

# 电渗析协同 Fenton 法处理化工园区综合废水的工艺耦合优化

古稼宝

桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西省桂林市, 541006;

**摘要:** 电渗析与 Fenton 法相结合的协同处理技术是一种新型的化工园区废水处理方法。本研究重点探讨了两者结合的工艺优化过程及其在综合废水处理中的应用效果。电渗析法通过选择性去除废水中的无机物, Fenton 法则通过强氧化性去除有机污染物。两者协同作用显著提高了废水的处理效率, 降低了能源消耗, 且在不同废水类型的适应性上表现优异。优化后的工艺不仅提高了去除率, 还有效延长了系统的使用寿命, 为化工园区废水的绿色处理提供了可行的方案。

**关键词:** 电渗析; Fenton 法; 协同处理; 废水处理; 工艺优化

**DOI:** 10.69979/3060-8767.24.4.004

## 引言

化工园区废水中含有大量的有机污染物和无机离子, 传统的单一处理方法往往难以同时应对多种污染物的高效去除。电渗析法和 Fenton 法作为两种常见的废水处理技术, 分别在去除无机盐和有机物方面具有独特优势。单一技术在处理复杂废水时常常面临效率低、能源消耗高的问题。电渗析与 Fenton 法的协同应用, 通过充分发挥各自优势, 可以有效提升废水的处理效果并降低运营成本。优化两者的耦合工艺, 不仅能够解决传统处理方法中的瓶颈, 还为环境友好型废水治理提供了一种创新的技术路径。

## 1 化工园区废水的处理难点及需求分析

### 1.1 化工废水的复杂污染特征

化工废水的污染特征复杂且多样, 主要表现为污染物种类繁多, 浓度高且变化大。废水中不仅包含多种化学原料的残留物, 还有来自生产过程的副产物及溶剂等物质。这些污染物的化学结构复杂, 不同物质在废水中的相互作用增加了处理的难度。废水中有时还含有重金属、表面活性剂以及其他难以降解的有机物, 这些污染物的去除需要结合多种技术才能达到理想效果。化工废水的高浓度和复杂性要求处理工艺不仅要具备高效去除能力, 还需要具备较强的适应性, 以应对不同废水的处理需求。

### 1.2 现有废水处理技术的局限性

传统的废水处理技术, 如物理吸附法、化学沉淀法和生物处理法等, 虽然在一定程度上能够去除废水中的

某些污染物, 但这些方法在处理化工园区废水时往往存在局限性<sup>[1]</sup>。物理法对无机盐和溶解性物质的去除效果有限, 且能耗较高; 化学沉淀法对于某些溶解度较高的污染物无能为力, 而沉淀物的后续处理又增加了成本和复杂性; 生物法则受限于其对有毒有害物质的适应能力, 且其去除效率随着废水性质的变化而降低。尤其是在处理含有有毒有害有机物或高浓度污染物的废水时, 传统技术难以实现高效、稳定的去除。因而, 亟需开发更加高效、环保的技术, 特别是能够同时处理有机物和无机物的综合治理方案。

## 2 电渗析与 Fenton 法的基本原理与应用

### 2.1 电渗析法在废水处理中的作用与优势

电渗析法是一种基于电场作用, 通过选择性透过带电膜来分离溶液中不同离子的过程。它利用阳离子交换膜和阴离子交换膜在电场作用下对溶液中离子的分离功能, 能够有效去除废水中的无机盐、金属离子及一些低分子无机污染物。电渗析法的主要优势在于能耗较低, 处理效率高, 尤其适用于低浓度、含盐废水的处理。与传统的物理吸附法和化学沉淀法相比, 电渗析法在去除溶解性盐类、重金属和无机污染物时具备较高的选择性, 且废水的处理过程相对简便。除了可以减少废水中的无机污染物浓度外, 电渗析还具有较强的可调性, 操作条件(如电压、流速等)可以根据废水的实际成分进行优化调节。电渗析法处理后产生的浓盐水可以进一步通过其他技术(如反渗透或蒸发)进行资源回收或再处理, 进一步提高资源利用效率和处理的经济性。

## 2.2 Fenton 法在有机污染物去除中的应用

Fenton 法是一种利用过氧化氢 ( $H_2O_2$ ) 和二价铁离子 ( $Fe^{2+}$ ) 反应生成强氧化性自由基  $\cdot OH$  来降解有机污染物的氧化技术。该方法通过 Fenton 反应生成的  $\cdot OH$  自由基, 具有极强的氧化能力, 可以快速分解复杂的有机物, 特别是难降解的化学品<sup>[2]</sup>。Fenton 法的优势在于反应过程迅速, 能够在较短时间内有效降低有机物的浓度, 且对广泛种类的有机污染物均具有较好的处理效果。其应用领域涵盖了水处理、废气净化和土壤修复等多个领域。Fenton 反应在有机废水处理中的应用, 不仅能够去除水中的有害有机物, 如苯系物、农药残留等, 还能有效分解某些难降解的工业污染物, 如染料、溶剂等。Fenton 法操作简单、反应条件温和, 具有较低的设备投资和运行成本, 在实际应用中表现出较好的经济性和环境友好性。Fenton 法也存在一些挑战, 如反应过程中生成的  $Fe^{3+}$  易形成沉淀, 需要进一步的优化措施以提高其经济效益和处理效率。

## 3 电渗析与 Fenton 法的协同效应分析

### 3.1 两种方法协同作用的理论基础

电渗析法与 Fenton 法的协同作用基于两种技术的互补性。电渗析法通过电场驱动溶液中带电离子经过离子交换膜的选择性迁移, 主要去除废水中的无机污染物、金属离子及一些低分子无机盐。它在去除水中离子时不直接影响有机物, 能够有效减少水中无机污染物的浓度。Fenton 法则是通过过氧化氢与铁离子反应生成  $\cdot OH$  自由基, 具备强氧化能力, 能降解水中的有机污染物及难降解的化学物质。在两者协同作用下, 电渗析法可以先去除废水中的无机污染物, 降低有机污染物的负荷, 减少 Fenton 法的氧化压力, 从而使 Fenton 反应更高效。另一方面, Fenton 法通过强氧化分解有机物, 将其转化为较易去除的低分子物质, 这些分解产物更容易通过电渗析法去除, 尤其是当分解产物呈现带电状态时。这种协同机制有效避免了单一方法的局限性, 充分发挥了两种技术的优点。电渗析法和 Fenton 法在废水处理中的协同作用, 还可通过调整工艺参数, 如电流强度、过氧化氢浓度、反应时间等, 进一步优化废水的处理效果, 确保废水中复杂污染物的高效去除。

### 3.2 协同处理对废水处理效果的提升

电渗析与 Fenton 法的协同处理在废水治理中显示

出明显的优势, 尤其在处理复杂的化工园区废水时, 能有效提高整体的去除效率。电渗析法通过分离溶解性无机污染物、金属离子及部分有机物, 减少了 Fenton 法处理过程中对高浓度污染物的氧化负担, 为 Fenton 反应提供了一个较为“纯净”的水质环境, 降低了反应中产生副产物的可能性, 提高了反应速率<sup>[3]</sup>。在去除无机物的同时, Fenton 法能够强力降解有机污染物, 转化为较易处理的小分子物质, 这些物质在电渗析的作用下能更有效地被去除。协同处理技术在提高去除率的同时, 还能够显著降低能耗和化学药剂的使用量。电渗析法的低能耗特点与 Fenton 法在短时间内实现高效氧化的特性结合后, 能够显著提升处理效率, 减少系统的能耗开销, 从而在经济性和环境友好性方面都表现出较好的效果。

## 4 电渗析与 Fenton 法工艺的优化策略

### 4.1 电渗析与 Fenton 法工艺参数的优化

电渗析与 Fenton 法的工艺优化首先需要关注各自的核心工艺参数, 通过精确调整这些参数来提升废水处理的效率与效果。在电渗析过程中, 关键参数包括电流密度、膜的选择性、流速以及溶液的 pH 值。电流密度对膜的渗透速率和污染物的去除效率有显著影响, 过低的电流密度可能导致去除效率不高, 而过高则可能导致膜的过度电化学反应或能耗增加。膜的选择性则直接决定了废水中不同污染物的去除效果, 特别是对于具有复杂化学成分的废水, 选择性较强的膜能够提高无机污染物的分离效率。此外, 流速的调节影响膜表面污染物的去除速率, 在电渗析过程中, 过快或过慢的流速都可能影响处理效果。溶液的 pH 值对于某些金属离子的去除和有机污染物的降解有着重要作用, 合理调节 pH 值有助于提高电渗析法的整体效率。

在 Fenton 法中, 过氧化氢的浓度、反应温度、铁离子的浓度以及反应时间是影响氧化效果的关键因素。过氧化氢浓度过低, 可能导致自由基生成不足, 降低有机污染物的降解效率, 而浓度过高则可能导致过氧化氢的分解, 产生副产物, 影响处理效果。铁离子的浓度则需要一定范围内进行控制, 铁离子过多容易形成不溶性铁氢氧化物沉淀, 从而影响反应的进行; 而过少则可能导致氧化能力不足。反应温度的提高有助于加速 Fenton 反应, 但温度过高时会加速过氧化氢的分解, 反而降低处理效果。反应时间与 Fenton 法的氧化能力直

接相关,适当延长反应时间可以提高降解效果,但过长的反应时间可能导致经济成本的上升。

#### 4.2 系统集成与操作条件的优化分析

优化集成主要包括两个方面:系统的结构设计和操作条件的匹配。电渗析与 Fenton 法的联合应用要求合理配置各自的处理环节,使其能够在不同的阶段发挥最大效能。在废水处理的初期阶段,电渗析可以用于去除废水中的无机盐和金属离子,降低水中无机污染物的浓度,减轻 Fenton 法的负担,使其能够集中精力降解有机污染物<sup>[4]</sup>。在这之后,Fenton 法的强氧化作用可以去除水中的有机污染物,并通过氧化生成的小分子化合物,进一步提高水质。两者的无缝连接,既保证了处理效果的最优化,又避免了单一技术可能面临的处理瓶颈。

在操作条件的优化方面,系统运行中的电流强度、过氧化氢浓度、反应温度、流速等都需要根据废水的具体性质进行动态调节。电渗析单元与 Fenton 反应池的流体流速、温度和反应时间必须协调匹配,以确保两者能够在各自的操作条件下达到最佳效果。废水的进水量、进水浓度等也会对系统的处理效率产生影响,需要通过实时监控和调节操作参数来实现系统的稳定运行。例如,较高的进水浓度可能会导致处理过程中反应效率的下降,因此在系统运行过程中需要根据废水浓度调整电流强度和过氧化氢的添加量,以优化反应条件,确保高效去除污染物。

系统集成设计的优化不仅仅是为了提高废水处理效果,还要关注系统运行的经济性。合理的操作条件可以降低能源消耗和药剂使用量,从而减少处理成本,提高系统的整体经济性。综合考虑处理效果、运行成本和设备投资,电渗析与 Fenton 法的协同处理系统通过灵活的工艺优化与集成设计,能够实现高效、稳定且经济的废水治理方案。

表 1 电渗析与 Fenton 法协同处理优化参数对比

参数	电渗析法优化条件	Fenton 法优化条件	效果提升 (%)	数据来源
电流密度 (A/m <sup>2</sup> )	20-30	-	15-25	李, 2021. 《电渗析与 Fenton 法联合废水处理研究》
过氧化氢浓度 (mg/L)	-	1000-2000	10-20	张, 2022. 《Fenton 法在工业废水处理中的应用》
铁离子浓度 (mg/L)	-	10-20	5-10	王, 2023. 《Fenton 氧

pH 值	5.5-7.5	3-5	20-30	化法优化研究》 周, 2020. 《废水中 pH 值对电渗析及 Fenton 法的影响》 赵, 2021. 《Fenton 反应优化与废水处理》
反应时间 (min)	-	30-60	12-18	

### 5 电渗析-Fenton 法协同处理废水的实践应用

#### 5.1 不同类型废水处理效果比较

电渗析与 Fenton 法的协同处理技术在不同类型废水中的应用效果表现出明显差异,主要取决于废水的成分和污染物的种类。对于含有高浓度无机盐和重金属的废水,电渗析法能够迅速去除溶解性盐类和金属离子,减少这些污染物对后续 Fenton 反应的影响,从而提高 Fenton 法对有机物的降解效率。在高浓度有机物废水中,Fenton 法能够通过生成强氧化性自由基,降解大分子有机污染物,减少其对电渗析膜的污染,提高膜的使用寿命与稳定性。电渗析与 Fenton 法结合后,对于处理含有复杂有机物的废水,协同处理技术能够显著提高有机物的去除率。在这种情况下,电渗析负责去除废水中的无机成分,Fenton 法则利用强氧化性将有机污染物分解为较易去除的小分子物质,使得后续处理更加高效。不同类型的废水通过适配电渗析和 Fenton 法的优化工艺,能够取得更好的整体去除效果,提升处理效率。

#### 5.2 工艺优化后的应用案例分析

在某化工园区废水处理系统中,电渗析与 Fenton 法的协同应用经过工艺优化后,成功提升了废水的处理效果<sup>[5]</sup>。该园区废水中含有较高浓度的无机盐(约 3500 mg/L)、重金属离子(如铜、镍等)和有机溶剂(如苯系物)。在初步处理阶段,电渗析法将废水中的无机盐和金属离子去除约 70%,大大降低了 Fenton 法反应中有害物质的干扰。Fenton 法通过加入适量的过氧化氢(浓度为 1000 mg/L)和铁离子(浓度为 15 mg/L),在 60 分钟的反应时间内,去除了水中约 80%的有机溶剂和约 90%的苯系物污染物。优化后的系统不仅提高了有机物的去除效率,还减少了系统的能耗和化学药剂的使用量。在这一过程中,废水的处理成本较传统单一技术降低了 15%左右。实验表明,通过优化电渗析与 Fenton 法的各项工艺参数,协同处理不仅能够提升废水的净化效果,还能在减少运行成本和提高系统稳定性方面发挥重要

作用。

## 6 结语

电渗析与 Fenton 法的协同处理技术在化工园区废水处理中的应用展现出显著的优势。通过优化工艺参数与系统集成设计,能够有效提升处理效率,降低能耗和运行成本。针对不同类型废水的处理效果表明,协同工艺具有广泛的适用性。未来,随着技术的不断发展和优化,电渗析与 Fenton 法的结合有望在更复杂废水处理场景中发挥更大作用,进一步推动废水处理技术的创新与应用。

### 参考文献

[1] 樊杰. 金刚烷胺制药废水 Fenton-超声氧化处理及溴化氢双极膜电渗析回收[D]. 北京林业大学,2013.

[2] 张小兰,马旭宾,林锦涛,等. 双极膜电渗析处理餐厨垃圾厌氧消化液的特性研究[J]. 科技创新与应用,2025,15(02):58-62.

[3] 李学伟,苗春雷,朱娅媛,等. 电渗析技术在广式酱油减盐中的应用研究[J]. 中国调味品,2024,49(12):159-165.

[4] 孙旭,梁铄,吴亮. 双极膜电渗析制备高浓度无机碱工艺研究[J]. 膜科学与技术,2024,44(06):96-106.

[5] 王潇潇,钟溢健,李金城,等. 三维电解-Fenton 法处理垃圾膜浓缩液的试验研究[J/OL]. 桂林理工大学学报,1-13[2025-02-10].

作者简介:古镓宝(1996年3月6日),男,汉族,河南省社旗县人,研究生,资源与环境专业硕士,桂林理工大学,废水资源循环利用。