低温烟气氮氧化物 KI/PPG 复合脱除剂性能实验研究

石荣桂[1],钱 磊[1],郭 超[2],魏国祥[2],梁国祥[2],刘炳成[2*]
(1.山东电力工程咨询院有限公司,山东 济南 250013;
2.青岛科技大学机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:化石燃料燃烧产生的氮氧化物(NO_x)危害环境。工业锅炉等排放的烟气温度多低于180℃,难以直接采用SCR技术脱除NO_x,湿法脱硝在该领域潜力巨大。针对低温湿法亚硫酸盐脱硝体系易氧化失活的难题,以碘化钾(KI)为主吸收剂,测试多种大分子有机物添加剂复合脱除剂对氮氧化物的脱除效果,其中聚丙二醇/KI复配吸收剂效果最优。实验显示,50℃为最佳反应温度;碱性环境更利于高效脱硝,酸性条件下高浓度的H^+与NO_2^-易生成易分解的HNO_2,导致脱硝效率降低。

关键词:湿法脱硝;低温烟气脱硝;复合脱硝剂;碘化钾;聚丙二醇
中图分类号:TQ028.17;X701.7 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0177-05
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.029

Experimental research on the NO_x removal performance of KI/PPG composite agent from low-temperature flue gas

SHI Rong-gui[1], *QIAN Lei*[1], *GUO Chao*[2], *WEI Guo-xiang*[2], *LIANG Guo-xiang*[2], *LIU Bing-cheng*[2*]
(1.Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;
2.College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Nitrogen oxides (NO_x) generated from fossil fuel combustion pose environmental hazards. Flue gas discharged from industrial boilers and similar facilities typically has a temperature below 180℃, rendering SCR technology unsuitable for direct NO_x removal. In contrast, wet flue gas denitration boasts greater potential in this field. To address the issue of facile oxidative deactivation in low-temperature wet sulfite denitration systems, potassium iodide (KI) was adopted as the primary absorbent. The NO_x removal performance of various composite agents blended with macromolecular organic additives was evaluated, and the polypropylene glycol/KI composite absorbent delivered the optimal effect. Experimental results indicate that 50℃ is the optimal reaction temperature. An alkaline environment is more favorable for high-efficiency denitration, while under acidic conditions, high concentrations of H^+ and NO_2^- readily form easily decomposable nitrous acid (HNO_2), leading to a decline in denitration efficiency.

Key words: wet flue gas denitration; low-temperature flue gas denitration; composite denitration agent; potassium iodide; polypropylene glycol

煤燃烧过程排放的氮氧化物(NO_x)是造成酸雨和雾霾的重要因素,不仅对生态环境造成严重破坏,还会对人体健康产生一系列负面影响[1]。针对中高温烟气(200~600℃)的氮氧化物脱除,通常采用选择性催化还原法(SCR)[2]和选择性非催化还原法(SNCR)[3]。对于温度低于200℃的低温烟气脱硝,湿法脱硝技术有脱除效率高、运行成本低、二次污染小等优势,具有广阔的应用潜力。

近年来,利用一体化氧化吸收工艺同时去除烟气SO_2和NO_x的研究越来越受到关注[4],技术的核心在于将烟气中溶解度极低的NO通过环境友好的氧化过程转化为可溶性较高的NO_2,随后通过液相吸收实现烟气氮氧化物脱除。亚硫酸盐是烟气湿法脱硝工艺技术中有效的NO_2吸收剂,但溶液中的有效脱硝组分SO_3^{2-}容易被烟气中携带的O_2氧化变成SO_4^{2-},从而失去脱硝能力。碘化钾(KI)在烟气湿法脱硝过程中展现出显著的抗氧化优势,但其本身还原性较弱,脱硝效率低于亚硫酸盐。Mok[5]、Tang等[6]研究表明,还原性添加剂(如亚硫酸盐、硫化钠)可促进NO_2的液相转化。Lian等[7]、Gao等[8]实验研究了对湿法脱硝性能的影响。Guo等[9]测量了亚硫酸铵溶液中NO_2的吸收速率,发现吸收液中

收稿日期:2026-01-09;**修回日期**:2026-08-21
作者简介:石荣桂(1971-),男,硕士,高级工程师,研究方向为电厂烟气净化处理工艺研究,shironggui@spic.com.cn;刘炳成(1975-),男,博士,教授,研究方向为环保新技术与装备,通讯联系人,bingchengL@163.com。

存在的铵离子(NH_4^+)会抑制氧气(O_2)在水中的溶解,从而削弱 O_2 与亚硫酸根(SO_3^{2-})之间的反应。抗氧化剂能够在一定程度上抑制 O_2 对烟气湿法脱硝的不良影响,但也增加了烟气脱硝运行成本。烟气脱硝效率不仅取决于还原剂本身的化学性质,烟气与还原剂之间的气液传质阻力同样起着关键影响作用。探索通过添加某些与 NO_x 组分具有较强物理相互作用的成分,增大烟气 NO_x 气体组分在液体吸收剂中的溶解度,从而提高 KI 脱硝性能具有重要的工程应用意义。因此本文选择 KI 作为吸收剂,选择 5 种含有 C\H\O 元素的有机大分子化合物作为添加剂,构建复合吸收剂,通过加入添加剂增大 NO_x 在溶液中的溶解度,综合提升烟气湿法脱硝性能。同时还考察了吸收剂浓度、添加剂浓度、温度、pH 等关键参数对脱硝效果的影响,对优化后的体系的脱硝性能进行了验证,为后续工业应用提供了具体的参数参考。

1 实验系统及方法

1.1 实验仪器与试剂

本研究中使用的主要化学用品如下:碘化钾(99%分析纯)、聚丙二醇(99%分析纯)、聚乙二醇(99%分析纯)、β-环糊精(99%分析纯)、水苏糖(99%分析纯)、双季戊四醇(99%分析纯)、氢氧化钠(99%分析纯)、盐酸(99%分析纯)、亚硝酸钠(99%分析纯)。标准气体 NO_2(浓度为 2.04×10^{-5} mol/L,N_2 为平衡气体)、O_2(>99.99%)、N_2(>99.99%)。表 1 为所用实验仪器汇总。

表 1 实验仪器汇总

设备名称	型号	产地
德图烟气分析仪	TESTO340	德国德图
离子色谱仪	PIC-10	山东青岛
pH 计	SevenExcellenceTM	瑞士梅特勒
恒温水浴锅	HH-6	常州丹瑞实验仪器设备有限公司
电子天平	JA2003	上海方瑞仪器设备有限公司

1.2 实验装置及流程

搭建实验装置,实验装置如图 1 所示,其可分为 3 个模块:气体模拟单元、脱硝反应单元、监测分析单元。

第 1 模块由 NO_2、N_2、O_2 气瓶、转子流量计、气体缓冲瓶以及相关管路组成。气体经转子流量计调节流量后进入缓冲瓶充分混合;混合后的气体进入第 2 模块,脱硝反应单元采用恒温水浴控温的鼓泡反应器,在鼓泡反应器中混合气体与吸收剂发生反应;第 3 模块监测分析单元使用烟气分析仪实时检测进出口气体成分,并采用离子色谱仪对反应后溶液中的液相成分进行分析。

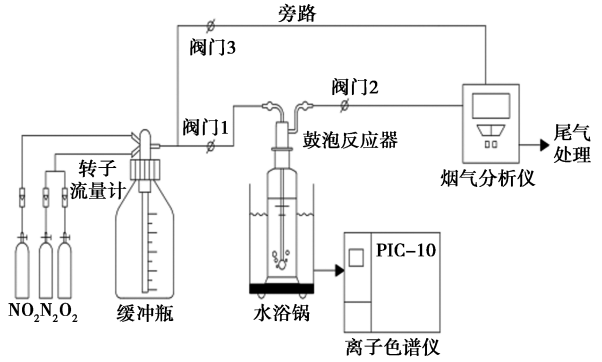


图 1 湿法脱硝实验流程图

1.3 实验数据分析方法

本实验中每隔 1 min 记录一次烟气出口数据,将通过实验装置中旁路的 NO_x 浓度作为进口浓度,鼓泡反应器后的 NO_x 浓度作为出口浓度,并根据公式(1)、(2)计算 NO_x 的吸收效率。

瞬时脱硝效率如式(1)所示。

$$\eta_{NO_x}=[(C_{inlet,NO_x}-C_{outlet,NO_x})/C_{inlet,NO_x}]\times100\% \quad (1)$$

式中:η_{NO_x} 为脱硝实验的瞬时 NO_x 脱除效率,%;C_{inlet,NO_x} 为鼓泡反应器进口烟气中的 NO_x 气体浓度,mol/L;C_{outlet,NO_x} 为鼓泡反应器出口烟气中的 NO_x 气体浓度,mol/L。

平均脱硝效率如式(2)所示。

$$E_{NO_x}=\{\int_{t_1}^{t_2}[(C_{inlet,NO_x}-C_{outlet,NO_x})/C_{inlet,NO_x}]dt\}/(t_2-t_1)\times100\% \quad (2)$$

式中:E_{NO_x} 为脱硝实验的平均 NO_x 脱除效率,%;C_{inlet,NO_x} 为鼓泡反应器进口烟气中的 NO_x 气体浓度,mol/L;C_{outlet,NO_x} 为鼓泡反应器出口烟气中的 NO_x 气体浓度,mol/L;t_1,t_2 为脱硝实验的开始时间和结束时间,min。

在实验中除了以气相吸收率作为表征,还采用离子色谱仪液相表征方法,通过检测实验后的亚硝酸根和硝酸根浓度,得到其在含 N 离子总量中的占比情况,如式(3)所示。

$$S_{NO_3^-}=[C_{NO_3^-}/(C_{NO_2^-}+C_{NO_3^-})]\times100\% \quad (3)$$

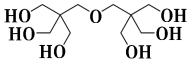
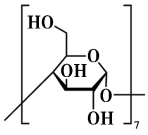
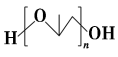
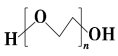
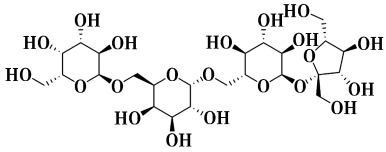
式中:$S_{NO_2^-}$,$S_{NO_3^-}$ 为脱硝实验后吸收剂中 NO_2^- 和 NO_3^- 的离子百分比,%;$C_{NO_2^-}$,$C_{NO_3^-}$ 为脱硝实验后吸收剂中的 NO_2^- 和 NO_3^- 离子的浓度,mg/L。

2　结果与讨论

2.1　不同添加剂对 KI 脱硝性能的效果对比

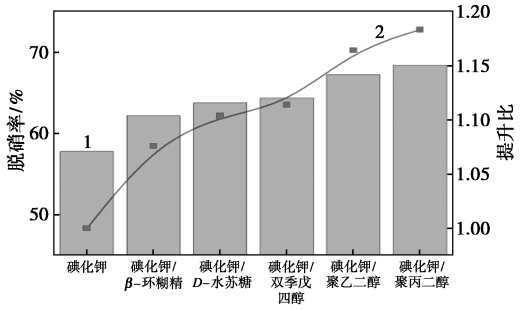
实验研究了不同大分子添加剂双季戊四醇(Di-PE,M_w 254.28)、*D*-水苏糖(D-S,M_w 666.58)、*β*-环糊精(*β*-CD,M_w 1 134.98)、聚乙二醇(PEG,M_w 2 000)、聚丙二醇(PPG,M_w 400)对 KI 脱硝剂性能的影响,其化学结构如表 2 所示,实验条件:NO_2 浓度为 2.04×10^{-5} mol/L,吸收剂 KI 浓度为 0.02 mol/L,5 种添加剂浓度均为 0.005 mol/L,两两配成 250 mL 溶液,烟气流量控制在 0.6 L/min,温度维持在 50℃进行反应。

表 2　添加到吸收剂中的几种氧化抑制剂的化学结构

结构	名称
	双季戊四醇
	*β*-环糊精
	聚丙二醇
	聚乙二醇
	*D*-水苏糖

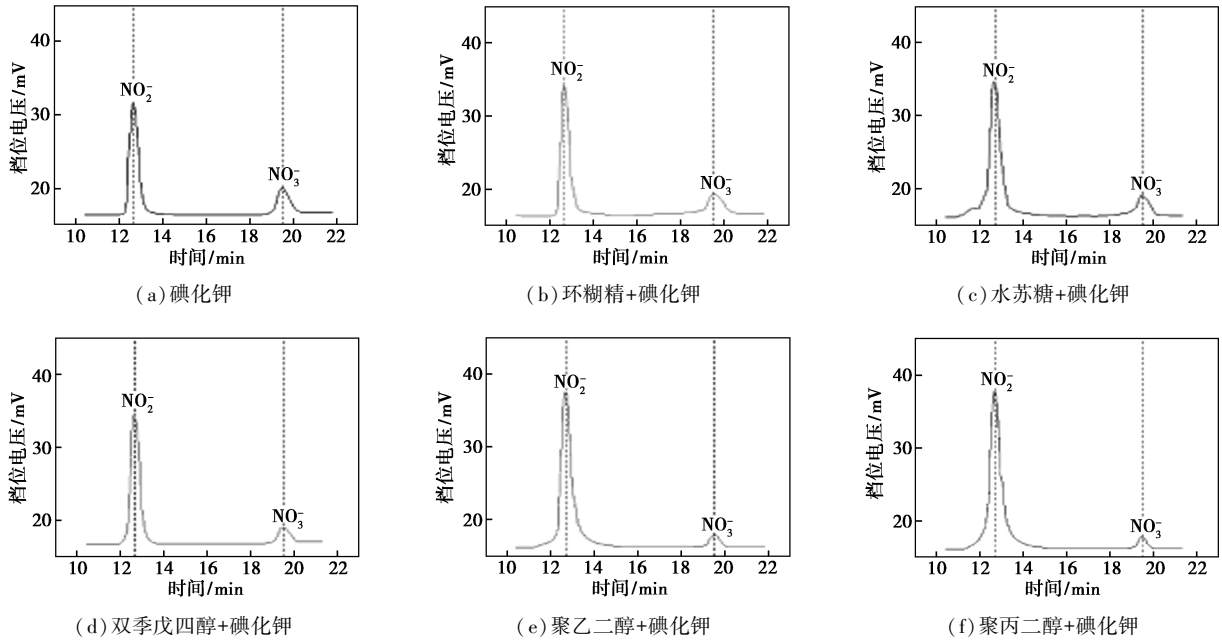
如图 2 所示加入不同添加剂的脱硝率差距不大,以 KI 溶液作为对照实验,使用聚丙二醇作为添加剂脱硝率最高,提升最明显。不同添加剂脱硝性能从大到小排列为:聚丙二醇(PPG)>聚乙二醇(PEG)>双季戊四醇(Di-PE)>水苏糖(D-S)>环糊精(*β*-CD)>无添加剂。图 3 中离子的峰面积代表了溶液中对应离子浓度的大小,同一种离子出峰时间是一定的,峰面积越大表明离子浓度越高。根据式(4)可知 KI 与 NO_2 生成的直接产物是亚硝酸根离子,从液相离子浓度情况图 4 也可看出反应生成含氮离子主要以亚硝酸根的形式存在,其中少量的硝酸根为亚硝酸根的氧化产物。使用聚丙二醇作为添加剂时液相离子浓度最高,表明 KI/PPG 体系吸收效果最好,与气相结果相符,后续选择聚丙二醇(PPG)作为最优添加剂进行后续研究。

$$2NO_2(aq) + 2KI(aq) \longrightarrow 2KNO_2(aq) + I_2 \quad (4)$$



1—脱硝率;2—提升比

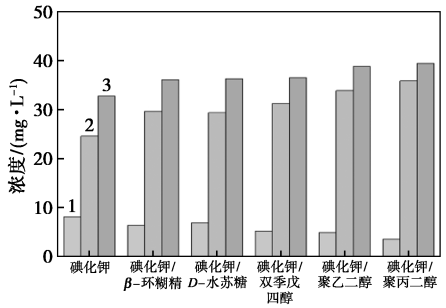
图 2　不同添加剂组合下的脱硝率及提升比



(a)碘化钾　(b)环糊精+碘化钾　(c)水苏糖+碘化钾

(d)双季戊四醇+碘化钾　(e)聚乙二醇+碘化钾　(f)聚丙二醇+碘化钾

图 3　不同添加剂组合下的液相离子色谱图



1—硝酸根浓度;2—亚硝酸根浓度;3—含 N 离子总和浓度

图 4 不同添加剂组合下的离子浓度

2.2 单因素变量实验结果

2.2.1 温度对脱硝效率的影响

由上节经过气相和液相综合分析,筛选出当前实验条件下的最优添加剂为聚丙二醇(PPG),但 KI 与 PPG 组合成的复合脱硝体系受温度、pH、吸收剂浓度、添加剂浓度影响有什么变化尚不清楚,因此设置了单因素变量实验,目的是得到各因素的影响规律。

如表 3 可知,在控制烟气流量 0.6 L/min,NO_2 浓度 2.04×10^{-5} mol/L,脱硝剂总容量 250 mL,其中 KI 浓度 0.02 mol/L,PPG 浓度 0.005 mol/L,溶液初始 pH 为 7 的实验条件下,随着温度升高,脱硝率呈现先上升后下降的趋势,当温度为 50℃时最大脱硝率为 67.78%,温度升高至 70℃时脱硝率下降至 63.66%,这表明一味升高温度并不利于烟气脱硝,根据亨利定律可知,高温下气体在溶液中的溶解度下降,因此较高的温度不利于气体的吸收。前期的上升趋势是因为温度升高导致反应速率常数 k 增大,具体可见阿伦尼乌斯公式(5)。这 2 种情况同时存在共同影响着脱硝率,在此实验条件下,选取 50℃作为最优温度。

$$k = A(T/298\ \mathrm{K})^{\beta}\exp(-E_a/RT) \tag{5}$$

式中:k 为反应的速率常数;A 为指数前因子,$cm^3/(mol\cdot s)$;β 为无量纲温度指数;E_a 为活化能,kJ/mol;R 为理想气体常数,取 8.314 J/(mol·K);T 为反应温度,K。

表 3 不同温度下的脱硝率

温度/℃	30	40	50	60	70
脱硝率/%	62.45	65.30	67.78	64.48	63.66

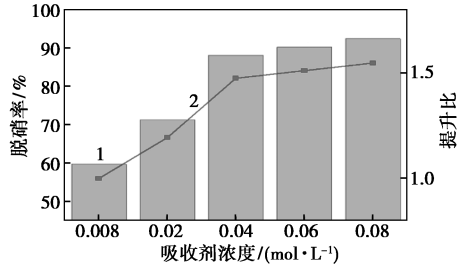
2.2.2 吸收剂-KI 浓度对脱硝效率的影响

将 KI 分别配置了 0.008、0.02、0.04、0.06、0.08 mol/L 的浓度,探究 KI 浓度对脱硝率的影响,实验条件为:烟气流量 0.6 L/min,NO_2 浓度 2.04×10^{-5} mol/L,脱硝剂总容量 250 mL,实验温度为 50℃,PPG 浓度 0.005 mol/L,溶液初始 pH 为 7。

实验结果如图 5 可知,随着吸收剂浓度的增大,脱硝率始终呈现上升趋势,KI 浓度较低时,脱硝率受浓度影响明显,由公式(4)可知,随着 KI 浓度的增大,有利于反应正向进行,整体反应速率增大。但当 KI 浓度从 0.04 增加到 0.08 时脱硝率提升比差不多,脱硝率增幅越来越小,这是因为气相 NO_2 的扩散速度低于液相中 NO_2 的消耗速度,I^- 与 NO_2 的反应速率可由公式(6)表示,此时 NO_2 从气相扩散到液相的速度是主要限制因素。综合考虑脱硝率以及成本来看,在此实验条件下选择 0.04 mol/L 的 KI 作为最优浓度。

$$r_{NO_2} = kC_{NO_2(aq)}C_{I^-(aq)} \tag{6}$$

其中,r_{NO_2} 为 KI 溶液吸收 NO_2 的化学反应速率,mol/(L·s);k 为该反应的速率常数,与温度有关;$C_{NO_2(aq)}$ 和 $C_{I^-(aq)}$ 分别为溶液中 NO_2 和 I^- 离子的浓度,mol/L。



1—脱硝率;2—提升比

图 5 吸收剂浓度对脱硝率的影响

2.2.3 pH 对脱硝效率的影响

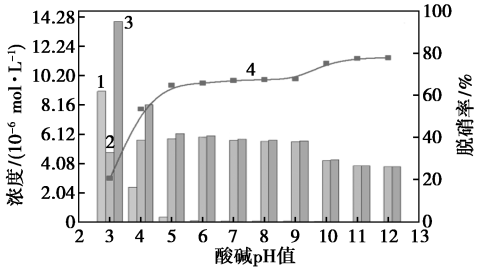
脱硝剂的 pH 在湿法脱硝过程中起着重要的作用,关系到脱硝率以及设备腐蚀问题。实验探究了初始 pH 对脱硝率的影响,采用稀盐酸溶液和氢氧化钠溶液调节溶液 pH,实验条件为:烟气流量 0.6 L/min,NO_2 浓度 2.04×10^{-5} mol/L,脱硝剂总容量 250 mL,实验温度为 50℃,PPG 浓度 0.005 mol/L,KI 浓度为 0.02 mol/L。

由图 6 可知,随着溶液 pH 的增大,出口氮氧化物呈现下降趋势,出口 NO_x 中 NO 的占比逐渐减少,这说明溶液酸性越强式(7)和式(8)反应越剧烈,亚硝酸根发生了歧化反应生成了 NO,对脱硝产生了不利影响。脱硝率上升速率先快后慢,相比于酸性和中性条件,碱性条件下更有利于 NO_2 的吸收。pH=10 时脱硝率可以达到 75.37%,继续提高 pH 脱硝率增长效果不明显,综合考虑脱硝率和成本,此实

验中选择初始 pH 为 10 作为最优条件。

$$3HNO_2(aq) \longrightarrow NO(g) + HNO_3(aq) + 2H_2O(l) \quad (7)$$

$$2HNO_2(aq) \longrightarrow NO(g) + NO_2(g) + H_2O(l) \quad (8)$$

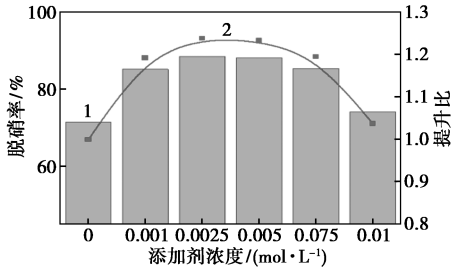


1—硝酸根浓度;2—亚硝酸根浓度;3—含 N 离子总和浓度;4—脱硝率

图 6　溶液初始 pH 对脱硝率的影响

2.2.4　添加剂-PPG 浓度对脱硝效率的影响

为了考察 KI 与 PPG 的最佳配比条件,分别向 0.04 mol/L 的 KI 溶液中添加 0.001、0.002 5、0.005、0.007 5、0.01 mol/L 的 PPG 进行实验。由图 7 可知,相较于只有 KI 的溶液加入,不同的 PPG 浓度脱硝率都有一定程度提高,增长趋势呈现先升后降的趋势,在添加剂浓度增大到 0.002 5 时呈现出最高的脱硝率与提升比,最高脱硝率可达到 88.51%。添加剂的加入有利于 NO_2 在水中的溶解度,增大了溶液中的 NO_2 反应浓度,有利于 KI 脱硝反应(4)的进行。随着 PPG 浓度继续增加,提升比呈现下降趋势,表明过高的 PPG 浓度反而抑制了脱硝效果,其原因可能为:添加剂属于大分子有机物,随着添加剂浓度的增加,溶液粘度增大,相应的气液传质阻力增大,因此过高的 PPG 浓度不利于脱硝率的提升。实验结果表明,0.002 5 mol/L 和 0.005 mol/L 的 PPG 脱硝率所差不大,选用 0.002 5 mol/L 作为最优浓度。



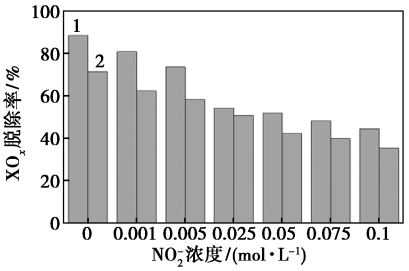
1—脱硝率;2—提升比

图 7　不同添加剂浓度下的脱硝率及提升比

2.2.5　NO_2^- 离子对脱硝效率的影响

根据反应方程式(4)可知 KI 与 NO_2 生成的直接产物是 NO_2^-,随着反应的进行 NO_2^- 会逐渐累积,为了探究离子富集是否会对脱硝产生影响,设立了对比实验,采用 $NaNO_2$ 与 KI、$NaNO_2$ 与 KI/PPG 组成含有不同初始离子浓度的脱硝剂,探究有无添加剂的情况下不同 NO_2^- 浓度对脱硝率的影响。NO_2^- 浓度分别为 0、0.001、0.005、0.025、0.05、0.075、0.1 mol/L,实验条件为烟气流量 0.6 L/min,NO_2 浓度 2.04×10^{-5} mol/L,脱硝剂总容量 250 mL,实验温度为 50℃,PPG 浓度 0.002 5 mol/L,KI 浓度为 0.04 mol/L,pH 为 10。

由图 8 可知,随着 NO_2^- 浓度的增大,脱硝率呈现持续下降的趋势,在相同 NO_2^- 浓度条件下,添加 0.002 5 mol/L 添加剂以后的脱硝率普遍高于未加添加剂的脱硝率。由反应式(4)可知,NO_2^- 是反应生成物,其浓度增大会导致反应向左移动,从而抑制脱硝反应的进行,导致脱硝率下降。在实际的工业应用中吸收液长时间吸收会导致 NO_2^- 累积量持续增多,而离子富集会对脱硝产生不利影响,因此,建议采用合适的方法及时去除富集离子,以维持吸收液的脱硝性能稳定。



1—碘化钾+聚丙二醇;2—碘化钾

图 8　NO_2^- 浓度对脱硝率的影响

3　结论

本文针对传统亚硫酸盐易被氧化失活这一问题,选用抗氧化性能更好的 KI 作为吸收剂,提出了一种吸收剂/添加剂的复合脱硝体系。通过对比 5 种大分子有机物添加剂(双季戊四醇、*D*-水苏糖、*β*-环糊精、聚乙二醇、聚丙二醇)的脱硝效果,结合气相和液相检测数据的分析,发现 PPG 对 KI 吸收 NO_2 的促进作用最强。针对 KI/PPG 组成的复合脱硝体系,系统评价了溶液温度、初始 pH、KI 浓度、PPG 浓度、NO_2^- 含量对脱硝率的影响。实验结果表明,温度对脱硝效率的影响是非线性的,在实验考察的区间内,最佳温度为 50℃,温度过低或过高均会对脱硝过程产生不利影响;碱性环境下更有利于氮氧化物的高效脱除,在酸性条件下,高浓度的 H^+ 与 NO_2^- 结合生成 HNO_2,HNO_2 不稳定,易分解重新

(下转第 188 页)

氧基团和缺陷位点对 Pd 活性中心的锚定稳定作用。经 4 次循环使用后,该催化剂仍保持较高的转化率和选择性,展现出良好的重复使用潜力。

参考文献

[1] Mahmoud L A M, Rowlandson J L, Fermin D J, *et al*. Porous carbons: A class of nanomaterials for efficient adsorption-based hydrogen storage[J]. RSC Applied Interfaces, 2025, 2: 25-55.

[2] 朱世东,赵乾臻,王星海,等.石墨烯/高分子功能复合材料制备与应用研究进展[J].复合材料学报,2022,39(2):489-501.

[3] Yamamoto M, Goto S, Tang R, *et al*. Toward three-dimensionally ordered nanoporous graphene materials: Template synthesis, structure, and applications[J]. Chemical Science, 2024, 16(4): 1953-1975.

[4] Qiu B C, Xing M Y, Zhang J L. Recent advances in three-dimensional graphene based materials for catalysis applications[J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47(6): 2165-2216.

[5] Chen Z, Ren W C, Gao L, *et al*. Three-dimensional flexible and conductive interconnected graphene networks grown by chemical vapour deposition[J]. Nature Materials, 2011, 10: 424-428.

[6] Huang X, Qian K, Yang J, *et al*. Functional nanoporous graphene foams with controlled pore sizes[J]. Advanced Materials, 2012, 24: 4419-4423.

[7] Fan D, Liu Y, He J, *et al*. Porous graphene-based materials by thermolytic cracking[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22: 1396-1402.

[8] Wu Z S, Yang S B, Sun Y, *et al*. 3D nitrogen-doped graphene aerogelsupported Fe_3O_4 nanoparticles as efficient electrocatalysts for the oxygen reduction reaction[J]. Journal of the American Chemical Society, 2012, 134: 9082-9085.

[9] Li Y, Chen J, Huang L, *et al*. Highly compressible macroporous graphene monoliths via an improved hydrothermal process[J]. Advanced Materials, 2014, 26: 4789-4793.

[10] Liu P, Chen Y L, Zhang Z X, *et al*. One-step synthesis of 3D reduced graphene oxide supported Pd catalyst with high activity and recovery in the hydrogenation of nitrobenzene[J]. Reaction Kinetics Mechanisms and Catalysis, 2018, 125(2): 595-603.

[11] 刘平,陈炎亮,张志翔,等.一种软模板法制备三维石墨烯负载纳米 Pd 催化剂及其在硝基苯加氢中的应用:CN 108295843B[P].2020-05-26.

[12] Zhang W Z, Qiao X L, Chen J G. Synthesis and characterization of silver nanoparticles in AOT microemulsion system[J]. Chemical Physics, 2006, 330: 495-500.

[13] 金彦任,黄振兴.吸附与孔径分布[M].北京:化学工业出版社,2015:91-96.

[14] Choi S, Kim S, Woo S, *et al*. Comparative study of reduced graphene oxide aerogels and films for supercapacitor electrodes[J]. Journal of Powder Materials, 2025, 32(1): 23-29.

[15] Shen Y M, Lu S X, Xu W G, *et al*. Fabrication of composite material with Pd nanoparticles and graphene on nickel foam for its excellent electrocatalytic performance[J]. Electrocatalysis, 2020, 11(5): 1-14.

[16] Chen H M, Zhou Z N, Chen W, *et al*. Construction of stable bio-Pd catalysts for environmental pollutant remediation[J]. RSC Advances, 2021, 11(57): 36174-36180.

[17] Surekha G, Krishnaiah K V, Ravi N, *et al*. FT-IR, Raman and XRD analysis of graphene oxide films prepared by modified Hummers method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1495: 12012.

[18] Dreyer D R, Park S, Bielawski C W, *et al*. The chemistry of graphene oxide[J]. Chemical Society Reviews, 2010, 39(1): 228-240.

[19] Ren S Y, Tan L X, Zhou J H, *et al*. Eco-friendly encapsulation of metal clusters in porous organic cages for engineerable microenvironment and enhanced catalysis[J]. CCS Chemistry, 2024, 6(9): 2186-2197.

[20] Sui Z Y, Zhang X T, Lei Y, *et al*. Easy and green synthesis of reduced graphite oxide-based hydrogels[J]. Carbon, 2011, 49(13): 4314-4321.

[21] Zhu W W, Xu N, Lin X G, *et al*. Highly selective dual-atom Pd heterogeneous catalyst prepared by size-selected cluster beam[J]. ACS Catalysis, 2024, 14(17): 12982-12990.■

(上接第 181 页)

释放出 NO 和 NO_2,降低脱硝效率。作为直接反应产物的 NO_2^- 在液相中持续累积会引发反应平衡的逆向移动,对脱硝效率产生不利影响。同时需要注意,添加剂浓度对脱硝效率存在双重影响,浓度低时其促进作用较弱,浓度高时会造成溶液粘度增大影响传质,因此 PPG 浓度需控制在适当范围,既要保证对吸收的促进作用,又要避免因溶液黏度增加导致的传质限制。这些研究发现为工业烟气脱硝工艺的改进提供了新的技术思路,为进一步探究在工业中应用起到指导作用。

参考文献

[1] Chu H, Chien T W, Li S Y. Simultaneous absorption of SO_2 and NO from flue gas with $KMnO_4$/NaOH solutions[J]. Science of the Total Environment, 2001, 275(1/3): 127-135.

[2] Putluru S, Riisager A, Fehrmann R. Vanadia supported on zeolites for SCR of NO by ammonia[J]. Applied Catalysis B Environmental, 2010, 97(3/4): 333-339.

[3] Fu S L, Song Q, Tang J S, *et al*. Effect of CaO on the selective noncatalytic reduction de NO_x process: Experimental and kinetic study[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 249: 252-259.

[4] Sun W, Ding S, Zeng S, *et al*. Simultaneous absorption of NO_x and SO_2 from flue gas with pyrolusite slurry combined with gas-phase oxidation of NO using ozone[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(1): 124-130.

[5] Mok Y S. Absorption-reduction technique assisted by ozone injection and sodium sulfide for NO_x removal from exhaust gas[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 118(1/2): 63-67.

[6] Tang N, Liu Y, Wang H, *et al*. Enhanced absorption process of NO_2 in $CaSO_3$ slurry by the addition of $MgSO_4$[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 160(1): 145-149.

[7] Lian Z, Li G J, Zhang S L, *et al*. Mechanism and kinetic study of cyclodextrin use to facilitate NO_2 absorption in sulfite solutions[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(12): 7696-7706.

[8] Gao B, Zhuang R, Guo J. Preparation of polymer-supported polyethylene glycol and phase-transfer catalytic activity in benzoate synthesis[J]. AIChE J, 2010, 56: 729-736.

[9] Guo R T, Pan W G, Zhang X B, *et al*. Absorption of NO_2 into aqueous $(NH_4)_2SO_3$ solution in a stirred tank reactor[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2013, 32(3): 465-469.■