

# 膜分离技术在工业废水处理中的应用分析

文 / 崔 静 西安国祯环保工程有限公司

**摘要:** 现阶段,我国工业发展速度较快,工业废水排放量也随之增加,若不能对其进行科学处理,较易对生态环境造成影响。膜分离技术在处理工业废水方面具有环保、高效等优势,被工业领域广泛应用,已然成为工业重要发展方向。对此,本文基于膜分离技术在工业废水处理中的具体分类,针对其实际应用进行深入剖析,为促进工业环保发展,保护生态平衡提供建议,以供参考。

**关键词:** 膜分离技术; 工业废水处理; 技术应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.09.116

## 引言

近年来,工业规模迅速扩张,使废水排放量显著攀升,据数据统计,仅2022年,全球工业废水排放高达4000亿吨,并且数字还在以每年3%的速度持续增长。工业废水成分较为复杂,除了大量的有机物、悬浮物、重金属离子外,可能还含有各类有害物质,未经处理直接排放,会对周边水体、土壤、空气等造成不可逆的伤害。因此,需积极应用膜分离处理技术,打破传统工业废水处理的局限性,提升处理效果,保证环境安全。

### 一、膜分离技术在工业废水处理中的具体分类

#### (一) 超滤(UF)

超滤膜的孔径在 $0.001-0.1\mu\text{m}$ 之间,能够截留工业废水中的大分子胶体、有机物、蛋白质等,超滤的过程通常以静压差作为推动力,操作压力会控制在 $0.1-0.6\text{MPa}$ 。以食品加工厂的工业废水处理为例,利用超滤膜能将废水中92%的大分子有机物截留,将废水中的大分子有机物含量从每升30毫克降至每升24毫克,有效去除废水中部分重金属离子和大部分有机物,以此减轻后续处理难度,取得更好的处理效果<sup>[1]</sup>。

#### (二) 微滤(MF)

微滤膜的孔径范围在 $0.1-10\mu\text{m}$ 之间,其作用在于截留工业废水中的细菌、胶体、悬浮颗粒等较大尺寸的杂质。微滤同样以紧压茶作为推动,但相比之下操作压力较低,需控制在 $0.01-0.2\text{MPa}$ 之间。以处理印染厂工业废水为例,应用微滤膜可将废水中悬浮物从每升500毫克,过滤下降至每升50毫克,去除率可达90%,能将工业废水中细菌、悬浮物去除,细菌截留率高达95%,为后续处理工艺降低微生物负荷。

#### (三) 纳滤(NF)

纳滤膜的孔径范围在 $0.001-0.01\mu\text{m}$ 之间,截留分子量为 $200-1000\text{Da}$ ,对二价及以上离子具有较高截留率,对小分子有机物也具备良好的去除效果,其操作压力在 $0.5-2.0\text{MPa}$ 。以化工园区工业废水处理为例,纳滤膜对二价离子的截留率可达97%,对小分子有机物的去除率在85%左右,能够实现工业废水的脱盐、软化,更能去除部分有机物。在通过纳滤膜处理后,工业废水中的钙离子可从每升100毫克下降至每升3

毫克,小分子有机物浓度从每升150毫克下降至每升22.5毫克。

#### (四) 反渗透(RO)

反渗透膜的孔径较小,范围在 $0.0001-0.001\mu\text{m}$ 之间,能截留分子量大于 $100\text{Da}$ 的有机物和溶解性盐类,反渗过程有压力差作为推动,操作压力相对较高,需控制在 $1-10\text{MPa}$ 。以电子厂工业废水处理为例,应用反渗透技术,可将工业废水中的溶解盐类含量从每升800毫克降至每升20毫克,有机物去除率可达99%以上。工业废水内电导率从的 $1500\mu\text{S/cm}$ 下降至 $50\mu\text{S/cm}$ 以下,满足电子行业对水质的严格要求,以此实现水资源的循环利用,膜分离技术的关键特性和主要应用场景。

### 二、膜分离技术在工业废水处理中的实际应用

#### (一) 电镀行业废水处理

电镀行业是重金属离子废水的重要来源,据统计,电镀行业每年工业废水排放量可达50亿吨,需积极应用膜分离技术,减轻工业废水排放污染。针对电镀行业工业废水,可应用纳滤膜分离技术,将废水中铬、铜、镍等重金属离子有效截留,使其含量下降至可排放标准,截留率可达95%以上,能将工业废水中的铬离子含量从每升150毫克下降至每升7.5毫克,铜离子从每升300毫克下降至每升15毫克以下,镍离子浓度从每升200毫克下降至每升10毫克以下,经过纳滤膜处理后,可将工业废水中的重金属离子浓缩至初始的5-10倍,有助于处理后的废水回收再利用。为提高处理效果,可再次应用超滤、反渗透组合处理工艺,超滤膜可将工业污水中的胶体、大分子有机物去除,对胶体去除率可达93%,大分子有机物去除率能达到95%。随后,在使用反渗透处理技术,高效截留工业废水中的重金属离子,实现废水水质净化,经处理过的工业废水,重金属离子含量满足国家排放标准,可将其应用于电镀行业镀件漂洗环节,水资源循环利用率可达70%<sup>[2]</sup>。

#### (二) 轻工行业废水处理

在处理轻工行业废水时,膜分离技术的主要原理在于将轻工废水中的无机物、有机物进行分离回收,在处理漂白废水环节体现良好效果,并将废水中可回收化学品集中收集,如柠檬酸等,以此提升经济效益。同时,

还需利用膜分离技术将废水中 BOD<sub>5</sub> 指标下降至 67%，将 COD 含量下降至 86%，达到相应标准，保证废水排放后的环境效益。以食品加工废水处理为例，其中工业废水中有机物含量较高，处理的主要目标在于降低废水中污染物质，并将有用的化学品回收。可通过应用微滤膜、纳滤膜两种处理工艺，将工业废水中无机物或有机物分离，再将工业废水中的林可霉素、葡萄糖等有用成分回收。如，应用微滤膜、纳滤膜处理黄姜废水，能从废水中提炼出 85%~90% 纯度的葡萄糖溶液；使用纳滤膜处理林可霉素废水，可提炼出 70%~80% 纯度的氧化钠溶液。随后，再降低工业废水的 COD 含量，黄姜废水在经过处理后，COD 含量可从每升 82000 毫克降低至每升 4000 毫克；去除率可达 86%；应用纳滤膜处理林可霉素废水，COD 含量能从每升 500 摩尔下降至每升 100 摩尔，去除率 70%~80%，以此保证环境效益。

### （三）冶金行业废水处理

冶金行业的工业废水成分较为复杂，其中含有大量的悬浮物和重金属离子，在处理过程中，通常需要采用微滤、超滤、反渗透等多环节组成的合成工艺，旨在实现水资源循环利用与重金属回收。微滤膜能将工业废水中颗粒较大的悬浮物去除，去除率能达到 95%，为后续开展超滤处理降低难度；超滤膜能有效截留部分重金属离子、大分子有机物，大分子有机物的截留率能达到 94%。经过前两步处理，此时工业废水中的悬浮物、大分子有机物含量明显下降，便可进行反渗透处理工艺，实现废水深度脱盐，再将重金属离子去除，将水质处理到可循环利用标准，可将回收水作为冶金工艺冷却水使用，水资源回收率达到 65% 以上。此外，通过膜技术处理，可将工业废水中的重金属再次提炼，重新用于冶金生产，回收的铜、铁等重金属纯度高达 95%，进一步提升了资源利用率，提高冶金行业生产经济效益<sup>[3]</sup>。

### （四）制药行业有机废水处理

制药行业与其他行业相比较为特殊，工业废水中含有大量的抗生素、药物中间体等有机物，处理难度相对较大，而膜分离技术则在制药行业废水处理中展现出较大优势。初期可应用超滤技术，将工业废水中的胶体、蛋白质等大分子物质截留，截留率能达到 97% 左右，有效降低后续处理工艺的负荷。随后，可利用纳滤技术与反渗透工艺，将废水中残留的药物成分、小分子有机物去除，药物残留成分去除率可达 99%，满足国家排放标准。以制药厂废水处理为例，一般情况下，为增强处理效果，会采用纳滤、超滤、反渗透技术的组合处理工艺，处理后的水质可回收用于制药环节的清洁用水，可实现水资源回收率 60%，从而避免药物成分污染周边生态环境。经检测，应用膜分离技术工艺处理过的工业废水，水中抗生素残留量远低于国家标准，满足制药行业对工业废水水质的严格要求。

### （五）印染以及含酚废水处理

据统计，印染行业每年产出的有机印染废水高达 300 亿吨，膜分离技术在处理硝基甲苯废水和含酚废水中具有明显技术优势，被印染行业广泛应用。通常，在处理印染废水时，会采用微滤、超滤相结合的组合处理工艺，能将废水中悬浮物去除 97% 左右，去除大分子有机物 94%，将废水中可生化指标 COD/BOD<sub>5</sub> 含量从最初的 0.25 提升至 0.45。接着再应用超滤、纳滤组合处理工艺，将废水中助剂、染料去除，脱色率可达 98%，染料去除率可达 95%，助剂去除率达到 92%，处理后再回收部分水资源，回收率可达 55%，回收活性染料的纯度可达 90%，进而降低生产成本，提升资源利用率<sup>[4]</sup>。印染废水是一种高水量、高色度、高毒性的工业废水，若处理不当会造成严重的环境污染，利用纳滤技术和反渗透技术，可利用其半透膜透过性原理，对工业废水中无机物、有机物进行分离回收。纳滤膜在低压状态下的通量较高，抗污能力也更强，与反渗透工艺相结合，能有效去除工业污水中的镁和钙，应用流程如图 1 所示。

此外，膜分离技术在处理硝基甲苯废水和含酚废水方面也具有显著优势，例如，在处理硝基甲苯废水时，可使用表面活性剂充当内相试剂，在废水中提取出硝基甲苯，再使用膜分离技术从废水中提取出酚，除酚率可达 99.5%；膜分离技术还可从氨基酸废水中浓缩出氨基酸，通过低电压破乳技术得到氨基酸乳液，进而实现资源的综合利用；还可从硝基苯胺废水中提取硝基苯胺，将溶剂油和活性剂作为萃取剂，能降低废水中的毒性，以此满足工业排放标准。

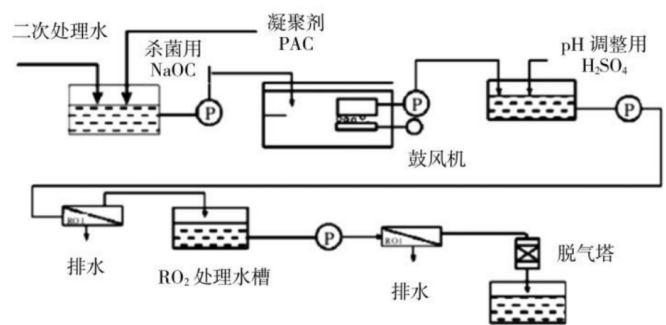


图 1 印染水膜分离技术应用流程图

### （六）化工行业有机废水处理

化工行业产生的有机废水成分较为复杂，其中含有大量的有机物难以降解，通常在处理化工废水时，会采用浓缩、焚烧方法，但传统工业废水浓缩处理后，废水中的含盐量较高，会对焚烧炉、暖气装置等造成腐蚀，因此，需采用膜分离技术，将废水中的盐分去除。可利用纳滤膜半透膜透过性原理，将工业废水中的无机物、有机物分离并回收，再将废水中的含盐量降低，进行焚烧、曝气处理，去除有机气体，利用透过液对废水进行生化处理，使其转变为危害性较小的排放液。以化工园区化工废水处理为例，采用微滤、超滤组合处理工艺，可将

工业废水中悬浮物去除 96%，去除 93% 的大分子有机物，将化工废水的可生化指标 COD/BOD<sub>5</sub> 从最初的 0.2 提高至 0.4。随后，再使用纳滤、反渗透组合处理技术，将化工废水中的小分子有机物去除，纳滤膜可对小分子有机物去除 88%，反渗透技术可去除 99% 的有机物，将废水质量处理至回收、排放标准。通过膜分离技术，还能将化工废水中部分有机物回收，重新作为化工原料利用，如苯、甲苯等有机物，回收纯度可达 90% 以上，有效降低化工行业生产成本，实现化工生产的经济效益最大化。

### （七）石油开采含油废水处理

石油开采过程中，通常会伴随大量含油废水生成，膜分离技术对于废水中的油滴具有良好的截留作用，可将含油废水中的油含量、无机盐、有机物等降低至标准水平。首先，针对石油开采生产出的含油废水，应分离其中的油水相，经处理后得到富油水相和无油盐水相。其次，再将含油废水中的原油资源回收。将富油水相加入供水中，开展洗油工作，提升原油回收率。最后，为节省含油废水中的可回收水资源，应将无油盐水进一步处理，实现水资源的循环利用，以此体现膜分离技术高效、节能、环保的生产特点。以石油矿井开采生成的含油废水处理为例，可采用微滤膜分离技术，将含油废水中的含油量从每升 1000 毫克下降至每升 10 毫克，油截留率可达 99%。确保处理后的水质满足回收、排放标准，可将其用于油田注水环节，水资源回收率可达 75%。此外，针对含油废水处理，还可使用膜接触器技术，利用膜的选择性渗透原理，将水、油高效分离，分离率高达 98%，处理后的水质 COD 含量可降至每升 100 毫克，满足石油开采冷却水循环要求<sup>[5]</sup>。

### （八）炼油行业含油废水处理

炼油行业的含油废水中含有多种复杂的油类物质和有机物，在处理炼油废水过程中，需将含油废水输送至隔油池进行预处理，将大部分浮油去除，再应用膜分离技术深度处理。可采用超滤膜将含油废水中的部分有机物、乳化油，乳化油去除率可达 96%；再使用反渗透技术，将溶解性油类、有机物去除，使处理后的水质满足回收标准，可将其用于炼油厂冷却水循环环节，水资源回收率达到 60%。同时，经过膜分离技术处理的含油废水，可将油类物质提炼后进行再加工，轻质油回收率高达 80%，以此提高炼油行业的资源利用率，降低排放水对周边环境的污染情况，满足绿色、环保生产标准。

### （九）机械加工行业含油废水处理

机械加工行业中的含油废水，主要来源于金属研磨、切割等工序，膜分离技术在处理此类含油废水的效果较为显著，能有效截留含油废水中的悬浮物、金属屑等杂质，去除率高达 98%。

首先，在开展膜分离处理前，应进行含油废水的预处理，使用格栅将含油废水中较大的颗粒杂质去除，栅

条间距应在 3-10 毫米，能有效拦截尺寸大于栅条间距的杂物，避免进入后续处理设备，保证设备运行流畅。再利用油水之间的密度差，将含油废水放置在隔油池中，使油分自然上升，再将漂浮油、分散油分离，可去除含油废水中 60%-80% 浮油。通过气浮处理，设备释放出微小气泡，将气泡附着在悬浮物、油滴上，加速上浮速度，气浮设备的压力应控制在 0.3-0.5MPa，回流比在 20%~30% 之间，有助于进一步去除含油废水中的悬浮物与油类，去除率可达 80%-90%。使用盐析法在含油废水中投加 1%-3% 的破乳剂氯化钙，使废水中油滴变大，便于后续深度处理。

其次，采用膜分离处理超滤技术，将含油废水输送至超滤膜系统，因其平均孔径在 0.001-0.1 μm，运行压力在 0.1-0.5MPa，可有效截留含油废水中的大分子有机物、乳化油等污染物，去除率可达 95%，使小分子物质与水透过膜。若机械加工行业对水质的要求较高，可搭配反渗透技术，去除水中重金属离子、溶解性固体，使水质脱盐率达到 95%，再将处理后的水回收，实现水资源的循环利用。

最后，还需根据膜的污染情况进行膜清洗工作，可使用气擦洗、反冲洗等物理方法，也可定期使用化学清洗液，如酸液清洗柠檬酸、盐酸等，去除膜表面污染物，延长其使用寿命。

### 结语

总而言之，在工业废水处理过程中，膜分离技术是一种环保、高效的处理方式，不仅能有效去除工业废水中的有机物、重金属离子、油类物质等，还能进一步实现水资源、有机污染物的循环利用。各行业需根据实际需求与工业废水含量，选择恰当的处理技术，以此提升工业废水处理效率和质量，进一步保护生态环境，促进工业生产可持续发展。

### 参考文献

- [1] 张卞阳洋, 朱新华, 周婧, 李敏敏. 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.
- [2] 武戌亮, 袁素海, 陈永兵, 等. 膜分离技术在工业废水处理中的应用及性能优化研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2024 (7): 41-43.
- [3] 陈吉, 程前程, 郭昊. 膜分离技术在工业废水处理中的应用与效能评估 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2024 (5): 118-122.
- [4] 陈军生. 工业废水处理中膜分离技术的研究分析 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2024 (6): 115-118.
- [5] 何勇. 超滤膜技术在工业废水处理中的应用效果评估与探索 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024 (6): 148-151.

作者简介：崔静，1982 年 01 月，女，陕西西安人，汉族，本科，工程师，研究方向为：农村、工业污水处理。