2026电化学水处理技术及装备交流会

气体扩散阴极电化学合成双氧水的电极制备、过程控制及应用研究

- 张乐华　徐成建　谢旺红　胡华为　卢子兰　邱燕楠

- 单位：华东理工大学　石河子大学

目录

Contents

01 研究背景

02 技术研究

03 应用研究

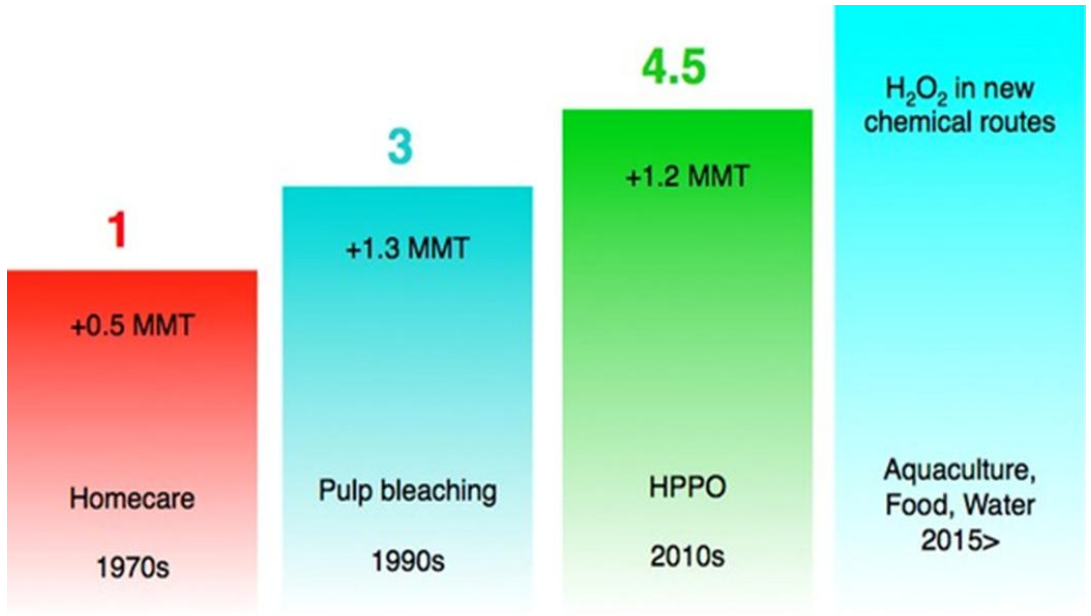
04 结论与展望



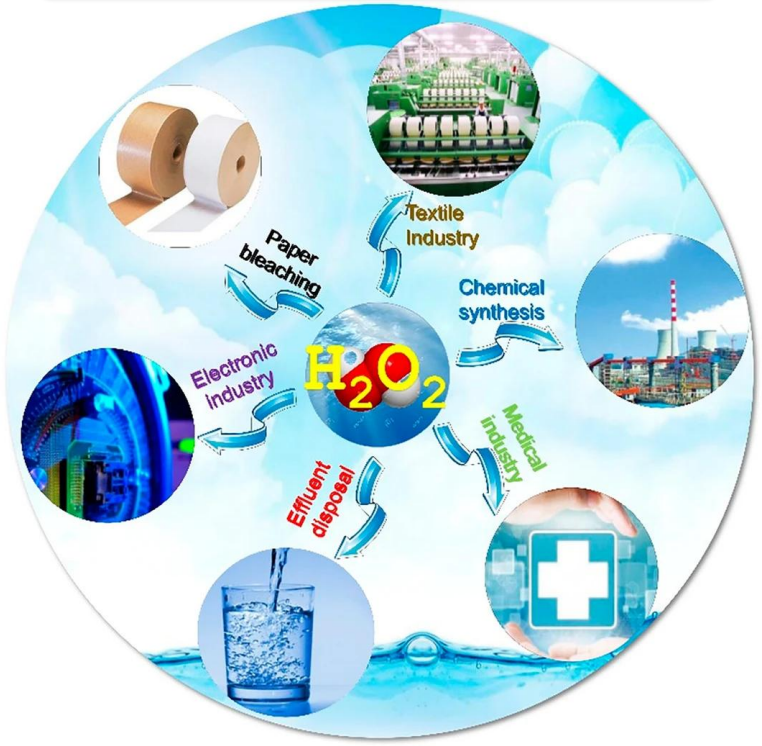
01 研究背景

01 全球过氧化氢需求不断增大

过氧化氢市场需求



过氧化氢应用广泛



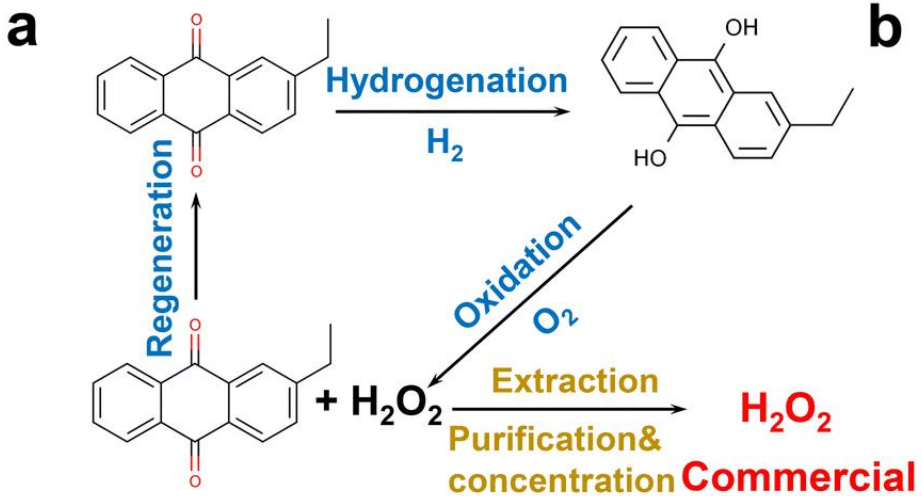
- 2023 年全球H_2O_2需求突破 650 万吨，特别是一些非集中的分布式现场生产需求难以实现；
- 一种重要的绿色化工基础产品，广泛应用于纸浆漂白、医疗消毒、环境治理及化学合成等领域。

全球H_2O_2需求持续扩容，先进合成技术是释放其产业价值的核心引擎

[1] Patricia M G ,Laura V ,Deborah W , et al.Photocatalytic Synthesis of Hydrogen Peroxide from Molecular Oxygen and Water[J].Topics in Current Chemistry,2023,381(4):15-15.

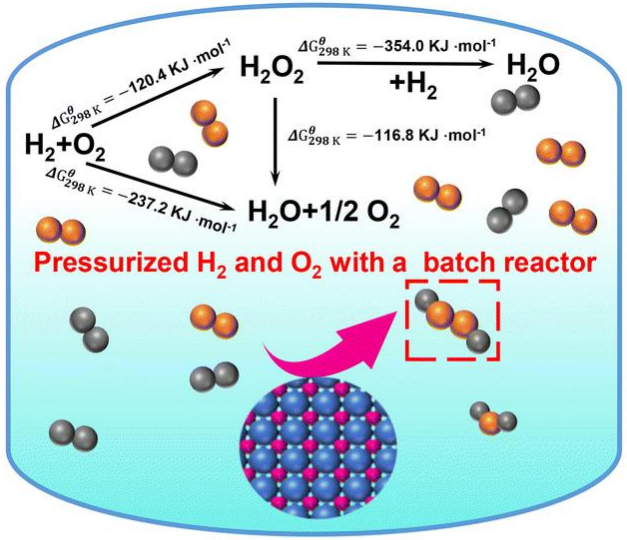
01 过氧化氢合成技术

蒽醌法



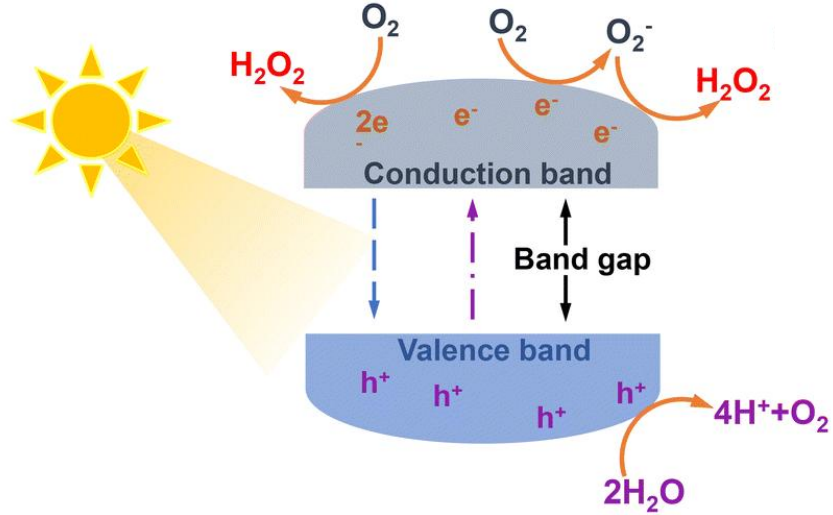
- Harmful organic solutions are needed
- High cost
- Transport safety hazard

氢氧直接合成法



- High safety risk
- Low yield
- High cost

光催化合成法



- Harmful organic solutions are needed
- Low response to sunlight
- High recombination rate of photo-generated species

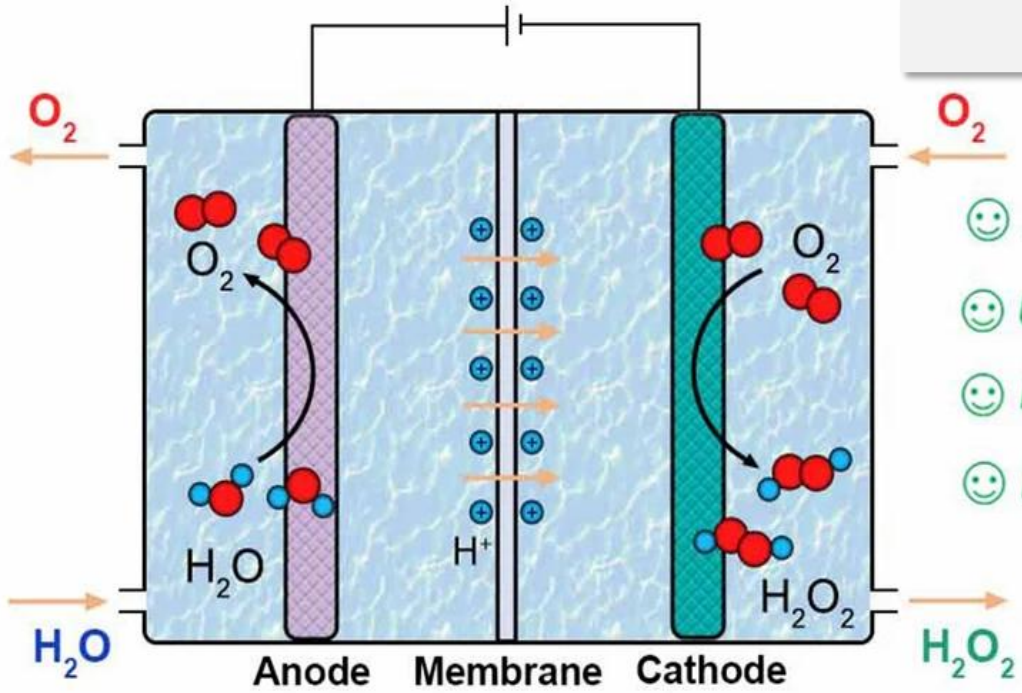
- 全球 95% 以上 H_2O_2依赖蒽醌法，存在过程复杂、能耗高、环境污染严重及储运安全风险；
- 氢氧合成、光催化法分别受H_2、O_2混合易制爆、贵金属依赖及光效低、溶剂污染等制约，难以规模化应用。

探索一种绿色环保、经济安全且高效的H_2O_2生产替代工艺具有重要研究意义

[1] Wei J ,Wang S ,Wu J , et al.Progress and perspectives of Pd-based catalysts for direct synthesis of hydrogen peroxide[J].Industrial Chemistry & Materials,2024,2(01):7-29.

01 二电子氧还原（2e⁻ORR）

d



电催化合成法

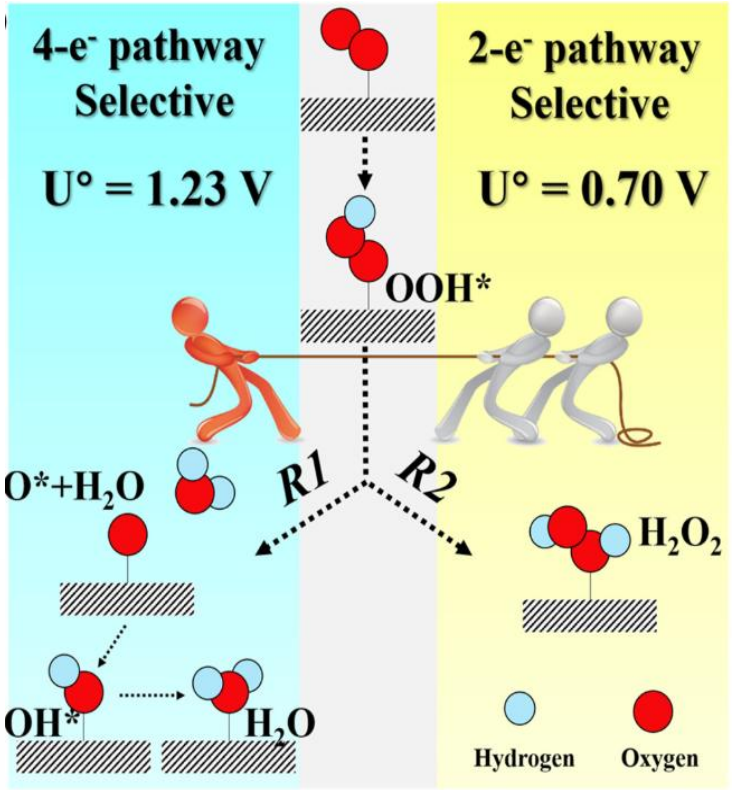
☺ *Zero-carbon emission*

☺ *Usage of green solvents*

☺ *Eco-friendly*

☺ *Enabling on-site production*

☹ $H_2O_2=2H^++O_2+2e^-$



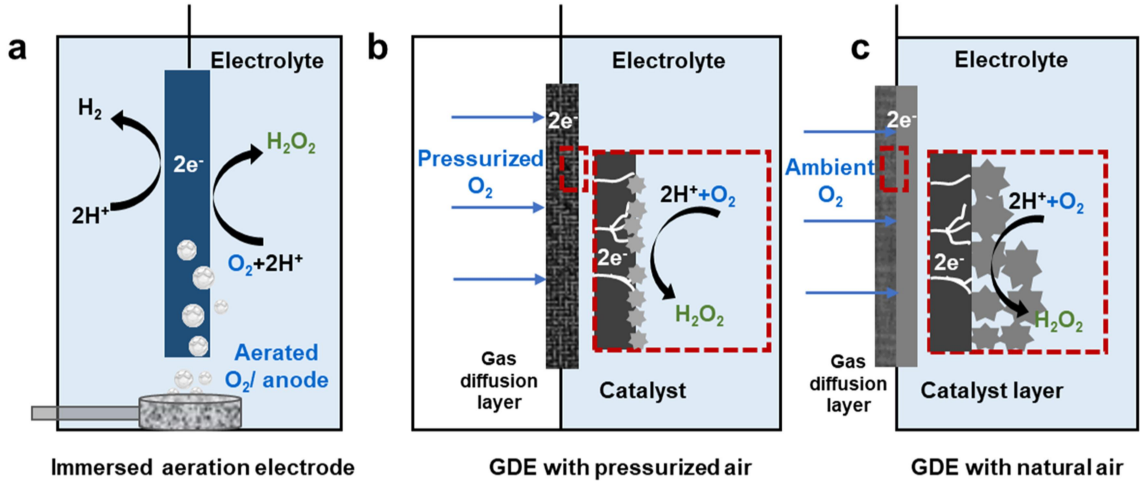
Anode: $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ ✖ Cathode: $O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O_2$

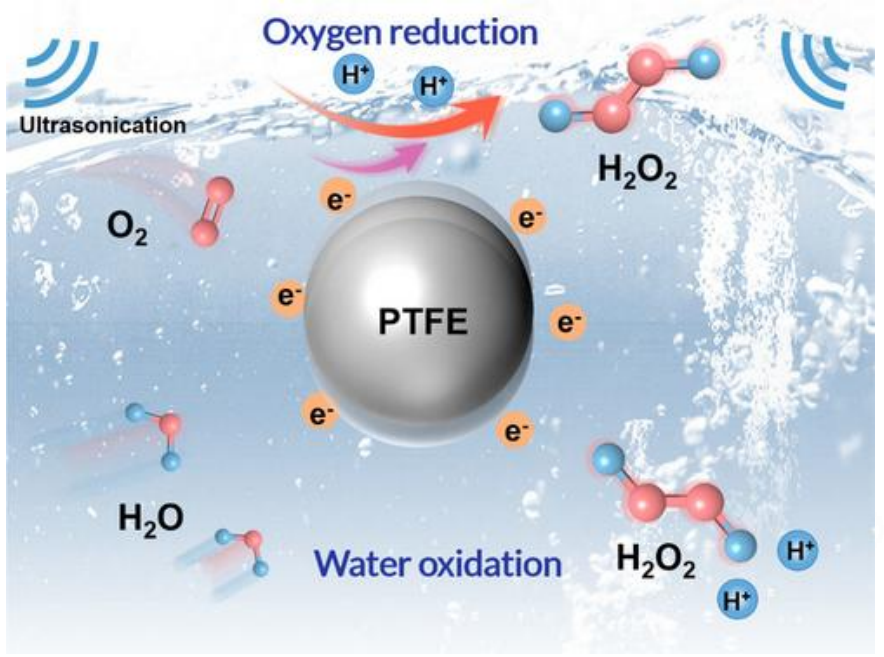
- 常温常压下利用O_2、H_2O为原料，在电场驱动下实现H_2O_2现场连续分布式生产，是一种绿色、环保的生产路线；
- 现阶段普遍存在反应活性低、稳定性差及单室无膜中H_2O_2在阳极易分解等问题。

设计一种高效电合成H_2O_2体系，以实现其高效合成与应用，具有重要科学价值与工程意义

[1] Tian Y ,Deng D ,Xu L , et al.Strategies for Sustainable Production of Hydrogen Peroxide via Oxygen Reduction Reaction: From Catalyst Design to Device Setup[J].Nano-Micro Letters,2023,15(08):232-276.
[2] Guo X., Lin S., Gu J., et al. Simultaneously Achieving High Activity and Selectivity toward Two-Electron O2 Electroreduction: The Power of Single-Atom Catalysts[J]. ACS Catalysis, 2019, 9(12): 11042-11054.

01 碳基催化剂在2e-ORR的应用





[1] Zhao, Jiawei, et al. Contact-electro-catalysis for Direct Synthesis of H2O2 under Ambient Conditions. Angewandte Chemie International Edition 62.21 (2023): e202300604.

目录

Contents

01 研究背景

02 技术研究

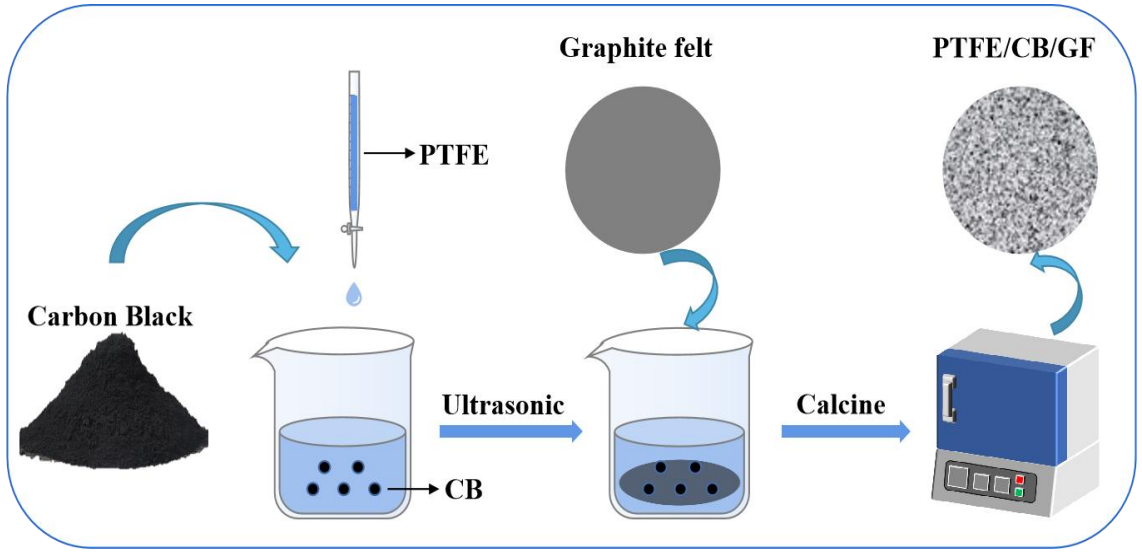
03 应用研究

04 结论与展望

21

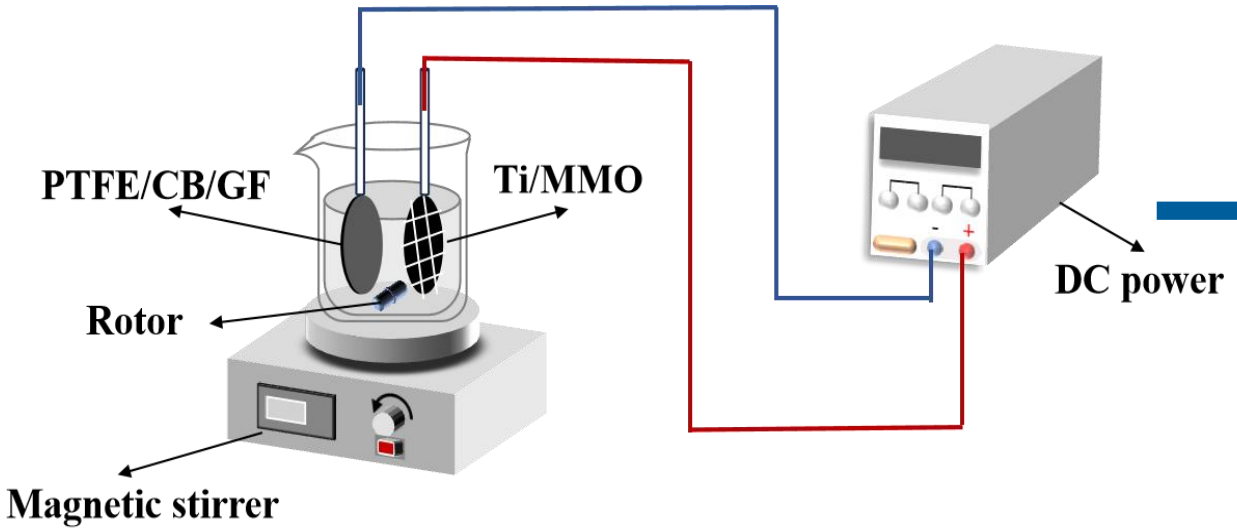
气体扩散阴极制备及其ORR性能

电极制备及电化学体系搭建



（1）GF（厚度3mm，直径5cm）分别浸入C_3H_6O和C_2H_6O中超声30min，清洗烘干后得**预活化GF**。

（2）5mL PTFE、100mL水、5mL C_3H_8O、1g CB混合超声处理30 min，GF浸没其中超声30 min，冷却烘干，置于马弗炉中煅烧（起始温度100℃，以3℃/min的速率升温至400℃，保温60mim）

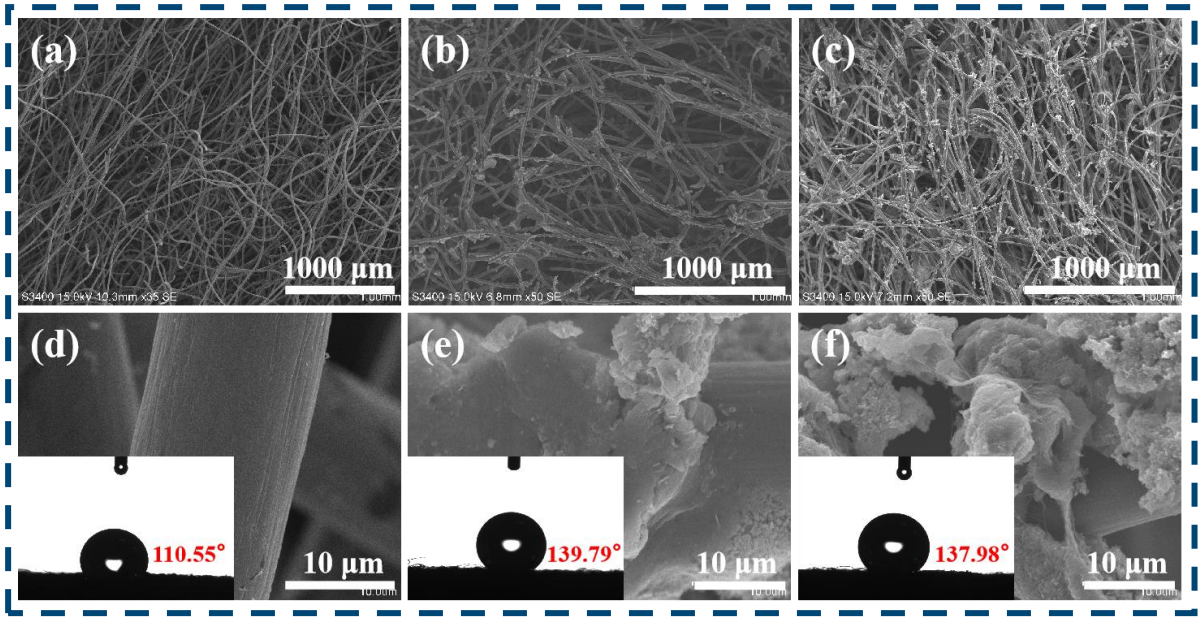


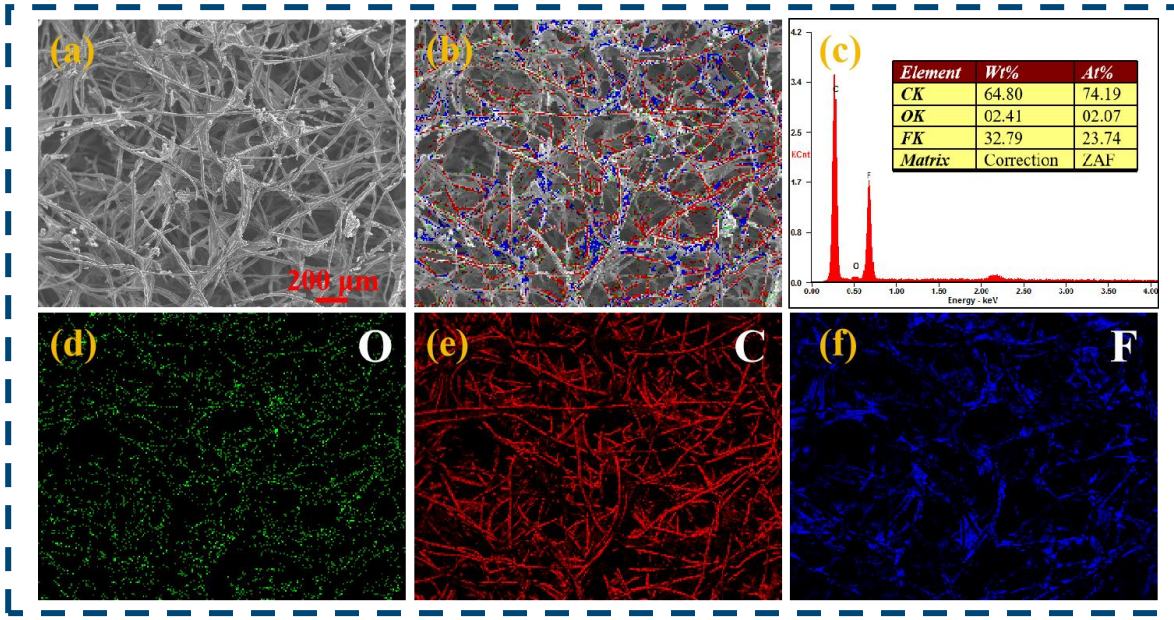
阳极：**Ti/MMO**电极，直径5cm；

阴极：**PTFE/CB/GF**电极，厚度3mm，直径5cm

典型单室电解装置：**阳极析氧反应**（OER）向溶液中提供溶解氧

PTFE/CB/GF电极材料表征



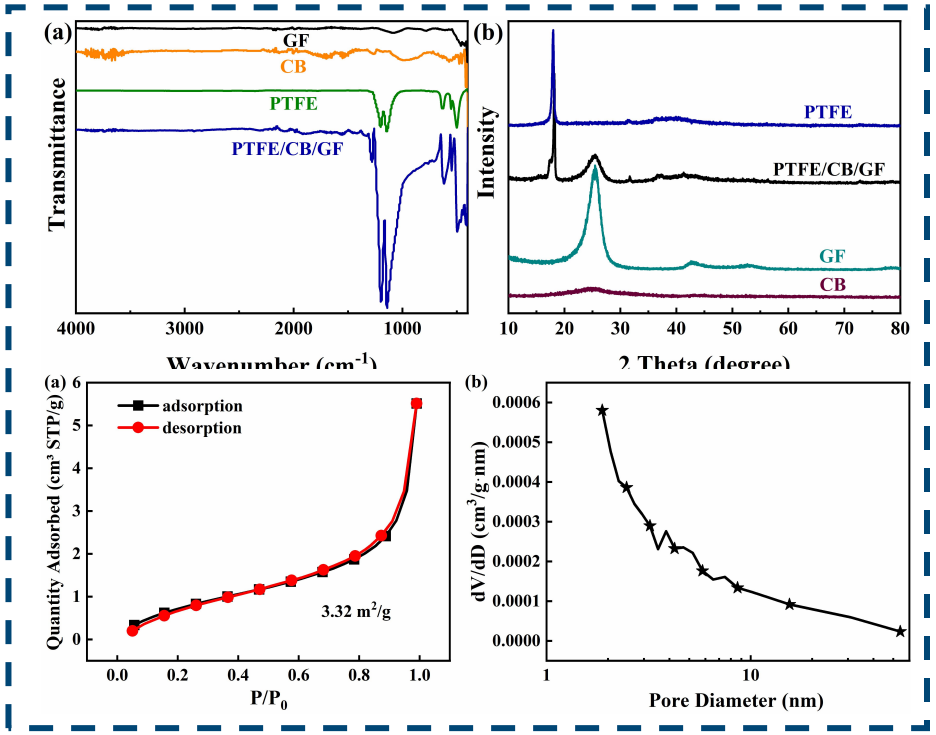


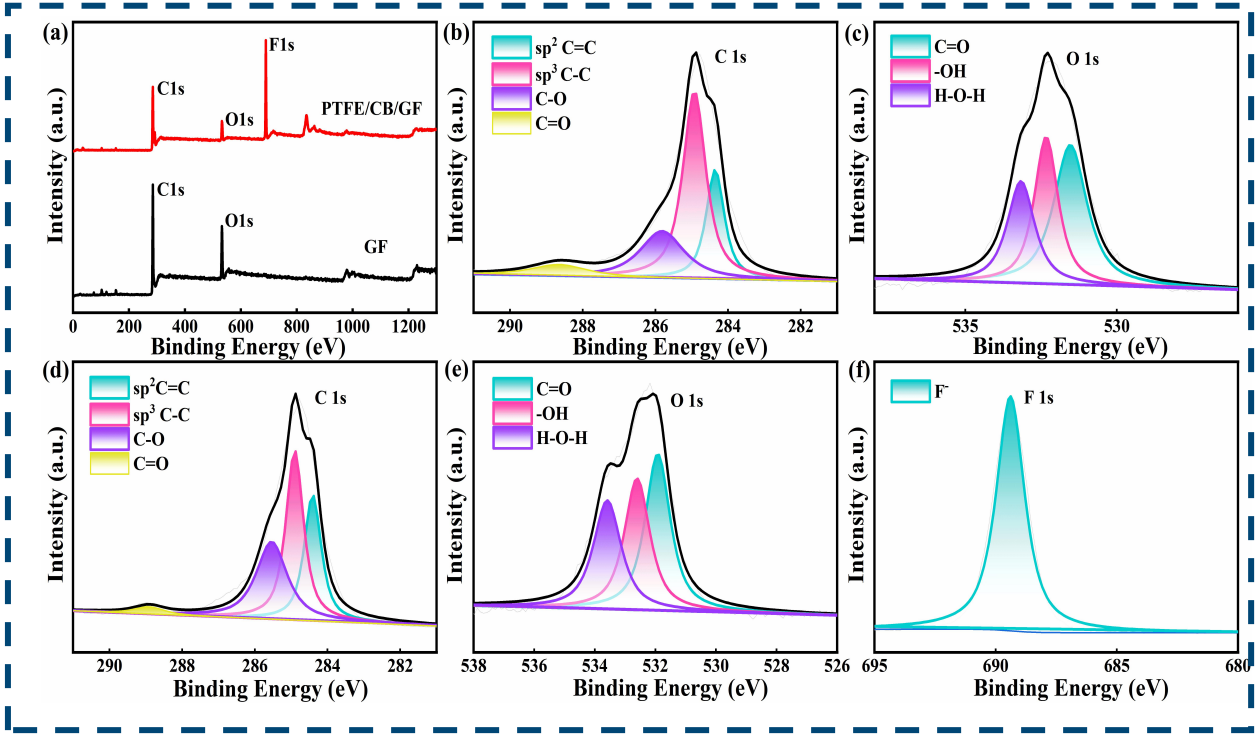
- GF具有**三维微孔结构**，表面光滑且不含杂质
- PTFE作为粘合剂，使CB均匀盘簇在GF上，增加了GF电极的比表面积，同时增加了电极表面可用于**O_2还原的活性位点**
- **PTFE/CB/GF**电极与水滴的**接触角约为140°**，显著高于未改性的纯**GF（~110°）**，体现出PTFE/CB/GF优异的**疏水性**。
- 电解 10h 后PTFE和CB依然均匀地包裹在GF表面，接触角**约为138°**，依然具有较好的疏水性

成功负载

- EDS结果显示C、O、F在电极表面分布均匀，含量分别为**64.80%、2.41%与32.79%**
- C分布在负载层和GF内部，呈纤维状；F集中分布在负载层中，使得电极表现出较强的疏水性；O则主要来自GF和CB表面的含氧官能团
- 负载层内元素C分布减少而元素F分布增加，说明**PTFE冷却成膜后包覆在CB或GF碳纤维表面**

PTFE/CB/GF电极材料表征

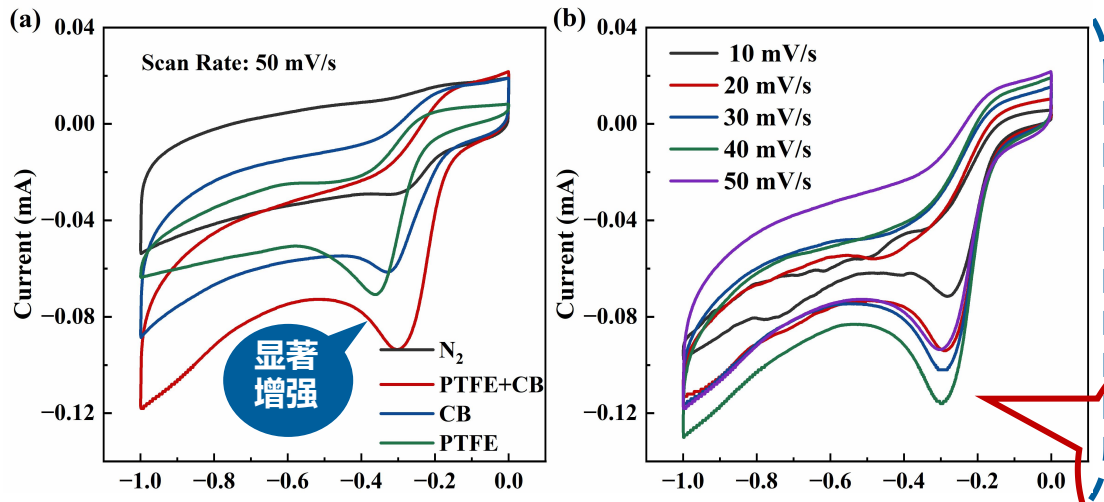




- **PTFE**在**1100~1200/cm**之间出现明显的强吸收峰；**CB**在**1700/cm**处出现的弱吸收峰
- 衍射峰位置在**2θ为17°和25°**处，分别对应于**PTFE特征峰**以及**CB和GF的特征峰**，且未观察到其它杂质峰
- N_2吸附-脱附曲线呈现典型的**IV型等温线**，表明该材料具有明显的**介孔结构**，孔径主要分布在小于10 nm的范围内
- 对于C1s峰，284.8 eV、285.1 eV、286 eV和288.2 eV的峰值分别对应于GF上的$sp^2C=C$、sp^3C-C、C-O和C=O结合键；对于O1s峰，531 eV、532.5 eV和534. eV处特征峰分别为C=O键、-OH和吸附态的H_2O
- 在**691 eV处**出现F的强烈信号，证明**PTFE的成功负载**，而改性样品中C和O信号强度的降低则是由于PTFE均匀且大量包裹覆盖在GF表面引起的

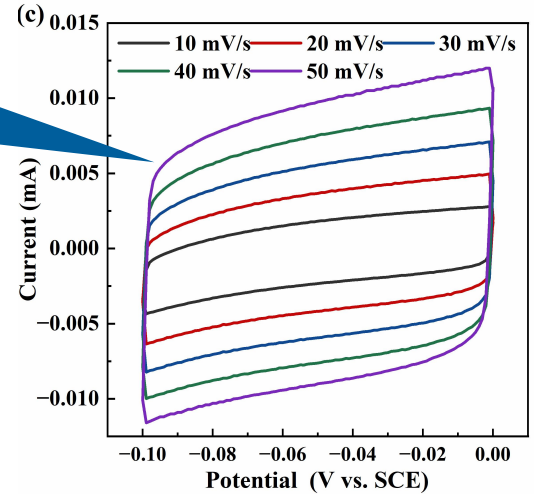
PTFE/CB/GF电极ORR性能测试

CV曲线



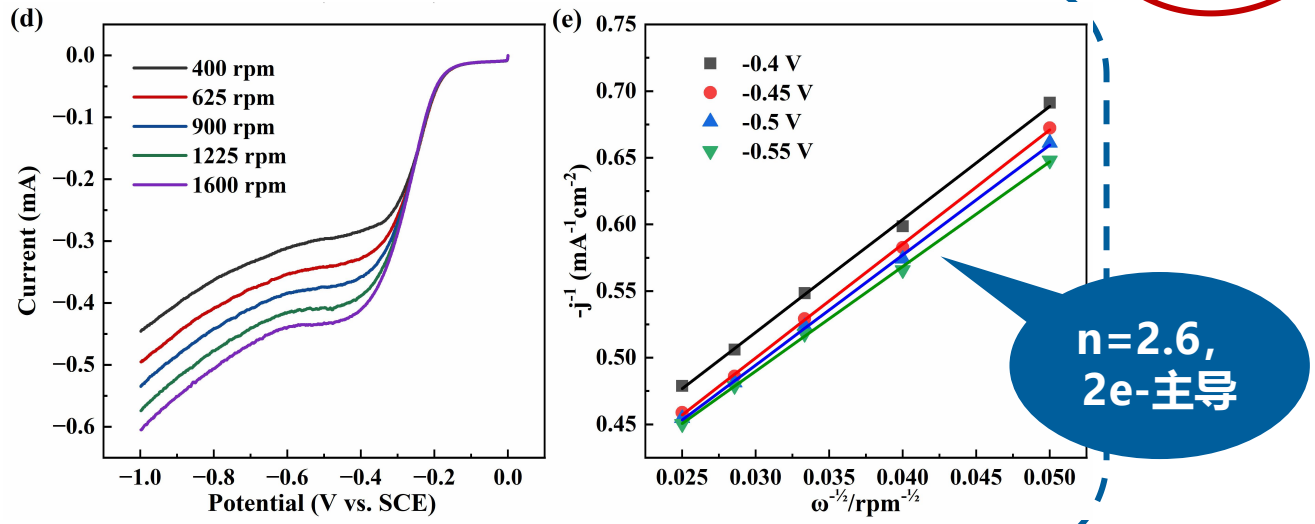
PTFE的引入降低了电极电容

O2还原峰电位未改变

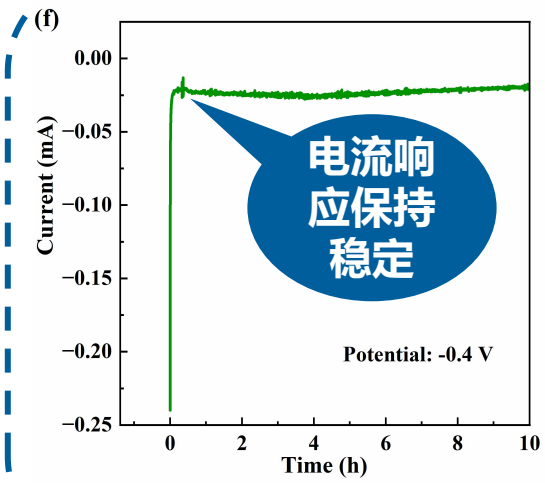


充放电CV曲线

LSV曲线



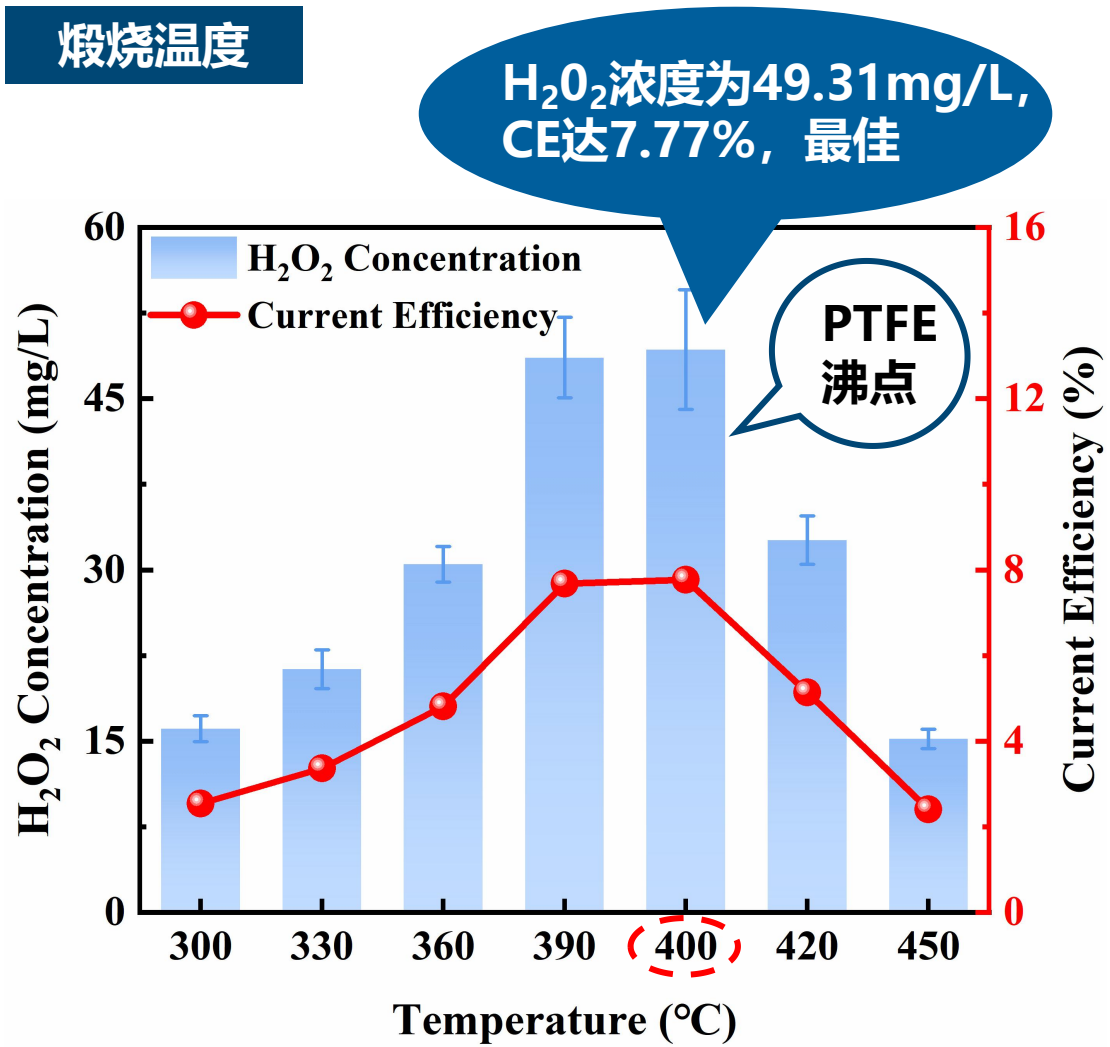
n=2.6, 2e-主导



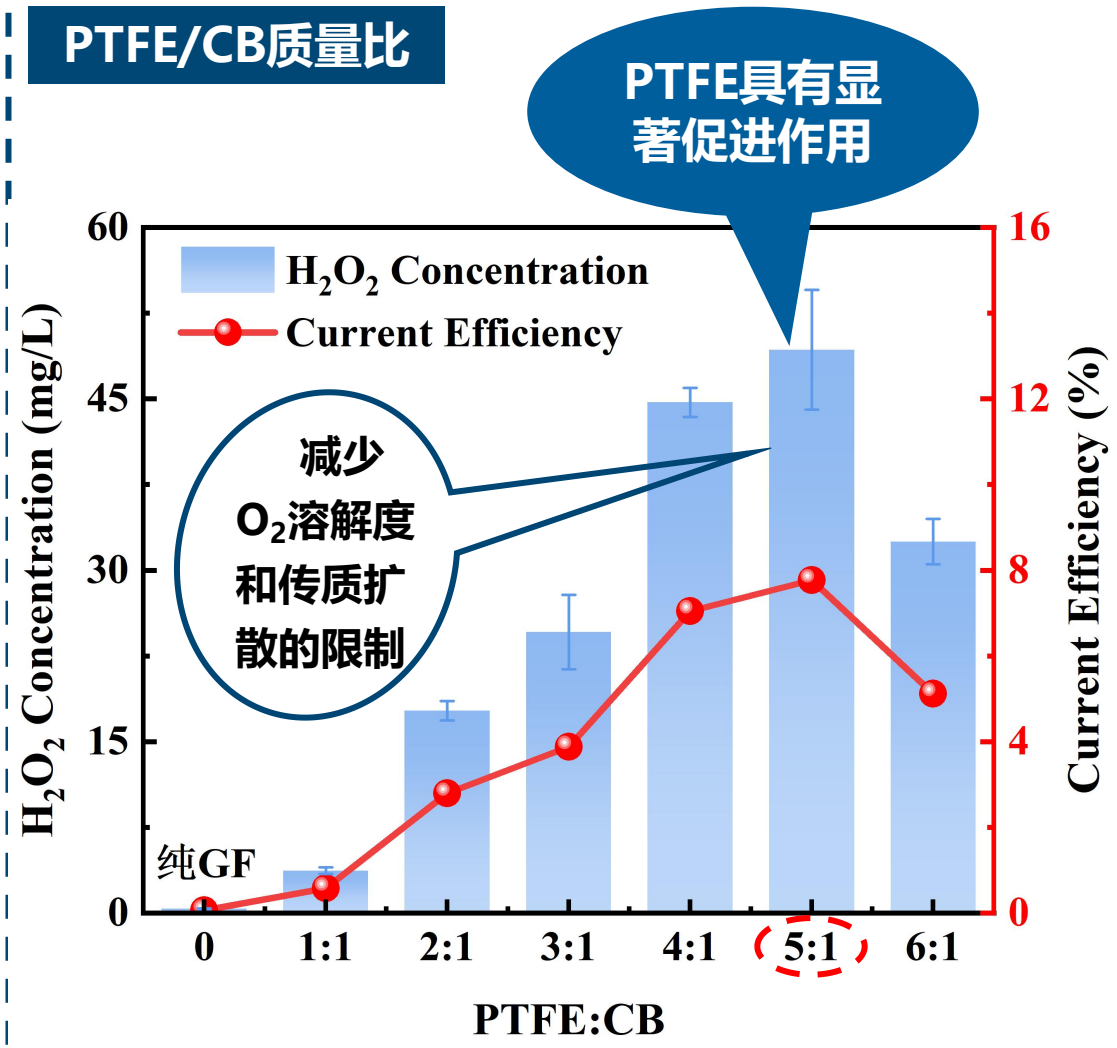
i-t曲线

PTFE/CB/GF电极优化

煅烧温度

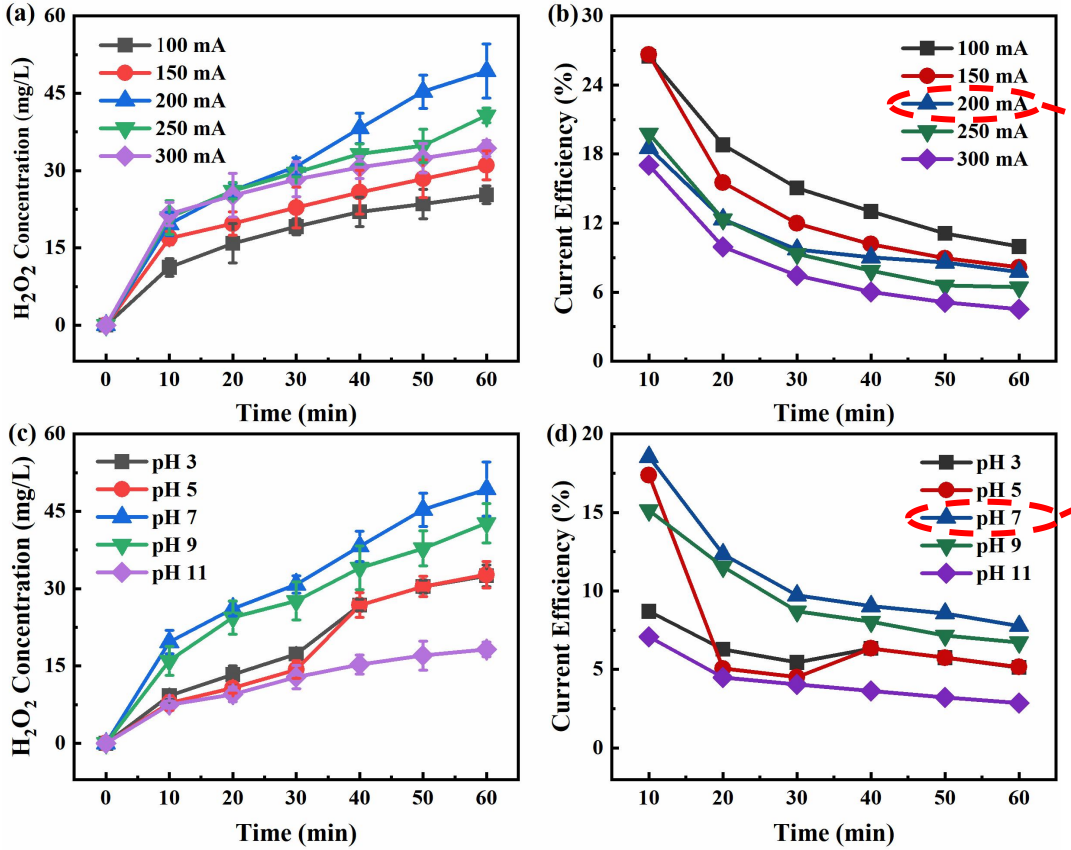


PTFE/CB质量比



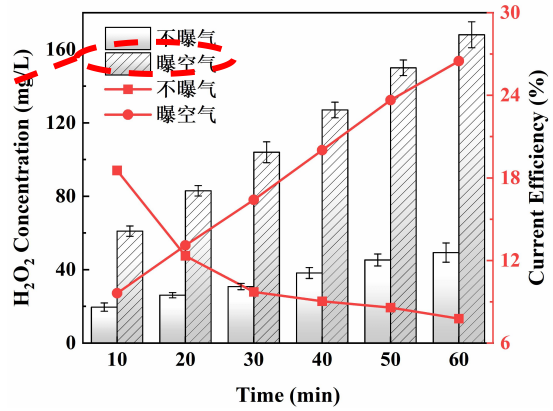
影响因素分析

电流和PH

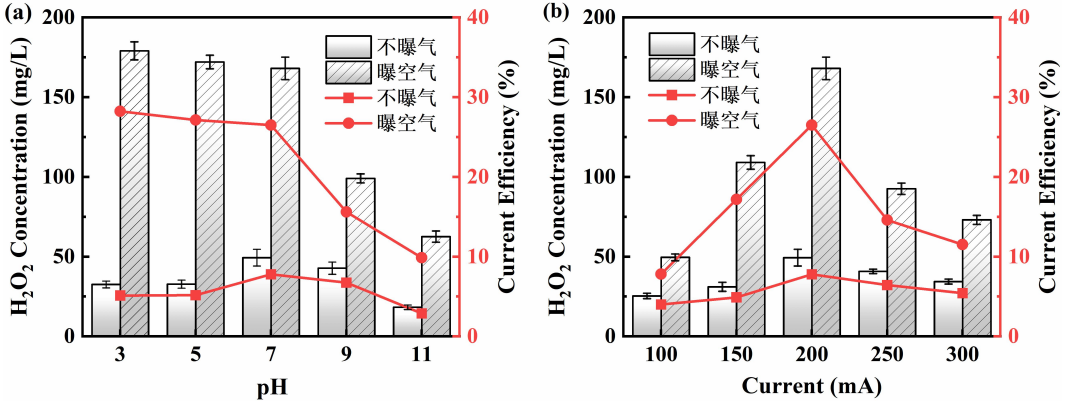


最佳条件：200mA、pH为7；曝气时H_2O_2浓度显著增加，60min达到168.06 mg/L

曝气



曝气增加了溶解氧的供应，增强了O_2的质量传递，提高电极内部活性位点与O_2的接触概率，从而促进H_2O_2的生成



➢ 曝气时，**中性条件下**依然具有较高的H_2O_2产量，酸性条件下O_2的溶解度较高，持续曝气使得溶液中溶解氧处于饱和状态，从而提高H_2O_2的潜在产量；外部曝气会显著提高H_2O_2产量，其产量在**200mA电流**条件下是不曝气的**3.41倍**

小结

1. 通过**浸渍-加热固化法**实现了PTFE与CB在GF表面的**协同负载**。改性后GF的**疏水性大大增强**，接触角约由110°增加至140°

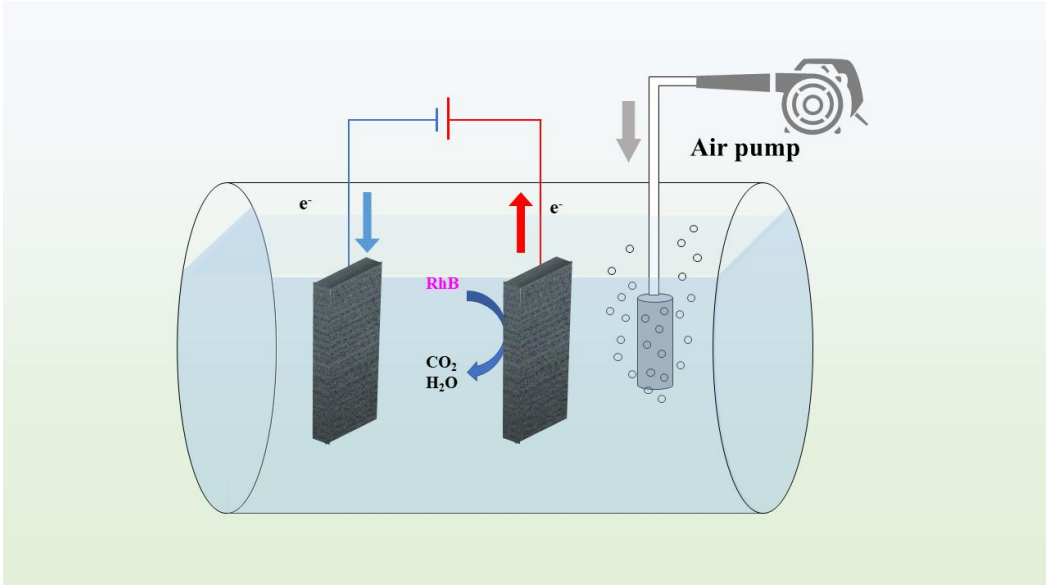
2. PTFE/CB催化层在ORR中接近**2e-路径**；在恒电位-0.4V vs.RHE下电解36000s时，电流无明显衰减，表明该电极具有优异的稳定性与重复性

3. 改性电极的PTFE与CB最佳质量比为**5:1**，最佳煅烧温度为**400℃**；**200 mA，pH7**条件下H_2O_2产量最高（**49.31mg/L**），持续曝气时产量显著提升至**168.06 mg/L**，是不曝气的**3.41**倍

22

空气辅助的电合成双氧水

反应装置



阳极：PbO_x@C/GF

阴极：碳毡

电极面积： 2.5×3.5 cm^2

电极间距：1 cm

反应器体积：120 mL

阳极材料制作流程如右图

负载液（每20mL）含：

0.1 g 聚乙烯吡咯烷酮（PVP）

2 mL 乙酸

0.5 g 四乙酸铅

碳毡

浸没于负载液

反复吸取后烘干

直至负载液全部转移

含负载液的碳毡

管式炉

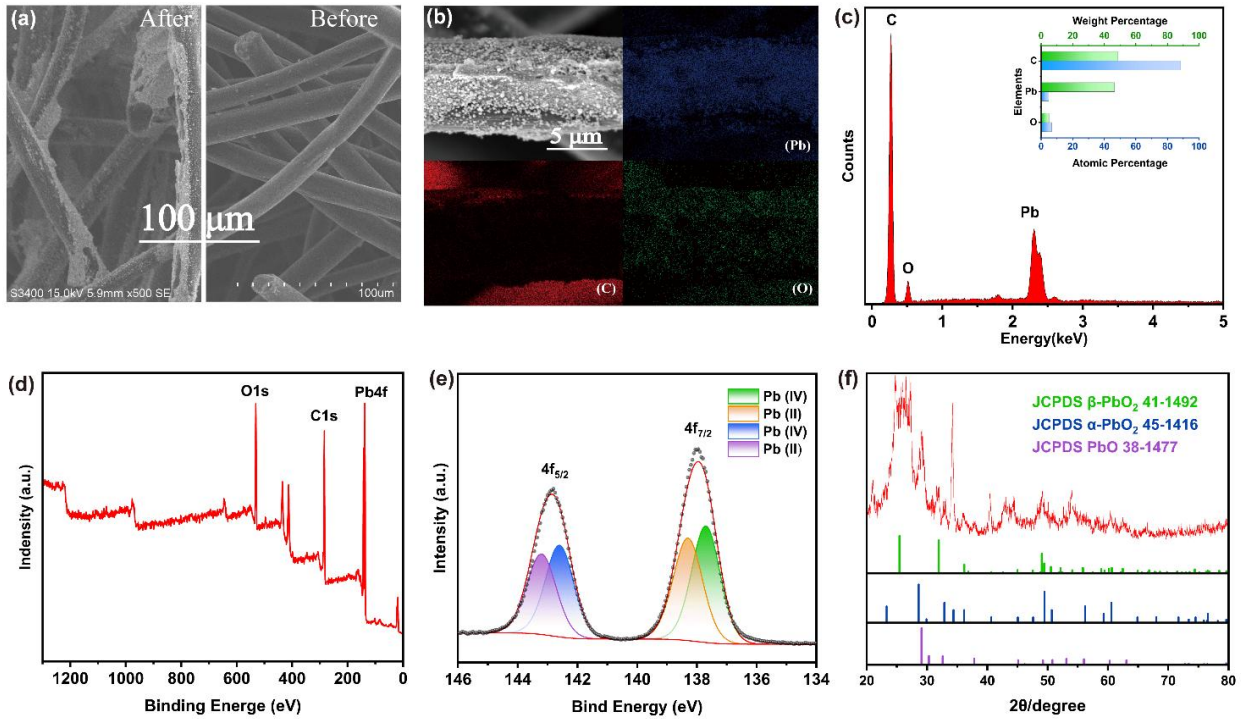
氮气氛围加热

PbO_x@C/GF

升温速率5℃/min

800℃保温60 min

电极表征



（a）、（b）电极上催化剂的均匀负载；

（c）电极上的铅、氧含量比介于1~2；

（d）电极上存在氧、碳和铅；

（e）同时铅存在Pb(II)和Pb(IV)；

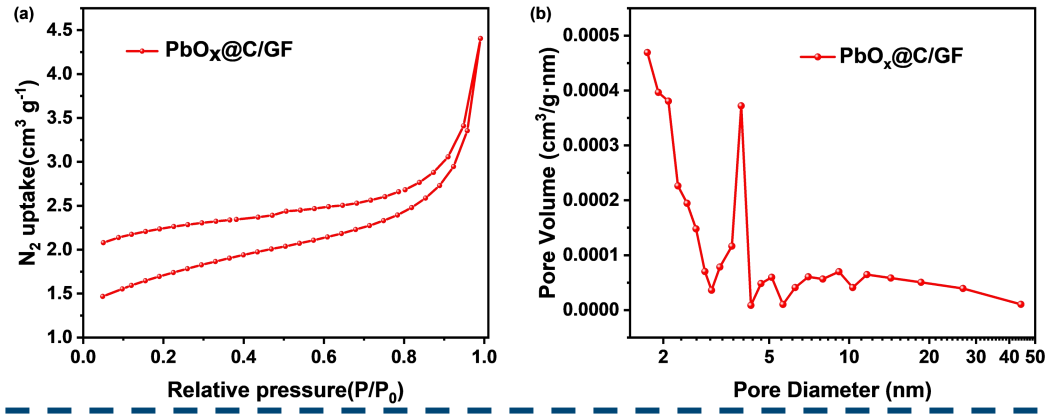
（f）电极上存在PbO_2和PbO。

Pb(II)和Pb(IV)成功掺杂并负载在碳毡上

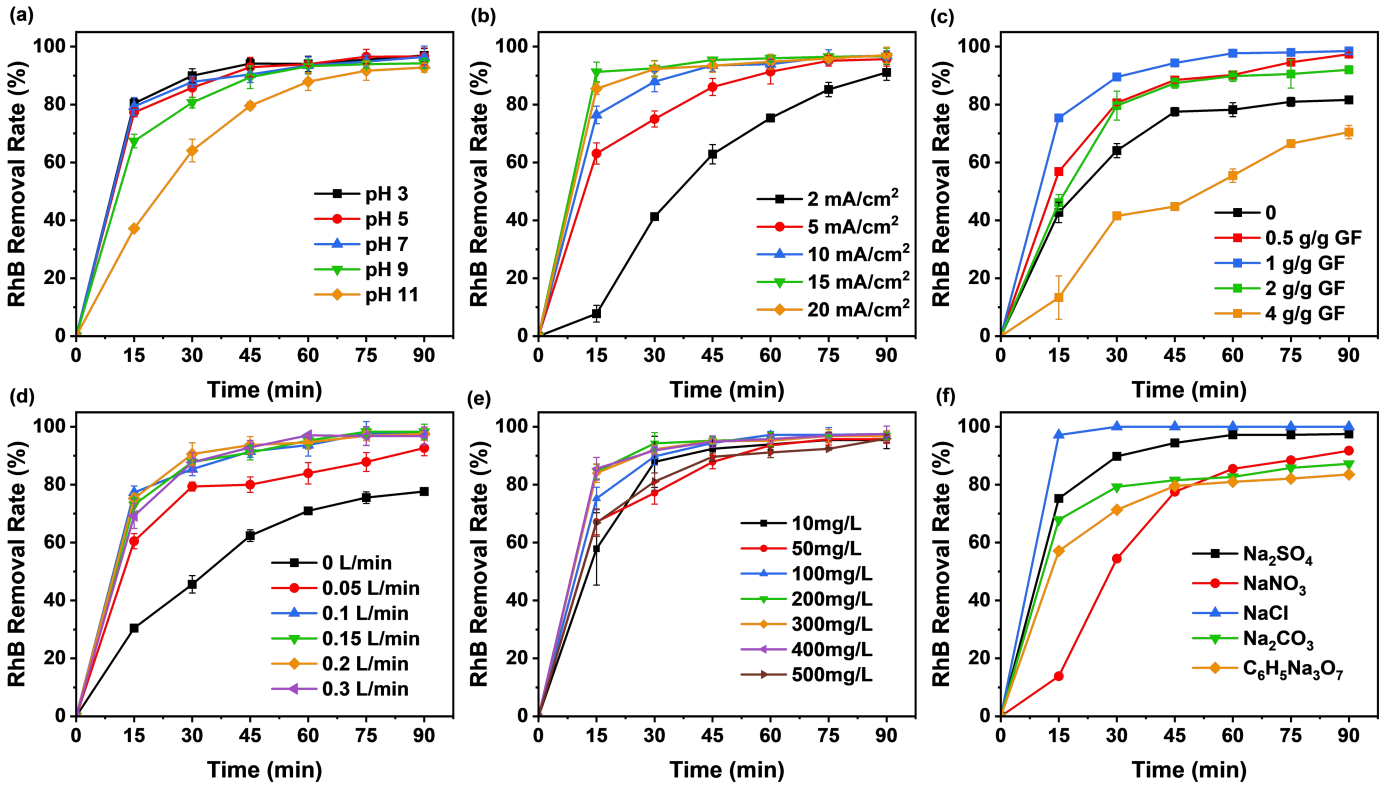
（a）遵循I型可逆等温线

（b）材料孔径主要集中在4 nm附近和2 nm以下

电极比表面积提升（0.19 m^2/g提升至5.73 m^2/g ）



单因素分析与稳定性测试



（a）酸性不利于污染物吸附，碱性不利于反应；

（b）电流密度低催化性差，过高副反应增多；

（c）催化剂少则活性点位少，过多影响比表面积；

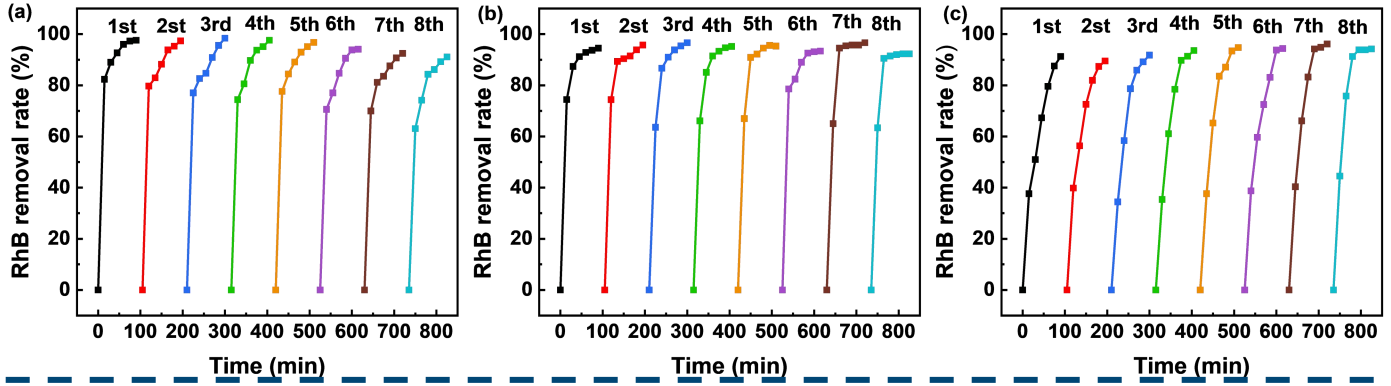
（d）气体流量在0.1 L/min以上时不再影响反应；

（e）在100 mg/L RhB时效果稳定且最终含量低

（f）阴离子对90 min内RhB去除率影响较小

选用硫酸钠为电解质以屏蔽阴离子影响。电催化湿式氧化在pH 5、电流密度15 mA/cm²、催化剂负载量1 g /g GF、气体流量1 L/min，对100 mg/L RhB 90 min 的最高去除率为96.68%。

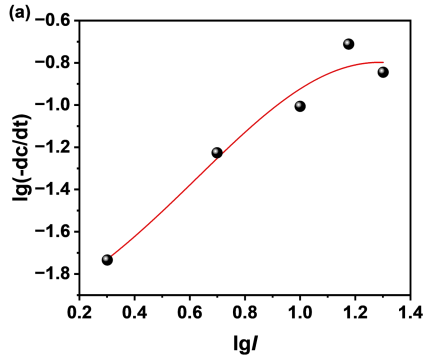
该电极在（a）pH 3、（b）pH7、（c）pH 11的条件下，8次循环内均有**稳定的去除效果**，且金属浸出量**可忽略不计**（小于ICP-MS检测限）



动力学拟合

电流密度对反应速率的影响

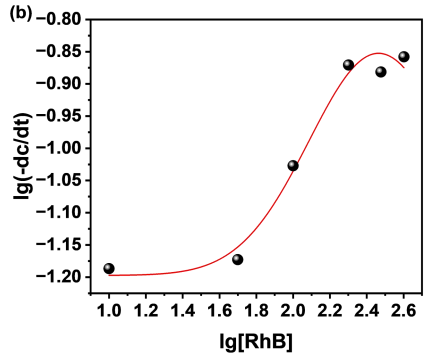
电流密度 (mA/cm²)	拟合方程	R²	-dc/dt	lg(-dc/dt)
2	$C/C_0=-0.44054+1.49853e^{-t/81.26156}$	0.9732	0.01844	-1.734219714
5	$C/C_0=0.06198+0.92833e^{-t/15.62944}$	0.9904	0.05940	-1.22623163
10	$C/C_0=0.0496+0.948956e^{-t/9.62673}$	0.9977	0.09860	-1.006158826
15	$C/C_0=0.04499+0.95495e^{-t/4.91243}$	0.9987	0.19438	-0.711344915
20	$C/C_0=0.05007+0.949712e^{-t/6.63991}$	0.9986	0.14303	-0.844571182



$$\lg\left(-\frac{dc}{dt}\right)=-2.18069+\left(\frac{2.28465}{1.31821\sqrt{\frac{\pi}{2}}}\right)\times e^{\left[-\frac{2(\lg I_0-1.28798)^2}{1.31821^2}\right]}$$

RhB浓度对反应速率的影响

初始RhB (mg/L)	拟合方程	R²	-dc/dt	lg(-dc/dt)
10	$C/C_0=0.03413+0.97155e^{-t/14.93648}$	0.9938	0.06505	-1.186783106
50	$C/C_0=0.05988+0.93189e^{-t/13.87166}$	0.9839	0.06718	-1.172763784
100	$C/C_0=0.0324+0.96646e^{-t/10.28386}$	0.9987	0.09398	-1.026972272
200	$C/C_0=0.03859+0.96131e^{-t/7.13688}$	0.9996	0.13470	-0.870644934
300	$C/C_0=0.04356+0.95612e^{-t/7.27616}$	0.9987	0.13140	-0.881389838
400	$C/C_0=0.04226+0.95737e^{-t/6.90242}$	0.9975	0.13870	-0.857921567



$$\lg\left(-\frac{dc}{dt}\right)=-1.19736+\left(\frac{0.32618}{0.75458\sqrt{\frac{\pi}{2}}}\right)\times e^{\left[-\frac{2(\lg[RhB]_0-2.46397)^2}{0.75458^2}\right]}$$

总反应速率方程

$$V=-(dc/dt)$$
$$=K[RhB]^a[I]^b$$
$$=0.0019973[RhB]^{0.345}[I]^{1.350}$$

总反应速率常数：k = 0.0019973

总反应阶数为：a + b=1.695

电流密度 (1.35) > RhB浓度 (0.345)

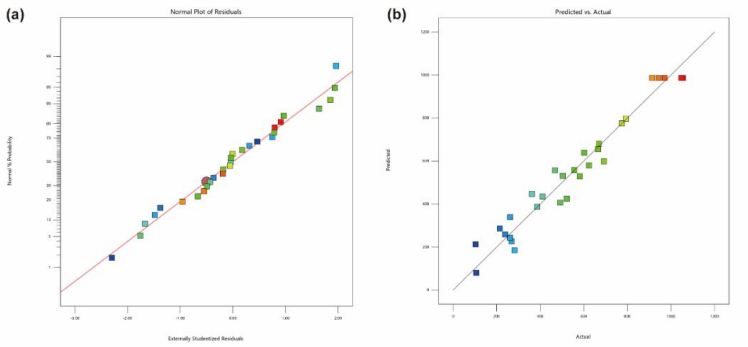
电流密度对反应速率的影响更大

响应面优化

因素		水平		
电流密度（mA/cm²）	A	30	40	50
pH	B	7	9	11
碳纳米管负载量（g）	C	0.05	0.1	0.15
PTFE负载量（mL）	D	0.25	0.5	0.75

来源	平方和	自由度	均方	F-value	p-value	显著性
Model	2.05E+06	14	1.47E+05	20.56	<0.0001	非常显著
A-CD	60998.06	1	60998.06	8.55	0.0111	显著
B-pH	33191.97	1	33191.97	4.65	0.0488	显著
C-Catalyst	6.27E+05	1	6.27E+05	87.9	<0.0001	非常显著
D-PTFE	71644.94	1	71644.94	10.05	0.0068	显著
AB	15555.7	1	15555.7	2.18	0.1619	不显著
AC	411.19	1	411.19	0.0577	0.8137	不显著
AD	1111.08	1	1111.08	0.1558	0.6990	不显著
BC	985.27	1	985.27	0.1381	0.7157	不显著
BD	7511.12	1	7511.12	1.05	0.3222	不显著
CD	12656.25	1	12656.25	1.77	0.2041	不显著
A^2	5.94E+05	1	5.94E+05	83.34	<0.0001	非常显著
B^2	3.00E+05	1	3.00E+05	42.02	<0.0001	非常显著
C^2	5.57E+05	1	5.57E+05	78.11	<0.0001	非常显著
D^2	4.35E+05	1	4.35E+05	61.02	<0.0001	非常显著
残差	99848.17	14	7132.01			
失拟项	84084.22	10	8408.42	2.13	0.2422	不显著
误差	15763.95	4	3940.99			
总和	2.15E+06	28				

CNT含量>PTFE含量>电流密度>pH值



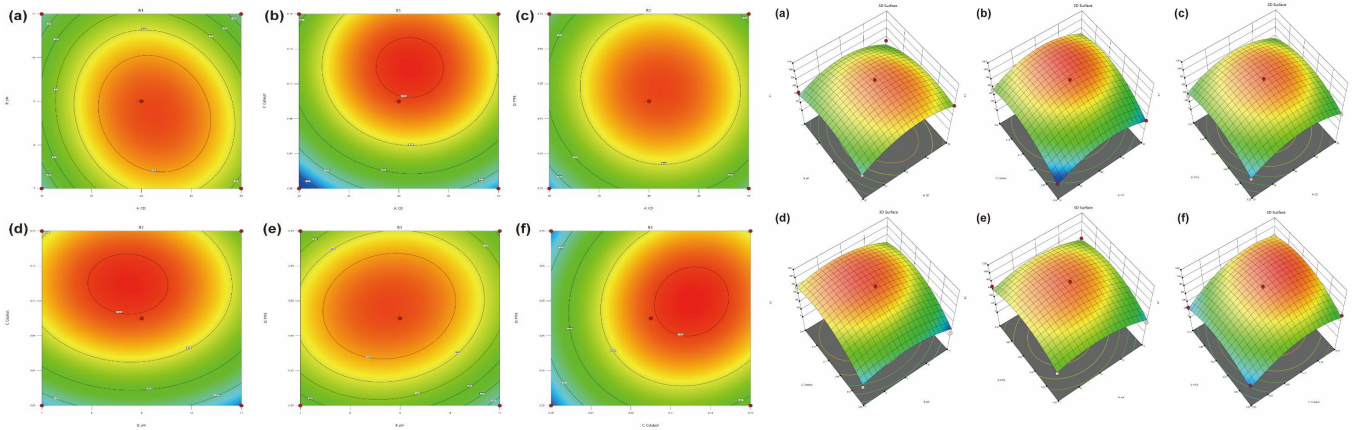
R^2=0.9536

Adj R^2=0.9072

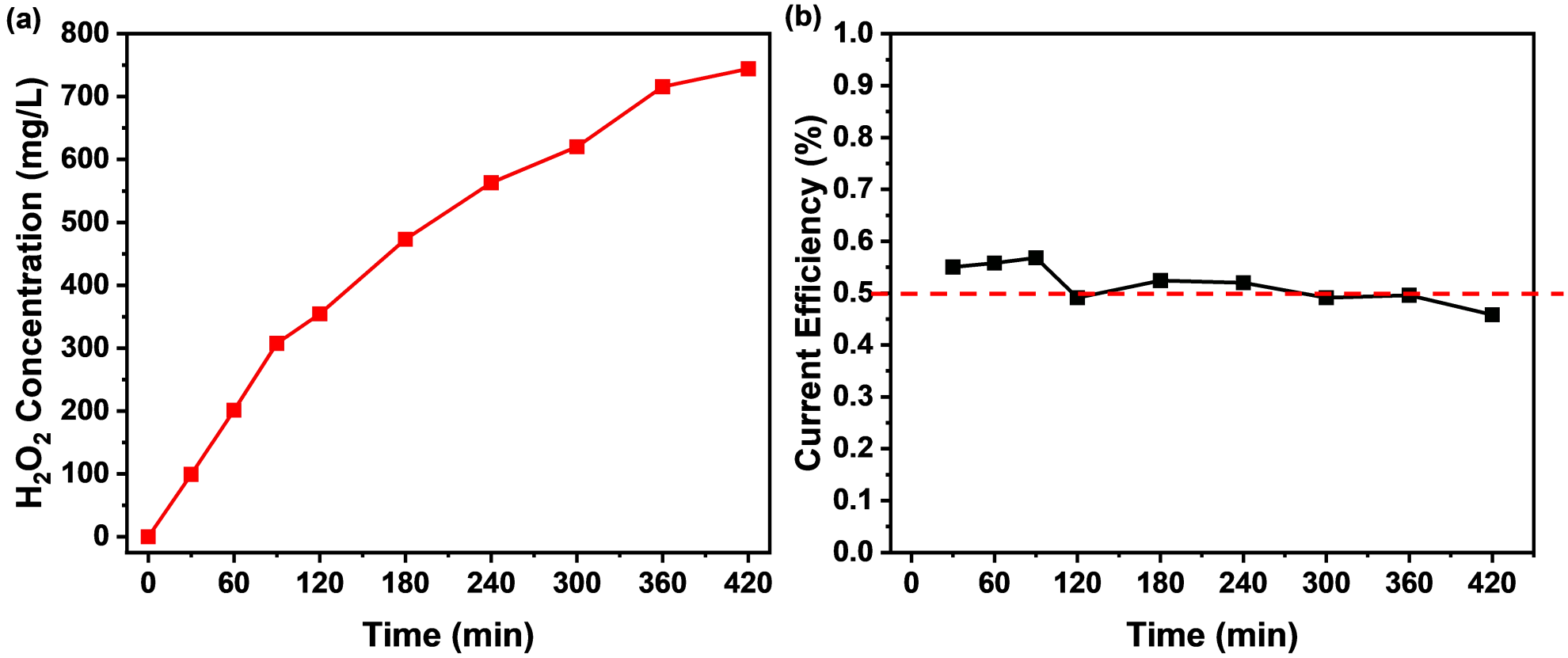
拟合性能良好

最优条件：电流密度41.20 mA/cm²、pH 8.73、0.12 g CNT负载量、0.55 mL PTFE含量

优化后过氧化氢产率为1068.56 mg/L，均值提升8.31%



稳定性测试



在420 min内可以稳定持续生产过氧化氢
最高浓度为**744.12 mg/L**
生产期间电流效率可维持在**50%**左右

小结

1. 成功制备了负载碳纳米管和聚四氟乙烯的碳毡，负载后疏水性增强，活性位点增多。

2. 单因素实验中在最优条件下可在120 min内生产最高1055.23 mg/L过氧化氢，通过响应面优化可提升至1068.56 mg/L。

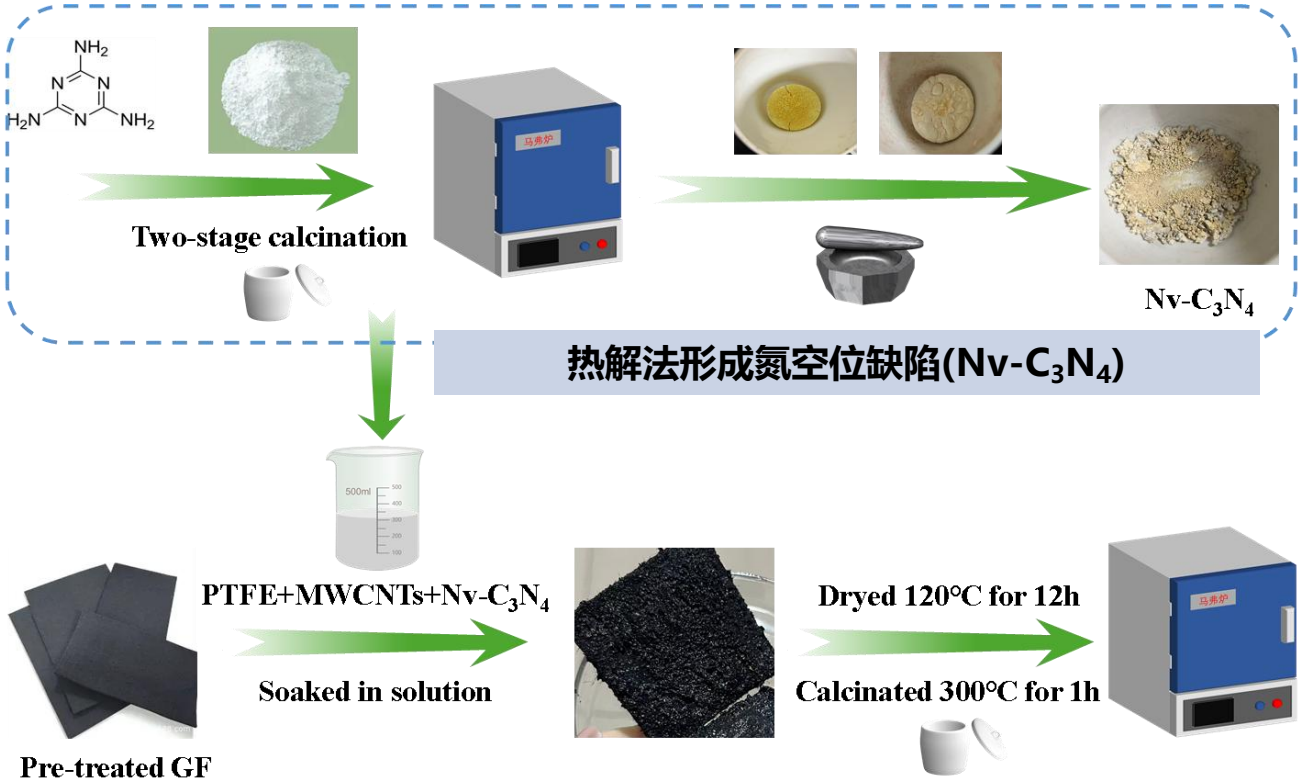
3. 内部曝气体系可在420 min内稳定生产744.12 mg/L的过氧化氢，且电流效率可以稳定保持在50%。



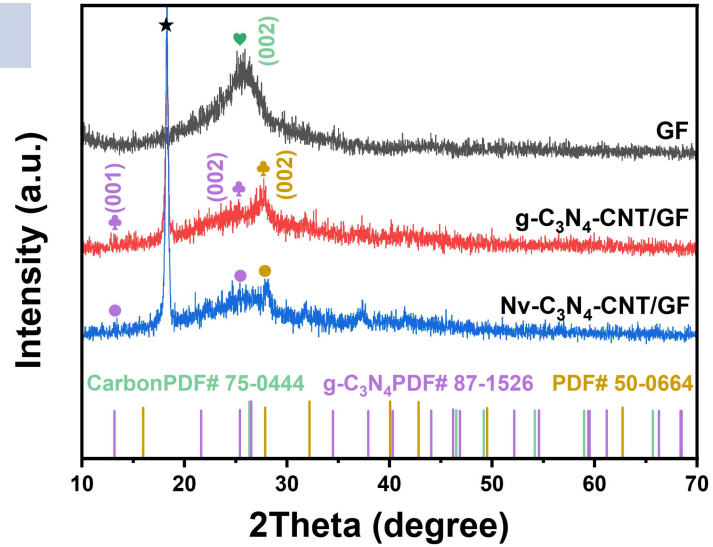
23 氮掺杂碳纤维阴极的制备及产双氧水性能

02 Nv-C_3N_4-CNT/GF阴极材料的制备和结构表征

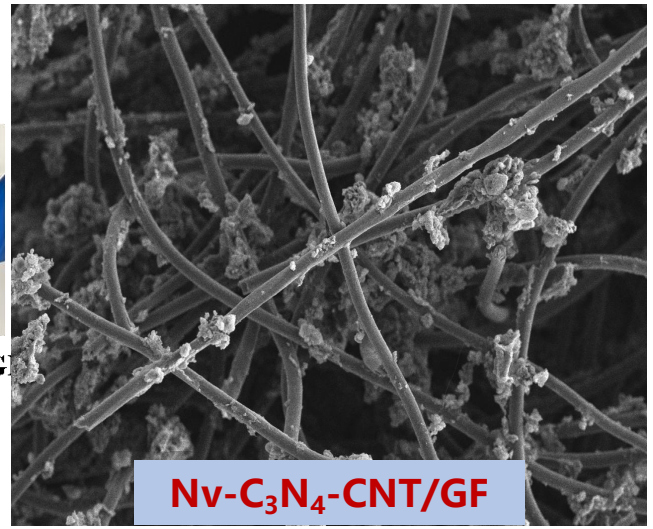
Nv-C_3N_4-CNT/GF的制备



XRD



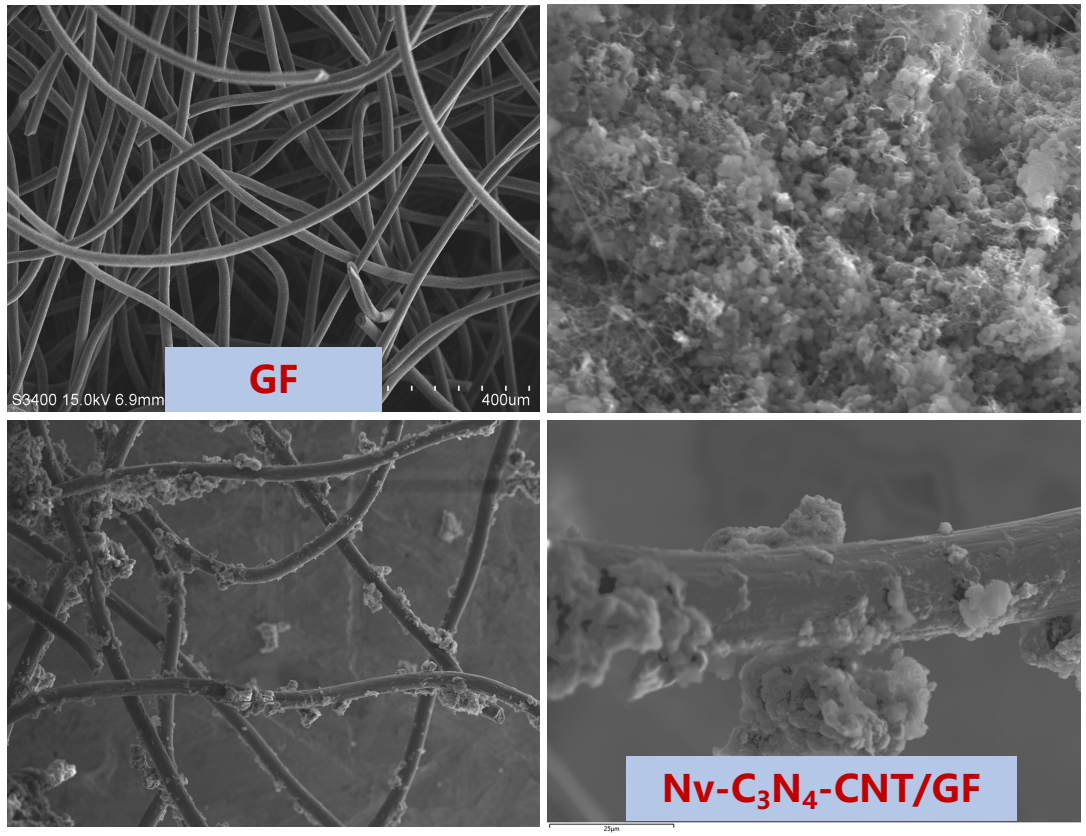
SEM



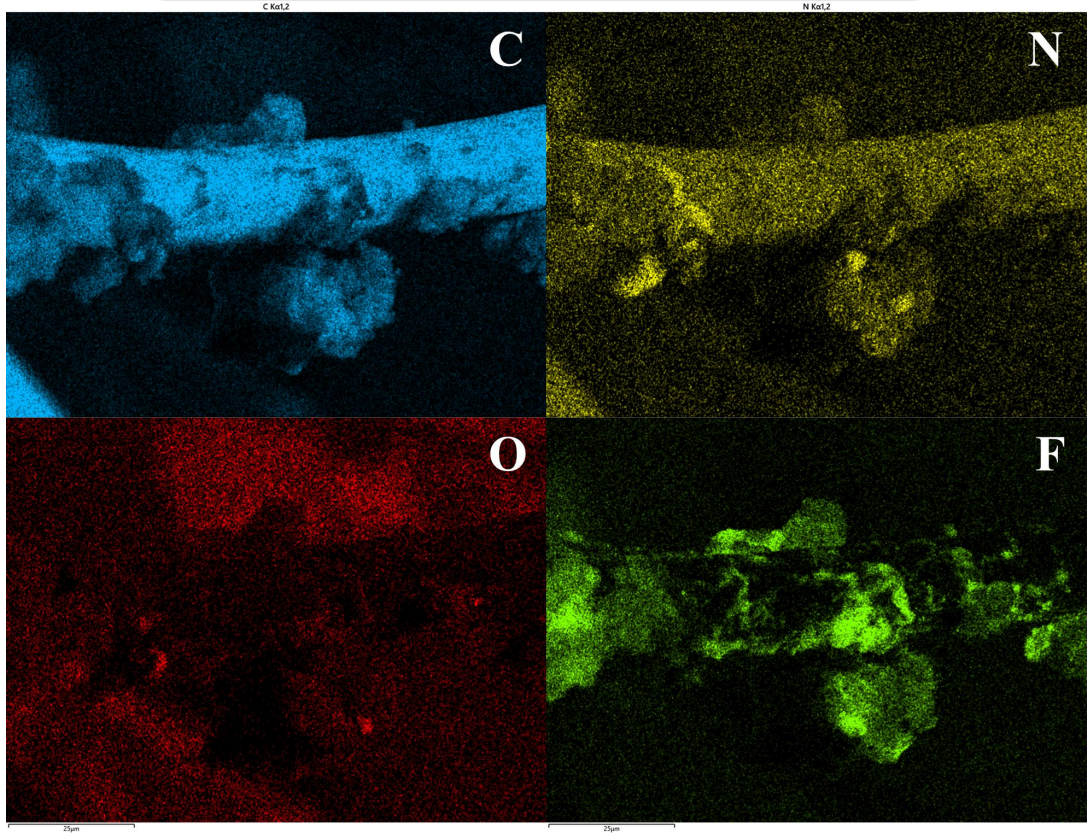
XRD和SEM初步表明Nv-C_3N_4与CNT成功负载于GF表面

02 Nv-C_3N_4-CNT/GF的形貌结构

形态表征



Mapping元素分布图

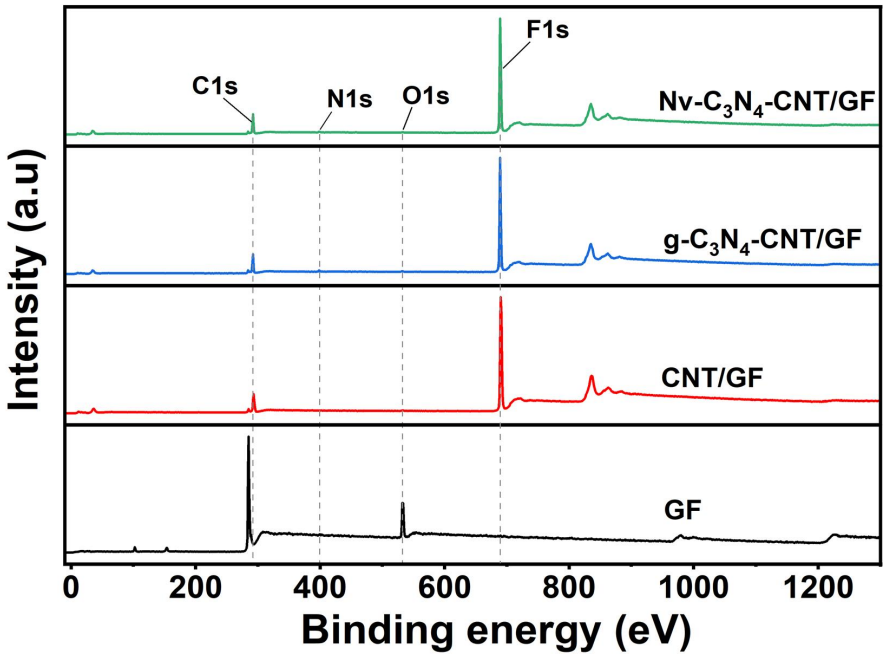


- 原始GF光滑，改性后CNT 丝状物交织，颗粒附着于 CNT 网络，暴露更多活性位点；PTFE 固化将催化剂牢固粘连；
- Mapping结果显示，C、N、O、F在电极表面均匀分布。

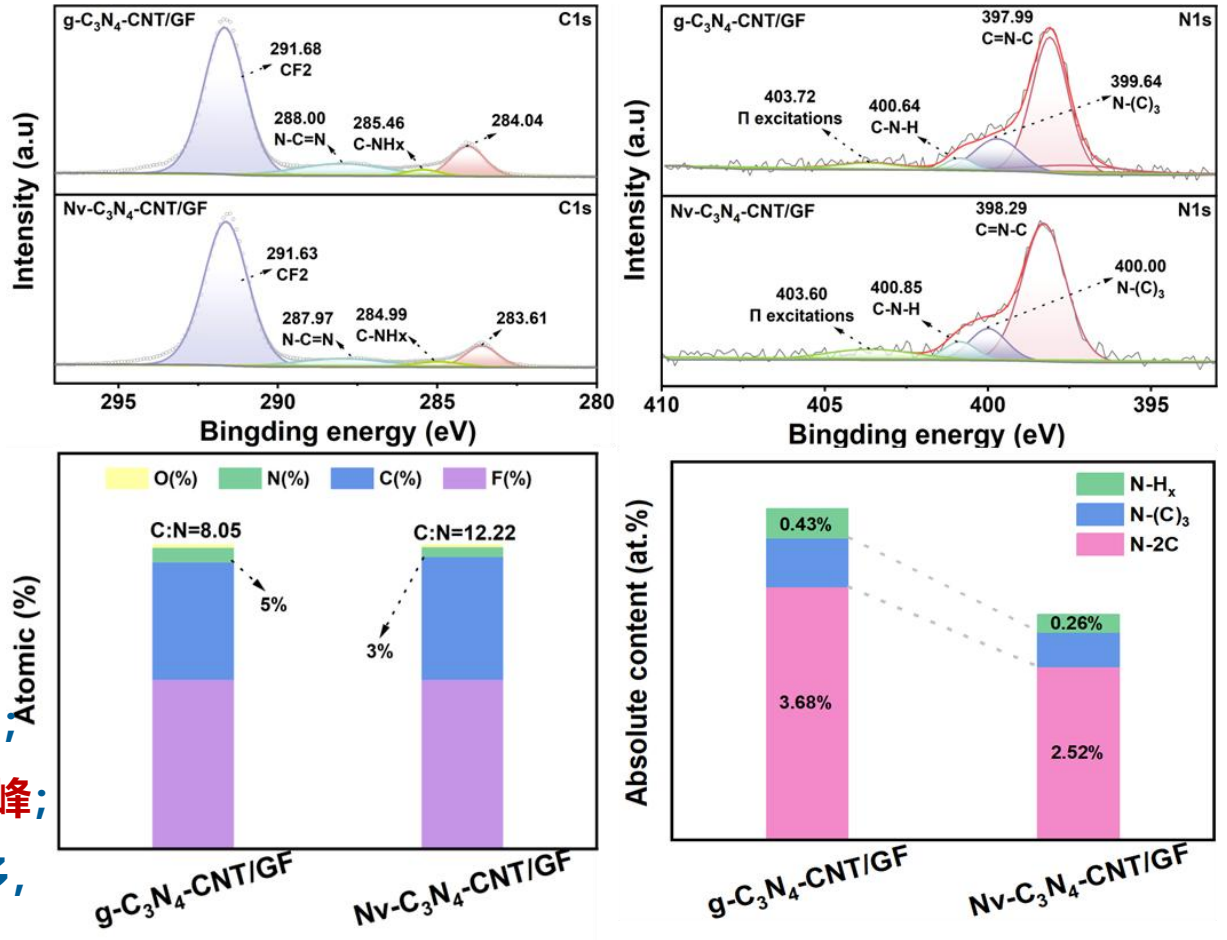
通过浸渍-烧结法成功地将催化剂负载于GF基底上，且呈现出典型的三维微孔网状结构

02 Nv-C_3N_4-CNT/GF的元素组成分析

元素组成



元素分析

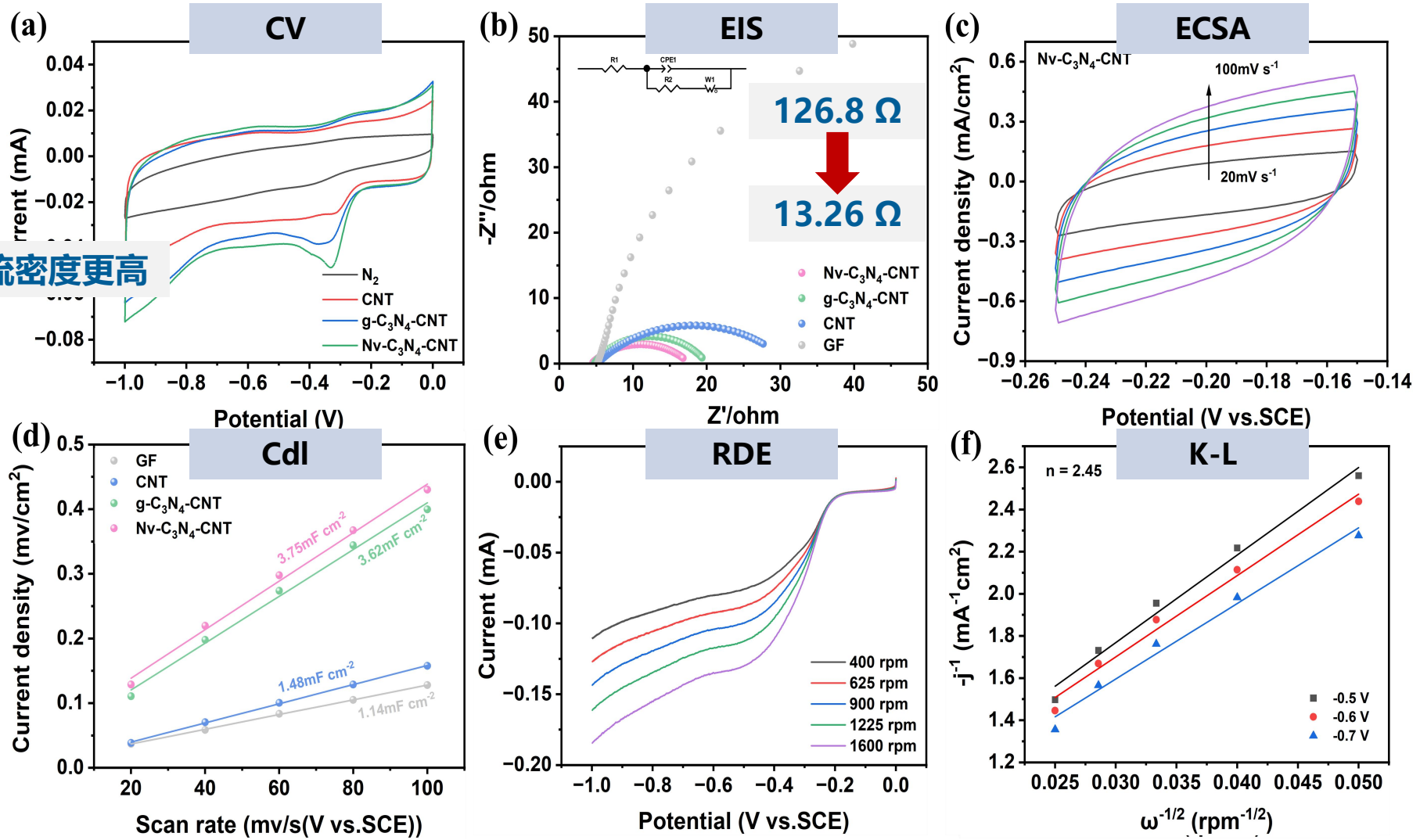


- Nv- C_3N_4- CNT/GF 特征峰向**低结合能偏移，电子密度增加**；
- N1s 谱图证明 N 掺杂，**含 sp^2 氮、叔氮、氨基氮及 π* 激发峰**；
- C/N 原子比（12.22）为前者 1.52 倍，N- 2C 含量下降最多，**证实氮空位源于庚嗪 / 三嗪环断裂。**

氮空位显著改变电子结构、提高 C/N 比、暴露更多碳位点，有利于 $2e^-$ 氧还原生成 H_2O_2

02 Nv-C_3N_4-CNT/GF的电化学表征

- 氧还原峰值电流密度更高

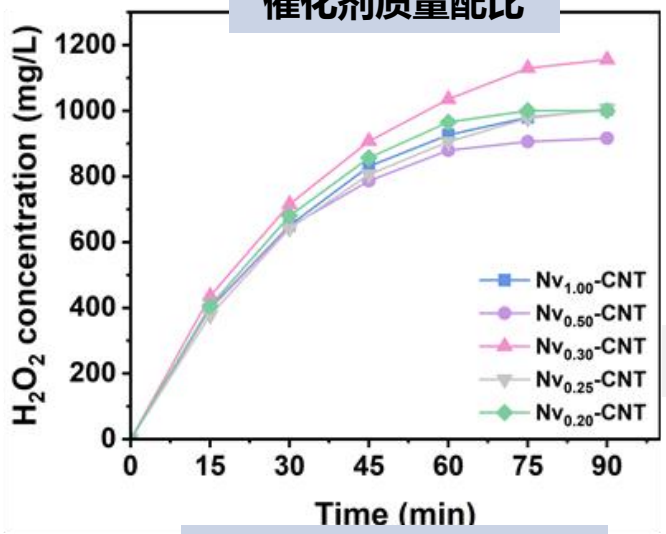


氮空位修饰改性阴极降低电荷转移电阻、增加活性表面积，以两电子氧还原为主

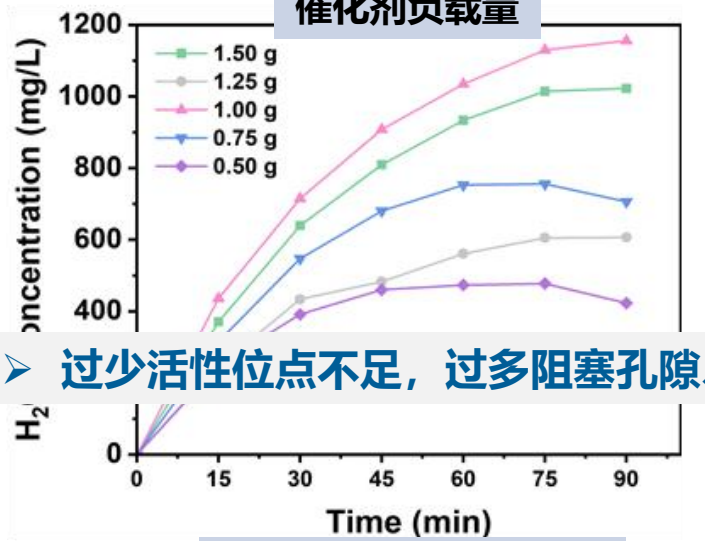
02

Nv-C_3N_4-CNT/GF电合成过氧化氢的性能优化

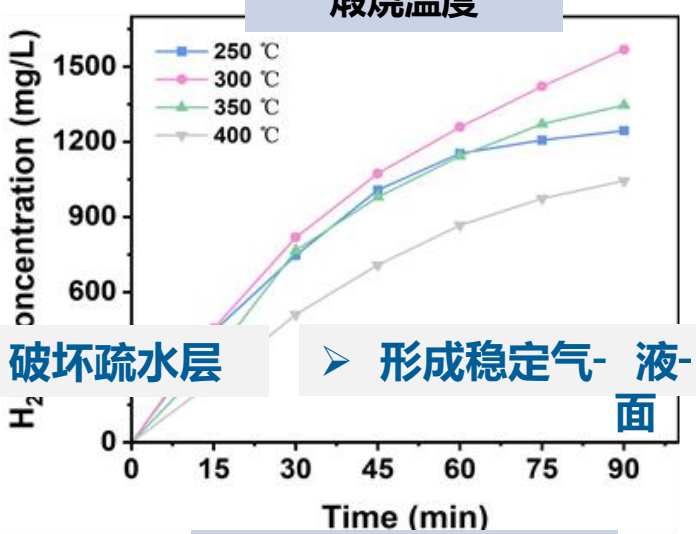
催化剂质量配比



催化剂负载量



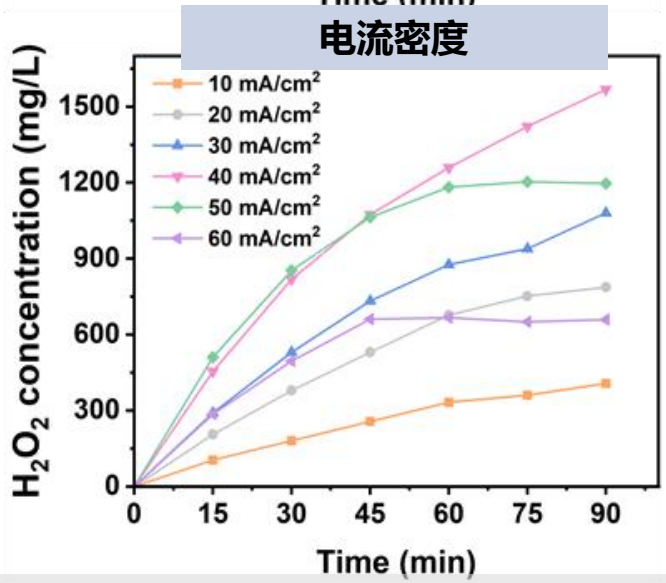
煅烧温度



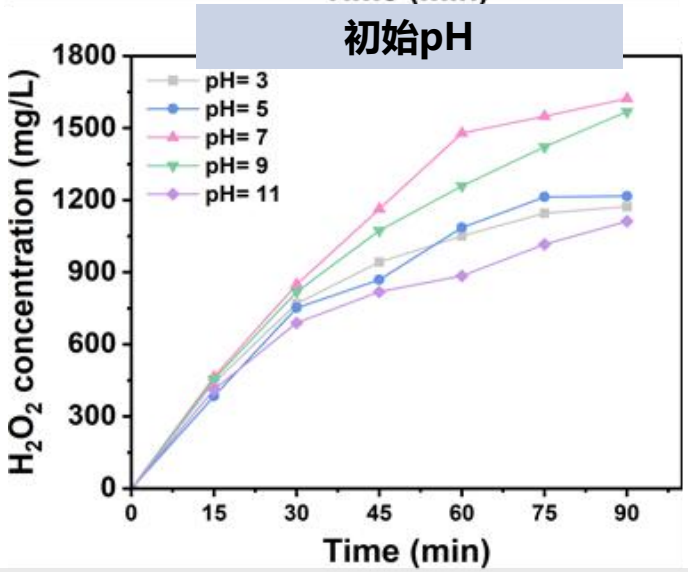
➢ 过少活性位点不足，过多阻塞孔隙、破坏疏水层

➢ 形成稳定气- 液- 固三相界面

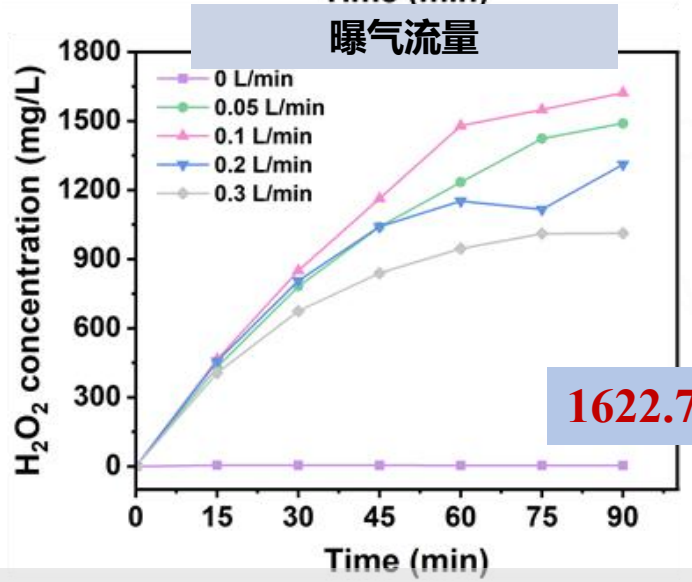
电流密度



初始pH



曝气流量



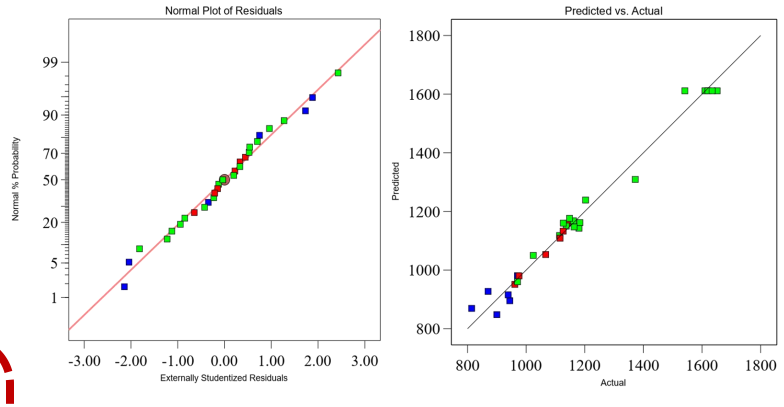
1622.73 mg/L

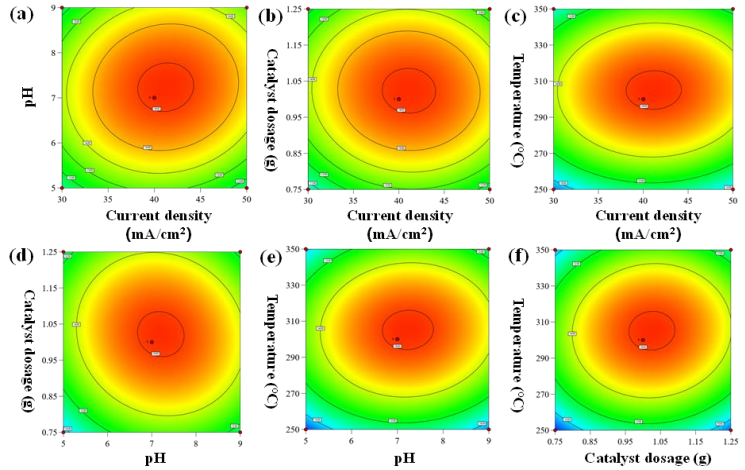
最优条件为：催化剂 3:1、负载 1.0 g、煅烧 300℃、电流 40 mA/cm²、pH≈7、曝气 0.1 L/min

02 RSM分析

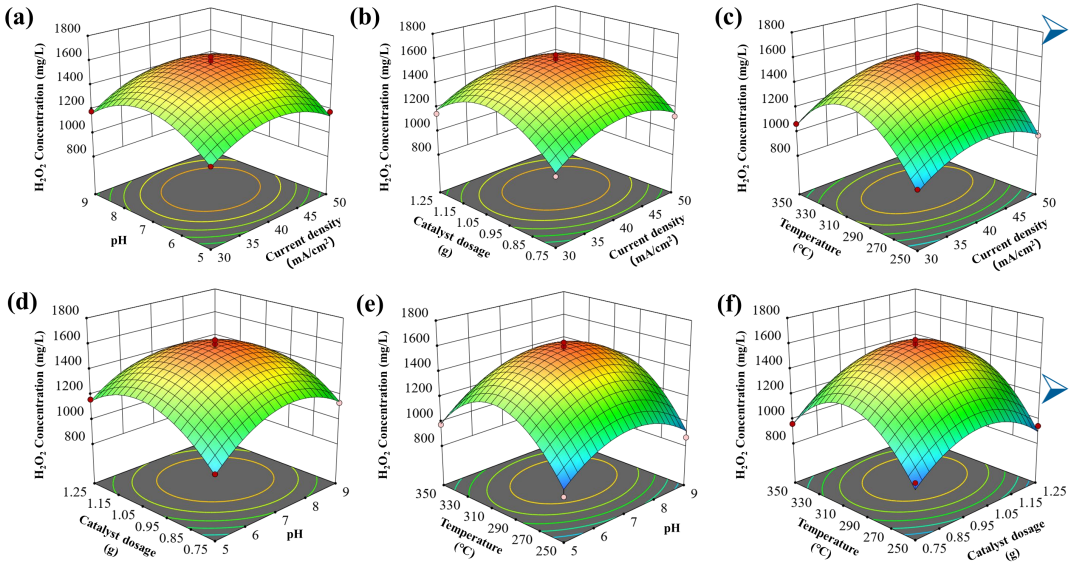
水平	A-电流密度 (mA/cm²)	B-pH	C-催化剂含量 (g)	D-煅烧温度 (℃)
低	30	5	0.75	250
中	40	7	1.0	300
高	50	9	1.25	350

来源	平方和	自由度	均方	F-value	p-value	显著性
Model	1.40E+06	14	1.00E+05	49.96	< 0.0001	**显著**
A-电流密度	19770.08	1	19770.08	9.86	0.0072	**显著**
B-pH	30176.99	1	30176.99	15.05	0.0017	**显著**
C-催化剂用量	31555.4	1	31555.4	15.74	0.0014	**显著**
D-煅烧温度	75073.51	1	75073.51	37.45	< 0.0001	**非常显著**
AB	2143.92	1	2143.92	1.07	0.3186	不显著
AC	567.15	1	567.15	0.2829	0.6031	不显著
AD	443.13	1	443.13	0.2211	0.6455	不显著
BC	7121	1	7121	3.55	0.0804	不显著
BD	2227.35	1	2227.35	1.11	0.3097	不显著
CD	3043.37	1	3043.37	1.52	0.2382	不显著
A^2	1.90E+05	1	1.90E+05	94.7	< 0.0001	非常显著
B^2	3.17E+05	1	3.17E+05	158.04	< 0.0001	非常显著
C^2	3.86E+05	1	3.86E+05	192.4	< 0.0001	非常显著
D^2	9.02E+05	1	9.02E+05	449.71	< 0.0001	非常显著
残差	28064.89	14	2004.64			
失拟项	19744.33	10	1974.43	0.9492	0.5722	不显著
误差	8320.57	4	2080.14			
总和	1.43E+06	28				





➢ **残差概率分布呈正态、实测值与预测值高度吻合，说明响应面模型拟合效果好、实验误差随机、预测精度高。**

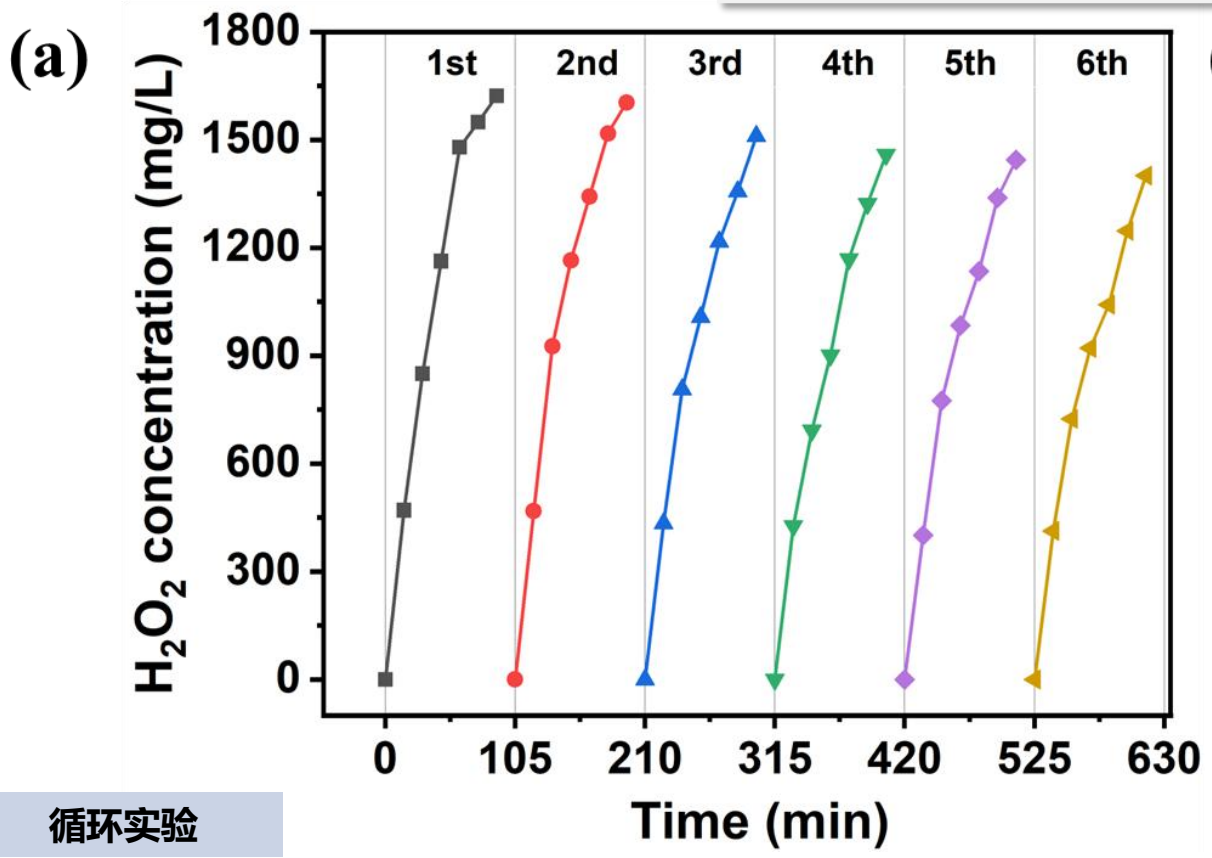


四因素三水平构建的二阶回归模型高度显著（$P<0.0001$），拟合度好（$R^2=0.9813$）失拟项不显著，可精准预测 H_2O_2产量；

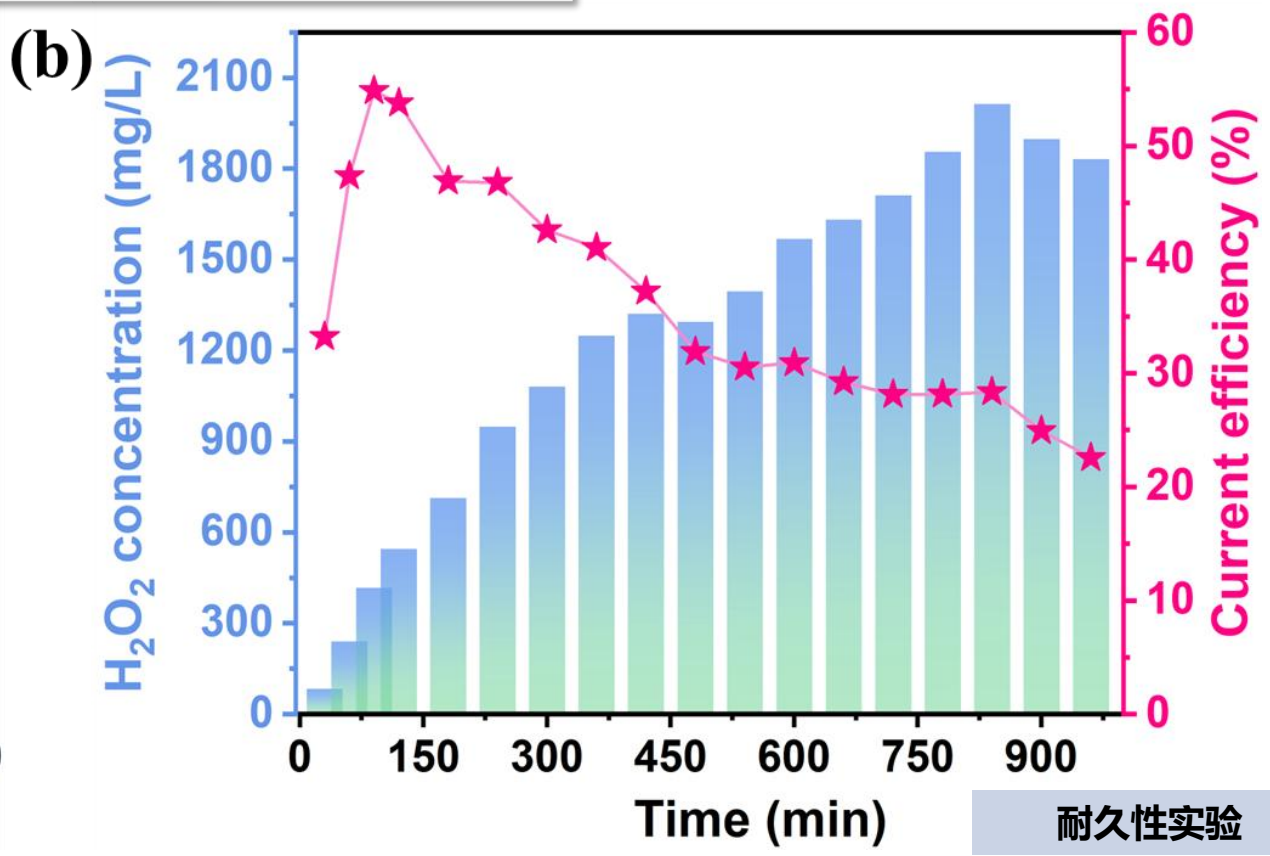
最优工艺：电流密度 41 mA/cm²、pH 7.23、催化剂用量 1.00 g、煅烧温度 305℃

02 Nv-C_3N_4-CNT/GF电合成过氧化氢的性能优化

催化剂的循环稳定性探究



循环实验



耐久性实验

- 6 次循环后 H_2O_2产量下降 13.68%，这是由于部分催化剂颗粒出现脱落及PTFE层出现局部微观开裂；
- 16 h 连续运行，840 min 时H_2O_2产量达峰值（2014.04 mg/L），900 min 后小幅下降，稳定性较良好。

Nv- C_3N_4- CNT/GF电极表现出较好的循环稳定性

02 小结

01 **材料构建与结构特性：**通过浸渍-烧结法成功制备了Nv-C_3N_4-CNT/GF复合材料，氮空位调控氮化碳电子结构、暴露更多活性位点；CNT 构建导电网络、增大比表面积；PTFE 疏水层稳定气-液-固三相界面，形成三维微孔网状结构，为高效 $2e^-$ORR提供结构基础。。

02 **电化学测试：**Nv-C_3N_4-CNT/GF 阴极电荷转移电阻低、电化学活性面积大，氮空位缺陷显著提升 $2e^-$ORR 催化活性，电子转移数接近 2，对 H_2O_2生成选择性较好。

03 **电合成过氧化氢性能：**催化剂质量比 3:1、负载量 1.0 g、煅烧温度 300°C、电流密度 40 mA/cm²、初始 pH 7、曝气流量 0.1 L/min 为最优条件，90 min 时 H_2O_2产量达 1622.73 mg/L、电流效率 54.86%。

04 **响应面（Box-Behnken）优化：**最优工艺为电流密度 41 mA/cm²、pH 7.23、催化剂负载量 1.0 g、煅烧温度 305°C，预测 H_2O_2产量 1638.73 mg/L，模型可靠。

目录

Contents

01 研究背景

02 技术研究

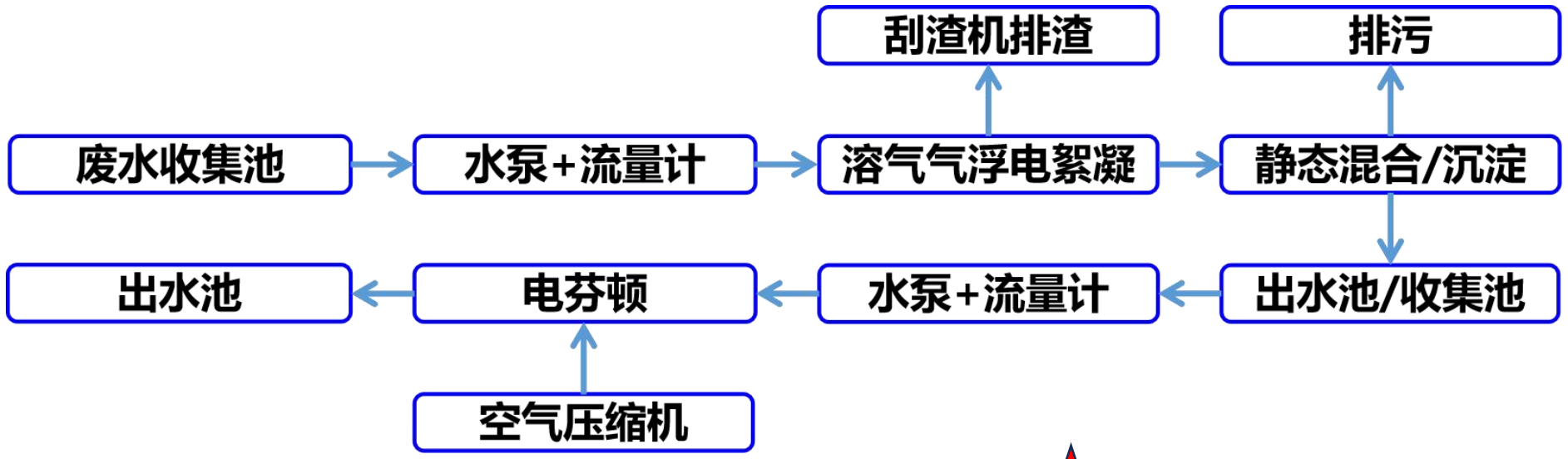
03 应用研究

04 结论与展望

3.1 含油废水的电芬顿处理

现场放大实验

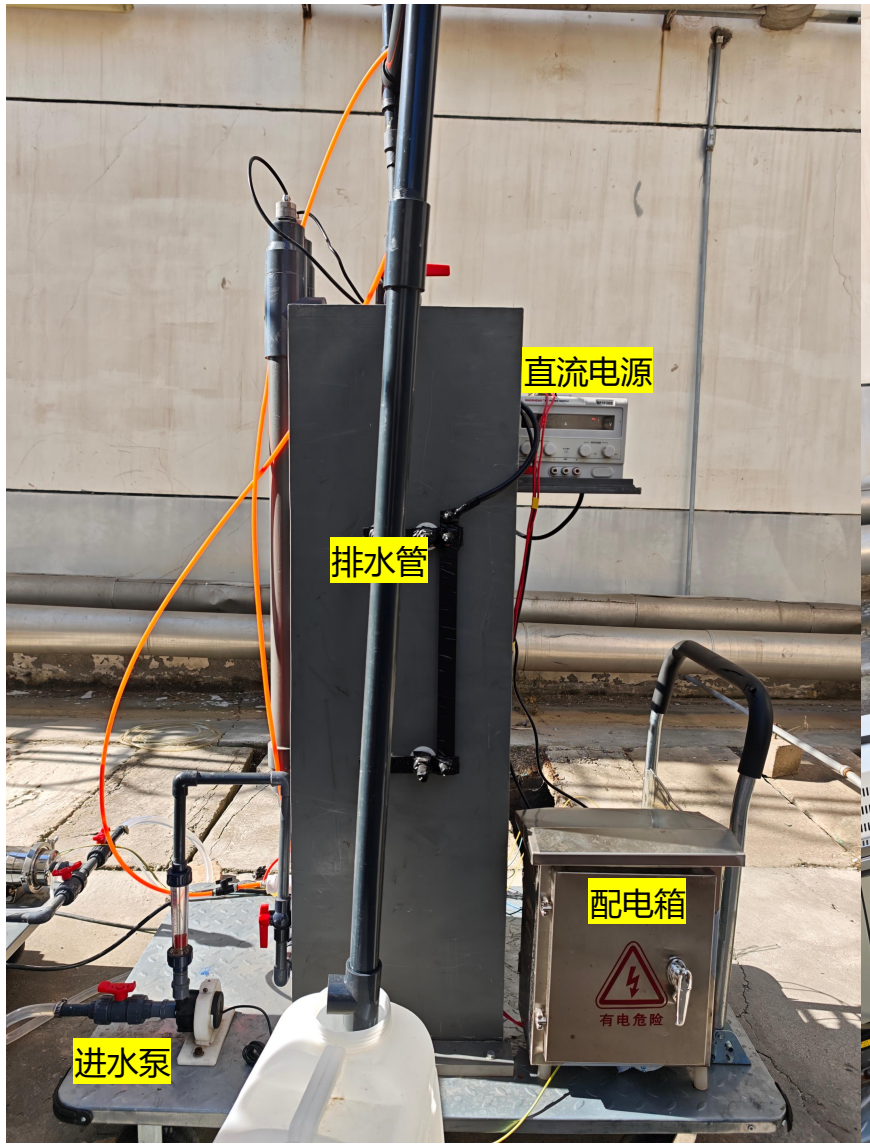
■ 1、实验方案与内容

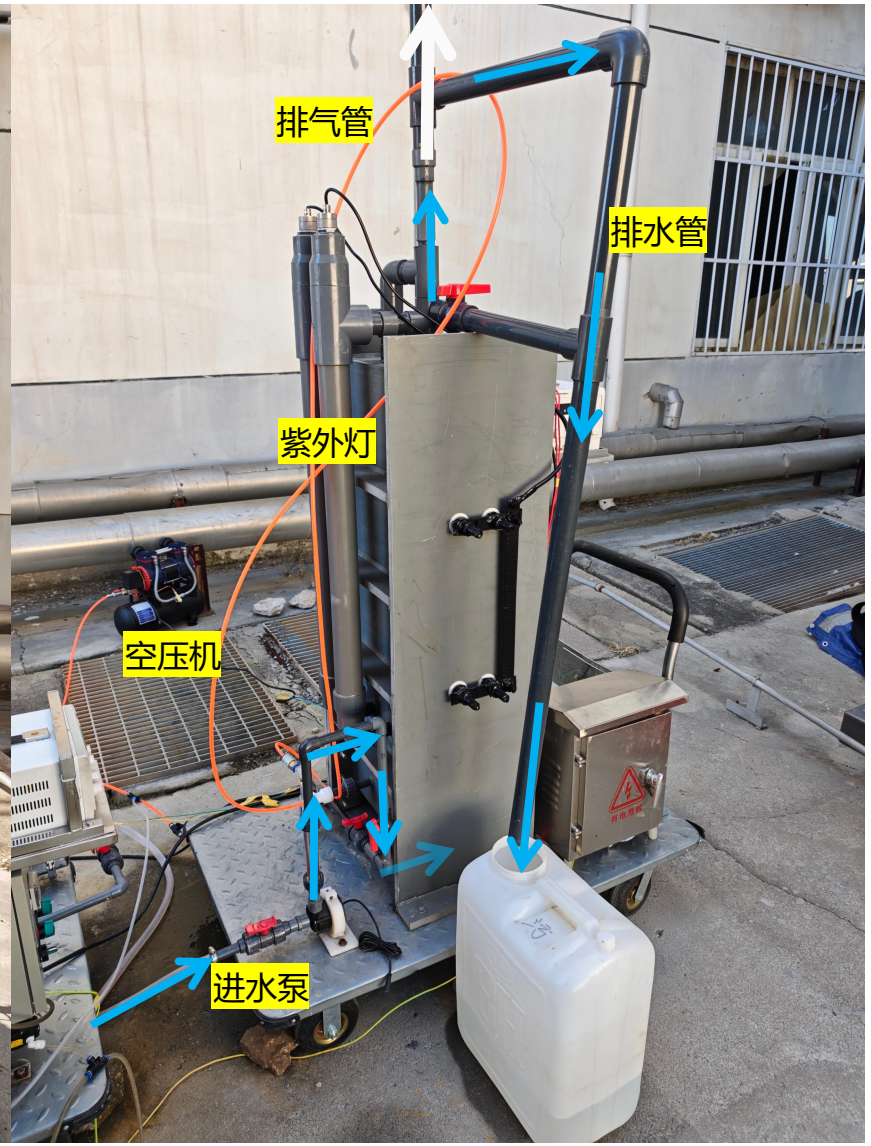


现场实验流程图

五、现场放大实验

■ 2、现场实验装置——电芬顿

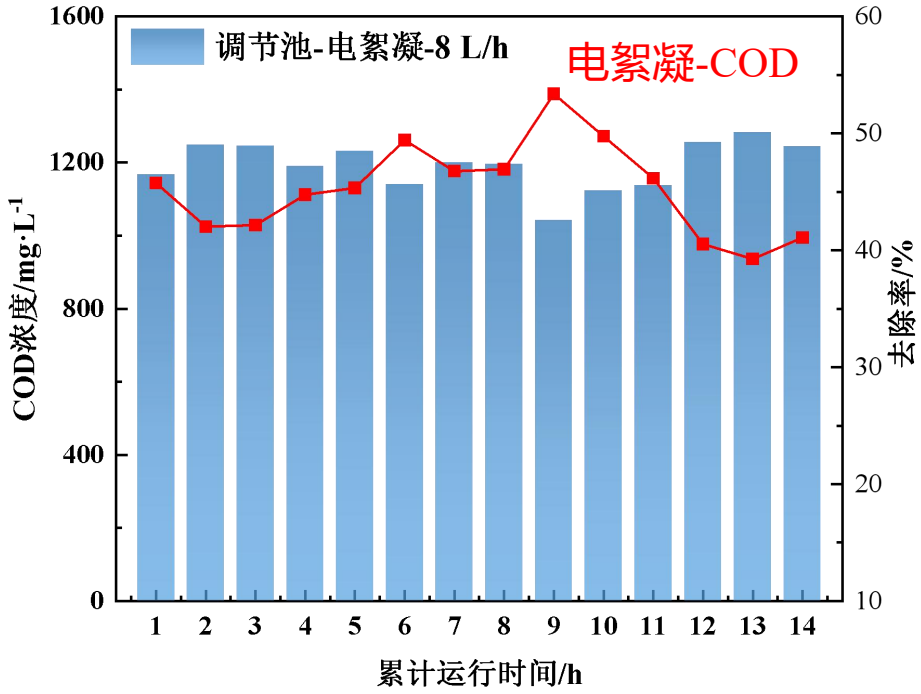


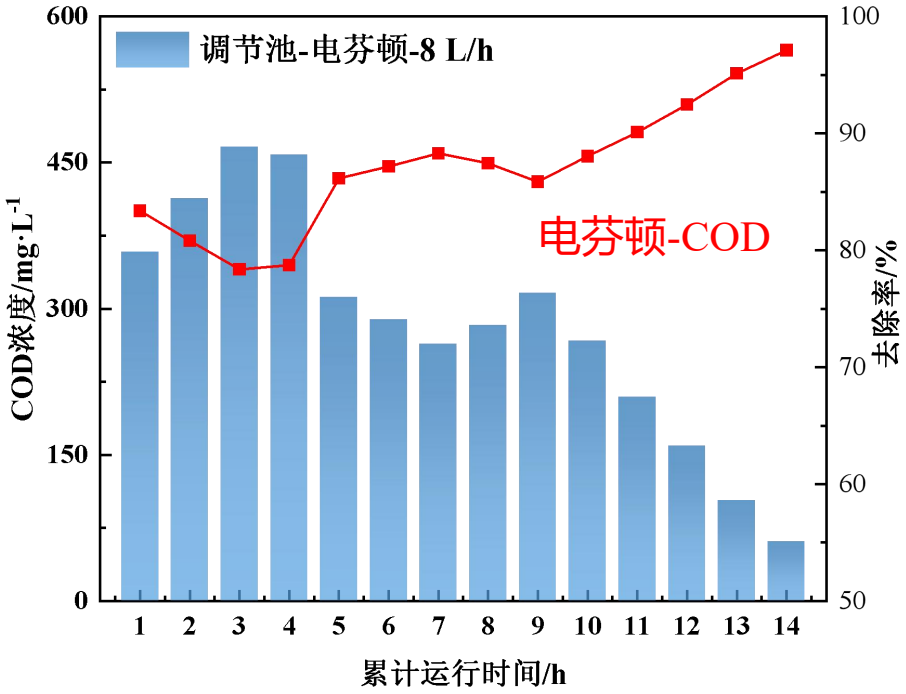


五、现场放大实验

■ 4、调节池水样实验结果

- **COD**：连续运行14 h后，原水COD浓度2112 mg/L，经电絮凝降至1244 mg/L，再经电芬顿显著降至61 mg/L。聚合物浓度从1286.51 mg/L显著下降至10.42 mg/L。紫外光进一步活化过氧化氢、提升了对难降解有机物的矿化能力。
- **氨氮**：从原水35.5 mg/L降至6.72 mg/L，去除率81.07%。氯离子由电絮凝出水4623 mg/L降至电芬顿出水3131 mg/L，表明部分氯离子在阳极被氧化生成了活性氯，直接参与污染物降解。

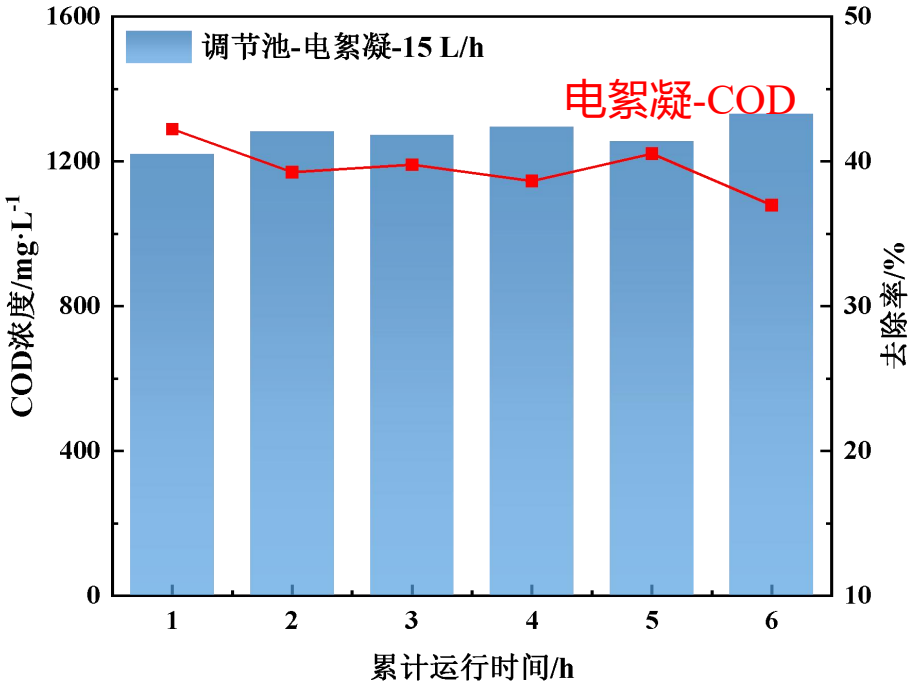


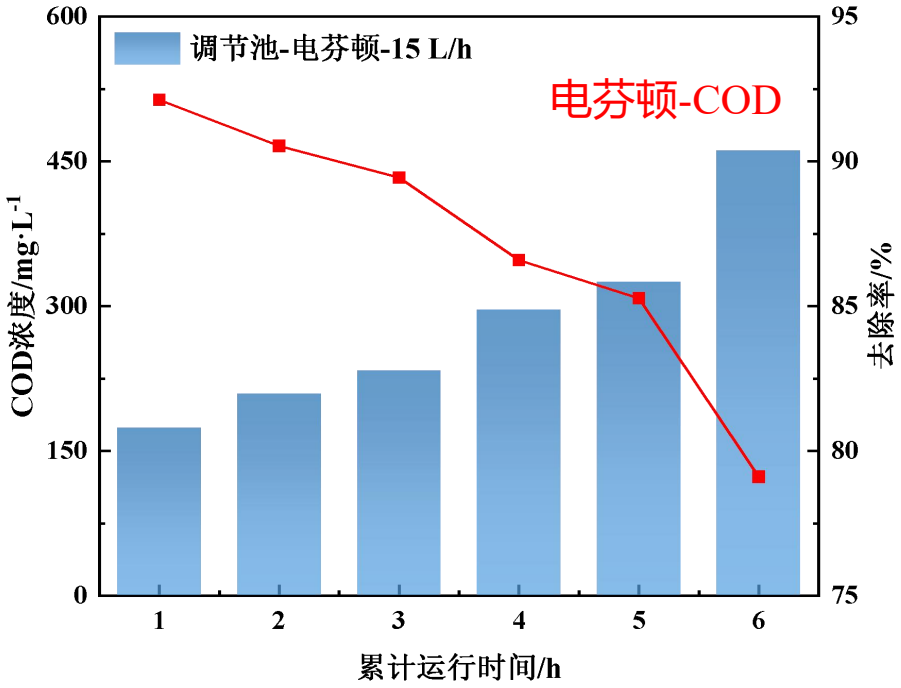


五、现场放大实验

■ 4、调节池水样实验结果——单因素实验

- **不同进水流量：**改变进水流量由8 L/h增大至15 L/h，电絮凝单元对COD的去除率维持在40%以上，然而，延长水力停留时间并未显著提升电絮凝单元COD的去除率；电芬顿单元COD去除率由91.76%下降至78.17%。

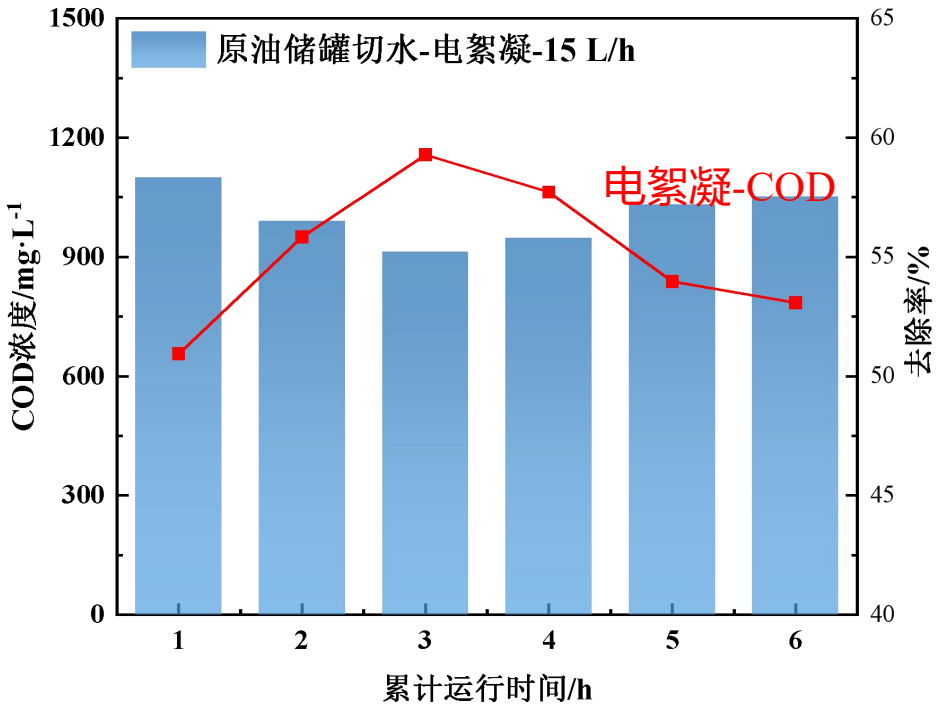


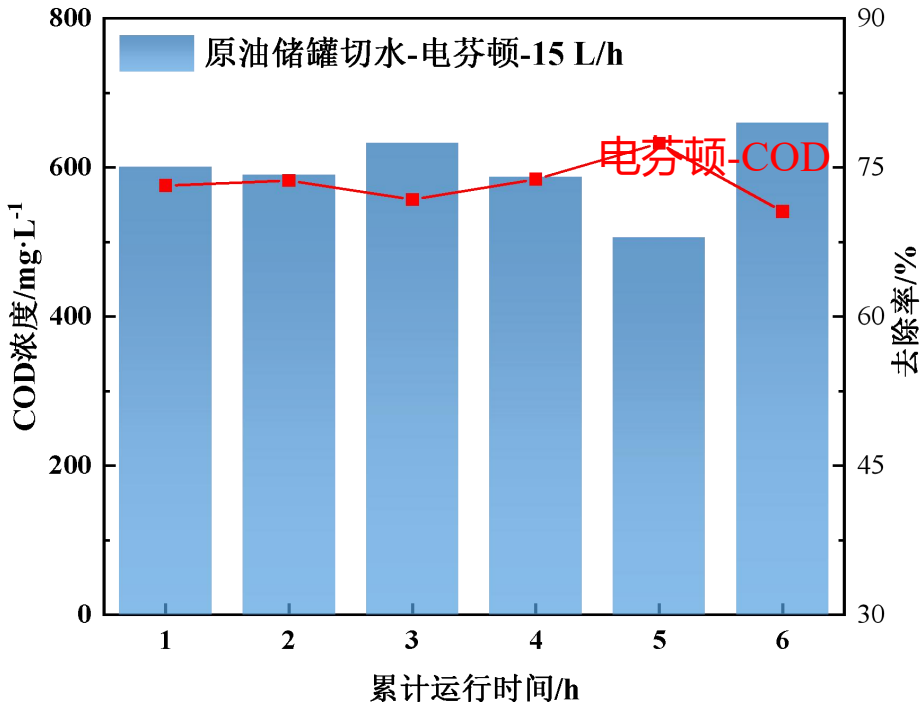


五、现场放大实验

■ 5、原油储罐切水水样实验结果

- **COD：**电絮凝出水COD为913-1100 mg/L，电芬顿出水进一步降至506-660 mg/L，总去除率在70.56%-77.43%之间波动。
- **氨氮：**原水氨氮初始浓度为25.9 mg/L。经电絮凝处理后降至14.9 mg/L，再经电芬顿处理降至5.26 mg/L，总去除率为79.69%。工艺对氨氮的去除效果稳定。

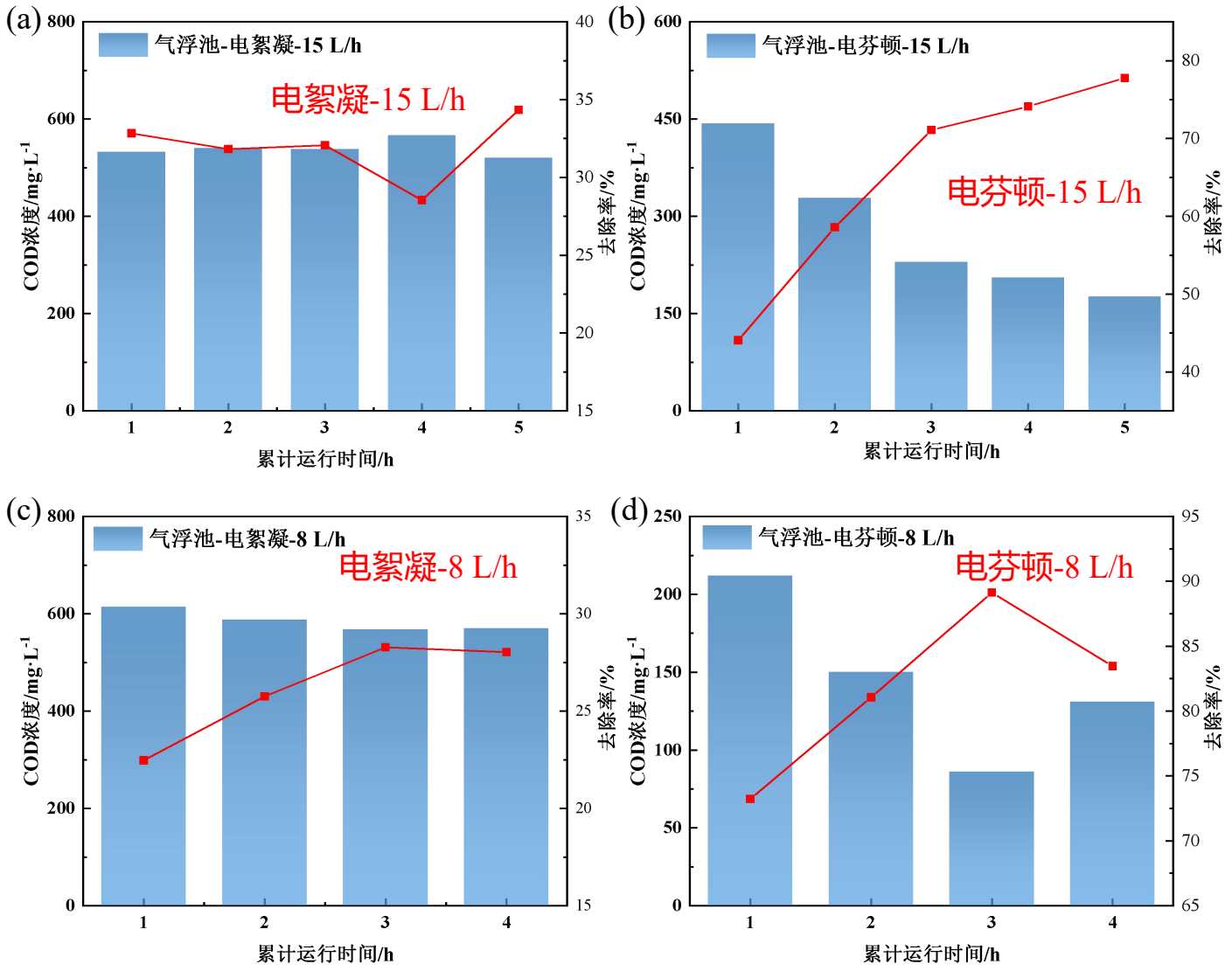




五、现场放大实验

■ 6、气浮池出水水样实验结果

- **COD**：不同进水流量下，电絮凝COD去除率变化不显著。而电芬顿单元去除率显著提升。电絮凝-电芬顿工艺综合去除率可达89.14%。出水COD为100-200mg/L。
- **氨氮**：进水流量对于氨氮的去除影响较小，整体工艺运行稳定。



3.2　有机胺废水处理

中试布局

中试规模

10L/h（240L/d)

中试场地

嘉兴市南湖区新丰镇中试基地

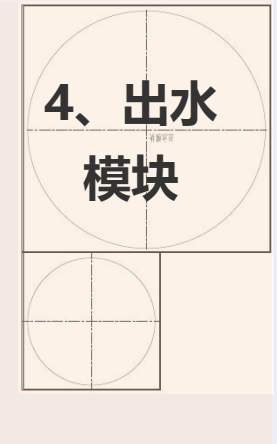


工艺流程

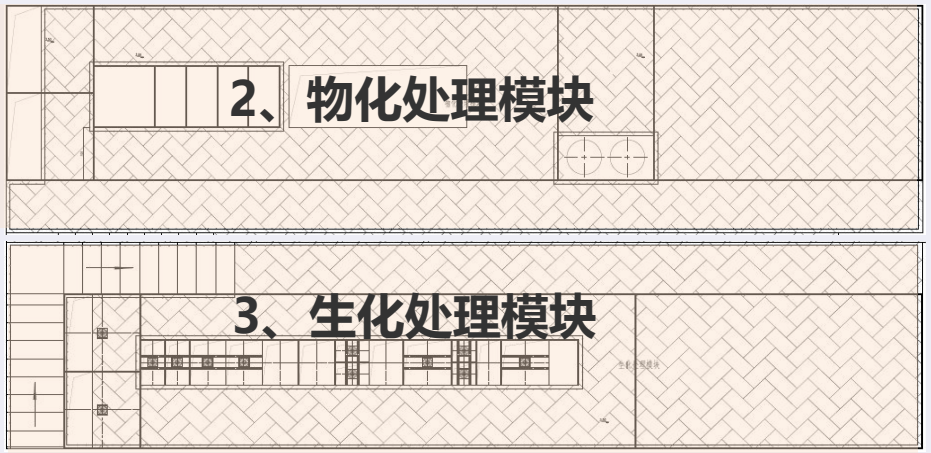
物化处理工艺：

预加氯+电化学+硫自养+尾水池

中试装置

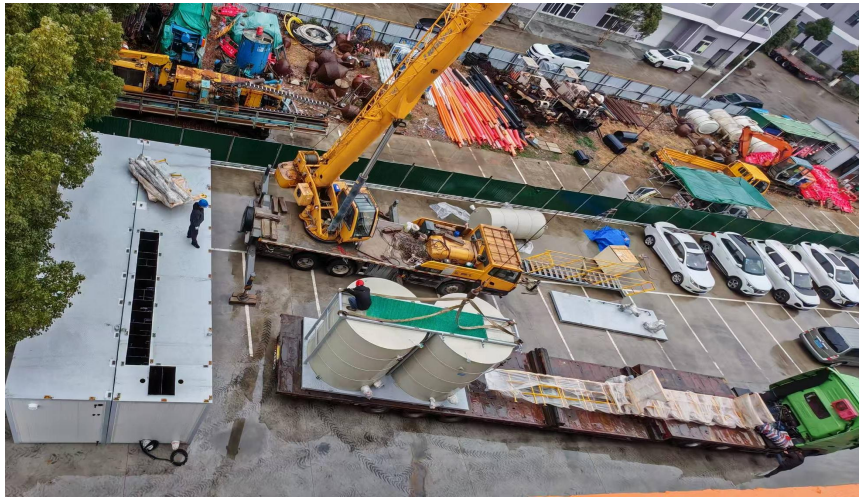






1进水调节模块 1.5×6.0×2.0m
2物化处理模块 10.7×2.7×3.5m
3生化处理模块 9.2×2.4×3.5m
4出水模块 1.5×7.0×2.0m

现场照片













原水水质

中试试验采用含有机胺废水

- 第1批，取5t原水，2026.01.13
- 第2批，取9t原水，2026.02.03
- 第3批，取9t原水，2026.03.27
- 第4批，取8t原水，2026.04.21
- 第5批，取8t原水，2026.04.29（尚未启用）

各批原水常规数据化验结果

原水	COD	氨氮	总氮	pH	电导率 (μS/cm)	TDS (g/L)
第一批	2775	662	1137	7.3	25400	13.6
第二批	3140	670	1150	8.4	25300	13.5
第三批	1330	606	710	6.87	23400	13.0
第四批	925	652	912	8.33	14590	8.0

第三批原水元素离子化验结果

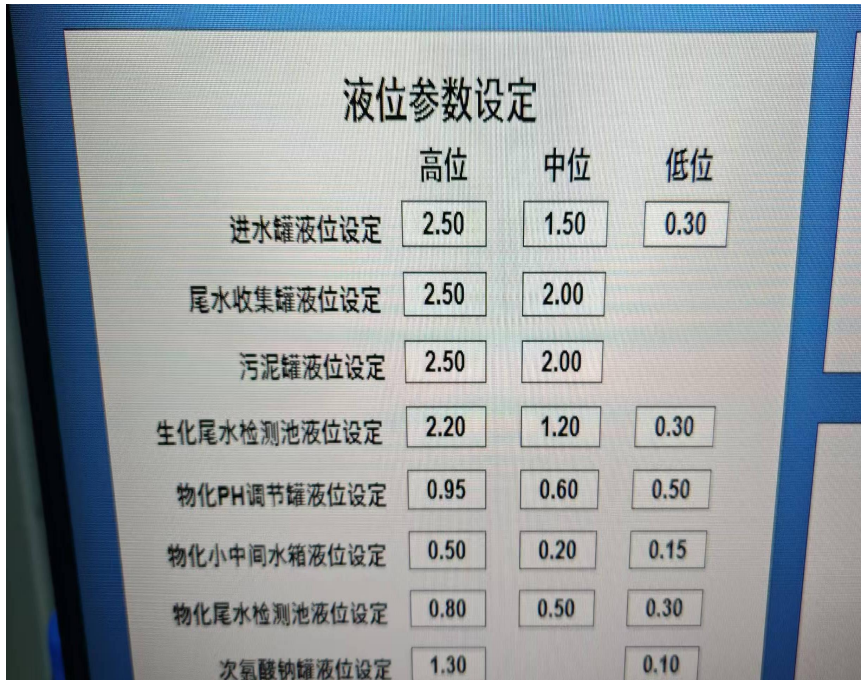
金属元素	浓度[mg/L]	阴离子	浓度[mg/L]
K	2.30	Cl^-	42
Ca	2.93	SO_4^{2-}	11100
Na	1863.57	NO^{2-}-N	4.01
Mg	0.14	NO^{3-}-N	0.69
Al	0.13	Br^-	4.76
Fe	0.12		
Mn	0.29		
Zn	0.02		

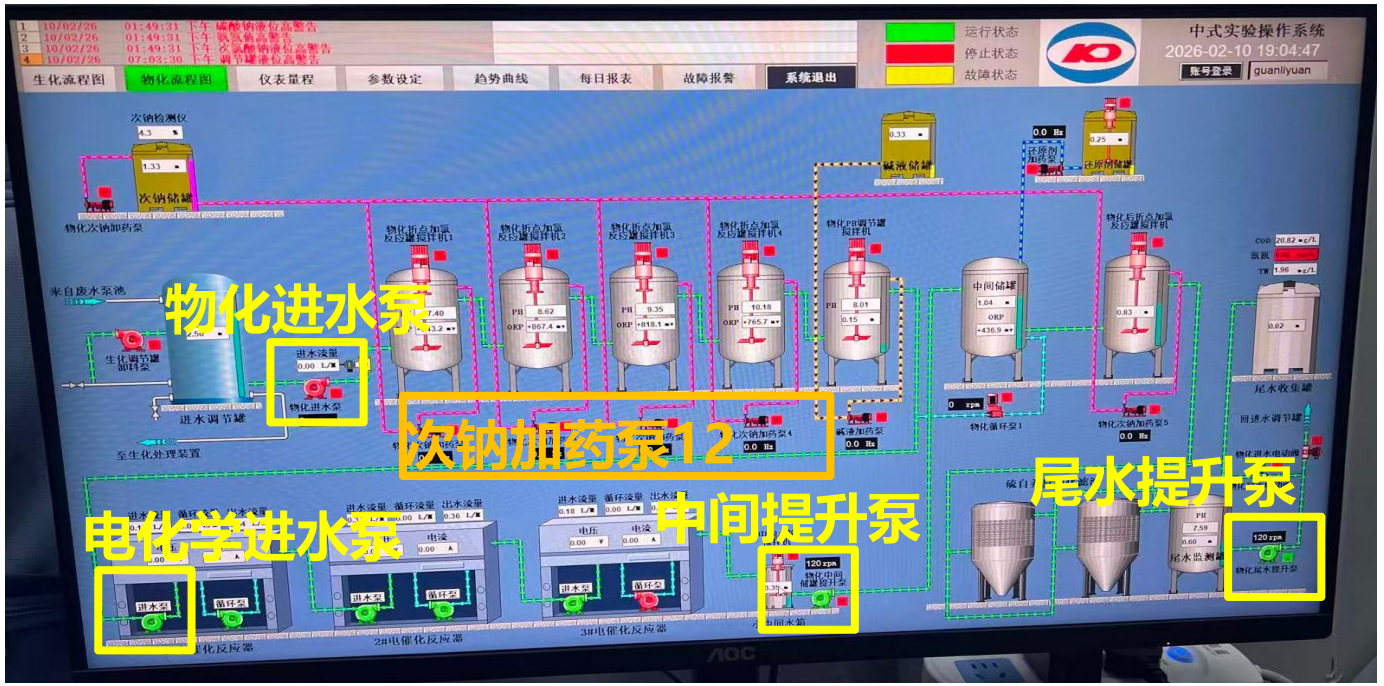
原水特性：酸碱中性，高盐高电导

主要盐分：硫酸钠

1mg/L 乙醇胺 ~1.31mg/L COD ~ 0.39mg/L TOC ~ 0.23mg/L TN

联动测试





已完成物化线所有6项联动运行

物化进水泵与中间储罐液位联动，高停

电化学进水泵与中间储罐液位联动，高开低停

中间提升泵与小中间水箱液位联动，高开低停

尾水提升泵与尾水监测罐液位联动，高开低停

次钠加药泵1与进水流量联动

次钠加药泵2与进水流量联动

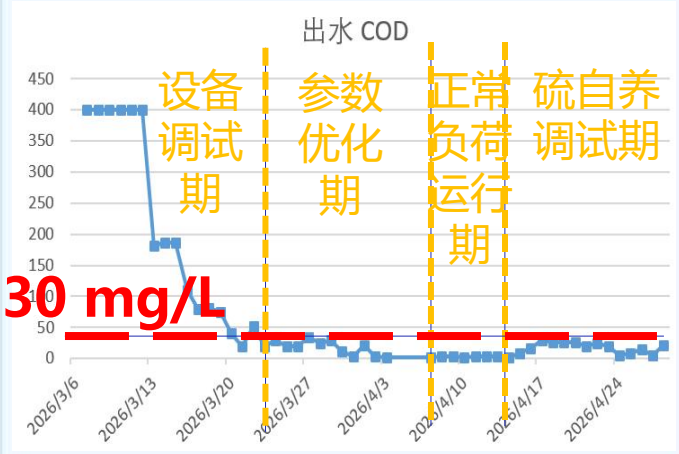
出水水质

2.5-3.4 设备安装单机调试　　**3.5-至今 物化试验**

- 阶段一：3.5-3.22，设备调试期
- 阶段二：3.23-4.6，参数优化期（增加电化学4、5）
- 阶段三：4.7-4.14，稳定运行期
- 阶段四：4.15-4.30，硫自养调试期
- 阶段五：5.1-至今，设备优化调整

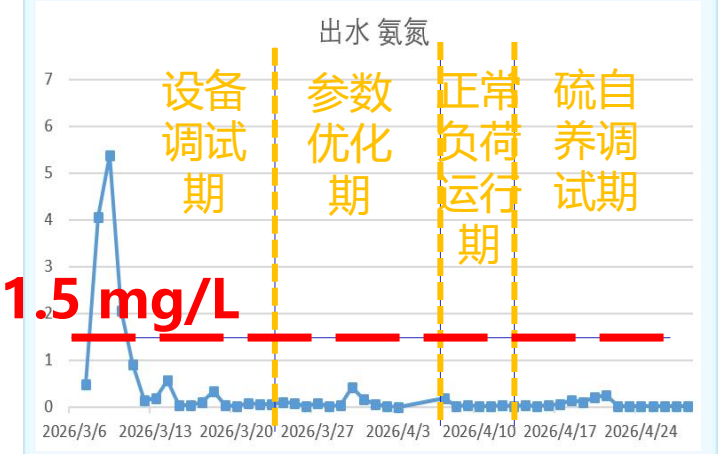
出水 COD

<30 mg/L



出水氨氮

<1.5 mg/L



出水TN

<10 mg/L



4.7-4.14期间，物化工艺实现连续7d自动运行稳定达标

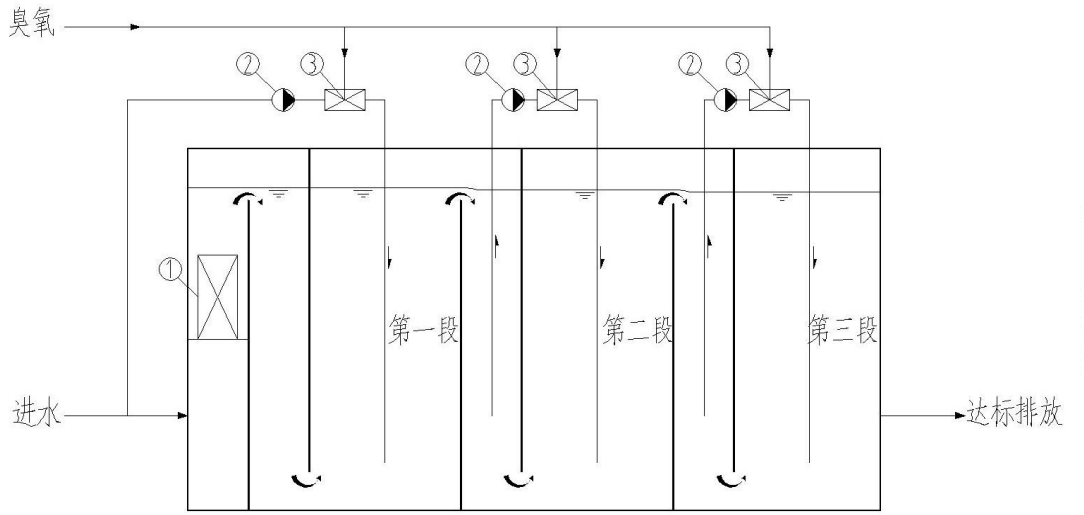


张乐华 慎独+习劳

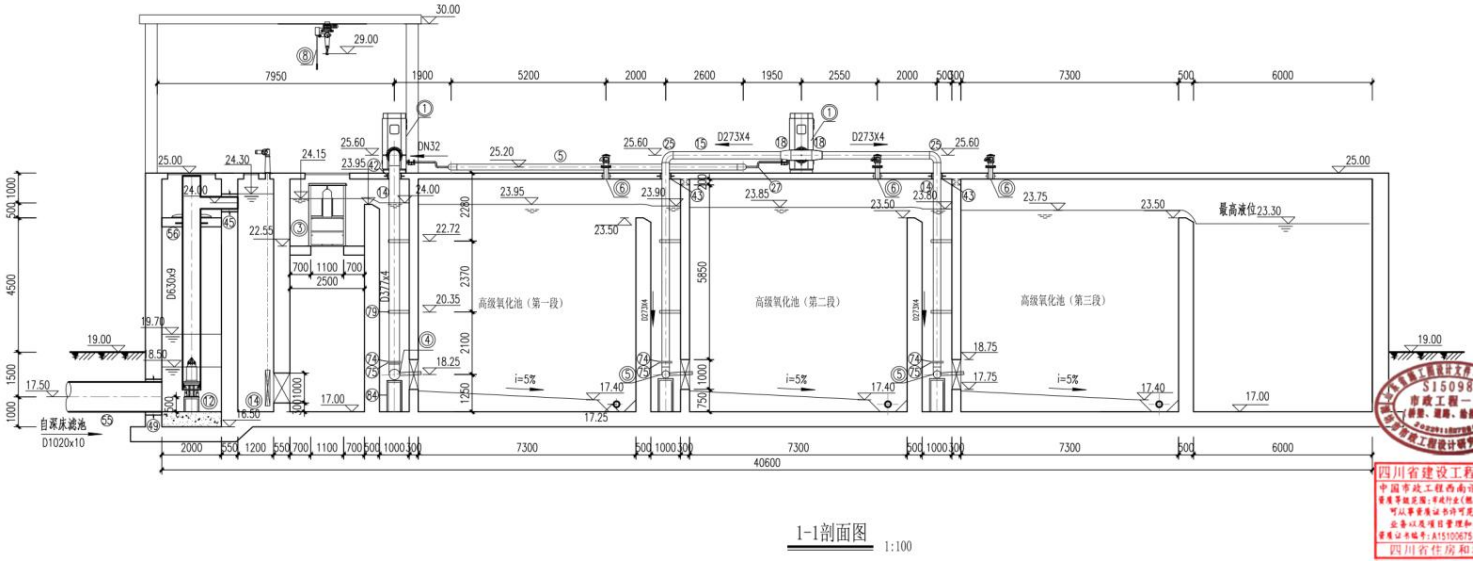
上海 闵行

3.3 电化学激发臭氧工艺

4.1 电催化耦合O_3反应器工艺介绍



① 电催化耦合O_3反应器； ② 定制的离心泵；③ 高效溶气装置



1-1剖面图 1:100

4.2 电催化耦合O_3氧化与传统O_3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

案例一：设计规模 5万m3/d （山东）
案例二：设计规模1000 m3/d （沈阳）



四、项目效果

案例一：

1. 设计处理水量为5万m^3/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

案例二：

1. 设计处理水量为1000m^3/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

目录

Contents

01 研究背景

02 技术研究

03 应用研究

04 结论与展望

4.1 结论

01 阴极材料

PFTE气体扩散阴极、 空气辅助阴极、氮碳掺杂石墨阴极能够提供更多暴露活性位点和更快界面电子传输。FE达到80%，双氧水产量在200-5000mg/L。

02 应用研究

气体扩散阴极构建的电芬顿处理含油废水、含有机胺废水均效果明显；，气体扩散阴极构建电化学-臭氧工艺，用水的深度处理，可达近三类地表水的排放标准，展现出良好的实际应用潜力。

2026电化学水处理技术及装备交流会

谢谢！

- 张乐华　徐成建　谢旺红　胡华为　卢子兰　邱燕楠

- 单位：华东理工大学　石河子大学