

## Preparation of activated carbon from sludge and sawdust with $\text{ZnCl}_2$ as activator

Dongqiang WU<sup>1</sup>, Peiyong MA<sup>2,3\*</sup>, Song HU<sup>4</sup>, Xianjun XING<sup>2,3</sup>, Xianwen ZHANG<sup>1,3</sup>

1. School of Automobile and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

2. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

3. Institute of Advanced Energy Technology & Equipment, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

4. Anhui Province Environmental Protection Industry Development Association, Hefei, Anhui 230000, China

**Abstract:** The sludge based activated carbon was prepared by activation of  $\text{ZnCl}_2$  in a pyrolytic furnace with the sludge from municipal wastewater treatment plants and sawdust. And single factor experiments were conducted to explain the effects of four factors, sawdust addition rate, material salt ratio, activation temperature and activation time, on the adsorption performance of sludge activated carbon. The results showed that the optimum adsorption capacity of activated carbon can reach 679.25 mg/g when the mass fraction of the sawdust in the mixture 20%, the material/salt mass ratio of 2, the activation temperature of 550 °C and the activation time of 15 min, respectively. The sludge activated carbon has developed pore structure, the specific surface area up to 609.68 m<sup>2</sup>/g, the total pore volume comes to 0.51 cm<sup>3</sup>/g, and the average pore size is 3.51 nm.

**Key words:** sludge; activated carbon; zinc chloride; dry mixing; preparation; absorption; pore structure

## 污泥-锯末混合 $\text{ZnCl}_2$ 活化制备活性炭

吴东强<sup>1</sup>, 马培勇<sup>2,3\*</sup>, 胡 淞<sup>4</sup>, 邢献军<sup>2,3</sup>, 张贤文<sup>1,3</sup>

1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009

2. 合肥工业大学机械工程学院, 安徽 合肥 230009

3. 合肥工业大学先进能源技术与装备研究院, 安徽 合肥 230009

4. 安徽省环境保护产业发展促进会, 安徽 合肥 230000

**摘 要:** 以城市污水厂二沉池污泥为主要原料、固体  $\text{ZnCl}_2$  为活化剂, 添加一定量锯末, 在高温管式炉中采用化学活化法制备污泥活性炭, 通过单因素实验考察了锯末添加率、盐料比、活化温度、活化时间对污泥活性炭吸附性能的影响。结果表明, 锯末添加量为 20%、盐料质量比为 2.0、活化温度为 550 °C、活化时间为 15 min 时, 所得活性炭碘吸附性能最优, 达 679.25 mg/g; 污泥活性炭具有发达的孔结构, 其比表面积达 609.68 m<sup>2</sup>/g, 总孔容为 0.51 cm<sup>3</sup>/g, 平均孔径为 3.51 nm。

**关键词:** 污泥; 活性炭; 氯化锌; 干混; 制备; 吸附; 孔结构

中图分类号: TQ424.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)04-0792-07

### 1 前 言

随着我国城市化进程的加快, 生活污水产量急剧上升, 随之而来的污泥处理问题也越来越严重, 妥善处理

城市污水厂污泥是我国城市化进程中面临的重大问题<sup>[1]</sup>。传统的处理方法有焚烧处理、卫生填埋、土地利用、海洋排放等, 虽都能处理污泥, 但长期使用会埋下众多环境隐患, 产生新的威胁<sup>[2,3]</sup>。

收稿: 2017-11-06, 修回: 2018-01-16, 网络发表: 2018-03-27, Received: 2017-11-06, Revised: 2018-01-16, Published online: 2018-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51006031)

作者简介: 吴东强(1993-), 男, 山西省忻州市人, 硕士研究生, 动力工程专业, Tel: 13856912553, E-mail: 185424673@qq.com; 马培勇, 通讯联系人, Tel: 15375385975, E-mail: mapeiyong@163.com.

**引用格式:** 吴东强, 马培勇, 胡淞, 等. 污泥-锯末混合  $\text{ZnCl}_2$  活化制备活性炭. 过程工程学报, 2018, 18(4): 792-798.

Wu D Q, Ma P Y, Hu S, et al. Preparation of activated carbon from sludge and sawdust with  $\text{ZnCl}_2$  as activator (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 792-798, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217400.

20 世纪 80 年代后期出现了以污泥为原料制备活性炭的新方法, 可实现污泥的减量化、资源化、无害化, 且制备成本低<sup>[4]</sup>. 目前国内外研究者对污泥活性炭的制备进行了大量研究, 取得了显著成果<sup>[5]</sup>. Beeckmans 等<sup>[6]</sup>最先提出用污泥制备活性炭的想法, 之后便有大量的研究<sup>[7-10]</sup>. Li 等<sup>[9]</sup>用造纸厂污泥作为制备生物活性炭的原料, 通过蒸汽进行物理活化, 在活化温度 300 ℃、活化时间 60 min 下, 所得活性炭的碘吸附量达最大, 为 186.36 mg/g; 活化温度 850 ℃、活化时间 40 min 时, 所得活性炭比表面积最大, 为 135.49 m<sup>2</sup>/g. 任爱玲等<sup>[11]</sup>利用污水处理厂污泥, 以 ZnCl<sub>2</sub> 为活化剂制备污泥活性炭, 通过正交实验确定了最佳制备条件, 所制污泥活性炭的碘吸附量为 514~542 mg/g. 李依丽等<sup>[12-14]</sup>利用两步热解法优化制备了污泥基活性炭, 在污泥中添加 25% 玉米芯提高原料含碳率, 最终活性炭比表面积达 769 m<sup>2</sup>/g. 但二步法工序繁琐、耗时耗能. 李道静等<sup>[15]</sup>将一定比例的玉米芯掺杂在污泥中制备活性炭, 提升了污泥活性炭的吸附性能, 玉米芯添加比由 0 增至 50% 时, 活性炭碘吸附量由 307 mg/g 增至 492 mg/g. 刘亚纳等<sup>[16]</sup>以剩余污泥为原料制备活性炭, 研究了其对亚甲基蓝的吸附能力, 吸附符合 Langmuir 等温吸附方程和二级反应动力学方程.

目前, 活性炭制备方法主要有化学活化法和物理活化法<sup>[17]</sup>. 由于污泥成分不稳定, 有机物含量少, 所制活性炭的吸附效果不理想. 采用化学浸渍法<sup>[18]</sup>需烘干, 耗能

耗时、工序繁琐, 还须较多专业设备才可实现, 增加了制备成本<sup>[19]</sup>. 锯末是木材加工厂的废弃物, 我国每年产生大量锯末. 将锯末掺入污泥中制备活性炭, 可提高活性炭的吸附性能, 同时又可将锯末资源化利用, 前人对此研究较少.

本研究采用干法混合方式将添加一定量锯末的污泥与粉末状活化剂 ZnCl<sub>2</sub> 混合, 采用化学活化法直接制备活性炭, 通过单因素实验考察锯末添加率、盐料比、活化温度、活化时间对污泥活性炭吸附性能的影响, 为优化实验和工业生产提供依据.

2 实验

2.1 实验材料

污泥(安徽省合肥市某污水处理厂), 锯末为山东省某木材加工厂产生的废弃梧桐树锯末. 无水 ZnCl<sub>2</sub>、盐酸、碘化钾、碘、淀粉溶液、硫代硫酸钠等药品均为分析纯(国药化学试剂有限公司).

污泥和锯末的工业分析与元素分析结果见表 1. 可以看出, 污泥中固定碳很少, 主要成分为灰分和挥发分; 含较多的 C 和 O 元素, H 和 N 元素含量较少, 4 种元素的总和不超过 50%, 表明污泥中还含大量其它元素, 如 Si 和各种金属元素等<sup>[20]</sup>. 锯末中挥发分含量为 73.1%, 固定碳含量为 13.54%(是污泥中固定碳含量的 2.6 倍), 碳含量为 40.12%, 几乎是污泥中碳含量的 2 倍, 因此在污泥中添加锯末可很好地提高污泥中的含碳比.

表 1 污泥和锯末的工业和元素分析结果  
Table 1 Proximate and elemental analysis results of sludge and sawdust

Matetial	Proximate analysis/wt% (ad)				Elemental analysis/wt% (ad)			
	Moisture	Ash	Vloatile	Fixed carbon	C	H	O	N
Sludge	4.48	48.26	42.02	5.24	22.59	3.52	16.74	3.63
Sawdust	9.40	3.96	73.10	13.54	40.12	4.56	41.75	0.15

2.2 实验设备和分析仪器

750T 型多功能粉碎机(浙江铂欧五金厂), 8411 型电动振筛机(浙江道虞越州土工仪器厂), OTP1200X 型高温管式炉(安徽科晶材料技术有限公司), DHG-9070AG 型电热恒温鼓风干燥箱(上海三发科学仪器有限公司). vario MACRO cub 元素分析仪(德国 Elemental Analyzer 公司), EVO18 扫描电子显微镜(SEM, 德国蔡司公司), TriStar II 3020 全自动三站式比表面积孔隙分析仪(BET, 美国 Micromeritics Instrument Corporation), Nicolet iZ10 傅立叶红外光谱仪(FT-IR, 德国 Neaspec 公司).

2.3 实验设计及流程

2.3.1 活性炭的制备

污泥为主要原料、锯末为辅助原料、无水 ZnCl<sub>2</sub> 为

活化剂. 将污泥在 105 ℃ 下保温 12 h, 烘干破碎, 过 100 目(150 μm)泰勒标准筛. 将锯末清洗、干燥、破碎, 过 40 目(365 μm)标准筛, 待用.

将污泥、锯末和 ZnCl<sub>2</sub> 按一定比例均匀混合, 置于坩埚内, 将坩埚移入高温管式炉, 在流速为 1.0 L/min 的氮气气氛下活化. 活化所得样品用 0.1 mol/L HCl 溶液酸洗, 再用去离子水洗至中性; 研磨并过 200 目(75 μm)标准筛, 得最终样品. 实验流程如图 1 所示.

2.3.2 计算方法

锯末添加率 λ、盐料比 γ、活性炭产率 δ 分别用下式计算:

$$\lambda=M_j/M_w,$$
 (1)

$$\gamma=M_z/M_l,$$
 (2)

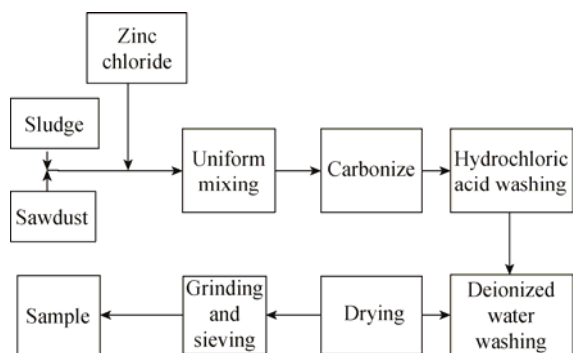


图1 污泥碳化流程

Fig.1 Flow chart of sludge carbonization

$$\delta = M_T / (M_j + M_w), \quad (3)$$

式中,  $M_j$ ,  $M_w$  分别为锯末与污泥的质量(g),  $M_z$  为无水  $\text{ZnCl}_2$  的质量(g),  $M_l$  为污泥和锯末混合物的质量(g),  $M_T$  为所得活性炭质量(g).

### 2.3.3 分析方法

采用煤质颗粒活性炭碘吸附量测定方法<sup>[21]</sup>测定污泥活性炭的碘吸附量, 用 SEM 观察样品的形貌结构, 用 FT-IR 分析样品的表面官能团分布, 用 BET 检测样品的比表面积和孔结构.

## 3 结果与讨论

### 3.1 工艺参数对污泥活性炭吸附性能的影响

固定实验条件: 锯末添加率 20wt%、盐料质量比 2.0、活化温度 550℃、活化时间 60 min, 考察单因素对污泥活性炭吸附性能的影响(实验相对标准偏差为 3%).

#### 3.1.1 锯末添加率对活性炭吸附性能的影响

锯末添加率对活性炭吸附性能的影响如图 2 所示. 可以看出, 污泥活性炭对碘的吸附量随锯末添加率增加而提高, 锯末添加率大于 10wt%时, 碘吸附量大幅提升, 锯末添加率分别为 20wt%和 30wt%时, 碘吸附量分别为 638.16 和 672.82 mg/g, 活性炭产率分别为 37.96%和 34.52%. 锯末添加率为 30%时产率减小较多, 主要是因为锯末中含大量纤维素, 在活化剂作用下, 形成了发达的孔结构, 污泥中含碳量较低, 锯末含碳量较高, 因此活性炭对碘的吸附性能与锯末添加率呈正相关; 且污泥中灰分较多, 挥发分较少, 锯末则反之, 因此锯末添加率从 20%提升到 30%时, 活性炭产率下降<sup>[22]</sup>. 实验中明显观察到随锯末添加率增大, 收集到的焦油类物质增多, 表明锯末在焙烧过程中生成较多的烃类物质, 导致活性炭产率由不添加锯末时的 39.36%降至锯末添加率为 30%时的 34.52%. 虽然锯末添加率为 30%的产物的碘吸附量高于锯末添加率为 20wt%时, 但本研究的主要

目的是污泥的资源化利用, 因此选取最优锯末添加率为 20wt%.

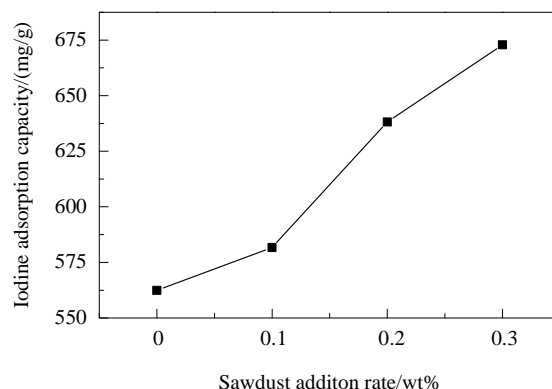


图2 锯末添加率与活性炭碘吸附量的关系曲线

Fig.2 The relation curve between sawdust addition rate and iodine adsorption capacity of activated carbon

#### 3.1.2 盐料质量比对吸附性能的影响

盐料质量比对活性炭吸附性能的影响如图 3 所示. 可以看出, 随盐料质量比提高, 污泥活性炭对碘的吸附量先快速增大后缓慢减小. 当盐料质量比为 2.0 时, 污泥活性炭碘吸附量最大, 达 638.16 mg/g. 这是因为  $\text{ZnCl}_2$  是化学活化剂, 在反应过程中主要作用是脱水缩合, 阻止碳化过程中焦油产生, 提高产物的碳含量, 促进形成孔结构<sup>[23,24]</sup>. 盐料比较低时,  $\text{ZnCl}_2$  含量较少, 对原料活化不充分. 随盐料比提高, 原料被充分活化, 从而使产物的碘吸附性能提升.  $\text{ZnCl}_2$  对原料有脱水和润胀作用, 含量越高, 所得产物的孔结构越发达<sup>[25,26]</sup>. 但当盐料比超过 2.0 时,  $\text{ZnCl}_2$  已将原料充分活化, 过量的  $\text{ZnCl}_2$  会堵塞原来生成的孔, 并将一些已生成的孔扩大成较大的孔洞, 导致活性炭的吸附性能降低<sup>[27]</sup>.

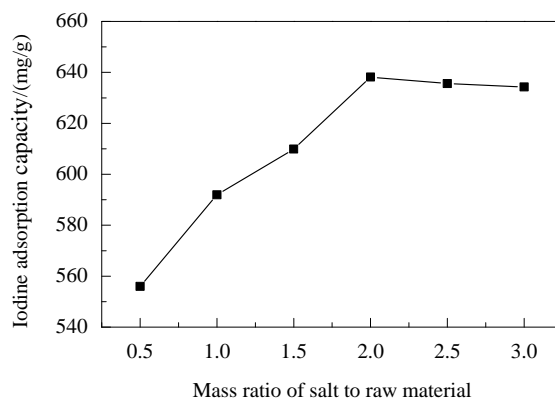


图3 盐料质量比与活性炭碘吸附量的关系

Fig.3 Relationship between material/salt mass ratio and iodine adsorption capacity of activated carbon

### 3.1.3 活化温度对吸附性能的影响

活化温度对活性炭吸附性能的影响如图4所示。可以看出, 活化温度提高, 污泥活性炭的碘吸附量先快速上升后降低, 活化温度为  $550^\circ\text{C}$  时, 达峰值  $638.16\text{ mg/g}$ 。这主要是因为随温度升高, 污泥中的易挥发成分析出, 活化剂使原料脱水缩合形成多孔结构的活性炭, 而  $\text{ZnCl}_2$  主要是在高于  $450^\circ\text{C}$  下发挥活化造孔作用<sup>[28]</sup>, 活化温度低于  $450^\circ\text{C}$  时,  $\text{ZnCl}_2$  对原料的造孔作用较弱, 活化不完全, 故吸附量较低。当温度接近  $450^\circ\text{C}$  时, 活化速率不断加快,  $\text{ZnCl}_2$  与原料上的一些活性物质反应, 微晶内原本闭塞的孔也被打开, 开始生成大量有吸附能力的孔, 碘吸附量大幅提升。但温度超过  $550^\circ\text{C}$  后, 活性炭中碳骨架过度烧失, 原本已形成的孔结构被破坏, 形成无吸附能力的大孔<sup>[14]</sup>。因此, 最优活化温度为  $550^\circ\text{C}$ 。

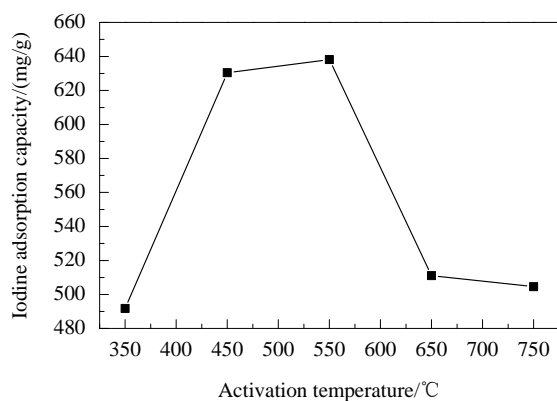


图4 活化温度与活性炭对碘的吸附量的关系

Fig.4 Relationship between activation temperature and iodine adsorption capacity of activated carbon

### 3.1.4 活化时间对吸附性能的影响

活化时间对活性炭吸附性能的影响如图5所示。可以看出, 随活化时间延长, 活性炭的碘吸附量先增加后降低, 15 min 时最大, 为  $679.25\text{ mg/g}$ , 但整体变动不大。这是因为活化剂发挥活化作用需要一定时间<sup>[28]</sup>。活化时间小于 15 min 时,  $\text{ZnCl}_2$  未能与原料充分反应, 活化不完全, 生成的孔结构较少。活化时间超过 15 min 时, 活化反应充分, 新孔不断生成, 原有的闭塞孔基本打开, 吸附效果较好<sup>[29]</sup>。随活化时间加长, 已有的孔结构在长时间活化作用下不断扩充、坍塌, 形成较大的孔洞, 导致具有吸附能力的孔减少, 碘吸附能力下降。因此, 最佳活化时间为 15 min。

## 3.2 污泥活性炭的孔结构

### 3.2.1 比表面积与孔分布

采用  $\text{N}_2$  吸附法<sup>[30]</sup>分析活性炭的孔结构和比表面积。

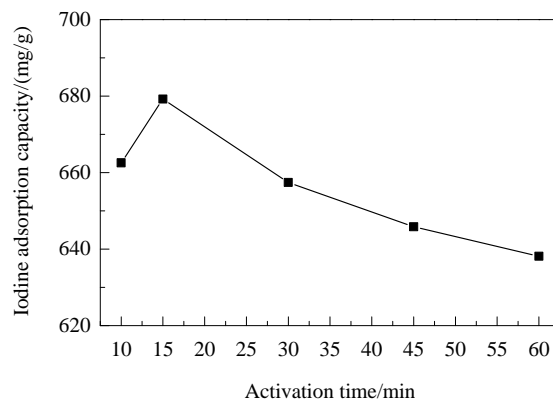


图5 活化时间与活性炭碘吸附量的关系

Fig.5 Relationship between activated time and iodine adsorption capacity of activated carbon

通常采用  $\text{N}_2$  吸脱附法测定活性炭的饱和气体吸附量。选择锯末添加率 20%、盐料质量比 2.0、活化温度  $550^\circ\text{C}$ 、活化时间 15 min 条件下所制碘吸附性能最优的活性炭进行 BET 分析, 结果显示, 其比表面积为  $609.68\text{ m}^2/\text{g}$ 、总孔容为  $0.51\text{ cm}^3/\text{g}$ 、平均孔径为  $3.51\text{ nm}$ , 其中微孔孔容为  $0.07\text{ cm}^3/\text{g}$ 。

图6为所测样品的  $\text{N}_2$  吸-脱附等温曲线, 该曲线为 II 型等温线<sup>[31]</sup>, 为非严格的单层吸附等温线, 在  $p/p_0=0.2$  附近存在 1 个拐点, 表明单层吸附结束, 开始出现多层吸附。在高压区由于毛细凝聚现象, 吸附等温线与脱附等温线分离, 吸附等温线在脱附等温线的下方, 产生吸附滞后现象, 即滞后环<sup>[32]</sup>, 表明污泥活性炭中存在较多的微孔和中孔。

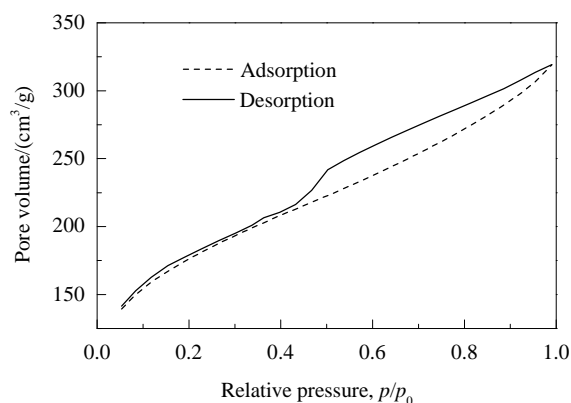


图6 污泥活性炭吸-脱附等温曲线

Fig.6 Adsorption-desorption isotherms of activated carbon

图7为污泥活性炭的 BJH 吸附累积孔容, 在  $4\text{ nm}$  处出现峰值, 表明样品中含较多直径约  $4\text{ nm}$  的孔。

### 3.2.2 锯末添加率对污泥活性炭孔结构的影响

不同锯末添加率下所制的污泥活性炭的孔结构见表2。可以看出, 锯末添加率提高, 活性炭比表面积增大,

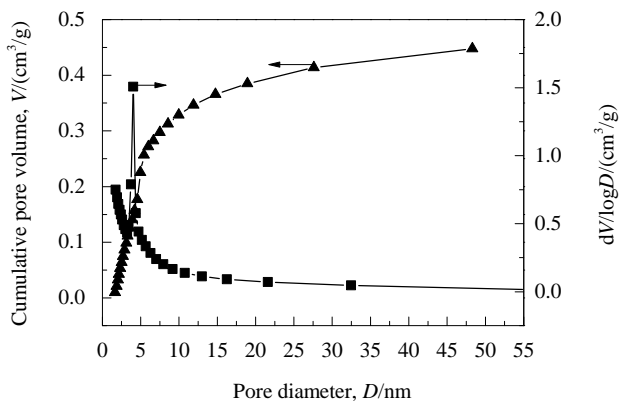


图 7 污泥活性炭的 BJH 吸附累积孔容分布  
Fig.7 Distribution graph of BJH adsorption cumulative pore volume of activated carbon

表明增加锯末添加率会产生更多的孔. 介孔孔容和总孔容均不断增大, 微孔孔容基本不变, 表明锯末有利于形成介孔, 一部分微孔经活化剂扩孔形成了介孔, 因而介孔孔容增幅较大. 加入锯末可显著提高所制活性炭的比表面积, 但二者不呈线性变化, 表明锯末对原料活化有一定的促进作用, 加入少量锯末时促进作用较明显, 比表面积提升较大, 加入较多锯末时促进作用减弱, 比表面积提升减小.

3.2.3 活性炭的微观形貌

对吸附性能最佳的活性炭样品进行 SEM 检测, 结果如图 8 所示. 可以看出, 污泥活性炭表面粗糙不平, 有大量细微的孔结构密布于活性炭表面, 孔结构发达.

表 2 锯末添加率与污泥活性炭孔径结构的关系					
Table 2 Relationship between sawdust addition rate and pore size of activated carbon in sewage sludge					
Sawdust content/wt%	BET surface area /(m <sup>2</sup> /g)	Mesopore volume /(cm <sup>3</sup> /g)	Total pore volume /(cm <sup>3</sup> /g)	Micropore volume /(cm <sup>3</sup> /g)	Mesopore volume/total pore volume
0	385.87	0.32	0.37	0.05	0.87
10	624.14	0.76	0.82	0.06	0.92
20	691.27	0.82	0.88	0.06	0.93
30	751.30	0.85	0.91	0.06	0.92

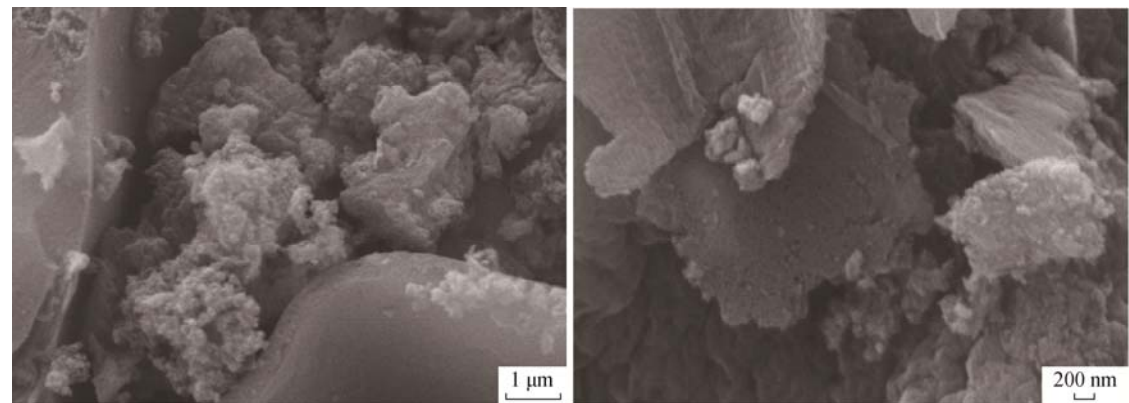


图 8 污泥活性炭样品的 SEM 照片  
Fig.8 SEM images of activated carbon

3.2.4 活性炭的红外光谱

图 9 为相同活化条件、不同锯末添加率时污泥活性炭的 FT-IR 谱. 可以看出, 不同锯末添加率下所获样品的表面官能团基本一致, 3667 和 3415 cm<sup>-1</sup> 处为 O-H 伸缩振动峰或羟基氢[33], 1619 cm<sup>-1</sup> 处为羰基的伸缩振动峰[34], 1434 cm<sup>-1</sup> 处为 CH<sub>2</sub> 吸收峰[35], 1128, 1089 和 840 cm<sup>-1</sup> 处为 Si-O-Si 振动吸收峰[36], 880~680 cm<sup>-1</sup> 处为 C-H 弯曲振动峰. 3415 和 1089 cm<sup>-1</sup> 附近的峰强度差别较大, 添加 20% 锯末的活性炭中含-OH 更多, 纯污泥活性炭则含 Si-O-Si 更多, 这是因为污泥中含更多的硅酸盐和石英砂, 而锯末中含较多的有机物质.

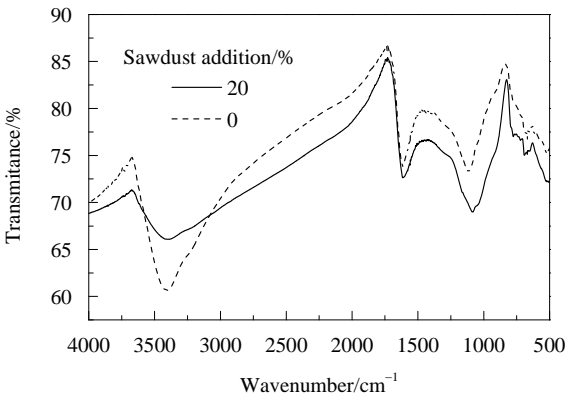


图 9 不同锯末含量的活性炭的红外光谱  
Fig.9 FT-IR spectra of activated carbon with different sawdust contents

## 4 结论

以污泥和锯末为原料、无水  $\text{ZnCl}_2$  为活化剂制备活性炭, 研究了锯末添加率、盐料比、活化温度、活化时间对污泥活性炭吸附性能的影响, 得到以下结论:

(1) 通过干法  $\text{ZnCl}_2$  活化方式将污泥和锯末混合活化, 可显著提高污泥活性炭的吸附能力。

(2) 锯末添加率 20%、盐料质量比 2.0、活化温度  $550^\circ\text{C}$ 、活化时间 15 min 条件下, 所得活性炭的碘吸附量较高, 达 679.25 mg/g。

(3) 所制污泥活性炭有大量孔, 比表面积为  $609.68 \text{ m}^2/\text{g}$ , 总孔容为  $0.51 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 平均孔径为 3.51 nm, 其中微孔孔容为  $0.07 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。

(4) 添加锯末对活性炭表面官能团的影响较小。

## 参考文献

- [1] 苏铭华. 污泥质废弃物衍生燃料的研制开发 [J]. 中国资源综合利用, 2009, 27(7): 14–15.  
Su M H. Research and development of sludge derived fuel [J]. Chinese Renewable Energy Industries Association, 2009, 27(7): 14–15.
- [2] 赵丽君, 张大群, 陈宝柱. 污泥处理与处置技术的进展 [J]. 中国给水排水, 2001, 17(6): 23–25.  
Zhao L J, Zhang D Q, Chen B Z. Advances in sludge treatment and disposal technology [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(6): 23–25.
- [3] 刘英华. 城市污水处理厂污泥制备活性炭的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 6–10.  
Liu Y H. Study on preparation of activated carbon from sewage sludge from municipal wastewater treatment plant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008: 6–10.
- [4] 夏莉. 微波热解污泥及其产物组成的分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 7–10.  
Xia L. Analysis of microwave pyrolysis sludge and its product composition [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 7–10.
- [5] Mohammed R, Imriti M, Ouchra B, et al. In-vessel treatment of urban primary sludge by aerobic composting [J]. Bioresour. Technol., 2010, 101(15): 5988–5995.
- [6] Beeckmans J M, Ng P C. Pyrolyzed sewage sludge—its production and possible utility [J]. Environ. Sci. Technol., 1971, 5(1): 69–71.
- [7] Maria J M, Adrian A A, Balaguer M D, et al. Activated carbons developed from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions [J]. Chem. Eng. J., 2003, 94(3): 231–239.
- [8] Victor M M, Mohedano A F, Rodriguez J J. Activated carbons from sewage sludge application to aqueous-phase adsorption of 4-chlorophenol [J]. Desalination, 2011, 277(1): 377–382.
- [9] Li W H., Yue Q Y, Gao B Y, et al. Preparation of sludge-based activated carbon made from paper mill sewage sludge by steam activation for dye wastewater treatment [J]. Desalination, 2011, 278(1/3): 179–185.
- [10] Wang X N, Zhu N W, Yin B K. Preparation of sludge-based activated carbon and its application in dye wastewater treatment [J]. J. Hazard. Mater., 2008, 153(1/2): 22–27.
- [11] 任爱玲, 王启山, 贺君. 城市污水处理厂污泥制活性炭的研究 [J]. 环境科学, 2004, 5(增刊 1): 48–51.  
Ren A L, Wang Q S, He J. Study on the activated carbon produced with sewage sludge [J]. Environmental Science, 2004, 5(S1): 48–51.
- [12] 李依丽, 王姚, 李利平, 等. 污泥活性炭的制备及其性能的优化 [J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(3): 452–458.  
Li Y L, Wang Y, Li L P, et al. Preparation of activated carbon from sewage sludge and optimization of its performance [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(3): 452–458.
- [13] 李依丽, 李利平, 尹晶, 等. 污泥基活性炭的两步热解优化制备及其性能表征 [J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(12): 1887–1890.  
Li Y L, Li L P, Yin J, et al. Preparation and characterization of activated carbon from sewage sludge by two steps pyrolysis [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(12): 1887–1890.
- [14] Li Y L, Li Y L, Li L P, et al. Preparation and analysis of activated carbon from sewage sludge and corn stalk [J]. Adv. Powder Technol., 2016, 27(2): 684–691.
- [15] 李道静, 封莉, 张立秋. 玉米芯掺杂对污泥基活性炭性能的影响 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 1010–1014.  
Li D J, Feng L, Zhang L Q. Effect of corncob blending on properties of sludge based activated carbon [J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(3): 1010–1014.
- [16] 刘亚纳, 周鸣, 汤红妍, 等. 亚甲基蓝在污泥活性炭上的吸附 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(7): 2339–2344.  
Liu Y N, Zhou M, Tang H Y, et al. Adsorption of methylene blue on activated carbon of sludge [J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(7): 2339–2344.
- [17] Rio S, Coq L L, Faur C, et al. Preparation of adsorbents from sewage sludge by steam 7 activation for industrial emission treatment [J]. Process Saf. Environ. Prot., 2014, 84(4): 258–264.
- [18] Tsai W T, Chang C Y, Lee S L. A low cost adsorbent from agricultural waste corn cob by zinc chloride activation [J]. Bioresour. Technol., 1998, 64(3): 211–217.
- [19] 马培勇, 武晋州, 张贤文, 等.  $\text{K}_2\text{CO}_3$ -锯末干混合制备成型活性炭 [J]. 过程工程学报, 2018, 18(1): 159–164.  
Ma P Y, Wu J Z, Zhang X W, et al. Preparation of formed activated carbon from  $\text{K}_2\text{CO}_3$ -sawdust dry mixing [J]. Chin. J. Process Eng., 2018, 18(1): 159–164.
- [20] 马勇, 卢波, 刘加荣. 水泥厂协同利用城镇污水处理厂污泥的探索 [J]. 上海建材, 2009, 28(4): 10–13.  
Ma Y, Lu B, Liu J R. Research on synergistic utilization of sewage sludge in urban sewage treatment plant in cement plant [J]. Shanghai Building Materials, 2009, 28(4): 10–13.
- [21] 中国兵器工业集团公司. 煤质颗粒活性炭实验方法—碘吸附量的测定: GB T7702.7–2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1–6.
- [22] 尹炳奎. 污泥活性炭吸附剂材料的制备及其在废水处理中的应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 37.  
Yin B K. Preparation of activated carbon adsorbent for sludge and its application in wastewater treatment [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007: 37.



- [23] 苑守瑞, 朱义年, 梁美娜, 等.  $\text{ZnCl}_2$  活化法制备柚子皮活性炭 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(增刊 1): 22–25.  
Yan S R, Zhu Y N, Liang M N, et al. Preparation of activated carbon from shaddock peel by zinc chloride activation [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(S1): 22–25
- [24] Mohanty K, Das D, Biswas M N. Preparation and characterization of activated carbons from sterculia, Alata, nutshell by chemical activation with zinc chloride to remove phenol from wastewater [J]. Adsorption-Journal of the International Adsorption Society, 2006, 12(2): 119–132.
- [25] 翟云波. 基于化学活化法的污泥衍生吸附剂的制备及应用基础研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2005: 42.  
Zhai Y B. Study on preparation and application of sludge derived adsorbent based on chemical activation method [D]. Changsha: Hunan University, 2005: 42.
- [26] Ozdemir I, Sahin M, Orhan R, et al. Preparation and characterization of activated carbon from grape stalk by zinc chloride activation [J]. Fuel Process. Technol., 2014, 125(9): 200–206.
- [27] 赵晶晶. 污泥活性炭的制备及其应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 27.  
Zhao J J. Preparation and application of activated sludge from activated sludge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 27.
- [28] Liu T, Wei D, Zhang G, et al. A comparison of flocculent and granular structure of sludge on the influence of activated carbon preparation, characterization and application [J]. RSC Adv., 2016, 6(90): 45–52.
- [29] 张会平, 叶李艺, 杨立春. 氯化锌活化法制备木质活性炭研究 [C]//全国活性炭学术研讨会论文集. 2004: 42–45.  
Zhang H P, Ye L Y, Yang L C. Preparation of woody activated carbon by zinc chloride activation method [C]//Symposium on Activated Carbon in China. 2004: 42–45.
- [30] 陈金妹, 谈萍, 王建永. 气体吸附法表征多孔材料的比表面积及孔结构 [J]. 粉末冶金工业, 2011, 21(2): 45–49.  
Chen J M, Tan P, Wang Y J. Specific surface area and pore structure of porous materials characterized by gas adsorption method [J]. Powder Metallurgy Industry, 2011, 21(2): 45–49.
- [31] 孙媛媛. 芦竹活性炭的制备、表征及吸附性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014: 9.  
Sun Y Y. Preparation, characterization and adsorption properties of activated carbon from *Arundo donax L.* [D]. Jinan: Shandong University, 2014: 9.
- [32] 邢献军, 孙宗康, 范方宇, 等. 干法制备高中孔率生物质成型活性炭 [J]. 化工学报, 2016, 67(6): 2638–2644.  
Xing X J, Sun Z K, Fan F Y, et al. Preparation of activated carbon from biomass with high porosity rate by dry process [J]. CIESC Journal, 2016, 67(6): 2638–2644.
- [33] Warnock D D, Lehmann J, Kuypers T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil concepts and mechanisms [J]. Plant & Soil, 2007, 300(2): 9–20.
- [34] 赵兴兴, 王哲. 氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 [J]. 环境科学, 2014, 35(2): 663–668.  
Zhao X X, Wang Z. Study on the adsorption mechanism of ofloxacin on carbon nanotubes [J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 663–668.
- [35] 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 [J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3716–3721.  
Guo W J, Liang X F, Lin D S, et al. Heavy metal adsorption characteristics of soil remediation [J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3716–3721.
- [36] Yang H, Xu R, Xue X, et al. Hybrid surfactant-templated mesoporous silica formed in ethanol and its application for heavy metal removal [J]. J. Hazard. Mater., 2008, 152(2): 690–698.