

铁碳材料还原 NO 络合吸收体系中 Fe(Ⅲ) EDTA 的性能

张颖, 黄妍*, 李元元, 唐南, 张俊丰, 杨柳春

湘潭大学环境与资源学院, 湘潭 411105

摘要 在湿法烟气脱硝中, Fe(Ⅱ) EDTA 是一种常用的螯合剂, 对 NO 有良好的络合吸收能力, 但是 Fe(Ⅱ) EDTA 容易被 O₂ 氧化成对 NO 无络合能力的 Fe(Ⅲ) EDTA。因此, 选择合适的还原剂实现 Fe(Ⅲ) EDTA 的高效还原是络合脱硝的关键技术之一。比较了铁碳(Fe/AC)和铁粉(Fe)在不同搅拌速度下对 Fe(Ⅲ) EDTA 的还原, 系统探讨了铁碳质量比、O₂ 浓度、铁碳中 Fe 与 Fe(Ⅲ) EDTA 的摩尔比、pH 值和 Fe(Ⅲ) EDTA 初始浓度对铁碳还原 Fe(Ⅲ) EDTA 的影响, 考察了 Fe/AC 投加前后 NO 吸收效率的变化, 同时通过 BET、XRD 表征技术对铁碳材料进行了分析。结果表明: Fe/AC 能很好地再生 Fe(Ⅱ) EDTA, 从而提高 NO 吸收效率。提高搅拌速度、铁碳中 Fe 与 Fe(Ⅲ) EDTA 的摩尔比、Fe(Ⅲ) EDTA 初始浓度, Fe(Ⅲ) EDTA 的还原速率会相应增大; O₂ 浓度及 pH 增大会降低 Fe(Ⅲ) EDTA 的还原速率。表征结果表明, 铁碳表面形成的氢氧化物为 γ -FeOOH。

关键词 铁碳; 微电解; Fe(Ⅲ) EDTA 还原; NO 去除

中图分类号 X511 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)11-5943-06 DOI 10.12030/j.cjee.201701099

Performance of Fe(Ⅲ) EDTA reduction with Fe/AC in NO complex absorption system

ZHANG Ying, HUANG Yan*, LI Yuanyuan, TANG Nan, ZHANG Junfeng, YANG Liuchun

College of Environment and Resources, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China

Abstract In wet flue gas denitration, Fe(Ⅱ) EDTA is a common chelating agent with good complexing ability to NO, but it is easily oxidized to Fe(Ⅲ) EDTA which have no binding capacity to NO. Thus it's a key technology to select proper reducing agents to regenerate Fe(Ⅱ) EDTA. Batch experiments were conducted to compare the Fe(Ⅲ) EDTA reduction in Fe/AC and Fe system at different stirring speed. The effects of different parameters on Fe(Ⅲ) EDTA reduction were investigated such as the mass ratio of Fe to AC, O₂ concentration, the molar ratio of Fe to Fe(Ⅲ) EDTA, the pH value and the initial concentration of Fe(Ⅲ) EDTA. And the NO removal efficiency was also investigated without and with Fe/AC. Furthermore, Fe/AC material was analyzed by BET, XRD. The experimental results showed NO removal efficiency was improved with regeneration of Fe(Ⅱ) EDTA by Fe/AC. The reduction rate of Fe(Ⅲ) EDTA increases with the enhancement of stirring speed, the molar ratio of Fe in Fe/AC to Fe(Ⅲ) EDTA and the initial concentration of Fe(Ⅲ) EDTA. However, the reduction rate of Fe(Ⅲ) EDTA obviously decreased when the concentration of O₂ and the pH value increased. The characterization results demonstrated the surface of Fe/AC was covered with γ -FeOOH.

Key words Fe/AC; microelectrolysis; Fe(Ⅲ) EDTA reduction; NO removal

氮氧化物(NO_x)是大气主要污染物之一, 是灰霾、酸雨等大气污染的重要前体物, 有效控制 NO_x 排放对大气环境改善至关重要^[1-2]。燃煤工业锅炉是除电站锅炉外氮氧化物的另一主要来源, 在我国量大面广。与电站锅炉相比, 燃煤工业锅炉烟气排烟温度较低, 运行负荷变化较大, 自控水平低, 且大都没有为锅

基金项目: 湖南省教育厅高校创新平台开放基金项目(14K094)

收稿日期: 2017-01-14; 录用日期: 2017-04-17

第一作者: 张颖(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 大气污染治理新技术与应用。E-mail: 1527154426@qq.com

* 通信作者, E-mail: xtuhy@163.com

炉改造预留空间,场地紧张,火电厂 $\text{NH}_3\text{-SCR}$ 烟气脱硝技术和设备无法直接应用^[3]。目前,工业锅炉 95% 以上均采用钙基湿法脱硫工艺^[4],如能利用这一湿法系统同时脱除烟气中的氮氧化物,无疑是最经济的选择。因此,研究和开发高效、无二次污染的 NO_x 控制湿法新技术具有实际意义。

20 世纪 70 年代以来,国内外的学者广泛地开展了关于向烟气系统中的洗涤液添加亚铁螯合剂进行脱氮的研究^[5-8]。亚铁螯合剂如 Fe(II)EDTA 能快速吸收 NO ,形成络合物 Fe(II)EDTA-NO 。但是亚铁螯合剂中的 Fe^{II} 容易被烟气中的氧气氧化为 Fe^{III} ,从而失去对 NO 的络合能力。因此,要保证吸收过程的连续高效进行,需选用合适的还原剂实现络合吸收液中 Fe(II)EDTA-NO 和 Fe(III)EDTA 的高效还原。目前,用于还原络合吸收液的还原剂主要有:亚硫酸盐(sulfite)^[9],硫化物(sulfide)^[10],连二硫酸盐(dithionate)^[11]和铁、锌、铝等金属单质^[12-14]等。其中单质铁因价廉易得,还原性能较好而受到关注。马乐凡等^[13]提出了用铁粉还原 NO 的同时再生 Fe(III)EDTA ;何飞强等^[14]开展了在有氧条件用铁粉还原 Fe(III)EDTA 络合物的机制和动力学研究。但在上述过程中,络合态氮氧化物经铁还原全部被转化为氨,而不是无害的 N_2 ,如能对还原产物进行控制,使络合态 NO 还原为 N_2 ,将大大简化工艺流程,促进该工艺的实际应用。

本课题组前期尝试采用铁碳材料(Fe/AC)作还原剂,对络合吸收液中 Fe(II)EDTA-NO 进行还原再生,获得良好效果,其还原速率和还原产物 N_2 选择性较单质铁大大提高,具有良好的研究前景。在此基础上,本文采用 Fe/AC 还原络合液中 Fe(III)EDTA ,探讨不同因素对 Fe/AC 还原 Fe(III)EDTA 的影响,考察 NO 络合吸收- Fe/AC 再生性能,为 Fe/AC 应用于 NO 络合吸收液再生提供参考。

1 实验部分

1.1 材料与试剂

铁粉从上海金山冶炼厂购买,活性炭从天津科欧化学试剂有限公司处购买。 $\text{NH}_4\text{Fe(SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和 Na_2EDTA 均为分析纯,购置于天津光复科技发展有限公司。 N_2 (99.99%) 和 O_2 (99.99%) 购置于湘潭众泰宏远有限公司。实验用水为超纯水。

1.2 实验仪器

RW20 数显机械搅拌器(德国 IKA 公司);便携式 pH 310 计(Eutech/Oakton 仪器公司);UV757 紫外可见分光光度计(上海仪电科学仪器股份有限公司);OTF-1200X 型高温管式炉(合肥科晶材料有限公司);ZK-82A 型电热真空高温干燥箱(上海实验仪器设备有限公司);D/MAX-RAX 型 X-射线衍射仪(RIGAKU 公司);NOVA2000 型比表面积分析仪(美国 Quanta chrome 公司)。

1.3 铁碳材料的制备

将经过预处理的铁粉和活性炭分别过标准筛 200 目,然后称取适量的铁粉和活性炭放入球磨机中工作一段时间使其充分混合均匀,最后将混匀的铁碳材料放入管式炉中在通 N_2 气氛,温度为 1 000 $^\circ\text{C}$ 的条件下焙烧 4 h。

1.4 Fe(III)EDTA 的还原实验

Fe(III)EDTA 还原实验装置,如图 1 所示。 Fe(III)EDTA 溶液通过将适量的 Na_2EDTA 和 $\text{NH}_4\text{Fe(SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 溶液混合均匀配制而成,再取 150 ml Fe(III)EDTA 溶液置于 250 ml 四口瓶中,通过转子流量计控制 N_2 和 O_2 浓度,进气流量为 $0.6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,在固定转速下加入还原剂启动反应,反应时间为 60 min。溶液中 pH 值通过加入 H_2SO_4 和 NaOH 进行调节。在指定时间用移液枪取样 1~2 mL,然后通过 $0.22 \mu\text{m}$ 水系微滤头过滤,将得到的溶液稀释到合适倍数后测定 Fe(II) 的浓度。

溶液中 Fe(II) 浓度采用邻菲罗啉分光光度法在 510 nm 波长下测定^[15]。 Fe(II) 标准曲线线性回归方程为:

$$y = 0.086x - 0.0003, R^2 = 0.9998 \quad (1)$$

式中: y 为吸光度; x 为 Fe(II) 浓度, $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; R 为相关系数。

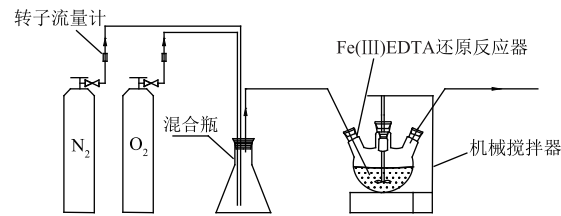


图 1 铁碳还原 Fe(Ⅲ)EDTA 实验装置与流程

Fig. 1 Experimental apparatus and flow diagram of Fe(Ⅲ)EDTA reduction by Fe/AC

2 结果与讨论

2.1 铁粉、铁碳分别还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的比较

在通 N₂,Fe(Ⅲ)EDTA 初始浓度为 20 mmol·L⁻¹,pH 为 7,Fe 与 Fe(Ⅲ)EDTA 物质的量之比为 5 的条件下,分别采用铁粉、铁碳(铁碳质量比为 2)还原 Fe(Ⅲ)EDTA,实验结果如图 2 所示。当搅拌速度为 400 r·min⁻¹时,铁碳和铁粉还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的最大反应速率分别为 0.836,0.367 mmol·(L·min)⁻¹,还原效率分别为 77.2% 和 47.0%;当搅拌速度为 800 r·min⁻¹时,铁碳和铁粉还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的最大反应速率分别为 1.29 和 1.12 mmol·(L·min)⁻¹,还原效率分别为 82.7% 和 81.7%。可见无论搅拌速度为 400 r·min⁻¹还是 800 r·min⁻¹,铁碳还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的速率和还原效率都要高于单独用铁粉还原 Fe(Ⅲ)EDTA。而且在低搅拌速度下,铁碳材料还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的优势更加明显,这在一定程度上能降低工业运行成本,具有一定的工业应用前景。

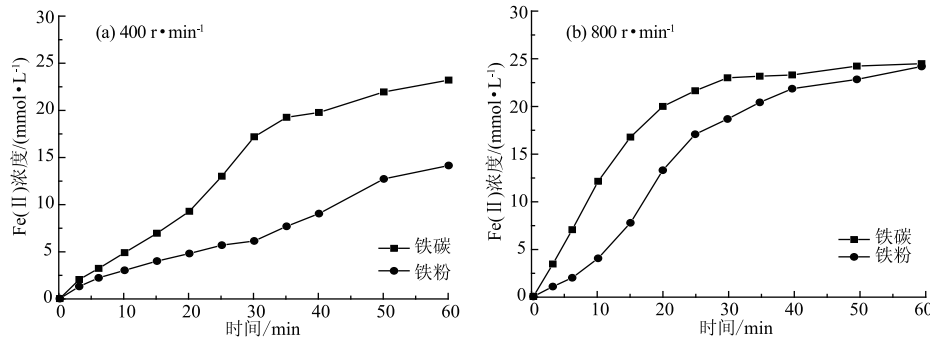


图 2 在不同搅拌速度下铁粉,铁碳分别还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的比较

Fig. 2 Comparison of reduction of Fe(Ⅲ)EDTA by Fe powder and Fe/AC respectively under different stirring speed

表 1 为铁粉、活性炭和铁碳的 BET 分析结果,说明将铁粉负载到活性炭后,铁碳比铁粉有更大的比表面积和孔容积,这可能会有利于 Fe(Ⅲ)EDTA 的还原。同时铁碳中引入的碳颗粒和铁颗粒接触可以组成原电池,溶液中形成的大量微电池能有效地促进 Fe(Ⅲ)EDTA 的还原^[16],从而使得铁碳对 Fe(Ⅲ)EDTA 的还原效果比铁粉更好。

2.1.1 铁碳质量比对还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的影响

在通 N₂, Fe(Ⅲ)EDTA 初始浓度为 20 mmol·L⁻¹,pH 为 7,转速为 800 r·min⁻¹,铁碳中 Fe 与 Fe(Ⅲ)EDTA 的摩尔比为 5,铁碳质量比对铁碳还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的影响如图 3 所示,当铁碳质量比从 0.5 增加到 2 时,Fe(Ⅱ)浓度从 14.87 mmol·L⁻¹

表 1 铁粉、活性炭和铁碳的 BET 分析

Table 1 BET analysis results of Fe powder, Active Carbon and Fe/AC

项目	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔容积/(cm ³ ·g ⁻¹)
铁粉(Fe)	2.49	0.000 94
活性炭(AC)	889.02	0.50
铁碳(Fe/AC)	486.73	0.29

增加到 $24.82 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; 而铁碳质量比继续增加时, $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度缓慢上升。这是因为铁碳质量比较小时, 碳源所占比例大, 系统中形成的原电池较少, 但随着铁碳比例的增加, 铁粉所占比例逐渐上升, 形成的原电池也逐渐增加, 使得 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 越容易被还原。基于对上述因素的研究, 后续实验选择转速为 $800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和铁碳质量比为 2。

2.1.2 O_2 浓度对还原 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的影响

在 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 初始浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7, Fe 与 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的物质的量之比为 5 的条件下, O_2 浓度对铁碳还原 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的影响如图 4 所示。当 O_2 浓度分别为 0、5%、10% 和 15% 时, 反应 60 min 后 $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度分别为 24.82、15.63、13.07 和 $8.55 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这表明了 O_2 对 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的还原有抑制作用。在铁碳微电解还原 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的过程中, 铁碳的还原作用使得 $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度的增加, 但是氧气的存在会将 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化成 $\text{Fe}(\text{III})$ 造成 $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度的减少。

无 O_2 (通 N_2) 时, $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度一直增加, 而且其再生速率随时间的变化先增大后趋于平缓; 有 O_2 时, 再生速率随时间的变化是先增大后下降, 且 O_2 浓度越大, 再生速率的下降幅度越大。铁碳中 Fe 作为原电池阳极不断被消耗, 所以随着时间的推移, 铁碳的还原能力也逐渐下降。

铁碳材料在有氧条件下表面会产生腐蚀产物, 如铁的氧化物或氢氧化物^[17]。图 5 表明反应前 Fe/AC 中 Fe 主要以铁单质的形式存在, 反应后 Fe 单质的衍射峰强度变小, 且还出现了其他衍射峰, 通过与标准卡片 (PDF: 76-2301) 相比对, 判断这些衍射峰所对应的物质为 $\gamma\text{-FeOOH}$ 。

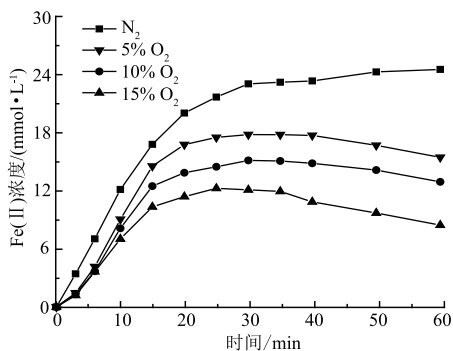


图 4 不同 O_2 浓度对还原 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的影响

Fig. 4 Effect of O_2 concentration on $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ reduction

2.1.3 铁碳中 Fe 与 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的摩尔比对还原 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的影响

在 O_2 浓度为 5%, $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 初始浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7 的条件下, Fe 与 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 物质的量之比对还原 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的影响如图 6 所示。当 Fe 与 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的物质的量之比分别为 1、3、5 和 10, 对应的 $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度最大值为 10.29、13.56、18.01 和 $24.31 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在 $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度增加阶段, $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 还原速率随着铁碳浓度的增加而增大。这是因为随着 Fe 与 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 物质的量之比的增大, 形成的原电池数量增多, 可以提供更多的反应活性位, 促进 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 还原。一般工业锅炉烟气氧含量为 5% ~ 10%, 这不利于 $\text{Fe}(\text{III})$

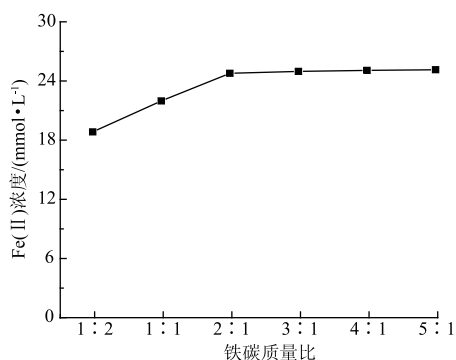


图 3 铁碳质量比对还原 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的影响

Fig. 3 Effect of mass ratio of Fe to AC on $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ reduction

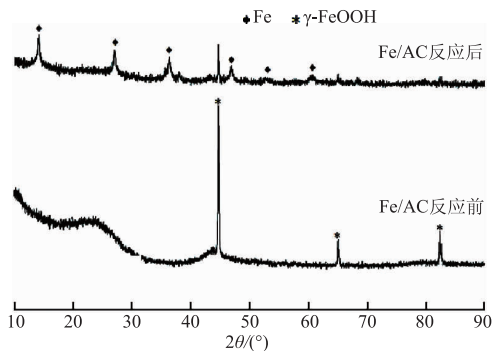


图 5 铁碳材料的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of Fe/AC material

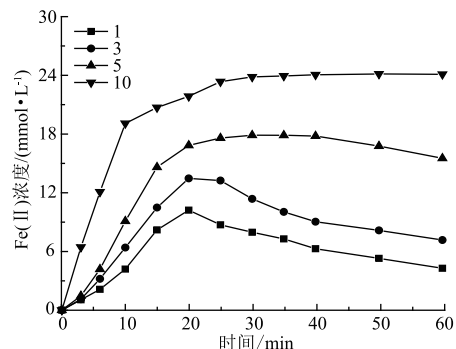


图 6 铁碳中 Fe 与 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ 的物质的量之比对还原 $\text{Fe}(\text{III})\text{EDT}$ 的影响

Fig. 6 Effect of molar ratio of Fe to $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ on $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ reduction

EDTA 的还原,由此在工业上可以适当增大 Fe 与 Fe(Ⅲ)EDTA 的物质的量之比来保持 Fe(Ⅱ)EDTA 的高效再生。

2.1.4 溶液初始 pH 值对铁碳还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的影响

在 O₂ 浓度为 5%,Fe(Ⅲ)EDTA 初始浓度为 20 mmol·L⁻¹,铁碳中 Fe 与 Fe(Ⅲ)EDTA 的物质的量之比为 5 的条件下,溶液初始 pH 值对铁碳还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的影响如图 7 所示。当 pH 为 3 时,Fe(Ⅱ)浓度在 30 min 内快速增加 28.59 mmol·L⁻¹,而当 pH 为 8 时,Fe(Ⅱ)浓度随着反应时间的增加基本没有太大变化。可见 pH 对 Fe(Ⅲ)EDTA 的还原有较大影响,pH 越高越不利于铁碳还原 Fe(Ⅲ)EDTA。在酸性条件下,H⁺ 在阴极可以得到铁粉作为阳极提供的电子,从而生成新生态的 [H]^[18],提高了 Fe(Ⅲ)EDTA 的还原效率;在高 pH 条件下,阳极铁的溶出速率会降低,生成的氢氧化亚铁或氢氧化铁会覆盖到铁粉和活性炭表面,阻碍微电解反应的进行,影响铁碳对 Fe(Ⅲ)EDTA 的还原。

2.1.5 Fe(Ⅲ)EDTA 的初始浓度对还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的影响

在 O₂ 浓度为 5%,pH 为 7,铁碳中 Fe 与 Fe(Ⅲ)EDTA 的物质的量之比为 5 的条件下,Fe(Ⅲ)EDTA 的初始浓度对还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的影响结果如图 8 所示。随着 Fe(Ⅲ)EDTA 的初始浓度的增加,生成的 Fe(Ⅱ)浓度也不断增加。当 Fe(Ⅲ)EDTA 的初始浓度分别为 10、20、30 和 40 mmol·L⁻¹ 时,对应的 Fe(Ⅱ)最大浓度为 9.32、18.01、26.46 和 33.27 mmol·L⁻¹。Fe(Ⅲ)EDTA 浓度的增加提高了铁碳与溶液之间的传质能力,从而有利于铁碳还原 Fe(Ⅲ)EDTA,使得 Fe(Ⅱ)浓度也不断上升。但是因为氧气的氧化作用,Fe(Ⅱ)浓度在达到最大浓度值后开始出现下降。

2.2 NO 去除效率的变化

在实验室规模条件下,开展了 Fe(Ⅱ)EDTA 络合吸收-铁碳微电解还原再生脱除 NO 的研究。实验条件为:500 mL 0.02 mol·L⁻¹ Fe(Ⅱ)EDTA 络合液,NO 入口浓度为 500×10⁻⁶,氧气浓度为 5%,pH 值为 6,进气流量为 0.6 L·min⁻¹,Fe 与 Fe(Ⅱ)EDTA 的物质的量之比为 10,实验结果如图 9 所示。由此可见 NO 去除效率随时间的变化基本与 Fe(Ⅱ)浓度的变化保持一致。在前 90 min 内,没加 Fe/AC 时 NO 去除效率从 90.68% 下降到 33.71%,随后加入 Fe/AC,NO 去除效率在 90 min 后增加到 86.01%。这说明 NO 去除效率的下降主要是因为氧气将 Fe(Ⅱ)EDTA 氧化成 Fe(Ⅲ)EDTA,当加入 Fe/AC 后由于 Fe(Ⅲ)EDTA 又被还原成 Fe(Ⅱ)EDTA,NO 去除效率开始上升。由此表明,Fe/AC 能很好地再生 Fe(Ⅱ)EDTA,从而提高 NO 吸收效率。

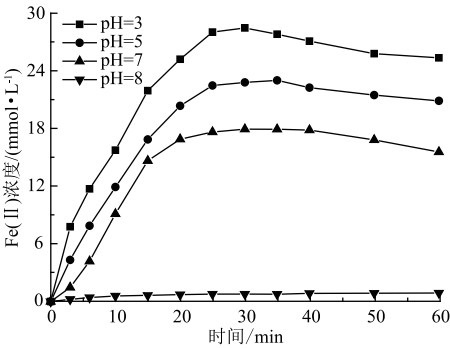


图 7 pH 对还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的影响
Fig. 7 Effect of pH on Fe(Ⅲ)EDTA reduction

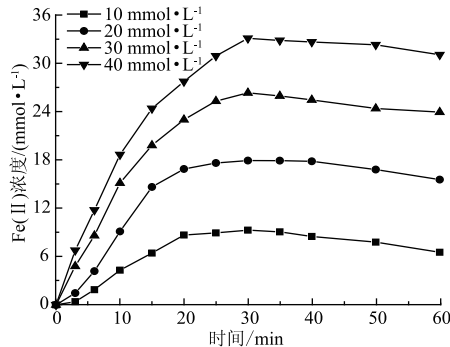


图 8 Fe(Ⅲ)EDTA 的初始浓度对还原 Fe(Ⅲ)EDTA 的影响

Fig. 8 Effect of initial Fe(Ⅲ)EDTA concentration on Fe(Ⅲ)EDTA reduction

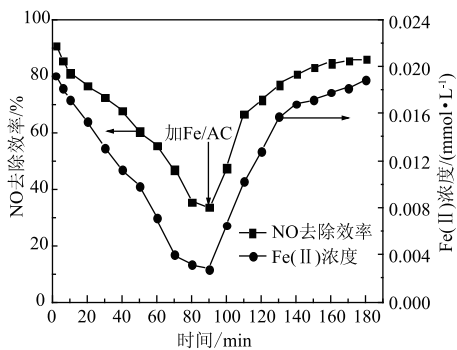


图 9 NO 去除效率和 Fe(Ⅱ)浓度随时间的变化情况

Fig. 9 Variations of NO removal efficiency and Fe(Ⅱ) concentration versus time

3 结论

1) 铁碳微电解反应能有效还原 Fe(III)EDTA , 且该方法要优于单独使用铁粉的效果, 尤其是在低搅拌速度下, 具有一定的工业应用前景。

2) 增大 O_2 浓度和 pH 能明显降低 Fe(III)EDTA 的还原速率, 且在有氧条件下, 铁碳材料表面有氢氧化化合物 $\gamma\text{-FeOOH}$ 的生成; 增大搅拌速度、铁碳中 Fe 与 Fe(III)EDTA 的物质的量之比和 Fe(III)EDTA 的初始浓度会使得 Fe(III)EDTA 的还原速率增加。

3) 铁碳材料对 Fe(III)EDTA 还原效果的促进主要是因为发生了微电解反应, 加速电子传递到碳阴极表面。此外, 在 Fe(II)EDTA 络合吸收 NO 的溶液中加入铁碳可以提高 NO 的吸收效率。

参考文献

- [1] KAMPA M, CASTANAS E. Human health effects of air Pollution[J]. Environmental Pollution, 2008, 151(2): 362-367
- [2] 中国环境保护产业协会脱硫脱硝委员会. 脱硫脱硝行业 2014 年发展综述[J]. 中国环保产业, 2015(12): 4-23
- [3] 王慧丽, 雷宇, 陈潇君, 等. 京津冀燃煤工业和生活锅炉的技术分布与大气污染物排放特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(10): 1510-1517
- [4] 赵南. 臭氧氧化结合湿法同时脱硫脱硝工艺及吸收添加剂研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015
- [5] CHIEN T W, HSUEH H T, CHU B Y, et al. Absorption kinetics of NO from simulated flue gas using Fe(II)EDTA solutions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87(5): 300-306
- [6] LIU Nan, LU Bihong, ZHANG Shihan, et al. Evaluation of nitric oxide removal from simulated flue gas by $\text{Fe(II)EDTA/Fe(II)citrate}$ mixed absorbents[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(8): 4910-4916
- [7] DU Qian, ZHAO Haoyang, MING Leiling, et al. Experimental investigation on the kinetics of NO complex absorption through $\text{Fe}^{\text{II}}\text{EDTA}$ solvent in a double-stirred reactor[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(8): 4425-4431
- [8] 马乐凡, 童志权, 李钦武. 亚铁螯合剂液相脱除烟气中 NO_x [J]. 环境工程学报, 2004, 5(8): 67-71
- [9] YAN Bei, YANG Jiehong, GUO Meng, et al. Experimental study on $\text{Fe}^{\text{II}}\text{Cit}$ enhanced absorption of NO in $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ solution[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21(1): 476-482
- [10] WANG Xiaojun, ZHANG Yu, DONG Xiyang, et al. Fe(II)EDTA-NO reduction by sulfide in the anaerobic aqueous phase: Stoichiometry and kinetics[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(10): 6024-6030
- [11] SUCHECHI T T, MATHEWS B, KUMAZAWA H. Kinetic study of ambient-temperature reduction of $\text{Fe}^{\text{III}}\text{edta}$ by $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(12): 4249-4253
- [12] SUCHECHI T T, MATHEWS B, AUGUSTYNIAK A W, et al. Applied kinetics aspects of Ferric-EDTA complex reduction with metal powder[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(37): 14234-14240
- [13] 马乐凡, 童志权, 张俊丰. 液相络合-铁粉还原-酸吸收回收法脱除烟气中 NO_x 的机理研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 637-642
- [14] HE Feiqiang, DENG Xiaohe, CHEN Min. Kinetics of $\text{Fe}^{\text{III}}\text{EDTA}$ complex reduction with iron powder under aerobic conditions[J]. RSC Advances, 2016, 6(44): 38416-38423
- [15] 刘芸. 一氧化氮络合吸收产物的测定及其微生物还原特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011
- [16] 鞠峰, 胡勇有. 铁屑内电解技术的强化方式及改进措施研究进展[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2585-2594
- [17] LIU Airong, LIU Jing, PAN Bingcai, et al. Formation of lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) from oxidation of nanoscale zero-valent iron(nZVI) in oxygenated water[J]. RSC Advances, 2014, 4(101): 57377-57382
- [18] WANG Jiankang, FARRELL J. Investigating the role of atomic hydrogen on chloroethene reactions with iron using tafel analysis and electrochemical impedance spectroscopy[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(17): 3891-3896

(责任编辑: 靳炜)