

利用 H^+ 浓度变化控制含 Cl^- 的氨氮废水的电解时间

莫恒亮¹, 陈亦力¹, 文剑平², 俞开昌², 吴文辉¹, 万平玉³, 唐 阳³, 李锁定^{1*} (1.北京碧水源膜科技有限公司, 北京 101400; 2.北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206; 3.北京化工大学, 北京 100029)

摘要: 采用电化学间接氧化法处理含 Cl^- 的中高浓度氨氮废水, 针对不同浓度的氨氮废水的电解时间的控制, 提出利用废水的 H^+ 浓度变化控制氨氮废水实际处理时间。从理论计算及对模拟和实际氨氮废水进行电解分析发现: 当废水氨氮还没有完全降解时, 每一个 NH_4^+ 降解的过程中会生成一个 H^+ , $c(H^+)$ 随着时间线性上升; 当氨氮刚好完全降解时, $c(H^+)$ 达到最大值; 此后继续电解且废水 $pH < 7$ 时, 电解过程形成的 OH^- 会持续消耗 H^+ , $c(H^+)$ 随着时间线性下降。利用 pH 计实时监测废水的 pH 值, 通过程控信号转换器进行 $c(H^+)$ 与 pH 值的换算, 将 pH 值信号转化为 $c(H^+)$ 信号, 可提高决策的准确性和灵敏度。

关键词: 氨氮处理; 电化学氧化; pH 值变化; 氢离子浓度; 电解时间; 决策

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)12-5325-06

Control of electrolysis time of ammonia nitrogen wastewater containing Cl^- by H^+ concentration change. MO Heng-liang¹, CHEN Yi-li¹, WEN Jian-ping², YU Kai-chang², WU Wen-hui¹, WAN Ping-yu³, TANG Yang³, LI Suo-ding^{1*} (1.Beijing Origin Water Membrane Technology Co., Ltd., Beijing 101400, China; 2.Beijing Origin Water Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China; 3.Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China). *China Environmental Science*, 2020,40(12): 5325~5330

Abstract: The indirect electrochemical oxidation method was used to treat high or medium concentration ammonia nitrogen wastewater containing Cl^- . The change of H^+ concentration of wastewater was used to control the electrolysis time of different concentration ammonia nitrogen wastewater. Based on theoretical calculation and electrolytic analysis of simulated and actual ammonia nitrogen wastewater, it was found that when the ammonia nitrogen in wastewater had not been completely degraded, one H^+ would be generated in the degradation process of each NH_4^+ , $c(H^+)$ would rise linearly with time; when the ammonia nitrogen just completely degraded, $c(H^+)$ would reach the maximum value; after that, when the electrolysis continued and the pH of wastewater was less than 7, the OH^- formed in the electrolysis process would continue to consume H^+ , and $c(H^+)$ declined linearly with time. Using pH meter to monitor the pH of waste water in real time, and through the program-controlled signal converter, the pH value signal was converted into $c(H^+)$ signal, which could improve the accuracy and sensitivity of decision-making.

Key words: ammonia nitrogen treatment; electrochemical oxidation; pH value change; hydrogen ion concentration; electrolysis time; decision making

氨氮废水主要来源于生活污水中含氮有机物的分解、焦化、稀土提取、合成氨、氮肥生产等工业废水, 以及农田排水等。处理低浓度氨氮废水可采用离子交换法^[1-4]、折点加氯法^[5]、生化法^[6-11]等, 处理中高浓度氨氮废水可采用电化学氧化法^[12]、吹脱法^[13]、气提法^[14]及膜吸收法^[15]等。

电化学氧化法分为直接氧化和间接氧化, 电化学间接氧化法处理中高浓度氨氮废水, 具有高效、简便、产水水质稳定、产物无毒害的优势^[16-21]。但是对于不同浓度的氨氮废水的电解处理, 如何控制实际电解时间(即氨氮完全降解所需要的时间)没有比较普适的办法, 因为废水处理的氨氮浓度不同、电解条件不同、电流效率不同而难以用理论电解时间进行控制。此外, 利用监测废水中氨氮的变化(氨氮检测仪)及余氯的变化(余氯检测仪)来控制实际电解时间, 理

论上可行, 但实际操作却难以实现, 因为氨氮检测仪易受其他高浓度阳离子干扰(如 Na^+)而难以实现在高盐废水中进行氨氮的检测, 而氨氮的电化学氧化降解过程中形成的多种中间产物(如一氯胺、二氯胺、三氯胺)^[17-25]容易对氨氮检测仪及余氯检测仪的准确性造成影响。

因此, 需要寻找一种简便、高效、科学的方法进行氨氮废水电解时间的决策。本研究根据电化学去除氨氮的原理, 以 $c(H^+)$ 作为信号控制电解时间, 旨在解决电化学处理氨氮废水的电解时间的决策问题, 在氨氮废水的电化学处理上实现推广应用。

收稿日期: 2020-04-08

基金项目: 北京市自然科学基金项目(2182050, 2182046); 北京市科协金桥工程种子资金项目(ZZ19035); 国家重点研发计划(2016YFF0204301)

* 责任作者, 教授级高工, bsy_lisuoding@126.com

1 材料与方法

1.1 材料及仪器

NH_4Cl 、 NaCl 、纳氏试剂、去离子水,均为分析纯,实验使用过程中无需再纯化处理.Global Water 水质 pH 在线监测仪器(WQ201 型,4~20mA 模拟信号输出),购于北京戴美克科技有限公司;BT300-02 蠕动泵,购于保定齐力恒流泵有限公司;LW-WYJ3010 直流稳压电源,购于德国力威(中国)有限公司; $\text{RuO}_2\text{-IrO}_2/\text{Ti}$ 电极,Ti 电极,购于宝鸡市昌立特种金属有限公司;有机玻璃电解槽,KMS-101B 磁力搅拌器。

1.2 氨氮废水配制及采样

模拟氨氮废水:用 NH_4Cl 及 NaCl 分别配制 4 种不同氨氮浓度的废水,其氨氮浓度($\text{NH}_3\text{-N}$,以 N 计)及氯化钠溶度分别为:500mg/L 氨氮+1mol/L 氯化钠、1500mg/L 氨氮+1mol/L 氯化钠、2500mg/L 氨氮+1mol/L 氯化钠、5000mg/L 氨氮+1mol/L 氯化钠。每次取 2L 水样进行电解。

实际氨氮废水:利用北京市某市政污水处理厂的铵离子筛吸附柱的洗脱液进行电解实验。该洗脱液的来源:利用 2mol/L 的氯化钠再生液,对吸附 NH_4^+ 饱和的铵离子筛吸附柱进行再生(即 Na^+ 置换 NH_4^+),实现铵离子筛吸附位点上 NH_4^+ 的脱附。该洗脱液主要成分为 2mol/L 的氯化钠及不同浓度的氨氮。分别在不同日期取 3 种水样,每种水样分别取 2L 进行电解。

1.3 电解法处理氨氮废水的工艺流程

电解法处理氨氮废水的工艺流程如图 1 所示。2L 氨氮废水装在废水槽中,利用蠕动泵以 400mL/min 的流速泵入电解槽内,经过电解后再回流到废水槽中。废水槽底部有磁子,利用磁力搅拌器使氨氮废水混合均匀,转速为 300r/min。电解槽内含有 $\text{RuO}_2\text{-IrO}_2/\text{Ti}$ 阳极(网孔状)及 Ti 阴极(平板状),几何面积均为 375cm^2 ($15\text{cm}\times 25\text{cm}$),阴阳极的电极间距为 1.5cm。利用直流稳压电源,采用恒电流法进行电解,电流密度为 $15\text{mA}/\text{cm}^2$ 。电解过程中,利用 pH 计持续检测废水槽中的氨氮废水的 pH 值,将 pH 值模拟信号输入程控信号转换器,通过 pH 值转换程序进行 $c(\text{H}^+)=10^{-\text{pH}}\times 1000\text{mmol/L}$ 的运算,将 pH 值信号转化为 $c(\text{H}^+)$ 信号。

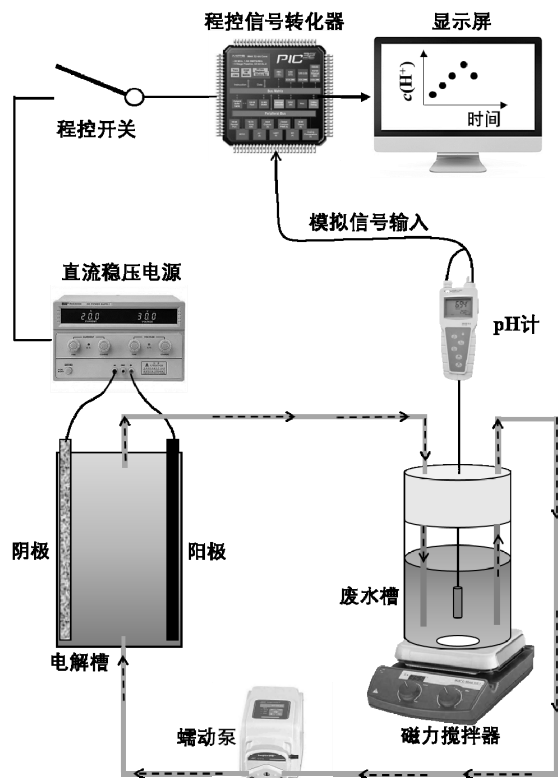


图1 电解法处理氨氮废水的工艺流程

Fig.1 Flow chart of ammonia nitrogen wastewater treatment by electrolysis

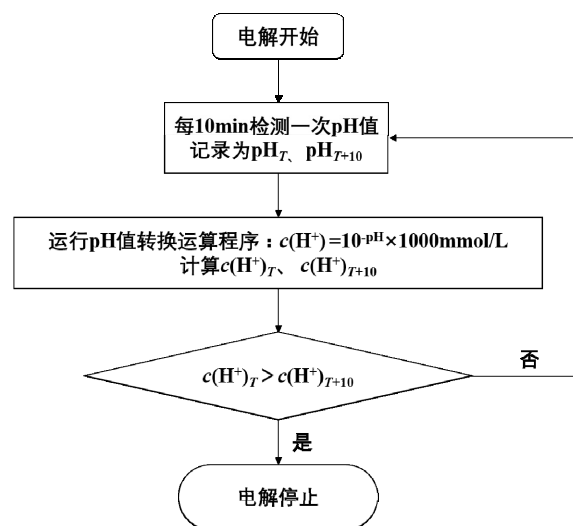


图2 氨氮废水电解时间控制的流程

Fig.2 Flow chart for controlling electrolysis time of ammonia nitrogen wastewater

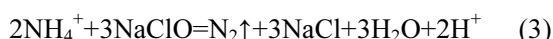
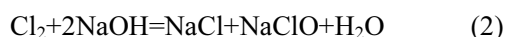
如图 2 所示,电解时间的决策过程为:电解开始后,每 10min 检测一次 pH 值,并将记录的相邻的 2 个 pH 值(如 pH_T 、 pH_{T+10})输入程控信号转换器,如果 $c(\text{H}^+)_T > c(\text{H}^+)_{T+10}$,程控信号转换器则发出断开程控开关的指令,直流稳压电源停止工作;如果 $c(\text{H}^+)_T <$

$c(H^+)_{T+10}$, 则继续电解, 重复以上过程, 一直等到相邻的 2 个 $c(H^+)_T > c(H^+)_{T+10}$, 则停止电解。

2 结果与讨论

2.1 理论可行性分析

电解槽中阴阳极反应的总反应方程式为式(1), 电解产生的 Cl_2 与 $NaOH$ 互相反应, 生成 $NaClO$, 如式(2)所示。 $NaClO$ 与 NH_4^+ 的反应式为式(3), 由式(3)可知, 2 个 NH_4^+ 转变为 N_2 的过程中, NH_4^+ 自身的氢元素一部分转化到水分子中(变为化合态的氢原子), 一部分以游离态 H^+ 的形式存在于水体中^[17-25], 溶液中的 $c(H^+)$ 会升高, 导致溶液 pH 值降低。此外, 由式(3)可知, 1 个 NH_4^+ 被氧化, 会释放出 1 个 H^+ , 即废水中氨氮没有完全降解之前, 随着电解的进行, 废水的 $c(H^+)$ 会增加, pH 值会持续降低。当废水中 NH_4^+ 完全被氧化为 N_2 之后, 式(2)中生成的 $NaClO$ 处于过剩状态, $NaClO$ 在溶液中极易水解(如式(4)所示), 生成碱性的 $NaOH$, 进而消耗废水中的 H^+ , 导致 $c(H^+)$ 减小, pH 值提高。



但是, 由于 pH 值与 $c(H^+)$ 的对数函数关系 $pH = -\lg c(H^+)$, 决定了 pH 值的变化趋势为: 从废水初始 pH_0 快速下降, 然后平缓下降, 直到废水中氨氮完全降解时达到最低点 $pH_{\min}$, 此后废水 pH 值开始缓慢增加, 然后再快速增加。这意味着 pH 值随时间的变化曲线的拐点峰型并不尖锐, 非常平缓(输出信号的强度及灵敏度不够高), 不利于进行电解停止的决策(理论上应该在拐点处停止电解); 但如果将 pH 值信号转换为 $c(H^+)$ 信号, 则 $c(H^+)$ 随时间的变化曲线会出现尖锐的拐点峰型, 极大提高了拐点处的信号强度及灵敏度。由于电解时间的控制需要电解系统提供一个准确而灵敏的参数, 因此可将废水中的 pH 值信号, 通过 pH 值转换程序 $c(H^+) = 10^{-pH} \times 1000 \text{ mmol/L}$ 进行运算, 转换为 $c(H^+)$ 信号, 从而提高决策的准确性和灵敏度。

电解过程中, 可以分为 3 种情况(氨氮未完全氧化时, 氨氮刚好完全氧化时, 氨氮完全氧化后且废水 $pH < 7$ 时)对 $c(H^+)$ 的大小进行计算, 分别如公式(5)~(7)

所示。

氨氮未完全降解时:

$$c(H^+)_1 = c(H^+)_0 + c(H^+)_{\text{增}} = c(H^+)_0 + \frac{n(NH_4^+)_{\text{降}}}{V} = c(H^+)_0 + \frac{SjT}{3N_A Q_e V} \quad (5)$$

氨氮刚好完全降解时:

$$c(H^+)_{\max} = c(H^+)_0 + c(NH_4^+)_0 \quad (6)$$

氨氮完全降解后且废水 $pH < 7$ 时:

$$c(H^+)_2 = c(H^+)_{\max} - c(OH^-)_{\text{增}} = c(H^+)_0 + \frac{5}{2} c(NH_4^+)_0 - \frac{SjT}{2N_A Q_e V} \quad (7)$$

式中: S 为阳极面积, m^2 ; T 为从电解开始之后的持续电解时间, s ; j 为电流密度, A/m^2 ; N_A 为阿伏伽德罗常数, $6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$; Q_e 为电子带电量, $1.6 \times 10^{-19} C$; V 为废水体积, L ; $c(H^+)_0$ 为废水电解前的 H^+ 浓度, mol/L ; $c(H^+)_{\text{增}}$ 为废水电解过程中增加的 H^+ 浓度, mol/L ; $n(NH_4^+)_{\text{降}}$, 废水电解过程中降解的 NH_4^+ 的物质的量, mol ; $c(NH_4^+)_0$ 为废水初始 NH_4^+ 的物质的量浓度, mol/L ; $c(OH^-)_{\text{增}}$ 为废水电解过程中增加的 OH^- 浓度, mol/L 。

由公式(5)可知, 氨氮未完全降解时, 废水中的 $c(H^+)_1$ 与电解时间 T 呈正相关关系; 由公式(6)可知, 当氨氮刚好完全降解时, 废水中的 $c(H^+)_{\max}$ 取决于废水的初始 H^+ 浓度和初始 NH_4^+ 浓度; 由公式(7)可知, 当氨氮完全降解后且废水 $pH < 7$ 时, 废水中的 $c(H^+)_2$ 与电解时间 T 呈负相关关系。综上所述, 利用废水中的 $c(H^+)$ 随着电解时间 T 的变化规律, 在理论上可以实现电解时间的决策与控制。

2.2 模拟氨氮废水的电解

如图 3b 所示, 电解开始后, 氨氮从 2500 mg/L 逐渐下降到 0 mg/L , 约耗时 5.6 h 。废水 pH 值从 6.13 先快速下降到 2.22 (此过程约耗时 0.2 h), 随着氨氮的持续降解, 废水 pH 值从 2.22 缓慢下降到 0.75 (此过程约耗时 5.4 h), 当废水 pH 值为 0.75 时, 废水中氨氮已经完全被降解, 当电解继续进行时, 废水的 pH 值从 0.75 开始缓慢上升至 1.98 (此过程约耗时 3.2 h), 然后废水的 pH 值快速从 1.98 上升至 8.65 (此过程耗时 0.2 h)。废水在电解过程中的 pH 值变化, 呈现“快速下降→缓慢下降→缓慢上升→快速上升”的特点。如果利用 pH 值的变化信号作为电解时间的决策, 则会出现信

号强度低且不够灵敏的问题,因为电解时间 $T_1=336\text{min}$ 时, $\text{pH}_1=0.75$,电解时间 $T_2=346\text{min}$ 时, $\text{pH}_2=0.77$,氨氮完全降解后的 10min 内,废水 pH 值的变化很小,约为 0.02,因此 pH 值不适合作为电解时间的决策信号。

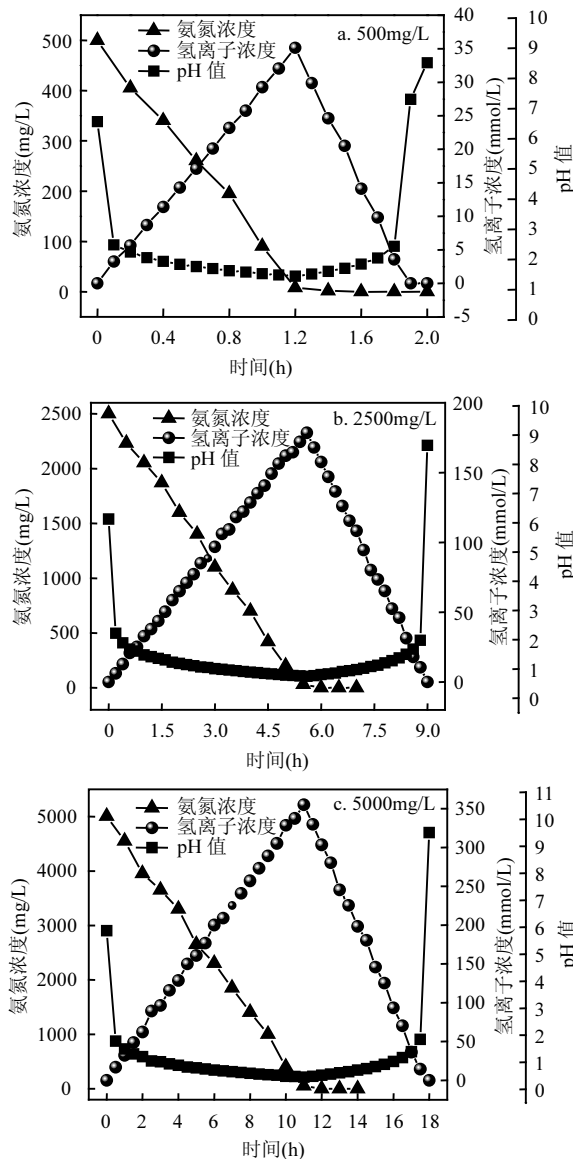


图3 氨氮浓度为 500, 2500, 5000mg/L 的氨氮废水的电解分析
Fig.3 Electrolytic analysis of ammonia nitrogen wastewater with $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration of 500, 2500 and 5000mg/L

但是,将 pH 值转换为 $c(\text{H}^+)$ 信号后,电解时间 $T_1=336\text{min}$ 时, $c(\text{H}^+)_1=177.83\text{mmol/L}$, 电解时间 $T_2=346\text{min}$ 时, $c(\text{H}^+)_2=169.82\text{mmol/L}$, $c(\text{H}^+)_1 - c(\text{H}^+)_2 = 8.01\text{mmol/L}$. 此外,当废水氨氮还没有完全降解时, $c(\text{H}^+)$ 随着时间线性上升,这是因为每一个 NH_4^+ 降解的过程中就会释放一个 H^+ ; 当 NH_4^+ 完全降解

时, $c(\text{H}^+)$ 达到最高值; 此后继续电解, 电解过程形成的 OH^- 会持续消耗 H^+ , $c(\text{H}^+)$ 随着时间线性下降. 同理, 从图 3a,c 亦可得到基本一致的结论. 由此可知, 对于模拟氨氮废水的电解过程, 可以利用废水中的 $c(\text{H}^+)$ 随着电解时间 T 的变化规律, 实现电解时间的决策与控制。

2.3 实际氨氮废水的电解

如图 4 所示, 电解过程中废水的 $c(\text{H}^+)$ 快速增加, 当检测到两个相邻的 $c(\text{H}^+)_T$ 和 $c(\text{H}^+)_{T+10}$ 满足 $c(\text{H}^+)_T > c(\text{H}^+)_{T+10}$, 系统发出停止电解的信号. 此外, 由表 1 可知, 电解结束后, 废水中没有氨氮残余, 证明氨氮已经完全降解. 假设氨氮完全降解之后, 到决策系统发出停止电解的信号, 所需的时间约为 10min (称为决策时间), 则 3 种废水的决策时间占实际电解时间的比例分别为 10%、7.7% 及 6.7%, 该比例可以满足实际工程应用的经济要求, 在相同电解条件下, 该比例随着废水氨氮浓度的升高而降低, 因为氨氮浓度越高, 所需的实际电解时间越长. 由此可知, 利用氨氮废水电解过程中 $c(\text{H}^+)$ 变化作为决策信号, 可以经济、准确快速实现氨氮废水电解时间的决策控制。

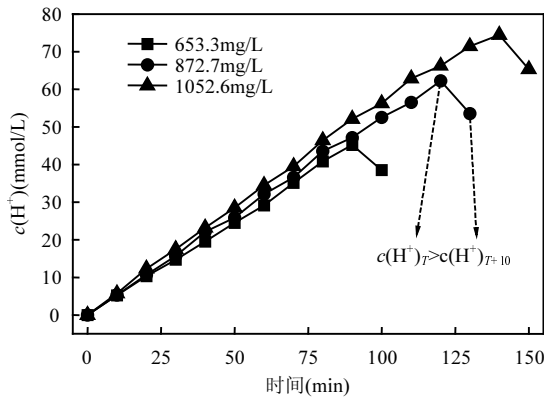


图4 三种实际氨氮废水的 $c(\text{H}^+)$ 与电解时间 T 的关系
Fig.4 Relationship between $c(\text{H}^+)$ and electrolysis time of three kinds of real ammonia nitrogen wastewater

表 1 实际氨氮废水电解的结果			
Table 1 Results of electrolysis of real ammonia nitrogen wastewater			
参数	废水 A	废水 B	废水 C
初始氨氮浓度(mg/L)	653.3	872.7	1052.6
电解结束时氨氮浓度(mg/L)	0	0	0
决策时间(min)	≈10	≈10	≈10
理论电解时间(min)	79.91	106.74	128.74
实际电解时间(min)	100.00	130.00	150.00
电流效率(%)	74.9%	78.2%	83.5%
决策时间占实际电解时间百分比(%)	≈10.0%	≈7.7%	≈6.7%

2.4 重复性检测

为了验证该方法的重复性,对 5 个氨氮浓度为 1500mg/L 的模拟氨氮废液(体积为 2L 的 1500mg/L 氨氮+1mol/L 氯化钠混合液)进行相同条件下的电解分析,结果如图 5 所示,可知 5 个水样在电解过程中,废水的 $c(H^+)$ 快速增加,当检测到两个相邻的 $c(H^+)_T$ 和 $c(H^+)_{T+10}$ 满足 $c(H^+)_T > c(H^+)_{T+10}$, 系统发出停止电解的信号,电解均在 220min 停止.此外,5 个水样的 $c(H^+)$ 与时间 T 曲线比较接近,没有出现大幅度的偏差,说明当电解条件相同时,同一浓度的氨氮废液的电解时间的决策具有良好的重复性.

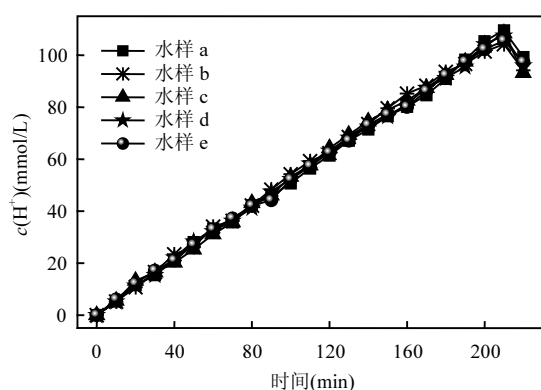


图 5 五种相同浓度氨氮废水的 $c(H^+)$ 与电解时间 T 的关系
Fig.5 Relationship between $c(H^+)$ and electrolysis time of five ammonia nitrogen wastewater with the same concentration

3 结论

3.1 通过理论计算可知,电解过程氨氮废水的氢离子浓度变化可以分为 3 种情况:氨氮未完全降解时,废水中的 $c(H^+)_1$ 与电解时间 T 呈正相关关系;当氨氮刚好完全降解时,废水中的 $c(H^+)_{max}$ 取决于废水的初始氢离子浓度和初始铵离子浓度;当氨氮完全降解后且废水 $pH < 7$ 时,废水中的 $c(H^+)_2$ 与电解时间 T 呈负相关关系.

3.2 通过模拟氨氮废水的电解,可知废水在电解过程中的 pH 值的变化,呈现“快速下降→缓慢下降→缓慢上升→快速上升”的特点.由于拐点处 pH 值的平缓变化导致不能直接利用 pH 值信号作为电解时间的决策信号,可将废水的 pH 值信号,通过 pH 值转换程序 $c(H^+) = 10^{-pH} \times 1000 \text{ mmol/L}$ 进行运算,转换为 $c(H^+)$ 信号,从而提高决策的准确性和灵敏度.

3.3 电解时间的决策过程为:电解开始后,每 10min

检测 1 次 pH 值,并将记录的相邻的 2 个 pH 值(如 pH_T , pH_{T+10})输入程控信号转换器,进行 $c(H^+)$ 与 pH 值的转换运算,如果 $c(H^+)_T > c(H^+)_{T+10}$,程控信号转换器则发出断开程控开关的指令,直流稳压电源停止工作;如果 $c(H^+)_T < c(H^+)_{T+10}$,则继续电解,并重复以上过程.利用氨氮废水电解过程中 $c(H^+)$ 变化作为决策信号,可以经济、准确快速实现氨氮废水电解时间的控制.

参考文献:

- [1] 刘思远,郝瑞霞,王丽沙,等.分子筛脱硅对其结构与吸附氨氮性能的影响 [J]. 中国环境科学, 2019,39(12):5029-5039.
Liu S Y, Hao R X, Wang L S, et al. Effect of molecular sieve desilication on its structure and adsorption of ammonia nitrogen [J]. China Environmental Science, 2019,39(12):5029-5039.
- [2] 孙 彤,郝瑞霞,武旭源,等.天然沸石定向合成 A 型分子筛及其脱氮性能 [J]. 中国环境科学, 2020,40(2):623-630.
Sun T, Hao R X, Wu X Y, et al. Targeted synthesis of type-A molecular sieve based on natural zeolite and its denitrification performance [J]. China Environmental Science, 2020,40(2):623-630.
- [3] 李文静,李 军,张彦灼,等.NaCl 改性沸石对水中氨氮的吸附机制 [J]. 中国环境科学, 2016,36(12):3567-3575.
Li W J, Li J, Zhang Y Z, et al. Adsorption mechanism of ammonium from aqueous solutions by NaCl modified zeolite [J]. China Environmental Science, 2016,36(12):3567-3575.
- [4] 孙 彤,郝瑞霞,武旭源,等.天然沸石合成 A 型分子筛的吸附与再生特性 [J]. 中国环境科学, 2020,40(7):2926-2933.
Sun T, Hao R X, Wu X Y, et al. Adsorption and regeneration characteristics of type-A molecular sieve synthesized from natural zeolite [J]. China Environmental Science, 2020,40(7):2926-2933.
- [5] 李 晓,刘碧武,郭 军.折点加氯法去除生活污水氨氮的试验研究 [J]. 能源环境保护, 2019,33(5):32-35.
Li X, Liu B W, Guo J. Experimental study on ammonia removal from domestic sewage by breakpoint chlorination [J]. Energy Environmental Protection, 2019,33(5):32-35.
- [6] 李柏林,任晓玲,李 晔,等.溶解氧对单级颗粒污泥自养脱氮系统影响的模拟 [J]. 中国环境科学, 2019,39(12):5126-5133.
Li B L, Ren X L, Li Y, et al. Simulation study on the effect of dissolved oxygen on single-stage granular sludge autotrophic nitrogen removal system [J]. China Environmental Science, 2019,39(12):5126-5133.
- [7] 李海鑫,刘秀红,杨忠启,等.调整气水比优化高氨氮废水 BAF 一体化脱氮 [J]. 中国环境科学, 2019,39(9):3807-3813.
Li H X, Liu X H, Yang Z Q, et al. Optimization of the integrated nitrogen removal process of high ammonia nitrogen wastewater in BAF by adjusting the gas water ratio [J]. China Environmental Science, 2019,39(9):3807-3813.
- [8] 郑照明,李 军,马 静,等.SNAD 生物膜厌氧氨氧化活性的氨氮抑制动力学研究 [J]. 中国环境科学, 2016,36(10):2957-2963.
Zheng Z M, Li J, Ma J, et al. The kinetic coefficients of ammonium inhibition on the Anammox activity of SNAD biofilm [J]. China Environmental Science, 2016,36(10):2957-2963.

- [9] 杨美娟,刘 祥,王凯军,等.固定化微藻流化床反应器去除低碳污水中氨氮的潜力 [J]. 中国环境科学, 2020,40(5):2040–2046.
Yang M J, Liu X, Wang K J, et al. The potential of immobilized microalgae fluidized bed reactor for removing ammonium from low carbon wastewater [J]. China Environmental Science, 2020,40(5): 2040–2046.
- [10] 李 冬,曹瑞华,杨 航,等.生物净化低温高铁锰氨氮地下水氨氮去除机制 [J]. 中国环境科学, 2017,37(7):2623–2632.
Li D, Cao R H, Yang H, et al. Removal mechanism of ammonia nitrogen in bio-purification process for high iron and manganese removal from low temperature groundwater [J]. China Environmental Science, 2017,37(7):2623–2632.
- [11] 邓凯文,李建政,赵博玮.WFSI 处理低 C/N 比养猪废水的效果及脱氮机制 [J]. 中国环境科学, 2016,36(1):87–91.
Deng K W, Li J Z, Zhao B W. Efficiency and denitrification mechanism in a wood-chip-framework soil infiltrator treating piggery wastewater with low C/N ratio [J]. China Environmental Science, 2016,36(1):87–91.
- [12] 王 鹏,刘伟藻,方汉平.垃圾渗沥液中氨氮的电化学氧化 [J]. 中国环境科学, 2000,20(4):289–291.
Wang P, Liu W Z, Fang H P. Electrochemical oxidation of landfill leachate [J]. China Environmental Science, 2000,20(4):289–291.
- [13] 赵贤广,杨世慧,邱明建,等.负压蒸发-吹脱组合新技术处理垃圾沥滤液高浓度氨氮实验研究 [J]. 现代化工, 2020,40(2):187–190,195.
Zhao X G, Yang S H, Qiu M J, et al. Experimental study on treatment of high concentration ammoniacal nitrogen in landfill leachate by negative pressure evaporation-stripping combined technology [J]. Modern Chemical Industry, 2020,40(2):187–190,195.
- [14] Yin S H, Chen K H, Srinivasakannan C, et al. Enhancing recovery of ammonia from rare earth wastewater by air stripping combination of microwave heating and high gravity technology [J]. Chemical Engineering Journal, 2018,337:515–521.
- [15] Zhang C Y, Ma J X, He D, et al. Capacitive membrane stripping for ammonia recovery (CapAmm) from dilute wastewaters [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2018,5(1):43–49.
- [16] 王春荣,李 焜,胡建龙,等.电化学氧化除氨氮过程中羟基自由基及中间产物定量分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(2):238–241.
Wang C Y, Li D, Hu J L, et al. The quantitative analysis of hydroxyl radical produced and intermediate products in the process of electrochemical oxidation for ammonia removal [J]. China Environmental Science, 2012,32(2):238–241.
- [17] 姜 辉,周德鸿,陈卫国,等.三维电极处理氨氮废水的电化学反应特性 [J]. 中国环境科学, 2014,34(10):2551–2555.
Jiang H, Zhou D H, Chen W G, et al. Preliminary exploration of electrochemical reaction characteristics in three-dimensional electrode treatment ammonia wastewater [J]. China Environmental Science, 2014,34(10):2551–2555.
- [18] 陈金奎,施汉昌,徐丽丽.pH 值对氨氮电化学氧化产物与氧化途径的影响 [J]. 环境科学, 2008,29(8):2277–2281.
Chen J L, Shi H C, Xu L L. Effect of pH for the electrochemical oxidation products and oxidation pathways of ammonia [J]. Environmental Science, 2008,29(8):2277–2281.
- [19] Kim K W, Kim Y J, Kim I T, et al. Electrolytic decomposition mechanism of ammonia to nitrogen at IrO₂ anode [J]. Electrochimica Acta, 2005,50(22):4356–4364.
- [20] Laiza C, José Antonio C, Ponciano G. Evaluation of anode materials for the electro-oxidation of ammonia and ammonium ions [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011,129(3):1146–1151.
- [21] 朱 艳,汪家权,陈少华,等.氯离子对氨氮电化学氧化的影响 [J]. 环境工程学报, 2013,7(7):2619–2623.
Zhu Y, Wang J Q, Chen S H, et al. Effect of chloride ion on ammonia electrochemical oxidation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013,7(7):2619–2623.
- [22] Chen J L, Shi H C, Lu J H. Electrochemical treatment of ammonia in wastewater by RuO₂-IrO₂-TiO₂/Ti electrodes [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2007,37(10):1137–1144.
- [23] Kapalka A, Joss L, Anglada A, et al. Direct and mediated electrochemical oxidation of ammonia on boron-doped diamond electrode [J]. Electrochemistry Communications, 2010,12(12):1714–1717.
- [24] Steven L V, Lionel R, Daniel B. Study of the electrochemical oxidation of ammonia on platinum in alkaline solution: Effect of electrodeposition potential on the activity of platinum [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2013,691:18–27.
- [25] 马小霞,袁玉南,唐金晶,等.电化学氧化法去除电解锰渣中的氨氮 [J]. 环境化学, 2016,35(12):2592–2598.
Ma X X, Yuan Y N, Tang J J, et al. Removal of ammonia nitrogen from electrolytic manganese residue by electrochemical oxidation [J]. Environmental Chemistry, 2016,35(12):2592–2598.

作者简介: 莫恒亮(1988–),男,广东湛江人,工程师,博士,主要从事电化学水处理技术及水处理功能材料研究.发表论文 10 余篇。