

超滤膜处理油田含油污水研究进展

黄斌¹, 张威^{1*}, 王莹莹¹, 傅程², 许瑞¹, 史振中¹

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆 163348;

2. 中国石油大庆油田博士后科研工作站, 黑龙江大庆 163458)

摘要: 针对国内外油气工业中含油污水处理效率低、设备运行费用高的现状, 介绍了超滤膜过滤的原理以及含油污水超滤膜处理技术, 包括单一膜、复合膜、改性膜和共混膜以及超滤膜与其他方法的耦合工艺。最后, 针对目前存在的问题提出了一些建议。

关键词: 含油污水; 超滤膜; 耦合工艺

中图分类号: TE992

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)06-0043-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.06.010

Advances in oily wastewater treatment by ultrafiltration membranes

HUANG Bin¹, ZHANG Wei^{1*}, WANG Ying-ying¹, FU Cheng², XU Rui¹, SHI Zhen-zhong¹

(1. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163348, China;

2. Post-doctoral Research Station of Daqing Oilfield, CNPC, Daqing 163458, China)

Abstract: Given the present low efficiency and high operation cost in the oily wastewater treatment at domestic and abroad oil and gas industry, this paper introduces the filtration principle of ultrafiltration (UF) membrane and the treatment technology of oily wastewater by UF membrane, including single membrane, composite membrane, modified membrane and blend membrane as well as the coupling process of ultrafiltration membrane and other methods. Finally, some suggestions are put forward for the existing problems.

Key words: oily wastewater; ultrafiltration membrane; coupling process

在油气工业生产和加工过程中, 会产生大量的含油污水。含油污水经过处理后, 既能减小其外排对环境造成的污染, 又能用于回注地层, 降低油田开发的成本。目前, 国内外现有的含油污水处理技术主要包括重力分离、浮选、聚结、吸附、过滤、化学破乳、生物技术以及上述技术的组合使用^[1]。由于这些技术普遍存在处理费用高、运行效率低等问题, 因此亟需开发高效、节能、无污染的油田采出水处理技术。而膜技术具有分离效率高、能耗低、出水水质高、耐高温高压、机械强度高、良好的化学稳定性等优点, 尤其是超滤膜技术, 技术成熟、自动化程度高、应用广泛, 已开始逐步代替传统的处理技术^[2], 本文中综述了各类超滤膜的国内外研究现状, 以期超滤膜在油田污水处理中进一步推广提供参考。

液借助外界压力作用, 以一定的流速在超滤膜面上流动, 使料液中的无机离子、小分子质量物质透过膜表面, 把料液中的大分子物质、胶体物质、细菌及微生物等截留下来, 从而实现分离目的。超滤对油田的悬浮固体、胶体、细菌和各种有机物均有较好的去除效果, 产出水水质也都能达到油田回注用水标准。超滤膜对溶质的分离过程有: ①在膜面的机械筛分; ②在膜表面和膜孔内的吸附; ③在孔中停留而被去除^[3]。

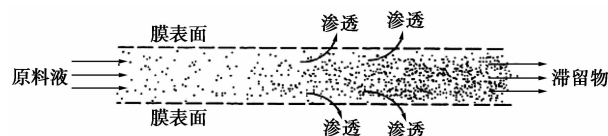


图1 超滤膜过滤原理示意图

1 超滤膜过滤原理

超滤技术的基本原理(见图1)是: 被分离的料

2 超滤膜技术

2.1 单一膜

目前, 国内外用于油田含油污水处理的超滤膜

收稿日期: 2016-10-09

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531074)

作者简介: 黄斌(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事提高采收率和采出水处理研究; 张威(1992-), 男, 硕士生, 研究方向为油田采出水处理技术, 通讯联系人, 15776541967@163.com。

主要有聚砜(PSf)超滤膜、聚醚砜(PES)超滤膜、中空纤维(PSB)超滤膜、聚偏氟乙烯(PVDF)超滤膜。

2.1.1 PSf 超滤膜

PSf 超滤膜主要以聚砜作膜材料, *N*-甲基吡咯烷酮为溶剂, 水为非溶剂, 采用 L-S 相转化法制备。Chakrabarty 等^[4]制备了 4 种不同类型的 PSf 超滤膜, 其组成如表 1 所示。

表 1 不同膜的组分(PSf 质量分数 12%)

膜体系	膜名称	溶剂		添加剂	
		质量分数/%		质量分数/%	
		NMP	DMAc	PVP	PEG
PSf/NMP/PVP24000	M ₁	83	—	5	—
PSf/DMAc/PVP360000	M ₆	—	83	5	—
PSf/NMP/PEG20000	M ₉	83	—	—	5
PSf/DMAc/PEG20000	M ₁₂	—	83	—	5

将这 4 种超滤膜用于处理油水乳状液和油田含油污水, 结果表明, PSf 超滤膜不能将出水中的含油量降到 10 mg/L 以下, 不能满足含油污水的排放标准, 超滤之后必须对出水做进一步的处理, 比如纳滤或者反渗透过滤, 才能使出水达到排放标准。

2.1.2 PES 超滤膜

PES 超滤膜通常以聚醚砜为膜材料, 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为添加剂, *N,N*-二甲基乙酰胺(DMAc)为溶剂, 采用相转化法制备。潘振江等^[5]采用 PES 超滤膜处理油田采出水, 超滤出水中的油类, 悬浮物及粒径中值均满足油田回注水的水质标准。Abdolhamid 等^[6]用合成的 PES 超滤膜处理炼油污水, TOC 去除率可达 96.3% 以上, 油脂去除率更是高达 99.7%, 可见 PES 超滤膜对炼油污水有很好的处理效果。

2.1.3 PVDF 超滤膜

PVDF 膜由于具有耐腐蚀、膜通量大、机械强度高、亲水性能好、化学稳定性好等特点引起了研究人员的广泛关注。徐俊等^[7]用 PVDF 膜处理大庆油田含油废水, 膜滤出水中油和悬浮物的质量浓度均小于 1.0 mg/L, 去除率可达到 95%。丁慧等^[8]研究发现, 在温度 50℃, 浓水回流量积比 50%, 在线反冲洗周期 25 min 的条件下, 用 PVDF 膜处理油田采出水, 水质可达到 SY/T 5329—94 低渗透油田注水水质 A1 级标准。镇祥华等^[9]报道了在跨膜压差为 0.30~0.35 MPa, 膜面流速为 3.0~3.5 m/s, 温度为 35~40℃ 的条件下, 用截留分子质量为 100 Ku 的

PVDF 膜处理大庆油田采出水, 出水中的含油量和悬浮物均低于 1 mg/L, 出水水质满足油田回注水标准。刘彬等^[10]考察发现在一定的预处理条件下, 采用 PVDF 膜处理油田污水, 出水水质可达到特低渗透油田回注水“5.1.1”水质标准。

2.1.4 PSB 超滤膜

李红剑^[11]以 α -纤维素为原料, 一水合 *N*-甲基吗啉-*N*-氧化物(NMMO·H₂O)为溶剂, 聚乙二醇(PEG400)为添加剂, 去离子水为内外凝胶浴, 采用浸入相转化法制备了 PES 超滤膜, 并考察了其用于油水分离的效果, 结果表明, 油水乳状液的截留率可达到 99% 以上, 出水含油量小于 10 mg/L。Li 等^[12]通过在 PVDF 中空纤维微滤膜的表面和表层下生成的 PSB 层制备出亲水性 PSB 超滤膜, 这种 PSB 超滤膜具有很好的过滤性能, 油滴截留率可达 90%。

综上所述, 将单一超滤膜的特点及其对含油污水的处理效果总结如表 2 所示。

表 2 单一超滤膜的特点及处理效果

单一膜	特点	处理效果
PSf 超滤膜	稳定性好, 憎水性强, pH 适用范围广, 极限操作压力较低	出水含油量不能达到外排标准
PES 超滤膜	良好的通量, 化学稳定性好, 碱性 pH 稳定, 疏水性强	出水能满足油田回注水标准
PVDF 超滤膜	膜通量大, 化学稳定性好, 机械强度高, 较疏水, 易于改性	出水水质可达到低渗透油田回注水标准
PSB 超滤膜	有效膜面积大, 通量高, 能很好地进行反冲洗, 操作压力低	平均截油率可达 95% 以上

由表 2 可以发现, 除了 PSf 超滤膜之外, 其他的单一膜处理含油污水的效果都比较好, 出水基本都能达到油田回注水标准。

2.2 复合膜

由于单一膜存在制膜工艺复杂、膜的重复性差、制备小孔径膜困难、质脆柔韧性差、成本高等缺点, 因此研究者们将 2 种单一膜复合在一起, 使其同时具备 2 种或多种单一膜的优点。目前国内外研究的复合膜主要是有机-无机复合膜。常用的无机材料主要有 TiO₂、SiO₂、Al₂O₃ 等, 常用的有机材料主要有聚砜、聚丙烯酸、聚乙烯醇、聚偏氟乙烯、聚乙烯和聚乙烯吡咯烷酮。

张裕卿等^[13]报道了聚砜-Al₂O₃ 复合膜处理油田含油污水, 复合膜的截油率可达 90%, 出水满足油田回注水标准, 而且复合膜经过清洗后, 水渗透通

量能恢复到原始通量的85%。王枢等^[14]采用界面聚合法对PVDF超滤膜进行表面改性,制备出了具有抗污染的聚酰胺/聚乙烯醇复合超滤膜,在复合膜水通量为 $190\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时,复合膜的截油率可达98.5%以上,出水含油量小于 1.6 mg/L ,膜性能均优于单一的PVDF膜。吴春金等^[15]以混合醋酸纤维素微孔膜为支撑膜制备了聚乙烯醇复合超滤膜,对模拟含油污水的处理实验结果表明,该复合膜的截油率可达90%以上,且具有良好的耐油污染性能。Lu等^[16]采用相转化法制备出了管式 Al_2O_3 -PVDF复合超滤膜,并将其用于处理大庆油田含油污水,结果表明,出水含油量和悬浮固体含量均低于 1 mg/L ,化学需氧量(COD)和总有机碳(TOC)的去除率分别为90%和98%以上,而且清洗后的膜通量恢复率可达100%。Ong等^[17]以聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为添加剂,以 TiO_2 和聚偏氟乙烯(PVDF)为原料,制备了PVDF-PVP- TiO_2 复合超滤膜,当PVDF膜中 TiO_2 的质量分数为2%时,该复合膜的性能最佳,膜通量可达 $70.48\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,截油率更是高达99.7%,但是当含油量由从 250 mg/L 增大到 $1\ 000\text{ mg/L}$ 时,膜通量下降较快。

2.3 改性膜

目前国内外常用的超滤膜改性方法主要有膜表面改性法和膜材料改性法。膜表面改性主要通过膜表面的物理改性和化学改性来实现,而膜材料改性则是通过向超滤膜铸膜液中添加高分子材料或小分子无机粒子以及膜材料本体的化学改性来实现。通过改性处理,可以使超滤膜具有更好的抗污染性,增大膜的使用寿命。

芦艳等^[18]采用膜材料改性法制备了改性PVDF超滤膜,并用制备的PVDF超滤膜处理含油污水,出水含油量和悬浮固体含量均为 0.2 mg/L ,粒径中值也小于 $2\ \mu\text{m}$,出水水质满足油田回注水要求。竺柏康等^[19]向PVDF/PVP体系中添加 TiO_2 和 Al_2O_3 2种无机纳米颗粒,制备出了改性PVDF平板超滤膜,当纳米颗粒总含量为3%, Al_2O_3 与 TiO_2 质量比为1:2时,改性PVDF平板超滤膜性能最好,出水悬浮物含量低于 0.4 mg/L ,石油烃类含量小于 0.5 mg/L ,COD值在 $60\sim 70\text{ mg/L}$,达到国家污水排放标准。吕慧等^[20]采用无机纳米改性PVDF超滤膜处理大庆油田采油废水,在操作压力为 0.1 MPa ,处理温度为 40°C 时,处理后的出水中含油量小于 1.0 mg/L ,悬浮物含量小于 0.4 mg/L ,COD去除率为80%~

94%,TOC去除率在90%以上。徐俊等^[21]采用改性的PVDF膜处理大庆油田含油污水,在膜面流速为 4.5 m/s ,跨膜压差为 0.2 MPa ,温度为 $(37\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的最佳运行条件下,出水水质可达到《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》(SY/T 5329—94)的A1级标准。Abdolhamid等^[22]用改性PES中空纤维超滤膜处理工业含油废水,截油率可达98.5%,悬浮固体去除率也可达98.2%。Chakrabarty等^[23]以聚乙烯吡咯烷酮(PVP)和聚乙烯醇(PEG)为添加剂,制备出了亲水性强,孔隙度高的改性PSf超滤膜,实验进行了12种改性PSf超滤膜处理含油污水,结果表明,每种改性PSf超滤膜的截油率都能达到90%以上,都可以达到污水排放标准。

2.4 共混膜

国内关于共混超滤膜制备和表征的文献较多,潘学杰、于兰哲、王新、赵津礼、赵后昌等人都报道了相关共混超滤膜的制备和表征,但共混超滤膜用于含油污水处理的文献报道则很少,仅赵文敏等^[24]报道了PVDF/PAN共混超滤膜处理自制乳化油污水,国外则有共混超滤膜处理含油污水的文献报道。

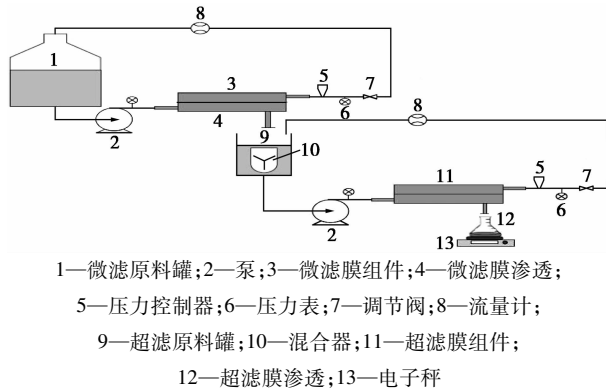
Martin^[25]报道了PVDF/PC(聚碳酸酯)共混膜过滤油水乳状液,并分析了聚碳酸酯含量对PVDF/PC共混膜结构、亲水性和功能的影响,实验结果表明,当PVDF/PC共混膜中PC的质量分数为20%时,共混膜的性能最优,此时共混膜的原始渗透通量可达 $28.59\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,极限渗透通量为 $22.11\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,截油率更是高达97.8%。Abdolhamid等^[26]运用一种干喷湿纺工艺,利用相转化法制备了PES/PAN共混中空纤维超滤膜,通过实验研究发现,PES与PAN的质量比为3:1时,共混膜的机械强度和分离效果最好,用此条件下的共混膜处理含油污水,COD的去除率为80.6%,TOC的去除率为89.3%,悬浮固体的去除率可达100%,除油率也高达99.7%,出水水质满足含油污水排放标准。Martin等^[27]磺化聚碳酸酯(SPC)/PVDF共混超滤膜处理乳化含油污水,截油率可达96.63%以上。

3 超滤膜耦合工艺

由于单一的超滤膜存在易污染、膜通量下降快等问题,许多研究者研究超滤膜与其他含油污水处理工艺的联用效果。目前国内外已有很多相关的文献报道。耦合工艺主要有膜工艺的耦合以及超滤膜与物理化学方法的联用。

3.1 微滤-超滤(MF/UF)耦合工艺

Kourosch 等^[28]研究了 MF/UF 耦合工艺处理含油污水的效果,流程如图 2 所示。其中 MF 采用的是商用的 PVDF 膜,UF 采用的是 PES 膜,并将其与单一的 MF 工艺和 UF 工艺的处理效果进行了对比,结果表明,MF/UF 耦合工艺处理含油污水的效果要优于单一的 MF 工艺或者 UF 工艺,耦合工艺处理后的出水中含油量仅为 0.4 mg/L,而悬浮固体含量几乎为 0。



1—微滤原料罐;2—泵;3—微滤膜组件;4—微滤膜渗透;
5—压力控制器;6—压力表;7—调节阀;8—流量计;
9—超滤原料罐;10—混合器;11—超滤膜组件;
12—超滤膜渗透;13—电子秤

图 2 微滤-超滤耦合工艺流程

3.2 超滤-反渗透(UF/RO)耦合工艺

Abdolhamid 等^[29]报道了 UF/RO 耦合工艺处理含油污水,工艺流程如图 3 所示,其中 UF 工艺采用的是 PAN 膜,RO 工艺采用的是 PA(聚酰胺)膜,实验结果表明,UF/RO 耦合工艺对油脂的去除率可达 100%,而对 TOC、COD、TDS 的去除率也都在 95% 以上。

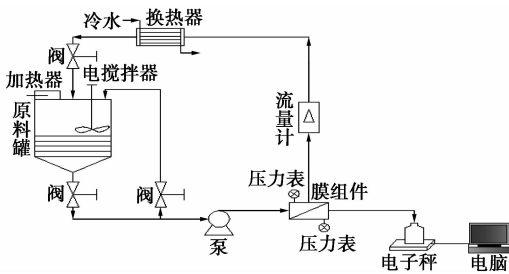


图 3 UF/RO 耦合工艺流程

3.3 超滤-纳滤(UF/NF)耦合工艺

Orecki 等^[30]考察了(UF/NF)耦合工艺对模拟含油污水的处理效果,工艺流程如图 4 所示。其中 UF 工艺采用的是 PVDF 膜,而 NF 工艺采用 PA 膜,实验结果表明,第一步 UF 工艺去油率就能达到 90% 以上,再经过第二步的 NF 工艺,去油率已经可以达到 100%,TOC 去除率也能达到 99% 以上。

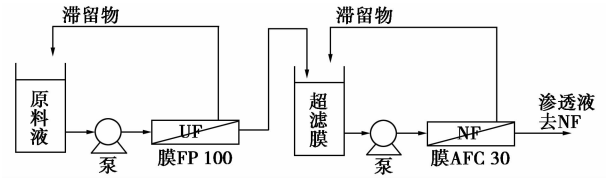


图 4 UF/NF 耦合工艺流程

3.4 混凝-超滤耦合工艺

孙欣等^[31]建立了混凝-超滤工艺处理聚驱采油废水工艺,在 PAC 混凝剂用量为 400 mg/L,超滤压力为 0.04 MPa,膜面流速为 0.7 m/s,温度为 40℃ 的条件下,用此工艺处理采油废水,出水中油的去除率可达 92.7%,COD 去除率也可达 95.2%。

3.5 核桃壳过滤-超滤耦合工艺

王立国等^[32]采用核桃壳过滤-超滤耦合工艺处理油田含油污水,工艺流程如图 5 所示,其中超滤膜材质为 PSf 或 PES,中空纤维膜的内径为 0.8 mm,外径为 1.2 mm。膜的截留相对分子质量为 67 000,结果表明,出水中含油量可降至 0.33 mg/L,颗粒平均去除率也可达 99.09%,出水水质达到 SY/T 5329—94 碎屑岩油藏注水水质指标中 A1 类标准的要求。

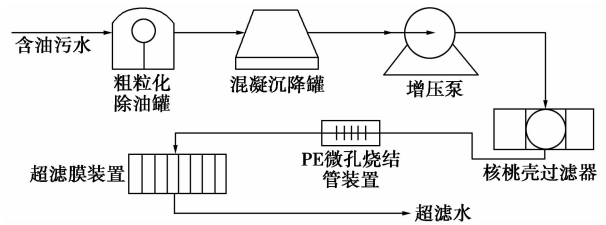


图 5 核桃壳过滤-超滤耦合工艺流程

4 结语

虽然与传统的物理法、化学法和生物法处理油田含油污水相比,超滤膜技术处理含油污水具有能耗低、分离效率高、出水水质好等优点,但超滤膜同时具有易污染的特点,被污染的膜通量会急剧下降,导致分离效果差,从而无法达到油水分离的目的。因此针对目前超滤膜的应用情况以及存在的问题,提出了几点建议。

(1)加强超滤膜污染的微观机理研究,研发出抗污染能力强的超滤膜,推广其在污水处理中的应用。

(2)研发出成本低、性能好的膜材料,同时进一步提高和完善膜组件的制备工艺,运用已有的工艺

和技术,提高膜本身的性能。

(3)加强膜表面、膜材料微观层次的分析研究,针对单一膜存在的问题,通过膜材料的优选以及膜表面的工艺处理,研制出性能更好的改性膜、复合膜和共混膜,以提高超滤膜的油水分离效果。

(4)加强超滤膜技术与其他处理工艺或方法的耦合研究,寻找出经济、高效、无污染的处理工艺。

参考文献

- [1] 张逢玉,姜安玺,吕阳.油田采出水处理技术与发展趋势研究[J].环境科学与管理,2007,32(10):65-68.
- [2] 窦茂卫,苏保卫,高学理,等.油田采出水膜法处理技术应用研究进展[J].环境科学与技术,2011,34(8):124-130.
- [3] 余剑锋.超滤法处理油田采出水技术及其膜污染机理研究[D].西安:长安大学,2003.
- [4] Chakrabarty B, Ghoshal A K, Purkait M K. Cross-flow ultrafiltration of stable oil-in-water emulsion using polysulfone membranes [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 165(2): 447-456.
- [5] 潘振江,高学理,祝威,等.聚醚砜超滤膜处理油田采出水试验研究[J].膜科学与技术,2011,31(2):95-99.
- [6] Abdolhamid S, Toraj M, Reza M B, et al. Asymmetric polyethersulfone ultrafiltration membranes for oily wastewater treatment; Synthesis, characterization, ANFIS modeling, and performance [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(1): 170-178.
- [7] 徐俊,于水利,梁春圃,等.超滤膜处理含聚合物采油废水的实验研究[J].工业水处理,2006,26(5):38-40.
- [8] 丁慧,彭兆洋,李毅,等.超滤膜处理油田采出水试验研究[J].水处理技术,2013,39(1):114-117.
- [9] 镇祥华,于水利,庞焕岩,等.超滤膜处理油田采出水用于回注的试验研究[J].环境污染与防治,2006,28(5):329-333.
- [10] 刘彬,蔡诚,张磊,等.超滤膜应用于油田污水深度处理的试验研究[J].天津工业大学学报,2007,26(4):12-15.
- [11] 李红剑.纤维素非对称中空纤维超滤膜制备及油水分离研究[D].大连:中国科学院大连化学物理研究所,2006.
- [12] Li Q, Yan Z Q, Wang X L. A poly(sulfobetaine) hollow fiber ultrafiltration membrane for the treatment of oily wastewater [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(24): 11048-11065.
- [13] 张裕卿,常俊石.聚砜-Al₂O₃复合膜处理油田含油污水[J].工业水处理,2000,20(2):24-26.
- [14] 王枢,褚良银,陈文梅,等.有机/无机复合型抗污染油水分离膜研究[J].高等化学工程学报,2005,19(1):11-16.
- [15] 吴春金,张龙,李磊,等.聚乙烯醇复合超滤膜的研制及其耐污染性能[J].水处理技术,2008,34(4):40-43.
- [16] Lu Y, Sun H, Meng L L, et al. Application of the Al₂O₃-PVDF nanocomposite tubular ultrafiltration (UF) membrane for oily wastewater treatment and its antifouling research [J]. Separation and Purification Technology, 2009, 66(2): 347-352.
- [17] Ong C S, Lau W J, Goh P S, et al. Effect of PVP molecular weights on the properties of PVDF-TiO₂ composite membrane for oily wastewater treatment process [J]. Separation Science and Technology, 2014, 49(15): 2303-2314.
- [18] 芦艳,和树立,王琦旗. PVDF膜改性方法研究进展[J]. 化学通报, 2014, 77(11): 1054-1057.
- [19] 竺柏康,王北福.处理油库污水的改性PVDF超滤膜结构与性能[J].化工学报,2013,64(10):3658-3663.
- [20] 吕慧. PVDF纳米改性膜制备及其对采油废水处理效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [21] 徐俊,于水利,贾凌志,等.改性聚偏氟乙烯超滤膜深度处理采油污水[J].中国给水排水,2010,26(1):74-76.
- [22] Abdolhamid S, Toraj M, Reza M B, et al. Experimental investigation and modeling of industrial oily wastewater treatment using modified polyethersulfone ultrafiltration hollow fiber membranes [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2015, 32(6): 1101-1118.
- [23] Chakrabarty B, Ghoshal A K, Purkait M K. Ultrafiltration of stable oil-in-water emulsion by polysulfone membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 325(1): 427-437.
- [24] 赵文敏,蒋国军,李方,等.静电纺PVDF/PAN共混纳米纤维膜对含油污水的过滤性能[J].东华大学学报,2015,41(5):565-571.
- [25] Martin A M. Ultrafiltration of oil/water emulsions using PVDF/PC blend membranes [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 53(3): 569-578.
- [26] Abdolhamid S, Toraj M. PES and PES/PAN blend ultrafiltration hollow fiber membranes for oily wastewater treatment: Preparation, experimental investigation, fouling, and modeling [J]. Advances in Polymer Technology, 2015, 34(3): 1-16.
- [27] Martin A M, Jos M, Nelio A O. SPC/PVDF membranes for emulsified oily wastewater treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 326(2): 688-693.
- [28] Kourosh M, Ahmadsreza R, Abdolreza A. A hybrid microfiltration/ultrafiltration membrane process for treatment of oily wastewater [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 55(4): 901-912.
- [29] Abdolhamid S, Ramin B, Mohsen A. Oily wastewater treatment using a hybrid UF/RO system [J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 28(1/2/3): 75-82.
- [30] Orecki A, Tomaszewska M, Karakulski K. Removal of oil from model oily wastewater using the UF/NF hybrid process [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2006, 15(1): 173-177.
- [31] 孙欣,王鹏,赵姗姗.混凝-超滤处理聚驱采油废水工艺研究膜分离技术在油田含油污水处理中的应用研究进展[J].哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2013,29(2):176-179.
- [32] 王立国,高从堦,王琳,等.核桃壳过滤-超滤工艺处理油田含油污水[J].石油化工高等学校学报,2006,19(2):23-26. ■