吸收法定量分析样品中 Ni^{2+} 及 Cu^{2+} 的浓度。

2 结果与讨论

2.1 膜堆电压对 EDI 分离性能的影响

实验采用恒定电压运行模式,在电压为 15 、 17.5 、 20 、 22.5 V 下膜堆电流、电阻及出水水质随运行时间的变化如图 2、3 所示。

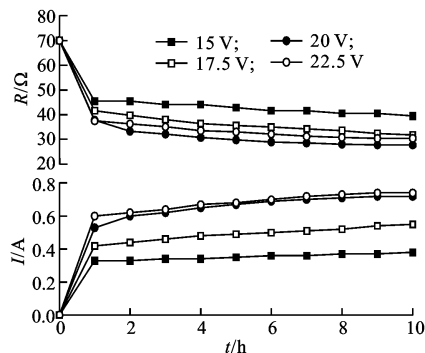


图2 膜堆电流及电阻随时间的变化

由图 2 可见,不同电压下,电流均随时间的推移有所增加,膜堆电流随电压的升高相应增大,但在 $2 \sim 22.5 \text{ V}$ 区期,电流增大趋势不明显。文献^[4]在对“膜堆电阻电压”曲线的研究中认为,膜堆电阻随电压的升高而增大,但在达到峰值后开始下降,其原因是膜堆内部发生了水解离,从而促使电流增大。根据图 2,在 15 V 时,膜堆电阻最大,水解离不明显,而

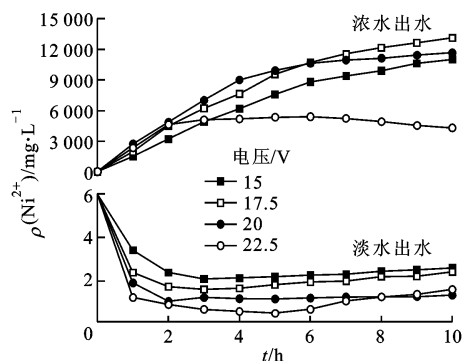


图 3 EDI 出水中 Ni^{2+} 浓度随时间的变化

在 17.5 V 时,膜堆电阻明显减小,说明 EDI 淡水室中已经发生了水解离;在 20 V 时,膜堆电阻持续降低,表明水解离程度加剧;在 22.5 V 时,膜堆电阻较 20 V 时有所上升,其原因是 EDI 隔室内已经形成了 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 沉淀,使得离子传递受到阻碍。

由图 3 可见:在 15、17.5 V 时,淡水出水中 Ni^{2+} 浓度在降至一定程度后达到基本稳定,实验结束时分别达到 2.78、2.45 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,脱除率分别为 94.7%、95.1%;浓水出水中 Ni^{2+} 浓度均随时间的推移有所增大,实验结束时分别达到 11 031、13 137 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浓缩倍数分别为 223、262;在 20 V 时,浓水出水中 Ni^{2+} 浓度在 4.5 h 后逐渐趋于稳定,EDI 的浓缩性能有所下降;在 22.5 V 时,浓水出水中 Ni^{2+} 浓度在 2 h 后出现下降趋势,上述现象佐证了在高电压下,EDI 隔室内因剧烈水解离生成了 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 结垢,导致浓缩性能急剧下降,大量 Ni^{2+} 被截留在膜堆内部。

实验结束后拆开膜堆,经检查看到:15 V 时树脂及膜的颜色均与运行前相同,17.5 V 时膜堆第二段出水口处阳树脂由先前的绿色转为淡黄色,这是 Ni^{2+} 饱和的树脂被 H^+ 置换的结果,表明膜堆已发生微弱的水解离;20、22.5 V 时膜堆的第二段淡水室树脂表面及阴膜面均出现绿色沉淀物,22.5 V 时最为严重。可见,当膜堆内部水解离发生后,大量的 Ni^{2+} 与水解离产生的 OH^- 结合生成沉淀,致使浓水 Ni^{2+} 不再浓缩,从而影响膜堆的稳定运行。

工作电压对 EDI 分离的影响体现在离子迁移的速度和水解离的程度上。一般认为,在适宜的电压范围内,电压越高,水解离程度就越大,树脂再生越彻底,离子脱除效果越好。对于重金属离子溶液的处理,水解离越剧烈,金属氢氧化物沉淀生成就越容易,致使电流效率大幅度降低,膜堆稳定运行受到影

响。因此,该 EDI 过程应以确保不发生显著水解离、保证膜堆稳定运行为前提来选择适宜的工作电压,以提高分离效率,降低能耗。实验结果显示,在 15、17.5 V 时,EDI 均可保证膜堆运行稳定且淡水出水水质变化不大,对应的电流效率分别为 71.45%、49.56%,能耗分别为 0.228、0.385 $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可见,在实验条件下,采用 15 V 的膜堆工作电压既可保证出水水质,又可降低能耗,且兼顾了经济性及稳定性。

2.2 淡化室隔板厚度对 EDI 分离性能的影响

根据 2.1 节,本文先后采用 3、5 mm 两种厚度的淡化室隔板组装 EDI 膜堆,并控制 EDI 在 15 V 下恒压运行(下同)。实验中膜堆电流及出水中 Ni^{2+} 浓度随时间的变化分别如图 4、5 所示。

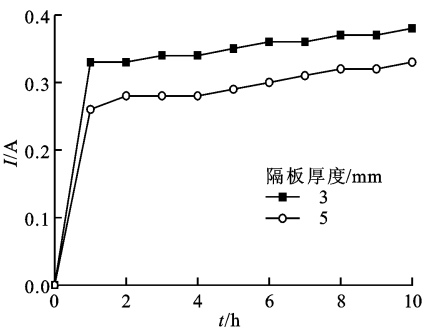


图 4 2 种隔板厚度下膜堆电流随时间的变化

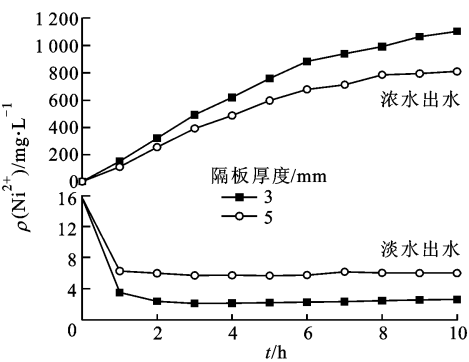


图 5 2 种隔板厚度下 EDI 出水中 Ni^{2+} 浓度随时间的变化

由图 4 可见,淡化室隔板厚度为 5 mm 时的膜堆电流始终低于隔板厚度为 3 mm 时的情况,表明增加隔板厚度会给 EDI 内的离子传递带来不利影响。由图 5 可见,淡化室隔板厚度为 5 mm 时的 EDI 分离性能低于隔板厚度为 3 mm 时的情况。实验结束时,在 2 种隔板厚度下的浓水出水中 Ni^{2+} 浓度分别为 8 105、11 171 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浓缩倍数分别为 162、223,相应的淡水出水中 Ni^{2+} 浓度分别为 6.01、2.78 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ni^{2+} 脱除率分别为 87.9%、94.44%。

增加淡化室隔板厚度,即增加淡化室膜间距,对 EDI 的分离性能有正反两方面的作用.一方面,两电极板的间距增大及淡化室中树脂量增多,均会导致膜堆整体电阻增大,在相同的分离驱动力下,离子迁移率降低,另外对于均匀混合填充的树脂床层,其床层电阻将随床层厚度的增加而增大^[8];另一方面,由于处理的水量相同,隔板厚度增大使得离子在淡水室内的停留时间相应延长,这有利于提高离子脱除率.通过本文的实验结果表明,隔室厚度增加而导致的分离性能下降效应,超过了停留时间延长对离子脱除的促进效应,所以从总体看,EDI 的分离性能有所下降.

2.3 原水浓度对 EDI 分离性能的影响

基于上述实验结果,采用 3 mm 隔板组装淡水室的 EDI 膜堆,再对原水中 Ni²⁺ 浓度 ρ_o 分别为 50、75、100 mg · L⁻¹ 的 NiSO₄ 溶液进行处理,以考察原水浓度对 EDI 分离性能的影响.膜堆电流及出水中 Ni²⁺ 浓度随时间的变化如图 6、7 所示.

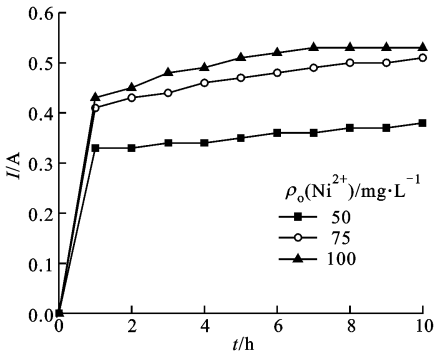


图 6 处理 3 种原水时膜堆电流随时间的变化情况

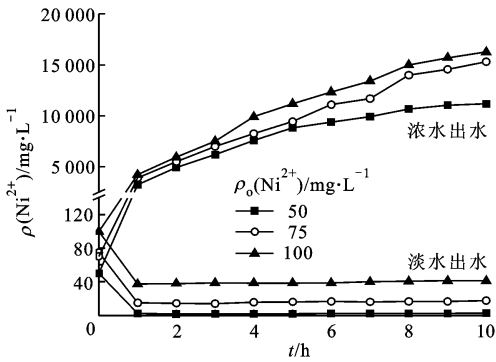


图 7 处理 3 种原水时 EDI 出水中 Ni²⁺ 浓度随时间的变化情况

由图 6 可知,膜堆电流随原水中 Ni²⁺ 浓度的增加而增大.实验中,膜堆电流分别由实验开始的 0.3、0.41、0.43 A 缓慢上升至实验结束时的 0.38、

0.51、0.53 A.由于 EDI 浓缩室、淡化室中均填充有混床树脂,隔室内溶液的离子浓度和树脂床层均对室内电阻有重要影响,因此膜堆电流并非与原水中 Ni²⁺ 浓度呈正比关系,其增幅低于原水中 Ni²⁺ 浓度的增幅.

由图 7 可知,随着原水离子浓度的增加,浓水出水中 Ni²⁺ 浓度增大,淡水出水中水质降低.当原水中 Ni²⁺ 浓度分别为 50、75、100 mg · L⁻¹ 时,实验结束时浓水出水中 Ni²⁺ 浓度分别为 11 171、15 299、16 257 mg · L⁻¹,浓缩倍数依次为 223、204、163,而淡水出水中 Ni²⁺ 浓度分别为 2.78、17.64、41.3 mg · L⁻¹,离子脱除率分别为 94.44%、76.48%、58.7%,对应的电流效率分别为 70.94%、36.23%、9.37%.

由此可见,随着原水中 Ni²⁺ 浓度的升高,膜堆负荷相应增大,不经树脂相传递的离子更多,这些离子转而在溶液相中迁移,从而降低了离子传递效率.

在本文实验条件下,由于 EDI 在较低的工作电压下运行,膜堆内不会发生显著的水解离,其工况属于增强传质模式,而树脂的填充则使得分离不受浓差极化因素的限制,因此可假设 EDI 的离子脱除率随淡化室的流程长度线性变化,这样第一、二段膜堆具有相同的离子脱除率^[8].根据电流效率可导出膜堆出水浓度、进水浓度、工作电流与流量之间的关系式

$$\eta = \frac{Qz(\rho_{di}(\text{Ni}^{2+}) - \rho_{do}(\text{Ni}^{2+}))F}{NI} \times 100\% \quad (1)$$

$$\rho_{do}(\text{Ni}^{2+}) = \rho_{di}(\text{Ni}^{2+}) - \frac{\eta NI}{QzF} \quad (2)$$

式中:η 为电流效率;Q 为淡水进水流量;z 为离子化合价位;F 为法拉第常数;N 为膜对数;I 为电流强度;ρ_{di}(Ni²⁺)、ρ_{do}(Ni²⁺) 分别为膜堆淡水进、出水中 Ni²⁺ 的浓度.

根据式(2),在进水流量、离子种类一定的条件下,要想处理更高离子浓度的原水,并获得较好的淡水出水水质,必须提高工作电流,或者提高膜对的数量,即增大装置规模,但提高工作电流易导致膜堆内发生水解离,且具有结垢风险.与之相比,增加装置规模将是一种安全、可行的方法.

2.4 原水组分对膜堆分离性能的影响

在上述优化的实验条件下,对原水同时含 Ni²⁺、Cu²⁺ 的 25 mg · L⁻¹ NiSO₄ 和 CuSO₄ 混合溶液(双组分原水),及仅含 Ni²⁺ 的 50 mg · L⁻¹ NiSO₄ 溶液(单组分原水),在 15 V 下进行性能考察,相应的两种膜堆电流随时间的变化如图 8 所示.

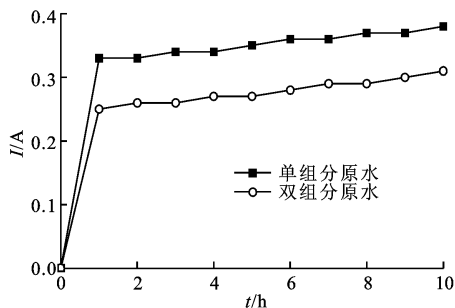


图8 处理2种原水时膜堆电流随时间的变化

由图8可见,在实验范围内,处理单组分原水的膜堆电流始终大于处理双组分原水的。实验结束时的电流分别为0.38、0.31 A,这可能是由于处理双组分原水时,树脂对 Ni^{2+} 及 Cu^{2+} 的亲合力有所差别,离子在树脂相的迁移存在竞争,从而降低了离子在树脂相中的迁移速度。

采用固定比 R_f 来衡量树脂对 Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 的亲合力。 R_f 为离子吸附达到平衡时,树脂吸附的某种离子的摩尔数与所吸附的全部离子的摩尔数之比, R_f 越大,树脂对离子的亲合力越大。实验中,将5 mL滤干的树脂分别置于体积为60 mL且含 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 均为 $0.425 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NiSO_4 、 CuSO_4 混合溶液中静置,每隔2 h测定溶液中 Ni^{2+} 及 Cu^{2+} 的浓度,直至浓度基本不变,并视此状况时离子交换已达到平衡。达到吸附平衡时, R_f 分别为58.7%、41.3%,表明树脂对 Ni^{2+} 离子具有较大的亲合力。

对于双组分原水,EDI浓、淡水出水中 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度变化如图9所示。由图9可见:运行10 h后,浓水出水中 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度分别达3 258、4 690 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浓缩倍数分别为130、187;淡水出水中 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度分别为4.71、3.71 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,离子脱除率分别为81.16%、85.16%。可见,在本文实验条件下,EDI对 Ni^{2+} 的分离性能低于对 Cu^{2+} 的,这是因为树脂优先选择混合液中亲合力大的 Ni^{2+} 进行吸附交换,但亲合力越大,离子从树脂解吸就越困难。树脂的离子选择性提高,导致离子在树脂内的迁移能力降低,在迁移过程中,二价离子颗粒的扩散控制^[9-10]尤为重要。离子半径将直接影响其在树脂内的迁移速度,络合 $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$ 的半径小于络合 $\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$,所以络合 $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$ 的迁移速度相对较大。

对于不同组分原水,浓、淡水出水中总离子浓度随时间的变化如图10所示。

由图10可见,处理双组分原水时EDI的总离

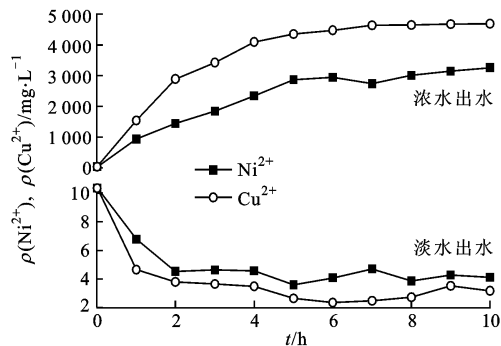
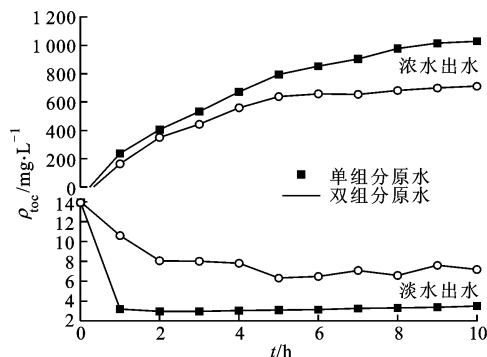
图9 双组分原水的EDI出水中 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度随时间的变化情况

图10 不同组分原水的浓、淡水出水中总离子浓度随时间的变化情况

子脱除性能低于处理单组分原水。实验结束时,单组分原水及双组分原水的浓水出水中总离子浓度分别为11 131、7 950 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浓缩倍数分别为223和159;淡水出水中总离子浓度分别为2.78和7.28 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总离子脱除率分别为94.46%、85.44%。

3 结 论

(1)采用浓缩室、淡水室均填充树脂的强化EDI对含重金属离子溶液进行了高效浓缩和同步淡化。控制EDI在增强传质模式下运行,可避免EDI内产生显著的水解离,保证运行稳定。以 Ni^{2+} 浓度为50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NiSO_4 溶液为对象,EDI在优化的实验条件下可将 Ni^{2+} 浓度持续浓缩至11 031 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浓缩倍数达到223,相应的淡水出水中 Ni^{2+} 浓度持续降低至2.78 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并具有良好的稳定性。

(2)增大淡化室隔板厚度会影响EDI的分离性能,主要原因在于,隔板厚度增大会导致膜堆电阻增大,从而降低EDI的电流效率。

(3)对于含 Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 的双组分原水,由于树脂对重金属离子亲合力存在差异,不同离子的分离性能有所不同,所以在本文实验条件下,EDI对

Ni^{2+} 的脱除性能低于对 Cu^{2+} 的. 相对于总离子浓度相同的 NiSO_4 单组分原水和 $\text{NiSO}_4 + \text{CuSO}_4$ 双组分原水, EDI 对后者的浓缩、分离性能低于对前者.

参考文献:

- [1] XING Yunqing, CHEN Xueming. Variable effects on the performance of continuous electrodeionization for the removal of Cr(VI) from wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2009, 68(3): 357-362.
- [2] XIAO Feng, GAO Junsong, WU Zucheng. Removal of copper ions from electroplating rinse water using electrodeionization [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2008, 9A(9): 1283-1287.
- [3] TAGHDIRIAN H R, MOHEB A, MEHDIPOUR-GHAZI M. Selective separation of Ni(II)/Co(II) ions from dilute aqueous solutions using continuous electrodeionization in the presence of EDTA [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 362(1/2): 68-75.
- [4] 王玉珍, 王建友, 卢会霞, 等. 电去离子集成过程分级浓缩与纯化电镀镍漂洗废水 [J]. 化工学报, 2010, 61(3): 754-760.
- WANG Yuzhen, WANG Jianyou, LU Huixia, et al. Successive concentrating and purifying nickel electroplating rinsing wastewater by integrated membrane processes with electrodeionization [J]. CIESC Journal, 2010, 61(3): 754-760.
- [5] LU Huixia, WANG Jianyou, YAN bo, et al. Recovery of nickel ions from simulated electroplating rinse water by electrodeionization process [J]. Water Science and Technology, 2010, 61(3): 729-735.
- [6] 任安娟, 王建友, 卢会霞, 等. 电去离子技术同步纯化和浓缩含镍离子溶液的研究 [J]. 现代化工, 2009, 29(6): 55-60.
- REN Anjuan, WANG Jianyou, LU Huixia, et al. Study on purifying and concentrating nickel wastewater synchronously by EDI [J]. Modern Chemical Industry, 2009, 29(6): 55-60.
- [7] 王玉珍, 王建友, 卢会霞, 等. 倒极电去离子(EDI)过程浓缩分离含镍离子溶液 [J]. 化工学报, 2010, 61(10): 2688-2693.
- WANG Yuzhen, WANG Jianyou, LU Huixia, et al. Concentration and separation of nickel-containing solution by electrodeionization with polarity reversal [J]. CIESC Journal, 2010, 61(10): 2688-2693.
- [8] 王建友. 电去离子过程的传质机理及其集成膜过程的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [9] 钱庭宝. 离子交换剂应用技术 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1984: 77-78.
- [10] HELFFERICH F G. Ion exchange [M]. New York, USA: McGraw Hill Book Company, 1962: 250-322.

(编辑 苗凌)