

超滤膜法处理含油清洗废水及清洗剂回用研究

余炎子^{1,2,3}, 武永前¹, 徐飞然^{1,2}, 柯 达¹, 李传刚²

(1. 天津航海仪器研究所九江分部, 江西九江 332007; 2. 九江七所精密机电科技有限公司, 江西九江 332000; 3. 江西省流体污染控制重点实验室, 江西九江 332000)

[摘要] 含油清洗废水的深化处理及清洗剂回收再利用一直是工业废水处理领域关注的焦点。清洗剂具有既亲水又亲油的特点, 其高效回收受到限制。同时, 由于清洗废水所含油品种类复杂, 很难匹配到合适的处理方法。为解决该难题, 深入研究了过滤精度、跨膜压差、温度、浓度等因素对超滤膜法处理含油清洗废水及清洗剂回用效果的影响。研究表明, 适宜过滤精度的膜元件、合适的跨膜压差和温度可实现较高的清洗剂回用率和石油类截留率。此外, 废水中清洗剂的含量越高, 产水中的清洗剂越多; 石油类含量越高, 清洗剂的回用率越低, 膜受污染程度也越严重。结果表明, 超滤膜法是一种回用效率高、对废油截留效果佳的清洗废水处理方法, 与传统处理工艺相比, 兼具环保和经济实用性优势, 可应用于工业含油清洗废水、船舶舱底油污水以及其他含油清洗废水的净化及回用处理。

[关键词] 超滤; 膜法; 含油清洗废水; 回用

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)12-0142-06

Study on treatment of oily cleaning wastewater and reuse of cleaning agent by ultrafiltration membrane method

YU Yanzi^{1,2,3}, WU Yongqian¹, XU Feiran^{1,2}, KE Da¹, LI Chuan'gang²

(1. Jiujiang Branch, Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Jiujiang 332007, China;
2. JiuJiang 707 SCI & TECH Co., Ltd., Jiujiang 332000, China; 3. Jiangxi Key Laboratory
of Fluid Pollution Control, Jiujiang 332000, China)

Abstract: Advanced treatment of oily cleaning wastewater and recycling of cleaning agent have been the focus of attention in the field of industrial wastewater treatment. Cleaning agents are both hydrophilic and oleophilic, and their efficient recovery is limited. At the same time, it is difficult to match a suitable treatment method because of the complicated oil species contained in cleaning wastewater. In order to solve this problem, the effects of filtration accuracy, transmembrane pressure difference, temperature and concentration on the treatment of oily cleaning wastewater and the reuse of cleaning agent by ultrafiltration method were studied in depth. The results showed that the membrane element with suitable filtration accuracy, appropriate transmembrane pressure difference and temperature could achieve higher reuse rate and oil retention rate. In addition, the higher the cleaning agent content in the wastewater, the more the cleaning agent in the produced water. The higher the petroleum content, the lower the reuse rate of cleaning agent and the more serious the membrane contamination. The results showed that the method was a cleaning wastewater treatment method with high reuse efficiency and good retention effect of waste oil, which is both environmentally friendly and economically practical compared with the traditional treatment process, and can be applied to the purification and reuse treatment of industrial oily cleaning wastewater, ship bilge oil effluent and other oily cleaning wastewater.

Key words: ultrafiltration; membrane method; oily cleaning wastewater; reuse

工业清洗废水主要产生自石油的开采、加工、运输, 以及各类机械加工、制造等过程, 来源范围广、产

量大, 若不进行深度回收处理, 可造成自然环境的破坏, 并导致资源浪费。因此, 循环再利用清洗废水,

对清洗剂进行回用成为目前清洗废水处理技术的发展需求^[1-5]。

传统的工业清洗废水处理方法包括物理法、化学法、微生物处理及物理化学法^[6]。然而,若要实现清洗剂的高效分离与回收利用,须根据清洗废水的特点选择合适的处理方法。清洗剂的主要成分为表面活性剂,具有既亲油又亲水的特征。清洗剂与废油在水中混合后,采用一般的物理或化学方法处理,产水中仍含有较高的清洗剂,不符合绿色环保的要求,应采取更有效的措施分离清洗剂并回收利用^[7]。

碳化硅陶瓷超滤膜具有耐酸碱、机械强度高等优点,同时具有亲水疏油特性,在含油清洗废水处理中有独特优势^[8]。目前碳化硅陶瓷膜的应用还处于初级阶段,在污水过滤、气体除尘、吸声降噪等领域具有潜在优势^[9-11]。蓝伟光等^[12]使用 $0.1\ \mu\text{m}$ 孔径的碳化硅陶瓷膜处理含油废水;徐慢等^[6]研究了碳化硅陶瓷膜对含油切削液、机油废水、食用油废水的分离处置效果及工艺特性。笔者采用碳化硅陶瓷超滤膜开展了含油清洗废水处理及清洗剂回用的研究,并考察了过滤精度、跨膜压差、温度、浓度等因素对处理与回用效果的影响。

1 材料与方法

1.1 废水水质

工业含油清洗废水的成分虽然较为复杂,但以清洗剂和石油类物质为主。其中,工业用清洗剂多选用阴离子表面活性剂;而受上游生产工艺、制造过程等的影响,清洗废水含有的石油类物质种类较多(如汽轮机油、液压油、齿轮油等)^[13]。为便于开展研究,本研究中以常见的32号汽轮机油作为研究对象。

1.2 膜元件

试验所用膜元件为柱式碳化硅陶瓷膜,基本参数为:长度530 mm,外径46.8 mm,通道数量61个,单个通道直径3.6 mm,过滤精度 0.01 、 $0.04\ \mu\text{m}$,推荐膜面流速 $2\sim 4\ \text{m/s}$ 。

1.3 分析方法

阴离子表面活性剂按GB/T 7494—1987《水质阴离子表面活性剂的测定 亚甲蓝分光光度法》^[14],用紫外可见分光光度计进行测定。石油类物质按照HJ 637—2012《水质 石油类和动植物油类的测定 红外分光光度法》^[15],用红外测油仪进行检测。

1.4 试验装置

参考GB/T 32360—2015《超滤膜测试方法》中的超滤膜测试装置要求,开展设计并搭建试验装置^[16],工艺流程如图1所示。

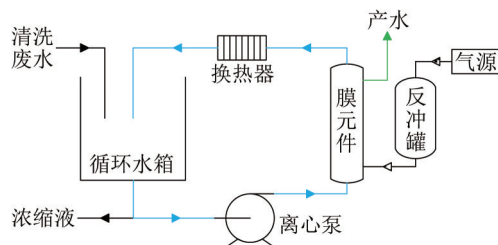


图1 工艺流程

Fig. 1 Process flow

2 结果与讨论

2.1 膜精度选择

初步选取2种过滤精度(0.01 、 $0.04\ \mu\text{m}$)的碳化硅陶瓷膜作为用膜样件^[5]。在水温为 $25\ ^\circ\text{C}$ 、不同跨膜压差的条件下,碳化硅陶瓷膜的清水(市政自来水)通量变化如图2所示。

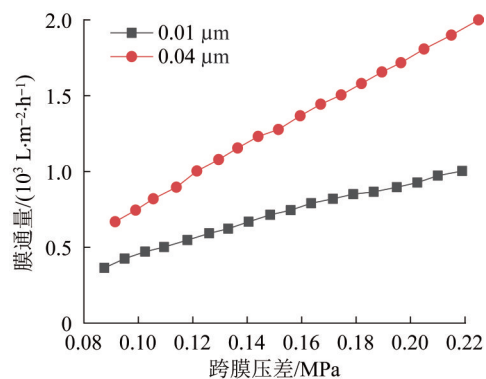


图2 清水通量随跨膜压差的变化

Fig. 2 Variation of water flux with transmembrane pressure difference

由图2可见,随着跨膜压差的增大,膜通量呈线性上升趋势。将膜通量变化值与跨膜压差变化值之比定义为膜通量变化率,计算得到2种精度碳化硅陶瓷膜的清水通量变化率分别为 $4\ 854.0$ 、 $9\ 972.4\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{MPa})$,二者相差2.05倍。

在废水温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ 、清洗剂体积分数为5%(阴离子表面活性剂检测质量浓度 $1.52\ \text{mg/L}$)、石油类物质体积分数为0.1%(检测质量浓度 $870.1\ \text{mg/L}$)、跨膜压差为 $0.1\ \text{MPa}$ 的条件下,2种精度碳化硅陶瓷膜的废水通量随时间的变化情况如图3所示。

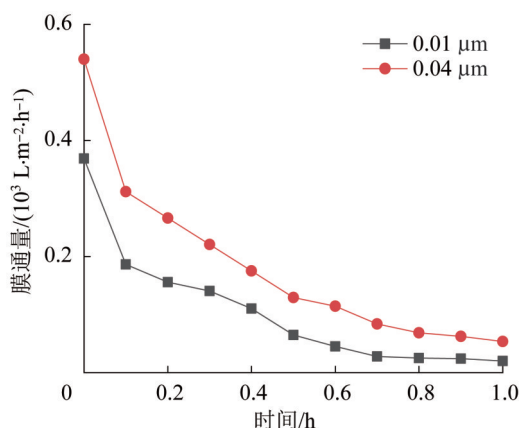


图3 清洗废水通量随时间的变化情况

Fig. 3 Variation of flux of cleaning wastewater with time

图3中,随着过滤时间的延长,膜通量逐渐降低。0~0.1 h膜通量衰减较快,分别从368.7 L/(m²·h)降到186.3 L/(m²·h)(0.01 μm精度),从539.8 L/(m²·h)降到311.8 L/(m²·h)(0.04 μm精度);0.1 h以后,膜通量衰减速率逐渐减小^[6]。这是由于过滤开始时清洗废水中的油类物质被膜孔截留,在膜表面逐渐发生富集、吸附,形成浓度边界层,造成膜污染,膜通量迅速降低。随着时间的延长(0.1 h后),边界层中的油类浓度要远高于主体溶液中的浓度,形成膜表面到主体溶液之间的浓度差,导致紧靠膜表面的油类向主体溶液扩散(浓差极化现象)。此过程表现为膜通量的衰减速率逐渐减小。当边界层中的油类浓度达到一定值时(1 h后),浓差极化趋于稳定,膜通量趋于稳定值^[17]。

由于0.04 μm碳化硅陶瓷膜的清水通量和废水通量均明显大于0.01 μm碳化硅陶瓷膜的相应通量,为提高膜处理效率,后续试验选择0.04 μm精度碳化硅陶瓷膜开展进一步研究。

2.2 验证试验

为初步验证0.04 μm精度碳化硅陶瓷膜是否适于处理含油清洗废水,在水温为25℃、不同跨膜压差下处理含5%清洗剂、0.1%石油类的清洗废水,处理前后的水质情况如表1所示。

表1 处理前后水质情况

Table 1 Water quality before and after treatment

项目	清洗废水	0.1 MPa产水	0.15 MPa产水	0.2 MPa产水
阴离子表面活性剂/(mg·L ⁻¹)	1.52	0.63	1.09	1.17
石油类/(mg·L ⁻¹)	870.1	48.1	70.2	85.2

由表1可见,在0.1、0.15、0.2 MPa跨膜压差下,阴离子表面活性剂的回用率分别为41.4%、71.7%、77.0%,石油类物质的截留率分别为94.5%、91.9%、90.2%。随着跨膜压差的增加,清洗剂的回用率逐渐增大,而石油类物质截留率逐渐减小^[12]。

鉴于清洗剂回用相关研究较少,依据上述结果给出阴离子表面活性剂回用率>70%、石油类物质截留率>90%的指标要求。据此认为,0.04 μm精度碳化硅陶瓷膜在石油类物质截留及清洗剂回用方面均具有一定潜力。后续进一步探讨跨膜压差、温度、浓度等因素对该碳化硅陶瓷膜处理含油清洗废水及回用清洗剂的效果的影响。

2.3 跨膜压差的影响

(1)清洗剂-跨膜压差试验。在25℃、清洗剂为5%、不同跨膜压差条件下,用0.04 μm碳化硅陶瓷膜处理含油废水。膜通量及产水中阴离子表面活性剂的变化如图4所示。

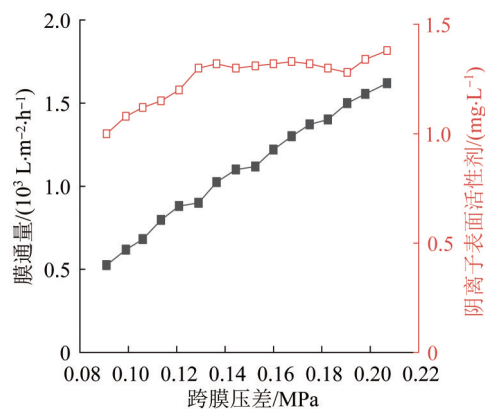


图4 产水中阴离子表面活性剂随跨膜压差的变化

Fig. 4 Variation of anionic surfactant content in produced water with transmembrane differential pressure

图4中,总体来看膜通量与跨膜压差呈正相关。试验初始时,随着跨膜压差的增大,产水中阴离子表面活性剂含量逐渐增大;当跨膜压差增至0.13 MPa时,产水中的阴离子表面活性剂趋于稳定(1.3 mg/L左右,回用率达到85.5%);直到跨膜压差增至0.19 MPa时,产水中的阴离子表面活性剂又呈现逐渐上升的趋势。这可能是因为,当跨膜压差<0.13 MPa时,随着跨膜压差的增大,阴离子表面活性剂的通量逐渐增大;0.13~0.19 MPa时,由于碳化硅陶瓷膜对水分子的选择透过性远大于对阴离子表面活性剂,使得水分子通量逐渐增大而阴离子表面活性剂通量变化不明显;当跨膜压

差 >0.19 MPa时,阴离子表面活性剂逐渐克服膜孔的摩擦与阻碍作用,其跨膜运输的速率大大增加,从而产水中阴离子表面活性剂含量呈逐渐增大趋势。

(2)石油类物质-跨膜压差试验。适宜的跨膜压差可提高石油类物质的截留率。在温度为 25°C 、石油类物质为 0.1% 、不同跨膜压差条件下,考察 $0.04\text{ }\mu\text{m}$ 碳化硅陶瓷膜的水通量及产水中石油类物质变化情况,结果见图5。

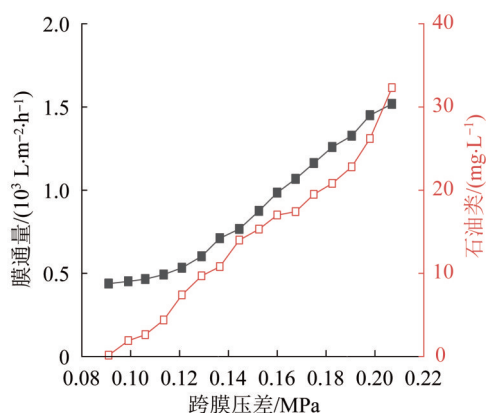


图5 膜通量及产水石油类含量随跨膜压差的变化

Fig. 5 Flux and oil content of produced water with transmembrane pressure difference

由图5可见,随着跨膜压差增大,膜通量逐渐增大,产水石油类物质也逐渐增大^[12]。可见对于含油废水的处理,跨膜压差足够小,就能保证产水中的石油类较低。但跨膜压差与产水量呈正相关,获得适宜的跨膜压差,既能保证产水中较低的石油类含量,又满足一定产水量要求最为关键。进一步研究了清洗废水处理效果与跨膜压差的内在联系。

(3)清洗废水-跨膜压差试验。在温度为 25°C 、清洗剂为 5% 、石油类物质为 0.1% 、不同跨膜压差条件下,考察 $0.04\text{ }\mu\text{m}$ 碳化硅陶瓷膜对废水的处理效果。产水中阴离子表面活性剂及石油类物质含量与跨膜压差的关系如图6所示。

由图6可见,随着跨膜压差的增大,产水中的阴离子表面活性剂和石油类含量均逐渐增加,表现为清洗剂回用率逐渐增大,石油类截留率逐渐减小。当跨膜压差达到 0.15 MPa时,二者趋于稳定,分别为 1.1 mg/L (回用率 72.4%)和 72 mg/L (截留率 91.7%)。当跨膜压差 >0.18 MPa时,二者含量均呈显著增加趋势,即清洗剂回用率逐渐增大,石油类截留率逐渐减小。

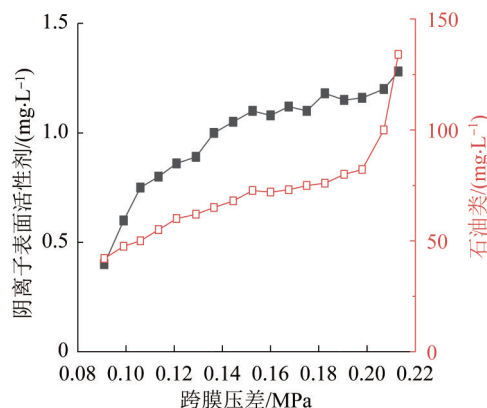


图6 产水中阴离子表面活性剂及石油类含量与跨膜压差的关系

Fig. 6 Relationship between the content of anionic surfactants and petroleum in produced water and the transmembrane pressure difference

2.4 温度的影响

上述试验均设定在 25°C 恒温条件下操作,且试验发现跨膜压差在 $0.15\sim 0.18$ MPa范围内有助于清洗剂的回用及石油类物质的截留。在跨膜压差为 0.15 MPa,清洗废水含 5% 清洗剂、 0.1% 石油类的条件下,探讨清洗废水温度对碳化硅陶瓷膜处理性能的影响,如图7所示。

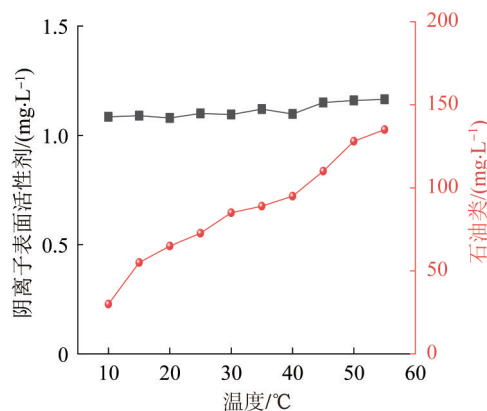


图7 产水中阴离子表面活性剂及石油类含量与温度的关系

Fig. 7 Relationship between temperature and content of anionic surfactants and petroleum in produced water

由图7可见,随着温度的升高,产水中的石油类物质呈上升趋势,阴离子表面活性剂检测值变化不大,保持在 1.1 mg/L 左右(回用率 72.4%)^[12]。由此可见,随着温度的增加,清洗剂的回用率保持相对稳定,而石油类物质的截留率则逐渐降低。

2.5 废水清洗剂和石油类物质体积分数的影响

(1)清洗剂。一般工业用清洗剂的推荐使用体

积分数为5%~10%,探讨了不同体积分数下清洗剂的回用效率。在清洗废水温度25℃、跨膜压差0.15 MPa、石油类0.1%、不同清洗剂含量条件下,产水中阴离子表面活性剂及石油类物质的变化情况、清洗剂回用率及石油类截留率如表2所示。

表2 产水中的阴离子表面活性剂及石油类物质

Table 2 Content of anionic surfactants and petroleum and corresponding recovery and petroleum.

φ (清洗剂)/%	5	6	7	8	9	10
阴离子表面活性剂/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.10	1.29	1.59	1.88	2.20	2.59
石油类/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	73.1	70.5	65.2	60.0	53.0	47.9
阴离子表面活性剂回用率/%	72.4	70.7	74.7	77.3	80.4	85.2
石油类截留率/%	91.6	91.9	92.5	93.1	93.9	94.5

由表2可见,随着清洗剂体积分数从5%升至10%,阴离子表面活性剂的回用率和石油类的截留率逐渐增大。

(2)石油类物质。在废水温度为25℃、跨膜压差0.15 MPa、清洗剂为5%的条件下,产水中的阴离子表面活性剂、石油类随废水中石油类的变化如表3所示。

表3 产水阴离子表面活性剂及石油类含量及相应回用率和截留率

Table 3 Content of anionic surfactants and petroleum and corresponding recovery and petroleum

φ (石油类)/%	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2
阴离子表面活性剂/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.28	1.20	1.10	0.89	0.59
石油类/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	3.2	45.2	72.7	105.3	123.5
阴离子表面活性剂回用率/%	84.2	78.9	72.4	59.2	39.4
石油类截留率/%	96.3	89.6	91.6	91.9	92.9

随着废水中石油类物质体积分数从0.01%升至0.2%,产水中石油类逐渐增大,由3.2 mg/L升至123.5 mg/L^[12];而产水中阴离子表面活性剂逐渐减小,由1.28 mg/L降至0.61 mg/L。随着废水中石油类物质的增大,废水表面的悬浮油越来越多,导致清洗剂与石油类吸附结合后在废水表面大量富集。在循环水处理时,如废水表面的石油类及清洗剂处理不及时,石油类物质升高不利于清洗剂的回用。因此,在持续评估原水清洗能力的基础上,当石油类含量达到某一特定值时开展清洗废水的回用处理较为适宜。

3 结论

(1)适宜过滤精度的膜元件不仅可保证较大的膜

通量,还有助于清洗剂的回用和石油类物质的截留。

(2)随着跨膜压差的增大,产水中清洗剂和石油类物质的含量均呈增大趋势,合适的跨膜压差可实现较高的清洗剂回用率和石油类截留率。

(3)温度变化(10~55℃)对清洗剂回用的影响较小,而随着温度的升高,石油类物质截留率逐渐减小。

(4)废水中清洗剂含量越高,产水中清洗剂越多;石油类物质越高,清洗剂的回用率越低,膜受污染程度也越严重,可通过碱性水与空气混合反冲洗方法恢复膜通量。

参考文献

- [1] 费彬. 工业清洗废水处理技术及移动式处理装置[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(1): 221.
FEI Bin. Industrial cleaning wastewater treatment technology and mobile treatment device[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(1): 221.
- [2] 陈敬, 朱乐辉, 刘小虎. 高浓度机械加工清洗废水预处理工艺研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(4): 84-86.
CHEN Jing, ZHU Lehui, LIU Xiaohu. Research on the pretreatment process of highly concentrated mechanical cleaning wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(4): 84-86.
- [3] 冯继波. 超滤膜技术在工业废水处理中的应用[J]. 资源节约与环保, 2014(7): 61.
FENG Jibo. Application of ultrafiltration membrane technology in industrial wastewater treatment[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2014(7): 61.
- [4] 刘艳红, 杨舒程, 杨炳祺, 等. 工业废水处理技术进展[J]. 河南化工, 2021, 38(10): 5-7.
LIU Yanhong, YANG Shucheng, YANG Bingqi, et al. Progress of industrial wastewater treatment technology[J]. Henan Chemical Industry, 2021, 38(10): 5-7.
- [5] 张壮伟. 工业废水循环利用的机理与方法研究[J]. 资源节约与环保, 2021(12): 114-116.
ZHANG Zhuangwei. Research on the mechanism and method of industrial wastewater recycling[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2021(12): 114-116.
- [6] 代小元. 碳化硅陶瓷膜在油水分离中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
DAI Xiaoyuan. Application of silicon carbide ceramic film in oil-water separation[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.
- [7] 李银玲. 环保型清洗剂处理含油污泥研究[J]. 清洗世界, 2021, 37(5): 33-34.
LI Yinling. Study of environmentally friendly cleaning agents for treatment of oily sludge[J]. Cleaning World, 2021, 37(5): 33-34.
- [8] 代小元, 沈凡, 戴武斌, 等. 碳化硅陶瓷膜处理工业废水的工艺

- 特性研究[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(3): 284-287.
- DAI Xiaoyuan, SHEN Fan, DAI Wubin, et al. Process characteristics of industrial wastewater treatment with silicon carbide ceramic membrane[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2018, 40(3): 284-287.
- [9] 余炎子, 李传刚, 鄢恒飞, 等. 多孔碳化硅陶瓷膜分离技术的应用研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(5): 41-45.
- YU Yanzi, LI Chuangang, YAN Hengfei, et al. Progress in separation technology of porous SiC ceramic membrane [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(5): 41-45.
- [10] 夏雪兰. 环境工程水处理中超滤膜技术的应用[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(3): 194-196.
- XIA Xuelan. Application of ultrafiltration membrane technology in environmental engineering water treatment [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(3): 194-196.
- [11] 李建勃. 膜技术在工业废水处理中的应用研究进展[J]. 清洗世界, 2021, 37(9): 16-17.
- LI Jianbo. Research progress on the application of membrane technology in industrial wastewater treatment [J]. Cleaning World, 2021, 37(9): 16-17.
- [12] 叶世威, 王贝辉, 洪昱斌, 等. 碳化硅陶瓷膜在油水分离中的应用研究[J]. 功能材料, 2011, 42(2): 248-251.
- YE Shiwei, WANG Beihui, HONG Yubin, et al. The study of silicon carbide ceramic membrane used in oil-water separation [J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(2): 248-251.
- [13] 李桂菊, 张滢, 冀倩儒, 等. 含油清洗废水联合处理工艺研究[J]. 工业水处理, 2012, 32(7): 64-67.
- LI Guiju, ZHANG Xi, JI Qianru, et al. Research on the united treatment process of oil-bearing cleaning wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32(7): 64-67.
- [14] 国家环境保护局. 水质 阴离子表面活性剂的测定 亚甲基分光光度法: GB 7494—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- Ministry of Ecology and Environment of PRC. Water quality-Determination of anionic surfactants-Methylene blue spectrophotometric method: GB 7494—1987 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing and Media Co., Ltd., 1987.
- [15] 国家环境保护局. 水质 石油类和动植物油类的测定 红外分光光度法: HJ 637—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- Ministry of Ecology and Environment of PRC. Water quality-Determination of petroleum, animal fats and vegetable oils-infrared spectrophotometric: HJ 637—2012 [S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2012.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 超滤膜测试方法: GB/T 32360—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, PRC. Test methods for ultrafiltration membranes: GB/T 32360—2015 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing and Media Co., Ltd., 2015.
- [17] 邢卫红, 童金忠, 徐南平, 等. 微滤和超滤过程中浓差极化和膜污染控制方法研究[J]. 化工进展, 2000, 19(1): 44-48.
- XING Weihong, TONG Jinzhong, XU Nanping, et al. Control of concentration polarization and fouling of membranes in microfiltration and ultrafiltration [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2000, 19(1): 44-48.
- 【作者简介】 余炎子(1990—), 博士, 高级工程师。电话: 17855129818, E-mail: yuyz@mail.ustc.edu.cn。
- 【收稿日期】 2022-10-30(修改稿)

·国内外水处理技术信息·

利用高级氧化对污水进行预处理培养工程微藻进行污水深度处理和二氧化碳减排的方法——马军, 韩雅红, 王群, 等. CN 101654313A

滤池里以利用高级氧化对污水进行预处理培养工程微藻进行污水深度处理和二氧化碳减排的方法。它涉及了利用高级氧化对污水和烟气进行预处理, 利用人工培养工程微藻同时解决污水深度处理和CO₂减排的方法, 解决了现有技术中藻类因无法吸收污水中的大分子有机污染物而在污水处理中受到限制的缺陷。本发明利用高级氧化处理污水和烟气, 之后在生物反应器中利用工程微藻对

预处理后的污水进行深度处理, 将烟气中的CO₂吸收利用, 工程微藻也可以提取功能性产品。本发明具有成本低、投资小、效率高的优点, 处理效果好, 使烟气资源化, 增加生物质能来源, 减轻污水深度处理工艺的负担, 降低了工程造价, 改变了传统意义上污水处理观念。