

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201801074



# 改性活性炭纤维催化碳酰肼 去除给水中的溶解氧

王洁, 梁美生, 叶翠平

( 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600 )

**摘要:** 将制备的水热改性活性炭纤维负载 Ni(Ni/GSACF)作为催化剂,催化碳酰肼还原去除水中的溶解氧(DO),考察反应时间、反应温度、初始 pH 值、碳酰肼质量浓度和催化剂质量浓度对 DO 去除效果的影响.在优化条件下,45 min 后水中的 DO 质量浓度从  $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降至  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,去除率可达 98.0%.对载体和催化剂进行表征分析,水热处理后 GSACF 表面的含氧官能团明显增加,催化剂表面具有均匀分散的活性 Ni 物种.研究表明:活性炭纤维表面含氧官能团的增加有利于促进活性 Ni 物种在活性炭纤维表面的分散,从而提高 Ni/GSACF 催化剂的催化除氧性能.

**关键词:** 活性炭纤维; 给水处理; 含氧官能团; 催化除氧; 碳酰肼; 溶解氧

**中图分类号:** X 703.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2018)05-0720-06

## Reduction of Dissolved Oxygen in Feed Water by Carbohydrazide With Modified Activated Carbon Fiber Catalysts

WANG Jie, LIANG Meisheng, YE Cuiping

( College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China )

**Abstract:** Water thermal modified activated carbon fiber loaded Ni (Ni/GSACF) were prepared and used as catalysts to remove the dissolved oxygen (DO) in water by catalyzing the reduction reaction of carbohydrazide. The effects of reaction time, temperature, initial pH and the concentration of carbohydrazide and catalyst on Ni/GSACF catalytic performance in DO reduction by carbohydrazide were investigated. In the optimization condition, the DO concentration in water was reduced to  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  from  $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  in 45 min by the Ni/GSACF catalysts, and the removal rate reached 98.0%. The supports and catalysts were characterized, the oxygen-containing functional groups on the surface of GSACF were increased significantly after water thermal treatment, and the surface of the catalysts had a uniformly dispersed active Ni species. The results revealed that the increase of oxygen-containing functional groups in activated carbon fiber promoted the dispersion of the active Ni species and improved the catalytic activity in the reduction of DO by carbohydrazide.

**Keywords:** activated carbon fiber; feed water treatment; oxygen-containing functional group; catalytic deoxygenization; carbohydrazide; dissolved oxygen

工业给水中的溶解氧(DO)是造成设备和管网腐蚀的主要原因,容易影响其正常使用和寿命,严重时会造成安全事故<sup>[1-2]</sup>.因此,为保证设备及附属管道安全经济运行,必须预先除去给水中的 DO.目前,除氧方法可分为物理除氧方法和化学除氧方法.物理除氧方法包括热力除氧、真空除氧和解析除氧等,

**收稿日期:** 2018-01-30  
**通信作者:** 梁美生(1968-),女,教授,博士,主要从事大气、水污染控制工程的研究. E-mail: liangms88888@163.com.  
**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(21776192)

主要通过对温度和压力的改变使水中的氧去除,但耗能大且除氧不彻底<sup>[3]</sup>.化学除氧主要通过加入除氧剂与水中的氧气反应而去除.常用的有亚硫酸钠和联氨,使用亚硫酸钠易腐蚀管道,并使水中含盐量增加,而联氨具有很高的毒性<sup>[4]</sup>.碳酰肼作为绿色无毒的除氧剂,同时具备很好的缓蚀性能,有着广阔的应用前景<sup>[5]</sup>.由于碳酰肼与氧气反应需要较高的反应温度(87.8~176.7℃),利用高效的催化剂降低反应温度有利于节能降耗.但是,迄今为止,有关催化碳酰肼除氧的研究报道较少.活性炭纤维比表面积大,具有丰富的孔结构,是良好的吸附剂和催化剂载体<sup>[6-7]</sup>,而金属 Ni 在氧化还原反应中表现出很好的催化性能<sup>[8-9]</sup>.本文设计制备了水热改性活性炭纤维负载 Ni 催化剂 Ni/GSACF,催化碳酰肼还原去除给水中的 DO.同时,对载体和催化剂进行表征分析,并优化反应条件.

## 1 实验部分

### 1.1 材料与试剂

粘胶基活性炭纤维毡(比表面积 $\geq 1\,400\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ,江苏苏通碳纤维科技有限公司);硝酸镍(天津市登峰化学试剂厂),碳酰肼(上海迈坤化工有限公司),硝酸(天津市广成化学试剂有限公司),氢氧化钠(天津市北方天医化学试剂厂),均为 AR 级.

### 1.2 催化剂的制备

1.2.1 活性炭纤维的预处理 将活性炭纤维剪成  $0.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$  的小方块,于沸水浴中煮沸 30 min,用去离子水冲洗表面,此过程重复 3 次;然后,放入干燥箱中,于  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  下干燥至恒质量,标记为 ACF.

1.2.2 Ni/GSACF 催化剂的制备 将 5 g ACF 置于高压反应釜中,加入 200 mL 去离子水,在  $270\text{ }^{\circ}\text{C}$  下水热改性 3 h,取出干燥至恒质量,记为 GSACF.采用浸渍-煅烧法制备负载型催化剂,将 GSACF 等体积浸渍于质量分数为 10% 的硝酸镍溶液中,超声 30 min 后置于恒温振荡器中振荡 3 h, $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  下干燥至恒质量;然后,于石英管中在  $\text{N}_2$  氛围下于  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  焙烧 3 h,记为 Ni/GSACF.同时,以未改性的 ACF 作为载体,相同方法制备了 Ni/ACF.以 ACF,GSACF,Ni/ACF 作为实验对照.

### 1.3 催化剂的表征

采用 NICOLET iS10 型傅里叶变换红外光谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司),对水热改性前后的 ACF 进行表面基团分析,将待测催化剂样品研磨、干燥后,采用压片法进行扫描测试,扫描范围为  $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ ,最高分辨率为  $0.15\text{ cm}^{-1}$ .在 D8 Advance 型 X 射线衍射仪(美国 Bruker 公司)上进行 X 射线衍射(XRD)测试,辐射源为 Cu-K $\alpha$ ,扫描范围( $2\theta$ )为  $20^{\circ}\sim 90^{\circ}$ .采用 JSM-7100F 型扫描电子显微镜表征载体和催化剂的表面形貌.

### 1.4 DO 去除实验

采用具塞锥形瓶做反应器,恒温水浴控制反应温度.开启恒温水浴,设定反应温度,取 100 mL 原水和一定量的催化剂于 250 mL 锥形瓶中,将其置于水浴锅内.当达到设定温度后,用  $\text{HNO}_3$  和  $\text{NaOH}$  调节原水的初始 pH 值到预定值后,迅速加入一定量的碳酰肼水溶液,在水浴恒温振荡器上进行反应,并开始计时;每隔一定时间用溶解氧测量仪测定水中的 DO 质量浓度,并计算 DO 去除率.所有实验均设置 3 组平行实验,以保证数据的有效性.DO 去除率  $\eta=(\rho_1-\rho_2)/\rho_1$ .其中: $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为反应前、后水中 DO 质量浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 催化剂的表征

2.1.1 表面含氧官能团分析 ACF 和 GSACF 的 FT-IR 谱图,如图 1 所示.由图 1 可知: $3\,450\sim 3\,400\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于  $-\text{OH}$  伸缩振动, $1\,580\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动, $1\,340\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于  $\text{C}-\text{H}$  弯曲振动, $1\,080\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于  $\text{C}-\text{O}$  伸缩振动, $732\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于  $\text{CH}_2$  的面内摇摆.对比 ACF 和 GSACF 的红外谱图可知,水热改性后  $\text{C}=\text{O}$ , $\text{C}-\text{O}$  的峰强大大增强, $\text{C}-\text{H}$  和  $\text{CH}_2$  吸收峰减弱消失.这是由于在水热改性过程中,ACF 与  $\text{H}_2\text{O}$  反应,形成部分羟基、

环氧基、内酯基等含氧官能团,使 ACF 表面含氧官团增加<sup>[10-11]</sup>.

2.1.2 催化剂组成分析 载体和催化剂的 XRD 谱图,如图 2 所示.由图 2 可知:ACF 和 GSACF 的 XRD 谱图均显示有 2 个特征衍射峰.其中, $2\theta=23^\circ$ 的衍射峰较强,对应石墨微晶的(002)晶面; $2\theta=44^\circ$ 的衍射峰较弱,对应石墨微晶的(010)晶面,且这两个衍射峰的峰形较宽,证明 ACF 为石墨微晶乱层结构<sup>[12]</sup>.Ni/ACF 和 Ni/GSACF 在  $2\theta$  为  $44.4^\circ$ 、 $51.8^\circ$  处出现 Ni 的特征衍射峰,在  $2\theta$  为  $37.3^\circ$ 、 $62.8^\circ$  处出现了 NiO 的特征衍射峰.这是由于热处理过程中, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  分解成为 NiO,而 ACF 本身具有一定的还原能力,部分 NiO 在焙烧时被 C 还原为单质 Ni<sup>[13]</sup>.与 Ni/ACF 相比,Ni/GSACF 谱图中的 Ni 和 NiO 衍射峰相对弥散,说明 GSACF 表面 Ni 物种分散度相对较高.

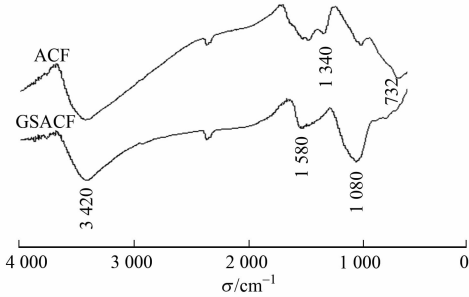


图 1 ACF 和 GSACF 的 FT-IR 谱图  
Fig.1 FT-IR spectra of ACF and GSACF

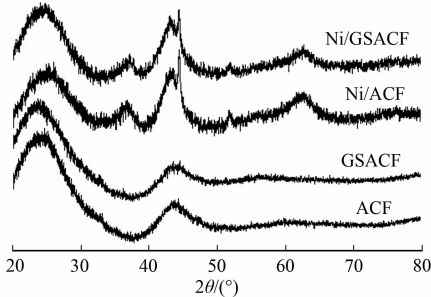
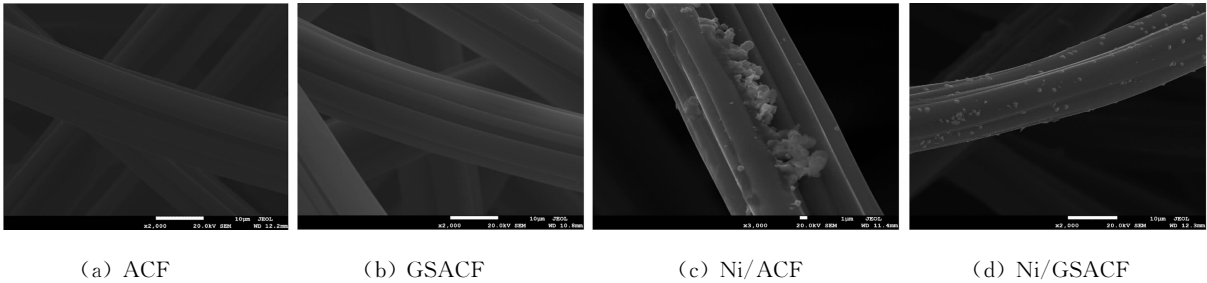


图 2 载体和催化剂的 XRD 谱图  
Fig.2 XRD patterns of supports and catalysts

2.1.3 催化剂表面形貌分析 ACF,GSACF,Ni/ACF 和 Ni/GSACF 的 SEM 图,如图 3 所示.从图 3 整体上看,这些 ACF 由表面光滑的管束状结构组成.

对比图 3(a),(b)可知:经过水热改性,光滑的 GSACF 管束间隙增大.由图 3(c)可以观察到:ACF 表面分散着一些微粒,结合 XRD 可知,这些微粒应该为 Ni 和 NiO,但存在明显的团聚现象.经过水热改性的 GSACF 负载 Ni 的 SEM 图,如图 3(d)所示.由图 3(d)可知:相比图 3(c)而言,Ni 物种在 GSACF 上分散均匀,与 XRD 表征结果一致.这是由于 ACF 表面的含氧官能团在浸渍时有助于  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  落位<sup>[14-16]</sup>.水热改性后的 GSACF 表面的含氧官能团数量增加,有利于促进前驱物  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  在载体表面分散落位,促使焙烧后的催化剂表面形成均匀分散的 Ni 物种,明显改善金属粒子在活性炭纤维上团聚的问题.



(a) ACF (b) GSACF (c) Ni/ACF (d) Ni/GSACF  
图 3 催化剂表面形貌分析

Fig.3 Surface morphology analysis of catalysts

2.2 改性活性炭纤维催化碳酰肼除氧实验

2.2.1 不同催化剂的催化除氧性 当温度为  $45^\circ\text{C}$ 、初始 pH 值为 8.3、碳酰肼质量浓度为  $9.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、催化剂质量浓度为  $0.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,不同催化剂作用下,水中 DO 质量浓度( $\rho$ )随时间( $t$ )的变化曲线,如图 4 所示.由图 4 可知:随着反应的进行,水中的 DO 质量浓度逐渐减少,随后速度减缓并趋于稳定.催化剂对碳酰肼除氧的催化活性大小依次为: $\text{Ni/GSACF}>\text{Ni/ACF}>\text{GSACF}>\text{ACF}$ .

当没有催化剂时,反应 45 min 后,DO 质量浓度降至  $3.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率仅为 29.4%;加入 ACF 和 GSACF 反应进行 45 min 后,DO 质量浓度分别降为  $2.4$  和  $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,DO 去除率分别为 52.9% 和 60.8%;当加入 Ni/ACF 后,催化活性显著提高,去除率达到 89.2%;而加入 Ni/GSACF 的催化效果最佳,反应进行 45 min 后 DO 质量浓度降至  $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,去除率为 98.0%,除氧效果优于文献报道<sup>[17-18]</sup>,可以有效提高工业给水中 DO 的去除效率.

ACF 本身对 DO 具有一定的催化还原能力,但还原能力十分有限.对比 ACF 和 GSACF,水热处理有效清除了活性炭纤维孔道内的杂质,可能导致 ACF 表面形成更多的表面缺陷和含氧官能团,增加部分活性位,所以 GSACF 催化活性略微增加.对比 Ni/ACF 和 Ni/GSACF,GSACF 的表面缺陷有利于使  $O_2$  电负性增强,易于被催化还原<sup>[19]</sup>;GSACF 增加的含氧官能团有效促进了 Ni 物种的分散,使有效活性位进一步增加,所以 Ni/GSACF 催化活性明显增加,表现出最好的除氧效果.

2.2.2 反应温度的影响 当初始 pH 值为 8.3、碳酰肼质量浓度为  $9.3\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、催化剂质量浓度为  $0.6\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时,反应温度对 Ni/GSACF 催化碳酰肼除氧效果的影响,如图 5 所示.

由图 5 可知:反应温度对水中 DO 的溶解度有一定影响,温度越高,水中 DO 的质量浓度越低.当反应温度分别为 25,35,45,55  $^{\circ}\text{C}$  时,水中 DO 的初始质量浓度分别为  $5.6,5.3,5.1,4.7\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,反应进行 45 min 后,DO 的质量浓度分别降至  $1.6,0.7,0.1,0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,去除率分别为 71.4%,86.8%,98.0%和 100%.可见,随着反应温度的提高,DO 的去除率相应提高.当反应温度为 25,35  $^{\circ}\text{C}$  时,除氧后水中氧含量仍较高;当反应温度为 45  $^{\circ}\text{C}$  且反应进行到 45 min 时,水中 DO 的质量浓度降至  $0.1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下;当反应温度为 55  $^{\circ}\text{C}$  且反应进行到 35 min 时,水中 DO 的质量浓度降至  $0.1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,DO 去除率为 98.0%,相比温度为 45  $^{\circ}\text{C}$  时仅提高了 3.9%.在氧化还原反应过程中,升高反应温度有利于提高反应速率和 DO 去除率.考虑到实际应用中应节约除氧成本,同时保持一定的除氧效果,后续实验选取反应温度为 45  $^{\circ}\text{C}$ .

2.2.3 初始 pH 值的影响 当温度为 45  $^{\circ}\text{C}$ 、碳酰肼质量浓度为  $9.3\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、催化剂质量浓度为  $0.6\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时,初始 pH 值对 Ni/GSACF 催化碳酰肼除氧效果的影响,如图 6 所示.

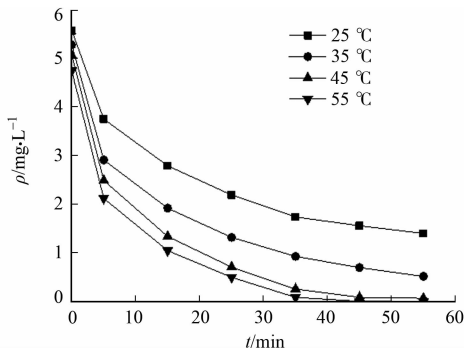


图 5 反应温度对 Ni/GSACF 催化碳酰肼除氧效果的影响

Fig. 5 Effect of temperature on Ni/GSACF catalytic performance in DO reduction by carbohydrazide

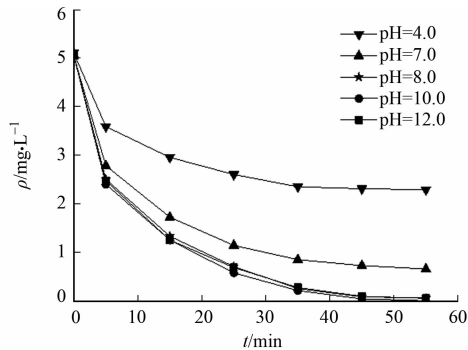


图 6 pH 值对 Ni/GSACF 催化碳酰肼除氧效果的影响

Fig. 6 Effect of pH value on Ni/GSACF catalytic performance in DO reduction by carbohydrazide

由图 6 可知:初始 pH 值对 Ni/GSACF 催化剂的活性有显著影响.当初始 pH 值为 4.0 时,反应 45 min 后,水中 DO 的质量浓度为  $2.3\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;当初始 pH 值为 7.0 时,反应 45 min 后,水中 DO 的质量浓度为  $0.7\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;而当初始 pH 值为 8.0~12.0 时,反应进行 45 min 后,DO 的质量浓度均降至  $0.1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下.在酸性条件下,催化剂表面负载的 Ni 物种会和酸反应溶脱到水体中,造成活性物种 Ni 的流失,从而使催化剂失活.而在碱性条件下,催化剂表面的 Ni 物种较为稳定;同时,Ni 物种可能与水中的  $OH^-$  络合形成稳定的还原性物种  $Ni(OH)_2$ ,因而,具有较好地催化活性.碱性条件还有利于金属表面生成致密稳定的保护膜,减缓水中 DO 对管道的腐蚀<sup>[20]</sup>.由于实验用水 pH 值约为 8.3,后续实验无需调整 pH 值.

2.2.4 碳酰肼质量浓度的影响 当温度为 45  $^{\circ}\text{C}$ 、初始 pH 值为 8.3、催化剂质量浓度为  $0.6\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时,碳酰肼质量浓度( $\rho_{\text{碳酰肼}}$ )对 Ni/GSACF 催化碳酰肼除氧效果的影响,如图 7 所示.由图 7 可知:随着碳酰肼质量浓度由  $5.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加至  $10.7\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,反应 45 min 后,DO 去除率从 52.9% 提高到

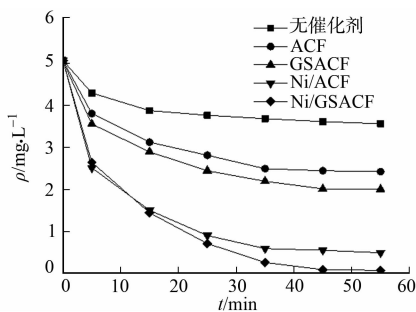


图 4 不同催化剂催化碳酰肼的除氧效果

Fig. 4 Effect of different catalysts in DO reduction by carbohydrazine

99.9%。当碳酰肼的质量浓度达到  $9.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,45 min 后 DO 质量浓度降至  $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率已达到 98.0%;继续增加碳酰肼质量浓度至  $10.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,DO 去除率仅仅增加 1.9%。适当增加碳酰肼质量浓度有利于提高反应物浓度,促进化学反应平衡向右移动,从而提高反应速率和 DO 去除率。考虑除氧成本,同时能够保持一定的除氧效果,后续实验选用碳酰肼质量浓度为  $9.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2.4 催化剂质量浓度的影响 当温度为  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、初始 pH 值为 8.3、碳酰肼质量浓度为  $9.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,催化剂 Ni/GSACF 质量浓度( $\rho_{\text{Ni/GSACF}}$ )对碳酰肼除氧的效果的影响,如图 8 所示。由图 8 可知:适当增加催化剂的质量浓度,可以增加催化反应中活性 Ni 物种的数量,提高催化反应速率和 DO 去除率。当 Ni/GSACF 质量浓度由  $0.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到  $0.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,反应 45 min 后,DO 的去除率由 76.5% 提高到 98.0%,反应速率也明显加快;但当继续增加催化剂质量浓度至  $0.7\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,反应速率略微增加。考虑到实际应用中应节约催化剂用量成本,选择催化剂质量浓度为  $0.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

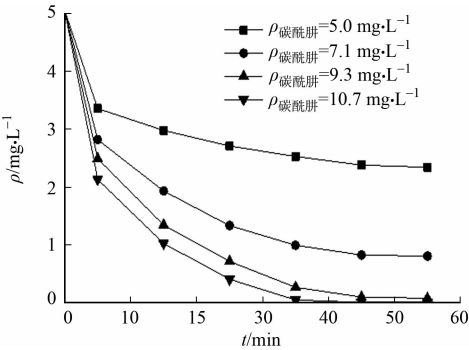


图 7 碳酰肼质量浓度对 Ni/GSACF 催化碳酰肼除氧效果的影响

Fig. 7 Effect of carbonylhydrazide concentration on Ni/GSACF catalytic performance in DO reduction by carbonylhydrazide

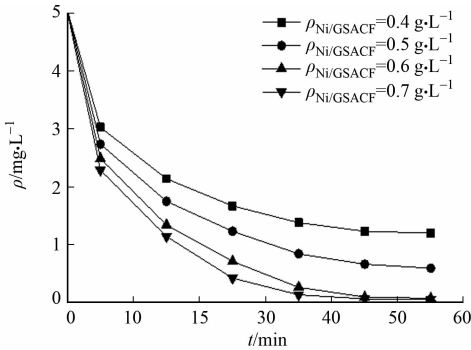


图 8 Ni/GSACF 质量浓度对碳酰肼除氧效果的影响

Fig. 8 Effect of catalyst concentration on Ni/GSACF catalytic performance in DO reduction by carbonylhydrazide

2.3 催化反应机理探讨

根据实验结果,推测 Ni/GSACF 催化碳酰肼除氧的机理示意图,如图 9 所示。碳酰肼在催化剂作用下,由于镍和羰基氧相互作用,使羰基电子云分布进一步向氧转移,由于镍的吸电子作用,使 C—N 电子云密度下降,最终导致 C—N 键减弱<sup>[21]</sup>,使其与氧气在较低温度下易发生反应。由于反应产物为  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ ,对水质和管材无影响<sup>[22-23]</sup>。

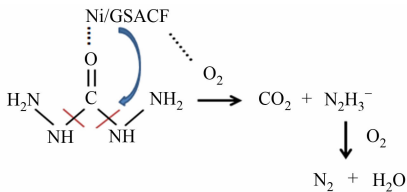


图 9 Ni/GSACF 催化碳酰肼还原去除 DO 机理

Fig. 9 Schematic of reduction of DO by carbonylhydrazide over Ni/GSACF catalysts

3 结束语

以水热处理的活性炭纤维负载镍作为催化剂(Ni/GSACF),用于催化碳酰肼还原去除给水中的 DO,取得了良好的效果。FT-IR 表明,水热处理有助于提高催化剂表面含氧官能团数量;XRD 表征显示催化剂表面具有活性 Ni 物种;SEM 显示 Ni 物种在 GSACF 表面均匀分散。当反应温度为  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、初始 pH 值为 8.0~12.0、碳酰肼质量浓度为  $9.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、催化剂质量浓度为  $0.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,反应 45 min 后,水中 DO 质量浓度降至  $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下。相较于其他除氧工艺,本工艺操作简便、绿色安全、运行费用低,在较低温度下,具有较好的除氧效果。

参考文献:

[1] 陈剑钧. 小型工业锅炉给水除氧的实用工艺探讨[J]. 工业用水与废水, 2007, 38(4): 80-81. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-2455. 2007. 04. 024.

[2] 杜斌, 袁益超, 刘聿拯, 等. 给水除氧技术的特点与比较[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(4): 296-298. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-5884. 2008. 04. 019.

[3] 郭文建. 浅析锅炉给水除氧方法的选择与应用[J]. 西部资源, 2012(4): 156-158.

- [4] 丁姗姗,曹顺安,胡家元. 锅炉给水处理中的化学除氧剂[J]. 工业水处理, 2010, 30(4): 17-21. DOI:10. 3969/j. issn. 1005-829X. 2010. 04. 005.
- [5] 肖栓柱. 碳酰肼在电厂化学中的应用[J]. 石化技术, 2017, 24(5): 51. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-0235. 2017. 05. 035.
- [6] 张彬,宋磊. 活性炭材料的孔径结构对 SO<sub>2</sub> 吸附性能的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 293-298. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2014. 03. 0293.
- [7] 王晓明,许绿丝. 活性炭纤维脱除气态污染物反应器的阻力[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2009, 30(2): 175-178. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2009. 02. 0175.
- [8] BESWICK O, LAMEY D, MURISSET F, *et al.* Ni-based structured catalyst for selective 3-phase hydrogenation of nitroaromatics[J]. Catalysis Today, 2016, 273: 244-251. DOI:10. 1016/j. cattod. 2016. 04. 020.
- [9] QI Suitao, LI Yingying, YUE Jiaqi, *et al.* Hydrogen production from decalin dehydrogenation over Pt-Ni/C bimetallic catalysts[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2014, 35(11): 1833-1839. DOI:10. 1016/S1872-2067(14)60178-9.
- [10] 李健,向兰,金涌. 水热改性法制备分散性纳米氧化镍[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(4): 425-428. DOI:10. 3321/j. issn:1002-185X. 2004. 04. 021.
- [11] 刘守新,孙剑. 水热法制备炭球-活性炭复合材料[J]. 无机材料学报, 2009, 24(6): 1132-1136. DOI:10. 3724/SP. J. 1077. 2009. 01132.
- [12] 任建莉,叶素娟,陈俊杰,等. 活化处理活性炭纤维的表面特性及其汞吸附性能[J]. 环境科学学报, 2010, 30(7): 1410-1417. DOI:10. 13671/j. hjkxxb. 2010. 07. 010.
- [13] GOOSSAERT V. Catalytic oxidation of toluene and *m*-xylene by activated carbon fiber impregnated with transition metals[J]. Carbon, 2005, 43(15): 3041-3053. DOI:10. 1016/j. carbon. 2005. 06. 039.
- [14] YUAN Dingsheng, LIU Yingliang. Electroless deposition of Cu on multiwalled carbon nanotubes[J]. 稀有金属(英文版), 2006, 25(3): 237-240. DOI:10. 1016/S1001-0521(06)60046-6.
- [15] 孟冠华,李爱民,张全兴. 活性炭的表面含氧官能团及其对吸附影响的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2007, 23(1): 88-94. DOI:10. 3321/j. issn:1001-5493. 2007. 01. 013.
- [16] 谭三香,谭绍早,刘应亮,等. 载铜活性炭微球的制备及抗菌性能[J]. 无机材料学报, 2010, 25(3): 299-305. DOI:10. 3724/SP. J. 1077. 2010. 00299.
- [17] MOON J S, PARK K K, KIM J H, *et al.* Reductive removal of dissolved oxygen in water by hydrazine over cobalt oxide catalyst supported on activated carbon fiber[J]. Applied Catalysis A: General, 2000, 201(1): 81-89. DOI:10. 1016/S0926-860X(00)00423-3.
- [18] 温菊花,王争光,邱添,等. 中性水质中催化联氨除氧效果试验研究[J]. 核动力工程, 2007, 28(1): 128-130. DOI:10. 3969/j. issn. 0258-0926. 2007. 01. 029.
- [19] YANG Hao, XIAO Zhongliang, QU Yingmin, *et al.* The role of RGO in TiO<sub>2</sub>-RGO composites for the transesterification of dimethyl carbonate with phenol to diphenyl carbonate[J]. Research on Chemical Intermediates, 2017(1): 1-14. DOI:10. 1007/s11164-017-3135-9.
- [20] 陈莉荣,阚伟海,姜庆宏,等. 软化水中除氧剂与 pH 值对碳钢腐蚀率影响研究[J]. 表面技术, 2015(7): 108-113. DOI:10. 16490/j. cnki. issn. 1001-3660. 2015. 07. 020.
- [21] 谈琰,戴帆,李咸伟,等. 碳酰肼对烧结过程二噁英生成的抑制作用[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(5): 48-53. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-3865. 2012. 05. 010.
- [22] 官贞珍,陈德珍,洪璠,等. 中高温区碳酰肼还原 NO<sub>x</sub> 和抑制二噁英的研究[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2810-2816. DOI:10. 13227/j. hjkx. 2011. 09. 036.
- [23] VASILE-PAFILI S M V, BARTZIS J G. Experimental investigation and optimization of carbonylhydrazide application using different alkalization agents on boilers all-volatile treatment[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(10): 1269-1275. DOI:10. 1016/j. applthermaleng. 2010. 02. 001.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)