

活性炭吸附处理含重金属废水的效果与优化

申芳

山西交控生态环境股份有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i3.2616

[摘要] 本文深入探究了活性炭吸附含重金属废水的机制,主要包括物理吸附、化学吸附和离子交换作用。其中物理吸附依赖分子间作用力使重金属离子在表面富集,化学吸附通过化学键实现稳定结合,而离子交换作用则通过可交换离子与重金属离子的置换实现去除。研究表明,吸附效果受活性炭特性、废水性质及环境条件的影响,因此通过优化活性炭选型、技术改性和工艺调整,以达到提升吸附性能目的,从而为实际废水处理提供理论依据和技术参考。

[关键词] 活性炭; 含重金属废水; 吸附效果; 优化策略

中图分类号: X703 文献标识码: A

The Effect and Optimization of Activated Carbon Adsorption Treatment for Heavy Metal Containing Wastewater

Fang Shen

Shanxi Jiaokong Ecological Environment Co., Ltd

[Abstract] This article explores in depth the mechanism of activated carbon adsorption on wastewater containing heavy metals. The mechanism of activated carbon adsorption on wastewater containing heavy metals mainly includes physical adsorption, chemical adsorption, and ion exchange. Physical adsorption relies on intermolecular forces to enrich heavy metal ions on the surface, chemical adsorption achieves stable binding through chemical bonds, and ion exchange achieves removal through the displacement of exchangeable ions and heavy metal ions. The adsorption effect is influenced by the characteristics of activated carbon, wastewater properties, and environmental conditions. By optimizing the selection, technical modification, and process adjustment of activated carbon, the adsorption performance can be improved, providing theoretical basis and technical reference for actual wastewater treatment.

[Key words] activated carbon; Wastewater containing heavy metals; Adsorption effect; optimization strategy

引言

随着工业化加速,重金属废水大量排放,给生态环境带来严重破坏并威胁人类健康,使得寻找高效处理方法已十分紧迫。活性炭吸附法因吸附容量大、速度快且可重复利用,在含重金属废水处理领域备受关注。活性炭凭借大比表面积、丰富孔隙和独特表面化学性质,通过物理、化学吸附及离子交换等机制吸附重金属离子,不过其效果受自身、废水及环境多因素制约,需从精准选型等多方面优化来提升效能。

1 活性炭吸附含重金属废水的作用机制

1.1 物理吸附原理

活性炭拥有高度发达且由微孔(孔径小于2nm)、中孔(孔径2~50nm)和大孔(孔径大于50nm)构成的孔隙结构,其比表面积通常可达 $500\text{--}1500\text{m}^2/\text{g}$ 甚至更高。在对含重金属废水进行吸附操作时,率先发挥作用的是物理吸附。重金属离子凭借范德华力、

静电作用以及疏水作用等,与活性炭表面产生相互作用。当含重金属废水与活性炭相互接触,由于活性炭表面原子的力场处于不饱和状态而存在剩余力,重金属离子便会被吸引至活性炭表面。以静电作用为例,倘若重金属离子带正电荷,而活性炭表面因特定条件带有负电荷,二者之间就会产生静电引力,促使重金属离子被吸附在活性炭表面^[1]。活性炭的微孔为吸附提供了大部分表面积,像汞离子(Hg^{2+})这类离子半径较小的重金属离子,能够进入活性炭的微孔中,进而实现高效吸附。大孔和中孔则充当通道,助力重金属离子向微孔扩散,让活性炭得以充分施展其吸附能力。

1.2 化学吸附机制

活性炭表面存在着诸如羧基(-COOH)、羟基(-OH)、酚羟基等丰富的官能团,这些官能团赋予活性炭表面一定的化学活性,使其能够与重金属离子发生化学反应并形成化学键,从而将重

金属离子稳固地吸附在活性炭上,这便是化学吸附过程。以羧基来说,它能够与重金属离子发生络合反应。相较于物理吸附,这种化学吸附作用更为稳定,被吸附的重金属离子难以脱附。而且,不同官能团对不同重金属离子的吸附具备一定选择性。比如,酚羟基可能对某些特定重金属离子的吸附能力更强,这是由其化学结构和电子云分布特点所决定,使其与这些重金属离子之间能够形成更为稳定的化学键。

1.3 离子交换作用

在含重金属废水体系里,活性炭表面存在着可交换的离子,这些离子会与废水中的重金属离子发生离子交换反应。活性炭表面常见的可交换阳离子有氢离子(H^+)、钠离子(Na^+)等。当含重金属废水流经活性炭时,重金属离子便会与活性炭表面的可交换阳离子展开交换。以处理含铅废水为例,铅离子(Pb^{2+})会与活性炭表面的氢离子进行交换,其反应方程式为: $Pb^{2+} + 2H^+ - \text{活性炭} \rightleftharpoons Pb - \text{活性炭} + 2H^+$ 。此离子交换作用不仅受重金属离子与活性炭表面可交换离子浓度差的影响,还与离子的交换平衡常数紧密相关。离子交换过程使得活性炭能够持续吸附重金属离子,直至达到交换平衡状态。并且,溶液的pH值对离子交换过程有着显著影响,因为pH值会改变活性炭表面可交换离子的存在形式以及重金属离子的水解程度等,从而对离子交换的效率和吸附效果产生作用。

2 影响活性炭吸附含重金属废水效果的关键因素

2.1 活性炭自身特性

活性炭的比表面积和孔隙结构对其吸附效果有着极为关键的影响,活性炭的比表面积一般处于 $500\text{--}1500\text{m}^2/\text{g}$ 区间,甚至会更高,其丰富的孔隙可细分为微孔(孔径小于 2nm)、中孔(孔径 $2\text{--}50\text{nm}$)和大孔(孔径大于 50nm)。其中,微孔作为主要的吸附位点,对于像汞离子(Hg^{2+})这类离子半径较小的重金属离子而言,能够顺利进入微孔实现高效吸附过程;而中孔和大孔发挥着类似通道的作用,助力重金属离子向微孔扩散。例如,活性炭纤维(ACF)的微孔体积约占总体积的90%,且微孔孔径大多在 1nm 左右,与颗粒活性炭和粉末活性炭相比,ACF对水中重金属离子的吸附容量更大、吸附速率更快^[2]。另外,活性炭表面官能团的种类和数量也不容忽视,常见的羧基($-COOH$)、羟基($-OH$)、酚羟基等官能团,赋予了活性炭表面化学活性。不同官能团对不同重金属离子的吸附具有选择性,比如羧基能够与铜离子(Cu^{2+})发生络合反应,通过形成配位键达到吸附目的。

2.2 废水性质

废水中重金属离子的初始浓度和存在形态对活性炭吸附效果有着重要作用。当初始浓度较高时,在一定范围内,浓度差会促使离子向活性炭表面扩散,进而使吸附量增加,但当浓度过高时,可能会使活性炭表面吸附位点迅速饱和,导致吸附效率降低。重金属离子存在形态多样,有游离态、络合态等,游离态离子相对更容易被吸附。以含铅废水为例,若铅离子以络合态存在,由于络合剂的作用,其与活性炭表面活性位点的结合会受到阻碍,吸附效果变差^[3]。而且,废水中其他共存物质也会干扰吸附。

当水中存在其他重金属离子时,可能会产生协同或拮抗效应,如铅和镉两种重金属离子共存时,它们形成的化合物会占据活性炭表面,大幅降低吸附面积,致使活性炭吸附能力下降^[4]。此外,废水中的有机化合物、阴离子等也可能与重金属离子竞争活性炭表面吸附位点,进而影响吸附效果。

2.3 吸附环境条件

活性炭表面的各类含氧基团与官能团是吸附活性中心,pH值对吸附过程影响显著,既左右吸附点解离,又作用于重金属离子的水解、氧化还原及沉淀反应。溶液pH在3.0–6.5区间时,吸附容量随pH值升高而增大。pH值低时,大量 H^+ 占据活性炭活性中心,致使重金属离子吸附量少;pH值升高, H^+ 离解,活性中心暴露,吸附量增大。但pH值持续升高, OH^- 与金属离子作用力增强,吸附量反而下降。温度同样关键,吸附是吸、脱附交织过程,且为吸热反应。 $<50^\circ\text{C}$ 时,对吸附容量影响小;大于 50°C 时,分子热运动加剧,破坏吸附平衡,吸附容量减小,尽显物理吸附特性。

3 提升活性炭吸附含重金属废水效果的优化策略

3.1 基于废水特性的活性炭精准选型

对于离子半径较小的重金属离子,如离子半径约为 0.116nm 的汞离子(Hg^{2+}),粉末活性炭是理想之选。粉末活性炭颗粒细小,投入水中可快速分散,其比表面积通常在 $1000\text{--}1500\text{m}^2/\text{g}$,微孔结构丰富且大多孔径在 1nm 以下,能为汞离子提供充足的吸附位点。在处理含汞浓度 50mg/L 的化工废水时,投加比表面积 $1200\text{m}^2/\text{g}$ 的粉末活性炭,按 10g/L 的量添加,经过2小时吸附,可有效降低汞离子浓度。若废水中重金属离子以大分子络合物形式存在,像工业电镀废水中重金属与络合剂形成的络合物,颗粒活性炭优势尽显。颗粒活性炭中孔($2\text{--}50\text{nm}$)和大孔(大于 50nm)较多,独特孔径分布能为大分子络合物提供扩散通道,助力吸附。在连续流污水处理系统中,颗粒活性炭机械强度好、易于再生,可通过反冲洗或热解等方式恢复吸附性能,稳定发挥作用。另外,活性炭的灰分和强度指标也不容小觑。灰分低于5%的活性炭杂质少,能减少对吸附位点的占用;在连续处理废水工艺中,强度达90%以上的活性炭,可有效降低因摩擦、水流冲击等造成的破碎损耗,保障处理过程稳定运行。

3.2 运用前沿技术创新活性炭改性方法

在化学改性领域,除了传统的酸碱和硝酸氧化改性方法,表面接枝改性因独特优势而展现出巨大潜力。以含铜废水处理过程为例,将活性炭浸没在5%–10%的氢氧化钠溶液中2–3小时,该步骤不仅能有效清除活性炭表面的杂质,还能激活其表面官能团,为后续反应奠定基础。之后,把处理过的活性炭放入含有3%–5%硅烷偶联剂的有机溶液,在 $60\text{--}80^\circ\text{C}$ 的环境下回流反应4–6小时,硅烷偶联剂分子一端的有机基团与活性炭表面的羟基等官能团发生化学反应完成接枝,另一端如氨基($-NH_2$)的活性基团能与铜离子(Cu^{2+})形成稳定配位键,极大增强了对铜离子的吸附选择性。在物理改性范畴,等离子体处理是一项新兴技术。将活性炭置于等离子体反应器,在氩气等惰性气体保护下,以100–200W功率处理5–10分钟,高能粒子轰击活性炭表面,刻蚀出

更多微小孔洞,增加活性位点,显著提升吸附活性。还可尝试复合改性,先微波活化物理改性增加孔隙率,再化学试剂表面处理引入特定官能团,进一步提升活性炭综合性能。

3.3 运用科学手段深度改良吸附工艺

在运用响应面法对含重金属废水处理过程中吸附时间和投加量进行优化时,一般会将吸附时间设定在1~4小时的区间,活性炭投加量控制在5~15g/L,废水初始浓度范围为50~150mg/L。以某含镉废水处理实验为实例,通过一系列实验构建数学模型,致力于找出最佳的吸附时间和投加量组合。实验结果表明,当吸附时间为2.5小时、活性炭投加量为10g/L时,对镉离子的吸附能达到最佳效果。在搅拌方式的选择上,采用变速搅拌策略较为适宜。在吸附初期,以250~350r/min的高速搅拌20~30分钟,这一操作能够促使活性炭与废水迅速混合,从而加快重金属离子向活性炭表面的扩散速度;随后将搅拌速度降低至100~150r/min,以此维持吸附过程的稳定性,避免因过度搅拌而破坏活性炭结构以及吸附平衡。在吸附设备的抉择方面,连续流搅拌釜式反应器凭借其高效的混合和传质性能,能够切实有效地提高处理效率和吸附效果的稳定性。在实际工业应用中,运用该反应器处理含锌废水,处理量会得到显著提升。固定床吸附工艺也是一种可行之选,使废水通过填充有活性炭的固定床,能让废水与活性炭充分接触,延长吸附时间,进而提高吸附效率。

3.4 借助智能系统精细调控吸附体系参数

针对溶液pH值这一关键因素,引入自动控制系统,通过安装在线pH传感器来实时监测废水pH值,以含铅废水处理为例,其处理的最佳pH值在6~8区间,当pH值低于6时,自动控制系统迅速添加0.1~0.5mol/L的氢氧化钠溶液调节,若高于8则添加0.1~0.5mol/L的稀硫酸进行调整。在温度控制环节,借助智能温控系统,结合热交换器和温度传感器协同运作,当温度高于35℃,热交换器中循环冷却水加大流量实现降温,温度低于25℃时,通过电加热丝或蒸汽加热等方式升温,确保温度稳定在25~35℃的最佳范围。对于废水中的共存杂质,采用多重过滤和离子交换组合工艺,先通过砂滤和袋式过滤除去大颗粒杂质,再利用强酸性阳离子交换树脂去除如钠离子(Na^+)、钙离子(Ca^{2+})等干扰阳离子,接着用弱碱性阴离子交换树脂去除氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})等干扰阴离子,提升活性炭对目标重金属离子的吸附选择性,借助在线监测设备实时掌握重金属离子浓度变化,依此及时调整吸

附工艺参数,保障吸附效果稳定。

3.5 通过协同作用实现多元技术联用

构建活性炭-电化学复合体系时,将活性炭填充于电解槽内,使其兼具电极材料和吸附介质的双重作用。以含铬废水处理为例,向废水中添加5~10g/L的活性炭,同时在电解槽两端施加3~5V直流电压。在电场的影响下,活性炭表面会发生电化学反应,所产生的活性物种能够将三价铬(Cr^{3+})氧化为六价铬(Cr^{6+}),这种转化使得铬离子更易被活性炭吸附;并且电场能够推动重金属离子向活性炭表面迁移,进而提升吸附效率。在与光催化技术联用方面,将负载光催化剂的活性炭应用于含汞废水处理。在光催化反应过程中,以紫外灯或太阳光作为光源,将光照强度控制在1000~2000lx,此时活性炭不仅提供了吸附位点,还能促进光生载流子的分离,提高光催化降解汞离子的效率,达成吸附与光催化协同去除重金属离子的目的。还可尝试将活性炭与生物处理技术相结合,借助微生物的代谢作用以及活性炭的吸附作用,共同去除废水中的重金属离子和有机污染物。

4 结语

活性炭吸附处理含重金属废水时,物理吸附借分子间作用力让重金属离子在其表面聚集,化学吸附通过形成化学键实现稳固结合,离子交换作用基于离子交换原理去除重金属离子。研究结果表明,活性炭自身特性、废水性质和吸附环境条件影响吸附效果,可通过精准选型、创新改性等方式提升吸附效果。未来技术进步有望助力活性炭吸附法在该领域发挥更大作用。

【参考文献】

- [1]徐强,孙雪艳,冯时,等.化学絮凝-活性炭吸附法在处理含重金属废水中的应用[J].辽宁化工,2024,53(07):1031~1034.
- [2]李顺顺,李伏虎,张佳,等.活性炭纤维在工业废水处理中吸附重金属离子的研究[J].山东化工,2022,51(05):216~219.
- [3]张璐,杨小丽,董维华.活性炭吸附法处理实验室重金属废液的研究进展[J].化工设计通讯,2019,45(03):135+140.
- [4]李玉,刘俊,陆英,等.改性活性炭吸附处理含铅废水的研究[J].广东化工,2022,49(01):147~149+163.

作者简介:

申芳(1987--)女,汉族,山西运城人,本科,现有职称:工程师。研究方向:环保。