

# 胺基改性花生壳粉吸附剂的制备及其对 SO<sub>2</sub> 的吸附

夏维清, 黄恋涵, 朱晓帆\*

(四川大学分析测试中心, 四川 成都 610065)

**摘要:**以花生壳为原料,经溶胀、氯化及胺化改性制备 SO<sub>2</sub> 吸附材料。利用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、扫描电子显微镜(SEM)、元素分析仪(EA)等分析手段对样品进行表征和测试,并探究了胺试剂种类、吸附剂含水率、烟气流速、吸附温度对 SO<sub>2</sub> 吸附效果的影响。结果表明,胺基改性花生壳吸附剂脱硫效果明显;改性后花生壳纤维分子中引入了胺基,含氮量增加,吸附剂表面卷曲粗糙,孔洞明显;改性后吸附剂硫容与吸附剂中含氮量有关;链状结构的乙烯胺改性剂效果优于带有支链的尿素。实验中三乙烯四胺基花生壳(PS-TT)在含水率为100%、烟气流速为400 mL/min、吸附温度为35℃的优化条件下,硫容能达74.6 mg/g。

**关键词:**花生壳;胺化改性;SO<sub>2</sub>;吸附性能

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)12-0145-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.12.032

## Preparation of amine modified peanut shell powder and its adsorption to SO<sub>2</sub>

XIA Wei-qing, HUANG Lian-han, ZHU Xiao-fan\*

(Analytical and Testing Center, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A adsorption material for SO<sub>2</sub> is prepared with peanut shell as raw material through swelling, chlorination and amination modification. The samples are characterized and tested by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM) and elemental analyzer (EA). Influences of amine reagent types, water content in adsorbent, flue gas velocity and adsorption temperature on the adsorption efficiency to SO<sub>2</sub> are investigated. The experimental results indicate that amine modified peanut shell adsorbent has good desulfurization efficiency. After modification, amine groups are grafted into peanut shell fiber molecular, which causes nitrogen content to increase. The surface of modified adsorbent is curling and rough, with obvious pores. The adsorption capacity of modified adsorbent to SO<sub>2</sub> is corresponded with nitrogen content of adsorbent. Vinylamine modifier with a chain structure performs a better adsorption performance than urea modifier with branched chain. In the experiment, the adsorption capacity of triethylene tetramine-peanut shell (PS-TT) to SO<sub>2</sub> can reach 74.6 mg·g<sup>-1</sup> under the optimal conditions as follows: water content is 100%, flue gas flow is 400 mL·min<sup>-1</sup> and adsorption temperature is at 35℃.

**Key words:** peanut shell; amination modification; SO<sub>2</sub>; adsorption performance

二氧化硫(SO<sub>2</sub>)是衡量大气是否遭到污染的重要标志<sup>[1]</sup>。SO<sub>2</sub>的大量排放威胁人类身体健康,给生态环境造成严重破坏,同时也是造成酸雨和雾霾天气重要因素<sup>[2-4]</sup>。吸附法是广泛应用的脱硫方法,具有二次污染少、工艺过程简单、热稳定性好、化学性质稳定等优点<sup>[5-6]</sup>。吸附法脱硫以活性炭吸附为主要方式,但存在运行费用高、强度低、能耗大等不足。

含纤维素的农产品废弃物具有潜在的吸附性能,且价格低廉、来源广泛<sup>[7]</sup>。根据中国年鉴统计,2016年我国花生产量1 729万t,相应产生花生壳约345万t,除少量花生壳作为粗饲料外,大量的花生壳被烧掉或扔掉,造成资源浪费。花生壳的主要成分是纤维素、半纤维素和木质素等<sup>[8]</sup>,其中纤维素是由D-吡喃葡萄糖酐通过β-1,4苷键连接的立体

规整性高分子化合物,在其大分子链中每个葡萄糖基环上有3个活泼的羟基,即2个仲羟基和1个伯羟基。通过改性可以将一些功能基团引入到羟基位置。

目前,研究者主要将花生壳改性作为吸附剂去除废水中的重金属离子<sup>[9-15]</sup>、磷<sup>[16]</sup>和染料<sup>[7,17]</sup>等,LIU等<sup>[18-20]</sup>将稻草秸秆改性并用于SO<sub>2</sub>的吸附有较好的效果,但关于花生壳吸附剂对气体SO<sub>2</sub>污染物的吸附研究却鲜有报道。

笔者以花生壳粉为原料,通过溶胀、氯化、胺化三步反应制备出对SO<sub>2</sub>具有良好吸附性能的胺基改性花生壳吸附剂,并利用扫描电镜、傅里叶变换红外光谱、元素分析仪等对胺化花生壳的结构和成分进行分析,探讨了胺试剂种类、吸附剂含水率、烟气流速、吸附温度等对胺化花生壳吸附SO<sub>2</sub>性能的影响。

收稿日期:2018-03-16;修回日期:2018-10-07

作者简介:夏维清(1993-),女,硕士研究生,研究方向为环境材料,929117145@qq.com;朱晓帆(1962-),女,博士,研究员,研究方向为环境材料,通讯联系人,zhuxf301@163.com。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂与仪器

花生壳取自四川成都某乡村,经粉碎后过 80 目筛备用;三氯氧磷( $\text{POCl}_3$ )、乙醇、 $N,N$ -二甲基甲酰胺(DMF)、乙二胺,均为分析纯,成都科龙试剂厂生产; $\text{SO}_2$  模拟烟气( $\text{SO}_2/\text{N}_2$ )  $\text{SO}_2$  的体积分数为 0.3%,四川天一科技股份有限公司生产。Euro EA3000 型元素分析仪,意大利 Euro Vector S.P.A 公司生产;Nicolet 6700 型傅里叶红外光谱仪, Nicolet 公司生产;X-450 扫描电子显微镜, Hitachi 公司生产。

### 1.2 胺化花生壳的制备

花生壳纤维中含有丰富的活泼羟基,这些羟基往往缔合成分子内和分子间氢键,影响了反应活性,所以通常要进行溶胀预处理,打断纤维素分子间氢键,使纤维素的微孔充分地扩张,增加反应的可及度、结晶度和膨胀度等。选用  $N,N$ -二甲基甲酰胺(DMF)作为溶胀剂,另外还选取链状结构的乙烯胺(乙二胺、二乙烯三胺、三乙烯四胺)和带有支链的尿素作改性剂。

实验方法如下:(1)预处理:将一定质量的花生壳粉浸入  $N,N$ -二甲基甲酰胺(DMF)超声波处理 1 h,然后室温润胀 12 h;(2)氯化:将溶胀后的花生壳粉按料液质量比 1:10 浸入体积分数为 7.5% 的  $\text{POCl}_3$ (溶剂为 DMF),于  $70^\circ\text{C}$  水浴下反应 1 h,抽滤后用纯水和乙醇洗至中性, $75^\circ\text{C}$  下干燥;(3)胺化:将氯化后的花生壳粉分别加入尿素、乙二胺、二乙烯三胺、三乙烯四胺溶液中(质量分数均为 20%),

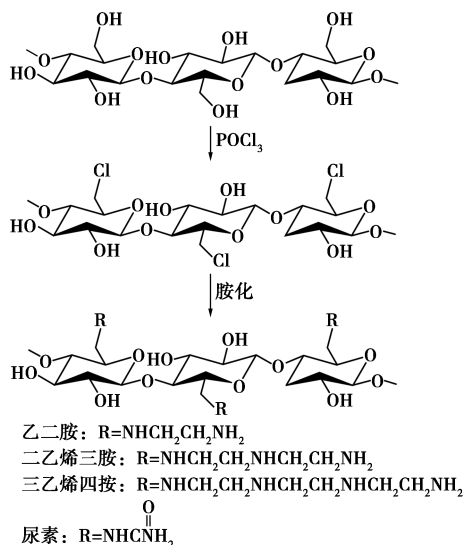


图 1 胺基改性花生壳路线图

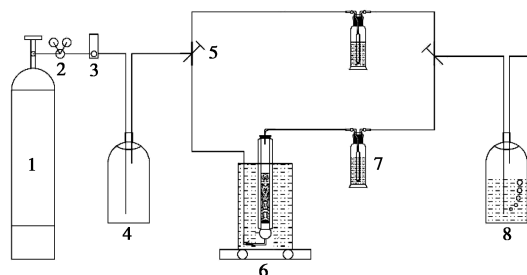
$70^\circ\text{C}$  下反应 1.5 h。抽滤后用纯水和乙醇洗至中性, $75^\circ\text{C}$  下干燥,反应得到的样品分别记为 PS-UR、PS-ED、PS-TD、PS-TT;改性路线图如图 1 所示。

### 1.3 $\text{SO}_2$ 的吸附

将进口体积分数为 0.3% 的模拟烟气通过装有 2 g 胺基改性花生壳粉玻璃吸附柱( $\Phi 30 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ );当脱硫率降至 40% 时,吸附试验结束并计算硫容。尾气中  $\text{SO}_2$  经  $\text{H}_2\text{O}_2$  吸收液吸收,NaOH 溶液滴定至中性,计算逸出  $\text{SO}_2$  的浓度。脱硫装置如图 2 所示。胺基改性花生壳吸附剂硫容计算式如下:

$$AC_{\text{SO}_2} = \left[ \int_0^{t_{40\%}} Q \times (C_0 - C_t) dt \right] / m \quad (1)$$

式中: $AC_{\text{SO}_2}$  为吸附剂硫容; $C_0$  和  $C_t$  分别为进口质量浓度和  $t$  时刻出口质量浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $t_{40\%}$  为脱硫率降到 40% 的时间,  $\text{min}$ ;  $Q$  为气体流量,  $\text{L/min}$ ;  $m$  为吸附剂质量,  $\text{g}$ 。



1— $\text{SO}_2$  模拟气体;2—减压阀;3—玻璃转子流量计;  
 4—气体缓冲瓶;5—三通阀;6—吸附装置;7— $\text{H}_2\text{O}_2$  吸收瓶;  
 8—NaOH 尾气吸收瓶

图 2  $\text{SO}_2$  吸附装置

## 2 结果与讨论

### 2.1 胺化试剂的选择

分别用尿素、乙二胺、二乙烯三胺、三乙烯四胺作胺化试剂制成胺基改性花生壳吸附剂,用元素分析仪测定其含氮量;在气体流速为  $400 \text{ mL/min}$ 、含水率 100%、烟气温度为  $25^\circ\text{C}$  的实验条件下测定其硫容,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,相比花生壳粉原料,经胺化改性后的花生壳粉吸附剂的脱硫效果明显,吸附剂硫容与改性花生壳中含氮量有关,含氮量越高,对  $\text{SO}_2$  的吸附效果越好。链状结构的 3 种乙烯胺的胺化吸附效果均好于带有支链的尿素;尿素和乙二胺虽然具有相同数量的胺基,但乙二胺改性花生壳(PS-ED)中含氮量几乎是尿素改性花生壳(PS-UR)的 1.5 倍,这是因为乙二胺是线形结构的烷烃,分子支链少,反应位阻比较小,供电能力和胺基碱性强,比带有支链的尿素更容易取代纤

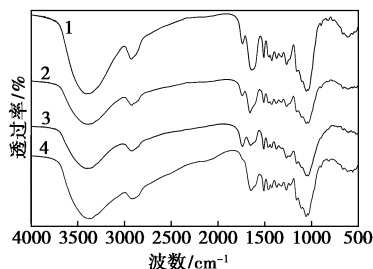
纤维素上的氯基,引入-NH<sub>2</sub>,使吸附效果更好;链状三乙烯四胺具有最多的胺基基团,改性后引入的一NH<sub>2</sub>最多,含氮量最高,故脱硫效果为:三乙烯四胺(PS-TT)>二乙烯三胺(PS-DT)>乙二胺(PS-ED)>尿素(PS-UR)。因此,实验中选用PS-TT吸附剂为主要研究对象。

表1 胺试剂类别对改性花生壳粉的硫容及其含氮量的影响

样品名称	PS	PS-UR	PS-ED	PS-DT	PS-TT
含氮量/%	1.491	2.108	3.933	4.422	4.723
硫容/(mg·g <sup>-1</sup> )	4.2	11.4	52.5	60.5	69.8

## 2.2 FT-IR 分析

花生壳改性前后的红外图谱如图3所示。由图3可以看出,花生壳原料在3200~3550 cm<sup>-1</sup>之间出现较宽的吸收峰,为分子间氢键O—H的伸缩振动峰;1139~1483 cm<sup>-1</sup>之间为O—H的面内弯曲振动峰。2921 cm<sup>-1</sup>和1056 cm<sup>-1</sup>分别是C—H和C—O的伸缩振动吸收峰。1637 cm<sup>-1</sup>处也有1个强而宽的中型峰,为C=O的伸缩振动吸收峰。这些特征峰与纤维素主链上的特征吸收峰一致。



1—花生壳原料;2—润胀后花生壳;3—氯化后花生壳;  
4—三乙烯四胺胺化花生壳

图3 花生壳改性前后红外谱图

由图3中谱线1和谱线2的对比可以看出花生壳润胀后基团的变化。谱线2中3200~3550 cm<sup>-1</sup>之间O—H的伸缩振动峰和1139~1483 cm<sup>-1</sup>之间O—H的面内弯曲振动强度减小,说明经DMF处理后花生壳纤维中氢键减少,分子间的羟基结合力变弱。此外,1637 cm<sup>-1</sup>处C=O的伸缩振动吸收峰向高波数1654 cm<sup>-1</sup>处移动,且宽度变窄、强度增强,表明处理后羰基含量增加,有利于后期的进一步氯化改性。

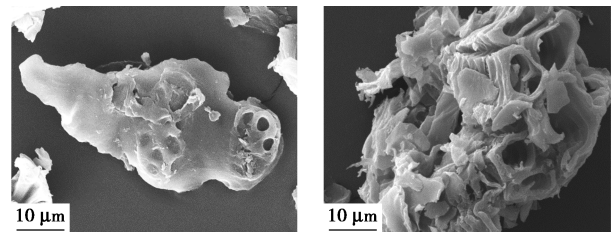
由图3中谱线2和谱线3的对比可以看出氯化对花生壳改性的影响。谱线3中1193 cm<sup>-1</sup>处的C—O的反对称伸缩峰和1637 cm<sup>-1</sup>处C=O的伸缩振动吸收峰强度不同程度减弱,说明氯化反应取代

了羟基,并与C=O发生了加成反应。

由图3中谱线3和谱线4的对比可看出三乙烯四胺胺化对花生壳基团的影响。谱线4中3365 cm<sup>-1</sup>和1020~1220 cm<sup>-1</sup>处—NH<sub>2</sub>的特征吸收峰强度增强。说明胺化反应成功引入了胺基基团。

## 2.3 SEM 分析

利用扫描电镜对花生壳粉改性前后表面形貌进行观察,结果如图4所示。由图4(a)可以看出,改性前原料花生壳粉表面较光滑、平整,结构致密;由图4(b)可以看出,经三乙烯四胺改性后的花生壳粉表面形貌发生明显的变化,整个表面变得卷曲、粗糙、凹凸不平,沟壑、孔洞明显,表明花生壳纤维的结构在改性反应中发生很大程度的变化,胺化效果较好,改性后的纤维微孔得到了充分地扩张。

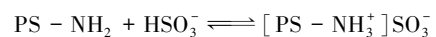
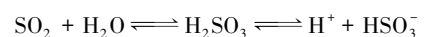


(a)花生壳原料 (b)三乙烯四胺胺化花生壳

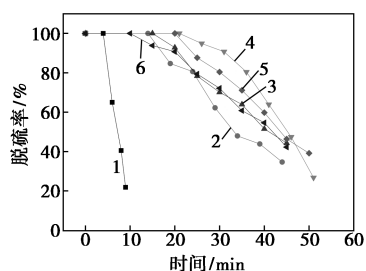
图4 花生壳改性前后SEM图

## 2.4 吸附剂含水率的影响

在气体流速为400 mL/min,烟气温度的25℃的实验条件下,PS-TT吸附剂在不同含水率下SO<sub>2</sub>的吸附曲线和吸附剂硫容如图5和表2所示。由图5和表2可以看出,PS-TT吸附剂在不含水的条件下,硫容较低,穿透速率很快,几乎呈直线式下降。随着PS-TT含水率增加,SO<sub>2</sub>硫容显著增大,在PS-TT含水率为100%时达到最大值,约为吸附剂不含水时的6倍;之后,随着PS-TT含水率的继续增加,SO<sub>2</sub>吸附效果又逐渐变差。胺基改性花生壳吸附SO<sub>2</sub>主要是依靠壳粉表面的胺基功能团,依靠自身孔结构和表面积带来的吸附作用很小,当吸附材料中加入水时,气体中的SO<sub>2</sub>易溶于水转变为溶解状态的亚硫酸根,进而与胺基结合,水在其中起到形成和电离H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>的作用,是反应发生的必要条件。



此外,适量的水可以使PS-TT吸附剂充分润胀,有利于吸附剂微孔的扩张和SO<sub>2</sub>在吸附剂中的扩散。但当含水量过多时,会在吸附剂表面形成一层水膜,阻碍胺基与SO<sub>2</sub>之间的反应,导致吸附效果下降。



1—0%; 2—50%; 3—75%; 4—100%; 5—125%; 6—150%

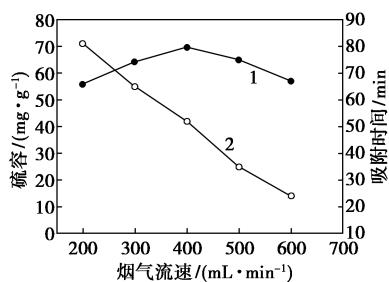
图 5 吸附剂在不同含水率时对 SO<sub>2</sub> 吸附的影响

表 2 不同含水率下 PS-TT 吸附剂硫容

含水率/%	0	50	75	100	125	150
硫容/(mg·g <sup>-1</sup> )	11.2	54.1	60.7	69.8	65.7	56.3

### 2.5 烟气流速的影响

在 PS-TT 吸附剂含水率为 100%、烟气温度的 25℃ 实验条件下,不同烟气流速条件下 PS-TT 吸附剂硫容及脱硫率降至 40% 所需的时间如图 6 所示。从图 6 中可以看出,烟气流速对 PS-TT 吸附剂脱硫效果有很大影响。当烟气流速为 200~400 mL/min 时,SO<sub>2</sub> 的硫容逐渐增大;当烟气流速超过 400 mL/min 时,随着烟气流速增加,PS-TT 吸附剂硫容有所下降。这是由于适当提高烟气流速,增大了气体推动力,有利于 SO<sub>2</sub> 气体的扩散和吸附,但当烟气流速过快时,SO<sub>2</sub> 未能与吸附剂充分反应就被带出,导致脱硫效果变差。但是,较小的烟气流速会导致脱硫吸附时间变长,所需能耗越多,因此,实际操作中应综合考虑,本实验中选择 400 mL/min 为 PS-TT 吸附剂的脱硫最佳烟气流速。



1—硫容; 2—吸附时间

图 6 烟气流速对 PS-TT 吸附剂硫容和吸附时间的影响

### 2.6 吸附温度

在烟气流速为 400 mL/min、吸附剂含水率为 100% 条件下,不同烟气温度的 PS-TT 吸附剂对 SO<sub>2</sub> 的吸附效果如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着温度的升高,PS-TT 吸附剂硫容先增大后减小。当温度从 15℃ 升高至 35℃ 时,SO<sub>2</sub> 硫容由 58.0 mg/g

提高到 74.6 mg/g,继续升温至 65℃,硫容略微下降至 71.9 mg/g。原因是当温度较低时,SO<sub>2</sub> 分子向 PS-TT 吸附剂内部扩散过程中存在较高动力学阻力,只能与吸附剂表面的胺基进行反应,随着温度的升高,PS-TT 吸附剂中的胺基以及 SO<sub>2</sub> 分子活性增强,有利于 SO<sub>2</sub> 分子与更多胺基活性位接触和向吸附剂内部扩散。随着温度继续升高,吸附平衡中脱附过程可能出现,导致硫容下降,所以应选择适当的吸附温度。

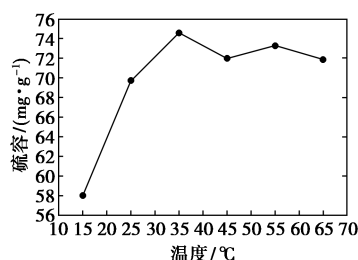


图 7 吸附温度对 PS-TT 硫容的影响

## 3 结论

(1) 将花生壳粉进行胺化改性制备吸附剂的工艺简单、方法可靠、操作简便,脱除 SO<sub>2</sub> 效果明显。

(2) 改性后花生壳纤维分子中引入了胺基,含氮量增加;表面变得卷曲粗糙,孔洞明显;吸附剂硫容与改性后吸附剂中含氮量有关;链状结构的乙胺胺改性剂效果优于带有支链的尿素。

(3) 吸附剂含水率、烟气流量、吸附温度影响胺基改性花生壳吸附剂脱硫效果。在本实验中,PS-TT 吸附剂较佳吸附条件为含水率为 100%,烟气流量为 400 mL/min,吸附温度为 35℃。

### 参考文献

- [1] Wang T. Emission characteristics of CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and indications of biomass burning observed at a rural site in eastern China [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D12): ACH-1-ACH 9-10.
- [2] Ping J. Influence of hazy weather on patient presentation with respiratory diseases in Beijing, China [J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2015, 16(2): 607-611.
- [3] Zhang X, Jiang H, Jin J, et al. Analysis of acid rain patterns in northeastern China using a decision tree method [J]. Atmospheric Environment, 2012, 46(1): 590-596.
- [4] Wang Y, Liu S, Liu X. Evaluation of the status of the power structure based on SO<sub>2</sub> emissions responsibility [C]. 6th International Conference on Management, Education, Information and Control; 2016.

(下转第 150 页)

## 1 实验部分

### 1.1 $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的制备

将 0.2 g 氯化钨( $\text{WCl}_6$ )溶于少量乙醇中,然后与 8.0 g 水进行混合,充分搅拌,移入 45 mL 水热釜中 110℃ 加热 2.5 h,自然冷却至室温,离心将固体分离,并用  $\text{H}_2\text{O}$  洗涤 3 次,于 80℃ 烘箱中干燥 12 h,所得固体即为  $\text{WO}_3$ 。

称取 6 g 尿素于坩埚中,以 3℃/min 的升温速率升温,于 550℃ 马弗炉中煅烧 4 h,自然冷却至室温,将所得的固体研磨至粉末状;称取 0.3 g 上述粉末于坩埚中,以 3℃/min 的升温速率升温,于 550℃ 马弗炉中煅烧 3 h,自然冷却至室温,将所得的固体研磨至粉末状,所得的样品即  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 。

称取 0.04 g  $\text{WO}_3$  和 0.16 g  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  分别分散在 20 mL 乙醇中,超声处理 1 h,然后将两分散液混合,超声处理 1 h,然后在 60℃ 水浴、500 r/min 搅拌下将乙醇蒸干,所得固体研磨后于 80℃ 烘箱中干燥 12 h。将干燥的样品置于坩埚中,以 3℃/min 的升温速率升温,于 450℃ 马弗炉中煅烧 4 h,自然冷却至室温,将所得固体研磨至粉末状,所得的样品即  $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 。

### 1.2 $\text{Ag-MnO}_x/\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的制备

称取 0.3 g  $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$  并分散在 100 mL 0.070 g/L 的  $\text{MnCl}_2$  溶液中,暗室搅拌 30 min,在 1 000 W 氙灯照射下搅拌 6 h,离心分离,所得固体用  $\text{H}_2\text{O}$  和无水乙醇洗涤 3 次,置于 80℃ 烘箱中干燥 12 h,研磨成粉末状,所得的固体即为  $\text{MnO}_x/\text{WO}_3/$

$\text{g-C}_3\text{N}_4$  复合光催化剂。将  $\text{MnO}_x/\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$  分散在 100 mL 0.050 g/L 的  $\text{AgNO}_3$  溶液中,加入 5 mL 三乙醇胺,暗室搅拌 30 min,在 1 000 W 氙灯照射下搅拌 3 h,离心分离,所得固体用  $\text{H}_2\text{O}$  和无水乙醇洗涤 3 次,置于 80℃ 烘箱中干燥 12 h,研磨成粉末状,所得固体即  $\text{Ag-MnO}_x/\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$  复合光催化剂。

### 1.3 $\text{Ag-MnO}_x/\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4(\text{imp})$ 的制备

称取 0.3 g  $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$  NS 分散在 30 mL  $\text{AgNO}_3$  质量浓度为 0.157 g/L、 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$  质量浓度为 0.207 g/L 的混合溶液中浸渍 2 h 后蒸干液体,将干燥的样品置于坩埚中,以 3℃/min 的升温速率升温,于 400℃ 马弗炉中煅烧 2 h,自然冷却至室温,将所得的固体研磨至粉末状,分散在甲醛溶液中搅拌 6 h,离心将固体分离,并用无水乙醇洗涤 3 次,在 80℃ 烘箱中干燥 12 h,所得固体即为  $\text{Ag-MnO}_x/\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4(\text{imp})$ 。

### 1.4 $\text{Ag-MnO}_x/\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的表征

利用德国布鲁克 AXS 公司生产的 D8-Focus 型 X 射线衍射仪对样品的晶相进行表征,射线源为  $\text{Cu-K}\alpha$ ,工作电压为 40 kV,工作电流为 40 mA,扫描范围为 10~80°,扫描速度为 5°/min;利用日本电子公司生产的 JEM-2100F 型场发射透射电子显微镜观察样品的外貌形态、晶型结构、颗粒尺寸,工作电压为 200 kV,点分辨率为 0.19 nm;利用德国布鲁克公司生产的 Vertex 70 傅里叶变换红外光谱仪进行样品的红外光谱分析;利用日本岛津公司的 UV-2550 紫外-可见分光光度计测试样品的光学特性,以  $\text{BaSO}_4$  作为参比。

(上接第 148 页)

- [5] 王雷,章明川,周月桂,等.半干法烟气脱硫工艺探讨及其进展[J].锅炉技术,2005,36(1):70-74.
- [6] 赵卷,张少峰,张占锋.半干法烟气脱硫技术研究新进展[J].河北工业大学学报,2003,32(5):81-86.
- [7] 张腾化,岳晓康,刘伟华,等.磁性花生壳活性炭处理亚甲基蓝模拟染料废水[J].安徽农业科学,2017,(28):65-67.
- [8] 范鹏程,田静,黄静美,等.花生壳中纤维素和木质素含量的测定方法[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2008,(5):64-65.
- [9] Xu T, Liu X. Peanut shell activated carbon: Characterization, surface modification and adsorption of  $\text{Pb}^{2+}$  from aqueous solution[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 16(3): 401-406.
- [10] El-Shafey E I. Removal of  $\text{Se}(\text{IV})$  from aqueous solution using sulphuric acid-treated peanut shell[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 84(4): 620-627.
- [11] 高立达,曹林毅,王姗姗,等.改性花生壳对重金属  $\text{Cr}(\text{VI})$  的吸附性能研究[J].西安科技大学学报,2014,(5):585-590.
- [12] 高雪川.含胺基改性纤维素的制备及其对  $\text{Cu}^{2+}$  吸附的研究[D].济南:山东大学,2015.
- [13] 赵雅兰.生物改性花生壳材料的制备及其对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附性能研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [14] 孟祥霞,邬欣慧,马东,等.水热改性花生壳对水中  $\text{Cr}(\text{VI})$  的吸附性能[J].工业水处理,2017,(10):52-56.
- [15] 雷娟.高锰酸钾改性对花生壳吸附  $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$  的特性和机理的影响[D].广州:华南理工大学,2014.
- [16] 刘茹,倪伟迪,王春英.改性花生壳对水中磷的吸附特性[J].江苏农业科学,2017,45(24):255-258.
- [17] 陈碧,晁小练,高雯雯,等.改性花生壳对酸性橙 II 的吸附影响因素及动力学研究[J].化学与生物工程,2017,(10):44-48.
- [18] Liu Z, Jiang L, Qi M, et al. Preparation of tetraethylenepentamine modified straw and its adsorption of sulfur dioxide[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2015, 24(12A): 4458-4464.
- [19] Yang C, Tan T, Zhu X. Adsorptive capacity of ethylenediamine treated oxidised rice straw for sulfur dioxide[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(2): 1843-1848.
- [20] 张志斌,李佳,管冬兴,等.乙二胺基棉纤维脱硫剂的制备研究[J].环境工程学报,2009,(6):1089-1093. ■