

活性炭负载钴 - 过硫酸盐氧化处理含酚废水的研究

饶倍仁^{1*}, 吴辉勇^{2,3}, 从军军², 张胜军^{2,4}, 朱海杰², 王鑫蕊², 成岳^{2#}

¹江西景江安全环保技术有限公司, 江西 景德镇

²景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院, 江西 景德镇

³上饶师范学院化学与环境科学学院, 江西 上饶

⁴江西墨塔科技股份有限公司, 江西 景德镇

收稿日期: 2023年7月6日; 录用日期: 2023年8月7日; 发布日期: 2023年8月18日

摘要

酚类是一种高毒性的有机物, 对人类健康和生态环境都产生了极大的危害, 其在氧化反应中产生的中间产物也具有高毒性且难处理、成分复杂、废水量大、色度大, 因此有必要对酚类物质的降解进行分析研究。本研究选择活性炭(AC)做载体。通过活性炭负载钴离子, 进一步提高过硫酸盐的活性, 用X射线分析仪(XRD), 扫描电子显微镜(SEM)对活性炭负载钴进行表征分析。通过实验研究钴负载量、活性炭负载钴的投加量、过硫酸钠的投加量、反应时间、反应温度、废水的pH以及废水初始浓度对含酚废水降解效果的影响。结果表明, 当钴负载量为6%、活性炭负载钴用量为1.2 g/L、过硫酸钠用量为0.9 g/L、反应时间为100 min、反应温度为50°C、废水的pH为3、废水初始浓度为90 mg/L时, COD的去除率可达95.98%, 有可实际操作的意义。

关键词

活性炭负载钴, 过硫酸钠, 苯酚, 高级氧化技术

Study on Oxidation Treatment of Phenol-Containing Wastewater with Activated Carbon Supported Cobalt-Persulfate

Peiren Rao^{1*}, Huiyong Wu^{2,3}, Junjun Cong², Shengjun Zhang^{2,4}, Haijie Zhu², Xinrui Wang², Yue Cheng^{2#}

¹Jiangxi Jingjiang Safety and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Jingdezhen Jiangxi

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 饶倍仁, 吴辉勇, 从军军, 张胜军, 朱海杰, 王鑫蕊, 成岳. 活性炭负载钴-过硫酸盐氧化处理含酚废水的研究[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(4): 914-924. DOI: 10.12677/aep.2023.134112

²School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen Jiangxi

³School of Chemistry and Environmental Sciences, Shangrao Normal University, Shangrao Jiangxi

⁴Jiangxi Mota Technology Co., Ltd., Jingdezhen Jiangxi

Received: Jul. 6th, 2023; accepted: Aug. 7th, 2023; published: Aug. 18th, 2023

Abstract

Phenols are highly toxic organic compounds that pose great harm to human health and the ecological environment. The intermediate products produced during oxidation reactions are also highly toxic and difficult to treat, with complex components, large amounts of wastewater, and high chromaticity. Therefore, it is necessary to analyze and study the degradation of phenolic substances. This study selects activated carbon (AC) as the carrier. The activity of persulfate was further improved by loading cobalt ion on activated carbon. The cobalt loaded on activated carbon was characterized and analyzed by X-ray analyzer (XRD) and Scanning electron microscope (SEM). The effects of cobalt loading, cobalt loading on activated carbon, Sodium persulfate, reaction time, reaction temperature, pH of wastewater and initial concentration of wastewater on the degradation of phenol containing wastewater were studied through experiments. The results showed that when the cobalt loading was 6%, the cobalt loading on activated carbon was 1.2 g/L, the Sodium persulfate was 0.9 g/L, the reaction time was 100 min, the reaction temperature was 50°C, the pH of wastewater was 3, and the initial concentration of wastewater was 90 mg/L, the COD removal rate could reach 95.98%, which was of practical significance.

Keywords

Activated Carbon Loaded Cobalt Sodium, Persulfate, Phenol, Advanced Oxidation Technology

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

酚类是一种高毒性有机物，含酚废水具有体量大，毒性高，危害大等特性，对人类健康和生态环境产生了极大的威胁[1] [2]，且在氧化反应中产生的中间产物也是高毒性，因此有必要对苯酚的降解机理进行分析，也有必要对反应后溶液的水质进行分析[3] [4]。

目前国内外常用的含酚废水处理有蒸汽脱酚法、萃取法、吸附法、生物法、膜分离技术以及高级氧化技术等[5] [6]。一些常规的处理方法只能转移污染物，不能彻底地转化为无害物质[7]。而且有的处理方法对反应条件要求较为苛刻，当反应条件不能完全达到要求时，废水的处理效果往往不太理想，而过硫酸盐高级氧化技术作为一种氧化能力强，反应速度快，二次污染小的新型高效污水处理方法[8] [9]，在水处理领域成为新的研究热点[10] [11]。由于它的氧化还原电位较高，尤其对处理高浓度、高毒性的工业废水具有重要的意义[12]。

2. 实验

2.1. 实验药品与仪器

药品和原料：活性炭(粉末) (天津市大茂化学试剂厂)，硝酸钴($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)，A.R.，天津市风船化

学试剂科技有限公司), 过硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, A.R, 天津市鼎盛鑫化工有限公司), 苯酚($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, A.R, 天津市风船化学试剂科技有限公司), 邻苯二甲酸氢钾($\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$, A.R, 天津市风船化学试剂科技有限公司), 无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, A.R, 上海试剂一厂), 浓硝酸(HNO_3 , C.P., 淄博市三宏化工厂), 氢氧化钠(NaOH , A.R, 天津市大茂化工试剂厂), 硫酸银(Ag_2SO_4 , A.R, 西陇化工股份有限公司), 重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, A.R, 天津市大茂化学试剂厂), 浓硫酸(H_2SO_4 , A.R, 淄博市三宏化工厂), 硫酸汞(HgSO_4 , A.R, 西陇化工股份有限公司), 去离子水(H_2O , 实验室制备)。

仪器和设备: 电子天平(FA1004B, 上海精密科学仪器有限公司), 磁力加热搅拌器(78-1 型, 金坛市荣华仪器制造有限公司), 艾柯实验室超纯水机(Exceed-Cd-08, 成都康氏康宁科技发展有限公司), 电热鼓风干燥箱(BGZ-76, 上海博讯实业有限公司医疗设备厂), 循环水多用真空泵(SHB-3, 郑州杜甫仪器厂), 电炉控制器(XMTA, 奥特温度仪表厂), 台式离心机(300 mL)(TDZ5-WS, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司), 智能消解仪(6B-12, 江苏盛奥华环保科技有限公司), 水浴恒温振荡器(SHA-B, 金坛市荣华仪器制造有限公司), pH 计(pHS-3C, 上海智光仪器仪表有限公司), 紫外可见分光光度计(UV-5100B 型, 上海元析仪器有限公司), 还要用到的仪器有: 50 mL 容量瓶、250 mL 容量瓶、500 mL 容量瓶、1000 mL 容量瓶、50 mL 锥形瓶(若干)、 $\phi 16\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 消解管(若干)、磁力搅拌子、50 mL 烧杯(若干)、100 mL 烧杯(若干)、200 mL 烧杯(若干)、250 mL 烧杯(若干)、500 mL 烧杯(若干)、300 mL 离心管、玻璃棒、100 mL 量筒(若干)、胶头滴管、试管刷、移液管(若干)、玛瑙研钵(1 个)、把手、漏斗、注射器、滤膜等。

表征仪器: X 射线分析仪(XRD) (DX-2700B, 丹东方圆仪器有限公司), 扫描电子显微镜 SEM (KYKY-EM3900M, 上海州怡仪器设备有限公司)。

2.2. 实验内容

2.2.1. COD 的标准曲线

本试验中 COD 的测定方法采用快速消解分光光度法(国家标准 HJ-T399-2007) [13]。

1) COD 标准溶液的配制: 准确称取预先在 $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 烘干的基准或优级纯邻苯二甲酸氢钾 [$\text{C}_8\text{H}_5(\text{COOH})(\text{COOK})$] 1.2754 g 溶于去离子水, 转移至 1000 mL 容量瓶中, 用去离子水稀释至标线, 此溶液的 COD 值为 1500 mg/L。

2) 本试验 COD 测定范围是低量程的, 所以 COD 标准系列使用溶液: COD 值分别为 25 mg/l、50 mg/l、100 mg/l、150 mg/l、200 mg/l 和 250 mg/L, 用水代替试样即为空白样, 在 440 nm 处测定其吸光度绘制标准曲线, 标准曲线方程为: $A = 0.0029C + 0.0018$ ($R^2 = 0.9994$)。

2.2.2. 活性炭负载钴的制备

把活性炭用蒸馏水浸泡至出水澄清, 然后用稀硝酸浸泡 20 h 以去除表面杂质和孔隙灰分, 接着用蒸馏水反复抽滤洗涤至活性炭的 pH 不再变化, 在烘箱中 105°C 下烘干。准确称取 5 g 处理过的活性炭, 加入到一定量的硝酸钴溶液(加入硝酸钴的量依据催化剂中的负载量而定), 然后磁力搅拌 20 h, 用蒸馏水、无水乙醇反复抽滤洗涤, 于 105°C 的烘箱中烘干, 干燥后转入瓷坩埚中, 在 500°C 的马弗炉中煅烧 2 h。即得到不同负载量的活性炭负载钴(负载量为 2%, 4%, 6%, 8%, 10%)。

2.2.3. 活性炭、活性炭负载钴及过硫酸钠对含酚废水降解效果的对比实验

本试验以苯酚溶液模拟含酚废水, 采用的水样为自配水样, 主要成分为苯酚, 其分子式为 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$, 分子量为 94.11。由于废水中化学需氧量(COD)完全由苯酚产生, 所以试验以 COD 的余率为水质指标。考察了负载量、活性炭负载钴和过硫酸钠的投加量、反应时间、反应温度、废水的 pH 以及废水浓度各因素对含酚废水降解效果的影响。

2.2.4. 实验过程

向 50 mL 的锥形瓶中加入 30 mL 不同浓度的苯酚废水, 然后再加入一定量的活性炭负载钴和过硫酸钠, 用 NaOH 和 HNO₃ 调节溶液初始 pH, 在一定温度的水浴恒温振荡器中反应并记下反应时间, 反应结束后, 用 0.45 μm 的滤膜过滤, 然后在 440 nm 处测定其吸光度, 计算 COD 余率。COD 余率计算方法如下:

$$\eta = \frac{C}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η —COD 的余率(%);

C_0 —COD 的初始浓度(mg/L);

C —处理后 COD 的浓度(mg/L)。

3. 结果分析与讨论

3.1. 对比实验

取 30 mL 浓度为 60 mg/L 的苯酚废水, 分别只加活性炭, 负载量为 6% 活性炭负载钴, 过硫酸钠各 40 mg, 在原液 pH 为 6 的情况下, 于 35℃ 的水浴恒温振荡器反应(其余条件相同), 处理后的结果见图 1。由图 1 可以看出, 只加过硫酸钠的 COD 余率低于只加活性炭和只加活性炭负载钴的余率, 只加活性炭负载钴的余率低于只加活性炭的, 说明过硫酸钠对苯酚的处理效果比活性炭和活性炭负载钴的好, 活性炭负载钴对苯酚的处理效果比活性炭的好。在其他条件都相同的情况下, 分别只加活性炭, 活性炭负载钴, 过硫酸钠的, COD 余率都比较大。因而证明这三种情况单独使用时都难于有效降苯酚废水。

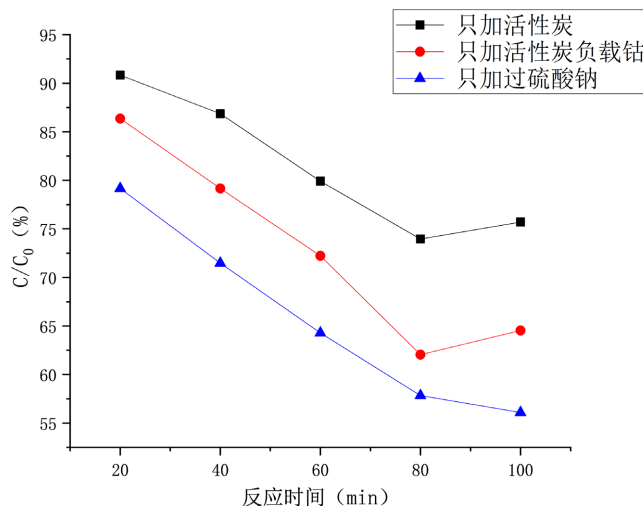


Figure 1. Comparison of experimental results

图 1. 对比实验结果

3.2. 钴负载量对苯酚废水降解效果的影响

钴负载量对苯酚废水降解效果的影响见图 2。由图 2 可以看出, 当钴负载量在 2%~6% 时, COD 的余率随着钴负载量的增大而减小, 当钴负载量为 6% 时 COD 的余率为 20.14%, 而当钴负载量 > 6% 时 COD 的余率随着钴负载量的增大而增大。这可能是因为在负载量 < 6% 时, 钴能均匀的负载到活性炭上, 钴起到了良好的催化作用; 而随着钴负载量变大, 因钴的用量变大, 钴会堵塞活性炭的孔隙, 造成活性炭的

吸附与催化能力降低,从而降低了对苯酚的降解效果。所以选取最佳的负载量为6%。

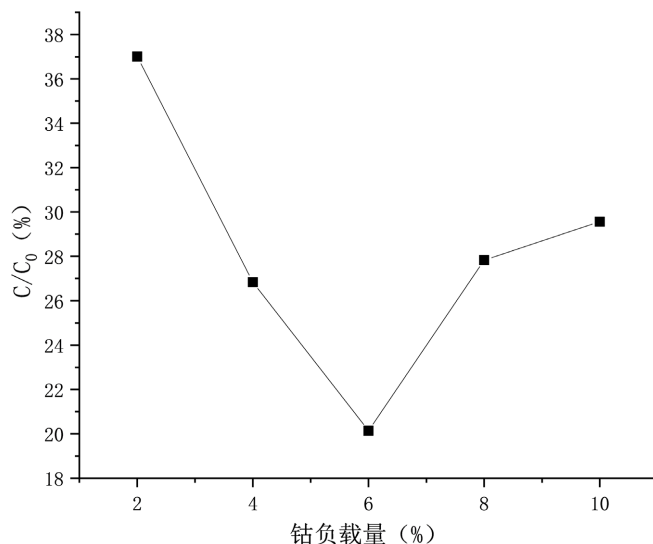


Figure 2. Effect of cobalt loading on the degradation of phenol wastewater
图 2. 钴负载量对苯酚废水降解效果的影响

3.3. 活性炭负载钴投加量对苯酚废水降解效果的影响

活性炭负载钴投加量对苯酚废水降解效果的影响见图 3。由图 3 可以看出,活性炭负载钴投加量的多少对于活化过硫酸钠对苯酚废水降解效果有较大的影响,随着活性炭负载钴投加量的增加,COD 的余率先降后升。当活性炭负载钴投加量较少时,由于催化剂量较少,对过硫酸钠的活化能力有限,使得 $\text{SO}_4 \cdot$ 产生数量较少,从而对苯酚的降解效果较低。随着活性炭负载钴投加量的增加,活化能力增强,从而对苯酚废水降解效果逐渐增强。当活性炭负载钴投加量为 1.2 g/L 时,COD 余率最低为 16.42%,降解效果最好。而投加量大于 1.2 g/L 时,由于投加量过多反而降低了其对过硫酸钠的活化能力,从而对苯酚废水的降解效果较低。所以选取最佳的活性炭负载钴投加量为 1.2 g/L。

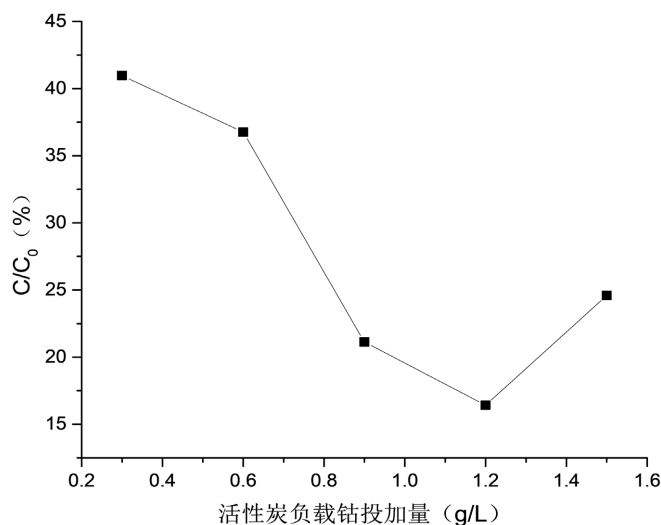


Figure 3. Effect of cobalt dosage on the degradation of phenol wastewater
图 3. 活性炭负载钴投加量对苯酚废水降解效果的影响

3.4. 过硫酸钠投加量对苯酚废水降解效果的影响

过硫酸钠投加量对苯酚废水降解效果的影响见图4。由图4可以看出,随着过硫酸钠投加量的增加,COD的余率先降后升。当过硫酸钠投加量较少时,产生的 $\text{SO}_4\cdot^-$ 较少,从而对苯酚的降解效果较低,随着过硫酸钠的增加,COD余率逐渐降低,从而对苯酚废水降解效果逐渐增强。当过硫酸钠投加量为0.9g/L时,COD余率最低为15.67%,降解效果最好。而投加量大于0.9g/L时,过硫酸钠产生的 $\text{SO}_4\cdot^-$ 与溶液中多余的 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 发生反应[14],反应方程式如下所示,使 $\text{SO}_4\cdot^-$ 减少,从而对苯酚的降解效果降低。所以选取最佳的过硫酸钠投加量为0.9g/L。

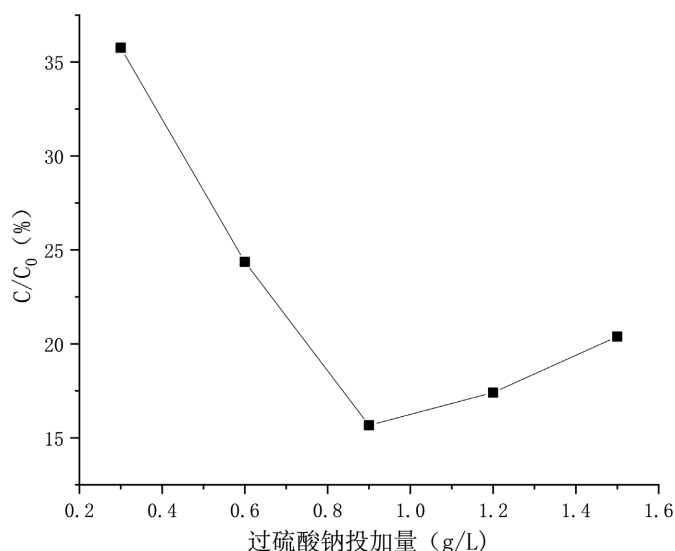


Figure 4. Effect of sodium persulfate dosage on degradation of phenol wastewater
图4. 过硫酸钠投加量对苯酚废水降解效果的影响

3.5. 反应时间对苯酚废水降解效果的影响

反应时间对苯酚废水降解效果的影响见图5。由图5可以看出,在反应的开始阶段,活性炭负载钴对过硫酸钠发挥了良好的活化作用,在较短的时间内,COD余率迅速降低,从而说明对苯酚的降解速率快。当反应时间大于60min后,COD余率缓慢下降,这是由于活性炭负载钴不断被消耗,从而降低对过硫酸钠的活化能力,从而降低反应速率。当反应时间达到100min时,COD余率最低为12.45%,降解效果最好。当反应大于100min时,COD余率不再变化甚至略微升高,这是由于氧化反应达到平衡,由于时间过长,使活性炭吸附的部分又解析出来,从而使其略微升高。所以选取最佳的反应时间为100min。

3.6. 反应温度对苯酚废水降解效果的影响

反应温度对苯酚废水降解效果的影响见图6。由图6可以看出,随反应温度的升高,COD余率逐渐降低,而温度较低时,COD余率较高,降解效果较差,说明温度较低时过硫酸钠比较稳定不易被活化,温度越高过硫酸钠活化效果越好,对苯酚的降解效果越好。在20℃~40℃时,随温度升高,COD余率迅速降低,从而说明对苯酚的降解速率快;当温度大于40℃时,COD余率缓慢降低,当温度达到60℃时,COD余率最低为8.73%,降解效果最好。而当温度在50℃时的COD余率与60℃时的余率相差不大,说

明在 50℃时，过硫酸钠已经得到充分活化，苯酚的降解效果较好，所以为了避免不必要的能源浪费，选取最佳的反应温度为 50℃。

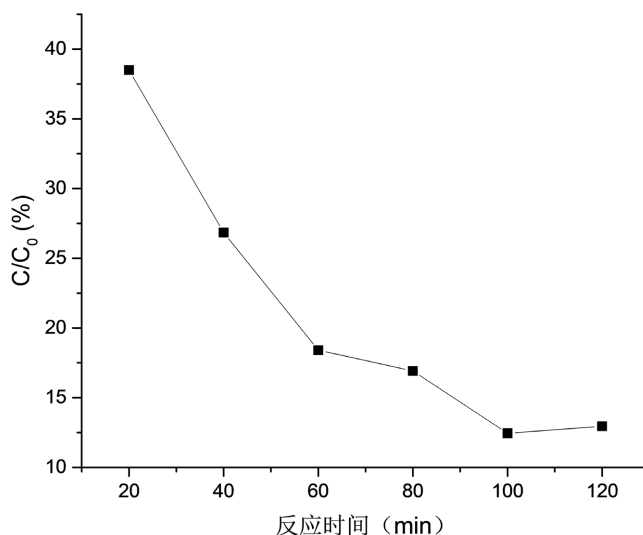


Figure 5. Effect of reaction time on degradation of phenol wastewater
图 5. 反应时间对苯酚废水降解效果的影响

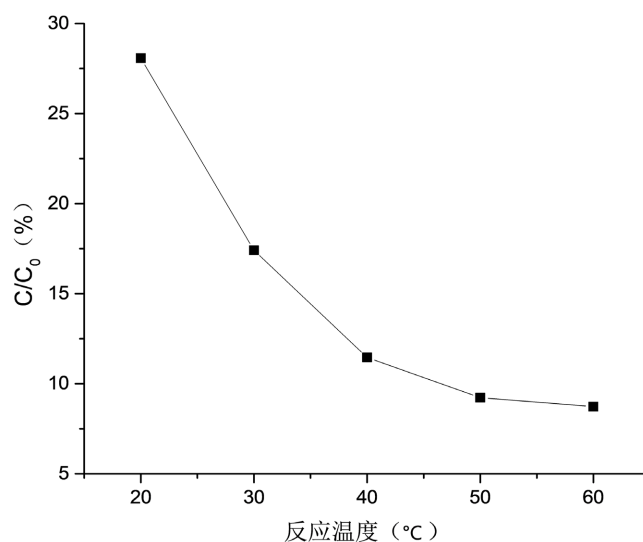


Figure 6. Effect of reaction temperature on degradation of phenol wastewater
图 6. 反应温度对苯酚废水降解效果的影响

3.7. pH 对苯酚废水降解效果的影响

pH 对苯酚废水降解效果的影响见图 7。由图 7 可以看出，pH 对苯酚废水降解效果有较大的影响。当 pH 在 1~3 时，COD 余率随着 pH 增大而降低，苯酚废水的降解效果越来越好，当 pH 为 3 时，COD 余率最低为 3.52%，降解效果最好。这是因为在酸性条件下，除了活性炭负载钴活化过硫酸钠，同时 H⁺对过硫酸钠也有一定的活化能力，反应方程式如下所示。当 pH 大于 3 时，COD 余率随着 pH 增大而逐渐增大，从而苯酚废水的降解效果逐渐降低，是由于溶液逐渐接近中性，H⁺对过硫酸钠活化能力减弱。而当 pH 大于 7 时，苯酚废水的降解效果越来越差，这与活性炭负载钴表面所带电子电荷性质有关。当溶液处

于碱性环境时, 活性炭负载钴表面带负电荷, 与 $S_2O_8^{2-}$ 产生静电排斥作用, 导致其对过硫酸钠活化作用减弱, 从而苯酚废水的降解效果降低。所以选取最佳的 pH 值为 3。

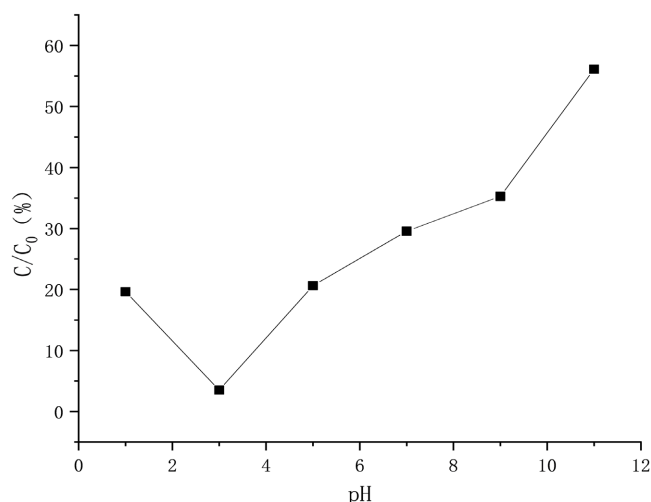


Figure 7. Effect of pH on the degradation of phenol wastewater
图 7. pH 对苯酚废水降解效果的影响

3.8. 苯酚废水初始浓度对降解效果的影响

苯酚废水初始浓度对降解效果的影响见图 8。由图 8 可以看出, 随着苯酚初始浓度的升高, COD 余率逐渐增大, 苯酚废水的降解效果逐渐降低。当苯酚的初始浓度最低为 10 mg/L 时, COD 余率最低为 2.07%, 苯酚废水的降解效果最好。当浓度低于 70 mg/L 时, 苯酚含量较少, 而活性炭负载钴活化过硫酸钠产生的 $SO_4 \cdot$ 相对较多, 降解速率较快, 苯酚废水降解效果较好。当浓度高于 70 mg/L 时, 苯酚含量较多, 而活性炭负载钴活化过硫酸钠产生的 $SO_4 \cdot$ 相对较少, 降解速率逐渐降低, 苯酚废水降解效果变差[15]。当浓度由 90 mg/L 增加到 110 mg/L 时, COD 余率变化比较平缓, 本酚废水的降解效果相差不多。虽然浓度较低, 处理效果更好, 但浪费资源, 无实际意义, 所以选取最佳的初始浓度为 90 mg/L。

3.9. 样品的 XRD 和 SEM 表征与分析

图 9 为活性炭与活性炭负载钴的 X 射线衍射(XRD)图谱, 其中 a 为活性炭, b 为活性炭负载钴。通过 a 与 b 的对比可以看出, 活性炭负载钴衍射图谱在 2θ 分别为 20.86° , 32.92° , 36.5° , 48.26° , 54.88° 处出现新的衍射峰, 再通过活性炭负载钴与 Co_3O_4 、 Co_2O_3 标准图谱的对比, 发现 2θ 分别为 20.86° , 32.92° , 36.5° , 48.26° 是 Co_3O_4 的峰, 54.88° 是 Co_2O_3 的峰。所以结果表明, Co 主要以 Co_3O_4 的形式负载于活性炭上, 且有少量的 Co_2O_3 [16]。

图 10 为活性炭与活性炭负载钴的扫描电子显微镜(SEM)图, 其中 a 为活性炭, b 为活性炭负载钴。由图 10(a)可以看出活性炭表面有大量均匀的孔隙, 且表面较为光滑平整; 而图 10(b)中活性炭负载钴表面及孔隙中均匀分布着细小的晶体颗粒, 而且粒径很小, 这可能是 Co_2O_3 、 Co_3O_4 以微粒形式负载于活性炭表面及孔隙中; 而它的表面较为粗糙, 有结构缺陷和断层, 这可能是由活性炭经过硝酸预处理和活性炭表面及孔隙处的含氧官能团在高温分解所造成的。进一步证实了活性炭成功负载了钴。

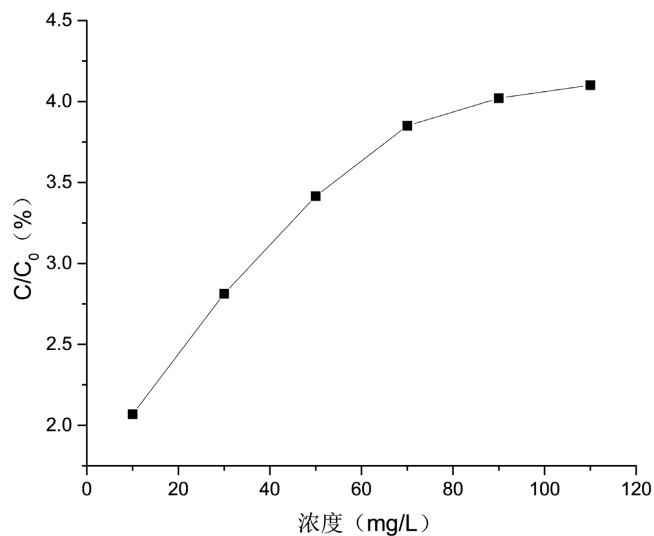


Figure 8. Effect of initial concentration of phenol wastewater on degradation
图 8. 苯酚废水初始浓度对降解效果的影响

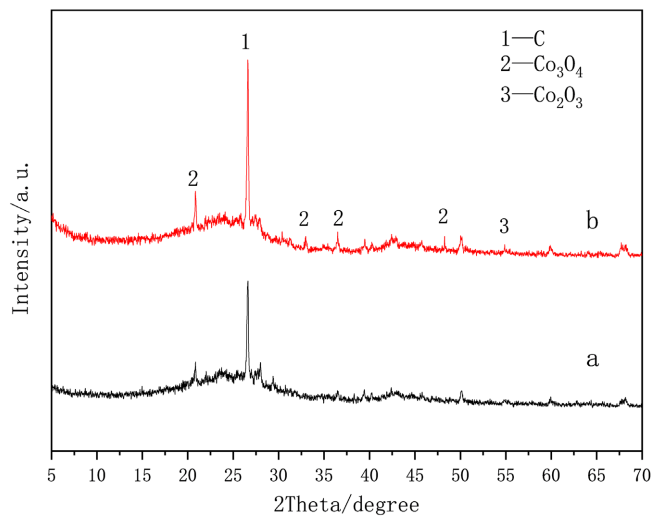


Figure 9. XRD of activated carbon (a) and activated carbon loaded cobalt (b)
图 9. 活性炭(a)与活性炭负载钴(b)的 XRD

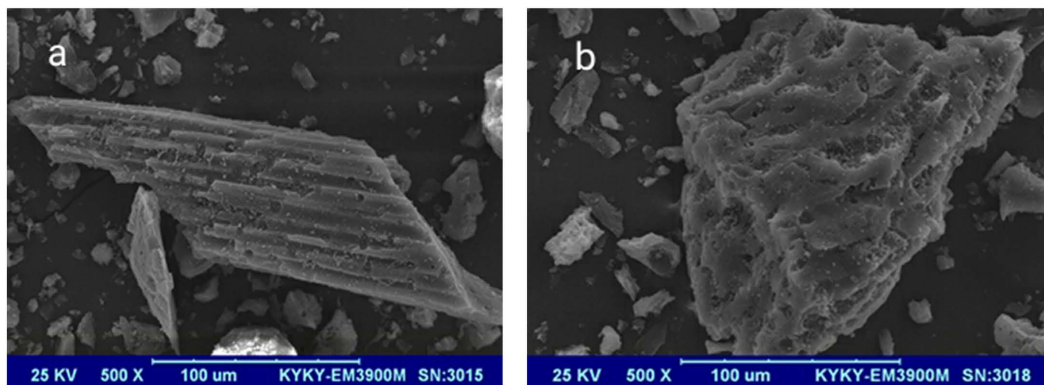


Figure 10. SEM of activated carbon and activated carbon loaded cobalt
图 10. 活性炭(a)与活性炭负载钴(b)的 SEM

3.10. 活性炭负载钴活化过硫酸盐降解苯酚的机理分析

图 11 是活性炭负载钴活化过硫酸盐降解苯酚的机理图。活性炭将苯酚分子与过硫酸盐分子吸附到活性炭的表面，表面上的吡啶基团、醌基、吡咯基团等碱性官能团为过硫酸盐提供电子，活性炭表面的缺陷位点和 π - π 电子作为活性位点也为过硫酸盐提供电子[17]，过硫酸盐电离后生成 $S_2O_8^{2-}$ ， $S_2O_8^{2-}$ 中的亲电氧接受电子后，引起 O-O-键断裂，生成硫酸根自由基($SO_4^{\cdot-}$)。同时活性炭上的钴能快速活化过硫酸盐产生 $SO_4^{\cdot-}$ ，主要利用钴的催化性能，具有较高的活化效率，在降解本酚废水中起主导作用。具有强氧化能力的硫酸根自由基将苯酚氧化成小分子有机物，最终矿化为二氧化碳和水。其中活性炭除了有活化过硫酸盐产生 $SO_4^{\cdot-}$ 的作用，同时对苯酚废水还能起到一定的吸附作用[18]。

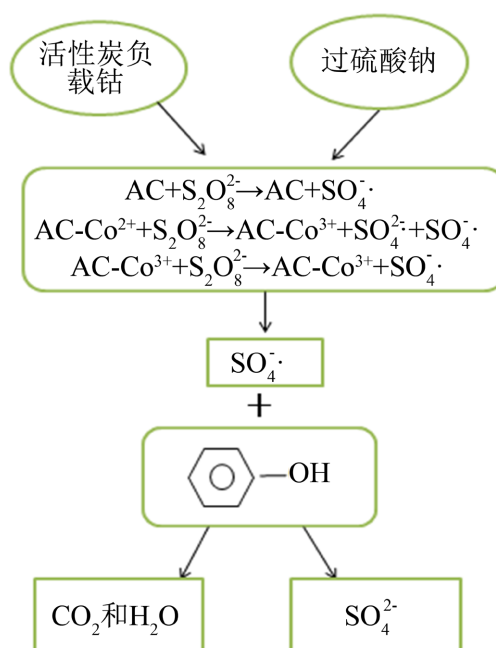


Figure 11. Reaction mechanism
图 11. 反应机理

4. 结论

1) 通过浸渍煅烧法制备得到活性炭负载钴活化过硫酸钠产生 $SO_4^{\cdot-}$ 降解苯酚废水取得良好效果，并且具有一定的矿化能力，不仅可以有效解决因过渡金属离子活化造成的有毒金属浸出、引入的离子容易流失、导致水体的二次污染的问题，而且还能循环利用。

2) 通过 X 射线分析仪(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)对活性炭负载钴的表征分析，证实了活性炭成功负载了钴。

3) 在只加活性炭、活性炭负载钴、过硫酸钠的情况下，对苯酚废水降解效果不明显。

4) 当钴负载量为 6%、活性炭负载钴用量为 1.2 g/L、过硫酸钠用量为 0.9 g/L、反应时间为 100 min、反应温度为 50℃、废水的 pH 为 3、废水初始浓度为 90 mg/L 时，COD 的去除率可达 95.98%，有可实际操作的意义。

参考文献

[1] 谢萌. 钴-碳基催化剂活化过单硫酸盐降解氯酚类有机污染物的研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学,

- 2019.
- [2] 李妍, 吴奇, 范文雯. 钴活化过一硫酸盐降解水中有机污染物的研究进展[J]. 化工环保, 2021, 41(4): 427-433.
- [3] Shao, P.H., Tian, J.Y., Yang, F., Duan, X.G., Gao, S.S., Shi, W.X., *et al.* (2018) Identification and Regulation of Active Sites on Nanodiamonds: Establishing a Highly Efficient Catalytic System for Oxidation of Organic Contaminants. *Advanced Functional Materials*, **28**, Article ID: 1705295. <https://doi.org/10.1002/adfm.201705295>
- [4] Ganiyu, S.O., van Hullebusch, E.D., Cretin, M., Esposito, G. and Oturan, M.A. (2015) Coupling of Membrane Filtration and Advanced Oxidation Processes for Removal of Pharmaceutical Residues: A Critical Review. *Separation and Purification Technology*, 156, . <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.09.059>
- [5] 刘子乐. 表面改性活性炭活化过硫酸盐降解苯酚的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [6] 胡锋平, 龙兰兰, 占鹏, 陈钧杰, 吴琦. 过渡金属负载碳基复合材料活化过硫酸盐降解有机废水研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(3): 885-891.
- [7] 王思齐. 过硫酸盐高级氧化法处理含酚废水的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2017.
- [8] 李志军. 负载 Fe(II)颗粒性活性炭活化过硫酸盐处理老龄垃圾渗滤液的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [9] Chen, H.G., Zhong, C.Y., Berkhouse, H., Zhang, Y.L., Lv, Y., Lu, W.Y., Yang, Y.B. and Zhou, J.G. (2016) Removal of Cadmium by Biofloculant Produced by *Stenotrophomonas maltophilia* Using Phenol-Containing Wastewater. *Chemosphere*, **155**, 163-169. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.044>
- [10] 齐亚兵. 活化过硫酸盐氧化法降解酚类污染物的研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(11): 6068-6079.
- [11] Bello, M.M. and Raman, A.A.A. (2017) Trend and Current Practices of Palm Oil Mill Effluent Polishing: Application of Advanced Oxidation Processes and Their Future Perspectives. *Journal of Environmental Management*, **198**, 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.050>
- [12] Almomani, F.A., Bhosale, R.R., Kumar, A. and Kennes, C. (2016) Removal of Volatile Sulfur Compounds by Solar Advanced Oxidation Technologies and Bioprocesses. *Solar Energy*, **135**, 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.037>
- [13] 河北省环境监测中心站. 水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法 HJ/T 399-2007 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [14] 金衍, 刘琛, 洪景萍. 辉光放电等离子体处理对活性炭负载钴基催化剂形貌及催化性能的影响[J]. 化学与生物工程, 2017, 34(5): 8-11.
- [15] Butini, S., Nikolic, K., Kassel, S., Brückmann, H., Filipic, S., Agbaba, D., *et al.* (2016) Polypharmacology of Dopamine Receptor Ligands. *Progress in Neurobiology*, **142**, 68-103. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2016.03.011>
- [16] Nunes, S., Gardner, T., Barlow, J., Martins, H., Salomão, R., Monteiro, D. and Souza, C. (2016) Compensating for Past Deforestation: Assessing the Legal Forest Surplus and Deficit of the State of Pará, Eastern Amazonia. *Land Use Policy*, **57**, 749-758. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.022>
- [17] 徐清艳. 活性炭负载钴活化过硫酸钠降解甲基橙的研究[J]. 化学工程与装备, 2016(11): 11-15.
- [18] 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅. 活性炭负载 Co_3O_4 活化过一硫酸盐降解金橙 G [J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2591-2600.