

污泥 - 烟草秸秆基活性炭的制备及对含铜废水去除性能研究

董志芬^{1,2}, 谢容生^{2,3*}

¹云南绿色环境科技开发有限公司, 云南 昆明

²云南省环境科学学会, 云南 昆明

³云南新世纪环境保护科学研究院, 云南 昆明

稿日期: 2023年1月3日; 录用日期: 2023年2月2日; 发布日期: 2023年2月10日

摘要

本研究采用炭化活化法制备污泥 - 烟草秸秆基活性炭, 在氮气保护气下将污泥与烟草秸秆掺杂制备活性炭, 并进行含铜废水的吸附性能研究, 继而优化制备污泥 - 烟草秸秆活性炭过程的最佳制备条件。通过 TGA、SEM、FT-IR 等分析表征, 进一步阐述污泥 - 烟草秸秆活性炭与废水中 Cu²⁺ 去除效果的内在关联。利用废弃的固体物料污泥与烟草秸秆掺杂制备碳基吸附材料处理含铜废水, 实现了固体废弃物的资源化利用, 开辟了城市污水厂污泥资源化利用新途径。

关键词

污泥 - 烟草秸秆基活性炭, 炭化活化法, 含铜废水, 吸附, 资源化利用

Preparation of Sludge-Tobacco Straw Activated Carbon and Its Application for the Removal of Copper-Containing Wastewater

Zhifen Dong^{1,2}, Rongsheng Xie^{2,3*}

¹Yunnan Environmental Science and Technology Development Co., Ltd, Kunming Yunnan

²Yunnan Environmental Science Society, Kunming Yunnan

³Yunnan New Century Environmental Protection Research Institute, Kunming Yunnan

Received: Jan. 3rd, 2023; accepted: Feb. 2nd, 2023; published: Feb. 10th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 董志芬, 谢容生. 污泥 - 烟草秸秆基活性炭的制备及对含铜废水去除性能研究[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(1): 47-57. DOI: 10.12677/aep.2023.131006

Abstract

The carbonization activation method was used to preparing activated carbon from sludge-tobacco straw in this study. The activated carbon was prepared by doping the sludge with tobacco straw under N_2 protective atmosphere, and the performance of copper-containing wastewater was studied to optimize the best preparation conditions in the preparation of sludge. Tobacco straw activated carbon process. Through the analysis and characterization of TGA, SEM, FT-IR, etc., the intrinsic relationship between the sludge-tobacco straw activated carbon and the removal effect of Cu^{2+} in the wastewater was further explained. The use of waste solid material sludge and tobacco straw to prepare carbon-based adsorption materials to treat copper-containing wastewater has realized the resource utilization of solid waste and opened a new way for urban sewage plant sludge resource utilization.

Keywords

Sludge-Tobacco Straw Activated Carbon, Carbonization Activation Method, Copper-Containing Wastewater, Adsorption, Resource Utilization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

含铜工业废水具有易富集、难降解等特点, 主要来源于有色金属冶炼、矿山开采、有机合成工艺、农药、印染、橡胶等工艺, 并且在电镀、化工、机械加工生产水、废旧电池垃圾处理等过程[1]。近年来随着电子芯片等产业兴起, 印刷电路板生产过程产生的含铜废水量也逐渐上升。据了解, 工业废水中 Cu^{2+} 浓度高达几十克每立方, 若未经处理直接排入水环境中会造成水环境污染, 水体自净困难, 若被人体摄入过量时会导致癌症的发生[2]。近年来, 低成本吸附剂对 Cu^{2+} 的吸附已成为研究热点。秸秆废弃物[3]、微生物[4]、树脂[5]及城市污泥[6]等已被用于废水中 Cu^{2+} 的去除。

污泥来源于污水处理厂污水处理过程, 具有含水率高、体积大、易腐败、不稳定等特点, 由于污泥中含有一些难以生物降解的有机污染物、重金属以及致病微生物等, 因此在一定程度上限制污泥的处理与处置[7]。污泥材料利用是近年来污泥处理一个重要的发展方向, 利用污泥及其焚烧产物制造砖块、陶粒、生化纤维板、玻璃、水泥、碳基材料等[8], 相对于其它处理技术具有明显的经济效益。污泥制备成污泥炭也是资源化利用的一种方式, 与传统制备碳源的活性炭相比, 污泥的性质非常特殊, 污泥灰分含量较高, 碳含量较低[9]。以污泥为前驱体制备污泥基活性炭[10], 是变废为宝、有效解决污泥处理与处置的途径。已有研究表明, 利用城市污水污泥制备活性炭吸附材料过程中掺杂一定量的生物质材料, 不仅能提高污泥基活性炭的碳含量[11], 而且经过活化后使污泥基活性炭的孔表面积得到改善, 由此延长了污泥基活性炭的吸附量和使用寿命[12] [13]。

云南是烟草生产大省, 每年夏季在摘除烟叶之后就会剩余大量的烟草秸秆被废弃或烧毁, 对环境有着极大的影响。结合云南本地情况, 本研究利用在污泥中掺杂增碳材料(烟草秸秆)制备污泥-烟草秸秆基活性炭, 并且将该活性炭用于含铜废水处理, 达到以废治废的目的, 实现固体废弃物资源化利用具有显著的环境、社会与经济效益。

2. 材料与方法

2.1. 污泥 - 烟草秸秆活性炭制备

试验所用原料为污泥及烟草秸秆, 污泥取自云南某净化厂的剩余污泥, 所用烟草秸秆为云南玉溪地区的弃置烟杆。实验所取的原样品经前处理, 主要步骤为先将污泥置于阴凉避光处自然晾干, 去除杂物, 置粉碎机粉碎, 用 105℃ 烘箱烘干至恒重过 200 目筛备用; 烟杆先剪碎自然晾干, 粉碎至粉末状, 在 105℃ 烘箱烘干至恒重, 过 200 目筛备用。污泥与烟草秸秆的元素分析见表 1:

Table 1. Elemental analysis of dried sludge and tobacco straw

表 1. 干污泥与烟草秸秆元素分析

含量/指标(%)	N	C	H	S
污泥	4.47	26.6	4.50	0.54
烟草秸秆	1.83	37.7	5.30	0.36

2.2. 制备方法与技术路线

1) 泥 - 烟草秸秆基活性炭制备方法

称取一定量的污泥及烟草秸秆, 将两者按一定的掺杂比例混合均匀。将混合样品置于管式电阻炉内进行高温炭化, 以不同升温速率、炭化温度、炭化时间的条件下制备污泥 - 烟草秸秆炭化料。炭化料经过一定浓度的活化剂浸渍后干燥, 置于管式电阻炉内以一定升温速率的升至预设的活化温度下进行活化。所得活性炭粗产品经 0.1 mol/L HCl 溶液酸洗后, 再用去离子水洗产物调节 pH 值为 6.5~7.0, 置于 105℃ 烘箱干燥, 即得到污泥 - 烟草秸秆基活性炭。称量定量样品, 在 600℃ 下加热 2 h, 用马弗炉进行原材料的挥发分测试, 测定结果如表 2 所示。

Table 2. Volatile content of raw materials

表 2. 材料的性能含量

样品	灰分(%)	挥发分(%)
污泥	42.80	57.20
烟草秸秆	18.30	81.70

2) 技术路线

制备污泥 - 烟草秸秆制备活性炭主要技术路线见图 1。

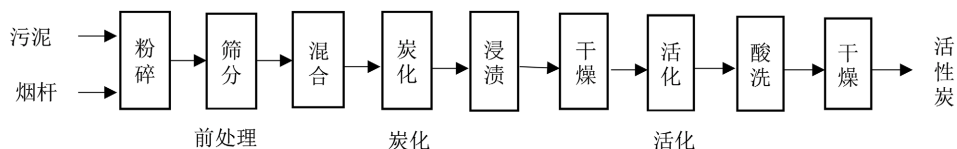


Figure 1. Flow chart for preparation of activated carbon

图 1. 技术路线图

3) 对含铜废水的吸附处理性能。主要方法如下:

通过静态吸附试验, 考察制备的碳基材料对废水中铜离子的去除效果。用 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 配制模拟含铜废水, Cu^{2+} 初始浓度为 50 mg/L, 调节 pH 值为 5.0。

称取一定质量的活性炭, 投加到既定浓度的含铜废水中, 经过 40 min 后吸附过滤操作, 通过 ICP 测定污泥-烟杆基活性炭处理后溶液中 Cu^{2+} 浓度, 根据公式 1, 计算出 Cu^{2+} 去除率。

$$\text{Cu}^{2+} \text{ 去除率} (\%) = (C_0 - C) / C_0 * 100\% \quad (\text{公式 1})$$

其中: C_0 —— Cu^{2+} 初始浓度, mg/L; C —— Cu^{2+} 吸附后浓度, mg/L。

2.3. 分析测试方法

采用电感耦合等离子体发射光谱仪(PQ9000, Leeman Corp., Germany)测定污泥-烟草秸秆活性炭吸附处理前后 Cu^{2+} 含量; 利用高分辨场发射扫描电子显微镜(Sirion 200 FEI COMPANY)、傅里叶红外光谱(Nicolet 6700 ThermoFisher, USA)同步热分析仪(Q600 TA, USA)对污泥-烟草秸秆活性炭进行表征分析。

3. 结果与分析

3.1. 炭化过程对 Cu^{2+} 处理的影响

3.1.1. 升温速率

炭化过程采取单试验因素进行试验, 分别选取 5、10、15、20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率, 控制炭化时间为 60 min、炭化温度为 700 $^{\circ}\text{C}$ 下制备得炭化料, 再将炭化料进行活化。活化条件如下: 以 0.5 mol/L KOH 为活化剂浸渍污泥-烟草秸秆炭化料, 浸渍时间为 2 h, 管式电阻炉以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 600 $^{\circ}\text{C}$ 活化温度进行活化 1 h, 得到粗制活性炭。该活性炭通过 0.1 mol/L HCl 溶液酸洗至上清液 pH 值为 6.5~7.0, 经 105 $^{\circ}\text{C}$ 恒温干燥箱烘干得到污泥-烟草秸秆活性炭产品。

所得活性炭产品处理含铜废水, 通过污泥-烟草秸秆活性炭对铜离子的去除效果反映升温速率对制备活性炭产品的影响(见图 2)。

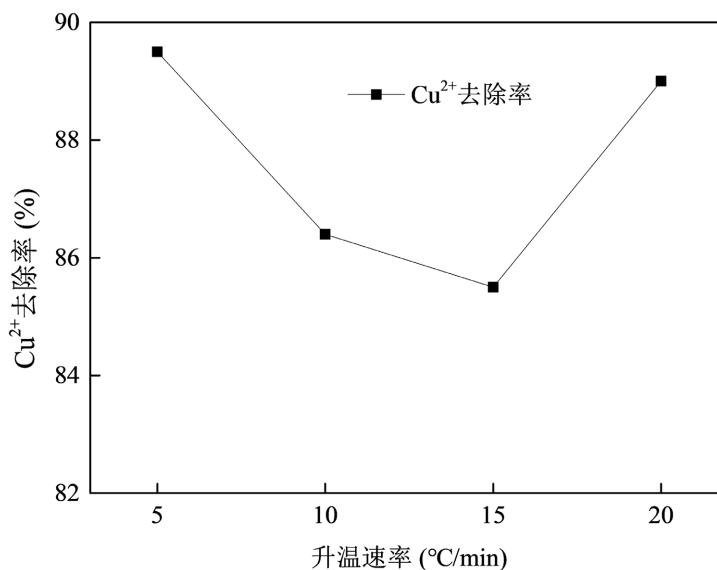


Figure 2. Effects of heating rate Cu^{2+} removal during carbonation process
图 2. 升温速率对铜离子去除效果的影响

炭化过程管式电阻炉升温速率为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, 污泥-烟草秸秆活性炭对 Cu^{2+} 的最佳去除效果达到 90%, 其原因可能为升温速率越慢, 活性炭吸附材料的造孔较规整、孔隙发达、成孔均匀, 此时大部分形成中孔和微孔, 该孔隙结构对废水中 Cu^{2+} 的吸附效果较好; 随着升温速率加快对 Cu^{2+} 的去除效果降低, 在

15°C/min 时达到最低为 85.5%，由此当升温速率逐渐增大，对活性炭产品的性能并没有改善，污泥与烟草秸秆的焦油及其他挥发分在这个过程中需要速度进行热解释放，未完成热解的成分留在原材料中，堵塞活性炭的成孔，孔隙不均匀，导致吸附效果差。当升温速率为 20°C/min 时，对 Cu^{2+} 的吸附能力上升，原因可能为由于升温速率过高，试验刚开始时原料中的焦油及其他挥发分未被热解释放，相反集聚在污泥与秸秆的孔隙中，在 20°C/min 升温速率下保持一定时间，当小孔内无法积聚这些组分时，焦油及其他挥发分便蒸发出来，这使得在 20°C/min 的升温速率下污泥与烟草秸秆形成大孔吸附效果增强。综合考虑时间成本，炭化过程选取升温速率为 20°C/min 为最佳。

3.1.2. 炭化温度

控制炭化升温速率为 20°C/min，分别选取 400°C、500°C、600°C、700°C、800°C 的炭化温度，其余操作条件与 3.1.1 中一致，烘干得到污泥 - 烟草秸秆活性炭产品。

如图 3 所示，当炭化最高温度逐渐上升，在相同条件下制得的活性炭产品对含铜废水中铜离子的去除率成正相关；在炭化最高温度为 700°C 时，铜离子的去除效果最好，去除率为 91.8%。原因可能为：在 700°C 下，由于温度导致污泥 - 烟草秸秆的孔数更多、孔径更细小、孔隙更发达[14]，因此在后续的活化条件一致的情况下，对含铜废水的吸附处理效果更好。随着炭化温度的升高，炭化进行比较完全，活化过程的逸出物就减少，其活化得率就升高。此外，炭化温度越高，能够与反应的活性点上的碳原子越少，碳的烧失量减少，也会使对 Cu^{2+} 的吸附能力增强。

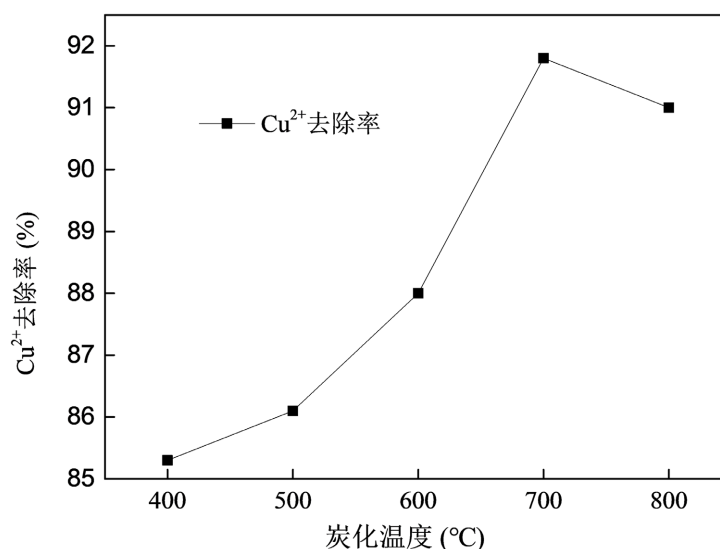


Figure 3. Effects of carbonization temperature and Copper ion removal effect during carbonation process
图 3. 炭化温度对铜离子去除效果的影响

3.1.3. 炭化时间

控制最高炭化温度为 700°C，炭化升温速率为 20°C/min，选取炭化时间分别 30 min、40 min、50 min、60 min、70 min，其余操作条件与 3.1.1 中一致。不同炭化时间与铜离子去除效果见图 4。

随着炭化时间增加，该碳基材料对 Cu^{2+} 的去除效果提升，在炭化保持时间为 60 min 时，所得活性炭产品对铜离子的去除率最高，约为 90%。因为在升温速率、炭化温度相同的条件下，炭化时间决定了碳基材料成孔的数量以及孔径的大小。炭化时间低于 60 min 时，成孔数相对较低导致碳基材料的吸附效果较低，炭化时间高于 60 min 时孔径大小不一导致碳基材料的品质较低，吸附效果降低。

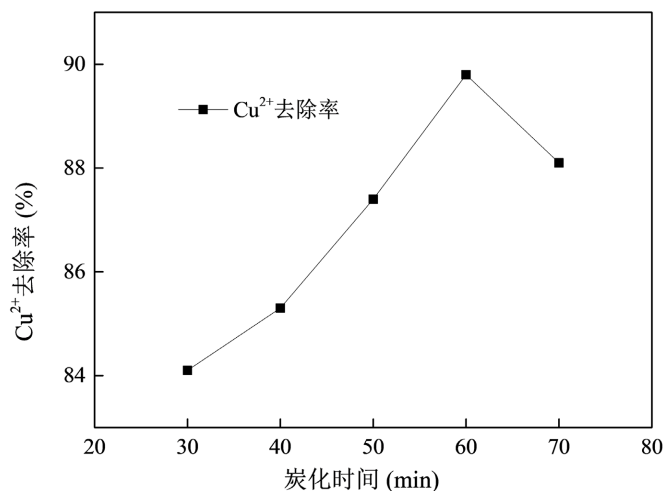


Figure 4. Different carbonization time and Copper ion removal effect during carbonation process
图 4. 不同炭化时间对铜离子去除效果

3.2. 活化过程对 Cu²⁺处理的影响

3.2.1. 活化温度

将污泥 - 烟草秸秆混合料置于 20°C/min 升温速率管式炉内, 在 700°C 下炭化 60 min, 得到污泥 - 烟草秸秆炭化料。选取活化温度分别为 400°C、500°C、600°C、700°C、800°C, 以 0.5 mol/L KOH 为活化剂浸渍污泥 - 烟草秸秆炭化料, 浸渍时间为 2 h, 管式电阻炉以 10°C/min 的升温速率升至设定活化温度进行活化 1 h, 粗制活性炭经酸洗得到活性炭产品。

不同活化温度对铜离子去除效果如图 5 所示。当活化温度逐渐上升, 活性炭对废水中 Cu²⁺ 的去除率也增加。活化温度在 600°C 以下时, 由于活化不充分, 孔隙结构不佳, 温度再度提高, 孔隙得以完善, 废水中 Cu²⁺ 的去除效果随之增大; 经 KOH 活化后的活性炭其对废水中 Cu²⁺ 去除率随热解温度的升高而不断增加, 在 700°C 去除效果最好但增长变化趋势较低。由于当温度上升到 800°C 左右时, 反应体系中出现金属钾蒸汽[9] (金属钾的沸点为 726°C), 钾蒸汽涌入微孔和石墨微晶间层, 继续对活性炭起催化造孔作用, 进而对废水中 Cu²⁺ 的吸附效果降低。综合时间以及节能等方面因素考虑, 本试验最佳活化温度为 600°C。

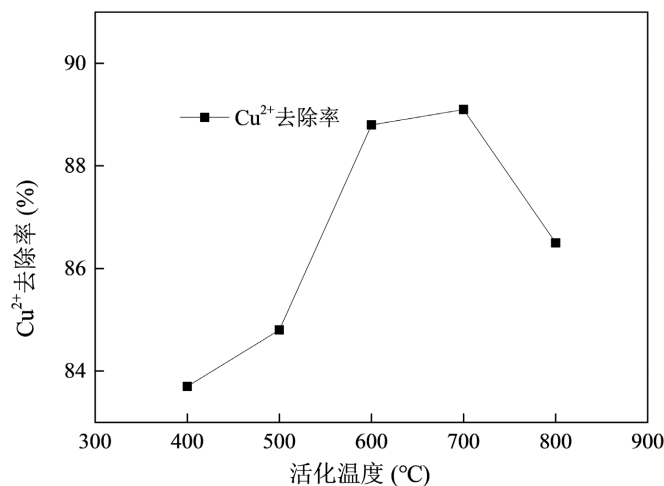


Figure 5. Different activation temperature and Copper ion removal effect
图 5. 不同活化温度对铜离子去除效果

3.2.2. 活化时间

活化保持时间分别取 30 min、45 min、60 min、75 min，其余操作条件与 3.2.1 中一致。从图 6 中得出，活化时间从 30~45 min 时活化反应还未充分进行，活化作用处于累积阶段，制备的活性炭铜离子吸附值不高。当活化时间为 60 min 时，活化反应充分完成，去除效果最高。在开始阶段，整个系统累积活化反应所需的能量，活化反应未进行或仅在表面局部能量不均匀区域进行，随着活化时间的增加，系统累积的能量越来越大，活化反应随之迅速进行，KOH 的活化作用发挥到最大，制备的活性炭吸附效果最好，此后，随着停留时间的进一步增加，制备的活性炭被烧失的可能性迅速增加[15]。实验结果也表明，在 75 min 阶段吸附效果下降，有部分活性炭在完成活化反应后烧失，同时灰分的增加，减小了污泥活性炭表面的活性中心，吸附效果下降。

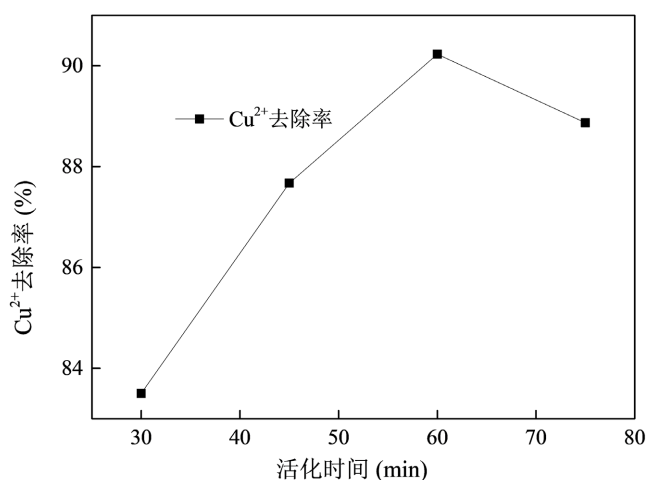


Figure 6. Different activator time and Copper ion removal effect
图 6. 不同活化时间对铜离子去除效果

3.2.3. 活化剂浓度

活化过程选取 KOH 活化剂浓度分别为 0.3 mol/L、0.4 mol/L、0.5 mol/L、0.6 mol/L，其余操作条件与 3.2.1 中一致。如图 7 所示，当用 KOH 溶液作为活化剂时，随着 KOH 溶液浓度升高，对含铜废水的去除效果越好。当 KOH 浓度为 0.5 mol/L 时，对废水中 Cu²⁺ 的去除效果最好约为 90%。该反应分为两步进行，在低温时生成表面物种，然后在高温时通过这些物种进行活化反应。活化剂浓度适当时，活化反应成孔机理就是通过与原料中的碳反应，把其中的部分碳刻蚀掉，经过洗涤将生成的盐及多余的洗去，在被刻蚀的位置出现了孔[14]。

3.2.4. 活化剂浸渍时间

炭化料与活化剂按固液比为 1:2.5 浸渍时间分别为 1 h、2 h、3 h，其余操作条件与 3.2.1 中一致。从图 8 中可以看出，活化剂浸渍时间在 2 h 的范围内，Cu²⁺ 的去除率最高，该试验选取活化剂浸渍时间为 2 h。经分析得，活化剂与炭化料的接触时间越长，制备的碳基材料对铜离子的处理效果越好。活化剂与炭化料充分接触，以化学分子的形式进入物质中，当时间为 2 h 时使得物料分子组成及孔隙逐渐吸收饱和，进而达到最大的饱和度。

3.3. 表征分析

3.3.1. 热重分析

图 9 为污泥的热重分析曲线，污泥在高温缺氧环境下进行的是放热分解反应，污泥热解的特征温度

是指污泥无氧热转化过程中的起始温度和峰值温度。整个过程中, 污泥出现 5 段明显的重量变化过程: 0°C~117°C 第一个失重平台, 属于水分的挥发并在 110.6°C 伴有明显的吸热峰, 平均吸收热量 107.9 J/g, 失重量 3.91%; 第二阶段 170°C~350°C 由于污泥中低分子化合物(主要是脂肪烃)在较低温度下开始反应, 碱性活化剂与原料表面含氧基团相互作用, 逐步构成表面基团(COK, -COOK 等)。该阶段存在两种反应, 一是活化剂脱水, 氢氧化物脱除水分子形成碱金属氧化物[16]。

3.3.2. SEM 分析

对污泥基、烟草秸秆、污泥 - 烟草秸秆进行扫描电镜分析如图 10, 污泥炭表面比较粗糙, 多孔并且孔结构较发达, 呈现大小不一的颗粒状(图 10(A)); 秸秆质地疏松, 有发达的孔结构(图 10(B))。利用秸秆和污泥掺杂体系制备的活性炭混合物, 孔隙多、孔径分布均匀细小、均匀成孔、形态各异、秸秆基质分布明显、孔隙和细孔均匀(图 10(C)); 同时也观察到秸秆炭表面杂质颇多, 是污泥中的灰分, 对孔的吸附会起到一定的阻碍作用。活化剂会对污泥炭和秸秆炭表面有刻蚀的作用, 热解过程中渍留在表面的活性氧化物占据的点刻蚀成许多小孔, 使得冷却后的样品在结构上失去原来的完整性(图 10(B))。在图中较多的可以观察到污泥炭中的中孔, 这是因为样品孔径扩充过程中, 颗粒粒度与微孔尺寸相当, 因而堵塞了部分微孔, 而污泥中存在明显的中孔, 因而对大分子有机物具有很好的吸附性。

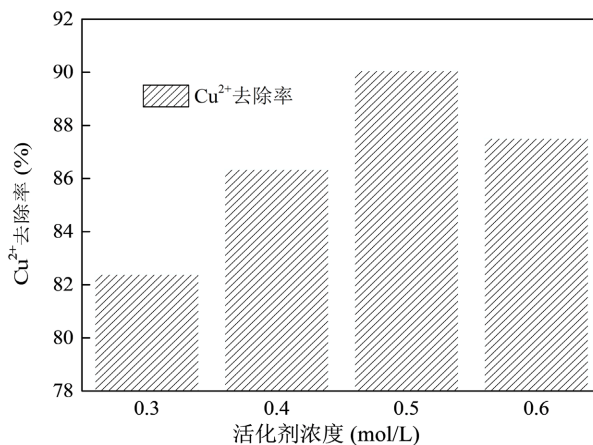


Figure 7. Different activator concentration and Copper ion removal effect

图 7. 不同活化剂浓度对铜离子去除效果

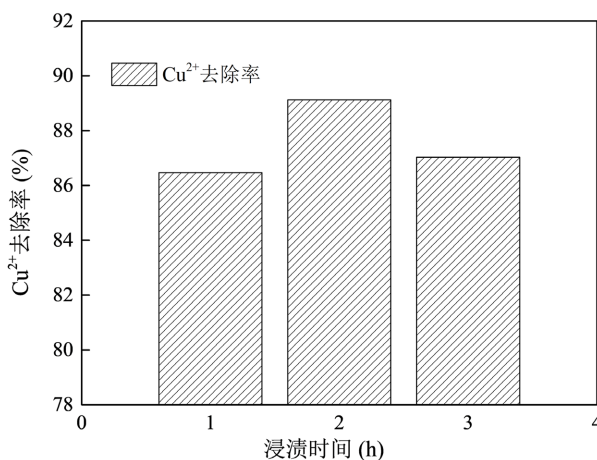


Figure 8. Different activator impregnation time and Copper ion removal effect

图 8. 不同活化剂浸渍时间对铜离子去除效果

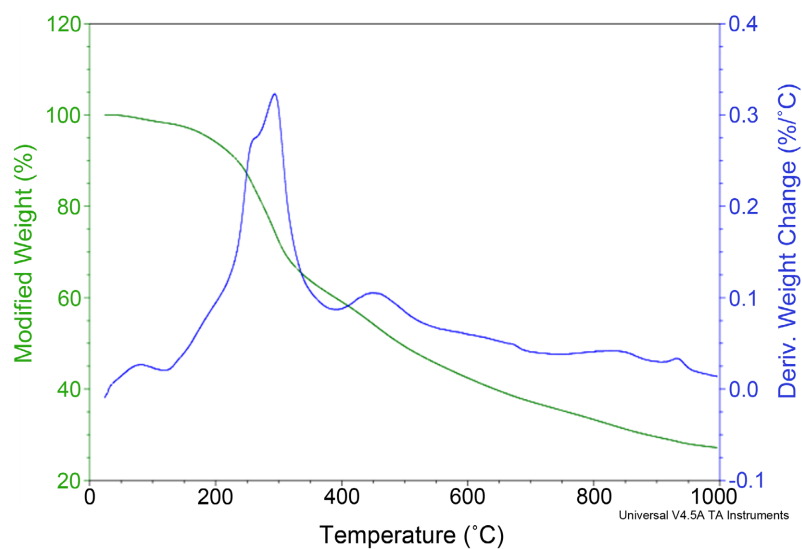


Figure 9. TG-DTG patterns sludge based activated carbon
图 9. 污泥活性炭 TG-TGA 曲线

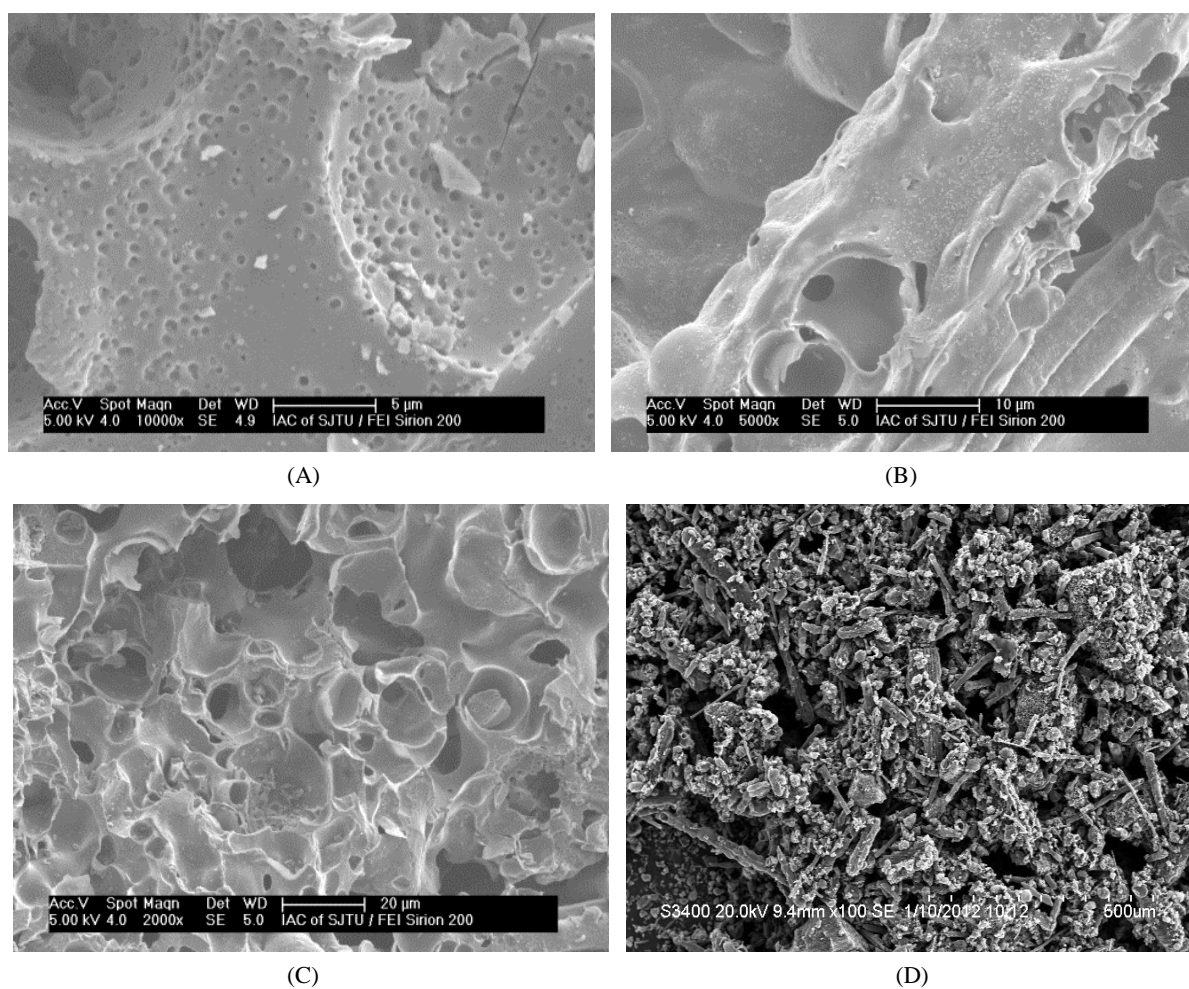


Figure 10. (A) SEM image of sludge; (B) SEM image of straw; (C) (D) SEM image of sludge-straw based activated carbon
图 10. (A) 污泥基扫描电镜图; (B) 烟草秸秆基扫描电镜图; (C) (D) 污泥 - 烟草秸秆基活性炭的扫描电镜图

3.3.3. FT-IR 分析

图 11(A)是经 KOH 活化 400℃与 700℃不同炭化温度热解制备污泥-烟草秸秆活性炭的红外光谱曲线,两个温度梯度下活性炭的主要特征吸收官能团基本一致。未完全炭化样品在 786 cm^{-1} 为 C-P 的伸缩振动峰,1072 cm^{-1} 处为 -C-O 的特征吸收峰而 2898 cm^{-1} 处很有可能为未断裂的直链烷烃 CH_2 对称伸缩振动峰。而经过高温热解的活性炭由于温度过高,导致 N_2 与 C 基发生反应,因此在 1033 cm^{-1} 处出现 R-NH₂ 的伸缩振动峰而 1381 cm^{-1} 处则可能是脂肪族 NO₂ 的对称伸缩峰,3486 cm^{-1} 处属于酚羟基 O-H 伸缩振动峰或氨基中的 N-H 伸缩振动峰。有机物大分子在高温条件下解聚以挥发物的形式逸出,纤维素脱水后会生成醇酮型互变异构体,同时木质素缩合成芳环结构。从图中可以看到与前述一致的包括酚羟基、芳环的 C=O 和 C=C 基团以及酚羟基或羧基的 C-O 基团。通过分析可以总结出污泥-烟草秸秆活性炭表面主要是以下四种官能团:羟基、酚羟基、羧基、内酯基

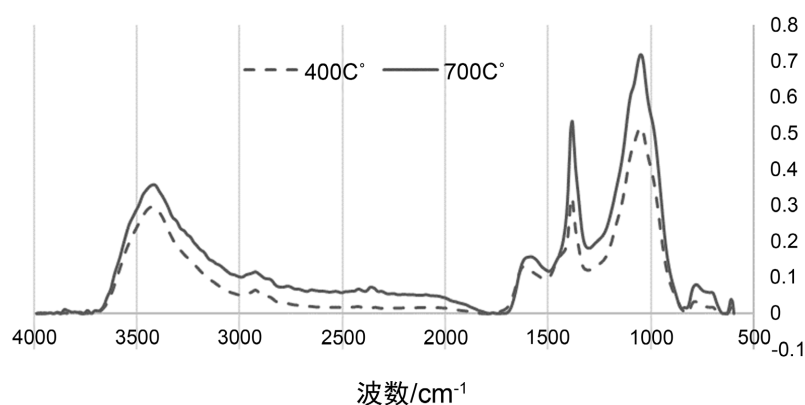


Figure 11. Infrared analysis of sludge-tobacco straw activated carbon

图 11. 污泥-烟草秸秆活性炭红外分析

4. 结论

1) 最佳制备工艺条件:炭化过程以污泥与烟草秸秆按 1:1 掺杂进行研究试验,以升温速率为 20℃/min 升至炭化温度为 700℃,并保持炭化时间为 60 min,以 0.5 mol/L 的 KOH 浸渍 2 h,以 10℃/min 的升温速率升至活化温度为 600℃,活化时间为 1 h,在该条件下所制备的污泥-烟草秸秆碳基材料对含铜废水中铜离子的去除率较好,约达 90%以上。

2) 污泥-烟草秸秆掺杂制备的活性炭,经 SEM 分析表征表明该类活性炭孔隙多、孔径分布均匀细小、均匀成孔、形态各异、秸秆基质分布明显、孔隙和细孔均匀,在最佳制备工艺条件下污泥-烟草秸秆活性炭具备较好的性能和品质。

3) 污泥-烟草秸秆活性炭的 FT-IR 分析测试表明,碳基材料表面含有羟基、酚羟基、羧基、内酯基,这些基团均呈电负性,能增强碳基材料对废水中 Cu^{2+} 的化学吸附效果。

4) 利用废弃的固体物料污泥与烟草秸秆掺杂制备碳基吸附材料处理含铜废水,实现了固体废弃物的资源化利用,开辟了城市污水厂污泥资源化利用新途径。

参考文献

- [1] 陈骏. 含铜废水的处理及研究进展[J]. 化工管理, 2016(14): 249.
- [2] 吕游. 改性活性炭对含铜废水吸附性能及其机理研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [3] 刘晓东, 李沅, 熊杰, 等. 改性玉米秸秆对铜离子的吸附性能[J]. 大连工业大学学报, 2018, 37(2):100-104.

-
- [4] 袁敏, 黄小钟, 王崇光, 等. 铜绿微囊藻对水中铜离子的吸附研究[J]. 当代化工研究, 2017(4): 11-12.
- [5] 陈尚, 刘青, 赵世强, 等. 树脂吸附铜锌离子的数值模拟[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(2): 6-12.
- [6] 羊依金, 陈红燕, 信欣, 等. 软锰矿改性城市污泥基活性炭处理含铜废水的试验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1): 223-227.
- [7] 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]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [8] 栗志翔. 市政污泥的处置及资源化利用综述[J]. 科技风, 2021(7): 121-122.
- [9] 周品. 污泥-秸秆复合基活性炭的制备, 性能研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 柳州: 广西科技大学, 2013.
- [10] Domene, X., Enders, A., Hanley, K., *et al.* (2015) Ecotoxicological Characterization of Biochars: Role of Feedstock and Pyrolysis Temperature. *Science of the Total Environment*, **512-513**, 552-561.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.035>
- [11] 李锋民, 郑浩, 邢宝山, 等. 植物生物质制备活性炭研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(28): 13730-13735.
- [12] Kalderis, D., Bethanis, S., Paraskeva, P., *et al.* (2008) Production of Activated Carbon from Bagasse and Rice Husk by a Single-Stage Chemical Activation Method at Low Retention Times. *Bioresource Technology*, **99**, 6809-6816.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.041>
- [13] 张双全, 武娜, 董明建, 等. 城市污泥与玉米秸秆共热解制备吸附剂的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(5): 799-803.
- [14] 杨丽萍. 烟杆基活性炭制备及对低浓度磷化氢吸附净化研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [15] 黄铮. 城市污水厂污泥制备活性炭及其吸附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [16] 翁诗甫, 徐怡庄. 傅里叶变化红外光谱分析[M]. 第三版. 北京: 化学工业出版社, 2016.