

火电厂循环冷却水电化学处理技术研究进展

李凡林, 方俊, 鲍广军, 张美, 关健康, 卢栋

淮河能源集团股份有限公司顾桥电厂, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年11月5日; 录用日期: 2024年11月29日; 发布日期: 2024年12月11日

摘要

本文综述了电化学方法在循环水除垢领域的研究进展, 并详细阐述了其应用原理和处理优势。本文介绍了电化学除垢技术的基本原理, 并深入分析了电极材料、供电方式、电流密度、停留时间等因素对处理效率的影响。本文展示了电化学技术在工业生产中的具体应用案例。最后, 文章总结了电化学除垢技术的现状, 并对其未来的发展趋势和潜在市场前景进行了展望。此综述不仅为相关领域的研究者提供了宝贵的参考信息, 也为工业应用提供了科学指导和实践基础。

关键词

循环水除垢, 电化学方法, 电流密度

Research Progress on Electrochemical Treatment Technology of Circulating Cooling Water in Thermal Power Plant

Fanlin Li, Jun Fang, Guangjun Bao, Mei Zhang, Jiankang Guan, Dong Lu

Guqiao Power Plant of Huaihe Energy (Group) Co., Lit., Huainan Anhui

Received: Nov. 5th, 2024; accepted: Nov. 29th, 2024; published: Dec. 11th, 2024

Abstract

The research progress of the electrochemical method in the field of circulating water descaling is reviewed, and its application principle and treatment advantages are described in detail. This paper introduces the basic principle of electrochemical descaling technology, and analyzes the influence of electrode material, power supply mode, current density, residence time and other factors on the treatment efficiency. This paper shows the specific application cases of electrochemical technology in industrial production. Finally, the article summarizes the current situation of electrochemical

descaling technology, and looks forward to its future development trend and potential market prospects. This review not only provides valuable reference information for researchers in related fields, but also provides scientific guidance and practical basis for industrial applications.

Keywords

Circulating Water Descaling, Electrochemical Method, Current Density

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国能源结构的特点, 以及火电行业对工业冷却水资源的高依赖性, 决定了循环冷却水系统的关键作用和面临的挑战。煤炭作为我国的主要能源之一, 火力发电站需求的冷却水量占到了工业用水总量的80%至90% [1] [2]。有效的循环使用不仅能提升水资源利用率, 也是实现水资源节约的直接途径。然而, 随着循环次数的增加, 水中的盐类浓缩, 金属离子含量升高, 并伴随氧气、灰尘和微生物介入, 导致水垢、腐蚀和生物滋生三大问题的出现和加剧[3]-[5]。这些问题之间相互作用, 促使循环冷却水系统的性能下降, 对火电厂稳定运行构成严重威胁。

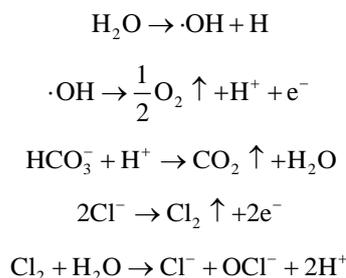
面对这些问题, 电化学处理技术展现出了处理这些问题的有效性。电化学处理技术展现出了处理这些问题的有效性。电化学除垢技术是一种主动式水处理技术, 能够有效降低循环水的硬度和化学需氧量(COD), 并具有较好的杀菌灭藻效果[6] [7]。此外, 电化学处理装置的运行可以减少循环水系统杀菌剂以及阻垢剂、缓蚀剂的用量, 有效降低系统运行的药剂成本。电化学旁流处理技术(ECT)能够连续将水中的结垢因子以固体的形式预先沉积去除, 维持循环水中的溶解态结垢因子在合理范围内[8]。最后, 本文将对电化学处理技术在循环冷却水处理方面的未来发展趋势进行总结和展望, 为解决火电厂循环冷却水问题提供新的思路和方法。

2. 火电厂循环冷却电化学水处理技术

2.1. 电化学处理系统

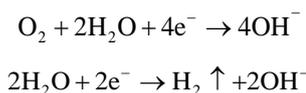
2.1.1. 阳极

在电化学设备反应室内, 其基本化学反应主要集中在内壁(阴极)的化学反应以及阳极上发生的化学反应。阳极接触面的电化学反应过程主要涉及水分子, 进而在其邻近形成一个高酸性环境[1]。如果生成的高活性羟基自由基·OH没有被马上消耗掉, 它们会在酸性条件下自行转化, 产出氧气[9]。受到传质作用和电场力的驱动, HCO_3^- 迁移至阳极表面, 并在此高酸性环境下与其他物质反应, 释放出 CO_2 , 从而导致溶液碱度的下降。当循环水含有氯离子时, 会生成具有强氧化性的 OCl^- , 进一步促使溶液的 pH 值下降。此外, 循环冷却水中的有机物、细菌和藻类倾向与强氧化性物质·OH 或 OCl^- 发生反应, 导致有机物被氧化成二氧化碳和水, 而藻类和细菌则被杀死或失活。电化学水处理技术的应用不仅限于有机物的降解, 还包括对无机污染物的处理。例如, 在铁电絮凝体系中, 不同 Eh 条件下产生羟自由基(·OH)降解有机污染物的机理被揭示[10]。重要的是, 由于羟基自由基·OH的稳定性较差, 它们仅能在阳极表面水相界面区域与有机物或微生物反应。而稳定性相对较强的 OCl^- 则可以离开界面区域, 扩散至水溶液中, 使得经电化学处理后的循环水在离开处理区域后, 仍具备抑制细菌和藻类生长的效果。

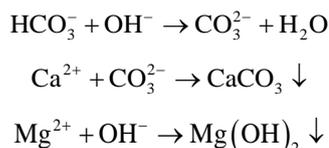


2.1.2. 阴极

在阴极极化过程中，主要通过两个步骤产生 OH^- ，这两个步骤分别是氧还原和析氢过程，进而在电极周围形成碱性环境[11]-[13]。首先，氧还原反应(ORR)通常涉及氧气分子的还原，这一过程需要较高的过电位，且其动力学受到多种因素的影响，如氧气分压、催化剂的种类和结构等[14]-[16]。在实际应用中，如水电解制氢，析氢反应的效率直接影响到整个系统的性能[17]-[19]。例如，通过改进阴极材料和表面处理技术，可以有效降低析氢反应的过电位，从而提高能量利用效率[20] [21]。此外，受传质作用影响，溶液中的 HCO_3^- 会迁移到阴极表面区域，并与 OH^- 进行反应生成 CO_3^{2-} ，该反应进一步促进了碱性环境的形成，影响整个电化学过程的效率和结果。



在碱性环境中，循环水中的钙和镁离子在传质作用和电场的影响下趋向于阴极表面富集。这些离子在阴极区域与产生的 CO_3^{2-} 和 OH^- 进行化学反应，形成沉淀。这些沉积物随后作为水垢层沉积在阴极表面，实现循环冷却水的除垢效果。此过程不仅有助于维护系统的运行效率，还能防止长期积累的垢层对设备造成的潜在损害，从而延长设备的使用寿命并优化其性能[22]。



2.1.3. 电化学系统

电化学技术，作为一种与传统化学药剂法截然不同的水处理新工艺，在特定的操作条件下，能够无需添加化学药剂而运行，从而不产生二次污染，体现了其作为一种环境友好型清洁技术的优势[23] [24]。在民用领域，该技术的应用极为广泛，涵盖了从中央空调系统的冷媒水系统到冷却循环水，再到民用建筑的热水系统以及冷却水循环系统等多个方面[25] [26]。

电化学处理技术在循环冷却水的除垢中起着重要作用，也有利于细菌和藻类的杀灭和抑制，以及有机物的去除，其原理图如图 1 所示。相关反应分别发生在阴极界面区、阳极界面区和溶液中。目前，在电化学循环水处理领域，流行的装置主要分为手动式和自动式两大类[27]。手动式装置的处理方式较为原始简单，它要求操作人员将电解设备直接置于循环水池中，设备通电后开始反应。反应进行一段适当的时间后，需要人工将设备从水池中取出进行除垢，除垢工作完成之后，设备再次被放回到水池中以继续电化学反应。这种方式的显著缺点在于，反应器的除垢过程需要人工操作，这无疑增加了劳动强度，同时也影响了设备的连续运行和整体的工作效率[28]。

自动式电化学处理装置能够提供更稳定的水质，降低人力成本，并且在处理大体积水流时更加经济高效。手动式与自动式电化学循环水处理装置各有特点和适用范围。用户在选择时应根据实际需求、成

本预算和期望的操作便利性进行权衡, 最终选取最适合自己的水处理解决方案[29]-[31]。其广泛的适用性展现了电化学技术在现代水处理领域中的关键作用和潜在价值。

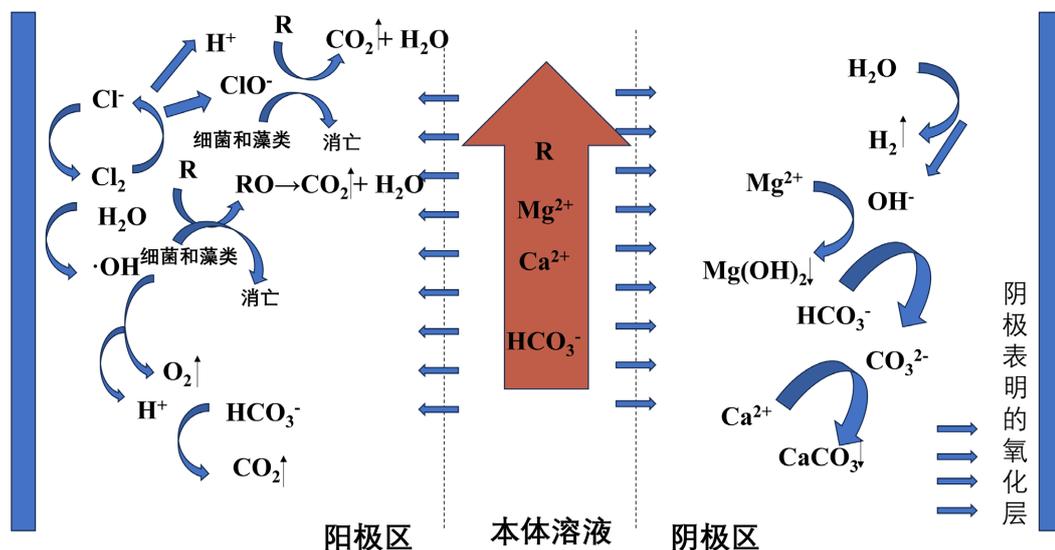


Figure 1. Schematic diagram of electrochemical treatment of circulating cooling water
图 1. 电化学技术处理循环冷却水原理图

2.2. 影响电化学循环冷却水处理的影响因素

2.2.1. 电学参数

电化学处理装置的性能受多种因素影响, 其中电流和电压等电学参数的作用尤为重要。电学参数对 COD 降解的影响见图 2, 电流密度对去除水中硬度离子, 如钙和镁离子有显著的影响。

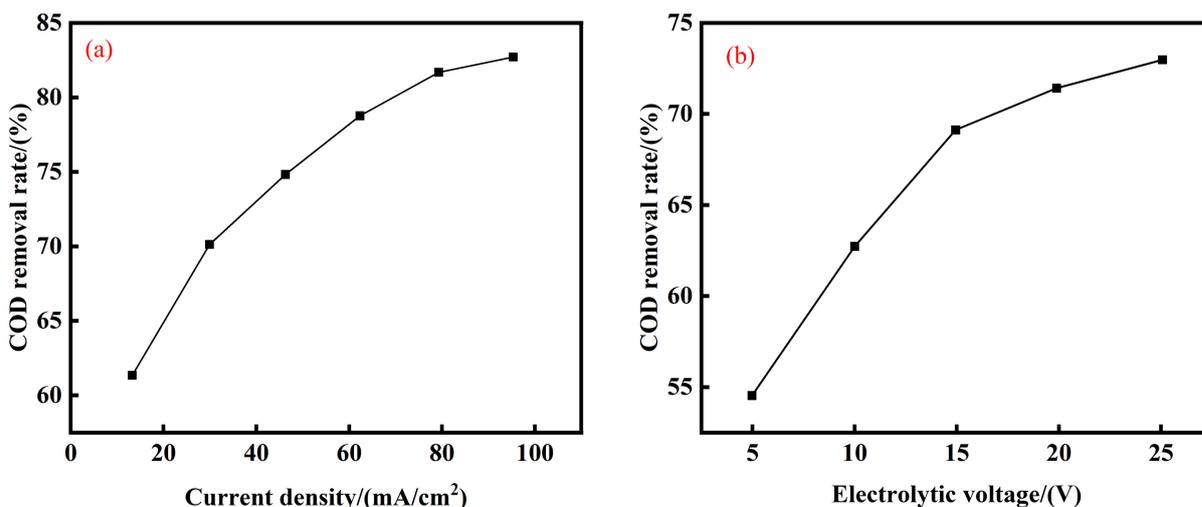


Figure 2. Effect of electrical parameters on COD degradation ((a) Current density, (b) Voltage)
图 2. 电学参数对 COD 降解的影响((a)电流密度, (b)电压)

李火银[32]发现当电流密度在 40~70 A/m² 范围内, 水质硬度去除率与电流密度呈正相关, 在电流密度为 40 A/m² 时, 水质硬度去除率为 4.67%, 而电流密度到 70 A/m² 时硬度去除率显著提高至 27.62%, 近

乎增加了五倍。此现象表明, 电流密度的增加加速了钙离子向阴极的迁移和富集, 从而提高了硬度离子的去除速度。然而, 电流密度超过一定阈值(70 A/m^2)后, 硬度去除率有下降趋势, 说明过高的电流密度可能导致电化学反应的效率降低[33]。

郭丽娜[34]的研究进一步显示, 随着电解电压的提高, 水质的硬度和碱度去除率均上升。具体而言, 在电压增至 30 V 时, 硬度和碱度的去除率分别达到了 40.3% 和 43.1% 。这可能是由于更高的电压加速了离子迁移速度, 使得诸如 MgCO_3 和 CaCO_3 等物质的析出更加明显, 导致溶解性总固体的减少。随着电压的增大, 水的电解反应速度加快, 从而提升了离子浓度和电导率。李森[35]发现与以上研究结果一致, 即更高的电压能够加快离子迁移速度, 增强反应的强度和速度。这强化了沉淀物的形成, 从而促进了水质软化过程。然而, 应注意的是电解电压的提升也会增加能耗和可能导致电化学设备过早老化。因此, 在设计和操作电化学处理装置时, 必须找到最佳的电学参数, 以确保处理效率和经济性的平衡。

2.2.2. 水力停留时间

水力停留时间是评估电化学反应器性能的关键因素之一, 它直接影响循环水中成垢离子的去除效率。在固定体积的电化学装置中, 流速与水力停留时间成反比关系: 流速增加, 水力停留时间减少; 流速减慢, 水力停留时间增长。水力停留时间越长, 循环水在反应器中的接触时间越长, 从而有助于成垢离子(如钙、镁离子)向阴极迁移并富集, 提高了除垢和防垢的效果。李火银[32]对某焦化企业实际循环水的处理实验可见, 随着水力停留时间的增加, 水中硬度和碱度的去除率均有显著提升。这一结果表明, 足够的水力停留时间对于电化学除垢效率至关重要。然而, 随着水力停留时间的进一步增加, 去除率的增长速率逐渐变缓, 这可能是由于反应动力学的限制, 或者是在一定时间后, 大部分易去除的离子已被去除, 剩余的离子更难以去除。

尽管较高的流速可能会降低单位质量水垢的能量消耗, 并提高电流效率, 但它可能不利于离子的充分迁移和富集, 从而影响除垢效果[36][37]。相反, 较低的流速(即较长的水力停留时间)虽然有利于除垢效果的提升, 但它意味着在实际应用中可能需要更大体积的电化学处理装置, 从而增加了设备成本和占用空间[38]。然而, 从理论上讲, 较长的水力停留时间有助于成垢离子在反应器内的充分反应和迁移, 从而提高除垢效率[39]-[41]。

综上所述, 水力停留时间的优化需要在实现高效除垢和控制设备成本之间找到一个平衡点。在设计和运行电化学装置时, 应综合考虑流速、装置体积、成本和除垢效果等多个因素, 以确保系统的经济性和功能性达到最佳状态。

2.3. 国内外研究现状

火电厂循环冷却水电化学处理技术在国内外的研究现状表明, 该技术已成为一种重要的水处理方法, 具有显著的除垢、杀菌和节能效果。电化学处理技术通过利用电场作用于水体, 能够有效地去除水中的钙镁离子和其他污染物, 从而减少结垢和腐蚀问题[42]。

在国内, 电化学处理技术已被广泛应用于火电厂的循环冷却水系统中。研究表明, 电化学装置能有效降低循环水的硬度和化学需氧量(COD), 并具有较好的杀菌灭藻效果[6][43]。此外, 电化学处理技术还被证明可以提高循环水的浓缩倍率, 从而节约水资源和降低运行成本。例如, 某电厂采用电化学除垢设备后, 每年可节省约 212.9 万元[44]。

在国际上, 电化学处理技术同样受到重视。研究者们探索了不同的电化学参数和系统配置, 以优化处理效果。例如, 通过调整电流、电压和板间距等参数, 可以显著提高电化学软化过程的效率[45]。此外, 电解-电吸附耦合技术被提出用于提高电化学软化的效果, 该技术在去除硬度和碱度方面表现出更高的

效率。然而，尽管电化学处理技术具有许多优点，但在实际应用中仍面临一些挑战，如电极的维护和再生问题，以及系统的整体能耗问题[46]。

2.4. 工程实际应用

循环冷却水电化学处理技术在我国工程实践得到了一定程度的应用，取得了可观的处理效果和经济效益。实验装置示意图如图3所示。樊旭[38]以10,000 m³/h的总循环水量为例，比较了电化学和化学药剂2种处理方法的优劣性。结果表明，电化学法较化学药剂法水处理排污量大大幅度减少，能有效地节约循环水补水量。并且电化学处理技术的药剂费、补水费、排水费、电费、设备维修费用(共计400.72万元/年)低于化学药剂法(共计763.14万元/年)。电化学处理技术在工业循环冷却水系统中的应用具有显著的优势，能够有效满足工业水质需求并降低运行成本，因此在工业生产中具有广阔的前景。随着技术的不断发展和完善，相信电化学处理技术将在工业生产中发挥越来越重要的作用，为工业企业提供高效、可靠和经济的水质处理解决方案。

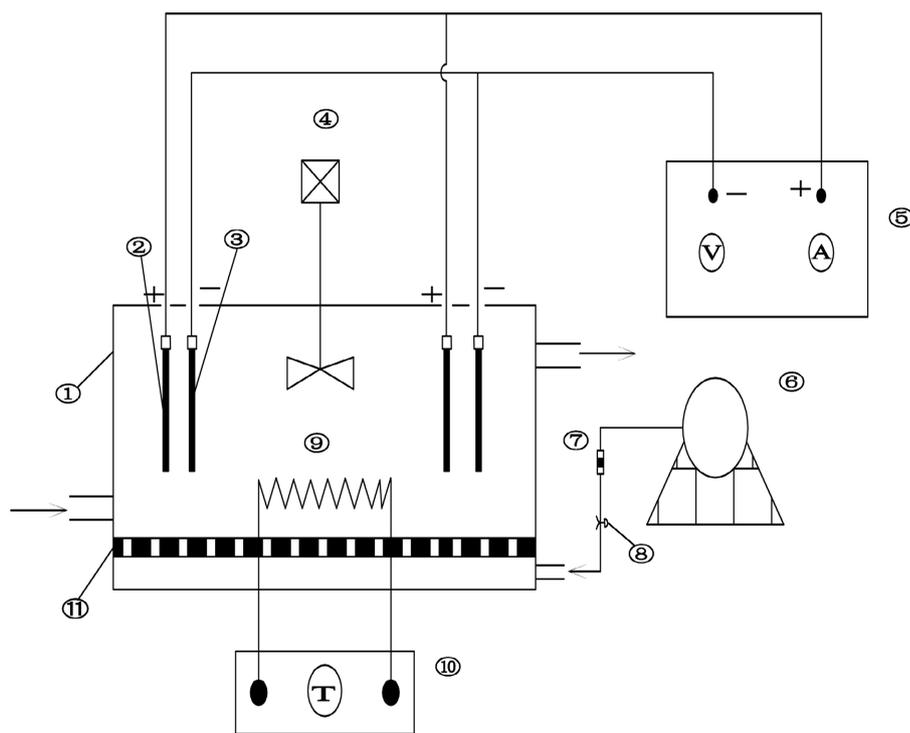


Figure 3. Schematic diagram of the experimental setup (1. Electrolyzer, 2. Anode, 3. Cathode, 4. Beater, 5. DC power supply, 6. Air compressor, 7. Flowmeter, 8. Manual valves, 9. Resistance coils, 10. Temperature controller, 11. Diffuser)

图3. 实验装置示意图 (1. 电解槽, 2. 阳极, 3. 阴极, 4. 搅拌器, 5. 直流电源, 6. 空气压缩机, 7. 流量计, 8. 手动阀, 9. 电阻线圈, 10. 温度控制器, 11. 扩散器)

3. 结论

循环冷却水系统是确保工业生产安全的关键，但结垢问题可严重影响其稳定运行，引起设备故障和增加成本。电化学除垢方法因环保和操作便捷而备受关注，它可以有效地去除垢层且不需化学药剂，节能减排。随着对电化学技术基础理论的深入探索和实践应用的持续扩展，这项技术正朝着更高的效率和更佳的经济性迈进。它展现出了巨大的潜力和广阔的发展前途，预计未来有望在大型工业循环水系统中获得更广泛的应用。

电化学处理技术在循环冷却水系统中的应用对提升工业生产的安全性和效率至关重要。然而，这项技术在工业规模应用中仍面临挑战。主要挑战包括：

- 1) 设计更高效的电化学反应器，以增大阴极工作面积，提高除垢速率；
- 2) 优化电化学除垢装置的运行参数，降低能耗；
- 3) 开发性价比高的电极材料，以经济高效的方式满足不同水质要求；
- 4) 研究低成本的一次性阴极和提高电极寿命的方法，以及降低阳极成本；

针对循环冷却水的电化学处理装置，未来发展方向应当侧重于以下几点：

- 1) 推进电极技术的创新，以适应各种类型的工业循环冷却水系统；
- 2) 发展标准化和模块化的处理单元，使装置能够根据工厂需求定制，适应不同规模的系统；
- 3) 实现电极极性转换技术的优化，自动去除电极表面垢层，同时保证除垢效率和电极寿命符合相应的工业标准。

为了使电化学处理装置在实际工程中得到更广泛的应用，技术性能的持续提升和成本控制将是研究的双重焦点。通过这些努力，电化学技术将更好地服务于工业循环冷却水系统，提升其可靠性和经济性。其中，技术性能的提升和应用成本的降低将是电化学处理技术广泛应用于工业的关键。

参考文献

- [1] 何池飞, 肖宁, 李静, 等. 循环冷却水电化学处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(12): 26-33.
- [2] Liu, Y., Hu, C. and Lo, S. (2019) Direct and Indirect Electrochemical Oxidation of Amine-Containing Pharmaceuticals Using Graphite Electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, **366**, 592-605. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.037>
- [3] 苏艳, 杨阳, 古克亚, 等. 循环冷却水系统的电化学除垢技术研究进展[J]. 工业水处理, 2023, 43(8): 30-37.
- [4] Martínez-Huitle, C.A. and Panizza, M. (2018) Electrochemical Oxidation of Organic Pollutants for Wastewater Treatment. *Current Opinion in Electrochemistry*, **11**, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.07.010>
- [5] Garcia-Segura, S., Ocon, J.D. and Chong, M.N. (2018) Electrochemical Oxidation Remediation of Real Wastewater Effluents—A Review. *Process Safety and Environmental Protection*, **113**, 48-67. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.09.014>
- [6] 张爱军, 晋银佳, 喻江, 等. 电化学技术处理火电厂循环水的试验研究[J]. 华电技术, 2019, 41(8): 53-56.
- [7] Le, T.X.H., Haflich, H., Shah, A.D. and Chaplin, B.P. (2019) Energy-Efficient Electrochemical Oxidation of Perfluoroalkyl Substances Using a Ti₄O₇ Reactive Electrochemical Membrane Anode. *Environmental Science & Technology Letters*, **6**, 504-510. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00397>
- [8] 贲念增, 张利, 陈磊, 等. 电厂尖峰循环冷却水电化学处理工程实践[J]. 工业水处理, 2018, 38(11): 103-105+108.
- [9] Botz, A., Clausmeyer, J., Öhl, D., Tarnev, T., Franzen, D., Turek, T., et al. (2018) Local Activities of Hydroxide and Water Determine the Operation of Silver-Based Oxygen Depolarized Cathodes. *Angewandte Chemie International Edition*, **57**, 12285-12289. <https://doi.org/10.1002/anie.201807798>
- [10] 钱傲. 电化学水处理体系在特定条件下对污染物的转化新机理[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [11] Gabrielli, C., Maurin, G., Perrot, H., Poindessous, G. and Rosset, R. (2002) Investigation of Electrochemical Calcareous Scaling. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **538**, 133-143. [https://doi.org/10.1016/s0022-0728\(02\)01044-6](https://doi.org/10.1016/s0022-0728(02)01044-6)
- [12] Zeppenfeld, K. (2011) Electrochemical Removal of Calcium and Magnesium Ions from Aqueous Solutions. *Desalination*, **277**, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.005>
- [13] 刘振. 浅析电化学除垢技术在循环水系统中的应用[J]. 河南化工, 2019, 36(8): 41-43.
- [14] 易清风. 氧气在阴极的电还原及其应用研究进展[J]. 化学研究与应用, 2003, 15(5): 595-600.
- [15] 高海玲. 氧阴极催化剂的制备及其电化学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [16] 胡波兵. 固体氧化物阴极表面氧还原反应过程研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [17] 胡伟康, 张允什, 宋德瑛, 等. 碱性电解水制氢的活性阴极材料[J]. 高技术通讯, 1995, 5(8): 55-60.

- [18] 付银辉, 黎学明, 杨文静, 等. Ni-Mo-P 活性阴极制备及析氢行为的研究[J]. 材料导报, 2009, 23(22): 56-58.
- [19] 刘恒君, 陆崖青. 新型析氢活性阴极的研究[J]. 中国氯碱, 2018(4): 1-3.
- [20] 曹寅亮, 李志林, 王峰, 等. 镍锡析氢活性阴极的电化学制备及其在碱性溶液中的电催化机理[J]. 物理化学学报, 2013, 29(7): 1479-1486.
- [21] Zhang, L., Xue, G., Liu, S., Zhang, N., Duan, A., Wang, L., *et al.* (2011) Treatment of Coking Wastewater by Coupling Electrochemical Oxidation and Flocculation Technology. 2011 *International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment*, Shanghai, 20-22 May 2011, 1133-1136. <https://doi.org/10.1109/icmree.2011.5930539>
- [22] 赵丹丹, 曹顺安, 陈东, 等. 电解技术在循环冷却水处理中的应用研究进展[J]. 热力发电, 2018, 47(6): 1-7.
- [23] 高磊, 疏吟梅, 朱伟光, 等. 电化学技术在某电厂循环水上的应用研究[J]. 电气技术与经济, 2024(3): 84-86+89.
- [24] 徐浩, 雷佳妮, 杨鸿辉, 等. 电化学水垢去除技术处理能力核算及技术改进[J]. 工业水处理, 2019, 39(2): 17-20+74.
- [25] 肖丙雁, 丁宗琪, 王万俊, 等. 电化学技术在稳定冷却循环水水质中的应用[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(2): 53-56.
- [26] He, Y., Lin, H., Guo, Z., Zhang, W., Li, H. and Huang, W. (2019) Recent Developments and Advances in Boron-Doped Diamond Electrodes for Electrochemical Oxidation of Organic Pollutants. *Separation and Purification Technology*, **212**, 802-821. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.056>
- [27] 荣光辉, 毛振兴, 刘保录, 等. 循环水电化学除垢研究进展[J]. 化工机械, 2023, 50(4): 448-455.
- [28] 徐浩, 郭艺菲, 郭思远, 等. 循环冷却水系统使用电化学除垢设备的选择方法[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛. 西安: 中国环境科学学会, 2019: 5.
- [29] 何卉, 张廷海, 汪莉. 化学水处理自动控制系统的设计与实现[J]. 盐业与化工, 2014, 43(2): 13-17.
- [30] 叶建军, 邱鹏. 自动化装置在循环水处理方案中的应用[J]. 工业水处理, 2001, 21(9): 33-34.
- [31] 李鹏飞. 电化学循环水处理技术项目探究[J]. 化工管理, 2019(10): 70.
- [32] 李火银, 员佳琦, 李攀, 等. 电化学水处理技术降低循环水硬度的实验研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(3): 37-41+47.
- [33] Turro, E., Giannis, A., Cossu, R., Gidarakos, E., Mantzavinos, D. and Katsaounis, A. (2011) Electrochemical Oxidation of Stabilized Landfill Leachate on DSA Electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, **190**, 460-465. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.085>
- [34] 郭丽娜. 电化学除垢技术在焦化废水处理循环冷却水中的应用分析[J]. 山西化工, 2023, 43(11): 126-128.
- [35] 李森, 王海峰. 电化学法处理冷却循环水技术的应用[J]. 化工进展, 2013, 32(10): 2514-2517.
- [36] 王雨萌. 静电场作用下水流速度变化对电厂循环水阻垢效果影响研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
- [37] 刘智安, 王雨萌, 夏添, 等. 循环水流速对换热器壁面 CaCO_3 水垢晶体的影响[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2016, 45(5): 639-644.
- [38] 鲁宁宁. 循环冷却水电化学除垢工艺优化及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- [39] 李文运, 赵振环, 李思敏, 等. 水力停留时间对 BAF 除污性能的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(3): 75-77.
- [40] 陈璐, 杜鹏程, 刘强. 水力停留时间对 HMBR 处理效能的影响[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2018, 18(4): 37-40.
- [41] 刘睿, 高艳梅, 王晓慧, 等. 水力停留时间对 MFC-A~2/O 工艺处理生活污水的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 680-685.
- [42] Li, X. (2022) Development in Electrochemical Technology for Environmental Wastewater Treatment. *International Journal of Electrochemical Science*, **17**, Article 2212110. <https://doi.org/10.20964/2022.12.104>
- [43] Sari, A., Sutarlan, E., Nursanto, E., *et al.* (2021) Cost Optimization of Tannery Wastewater Treatment by Electrocoagulation Process with Iron Electrode under Various DC Voltage and Electricity Consumption. In: *Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **F**, IOP Publishing.
- [44] 张延进, 张泽坤, 徐星, 等. 循环冷却水系统的电化学水质稳定技术案例分析[J]. 工业水处理, 2024, 44(2): 184-189.
- [45] Li, S. and Wang, H.F. (2013) Application of Electrochemical Technology in the Treatment of Circulating Cooling Water.

Chemical Industry and Engineering Progree, **32**, 2514-2517.

- [46] Xu, H., Xu, Z., Guo, Y., Guo, S., Xu, X., Gao, X., *et al.* (2020) Research and Application Progress of Electrochemical Water Quality Stabilization Technology for Recirculating Cooling Water in China: A Short Review. *Journal of Water Process Engineering*, **37**, Article 101433. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101433>