

# 油水分离膜技术在造纸工业及多领域中的应用研究进展

徐若谷, 李晨暘, 程博闻

(生物基纤维材料全国重点实验室, 纺织行业高性能纤维湿法非织造材料重点实验室,  
中国轻工业造纸与生物质精炼重点实验室, 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

**摘要:**随着工业化进程的加快,含油废水处理问题日益严峻,对生态环境和人类健康构成重大威胁。油水分离膜技术以其高效、节能、环保的特点,在含油废水处理领域展现出巨大潜力。本文综述了油水分离膜技术应用于含油废水处理的研究进展,重点介绍了油水分离膜的类型、特点以及分离机理,概述了油水分离膜技术在工业废水处理、环境应急响应、城市与农业水资源管理等领域的应用。今后,油水分离膜技术将朝着高性能、低成本、绿色化和智能化方向发展,应注重开发新型膜材料以提升膜的分离效率、抗污性能与稳定性以适应复杂水质,还应将膜技术与其他水处理技术结合,通过集成创新形成高效经济的综合处理系统。

**关键词:**油水分离;含油废水;膜材料;智能响应

随着社会工业化进程的加快和人民生活水平的提高,含油废水的排放量不断增加,对生态环境和人类健康构成严重威胁<sup>[1-2]</sup>。含油废水来源主要包括石油及天然气开采、金属冶炼、制浆造纸、食品加工、纺织印染等<sup>[3-4]</sup>。油水混合物不仅污染水源,影响水质安全,还可对土壤、植被和野生动物造成长期损害。因此,有效处理含油废水,实现油水的高效分离,成为环境保护和水资源管理的重要课题。常用的含油废水处理技术有重力法、离心法、吸附法、浮选法、化学法、生物法等<sup>[5-6]</sup>。近年来,新颁布的法律法规对环境污染程度的限定更为严格,但上述方法存在选择性低、能耗高、易产生二次污染等问题,传统的油水分离方法难以满足要求<sup>[7-11]</sup>。油水分离膜技术作为一种先进的分离技术,因其高效、节能、环保的特点,在含油废水处理领域展现出巨大潜力。该技术利用膜的选择性透过性,实现油水混合物的高效分离,与传统的油水分离方法相比,其具有占地面积小、处理效率高、操作简便等优势,逐渐成为含油废水处理的主流技术之一。

然而,油水分离膜技术在实际应用中仍面临一些挑战。例如:膜材料的稳定性、耐久性有待提高,以适应复杂多变的水质条件;同时,膜污染问题也是制约其长期稳定运行的关键因素之一。随着世界各国环保法规的日益严格和可持续发展理念的深入人心,开发高性能、低成本的油水分离膜材料,实现油水分离技术的绿色化、智能化、高效化,成为当前研究的热点和难点。

## 1 油水分离膜的种类及分离机制

### 1.1 膜材料分类

#### 1.1.1 传统膜材料

传统膜材料种类多样,按膜的孔径分类主要有微滤膜、超滤膜、纳滤膜、反渗透膜等,见图1。

(1)微滤膜(MF):微滤膜是一种孔径在0.02~10  $\mu\text{m}$ 的过滤膜,能够截留悬浮物、细菌、部分病毒等大分子物质。在张卞阳洋等<sup>[12]</sup>的油水分离中,微滤膜主要用于去除水中的悬浮油和乳化油。微滤膜具有操作简单、成本低廉的优点,但分离效率相

基金项目:天津科技大学大学生创新创业训练计划项目(202310057010)

通信作者:李晨暘,讲师,博士,主要研究方向为轻纺新材料,cylwork@tust.edu.cn。



图1 常见油水分离膜材料及分离机制

对较低,适用于油水分离的预处理阶段。童贇等<sup>[13]</sup>以聚偏氟乙烯(PVDF)微孔膜为基底,经碱化、表面接枝聚合甲基丙烯酸缩水甘油酯,再与胺化木质素磺酸钠(LA)、超支化聚酰胺(HP)和聚乙二醇二缩水甘油醚(PEGDGE)混合交联反应,制备了木质素磺酸钠/超支化聚酰胺杂化凝胶改性的超亲水PVDF-HPAS膜,其分离效率大于98%,同时展现出了良好的通量回复性和抗污染性。

(2)超滤膜(UF):超滤膜的孔径范围通常在0.001~0.02  $\mu\text{m}$  区间,能够截留蛋白质、胶体等大分子物质。在油水分离中,超滤膜可用于去除水中的乳化油、溶解性有机物等。超滤膜具有分离效率高、操作压力低、能耗低等特点,但易受污染,需定期清洗或更换。吕紫薇<sup>[14]</sup>通过将聚偏氟乙烯(PVDF)、经不同链长的离子液体改性的钠基蒙脱土(ILs- $\text{Na}^+\text{MMT}$ )粉末、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)溶于溶剂N,N-二甲基乙酰胺(DMAC),然后利用相转化法构建了PVDF/ILs- $\text{Na}^+\text{MMT}$ 超滤膜。基于膜表面的静电排斥作用,该膜展现出超高的水包油乳液截留率,同时具有优异的可持续使用性。李广超<sup>[15]</sup>以聚砜(PSF)为膜材料、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )为亲水性添加剂,通过非溶剂致相转化法(NIPS)成功制备出高负载氧化铝/聚( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PSF}$ )复合超滤膜,并成功应用于乳化含油废水(水包油)的处理。

(3)纳滤膜(NF):纳滤膜的孔径大多介于超滤和反渗透之间,约为1~2 nm,能够截留多价离子、小分子有机物等。在油水分离中,纳滤膜可用于去除水中的溶解性油、重金属离子等。纳滤膜具有选择性好、分离效率高、操作压力适中等优点,但成本相对较高。任万证<sup>[16]</sup>通过调整纺丝液的聚合物含量及溶剂组分制备了形貌均匀的PVDF-CTFE纳米纤

维膜,之后添加 $\text{SiO}_2$ 纳米粒子,采用一步静电纺丝方法,开发了一种具有微纳粗糙结构的PVDF-CTFE/ $\text{SiO}_2$ 纳米纤维膜。江琴等<sup>[17]</sup>通过单宁酸及聚多巴胺涂覆,制备了单宁酸(TA)-聚偏氟乙烯(PVDF)纳滤膜,同时评价了改性膜对刚果红、伊文思蓝、活性嫩黄等染料分离性能。结果表明:改性后膜表面粗糙度略微增大,亲水性明显增强。同时,改性膜具有水下超疏油的性质,能够完全抵抗水下油污的污染。

(4)反渗透膜(RO):反渗透膜是一种孔径小于1 nm的过滤膜,能够截留几乎所有的溶解性固体、无机盐、有机物等。在油水分离中,反渗透膜可用于去除水中的溶解性油、无机盐等。反渗透膜具有分离效率高、出水水质好等优点,但操作压力高、能耗大、成本高昂。陈可可等<sup>[18]</sup>在水油两相分别添加阳/阴离子表面活性剂(DTAB与SDS)辅助界面聚合,制备了高性能反渗透复合膜。性能测试表明:当SDS添加量为0.01%、DTAB添加量为0.02%时,膜的产水通量提高20%以上,且脱盐率基本保持不变。此研究为高性能反渗透膜的制备提供了一个方便、有效的途径。

#### 1.1.2 新型膜材料

新型膜材料因其独特的性能优势,正逐步取代传统膜材料,成为研究的热点和未来的发展趋势。这些新型膜材料不仅提高了油水分离的效率和精度,还增强了膜的抗污性能和稳定性,为处理复杂水质条件下的油水混合物提供了有效的解决方案。代表性的新型膜材料主要有超浸润膜、纳米复合材料、智能响应膜等。

(1)超浸润膜:超浸润膜是近年来发展起来的一种新型油水分离膜,其表面具有特殊的浸润性,能够实现油或水的选择性吸附和排斥。根据浸润性的不同,超浸润膜可分为超亲水/水下超疏油膜和超疏水/超亲油膜。这类膜材料在油水分离中表现出高效、稳定的分离性能,且不易受污染,易于清洗和再生。袁晓雨<sup>[19]</sup>利用双凝固浴法制备了具有特殊微纳结构的疏水/亲油聚偏氟乙烯(PVDF)膜,通过添加聚甲基丙烯酸十八烷基酯(PSMA)进一步提升膜的疏水性,并系统研究了多种因素对乳液分离效率的影响。为解决膜材料通量低和强度不足的问题,其还创新性地结合静电纺丝纳米纤维膜与PVDF/石墨烯(GE)涂层,形成了一种新颖的具有类珊瑚状微纳结构的复合膜,该膜不仅显著提高

了油水乳液的分离效率和抗污染性,还显著提升了膜的强度。袁腾<sup>[20]</sup>以不锈钢丝网为基材,成功制备了具有超亲水和超疏油性质的油水分离膜,该膜可有效分离各类油水混合物,分离效率高达99%,且网膜的水下超疏油和对油低粘附的特性使其不易被油粘附和污染。

(2) 纳米复合材料: 纳米复合材料是将纳米材料与传统膜材料相结合,通过纳米材料的特殊性能来提升膜的分离效率和抗污性能。例如,将纳米粒子(如二氧化硅、二氧化钛等)嵌入到膜材料中,可以增强膜的机械强度,提高膜材料的亲水性或疏水性,从而实现对油水的高效分离。此外,纳米复合材料还可以通过调整纳米粒子的种类、大小和分布来优化膜的分离性能。来晨雨等<sup>[21]</sup>采用静电纺丝法制备了聚偏氟乙烯(PVDF)纳米纤维膜,并通过共混纺丝法和真空抽滤两种方式将还原氧化石墨烯(rGO)微球负载在膜上,制得了高通量的rGO微球@PVDF纳米纤维复合油水分离膜。

(3) 智能响应膜: 智能响应膜是一种能够根据外界环境(如温度、pH值等)的变化而自动调整其分离性能的膜材料。在油水分离中,智能响应膜可以通过感知油水混合物的性质(如油的种类、浓度等)来自动调整其浸润性和孔径大小等参数,从而实现对油水的高效、精准分离。这类膜材料在复杂水质条件下的油水分离中具有广阔的应用前景。HU等<sup>[22]</sup>设计了一种具有Janus表面的pH响应型硅氧烷改性聚苯乙烯微球/氧化锌/碳纳米管/聚偏氟乙烯(S/PS/ZnO/CNTs/PVDF)膜,这种膜具有Janus特性,即其表面同时展现出亲水/水下疏油和亲油/水下疏水的功能。研究表明:这种膜能够按需分离油包水和水包油乳液,其分离机制与润湿性、黏附力和侵入压力密切相关。通过静电吸附和光降解的协同效应,该膜可有效去除废水中的染料,能实现一步分离其中包含油、细菌、有机染料和金属离子等成分的复杂废水。ORAL等<sup>[23]</sup>通过同时采用电纺丝和电喷雾技术,成功制造出了一种新型膜,该膜由醋酸纤维素(CA)纳米纤维和聚N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAM)微粒组成。这种CA/PNIPAM膜在油水分离方面表现出高效性能,能从水包油混合物和油包水乳液中分离出油滴,分离率分别达99.83%和96%。与纯CA膜相比,由于PNIPAM颗粒的加入,CA/PNIPAM膜的亲水性、排斥率和防污性能均有所

提高。此外,该膜还展现出自清洁能力和可逆的热响应通量变化,当温度超过PNIPAM的低临界溶液温度(LCST)时,其孔径会增大,从而影响渗透物的清澈度。这些特性使得CA/PNIPAM膜在油水分离应用中具有显著的优势和耐久性。CHEN等<sup>[24]</sup>发明了一种可控且可扩展的润湿性可切换膜(MCPP)制造方法,该方法利用天然微纤维素、MnO<sub>2</sub>纳米线、聚偏二氟乙烯和聚(N-异丙基丙烯酰胺)等材料,通过精确控制这些组分的用量,成功实现了对膜孔隙结构的精确调控和拉伸强度的显著提升。此外,利用聚(N-异丙基丙烯酰胺)的温度敏感性和MnO<sub>2</sub>纳米线的光热转换性能,MCPP膜展现出了灵敏的温度响应和可逆的润湿性转换特性,从而实现了乳液的温控智能分离。该膜对多种乳液均表现出较高的分离渗透率和分离效率,且具备良好的可重复使用性。

## 1.2 分离机制

分离机制是油水分离膜技术的核心,决定了其能否高效、精准地实现油水分离。膜分离过程主要包括三种机制,即筛分、静电相互作用和吸附<sup>[6]</sup>。

### 1.2.1 筛分

筛分即尺寸过滤机制,指的是根据膜孔径和油滴粒径大小关系,实现对水中油滴的截留<sup>[6]</sup>。油水分离膜通常具有微孔结构,精确控制这些微孔的孔径,可以实现对不同大小分子的筛分,进而达到油水分离的效果<sup>[8]</sup>。筛分机制的有效性取决于膜孔径的均匀性和稳定性,以及油滴和水滴的大小分布。

### 1.2.2 静电相互作用

静电相互作用是根据膜表面与乳化油滴带有相同电荷之间的排斥作用实现除油的<sup>[6]</sup>。这种相互作用通常基于电荷的吸引或排斥原理,在过滤由离子型表面活性剂稳定的乳液时,膜的孔径和表面电荷共同影响过滤性能:小孔膜易受油滴和表面活性剂吸附聚集而污染,大孔膜则受表面电荷影响;相同电荷因静电排斥而阻止油滴渗透,相反电荷则吸引油滴使其变形并渗透至膜内。因此,需优化膜孔径和表面电荷以平衡水渗透率和排油性,实现更佳过滤性能<sup>[6]</sup>。

### 1.2.3 吸附

吸附是指膜材料表面具有特殊的吸附能力,能够选择性地吸附油或水中的一种组分。吸附机制与溶质和膜的润湿性有关,疏水亲油性膜会吸附油

滴,此相互作用会减小膜的有效孔径,增大截留率,降低水渗透通量,导致膜表面和孔道结垢<sup>[6]</sup>。这种吸附作用通常基于材料表面的化学性质或物理结构。例如:某些膜材料表面可能含有亲水基团,能够与水分子形成氢键,从而增强对水的吸附能力;而另一些膜材料则可能具有疏水性质,更容易吸附油分子。通过吸附机制,膜材料能够进一步将油水混合物中的油或水组分分离出来,提高分离效率。

## 2 油水分离膜的应用领域

油水分离膜凭借其高效、环保的分离特性,在众多领域中展现出了广泛的应用潜力,特别是在工业废水处理、环境应急响应、城市与农业水资源管理以及特殊领域的应用中表现突出。

### 2.1 工业废水处理

在工业领域,油水分离膜被广泛应用于石化、冶金、造纸、纺织、食品等行业含油废水的处理中。

#### 2.1.1 石化行业

石化生产作为现代工业的重要组成部分,生产过程中不可避免地会产生大量的含油废水。这些废水成分复杂,不仅含有高浓度的油脂,还可能夹杂着各种有毒有害物质,如重金属离子、有机溶剂残留、多环芳烃等。这些污染物的存在,不仅对环境构成严重威胁,还可能通过生物链累积,对人类健康造成长远影响。油水分离膜能够有效分离这些废水中的油脂和有害物质,确保废水达标排放,还能够在处理过程中避免二次污染的产生,从而确保废水处理符合环保标准。同时,可保证油气田开采工作具有充足的水资源支持<sup>[25-26]</sup>。这不仅有助于降低废水对环境的污染,保护生态系统的健康与稳定,还能够降低石化企业的环保成本。与传统的废水处理方法相比,油水分离膜技术具有处理效率高、占地面积小、运行成本低等优势,因此更受石化企业的青睐。施小威<sup>[27]</sup>针对石油化工污水处理,设计了包括超润湿性油水分离膜、浮选技术及悬浮污泥过滤在内的预处理方案。实验证明:超润湿性油水分离膜能高效去除石油类物质及悬浮物,去除率分别为95.46%和91.06%,为石油化工污水处理提供了有效的技术途径。葛文越<sup>[28]</sup>重点分析了双膜法在石化污水回用中的应用,其中第一道预处理是保障系统稳定运行的关键。预处理采用Kristal 300系列超滤膜,可以有效去除胶体颗粒、病毒以及一

些大分子物质,并获得长期、稳定、优异的出水水质,为油田回注水提供了经济、有效的解决方案。

#### 2.1.2 冶金行业

冶金过程中使用的润滑油、冷却油等容易混入废水中,形成含油废水。利用油水分离膜能够高效分离这些废水中的油脂,保护水资源免受污染。敖庆波等<sup>[29]</sup>提出用 $R/D$ 参数( $R$ 为孔的半径, $D$ 为相邻孔之间的距离)来描述表面孔结构,并深入探究了其润湿性的影响机理,基于此开发了“一步成形”的粉末轧制技术,成功制备出孔隙率高、水下油接触角大的多孔钛分离膜。通过低温反应法进一步修饰孔结构,实现了更高的水下油接触角和超低滚动角。此外,通过调整 $R/D$ 参数,可定量预测、控制和反转润湿性。与脆弱的聚合物分离膜相比,该多孔金属分离膜在苛刻环境下更具优势,展现出在多个领域的广阔应用前景。张可<sup>[30]</sup>针对钢铁加工过程中排放的含油废水处理难题,提出了一种基于金属离子交联海藻酸钠(SA)对三聚氰胺泡沫(MS)进行亲水疏油性改性的超亲水-超疏油膜材料制备方法。通过调控海藻酸钠溶液浓度和交联离子类型( $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ ),制备了不同性能的超亲水膜材料,并系统表征了其润湿性能、油水分离效果、微观形貌结构等,重点考察了海藻酸钠修饰量对膜材料性能的影响,确定了最佳制备条件。结果表明: $\text{Cu}^{2+}$ 交联改性的膜材料(Cu-SA/MS)在油水分离效率、水通量、抗污性能、自清洁性能、抗酸碱性能和循环利用性等方面均优于 $\text{Ca}^{2+}$ 交联的膜材料(Ca-SA/MS),且表现出良好的抗盐性能、抗腐蚀性能,在钢铁加工含油废水处理领域具有较好的应用前景,对实现钢铁工业的超净排放具有重要意义。

江苏博大环保股份有限公司<sup>[31]</sup>针对钢铁冶金行业中难降解的含油废水,研发出一套高效处理技术。该技术整合专性高效联合菌群、无机中空纤维陶瓷膜以及生物曝气滤池(BAF),成功实现废水的减量化、无害化处理,并达成资源化回用目标。其提出对稀含油废水直接采用微生物处理,而浓含油废水则先通过陶瓷膜分离,然后再进行降解的策略,为废水治理提供了一种兼具经济性与环保性的方案。

#### 2.1.3 造纸行业

在造纸过程中的机械制浆、脱墨等工序会产生含油废水。油水分离膜在处理这类废水时展现出高效性能,能够精准地将废水中的油脂与水分离,

使处理后的水达到排放标准或可回用标准,极大程度减少了对环境的污染,助力造纸行业实现绿色生产。

苏林海<sup>[31]</sup>针对醋酸纤维素氨基甲酸酯(CAC)膜材料的合成及其在造纸废水处理中的应用,优化了CAC合成工艺,确定了最佳铸膜条件,对其处理造纸中段废水的效果以及抗酸碱与耐微生物性能进行了评估。结果表明:在造纸中段废水超滤处理中,CAC膜有显著的污染物去除能力。处理后废水的化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)由97.0 mg/L降至51.8 mg/L,悬浮物浓度由46 mg/L降至21 mg/L,色度由50倍降至14倍,电导率从3710 μS/cm降至3210 μS/cm,脱除率分别可达46.6%、53.3%、72%和13.5%。此外,CAC膜在酸性环境下显示出了良好的稳定性,拉伸强度与水通量几乎无变化;在碱性条件下,拉伸强度下降25.0%,水通量上升18.4%。在微生物污染环境中,其拉伸强度保持稳定,水通量虽有轻微损失,但通过清洗可有效恢复,损失率仅为1.1%。

综合上述结果,CAC膜在性能表现及耐久性方面均展现出显著的应用潜力,为造纸废水处理提供了一种高效且环保的创新解决方案。

#### 2.1.4 纺织行业

纺织印染过程中会产生大量含油废水,这些废水中含有染料、助剂以及油脂等污染物。油水分离膜能够分离废水中的油脂和其他有害物质,提高废水的可生化性,为后续处理提供便利。李娜娜等<sup>[32]</sup>分析了膜技术在纺织品加工过程中的应用,指出膜分离技术有效改善了纺织含油废水处理中传统处理方式存在的高能耗、低效率等弊端。然而,纺织废水中通常含有大量酸类或碱类物质,这些物质极有可能对分离膜的强度以及亲疏水性产生负面影响,从而导致膜的分离能力下降,不利于油类污染物的高效去除。陈华祥<sup>[33]</sup>通过将静电纺丝与功能纳米材料结合,设计并制备了多种功能化复合纳米纤维膜,系统研究了其在含油废水处理中的油水分离、抗菌和染料去除性能。首先,采用同轴静电纺丝和热粘技术制备了AgNPs稳定复合的纳米纤维膜。复合的纳米纤维膜表现出了良好的力学性能和抗菌活性,并能高效分离SDS稳定的油水乳液。然后,通过静电纺丝与原位生长技术制备了沸石咪唑骨架-8(ZIF-8)包裹银纳米团簇(AgNCs)复合的聚丙烯腈纳米纤维膜(ZIF-8@AgNCs/PAN),其在高

通量和高效油水分离的同时具备优异的抗菌性能,但在多次油水分离后膜表面颗粒存在脱落问题。最后,基于静电纺丝技术结合原位生长技术制备了沸石咪唑骨架-8/聚丙烯腈@二氧化钛(ZIF-8/PAN@TiO<sub>2</sub>)纤维膜,优化了TiO<sub>2</sub>掺杂量,提升了膜的分离通量、效率以及颗粒结合稳定性,同时实现对多种污染物的分离和抗菌效果。这些研究为纺织行业含油废水的高效处理提供了新思路。

#### 2.1.5 食品行业

在食品加工产业中,诸如肉类加工与乳制品生产过程中,不可避免地会产生富含高浓度油脂及各类固体杂质的废水。此类废水若未经妥善处理而直接排放,将对环境造成严重污染,并对产品品质构成潜在威胁。油水分离膜能够分离废水中的油脂和固体杂质,确保经处理后的废水水质符合国家排放标准,既保护了生态环境,又降低了生产设备的清洗与维护成本,延长了设备的使用寿命,同时还可显著提升产品的质量与安全性,为食品加工产业的可持续发展奠定坚实的基础。詹华宝<sup>[34]</sup>以7%NaOH/12%尿素的低温水溶液体系为溶剂制备高通量亲水性纤维素分离膜,通过调节致孔剂用量和凝固浴条件调控纤维素分离膜的结构和性能,并探究了其成膜机理和对食品含油废水的分离性能。实验表明,该膜对食品含油废水具有高效的油水分离能力和良好的抗污染性能。

## 2.2 环境应急响应

在环境应急响应领域,油水分离膜发挥着重要作用,特别是在油田泄漏、海洋油污治理等方面。

#### 2.2.1 油田泄漏

油田泄漏事故往往会导致大量油污进入环境,对土壤、水源和生态系统造成严重破坏。油水分离膜能够快速、高效地分离油污,减轻环境污染程度。刘薇薇<sup>[35]</sup>针对复杂油水体系易对膜产生污染,导致膜分离性能下降的问题,提出对油田采出水进行分级处理,针对不同阶段的油水体系制备相应的亲水性复合膜,建立低成本高效油田采出水分离纯化的膜集成技术,对油田采出水的膜法精细处理起指导作用。张少波等<sup>[36]</sup>针对石油泄漏污染和含油废水违规排放导致的严重环境问题,深入探讨了特殊润湿性膜在油水分离领域的应用潜力与面临的挑战,强调了开发多功能、智能性特殊润湿性膜的重要性,并呼吁使用更加绿色环保、可大规模生产的原

料和工艺来制备润湿性膜,以应对复杂环境的应用需求,并不断优化改进生产应用过程中的问题。

### 2.2.2 海洋油污治理

海洋油污治理作为全球环境保护领域中的一项重大挑战,其重要性不言而喻,直接关系到海洋生态系统的健康与平衡。鉴于海洋环境的复杂性与脆弱性,开发高效、环保的油污处理技术显得尤为重要。油水分离膜可用于海洋油污的分离和回收,降低油污对海洋生态系统的破坏。进一步地,油水分离膜还能够适应不同海况下的油污处理需求,无论是深海、浅海还是近岸区域,都能通过调整膜的材质、结构与操作条件,达到最佳的油污分离效果。此外,该技术还有助于实现油污资源的回收利用,将分离出的油污经过进一步处理转化为有价值的资源,如生物燃料或化工原料,从而实现环境保护与资源循环利用的双重目标。章成圆等<sup>[37]</sup>采用水热法在100目和500目不锈钢网上制备了氧化锌纳米结构,得到了一种油水分离网膜。在室温下依靠重力作用,该分离网膜对柴油和水混合物的分离效率可达到95.60%。

## 2.3 城市与农业水资源管理

在城市与农业水资源管理领域,油水分离膜也发挥着重要作用,主要有城市污水油类回收、农业灌溉水净化。

### 2.3.1 城市污水油类回收

城市污水系统作为城市基础设施的重要组成部分,其处理效率与质量直接影响到城市环境的可持续性及其居民的生活质量。城市污水中常含有一定量的油脂,这些油脂主要来源于餐饮、家庭食品加工、生活污水排放等方面。若不进行妥善处理,这些油脂不仅会加剧水体污染,影响水生生态系统的健康,还可能通过食物链累积,对人类健康构成潜在威胁。针对这一问题,油水分离膜技术作为一种高效、环保的污水处理技术,展现出了显著的应用价值。基于膜材料的特殊浸润性和选择透过性原理,通过精确设计的膜结构和优化的操作条件,能够有效地将污水中的油脂与水分分离开来。在当前的市政污水处理中,膜生物反应器(MBR)技术已成为一种重要的处理工艺,能够有效去除悬浮物、有机物和营养物质<sup>[38]</sup>。这一过程不仅实现了油脂的高效回收,还避免了传统处理方法中可能使用的化学试剂对环境的二次污染,符合绿色化学和可

持续发展的理念。吕元飞<sup>[39]</sup>针对工业化和城市化发展带来的含油废水处理难题,基于铜网、泡沫铜和纤维素膜三种基底材料,探索了制备特殊润湿性分离材料的新方法,并用于高效分离油水混合物。实验中,首先在铜网表面构筑具有超疏水性的花状 $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 纳米片结构,并对其形貌和结构进行表征;然后研究了其在油水分离中的应用(分离效率超过95.0%),并详细分析了正负毛细管效应下的分离机制。随后,以泡沫铜为基底,借鉴荷叶分级结构,通过原位生长纳米线与硅烷改性相结合,制备了超疏水/超亲油的微乳突状结构泡沫铜。该材料在油水分离方面表现出高效性能,同时展现出较强的抗菌能力。基于纤维素膜,采用原位生长及单侧改性技术制备了具有不对称润湿性的Janus纤维素膜,其在油包水和水包油乳状液分离中的效率超过96.0%,并展现出双面抗菌性能,有助于提升实际使用寿命。

回收的油脂经过进一步精炼和处理,可以转化为具有广泛应用价值的资源,如生物柴油等可再生能源。生物柴油作为一种清洁、可再生的能源替代品,不仅能够减少对化石燃料的依赖,降低温室气体排放,还有助于促进能源结构的多元化和经济的可持续发展。因此,通过油水分离膜技术回收并利用城市污水中的油脂,不仅有助于保护环境,减轻水体污染,还实现了资源的循环利用,促进了经济与环境的和谐共生。

### 2.3.2 农业灌溉水净化

农业灌溉作为农业生产中不可或缺的环节,其水质的好坏直接关系到农作物的生长状况及土壤环境的可持续性。然而,在实际灌溉过程中,灌溉水中可能含有一定量的油脂及其他污染物,这些污染物主要来源于周边环境的排放、农药残留以及农业机械的油污等。油脂和其他污染物的存在,不仅会阻碍农作物根系的正常呼吸与营养吸收,影响农作物的产量,还可能通过渗透进入土壤,导致土壤结构的破坏和微生物生态平衡的失衡,进而对土壤环境造成长期的不良影响。油水分离膜能够净化灌溉水,实现对灌溉水中油脂和其他污染物的有效分离与去除。油水分离膜凭借其高效的分离性能、稳定的化学性质以及良好的环境适应性,能够确保灌溉水的水质达到农业生产的要求,从而保障农作物的健康生长和土壤环境的保护。

### 3 总结与展望

油水分离膜技术在工业废水处理、环境应急响应以及城市与农业水资源管理等领域均取得了显著成效。在工业领域,该技术有效解决了石化、冶金、造纸、纺织、食品等行业含油废水的处理难题,确保了废水的达标排放,并显著降低了企业的环保成本。在环境应急响应中,油水分离膜技术以其快速、高效的油污分离能力,在油田泄漏和海洋油污治理等突发事件中发挥了关键作用。同时,在城市与农业水资源管理中,该技术也为城市污水油类回收和农业灌溉水净化提供了有效的技术支撑。

未来,油水分离膜技术将朝着高性能、低成本、绿色化和智能化方向发展。首先,研究者应致力于开发新型膜材料,进一步提升膜的分离效率、抗污性能和稳定性,以更好地适应复杂多变的水质条件。其次,随着膜技术的不断进步,未来的研究应注重技术的集成与创新,通过与其他水处理技术的有机结合,形成更为高效、经济的综合处理系统。此外,随着环保法规的日益严格和全球对可持续发展理念的深入认识,油水分离膜技术的绿色化、智能化发展将成为不可逆转的趋势。通过不断的技术创新和优化,油水分离膜技术有望在环境保护和水资源管理中发挥更大的作用,为推动生态文明建设和实现可持续发展目标做出重要贡献。

#### 参考文献:

- [1] 刘海峰,刘英菊,禹筱元,等. 酶刻蚀制备超疏水材料及其油水分离性能分析的综合实验设计[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(9): 213-221.
- [2] 方芳,刘飞龙,程喜全. MOFs基油水分离膜的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(5): 187-198.
- [3] 苏林海. 纤维素改性制备造纸废水处理回用膜的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- [4] 姚增光,杨焯,吴洪,等. 高通量,抗污染油水分离膜的研究进展[J]. 化学工业与工程, 2023, 40(3): 2-12.
- [5] 吴宗策,胡利杰,梁松苗. 油水分离膜的研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2016, 33(3): 80-83, 102.
- [6] 张玲玲,陈强,殷梦辉,等. 膜分离技术在乳化态含油废水处理中的应用研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(10): 2791-2796.
- [7] 桑义敏,张广远,陈家庆,等. 膜法处理含油废水研究进展[J]. 化工环保, 2006, 26(2): 122-125.
- [8] 王枢,褚良银,陈文梅,等. 油水分离膜的研究新进展[J]. 油田化学, 2003, 20(4): 387-390.
- [9] 孙玉凤,徐海波. 油水分离膜的应用与研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(6): 59-63, 68.
- [10] 郭宇,赵海滨. 多孔材料润湿性设计与油水分离应用研究进展[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(3): 426-436.
- [11] 陈佳,李琳,戴彩丽,等. 自适应润湿性油水分离网膜研究进展[J]. 高分子通报, 2024, 37(1): 36-51.
- [12] 张卞阳洋,朱新华,周婧,等. 膜分离技术在工业废水处理中的应用研究进展[J]. 当代化工研究, 2024(15): 30-32.
- [13] 童赞,王亚权,田妮妮,等. 超亲水木质素磺酸盐/超支化聚酰胺杂化接枝聚偏氟乙烯微滤膜的制备及分离性能研究[J]. 高分子通报, 2024, 37(8): 1073-1085.
- [14] 吕紫薇. 多功能聚偏氟乙烯超滤膜的亲水改性及性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2024.
- [15] 李广超. 高氧化铝负载的复合超滤膜的制备及其在油水分离领域的应用[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- [16] 任万征. 静电纺PVDF-CTFE纳米纤维膜的结构设计与性能研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- [17] 江琴,刘子瑜,赵滩. 单宁酸-多巴胺涂覆制备染料分离用纳滤膜[J]. 过程工程学报, 2022, 22(1): 89-96.
- [18] 陈可可,刘文超,谭惠芬,等. 基于表面活性剂辅助制备高性能反渗透膜的研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(10): 70-74.
- [19] 袁晓雨. 疏水/亲油膜的制备及其油水分离性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [20] 袁腾. 超亲水超疏油复合网膜的制备及其油水分离性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [21] 来晨雨,王瑞,程丝楠,等. 高通量rGO微球@PVDF纳米纤维复合膜的制备及其油水分离性能研究[J]. 化学工业与工程, 2024, 41(2): 47-56.
- [22] HU J T, GUI L S, ZHU M N, et al. Smart Janus membrane for on-demand separation of oil, bacteria, dye, and metal ions from complex wastewater[J]. Chemical engineering science, 2022, 253: 117586.
- [23] ORAL N, BASAL G. Smart antifouling and self-cleaning membrane for effective oil/water separation[J]. Macromolecular chemistry and physics, 2023, 224(20): 2300239.
- [24] CHEN X P, LI Y M, XU L, et al. Thermosensitive microfibril cellulose/MnO<sub>2</sub> membrane: dual network structure, photothermal smart modulation for switchable emulsion separation[J]. ACS sustainable chemistry & engineering, 2023, 11(3): 931-944.
- [25] 徐燕. 膜分离技术在油气田水处理中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(20): 178-180.
- [26] 田川川,段涛涛,高宇行. 膜分离技术在油气田水处理中的应用分析[J]. 山西化工, 2024, 44(9): 150-151.

- [27] 施小威. 超润湿性油水分离膜在石油化工污水处理中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(16): 98-100.
- [28] 葛文越. 膜技术处理废水和中水回用在石化行业中的应用[C]//膜分离技术在石油和化工行业中应用研讨会论文集. 北京:《膜科学与技术》编辑部, 中国膜工业协会, 2006: 46-48.
- [29] 敖庆波, 吴琛, 赵少阳, 等. 轧制多孔钛分离膜材料的制备及其油水分离性能研究[DB/OL]. (2022-05-12)[2024-10-28]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=4fayqqv3WFeRzMkeKrMDGBeAmQAz3qdzDKUMPOmjY19ygPcg7z0IbYyB\\_NruEfW9RKg4dTX7-x4sL29NmaCVIxxQnSr-qCnuCf7L\\_XHxIrm\\_anVFqMn3\\_CrZ8BVpPIObzauNSMyYyrLrpkGIK5l2X7U01baVke1\\_26xjdivb2X\\_WjhnWYBc6LdrgS9wchIEl&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=4fayqqv3WFeRzMkeKrMDGBeAmQAz3qdzDKUMPOmjY19ygPcg7z0IbYyB_NruEfW9RKg4dTX7-x4sL29NmaCVIxxQnSr-qCnuCf7L_XHxIrm_anVFqMn3_CrZ8BVpPIObzauNSMyYyrLrpkGIK5l2X7U01baVke1_26xjdivb2X_WjhnWYBc6LdrgS9wchIEl&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [30] 张可. 钢铁加工含油废水处理用超亲水膜材料制备及其性能研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2022.
- [31] 江苏博大环保股份有限公司. HYLs乳化含油废水微生物处理技术[DB/OL]. (2007-01-01)[2024-10-28]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=4fayqqv3WFDK-Tuitmd2wDOz-SmzyIB9qp\\_j5qBIeVTqPEkbLh8y3Zt164e\\_oIE\\_SWnJGKDRfmEi\\_R7-0\\_ZCIEMjJWSd59g4BchzWH-FLGQSPWqzCqo4RNpeVRY1Hj9EdTLziDB8GriNh9kQN-nRixEVxjOZlqzIJDMkH65dnk9g=&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=4fayqqv3WFDK-Tuitmd2wDOz-SmzyIB9qp_j5qBIeVTqPEkbLh8y3Zt164e_oIE_SWnJGKDRfmEi_R7-0_ZCIEMjJWSd59g4BchzWH-FLGQSPWqzCqo4RNpeVRY1Hj9EdTLziDB8GriNh9kQN-nRixEVxjOZlqzIJDMkH65dnk9g=&uniplatform=NZKPT).
- [32] 李娜娜, 郭丹, 张富勇, 等. 纺织品加工过程中含油废水处理的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2022, 39(2): 90-94.
- [33] 陈华祥. 用于油水乳液分离的功能粒子复合纳米纤维膜的构建及性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [34] 詹华宝. 高通量纤维素膜的制备及其油水分离性能的应用研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016.
- [35] 刘雅薇. 油田水分级处理用亲水改性分离膜及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [36] 张少波, 董延茂, 王紫玥, 等. 特殊润湿性膜在油水分离中的应用进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(4): 8-13.
- [37] 章成圆, 李翠翠, 李亚杰, 等. 亲水疏油油水分离膜的制备及其性能表征[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(4): 358-360.
- [38] 左光栋. 城市污水处理中的新型净化技术研究[J]. 清洗世界, 2024, 40(10): 93-95.
- [39] 吕元飞. 基于仿生可调控浸润性分级材料的制备及油水分离性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.

## Research Progress on the Application of Oil-water Separation Membrane Technology in the Paper Industry and Multiple Fields

XU Ruogu, LI Chenyang, CHENG Bowen

(State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, China Textile Industry Key Laboratory of High-performance Fibers Wet-laid Nonwoven Materials, China Light Industry Key Laboratory of Papermaking and Biorefinery, College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** With the acceleration of industrialization, the problem of oil-containing wastewater treatment has become increasingly serious, posing a major threat to the ecological environment and human health. Oil-water separation membrane technology has shown great potential in the field of oil-containing wastewater treatment due to its high efficiency, energy saving and environmental protection. In this paper, the research progress of the application of oil-water separation membrane technology in the treatment of oil-containing wastewater is reviewed. The types, characteristics and separation mechanisms of oil-water separation membranes are mainly introduced, and an overview of the applications of oil-water separation membrane technology in the fields of industrial wastewater treatment, environmental emergency response, and urban and agricultural water resources management is provided. In the future, the oil-water separation membrane technology will develop towards the directions of high performance, low cost, greenness, and intelligence. Attention should be paid to the development of new membrane materials to improve the separation efficiency, anti-fouling performance, and stability of the membranes, so as to adapt to complex water quality. Moreover, the membrane technology should be combined with other water treatment technologies, and through integrated innovation, an efficient and economical comprehensive treatment system should be formed.

**Key words:** oil-water separation; oil-containing wastewater; membrane material; intelligent response