

引用格式: 万琼, 杨虎生, 王峰, 等. 电化学消毒技术及电极材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44(9): 846-853.

WAN Q, YANG H S, WANG F, *et al.* Research Progress of Electrochemical Disinfection Technology and Electrode Materials[J]. Materials China, 2025, 44(9): 846-853.

## 电化学消毒技术及电极材料研究进展

万琼<sup>1</sup>, 杨虎生<sup>1</sup>, 王峰<sup>2</sup>, 杨国红<sup>1</sup>, 张新艳<sup>1</sup>,  
鞠恺<sup>1</sup>, 张奇莹<sup>1</sup>, 景宏彬<sup>2</sup>, 庞传山<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

(2. 陕西省水务集团水生态综合开发有限公司, 陕西 西安 710082)

**摘要:** 电化学消毒技术具有无需添加化学药剂、消毒效率高、消毒副产物少、操作灵活和管理水平要求低等优点, 在分散式水处理方面具有独特的优势。电极是电化学消毒的核心组成部分, 电极材料的选取及其构型设计对电化学消毒系统的消毒机理、传质速率、消毒效果、使用寿命和运行成本有至关重要的影响。在介绍电化学消毒原理的基础上, 分别针对流经式和穿流式电化学消毒系统中的电极材料及其特性和发展进行了综述, 并展望了电极材料的研究和发展方向, 为电化学消毒技术的推广应用提供了思路。

**关键词:** 电化学消毒; 电极材料; 消毒机理; 流经式; 穿流式

**中图分类号:** R123.6; TQ150 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)09-0846-08

## Research Progress of Electrochemical Disinfection Technology and Electrode Materials

WAN Qiong<sup>1</sup>, YANG Husheng<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>, YANG Guohong<sup>1</sup>, ZHANG Xinyan<sup>1</sup>,  
JU Kai<sup>1</sup>, ZHANG Qiyang<sup>1</sup>, JING Hongbin<sup>2</sup>, PANG Chuanshan<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2. Shaanxi Water Group Water Ecology Comprehensive Development Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

**Abstract:** Electrochemical disinfection technology has the advantages of no need to add chemicals, high disinfection efficiency, few disinfection by-products, flexible operation and low management level, and has unique advantages in decentralized water treatment. Electrode is the core component of electrochemical disinfection. The selection of electrode material and its configuration design have a vital influence on the disinfection mechanism, mass transfer rate, disinfection effect, service life and operation cost of electrochemical disinfection system. On the basis of introducing the principle of electrochemical disinfection, this paper summarizes the characteristics and development of electrode materials in flow-by and flow-through electrochemical disinfection systems respectively, and looks forward to the research and development direction of electrode materials, which provides ideas for the popularization and application of electrochemical disinfection technology.

**Key words:** electrochemical disinfection; electrode material; disinfection mechanism; flow-by; flow-through

收稿日期: 2024-01-16 修回日期: 2024-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42302292); 麟游县怡心谷康养度假区特色温泉用水关键技术项目(SCZF2021-ZB-2055/001)

第一作者: 万琼, 女, 1977年生, 副教授, 硕士生导师

通讯作者: 杨国红, 女, 1981年生, 讲师,  
Email: guohong0706@xust.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202401019

### 1 前言

水体中的病原微生物是公共卫生与安全的主要威胁。世卫组织调查数据表明, 发展中国家的水传播传染病发病率占总疾病的80%以上<sup>[1]</sup>。消毒作为水处理工艺流程中至关重要的环节, 能够有效灭活水中微生物, 最大限度阻断水媒疾病的传播。

电化学消毒利用安装在反应器内的电极, 在通电的条件下即可完成微生物的灭活。与氯消毒和臭氧消毒等

传统的消毒技术相比，电化学消毒技术因其无需额外添加化学药剂、消毒效率高、副产物少、操作灵活及自动化程度高等优势，在管理水平与技术基础相对薄弱的农村等地区，用于分散式水处理时展现出广阔的发展前景与巨大的应用潜力。

电极作为电化学消毒的核心组件，其构型和材料的选取对电化学消毒的传质效率、消毒性能、使用寿命和能耗有直接影响，甚至影响消毒机理。

从构型上来划分，电极主要分为流经式和穿流式2大类。流经式电化学消毒的电极通常为棒状、板状或筒状，电极固定不动，或者进行旋转以增加电极与电解液的接触和传质效果。流经式电极属于二维电极。电解液与电极能否有效接触对电化学消毒效果至关重要。流经式电极与电解液的接触有限，需要通过增加电极数量和(或)提升电压来提高消毒效果。

为了提高电化学消毒系统的传质效率，Huo课题组<sup>[2-5]</sup>研发了一种穿流式电化学消毒电极。穿流式电极也称为过滤式电极，属于三维电极，通常采用具有孔隙的材料，电解液从电极材料的孔隙内穿流而过，大大增加了电极与细菌的接触概率，提高了传质效率。

本文介绍了电化学消毒的机理，在此基础上，分别针对流经式和穿流式电化学消毒技术中电极材料的类型、特性及其发展进行了综述，并对后续研究提出展望，以期为电化学消毒技术的研究与应用提供思路。

## 2 电化学消毒机理

电化学消毒是通过多种机理共同作用完成的<sup>[6-8]</sup>。消毒机理可分为电场作用、活性氧基团作用和电解氯化作用3种。

### 2.1 电场作用

电场作用分为电场直接作用和电穿孔2种。对电极施加电压后，电场所产生的机械应力使微生物的细胞产生形变甚至破裂，细胞膜失去了选择透过性后，小分子物质能够自由穿过细胞膜进入细胞内，使微生物细胞膨胀破裂导致微生物死亡<sup>[9]</sup>，这种被称为直接电场作用。

在强电场(大于  $10 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ )条件下，微生物的磷脂双分子层和蛋白质的稳定性被破坏，细胞膜瞬间被击穿形成不可逆的孔，胞内物质外泄，从而导致微生物死亡<sup>[2,3]</sup>，这种作用机理称为电穿孔。Liu等<sup>[4]</sup>进行电化学消毒试验，使用扫描电镜观察到消毒后大肠杆菌细胞膜上出现了小孔结构，证明了电穿孔能够造成细菌死亡。Yang等<sup>[10]</sup>将银纳米线复合材料用于电化学消毒，试验结果也证实了这一现象。电穿孔技术消毒效率高且无副产物产生，但有研究表明，电穿孔技术没有直接破坏遗传

物质，被灭活的细胞可能会复活<sup>[3]</sup>，而且电穿孔技术所需的电压较高( $10^3 \sim 10^6 \text{ V}$ )，限制了其消毒作用的充分发挥。但也有研究表明，导电纳米线的尖端可产生“避雷针”效应，使局部电场得到增强，可在较低操作电压( $<10 \text{ V}$ )下实现电穿孔<sup>[11]</sup>。

### 2.2 活性氧基团作用

在电化学反应器内，电极附近将发生一系列电化学反应，生成具有强氧化性的活性氧基团，如图1所示。阳极附近的水分子发生反应生成具有氧化性的  $\text{O}_3$  以及  $\cdot\text{OH}$  和  $\cdot\text{O}$  等中间体，同时阴极附近的溶解氧和  $\text{H}^+$  被还原生成  $\text{H}_2\text{O}_2$ 。

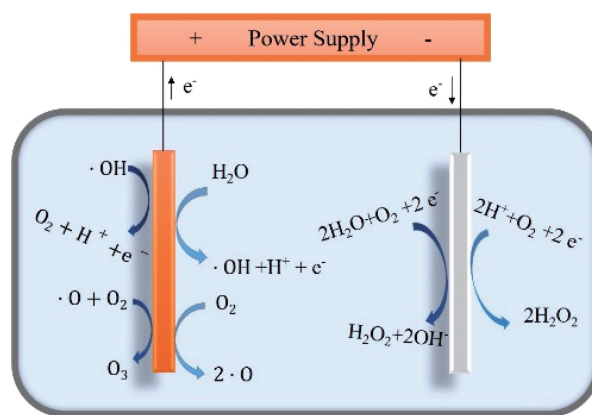


图1 活性氧化物的生成机理

Fig. 1 Formation mechanism of active oxides

$\cdot\text{OH}$  和  $\cdot\text{O}$  等活性物质具有较强的氧化能力，可使微生物快速被氧化破坏而死亡<sup>[12]</sup>。 $\text{H}_2\text{O}_2$  在酸碱条件下都具有较强的氧化性，而且还原产物为绿色清洁的  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。同时，值得注意的是，虽然  $\text{H}_2\text{O}_2$  具有氧化消毒的能力，但其本身也属于致癌物质，因此应避免  $\text{H}_2\text{O}_2$  在消毒过程中的过度累积。

为了明确哪种活性氧物质起主要杀菌作用，Jeong等<sup>[13]</sup>在无氯体系下对活性氧化物质进行检测，发现产生的  $\cdot\text{OH}$  是电化学消毒的主要消毒成分。

### 2.3 电解氯化作用

当水中存在氯离子时，氯离子在电场作用下在阳极表面失电子生成氯气，电解产生的氯气可进一步发生反应生成次氯酸和二氧化氯等消毒剂进行消毒<sup>[14]</sup>。水中氯离子的存在可增加电解液的导电性，并通过电化学反应生成次氯酸和二氧化氯等具有消毒能力的物质，从而提高消毒效果。研究表明，氯离子浓度低于  $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时不具备灭活效果<sup>[15]</sup>。同时还应注意，当原水受到有机物污染时，电解生成的氯可能与水中的部分有机物反应生成三氯甲烷等消毒副产物。

在电化学消毒过程中，以上几种消毒机理可能协同

发挥作用。不同电极材料的消毒效果和机理有所不同。即使相同的电极材料,流经式电极和穿流式电极对应的消毒机理也有所不同。

### 3 流经式电化学消毒电极材料

流经式电化学消毒电极材料主要有石墨、金属、金属氧化物及其涂层电极、掺硼金刚石薄膜电极(boron-doped diamond, BDD)等。由电化学消毒机理可知,阳极表面生成  $O_3$  以及  $\cdot OH$  和  $\cdot O$  等活性氧基团,阴极表面则主要生成  $H_2O_2$ , 目前研究多集中在阳极,也有部分研究者探究了阴极材料的消毒性能和机理<sup>[16-18]</sup>。

#### 3.1 石墨电极

石墨电极除了具备电化学消毒能力以外,还具有吸附能力强、化学稳定性高以及价格便宜等优点,因此,石墨电极是最早应用于电化学消毒的碳素电极材料。贾成瑶等<sup>[19]</sup>以石墨和 Ti 为电极,研究不同条件下三氯甲烷的生成情况,结果发现在相同电流密度和电解时间下 Ti 电极电解产生的三氯甲烷比石墨电极多,且电流密度越大,电解时间越长,产生的三氯甲烷越多。

石墨电极存在电阻大、能耗高的缺点,而且当电解液呈酸性时,电极表面易析出  $O_2$ , 石墨电极与  $O_2$  反应生成 CO 和  $CO_2$  易导致电极膨胀、脱落<sup>[20]</sup>, 使电极的稳定性和电解效率降低。

#### 3.2 金属电极

金属电极主要分为活泼电极和惰性电极,活泼金属电极(Al, Fe 等)电阻小,但耐蚀性差;惰性金属电极(Pt, Ti 等)因化学稳定性高、电化学活性高、耐蚀性好而被用作阳极材料。

与石墨电极相比,金属电极的电阻较低,可以降低系统的能耗。曾抗美等<sup>[20]</sup>分别以 Ti 和石墨为电极,对该电极对饮用水中大肠菌群的灭活效果进行了对比研究,发现消毒时间为 5 min 时, Ti 电极杀菌效果是石墨板电极的 1.4 倍。常用的金属电极及其特点如表 1 所示<sup>[21]</sup>。

Ag 和 Cu 电极在消毒过程中生成的  $Ag^+$  和  $Cu^{2+}$  具有持续杀菌作用,但需注意  $Ag^+$  和  $Cu^{2+}$  的积累量及其用水安全; Fe 和 Al 电极释放出的  $Fe^{3+}$  和  $Al^{3+}$  具有一定的絮凝

表 1 金属电极材料及其特点<sup>[21]</sup>

Table 1 Metal electrode materials and their characteristics<sup>[21]</sup>

Electrode material	Characteristic
Fe, Al	$AlCl_3$ and $FeCl_3$ are generated, which can promote flocculation while disinfection
Zn, Sn	Colloidal substances generated at the same time of disinfection can play a flocculation role
Ag, Cu	$Ag^+$ and $Cu^{2+}$ produced in electrolysis process have continuous sterilization

作用,可与电解产生的氧化剂形成絮凝-消毒的协同作用;而 Pt 电极析氧电位较高,能在表面形成一层稳定的氧化物薄膜,使其耐蚀性增强,但 Pt 电极成本较高,限制了它在电化学消毒中的应用。

#### 3.3 金属氧化物及其涂层电极

与金属电极相比,金属氧化物电极具有价格低、寿命长和催化活性高等优点。常用的金属氧化物电极材料有  $PbO_2$ 、 $SnO_2$  和  $MnO_2$  等。研究发现,不同的金属氧化物电极表面的消毒机理和反应产物有所区别,如  $SnO_2$  阳极的电位大于  $IrO_2$  阳极,在相同的电解条件下,  $SnO_2$  阳极表面会生成大量的  $\cdot OH$ ,而在  $IrO_2$  阳极表面几乎不产生<sup>[22]</sup>。

由于金属氧化物电极的机械损耗较大,因此逐渐被由基体和金属氧化物涂层构成的形稳电极(dimension stable anode, DSA)所替代。DSA 的基体材料一般以 Ti, Pt, Fe 等导体材料为主,表面覆盖  $SnO_2$ 、 $MnO_2$  和  $PbO_2$  等金属氧化物。Jeong 等<sup>[23]</sup>研究发现氧化物质的生成速率和电极材料有关,活性氯的产生顺序是  $Ti/IrO_2 > Ti/RuO_2 > Ti/Pt-IrO_2 > BDD > Pt$ , 其原因是 DSA 的析氯电位低,有利于活性氯的析出。研究表明,在同等电极材料、电流条件下,电极的析氯效率与电解质溶液中的  $Cl^-$  浓度有关<sup>[24]</sup>。

DSA 也具有结构稳定、价格便宜、耐腐蚀性强和寿命长等优点。相关研究及其结果如表 2 所示<sup>[25-30]</sup>。但在实际应用中发现,高温条件下电极涂层易溶解脱落,导致电极使用寿命缩减<sup>[31]</sup>。因此,应加强对涂层种类、涂覆量和涂覆方法等的优化研究,以提高电极的使用寿命和消毒效率。

表 2 形稳阳极材料相关研究

Table 2 Study on dimension stable anode materials

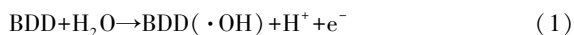
Anode material	Reaction condition	Test result	Ref.
Ti/RuO <sub>2</sub> , Ti/Pt, Ti/IrO <sub>2</sub>	Current density: 20 mA · cm <sup>-2</sup> , electrolytic time: 10 min	The inhibitory effect of three materials on algae growth is Ti/RuO <sub>2</sub> > Ti/Pt > Ti/IrO <sub>2</sub>	[25]
Ti/Sb-SnO <sub>2</sub> /PbO <sub>2</sub>	Current density: 30 mA · cm <sup>-2</sup> , electrolytic time: 75 min	<i>Escherichia coli</i> decreased by lg7, and the energy consumption during disinfection was 4.978 kWh · m <sup>-3</sup>	[26]

续表

Anode material	Reaction condition	Test result	Ref.
Ti/IrO <sub>2</sub> , Ti/IrO <sub>2</sub> -Pt	Current density: 10 mA·cm <sup>-2</sup> , electrolytic time: 10 min	The chlorine production of Ti/IrO <sub>2</sub> anode is 9.38 mg·L <sup>-1</sup> , and that of Ti/IrO <sub>2</sub> -Pt anode is only 3.30 mg·L <sup>-1</sup>	[27]
Ru-Ir coated Ti, Pt-coated Ti, Ir-Ta coated Ti	Voltage: 15 V, electric current: 110 mA, electrode spacing: 30 mm, electrolytic time: 20 s	The inactivation rate of three electrode materials to <i>Escherichia coli</i> is Ru-Ir coated Ti electrode, Pt-coated Ti electrode and Ir-Ta coated Ti electrode in turn	[28]
Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / β-PbO <sub>2</sub>	Current density: 100 A·cm <sup>-2</sup> , electrode spacing: 5 mm, electrolytic time: 12 min	The number of fecal coliform bacteria in the treated effluent is less than 500 CFU·L <sup>-1</sup>	[29]
Dimension stable anode	Current density: 75 mA·cm <sup>-2</sup> , flow rate: 200 L·h <sup>-1</sup> , electrolytic time: 60 min	The inactivation rate of <i>Escherichia coli</i> reached 98%	[30]

### 3.4 掺硼金刚石薄膜电极

金刚石薄膜电极由于具有耐蚀性强和硬度高等特点而备受关注。向金刚石薄膜电极中掺杂 O, N, Li, P, F 和 B 等元素可改善电极材料的电子结构, 增加活性点位, 有利于活性氧基团的生成<sup>[32, 33]</sup>。其中研究较多的是 BDD。BDD 具有以下特点: ① 化学稳定性高, 即使在强酸强碱条件下也不易被腐蚀; ② 析氧电位高, 易产生·OH、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 等强氧化物质; ③ 吸附性低, 电极表面不会吸收有机物, 避免被污染, 可长期使用。BDD 在电解过程中生成·OH, 能够无选择性灭活微生物, 电极反应如式(1)所示:



于鲁冀等<sup>[34]</sup>利用 BDD 对医疗废水进行消毒实验研究, 发现当电流密度为 8 mA·cm<sup>-2</sup>、消毒时间超过 9 s 时, 处理后废水中粪大肠菌群数小于 500 MPN·L<sup>-1</sup>。Cano 等<sup>[35]</sup>采用 BDD 阳极对城市污水厂出水进行消毒, 可在不外加任何药剂的前提下确保大肠杆菌完全去除。Cotillas 等<sup>[36]</sup>采用金刚石阳极可以在 5~100 A·cm<sup>-2</sup> 电流密度下对尿液进行完全消毒。Frontistis 等<sup>[37]</sup>采用 BDD 对二沉池出水进行电化学消毒, 当电流密度为 2.1 mA·cm<sup>-2</sup> 时, 1.5 min 后完全灭活大肠杆菌, 这表明 BDD 在电化学消毒领域中具有良好的应用前景。另外有研究表明 BDD 对铜绿假单胞菌的去除效果优于混合金属氧化物电极和 Pt 电极<sup>[38]</sup>。

同时在研究中发现使用 BDD 进行电化学消毒时会生成消毒副产物。Haaken 等<sup>[39]</sup>用 BDD 处理二沉池出水, 结果发现有机副产物三氯甲烷含量为 1.2 μg·L<sup>-1</sup>, 几乎可忽略, 但无机副产物氯酸盐(1.2 mg·L<sup>-1</sup>)和高氯酸盐(18 mg·L<sup>-1</sup>)的生成需要关注。与 BDD 相比, 用 DSA 阳极处理废水后产生的氯酸盐浓度更小, 且未检出高氯酸盐<sup>[40]</sup>。

## 4 穿流式电化学消毒电极材料

穿流式电化学消毒装置示意图如图 2 所示。穿流式

电化学消毒材料可分为碳基材料和金属及其氧化物纳米复合材料 2 大类。

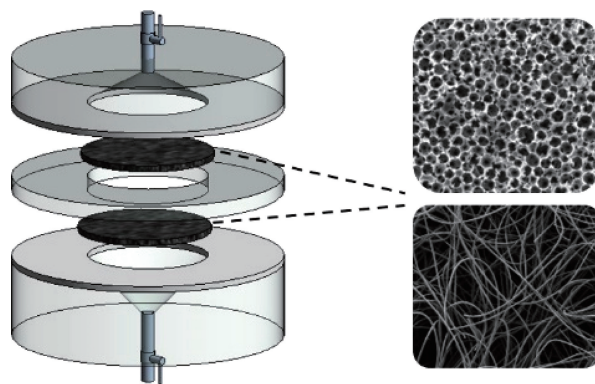


图 2 穿流式电化学消毒装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross-flow electrochemical disinfection device

### 4.1 碳基材料

碳纤维毡具有较高的孔隙率、导电性和化学稳定性, 活化后的碳纤维毡表面布满纳米级的微孔, 该微孔结构有利于强电场的形成, 因此活性炭纤维毡是理想的穿流式电化学消毒材料。辛蕾等<sup>[41]</sup>分别采用聚丙烯腈基活性炭纤维毡、黏胶基活性炭纤维毡、聚氨酯泡棉基活性炭纤维毡和聚丙烯腈基普通碳纤维毡 4 种复合电极进行电化学消毒试验研究, 结果表明, 聚丙烯腈基活性炭纤维毡复合电极对大肠杆菌的去除效果最佳, 在 2 V 的电压下去除率超过了 99.9%。与流经式电极材料相比, 该研究中电压降低了 1~2 个数量级, 表明聚丙烯腈基活性炭纤维毡可以作为穿流式电化学消毒的理想电极材料。

石墨烯材料有独特的光学和电学性质、极大的比表面积和较高的力学强度, 而且具有广谱抗菌性, 受到了研究者的关注。Norra 等<sup>[42]</sup>采用石墨烯电极在低电导率水中灭活大肠杆菌, 发现在 115 A·m<sup>-2</sup> 的电流密度下大肠杆菌完全失活, 并且不形成任何消毒副产物。然而石墨烯材料自身生物毒性尚待进一步研究。

碳纳米管表面的较高活性位点能够吸附并杀灭细菌,

因此具有较强的抗菌能力。Vecitis 等<sup>[43]</sup>对过滤截留在碳纳米管微滤膜上的大肠杆菌施加 2 V 电压,持续 30 s 后,大肠杆菌的灭活率超过 75%。Xie 等<sup>[44]</sup>以抗菌性和导电性优良的单壁碳纳米管、耐腐蚀性强的聚丙烯腈、强度高的聚氨酯及导电聚合物聚苯胺为原料,采用静电纺丝技术制备复合电极,在外加电压为 3 V 时,该复合电极可灭活  $10^5$  CFU · mL<sup>-1</sup> 的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌。还有文献显示,碳纳米管对大肠杆菌、微球菌、变形链球菌和沙门氏菌均具有良好的灭活作用<sup>[45, 46]</sup>。Kang 等<sup>[47]</sup>对比了单壁碳纳米管和多壁碳纳米管对大肠杆菌的灭菌效果,结果表明,单壁碳纳米管的电化学消毒效果优于多壁碳纳米管,说明碳纳米管的尺寸是控制其抗菌效果的关键因素。但碳纳米管耐腐蚀性不强,导致其性能不稳定<sup>[48]</sup>,将它应用于饮用水电化学消毒时,其自身的生物毒性也会带来风险<sup>[49]</sup>。

#### 4.2 金属及其氧化物纳米复合材料

纳米材料具有较大的比表面积,能够有效提高电解质溶液与电极材料的接触效率,而且纳米材料具有较强的力学性能以及较高的导电性和电化学活性。因此,近年来纳米复合材料受到了研究者的广泛关注。

将金属纳米材料负载于多孔材料上形成纳米复合材料电极,既能充分发挥多孔材料的吸附和灭菌性能,又能利用金属或金属氧化物纳米材料的尖端放电效应,在低电压下就可以产生强电场,使细菌因发生不可逆的电穿孔现象而被灭活<sup>[50, 51]</sup>。Pi 等<sup>[2]</sup>制备 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米线改性石墨毡电极并在 2.5 V 和 65 mL · min<sup>-1</sup> 的条件下进行电化学消毒,大肠杆菌的灭活率超过 lg6.7。Huo 等<sup>[52]</sup>采用铜磷化物纳米线改性泡沫铜电极进行电化学消毒,在 1 V 和 2 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup> 的条件下实现了完全消毒。Mahmoud 等<sup>[53]</sup>将 Ag-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米复合材料负载于碳毡材料制备成三维穿流式阳极进行电化学消毒,在 15.6 μA · cm<sup>-2</sup> 下实现细菌完全灭活。Segues 等<sup>[54]</sup>制备氧化锰改性的石墨烯海绵电极并进行无氯电化学消毒,可以灭活实际废水中的耐药性大肠杆菌,同时不会形成副产物。

在金属或金属氧化物纳米材料中,银纳米线由于其优异的光电性能、机械灵活性和抗菌性能受到了研究者的青睐。相关研究及其结果如表 3 所示<sup>[4, 51, 55-57]</sup>。

虽然纳米复合电极作为穿流式电极时消毒效率高,但是该电极存在价格昂贵和制备复杂的问题。

表 3 银纳米线复合材料在电化学消毒技术中的相关研究

Table 3 Study on the application of silver nanowire composites in electrochemical disinfection technology

Electrode material	Reaction condition	Release of Ag <sup>+</sup> / (μg · L <sup>-1</sup> )	Test result	Ref.
Polyurethane sponge, carbon nanotubes, silver nanowires	Filtration rate: 1.5 L · h <sup>-1</sup> , voltage: 5~20 V	70~94	The removal efficiency of <i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella typhi</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> and <i>Bacillus subtilis</i> is over 99.99%, and the removal efficiency of virus phage MS2 is over 99%	[4]
Silver nanowire, cotton fibre, polyaniline	Filtration rate: 800 mL · min <sup>-1</sup> , voltage: 20 V	<40	The electrode material can achieve an inactivation rate of more than 99% for <i>Escherichia coli</i>	[51]
Silver nanowire, activated carbon fiber cloth	Filtration rate: 2~10 mL · min <sup>-1</sup> , voltage: 10 V	<15	The maximum inactivation rate of <i>Escherichia coli</i> and MS2 phage was over 99.9%	[55]
Silver nanowire, polyacrylonitrile, polyaniline, activated carbon fiber cloth	Filtration rate: 1~4 mL · min <sup>-1</sup> , voltage: 6 V	<10	<i>Staphylococcus aureus</i> and <i>Escherichia coli</i> can be completely inactivated	[56]
Silver nanowire, polyacrylonitrile, thermoplastic polyurethane	Time: 10 d, voltage: 1.5 V	30	The membrane flux of 10 <sup>5</sup> CFU · mL <sup>-1</sup> <i>Escherichia coli</i> water sample was reduced by 35.3%, and 98% of the membrane flux could be recovered after 5 min backwashing, and the bacteria inactivation efficiency was maintained above 99%	[57]

## 5 电化学消毒电极材料特性对比分析

### 5.1 不同电极材料的消毒机理

不同电极材料的消毒机理有所不同,即使同种电极材料在不同构型下的消毒机理也有所不同。对比结果如表 4 所示,通过对比分析可得出如下结论。

(1) 穿流式电极与电解液的接触效率高于流经式电极与电解液,且电场作用更强;

(2) 纳米复合电极可以在较低的电压条件下实现电穿孔消毒,这是其他电极难以比拟的;

(3) 在相同条件下,电极的导电性越强,产生的电场越强,电场直接作用在消毒过程中贡献的比例也随之

升高，比如与石墨电极相比，金属和金属氧化物电极的电场作用更强；

除了具有电场作用、活性氧基团作用和电解氯化作用外，析出的  $Ag^+$  和  $Cu^{2+}$  也具有消毒作用。

(4) 在金属电极中，采用 Ag 和 Cu 作为电极材料时，

表 4 不同电极材料的作用机理  
Table 4 Mechanism and characteristics of different electrode materials

	Electrode material	Electric field compression	Electroporation	Electrolytic chlorination	Reactive oxygen species	Heavy metal
Flow-by	Graphite electrode	+	-	+	+	-
	Dimension stable anode	++	-	++	+	-
	Boron-doped diamond	++	-	+	++	-
	Ag, Cu	++	-	-	-	+
	Other metal electrodes	++	-	+	+	-
Flow-through	Non-metallic conventional electrode	+++	-	+	+	-
	Non-metallic nanocomposite electrode	+++	++	+	+	-
	Metal and its oxide nanowire composite electrode	+++	+++	++	++	-
	Ag nanowire composite electrode	+++	+++	++	++	+

Notes: “+” in table indicates the strength of the disinfection mechanism, “++” indicates strong, “+++” indicates very strong, and “-” indicates no; electrolytic chlorination is aimed at the presence of  $Cl^-$  in electrolyte; electroporation is aimed at the situation of normal operating voltage

### 5.2 不同电极材料的消毒性能

不同电极材料的消毒效率、经济性和安全性方面的研究结果及其对比如表 5 所示。从对比结果可以得出如下结论：① 不同电极材料的灭菌效率均较好；② 在能耗方面， $DSA > BDD >$  穿流式电极；③ 在消毒安全性方面，穿流式电极在电化学消毒时主要依靠电场作用灭活微生物，消毒过程中副产物较少。而 DSA 和 BDD 在目前的研究中存在氯酸盐、高氯酸盐等消毒副产物，将其应用在

饮用水消毒中具有一定的安全隐患。

## 6 结 语

电化学消毒技术被称为“下一代”消毒技术，为农村及技术水平较低的欠发达地区的分散式水消毒问题解决提供了新的思路。电极构型从流经式发展到穿流式，电极材料也经历了从单一材料到复合材料、从常规材料到纳米材料的发展历程。为实现电化学消毒技术产业化、

表 5 不同电极材料的性能对比  
Table 5 Performance comparison of different electrode materials

	Electrode material	Object	Efficiency	Energy consumption/ ( $kWh \cdot m^{-3}$ )	Disinfection by-products	Ref.
Flow-by	Graphite electrode	<i>Escherichia coli</i>	99.7%	3.85	—	[20]
	Dimension stable anode	<i>Escherichia coli</i>	98%	5.6	Chlorate	[31]
	Boron-doped diamond	<i>Escherichia coli</i>	lg4	2~2.6	Organic by-products, chlorate, perchlorate	[39]
	Boron-doped diamond	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	100%	0.3~0.6	Chlorate, perchlorate	[58]
Flow-through	Copper oxide nanowires	<i>Escherichia coli</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	>lg7	0.007	—	[3]
	Polyurethane sponge, carbon nanotubes, silver nanowires	<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella</i>	99.99%	0.028	—	[4]
	Ag- $Fe_3O_4$ -modified membrane	<i>Escherichia coli</i>	>lg5	0.041	—	[53]

规模化应用, 还须在电极材料方面进行以下几方面深入研究。

(1) 关于电化学消毒及其材料的研究还停留在实验室研究阶段, 后续需进一步探索电化学消毒实际应用过程中面临的问题, 如长期运行条件下电极的特性及其消毒性能的变化;

(2) 明晰不同电极材料的协同消毒机制和消毒副产物的生成规律, 并研究其调控策略和优化方法;

(3) 虽然穿流式纳米复合电极可以极大地提高传质和消毒效率, 但是这种电极材料制备复杂且价格昂贵, 限制了其规模化应用, 因此有必要探索制备简单、经济高效的电极材料。

### 参考文献 References

- [1] CISSÉ G. Acta Tropica[J], 2019, 194: 181-188.
- [2] PI S Y, SUN M Y, ZHAO Y F, *et al.* Chemical Engineering Journal [J], 2022, 435: 134967.
- [3] HUO Z Y, XIE X, YU T, *et al.* Environmental Science & Technology [J], 2016, 50(14): 7641-7649.
- [4] LIU C, XIE X, ZHAO W, *et al.* Nano Letters [J], 2013, 13(9): 4288-4293.
- [5] HUO Z Y, LUO Y, XIE X, *et al.* Environmental Science: Nano [J], 2017, 4(10): 2010-2017.
- [6] 张梓萌. 亚氧化钛膜电极电化学灭菌性能与机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
ZHANG Z M. Electrochemical Sterilization Performance and Mechanism of Titanium Oxide Film Electrode[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [7] 谭晓君. 负载银纳米线电纺膜电化学消毒效能及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
TAN X J. Study on Electrochemical Disinfection Efficiency and Mechanism of Electrospun Membrane Loaded with Silver Nanowires [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [8] LI Z, YANG D, LI S, *et al.* Science of the Total Environment [J], 2024, 912: 169043.
- [9] LACASA E, TSOLAKI E, SBOKOU Z, *et al.* Chemical Engineering Journal [J], 2013, 223: 516-523.
- [10] YANG Z, NI H, LIU P, *et al.* Chinese Chemical Letters [J], 2021, 32(10): 3143-3148.
- [11] HUO Z Y, DU Y, CHEN Z, *et al.* Water Research [J], 2020, 173: 115581.
- [12] 谭丽, 李本高. 工业水处理 [J], 2006(2): 1-5.  
TAN L, LI B G. Industrial Water Treatment [J], 2006(2): 1-5.
- [13] JEONG J, KIM J Y, YOON J. Environmental Science & Technology [J], 2006, 40(19): 6117-6122.
- [14] LI H, YU Q, YANG B, *et al.* Journal of Electroanalytical Chemistry [J], 2015, 738: 14-19.
- [15] REIMANIS M, MEZULE L, MALERS J, *et al.* Environmental Bio-technology [J], 2011, 7(1): 34-40.
- [16] 孙威. 橘子皮生物质炭的制备及其在电化学水处理中的应用研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.  
SUN W. Preparation of Orange Peel Biochar and Its Application in Electrochemical Water Treatment [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022.
- [17] 曹玉林. 磷掺杂生物炭浮岛式阴极电化学体系构建及消毒性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
CAO Y L. Construction of Floating Island Cathode Electrochemical System of Phosphorus-Doped Biochar and Study on Its Disinfection Performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [18] JIN Y, SHI Y, CHEN R, *et al.* Chemosphere [J], 2019, 215: 380-387.
- [19] 贾成瑶, 张飙, 陈蓉丽. 中国公共卫生 [J], 2001(4): 10-11.  
JIA C Y, ZHANG B, CHEN R L. China Public Health [J], 2001(4): 10-11.
- [20] 曾抗美, 史建福, 刘桂华. 中国给水排水 [J], 1999, 15(8): 17-19.  
ZENG K M, SHI J F, LIU G H. China Water & Wastewater [J], 1999, 15(8): 17-19.
- [21] 周芬, 尚媛媛. 中国科技信息 [J], 2021(13): 17-18.  
ZHOU F, SHANG Y Y. China Science and Technology Information [J], 2021(13): 17-18.
- [22] 王诗斐, 陈武森, 王梓行, 等. 电化学方法处理废水的研究进展 [C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会论文集. 北京: 《中国学术期刊》电子杂志社有限公司, 2022: 99-102.  
WANG S F, CHEN W S, WANG Z H, *et al.* Research Progress on Electrochemical Methods for Wastewater Treatment [C]//Proceedings of the 2022 Annual Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences. Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House Co., Ltd., 2022: 99-102.
- [23] JEONG J, KIM C, YOON J. Water Research [J], 2009, 43(4): 895-901.
- [24] 张招贤. 钛电极工业 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.  
ZHANG Z X. Titanium Electrode Industry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [25] 林莉, 李青云, 黄苗, 等. 华中科技大学学报(自然科学版) [J], 2012, 40(10): 87-90.  
LIN L, LI Q Y, HUANG Z, *et al.* Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition) [J], 2012, 40(10): 87-90.
- [26] RATHINAVELU S, DIVYAPRIYA G, JOSEPH A, *et al.* Environmental Research [J], 2022, 210: 112749.
- [27] 宋琳. 中水的电化学安全消毒技术研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.  
SONG L. Study on Electrochemical Safe Disinfection Technology of Reclaimed Water [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [28] 赵树理, 庞宇辰, 席劲璞, 等. 环境科学学报 [J], 2016, 36(2):

- 544-549.
- ZHAO S L, PANG Y C, XI J Y, *et al.* *Journal of Environmental Science*[J], 2016, 36(2): 544-549.
- [29] 周键, 王三反, 薛志强, 等. *环境工程学报*[J], 2014, 8(10): 4110-4114.
- ZHOU J, WANG S F, XUE Z Q, *et al.* *Journal of Environmental Engineering*[J], 2014, 8(10): 4110-4114.
- [30] GUSMÃO I C C P, MORAES P B, BIDOIA E D. *Brazilian Archives of Biology and Technology*[J], 2010, 53: 1235-1244.
- [31] 雒鹏飞, 刘洋, 王景博, 等. *化学与生物工程*[J], 2018, 35(9): 1-8.
- LUO P F, LIU Y, WANG J B, *et al.* *Chemical and Biological Engineering*[J], 2018, 35(9): 1-8.
- [32] 王文泉, 邢献军, 李珊, 等. *真空科学与技术学报*[J], 2020, 40(3): 273-279.
- WANG W Q, XING X J, LI S, *et al.* *Journal of Vacuum Science and Technology*[J], 2020, 40(3): 273-279.
- [33] 赵坤. 杂原子掺杂及金属负载多孔碳材料的制备及其电催化还原性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- ZHAO K. Preparation of Heteroatom Doped and Metal Supported Porous Carbon Materials and Their Electrocatalytic Reduction Performance [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [34] 于鲁冀, 孔德芳, 王震, 等. *环境科技*[J], 2013, 26(2): 35-37.
- YU L J, KONG D F, WANG Z, *et al.* *Environmental Science and Technology*[J], 2013, 26(2): 35-37.
- [35] CANO A, CAÑIZARES P, BARRERA-DÍAZ C, *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2012, 211/212: 463-469.
- [36] COTILLAS S, LACASA E, SÁEZ C, *et al.* *Applied Catalysis B: Environmental*[J], 2018, 229: 63-70.
- [37] FRONTISTIS Z, BREBOU C, VENIERI D, *et al.* *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*[J], 2011, 86(10): 1233-1236.
- [38] ZHOU S, BU L, SHI Z, *et al.* *Journal of Hazardous Materials*[J], 2018, 346: 73-81.
- [39] HAAKEN D, DITTMAR T, SCHMALZ V, *et al.* *Desalination and Water Treatment*[J], 2012, 46(1-3): 160-167.
- [40] BERGMANN M E H, ROLLIN J. *Catalysis Today*[J], 2007, 124(3): 198-203.
- [41] 辛蕾, 霍正洋, 倪欣业, 等. *环境科学学报*[J], 2018, 38(3): 940-946.
- XIN L, HUO Z Y, NI X Y, *et al.* *Journal of Environmental Science* [J], 2018, 38(3): 940-946.
- [42] NORRA G F, BAPTISTA-PIRES L, CUERVO L E, *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2022, 430: 132772.
- [43] VECITIS C D, SCHNOOR M H, RAHAMAN M S, *et al.* *Environmental Science & Technology*[J], 2011, 45(8): 3672-3679.
- [44] XIE C L, SHU Y, HU Y Y, *et al.* *Chemosphere* [J], 2020, 251: 126286.
- [45] BAI Y, PARK I S, LEE S J, *et al.* *Carbon*[J], 2011, 49(11): 3663-3671.
- [46] SCHIFFMAN J D, ELIMELECH M. *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2011, 3(2): 462-468.
- [47] KANG S, HERZBERG M, RODRIGUES D F, *et al.* *Langmuir*[J], 2008, 24(13): 6409-6413.
- [48] LIU H, VAJPAYEE A, VECITIS C D. *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2013, 5(20): 10054-10066.
- [49] KANG S, MAUTER M S, ELIMELECH M. *Environmental Science & Technology*[J], 2009, 43(7): 2648-2653.
- [50] HUO Z Y, LIU H, YU C, *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2019, 369: 1005-1013.
- [51] ABU-THABIT N Y, BASHEER R A. *Materials Research Express*[J], 2014, 1(3): 035010.
- [52] HUO Z Y, LIU H, WANG W L, *et al.* *Journal of Materials Chemistry A*[J], 2019, 7(13): 7347-7354.
- [53] MAHMOUD M, EL-LIETHY M A. *Journal of Environmental Chemical Engineering*[J], 2022, 10(1): 106985.
- [54] SEGUES C A, SERGIENKO N, BORREGO C M, *et al.* *Chemical Engineering Journal*[J], 2023, 472: 145082.
- [55] HONG X, WEN J, XIONG X, *et al.* *Chemosphere*[J], 2016, 154: 537-545.
- [56] WEN J, TAN X, HU Y, *et al.* *Environmental Science & Technology* [J], 2017, 51(11): 6395-6403.
- [57] 谭晓君, 胡勇有, 陈超. *环境科学学报*[J], 2018, 38(10): 3964-3972.
- TAN X J, HU Y Y, CHEN C. *Journal of Environmental Science*[J], 2018, 38(10): 3964-3972.
- [58] 向平, 张亚晴, 万一会. *土木建筑与环境工程*[J], 2017, 39(4): 76-82.
- XIANG P, ZHANG Y Q, WAN Y H. *Civil Architecture and Environmental Engineering*[J], 2017, 39(4): 76-82.