

模拟船舶烟气中氮氧化物的电催化 还原脱除工艺研究

魏宝震, 李春虎*, 尉 帅, 黄克磊
(中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266000)

摘要: 制作以改性 DSA 为阳极、钛网为阴极并在两极间填充活性炭纤维棉作为传导介质的电解催化装置; 将装置放置在喷淋洗涤反应器内, 研究模拟烟气中 NO_x 电催化还原脱除的影响因素。结果表明, 随着电流密度从 150 mA/cm^2 增大到 350 mA/cm^2 , 脱硝率逐渐升高, 而阴极电流效率则是先增大后减小; 随着烟气入口处 NO 浓度从 600 mg/m^3 增大到 1400 mg/m^3 , 脱硝率和阴极电流效率均逐渐增大; 随着液气比从 10 L/m^3 减小到 2.5 L/m^3 , 脱硝率逐渐减小而阴极电流效率逐渐增大。

关键词: 模拟烟气; 氮氧化物; 有效氯; 催化还原

中图分类号: X701.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)S2-0287-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.057

Study on electrocatalytic reduction removal of nitrogen oxides in simulated ship flue gas

WEI Bao-zhen, LI Chun-hu*, YU Shuai, HUANG Ke-lei

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China)

Abstract: An electrolytic catalytic device is prepared with modified DSA as the anode, titanium mesh as the cathode, and activated carbon fiber as the conduction medium between the two electrodes. The device is placed in a spray scrubber reactor to study the factors influencing the electrocatalytic reduction removal of NO_x from simulated flue gas. The results show that the denitrification rate increases gradually as the current density increases from $150 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ to $350 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, while the cathode current efficiency increases firstly and decreases then. The denitrification rate and cathode current efficiency both increase gradually as the NO concentration at the flue gas inlet increases from $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $1,400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The denitrification rate decreases gradually while the cathode current efficiency increases gradually as the ratio of liquid to gas decreases from $10 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ to $2.5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$.

Key words: simulated flue gas; nitrogen oxides; active chlorine; catalytic reduction

随着海上运输业在全球交通运输体系中承担运载量的逐年增加, 船舶柴油发动机尾气中的 NO_x 排放所带来的环境和健康问题引起人们高度重视。据统计, 全球约有 90% 以上的船舶采用燃烧重质燃料油的柴油发动机作为主要动力系统, 当柴油发动机缸内燃烧温度达到某一峰值后, 空气中的 N_2 会与 O_2 反应生成热力型 NO_x , 其中 95% 为 $\text{NO}^{[1]}$ 。 NO_x 的危害有以下几点: 长期吸入会损害人体呼吸系统; 形成酸雨侵蚀建筑物; 形成光化学烟雾致人体中毒和破坏臭氧层进而加剧温室效应。杨少龙^[2] 在电解海水鼓泡反应器的基础上添加紫外辐照来强化脱硝效果, 并对反应动力学和强化机理进行了研究, 但没有涉及脱硝废液中 NO_3^- 再处理的问题。李浩智^[3] 提出光催化/ NaHSO_3 高级还原技术联合还原脱硝工艺, 在烟气入口 NO 浓度为 1000 mg/m^3 的

实验条件下脱硝率和 N_2 选择性分别为 66% 和 67%。王耀霖^[4] 设计研究了高效稳定的 Urea-SCR 脱硝技术, 探究了影响还原剂尿素分解的外部因素, 但该技术需要使用大量还原剂, 存在氨泄漏的风险。

本文采用电解海水催化还原法, 首先利用阳极电解出的强氧化性有效氯将 NO 氧化成 NO_2 , NO_2 溶解于海水后生成的 NO_3^- 和 NO_2^- 经过传导介质活性炭纤维移动到阴极完成 NO_3^- 的电催化还原。最终, 大部分 N 元素以 N_2 的形式随净化后的烟气排出。考察了电流密度、烟气入口处 NO 浓度和液气比等因素对脱硝效果的影响。

1 实验方法

1.1 实验原理

电催化还原脱除模拟烟气中的 NO 包含两个过

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-03-04

基金项目: 青岛市民生科技计划项目(17-3-3-71-nsh)

作者简介: 魏宝震(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为船舶尾气污染控制处理, weibaozhen@stu.ouc.edu.cn; 李春虎(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为光电催化、污水处理及大气污染排放控制, 通讯联系人, lichunhu@ouc.edu.cn。

程:第一步是 NO 的氧化过程,海水中的氯离子在阳极 DSA 上生成 Cl_2 , Cl_2 溶于海水生成强氧化性物质有效氯,以 HClO 、 Cl_2 和 ClO^- 3 种形式存在,当电解海水 pH 在 4~6 区间时有效氯的主要存在形式是 HClO ,根据三者的标准电极电位^[5]可知氧化能力的强弱顺序是 $\text{HClO} > \text{Cl}_2 > \text{ClO}^-$, HClO 可以将难溶的 NO 氧化成易溶的 NO_2 , NO_2 溶解后产生 NO_3^- 和 NO_2^- ;第二步是 NO_3^- 在阴极被还原成 N_2 或 NH_4^+ 的过程,在这里又包含两种途径,一种是 H^+ 先吸附在阴极上得电子生成 $[\text{H}]$,然后 $[\text{H}]$ 间接还原 NO_3^- ,另一种是 NO_3^- 直接在阴极得电子发生还原反应,最终模拟烟气中的 NO 大部分以 N_2 的形式直接排放到大气中,脱硝液中残留少量 NO_2^- 和 NH_4^+ 。反应过程及方程式见图 1 和表 1。

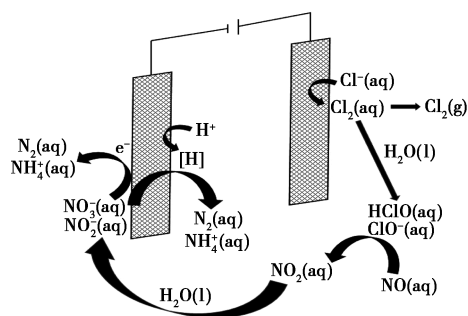


图 1 电催化还原脱除 NO 反应路径示意图

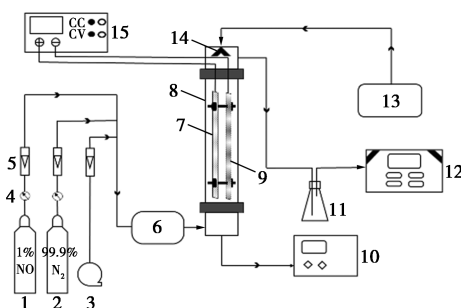
表 1 反应过程及方程式

反应过程	方程式
NO 氧化	$\text{NO}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{NO}(\text{aq})$
	$\text{NO}(\text{aq}) + \text{HClO}(\text{aq}) \longrightarrow \text{NO}_2(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq})$
	$2\text{NO}(\text{aq}) + 3\text{HClO}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \longrightarrow$
	$2\text{NO}_3^-(\text{aq}) + 3\text{Cl}^-(\text{aq}) + 5\text{H}^+(\text{aq})$
	$2\text{NO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{aq}) \longrightarrow \text{NO}_3^-(\text{aq}) + \text{NO}_2^-(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq})$
NO_3^- 阴极还原	$\text{NO}_3^-(\text{aq}) + 6\text{H}^+(\text{aq}) + 5\text{e}^- \longrightarrow 1/2\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$
	$\text{NO}_3^-(\text{aq}) + 10\text{H}^+(\text{aq}) + 8\text{e}^- \longrightarrow \text{NH}_4^+(\text{aq}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$

1.2 实验装置及流程

实验系统由模拟烟气系统、电解海水脱硝反应器和烟气分析系统 3 部分组成(图 2)。 N_2 (99.9%)、NO 标准气体(1% NO+99% N_2) 和空气通过转子流量计控制进入混气罐内充分混合,得到总流量为 12 L/min 的高浓度模拟烟气 [$c(\text{NO}) = 1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$]。反应器内径 25 mm、总高度 440 mm,内部竖直对立放置阴阳电极网,阳极为改性 DSA,阴极为钛,尺寸均为 200 mm×10 mm×1 mm,阴阳两

极间距为 4 mm,且在两极之间填充一定体积的活性炭纤维棉或活性炭作为传导介质。反应开始前,模拟烟气经过未通电、未喷淋的反应器后进入烟气分析仪(崂应 3022 型),记为 NO 入口处浓度 C_{in} (mg/L)。然后在海水储槽中装满新鲜海水,以 1.8 L/h 的流量经过喷头雾化后喷进反应器内与模拟烟气逆向接触反应,同时打开直流电源开关,使其在恒流或恒压模式下给反应器内电解装置供电。烟气分析仪每 30 s 记录一次出口浓度,待稳定后读取示数,记为 NO 出口处浓度 C_{out} (mg/L)。取示数稳定后的脱硝废液,用水质三氮分析仪(济南连华科技 LH-NC3M 型)测定液相中三氮离子浓度 $c(\text{NO}_3^-)$ 、 $c(\text{NO}_2^-)$ 和 $c(\text{NH}_4^+)$ 。



1—NO 钢瓶;2— N_2 钢瓶;3—空气泵;4—减压阀;5—转子流量计;
6—混气罐;7—DSA 阳极;8—亚克力反应器;9—钛网阴极;
10—液相三氮离子检测仪;11—尾气吸收瓶;12—烟气分析仪;
13—海水储槽;14—Y 型雾化喷头;15—直流电源

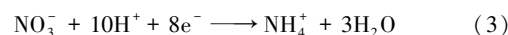
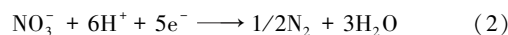
图 2 实验装置流程图

1.3 数据处理方法

用式(1)计算脱硝率:

$$\eta = [(C_{\text{in}} - C_{\text{out}})/C_{\text{in}}] \times 100\% \quad (1)$$

阴极电流效率是指在阴极还原 NO_3^- 消耗电荷的物质的量与理论电荷的物质的量之比。根据 N 元素守恒以及液相检测的三氮离子浓度,可以计算出 N_2 的物质的量,根据式(2)、式(3)可计算出在阴极还原 NO_3^- 消耗的总电荷量 n 。



再根据式(4)法拉第定律计算出理论电荷的物质的量:

$$Q = n_{\text{电}} \cdot F = I \cdot t \rightarrow n_{\text{电}} = (I \cdot t)/F \quad (4)$$

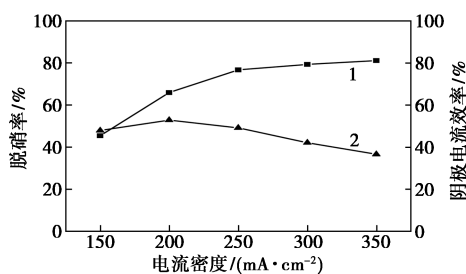
式中: $n_{\text{电}}$ 为理论电荷的物质的量, mol; F 为法拉第常数,约为 96 500 C/mol; I 为脱硝通过的电流, A; t 为整个脱硝过程持续的时间, s。因此阴极电流效率定义式为式(5):

$$CE_{\text{阴}} = (n/n_{\text{电}}) \times 100\% \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 电流密度的影响

如图3所示,电流密度从 150 mA/cm^2 增加到 350 mA/cm^2 时,脱硝率随之增加,而阴极电流效率先增大后减小。基于法拉第第一定律,电极上发生化学反应的物质的量与通过电解池的电荷量成正比,即电流密度越大在阳极生成的有效氯的量越多^[6],模拟烟气中就会有更多NO被有效氯氧化成易溶的 NO_2 ,进而使N元素以 NO_3^- 的形式转移至液相。因此,提高电流密度有利于NO的脱除。由于电流密度增大的同时会使电解装置的电压随之增加,阴阳两极之间的电场强度也随之增加, NO_3^- 往阴极移动的逆自发迁移行为被大大抑制,使得大量 NO_3^- 无法到达阴极材料表面完成催化还原。另外,阴极副反应也会随之加剧。因此,电流密度提高会给阴极电流效率带来负作用^[7-8]。电流密度对电催化还原脱硝的影响见表2。



1—脱硝率;2—阴极电流效率

图3 电流密度对脱硝效果的影响

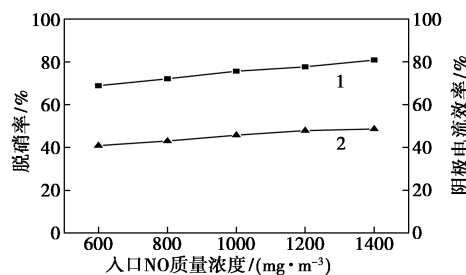
表2 电流密度对电催化还原脱硝的影响

电流密度/ ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	电压/ V	电流/ A	$c(\text{NO}_3^--\text{N})$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{NO}_2-\text{N})$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{NH}_4^+-\text{N})$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
150	5.91	3	2.314	0.099	1.822
200	6.99	4	1.258	0.100	1.767
250	9.81	5	1.366	0.097	1.662
300	12.34	6	2.045	0.123	1.475
350	14.68	7	3.020	0.113	1.044

2.2 模拟烟气入口处NO浓度的影响

如图4所示,在烟气总流量不变的情况下,增加烟气入口处NO的浓度可以提高脱硝率^[9],阴极电流效率也有小幅度增加。根据双膜理论^[10]和亨利(Henry)定律,烟气入口处NO浓度增加使NO的气相分压增加,NO气相分压增加又会导致气相传质推动力增加,最终加快了NO氧化吸收速率,提高了

NO氧化脱除率。随着脱硝率的上升,液相中 NO_3^- 浓度不断提高,阴阳两极区域 NO_3^- 的浓度差产生了传质推动力,促使更多的 NO_3^- 转移向阴极并完成催化还原反应,因此阴极电流效率随着入口处NO浓度的增加而小幅度上升。入口NO浓度对电催化还原脱硝的影响见表3。



1—脱硝率;2—阴极电流效率

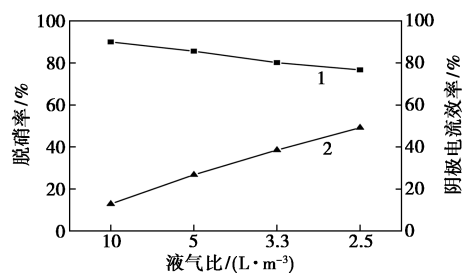
图4 入口处NO浓度对脱硝效果的影响

表3 入口NO浓度对电催化还原脱硝的影响

入口NO 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	电压/ V	电流/ A	$c(\text{NO}_3^--\text{N})$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{NO}_2-\text{N})$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{NH}_4^+-\text{N})$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
600	10	5.34	3.102	0.120	2.325
800	10	5.39	1.054	0.189	1.897
1000	10	5.29	0.994	0	0.503
1200	10	5.22	0.817	0.097	1.665
1400	10	5.34	1.020	0.111	1.478

2.3 液气比的影响

液气比是湿法脱硝工艺中一个非常重要的影响参数,它决定着烟气在反应器内的通过速度、停留时间以及气液传质效果,最终影响脱硝效果^[11-12]。如图5所示,液气比从 10 L/m^3 减小到 2.5 L/m^3 时,风速从 0.025 m/s 增加到 0.102 m/s ,脱硝率从 90.01% 下降到 76.7% 。液气比减小意味着喷淋量不变的情况下烟气流量增大、风速增加且停留时间减小,烟气中的NO与电解海水液相产物



1—脱硝率;2—阴极电流效率

图5 液气比对脱硝效果的影响

中的强氧化性有效氯物质无法充分接触反应,因此脱硝率会随着液气比减小而下降。

另外,阴极电流效率随液气比减小而增大。在液气比较大的条件下虽然可以获得较高的脱硝率,但由于烟气流量小所以脱除的 NO_x 总量不多。液气比为 10 L/m^3 时脱除模拟烟气中的 NO 总量约为 75.6 mg ,假设 NO 被氧化后溶于水全部以 NO_3^- 形式存在于液相中,那么 NO_3^- -N 的含量仅为 19.6 mg/L 。液气比为 2.5 L/m^3 时脱除的 NO 总量约为 257.7 mg ,液相中 NO_3^- -N 的含量约为 66.8 mg/L 。一方面, NO_3^- 若在阴极完成催化还原必须向逆自发电迁移方向移动,液气比减小可以加剧反应器内气相扰动,给 NO_3^- 向阴极的移动提供传动力;另一方面,阴阳两极附近区域存在较高的 NO_3^- 浓度梯度也有利于其向阴极移动,因此减小液气比有利于 NO_3^- 在阴极完成催化还原,提高阴极电流效率。液气比对电催化还原脱硝的影响见表 4。

表 4 液气比对电催化还原脱硝的影响

液气比/ ($\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$)	电压/ V	电流/ A	$c(\text{NO}_3^-)\text{-N}$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{NO}_2^-)\text{-N}$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{NH}_4^+)\text{-N}$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
10.0	9.79	5	4.533	0.546	0.856
5.0	9.68	5	2.444	0.354	0.974
3.3	9.77	5	1.141	0.118	1.456
2.5	9.81	5	1.366	0.097	1.662

2.4 极板间距的影响

如图 6 所示,当极板间距由 4 mm 增加到 12 mm 时,脱硝率基本保持在 77% ,阴极电流效率仅有小幅度下降。这是因为在电流密度不变的情况下,输入进整个体系的电荷量是一定的,即在阳极产生有效氯的浓度基本恒定,被氧化的 NO 的量也是恒定的,所以改变极板间距后脱硝率变化不大。同样, NO_2 溶于海水后生成的 NO_3^- 在一定面积的阴极上发生还原反应,阴极电流效率同样也不会发生较大变化。但是从表 5 的实验数据可知,随着极板间距的增大,反应电压却是不断增加的。反应器内的电解装置可以认为是一个无隔膜的电解槽,根据文献可知,无隔膜电解槽电压 (ΔV) 可以用式 (6) 表示^[13]:

$$\Delta V = \Delta E + \Delta \eta + \Delta V_{\Omega} + \Delta V_i \quad (6)$$

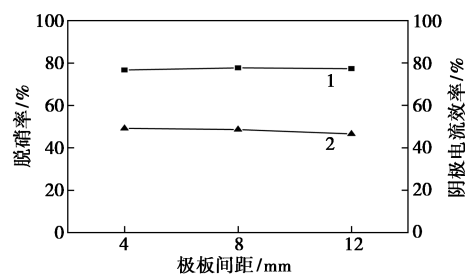
式中: ΔE 为电解制氯热力学平衡电位, V; $\Delta \eta$ 为阴极和阳极过电位之和, V; ΔV_{Ω} 为电解质溶液的欧姆降, V; ΔV_i 为电极性能下降引起的槽电压的偏移量,

此处 $\Delta V_i = 0 \text{ V}$ 。其中,电解质溶液的欧姆降又可以表示为式 (7)^[14]:

$$\Delta V_{\Omega} = (\delta \cdot I) / (A \cdot \sigma) \quad (7)$$

式中: δ 为阴阳两极间距, cm; I 为电解电流, A; A 为电极面积, cm^2 ; σ 为电解质溶液电导率, S/m 或 $(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$ 。

当电极材料、海水温度和含盐量一定时, ΔE 、 $\Delta \eta$ 和 ΔV_i 均为定值,电解槽电压仅与电解质溶液的欧姆降有关。电流和海水电导率不变的情况下,根据欧姆降的表达式可知,电解槽电压与阴阳两极间距成正比,可以解释槽电压随着间距的增大而升高。槽电压增大会抑制 NO_3^- 向阴极的迁移而且间距增大迁移距离随之增加,因此,阴极电流效率出现了随间距增大而小幅下降的现象。同时,增加极板间距导致的电压增加最终会使脱硝能耗提高,在实际应用中应该尽可能减小极板间距,保持在 $2.5 \sim 4 \text{ mm}$,但同时要避免因为阴极结垢或进入异物导致的阴阳极板短路打火问题。



1—脱硝率;2—阴极电流效率

图 6 极板间距对脱硝效果的影响

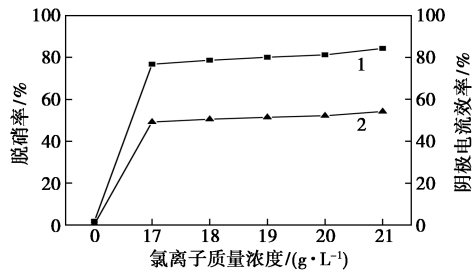
表 5 极板间距对电催化还原脱硝的影响

极板间距/ mm	电压/ V	电流/ A	$c(\text{NO}_3^-)\text{-N}$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{NO}_2^-)\text{-N}$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$c(\text{NH}_4^+)\text{-N}$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
4	9.81	5	1.366	0.097	1.662
8	9.77	5	4.546	0.101	1.210
12	10.25	5	9.271	0.072	0.402

2.5 海水中氯离子浓度的影响

如图 7 所示,用去离子水代替海水喷淋相当于氯离子浓度为零,阳极附近无法产生有效氯用于氧化 NO ,因此 NO 的脱除率几乎为零,阴极电流效率也几乎为零。原始海水中的氯离子浓度约为 17 g/L ,通过添加 NaCl 改变氯离子浓度。由图 7 可知,海水中的氯离子浓度增加会使脱硝率随之增加,阴极电流效率缓慢增加,但整体变化不显著。海水中氯离子浓度增加会加速氯离子由溶液本体向阳极表面的扩

散传质过程,有利于氯离子在阳极的吸附氧化生成更多有效氯,高浓度的有效氯吸收氧化 NO 的数量增加,导致脱硝率上升。由于并未改变液气比和电流密度,因此 NO_3^- 在阴极的还原速率无明显变化。



1—脱硝率;2—阴极电流效率

图7 氯离子质量浓度对脱硝效果的影响

由表6数据可知,随着海水中氯离子浓度的提高,槽电压逐渐降低。根据式(8)能斯特(Nernst)方程分析,电压逐渐下降的原因可能是因为氯离子浓度升高导致析氯反应电极电位降低。

$$\varphi_{(\text{Cl}_2/\text{Cl}^-)} = \varphi_{(\text{Cl}_2/\text{Cl}^-)}^\theta + (RT/2F) \ln P_{\text{Cl}_2} / [\text{Cl}^-]^2 \quad (8)$$

式中: $\varphi_{(\text{Cl}_2/\text{Cl}^-)}$ 为析氯反应电极电势,V; $\varphi_{(\text{Cl}_2/\text{Cl}^-)}^\theta$ 为析氯反应标准电极电势,V; R 为气体摩尔常数,约为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为温度,K; P_{Cl_2} 为氯气分压,kPa; $[\text{Cl}^-]$ 为氯离子浓度,mol/L。

因此,提高海水中氯离子的浓度有利于 NO_x 的脱除^[15]。同时,提高海水氯离子浓度有利于降低槽电压, NO_3^- 向阴极迁移运动的抑制作用减弱,有利于 NO_3^- 的还原。从实际角度考虑,槽电压减小可降低脱硝能耗,工业应用中可考虑喷淋浓海水来强化脱硝效果。

表6 氯离子质量浓度对电催化还原脱硝的影响

氯离子 质量浓度/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	电压/ V	电流/ A	$c(\text{NO}_3^- - \text{N}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$c(\text{NO}_2^- - \text{N}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$c(\text{NH}_4^+ - \text{N}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
0	10.98	5	2.547	1.001	0.032
17	9.81	5	1.366	0.097	1.662
18	9.70	5	1.203	0.111	2.015
19	9.64	5	1.020	0.157	1.680
20	9.32	5	1.130	0.135	1.887
21	9.01	5	0.875	0.131	1.527

3 结论

采用电催化还原脱硝工艺,模拟烟气中的 NO 先被阳极产生的有效氯氧化成 NO_2 , NO_2 溶于海水后产生的 NO_3^- 在阴极完成催化还原过程,最终生成

N_2 。研究了电催化还原脱硝的影响因素,得出以下结论:

(1) 电流密度越大脱硝率越高;阴极电流效率则是随电流密度增大而先增大后减小,因为电流密度越大导致电场强度越大,抑制 NO_3^- 向阴极的自发电迁移,无法顺利完成催化还原过程。

(2) 模拟烟气入口处 NO 浓度增加导致气相传质推动力增加,脱硝率和阴极电流效率均随之而增加。

(3) 随着液气比的增加,脱硝率逐渐下降,而阴极电流效率逐渐增大。

(4) 极板间距对脱硝率和阴极电流效率均无显著影响。

(5) 随着海水中氯离子浓度的增加,脱硝率和阴极电流效率均呈缓慢上升趋势。

参考文献

- [1] 方平,陈雄波,唐子君,等.船舶柴油机大气污染物排放特性及控制技术现状[J].化工进展,2017,36(3):1067-1076.
- [2] 杨少龙.基于紫外/电解海水的船舶废气脱硝性能与机理研究[D].大连:大连海事大学,2017.
- [3] 李浩智.船舶烟气光催化联合海水 NaHSO_3 脱硝的技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2021.
- [4] 王耀霖.船舶尾气高效脱硝系统的开发与优化[D].杭州:浙江大学,2017.
- [5] 吴维昌,冯洪清,吴开治.标准电极电位数据手册[M].北京:科学出版社,1991.
- [6] Abdel-Aal H K, Sultan S M, Hussein I A. Parametric study for saline water electrolysis: Part II—Chlorine evolution, selectivity and determination[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1993, 18(7):545-551.
- [7] 顾雨薇,李雪,陈硕,等.高盐水中硝酸根的电化学去除方法[J].科学通报,2020,65(26):2880-2894.
- [8] 叶舒帆,胡筱敏,和英滇,等.非贵金属催化还原水中的硝酸盐氮[J].环境化学,2011,30(10):1711-1717.
- [9] Yang S, Pan X, Han Z, et al. Kinetics of nitric oxide absorption from simulated flue gas by a wet UV/chlorine advanced oxidation process[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(7):7263-7271.
- [10] Hessel V, Löb P, Löwe H. Gas-liquid reactions[M]. Microreactors in Organic Chemistry and Catalysis, Wiley-VCH, 2007:139-183.
- [11] 张欢,钟鹭斌,苑志华,等.隔膜电解海水氧化耦合吸收脱硝脱硝净化船舶尾气技术[J].环境工程学报,2018,12(1):164-171.
- [12] 肖灵,程斌,莫建松,等.次氯酸钠湿法烟气脱硝及同时脱硝脱硝技术研究[J].环境科学学报,2011,31(6):1175-80.
- [13] Trasatti S. Electrocatalysis: Understanding the success of DSA[®][J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(15):2377-2385.
- [14] 陈延禧.电解工程[M].天津:天津科学技术出版社,1993.
- [15] 公丕建.基于 NaClO_2 /电解 NaCl 盐水的烟气脱硝性能及机理研究[D].北京:北京科技大学,2021. ■