

Ag 掺杂 MnO₂ 的制备及其对甲醛的催化降解

李国涵 丁建东 沈拥军 倪朝晖 景晓辉*

(南通大学化学化工学院,南通 226019)

摘 要 采用低温液相氧化还原法制备了 Ag 掺杂 MnO₂。利用 X 射线粉末衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、比表面积(BET)、X 射线能谱(EDS)和傅里叶变换红外光谱(FT-IR)对制备的样品进行了表征分析。以 Ag 掺杂 MnO₂ 为催化剂,在室温、常压、无光照条件下对甲醛气体进行了催化降解实验。结果表明:Ag 掺杂有效提高了 MnO₂ 的催化活性和对甲醛降解效果,当 Ag 掺杂量为 5%(wt,质量分数,下同)时,催化活性最高。20g Ag 掺杂量为 5%的 Ag-MnO₂ 对初始浓度为 20mg/m³ 的甲醛气体催化降解 4h 时,有效降解率达 99.65%。

关键词 银掺杂,二氧化锰,催化降解,甲醛

Preparation of Ag-doped MnO₂ and catalytic degradation of formaldehyde

Li Guohan Ding Jiandong Shen Yongjun Ni Zhaohui Jing Xiaohui

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong 226019)

Abstract Ag-doped MnO₂ catalysts were fabricated using the method of low-temperature liquid phase redox. The prepared samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), brunauer emmett teller (BET), X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) and fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The catalytic degradation of formaldehyde was conducted under normal temperature and pressure as well as without illumination. The results indicated that the appropriate amount of Ag doping significantly increased the catalytic activity, and Ag-doped MnO₂ with 5% doping amount of Ag showed the highest catalytic activity. The effective degradation efficiency reached 99.65%, while formaldehyde with initial concentration of 20mg/m³ was degraded by 20g of 5Ag-MnO₂ for 4h.

Key words Ag doping, manganese dioxide, catalytic oxidation, formaldehyde

随着越来越多的各类建筑材料、装修材料、纺织服装用品等进入人们的日常生活,室内空气中的甲醛污染已引起人们的极大关注。甲醛是挥发性有机化合物(VOCs)中最主要的一种,已成为我国最主要的室内空气污染物之一^[1],被世界卫生组织确定为致癌和致畸形物质,在我国有毒化学品优先控制名单上高居第二位^[2]。我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)明确规定室内甲醛浓度不得超过 0.1mg/m³,《民用建筑工程室内环境污染控制规范》(GB 50325—2010)则规定 I 类民用建筑工程室内甲醛浓度≤0.08mg/m³,II 类民用建筑工程室内甲醛浓度≤0.1mg/m³,但目前我国大多情况远高于这一标准。

由于甲醛的释放过程是一个缓慢逐渐的过程,这就增加了治理甲醛污染的难度^[3]。一直以来,去

除甲醛的方法依然为活性炭吸附法为主,但是活性炭吸附法只是将污染源转移,并不能分解污染物,存在吸附饱和和二次污染等问题^[4-5]。

催化氧化法具有降解效率高、无二次污染等特点。催化氧化法目前主要集中于研究光催化氧化法,光催化法通过 TiO₂、ZnO 等光催化剂生成具有很强氧化能力空穴(h⁺)及·OH 将甲醛氧化生成 CO₂ 和 H₂O,但光催化剂必须在光源(主要是紫外光)照射下才能激活^[6-7],限制了该类催化剂的一些应用。本课题组前期研究结果表明,MnO₂ 对空气中甲醛具有较好的催化氧化活性,在无光照条件下能将甲醛催化氧化成 CO₂ 和 H₂O^[8]。由于 MnO₂ 制备容易、价格低廉,显示出潜在的应用前景,但是 MnO₂ 的催化活性及其对甲醛的降解效果有待提高。

本研究在前期研究工作的基础上,采用低温氧

基金项目:国家自然科学基金专项基金(21246010);南通市科技计划项目(MS12015010);南通大学自然科学横向项目(15H037)

作者简介:李国涵(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为纳米材料制备与应用。

联系人:景晓辉(1960-),男,博士,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为催化理论与应用。

化还原法制备了 Ag 掺杂 MnO_2 催化剂,在室温、常压、无光照条件下对甲醛气体进行了催化降解实验,研究了 Ag 掺杂量、甲醛初始浓度和催化剂用量等因素对其催化降解性能的影响,以探索通过 Ag 掺杂提高 MnO_2 的催化活性及其对甲醛的降解效果。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

高锰酸钾、硫酸锰、硝酸银,国药集团化学试剂有限公司;甲醛溶液(37%~40%)、乙酸铵、冰乙酸、乙酰丙酮,上海润捷化学试剂有限公司;以上均为分析纯试剂。

恒温加热磁力搅拌器(DF-101S 型),郑州长城科工贸有限公司;电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9076A 型),上海市精宏实验设备有限公司;空气净化器(ES-002 型),上海竟源环保设备有限公司;大气采样仪(QC-2B 型),北京市劳动保护科学研究所;双光束紫外-可见分光光度计(TU-1901 型),北京普析通用仪器有限责任公司;X 射线粉末衍射仪(XRD,D8-Advance 型),德国 Bruker 公司;红外光谱仪(FT-IR,AVATAR 370FT-IR 型),美国 Thermo Nicolet 公司;快速比表面积分析仪(BET,ASAP 2020 型),美国 Micromeritics 公司;X 射线能谱(EDS,EX-250 型),日本 HORIBA 公司;扫描电镜(SEM,S-3400N 型),日本 HITACHI 公司;甲醛催化氧化实验舱,自制(图 1,容积 1m^3)。

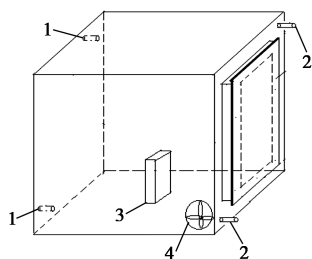


图 1 甲醛催化氧化实验舱

(1:气体采样口;2:电源线套管;3:空气净化器;4:小风扇)

1.2 催化剂的制备

称取一定量的 KMnO_4 和 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 分别于 80°C 下溶于蒸馏水中配制成 KMnO_4 溶液和 MnSO_4 溶液,然后各自通过分液漏斗同时滴入到盛有蒸馏水的四口烧瓶中,边搅拌边滴加,滴加完毕后,于 80°C 继续反应 2h 后冷却至室温,将沉淀物抽滤,再用蒸馏水洗涤并抽滤数次后于 80°C 干燥 10h,即可得到 MnO_2 。Ag 掺杂 MnO_2 的制备与 MnO_2 制备相类似,不同的是先将配制好的 AgNO_3 溶液

加入到 KMnO_4 溶液中,配制成混合溶液,然后再将混合溶液和 MnSO_4 溶液同时滴入到烧瓶中,进行反应。Ag 掺杂量以 Ag 与 MnO_2 的摩尔比计算,例如,Ag- MnO_2 -5 即为 Ag 掺杂量为 5%(wt,质量分数,下同)的 MnO_2 。

1.3 测试

将定量称取的甲醛溶液放入实验舱中,加热使其完全挥发,开启风扇使甲醛气体充分扩散后先取样测试甲醛气体的初始浓度。再开启已装填好催化剂的空气净化器,在常温、常压、无光照条件下进行甲醛催化氧化实验,每隔一段时间用大气采样器从实验舱内采集 10L 气体进行分析测试。

按国家标准(GB/T 15516—1995)采用乙酰丙酮分光光度法测定甲醛气体浓度;催化剂对甲醛的催化氧化效果通过有效降解率考量评价,有效降解率和自然衰减率分别按式(1)和式(2)计算^[9]。

$$Ke = \frac{Ce_0(1 - N_0) - Ce_t}{Ce_0(1 - N_0)} \times 100\% \quad (1)$$

$$N_0 = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,Ke 为有效降解率,%; N_0 为实验舱内甲醛浓度的自然衰减率,%; C_0 为实验舱内甲醛的初始浓度(空白实验), mg/m^3 ; C_1 为 t 时刻实验舱内甲醛浓度(空白实验), mg/m^3 ; Ce_0 为实验前实验舱内甲醛初始浓度, mg/m^3 ; Ce_t 为 t 时刻实验舱内甲醛浓度, mg/m^3 。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

图 2 为 MnO_2 与 Ag 掺杂 MnO_2 的 XRD 谱图。

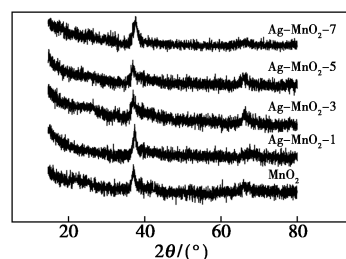


图 2 MnO_2 与 Ag 掺杂 MnO_2 的 XRD 谱图

由图可见,掺杂和未掺杂的样品均在 $2\theta = 37^\circ$ 和 66° 处出现了衍射峰,说明所制备样品主晶相均为 $\delta\text{-MnO}_2$ ^[10],同时表明,Ag 掺杂未能改变 MnO_2 的晶形。XRD 谱图中未出现 Ag 的特征衍射峰,主要是 Ag 的掺杂量少以及 Ag 高度分散的结果^[11]。

2.2 SEM 分析

MnO_2 与 Ag- MnO_2 -5 的 SEM 图见图 3。由图

可知,所制备样品均为类球形,掺杂前 MnO_2 团聚现象较为明显,粒径分布在 $300\sim 600\text{nm}$ 。Ag 掺杂后,基本消除了团聚,明显细化了晶粒,粒径分布降至 $100\sim 300\text{nm}$ 之间。

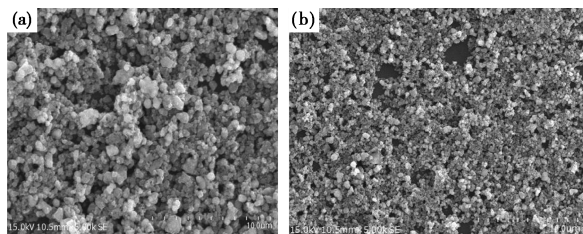


图3 MnO_2 (a)与 Ag-MnO_2-5 (b)的 SEM 图

2.3 EDS 分析

图4为 Ag-MnO_2-5 的 EDS 谱图。由图可知,不仅出现了 Mn 和 O 的特征峰,而且出现了明显的 Ag 特征峰,表明银元素已掺入到 MnO_2 晶格中。出现的硅元素是测试时所用硅片所致,少量 K 元素的存在是由于反应生成的 K^+ 吸附在样品上。

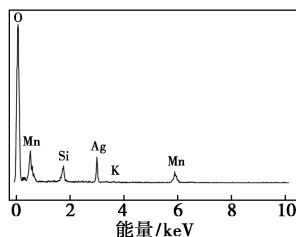


图4 Ag-MnO_2-5 的 EDS 谱图

2.4 BET 分析

表1列出了 MnO_2 与 Ag 掺杂 MnO_2 的 BET 参数。由表可见, MnO_2 经 Ag 掺杂后 BET 有了明显提高,这是因为 Ag 的掺入弥散,造成 MnO_2 晶格膨胀,阻止了团聚,并使得掺杂 MnO_2 比纯 MnO_2 具有更多的微孔,增大了外表面积。

表1 样品的 BET 参数

样品	微孔面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	外表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	BET/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
MnO_2	13.603	93.616	107.219
Ag-MnO_2-1	18.207	105.537	123.744
Ag-MnO_2-3	22.811	145.562	168.373
Ag-MnO_2-5	31.586	152.249	183.835
Ag-MnO_2-7	29.271	149.311	178.582

2.5 各因素对 Ag 掺杂 MnO_2 催化降解性能的影响

2.5.1 Ag 掺杂量

活性组分掺入量的变化可以导致活性组分分散度和纳米颗粒尺寸的变化,甚至影响载体的结构和

形貌,并最终影响催化剂的催化活性^[12-13]。在甲醛初始浓度为 $40\text{mg}/\text{m}^3$,催化剂用量均为 10g 的条件下,考察了 Ag 掺杂量对 Ag 掺杂 MnO_2 催化降解性能的影响,结果见图5。

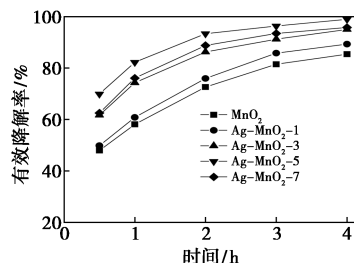


图5 Ag 掺杂量对 Ag 掺杂 MnO_2 催化降解性能的影响

由图可见,Ag 掺杂 MnO_2 对甲醛的催化氧化效果均好于未掺杂 MnO_2 。当 Ag 掺杂量由 0 增加到 5% 时,有效降解率随 Ag 掺杂量的增加逐步提高, Ag-MnO_2-5 对甲醛的降解效果最好。继续增加 Ag 掺杂量至 7%,其有效降解率反而下降。这表明,适量 Ag 掺杂不仅引发 MnO_2 晶格膨胀,抑制团聚,增加了反应面积^[14],同时银作为活性组分可以氧化 MnO_2 晶格中的氧,提供丰富的活性位点,增强银与 MnO_2 之间的协同作用,从而使催化性能明显提高^[15]。Ag 掺杂量少,则不能提供丰富的活性位点,但 Ag 掺杂过量又会诱导已分散的微粒重新聚集,降低催化剂面体比,削弱活性组分之间的协同作用^[14,16]。本实验结果表明,Ag 的最佳掺杂量为 5%。1h、2h、3h 和 4h 时, Ag-MnO_2-5 对甲醛的有效降解率分别达到 82.20%、93.29%、96.27% 和 98.91%,而未经掺杂的 MnO_2 对甲醛的有效降解率分别只有 58.06%、72.57%、81.44% 和 85.36%。由此可见,经 Ag 掺杂后 MnO_2 的催化氧化活性得到明显提高。

2.5.2 甲醛初始浓度

在催化剂为 Ag-MnO_2-5 ,用量均为 10g 的条件下,考察甲醛初始浓度对 Ag 掺杂 MnO_2 催化降解性能的影响,结果见图6。

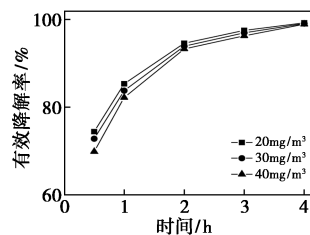


图6 甲醛初始浓度对 Ag 掺杂 MnO_2 催化降解性能的影响

由图可知,甲醛初始浓度对 Ag 掺杂 MnO_2 催化降解性能的影响主要体现在过程前 1h,随着催化氧化时间的延长,初始浓度对有效降解率的影响越来越小。这是因为,甲醛气体的催化氧化过程是一个动态吸附-催化氧化的循环过程,随着催化氧化反应的进行,实验舱内甲醛不断被降解,甲醇初始浓度对有效降解率的影响也逐步变小^[17]。图 6 的结果亦表明,Ag- MnO_2 -5 对高浓度甲醛气体有着很好的催化氧化能力。

2.5.3 催化剂用量

甲醛初始浓度为 $20\text{mg}/\text{m}^3$,催化剂为 Ag- MnO_2 -5 的条件下,考察了 Ag- MnO_2 -5 用量对 Ag 掺杂 MnO_2 催化降解性能的影响,结果见图 7。

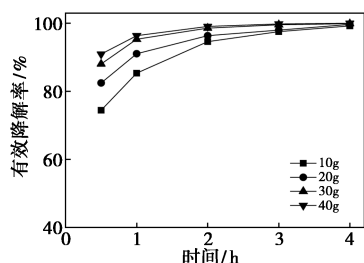


图 7 催化剂用量对 Ag 掺杂 MnO_2 催化降解性能的影响

由图可知,有效降解率随催化剂用量的增加而提高。当催化剂用量增加到 20g,4h 时甲醛有效降解率达 99.65%,此时实验舱内的剩余甲醛气体浓度已降至 $0.058\text{mg}/\text{m}^3$ 。当催化剂用量增至 30g,4h 时甲醛有效降解率提高到 99.85%;继续增加催化剂用量至 40g,在 4h 时已检测不出舱内的剩余甲醛气体。而在相同条件下,使用 20g 未经 Ag 掺杂的 MnO_2 催化降解 4h 时,实验舱内剩余甲醛气体浓度为 $1.763\text{mg}/\text{m}^3$;而如要在 4h 将舱内甲醛浓度降解至 $0.08\text{mg}/\text{m}^3$ 以下, MnO_2 用量须增至 50g。这表明,Ag 掺杂不仅提高了 MnO_2 对甲醛气体降解效果,而且可大大减少催化剂用量。

2.6 FT-IR 分析

Ag- MnO_2 -5 催化氧化甲醛前后的 FT-IR 谱图见图 8。由图可知, 520cm^{-1} 附近的吸收峰属于 Mn—O 的特征吸收峰^[18]; 3400 和 1100cm^{-1} 出现的吸收峰,主要是水分子表面—OH 的伸缩振动峰^[19]。催化氧化甲醛后,在 2356cm^{-1} 处出现 CO_2 吸收峰,说明 Ag 掺杂 MnO_2 将甲醛催化氧化成 CO_2 和 H_2O ^[20]。

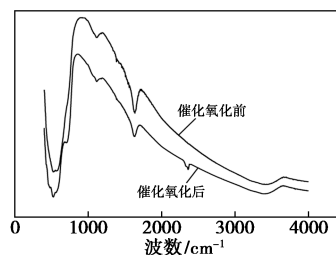


图 8 Ag- MnO_2 -5 催化氧化甲醛前后的 FT-IR 谱图

3 结论

低温液相氧化还原法制备银掺杂纳米 MnO_2 工艺简单,成本低。Ag 掺杂未改变 MnO_2 晶型,但细化了晶粒,大大增大了 MnO_2 的比表面积,显著的提高了 MnO_2 的催化活性和对甲醛的降解效果。Ag 的最佳掺杂量为 5%,常温、常压、无光照条件下,20g Ag- MnO_2 -5 对初始浓度 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 甲醛催化降解 4h 时,有效降解率达 99.65%,剩余甲醛气体浓度低于 $0.08\text{mg}/\text{m}^3$,完全达到 GB 50325—2010 关于 I 类民用建筑工程室内甲醛浓度的规定要求。

参考文献

- [1] 韩瑛玉,张华.载银氧化锰复合催化剂的制备及其室温下催化氧化甲醛性能[J].化工新材料,2014,42(9):135-140.
- [2] 杨俊涛,余倩,沈亮,等.ABS 基体化学镀铂催化剂室温净化甲醛的研究[J].化工新材料,2015,43(6):235-237.
- [3] 徐秋香,姜利利,陈云露.纺织品中甲醛含量超标的危害及控制方法[J].山东纺织科技,2016,57(5):24-26.
- [4] 蔡健,胡将军,张雁.改性活性炭纤维对甲醛吸附性能的研究[J].环境科学与技术,2004,27(3):16-19.
- [5] Rengga W D P, Chafidz A, Sudibandriyo M, et al. Silver nanoparticles deposited on bamboo-based activated carbon for removal of formaldehyde[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(2): 1657-1665.
- [6] 高如琴,郝丹迪,耿悦.多孔陶瓷固载 TiO_2 薄膜的制备及甲醛光催化动力学[J].复合材料学报,2016,33(1):142-148.
- [7] Duan Y Q, Yang S P, Yu J L, et al. Photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde by Fe-doped ZnO nanorods grown on ceramic spheres[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2014, 30(7): 1673-1677.
- [8] 程海军,丁欣宇,沈拥军,等.介孔二氧化锰的制备及催化氧化甲醛的研究[J].印染助剂,2016,33(8):5-9.
- [9] 黄薇.室内空气中甲醛污染控制研究[D].南昌:南昌大学,2007.
- [10] Lenoble V, Laclautre C, Serpaud B, et al. As(V) retention and As(III) simultaneous oxidation and removal on a MnO_2 -loaded polystyrene resin[J]. Science of the Total Environment, 2004, 326(1-3): 197-207.
- [11] 王杰.二氧化锰负载的金、银催化剂的制备及其光热催化性能

- 研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2014.
- [12] Yu X, He J, Wang D, et al. Facile Controlled synthesis of Pt/MnO₂ nanostructured catalysts and their catalytic performance for oxidative decomposition of formaldehyde[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(1): 851-860.
- [13] Chen D, Qu Z, Sun Y, et al. Identification of reaction intermediates and mechanism responsible for highly active HCHO oxidation on Ag/MCM-41 catalysts[J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2013, 142-143(5): 838-848.
- [14] Chen L C, Huang C M, Tsai F R. Characterization and photocatalytic activity of K⁺-doped TiO₂ photocatalysts[J]. *Journal of Molecular Catalysis A*, 2006, 265(1-2): 133-140.
- [15] Liu S, Qin X. Preparation of a Ag-MnO₂/graphene composite for the oxygen reduction reaction in alkaline solution[J]. *Rsc Advances*, 2015, 5(20): 15627-15633.
- [16] 石建行. MnO₂ 的掺杂及其催化氧化性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [17] 黄海燕. 纳米 TiO₂/VACF 光催化层净化室内空气中甲醛的实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [18] Zhang W, Mu B, Wang A. Halloysite nanotubes template-induced fabrication of carbon/manganese dioxide hybrid nanotubes for supercapacitors [J]. *Ionics*, 2015, 21 (8): 2329-2336.
- [19] Anirudhan T S, Jalajamony S, Sreekumari S S. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by amine and carboxylate functionalised bentonites [J]. *Applied Clay Science*, 2012, 65-66(9): 67-71.
- [20] 姜良艳, 周仕学, 王文超, 等. 活性炭负载锰氧化物用于吸附甲醛[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 337-341.

收稿日期: 2017-10-09

(上接第 97 页)

- [15] Ye Y, Zhang Y, Fan J, et al. Novel method for production of phenolics by combining lignin extraction with lignin depolymerization in aqueous ethanol [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 51(1): 103-110.
- [16] 张福勤, 黄伯云, 黄启忠, 等. 炭/炭复合材料石墨化度的研究进展[J]. *矿冶工程*, 2000, 20(4): 10-13.
- [17] 黄斌, 邓海金, 李明, 等. 石墨化热处理对碳/碳复合材料激光拉曼特性的影响[J]. *材料热处理学报*, 2005, 26(6): 20-24.
- [18] Guo X, Fan Q, Yu L, et al. Sandwich-like LiFePO₄/graphene hybrid nanosheets: in situ catalytic graphitization and their high-rate performance for lithium ion batteries [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013(38): 11534-11538.
- [19] Deng D, Pan X, Yu L, et al. Toward N-doped graphene via solvothermal synthesis [J]. *Chemistry of Materials*, 2011, 23(5): 1188-1193.
- [20] Chen W, Yan L, Bangal P R. Preparation of graphene by the rapid and mild thermal reduction of graphene oxide induced by microwaves [J]. *Carbon*, 2010, 48(4): 1146-1152.
- [21] 马贵香, 赵江红, 郑剑锋, 等. 氮掺杂石墨烯的制备及其电催化氧气还原性能[J]. *新型碳材料*, 2012, 27(4): 258-265.
- [22] Ren P G, Yan D X, Ji X, et al. Temperature dependence of graphene oxide reduced by hydrazine hydrate [J]. *Nanotechnology*, 2010, 22(5): 1-8.
- [23] 南松楠, 张宏伟, 王钦雯. 石墨烯基导电纸的制备及性能研究 [J]. *材料研究学报*, 2017, 30(11): 855-860.
- [24] Nethravathi C, Rajamathi M. Chemically modified graphene sheets produced by the solvothermal reduction of colloidal dispersions of graphite oxide [J]. *Carbon*, 2008, 46(14): 1994-1998.
- [25] Dey R S, Hajra S, Sahu R K, et al. A rapid room temperature chemical route for the synthesis of graphene: metal-mediated reduction of graphene oxide [J]. *Chemical Communications*, 2012, 48(12): 1787-1789.
- [26] Novoselov K S, Jiang D, Schedin F, et al. Two-dimensional atomic crystals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(30): 10451-10453.
- [27] Yu D, Liu F. Synthesis of carbon nanotubes by rolling up patterned graphene nanoribbons using selective atomic adsorption [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(10): 3046-3050.

收稿日期: 2017-09-28

修稿日期: 2018-11-15

(上接第 102 页)

- [26] 黄正宏, 康飞宇, 梁开明, 等. 氧化处理 ACF 对 VOC 的吸附及其等温线的拟合 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2002, 42(10): 1289-1292.
- [27] Jain S, Jayaram R V. Removal of basic dyes from aqueous solution by low-cost adsorbent: wood apple shell (*Feronia acidissima*) [J]. *Desalination*, 2010, 250(3): 921-927.
- [28] 殷国俊. 活性炭吸附 CO₂ 的基础研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [29] 周烈兴, 钱天才, 王绍华. 活性炭掺杂氧化锌对苯的吸附等温线测定及甲苯的吸附等温线预测 [J]. *功能材料*, 2010, 41(8): 1473-1476.
- [30] 张玲, 詹肇麟, 张天栋, 等. 高比表面积多孔炭质材料的孔结构特性及对苯酚的吸附 [J]. *化工新型材料*, 2017, 45(2): 117-119.
- [31] Gangupomu R H, Sattler M L, Ramirez D. Comparative study of carbon nanotubes and granular activated carbon: physico-chemical properties and adsorption capacities [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 302(1): 362-374.
- [32] 张春晓, 白福臣, 潘振远, 等. 有机高分子吸湿材料的吸附模型与机理 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(3): 83-87.
- [33] Konggidinata M I, Chao B, Lian Q, et al. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for adsorption of BTEX onto ordered mesoporous carbon (OMC) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 336(1): 249-259.

收稿日期: 2017-09-28

修稿日期: 2018-10-17