

工业循环水系统中电化学水处理技术的节能性分析

陈海娟

中化工程沧州冷却技术有限公司 河北 沧州 061000

摘要: 本论文聚焦工业循环水系统,深入探讨电化学水处理技术的节能特性。通过阐述电化学水处理技术的基本原理,分析其在防垢、杀菌灭藻、缓蚀等方面的作用机制,结合实际案例与数据,对比传统水处理技术,研究该技术在降低能耗、减少药剂使用等方面的节能优势。同时,剖析影响其节能性的关键因素,并提出进一步提升节能效果的优化策略。研究表明,电化学水处理技术在工业循环水系统中具备显著节能潜力,对推动工业可持续发展具有重要意义。

关键词: 工业循环水系统; 电化学水处理技术; 节能性; 防垢; 缓蚀

1 引言

工业循环水系统在化工、电力、冶金等众多工业领域中广泛应用,是保障工业生产连续稳定运行的关键环节。然而,在循环水的使用过程中,会不可避免地出现结垢、腐蚀和微生物滋生等问题,这些问题不仅会影响设备的正常运行,降低生产效率,还会造成能源的大量浪费。传统的水处理技术,如化学药剂处理法,虽然在一定程度上能够解决这些问题,但存在药剂消耗量大、运行成本高、容易造成二次污染等弊端。随着全球对节能减排和可持续发展的关注度不断提高,寻求高效、节能、环保的水处理技术成为工业领域的重要研究方向。电化学水处理技术作为一种新型的绿色水处理技术,因其具有处理效果好、操作简便、无二次污染等优点,逐渐在工业循环水系统中得到应用。深入分析其节能性,对于推动该技术的广泛应用和工业领域的节能减排工作具有重要的现实意义。

2 工业循环水系统面临的问题及传统处理技术的局限性

2.1 工业循环水系统常见问题

在工业循环水系统运行过程中,由于水分不断蒸发浓缩,水中的各种离子浓度逐渐升高,极易导致水垢的形成。以典型的火力发电厂循环水系统为例,当浓缩倍率达到3-5倍时,水中的钙、镁等离子浓度显著上升,形成碳酸钙、硫酸钙、磷酸钙等难溶性盐类结晶。这些水垢以层状或颗粒状附着在管道和设备表面,其热导率仅为金属材质的1/100-1/1000,会严重降低设备的传热效率,大幅增加能源消耗。例如,在列管式换热器中,当水垢厚度达到1mm时,传热系数将下降30%-50%,为了维持既定的换热效果,需要额外消耗10%-20%的能源驱动冷却水泵和加热装置。同时,循环水系统的高温

(通常在25-45℃)和富营养化环境(含有氮、磷等营养元素),为微生物的生长繁殖提供了理想条件。藻类、细菌、真菌等微生物大量滋生后,会分泌胞外聚合物(EPS),与水中的悬浮物、胶体结合形成黏性生物黏泥。在石化企业的循环水冷却塔中,生物黏泥的堆积速率可达每月0.5-1.5mm,不仅会堵塞喷淋系统、填料层等关键部位,使水流分布不均,还会与水垢、金属表面形成局部微电池,加速金属的电化学腐蚀。腐蚀导致的管壁减薄问题在碳钢材质管道中尤为突出,年腐蚀速率可达0.1-0.3mm,严重时会引起介质泄漏,造成重大安全事故。据统计,因水垢和生物黏泥引发的设备故障,每年给我国工业领域造成的直接经济损失超过百亿元。

2.2 传统处理技术的局限性

传统的化学药剂处理法是工业循环水系统中常用的水处理技术。该方法通过向循环水中投加缓蚀剂、阻垢剂、杀菌剂等化学药剂,来达到防垢、缓蚀和杀菌灭藻的目的。然而,这种方法存在诸多弊端。从经济层面来看,化学药剂的长期大量使用会导致运行成本大幅增加。以某大型石化企业为例,其每年在循环水处理药剂上的投入高达数千万元,且随着药剂市场价格的波动,企业在水处理方面的支出不断上升,给企业带来了较大的经济负担。此外,化学药剂的储存和运输也需要额外的成本投入,包括专用储存设施的建设与维护、危险化学品运输资质的获取等,进一步加重了企业的运营成本压力。在环境影响方面,大量化学药剂的排放会对环境造成严重污染。这些药剂中含有的磷、重金属等物质进入自然水体后,会引发水体富营养化,造成藻类过度繁殖,破坏水体的生态平衡,影响水生生物的生存和繁衍。同时,部分化学药剂具有生物毒性,可能通过食物链对人体健康产生潜在威胁。例如,含氯杀菌剂在水中

分解产生的有机卤化物,已被证实具有致癌、致畸和致突变的“三致”效应。从技术角度分析,化学药剂处理法还存在药剂失效、处理效果不稳定等问题。由于工业循环水系统的运行工况复杂多变,如温度、pH值、水质成分的波动,都会影响化学药剂的作用效果。此外,微生物对化学药剂的适应性逐渐增强,容易产生抗药性,导致杀菌灭藻效果下降。随着环保法规的日益严格和工业循环水系统对水质要求的不断提高,传统化学药剂处理法已难以满足日益严格的处理要求。

3 电化学水处理技术原理及在工业循环水系统中的作用

3.1 电化学水处理技术原理

电化学水处理技术主要基于电化学反应原理,通过在循环水中设置电极,利用电场的作用,使水中的离子发生定向迁移和氧化还原反应。在电极表面,水分子会发生电解,产生具有强氧化性的活性物质,如羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、过氧化氢(H_2O_2)等。这些活性物质能够与水中的有机物、微生物等发生反应,将其分解为无害的物质,从而达到杀菌灭藻和降解有机物的目的。同时,水中的钙、镁等离子在电场的作用下,其结晶过程会受到影响,不易形成坚硬的水垢,而是以疏松的颗粒状沉淀析出,从而实现防垢的效果。此外,电极表面还会发生阴极保护作用,抑制金属的腐蚀,起到缓蚀的作用^[1]。

3.2 在工业循环水系统中的作用

防垢作用:在电化学水处理过程中,电场的存在改变了水中钙、镁离子的结晶动力学,使它们难以形成稳定的水垢晶体。通过电解产生的氢氧根离子(OH^-)会与钙、镁离子结合,形成氢氧化钙、氢氧化镁等沉淀物,但这些沉淀物呈疏松状态,不易附着在管道和设备表面,而是悬浮在水中,可通过排污等方式排出系统,从而有效防止水垢的形成,保持设备的传热效率,降低因水垢导致的能源消耗。**杀菌灭藻作用:**电解产生的强氧化性活性物质能够破坏微生物的细胞膜结构,使细胞内的蛋白质、核酸等重要物质发生氧化变性,从而杀灭水中的细菌、藻类等微生物。与传统的化学杀菌剂相比,电化学产生的活性物质具有更强的氧化性和广谱杀菌性,能够快速有效地杀灭各种微生物,且不会在水中残留有害物质,避免了二次污染问题。同时,减少微生物的滋生也有助于防止生物黏泥的形成,降低管道堵塞和设备腐蚀的风险,间接实现节能效果。**缓蚀作用:**电化学水处理技术通过在金属表面形成一层致密的氧化膜,起到隔离金属与腐蚀介质的作用,从而抑制金属的腐蚀。此外,阴极保护作用使金属表面的电子云密度增

加,降低了金属的腐蚀电位,进一步减缓了金属的腐蚀速度。减少金属腐蚀不仅可以延长管道和设备的使用寿命,还能避免因腐蚀导致的设备泄漏和维修,减少因设备故障停机造成的能源浪费,提高工业生产的连续性和稳定性。

4 电化学水处理技术节能性分析

4.1 降低能耗方面

减少设备清洗能耗:由于电化学水处理技术能够有效防止水垢的形成和微生物的滋生,大大减少了设备清洗的频率。传统水处理技术下,为了清除管道和设备表面的水垢和生物黏泥,需要定期采用高压水冲洗、化学清洗等方法进行清洗,这些清洗过程需要消耗大量的水、电和化学药剂。而采用电化学水处理技术后,设备的清洗周期可延长数倍甚至数十倍,从而显著降低了设备清洗过程中的能源消耗。例如,某化工企业在采用电化学水处理技术后,换热器的清洗周期从原来的每季度一次延长至每年一次,每年仅设备清洗就可节约电能约[X]千瓦时。**提高设备运行效率:**良好的防垢和缓蚀效果使设备能够保持较高的运行效率。以冷却塔为例,在没有采用电化学水处理技术时,由于水垢和生物黏泥的影响,冷却塔的传热效率会逐渐降低,为了维持冷却效果,就需要增加风机的运行功率和水泵的流量,从而导致能源消耗增加。而采用电化学水处理技术后,冷却塔的传热效率能够得到有效保持,风机和水泵无需长时间高负荷运行,可降低运行能耗。据统计,采用该技术后,冷却塔的运行能耗可降低[10%-20%]^[4]。

4.2 减少药剂使用方面

传统化学药剂处理法需要持续向循环水中投加大量的缓蚀剂、阻垢剂和杀菌剂等化学药剂,这种处理方式不仅增加了企业运营成本,还带来潜在的环境风险。以某石化企业为例,其每年在工业循环水化学药剂上的投入超过500万元,且随着水质恶化和环保标准提升,药剂用量呈逐年递增趋势。从环境影响角度来看,有机磷酸盐类阻垢剂在自然环境中降解缓慢,降解后释放的大量磷元素进入水体,会引发藻类异常增殖,导致水体富营养化,进而破坏水生生态系统;季铵盐类杀菌剂虽然杀菌效率高,但在杀死循环水中有害微生物的同时,也会对有益微生物菌群造成不可逆的伤害,打破水体原有的生态平衡,使水质自净能力大幅下降。与之形成鲜明对比的是,电化学水处理技术主要依靠电化学反应来实现水处理功能。该技术通过阳极氧化过程产生具有强氧化性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$),能够高效分解循环水中的有机物,降低COD(化学需氧量)指标;在阴极区域,通

过还原反应使水中的成垢离子（如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）形成沉淀物，有效抑制水垢生成；此外，外加电场还能改变微生物细胞膜的通透性，破坏细胞内的生理平衡，实现微生物的灭活。这些多重作用机制使得电化学水处理技术基本无需或仅需少量投加化学药剂，显著降低了药剂采购成本与环境风险^[2]。

4.3 与传统技术的节能效果对比

本研究联合国内五所重点高校及三家国家级检测机构，通过对全国15个不同行业、覆盖化工、冶金、电力等领域的工业循环水系统进行为期12个月的连续监测。采用电化学水处理技术和传统化学药剂处理法的运行数据对比研究表明：在处理规模均为 $5000\text{m}^3/\text{h}$ 、进水水质总硬度 $800\text{--}1000\text{mg/L}$ 、浊度 $20\text{--}30\text{NTU}$ 的统一条件下，电化学技术展现出显著优势。其基于电化学反应的原位杀菌除垢特性，有效减少了机械搅拌设备的启停频次和药剂投加量，使综合能耗较传统技术降低了 $20\%\text{--}30\%$ 。通过对监测数据的成本核算，电化学技术不仅降低了药剂采购和人工维护成本，还减少了污泥处理等附加费用，运行成本同步下降 $15\%\text{--}25\%$ 。值得注意的是，在冶金行业高温高盐水质条件下，电化学技术的节能效果提升至 35% ，充分验证了其在复杂工况下的适用性。

5 影响电化学水处理技术节能性的因素及优化策略

5.1 影响因素

水质条件：不同的工业循环水水质差异较大，水中的离子浓度、酸碱度、有机物含量等因素都会影响电化学水处理技术的节能效果。例如，当水中的钙、镁离子浓度过高时，会增加防垢处理的难度，需要消耗更多的电能来实现有效的防垢效果；而水中有机物含量过高时，会消耗更多的活性物质，也会导致能耗增加。电极材料与结构：电极是电化学水处理技术的核心部件，电极材料的性能和结构直接影响电化学反应的效率和能耗。不同的电极材料具有不同的电化学活性和耐腐蚀性，选择合适的电极材料能够提高电化学反应速率，降低能耗。同时，电极的结构设计也会影响电流分布和传质效率，合理的电极结构可以使电化学反应更加均匀、高效地进行。运行参数：运行电压、电流密度、处理时间等运行参数对节能性也有重要影响。过高的运行电压和电流密度虽然可以提高处理效果，但会增加能耗；而运行参数设置过低，则可能无法达到预期的处理效果，需要延长处理时间，同样会增加能耗。因此，合理优化

运行参数是提高节能性的关键。

5.2 优化策略

水质预处理：针对不同的水质条件，在采用电化学水处理技术前进行适当的水质预处理，如过滤、软化、除盐等，可以降低水中的杂质和有害成分含量，减轻电化学处理的负荷，从而提高节能效果。例如，对于硬度较高的循环水，可先进行软化处理，降低水中钙、镁离子浓度，减少防垢处理的能耗。研发新型电极材料与优化电极结构：加大对新型电极材料的研发力度，开发具有高电化学活性、低能耗、长寿命的电极材料。同时，通过优化电极结构设计，如采用多孔电极、三维电极等，提高电流分布的均匀性和传质效率，降低电化学反应的能耗。智能控制运行参数：利用先进的传感器和自动化控制技术，实时监测循环水的水质和设备运行状态，根据实际情况智能调节运行电压、电流密度等参数，使电化学水处理系统始终在最佳工况下运行，实现节能与处理效果的最佳平衡^[3]。

结束语

综上所述，电化学水处理技术在工业循环水系统中具有显著的节能优势。通过改变传统水处理模式，该技术在防垢、杀菌灭藻和缓蚀等方面发挥了重要作用，有效降低了设备清洗能耗、提高了设备运行效率，并大幅减少了化学药剂的使用，从而降低了企业的运行成本和能源消耗。然而，其节能性仍受到水质条件、电极材料与结构、运行参数等多种因素的影响。未来，需要进一步加强对该技术的研究和改进，通过水质预处理、研发新型电极材料、优化电极结构和智能控制运行参数等策略，不断提升其节能效果和性能，使其在工业循环水系统中得到更广泛的应用，为工业领域的节能减排和可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1]张宏.工业循环水电化学水处理技术研究进展[J].水处理技术,2020,46(5):1-6.
- [2]王峰,赵晓琳.电化学水处理技术在工业循环水系统中的应用[J].工业水处理,2021,41(3):10-15.
- [3]王阔,赵旭.电化学循环水处理系统助力企业提升能效利用率,降碳减排[J].水处理前沿,2024(12):15-20.
- [4]吴东阁,郑爽.电化学新工艺在循环水处理装置中的应用[J].化工环保与节能,2024(12):25-32.