

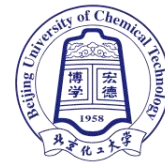


北京化工大学
BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

电催化氧化技术同步脱氮及降 有机物的工程案例

报告人：周家成 副研究员
北京化工大学-高新技术研究院 王焕升教授团队

2026 年6月27日



北京化工大学
BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

目录

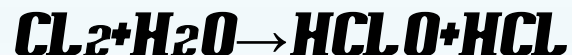
- 一. 研究背景
- 二. 研究内容
- 三. 小试实验
- 四. 中试实验
- 五. 示范工程建设
- 六. 相关研究

电化学去除氨氮机理：电化学体系氧化降解氨氮，按照作用的不同，可分为直接氧化和间接氧化。

直接氧化:氨氮被吸附到阳极表面，与阳极直接发生电子转移，从而被氧化降解



间接氧化:阳极反应先产生活性氯、羟基自由基、臭氧、过氧化氢等物质，然后 废水中的氨氮再与其发生反应而被氧化降解。



研究内容

- 服务区污水水质调研，总结其不同服务区之间的水质区别，总结高速服务区典型的水质水量的变化特点。
- 开展实验室电化学法去除氨氮二维电极和三维电极工艺流程、工艺设备和工艺参数的筛选和优化。
- 电化学小试实验，通过小试实验确定适合服务区污水电化学处理单元的最佳技术参数；
- 开展中试示范研究，在小试实验基础上设计中试实验装置1座，处理水量1 m³/H。

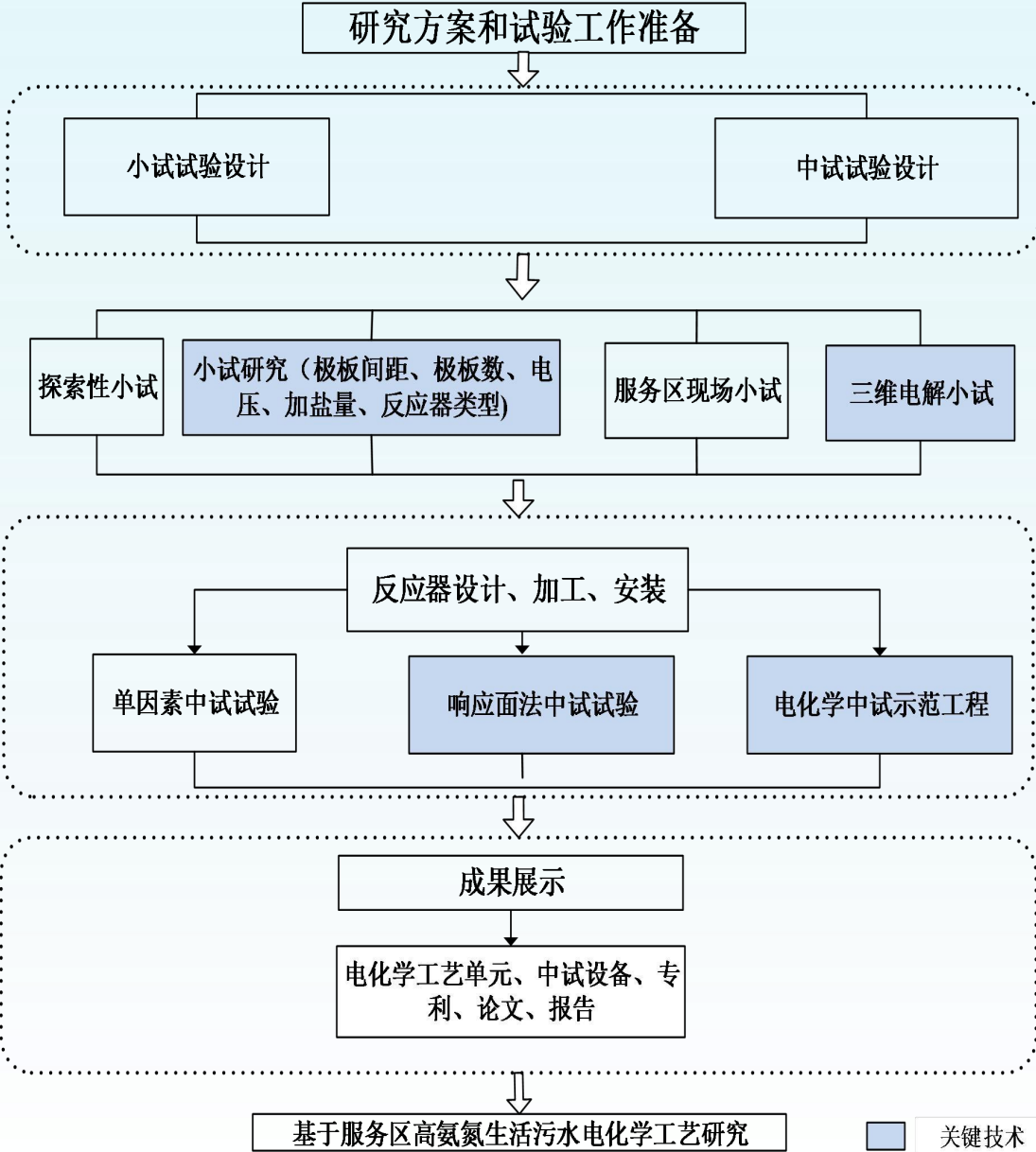
试验设计

小试试验

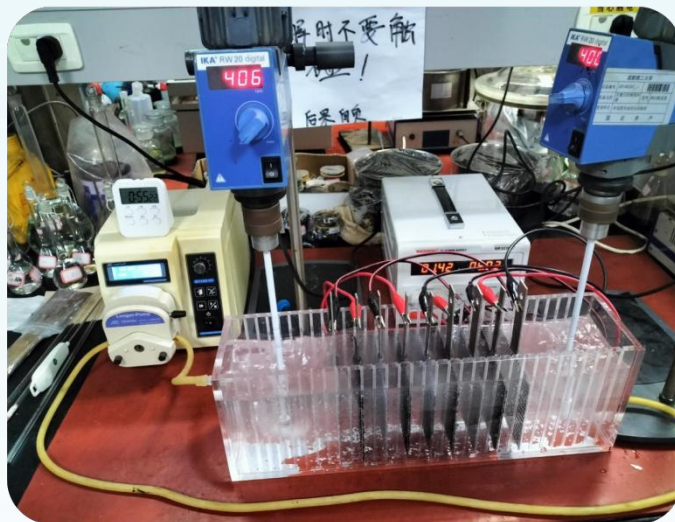
中试试验

课题目标

工艺指标	氨氮(mg/L)			总氮(mg/L)		
	进水指标	出水指标	去除率	进水指标	出水指标	去除率
设备前置	100~200	30~60	70%	120~240	40~80	67%
设备后置	10~30	1.5	95%	15~50	15	70%



阳极:钌铱钛网, 阴极:钛网; 电解槽:方形/圆形;
工艺条件:极板间距、电压、电解时间、流体流速、处理量;
目标参数:氨氮去除率、总氮去除率、吨水电耗。

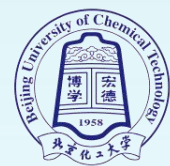


方形敞开式
(反应器I)



圆形封闭式
(反应器II)

电解槽反应器类型影响研究



方形开放式(电压=6V，NaCl=400mg/L)

电解时间 (min)	电压 (V)	电流(A)	电流密度 (mA/cm2)	温度 (° C)	电导率 (μs/cm)	氨氮浓度 (mg/L)	去除率 (%)	1m³水耗 电量 (kW·h)
0	6	3.34	2.78	23.1	1943	70		
30	6	3.05	2.54	28.1	1539	40	21.43%	6.1
60	6	2.98	2.48	30	1515	40	38.57%	11.92
90	6	2.87	2.39	30.1	1526	35	50.00%	17.22

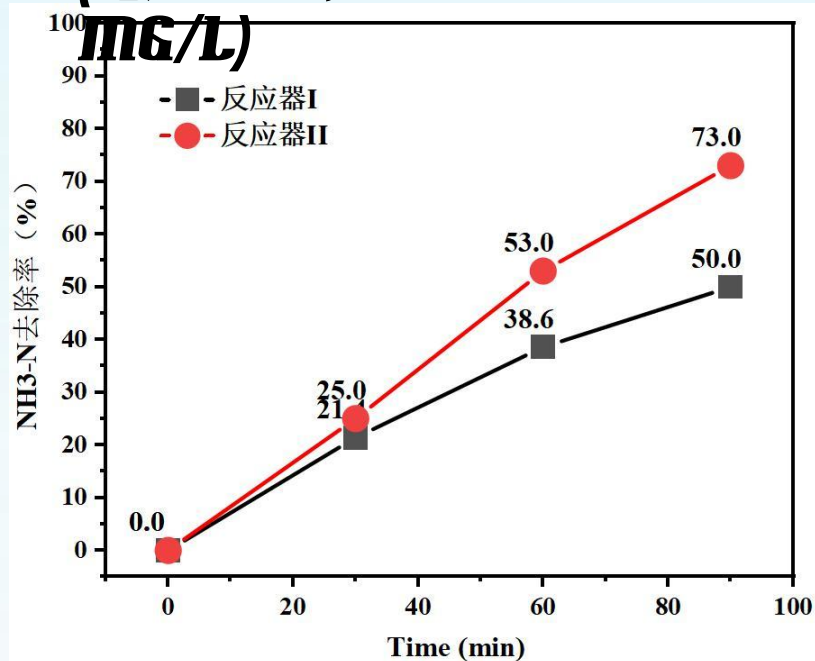
圆形封闭式(电压=6V，NaCl=400mg/L)

电解时间 (min)	电压 (V)	电流 (A)	电流密度 (mA/cm2)	温度 (° C)	电导率 (μs/cm)	氨氮浓度 (mg/L)	去除率 (%)	1m³水耗 电量 (kW·h)
0	6	5.84	8.18	23.6	2200	75	-	-
30	6	5.51	7.72	27.4	1787	60	25.03%	5.51
60	6	5.34	7.48	29.9	1618	35	53.00%	10.68
90	6	5.4	7.56	31.7	1482	20	73.00%	16.2

电解槽反应器类型影响研究

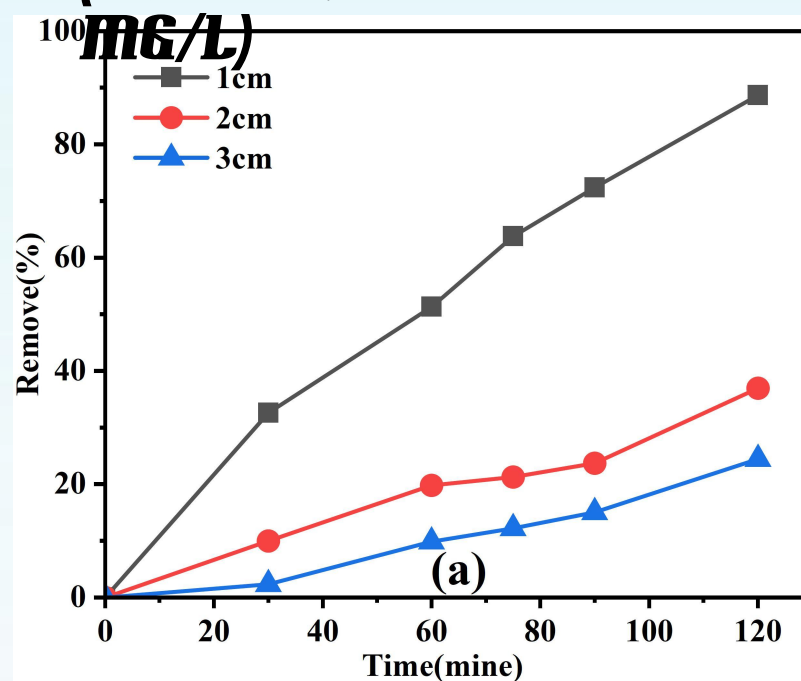


不同反应器氨氮去除率对比
(电压 = 6 V; $NaCl=400$
 mg/L)



- 同样条件下，圆柱封闭式反应器的氨氮去除率优于方形敞开式反应器。
- 密闭反应器氯气/次氯酸不易逃逸，提高了次氯的有效性

不同反应器氨氮去除率对比
(电压 = 6 V; $NaCl=400$
 mg/L)



- 电解槽极板间距1 cm极板间距有较好的去除效率。

电解槽参数影响研究

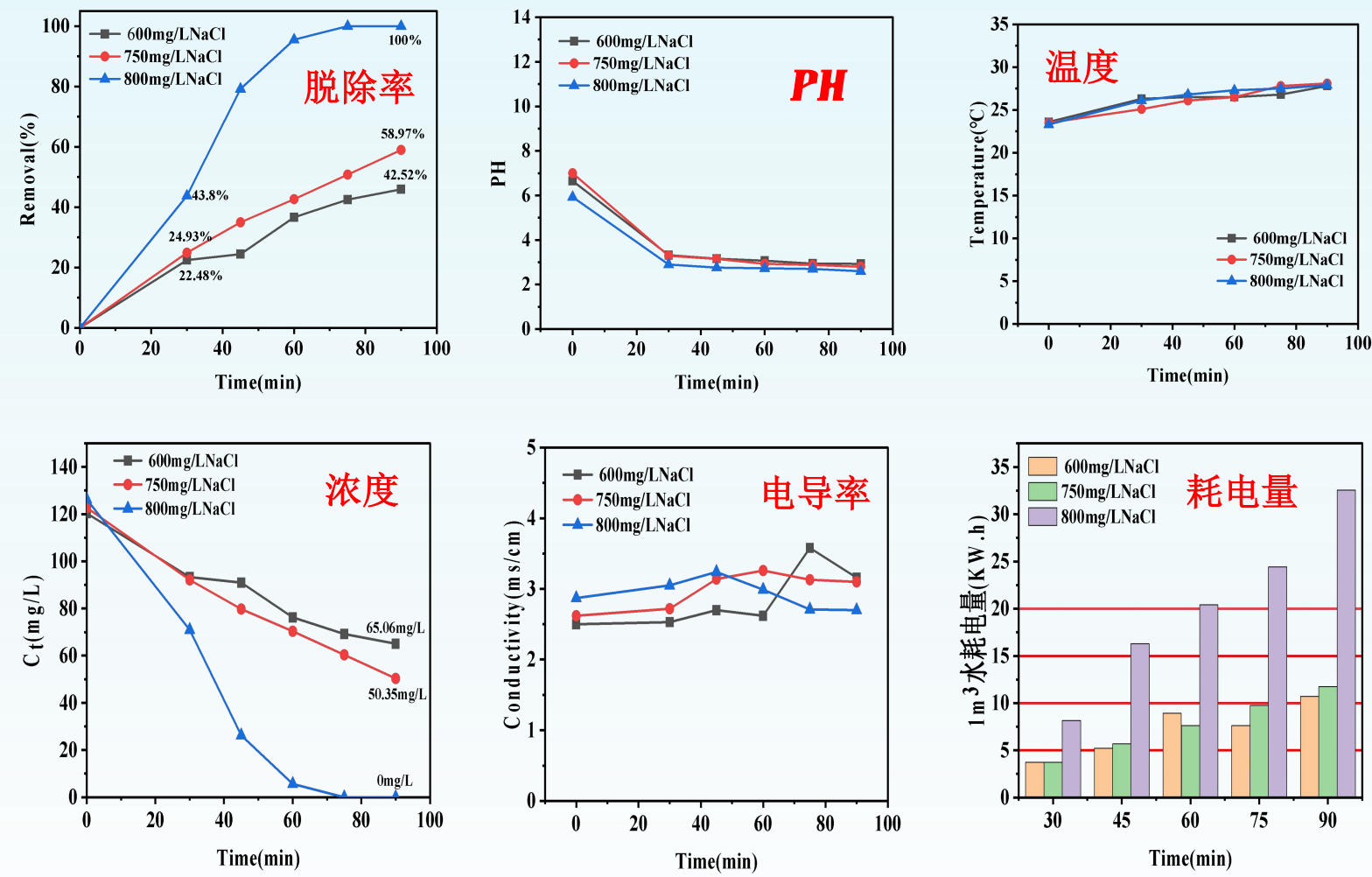
反应初始条件:氨氮**120.35 mg/L**，初始水温**23.6° C**，初始**PH 6.65**，初始电导率**2.5 ms/cm**。

反应器II/氨氮=120 mg/L/处理水量Q=1 L/电压=4 V/NaCl=600 mg/L										
电压 (V)	电流 (A)	电流密度 (mA/cm2)	功率 (W)	温度 (° C)	时间 (min)	PH	电导率 (ms/cm)	出水浓度 (mg/L)	去除率 (%)	吨水电耗 (KW·h)
4.00	3.47	2.84	13.90	26.3	30	3.32	2.53	93.29	22.48	3.73
4.00	3.47	2.83	13.88	26.5	45	3.16	2.70	90.94	24.44	5.21
4.00	4.47	3.65	17.88	26.5	60	3.07	2.62	76.24	36.66	8.94
4.00	3.05	2.49	12.20	26.8	75	2.94	3.58	69.18	42.52	7.63
4.00	3.57	2.92	14.28	27.8	90	2.93	3.16	65.06	45.94	10.71

反应器II/氨氮=120 mg/L/处理水量Q=1 L/电压=4 V/NaCl=750 mg/L										
电压 (V)	电流 (A)	电流密度 (mA/cm2)	功率 (W)	温度 (° C)	时间 (min)	PH	电导率 (ms/cm)	出水浓度 (mg/L)	去除率 (%)	吨水电耗 (KW·h)
4.00	3.73	3.05	14.92	25.1	30	3.29	2.72	92.12	24.93	3.73
4.00	3.79	3.10	15.16	26.1	45	3.15	3.14	79.76	35.00	5.68
4.00	3.81	3.11	15.24	26.5	60	2.93	3.26	70.35	42.67	7.62
4.00	3.90	3.19	15.60	27.8	75	2.88	3.13	60.35	50.82	9.75
4.00	3.91	3.20	15.65	28.1	90	2.80	3.10	50.35	58.97	11.74

电解槽参数影响研究

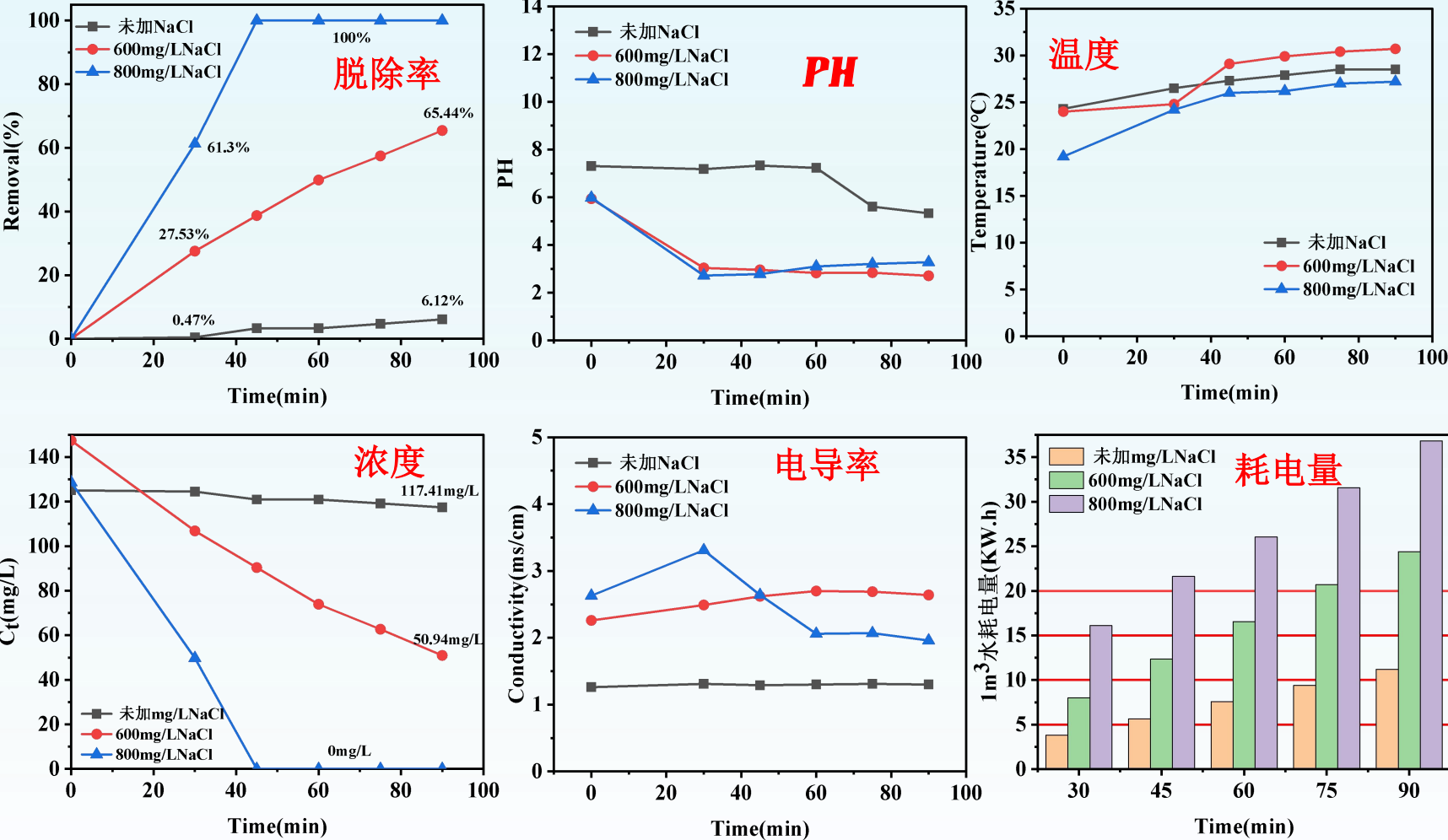
反应器II在电压=4 V条件下氨氮去除率等参数



- 盐的浓度越高，去除率越高
- 停留时间越长，去除率越高
- 同等条件下，盐的浓度越高，单位耗电量越大

电解槽参数影响研究

反应器II在电压-5 V条件下氨氮去除率等参数



- 盐含量增加， 40 min 实现氨氮100%去除
- 不同加盐量，氨氮去除率65%， 24 kwh/m³；氨氮去除率61%，耗电 16 kwh/m³

小试小结

➤ 停留时间和去除率关系

从上述实验来看，停留时间越长去除率越高，从去除率70%的指标来看，基本都需要20-30 min左右。

➤ 盐的浓度和去除率关系

盐的浓度越高，去除率相应越高，单位能耗也越低，从去除率70%的指标来看，基本800 mg/L以上。

➤ 不同电压下，去除率的不同

去除率同电压、能耗是正相关，电压越高去除率越高，同时能耗越高。

满足指标要求，需要优化停留时间、盐的浓度和电压三者关系，找到最佳的能耗参数。

中试实验装置



北京化工大学
BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

- (1) 中试地点: 窦店服务区(出京方向)污水站
- (2) 取样位置: 调节池
- (3) 处理量: $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$

中试技术参数(以小试为基础):

- (1) 极板间距: 1 cm
- (2) 反应器尺寸: $\Phi 300 \times 1500 \text{ mm}$
- (3) 极板尺寸: $695 \times 150 \times 15 \text{ mm}$
- (4) 加盐量: $0 \sim 1000 \text{ mg/L}$
- (5) 电压: $7 \sim 10 \text{ V}$



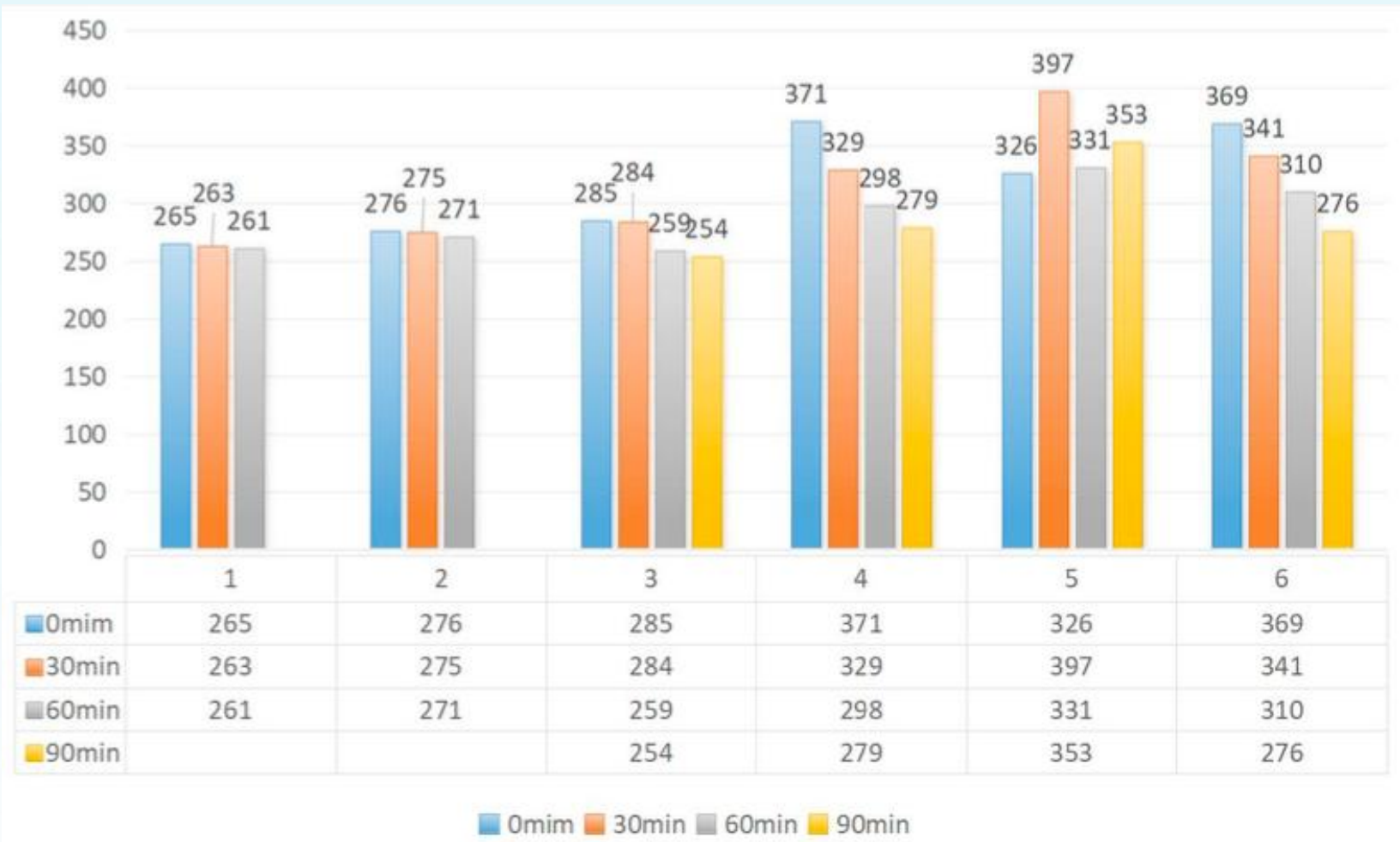
中试现场



电化学装置



电化学装置

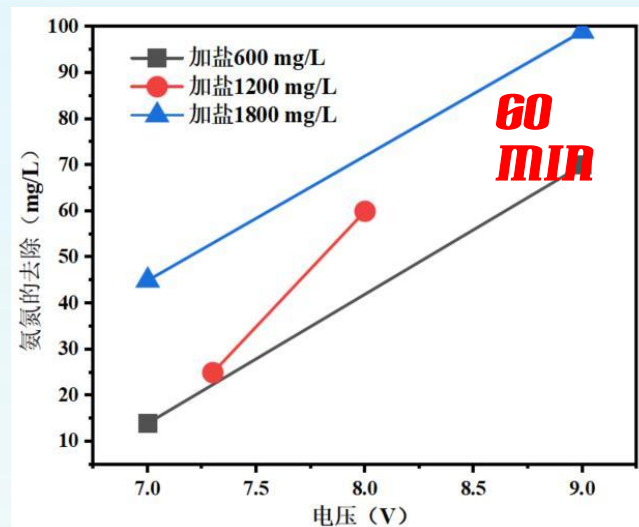
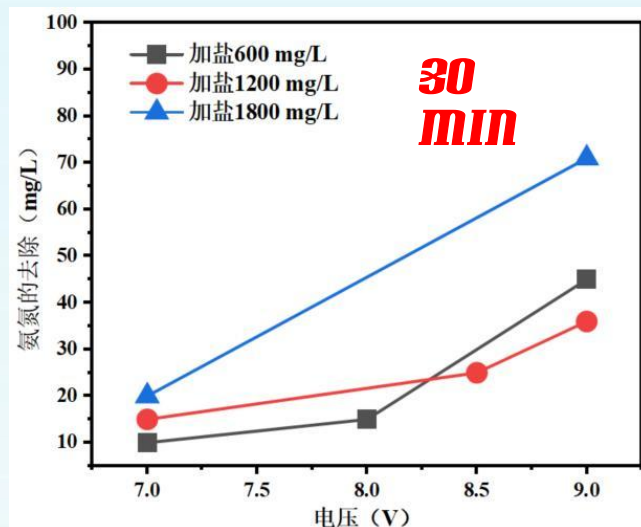


多次试验证明COD在30-90min 内，变化不大，特别在30min区间变化很小，因此后期对COD不做常规检测。

中试实验-单因素影响研究

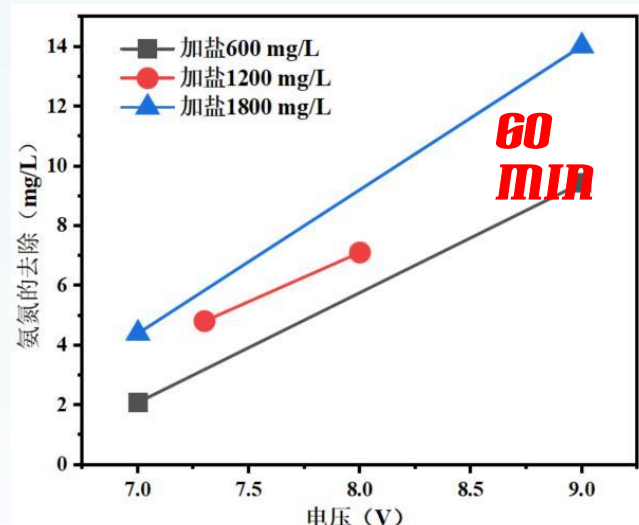
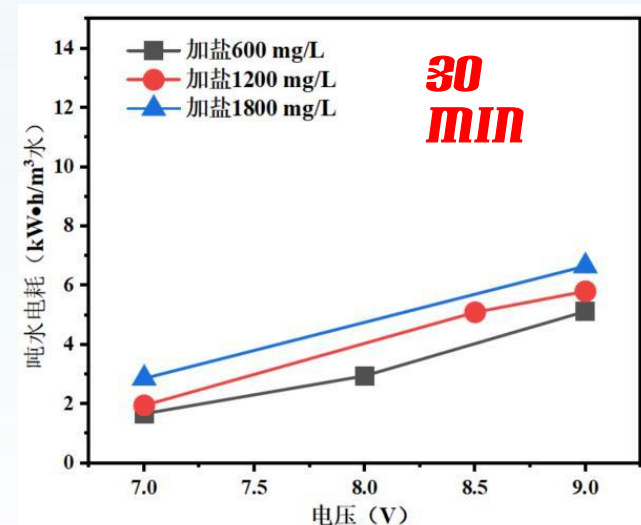


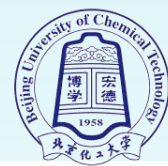
氨氮去除



无论小试或中试，氨氮总氮去除具有相同趋势，去除量相当，为提高试验效率，仅检测氨氮指标。

吨水电耗

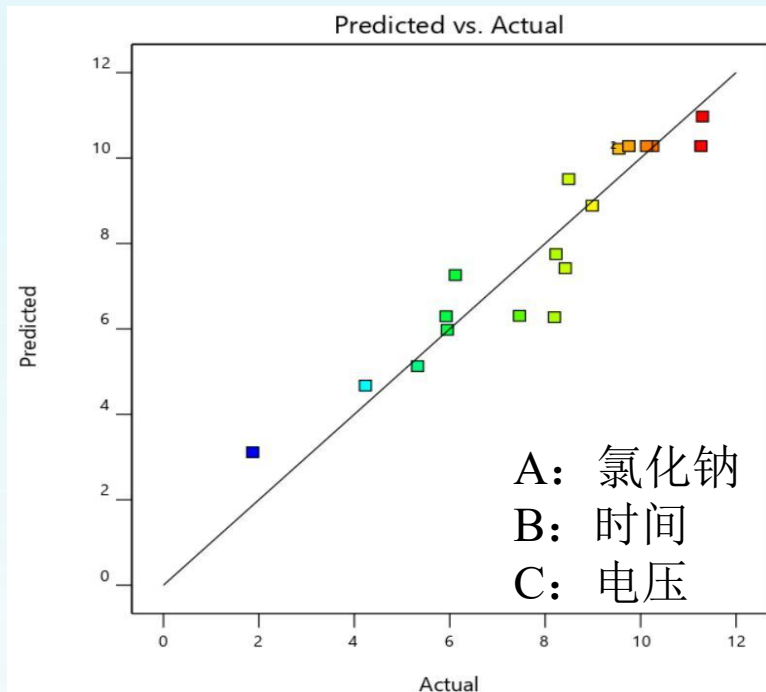




交互实验设计及结果

组数	加盐量 (mg/L)	Time (min)	Voltage (V)	氨氮去除率 (%)	吨水耗电量 (kW·h/m³水)	氨氮去除能力 (mg氨氮/KW·h)
1	600.00	30.00	7.00	8.70%	1.68	5.95
2	1800.00	30.00	7.00	11.58%	2.07	5.33
3	600.00	60.00	7.00	15.45%	2.87	5.92
4	1800.00	60.00	7.00	37.14%	4.34	8.99
5	600.00	30.00	9.00	25.00%	4.91	6.12
6	1800.00	30.00	9.00	80.00%	6.71	9.55
7	600.00	60.00	9.00	21.25%	9.09	1.87
8	1800.00	60.00	9.00	100.00%	14.13	8.49
9	190.92	45.00	8.00	28.57%	4.02	7.46
10	2209.08	45.00	8.00	76.19%	7.08	11.30
11	1200.00	19.77	8.00	18.18%	2.19	8.23
12	1200.00	70.23	8.00	71.72%	8.43	8.42
13	1200.00	45.00	6.32	5.71%	1.42	4.23
14	1200.00	45.00	9.68	91.43%	11.72	8.19
15	1200.00	45.00	8.00	64.00%	4.68	10.25
16	1200.00	45.00	8.00	64.00%	4.74	10.12
17	1200.00	45.00	8.00	64.00%	4.26	11.26
18	1200.00	45.00	8.00	80.00%	4.92	9.75
19	1200.00	45.00	8.00	59.26%	4.92	9.75

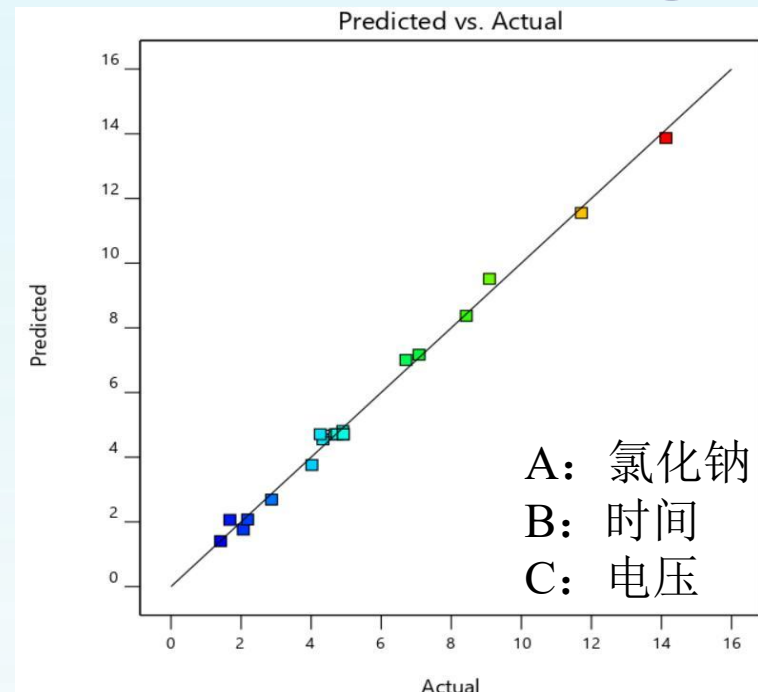
中试实验-响应面法研究



- 模型预测公式:

$$\text{氨氮去除能力}(mg\text{氨氮}/KW\cdot H) = -122.07 - 0.01*A + 0.86*B + 29.11*C + 0.000096*A*B + 0.0016*A*C - 0.070*B*C - 0.0000016*A^2 - 0.0041*B^2 - 1.70*C^2$$

- 拟合方程的 $R^2=0.89$

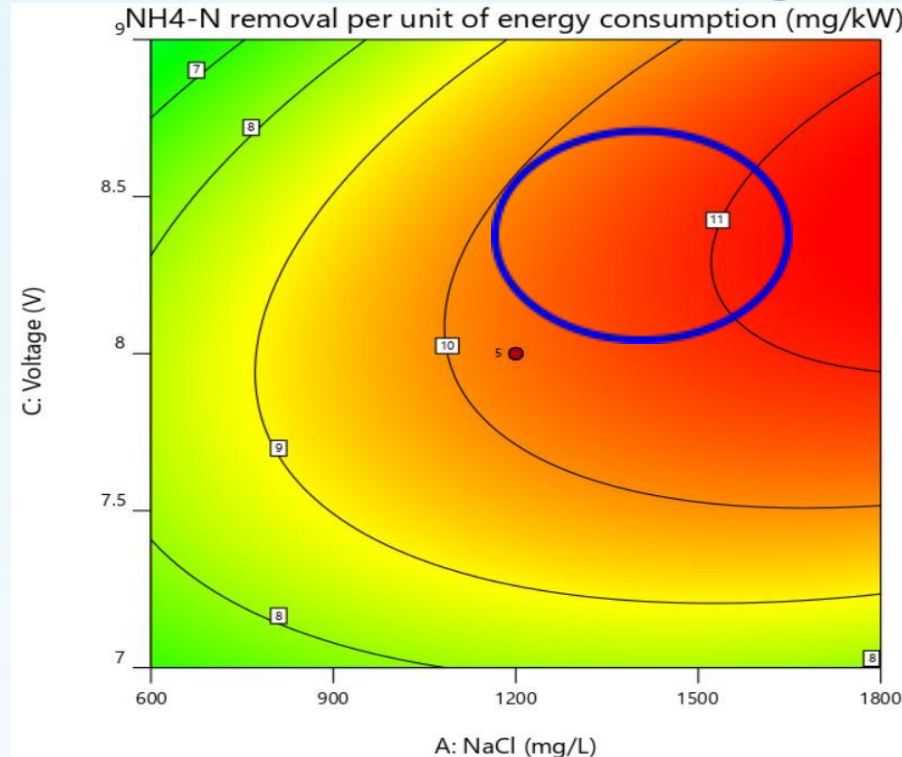
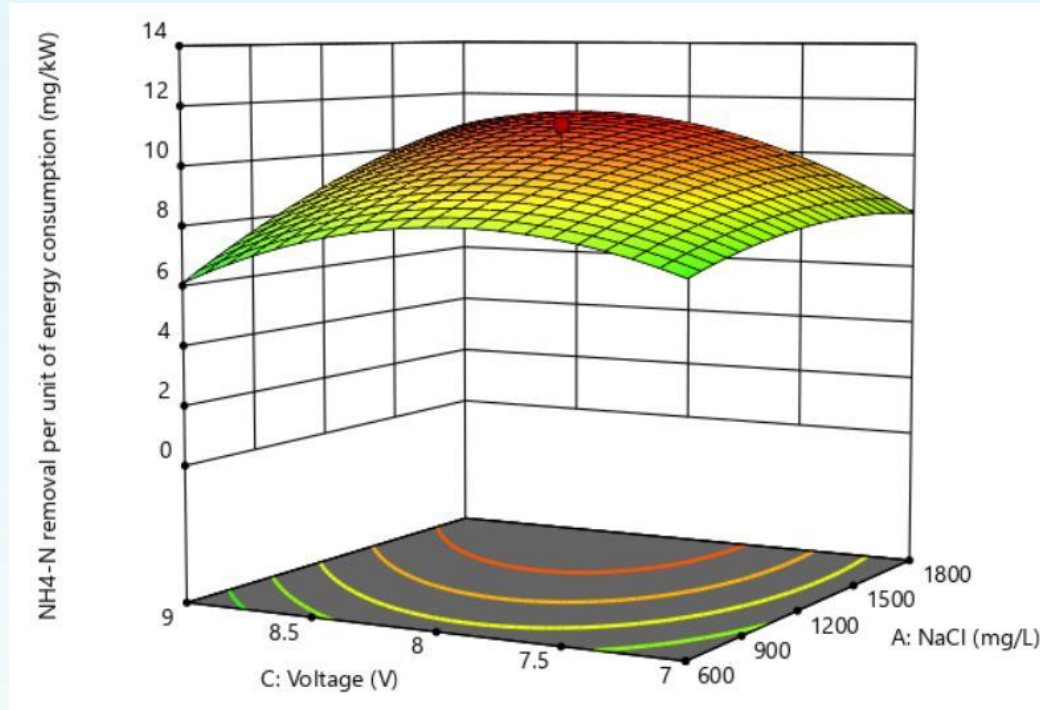


- 模型预测公式:

$$\text{吨水能耗} = 53.31 - 0.011*A - 0.56*B - 11.29*C + 0.00006*A*B + 0.0010*A*C + 0.068*B*C + 0.00000074*A^2 + 0.00080*B^2 + 0.63*C^2$$

- 拟合方程的 $R^2=0.99$

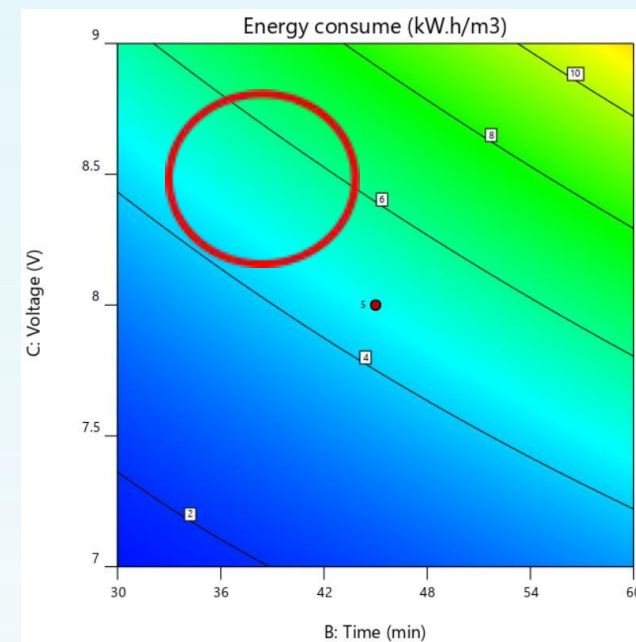
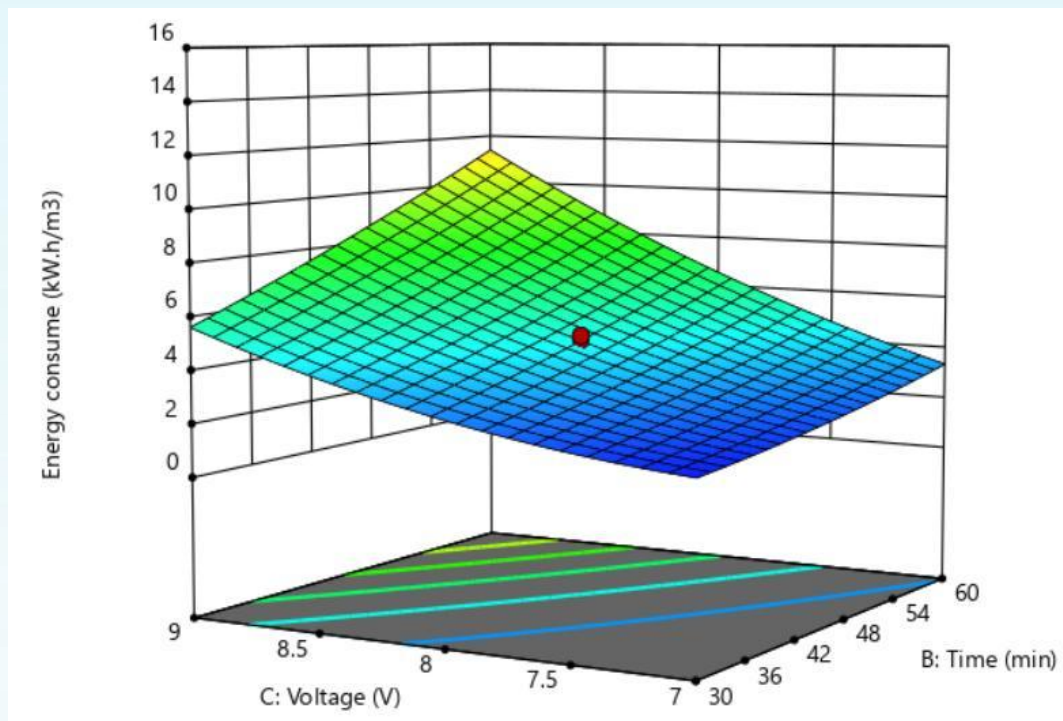
中试实验-响应面法研究



A: 氯化钠
B: 时间
C: 电压

- 电压的选择:当电压为8.5 V附近和加盐量越高, 氨氮的单位电耗对氨氮去除能力越强, 可达 10~12 mg/(kW·h)。
- 加盐量的选择:结合考核指标加盐量要求在1000 mg附近, 加盐量为约为1300 mg左右。
- 蓝色圆圈的区域为较为理想区域, 单位电耗对氨氮去除有10.5~11.5 mg/(kW·h)。

中试实验-响应面法研究



A: 氯化钠
B: 时间
C: 电压

- 流量(停留时间)越小和电压的值越大，吨水电耗越高，吨水电耗为1.0~11.0 kWh/m³。
- 红色圆圈的区域为较为理想的吨水电耗(4.5~6.5 kWh/m³)，对应的电压为8.2~8.7 V，停留时间为33~45 min。

中试实验-模型准确性



实验条件			预测数据			实验值		
加盐量 (mg/L)	停留时间 (min)	施加电压 (V)	吨水电耗 ($\text{KW}\cdot\text{H}/\text{m}^3$)	氨氮去除值 ($\text{mg}/\text{KW}\cdot\text{H}$)	氨氮去除/度电 $\text{mg}/(\text{KW}\cdot\text{H})$	吨水电耗 ($\text{KW}\cdot\text{H}/\text{m}^3$)	氨氮去除值 ($\text{mg}/\text{KW}\cdot\text{H}$)	氨氮去除/度电 $\text{mg}/(\text{KW}\cdot\text{H})$
1000	30	10.00	8.78	51.48	5.86	7.75	70.00	9.03
1000	45	8.00	4.40	43.04	9.78	5.04	51.00	10.12
1000	45	9.00	7.84	64.54	8.24	7.70	70.00	9.09
1200	30	9.00	5.65	52.72	9.34	5.30	55.00	10.38
1200	45	8.00	4.71	48.56	10.31	5.20	60.00	11.54
1400	30	8.00	3.21	30.67	9.56	3.90	63.00	16.15
1400	30	9.00	6.04	59.02	9.77	5.85	84.00	14.36
1400	45	8.30	6.10	65.87	10.79	6.60	91.00	13.79

- 误差范围基本上都能保证在**10%以内**。
- 因为服务区进入了旺季，基础含盐量相比预测值**偏大**。
- 如果按照现有水质，加盐量**1000 mg/L** ，停留时间为**30 min**，要达到**70%**的氨氮的出去率，施加电压要高于**10V**，吨水电耗达到了**7.75度**。

- 在一定范围内，吨水电耗与氨氮去除率呈正相关，与单位氨氮去除能力呈负相关。
- NaCl的加入能较好的提高氨氮去除率，且NaCl投加量高时，去除效果越好。
- 中试能达到氨氮去除率 $\geq 70\%$ 要求，但需进一步优化试验条件。

中试示范工程建设情况



北京化工大学
BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

- (1) 中试地点: 窦店服务区(出京方向)污水站
- (2) 取样位置: 调节池
- (3) 处理量: 1 m³/h

技术参数(以中试为基础):

- (1) 极板间距: 1 cm
- (2) 反应器尺寸: $\Phi 300 \times 1500$ mm
- (3) 极板尺寸: $695 \times 150 \times 15$ mm
- (4) 加盐量: 0~1000 mg/L
- (5) 电压: 7~10 V

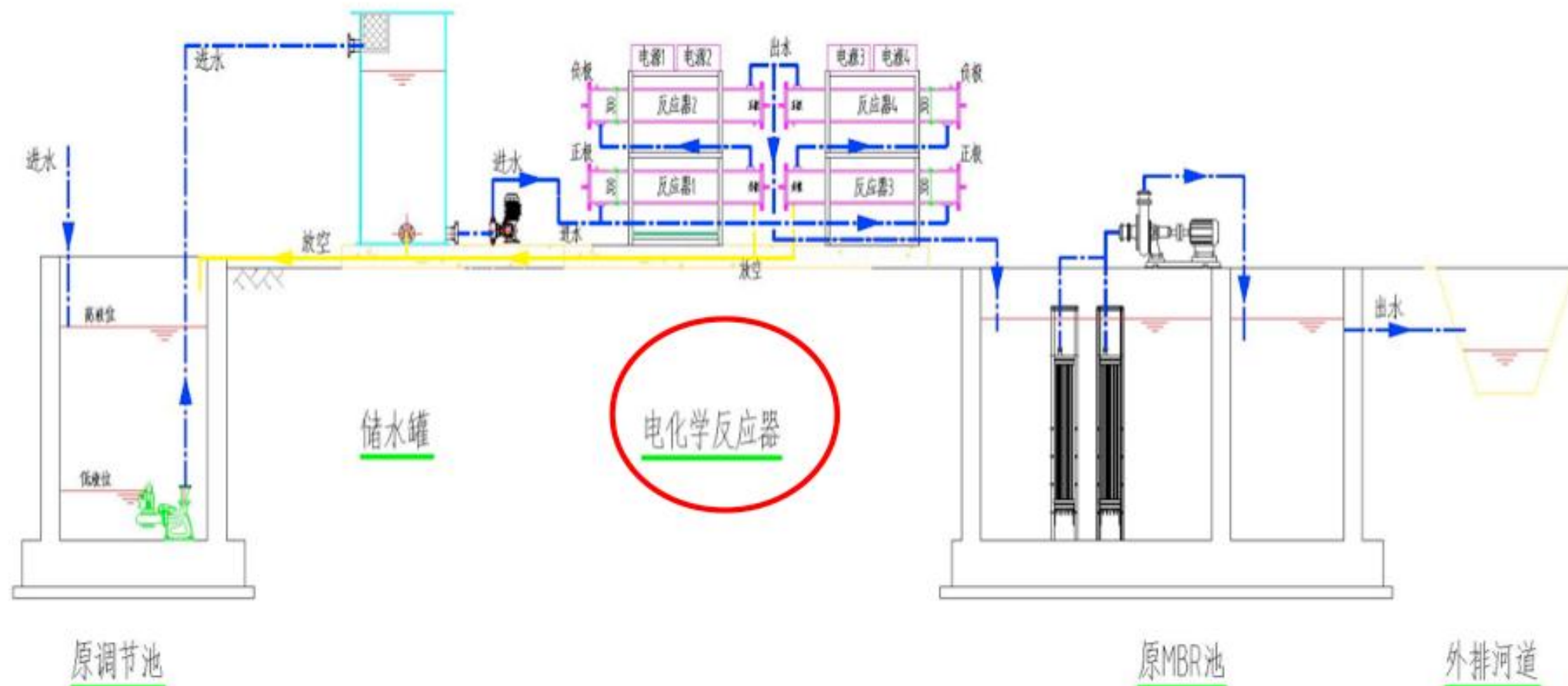


中试示范工程建设情况



北京化工大学
BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

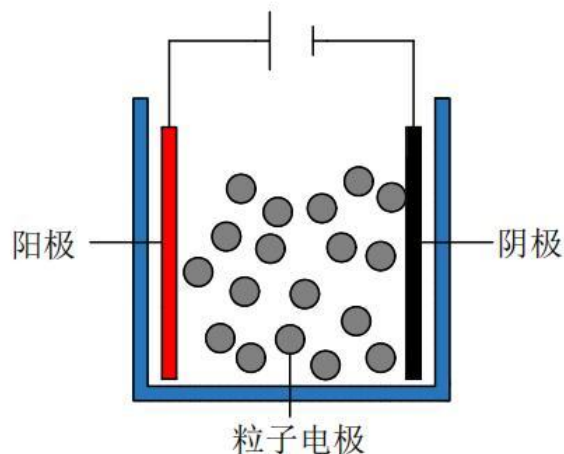
1 m³/h中试示范，目前已通水运行 ~300d，满足工艺要求



化学设备吨水电耗5~7 kW·h，投加氯化钠≤1000 mg/L，氨氮去除率70%以上，总氮67%。

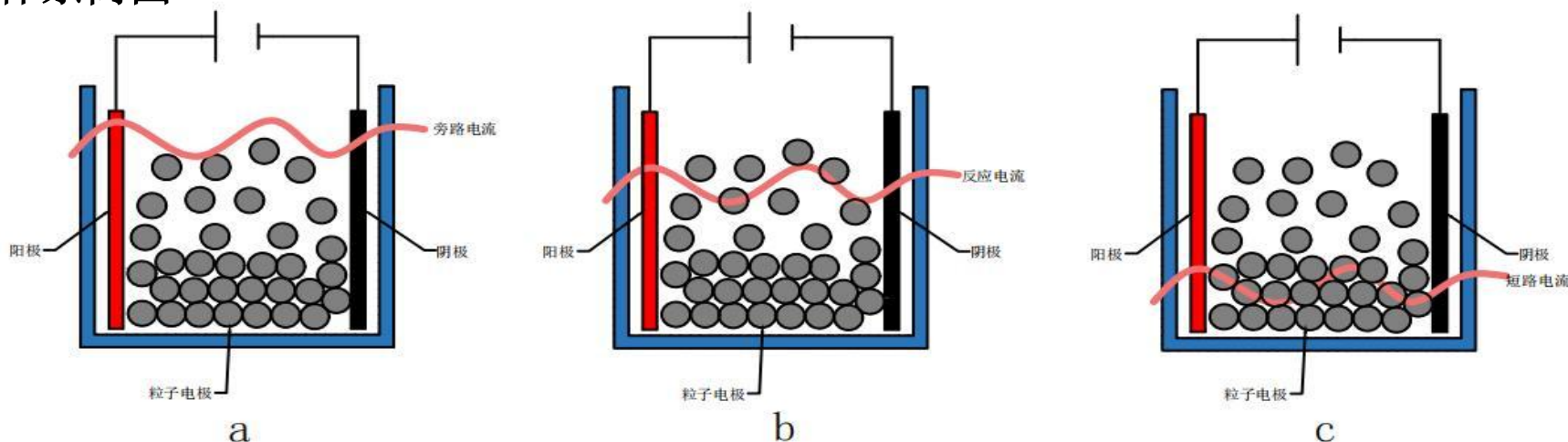
工艺流程图

三维电解体系探索性试验研究



三维电解体系简图

- 粒子电极也称第三电极，是指在传统的二维电极间引入具有导电性和较高析氧电位(抑制析氧效应的产生)的粒状或其它碎片状材料。
- 粒子电极降解污染物主要是在其表面富集有机物质使污染物在粒子电极表面进行直接氧化降解。
- 在三维电化学体系中，根据不同主电极和粒子电极的性质，电流走向存在三种形式，反应电流的形成有利于达到较好的氨氮去除效果。



三维电解体系电流走向简图

团队其他案例



北京化工大学
BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

■ 危废污泥/油泥热解技术及装备



浙江百合花集团污水站 10t/d+20t/d
江苏盐城某园区污水厂 20t/d
江苏南通某园区污水厂 20t/d
备注：含水率20%计

■ 水解酸化/UASB/EGSB/IC反应器



河北藁城某园区污水厂 10万t/d
江苏滨海某园区污水厂 2.0万t/d
江苏宝应某园区污水厂 1.0万t/d
山东青岛某园区污水厂 2.2万t/d
江苏丽王科技有限公司 0.8万t/d
江苏八巨药业有限公司 0.1万t/d

■ IC-MBR生化反应器



江苏滨海县新安新村
生活污水处理工程 200t/d
新疆喀纳斯景区
污水处理工程 1500t/d

团队其他案例



北京化工大学
BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

■ 芬顿氧化反应器



江苏响水某园区污水厂	0.75万t/d
江苏滨海某园区污水厂	2.0万t/d
广西平南某园区污水厂	3.0万t/d
江苏吉华化工有限公司	0.5万t/d
南通永盛化工有限公司	0.1万t/d
宁夏彩妍科技有限公司	0.1万t/d

■ 湿式催化氧化工艺包



中科院煤化所 30t/d
河北广祥药业有限公司 200t/d

■ 团队



北京化工大学高新技术研究院王焕升团队，致力化工行业环保10余年，核心团队10余人，拥有技术研发人员6人，硕士博士3人，化工领域中高级职称6人，具备完善的安装施工队伍。成员来自于北京化工大学、北京环科院、清华大学等环保权威部门。



北京化工大学
BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

顺祝商祺！