

# 改性瓦斯灰干法脱除 NO 的实验研究

庞崇靖, 张运瀚, 冯嘉予, 夏福婷, 马林转, 贾丽娟\*

(云南民族大学化学与环境学院, 云南省高校民族地区资源清洁转化重点实验室, 民族地区矿产资源综合利用重点实验室, 云南省教育厅环境功能材料重点实验室, 云南昆明 650504)

**摘要:**用不同碱改性固体废物瓦斯灰制备出一种能够脱除烟气中 NO 的催化剂。考察了浸渍浓度、固液比、超声时间等制备条件对瓦斯灰脱硝性能的影响, 并对材料进行了 XRF、XRD、SEM、EDS-Mapping、FT-IR 表征。结果表明, 利用 KOH 改性的瓦斯灰脱硝性能最佳, 在 KOH 浓度为 2 mol/L、固液比为 1:2、超声时间为 40 min 的最佳制备条件下脱硝率约达 100%。改性后, K 成功负载在材料表面, 瓦斯灰微观结构发生了变化, 生成的新物质为 NO 的去除提供了更多活性位点。

**关键词:**干法; 瓦斯灰; NO; 资源化利用

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)04-0112-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.04.022

## Experimental study on removal of NO by modified gas ash drying method

PANG Chong-jing, ZHANG Yun-han, FENG Jia-yu, XIA Fu-ting, MA Lin-zhuan, JIA Li-juan\*

(Yunnan Provincial Universities Key Laboratory of Clean Transformation of Resources in Ethnic Minority Areas, Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Mineral Resources in Ethnic Minority Areas, Environmental Functional Materials Key Laboratory of Yunnan Education Department, School of Chemistry and Environment, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China)

**Abstract:** A catalyst for removing NO from flue gas is prepared by using different alkali-modified gas ash, a kind of solid waste, to achieve the goal of "treating wastes with wastes". The influences of the preparation conditions such as impregnation concentration, solid-to-liquid ratio and sonication time on the denitrification performance of the gas ash-derived are investigated, and the catalyst is characterized by means of XRF, XRD, SEM, EDS-Mapping and FT-IR. The results show that the gas ash modified with KOH shows the best denitrification performance, which can deliver a denitrification rate of about 100% under the best preparation conditions that KOH concentration is 2 mol·L<sup>-1</sup>, solid-liquid ratio is 1:2, and sonication time is 40 min. After the modification, K has successfully been loaded on the material surface, the microstructure of gas ash has been changed, and the new substances generated provide more active sites for NO removal.

**Key words:** dry method; gas ash; NO; re-utilization

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)是造成酸雨和光化学烟雾的主要成分, 同时对人体健康和环境生态也有严重危害<sup>[1]</sup>。NO 占 NO<sub>x</sub> 总量的 90%~95%, 因此对 NO 的去除已成为环境治理的一个重要课题<sup>[2]</sup>。目前在工业实际生产实践中, 应用最为常见的 NO 脱除技术是氨选择性催化还原法, 然而该方法在实际生产过程中存在氨对设备的腐蚀性较大、运输及存储存在一定困难、氨易产生逃逸等问题<sup>[3]</sup>。因此, 开发一种 NO 脱除效率良好、成本较为低廉、制备方式相对简单的新材料已迫在眉睫。

高炉瓦斯灰的主要成分包括在金属冶炼过程中高炉煤气排放时携带的金属颗粒及金属蒸发过程中产生的冷凝物, 其主要元素有 C、Fe 等, 并含有少量 K、Na、Mg、Ca、Al、Si 等<sup>[4]</sup>。高炉瓦斯灰作为金属冶

炼过程中的副产品容易生产量相对较多、处理方式较为棘手等问题, 同时又含有大量的 K、Na、Ca、Fe 等活性金属, 具备净化工业烟气的潜质<sup>[5]</sup>。如徐雪松<sup>[4]</sup>利用高炉瓦斯灰脱除焦炉煤气中硫化氢, 脱硫效果可达到 80% 以上。裴元东等<sup>[6]</sup>在钢铁行业的冶炼过程中将瓦斯灰加入燃料中一起使用有助于减少 NO<sub>x</sub> 的排放。因此, 将瓦斯灰进行改性后再以干法脱除 NO 可达到“以废治废”的目的。

瓦斯灰本身虽具有去除 NO 的潜质, 但催化活性不足, 所以应当进行改性以提升催化效率。碱金属具有优秀的催化活性, 常被用于催化剂的改性材料, 因此, 笔者研究了超声辅助 KOH 浸渍法制备改性瓦斯灰材料, 并基于瓦斯灰特性考察了浸渍浓度、固液比、超声时间制备条件对材料脱硝性能的影响,

收稿日期: 2023-06-09; 修回日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968075)

作者简介: 庞崇靖(1997-), 男, 硕士生, 主要研究方向为大气污染控制, pangchongjing@163.com; 贾丽娟(1985-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为化工/冶金行业烟气脱硫脱硝技术、有色冶炼行业固体废物资源化, 通讯联系人, Leegyerkm@163.com。

然后进行系统性研究,得到了最佳制备条件,同时对材料进行表征分析。

## 1 实验设备和方法

### 1.1 催化剂的制备

实验选用的瓦斯灰来自于昆明钢铁控股有限公司。先将瓦斯灰与不同种碱金属改性对比后,以不同浓度的KOH按预设固液比混合均匀,通过预设不同时间超声浸渍法进行超声处理(功率为800 W,频率为59 kHz),之后于110℃的干燥箱中烘干12 h。筛出40~60目材料进行脱硝实验。

### 1.2 实验装置及流程

实验装置流程如图1所示。将1 g的改性瓦斯灰样品置于内径为6 mm、长度为50 cm的石英管中并于管式炉中进行实验反应,然后由温度控制箱检测调控反应温度。选取改性瓦斯灰1 g进行催化反应,采用动态配制模拟工业生产中的烟气,总气体流量为100 mL/min,其中NO的质量浓度为700 mg/m<sup>3</sup>,O<sub>2</sub>的体积分数为10%,N<sub>2</sub>作为主要平衡气体。尾气经由NaOH溶液吸收净化后在空气中释放。进出口气体经过MRU红外烟气分析仪在线检测主要成分。

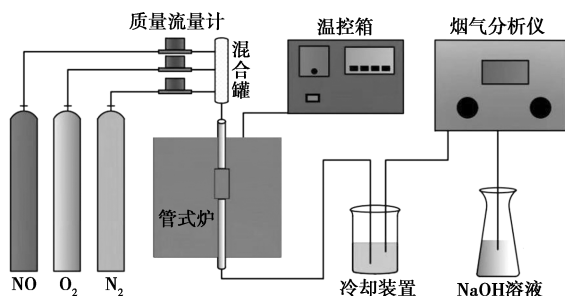


图1 实验装置图

### 1.3 数据处理

脱硝性能以NO去除率衡量,其计算式为:

$$\eta_{\text{NO}} = (C_{\text{NO}_{\text{in}}} - C_{\text{NO}_{\text{out}}}) / C_{\text{NO}_{\text{in}}} \quad (1)$$

式中: $\eta_{\text{NO}}$ 为NO脱除率; $C_{\text{NO}_{\text{in}}}$ 为进口浓度; $C_{\text{NO}_{\text{out}}}$ 为出口浓度。

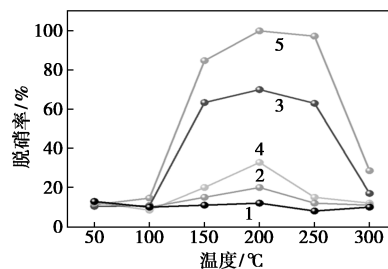
## 2 结果与探讨

### 2.1 改性剂及改性剂浓度影响因素的探究

选用4种碱对瓦斯灰进行改性<sup>[7-9]</sup>,并将改性后材料进行脱硝实验,结果如图2(a)所示。从图2(a)中可以看出,加入碱改性以后,瓦斯灰脱硝率得到显著提高。在50~200℃内,NO脱除率随着温度的升高而不断提高。在200℃时,NO脱除率达到最

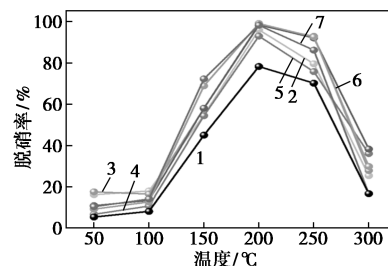
佳。在200~300℃内,NO脱除率随着温度的升高而减小。利用KOH改性的瓦斯灰NO脱除率最佳,在200℃时NO脱除率可以达到95%以上。推测是K的负载为材料提供电子,有利于氧空位和晶格氧的形成,有利于反应的进行<sup>[10]</sup>,故选择KOH作为改性剂。

为考察KOH浓度对脱硝性能的影响,以不同浓度的KOH溶液对瓦斯灰进行改性处理,结果如图2(b)所示。由图2(b)可知,随着KOH浓度不断增加,材料的脱硝率远高于未改性之前的原料。当KOH浓度低于2 mol/L时,瓦斯灰的NO脱除效率有部分的增加,但NO脱除率最高仅达到40%左右;当KOH浓度增加到2 mol/L时,在200℃可以达到100%,脱硝性能最佳;继续增加KOH浓度,瓦斯灰的脱硝率不再提高,脱硝率基本保持不变,出于成本考虑,选用2 mol/L KOH改性瓦斯灰。此外,随着反应温度超过200℃,脱硝率呈现先上升后下降的趋势,这归因于KOH产生烧结作用,当反应温度在200℃左右时可以达到最佳脱硝率(约100%)。



1—原料;2—Al(OH)<sub>3</sub>;3—NaOH;4—Ca(OH)<sub>2</sub>;5—KOH

(a) 不同碱改性对脱硝性能的影响



1—空白;2—0.5 mol/L;3—1.0 mol/L;4—1.5 mol/L;

5—2.0 mol/L;6—2.5 mol/L;7—3.0 mol/L

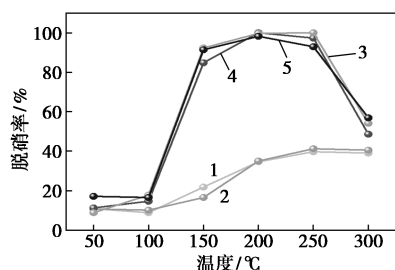
(b) KOH浓度对脱硝性能的影响

图2 不同碱改性及KOH浓度对脱硝性能的影响

### 2.2 固液比及超声时间对脱硝性能的影响

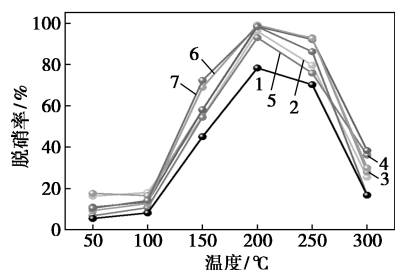
为考察固液比对脱硝性能的影响,以不同的固液比对瓦斯灰进行改性处理,结果如图3所示。由图3(a)可知,当固液比为1:1或1:1.5时,瓦斯灰的

脱硝率在 40% 左右,活性较低;增加固液比至 1:2 时,材料在反应温度 200℃ 下能实现 100% 的脱硝率,脱硝性能最佳;将固液比提高至 1:2.5 或 1:3 时,脱硝率无明显上升趋势。从成本考虑,在制备改性瓦斯灰时选择 1:2 作为最佳固液比条件。



1—1:1;2—1:1.5;3—1:2;4—1:2.5;5—1:3

(a) 固液比对脱硝性能的影响



1—0 min;2—10 min;3—20 min;4—30 min;5—40 min;

5—50 min;6—60 min

(b) 超声时间对脱硝性能的影响

图 3 固液比及超声时间对脱硝性能的影响

为考察超声时间对脱硝性能的影响,以不同超声时间对瓦斯灰进行改性处理。采用超声浸渍法是因为超声波产生的“空化效应”有足够的能量使活性组分均匀地负载在载体孔道内表面,并使其向材料孔道更深处负载,为反应提供了较多的活性位点,从而提高材料的活性和稳定性<sup>[11-13]</sup>。由图 3(b)可知,未经超声的改性瓦斯灰脱硝率仅达到 80% 左右;当对材料超声处理 40 min 时,脱硝率几乎可达 100%,然而随着超声时间的延长,瓦斯灰的脱硝率无明显提高。从节约能耗角度考虑,在制备改性瓦斯灰的过程中将超声时间设为 40 min。

综上所述,制备改性瓦斯灰的最优条件为 KOH 浓度为 2 mol/L、固液比为 1:2、超声时间为 40 min。

## 2.3 催化剂表征

### 2.3.1 改性前后瓦斯灰的 XRF 分析

材料的元素组成如表 1 所示。从表 1 中可以看出,改性前原料瓦斯灰主要元素为 Zn、Fe,并含有少量的 Cl、S、K、Si 等元素。改性后瓦斯灰 K 元素从 0.676% 提高到 12.452%。这是因为利用 KOH 改性

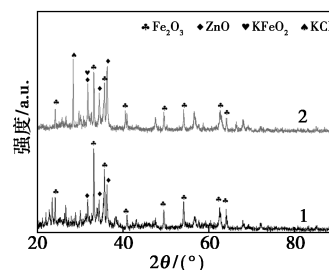
后,在超声浸渍法的作用下 K 成功负载在材料表面,从而使得 K 元素质量分数提高。此外,由于 K 的负载为材料提供电子,有利于氧空位和晶格氧的形成,有利于反应的进行<sup>[10]</sup>,所以使得改性后瓦斯灰脱硝性能增强。

表 1 材料的元素组成

材料	Zn	Fe	Cl	S	K	Si
原料瓦斯灰	43.034	38.154	5.156	3.190	0.676	2.005
改性瓦斯灰	40.935	32.926	3.087	1.981	12.452	1.419

### 2.3.2 改性前后瓦斯灰的 XRD 分析

利用 XRD 对 KOH 改性前后瓦斯灰进行表征分析,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,改性前瓦斯灰的主要成分是 ZnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,同时 XRF 的分析结果也证明了这一结论。通过 KOH 改性后瓦斯灰的 XRD 衍射峰依旧以 ZnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主,但 2θ 在 25~35° 出现 K 物种的衍射峰,主要存在形式为 KFeO<sub>2</sub>、KCl。推测为 K<sup>+</sup> 与瓦斯灰结合后产生的 KFeO<sub>2</sub>、KCl,这 2 种物质可以提供更多的活性位点<sup>[14-15]</sup>,从而提高瓦斯灰的脱硝性能。



1—改性前;2—改性后

图 4 改性前后瓦斯灰 XRD 图

### 2.3.3 改性前后瓦斯灰的 SEM 和 Mapping 分析

为了探究形貌变化对材料脱硝性能的影响,对其进行 SEM、Mapping 表征分析,结果如图 5 所示。由图 5 中可以看出,原始瓦斯灰呈现无规则块状,表面光滑,无明显孔隙结构。改性后瓦斯灰微观结构发生了变化,表面产生大量明显孔隙结构,有明显的颗粒物附着在表面。这是因为利用 KOH 改性后,表面被强碱腐蚀变得粗糙,从而提供了更多的活性位点,有利于 NO 的脱除。由 Mapping 分析结果可知,K 元素均匀分布在改性瓦斯灰表面,这是因为超声过程中超声波空化作用使得 K 元素得到良好的分散,均匀附着在材料表面<sup>[16]</sup>。同时结合 XRD 表征推测,改性瓦斯灰表面上的颗粒物为 KFeO<sub>2</sub>、KCl。

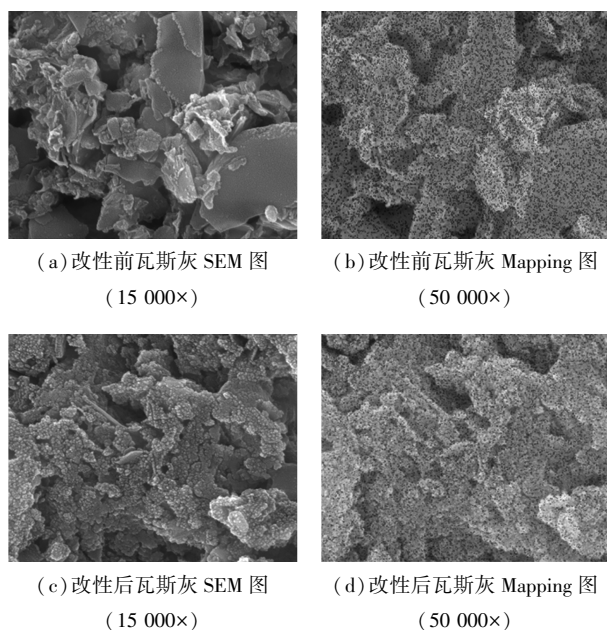


图5 改性前后瓦斯灰的SEM和Mapping图

### 2.3.4 改性前后瓦斯灰的红外分析

改性前后瓦斯灰的红外谱图如图6所示。由图6可知,  $3416\text{ cm}^{-1}$  为游离水的 O—H 振动峰,  $1632\text{ cm}^{-1}$  是—COO—振动峰<sup>[9]</sup>,  $1457\text{ cm}^{-1}$  对应于  $\text{CO}_3^{2-}$  的 C—O 拉伸振动吸收峰<sup>[17]</sup>,  $1382\text{ cm}^{-1}$  处推测为羧酸的特征峰<sup>[18]</sup>,  $1114\text{ cm}^{-1}$  为 C=O 振动峰<sup>[19]</sup>,  $998\text{ cm}^{-1}$  归因于二氧化硅和硅酸盐的 Si—O 拉伸振动吸收峰<sup>[17]</sup>,  $541\text{ cm}^{-1}$  为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  特征峰<sup>[17]</sup>。

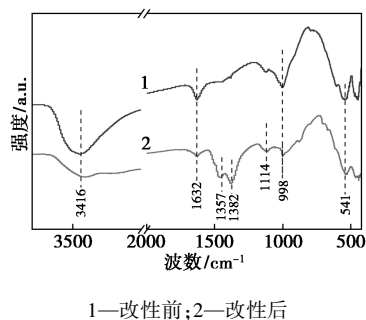


图6 改性前后瓦斯灰的红外谱图

改性后瓦斯灰对比于改性前瓦斯灰, O—H 峰强度降低, 这是由于碱处理减少—OH 自由基的含量<sup>[9]</sup>。此外, 改性后多出了  $1457\text{ cm}^{-1}$  的 C—O 拉伸振动吸收峰,  $1382\text{ cm}^{-1}$  的羧酸特征峰、 $1114\text{ cm}^{-1}$  的 C=O 振动峰, C=O 被认为是吸附酸性气体的典型碱性基团和活性位点<sup>[20]</sup>, 推测改性后生成的 C=O 基团促进了材料脱硝反应的进行。

通过对催化剂改性前后的表征分析可知, 通过 KOH 改性后瓦斯灰产生了  $\text{KFeO}_2$ 、 $\text{KCl}$ ; 改性后的瓦斯灰表面被强碱腐蚀变得粗糙; 改性后瓦斯灰中

—OH 自由基的含量减少, 多出了 C=O 振动峰, 这些都有利于脱硝反应的进行。

## 3 结论

利用碱金属对瓦斯灰进行改性, 同时控制 KOH 浓度、固液比、超声时间等影响因子得出以下结论:

(1) 经超声辅助 KOH 浸渍法制备的改性瓦斯灰材料用于脱除 NO 是可行并有效的。在最佳制备条件(超声时间为 40 min、KOH 浓度为 2 mol/L、固液比为 1:2)下, KOH 改性瓦斯灰脱硝率可以达到 100% 左右。

(2) 通过改性, 在瓦斯灰表面生成了新的物质  $\text{KFeO}_2$ 、 $\text{KCl}$ , 这有利于氧空位和晶格氧的形成并提供了更多的活性位点。此外, 改性后材料的微观结构发生了变化, 改性后生成的 C=O 基团促进了材料脱硝反应的进行。

## 参考文献

- [1] 唐宇星, 秦瑞香, 王金波, 等. 活性炭负载金属氧化物催化 NO 直接分解[J]. 化学研究与应用, 2017, 29(3): 420-424.
- [2] 莫建红, 童志权, 张俊丰. Mn/Co—Ba—Al—O 催化氧化 NO 性能研究[J]. 环境科学学报, 2007, (11): 1793-1798.
- [3] 王光华, 刘福, 陈哲, 等. 煤基炭负载 K/Ni 催化剂脱除  $\text{NO}_x$  的研究[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(2): 89-92.
- [4] 徐雪松. 高炉瓦斯灰用于气体中硫化氢脱除的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2015.
- [5] 吴丹. 高炉瓦斯灰催化松木热解及焦炭气化研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [6] 裴元东, 吴胜利, 张俊杰, 等. 烧结配加高炉瓦斯灰替代燃料降低  $\text{NO}_x$  排放实践[J]. 烧结球团, 2020, 45(1): 73-76.
- [7] 左嫣然, 易红宏, 唐晓龙, 等. 酸碱改性对活性焦烧结烟气脱硫性能的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3405-3410.
- [8] 贾阳. 高炉矿渣 SCR 低温脱硝催化剂的制备及机制研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- [9] 刘芳, 李孟, 李雨薇, 等. KOH 改性石墨烯对甲苯的吸附动力学及吸附机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 163-172.
- [10] 李杨, 廖卫平, 索掌怀. KOH 改性对  $\text{TiO}_2$  结构及其负载金催化剂 CO 氧化反应活性的影响[J]. 燃料化学学报, 2011, 39(1): 47-53.
- [11] 范鑫, 林倩, 潘红艳, 等. 超声浸渍制备钒催化剂催化氧化  $\text{SO}_2$  性能的研究[J]. 应用化工, 2019, 48(7): 1629-1634.
- [12] 周晓峰, 陈庆龄, 陶跃武, 等. 超声浸渍对费托合成 Co/Zr/SiO<sub>2</sub> 催化剂性能的影响[J]. 催化学报, 2011, 32(7): 1156-1165.
- [13] 邓红, 韦藤幼, 童张法. 超声浸渍法制备吗啉催化剂及其催化性能[J]. 化工进展, 2015, 34(2): 425-429, 446.

(下转第 121 页)

- [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 1044–1051.
- [3] Sun Z, Fridrich B, de Santi A, *et al.* Bright side of lignin depolymerization: Toward new platform chemicals [J]. Chem Rev, 2018, 118 (2): 614–678.
- [4] Schutyser W, Renders T, Van den Bosch S, *et al.* Chemicals from lignin: An interplay of lignocellulose fractionation, depolymerisation, and upgrading [J]. Chem Soc Rev, 2018, 47 (3): 852–908.
- [5] Lotfi S, Mollaabbasi R, Patience G S. Kinetics of softwood kraft lignin inert and oxidative thermolysis [J]. Biomass and Bioenergy, 2018, 109: 239–248.
- [6] Al Mukaimi M E, Kaiser K, Williams J R, *et al.* Centennial record of anthropogenic impacts in Galveston Bay: Evidence from trace metals (Hg, Pb, Ni, Zn) and lignin oxidation products [J]. Environmental Pollution, 2018, 237: 887–899.
- [7] Díaz-Urrutia C, Hurisso B B, Gauthier P M P, *et al.* Catalytic aerobic oxidation of lignin-derived bio-oils using oxovanadium and copper complex catalysts and ionic liquids [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2016, 423: 414–422.
- [8] 樊璐璐, 刘玉香, 范晓军, 等. 木质素及其模型化合物生产愈创木酚的研究进展 [J]. 现代化工, 2021, 41 (1): 29–52.
- [9] Babu D S, Srivastava V, Nidheesh P V, *et al.* Detoxification of water and wastewater by advanced oxidation processes [J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 133961.
- [10] Sillanpää M, Neibi M C, Matilainen A. Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 208: 56–76.
- [11] Gaur N, Narasimhulu K, Y P. Recent advances in the bio-remediation of persistent organic pollutants and its effect on environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 1602–1631.
- [12] Zhou Y, Zhang Y, Hu X. Synergistic coupling  $\text{Co}_3\text{Fe}_7$  alloy and  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  spinel for highly efficient removal of 2,4-dichlorophenol by activating peroxymonosulfate [J]. Chemosphere, 2020, 242: 125244.
- [13] 南亚林, 张鹏, 范文燕, 等. 负载型二硒化铁催化单过硫酸盐降解多氯联苯的研究 [J]. 现代化工, 2022, 42 (10): 190–195.
- [14] Davaritouchae M. Enhancement of Co/CNTs nano catalyst activity, selectivity and stability in FTS using functionalized carbon nanotubes [J]. Physical Review B Condensed Matter, 2008, 77 (4): 154.
- [15] Li J, Li H, Yuan Z, *et al.* Role of sulfonation in lignin-based material for adsorption removal of cationic dyes [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 135: 1171–1181.
- [16] Wang S, Zhao H, Zhao X, *et al.* Surface engineering of hollow carbon nitride microspheres for efficient photoredox catalysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381: 122593.
- [17] Zhang H, Tian W, Qian Z, *et al.* Co@C/CoOx coupled with N-doped layer-structured carbons for excellent  $\text{CO}_2$  capture and oxygen reduction reaction [J]. Carbon, 2018, 133: 306–315.
- [18] Yao Y, Hu Y, Hu H, *et al.* Metal-free catalysts of graphitic carbon nitride-covalent organic frameworks for efficient pollutant destruction in water [J]. J Colloid Interface Sci, 2019, 554: 376–387.
- [19] Long Y, Bu S, Huang Y, *et al.* N-doped hierarchically porous carbon for highly efficient metal-free catalytic activation of peroxymonosulfate in water: A non-radical mechanism [J]. Chemosphere, 2019, 216: 545–555.
- [20] Advani J H, Khan N-u H, Bajaj H C, *et al.* Stabilization of palladium nanoparticles on chitosan derived N-doped carbon for hydrogenation of various functional groups [J]. Applied Surface Science, 2019, 487: 1307–1315.
- [21] Lu N, Zheng B, Gu Y, *et al.* Fabrication of CoNPs-embedded porous carbon composites based on morphochemical imprinting strategy for detection of  $\text{H}_2\text{O}_2$  released from living cells [J]. Electrochimica Acta, 2019, 321: 134717.
- [22] Duan X, Su C, Miao J, *et al.* Insights into perovskite-catalyzed peroxymonosulfate activation: Maneuverable cobalt sites for promoted evolution of sulfate radicals [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, 220: 626–634.
- [23] Guo Y, Zeng Z, Li Y, *et al.* Catalytic oxidation of 4-chlorophenol on in-situ sulfur-doped activated carbon with sulfate radicals [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 179: 257–264. ■

(上接第 115 页)

- [14] 陈潇晶, 张慧荣, 郭彦霞, 等. 氢氧化钾活化后焦粉的结构变化及其对铅吸附性能的影响 [J]. 煤炭转化, 2019, 42 (6): 49–55.
- [15] 李锐, 王博涛, 贾丽娟, 等. 改性电石渣干法催化净化工业废气中的  $\text{NO}$  [J]. 环境工程学报, 2021, 15 (5): 1599–1605.
- [16] 曹向禹, 田俊阳, 李维鑫, 等. 微波-超声-磷酸法制备亚麻基活性炭纤维及其表征 [J]. 化工新型材料, 2021, 49 (12): 171–175.
- [17] 何倩. 高炉瓦斯灰中铍元素的浸取及选择性分离 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
- [18] 肖凡昊. 改性核桃壳材料对水中  $\text{Hg}(\text{II})$  的吸附实验研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [19] 巴浩楠. 改性氧化钙催化热解玉米秸秆产生物炭的研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021.
- [20] Zhang Kang, He Yong, Wang Zhihua, *et al.* Multi-stage semi-coke activation for the removal of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}$  [J]. Fuel, 2017, 210: 738–747. ■