

化学沉淀-微滤-络合-超滤处理高浓度含镍废水

张学俊,曾坚贤*,张 鹏,申少华,易良刚,田 俊,李 敏 (湖南科技大学化学化工学院,湖南 湘潭 411201)

摘要: 在 pH=9 下,镍离子浓度为 5562.71mg/L 的镍废水经充分沉淀后,以 0.5 μm 孔径陶瓷膜微滤处理,发现浓缩时膜通量(J)先快速降低,经缓慢下降后,再较快降低,镍截留系数(R_{Ni})接近 1,当体积浓缩因子(VCF)从 1 增大到 10 时,截留液镍浓度(C_r)从 5562.71mg/L 浓缩至 55507.76mg/L,渗透液镍浓度(C_p)为 13.26mg/L.以陶瓷膜渗透液为料液,以聚乙烯亚胺为络合剂,考察聚合物与金属质量比($r_{\text{p/m}}$)、pH 值、温度和操作压力对恒容超滤 R_{Ni} 和 J 的影响,并研究超滤浓缩过程.结果表明, R_{Ni} 随 $r_{\text{p/m}}$ 或 pH 增大而增大,随温度升高而略下降,与操作压力无关; J 随温度或操作压力增大而增大,随 pH 增大而增大至不变, $r_{\text{p/m}}$ 对 J 影响甚微.超滤浓缩时,控制 $r_{\text{p/m}}=7$ 和 pH=9,当 VCF 从 1 增大到 30 时, J 仅下降 9.76%, C_r 从 13.26mg/L 增大至 396.64mg/L, C_p 约 0.04mg/L,镍离子被浓缩,超滤渗透液可直接排放.

关键词: 陶瓷膜;微滤;络合;超滤;镍离子

中图分类号: X703.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2016)04-1106-06

Treatment of wastewater containing high concentration nickel ions with precipitation-microfiltration-complexation-ultrafiltration processes. ZHANG Xue-jun, ZENG Jian-xian*, ZHANG Peng, SHEN Shao-hua, YI Liang-gang, TIAN Jun, LI Min (College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China). *China Environmental Science*, 2016,36(4): 1106~1111

Abstract: The wastewater containing high concentration (5562.71mg/L) of nickel ion was first completely precipitated at pH 9, and subsequently treated by a ceramic microfiltration membrane with a pore diameter of 0.5 μm . During the concentration process, the membrane flux (J) dropped significantly at the initial stage, then declined slowly, and finally decreased at a rapid rate again. The nickel rejection coefficient (R_{Ni}) was found to be approx. 1. When the volume concentration factor (VCF) increased from 1 to 10, the nickel concentration in the retentate (C_r) increased from 5562.71 to 55507.76mg/L, whereas the nickel concentration in the permeate (C_p) remained nearly constant at approx. 13.26mg/L. Then, the complexation-ultrafiltration process was studied using the permeation fluid from the microfiltration process as the feed solution. Poly (ethylene imine) was employed as the complexing agent. The effects of the polymer/metal mass ratio ($r_{\text{p/m}}$), pH, temperature and operating pressure on R_{Ni} and J were investigated. Further, the process of ultrafiltration concentration was studied. The results showed that R_{Ni} increased with increasing $r_{\text{p/m}}$ or pH and decreased slightly with temperature, and that the operating pressure exerted no effect on R_{Ni} ; J increased with temperature or operating pressure. With increasing pH, J increased at first, and then reached a constant value. The effect of $r_{\text{p/m}}$ on J was insignificant. The ultrafiltration concentration experiment was carried out at $r_{\text{p/m}}=7$ and pH=9. When VCF increased from 1 to 30, J only declined by 9.76%. C_r increased linearly from 13.26 to 396.64mg/L, whereas C_p remained roughly unchanged at about 0.04mg/L. Nickel ions were concentrated effectively, and the permeation solution from the ultrafiltration process was discharged directly.

Key words: ceramic membrane; microfiltration; complexation; ultrafiltration; nickel ion

含镍废水主要来源于电镀、冶金、采矿、化学、机械制造、石油化工、纺织等行业,其毒性大且处理较为困难^[1-2],目前常见处理方法有化学沉淀、离子交换、氧化还原、吸附、电解、膜分离等^[3-4].膜分离技术具有能耗低、操作简便、分离效率高和环境友好等特点^[5-6],在含镍废水

收稿日期: 2015-09-01

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201410534004);国家自然科学基金资助项目(51573041);湖南省教育厅科研重点项目(15A061);湖南省化学化工类专业校企合作人才培养示范基地(145812);湖南省化学与生物科学类专业大学生创新训练中心(G21323)

* 责任作者,教授, zengjianxian@163.com

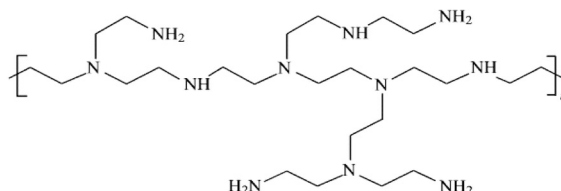
处理领域中备受关注,其中,陶瓷膜分离技术由于过滤阻力较小,膜化学稳定性好、分离效率高、抗微生物能力强、使用寿命长、易清洗及膜组件强度大等优点^[7-8],使其得以广泛应用,但陶瓷膜一般不能直接截留镍离子,需与其他方法结合,如:与化学沉淀法结合,操作较为简单,可处理高浓度含镍废水,渗透液中镍离子浓度大幅度下降,但往往很难满足排放标准.络合-超滤技术以含功能基团的水溶性聚合物为络合剂,与重金属离子生成络合物,借助超滤膜予以截留,近年来,一些研究者对该技术开展了研究,涉及重金属离子有 Co^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Pd^{2+} 、 Ni^{2+} 等^[9-14].然而,现有文献大多以单一络合超滤技术处理低浓度重金属废水,鲜见将陶瓷膜微滤与络合超滤结合处理高浓度含镍废水,借助前者浓缩高浓度镍,为镍回收奠定基础,以后者处理含低浓度镍离子的陶瓷膜渗透液,满足排放标准.

本文以高浓度含镍工业废水为研究对象,控制废水 pH 值为 9,经充分沉淀后,以 $0.5\mu\text{m}$ 陶瓷膜进行恒容过滤和浓缩过滤,考察操作时间、体积浓缩因子对膜通量和镍截留系数的影响,实现镍浓缩;以陶瓷膜渗透液为研究对象,以聚乙烯亚胺(PEI)为络合剂,研究络合-超滤行为,考察聚合物与金属质量比(定义为:在络合体系中,聚合物质量与金属离子质量的比值,以 $r_{p/m}$ 表示,单位为 $\text{mg PEI}/(\text{mg Ni})$)、pH 值、操作压力和温度对膜通量及镍截留系数的影响,并研究超滤浓缩过程.

1 材料与方法

1.1 材料

含镍电镀废水由湖南某厂提供,镍离子浓度为 5562.71mg/L ,含少量缓冲剂硼酸、光亮剂及悬浮颗粒等;氢氧化钠(NaOH),分析纯,天津市北方天医化学试剂厂;盐酸(HCl),分析纯,湖南省株洲市化学工业研究所;去离子水,自制;聚乙烯亚胺,50%溶液,分子式 $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH})_n$,平均分子量 7.0×10^4 ,由阿拉丁试剂公司提供,分子结构式如下:



陶瓷膜由南京工业大学膜科学技术研究所提供,膜孔径为 $0.5\mu\text{m}$,膜管长度为 450mm ,19 通道,通道内直径为 4mm ,膜材质为三氧化二铝;中空纤维超滤膜由天津膜天膜工程技术有限公司提供,膜材质为聚醚砜,截留分子量为 2.0×10^4 ,超滤组件型号 UEIP503,操作压差小于 0.15MPa ,温度 $5\sim 40^\circ\text{C}$,pH 值 $3\sim 12$,膜面积 0.3m^2 .

1.2 实验装置与分析仪器

陶瓷膜微滤装置由南京工业大学膜科学技术研究所提供,如图 1 所示,由恒温水槽、贮罐、泵、温度计、压力计、陶瓷膜组件、流量计和阀门等组成;中空纤维超滤装置见文献[9],由恒温水槽、贮罐、温度计、泵、压力计、中空纤维超滤组件、流量计和 pH 计等组成;pH 计(PE20 型,瑞士 Mettler Toledo 公司);原子吸收光谱仪(Aanalyst 300 型,美国 Perkin Elmer 公司).

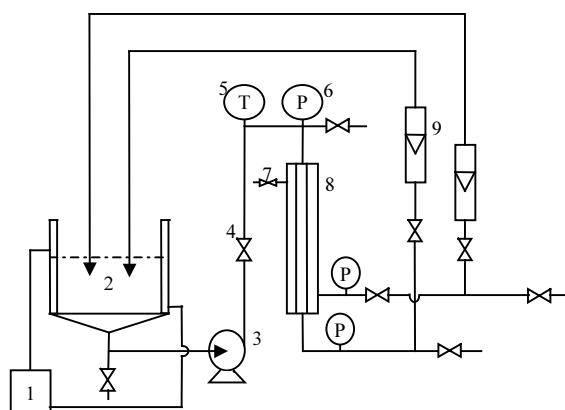


图 1 陶瓷膜微滤实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of ceramic membrane microfiltration apparatus

1. 恒温水槽;2. 贮罐;3. 离心泵;4. 阀门;5. 温度计;6. 压力计;7. 渗透液出口;8. 陶瓷膜组件;9. 流量计

1.3 实验方法

陶瓷膜微滤和中空纤维膜超滤的操作方法为:加入一定体积原料液到贮罐中,经泵驱动

进入膜组件,在压差推动下,渗透液径向透过分离膜,当优化操作参数时,调节渗透侧阀门,使得渗透液回流至贮罐中;当研究浓缩过程时,渗透液不返回贮罐中.未透过膜的截留液返回贮罐中,使体系得以循环.膜通量(J)以一定时间内流出的渗透液体积并结合膜面积计算获得:

$$J = \frac{V}{A\Delta t} \quad (1)$$

式中: J 为膜通量, $L/(m^2 \cdot h)$; V 为渗透液体积, L ; A 为膜有效面积, m^2 ; Δt 为渗透时间, h .分别测定截留液和渗透液镍浓度,以式(2)计算镍截留系数(R_{Ni}):

$$R_{Ni} = 1 - \frac{C_p}{C_r} \quad (2)$$

式中: R_{Ni} 为镍截留系数; C_p 为渗透液镍浓度, mg/L ; C_r 为截留液镍浓度, mg/L .陶瓷膜微滤过程 pH 值为 9,使得绝大多数镍离子形成氢氧化镍沉淀,恒容过滤(渗透液返回原料液中,贮罐中料液体积不变,料液中各组分浓度恒定)和浓缩过滤(渗透液不返回原料液中,贮罐中料液体积逐渐减少,料液中被截留的各组分浓度逐渐增大)时原料液体积分别为 12L 和 50L.未作说明时,中空纤维膜两侧压差为 60kPa,温度为 25℃,pH 值为 9, $r_{p/m}$ 为 7,料液体积为 1L.

PEI 络合-超滤恒容过程:PEI 在使用前需进行预处理,以除去能透过超滤膜的低分子量聚合物,预处理方法与文献[10]类似.以陶瓷膜渗透液为原料液,依据其镍离子浓度,加入预处理后 PEI 溶液,PEI 浓度对应于 $r_{p/m}$,调整 pH 值,充分搅拌 1h 后进行超滤,超滤 30min 后膜通量趋于稳定,此时测定膜通量、 C_p 和 C_r ,考察各操作参数($r_{p/m}$ 值、pH 值、操作压力、温度)对 R_{Ni} 和 J 的影响.

PEI 络合-超滤浓缩过程:陶瓷膜渗透液为 30L,pH 值为 9,镍离子浓度为 13.26mg/L,PEI 浓度为 95mg/L,跨膜压差为 60kPa,温度为 25℃,浓缩 30 倍时实验结束.

溶液 pH 值以 pH 计测定;镍离子浓度以原子吸收光谱仪测定.

2 结果与讨论

2.1 陶瓷膜微滤行为

2.1.1 操作时间对膜通量的影响 调节工业含镍电镀废水 pH 值为 9,镍离子充分沉淀后,采用恒容过滤方式,在不同跨膜压差(0.1~0.14MPa)、错流速度(3.4~4.5m/s)和温度(25~30℃)下,考察操作时间对 J 的影响,结果如图 2 所示.在各操作条件下均发现了类似现象,即:微滤初期, J 下降速度较快,然后下降较缓慢,最后趋于稳定,这可能是由于过滤初期,氢氧化镍沉淀在陶瓷膜表面较快沉积,部分氢氧化镍沉淀进入膜孔中,对膜孔形成一定堵塞,膜过滤阻力增大,渗透液透过速率逐渐下降,即 J 逐渐下降,此后,随着操作时间延长,氢氧化镍污染层趋于稳定,膜污染阻力基本不变,故 J 稳定,Zhong 等^[11]采用陶瓷膜过滤时亦获得了类似结论.

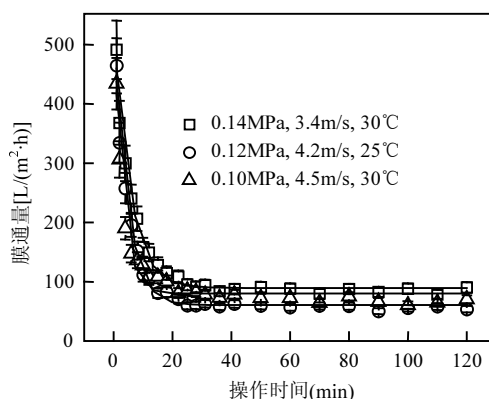


图2 不同操作条件下操作时间对膜通量的影响
Fig.2 Effect of operating time on membrane flux under different conditions

2.1.2 微滤浓缩过程 控制工业含镍电镀废水 pH 值为 9,跨膜压差为 0.14MPa,错流速度为 3.4m/s,温度为 30℃,在浓缩过滤模式下,考察体积浓缩因子(简称 VCF,定义为初始原料液体积与截留液体积之比)对 J 和 R_{Ni} 的影响,结果如图 3 所示.当 VCF 从 1 增大到 4 时, J 迅速从 491.2L/($m^2 \cdot h$)下降至 141.6L/($m^2 \cdot h$);VCF 为 4~8 时, J 变化较小,从 141.6L/($m^2 \cdot h$)降低至 100.6L/($m^2 \cdot h$);在 VCF 为 8~10 范围内, J 较快地从 100.6L/($m^2 \cdot h$)减小至 47.4L/($m^2 \cdot h$),这是因为膜污染物(氢氧化镍)浓度不断增大,膜污染逐渐加重,导致 J 不断下降.此外,过滤初期 R_{Ni} 较低,随着 VCF 增大, R_{Ni} 迅速

趋于 1 并维持不变,可能原因是,过滤初期膜表面未形成稳定滤饼层,膜孔径具有一定分布范围,部分微小氢氧化镍透过大的膜孔进入渗透液中,导致 R_{Ni} 较低,随着浓缩过程进行,形成的滤饼层可完全截留氢氧化镍沉淀.当 VCF 为 10 时,对应浓缩液为 5L,镍浓度为 55507.76mg/L,为回收镍奠定了较好基础;同时获得 45L 渗透液,其镍离子浓度为 13.26mg/L,此为采用化学沉淀法后的出水镍离子浓度(陶瓷膜微滤仅用于分离氢氧化镍沉淀,不能截留游离镍离子),该渗透液不能直接排放,本文以 PEI 络合-超滤技术进一步深度处理.

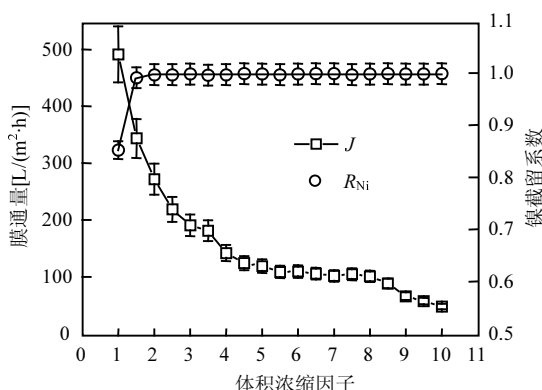


图 3 体积浓缩因子对膜通量和镍截留系数的影响

Fig.3 Effect of volume concentration factor on membrane flux and nickel rejection coefficient

2.2 聚乙烯亚胺络合-超滤行为

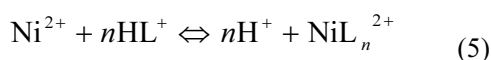
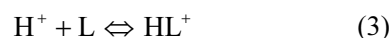
以陶瓷膜浓缩过程的渗透液为研究对象,采用 PEI 为络合剂,借助超滤膜的截留作用,对渗透液中的镍离子进一步处理.

2.2.1 聚合物与金属质量比、操作压力对镍截留系数和膜通量的影响 在恒容超滤下,料液 pH 值为 9(即陶瓷膜渗透液的 pH 值),陶瓷膜渗透液的镍离子浓度为 13.26mg/L,考察 $r_{p/m}$ 值、操作压力对 R_{Ni} 和 J 的影响,结果如图 4(a)和(b)所示.由图 4(a)可得,在相同操作压力下,当 $r_{p/m}$ 从 1 增大到 7 时, R_{Ni} 呈线性快速递增,即:增加 PEI 用量导致更多镍离子被截留,这是由于,在较低 $r_{p/m}$ 下,即 PEI 浓度较低,PEI 络合位数量不足以络合全部 Ni^{2+} ,未被络合的 Ni^{2+} 透过超滤膜,使得 R_{Ni} 较低;在较高 $r_{p/m}$ 下,即 PEI 浓度较高,更多 Ni^{2+} 与

PEI“绑定”而被超滤膜截留,故 R_{Ni} 增大.当 $r_{p/m}=7$ 时,对应 R_{Ni} 约为 0.99,继续增大 $r_{p/m}$, R_{Ni} 趋于不变,因此,从节约 PEI 用量角度考虑,pH=9 和 $r_{p/m}=7$ 为适宜操作条件.另外,当操作压力从 20kPa 增大 100kPa 时,相同 $r_{p/m}$ 下的 R_{Ni} 基本不变,这是由于操作压力不影响 PEI 与 Ni^{2+} 络合行为.

由图 4(b)可知,在相同 $r_{p/m}$ 下,当操作压力增大时, J 快速递增,这表明,在研究的 PEI 浓度范围内,超滤膜表面没有形成凝胶层, J 与操作压力成正比.此外,在相同操作压力下,随着 $r_{p/m}$ 增大, J 的变化可以忽略,即 PEI 用量增大对 J 影响甚微,这可能是在该研究条件下,浓差极化的影响很小,膜渗透速率几乎不受 $r_{p/m}$ 影响 Mslehiddinolu 等^[12]在研究络合超滤过程中亦发现了类似现象.

2.2.2 pH 值、温度对镍截留系数和膜通量的影响 在恒容超滤下,调节 $r_{p/m}=7$,陶瓷膜渗透液的镍离子浓度为 13.26mg/L,考察 pH 值、温度对 R_{Ni} 和 J 的影响,结果如图 5 所示.由图 5(a)可得,在相同温度下,随着 pH 值增大, R_{Ni} 逐渐增大,并趋于不变,可能的解释为,络合体系中可能的反应有:PEI 链上的络合位(以 L 表示)与 H^+ 反应、 Ni^{2+} 与 L 反应、 Ni^{2+} 与 HL^+ 的置换反应、生成镍氢氧化物反应等,可表示如下:



由式(3)和式(4)可得, H^+ 和 Ni^{2+} 竞争 L,尽管 Ni^{2+} 能与 HL^+ 发生置换反应(式(5)),但该反应大多发生在较高 pH 值下.在低 pH 值下, H^+ 浓度较大,L 易于与 H^+ 结合,式(3)右向进行,导致式(4)右向反应困难,游离 Ni^{2+} 浓度增大并透过超滤膜, R_{Ni} 降低.在高 pH 值下, H^+ 浓度较低,式(3)易于左向进行,L 浓度升高,故式(4)右向反应容易,生成的镍络合物被超滤膜截留, R_{Ni} 升高.此外,当温度从 20℃ 增大 35℃ 时,相同 pH 值下的 R_{Ni} 随温度升高而轻微下降,这可能是由于温度升高引起膜孔径略微变大,且 PEI 质量传递系数增大,导致 PEI 透过量增加,使得 R_{Ni} 下降.

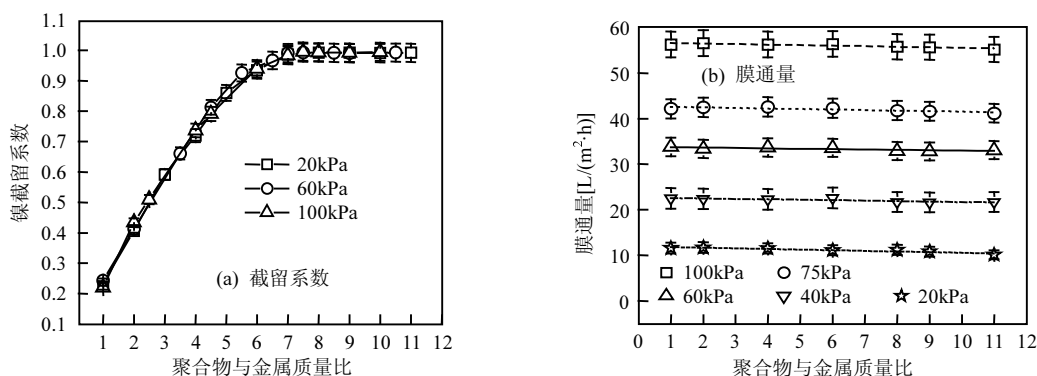


图4 聚合物与金属质量比、操作压力对镍截留系数和膜通量的影响

Fig.4 Effects of polymer/metal mass ratio and operating pressure on nickel rejection coefficient and membrane flux

由图 5(b)可得,在同一温度下,当 pH 值从 3 增大到 6 时, J 逐渐增大,pH 值超过 6 后, J 基本不随 pH 值变化,可能的解释为:在 H^+ 浓度较高的低 pH 值下,PEI 分子链容易与 H^+ 结合,易于团聚形成聚集体^[13],另一方面,有研究表明^[14],pH 值越低,膜表面负电荷越少,电荷排斥效应越差,导致 PEI 容易吸附

在膜表面,膜污染加重, J 下降.在 H^+ 浓度较低的高 pH 值下,PEI 链充分舒展^[13],且膜表面负电荷增多,PEI 与膜表面电荷排斥增强,膜污染下降, J 升高.另外,在相同 pH 值下,当温度从 20°C 升高到 35°C 时, J 逐渐增大,这主要是由于温度升高,引起料液黏度下降,且膜孔径略微变大,故溶剂透过速率增大.

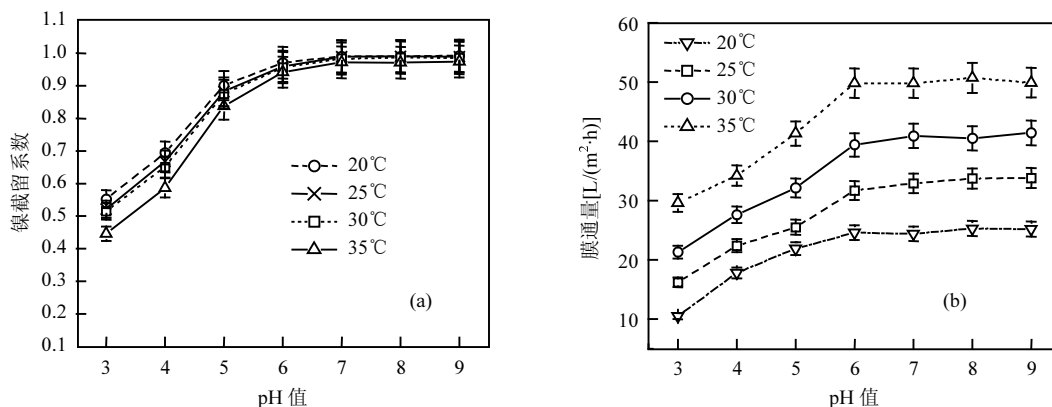


图5 pH 值、温度对镍截留系数(a)和膜通量(b)的影响

Fig.5 Effects of pH value and temperature on nickel rejection coefficient (a) and membrane flux (b)

2.2.3 超滤浓缩过程 取前述陶瓷膜浓缩过程渗透液 30L 为原料液,其镍离子浓度为 13.26mg/L ,pH 值为 9,控制 PEI 浓度为 95mg/L (即 $r_{\text{p/m}}$ 约为 7),跨膜压差为 60kPa ,温度为 25°C ,在超滤浓缩模式下,考察 VCF 对 J 、 R_{Ni} 、 C_r 和 C_p 的影响,结果如图 6.

当 VCF 从 1 增大到 30 时, J 从初始值 $33.8\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 下降到 $30.5\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,下降率仅为 9.76%,可见,在该研究条件下, J 衰减非常缓慢,可以忽

略不计. R_{Ni} 非常接近 1,且基本不变,这可以解释为,在 $\text{pH}=9$ 和 $r_{\text{p/m}}=7$ 下,绝大多数镍离子与 PEI 形成大分子络合物,该络合物被超滤膜截留,当 VCF 增大时,络合物被不断浓缩,镍离子仍处于络合状态而不能透过超滤膜,故 R_{Ni} 很高且不变.随着 VCF 值增大, C_r 呈线性快速递增,当 VCF 达到 30 时, C_r 从初始 13.26mg/L 增大到 396.64mg/L ,截留液中 Ni^{2+} 获得了有效浓缩; C_p 不随 VCF 变化,约为 0.04mg/L ,即超滤渗透液可

以直接排放.可见,PEI 络合-超滤能较好地处理陶瓷膜渗透液.

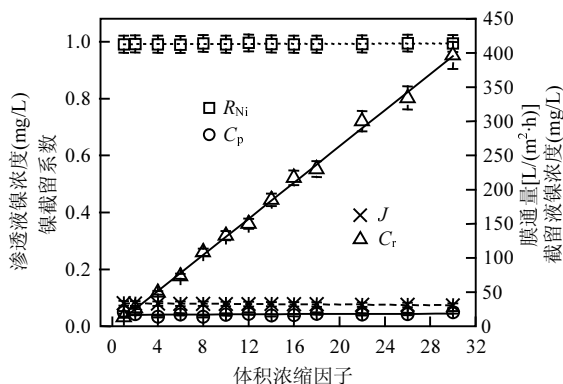


图6 体积浓缩因子对膜通量、镍截留系数、截留液镍浓度和渗透液镍浓度的影响

Fig.6 Effect of volume concentration factor on membrane flux, nickel rejection coefficient, nickel concentrations in the retentate and permeate

3 结论

3.1 研究了高浓度含镍废水的陶瓷膜微滤行为,在陶瓷膜恒容微滤过程中, J 初期下降较快,然后缓慢下降至不变;在陶瓷膜浓缩过程中, J 初期快速降低,经过缓慢下降阶段,再较快下降, R_{Ni} 迅速趋近1,当VCF为10时, C_r 从5562.71mg/L浓缩至55507.76mg/L, C_p 为13.26mg/L,需进一步处理.

3.2 以PEI络合-超滤技术恒容处理陶瓷膜渗透液,当 $r_{p/m}$ 从1增大到7时, R_{Ni} 快速递增至约0.99,此后 R_{Ni} 不变;随着pH值增大, R_{Ni} 逐渐增大至不变; R_{Ni} 随温度升高而轻微下降.当pH值从3增大到6时, J 逐渐增大,pH值超过6后, J 基本不变;随着温度或操作压力增大, J 快速递增; $r_{p/m}$ 对 J 影响轻微. $r_{p/m}=7$ 和pH=9为适宜操作参数.

3.3 在PEI络合-超滤浓缩过程中,当VCF从1增大到30时, J 的下降率仅为9.76%, R_{Ni} 非常接近1, C_r 从13.26mg/L增大至396.64mg/L, C_p 不变且约为0.04mg/L,超滤渗透液可直接排放.

参考文献:

[1] 韦友欢,黄秋婵,苏秀芳.镍对人体健康的危害效应及其机理研究[J].环境科学与管理,2008,33(9):45-48.

[2] 王宗海.络合-超滤技术处理镍离子废水[D].大连:大连理工大学,2008,7-10.

[3] 黄韵清,孙傅,曾思育,等.污水深度处理中超滤工艺对有机物的截留模型[J].中国环境科学,2015,35(2):420-426.

[4] Abadi S, Sebzari M, Hemati M, et al. Ceramic membrane performance in microfiltration of oily wastewater [J]. Desalination, 2011,265(1/3):222-228.

[5] 曾坚贤,郑立锋,孙霞辉,等.聚合物强化超滤技术分离 Hg^{2+} 和 Cd^{2+} 的研究 [J]. 中国环境科学,2010,30(6):780-785.

[6] Shao J H, Qin S, Davidson J, et al. Recovery of nickel from aqueous solutions by complexation-ultrafiltration process with sodium polyacrylate and polyethylenimine [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013,244-245:472-477.

[7] Khosa M A, Shah S S, Feng X. Metal sericin complexation and ultrafiltration of heavy metals from aqueous solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2014,244:446-456.

[8] Khosa M A, Shah S S, Feng X. Thermodynamic functions of metal-sericin complexation in ultrafiltration study [J]. Journal of Membrane Science, 2014,470:1-8.

[9] 曾坚贤,孙霞辉,周虎,等.聚合物强化超滤技术处理钨(VI) [J].过程工程学报,2011,11(3):396-400.

[10] 曾坚贤,叶红齐,刘辉,等.聚丙烯酸钠在中空纤维超滤膜表面的吸附研究 [J]. 高校化学工程学报,2007,21(4):563-568.

[11] Zhong Z X, Xing W H, Liu X, et al. Fouling and regeneration of ceramic membranes used in recovering titanium silicalite-1 catalysts [J]. Journal of Membrane Science, 2007,301:67-75.

[12] Müslehiddinoğlu J, Uludağ Y, Özbelge H. O, et al. Effect of operating parameters on selective separation of heavy metals from binary mixture via polymer enhanced ultrafiltration [J]. Journal of Membrane Science, 1998,140:251-266.

[13] Cañizares P, Lucas A, Pérez A, et al. Effect of polymer nature and hydrodynamic conditions on a process of polymer enhanced ultrafiltration [J]. Journal of Membrane Science, 2005,253(1/2):149-163.

[14] Zeng J X, Ye H Q, Liu H, et al. Characterization of a hollow-fiber ultrafiltration membrane and control of cleaning procedures by a streaming potential method [J]. Desalination, 2006,195(1/3):226-234.

致谢: 本文的英文摘要及英文图题由刘源博士修改完成,在此表示感谢.

作者简介: 张学俊(1993-),男,云南昭通人,本科生,主要从事重金属废水处理技术的研究.发表论文1篇.