

氧化石墨烯修饰蔗渣生物炭吸附 CO₂ 的研究

王立春 马丽萍* 彭雨惠 敖冉 郭致莹

(昆明理工大学环境科学与工程学院,昆明 650500)

摘 要 以甘蔗渣为原料,通过浸渍法制备了生物炭/氧化石墨烯复合吸附剂,研究了氧化石墨烯含量不同的复合吸附剂在压力 101.325kPa、温度 30℃ 条件下对 CO₂ 的吸附性能,并通过比表面积及孔径分析仪、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、傅里叶变换红外光谱仪、X 射线光电子能谱仪对复合吸附剂进行了表征。结果表明:热解温度为 900℃ 得到的生物炭表现出最高的 CO₂ 捕集能力,CO₂ 吸附量达到 57.4mg/g;当氧化石墨烯负载量为 9% (质量分数)时,复合吸附剂表现出最优的 CO₂ 捕集能力,CO₂ 吸附量为 77.5mg/g,与生物炭相比,氧化石墨烯修饰的生物炭对 CO₂ 的捕集能力提高了 35%;复合吸附剂对 CO₂ 的吸附能力受表面含氧官能团、生物炭的芳香化程度以及 CO₂ 与吸附剂表面趋近角度的影响。

关键词 生物炭,氧化石墨烯,二氧化碳,吸附

中图分类号 X511;X712

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2020)07-0108-06

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2020.07.026

Research on GO modified bagasse biochar for CO₂ adsorption

Wang Lichun Ma Liping Peng Yuhui Ao Ran Guo Zhiying

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract Graphene oxide(GO) modified biochar adsorbent was prepared by impregnation method. The adsorption performance of different content of the sorbent on CO₂ was studied in 101.325kPa, 30℃. The sorbent was characterized by BET, SEM XRD, FT-IR and XPS. The results shown that the raw biochar obtained by pyrolysis at 900℃ shown the highest capture capacity of CO₂ in unmodified biochar sorbents(57.4mg/g). As the load capacity of GO was 9wt%, the composite sorbent shown the optimal capture capacity of CO₂(77.5mg/g) which was increased by 35% compared with that of unmodified biochar. The adsorption capacity of the sorbent for CO₂ was affected by surface oxygen functional groups, aromatization degree of biochar and the approaching angle between CO₂ and adsorbent surface.

Key words biochar, graphene oxide, CO₂, adsorption

气候变暖是当今世界重要的环境问题,而其中 CO₂ 被认为是造成全球变暖的重要因素^[1]。目前我国能源仍以化石燃料为主,我国已成为世界第一的碳排放大国^[2],因此控制碳排放是亟需解决的问题。我国承诺在 2020 年前将单位国内生产总值(GDP)CO₂ 排放量在 2005 年的基础上削减 40%~45%,完成这个艰巨的任务面临着压力。目前干法吸附剂被认为是一种经济有效、可再生、对环境友好的吸附剂^[3]。

生物炭(BC)材料因来源广泛、价格便宜、易于再生、拥有较大的比表面积和孔体积等优点而受到关注^[4-6]。Liu 等^[7]利用咖啡渣作为生物质原料制

备了 CO₂ 吸附剂,发现该吸附剂具有较强的吸附能力和高效的 CO₂ 选择性,可应用于火电厂。Manyà 等^[8]以藤蔓为原料制备了具有高吸附能力和高选择性的 CO₂ 吸附剂。研究表明,热解温度 800℃ 时制备的活性炭吸附剂对 CO₂ 的吸附效果最好且再生所需的能量相对较低。

氧化石墨烯(GO)因优异的光学特性、机械性能和高导电性^[9-11]而备受关注。Zhang 等^[12]制备了四乙烯五胺改性 GO,四乙烯五胺质量分数为 3% 和 5% 时改性 GO 表现出最佳的吸附能力。Alhwaige 等^[13]利用冷冻干燥法制备了不同掺杂量的 GO/壳聚糖气凝胶复合物。结果表明 GO 负载量为 20%

基金项目:昆明理工大学分析测试基金(2017M20162207054)

作者简介:王立春(1993-),男,硕士研究生,研究方向为固体废弃物资源化。

联系人:马丽萍(1966-),女,教授,从事固体废弃物资源化利用及大气污染控制研究工作。

(质量分数)时,壳聚糖的比表面积从 153m²/g 增加到 415m²/g,25℃条件下 CO₂ 吸附量由 1.92mmol/g 增加到 4.15mmol/g,经过多次吸附-脱附循环,GO/壳聚糖气凝胶复合物仍能保持良好的吸附稳定性。Szcześniak 等^[14]制备的 GO/有序介孔碳材料在 0℃,压力 101.325kPa 条件下 CO₂ 吸附量达到 6mmol/g。

本研究以甘蔗渣为原料,采用湿法浸渍制备生物炭/氧化石墨烯(BG)复合吸附剂,采用热重分析仪、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、比表面积及孔径分析仪对其进行了表征,并研究了复合吸附剂在 30℃,压力 101.325kPa 条件下对体积分数为 100% CO₂ 的吸附-脱附性能。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

甘蔗渣、石墨粉(600 目)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS,纯度 ≥ 90.0%)、硝酸钠(NaNO₃,纯度 ≥ 99.0%)、二氧化碳(纯度 ≥ 99.9%)、氮气(纯度 ≥ 99.99%);浓硫酸(H₂SO₄)、高锰酸钾(KMnO₄)、过氧化氢(H₂O₂)、盐酸(HCl),均为分析纯。

粉碎机(CS-700 型),武义海纳电器有限公司;管式炉(KTL1700 型),南京南大仪器有限公司;数控超声波清洗器(KQ-400DE 型),昆山市超声仪器有限公司;85-2 控温磁力搅拌器(XMTD-702 型),金坛市医疗仪器厂;热重分析仪(TG, HCT-3 型),北京恒久科学仪器厂;比表面积及孔径分析仪(Autosorb-IQ 型),美国康塔公司;扫描电子显微镜(SEM, S4800 型),日本日立公司;X 射线衍射仪(XRD, Empyrean 型),荷兰 PANalytical 公司;傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, ALPHA 型),德国 Bruker 公司;X 射线光电子能谱仪(XPS, K-Alpha+ 型),美国赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验过程

1.2.1 GO 的制备

通过改性 Hummers 法制备 GO。取 70mL 浓 H₂SO₄ 置于冰水混合液的三口烧瓶中,称量 2.0g 石墨粉(600 目)、1.0g NaNO₃、0.1g SDBS,加入到三口烧瓶中,于 5℃机械搅拌 2.0h,将温度逐渐升温至 38.0℃保温 2.0h,期间分 10 次均匀投加共 12.0g KMnO₄,然后添加 150mL 去离子水并升温至 95.0℃,恒温 30min,加入 300mL 去离子水终止反应,最后加入 50mL 质量分数为 30%的 H₂O₂ 溶液和质量分数为 5%的 HCl 溶液,并用沸腾的去离

子水洗涤若干次至 pH=6~7,转移至烧杯,于 60℃干燥,得到片状 GO 薄膜。

1.2.2 BC 的制备

将经过 100℃干燥处理的适量甘蔗渣置于坩埚,在 N₂ 气氛下以 5℃/min 的升温速率升至不同温度(500℃、600℃、700℃、800℃、900℃、1000℃),恒温 2h 进行甘蔗渣的热解,然后自然冷却至室温,用去离子水清洗多次,于 100℃烘干,得到 BC。根据热解温度,制备的 BC 样品分别记作 BC500、BC600、BC700、BC800、BC900、BC1000。

1.2.3 BG 复合吸附剂的制备

取 1.0g BC 分散到 200mL 去离子水中超声 2h 至均匀分散状态;取相应质量的 GO 分散到 100mL 去离子水中,超声 1h 至均匀分散状态。然后将 GO 分散液倒入 BC 分散液中,得到混合溶液,持续超声 2h 至均匀分散,得到 BG 复合物分散液,将复合物分散液转移至反应釜,置于烘箱中于 160℃恒温 5h,取出自然冷却至室温,将复合物分散液转移到烧杯于 80℃干燥,得到 BG 复合吸附剂。

根据 GO 负载量,将制备的复合吸附剂样品分别记作 BGX(X 为 GO 在复合物中的质量分数,X=9%、16.67%、23.3%、40%、50%、60%、70%、90%)。

1.3 CO₂ 吸附性能测试

利用热重分析仪对 BC、GO 和 BG 复合吸附剂分别进行吸附性能测试。取 6mg 左右样品置于小坩埚中,在 N₂ 气氛下以 100mL/min 的流量吹扫 30min,然后在 N₂ 气氛下从室温升至 150℃保温 1h,脱除样品吸附的水,自然冷却至 30℃切换至纯 CO₂ 气氛,气流量为 50mL/min,于 30℃恒温 120min。

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

图 1 为 BC 样品的 SEM 图。从图可以看出,不同热解温度得到的 BC 均保留了甘蔗渣的孔隙结构,但热解温度大于 900℃时,甘蔗渣的原始孔隙结构被破坏,并且所得 BC 的比表面积、孔体积也随之减小。样品 BC900 表面存在发达的孔隙结构,这也为 GO 在其表面的浸渍提供了可能。

图 2 为 BG 复合吸附剂样品的 SEM 图。由图可以看出,GO 的负载对 BC 的表面结构和形貌有显著影响。随着 GO 负载量的增加,BC 表面原本丰富的孔隙结构逐渐被 GO 薄膜覆盖,褶皱和沟壑增多,有序程度降低。

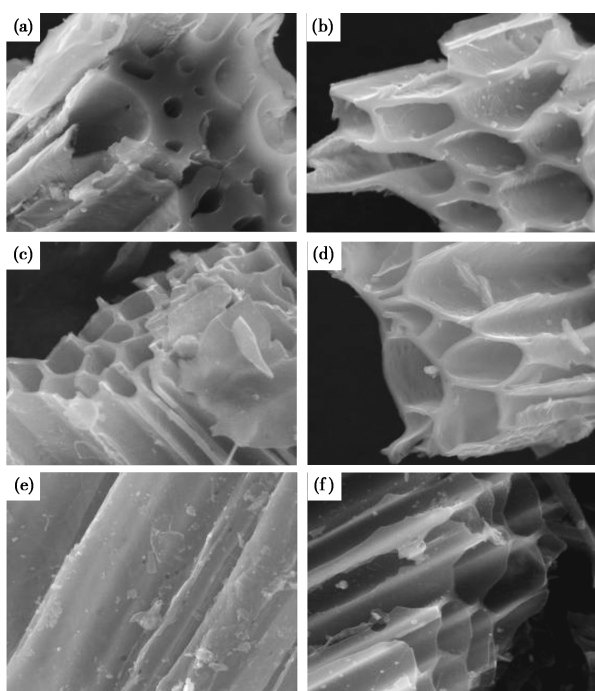


图 1 BC 样品的 SEM 图
[(a)BC500;(b)BC600;(c)BC700;(d)BC800;
(e)BC900;(f)BC1000]

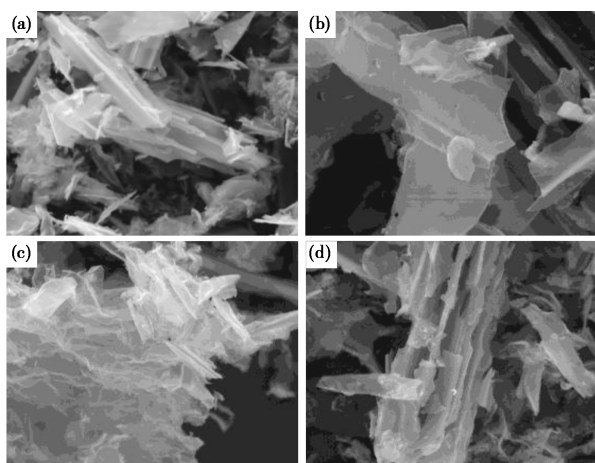


图 2 BG 复合吸附剂样品的 SEM 图
[(a)BG9;(b)BG16.67;(c)BG40;(d)BG60]

表 1 样品的孔结构参数

样品	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/ nm
BC500	3.067	0.01040	13.60
BC600	2.733	0.01300	19.00
BC700	179.997	0.12000	2.66
BC800	286.176	0.17800	2.49
BC900	519.026	0.30700	2.36
BC1000	358.011	0.26500	2.96
GO	33.440	0.03453	4.13
BG9	62.749	0.09030	5.75

表 1 为样品的孔结构参数。由表可知,负载 GO 后,BG9(BGX,X=9%)的比表面积大幅降低,平均孔径增加。这可能是因为 GO 在 BC 表面以薄膜的形式存在,严重堵塞了 BC 的大量微孔,同时在复合过程中,BC 的混乱程度增加,有序的孔结构遭到较强程度的破坏,令 BG9 比表面积和孔体积出现较大幅度的降低,从而在一定程度减弱了 BG9 对 CO_2 的吸附能力。

2.2 XRD 分析

GO 及 BG 复合吸附剂样品的 XRD 谱图见图 3。由图可知,GO 的主特征峰出现在衍射角 $2\theta=10.87^\circ$ 处,对应的层间距为 8.13nm,相比于石墨的层间距有所增大。这是因为在 GO 夹层中存在含氧官能团和少许水分子^[15], CO_2 分子的动力学直径为 0.33nm,这使得 CO_2 分子通过扩散进入层间,并在层间羟基、羧基等含氧官能团和水分子的阻碍下降低运动速度,最终吸附在 GO 层内。BG 复合吸附剂样品在衍射角 $2\theta=25^\circ$ 和 43° 处分别出现 2 个峰,对应 BC 的特征峰^[16],GO 位于 $2\theta=10.87^\circ$ 附近的特征峰在 BG 的谱图中消失,说明 GO 在 BC 中分散良好,无明显的团聚现象。随着 GO 负载量的增加,BG 复合吸附剂中的杂质峰减少,位于 $2\theta=18\sim 36^\circ$ 处的纤维素石墨微晶的晶面衍射峰强度逐渐增加,说明 GO 的引入降低了 BC 中对 CO_2 吸附作用弱的杂质的含量,提高了纤维素石墨微晶的结晶度,增强了 BC 的稳定性。

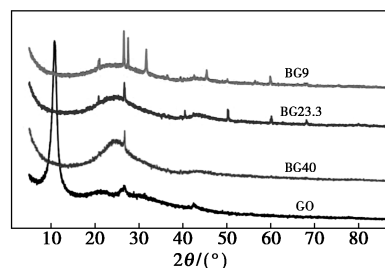


图 3 GO 及 BG 复合吸附剂样品的 XRD 谱图

2.3 FT-IR 分析

GO 和 BG9 的 FT-IR 谱图见图 4。由图可知: 3428cm^{-1} 、 2912cm^{-1} 、 2364cm^{-1} 、 1641cm^{-1} 、 1162cm^{-1} 处分别为—OH 伸缩振动吸收峰,C—H 伸缩振动吸收峰,空气中 CO_2 的 C—O 不对称伸缩振动吸收峰,C=C 的振动吸收峰,C—O—C 的吸收峰^[17-19]; 1268cm^{-1} 和 1066cm^{-1} 处为—C—OH 的伸缩振动吸收峰; 1403cm^{-1} 处为—C—OH 的弯曲振动吸收峰^[18,20]。由图可以看出,GO 和 BG9 的 FT-IR 谱图比较相似,说明 GO 与 BC 复合后其表面的主要官

能团仍得到保留,GO 的引入为 BC 提供了较为丰富的含氧官能团,提供了大量的吸附位点。BG9 在 3428cm⁻¹ 处的—OH 发生微弱的蓝移,这可能是 GO 与 BC 之间形成了少许分子间氢键导致的。

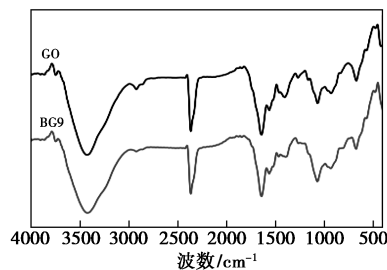


图 4 GO 和 BG9 的 FT-IR 谱图

2.4 XPS 分析

采用 X 射线光电子能谱仪测定 BG9 的表面元素价态,BG9 的 XPS 谱图见图 5。由图 5(a)可知:C1s 谱图中主要出现 5 个峰,结合能较低的 3 个峰分别位于 284.5eV(石墨碳)、285.3eV(C—OH 或 C—O—C)、288.5eV(—COOH)^[21];而结合能较高的 2 个峰与 C1s 重叠的 K2p 的峰分别位于 293.3eV(K2p_{3/2})和 296eV(K2p_{1/2})^[22]。由图 5(b)可知,O1s 谱图中出现 3 个峰,分别位于 531.7eV(C=O)、533.2eV(C—OH)、535.9eV(H—O—H)^[21,23]。C1s 谱图表明 BG9 表面含有大量的羟基、烷氧基和羧基类含氧官能团,并且存在一定量的吸附水。研究表明含氧官能团有助于提高吸附剂对 CO₂ 的吸附能力,其中—COOH 能够增强吸附剂对 CO₂ 的选择性吸附能力^[24],因此 GO 表面丰富的含氧官能团能够增强 BC 对 CO₂ 的吸附能力,并增强其对于 CO₂ 的吸附选择性。但是吸附剂对空气中的水有较强的吸附能力,会使水分子占据一定的吸附位点和部分孔隙结构,降低了吸附剂对 CO₂ 的吸附能力。

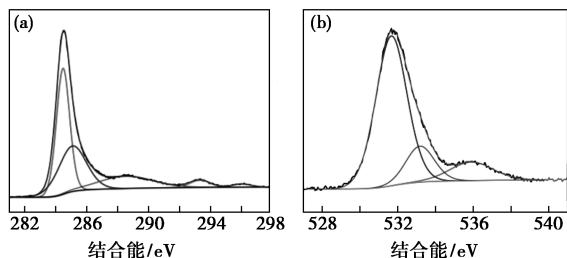


图 5 BG9 的 XPS 谱图

[(a)C1s;(b)O1s]

2.5 CO₂ 吸附性能研究

在压力 101.325kPa、温度 30℃ 条件下,BC 样品的 CO₂ 吸附曲线图见图 6。由图可知:随着热解

温度的升高,BC 样品对 CO₂ 吸附量整体呈上升趋势;其中 BC900 对 CO₂ 的吸附能力最强,达到 57.4mg/g。这可能是因为较高的温度下得到的 BC 具有更大的比表面积和孔体积,更利于吸附 CO₂ 的吸附。

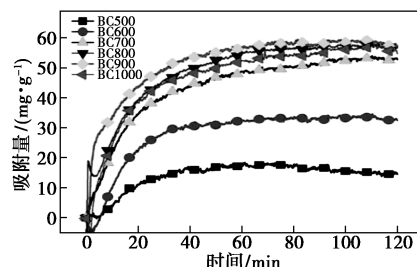


图 6 BC 样品的 CO₂ 吸附曲线图

图 7 为 GO 负载量不同的 BG 复合吸附剂样品的 CO₂ 吸附曲线图。由图可知:当 GO 负载量为 9%(wt,质量分数,下同)时,BG9 对 CO₂ 的吸附能力最强,达到 77.5mg/g。这可能是因为当 GO 负载量小于 9%时,GO 提供的含氧官能团有限,而且还造成了 BC 孔隙堵塞,导致其比表面积和孔体积减小,抑制了其对 CO₂ 的吸附;而当 GO 负载量大于 9%时,GO 的引入抑制了 BG 复合吸附剂对 CO₂ 的吸附。造成这种现象的原因目前尚不清楚,需要进行进一步的探究。

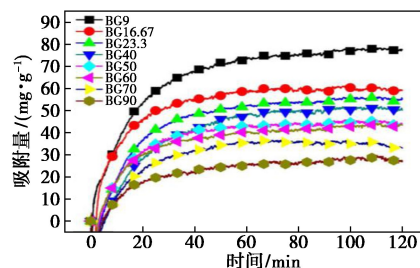


图 7 GO 负载量不同的 BG 复合吸附剂样品的 CO₂ 吸附曲线图

2.6 吸附机理研究

BG 复合吸附剂吸附 CO₂ 主要分为以下步骤:CO₂ 首先通过外扩散突破 BG 表面的气膜扩散到其外表面,在快速扩散过程中部分 CO₂ 吸附在 BG 的外表面;然后部分气体通过 BG 上的孔结构扩散进入其内部结构,此过程中部分 CO₂ 分子吸附在孔径内壁,部分 CO₂ 扩散进入孔结构中的微孔并被微孔吸附。

以芳香化碳结构为例说明 CO₂ 在吸附剂表面的吸附机理(见图 8)。CO₂ 分子中的 C 原子成正电势,O 原子为负电势,而 BC 表面的芳香化结构使

BC 表面呈电负性,具有较强的吸电子能力。在 CO_2 分子进行扩散运动的过程中,当 CO_2 分子以平行于吸附剂表面向其运动时,由于静电作用 CO_2 被吸附在吸附剂的表面;当 CO_2 分子垂直于吸附剂表面向其运动时,由于静电斥力, CO_2 分子较难靠近吸附剂的表面,无法与吸附剂表面形成稳定的相互作用力,导致 CO_2 难以稳定吸附在吸附剂表面。BG9 表面含有较为丰富的含氧官能团,羧基、羟基这类酸性基团中的氢原子能够与电负性强的原子形成相对于范德华力的氢键,即 CO_2 中具有较强电负性的 O 原子能够通过与羟基、羧基中的 H 原子相互作用,进而使 CO_2 能够较稳定地吸附在吸附剂表面。 H_2O 中的 H 原子相比于 CO_2 中 C 原子具有更强的正电势,与吸附剂表面具有更强的相互作用力,相比于 CO_2 吸附更加牢固,而 H_2O 与 CO_2 分子之间也存在着弱静电作用(极性分子与非极性分子之间存在的诱导力),这种弱静电作用会促进 CO_2 的吸附。

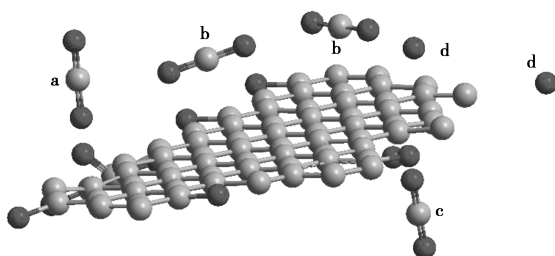


图 8 CO_2 吸附机理图

(注:a 为与平面结构垂直靠近—COOH 的 CO_2 ;b 为与平面结构平行的 CO_2 分子;c 为与平面结构垂直靠近—OH 的 CO_2 ;d 为水分子。)

3 结论

(1)随着热解温度的升高,BC 的比表面积和孔体积在 900°C 时最大,分别为 $519.026\text{m}^2/\text{g}$, $0.307\text{cm}^3/\text{g}$,在压力 101.325kPa 、温度 30°C 时对 CO_2 的吸附能力最强,达到 $57.4\text{mg}/\text{g}$;GO 负载量为 9%时,BG9 对 CO_2 吸附能力达到 $77.5\text{mg}/\text{g}$,比 BC 吸附能力提高了 35%。

(2)甘蔗渣的纤维孔道结构为 CO_2 捕集提供了天然的孔道结构,利于 CO_2 分子的扩散和捕集;GO 为 BC 提供了更多的含氧官能团(—OH, COOH, C—O—C),增强了 BC 对 CO_2 的捕集能力;BG 复合吸附剂较高的芳香化程度可以使其表面呈现较强的电负性,有利于 CO_2 的吸附。 CO_2 分子在扩散过程中以平行于吸附剂表面的状态趋近时,更容易形

成稳定的吸附态,当 CO_2 与吸附剂表面呈垂直态时,较难形成稳定的吸附态。此外,水分子依靠自身与 CO_2 分子间的作用力能够提升 BG 复合吸附剂的 CO_2 捕集能力。

参考文献

- [1] Oh T H. Carbon capture and storage potential in coal-fired plant in malaysia-a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2697-2709.
- [2] 门淑莲, 颜易. 碳排放转移及我国的应对之策[J]. 环境保护, 2012(10): 39-41.
- [3] Yu C H, Huang C H, Tan C S. A review of CO_2 capture by absorption and adsorption[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2012, 12(5): 745-769.
- [4] Ho S H, Zhu S S, Chang J S. Recent advances in nanoscale-metal assisted biochar derived from waste biomass used for heavy metals removal[J]. Bioresource Technology, 2017, 246: 123-134.
- [5] Bamdad H, Hawboldt K, Macquarrie S. A review on common adsorbents for acid gases removal; focus on biochar[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1705-1720.
- [6] 张青. 以生物质为碳源制备多孔碳及其吸附性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- [7] Liu S H, Huang Y Y. Valorization of coffee grounds to biochar-derived adsorbents for CO_2 adsorption[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 175: 354-360.
- [8] Manyà J J, González B, Azuara M, et al. Ultra-microporous adsorbents prepared from vine shoots-derived biochar with high CO_2 uptake and CO_2/N_2 selectivity[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 345: 631-639.
- [9] Chen J F, Hu Y Y, Huang W T, et al. Enhanced electricity generation for biocathode microbial fuel cell by in situ microbial-induced reduction of graphene oxide and polarity reversal[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(17): 12574-12582.
- [10] Park O K, Tiwary C S, Yang Y, et al. Magnetic field controlled graphene oxide-based origami with enhanced surface area and mechanical properties[J]. Nanoscale, 2017, 9(21): 6991-6997.
- [11] Schoche S, Hong N, Khorasaninejad M, et al. Optical properties of graphene oxide and reduced graphene oxide determined by spectroscopic ellipsometry[J]. Applied Surface Science, 2017, 421: 778-782.
- [12] Zhang Y, Chi Y, Zhao C Z, et al. CO_2 adsorption behavior of graphite oxide modified with tetraethylenepentamine[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2018, 63(1): 202-207.
- [13] Alhwaige A A, Agag T, Ishida H, et al. Biobased chitosan hybrid aerogels with superior adsorption; role of graphene oxide

- in CO₂ capture[J]. RSC Advances, 2013, 3(36): 16011-16020.
- [14] Szcześniak B, Choma J, Jaroniec M. Effect of graphene oxide on the adsorption properties of ordered mesoporous carbons toward H₂, C₆H₆, CH₄ and CO₂ [J]. Microporous & Mesoporous Materials, 2018, 261: 105-110.
- [15] Chowdhury S, Parshetti G K, Balasubramanian R. Post-combustion CO₂ capture using mesoporous TiO₂/graphene oxide nanocomposites[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 263: 374-384.
- [16] 余峻峰, 陈培荣, 俞志敏, 等. KOH 活化木屑生物炭制备活性炭及其表征[J]. 应用化学, 2013, 30(9): 1017-1022.
- [17] 乔涛, 邢蓉, 张永才, 等. γ -MnOOH 和 β -MnO₂ 纳米线的低温合成与表征[J]. 功能材料, 2004, 35(z1): 2823-2826.
- [18] 董丽丽, 邢翠娟, 祁瑞芳, 等. 氧化石墨烯制备条件及其对其性状的影响[J]. 山东化工, 2018, 47(7): 13-15.
- [19] 唐杰, 邓继勇. 氧化石墨烯改性纤维素的制备及对 Cu²⁺ 吸附性能的研究[J]. 滁州学院学报, 2015, 17(5): 57-61.
- [20] 罗海燕, 周靖, 张燕娟, 等. 氧化石墨烯的制备及其对罗丹明 B 的吸附性能[J]. 化工新型材料, 2019, 47(1): 172-176; 180.
- [21] Huang H C, Ye D Q, Huang B C. Nitrogen plasma modification of viscose-based activated carbon fibers[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(24): 9533-9540.
- [22] 尹宗杰, 汪霆, 邢华朝. XPS 数据处理方法技巧[J]. 山东化工, 2017, 46(12): 89-93.
- [23] Chen H, Guo Y C, Wang F, et al. An activated carbon derived from tobacco waste for use as a supercapacitor electrode material[J]. New Carbon Materials, 2017, 32(6): 592-599.
- [24] 张锦, 张登峰, 霍培丽, 等. 煤基质表面官能团对二氧化碳及甲烷吸附性能作用规律的研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(6): 1977-1988.
- 收稿日期: 2019-03-07
修回日期: 2020-03-25

~~~~~  
(上接第 103 页)

- [7] Visakh P M, Thomas S, Oksman K, et al. Crosslinked natural rubber nanocomposites reinforced with cellulose whiskers isolated from bamboo waste: processing and mechanical/thermal properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(4): 735-741.
- [8] Gao P, Zhang Y. Synthesis and characterization of zinc borate nanowhiskers and their inflaming retarding effect in polystyrene[J]. Journal of Nanomaterials, 2015, 2015: 1-6.
- [9] Li S, Long B, Wang Z, et al. Synthesis of hydrophobic zinc borate nanoflakes and its effect on flame retardant properties of polyethylene[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2010, 183(4): 957-962.
- [10] Sharma R, Kamal A, Abdinejad M, et al. Advances in the synthesis, molecular architectures and potential applications of gemini surfactants[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 125: 63-68.
- [11] Qiao M, Chen J, Yu C, et al. Gemini surfactants as novel air entraining agents for concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100: 40-46.
- [12] De S, Aswal V K, Goyal P S, et al. Characterization of new gemini surfactant micelles with phosphate headgroups by SANS and fluorescence spectroscopy[J]. Chemical Physics Letters, 1999, 303(3-4): 295-303.
- [13] Feng C, Zhang Y, Liang D, et al. Influence of zinc borate on the flame retardancy and thermal stability of intumescent flame retardant polypropylene composites[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 115: 224-232.
- 收稿日期: 2019-04-04  
修回日期: 2020-05-10

~~~~~  
(上接第 107 页)

- [6] Gumarov A K, Garipov R M, Stoyanov O V. Modified coatings based on chlorosulfonated polyethylene[J]. Polymer Science, 2013, 6(3): 222-227.
- [7] Mcalvey A. Vulcanizable chlorosulfonated polymers; US, US2586363A[P]. 1947-05-19.
- [8] Dixon S, Ennis Royce E, Kalil J, et al. Process for continuously chlorosulfonating polyethylene at higher temperatures; US, US3296222A[P]. 1967-03-01.
- [9] 宋结东. 气固相法的高粘度高填充性氯磺化聚乙烯的制备方法: CN 101735350A[P]. 2010-06-16.
- [10] 白杰. 固液三相反应制备氯磺化聚乙烯的方法: CN 102153683A[P]. 2011-08-17.
- [11] 赵季若, 冯莺, 曹桂芳, 等. 固相法合成氯磺化聚乙烯[J]. 石油化工, 1996, 25(3): 172-175.
- [12] Bai X, He X, Zhang J, et al. Improvement of interfacial interaction, dispersion, and properties of chlorosulfonated polyethylene/SiO₂ nanocomposites using CSPE-g-SiO₂ nanoparticles synthesized under ultrasonics[J]. Polymer Composites, 2012, 33(6): 940-950.
- [13] 赵旭涛, 刘大华. 合成橡胶工业手册(第二版)[M]. 化学工业出版社, 2006, 1215-1252.
- 收稿日期: 2018-11-05
修回日期: 2020-04-20