

草木灰浸取液活化制备污泥基脱 H_2S 碳材料研究

李 芬¹, 王 鹤¹, 张彦平², 于彩莲¹, 王奇飞¹

(1. 哈尔滨理工大学 化学与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401)

摘 要: 以污水处理厂剩余污泥为原料, 采用玉米棒灰浸取液代替化学活化剂热解污泥制备吸附碳材料, 通过 H_2S 的穿透时间、碘值以及亚甲基蓝吸附值等指标确定样品的最佳制备条件。结果表明当污泥与玉米棒灰的质量比为 1:2, 活化温度为 600°C , N_2 氛围下活化 1.5 h 所制得的碳材料具有最佳的脱臭性能, 在出气 H_2S 浓度不超过 $30.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, H_2S 的穿透时间可达 145 min, 其脱臭性能远高于商品活性炭, 此时亚甲基蓝吸附值和碘值分别为 $39.94\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $867.4\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 剩余污泥的热重分析说明碳材料孔的形成主要发生在 $178\sim 600^\circ\text{C}$ 范围内, 扫描电镜、孔结构和比表面积的特征显示材料表面粗糙, 介孔发达; 红外光谱显示出碳材料含氧、含氮官能团丰富, 而这些因素均有利于 H_2S 气体的吸附脱除。

关键词: 草木灰; 污泥; H_2S

DOI: 10.15938/j.jhust.2019.05.023

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2019)05-0138-07

Study of the Preparation of Carbon Material for H_2S Removing with the Extractive Solution of Plant Ash as Activator

LI Fen¹, WANG He¹, ZHANG Yan-ping², YU Cai-lian¹, WANG Qi-fei¹

(1. School of Chemical and Environment Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China

2. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In this paper, the extractive solution of corn cob ash is used as activator instead of the traditional chemical activator for pyrolysis sewage treatment plant sludge to make adsorption of carbon materials. We determine the best preparation conditions of the sample by the indicators such as the penetration time of H_2S and the adsorbing capacity of iodine and methylene blue. It turns out that the material has the best deodorization efficiency, H_2S penetrating time can be 145 min much higher than commercially available activated carbon's performance as the concentration of H_2S is no more than $30.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ iodine adsorbing $867.4\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and methylene blue $39.94\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ when the quality of sludge and the corn cob ash ratio of 1:2, the activation temperature at 600°C , 1.5 hour accompany with N_2 atmosphere. Thermogravimetric analysis of excess sludge show that the formation of holes of sludge carbon material mainly occur in the range of $178^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$; SEM and BET indicate that the material has rough surface developed mesopore structure, and FT-IR rich oxygen containing function groups. These characters are all conducive to remove and adsorb H_2S .

Keywords: plant ash; sludge; hydrogen sulfide

收稿日期: 2017-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51608166); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2014RFQXJ056)。

作者简介: 王 鹤(1993—), 男, 硕士研究生;

张彦平(1978—), 女, 副教授。

通信作者: 李 芬(1975—), 女, 博士, 教授, E-mail: hgxyllf@126.com。

0 引言

近年来我国的污水处理能力显著增强,城镇污水处理率逐年升高,但与之相配套的污泥处理处置并未得到足够重视,设施建设严重滞后,污泥安全处理率不超过 20%。早期的污泥多采用堆肥方式进行资源化利用,但随着重金属沉积等问题的发现,堆肥等处置方式暴露出了较大的环境风险隐患。鉴于此,污泥处置必须在稳定化的前提下,考虑其资源化并追求其经济效益。污泥热解炭化技术可将污泥制成廉价的吸附剂,因其能同时实现污泥的减量化、稳定化和资源化而成为众多污泥处理方法中的最优化方案。其中化学活化是热解污泥技术的主要方法之一,该方法的研究主要集中在氯化锌^[1]、磷酸^[2-3]、氢氧化钾^[4-5]、碳酸钾^[6]等活化药剂的选择上,制出的碳材料可在重金属^[7-8]、染料^[9]以及有机污染物^[10]的吸附中使用。但由于活化药剂未找到有效的再生方式,导致剩余污泥处置成本偏高,限制了在环境污染治理上的应用,因此多渠道寻找污泥活化剂就变得尤为重要。

我国草木灰提钾已有很长历史,提取的碳酸钾等物质多作为农业肥料使用^[11],但随着秸秆燃烧发电工业化的推进,集中产生的大量草木灰如仅作为土壤改良剂使用,很难满足处置要求,因此必须探索草木灰的其它应用途径。本文利用草木灰中富含钾元素的特点,采用剩余污泥为原料,草木灰浸取液为活化剂进行污泥热解制备脱 H_2S 碳材料的实验研究,提取钾盐后的草木灰残渣仍可作为土壤改良剂使用。该研究符合循环经济的理念,亦达到以废治废的目的。

1 实验部分

1.1 生物质活化剂的制备和筛选

实验所用的草木灰均来自哈尔滨市周边农村居民生活燃烧生物质所得。将收集的 4 种灰(草灰、木灰、玉米棒灰、稻壳灰)研磨过 178 μm 筛。分别称取 2.000 0 g $\pm$ 0.000 1 g 置于 250 mL 碘量瓶中,加入 50 mL 蒸馏水,将碘量瓶放在恒温水浴振荡器上,水浴加热 90 $^{\circ}\text{C}$,震荡 90 min。将震荡后的碘量瓶取下,冷却至室温,抽滤,取滤液补至 50 mL 于磨口具塞试管中。每种灰制备 3 个平行样用火焰光度计进行测定,结果取 3 次测试结果的平均数。不同类型

草木灰的含钾量(质量分数)见表 1,由表 1 可见,玉米棒灰的含钾量要远高于其它草木灰,因此后续实验采用玉米棒灰的浸取液作为污泥碳化活化剂使用。

表 1 不同类型草木灰的含钾量

Tab. 1 K content of different types of plant ash

灰质种类	稻草灰	玉米棒灰	木灰	稻壳灰
钾质量分数/%	0.25	26.35	1.775	0.125

1.2 污泥碳材料的制备

剩余污泥取自哈尔滨市某城市污水处理厂的污泥浓缩车间。污水处理厂的剩余污泥经脱水处理后自然风干,风干后污泥加入适量蒸馏水浸泡 24 h,浸泡后的污泥结构松散,pH 呈中性,过滤后置于烘箱中 85 $^{\circ}\text{C}$ 烘干,研磨备用;污泥中各元素含量通过 X 射线光电子能谱仪检测获得,各元素的质量分数如表 2 所示。

表 2 剩余污泥中各元素含量

Tab. 2 Each element content of excess sludge

元素	C	O	N	Si	P	Al	Fe
质量分数/%	61.76	24.16	5.12	3.71	2.02	2.57	0.66

将烘干后的剩余污泥与玉米棒灰滤液置于烧杯中混合,混合浸渍 24 h 后放入烘箱在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干,钵内研磨;磨碎后的样品均匀放入陶瓷坩埚中,将马弗炉调节至设定温度,升温速率为 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,并通入氮气,在氮气氛围下对样品进行炭化活化;活化后的样品冷却至室温取出,经蒸馏水洗涤后烘干即制得污泥碳材料,相同制备条件下制得 3 份样品备用。

1.3 测试和表征

采用气相色谱仪(GC-9160 上海欧华分析仪器厂)进行 H_2S 浓度的检测;称取 0.200 0 g $\pm$ 0.000 1 g 的样品置于内径为 1 cm 的吸附管中,调节气速约 20.0 mL $\cdot\text{min}^{-1}$, H_2S 进气浓度 1.539 g $\cdot\text{m}^{-3}$,开始吸附后每隔 1 min 进一次样,并记录 H_2S 的浓度,当出气中 H_2S 的浓度 ≥ 30.0 mg $\cdot\text{m}^{-3}$ 时停止吸附,将 H_2S 开始吸附至吸附结束时的时间规定为样品的 H_2S 穿透时间。

碘值采用 GB/T12496.8-1999 标准方法测定,亚甲基蓝吸附值采用 GB/T12496.10-1999 标准方法测定。硫容采用 HG/T 2513-2014 行业标准,氧化锌脱硫剂硫容实验方法测定。

污泥中各元素组成采用 XPS(PHI5700 ESCA 型 X 射线光电子能谱仪) 进行测定; 草木灰的含钾量利用火焰光度计(6400A) 进行分析; 样品的比表面积和孔结构用贝士德仪器科技(北京) 有限公司生产的 3H-2000PS1 型仪器测定; 样品表面官能团采用红外光谱仪(T60SXBFTIR 美国 NICOLE 公司) 进行分析测定; 差热-热重分析(TG-DTA) 采用 STA449C 型热重分析仪测定(氮气气氛, 升温速率 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 实验终温设定为 800°C)。

2 实验结果和讨论

2.1 污泥基脱 H_2S 碳材料的制备工艺优化

玉米棒灰的浸取液可替代化学活化剂钾盐。碳酸钾^[12]等钾盐能与污泥内部的碳原子发生反应, 消耗了大量的碳, “刻蚀”了初始孔隙周围的无定形碳, 生成二氧化碳和一氧化碳等气体。气体的产生可以进一步冲出孔道, 且一氧化碳与通入的氮气可以起到稀释二氧化碳的作用, 使得二氧化碳更为均匀与碳反应进一步产生一氧化碳, 导致活性炭孔隙结构更发达, 对孔隙结构起到了有效的调节作用^[13]。因此活化剂含量, 热解温度和热解时间等可以影响污泥碳材料的孔隙结构, 改变其吸附性能。本小节主要探讨了污泥与玉米棒灰的质量比(简称泥灰比) 和热解温度等因素对污泥碳材料吸附性能的影响, 试验方案见表 3, 实验结果如图 1、图 2 所示。

表 3 试验方案设计

Tab. 3 Test scheme design

样品编号	泥灰比/m: m	热解温度/ $^{\circ}\text{C}$	热解时间/h
1	1:1	800	1.5
2	1:2	800	1.5
3	1:3	800	1.5
4	1:4	800	1.5
5	1:5	800	1.5
6	1:6	800	1.5
7	1:2	400	1.5
8	1:2	500	1.5
9	1:2	600	1.5
10	1:2	700	1.5
11	1:2	600	1.0
12	1:0	600	1.5

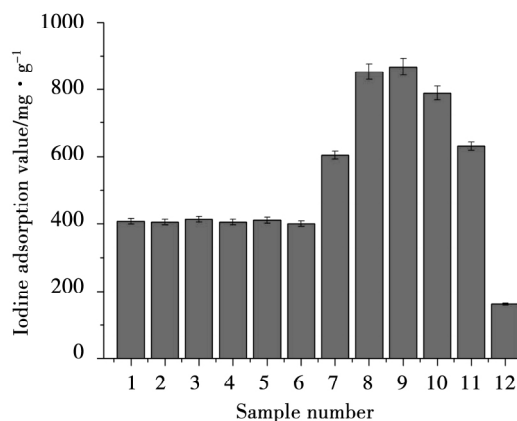
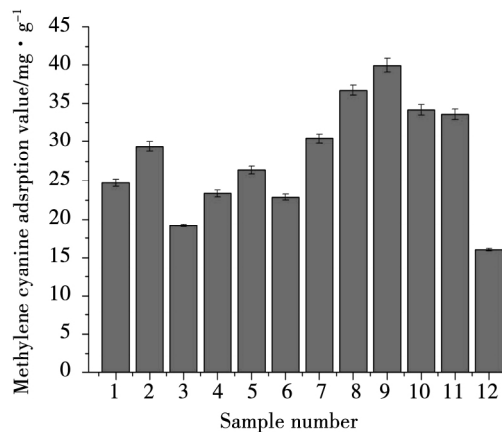


图 1 污泥碳材料的碘值与亚甲基蓝吸附值曲线图
Fig. 1 Iodine and methylene blue adsorption value of carbon material

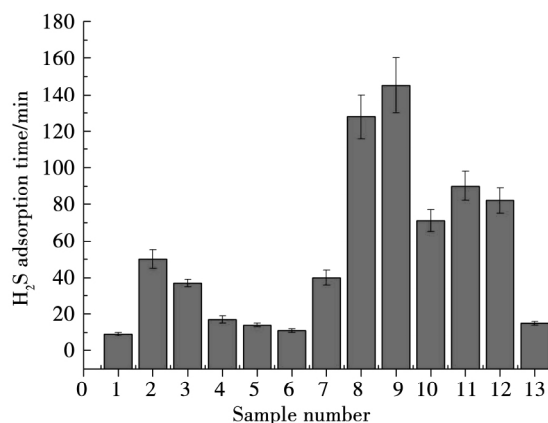


图 2 污泥碳材料的 H_2S 穿透时间柱状图
Fig. 2 H_2S penetrating time of the carbon material

亚甲基蓝吸附值用来初步判断材料的中孔构造, 碘值大小可分析材料的微孔结构^[14-15]。由图 1 中 1~6 号样品的吸附实验结果可知, 在 800°C 的热解温度时, 提高生物质活化剂含量对碘值影响不大,

碘值普遍处于较低水平。但亚甲基蓝值呈现出波动变化,其中2号样品,即泥灰比为1:2时,污泥碳材料的亚甲基蓝吸附值最大,可认为制备的材料中孔发达。

进行温度优化的7~10号样品,制备时确定的泥灰质量比为1:2,热解时间为1.5 h,热解温度分别为400℃,500℃,600℃和700℃。由图1可见,7~10号样品的碘值和亚甲基蓝值均高于1~6号样品。当热解温度为600℃时9号样品的碘值最大为 $867.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,亚甲基蓝吸附值最大为 $39.94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,说明活化温度对样品的碘值和亚甲基蓝吸附值的影响较大。在400℃~700℃范围内,随着热解温度的升高,样品的亚甲基蓝吸附值呈现增大趋势,但温度进一步升高,亚甲基蓝吸附值下降;分析认为,热解温度较低时,有利于中孔的形成^[14],但热解温度过高材料的烧失量增加,会导致原有中孔结构破坏影响了亚甲基蓝的吸附;而将活化时间缩短为1 h的11号样品,亚甲基蓝值较低,说明活化时间较短未形成发达的孔结构。此外对7~10号样品的碘值分析可知,随着热解温度的升高,碘值呈现先上升后下降的趋势,亚甲基蓝吸附值、碘值整体吸附规律较为吻合。

为进一步探讨污泥碳吸附剂的脱臭性能,以 H_2S 为目标物,进行脱臭性能分析,试验结果如图2所示。由图2可知1~6号样品中,随着泥灰质量比的增加, H_2S 的穿透时间呈现出先延长后缩短的趋势,其中800℃活化,泥灰比为1:1的1号样品对 H_2S 的吸附时间最短,而泥灰比为1:2的2号样品 H_2S 的穿透时间最长;7~10号样品中,随着热解温度从400℃增加到600℃, H_2S 的穿透时间增加,热解温度为600℃的9号样品对 H_2S 的穿透时间最长,继续提高热解温度到700℃, H_2S 的穿透时间缩短;12号样品虽然未加草木灰(样品简称为NBAC),但 H_2S 的穿透时间高于1~7号,原因在于1~6号样品的活化温度为800℃,7号样品的活化温度仅为400℃,温度过高或过低均不利于形成丰富的孔结构,最终影响碳材料对 H_2S 的吸附。综上所述,最终确定污泥脱臭碳材料的最佳制备条件是污泥与玉米棒灰的质量比为1:2,热解温度为600℃,热解时间为1.5 h,制备的样品对 H_2S 的吸附穿透时间可达145 min,硫容经测算可达 14.2 mg/g ,该样品简称为BAC。其脱硫性能明显优于13号商品活性炭 1.5 mg/g 的硫容。

2.2 材料分析与表征

2.2.1 污泥热解过程分析

为了分析污泥基碳材料的形成过程,利用热重分析仪对添加了玉米棒灰浸取液的剩余污泥进行差热—热重分析,TG-DTA曲线见图3。由图中TG线可见,污泥随活化温度升高持续失重,500℃之前的失重速率较大,材料失重可达33%;500℃~800℃失重速率减慢,失重百分比占5%左右。由DTA曲线可以看出,在室温到800℃的热解过程中,污泥出现三个吸热峰值,分别在118℃、178℃和590℃附近。其中118℃和178℃出现的吸热峰可归结为结合水以及结晶水的大量逸出;590℃的吸热峰则可归结为碳酸盐的分解反应及有机物的深度裂解,伴随着一氧化碳、二氧化碳、氢气、钾蒸气以及有机气体的释放,由于热解尾气具有强烈刺激性恶臭特性,分析可能有含氮和含硫等恶臭气体逸出^[17-18]。

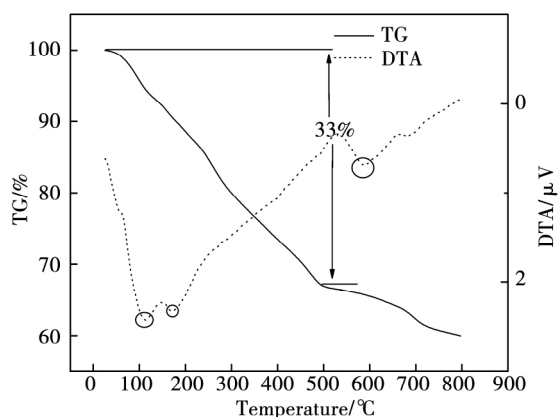


图3 剩余污泥的热重曲线

Fig. 3 Thermo gravimetric curve of surplus sludge

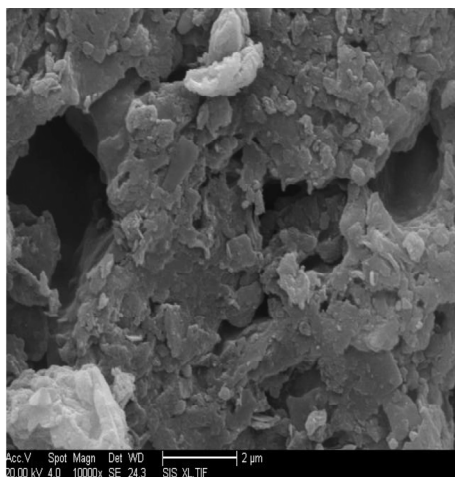
2.2.2 扫描电镜分析

添加活化剂前后的剩余污泥热解碳材料的表面形貌如图4所示。由图4(a)可见,未添加活化剂的污泥碳材料(NBAC)表面凹凸不平,但孔隙较少;而添加活化剂的剩余污泥在600℃热解1.5 h样品(BAC)的表面粗糙度增加,且出现了大量的不同大小规格的孔隙,这进一步说明草木灰浸取液起到了很好的活化作用及造孔作用^[19]。

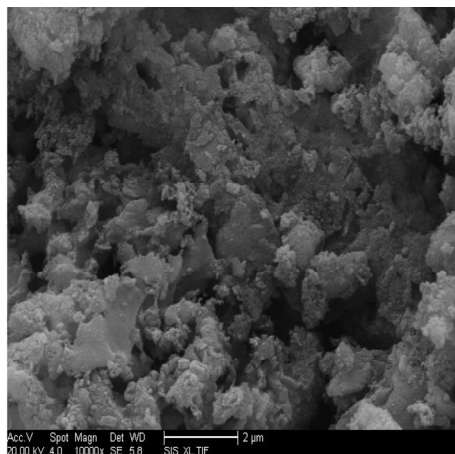
2.2.3 红外光谱分析

图5为添加活化剂前后的剩余污泥热解碳材料的红外光谱图。图5(a)在 1017.15 cm^{-1} 、 467.07 cm^{-1} 处有吸收峰出现,由于峰的位置比较单一无特征峰,不能够断定是有机基团峰还是无机杂质峰。与图5(a)对比,活化后的污泥碳材料出现了更多的

特征吸收峰。3 411.58 为 O-H 伸缩振动吸收峰; 1 017.03 可归结为 C-O 键伸缩震动吸收峰; 694.21 cm^{-1} 为 O-H 键的面外弯曲振动吸收峰; 而 1 593.19 cm^{-1} 为 NH_2 的弯曲振动吸收峰; 1 397.05 cm^{-1} 为饱和 C-H 键的变形振动吸收峰; 620.66 cm^{-1} 处的指纹区特征峰可能为 C-CO-C 的面内弯曲振动, 根据吸收峰可以推测活化后污泥含有醇羟基和氨基。污泥在热解过程与玉米棒灰浸取液中的碱性活化剂成分相互作用, 使污泥中纤维素、酯和蛋白质等有机质通过裂解、还原过程产生了含氧、含氮官能团, 而材料表面含氧官能团的增多增加了表面的极性与不饱和性, 有助于极性分子 H_2S 吸附的同时也起着将 H_2S 氧化成 S 的催化氧化作用, 含氮官能团一方面提供 H_2S 吸附和氧化的活性位, 另一方面局部环境呈碱性促进 H_2S 的分解和 S 的形成^[2]。



(a) NBAC (×10000)



(b) BAC (×10000)

图4 扫描电镜照片

Fig. 4 SEM picture of NBAC and BAC

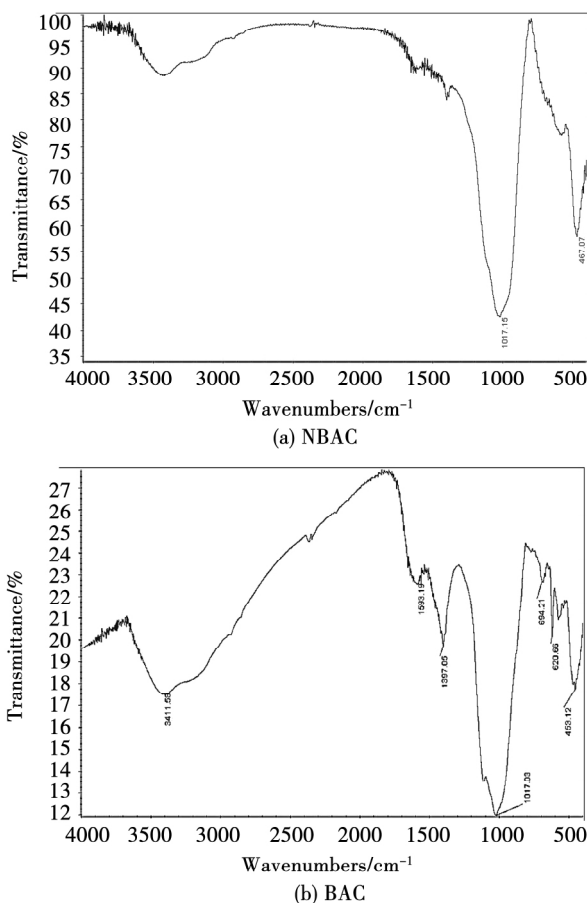


图5 污泥碳材料的红外光谱图

Fig. 5 FT-IR of sludge carbon material

2.2.4 比表面积和孔结构分析

污泥碳的吸附脱附等温线如图6所示, 污泥碳材料的氮气吸附脱附曲线低压端偏 X 轴, 相对压力轴凸出, 整体压力范围内凸向下符合Ⅲ型等温吸附曲线。在低压区吸附量少, 表明碳材料固体表面与被吸附分子之间的作用力较弱, 随组分分压的增加, 吸附质浓度的增大吸附量显著增加表明被吸附的分子之间作用力比较强。吸附气体量不断随组分分压的增加而上升, 直至相对饱和, 表现出有孔填充。污泥碳材料比表面积和孔结构数据见表4所示。由表4可知, BAC 的比表面积为 $30.64 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 总孔体积 $0.1151 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均孔径为 15.54 nm , 其中 $20 \sim 50 \text{ nm}$ 的介孔较多, 孔体积最大为 $0.0411 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 其次是 $2 \sim 20 \text{ nm}$ 的孔, 孔体积为 $0.0398 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 而大于 50 nm 的大孔相对较少, 孔体积为 $0.0328 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 小于 2 nm 的微孔数量最少, 孔体积仅为 $0.00145 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。分析可见 BAC 的比表面积数值并不大, 但大孔和介孔的数量相对较大, 特别是介孔体积占总孔体积的

70.3%,这说明污泥碳材料的脱臭效果是材料表面孔的分布特征和表面官能团等因素综合作用的结果。Adib^[21]等也有研究发现比表面积与硫容的相关系数只有0.657 2。比表面积及孔结构对硫化氢的吸附主要表现为范德华力作用下的物理吸附,碳材料的介孔起着吸附质分子通道的作用,可发生多层吸附,又在一定相对压力下发生毛细管凝结,提高了吸附能力^[22]。较高的中孔孔容可以为产物提供更多的存储空间,从而延缓产物在活性位点的沉积^[23]。Chen^[24]等通过研究发现碳材料的脱硫能力随中孔孔径增大而降低,最优孔径为 16 nm,与实验制得的平均孔径 15.54 nm 碳材料相接近。

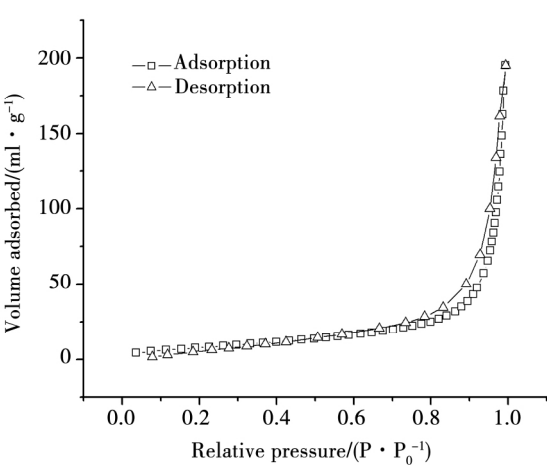


图 6 N₂ 吸附脱附等温曲线

Fig. 6 N₂ adsorption-desorption isotherms

表 4 孔结构参数

Table 4 Pore structure parameters

比表面积/ m ² · g ⁻¹	平均孔径/ nm	总孔体积/ mL · g ⁻¹	孔体积/mL · g ⁻¹			
			> 50 nm	50 ~ 20 nm	20 ~ 2 nm	< 2 nm
30.64	15.54	0.115 1	0.032 8	0.041 1	0.039 8	0.001 45

3 结 论

1) 以剩余污泥为原料,利用玉米棒灰的浸取液作为活化剂制备出污泥碳材料,并对材料吸附脱臭性能进行了分析。研究表明污泥与玉米棒灰的质量比为 1:2,600℃ N₂ 氛围热解活化 1.5 h,所制得的污泥碳材料具有最佳的吸附脱臭效能,其 H₂S 的穿透时间可达 145 min,硫容为 14.2 mg/g;

2) 采用热重和扫描电镜的分析表明,添加草木灰浸取液的剩余污泥在整个热解过程处于失重状态,说明浸取液与剩余污泥的碳反应,且在 600℃ 左右形成了适于吸附 H₂S 的结构。孔结构测试显示碳材料的孔体积和比表面积值不高,但介孔占的比例最大,而红外光谱分析显示材料表面含氧官能团、含氮官能团数量的增加均有利于对 H₂S 的吸附。这说明碳材料的吸附活性大小是孔结构和表面官能团等因素综合作用的结果。

参 考 文 献:

[1] EDRIS B, FERDOS K M, MOSTAFA A, et al. Dairy Wastewater Treatment by Chemical Coagulation and Adsorption on Modified Dried Activated Sludge: a Pilot-plant Study [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(18) : 8183.

[2] 邓辉,杨乐,吴湧道,等. 磷酸活化-微波热解制备污泥吸附剂及其结构演化 [J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2016, 34 (1) : 85.

[3] CHEN J J, WANG X L, LIU X Y, et al. Removal of Dye Wastewater COD by Sludge Based Activated Carbon [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 73 (SI) : 1.

[4] 闫中亚,王俊芬,吴玉英,等. KOH 活化脱墨污泥基活性炭的制备及表征 [J]. 中国造纸学报, 2016(1) : 32.

[5] GLAYDSON S R, MATTHEW A, EDER C L, et al. Activated Carbon from Sewage Sludge for Preconcentration of Copper [J]. Analytical Letters, 2016, 49(4) : 541.

[6] SUNIL A, AGUSTI F, JOSEF P, et al. A Potential Application of Sludge-based Catalysts for the Anaerobic Bio-decolorization of Tartrazine Dye [J]. Environmental Technology, 2015, 36 (20) : 2568.

[7] 付临汝,张立国,刘蕾,等. 改性污泥基吸附剂对水中铬(VI) 的吸附性能研究 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2015 (1) : 50.

[8] MUSTAFA I, HUSEYIN S, ŞEYMA A, et al. Investigation of Pb (II) Adsorption on a Novel Activated Carbon Prepared from Hazel-nut Husk by K₂CO₃ Activation [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(10) : 4587.

[9] KONG J, HUANG L, YUE Q, et al. Preparation of Activated Carbon Derived from Leather Waste by H₃PO₄ Activation and Its Application for Basic Fuchsin Adsorption [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(13/15) : 2440.

[10] HUANG L, WANG M, SHI C X, et al. Adsorption of Tetracycline and Ciprofloxacin on Activated Carbon Prepared from Lignin

- with H_3PO_4 Activation [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(13 - 15): 2678.
- [1] 张余莽,李楠,张静霞,等. 草木灰生物钾肥应用的探讨 [J]. 河南农业,2016(2): 15.
- [2] 吴丹梅,曾裕平,任乃林. 客家黄板中草木灰的成分分析及安全性评价 [J]. 广州化工,2013,41(16): 145.
- [3] 李芬,姜蔚,闫波. 污泥制备活性炭的活化剂及活化机制研究进展 [J]. 城市环境与城市生态,2011(3): 19.
- [4] JIAN S, WANG T, MA B, et al. Preparation and Characterization of Semi-carbonized Rice Straw Fiber [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2016, 31(3): 496.
- [5] 孙瑾,羊依金,龙宇,等. 铁系添加剂对污泥基活性炭性能与结构的影响 [J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 654.
- [6] 汤斯奇,王经臣, JAEHAC K. 不同热解终温和保留时间下污泥生物质炭孔隙结构特征 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 890.
- [7] 张贺东,高作鹏,敖文雅,等. 基于移动床的印染污泥微波热解及固相产物的表征与分析 [J]. 化工学报, 2017, 68(6): 2510.
- [8] 杨乐,李政家,邓辉,等. KOH 活化 - 微波热解制备污泥炭及其结构演化 [J]. 环境工程, 2016, 34(8): 120.
- [9] 谷麟,周品,袁海平,等. 不同活化剂制备秸秆 - 污泥复配活性炭的机理及性能 [J]. 净水技术, 2013(2): 61.
- [20] YANG G, SUN Y, ZHANG J, et al. Fast Carbonization Using Fluidized Bed for Biochar Production from Reed Black Liquor: Optimization for H_2S Removal [J]. Environmental Technology, 2016, 37(19): 2447.
- [21] ADIB F, BAGREEY A, BANDOSZ T J. Effect of Surface Characteristics of Wood-Based Activated Carbons on Adsorption of Hydrogen Sulfide [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1999, 214(2): 407.
- [22] FENG W, KWON S, BORGUET E, et al. Adsorption of Hydrogen Sulfide onto Activated Carbon Fibers: Effect of Pore Structure and Surface Chemistry [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 39(24): 9744.
- [23] 张紫晓. 炭基材料在室温下对硫化氢的催化氧化研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [24] CHEN Q, WANG J, LIU X, et al. Structure-dependent Catalytic Oxidation of H_2S Over Na_2CO_3 Impregnated Carbon Aerogels [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2011, 142(2): 641.

(编辑: 温泽宇)