

吸附—两级絮凝沉淀工艺处理磷系阻燃剂生产废水的效能研究

赵丽

(杭州泽元安全科技有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要 针对磷系阻燃剂废水的处理需求, 本研究采用吸附—两级絮凝沉淀工艺处理磷系阻燃剂废水。通过系统筛选适配的吸附材料和絮凝剂, 重点研究了吸附材料投加量、反应 pH 值、反应时间和絮凝剂投加量以及处理材料投加方式对总磷去除效果的影响。结果表明: 在 pH 值为 5、投加量为 1 wt%、动态反应 2 h 的条件下, 活性炭对总磷的去除率可达 35.1%; 活性炭预处理后进行两步絮凝剂的使用对磷系阻燃剂废水总磷的去除效果最佳, 废水总磷去除率可达 97.7%。

关键词 吸附; 絮凝沉淀; 多步法; 磷系阻燃剂废水

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.042

0 引言

阻燃剂是用于抑制高分子材料被点燃或延缓火焰蔓延的助剂。其中, 磷系阻燃剂凭借阻燃效率高、发烟量少、毒性低且燃烧时不释放腐蚀性气体等优势, 在各类阻燃助剂体系中的重要性持续提升。磷系阻燃剂品类丰富, 目前应用最为普遍的主要为磷酸酯类与麟酸酯类^[1-2]。市售的阻燃剂一般是以其中一种类型为主体, 另一种组分作为辅助, 其中以无机磷阻燃剂为主体的磷酸铵盐较为常用, 这一类含磷阻燃剂的废水中磷主要以聚磷酸铵 (APP)、三聚氰胺聚磷酸盐 (MPP) 等形式存在, 少量以有机态的磷形式存在, 无法用传统用于除正磷酸根的沉淀法直接除磷^[3], 而采用 Fenton 法^[4]或者单纯活性炭进行吸附^[5]效果良好, 但价格比较昂贵。选择吸附—两级絮凝沉淀工艺处理此类废水, 通过少量吸附材料吸附废水中有机磷与聚合态无机磷, 经两道絮凝沉淀冲洗吸附材料使其再生并沉降无机磷, 实现总磷高效去除。试验对比了常见吸附材料与絮凝剂的除磷效果, 现将结果汇报如下。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

1. 吸附材料: 膨润土 (Bent), 凹凸棒石 (ATP), 沸石粉 (Zeo), 硅藻土 (Dia), 活性炭 (AC), 以上吸附材料均为 200 目。

2. 絮凝剂: 聚合氯化铝 (PAC), 聚合硫酸铁 (PFS),

聚合硅酸铝铁 (PSAF), 聚氯化铝铁 (PAFC), 以上絮凝剂均满足工业生产标准。

3. 仪器: JJ224BC 型电子天平, 雷磁 PHS-25 型 pH 计, 101-1AB 型鼓风干燥箱, HZQ-X300C 型恒温振荡器, 722S 可见分光光度计。

1.2 废水水质

磷系阻燃剂废水取自海宁市某纺织公司二沉池出水, 外观澄清无色底部有少量杂质, 中性 (pH 值约为 7.5), 无味, 总磷浓度 13.1 mg/L, 其中有机磷 2.9 mg/L (要求处理后总磷浓度 < 0.5 mg/L)。

1.3 试验方法

1.3.1 吸附材料的预处理

在开展试验前, 先采用质量浓度 3% 的盐酸溶液对吸附材料浸渍处理 60 min, 再以同浓度氢氧化钠溶液浸泡相同时长以脱除杂质, 之后用去离子水反复淋洗至体系呈中性, 置于 105 °C 环境中烘干至质量不再变化, 备用。

1.3.2 废水的吸附

1. 最佳吸附材料及其最佳投加量的筛选。准确称取 0.5 wt%、0.8 wt%、1 wt%、2 wt% 和 3 wt% 水样质量的 5 种预处理后的吸附材料, 分别放入装有含磷废水的烧杯中, 调 pH=7, 置于 160 r/min 摇床中, 2 h 后取样, 调 pH 至中性, 过滤取滤液测总磷。筛选得到最佳吸附材料及其最佳投加量。作为对比, 最佳吸附材料进行静置反应条件下的吸附实验。

作者简介: 赵丽 (1989-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 环保安全咨询服务。

2. 最佳吸附 pH 的筛选。准确称取上文中最佳吸附材料及其最佳投加量，分别放入装有含磷废水的烧杯中，调不同 pH，置于 160 r/min 摇床中，2 h 后取样，调 pH 至中性，过滤取滤液测总磷。筛选得到该材料最佳反应 pH。

3. 最佳反应时间的筛选。准确称取最佳吸附材料及其最佳投加量，放入装有含磷废水的烧杯中，调 pH 至的最佳 pH，置于 160 r/min 摇床中，0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、2.5 h、3 h、4 h 后取样，调 pH 至中性，过滤取滤液测总磷。筛选得到该材料最佳反应时间。

1.3.3 废水的絮凝沉淀

取 1.3.2 中筛选出的最佳吸附材料及反应条件进行吸附实验，向待测样本中加入适量絮凝试剂，进行 30 min 的静置，调节溶液 pH 至中性，通过离心分离获取上层清液并检测总磷浓度，最终确定效果最佳的絮凝剂用量。

1.3.4 废水的二次絮凝沉淀

取 1.3.3 筛选出的最佳絮凝剂及其最佳投加量进行一次吸附 + 絮凝反应实验，静置反应 30 min，随后

加入同等絮凝剂，再静置反应 30 min，调 pH=7，分离上清液，测定其总磷浓度。

作为对比，最佳条件吸附处理后的废水加入上述同样总量的絮凝剂，静置反应 1 h，调 pH=7，分离上清液，测定其总磷浓度进行对比实验。

作为对比，采用两步絮凝 + 吸附在同样条件下进行实验。

1.4 分析方法

总磷浓度的检测严格依照《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》（GB 11893-1989）标准，选用钼酸铵分光光度法完成测定。

2 结果与分析

2.1 吸附材料及最佳反应条件的筛选

2.1.1 最佳吸附材料及其最佳投加量的筛选

分别选用预处理后膨润土、凹凸棒石、沸石粉、硅藻土和活性炭作为吸附材料，进行不同投加量下的动（静）态实验，实验结果见表 1，总磷去除率见图 1。

由图 1 数据可见，活性炭在所有吸附剂中达到了最

表 1 不同加药量下各吸附材料的总磷吸附效果

加药量 (wt%)	膨润土（动）	凹凸棒土（动）	沸石粉（动）	硅藻土（动）	活性炭（动）	活性炭（静）
0.5	12.9	12.7	12.8	12.5	12.5	12.7
0.8	12.9	11.9	12.6	12.3	11.3	12.5
1.0	12.7	11.9	12.4	12.2	10.0	12.4
2.0	12.6	11.8	12.3	11.9	9.5	11.5
3.0	12.2	11.4	11.9	11.3	8.8	10.9

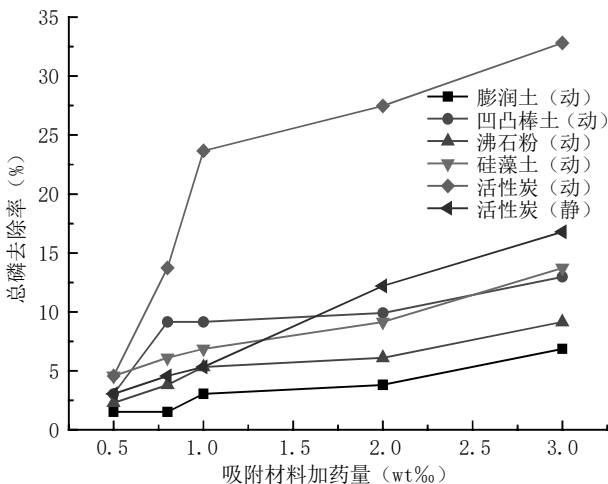


图 1 不同吸附材料对总磷去除率的影响

优的总磷去除效果，考虑与其比表面积大，可更多的吸附水体中的有机污染物^[6]，故相对于其它吸附材料，

活性炭的除磷效果最好。同时，动态条件下活性炭的吸附效果远高于静态条件下。动态条件下活性炭与含磷污染物的接触概率增加，有助于增加活性炭的吸附效果。考虑到活性炭的综合成本及其对该废水的处理效果，优选 1 wt% 进行后续的实验。

2.1.2 最佳吸附 pH 的筛选

图 2 为加药量为 1 wt% 时不同 pH 下活性炭的除磷效果，由图 2 可知，随着 pH 的增加，除磷效率逐渐下降至平衡。

研究表明，活性炭悬浮物的 pH 明显地影响着活性炭粒子表面的带电性，溶液偏酸性时炭粒表面带正电，易吸附溶液中带负电的磷酸根^[7]；随着溶液 pH 逐渐增加，炭粒表面带负电，对溶液中磷酸根吸附能力降低^[8]。但是对于实际水处理工程来说，若单纯用酸调 pH=2 左右进行活性炭吸附不现实，因为后续为了满足出水 pH 达标，还要回调 pH 至中性，故考虑到实际情况以及活

性炭对该废水的总磷去除效果, 优选 pH=5 作为后续实验的最佳 pH。

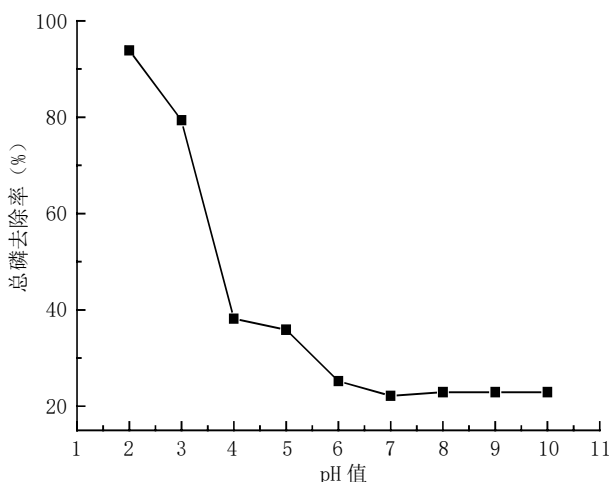


图2 不同 pH 下活性炭对总磷去除率的影响

2.1.3 最佳吸附时间的筛选

活性炭的吸附和解吸是一个可逆的平衡过程^[9], 即活性炭在吸附污染物的同时也伴随部分污染物从活性炭表面析出, 直至达到污染物的平衡状态。

活性炭在去除总磷过程中表现出优良的吸附动力学特性, 实验结果显示, 吸附进行 2 h 后即达到平衡状态, 此时总磷去除率为 35.1%, 水样中剩余磷含量不再发生明显变化。

2.2 絮凝剂及最佳加药方式的筛选

2.2.1 最佳絮凝剂的筛选

由前文可知, 采用活性炭一步法处理该废水在合理条件下不能达到预期的效果, 故接下来考虑多步法处理该废水。

活性炭预处理后采用不同絮凝剂进一步处理, 聚合硫酸铁作为絮凝剂对总磷去除效果最明显, 并且在加药量大于 1.0 wt% 后效果基本趋于稳定, 总磷去除率可达到 94.7%。

2.2.2 最佳加药方式的筛选

活性炭 + 聚铁两步法处理该含磷废水取得了较好的效果, 为了进一步加强除磷效果至达到标准, 采用了不同的加药方式来验证其对除磷效果的影响。加药方式如下: 1.0wt% AC+1.0wt% PFS+1.0wt% PFS, 总磷浓度: 0.3 mg/L; 1.0 wt% AC+2.0 wt% PFS, 总磷浓度: 0.5 mg/L; 1.0 wt% PFS+1.0 wt% PFS+1.0 wt% AC, 总磷浓度: 0.6 mg/L。

在加药量和部分反应条件相同情况下, 吸附一两级絮凝沉淀工艺处理此类废水的效果最佳。活性炭优

先吸附废水中大部分有机磷和少部分聚合态无机磷达到平衡状态, 后续聚铁的加入和颗粒较大的活性炭接触概率大, 故先絮凝活性炭表面的无机磷, 使活性炭又有了新的吸附点位去吸附残留的污染物, 从而逐步降低水中总磷含量; 而先用絮凝剂处理该废水, 产生的大量絮体会优先被活性炭吸附, 削弱活性炭对总磷的吸附能力。故吸附一两级絮凝沉淀工艺处理磷系阻燃剂废水的效果优于其他方法。

3 结论

1. 吸附实验表明, 在预处理含磷系阻燃剂的废水时, 活性炭表现为最优吸附介质, 当 pH 控制为 5、投加比例 1 wt%、持续反应 2 h, 可达 35.1% 的总磷去除效率。

2. 将聚合硫酸铁与活性炭联用, 在处理磷系阻燃剂废水时, 对总磷的去除效果明显更好。1 wt% 活性炭 + 1 wt% 聚合硫酸铁两步法对总磷的去除率可达到 94.7%。

3. 活性炭预处理后进行两步絮凝剂的使用对磷系阻燃剂废水总磷的去除效果优于其他加药方式, 该处理工艺步骤简便、成本低廉, 总磷去除率高达 97.7%, 具备较高的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 邵路山, 姚忠樱, 冯秀艳, 等. 有机磷系阻燃剂阻燃热塑性聚酯的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2024, 52(05): 171-180.
- [2] 王琦, 刘甘, 童张法, 等. 磷系阻燃剂协同三氧化二锑在 ABS 中的应用及其阻燃机理 [J]. 塑料工业, 2025, 53(09): 126-134, 152.
- [3] 朱峥嵘, 吴艳, 肖继波, 等. 磷酸氨镁沉淀法回收新型碳材料生产废水中的氨氮 [J]. 环境保护科学, 2025, 51(05): 82-89.
- [4] 唐林旺, 农运礼, 梁秀霞, 等. 焦磷酸钠 /Fe²⁺ 芬顿法强化处理锡多金属选矿废水性能研究 [J]. 电镀与精饰, 2025, 47(10): 17-25.
- [5] 秦玉莹, 李豪飞, 陈方方, 等. 活性炭孔结构对吸附除磷的影响 [J]. 应用化工, 2022, 51(06): 1624-1628.
- [6] 张丽, 张丹, 潘红艳, 等. 磷酸法低灰分活性炭的制备研究 [J]. 无机盐工业, 2024, 56(02): 95-103, 120.
- [7] 季红军, 童裕佳, 李佳尧, 等. 粉末活性炭集成 MBR 膜处理农药废水研究 [J]. 膜科学与技术, 2022, 42(01): 115-120, 128.
- [8] 赵俊昌. 高悬浮物矿井水治理及资源化利用技术研究 [J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(02): 48-50, 80.
- [9] 王彬, 王亚非, 查飞, 等. 磷酸活化花椒籽制备活性炭及其对亚甲基蓝的吸附 [J]. 应用化工, 2023, 52(12): 3297-3302.