

# 电催化膜技术处理有机废水的研究进展

陈朋利<sup>1,2</sup>, 李杰<sup>3</sup>, 古其林<sup>4,5</sup>, 吴海锁<sup>1</sup>, 吴伟<sup>1</sup>, 孙世鹏<sup>4,5\*</sup>

(1. 江苏环保产业技术研究院股份公司, 南京 210019;

2. 南京信息工程大学 环境科学与工程学院, 南京 210044;

3. 河海大学 环境学院 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098;

4. 南京工业大学 苏州未来膜技术创新中心, 苏州 215300; 5. 南京工业大学 化工学院 国家特种分离膜工程技术研究中心 材料化学工程国家重点实验室, 南京 211816)

**摘要:** 电催化膜技术结合了膜分离与电催化氧化的双重优势, 在去除废水中有机污染物方面展现了巨大的应用潜力。相较于传统处理工艺, 电催化膜通过直接氧化和间接氧化机制, 能够高效降解和深度矿化废水中的有机污染物, 同时显著缓解膜污染, 从而提升膜系统整体效能。本文基于国内外研究进展, 系统阐述了电催化阳极膜材料、作用机理、应用性能及其强化策略。针对现存技术瓶颈, 提出了若干未来研究方向与应用建议, 旨在推动电催化膜技术的工业化发展, 为复杂有机废水的高效治理提供理论支持与实践指导。

**关键词:** 电催化膜; 有机废水; 作用机理; 能耗分析; 强化过程

**中图分类号:** TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)03-0179-10

**doi:** 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.03.019

有机废水主要来源于化工、医药、染料纺织、造纸等行业, 通常含有多种高浓度有机污染物, 性质复杂(如强酸、强碱和高盐含量)。传统的混凝沉淀和生化处理工艺难以有效去除废水中结构复杂的有机污染物。膜分离技术凭借其出水水质高、占地面积小、易于自动化控制等优势, 在有机废水深度处理方面得到了广泛应用。然而, 膜污染引起的膜性能下降仍然是影响膜设备稳定运行的关键瓶颈<sup>[1]</sup>。因此, 开发具有选择性高且抗污染性能优异的新型膜材料成为亟待解决的问题。

电催化膜作为一种新型功能膜材料, 其结合了膜分离技术的高选择性和电催化氧化技术的强氧化

能力, 不仅能够实现污染物的物理截留, 还可以通过直接电氧化和间接电氧化等机理, 对水中有机污染物进行降解和矿化<sup>[2]</sup>。这一技术不仅有效解决了传统电化学氧化过程中能耗高、电流效率低的难题, 还显著缓解了膜污染问题, 实现了系统的协同增效<sup>[3]</sup>。研究表明, 电催化膜可以将电化学氧化扩散层厚度从 100  $\mu\text{m}$  显著降低至 1  $\mu\text{m}$ , 从而增强传质效率<sup>[4]</sup>, 在极短停留时间( $<5$  s)内, 实现了有机污染物的快速降解和矿化<sup>[5-6]</sup>, 与传统电化学氧化相比, 电催化膜的有机污染物去除率提高了 0.5~3 倍<sup>[7]</sup>, 膜通量提升了 1~6 倍<sup>[7-8]</sup>, 展现出在有机废水深度处理中巨大的应用潜力。

收稿日期: 2024-12-12; 修改稿收到日期: 2025-02-26

基金项目: 江苏省基础研究计划自然科学基金-青年基金项目(BK20220215); 江苏省创新能力建设计划——江苏省技术创新中心课题资助(BM2021804)

第一作者简介: 陈朋利(1989-), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事水处理膜材料与技术研发和应用。

\* 通讯作者, E-mail: ssp@njtech.edu.cn

引用本文: 陈朋利, 李杰, 古其林, 等. 电催化膜技术处理有机废水的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(3): 179-188.

Citation: Chen P L, Li J, Gu Q L, et al. Research progress of electro-catalytic membrane in treating organic wastewater [J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(3): 179-188.

近年来,电催化膜因其在废水处理领域的高效性和多功能性,逐渐成为研究与应用的热点。本文从电催化膜材料、作用机理、应用性能分析、强化策略等方面进行了综述,通过对现有技术瓶颈和挑战的总结,提出了未来研究方向,为电催化膜技术的进一步发展提供基本信息,并为实现其在复杂废水处理中的大规模推广提供实践指导。

## 1 电催化膜材料

### 1.1 金属氧化物

金属氧化物由于其优异的导电性、化学稳定性及较宽的氧化电位等特点,常用作电催化膜的电催化层材料。根据析氧电位(OEP)不同,金属氧化物阳极可以分为活性阳极(OEP<1.8 V)和非活性阳极(OEP>1.8 V)<sup>[9-10]</sup>。活性阳极材料主要有 RuO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub><sup>[11]</sup>、IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>[12]</sup>、铂钛材料(Ti/Pt)<sup>[13]</sup>以及碳涂层石墨。非活性阳极材料主要有 Ti/PbO<sub>2</sub><sup>[14-15]</sup>、Ti/SnO<sub>2</sub><sup>[16-17]</sup>、Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub><sup>[18-19]</sup>和掺硼金刚石电极(BDD)<sup>[20-21]</sup>。研究表明<sup>[9, 22-23]</sup>,活性阳极与产生的羟基自由基(·OH)间存在强烈的作用力(化学吸附),·OH中的氧原子转移至电极表面形成高价氧化物层,显著降低了电极表面·OH的生成和扩散,导致有机物的选择性氧化;而非活性阳极表面与羟基自由基(·OH)作用力较弱(物理吸附),有机物通过·OH的化学氧化作用实现降解,并可达完全矿化。

### 1.2 碳基材料

碳基材料由于其优异的导电性、化学稳定性、高比表面积以及环境友好性,常用作电催化膜的制备,常见的炭基材料主要有碳纳米管、石墨烯、掺硼金刚石、活性炭、煤炭等<sup>[24]</sup>。Pan等<sup>[25]</sup>以煤为材料制备了煤基碳膜(膜平均孔径 0.88 μm,孔隙率 51.83%),用于苯酚、双酚 A、四环素和罗丹明废水处理,在 2V 的电压下,污染物去除率均高于 97%。熊鸽等<sup>[26]</sup>分别制备了煤基复合膜(TiO<sub>2</sub>/CM)和活性碳基复合膜(TiO<sub>2</sub>/ACM),研究发现,相比煤基复合膜,活性碳基复合膜具有更高的比表面积、更优的电化学活性和电催化效率,对苯酚废水的 COD 去除率能够达到 92.4%(原水 COD 质量浓度为 2 450 mg/L、电流密度为 1 mA/cm<sup>2</sup>、停留时间为 12 min)。

### 1.3 复合材料

复合电催化膜材料利用金属氧化物、碳基材料

或导电聚合物间的协同作用,在提高膜导电性的同时可以改善膜基底的电化学活性,促进电化学反应的电子转移效率。采用 TiO<sub>2</sub>/CeO<sub>x</sub> 纳米颗粒对碳纳米管(CNT)膜进行功能化,能够显著提高电子转移速率并增加电荷容量<sup>[27]</sup>,通过多巴胺和 CNT 复合涂层制备的导电陶瓷膜显著提高陶瓷膜的抗污染性能<sup>[28]</sup>。采用纳米零价铁改性的碳纳米管对微滤聚醚砜膜表面进行改性,污染物去除率提高了 1.6 倍<sup>[29]</sup>。Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 与 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene 的复合膜对污染物 PFOA 的降解速率是纯 Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 膜的 3 倍,界面电荷转移电阻降低了 87%,展现出了协同增效效应<sup>[30]</sup>。

## 2 电催化膜作用机理

### 2.1 直接氧化

在电催化膜直接电氧化过程中,污染物首先被吸附在电催化膜表面,通过阳极电子转移过程实现对有机污染物的氧化分解,并最终矿化为无害的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sup>[9]</sup>,如图 1(a)所示。直接氧化需要控制电压在合适的范围内,Zhou 等<sup>[31]</sup>的研究表明,采用多壁碳纳米管负载的石墨-RuO<sub>2</sub> 电极(析氧电位 1.42 V),在电压≤0.3 V 时,电极表面主要发生污染物的吸附作用,此时污染物尚未发生氧化;当电压升高至 0.3~1.2 V 时,进入了污染物直接氧化阶段;电压超过 1.2 V 后,电极表面发生间接氧化过程。使用贵金属(如钯)能够显著提高直接氧化的反应速率<sup>[32]</sup>。Huang 等<sup>[33]</sup>开发了一种负载非晶态钯的 Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 电极,发现钯氧键(Pd-O)的存在显著增强了电子传递速率,从而实现了全氟辛酸(PFOA)的高效直接氧化。

### 2.2 间接氧化

如图 1(b)所示,电催化膜的间接氧化依赖于产生的强氧化物质(如·OH、Cl·和 OCl·),这些氧化物质增强了有机物的氧化过程<sup>[22]</sup>,其中电催化膜作为阳极通过电解水产生的羟基自由基(OH·)被认为是电催化膜过程中去除微污染物的主要自由基<sup>[26]</sup>。当废水中含有氯离子时,阳极通过氧化氯离子生成一系列活性氯物种(如 Cl·、Cl<sub>2</sub> 和 HClO),进一步促进有机污染物的电化学氧化。Yu 等<sup>[34]</sup>研究了不同电解质溶液环境中 Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 电催化膜对污染物萘酚去除性能的影响。研究发现,与 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaClO<sub>4</sub> 和 NaNO<sub>3</sub> 电解质相比,NaCl 电解质的存在使得污染物的去除率更高。然而 NaCl 浓度过高

时,可能会导致有毒副产物(如有机氯化物)的生成<sup>[35-36]</sup>。

### 2.3 电场效应

在施加外加电场的情况下,通过电荷吸引与排斥、电泳以及电解作用可以缓解膜污染,延长电催化膜的使用寿命<sup>[37]</sup>,如图1(c)所示。通过施加正负电位来改变电催化膜表面电性,由于电性排斥作用,可以减少废水中荷电污染物向膜表面迁移,从而降低膜污染<sup>[38-39]</sup>。电泳过程中,荷电离子会朝着对电极

移动,而不是膜表面,从而防止膜表面局部结晶的形成<sup>[40-41]</sup>。

然而,过强的电泳效应可能导致对电极处的离子浓度过高,产生浓度极化和混合效应,进而增加无机污染的风险<sup>[24,42]</sup>。由于电解作用,电催化膜过程中膜表面会生成氢气和氧气气泡<sup>[43]</sup>,生成的微气泡能阻碍污染物向膜表面迁移。膜表面形成的微气泡也会破坏或去除已经形成的污染层,从而达到自清洁效果<sup>[24,42,44]</sup>。

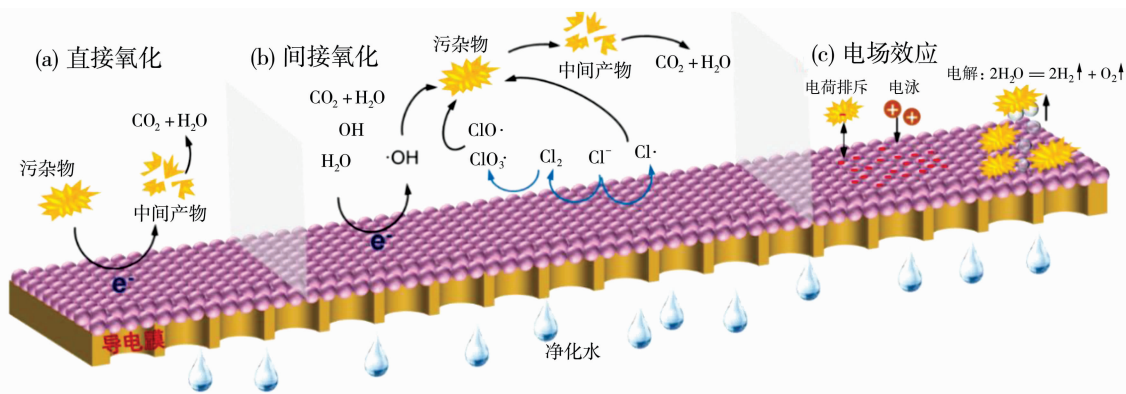


图1 电催化膜过程作用机理

Fig. 1 Operational mechanisms of electrocatalytic membrane processes

## 3 应用性能分析

### 3.1 污染物去除效率与能耗

电催化膜技术在有机污染物去除和能耗优化方面展现了显著的优势和广阔的应用潜力。研究表明,电催化膜尤其是电催化微滤和超滤膜已在多种废水处理场景中展现出卓越的性能。例如,在染料废水处理中,电催化膜通过生成活性氧物种(如 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{Cl}\cdot$ )有效降解染料分子,同时实现脱色和矿化<sup>[45]</sup>。在含酚类化合物废水处理中,电催化膜可以利用直接氧化和间接氧化机制,将复杂有机分子快速降解为无害的小分子,从而显著提高污染物的去除率<sup>[34]</sup>。同样,在含抗生素废水<sup>[46]</sup>、垃圾渗滤液<sup>[47]</sup>等不同种类的废水处理中,电催化膜都表现出良好的污染物去除性能。

污染物去除率和能耗是决定电催化膜技术能否实际应用的关键指标。表1总结了近年来电催化膜处理不同类型废水(如模拟废水中的甲基蓝废水、苯酚废水,以及真实废水中的工业废水反渗透浓缩液、垃圾渗滤液和焦化废水)的性能和能耗表现。研究表明,采用 $\text{TiO}_2$ -BNTs电催化膜处理垃圾渗滤

液生化出水,相比未施加电场,电流密度为 $20\text{ mA/cm}^2$ 时,COD去除率提升了 $69\%$ <sup>[47]</sup>。由表1所示,模拟废水因成分相对简单,其污染物去除率显著高于真实废水,且能耗更低。例如,采用 $\text{Co}_3\text{O}_4$  NNs/ $\text{Ti}$ 膜处理模拟苯酚废水时,COD去除率高达 $99.5\%$ ,能耗仅为 $0.061\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{kg}\cdot\text{COD})$ <sup>[48]</sup>。相比之下,使用 $\text{Ti}/\text{SnO}_2$ - $\text{Sb}/\text{PbO}_2$ 膜处理垃圾渗滤液生化出水,COD去除率仅为 $60\%$ ,但能耗却高达 $26\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{kg}\cdot\text{COD})$ <sup>[49]</sup>。

废水的污染物去除效率和能耗水平主要受废水性质和电催化膜材料的影响较大。例如,Yin等<sup>[50]</sup>采用 $\text{TiO}_2$ -BNTs/ $\text{SnO}_2$ - $\text{Sb}$ 膜处理反渗透浓水,COD去除率为 $69.1\%$ ,能耗为 $10.5\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{kg}\cdot\text{COD})$ ,表现出较高的能效比。而Ren等<sup>[51]</sup>使用 $\text{Ti}/\text{Pd}$ 膜处理COD更低的类似废水时,COD去除率为 $82.3\%$ ,但能耗达到了 $45\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{kg}\cdot\text{COD})$ 。这表明,不同电催化膜材料在处理复杂废水时,其性能和能耗差异显著。未来研究应针对废水特性优化电催化膜材料,进一步提高污染物去除效率,同时降低能耗,从而推动电催化膜技术的实际应用。

表 1 近年来电催化膜对不同污染物去除率与能耗汇总表

Table 1 Summary of removal efficiency and energy consumption of electrocatalytic membranes for removal of various pollutants in recent years

污染物质量 浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )	材料		阳极电催化膜性质		操作条件		去除率/%	能耗	参考文献
	阳极	阴极	孔径/μm	孔隙率/%	电解质 [质量浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )]	电压/电流 密度			
模拟亚甲基蓝 废水(200)	TiO <sub>2</sub> /碳膜	不锈钢网	0.41	32.6	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (15 000)	2.5 V/0.56 (mA · cm <sup>-2</sup> )	COD 83.65	5.87 [kW · h · (kg · COD) <sup>-1</sup> ]	[52]
模拟苯酚废水 (90)	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> NNs/Ti 膜	不锈钢网	5	—	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (14 200)	1.0 (mA · cm <sup>-2</sup> )	COD 99.5	0.061 [kW · h · (kg · COD) <sup>-1</sup> ]	[48]
模拟 1,4-二噁 烷废水(0.01)	1%GONs@ Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub> 膜	Ti/ RuO <sub>2</sub> -IrO <sub>2</sub>	1.57	43.76	Cl <sup>-</sup> (28.40±0.33)	20 (mA · cm <sup>-2</sup> )	1,4-二噁烷 63.2	0.2~0.6 (kW · h · m <sup>-3</sup> )	[53]
模拟卡马西平 废水(0.1)	Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub> 膜	碳毡	1.4	41	Cl <sup>-</sup> (556±65)	7.3(mA · cm <sup>-2</sup> )	98 卡马西平	0.74 (kW · h · m <sup>-3</sup> )	[54]
反渗透浓水 (COD 261 ~ 295)	TiO <sub>2</sub> -BNTs/ SnO <sub>2</sub> -Sb 膜	镍网	11.6	29.6	Cl <sup>-</sup> (1 197~ 1 248)	30 (mA · cm <sup>-2</sup> )	COD 69.1	10.5 [kW · h · (kg · COD) <sup>-1</sup> ]	[50]
反渗透浓水 (COD 160 ~ 170)	Ti/Pd 膜	钛网	10	—	Cl <sup>-</sup> (9 000)	5 V	COD 82.3±1.9	45 [kW · h · (kg · COD) <sup>-1</sup> ]	[51]
垃圾渗滤液生 化出水(COD 413~487)	TiO <sub>2</sub> - BNTs 膜	镍网	15	—	Cl <sup>-</sup> (1 837~ 2 078)	20 (mA · cm <sup>-2</sup> )	COD 36	20.4 [kW · h · (kg · COD) <sup>-1</sup> ]	[47]
垃圾渗滤液生 化出水(COD 212~283)	Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb/ PbO <sub>2</sub> 膜	不锈钢网	42~49	32~34	Cl <sup>-</sup> (1 227~ 1 306)	22 (mA · cm <sup>-2</sup> )	COD 60	26 [kW · h · (kg · COD) <sup>-1</sup> ]	[49]
焦化废水 (210±10)	Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub> 膜	石墨板	2.96	32.88	NaCl (—)	10.2 (mA · cm <sup>-2</sup> )	TOC 57.1	165.2 [kW · h · (kg · COD) <sup>-1</sup> ]	[55]

### 3.2 膜使用寿命与稳定性

电催化膜材料的使用寿命和抗污染性是影响其实际应用的重要指标。使用寿命主要与材料的电化学稳定性相关。高电流密度和强电极电势条件可能导致电极腐蚀或钝化。例如, TiO<sub>2</sub>-BNTs/SnO<sub>2</sub>-Sb 电催化膜在高盐反渗透浓缩液处理过程中表现出优异的电化学稳定性,使用 20 次循环后,膜表面电化学活性仍保持在新膜的 90% 以上<sup>[50]</sup>。Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 电极在电流密度为 20 mA/cm<sup>2</sup> 的条件下,预期使用寿命能达到约 6.8 年,使用寿命与 BDD 电极相

当<sup>[34]</sup>。相比之下,裸碳纳米管(CNTs)需要较高的电位来进行电化学氧化反应,这会导致腐蚀并缩短电极的整体使用寿命<sup>[23]</sup>。研究表明,MWCNTs/陶瓷复合膜在高电流密度(~20 mA/cm<sup>2</sup>)和阳极电位(~10 V)下,催化剂涂层出现明显的氧化钝化现象,限制了其长期稳定性<sup>[56]</sup>。SnO<sub>2</sub>-Sb 电极寿命较短<sup>[57]</sup>,但是将 SnO<sub>2</sub>-Sb 催化层负载在基膜表面和孔道内,膜理论寿命能够达到 2.15 年<sup>[58]</sup>。

抗污染性能方面,电催化膜可以原位生成活性氧物种(如 ·OH)和电解产生气泡,能够实现膜表

面的自清洁,从而提高电催化膜的寿命和稳定性。例如,金属氧化物膜(如  $\text{Ti}_4\text{O}_7$ )通过高氧析出电位直接矿化污染物,抗污染能力较强,但在高污染负荷下需优化膜表面结构以减少污染物积累。掺杂氧化石墨烯纳米颗粒的  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  电催化膜  $\cdot\text{OH}$  的生成速率提高了 2.5~2.8 倍,能够有效缓解膜污染<sup>[53]</sup>。研究发现,  $\text{TiO}_2\text{-BNTs/SnO}_2\text{-Sb}$  电催化膜在处理复杂废水(反渗透浓缩液)时,20 次循环后跨膜压差仅增加 3 kPa,显示出较强的抗污染能力<sup>[50]</sup>。相比之下,碳基膜因活性位点易被污染层覆盖,其抗污染性能略逊一筹。

综合来看,不同材料在使用寿命和抗污染性上各有优劣。未来需通过表面改性、纳米催化剂负载及多功能复合设计,实现材料抗污染性能与长寿命的有效平衡,以满足复杂废水处理需求。

## 4 电催化膜技术的强化策略

### 4.1 材料改性与微结构调控

通过材料改性可以调控膜表面的化学性质和物理特性,从而显著增强催化性能和抗污染能力。例如,在膜表面负载催化剂(如  $\text{IrO}_2$ 、 $\text{Co}_3\text{O}_4$  或零价金属纳米颗粒)可以增加活性位点,显著提高污染物的降解效率;此外,向膜材料中掺杂少量稀土金属(如  $\text{Ce}^{4+}$  或  $\text{La}^{3+}$ )或非金属元素(如 N 或 F),能够调控材料的电子结构和导电性,优化其电催化性能<sup>[59]</sup>。

引入氧化石墨烯、碳纳米管或金属氧化物等功能性材料,也可以进一步提升膜的导电性和表面活性。例如, Li 等<sup>[53]</sup> 研究表明,通过掺杂质量分数 1% 氧化石墨烯纳米颗粒制备的  $\text{GONs@Ti}_4\text{O}_7$  电催化膜的电荷转移电阻从原来的 73.87  $\Omega$  降低至 8.42  $\Omega$ ,同时  $\cdot\text{OH}$  的生成速率提高了 2.5~2.8 倍。这一结果表明,氧化石墨烯纳米颗粒的引入显著改善了膜的导电性能和电催化活性。

此外,通过调控膜的孔隙结构,不仅可以显著增加有效比表面积和传质通道,还能增强反应物与催化活性位点的接触效率,从而显著提升膜的传质性能和反应活性。Wang 等<sup>[55]</sup> 采用活化等离子体烧结制备了一种新型  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  电催化膜,与传统  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  膜相比,孔比表面积提高了 3 倍、孔隙率提高了 2 倍,同时电荷转移电阻降低了 99.3%~99.9%,传质速率提升了 5~110 倍。Li 等<sup>[11]</sup> 利用水热法在碳纳米纤维膜上原位生长一维  $\text{RuO}_2/\text{TiO}_2$  异质结纳米棒,显

著增强了电子的快速传输能力、羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )的生成速率以及膜的有效比表面积。这些研究表明,通过合理的膜结构优化,能够实现电催化膜性能的进一步提升,为高效废水处理提供了新的技术方向和理论支持。

### 4.2 工艺参数优化

电催化膜在废水处理中的性能受废水性质和操作参数的显著影响。关键参数如污染物浓度、电解质种类与浓度、电流密度、废水 pH 值以及膜通量,不仅决定了污染物的去除效率,还影响了能量利用效率<sup>[24]</sup>。通过优化这些过程参数,可以有效提升电催化膜的处理效果并降低能耗。根据准一级反应动力学规律,污染物浓度越高,所需降解时间越长,降解速率也相应降低。然而,研究表明,污染物浓度存在一个阈值,在该阈值范围内,污染物浓度的增加会提高去除效率;但当浓度超过阈值后,由于传质限制或反应活性位点饱和,去除效率反而开始下降<sup>[23,52]</sup>。

废水中常见电解质主要包括  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaCl}$ ,这两种电解质常存在于化工和印染高盐废水中。在含  $\text{NaCl}$  的废水电化学氧化过程中, $\text{Cl}^-$  离子能够生成强氧化性的活性物种(如  $\text{ClO}^-$  和  $\text{Cl}_2$ ),通过间接氧化降解有机污染物,可以显著提升整体催化效率<sup>[9,60]</sup>。然而,这一过程可能伴随有毒副产物(如氯酸盐和卤代有机物)的形成,带来潜在环境风险<sup>[35-36]</sup>。相比之下, $\text{Na}_2\text{SO}_4$  在电化学氧化中主要用于增强溶液的导电性,其本身并不直接参与氧化反应,但  $\text{SO}_4^{2-}$  可在阳极上被氧化生成过硫酸根离子( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ),进一步促进羟基自由基( $\text{OH}\cdot$ )介导的降解反应,从而提高反应效率<sup>[61]</sup>。与  $\text{NaCl}$  相比, $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的使用不会生成有毒自由基,也不会对电极表面造成腐蚀,这使其在废水处理过程中具有更高的安全性和材料兼容性。

电流密度是电化学高级氧化过程中的核心参数之一,直接决定了羟基自由基( $\text{OH}\cdot$ )的生成量。适当提高电流密度可以加速污染物的降解,但过高的电流密度可能因析氧反应(OER)的竞争作用导致降解速率趋于饱和。Wang 等<sup>[55]</sup> 研究表明,随着电流密度由 3  $\text{mA/cm}^2$  升高至 12  $\text{mA/cm}^2$ ,废水的 TOC 去除率由 26.6% 提高到了 85.8%,得到了极大提升。Yin 等<sup>[50]</sup> 的研究得到了同样的结论,但是在电流密度从 20  $\text{mA/cm}^2$  升高至 30  $\text{mA/cm}^2$  过程中,COD 去除率变化不大,这是由于在高电流密度

下,电力被用于产生氧气而降低了氧化污染物的效率。

酸性环境更适合电化学氧化反应,强酸条件下能够生成高活性的超氧离子,提升污染物的去除效率<sup>[62]</sup>。然而,当 pH 值过低( $< 3$ )时,可能会对电极材料造成损害,因此将反应体系的 pH 值控制在约 5 被认为是最佳条件<sup>[23]</sup>。Yin 等<sup>[50]</sup>研究也发现,在酸性条件下 COD 的去除率比在中性和碱性条件下要高,是由于在酸性条件下活性氯( $\text{Cl}\cdot$ 、 $\text{ClO}\cdot$ )和 $\cdot\text{OH}$ 具有更高的氧化电位和更强的氧化能力<sup>[63-64]</sup>。但是如果 COD 去除率在可接受范围内,尽量不要去调节废水的酸碱性以增加处理成本。

膜通量是影响污染物在电催化膜之间传质效率的重要参数。循环模式下,膜通量的增加(即水透过膜流速增加)能够增强污染物在膜电极间的传质效率,从而提升污染物与膜电极表面羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )发生碰撞的几率,进一步促进降解效率的提升<sup>[44]</sup>。Wang 等<sup>[55]</sup>的研究表明,在处理高浓度有机废水的电催化膜系统中,应尽可能提高膜通量。循环过滤实验结果显示,当膜通量由  $40 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  提高至  $240 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,TOC 去除率由 64.3% 提高到了 99%。然而,当污染物浓度降低至一定程度时,膜通量对 TOC 去除率的影响趋于不显著甚至下降,这一现象在 Yin 等<sup>[50]</sup>和 Peng 等<sup>[46]</sup>的研究中得到了验证。因此,根据不同的废水体系特性,合理控制膜通量对于确保系统的最佳性能至关重要。这种调控不仅可以提升处理效率,还能优化能量利用效率,从而实现废水处理过程的经济性与高效性。

#### 4.3 协同联用技术

电催化膜因其在废水处理中的高效性和多功能性,近年来成为研究热点。为进一步提升处理效率和拓宽应用范围,电催化膜协同联用技术逐渐受到广泛关注。电催化膜技术通过与其他高级氧化工艺的结合,发挥协同效应,在污染物去除、能耗优化和抗污染能力提升方面取得了显著进展。

例如,Wang 等<sup>[55]</sup>将臭氧氧化与  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  电催化膜结合,用于焦化废水处理,结果表明,系统的总有机碳(TOC)去除率提升了 14%,同时能耗降低了 30%。Tang 等<sup>[65]</sup>采用导电陶瓷膜与电絮凝技术相结合处理工业含油废水,研究显示,该系统的膜渗透通量比单独使用导电陶瓷膜高出 1.41 倍,显著提高了处理效率。

此外,电催化技术还可用于活化过硫酸盐

(PMS),实现协同增效。Xu 等<sup>[66]</sup>将  $\text{TiO}_2$  纳米阵列电催化膜作为阳极和阴极,与 PMS 耦合用于污染物处理。研究表明,该耦合系统对乙酰氨基酚的降解速率提高了 3.7 倍。研究还指出,PMS 在阴极上活化主要是由超氧自由基( $\text{O}_2^{\cdot-}$ )引发,而在阳极上的活化则归因于 PMS 吸附在电极上形成的过渡态复合物(PMS\*)。有机污染物通过与过渡态复合物发生电子转移反应,从而实现高效降解<sup>[67]</sup>。

电催化膜在流通操作下实现电化学氧化水处理,可显著提升阳极表面的传质效率。然而,氧析出反应(OER)可能导致氧气气泡滞留于尺寸较小的流道中,从而削弱电催化膜的长期过滤性能和处理能力<sup>[68]</sup>。Teng 等<sup>[69]</sup>的研究表明,超声波通过破裂大尺寸气泡,有效缓解了氧气气泡在多孔结构中的滞留问题,不仅显著提升了渗透通量,还增强了局部传质效率。此外,超声空化效应的作用进一步强化了传质效率并促进了 $\cdot\text{OH}$ 自由基的生成,从而使超声辅助电催化膜系统对污染物 4-氯苯酚的氧化速率提高了 216%。

为了进一步提升电催化膜系统的能效,相关的协同联用技术,如光催化协同技术<sup>[46,70]</sup>、芬顿协同技术<sup>[71-72]</sup>等,也引起了广泛的关注和研究,这些协同联用技术通过多种机制的协同作用,不仅显著提高了废水处理效率,还为复杂废水的深度处理提供了创新性的解决方案和新思路。

## 5 结论

电催化膜技术在废水处理领域展现出巨大的应用潜力,特别是在有机污染物去除方面表现出显著优势。在应用过程中,实际废水成分的复杂性,以及高电流密度和高阳极电位操作下的膜材料腐蚀与钝化问题,依然是限制电催化膜广泛应用的主要技术挑战。

未来研究应重点优化电催化膜的材料与结构设计。例如,通过稀土金属或非金属元素掺杂改性,开发复合纳米材料(如氧化石墨烯、碳纳米管),以及设计具有高孔隙率和大比表面积的多孔结构,以提升膜的电化学稳定性和传质效率。同时,将电催化膜技术与其他高级氧化技术(如光催化和臭氧氧化等)联用,可进一步提高污染物的去除效率并显著降低能耗。此外,导电纳滤膜和反渗透膜的进一步开发,以及其在复杂废水体系中的多场景应用研究,将有助于推动电催化膜技术的实际应用。

## 参考文献:

- [1] 王远远, 王仪, 黄思怡, 等. 高盐有机废水超滤处理的膜污染机制和分离效果研究[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(6): 26-36.
- [2] Larocque M J, Gelb A, Latulippe D R, *et al.* Meta-analysis of electrically conductive membranes: A comparative review of their materials, applications, and performance[J]. Sep Purif Technol, 2022, 287: 120482.
- [3] Liu Y, Liu F, Ding N, *et al.* Recent advances on electroactive CNT-based membranes for environmental applications: The perfect match of electrochemistry and membrane separation[J]. Chin Chem Lett, 2020, 31: 2539-2548.
- [4] Chaplin B P. Critical review of electrochemical advanced oxidation processes for water treatment applications[J]. Environ Sci-Proc Imp, 2014, 16: 1182-1203.
- [5] Guo L, Jing Y, Chaplin B P. Development and characterization of ultrafiltration TiO<sub>2</sub> Magnéli phase reactive electrochemical membranes[J]. Environ Sci Technol, 2016, 50: 1428-1436.
- [6] Gayen P, Spataro J, Avasarala S, *et al.* Electrocatalytic reduction of nitrate using magnéli phase TiO<sub>2</sub> reactive electrochemical membranes doped with Pd-based catalysts[J]. Environ Sci Technol, 2018, 52: 9370-9379.
- [7] Wang H, Guan Q, Li J, *et al.* Phenolic wastewater treatment by an electrocatalytic membrane reactor[J]. Catal Today, 2014, 236: 121-126.
- [8] Geng P, Chen G. Magnéli Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> modified ceramic membrane for electrically-assisted filtration with anti-fouling property[J]. J Membr Sci, 2016, 498: 302-314.
- [9] Skolotneva E, Kislyi A, Klevtsova A, *et al.* Mathematical modeling of the anodic oxidation of organic pollutants: A review[J]. Environ Chem Lett, 2024, 22(3): 1521-1561.
- [10] Panizza M. Importance of electrode material in the electrochemical treatment of wastewater containing organic pollutants [M]//New York: Springer, 2010.
- [11] Li X, Shao S, Yang Y, *et al.* Engineering Interface with a one-dimensional RuO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> heterostructure in an electrocatalytic membrane electrode: Toward highly efficient micropollutant decomposition [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(19): 21596-21604.
- [12] An H, Park W, Shin H, *et al.* Recommended practice for measurement and evaluation of oxygen evolution reaction electrocatalysis[J]. EcoMat, 2024, 6(10): 12486.
- [13] Gunaslan S, Fil B A, Yilmaz A E. Turbidity removal by electrooxidation from pistachio processing wastewater using Ti/Pt anodes[J]. J Chem Soc Pak, 2024, 46(1): 1.
- [14] Chen S, Li J, Liu L, *et al.* Fabrication of Co/Pr co-doped Ti/PbO<sub>2</sub> anode for efficiently electrocatalytic degradation of  $\beta$ -naphthoxyacetic acid [J]. Chemosphere, 2020, 256: 127139.
- [15] Li X, Xu H, Yan W, *et al.* Electrocatalytic degradation of aniline by Ti/Sb-SnO<sub>2</sub>, Ti/Sb-SnO<sub>2</sub>/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Ti/Sb-SnO<sub>2</sub>/PbO<sub>2</sub> anodes in different electrolytes [J]. J Electroanal Chem, 2016, 775: 43-51.
- [16] Bi Q, Zhang Z, Sun Y, *et al.* Preparation and performance of highly active and long-life mesopore Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb electrodes for electrochemical degradation of phenol[J]. J Alloy Compd, 2021, 889: 161657-161669.
- [17] Asim S, Zhu Y, Rana M, *et al.* Nanostructured 3D-porous graphene hydrogel based Ti/Sb-SnO<sub>2</sub>-Gr electrode with enhanced electrocatalytic activity [J]. Chemosphere, 2017, 169: 651-659.
- [18] Lin H, Niu J, Liang S, *et al.* Development of macroporous Magnéli phase Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> ceramic materials: As an efficient anode for mineralization of poly-and perfluoroalkyl substances [J]. Chem Eng J, 2018, 354: 1058-1067.
- [19] Yang K, Lin H, Feng X, *et al.* Energy-efficient removal of trace antibiotics from low-conductivity water using a Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> reactive electrochemical ceramic membrane: Matrix effects and implications for byproduct formation[J]. Water Res, 2022, 224: 119047.
- [20] Yang K, Yin J, Zhu T, *et al.* Effect of boron-doped diamond anode electrode pretreatment on UF membrane fouling mitigation in a cross-flow filtration process[J]. Sep Purif Technol, 2021, 259: 118110.
- [21] Bejan D, Guinea E, Bunce N J. On the nature of the hydroxyl radicals produced at boron-doped diamond and Ebonex® anodes [J]. Electrochim Acta, 2012, 69: 275-281.
- [22] Martinez B V, Odier H, Coetsier C, *et al.* Recent advances in sub-stoichiometric TiO<sub>2</sub> as reactive electrochemical membranes (REM) for bio-refractory pollutants removal: A critical review[J]. J Environ Chem Eng, 2023, 11(3): 110203.
- [23] Kumari P, Bahadur N, Cretin M, *et al.* Electro-catalytic membrane reactors for the degradation of organic

- pollutants — A review[J]. *React Chem Eng*, 2021, 6: 1508-1526.
- [24] Barbhuiya N H, Misra U, Singh S P. Synthesis, fabrication, and mechanism of action of electrically conductive membranes: A review[J]. *Environ Sci-Wat Res*, 2021, 7(4): 671-705.
- [25] Pan Z, Yu F, Li L, *et al.* Low-cost electrochemical filtration carbon membrane prepared from coal via self-bonding[J]. *Chem Eng J*, 2020, 385: 123928.
- [26] 熊 鸽, 王 虹, 惠洪森, 等. 活性炭基微孔炭膜制备及电化学性能[J]. *膜科学与技术*, 2019, 39(5): 37-44, 57.
- [27] Liu F, Liu Y, Shen C, *et al.* One-step phosphite removal by an electroactive CNT filter functionalized with  $\text{TiO}_2/\text{CeO}_x$  nanocomposites[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 710: 135514.
- [28] Li P, Yang C, Sun F, *et al.* Fabrication of conductive ceramic membranes for electrically assisted fouling control during membrane filtration for wastewater treatment[J]. *Chemosphere*, 2021, 280: 130794.
- [29] Sutherland A J, Ruiz-Caldas M X, de Lannoy C F. Electro-catalytic microfiltration membranes electrochemically degrade azo dyes in solution[J]. *J Membr Sci*, 2020, 611: 118335.
- [30] Ma Q, Gao J, Cheng K, *et al.* Electrooxidation of perfluorocarboxylic acids by an interfacially engineered Magnéli phase titanium oxide ( $\text{Ti}_4\text{O}_7$ ) electrode with MXene[J]. *ACS EST Engg*, 2024, 4(5): 1102-1112.
- [31] Zhou X, Liu S, Xu A, *et al.* A multi-walled carbon nanotube electrode based on porous Graphite- $\text{RuO}_2$  in electrochemical filter for pyrrole degradation [J]. *Chem Eng J*, 2017, 330: 956-964.
- [32] Ran W, Zhao H, Zhang X, *et al.* Critical review of Pd-catalyzed reduction process for treatment of waterborne pollutants[J]. *Environ Sci Technol*, 2024, 58(7): 3079-3097.
- [33] Huang D, Wang K, Niu J, *et al.* Amorphous Pd-loaded  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  electrode for direct anodic destruction of perfluorooctanoic acid[J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(17): 10954-10963.
- [34] Yu J, Wang J, Yu H, *et al.* Development of  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  reactive electrochemical membrane and electrochemical oxidation of naphthols in aqueous solution[J]. *Process Saf Environ Prot*, 2024, 182: 497-508.
- [35] Zhi D, Zhang J, Wang J, *et al.* Electrochemical treatments of coking wastewater and coal gasification wastewater with  $\text{Ti}/\text{Ti}_4\text{O}_7$  and  $\text{Ti}/\text{RuO}_2\text{-IrO}_2$  anodes [J]. *J Environ Manag*, 2020, 265: 110571.
- [36] Wang L, Wang Y, Sui Y, *et al.* Formation of chlorate and perchlorate during electrochemical oxidation by Magnéli phase  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  anode: Inhibitory effects of co-existing constituents [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 15880.
- [37] Kim J, Lee J, Lee S, *et al.* Electrically conductive membrane for fouling control: Its mechanisms and applications[J]. *Desalination*, 2024, 578: 117445.
- [38] Li N, Wang W, Ma C, *et al.* A novel conductive rGO/ZnO/PSF membrane with superior water flux for electrocatalytic degradation of organic pollutants[J]. *J Membr Sci*, 2022, 641: 119901.
- [39] Kim J, Yun E-T, Tijing L, *et al.* Mitigation of fouling and wetting in membrane distillation by electrical repulsion using a multi-layered single-wall carbon nanotube/polyvinylidene fluoride membrane [J]. *J Membr Sci*, 2022, 653: 120519.
- [40] Liu L, Li K, Zhao S, *et al.* The effects of electrophoresis, bubbles and electroosmosis for conductive membrane performance in the electro-filtration process[J]. *J Membr Sci*, 2021, 620: 118955.
- [41] Rao U, Iddya A, Jung B, *et al.* Mineral scale prevention on electrically conducting membrane distillation membranes using induced electrophoretic mixing[J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(6): 3678-3690.
- [42] Zhang Z, Huang G, Li Y, *et al.* Electrically conductive inorganic membranes: A review on principles, characteristics and applications [J]. *Chem Eng J*, 2022, 427: 131987.
- [43] Karkooti A, Rastgar M, Nazemifard N, *et al.* Graphene-based electro-conductive anti-fouling membranes for the treatment of oil sands produced water [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 704: 135365.
- [44] Sun M, Wang X, Winter L R, *et al.* Electrified membranes for water treatment applications[J]. *ACS EST Engg*, 2021, 1(4): 725-752.
- [45] Malekabadi F K, Yousefi F, Karimi R, *et al.* Electrocatalytic membrane containing  $\text{CuFeO}_2$  nanoporous carbon for organic dye removal application[J]. *Chem Eng Res Des*, 2022, 183: 345-356.
- [46] Peng Y, Yan Y, Ma X, *et al.* Efficient electrochemical oxidation of antibiotic wastewater using a graphene-loaded  $\text{PbO}_2$  membrane anode: Mechanisms and applications[J]. *Environ Res*, 2024, 259: 119517.
- [47] Yin X, Li W, Zhu H, *et al.* Electrochemical oxidation of bio-treated landfill leachate using a novel dynamic

- reactive electrochemical membrane (DREM) [J]. *J Hazard Mater*, 2023, 446: 130745.
- [48] Yin Z, Zhang K, Ma N, *et al.* Catalytic membrane electrode with  $\text{Co}_3\text{O}_4$  nanoarrays for simultaneous recovery of water and generation of hydrogen from wastewater[J]. *SCMs*, 2023, 66(2): 651-663.
- [49] Lin H, Peng H, Feng X, *et al.* Energy-efficient for advanced oxidation of bio-treated landfill leachate effluent by reactive electrochemical membranes (REMs): Laboratory and pilot scale studies[J]. *Water Res*, 2021, 190: 116790.
- [50] Yin X, Li W, Zhu H, *et al.* Electrochemical treatment of municipal reverse osmosis concentrates by a  $\text{TiO}_2$ -BNTs/ $\text{SnO}_2$ -Sb reactive electrochemical membrane [J]. *Sep Purif Technol*, 2024, 331: 125726.
- [51] Ren L, Li Y, Guo Y, *et al.* Electrochemical oxidation of reverse osmosis concentrate using a pilot-scale reactive electrochemical membrane filtration system: Performance and mechanisms[J]. *J Hazard Mater*, 2024, 465: 133315.
- [52] Qaseem S, Dlamini D S, Zikalala S A, *et al.* Electrocatalytic membrane anode for dye removal from wastewater [J]. *Colloid Surface A*, 2020, 603: 125270.
- [53] Li W, Xiao R, Xu J, *et al.* Interface engineering strategy of a  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  ceramic membrane via graphene oxide nanoparticles toward efficient electrooxidation of 1,4-dioxane[J]. *Water Res*, 2022, 216: 118287.
- [54] Ganzenko O, Sistat P, Trelleu C, *et al.* Reactive electrochemical membrane for the elimination of carbamazepine in secondary effluent from wastewater treatment plant[J]. *Chem Eng J*, 2021, 419: 129467.
- [55] Wang W, Wang J, Wang J, *et al.* Enhanced treatment of p-nitrophenol and coking wastewater through electrochemical and electrochemical-ozonation coupling process utilizing a novel  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  reactive electrochemical membrane anode[J]. *J Environ Chem Eng*, 2024, 12(3): 112549.
- [56] Ma Q, Gao J, Potts C, *et al.* Electrochemical aging and halogen oxides formation on multiwalled carbon nanotubes and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  @  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  coated conductive membranes[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2022, 61: 14260-14271.
- [57] Yang C, Shang S, Li X-y J J o H M. Oxygen-vacancy-enriched substrate-less  $\text{SnO}_x/\text{La-Sb}$  anode for high-performance electrocatalytic oxidation of antibiotics in wastewater[J]. *J Hazard Mater*, 2022, 436: 129212.
- [58] Di Y, Gu Z, Kang Y, *et al.* Enhanced oxidation of organic pollutants by regulating the interior reaction region of reactive electrochemical membranes [J]. *J Hazard Mater*, 2024, 466: 133584.
- [59] Barrera-Díaz C, Canizares P, Fernández F, *et al.* Electrochemical advanced oxidation processes: An overview of the current applications to actual industrial effluents[J]. *J Mex Chem Soc*, 2014, 58(3): 256-275.
- [60] Zeng W, Liang H, Zhang H, *et al.* Efficient electrochemical oxidation of sulfamethoxazole by a novel reduced  $\text{TiO}_2$  nanotube arrays-based flow-through electrocatalytic membrane[J]. *Sep Purif Technol*, 2022, 289: 120720.
- [61] Zambrano J, Min B. Comparison on efficiency of electrochemical phenol oxidation in two different supporting electrolytes ( $\text{NaCl}$  and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) using Pt/Ti electrode[J]. *Environ Technol Inno*, 2019, 15: 100382.
- [62] Zhong C, Wei K, Han W, *et al.* Electrochemical degradation of tricyclazole in aqueous solution using Ti/ $\text{SnO}_2$ -Sb/ $\text{PbO}_2$  anode[J]. *J Electroanal Chem*, 2013, 705: 68-74.
- [63] Wu W, Huang Z H, Lim T T. Recent development of mixed metal oxide anodes for electrochemical oxidation of organic pollutants in water [J]. *Appl Catal, A*, 2014, 480: 58-78.
- [64] Aquino J M, Rocha-Filho R C, Ruotolo L A, *et al.* Electrochemical degradation of a real textile wastewater using  $\beta\text{-PbO}_2$  and DSA® anodes[J]. *Chem Eng J*, 2014, 251: 138-145.
- [65] Tang J, Zhang C, Quan B, *et al.* Electrocoagulation coupled with conductive ceramic membrane filtration for wastewater treatment: Toward membrane modification, characterization, and application [J]. *Water Res*, 2022, 220: 118612.
- [66] Xu J, Liu Y, Li D, *et al.* Electrochemical activation of peroxymonosulfate by 3D printed blue  $\text{TiO}_2$  nanotube arrays reactive electrochemical membrane for efficient degradation of acetaminophen [J]. *J Environ Chem Eng*, 2023, 11(3): 109602.
- [67] Yu S, Zhang R, Dang Y, *et al.* Electrochemical activation of peroxymonosulfate at  $\text{Ti}/\text{La}_2\text{O}_3\text{-PbO}_2$  anode to enhance the degradation of typical antibiotic wastewater [J]. *Sep Purif Technol*, 2022, 294: 121164.
- [68] Skolotneva E, Cretin M, Mareev S J M. A simple 1D convection-diffusion model of oxalic acid oxidation using reactive electrochemical membrane [J]. *Mem-*

- branes, 2021, 11(6): 431.
- [69] Teng J, You S, Ma F, *et al.* Enhanced electrochemical decontamination and water permeation of titanium suboxide reactive electrochemical membrane based on sonoelectrochemistry[J]. *Ultrason Sonochem*, 2020, 69: 105248.
- [70] Li H, Zhao K, Zhang X, *et al.* Electrochemical anodic oxidation-based membrane system for micropollutant removal[J]. *ACS EST Engg*, 2024, 4(2): 224-249.
- [71] Xu Y, Chen Y, Sun M, *et al.* A dual flow-through electrochemical system coupled electrocatalytic membrane electrode and heterogeneous electro-Fenton for organic wastewater treatment[J]. *J Environ Chem Eng*, 2024, 12(3): 112788.
- [72] Li N, Lu X, He M, *et al.* Catalytic membrane-based oxidation-filtration systems for organic wastewater purification: A review[J]. *J Hazard Mater*, 2021, 414: 125478.

## Research progress of electro-catalytic membrane in treating organic wastewater

CHEN Pengli<sup>1,2</sup>, LI Jie<sup>3</sup>, GU Qilin<sup>4,5</sup>, WU Haisuo<sup>1</sup>,  
WU Wei<sup>1</sup>, SUN Shipeng<sup>4,5</sup>

- (1. Jiangsu Academy of Environmental Industry and Technology Corp., Nanjing 210019, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. NJTECH University Suzhou Future Membrane Technology Innovation Center, Suzhou 215300, China; 5. National Engineering Research Center for Special Separation Membrane, State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, College of Chemical engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** Electro-catalytic membrane technology combines the dual advantages of membrane separation and electrocatalytic oxidation, demonstrating immense potential for organic pollutant removal in wastewater treatment. Compared to conventional processes, electro-catalytic membrane technology enables efficient degradation and deep mineralization of organic contaminants through both direct oxidation and indirect oxidation mechanisms. Simultaneously, it significantly mitigates membrane fouling. Based on recent domestic and international research progress, this paper systematically examines electro-catalytic membrane materials, operational mechanisms, application performance, and optimization strategies. Finally, we propose future research directions and practical recommendations. These aim to advance industrial-scale implementation of electro-catalytic membrane technology and provide theoretical and operational guidance for effective treatment of complex organic wastewater.

**Key words:** electro-catalytic membrane; organic wastewater; operational mechanisms; energy consumption analysis; process intensification