



2026 电化学水处理技术及装备 暨水处理专项交流会

电催化还原技术及装备

张乐华 教授

石河子大学/华东理工大学

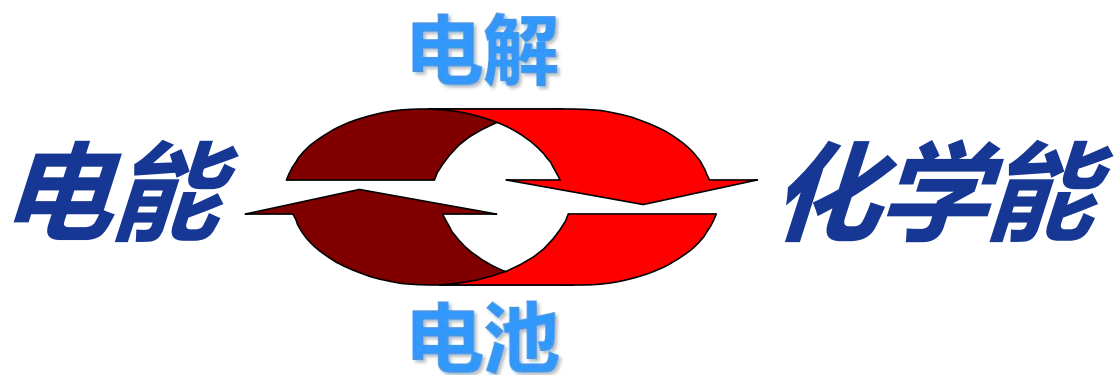
工业废水无害化与资源化国家工程研究中心

目录

- 1. 电催化还原基本原理**
- 2. 电催化还原装备**
- 3. 案例：高氮废水处理**
- 4. 总结**

1.1 电化学工作原理概述

电化学是研究两类导体形成的带电界面现象及其上所发生化学反应的科学，主要是研究**电能和化学能**之间的相互转化及转化过程中的有关规律。



1.2 电化学反应

电极按照电荷的流动方向分阴极和阳极：

阴极

Cathode

发生**还原作用**的极称为阴极，
在电解池中，阴极是负极。

阳极

Anode

发生**氧化作用**的极称为阳极，
在电解池中，阳极是正极。

2.1 电化学氧化（阳极过程）

电化学氧化：利用不溶性阳极的直接电解氧化作用或阳极反应产物（ Cl_2 、 ClO^- 、 O_3 ）间接的氧化作用，降解消除水中的氰、酚以及COD、 S^{2-} 等污染物。

❖ 直接氧化

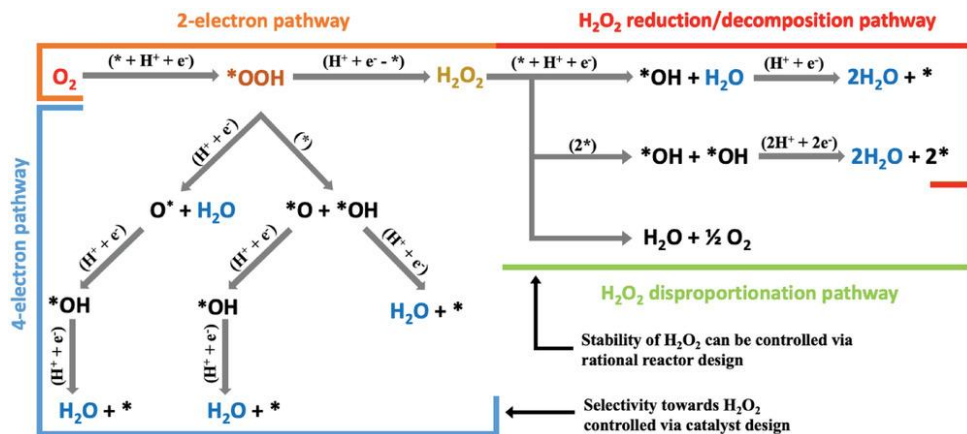
使有机物或还原性无机物氧化为无害物质，对于难降解有毒有机物转化有意义。

❖ 间接氧化

阳极反应产生有强氧化作用的中间产物，使污染物被氧化为无害物质。

2.2 电化学还原（阴极过程）

电催化ORR机理及催化剂



ORR机理:

2e-ORR: *OOH直接脱附生成H₂O₂

4e-ORR: O-O键断裂生成*O中间体，继而经*OH中间态最终完全还原为H₂O

电催化剂:

高活性

高选择性

高稳定性

成本

贵金属及其合金: 催化性能优异，但成本高昂，资源稀缺

碳材料: 可原子调控，电化学性能稳定，来源丰富

电 - Fenton

电Fenton法是利用电解产生双氧水或亚铁离子或者同时电生这两种物质，使之构成Fenton试剂。

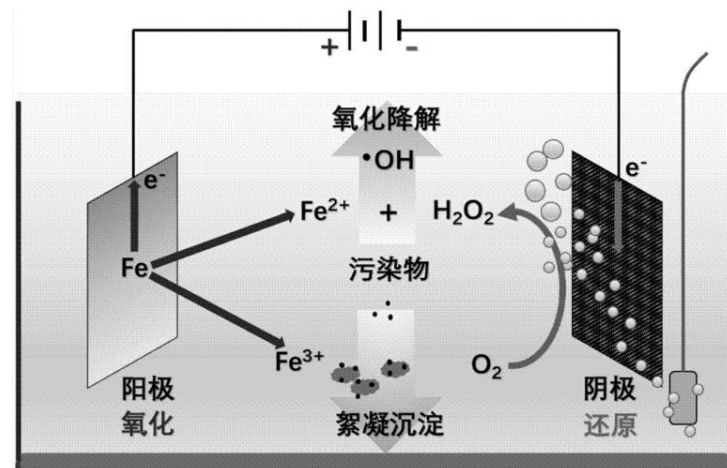
阴极反应：



阳极反应：



电生的 H_2O_2 和 Fe^{2+} 发生Fenton试剂反应：



2.3 金属离子的电化学还原

电化学基础

导体 通电时，在两电极中及电极与直流电源相连接的导线中，移动的导电粒子是金属导体中的自由电子。

溶液 电还原是通过电解质溶液中的离子分别在阴极和阳极表面发生氧化还原反应而进行的过程。

阴极反应：



阳极反应：

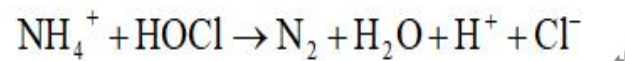
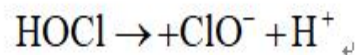
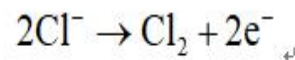
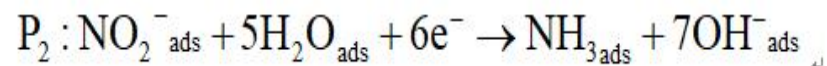
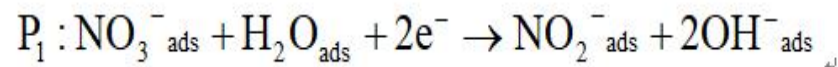
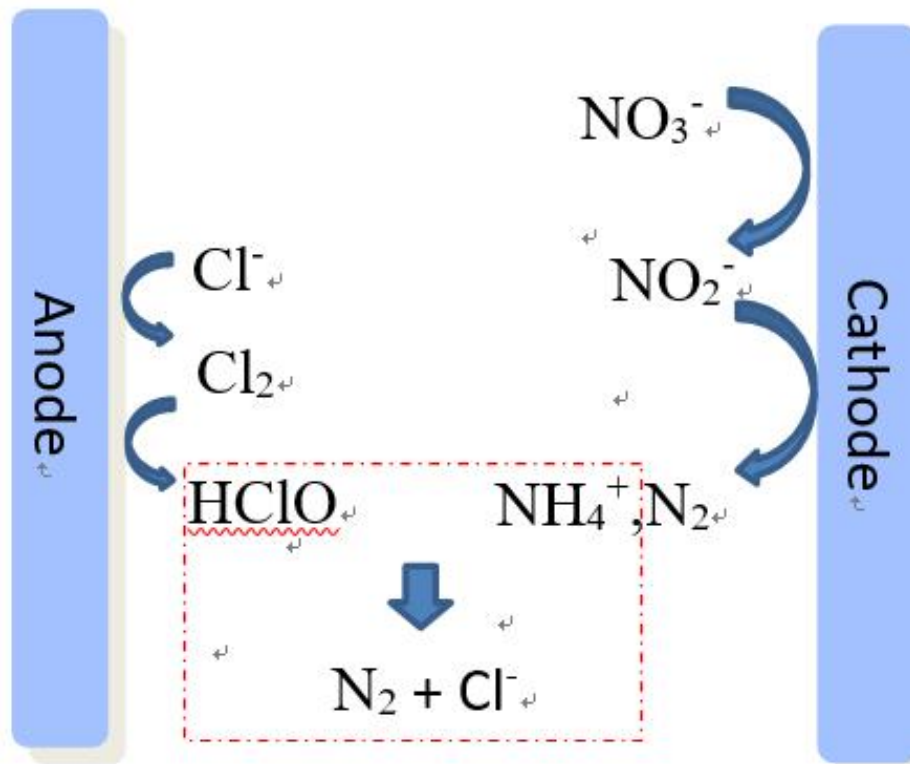


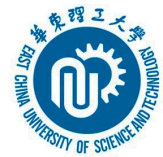
例如含镍废水：



2.4 电化学法还原--去除硝态氮

电化学阴极过程，硝态氮电化学还原反应生成氨氮和氮气，在氯离子催化作用下，氨氮再次转化为氮气，最终硝态氮均转化为氮气。





$\text{Cu}_x\text{Fe}_y/\text{NF}$ 电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究



电极的制备和表征

原位电化学共沉积法 (-0.6 / -1.7 V)

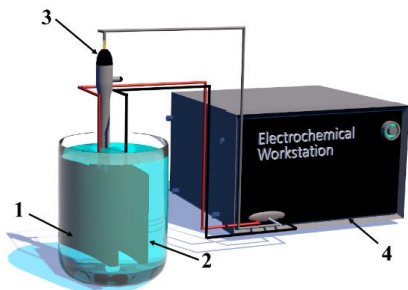


图 3.1 电化学沉积实验装置图：(1) 铂板；(2) NF；
(3) Ag/AgCl 电极；(4) 电化学工作站

电化学还原性能测试系统

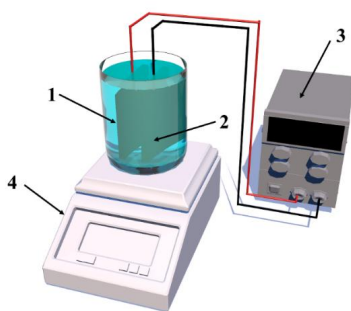


图3.2 硝酸还原实验装置图：(1) 钉钽钛板阳极；(2) $\text{Cu}_x\text{Fe}_y/\text{NF}$ 阴极；(3) 电源；(4) 磁力搅拌器

$\text{Cu}_x\text{Fe}_y/\text{NF}$ 电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

$\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ (-0.6 V)

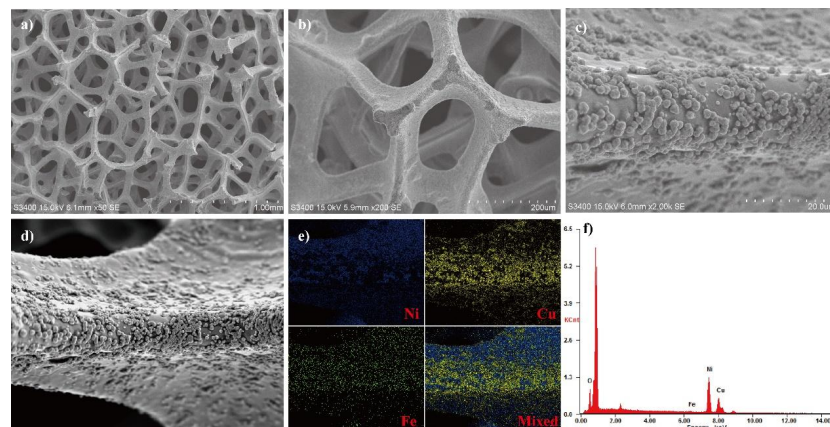


图 3.3 (a-d) $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ (-0.6 V) 的扫描电镜图像；(e) $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ (-0.6 V) 电极的铜、铁和镍元素图谱；(f) $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ (-0.6 V) 的EDS图谱

-0.6 V 电压下，无法得到分布均匀、比例符合要求的 Cu_xFe_y 催化剂



电极表征

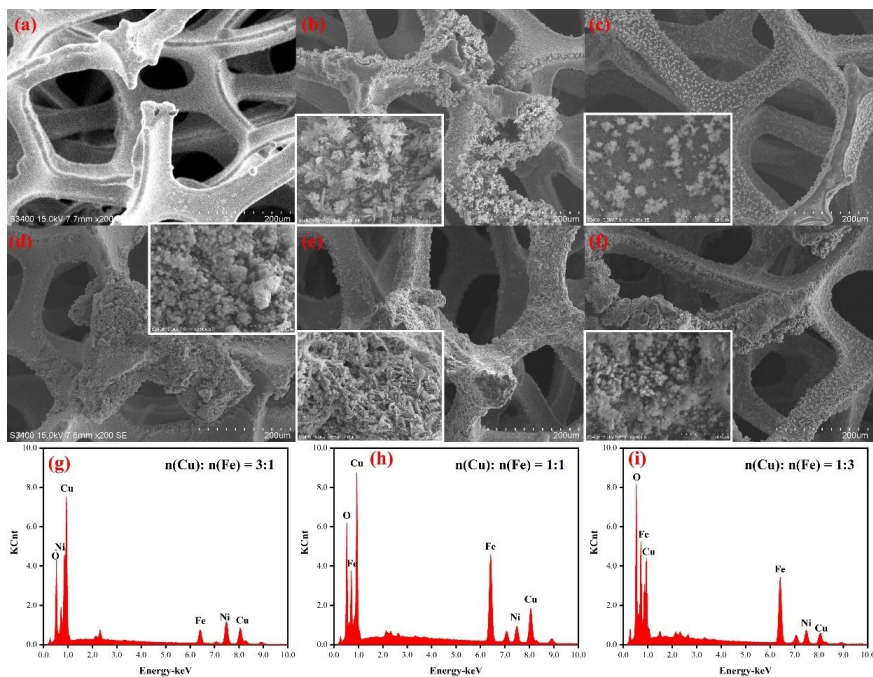


图3.4 (a) NF, (b) Cu/NF, (c) $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$, (d) $\text{Cu}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{NF}$, (e) $\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{75}/\text{NF}$ 和 (f) Fe/NF 的SEM图像; (g) $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$, (h) $\text{Cu}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{NF}$ 和 (i) $\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{75}/\text{NF}$ 中的元素分布

在NF表面按比例原位电沉积得到 Cu_xFe_y

$\text{Cu}_x\text{Fe}_y/\text{NF}$ 电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

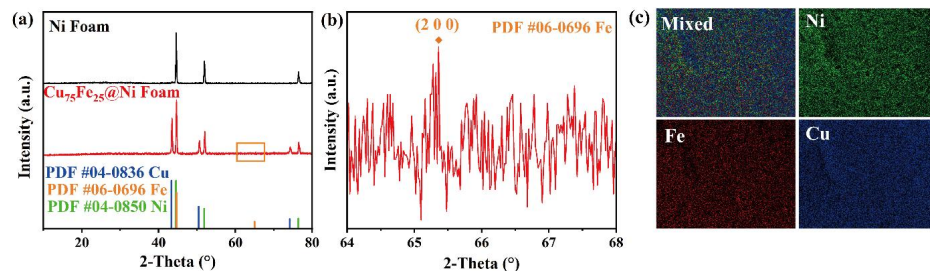


图3.5 (a) NF和 $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ 的XRD图谱; (b) $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ 中的Fe峰; (c) $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ 电极的铜、铁和镍元素图谱

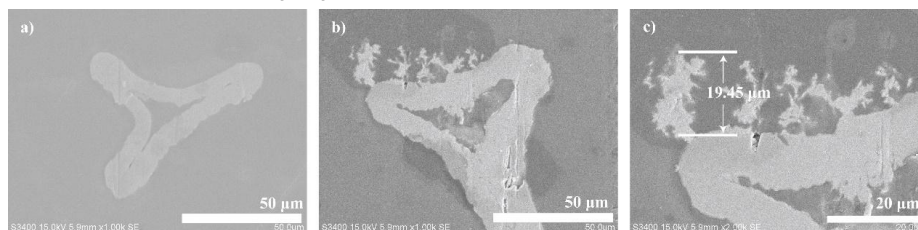


图 3.6 (a) NF、(b) (c) $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ 横截面的SEM图像

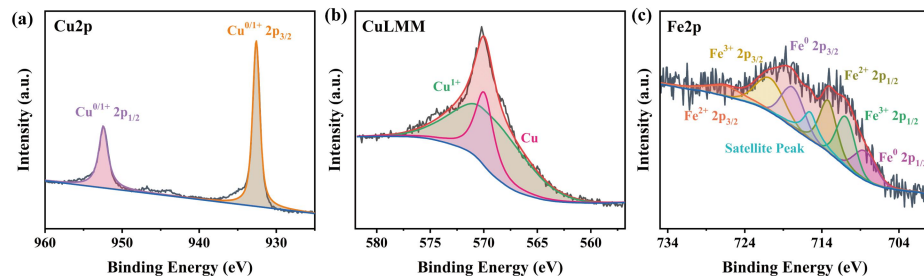


图3.7 $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}/\text{NF}$ 的XPS图谱: (a) Cu 2p, (b) Cu LMM和 (c) Fe 2p



电化学还原硝酸盐氮性能

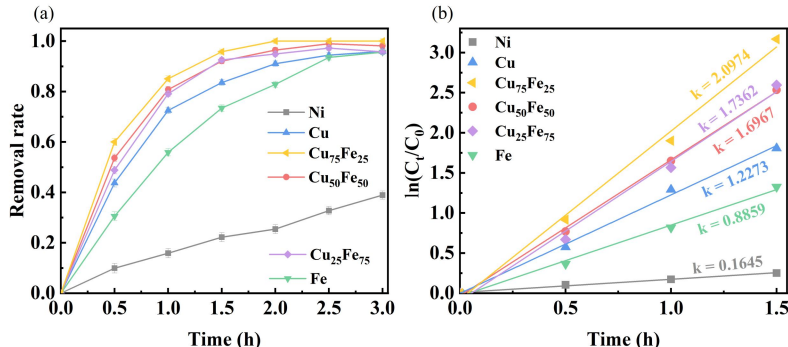
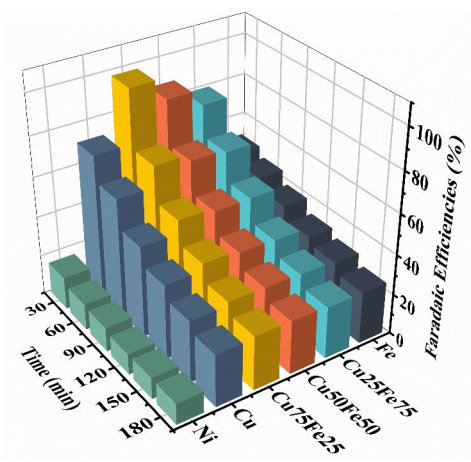


图3.8 NF, Cu/NF, Cu₇₅Fe₂₅/NF, Cu₅₀Fe₅₀/NF, Cu₂₅Fe₇₅/NF和Fe/NF的 (a) 电化学还原硝酸盐氮的去除率和 (b) 拟一级动力学系数



Cu_xFe_y具有更快的反应速率和更高的法拉第效率

图3.9 NF, Cu/NF, Cu₇₅Fe₂₅/NF, Cu₅₀Fe₅₀/NF, Cu₂₅Fe₇₅/NF和Fe/NF的法拉第电流效率

Cu_xFe_y/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

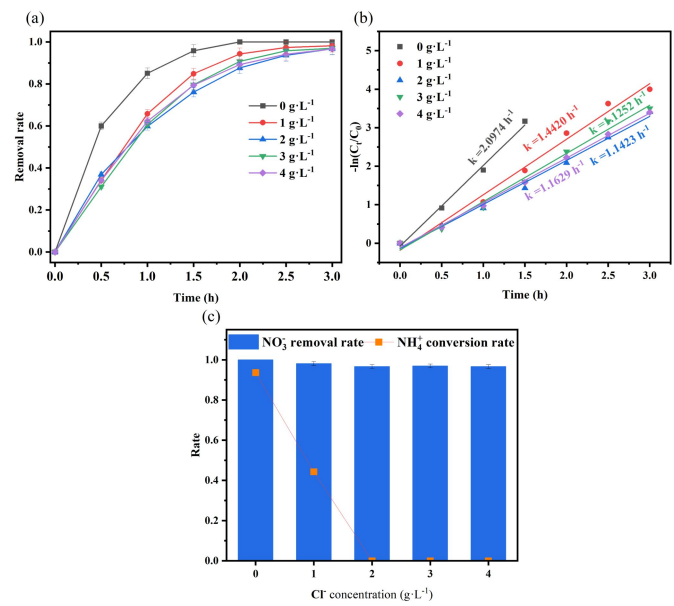


图3.10 Cu₇₅Fe₂₅/NF在不同氯离子浓度下 (a) 电化学还原硝酸盐的性能, (b) 还原速率和 (c) 硝酸盐氮去除率和电解产物的选择性

折点加氯促进还原产物中的氨100%被转化为氮气



电化学还原硝酸盐氮性能

Cu_xFe_y/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

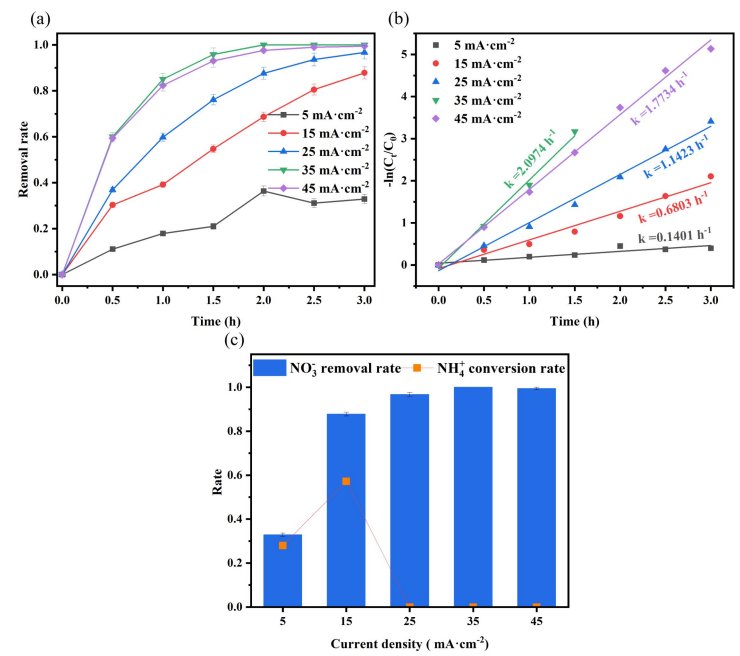


图3.11 Cu₇₅Fe₂₅/NF在不同电流密度 (a) 电化学还原硝酸盐的性能, (b) 还原速率和 (c) 硝酸盐氮去除率和电解产物的选择性

增强电极表面电子传递, 反应速度上
限受到电极表面活性位点数量限制

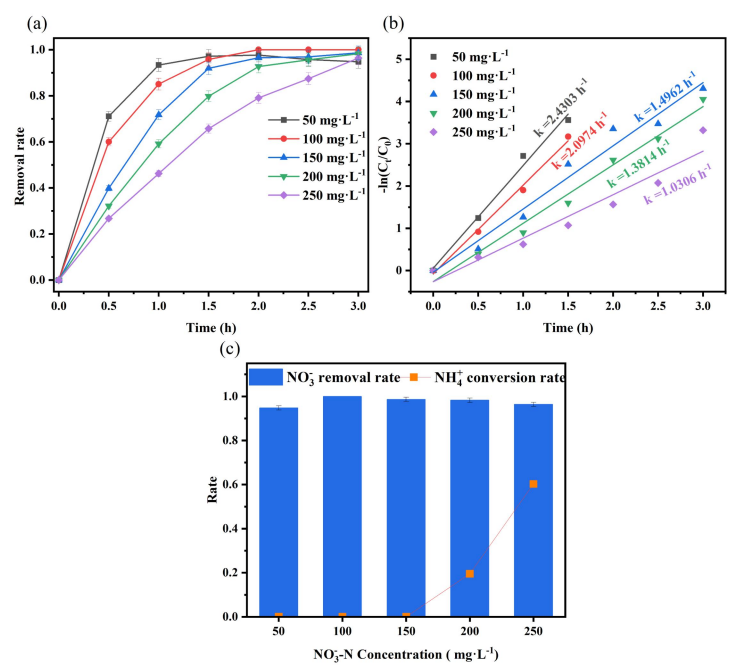


图3.12 Cu₇₅Fe₂₅/NF在初始硝酸盐浓度下 (a) 电化学还原硝酸盐的性能, (b) 还原速率和 (c) 硝酸盐氮去除率和电解产物的选择性

增强传质提高单位时间还
原量, 但还原率下降



Cu_xFe_y/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

受pH影响小，中性条件下
反应速率最快

电极在24h的耐久实验中
表现出良好的稳定性

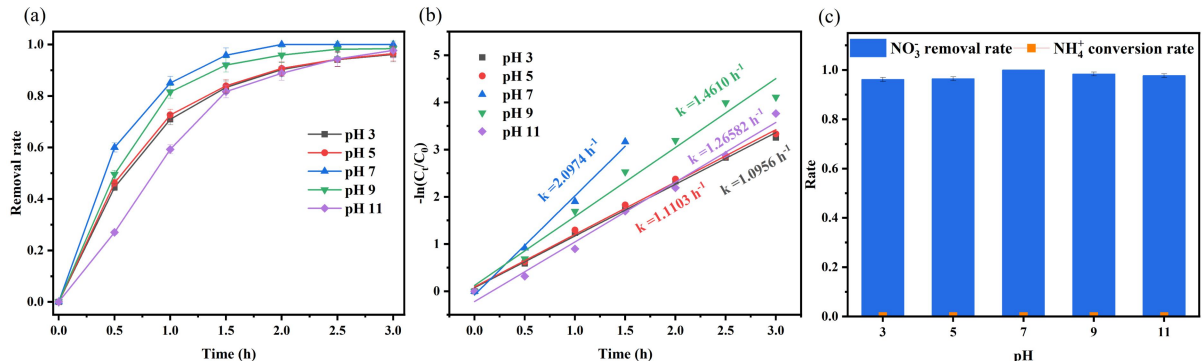


图3.13 Cu₇₅Fe₂₅/NF在不同pH下 (a) 电化学还原硝酸盐的性能， (b) 还原速率和 (c) 硝酸盐氮去除率和电解产物的选择性

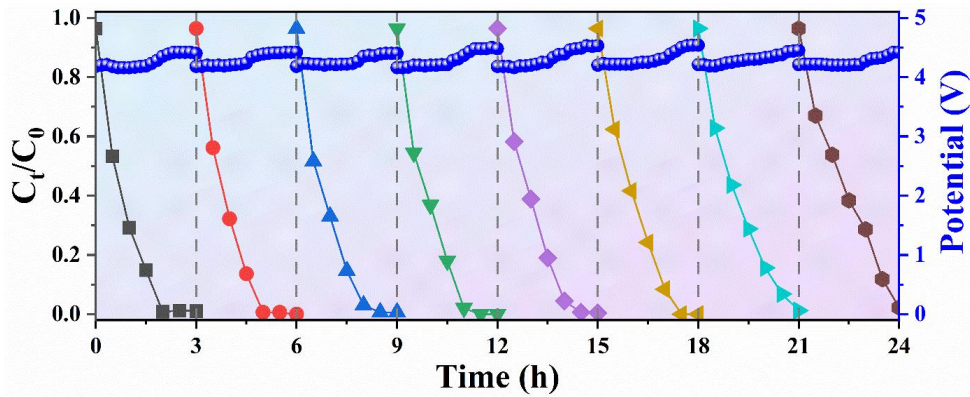


图3.14 Cu₇₅Fe₂₅/NF电化学还原硝酸盐的稳定性

Cu_xFe_y/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

电化学分析

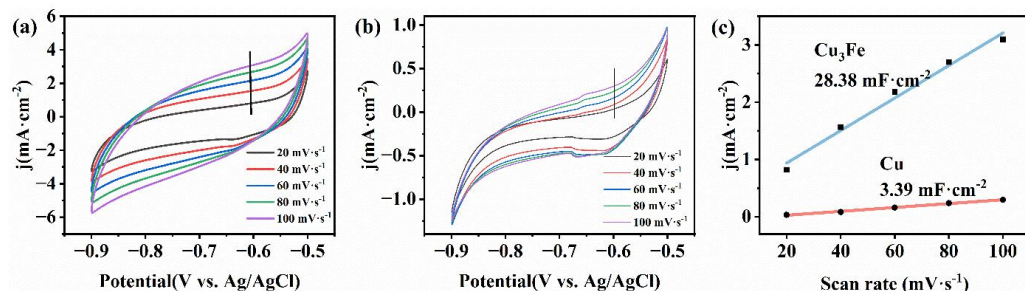


图3.15 不同扫描速率下 (a) Cu₇₅Fe₂₅和 (b) Cu的CV曲线; (c) 催化剂电容电流与扫描速率的线性拟合

K-L 分析结果

催化剂	电位 (V vs. Ag/AgCl)	斜率 (mA · s ^{0.5})	截距 (cm ⁻² · mA ⁻¹)	电子转移数
Cu ₇₅ Fe ₂₅	-1.4	0.33	0.0073	6.3
Cu	-1.4	0.43	0.0084	4.8

- Cu₇₅Fe₂₅催化剂具有更高的C_{dl}和ECSA
- LSV和CV结果表明其对硝酸盐具有出色的催化活性
- 还原过程涉及一个6e⁻过程，反应路径宏观为：

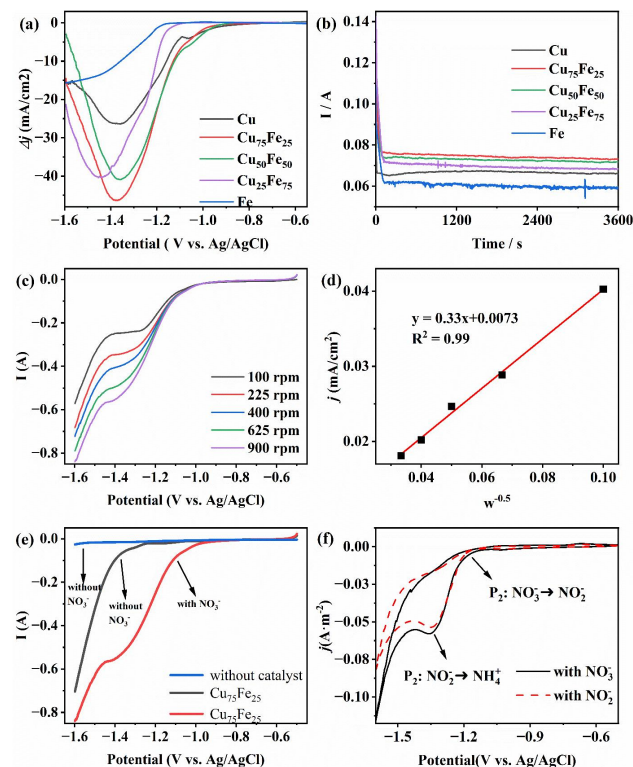
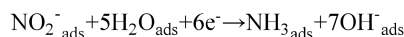
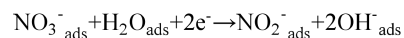


图3.16 (a) IR修正并减去氢还原电流后的NO₃-RR伏安图j-V图; (b) i-t图; (c) Cu₇₅Fe₂₅催化剂在不同转速的RDE上硝酸盐还原的附加j-V图; (d) Cu₇₅Fe₂₅上NO₃⁻还原的K-L分析结果; (e) NO₃⁻还原的j-V图; (f) Cu₇₅Fe₂₅和纯铜催化剂在10 mM NO₃⁻中的CV



反应路径和增强机制

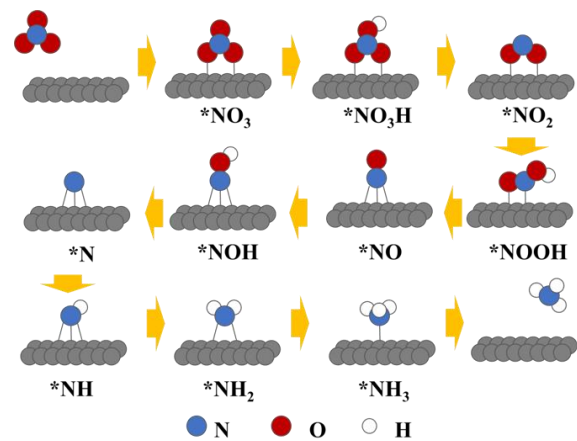


图3.17 $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}$ 表面 NO_3^- 的吸附和反应路径

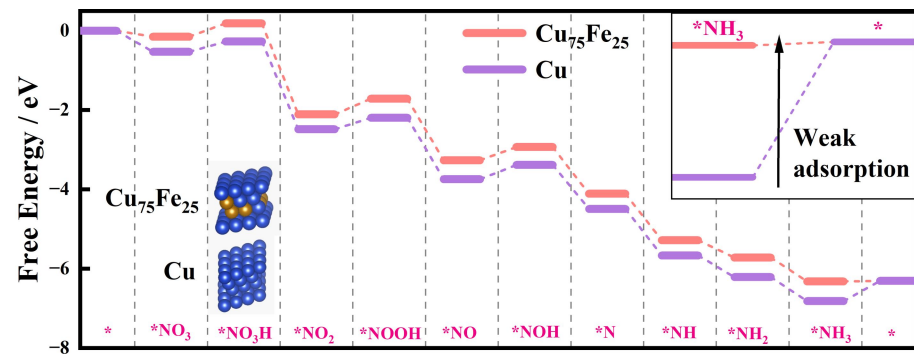


图3.18 $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}$ 和Cu表面不同中间产物的反应自由能

$\text{Cu}_x\text{Fe}_y/\text{NF}$ 电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

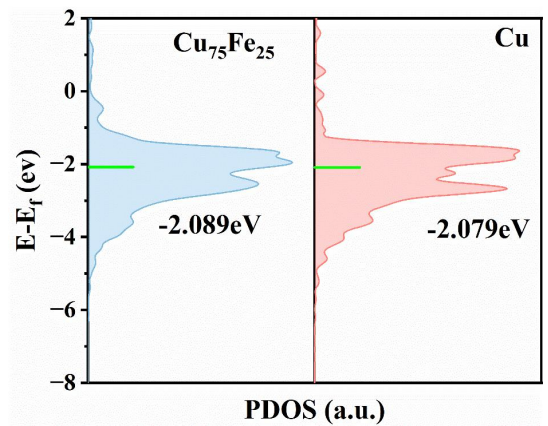


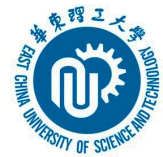
图3.19 $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}$ 和Cu的态密度 (PDOS) 和d带中心

增强机制

Cu d带中心向深层移动削弱了氨的吸附能，从而有助于释放出产物 NH_3 ，使活性位点暴露出来，从而使 $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}$ 比Cu具有更优越的 NO_3^- -RR性能。

小结

- ◆ 通过电化学共沉积方法在NF表面制备了一系列 Cu_xFe_y ，并**通过溶液中 CuSO_4 与 FeSO_4 的比例控制其组成**。该制备方法快速简单，可降低材料成本。
- ◆ 制备的 $\text{Cu}_x\text{Fe}_y/\text{NF}$ 电极在不同条件下对硝酸盐还原均表现出较高的电催化活性。在**2 h内98.4%还原硝酸盐**，30 min内电流效率达到98.01%，60 min内电流效率达到69.47%，具有良好的稳定性。
- ◆ **$\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}$ 的 C_{dl} 和ECSA更大**， NO_3^- 在其表面还原首先通过 $2e^-$ 转移转化为 NO_2^- ，然后通过 $6e^-$ 转移转化为 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 。
- ◆ 由于铜的**d带中心的铁偏移**导致 $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}$ 对氨的吸附能量比Cu弱， $\text{Cu}_{75}\text{Fe}_{25}$ 在 NO_3^- 还原成 NH_3 方面具有更高的活性和选择性。



Cu/Fe(OH)₃/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究



Cu/Fe(OH)₃/NF电极的制备 及其电化学还原硝酸盐氮研究

- 由于**无定形结构**和羟基与NO₃⁻中氧的**氢键**，Fe(OH)₃具有**出色的硝酸盐吸附能力**。
- 但同时Fe(OH)₃还表现出良好析氢性能，这会阻碍硝酸盐在其表面的电化学还原。
- 通过掺杂Cu增强Fe(OH)₃的硝酸盐还原性能，**减弱析氢性能**。

原位化学制备

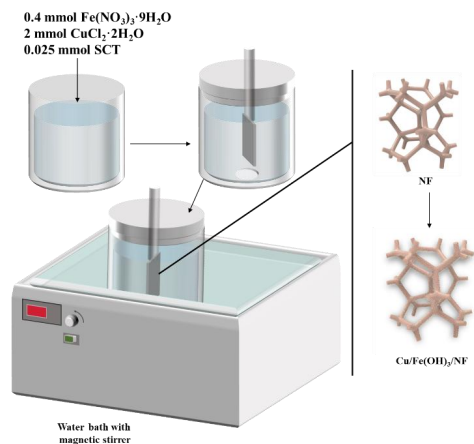


图4.1 Cu/Fe(OH)₃/NF的制备过程

电化学还原性能测试

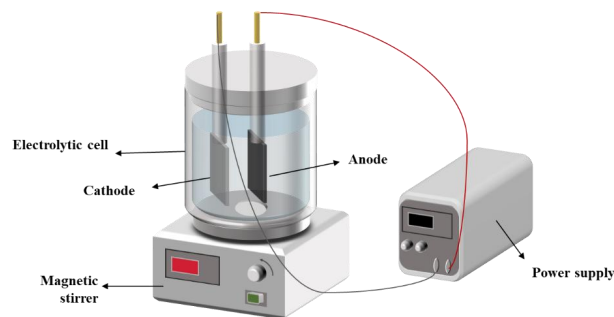


图4.2 电化学硝酸盐还原反应器

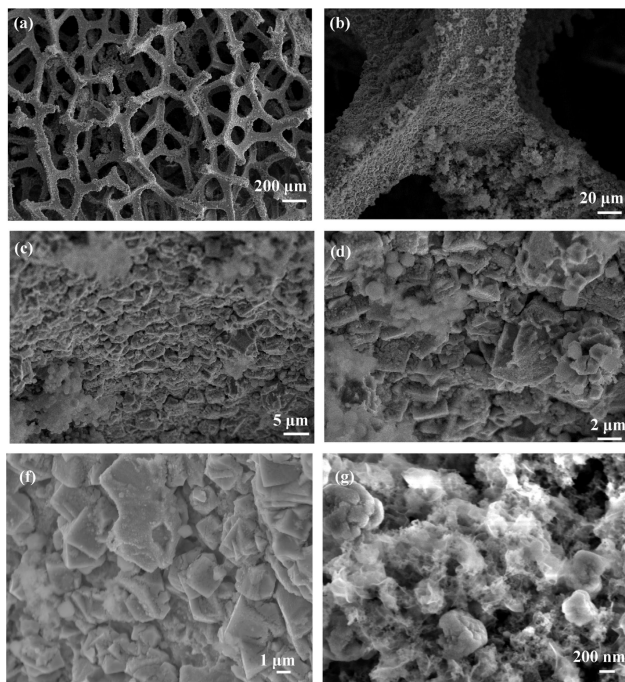


图4.3 Cu/Fe(OH)₃/NF电极的SEM图像

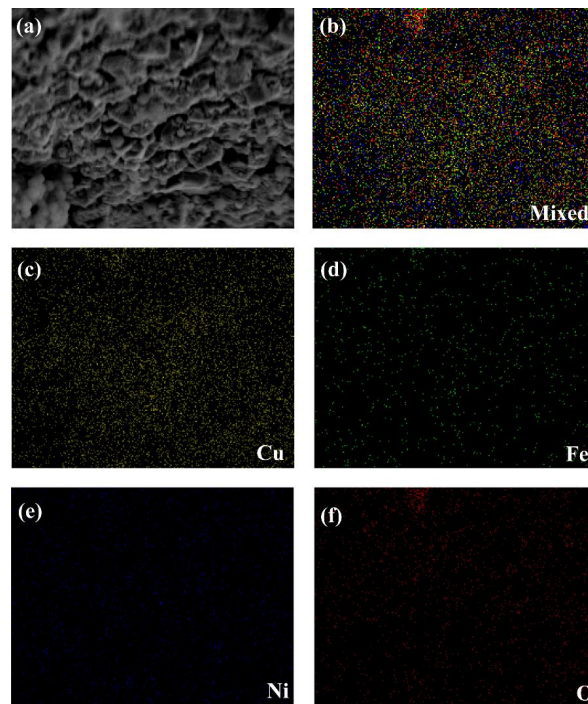


图4.4 Cu/Fe(OH)₃/NF电极的 (a) SEM图像, (b) 元素图谱, (c) 铜、(d) 铁和 (e) 镍和 (f) 氧单元素图谱

在NF表面使用化学法原位制备了Cu/Fe (OH)₃

Cu/Fe(OH)₃/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

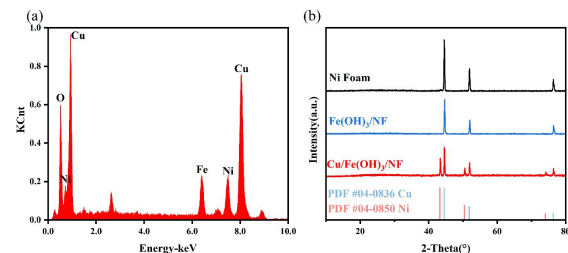


图4.5 Cu/Fe(OH)₃/NF电极的 (a) EDS和 (b) XRD结果

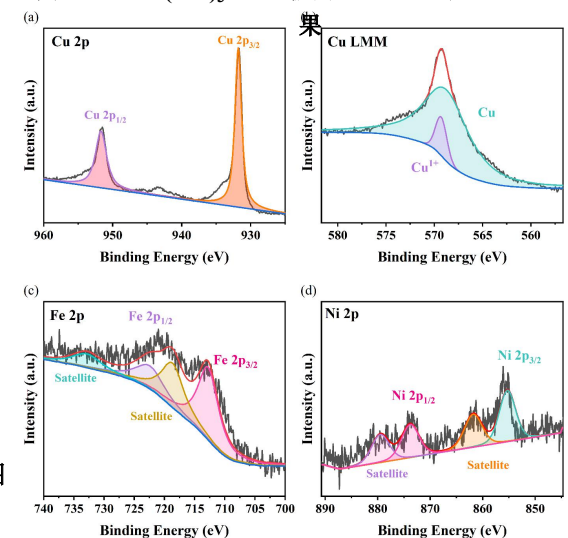
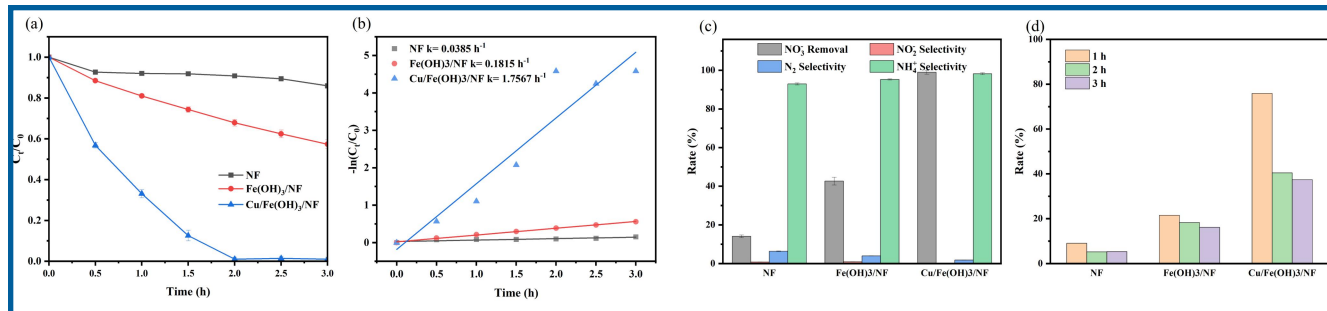


图4.6 Cu/Fe(OH)₃/NF的XPS图谱: (a) Cu 2p, (b) Cu LMM, (c) Fe 2p和 (d) Ni 2p



电化学还原硝酸盐氮性能

Cu/Fe(OH)₃/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究



Cu/Fe(OH)₃/NF具有更快的还原速率和更高的电流效率

图4.7 NF, Fe(OH)₃/NF和Cu/Fe(OH)₃/NF电极的 (a) 电化学还原硝酸盐的性能, (b) 还原速率, (c) 产物的选择性和 (d) 电流效率

电流密度

增强电极表明电子转移, 提高还原速率

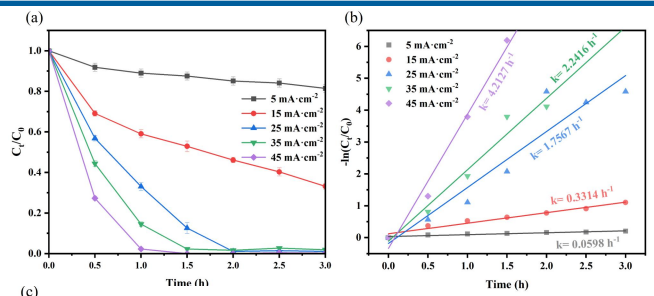


图4.9 Cu/Fe(OH)₃/NF在不同电流密度下 (a) 电化学还原硝酸盐的性能, (b) 还原速率和 (c) 产物的选择性

NO₃ 浓度

影响硝酸盐在溶液中的传质过程, 提高单位时间去除量, 但降低去除率

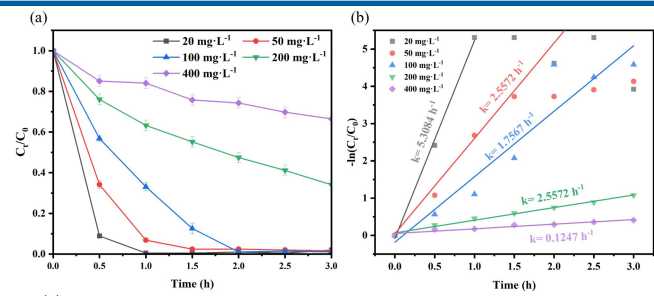


图4.8 Cu/Fe(OH)₃/NF在不同初始硝酸盐氮浓度 (a) 电化学还原硝酸盐的性能, (b) 还原速率和 (c) 产物的选择性



电化学还原硝酸盐氮性能

Cl⁻

折点加氯影响产物的选择性和反应效率

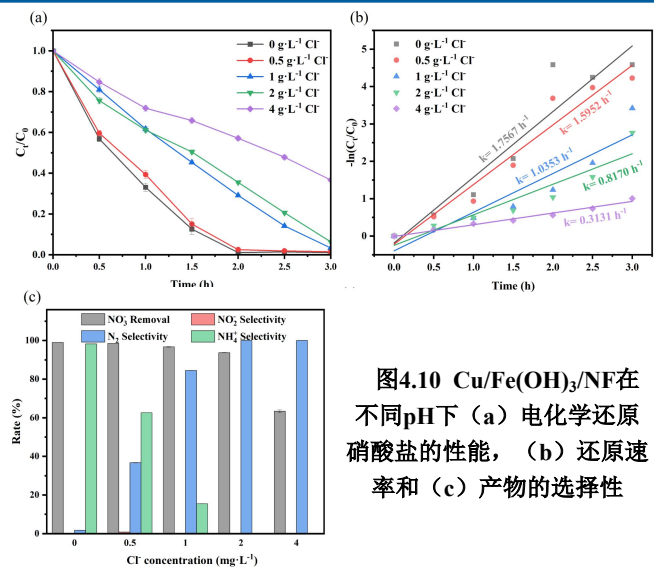


图4.10 Cu/Fe(OH)₃/NF在不同pH下 (a) 电化学还原硝酸盐的性能, (b) 还原速率和 (c) 产物的选择性

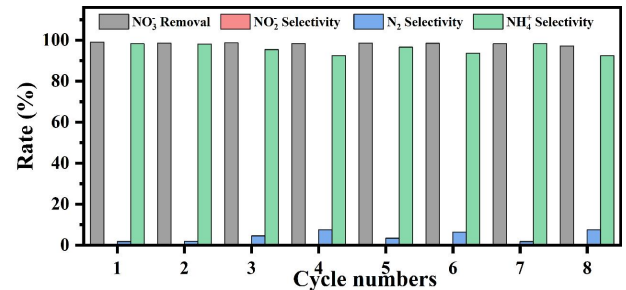


图4.12 Cu/Fe(OH)₃/NF电化学还原硝酸盐的稳定性

Cu/Fe(OH)₃/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

pH

影响阴极表面的析氢反应, 活性氢在反应中产生作用

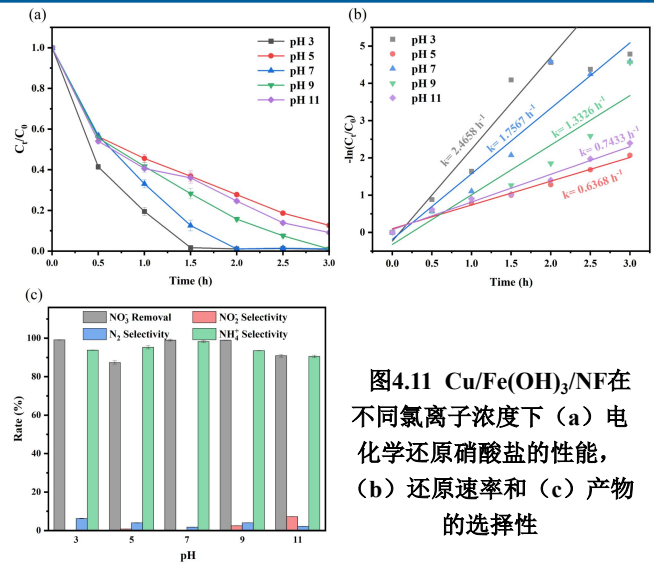


图4.11 Cu/Fe(OH)₃/NF在不同氯离子浓度下 (a) 电化学还原硝酸盐的性能, (b) 还原速率和 (c) 产物的选择性

24h重复实验中, 硝酸盐去除率从98.98%下降到97.15%, 表明材料具有良好的可重复使用性和优异的产物选择性。



电化学分析和反应过程

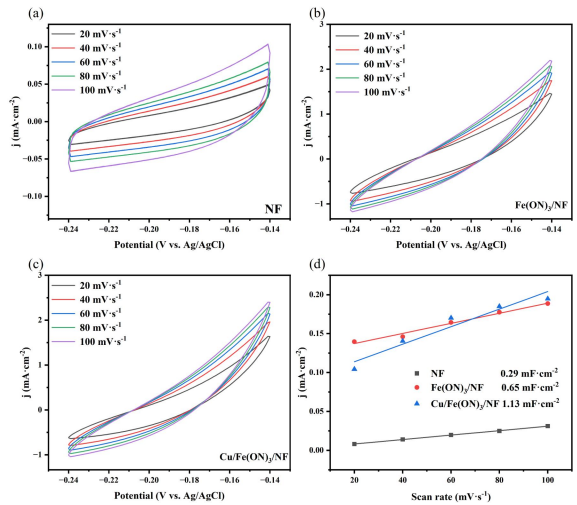


图4.13 不同扫描速率下 (a) NF, (b) Fe(OH)₃/NF和 (c) Cu/Fe(OH)₃/NF的CV曲线; (d) 催化剂电容电流与扫描速率的线性拟合

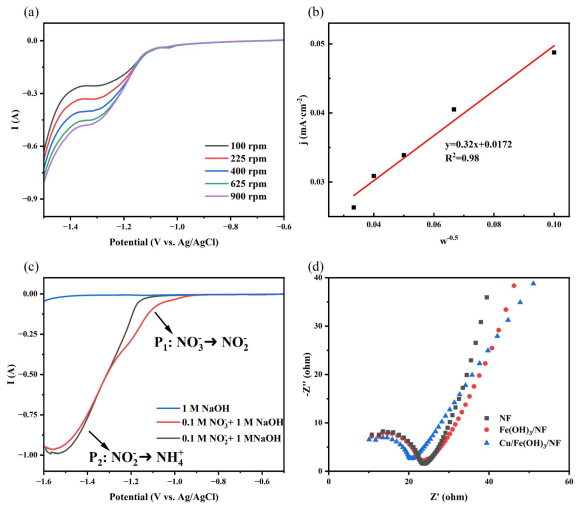


图4.14 Cu/Fe(OH)₃的 (a) 不同转速下的LSV曲线; (b) K-L分析结果和 (c) 不同溶液中的LSV曲线; (d) NF, Fe(OH)₃/NF和Cu/Fe(OH)₃/NF电极的奈奎斯特曲线

Cu/Fe(OH)₃/NF 具有更高的C_{dl}和ECSA, 更低的电阻, 电子转移数为6.5, 表明电极表面存在6e⁻转移过程

Cu/Fe(OH)₃/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

反应过程

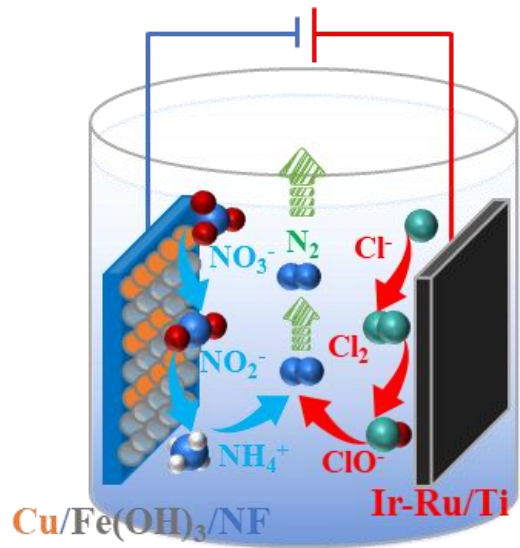
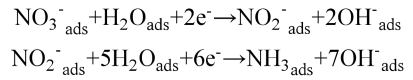


图4.15 Cu/Fe(OH)₃/NF上的硝酸盐电化学还原路径和电化学系统中折点加氢过程



反应路径和增强机制

Cu/Fe(OH)₃/NF电极的制备及其电化学还原硝酸盐氮研究

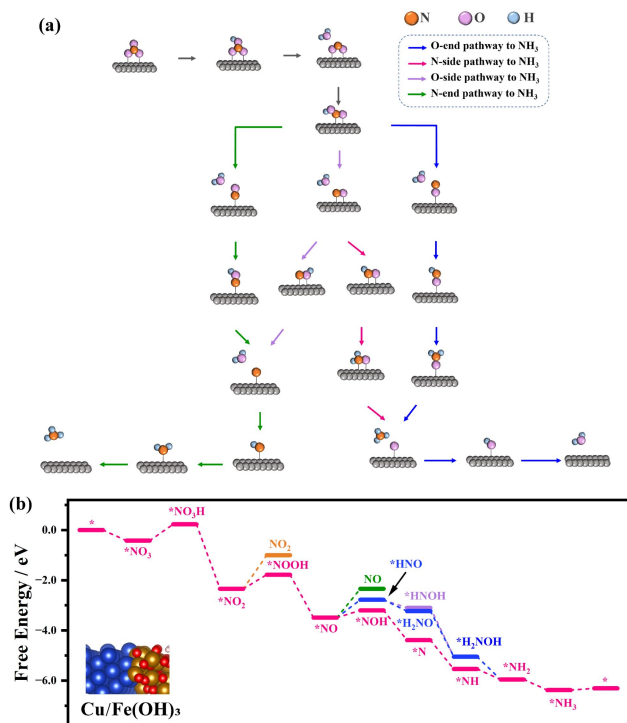


图4.16 (a) 硝酸根离子在Cu/Fe(OH)₃表面的四种反应路径；(b) 硝酸根离子在Cu/Fe(OH)₃表面的四种反应路径的吉布斯自由能变化

**更小的PDS、强硝酸盐吸附和弱氨吸附性能，
强活性氢吸附阻碍HER**

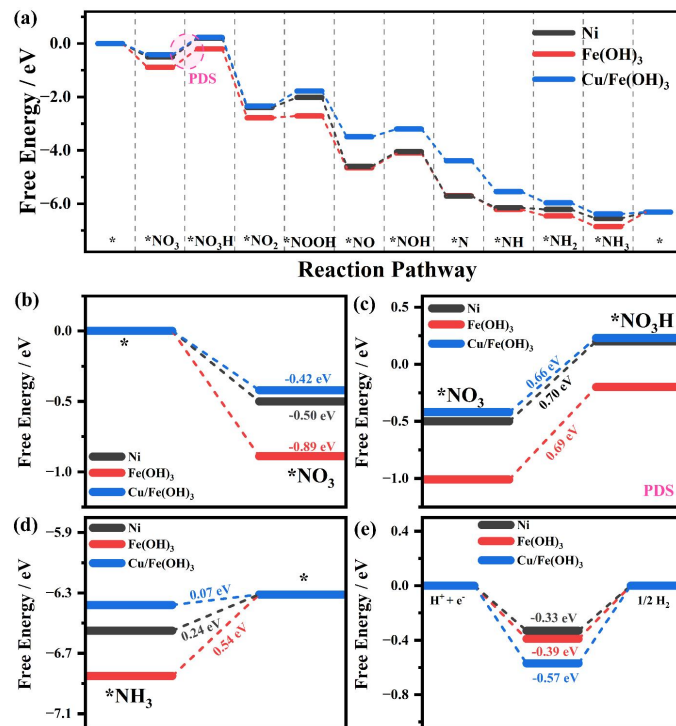


图4.17 Ni, Fe(OH)₃和Cu/Fe(OH)₃的 (a) 表面硝酸盐还原过程的自由能变化ΔG；(b) 硝酸盐表面吸附自由能变化ΔG；(c) 速率决定步骤的自由能变化ΔG；(d) 氨从表面脱附的自由能变化ΔG；(e) 表面析氢反应的自由能变化ΔG

目录

1. 电催化还原基本原理
2. 电催化还原装备
3. 案例：高氮废水处理
4. 总结

华东理工大学多元催化电化学技术应用总体情况

- ◆**内容：**研究氮元素的电化学形态转化与去除基础上，研发了**多元催化电化学**水处理系列装备，同时具有杀菌、脱硝氮与氨氮、降COD、除垢、调节pH值的功能。
- ◆**亮点：**建立**30**个工程案例，20~600T/d。如“**雪龙2号**”极地考察船淡水舱电化学净化保鲜装置，300T/d。



电化学装备

- (1)发明专利, ZL200910197470.0 (授权)
- (2)发明专利, ZL201110121885.7 (授权)
- (3)发明专利, ZL200910045664.5 (授权)
- (4)实用新型, ZL200920067256.9 (授权)
- (5)实用新型, ZL200920067257.3 (授权)
- (6)发明专利, CN201610893677.1 (公开)
- (7)实用新型, CN201621119819.0 (实审)
- (8)发明专利, CN201710220392.6 (实审)
- (9)发明专利, CN201710220401.1 (实审)
- (10)实用新型, CN201721354039.5 (实审)
- (11)实用新型, CN201721354313.0 (实审)

专利情况



工程实践

4.1 深度水处理专用电化学反应器

适应范围:

主要用于生化后出水的提标改造（深度处理），能同时实现去氨氮、脱色、去COD，降总氮等。包括：

- ①医药废水、化工废水、垃圾渗滤液生化后出水深度处理，同步除COD与脱氮功能。
- ②工业及医疗废水排放前的杀菌消毒、
- ③低有机物条件下高浓度硝态氮及氨氮去除，
- ④洗涤废水、洗浴废水、游泳池水及农村饮用水的杀菌。



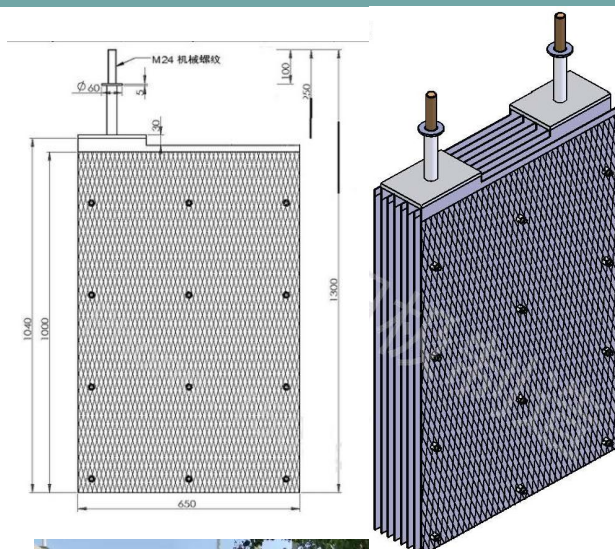
型号	尺寸	电源	处理能力	自控配置		
				基本型	数字型	智能型
JF-DCHX01	1500x1450 x1800 mm	380V 三相五 线制最大功 率：15KW	10-40m³/d （视水质情 况）	配置PLC 自动控制 系统	数据实时监 测功能，可 选传感器有 PH、ORP、 电导率等	数字型+物 联网云平台， 实现远程手 机实时监控 功能
JF-DCHX02	2500x1450 x1800 mm	380V 三相五 线制最大功 率：30KW	20-60m³/d （视水质情 况）	配置PLC 自动控制 系统	数据实时监 测功能，可 选传感器有 PH、ORP、 电导率等	数字型+物 联网云平台， 实现远程手 机实时监控 功能



3.4 电化学法处理废水工艺装置工业应用案例

案例. 浙江某垃圾渗漏液处理站废水治理项目

原水中含氨氮
 300 mg/L ,
 $\text{COD } 200\text{ mg/L}$ 。
经过该电化学反应器后，**氨氮态小于 20 mg/L** ，**COD 小于 100 mg/L** 。

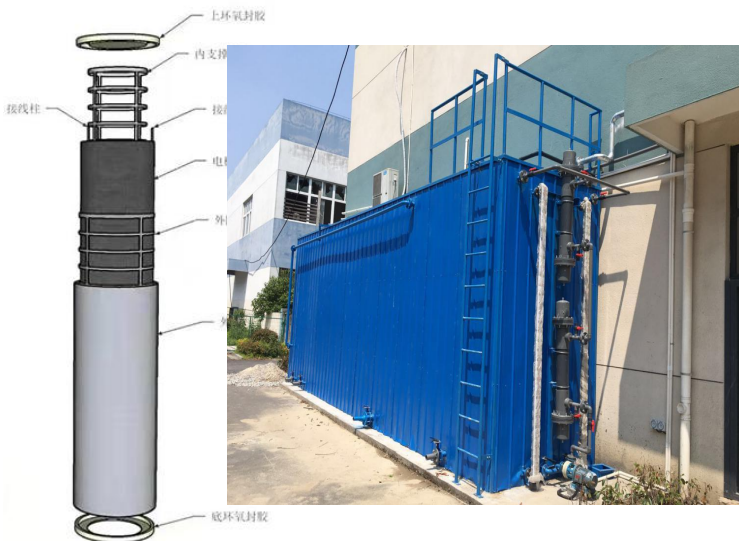


4.2 脱氮专用电化学反应器

适应范围:

主要用于脱氮，可以去除氨氮、硝氮、亚硝氮等无机氮。如：

- (1) 高浓度总氮工业废水，高N/C比工业废水；
- (2) 含硝态杂质的工业废盐或工业废水净化；
- (3) 含亚硝态氮的废盐或废盐水净化后资源化；
- (4) 工艺母液的脱氮处理。



型号	尺寸	电源	处理能力	自控配置		
				基本型	数字型	智能型
JF-DCT01	φ200 L1300 mm	380V 三相五 线制最大功 率：4KW	1-10m³/d (视水质情 况)	配置PLC 自动控制 系统	数据实时监 测功能，可 选传感器有 PH、ORP、 电导率等	数字型+物 联网云平台， 实现远程手 机实时监控 功能
JF-DCT02	φ300 L1300 mm	380V 三相五 线制最大功 率：6KW	2-20m³/d (视水质情 况)	配置PLC 自动控制 系统	数据实时监 测功能，可 选传感器有 PH、ORP、 电导率等	数字型+物 联网云平台， 实现远程手 机实时监控 功能



3.4 电化学法处理废水工艺装置工业应用案例

案例. 浙江某垃圾渗漏液处理站废水治理项目

原水中含氨氮态
 2000 mg/L ，经过
MBR膜生物反应器处理后，
氨氮态仍大于
 100 mg/L ，总氮约为
 300 mg/L 。经过该电化
学反应器后，氨氮态小
于 25 mg/L ，总氮小于为
 50 mg/L 。



4.3 电絮凝反应器

适应范围:

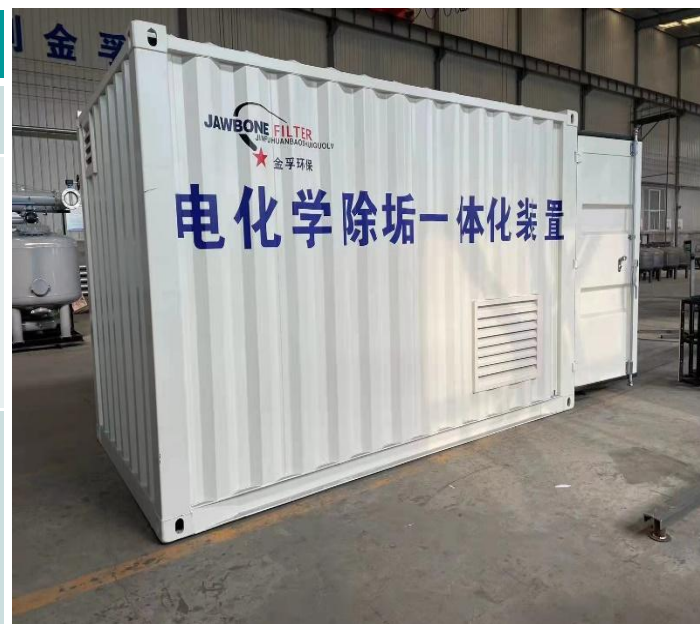
主要用于污废水处理的预处理和深度处理中，适用范围包括：含煤废水、洗车废水、印染废水、油田废水、有色金属冶炼业废水、电子行业化学机械磨光废水、造纸废水、含硼废水、含磷废水、含高油脂的餐饮废水、金属表面加工废水等的处理。



型号	处理水量 吨/h	处理前ss mg/L	处理后ss mg/L	澄清装置 选配	絮凝功率 Kw
JEC-01	1	≤3000	≤10	JFC-02	0.75
JEC-05	5	≤3000	≤10	JFC-10	1.5
JEC-10	10	≤3000	≤10	JFC-20	2.2
JEC-20	20	≤3000	≤10	JFC-40	3.0
JEC-50	50	≤3000	≤10	JFC-100	7.5

4.4 电化学除垢反应器

型号	尺寸	电源	处理能力	自控配置		
				基本型	数字型	智能型
JF-DCG-25	电动刮刀	380V AC最大功率：2KW	25 m ³ /h	配置PLC自动控制系统	数据实时监测功能，可选传感器有PH、ORP、电导率等	数字型+物联网云平台，实现远程手机实时监控功能
JF-DCG-100	无刮刀	380V AC最大功率：6KW	100 m ³ /h	配置PLC自动控制系统	数据实时监测功能，可选传感器有PH、ORP、电导率等	数字型+物联网云平台，实现远程手机实时监控功能



适应范围：

主要用于应用于工业系统上,主要包括冶炼、冶金、石化、电力、化工、中央空调等各行业循环水的处理。

4.5 电化学除垢/过滤一体式反应器

适应范围:

主要用于循环冷却水工艺中除藻和过滤的要求，同时具有一定的阻垢效果。本产品高度集成电化学水处理技术和电刷式网式过滤技术，循环冷却水首先经过电化学反应器实现阻垢、灭藻功能，然后经过网式过滤器的精密不锈钢滤网过滤，有效去除水中的悬浮颗粒和藻类，降低浊度，使循环水水质得到改善。

型号	尺寸	电源	处理能力	自控配置		
				基本型	数字型	智能型
JF-DZG-25	电动刮刀	380V AC最大功率：1KW	25 m³/h	配置PLC自动控制系统	数据实时监测功能，可选传感器有PH、ORP、电导率等	数字型+物联网云平台，实现远程手机实时监控功能
JF-DZG-50	电动刮刀	380V AC最大功率：1KW	50 m³/h	配置PLC自动控制系统	数据实时监测功能，可选传感器有PH、ORP、电导率等	数字型+物联网云平台，实现远程手机实时监控功能



4.7 电激发臭氧催化专用电化学反应器

适应范围

主要用于用于电化学与臭氧催化协同工艺，适应于市政污水和工业废水的生化后出水的提标改造（由排放标准提升到环境水质标准）、微污染水体深度净化（发去异味），能同时实现去氨氮、脱色、去COD和去异味等能力。

用本电化学反应器，臭氧法**不再需要其它专用催化剂**。在低浓度废水深度处理方面具高效处理能力。



型号	尺寸	电源	处理能力	自控配置		
				基本型	数字型	智能型
JF-ECO	1100x1100 x1800 mm	380V 三相五 线制最大功 率：15KW	2-20万 m ³ /d（视 水质情况）	配置PLC 自动控制系统	数据实时监 测功能，可 选传感器有 PH、ORP、 电导率等	数字型+物 联网云平台， 实现远程手 机实时监控 功能

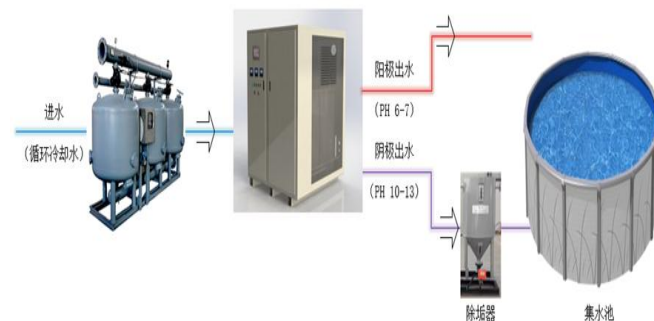
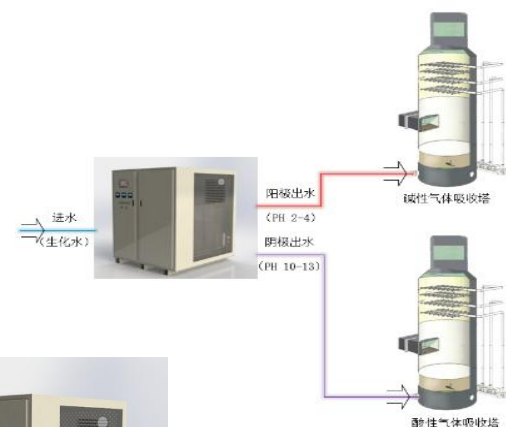
4.6 无药剂pH自动调节电化学反应器

1. 酸碱气体吸收塔：生化出水通过电化学反应制备酸性(pH2-4)与碱性(pH10-13)用于喷淋塔。无药剂、低成本、不增加废水盐度。

2. 反硝循环回流：生化出水通过电化学反应制备酸性与碱性。阳极出水(pH6-7)直接排放，COD可比原水下降5-20不等，阴极出水(pH8-10)作为反硝化循环水回流。

3. 循环冷却水除垢：循环冷却水经电化学反应制备酸性与碱性。阳极出水(pH6-7)回流集水池，完成杀菌、去除部分COD及调整pH值等三重功能；阴极出水(pH10-13)形成碳酸钙沉淀除垢。

4. 还可用于芬顿反应、铁碳反应池进水等其它需要调整pH值情况；以及衣服洗涤及工厂地面冲洗等灭菌需要。



目录

1. 电化学技术基本原理
2. 电化学水处理装备
3. 案例：高氮废水处理
4. 总结

2. 进出水质

设计处理量为 $60\text{m}^3/\text{d}$ ，其中浓水为 $15\text{-}20\text{ m}^3/\text{d}$ ，综合废水为 $35\text{-}40\text{ m}^3/\text{d}$ 。其进出水的水质指标如下表所示。处理后出水执行《污水综合排放标准》GB8978-1996的三级标准；其中银离子执行《电镀污染物排放标准》GB21900-2008的总银限值。

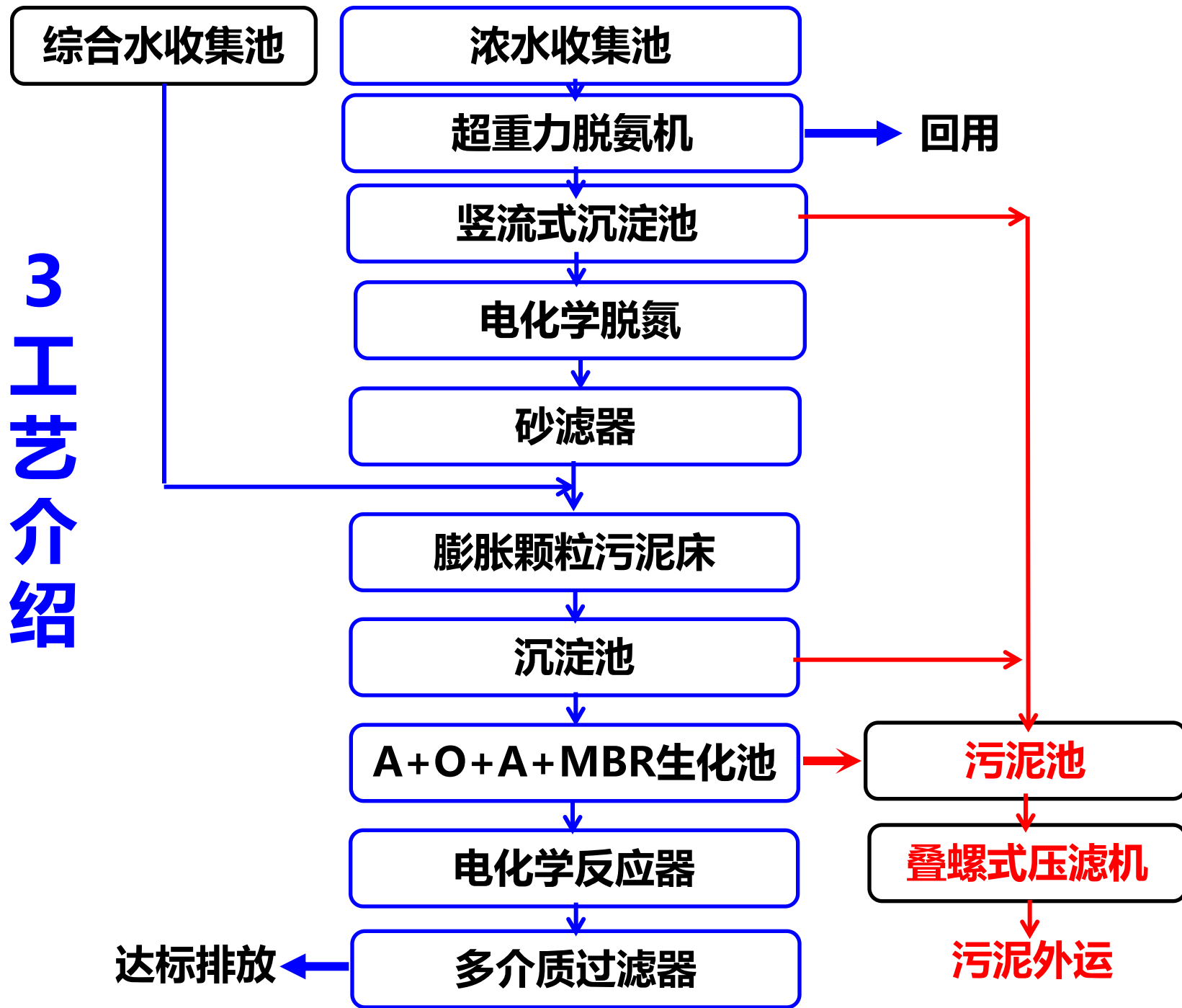
	pH	COD (mg/L)	氨氮(mg/L)	总氮(mg/L)	银离子 (mg/L)
浓水	11	13000	5000	4000	20
综合水	6-9	2600	500	1100	0.4
出水	6-9	500	45	70	0.1

案例一、进出水质

水质特点与处理难点分析：

- (1) 高氨氮：5000 mg/L，高硝态氮：4000mg/L
- (2) 高COD：13000mg/L
- (3) 有机物难生化降解。
- (4) 含银离子等重金属且与杀菌与抑菌作用：为氧化剂。

3 工艺介绍



3. 工艺介绍

3.1 高氨氮废水处理



超重力脱氨机：这是一款针对1-5%浓度氨氮废水处理专属设备。

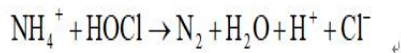
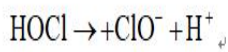
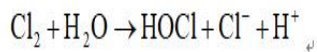
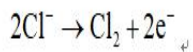
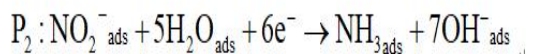
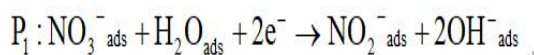
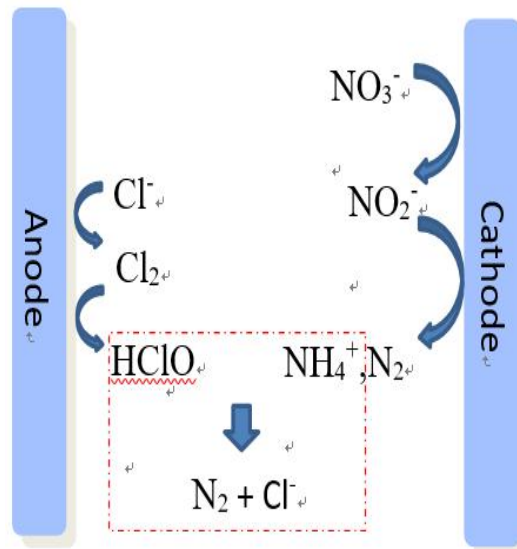
产生浓度为13-18%的氨水，处理后废水中含氨0.05-0.1%。

工作原理：利用**旋流**与加热使氨气解析，超重力场中逆流气体对氨水**吹脱**，实现脱氨。

实验结果：进水氨氮5000mg/L，处理后出水氨氮500-1000mg/L。

3. 工艺介绍

3.1 高氮废水处理



电化学脱氮： 阳极脱氮分为直接氧化与间接氧化两种；阴极过程可把硝态氮还原生成氨氮和氮气，在阳极辅助下氨氮再次转化为氮气。

实验结果： 进水氨氮 5000mg/L，处理后出水 500mg/L； 进水氨氮 1000mg/L，处理后出水 50mg/L。

4. 工程



中试进水5000mg/L硝态氮，该废水经电化学还原后，硝态氮大幅降低到300-1500mg/L，而后进入生物反硝化反应器，出水COD小于500mg/L，硝态氮小于50mg/L后纳管。



脱氮+除银

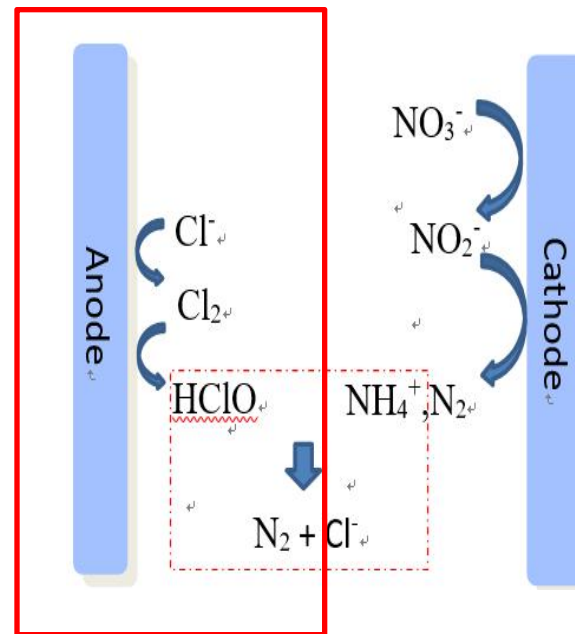
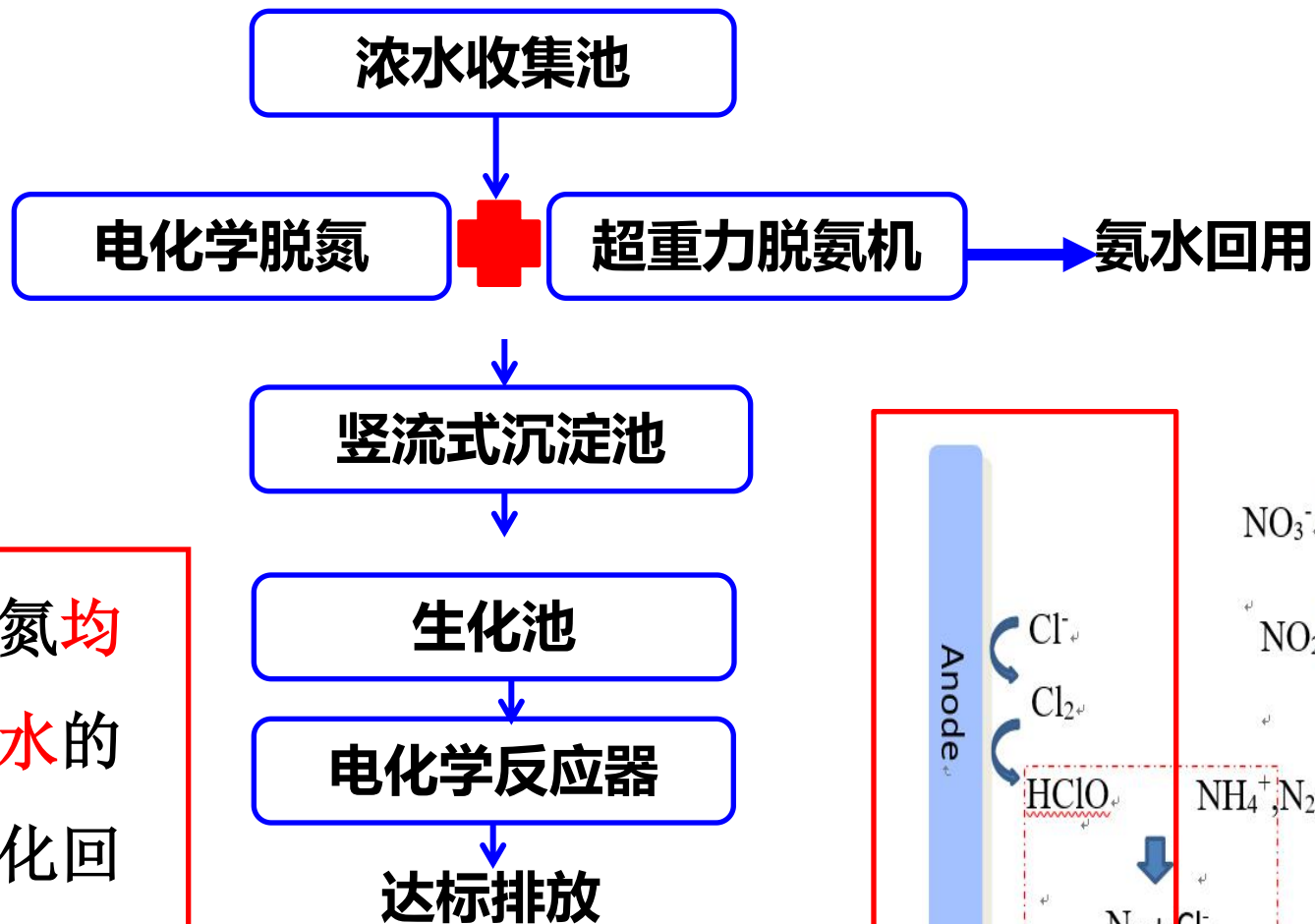
一期工程：进水5000mg/L氨氮且4000mg/L硝态氮，该废水经脱氮+电化学+生化处理后，出水COD小于100mg/L，总氮小于70mg/L。



4. 工程

二期工程

硝氮与氨氮均
最终以氨水的
形式资源化回
收，回用。



3. 工艺运行成本分析

运行成本分析

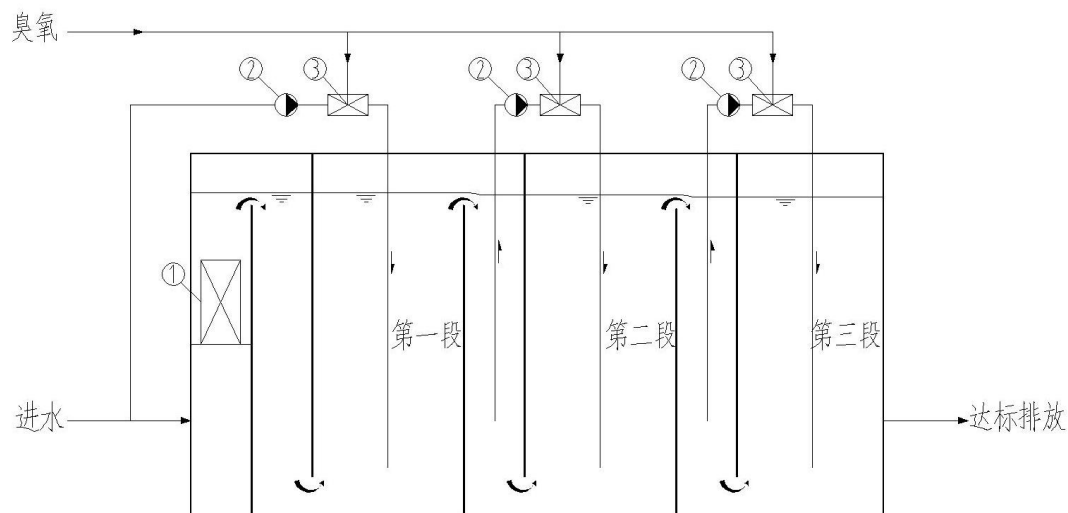
项 目	指 标	计算标准	单价（元/吨废水）
电费	200.0 kwh / m³水	0.8元/kwh	160.00
营养成份	0.5kg/ m³水	30000元/t	15.00
絮凝药剂	0.5kg/ m³水	6000元/t	3.00
污泥处置	30.0kg/ m³水	500元/t污泥	15.00
人员工资	兼职人员2名	/	/
合 计			193.00

总装机功率为410kW，预计运行功率为200kW。本方案处理废水运行直接成本为193.00元/m³废水。实际运行费用在150.0-200.0元/m³废水之间（未包括氨水回用节省费用）。

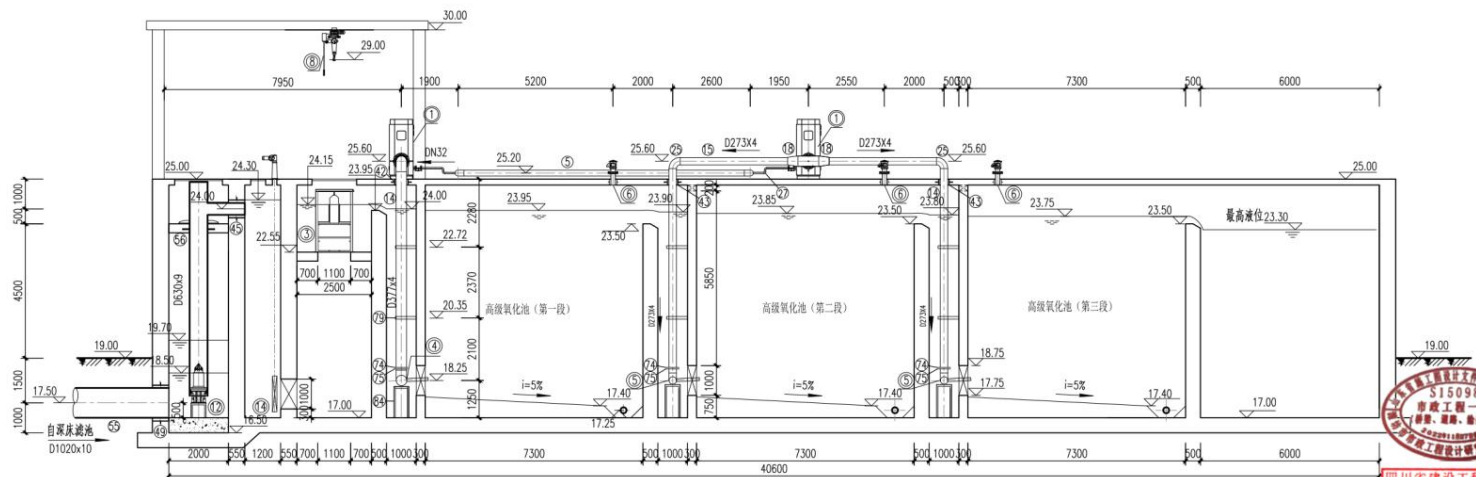
案例二

电催化耦合 O_3 氧化工艺介绍

4.1 电催化耦合O₃反应器工艺介绍



① 电催化耦合O₃反应器； ② 定制的离心泵； ③ 高效溶气装置



4.2 电催化耦合O₃氧化与传统O₃催化氧化的比较

项目名称	电催化耦合O ₃ 反应器	传统O ₃ 催化反应器	传统的活性炭吸附~再生技术
O ₃ 的利用率	不小于90%	30~70%	/
去除1mg/L COD 消耗的O ₃ 量	1.6~1.8 mg/L	2.5~3.0 mg/L	/
可调控性	很好	一般	一般
催化剂或电极使用寿命	3~5年	3~5年	3年（活性炭）
一次性投资	较少（1.0）	较高（催化剂昂贵 ~1.3）	高（~2.5）
装置电耗	少	较多（高30%）	很低
活性炭再生费用	0	0	1.2元/m ³ 废水
生物活性炭效率	好（B/C高）	一般（B/C低）	低

臭氧催化氧化工艺段

设计规模：5万m³/d 2000m³/h
处理线2条 单条1000m³/h
(并列运行)

反应槽 1座：L*B*H 36.2X23X8m

主要设备：

高效溶气装置 4台

电催化反应器 N=15.0kw 2台

催化氧化流程泵 Q=350M³/H

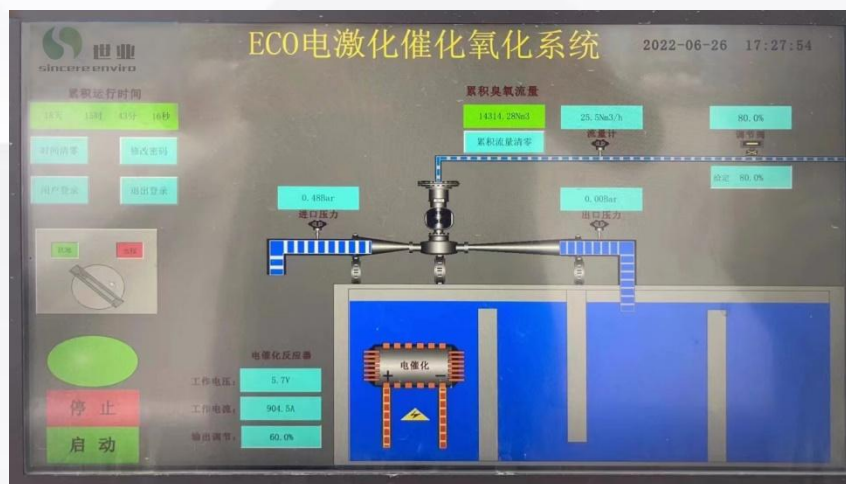
H=28m 4台

配套臭氧发生器2台和厂房1座



简单而卓有成效 (Simple and Effective)

实际运行数据



单组实际运行水量 900m³/h
 COD从40ppm降到20ppm 实际去除量 18KG/h
 O₃投加量60m³/h, 浓度139.3mg/l 共8.4KG/h
 COD/O₃≈1/0.5
 即去除1mgCOD 只需0.5mgO₃(根据不同水质不同, 一般为2左右)
 电催化功率: 5.7V*700A≈4.2KW



简单而卓有成效 (Simple and Effective)

四、项目效果

1. 设计处理水量为3万m³/d。
2. 设计进出水的水质

水质指标	进水水质	出水要求
pH	6~9	6~9
COD	50mg/L	22mg/L
SS	10mg/L	10mg/L

1. 设计处理水量为1000m³/d。
2. 设计进出水的水质

水质指标	进水水质	出水要求
pH	6~9	6~9
COD	40mg/L	10mg/L
SS	20mg/L	10mg/L

简单而卓有成效（Simple and Effective）



2026 电化学水处理技术及装备 暨水处理专项交流会

谢谢

张乐华 教授

石河子大学/华东理工大学

工业废水无害化与资源化国家工程研究中心