

# 基于文献分析的电化学水处理技术研究现状与展望

周新雪 代俊

成都市市政工程设计研究院有限公司，四川省成都市 610000

西南化工研究设计院有限公司，四川省成都市 610000

**摘要:** 电化学水处理技术作为一种高效、环保的水处理方法，近年来受到了广泛关注。本文通过文献分析，综述了电化学水处理技术的基本原理、应用领域、研究进展及未来展望。研究发现，电化学水处理技术在工业废水处理、市政污水处理和饮用水净化等方面具有显著优势。然而，技术优化、材料创新和规模化应用仍面临挑战。未来，随着新型电极材料和催化剂的开发，以及反应器设计的不断改进，电化学水处理技术有望在更广泛的领域得到应用。

**关键词:** 电化学；水处理；氧化还原；电极

**Abstract:** Electrochemical water treatment technology, as an efficient and environmentally friendly method for water treatment, has received widespread attention in recent years. This paper reviews the basic principles, application areas, research progress, and future prospects of electrochemical water treatment technology through literature analysis. The research findings indicate that electrochemical water treatment technology has significant advantages in industrial wastewater treatment, municipal sewage treatment, and drinking water purification. However, challenges remain in technology optimization, material innovation, and large-scale application. In the future, with the development of novel electrode materials and catalysts, as well as continuous improvements in reactor design, electrochemical water treatment technology is expected to be applied in a broader range of fields.

**Keywords:** Electrochemistry; Water Treatment; Redox; Electrode

DOI:10.69979/3060-8767.24.1.004

## 引言

随着全球经济的飞速发展，水体污染在发展中国家日益加剧，已成为亟待解决的世界性环境问题<sup>[1]</sup>。我国的水污染情况尤为突出，主要面临两大类问题：一方面，许多地区缺乏完善的污水排放和集中处理设施，生活污水未经处理直接排放，对环境造成严重污染；另一方面，工业废水排放量巨大，传统处理方法难以应对这些高浓度污染物<sup>[2]</sup>。传统的废水处理技术，如生物化学处理，因其对废水可生化性和微生物生存环境的要求较高，在处理某些难以降解的工业废水方面效果有限<sup>[3]</sup>。

面对日益复杂的水污染问题，传统的生物处理方法因运行成本低，曾被广泛应用于环境治理。然而，随着水体污染物种类和浓度的增加，生物处理方法的局限性逐渐显现，难以满足现代水处理需求。相比之下，电化学水处理技术凭借其在常温常压下运行、污染物去除效率高等优势<sup>[4]</sup>，受到越来越多研究者的关注。该技术通过电能驱动，利用催化活性电极直接或间接氧化污染物，

实现了对废水的高效治理。

电化学水处理技术作为一种新兴的高级氧化技术，通过电极反应高效去除难以生化降解的持久性污染物，包括对人体有害的致癌、致畸和致突变有机物，展现出独特的优势。该技术以其高效、操作简便、易于自动化控制和无二次污染等特点，被誉为“环境友好技术”，在污水处理领域显示出广阔的应用前景<sup>[5]</sup>。

电力技术的发展也为电化学水处理技术提供了新的契机<sup>[6]</sup>。电化学方法凭借其强氧化能力和灵活的工艺特点，逐渐在废水处理领域占据重要位置。当前，电化学氧化、电絮凝、电渗析等技术在处理难降解废水方面已取得显著成果，并得到了广泛应用<sup>[7]</sup>。

尽管早在 20 世纪初期该技术便受到关注，但由于当时电力成本较高，应用受限。随着电力技术的进步和成本的降低，电化学水处理技术的应用潜力逐渐显现。本文旨在通过文献分析，系统综述电化学水处理技术的基本原理、应用现状、研究进展及未来展望，探讨其在水处理领域的广泛应用前景及发展方向。

## 1. 电化学水处理技术的基本原理

电化学水处理技术是一种通过电能驱动的高级氧化技术，利用电极反应去除水中的污染物。其主要组件包括电源、阴极、阳极和电解液。电化学反应的核心在于电极与电解质之间的电荷转移过程<sup>[8]</sup>，这一过程使得污染物能够在电极表面发生氧化或还原反应。根据电化学氧化的机制，污染物的去除主要依赖于直接氧化和间接氧化两种方式。

### 1.1 直接氧化

直接氧化是指污染物在电极表面直接发生电子转移的过程，导致污染物的氧化。在这一过程中，污染物被吸附到阳极表面，通过电极反应失去电子，从而被氧化。直接氧化可以进一步分为两类反应：电化学反应过程和电化学反应过程<sup>[9]</sup>。

①电化学反应过程：在这个过程中，污染物并未完全降解，而是从大分子转化为小分子。尽管污染物的结构发生变化，但并未彻底矿化。

②电化学反应过程：在这一过程中，污染物被彻底氧化为无机物，通常是稳定的最终产物，如二氧化碳和水。这一过程依赖于阳极材料的性质，不同的阳极材料会影响反应路径和最终产物<sup>[10]</sup>。

不同的电极材料会有不同的反应机理。

### 1.2 间接氧化

间接氧化则利用电解液中的离子在电极表面发生反应生成强氧化性物质，这些物质再进一步氧化水中的污染物<sup>[11]</sup>。例如，在含氯电解液中，氯离子在阳极失去电子生成氯气，氯气与水反应生成次氯酸，次氯酸是一种强氧化剂，可以有效氧化水中的有机污染物和病原体。由于实际废水中通常含有氯离子，这种间接氧化过程在废水处理应用中备受关注。

### 1.3 电化学处理技术的物理化学过程

电化学水处理技术不仅包括氧化还原反应，还涉及物理过程如吸附、絮凝和膜分离等。在电化学反应器中，通过外加电场调控电子定向转移，使水中的污染物在反应器中发生特定的物理和化学反应，从而被去除。化学过程可以进一步分为直接电解和间接电解<sup>[12]</sup>。

①直接电解：污染物直接在电极上发生氧化或还原反应。阳极过程是污染物在阳极表面被氧化成低毒易降解物质，甚至直接矿化<sup>[12]</sup>；阴极过程是污染物在阴极表面被还原，从而去除污染物，常用于回收重金属和卤代烃。

②间接电解：利用电化学反应产生的强氧化或还原性中间物质降解或转化污染物。间接电解可以是可逆过程或不可逆过程。可逆过程指生成的氧化还原物质可以通过电极反应再生并循环利用；不可逆过程指生成的强氧化性物质，如氯酸盐和臭氧，直接参与污染物的氧化。

## 2. 电化学水处理技术的应用

### 2.1 工业废水处理

工业废水中常常含有难以降解的有机污染物和重金属离子，传统的处理方法通常难以达到理想的效果。相比之下，电化学水处理技术在去除这些复杂污染物方面表现出色。电絮凝技术通过电极产生的絮凝剂有效地将悬浮颗粒和胶体物质聚集，使其沉淀分离。已有研究指出，电絮凝可以有效去除电镀废水中的重金属离子，如铬、镍等，其处理效果优于传统的化学絮凝法<sup>[13]</sup>。

电氧化技术则通过阳极反应生成强氧化剂，如羟基自由基，氧化分解有机污染物。应用电氧化技术可以高效去除印染废水中的有机染料，显著提高废水的可生化性<sup>[14]</sup>。电化学水处理还可以还原可以有效回收电镀废水中的银和铜，提高资源利用率<sup>[15]</sup>。

### 2.2 市政污水处理

市政污水处理也是电化学水处理技术的重要应用领域。电化学技术不仅能够去除污水中的有机污染物和重金属离子，还能有效去除氨氮和磷等营养物质，从而防止水体富营养化。电絮凝技术能够去除多种污染物，处理各种工业废水，并能应对污染物质量和数量的波动。将电絮凝与降解过程结合使用可以显著提高处理效果<sup>[16]</sup>。

### 2.3 饮用水净化

在饮用水净化方面，电解水技术通过电解反应生成次氯酸，用于饮用水的消毒处理，有效杀灭水中的病原微生物。研究表明，电化学氧化技术能够有效去除饮用水中的有机污染物和微生物，显著提高水质安全性<sup>[17]</sup>。

电化学还原技术还可以有效去除饮用水中的铅和砷，达到饮用水标准<sup>[18]</sup>。电化学水处理技术在饮用水净化方面的应用，不仅提高了水质安全性，还减少了化学药剂的使用，避免了二次污染。

## 3. 电化学水处理技术的研究进展

### 3.1 新型电极材料的开发

电极材料是电化学水处理技术的核心，其性能直接影响电化学反应的效率和效果。近年来通过致力于开发

新型电极材料,以提高电化学水处理的性能。例如,掺杂金属氧化物电极和复合材料电极在电化学反应中表现出优异的性能。Rani 等人发现掺杂铋的氧化钛电极具有较高的氧化能力和稳定性,可以显著提高有机污染物的去除效率<sup>[19]</sup>。此外,碳基材料如石墨烯和碳纳米管的引入,也显著增强了电极的导电性和催化活性<sup>[20]</sup>。

### 3.2 催化剂的优化

催化剂在电化学反应中能直接影响反应的速率和选择性。研究人员通过合成和改性多种催化剂以提高电化学反应的效率。研究发现,钴掺杂的黑色 TiO<sub>2</sub> 纳米管 (Co-Black TNT) 在激活过氧单硫酸盐 (PMS) 方面表现出高效和稳定的性能,从而显著提高了有机污染物的降解效率<sup>[21]</sup>。Guo 等人还通过在 MOF 的纳米空间内合成金属和氮掺杂的碳基催化剂,开发出具有高表面积和均匀分布的小型金属/氮活性位点的电催化剂,显著提高了氧还原反应 (ORR) 的电催化活性<sup>[22]</sup>。

### 3.3 电化学反应器的设计和优化

电化学水处理技术通过优化反应器结构和操作条件,显著提高了电化学水处理的效率。例如,研究表明,磁稳定流化床电极通过增强电极颗粒之间的接触,显著提高了电化学反应的产率。在施加 20 mT 磁场时,有效电极表面积增加了高达 400%,提高了电化学反应的效率<sup>[23]</sup>。此外,微反应器和连续流反应器等新型反应器的开发,也为电化学水处理技术的应用提供了新的思路。Liu 等人通过引入一种新型的气泡基微反应器,可以显著提升电催化氮还原反应的传质行为,从而提高反应性能。实验和模拟结果表明,使用该微反应器后,氨的产量可提高两倍<sup>[24]</sup>。

### 3.4 多功能电化学水处理技术

电化学水处理技术的多功能电极材料和反应器设计能够使电化学水处理技术能够同时实现污染物去除和资源回收。通过在电极表面引入磁性纳米颗粒,可以同时实现污水处理和重金属回收<sup>[25]</sup>。并且研究人员还开发了具有杀菌功能的电化学反应器,通过电化学反应生成的活性氧物种,可以有效杀灭水中的病原微生物<sup>[17]</sup>。

## 4. 电化学水处理技术的未来展望

①新型电极材料的开发将继续推动电化学水处理技术的发展。随着纳米技术和材料科学的进步,更多具有高导电性、高催化活性和良好稳定性的材料将被应用于电极的制造中。这不仅将提高电化学反应的效率,还

将延长电极的使用寿命,降低整体运行成本。催化剂的优化仍然是一个重要的研究方向。通过开发更高效、更耐用的催化剂,可以进一步提高电化学反应的速率和选择性。特别是基于金属有机框架 (MOF) 的催化剂,凭借其高比表面积和丰富的活性位点,展示出巨大的潜力。

②在电化学反应器的设计方面,未来的研究将更加注重提高传质效率和反应速率。新型反应器如微反应器和连续流反应器的应用,有望显著提升电化学水处理的整体效率。同时,多功能反应器的开发也将成为一个重要趋势,通过集成絮凝、杀菌等功能,实现污水处理和资源回收的多重目标。电化学水处理技术的智能化和自动化控制也将是未来发展的一个重要方向。通过引入先进的传感器和控制系统,可以实时监测和调节电化学反应过程,提高处理效率和效果,减少能耗和副产物的生成。

③在应用拓展方面,电化学水处理技术将在更多领域得到应用。除了传统的工业废水和市政污水处理,电化学技术在农业废水、医疗废水以及新兴污染物(如微塑料、抗生素残留等)处理中的应用前景广阔。同时,随着全球水资源短缺问题的加剧,电化学水处理技术在海水淡化和再生水利用方面也具有巨大的潜力。

#### 参考文献:

- [1] ANGLADA Á, URTIAGA A, ORTIZ I. Contribution of electrochemical oxidation to wastewater treatment: fundamentals and review of applications [J]. 2009, 84(12): 1747-55.
- [2] 张瑞, 赵霞, 李庆维, et al. 电化学水处理技术的研究及应用进展 [J]. 水处理技术, 2019, 45(04): 11-6.
- [3] BHAGAWAN D, CHANDAN V, SRILATHA K S, et al. Industrial wastewater treatment using electrochemical process [J]. IOP Conference Series: Earth Environmental Science, 2018, 191.
- [4] CHAPLIN B P. The Prospect of Electrochemical Technologies Advancing Worldwide Water Treatment [J]. Accounts of chemical research, 2019, 52 3: 596-604.
- [5] 李庆, 尹先清, 翟磊, et al. 电化学处理海上油田含聚污水矿场 [J]. 水处理技术, 2016, 42(05): 78-81.
- [6] 李思琪. 电化学水处理技术的研究进展与应用现状 [J]. 农业与技术, 2022, 42(03): 35-7.
- [7] CHEN G. Electrochemical technologies in wastewater treatment [J]. Separation Purification Technology, 2004, 38: 11-41.

- [8]叶耘峰. 水处理中电化学方法的基本原理和新技术进展——评《水处理电化学原理与技术》 [J]. 水资源保护, 2020, 36(04): 107.
- [9]宋媛莉, 李进松. 电化学技术在废水处理中的应用研究进展 [J]. 生物化工, 2024, 10(02): 253-6.
- [10]DROGUI P, BLAIS J-F, MERCIER G. Review of Electrochemical Technologies for Environmental Applications [J]. Recent Patents on Engineering, 2007, 1(3): 257-72.
- [11]BADDOUH A, BESSEGATO G, RGUI TI M, et al. Electrochemical decolorization of Rhodamine B dye: Influence of anode material, chloride concentration and current density [J]. Journal of environmental chemical engineering, 2018, 6: 2041-7.
- [12]ZHU X, NI J, LAI P. Advanced treatment of biologically pretreated coking wastewater by electrochemical oxidation using boron-doped diamond electrodes [J]. Water Research, 2009, 43(17): 4347-55.
- [13]AKBAL F, CAMCI S. Comparison of Electrocoagulation and Chemical Coagulation for Heavy Metal Removal [J]. 2010, 33(10): 1655-64.
- [14]VLYSSIDES A, LOIZIDOU M, KARLIS P, et al. Electrochemical oxidation of a textile dye wastewater using a Pt/Ti electrode [J]. Journal of hazardous materials, 1999, 70 1-2: 41-52.
- [15]PENG C, LIU Y, BI J, et al. Recovery of copper and water from copper-electroplating wastewater by the combination process of electrolysis and electrodialysis [J]. Journal of hazardous materials, 2011, 189 3: 814-20.
- [16]SHAHEDI A, DARBAN A K, TAGHIPOUR F, et al. A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes [J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2020, 22:154-69.
- [17]PRAMANIK K, SENGUPTA P, DASGUPTA S, et al. Electrochemical Column Cell for Continuous Oxidative Inactivation of Pathogens and Reductive Removal of Toxic Heavy Metals [J]. ACS applied materials interfaces, 2021.
- [18]KOBAYA M, GEBOLOGLU U, ULU F, et al. Removal of arsenic from drinking water by the electrocoagulation using Fe and Al electrodes [J]. Electrochimica Acta, 2011, 56: 5060-70.
- [19]RANI M, KESHU, SHANKER U. Efficient degradation of organic pollutants by novel titanium dioxide coupled bismuth oxide nanocomposite: Green synthesis, kinetics and photoactivity [J]. Journal of environmental management, 2021, 300: 113777.
- [20]LI Y, ZHOU W, WANG H, et al. An oxygen reduction electrocatalyst based on carbon nanotube-graphene complexes [J]. Nature nanotechnology, 2012, 7 6: 394-400.
- [21]LIM J, YANG Y, HOFFMANN M R. Activation of Peroxymonosulfate by Oxygen Vacancies-Enriched Cobalt-Doped Black TiO<sub>2</sub> Nanotubes for the Removal of Organic Pollutants [J]. Environmental Science Technology, 2019, 53: 6972 - 80.
- [22]GUO J, LI Y, CHENG Y, et al. Highly Efficient Oxygen Reduction Reaction Electrocatalysts Synthesized under Nanospace Confinement of Metal-Organic Framework [J]. ACS nano, 2017, 11 8: 8379-86.
- [23]TSCHOEPE A, WYRWOLL M, SCHNEIDER M, et al. A magnetically induced fluidized-bed reactor for intensification of electrochemical reactions [J]. Chemical Engineering Journal 2020, 385: 123845.
- [24]LIU H, LIU Y, YU X, et al. A Novel Bubble-based Microreactor for Enhanced Mass Transfer Dynamics toward Efficient Electrocatalytic Nitrogen Reduction [J]. J Small, 2023: e2309344.
- [25]WANG D, LI Y, LI PUMA G, et al. Photoelectrochemical cell for simultaneous electricity generation and heavy metals recovery from wastewater [J]. Journal of hazardous materials, 2017, 323 Pt B: 681-9.