

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.015

有机硅生产行业重金属废水膜分离技术研究

周荣忠^{1,2}, 谢锦文^{1,2}, 李攀荣^{1,2}, 代振鹏^{1,2}, 王佳琪^{1,2}, 易佳璐^{1,2},
李文^{1,2}

(1. 江西金达莱环保股份有限公司, 江西 南昌 330000; 2. 江西省电子电镀废水处理与资源化重点实验室, 江西 南昌 330000)

摘要: 选用0.4 μm的PVDF中空纤维膜,在抽停比为7 min:2 min、曝气量为70 m³/(m²·h)、初始膜通量为0.5 m³/(m²·d)、悬浮液浓度在20 000 mg/L以内的条件下,对含铜锌重金属有机硅生产废水进行处理,出水Cu²⁺、Zn²⁺浓度分别为0.20、0.36 mg/L,去除率分别为99.80%、99.07%,且凝聚体污泥干基中Cu含量均值达到17.64%,超过《铜精矿》(YS/T 318—2007)四级品标准,可直接资源化回收,产生经济效益,冲抵后废水处理成本为4.60元/m³。

关键词: 膜分离; 重金属废水; 有机硅; Cu²⁺; Zn²⁺; 资源化回收

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0090-07

Membrane Technology for Heavy Metal Separation from Organic Silicon Production Industry Wastewater

ZHOU Rong-zhong^{1,2}, XIE Jin-wen^{1,2}, LI Pan-rong^{1,2}, DAI Zhen-peng^{1,2},
WANG Jia-qi^{1,2}, YI Jia-lu^{1,2}, LI Wen^{1,2}

(1. Jiangxi JDL Environmental Protection Co. Ltd., Nanchang 330000, China; 2. Key Laboratory of Electronic Electroplating Wastewater Treatment and Recycling of Jiangxi Province, Nanchang 330000, China)

Abstract: A PVDF hollow fiber membrane with pore size of 0.4 μm was selected to treat organic silicon production wastewater containing copper and zinc under the following conditions: pumping work/stop time of 7 min to 2 min, aeration rate of 70 m³/(m²·h), initial membrane flux of 0.5 m³/(m²·d) and suspended solids concentration less than 20 000 mg/L. The concentrations of Cu²⁺ and Zn²⁺ in effluent were 0.20 mg/L and 0.36 mg/L, and the removal efficiencies were 99.80% and 99.07%, respectively. The average copper content in the dry base of condensed sludge reached 17.64%, which exceeded the fourth-grade product standard of *Copper Concentrate* (YS/T 318—2007) and could be directly recycled to generate economic benefits. The cost of wastewater treatment after cost compensation was 4.60 yuan/m³.

Key words: membrane separation; heavy metal wastewater; organic silicon; Cu²⁺; Zn²⁺; recycling

化工有机硅材料被誉为“工业味精”,是促进工业现代化发展的一剂良药,已广泛应用于电子、汽

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC04B01); 江西省重点研发计划项目(20151BCD40015)

通信作者: 李攀荣 E-mail: 9722646748@163.com

车、医疗等行业^[1-4]。为应对有机硅产品的旺盛需求,国内以星火为代表的有机硅单体生产企业产能迅速扩大,然而单体合成反应中铜锌催化剂所带来的重金属污染问题与日俱增,逐渐成为阻碍有机硅生产行业可持续发展的难题。重金属被称为永久性污染物,具有“三致”作用,易富集难降解物,严重威胁生态安全。去除重金属的方法主要有化学沉淀法、离子交换法、电解法、人工湿地、生物法、膜分离法等,其中化学沉淀法应用最广泛^[5]。化学沉淀法是通过添加混(絮)凝剂、络合剂等方式将离子态重金属固定为凝聚体进行固液分离,从而实现对重金属的去除^[6]。常见的固液分离方式有重力沉降、离心分离、过滤等,其中重力沉降分离效率较低,离心分离难以实现大型化以及工业化,不适用于凝聚体分离。相对于传统的固液分离方法,以中空纤维膜等为主流的分离技术具有操作简单、分离高效、可连续化操作等特点,近年来成为了热点研究方向。基于此,笔者对重金属凝聚体膜分离中材料的选择、污染控制和工程应用等方面进行了研究,旨在为处理有机硅行业重金属废水提出一种流程短、操作管理简单、运行成本低的新工艺,在废水高效处理的同时实现重金属资源化回收利用,助力有机硅行业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取某有机硅生产企业产生的废水(Cu^{2+} 浓度为64.57~196.35 mg/L、 Zn^{2+} 浓度为22.54~85.25 mg/L、pH为1~2),用10%的NaOH溶液进行中和预处理,调节pH为8~9,反应时间约为6 min,处理后的含重金属凝聚体混合废水无需沉降分离,可以直接作为实验用水。实验所用药剂主要为盐酸和氢氧化钠。实验仪器包括分析天平、中空纤维膜组件、电热恒温鼓风烘箱。

实验装置主要由膜组件、压力表、负压泵和鼓风机等部分组成,具体如图1所示。其中,膜组件包括集水管和多个中空纤维膜单元,中空纤维膜单元包括多根中空纤维膜和设置在集水管上能够拆卸的膜片。中空纤维膜的主要技术参数:膜材质为聚偏氟乙烯,膜孔径为0.4 μm ,跨膜压差<0.05 MPa,污泥浓度<30 g/L,膜清水通量<1 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,曝气量为50~120 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

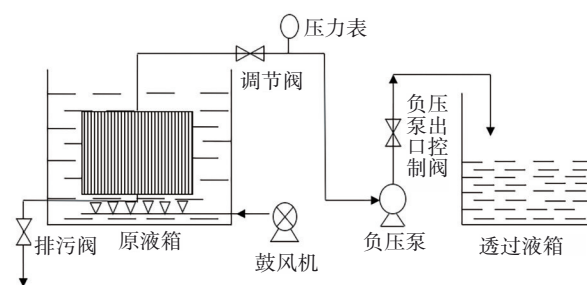


图1 中空纤维膜微滤实验流程

Fig.1 Flow chart of hollow fiber membrane microfiltration experiment

1.2 实验方法

首先筛选凝聚体膜材料,选择合适的膜材质和种类,通过控制系统抽停比、曝气量、悬浮液浓度和膜通量等参数,延缓污染速度,并在上述基础之上进行工程现场应用。

2 结果与分析

2.1 膜比选及污染控制效果

2.1.1 凝聚体膜的选择

① 膜结构

膜按其结构形式可以分为管式膜、平板式膜、卷式膜、中空纤维膜。表1展示了不同结构形式膜的特点。可知,中空纤维膜具有成本低、单位体积膜面积大、能耗低、膜更换费用低、分离效果好、操作简单、经济效益高等突出优势,但其抗污染性能一般,可通过优化运行条件控制膜污染,提升抗污染性能。基于此,选用中空纤维膜进行重金属凝聚体的分离,通过选择合适的膜材料和孔径、运行参数及清洗方式,保证分离过程的高效性。

表1 不同结构形式膜的特点

Tab.1 Characteristics of membrane with different structural forms

类型	单位膜面积成本	更换膜费用	通量	单位体积膜面积	能耗	抗污染性能
管式	高	低	较高	小	高	很好
中空纤维式	低	低	较高	大	低	一般
平板式	最高	最高	最高/较高	中等	中等	好/一般
卷式	低	高	较高	大	中等	好/一般

② 膜材料

目前,膜材料分为有机类和无机类两种,其中有机类主要包括纤维素衍生物类、聚合物类等;无机类主要包括金属及金属氧化物类、无机陶瓷类

等。常用的几种膜材料情况见表2。

表2 不同材质膜性能对比

Tab.2 Comparison of membrane with different materials

项 目		优点	缺点
聚烯烃类	聚丙烯腈 (PAN) ^[7]	亲水性好、价格便宜、成膜性好	耐酸碱、氧化性药剂不佳,机械强度不高,易断丝
	聚丙烯 (PP) ^[8]	力学性能较好、耐酸碱和有机溶剂	耐氧化性化学药剂性能低、易老化
	聚乙烯 (PE) ^[9]	化学稳定性较好、室温下耐酸碱	抗氧化性不佳、紫外光照射易发生光解
聚砜类	聚砜 (PSF)、聚醚砜 (PES) ^[10]	机械性能好、热稳定性和化学稳定性较好、耐酸碱	易污染,耐磨性、耐脏性、耐腐蚀性差
	聚氯乙烯 (PVC) ^[11-13]	机械性能好、热稳定性和化学稳定性较好、耐酸碱、耐腐蚀、抗压、成本低	需添加含铅稳定剂、安全性低、出水量小
含氟聚合物	聚偏氟乙烯 (PVDF) ^[14]	抗高温、耐酸碱和有机溶剂、抗氧化、抗污染、弹性好、抗老化、寿命长、化学稳定性好、亲水性好、通量大	成本较高、表面强度较低
无机陶瓷类	陶瓷膜 ^[15-16]	化学稳定性好、耐酸碱和有机溶剂、机械强度大、可反向冲洗、抗微生物能力强、耐高温、孔径分布窄、分离效率高	造价昂贵、脆性大、弹性小、加工困难

化学稳定性和亲水性是滤膜用于水处理时的两个重要特性。在酸碱、氧化剂、微生物等环境条件下,化学稳定性对膜材料的寿命起着决定性作用,也是选择膜污染清洗方法的直接影响因素;亲水性是影响膜通量以及对水中有机污染物吸附程度的重要因素。膜材料亲水性好,则不容易被污堵,且污堵后易清洗恢复。综合比较各种材质膜,PVDF膜具有化学稳定性好、亲水性好、通量高、能耗相对较低等诸多优势,因此实验选择添加有亲水性高分子物质等改性材料的PVDF膜。

③ 膜种类

膜按照孔径大小和分离机理可以分为微滤膜、超滤膜、纳滤膜和反渗透膜等,主要情况见表3。微滤以静压差作为推动力,利用微滤膜的“筛分”作用

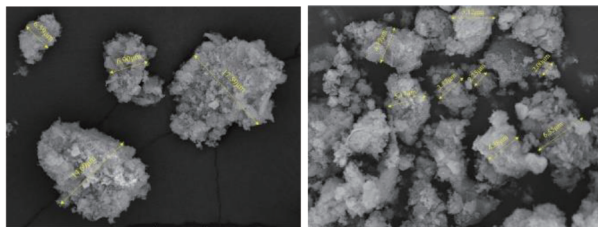
进行固液分离,多用于分离、提纯或浓缩含有细小固体颗粒(直径为100~10 000 nm)的悬浮液,也可以对直径大于10 μm 的固体颗粒悬浮液进行固液分离。相对于需要高压差作为推动力的超滤和反渗透而言,微滤能在低能耗、高通量的工况下对非均相悬浮液进行固液分离。综合考虑能耗和分离效果,选择微滤膜进行实验。

表3 不同膜的分离机理及特征

Tab.3 Separation mechanisms and characteristics of different membranes

项 目	孔径范围/nm	压力差/MPa	截留组分
微滤	100~10 000	0.000 7~0.07	悬浮物、纤维和细菌
超滤	1~100	0.1~0.7	生化制品、胶体、细菌病毒和大分子物质(分子质量为1~30 ku)
纳滤	0.1~1	0.3~0.7	大部分悬浮物、溶质和盐
反渗透	0.1	1.5	全部悬浮物、溶质和盐、离子态物质[进水污染指数(SDI)<5, COD<100 mg/L]

为进一步选择适宜的膜孔径,对凝聚体颗粒粒径进行了测定,结果见图2。可知,重金属凝聚体是多种杂质的团聚体,表面菱角突出,呈不规则形状,且粒径较大,主要粒径分布范围为2~20 μm 。根据孔径大小判断,使用微滤膜可达到较好的分离效果,因此选用市场上比较常见的0.4 μm 微滤膜。



a. 放大5 000倍

b. 放大8 000倍

图2 凝聚体颗粒的SEM照片

Fig.2 SEM photos of agglomerate particles

2.1.2 膜污染控制效果

膜污染主要是由于物理及化学作用,使污泥絮体、胶体颗粒、溶解性有机物及无机盐类等物质在膜的表面吸附和沉积,或堵塞在膜孔通道内外,导致透过物通过膜的阻力变大,过滤性能降低,最终导致膜的通量下降、膜压差升高的现象。膜污染主要由浓差极化、膜孔堵塞、表面吸附沉积等因素构成^[17]。膜污染的表征方法是测定膜过滤阻力,过滤总阻力 R 等于膜自身的固有阻力 R_m 、膜表面界面浓

差极化阻力 R_{cp} 、膜孔堵塞阻力 R_b 、泥饼层阻力 R_c 、凝胶层阻力 R_g 之和,符合达西定律^[18],见式(1)。

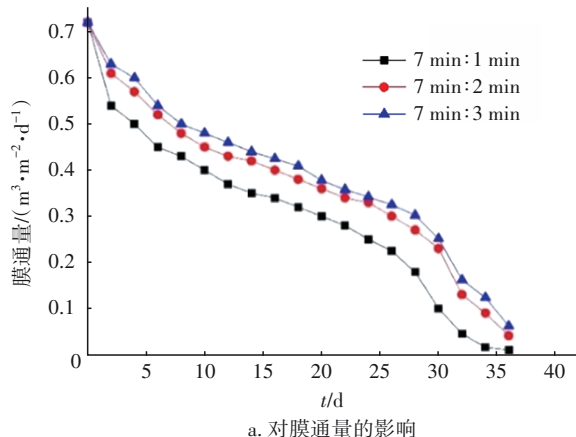
$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{P}{\mu R} = \frac{P}{\mu(R_m + R_{cp} + R_b + R_c + R_g)} \quad (1)$$

式中: J 为膜通量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; A 为膜面积, m^2 ; V 为透过液体积, m^3 ; t 为时间, s ; P 为跨膜压差, Pa ; μ 为透过液黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

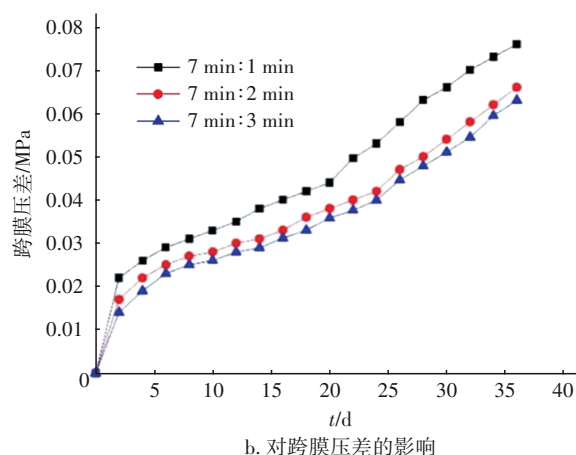
通过达西定律可知,膜通量的大小可以间接反映膜过滤阻力,从而表征膜污染状况。同时结合上述膜污染构成,分析表明膜污染主要表现为浓差极化、膜孔堵塞和表面吸附沉积等现象,为了更好地控制膜污染,以膜通量作为衡量指标,研究抽停比、曝气量、悬浮液浓度等条件对膜通量的影响。

① 抽停比

间歇运行是控制膜污染的一种可行方法,膜组件在负压条件下出水,停抽时负压突然消失,因负压而附着在膜表面的污染物会从膜表面脱离下来,并被水流带走。在没有压力梯度的条件下,曝气产生的影响显著增强,加速了污染物从膜表面脱离。在 $\text{MLSS} < 8\,000 \text{ mg/L}$ 、曝气量为 $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 条件下,考察抽停比对膜通量和跨膜压差的影响,结果如图3所示。可以看出,随着停抽时间的增加,反应器中曝气冲刷效果变化明显,膜通量下降减缓,跨膜压差上升趋势趋缓,表明停抽时间的增加可有效减缓膜污染速度。但是当停抽时间为3 min时,系统每天的产水时间仅为16.8 h,较之停抽时间为2 min时的产水时间减少11.30%,影响了系统的产水量。因此,综合考虑膜污染速度和系统的产水性能,确定最佳抽停比为7 min:2 min。



a. 对膜通量的影响



b. 对跨膜压差的影响

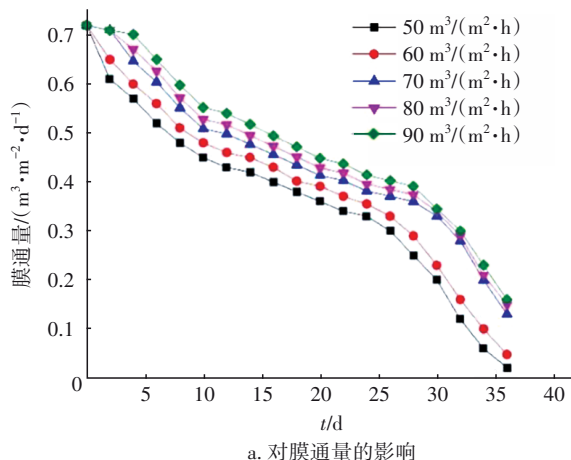
图3 抽停比对膜通量和跨膜压差的影响

Fig.3 Effect of work/stop time on membrane flux and trans-membrane pressure

② 曝气量

曝气量作为一种常用且方便的水力条件控制参数,常被用来控制和减轻膜污染。加大曝气量可以加速泥水混合液的循环速率,提高膜表面的剪切力,使污染物不易附着在膜表面,加速膜表面污染物的脱离。

选取膜通量作为膜污染的衡量指标,在悬浮液浓度为 $8\,000 \text{ mg/L}$ 、抽停比为7 min:2 min条件下,考察曝气量对膜通量和跨膜压差的影响,结果如图4所示。不同曝气量条件下,膜通量下降幅度趋势差异明显。以膜通量下降约50%作为基准,相比于曝气量为 $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,当曝气量为 $70 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,所需时间由约22 d延长至约30 d,继续增加曝气量所需时间无明显延长。考虑到曝气量的增加会加大能耗,故而在保证最佳膜通量的前提下,确定最佳曝气量为 $70 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。



a. 对膜通量的影响

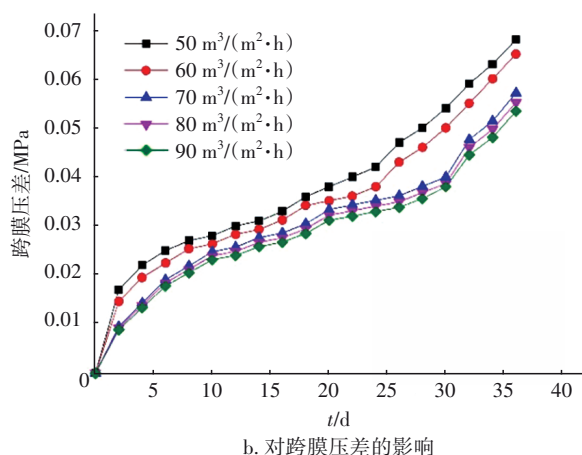


图4 曝气量对膜通量和跨膜压差的影响

Fig.4 Effect of aeration rate on membrane flux and trans-membrane pressure

③ 悬浮液浓度

当抽停比为7 min:2 min、曝气量为70 m³/(m²·h)时,悬浮液浓度对膜通量和跨膜压差的影响见图5。

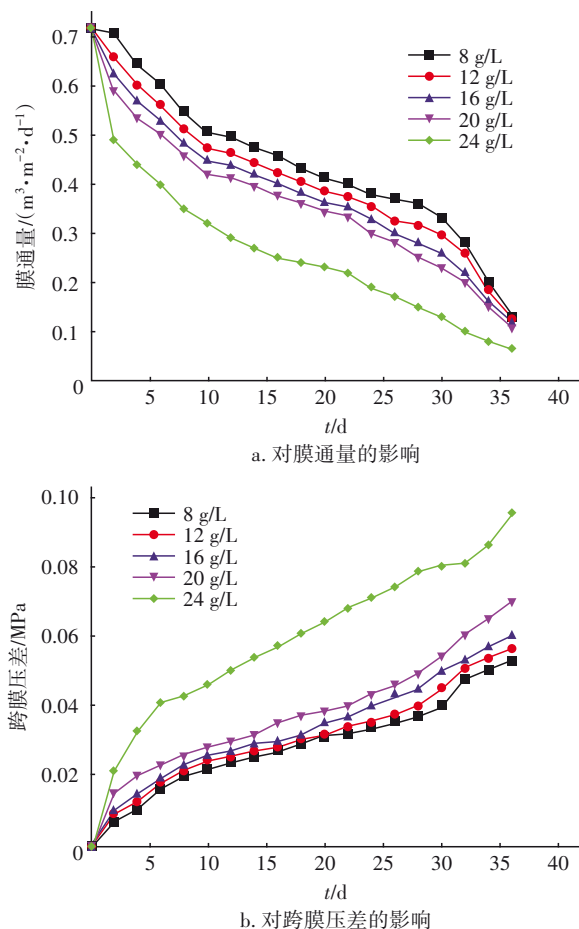


图5 悬浮液浓度对膜通量和跨膜压差的影响

Fig.5 Effect of suspension concentration on membrane flux and trans-membrane pressure

由图5可知,随着悬浮液浓度的增加,膜污染速率随之增大。当悬浮液浓度由8 g/L上升至20 g/L时,膜通量下降约50%所需时间也由约30 d减少至约23 d。继续增加悬浮液浓度至24 g/L时,膜通量下降约50%所需时间下降至约6 d,明显增加了膜清洗频率。综合考虑膜清洗的经济成本和排泥次数,确定最高的悬浮液浓度为20 g/L。

④ 膜通量

当抽停比为7 min:2 min、曝气量为70 m³/(m²·h)、悬浮液浓度为20 g/L时,在不同初始膜通量下考察膜通量的下降速度,结果如图6所示。可知,在同等膜面积条件下,初始膜通量越大,膜通量下降的速度越快。当初始膜通量为0.7 m³/(m²·d)时,膜通量仅4 d就下降20%,下降至0.4 m³/(m²·d)时仅需10 d;当初膜通量为0.5 m³/(m²·d)时,膜通量下降速度平缓,维持在0.4 m³/(m²·d)以上可达3周左右,为保障稳定的膜通量和减少膜清洗频率,确定初始膜通量为0.5 m³/(m²·d)最佳。

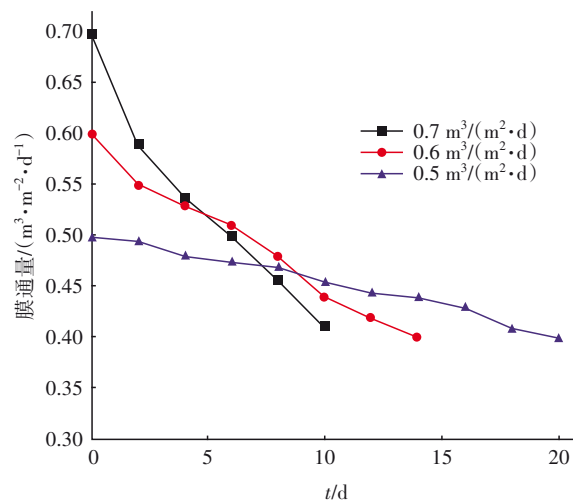


图6 不同初始膜通量下膜通量的下降速度

Fig.6 Decrease rate of membrane flux under different initial membrane fluxes

2.2 工程现场应用分析

2.2.1 工程运行效果

中试装置采用废水→中和预处理→膜分离→出水工艺流程,处理规模为50 m³/d。设计运行参数:膜孔径为0.4 μm的PVDF中空纤维膜、抽停比为7 min:2 min、曝气量为70 m³/(m²·h)、初始膜通量为0.5 m³/(m²·d)。主要包括预处理设备(L×B×H=6.0 m×2.1 m×3.0 m)及膜分离集成设备(L×B×H=

8.0 m×2.1 m×3.0 m),总装机功率为3.89 kW,实际运行功率为2.22 kW。废水进入预处理设备,经斜管沉淀模块去除大部分悬浮杂质后进入中和预处理模块,随后进入膜分离集成设备,实现出水水质达标的同时获得含铜污泥。

中试现场位于某有机硅生产企业内,进水中 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的平均浓度分别为102.34、38.60 mg/L,运行周期为1年,运行效果如图7所示。

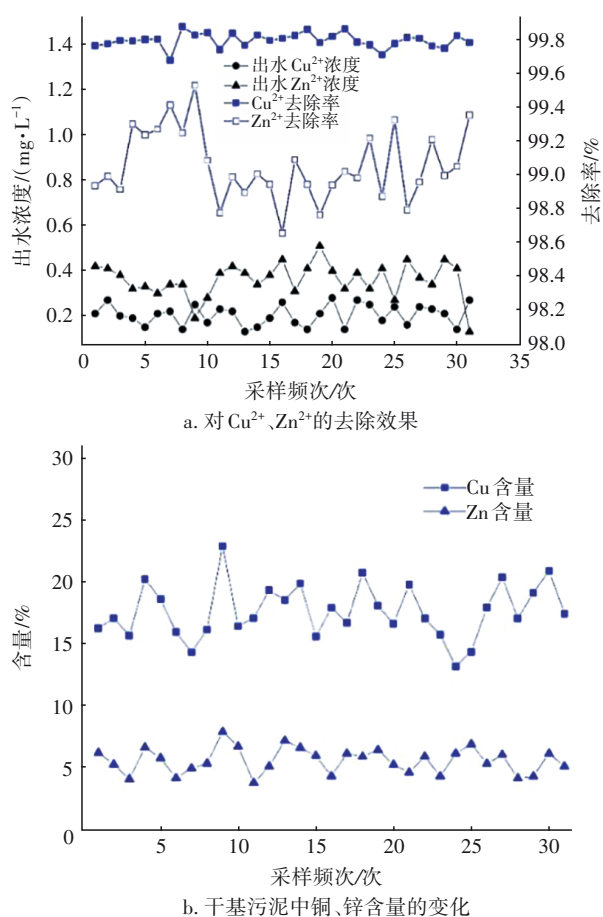


图7 中试装置运行效果

Fig.7 Operation effect of the pilot plant

中试装置运行过程中,平均25 d左右需要进行1次在线反冲洗,与上述研究结果基本吻合。由图7可知,中试装置出水 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的平均浓度分别为0.20、0.36 mg/L,去除率分别为99.80%、99.07%。通过对分离以后的Cu、Zn凝聚体污泥进行分析发现,污泥干基中Cu含量均值达到17.64%,Zn含量均值达到5.57%,其中Cu含量超过《铜精矿》(YS/T 318—2007)四级品标准($\geq 16\%$),可直接资源化回收。

2.2.2 经济成本分析

该工程的运行费用主要包括电费、药剂费、人工费和折旧费等。运行电耗主要涉及污水提升泵、鼓风机和产水泵等,日均耗电量为45.8 kW·h,按0.6元/(kW·h)计算,电费约为0.55元/ m^3 。药剂费主要包括中和反应所需添加NaOH和膜清洗的药剂费(共清洗4次),所需药剂费约为5.90元/ m^3 。现场兼职看管人员费用按800元/月计算,人工费为0.53元/ m^3 。折旧设备主要为膜组件、风机、泵等,折旧费约为0.82元/ m^3 。

分析含铜污泥成分可知,污泥干基中Cu可直接资源化回收,按市场价1500元/t的价格(铜泥含水率为75%)回收估算,废水产生的含铜污泥约为2.13 kg/ m^3 ,则回收Cu资源的经济效益达3.20元/ m^3 。综上所述,废水处理成本为4.60元/ m^3 。

3 结论

采用0.4 μm 的PVDF中空纤维膜时,在抽停比为7 min:2 min、曝气量为70 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、初始膜通量为0.5 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、悬浮液浓度在20 g/L以内的条件下,膜污染控制效果最佳。在上述条件下,对含铜、锌重金属有机硅生产废水进行处理,出水 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度分别为0.20、0.36 mg/L,去除率分别为99.80%、99.07%。Cu、Zn凝聚体污泥干基中Cu含量均值达到17.64%,Zn含量均值达到5.57%,其中Cu含量超过《铜精矿》(YS/T 318—2007)四级品标准,可直接资源化回收,在减少污泥处置成本的同时增加了资源回收的经济效益。结合运行成本分析,该工程的废水处理成本为4.60元/ m^3 。

参考文献:

- [1] SEYEDMEHDI S A, ZHANG H, ZHU J. Influence of production method, silicone type and thickness on silicon rubber superhydrophobic coatings [J]. Progress in Organic Coating, 2016, 90: 291–295.
- [2] GAI L Z, MACK J, LU H, et al. Organosilicon compounds as fluorescent chemosensors for fluoride anion recognition [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2015, 285: 24–51.
- [3] ERMAKOVA E N, SYSOEV S V, NIKULINA L D, et al. Synthesis and characterization of organosilicon compounds as novel precursors for CVD processes [J]. Thermochimica Acta, 2015, 622: 2–8.
- [4] THEELEN M, HABETS D, STAEMMLER L, et al.

- Localised plasma deposition of organosilicon layers on polymer substrates [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 211: 9-13.
- [5] 黄建新, 魏协奔. 电镀废水中重金属回收技术研究现状与发展[J]. *广东化工*, 2017, 44(7): 210-211.
- HUANG Jianxin, WEI Xieben. The present situation and development technologies to recycle the metal from electroplating wastewater [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44(7): 210-211 (in Chinese).
- [6] 朱遂一, 吴亚琼, 霍明昕, 等. 电镀废水中低浓度镍和锌离子的高效富集研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(10): 3381-3386.
- ZHU Suiyi, WU Yaqiong, HUO Mingxin, *et al.* A novel application of hematite precipitation for high-purity enrichment of nickel and zinc from smelting wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(10): 3381-3386 (in Chinese).
- [7] ZHAO K Y, ZHANG X X, WEI J F J, *et al.* Calcium alginate hydrogel filtration membrane with excellent anti-fouling property and controlled separation performance [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 492: 536-546.
- [8] 奚振宇, 王玉杰, 张新妙, 等. 共混改性聚丙烯分离膜的制备与性能研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(10): 189-192.
- XI Zhenyu, WANG Yujie, ZHANG Xinmiao, *et al.* Study on preparation and property of polypropylene separation membrane by blending modification [J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(10): 189-192 (in Chinese).
- [9] 廖祝胜, 王利强. 聚乙烯膜的卵磷脂改性及表面性能研究[J]. *功能材料*, 2018, 49(3): 3140-3145.
- LIAO Zhusheng, WANG Liqiang. Modification of polyethylene film by lecithin and analysis of surface properties [J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(3): 3140-3145 (in Chinese).
- [10] 魏柯, 张道海, 秦舒浩, 等. 聚砜分离膜的亲水改性研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2018, 34(8): 179-183.
- WEI Ke, ZHANG Daohai, QIN Shuhao, *et al.* Advances in hydrophilic modification of polysulfone separation membrane [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2018, 34(8): 179-183 (in Chinese).
- [11] KANG G D, CAO Y M. Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes: a review [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 463(1): 145-165.
- [12] LIU F, HASHIM N A, LIU Y T, *et al.* Progress in the production and modification of PVDF membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 375(1/2): 1-27.
- [13] RANA D, MATSUURA T. Surface modifications for antifouling membranes [J]. *Chemical Reviews*, 2010, 110(4): 2448-2471.
- [14] 高瑞昶, 陈静. 聚苯胺-蒙脱土复合物改性PVDF超滤膜的制备及性能[J]. *天津大学学报*, 2020, 53(1): 87-95.
- GAO Ruichang, CHEN Jing. Preparation and properties of PANI-MMT modified PVDF ultrafiltration membrane [J]. *Journal of Tianjin University*, 2020, 53(1): 87-95 (in Chinese).
- [15] KHEMAKHEM M, KHEMAKHEM S, AMAR R B. Emulsion separation using hydrophobic grafted ceramic membranes [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, 436: 402-407.
- [16] REN C L, FANG H, GU J Q, *et al.* Preparation and characterization of hydrophobic alumina planar membranes for water desalination [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 35(2): 723-730.
- [17] 刘建新. 膜过滤器阻力形成机理与分离过程强化 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- LIU Jianxin. Formation Mechanisms of Membrane Filter Resistance and Separation Processes Enhancement for Membrane Filtration [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [18] 郑义, 陆茵, 张盛杰, 等. 几种物质在聚醚砜膜、聚砜膜、聚氯乙烯膜上的污染特性研究[J]. *水处理技术*, 2016, 42(10): 30-33.
- ZHENG Yi, LU Yin, ZHANG Shengjie, *et al.* Study of several pollutants effect on fouling characteristics of PES, PSF, PVC membrane [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(10): 30-33 (in Chinese).

作者简介: 周荣忠(1984-), 男, 江西吉安人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为废水处理及资源化利用。

E-mail: zhourongzhong@jdlhb.com

收稿日期: 2020-07-22

修回日期: 2020-08-20

(编辑: 任莹莹)