



华中科技大学

Huazhong University of Science and Technology



电化学除垢的原理和技术前沿问题

吴旭 教授

2026.03.22



目录

1 技术原理

2 前沿问题

3 示范案例

循环水除垢市场

8.2%

市场增长率

全球工业节水市场年复合增长率
(2023 Frost数据)

600亿

市场规模

中国工业循环水处理市场规模 (2023
生态环境部)

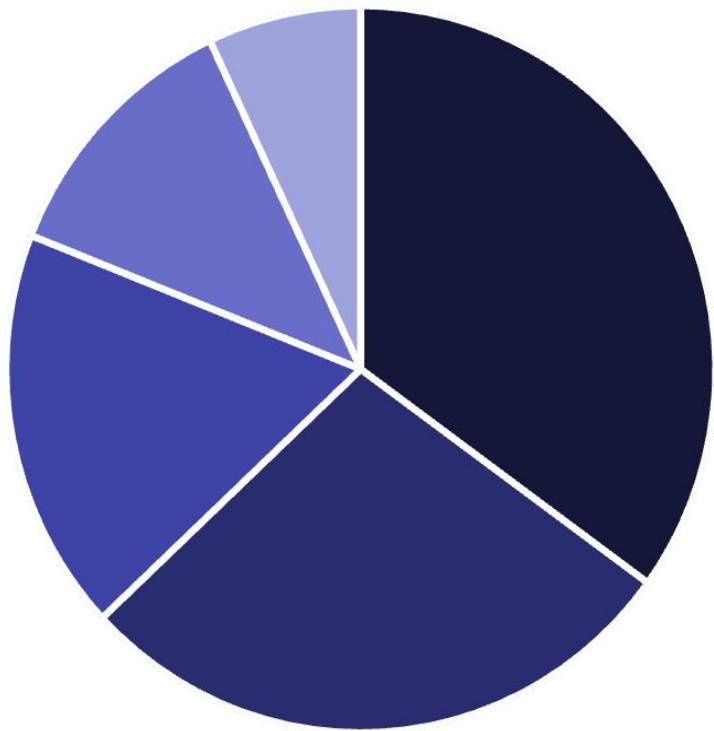
3

主要痛点

水分损失、药剂成本、能耗



应用矩阵



■ 电力 ■ 石化 ■ 食品 ■ 电子 ■ 其他

电力行业应用占比最高，达35%。石化行业紧随其后，占28%。食品和电子行业分别占18%和12%。

行业	需求痛点	典型案例
工业冷却水	维护成本高（占系统总成本40%）	宝钢应用后年省387万元
中央空调	能效下降（结垢1mm=能耗↑7%）	深圳平安金融中心项目
石油化工	管道腐蚀风险	中石化茂名分公司试点
市政水处理	环保政策压力	武汉东湖高新水厂改造

一、技术原理

电化学除垢原理

1

电场电化学反应

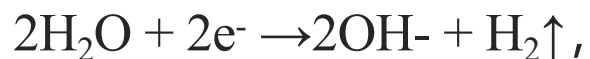
电化学反应分为阴极和阳极反应以及电场运动，在循环水运行环境中阳极发生氧化反应，阴极发生还原反应。

同时发生电氧化杀菌、电沉积，电泳，电迁移、电吸附等现象。

2

阴极碱性环境

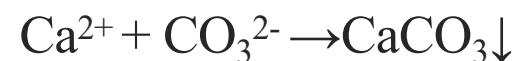
在电场作用下，阴极附近发生还原反应：



形成碱性环境，促使 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子沉淀析出，降低水质硬度。

3

钙、镁等元素析出



这些沉淀物可以在阴极析出为垢，从水溶液体系统中不断地清除，达到循环水主动除垢节水降药剂的效果。

电化学阻垢机理

1 电场极化作用

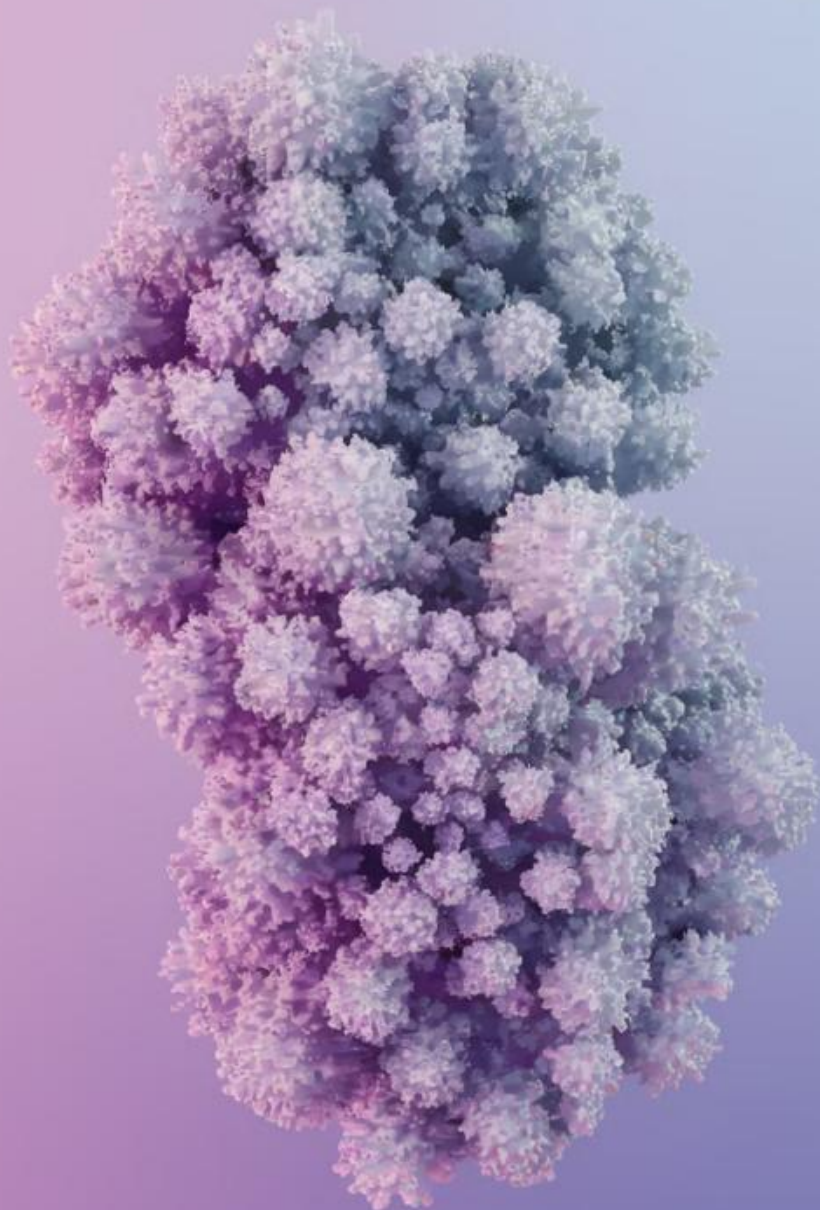
水分子在电场作用下发生极化现象，大分子簇（分子团）被打散变为小分子还原水，使水体溶解性、渗透性增强，起到阻垢、溶垢的作用。

2 晶格畸变效应

在电场作用下，改变 CaCO_3 的结晶过程，使其生成松散泡沫状的文石结构软垢，抑制了致密的方解石结构硬垢的生成，具有良好的阻垢作用。

3 持续预防机制

电化学处理系统持续工作，不断改变水体物理化学性质，预防新垢形成，同时促使已形成的水垢逐渐软化并脱离设备表面。





电化学杀菌原理

次氯酸杀菌

阳极的强氧化作用将水中氯离子转化为氯气($2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$), 氯气溶于水转化为次氯酸($\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^- + \text{HClO}$), 次氯酸是水处理中常用的高效杀菌剂。

阳极强氧化反应

在电场作用下, 阳极附近产生羟自由基($\text{OH}\cdot$)、氧自由基($\text{O}\cdot$)、氯自由基($\text{Cl}\cdot$)、双氧水(H_2O_2)、臭氧(O_3)等强氧化物质, 具有极强的杀菌效果。

电场与pH杀菌

电场对微生物有显著抑制作用。同时, 工作时阳极区域形成强酸环境($\text{pH} < 4$), 阴极区域形成强碱环境($\text{pH} > 10$), 这些极端pH环境 also 具有很强的杀菌效果。



电化学除垢技术优势

比较内容	化学药剂法	电化学处理法
成垢离子处理	仍然在循环水中	以预垢形式持续取出
COD控制	药剂自身易导致COD升高	无任何导致COD升高的物质
浓缩倍数	比较低	可显著提高
管道清洗	需定期清洗，易损坏管道	不需要清洗，安全可靠
环境影响	有二次污染，需定期排污	无污染物质产生，"零"排放
运行成本	长期持续投资	一次投入，长期回报



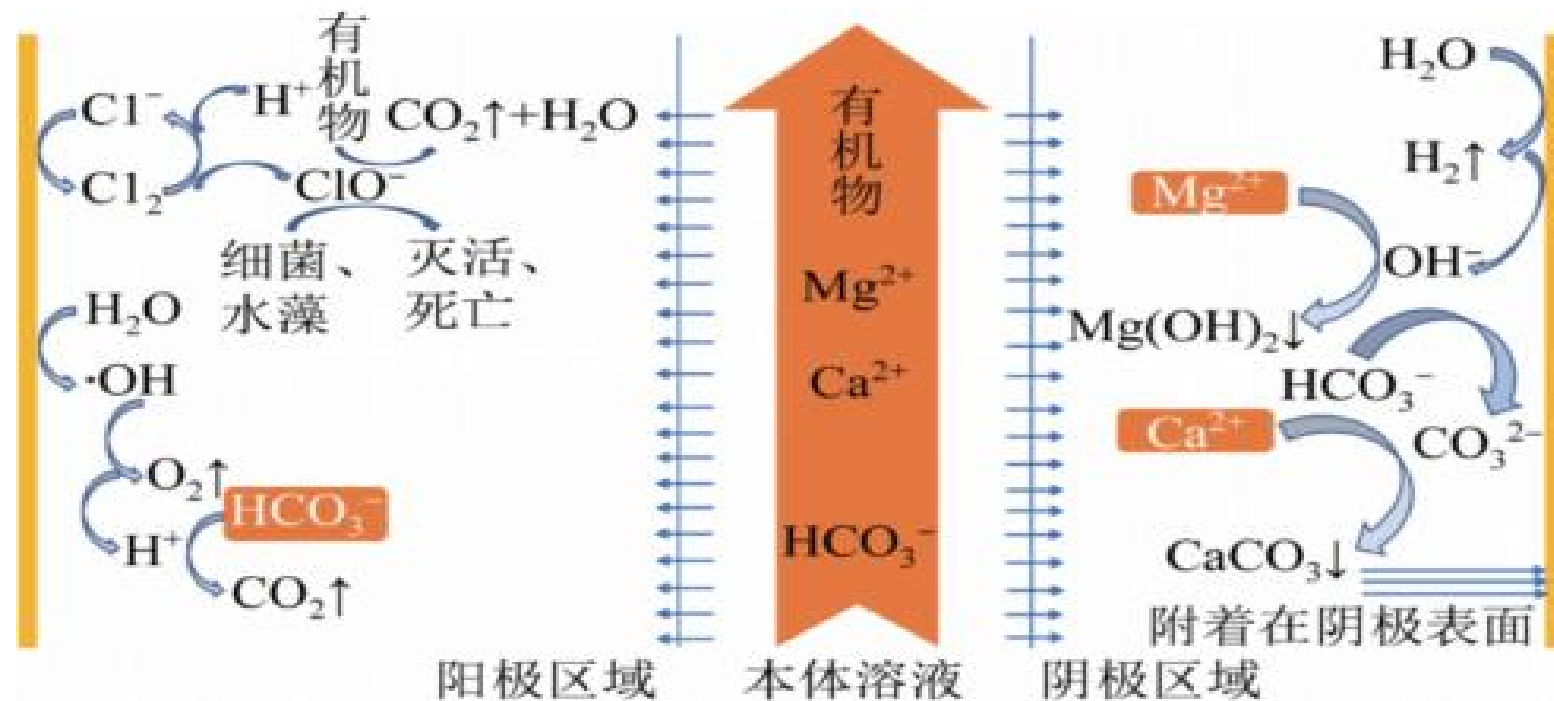
目录

1 技术原理

2 前沿问题

3 示范案例

二、前沿问题



电化学除垢示意图

- 一、电极材料与结构因素对于除垢效率的影响规律，目前除垢效率为 $5\text{-}20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
- 二、不同水质尤其是关键杂质对于电极效能的影响，比如 F^- ， Cl^- ，有机酸，硅，砷，重金属等
- 三、碱土元素的经济性问题，处理循环水除垢 vs. 生产钙镁的产品

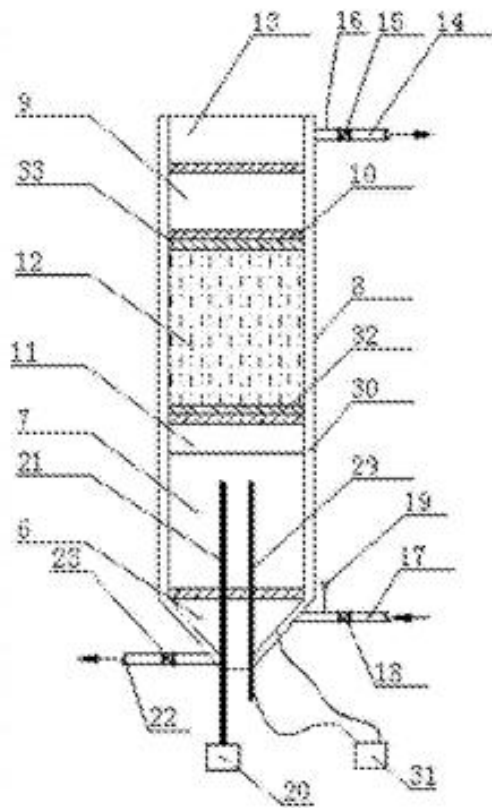
二、前沿问题

(54)发明名称

一种电化学除垢装置

(57)摘要

本发明涉及一种电化学除垢装置,用以解决传统电化学除垢装置除垢不彻底、除垢成本高及除垢难度大的问题,包括除垢本体、原水进水管路系统、超声波清洗系统、废渣排出系统及自动控制系统,所述原水进水管路系统、超声波清洗系统及废渣排出系统分别与所述除垢本体连接,所述自动控制系统分别与所述除垢本体、原水进水管路系统、超声波清洗系统及废渣排出系统连接。



创新点：通过电化学、超声波和纤维过滤的**集成设计**，结合**智能控制**系统，提高除垢效率和自动化水平。

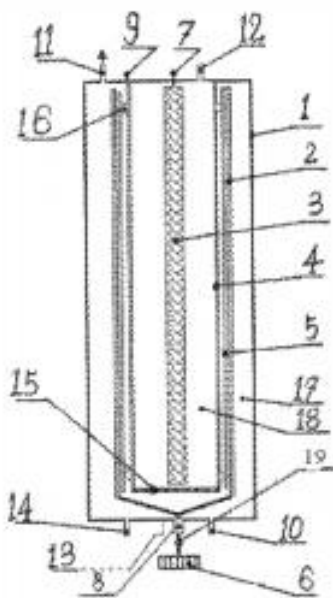
二、前沿问题

(54) 发明名称

一种电化学水垢去除装置

(57) 摘要

本申请提供了一种电化学水垢去除装置,包括用于电化学水处理的水垢晶核生成单元;所述水垢晶核生成单元包括槽体;所述槽体的底部设有进水口和排污口;所述槽体的顶端设有出水口;设置于所述槽体的内部的旋转阴极;设置于所述槽体的内部的阳极。在本申请中,在旋转阴极附近,水溶液电解产生 OH^- , 在旋转阴极附近界面层获得 pH 值高达 14 的碱性溶液, 旋转电极将电化学过程中旋转阴极表面上和界面层中形成的水垢晶核扩散到溶液中, 大量的晶核为溶液中的结垢离子提供了超大的晶体生长表面和晶体活性生长点; 由于大量微小晶核的表面积比旋转阴极表面积大很多倍, 结垢离子结晶析出的几率大大增加, 除垢效率也就增加。



创新点: **旋转阴极**强化传质过程, 促使结垢离子快速生成大量微小晶核并扩散至溶液中, 显著**提升除垢效率**, 同时采用隔膜**分隔阴阳极室**以**提高电流效率**。

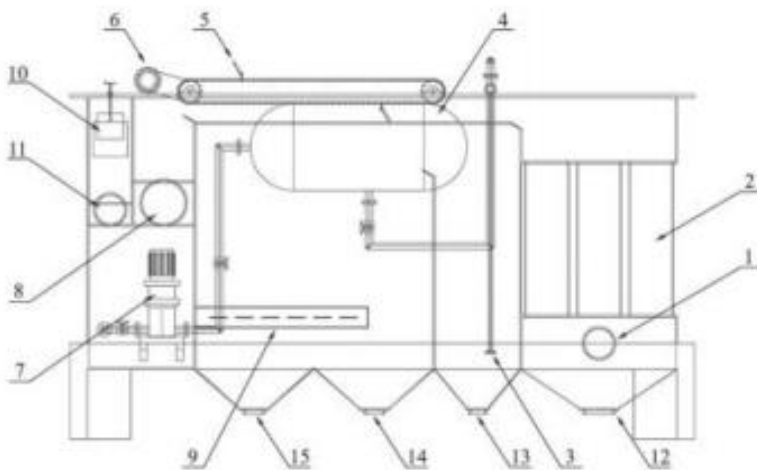
二、前沿问题

(54) 发明名称

一种电絮凝-电化学氧化耦合降浊除垢一体化装置

(57) 摘要

本发明公开了一种电絮凝-电化学氧化耦合降浊除垢一体化装置,所述壳体内设置有压力溶气罐、装置反应腔、分离区以及澄清溢流区,所述装置反应腔内设置有若干反应单元,直流电源与各反应单元相连接,所述分离区内部通过挡板分隔为溶气水释放室及澄清区,溶气水释放室的顶部与澄清区的顶部及装置反应腔相连通,集水管的一端位于澄清区内,集水管的另一端插入于所述澄清溢流区,澄清溢流区的顶部开口与所述出水口相连通,所述分离区的顶部设置有刮渣机;所述压力溶气罐的出口与释放管的一端相连通,释放管的另一端插入于所述溶气水释放室内,该装置能够将电絮凝与电化学氧化技术相结合,以提高净化效果。



创新点：通过电絮凝与电化学氧化技术耦合，结合溶气气浮和分层排泥设计，利用铁基非活性金属氧化物阳极网加速 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ，强化絮凝与氧化协同作用，提升高浊度、高COD废水的处理效率。

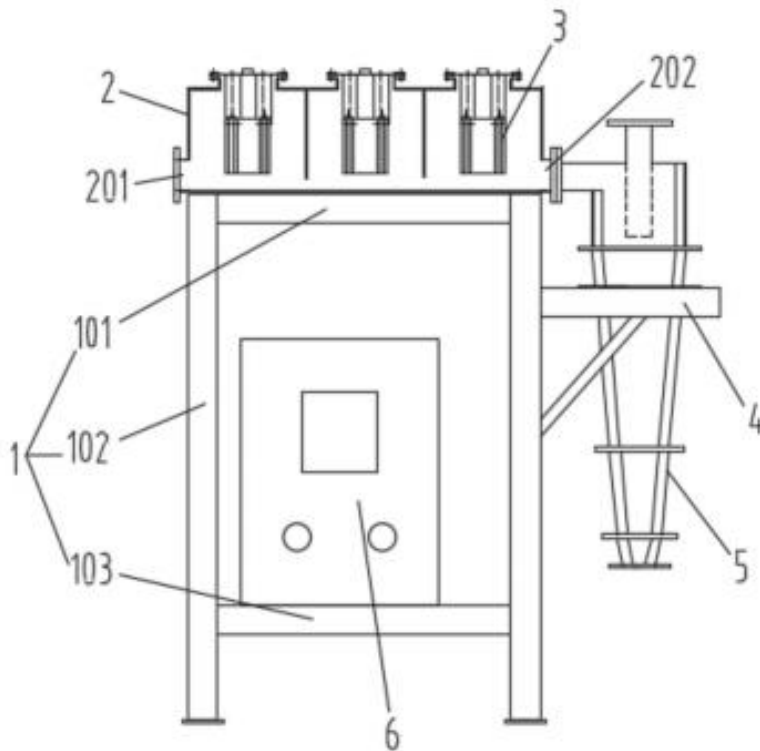
二、前沿问题

(54) 实用新型名称

一种多级除垢装置

(57) 摘要

涉及水电解除垢设备领域的一种多级除垢装置,包含支撑架、旋流器、电解箱、控制柜以及多个除垢电极组件;支撑架包含上平台和下平台,上平台的下台面四角设有四个支腿,控制柜安置于下平台的上台面;上平台的上台面一侧设为操作区,电解箱安装于上平台的上台面另一侧,电解箱两端的箱壁下部分别设有对应的进水管和出水管,多个除垢电极组件可拆卸安装于电解箱内上部;支撑架对应操作区一端的侧面设有爬梯,旋流器设于爬梯旁边对应电解箱出水管的位置,且旋流器顶部的侧切进料口与电解箱的出水管对应连接,旋流器的中部外壁与支撑架固定连接;该多级除垢装置通过多级多种除垢方式,提高除垢效果,并针对性的设计更加合理的整体结构布局。



创新点：通过**多级电极组件串联**电解箱与**旋流器**结合，形成电解除垢与离心分离的双重处理流程，采用**模块化**支撑架设计，优化空间布局以提升安装维护便捷性。

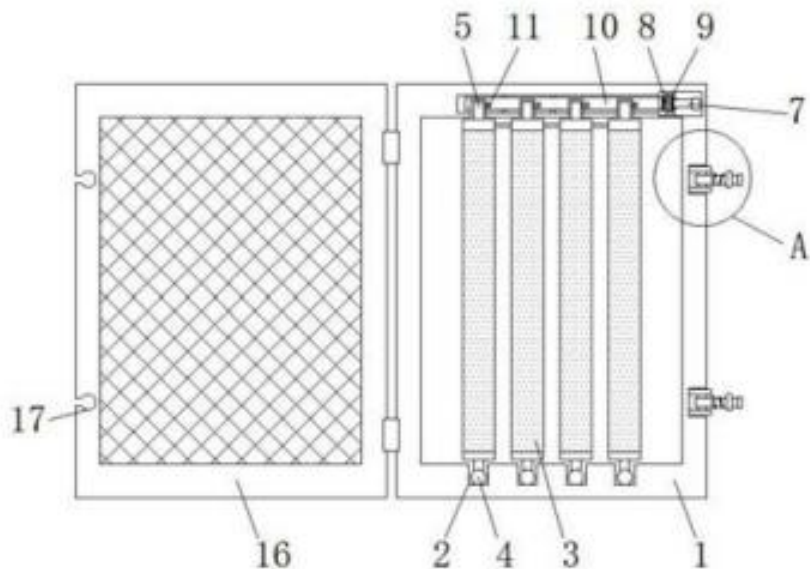
二、前沿问题

(54)实用新型名称

一种新型除垢电极

(57)摘要

本实用新型公开了一种新型除垢电极,包括置物箱、拨杆和门板,所述置物箱的底部开设有滑槽,且置物箱的内部设置有集成片,同时集成片的下方通过滚轮与置物箱相互连接,所述集成片的端头处设置有固定块,且固定块的中间位置预留有孔洞,所述拨杆位于置物箱的端头处,且拨杆的端头处固定有齿轮,同时齿轮通过连接转轴与置物箱相互连接,所述齿轮的边侧连接有连接板,且连接板的中间位置固定有限制杆,所述置物箱的中间位置设置有固定杆,且固定杆通过阻尼转轴与置物箱相互连接,所述门板的一端与置物箱相互连接,且门板的另一端开有限位槽。该新型除垢电极,便于定期对装置的内部进行清洁除垢,提高了工业水吸附除垢的效率。



创新点：通过可滑动拆卸的集成片和网状门板设计，结合齿轮-连接板联动机构，实现电极的快速拆卸和清洁，显著提升了除垢效率和维护便捷性。

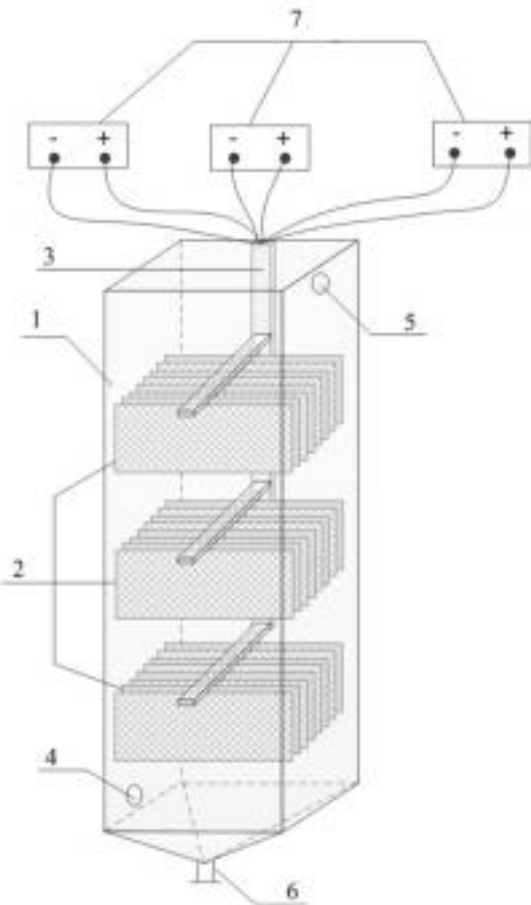
二、前沿问题

(54) 实用新型名称

一种基于多级除垢的水处理系统

(57) 摘要

本实用新型公开了一种基于多级除垢的水处理系统,包括反应箱体池、工作电源及控制器;反应箱体池底部的侧面上设置有进水口,所述反应箱体池顶部的侧面上设置有排水口,所述反应箱体池的底部设置有排泥口,反应箱体池内部自上到下划分为若干水处理区域,其中,各水处理区域均设置有除垢电极组;所述工作电源包括若干电源模块,其中,一个电源模块对应一个除垢电极组,各电源模块的输出端与对应除垢电极组相连接,控制器与所述电源模块的控制端相连接,该装置能够调整各级除垢电极组的运行参数。



创新点：通过多级垂直分布的除垢电极组和独立电源模块控制，结合实时水质监测反馈，实现了对不同水质区域的自适应参数调节，显著提升了除垢效率和能耗优化。

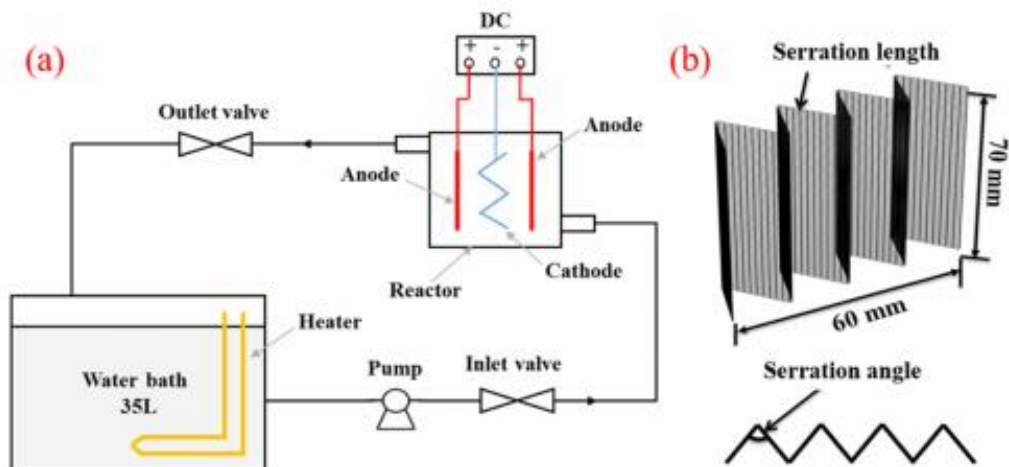
二、前沿问题

Serrated Mesh Cathode for Low-Energy-Consumption Electrochemical Descaling: Mechanism and Process Optimization

Zhengqing Yang, Wen Sun,* Yapeng Huang, Yixuan Feng, Wei Gao, Lida Wang, Xu Chen,
and Guichang Liu*

Cite This: *Ind. Eng. Chem. Res.* 2023, 62, 18438–18449

Read Online



电极材料以及结构:

阳极材料: 钛基涂层电极

阳极结构: 平板结构

阴极材料: 304不锈钢

阴极结构 (如图b): 锯齿网状, 锯齿长度20 mm, 锯齿角度60° (优化参数), 投影宽度60 mm, 高度70 mm。

除垢性能:

除垢速率: **11.79 g·m⁻²·h⁻¹**

能耗: 最低5.26 kWh/kg CaCO₃

最佳条件: 锯齿长度20 mm、锯齿角度60°、电流0.3 A、极间距20 mm

创新点:

创新阴极结构

二、前沿问题

Water Science & Technology



© 2021 The Authors

Water Science & Technology Vol 84 No 9, 2432 doi: 10.2166/wst.2021.436

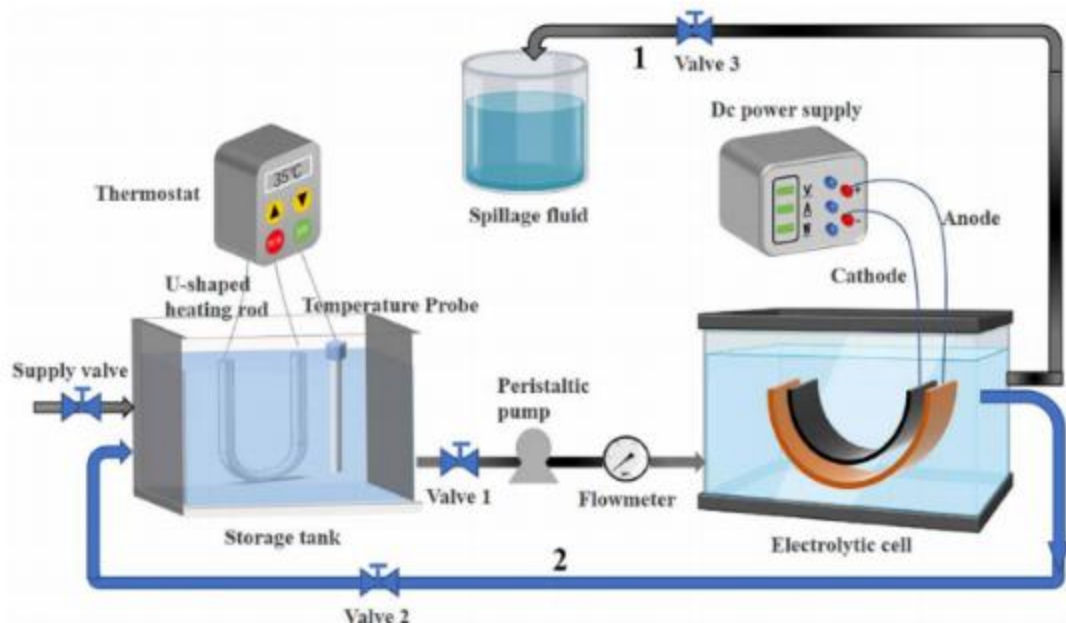
Research on performance optimization and mechanism of electrochemical water softening applied by pulse power supply

Zhonghao Wang, Wei Lin^{*}, Wei Wang, Zhangwei Wang, Jimin Li, Jianmin Xu and Jiuyang Yu

School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430000, China

*Corresponding author. E-mail: linwei@wit.edu.cn

WL, 0000-0001-5076-5755



阴阳极材料以及结构：

阳极材料：钛基涂层电极

阳极结构：弧形板状（位于阴极滚筒下方）

阴极材料：304不锈钢（18 cm × 10 cm × 5.7 cm，厚度1 mm）

阴极结构：在小型实验平台中为平板结构（验证性能）；在实际装置中为薄壁滚筒设计（可旋转，兼具除垢和脱水功能）

除垢性能：

硬度去除率：13.7 g h⁻¹ m⁻²

单位垢重能耗：0.16 kWh g⁻¹

创新点：

创新阴极结构



目录

1 技术原理

2 前沿问题

3 示范案例

技术代表公司-青骊骥

[关于我们](#)[产品及技术介绍](#)[案例分享](#)[新闻公告](#)[招纳贤士](#)[联系我们](#)[氢能业务](#)[环保业务](#)

电化学水处理设备

新型电化学工业循环水处理设备

采用先进的电化学处理技术，突破行业瓶颈，单台处理量达50000m³/h，通过智能控制技术加物联网科技，实现远程实时在线监控各项指标，智能计算循环水趋势。客户覆盖钢铁、火电、化工，煤化工等大型企业。



电化学背景，主要做氢能？

技术代表公司-湖北美辰环保股份有限公司



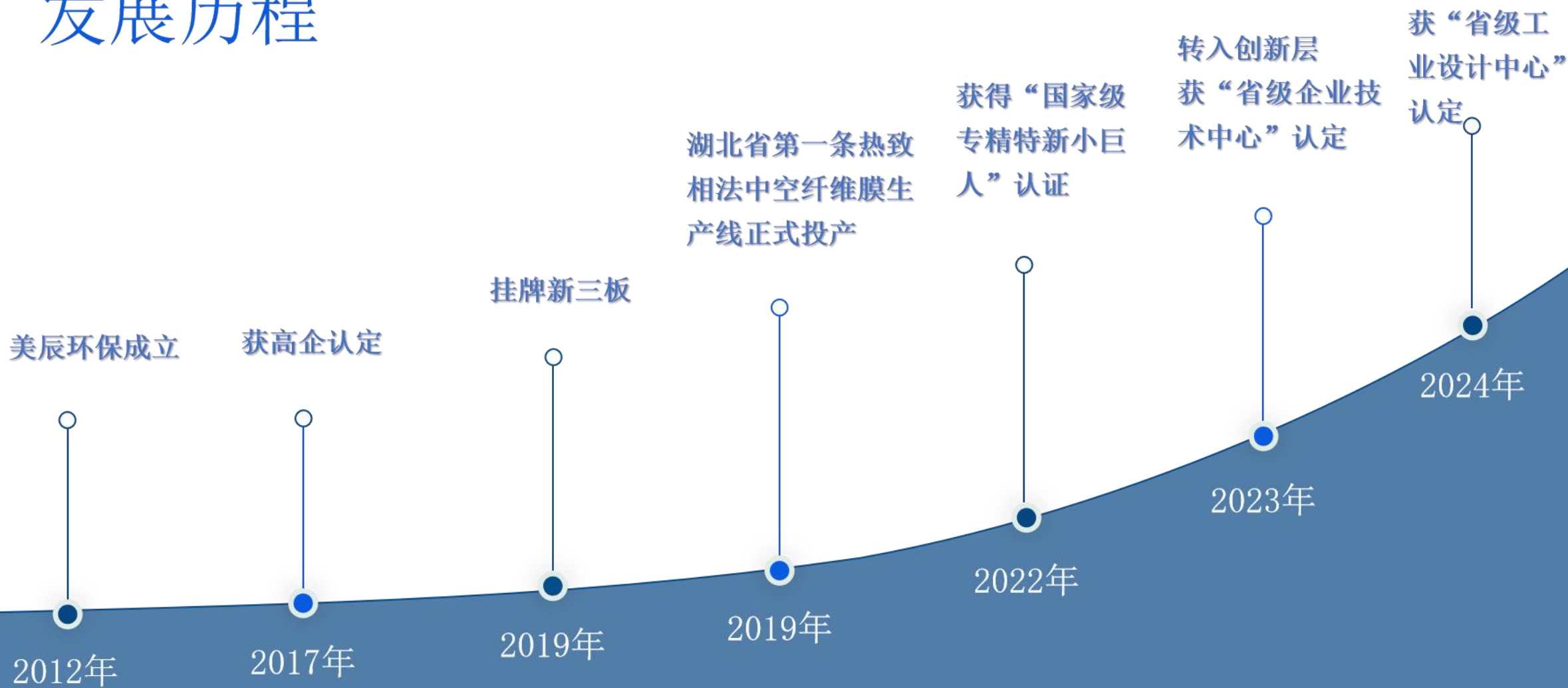
公司简介

工业水系全生命周期节能环保服务商

秉持创新引领、绿色发展的理念，致力于成为“三磷”治理技术的先行者和工业水系全生命周期节能环保治理服务商的典范。



发展历程



企业资质

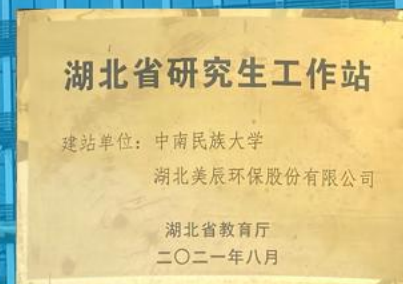
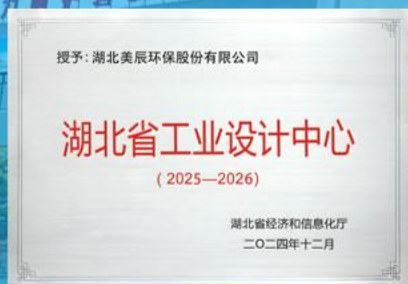
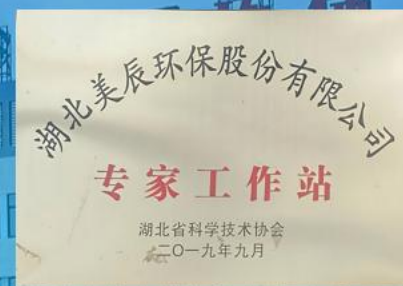
获各类资质认定

MAC、工业设计资质认证、工业废水处理二级、生活污水处理二级、环保工程专业承包贰级、两化融合体系、三体系等

实力值得信赖



科研平台



八大 省级科研平台

八大平台助力企业技术创新，提升“三磷”治理能力，强化工业水系环保服务，巩固行业领先地位。

示范案例



设计循环水量8400m³/h

- 1) 实现浓缩倍数6.5-8倍;
- 2) 实现补水量减少150-300m³/天;
- 3) 电化学设备产垢2-3吨/月;
- 4) 实现缓蚀剂投加量减少30%~40%;
- 5) 阻垢剂投加量减少30%~40%;
- 6) 硫酸投加量减少40%~50%;
- 7) 日常杀菌剂投加量减少30-50%。