

# 高效吸附材料在重金属废水处理中的应用与机制研究及吸附设备性能分析

蒋晓雷 马小兰 郑媛媛

(山东泰亚环保科技有限公司, 山东 潍坊 261200)

**摘要:** 随着工业化进程的不断推进, 重金属废水的排放量显著增加, 已成为严重的环境污染问题。重金属具有生物累积性和毒性, 能够通过食物链进入人体, 对生态系统和人类健康造成持久的危害, 因此, 重金属废水的处理与治理成为环境保护领域亟需解决的重要课题。通过系统探讨高效吸附材料在重金属废水处理中的应用及其吸附机制, 并对吸附设备的性能进行分析和优化, 可以提升现有重金属废水处理工艺的效率, 还为新型吸附材料和设备的研发提供了参考, 对于保护环境、促进可持续发展具有重要的现实意义。

**关键词:** 高效吸附材料; 重金属废水处理; 吸附设备性能分析

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1674-6937(2024)08-0063-03

传统的废水处理方法如化学沉淀、离子交换和电解等, 虽然在某些方面具有一定的效果, 但普遍存在操作复杂、成本高昂、二次污染等问题。近年来, 吸附技术因其高效、经济、环保等优点, 在重金属废水处理领域得到推广和使用, 而高效吸附材料为重金属废水处理提供了新的解决方案, 具有重要的研究价值和应用前景<sup>[1]</sup>。

## 1 高效吸附材料的种类与特性

### 1.1 活性炭

活性炭是一种高效的吸附材料, 广泛应用于废水处理。活性炭具有极高的比表面积, 通常在 500~1500 m<sup>2</sup>/g 之间, 这赋予其卓越的吸附能力, 活性炭的孔径分为微孔, 不同孔径的分布使其能够吸附不同大小的分子和离子。活性炭表面富含羟基、羧基等含氧基团, 可有效增强其对重金属的吸附性能, 利用范德华或静电力作用将重金属离子吸附于其孔内, 形成一种新的高效去除方法。在活性炭的作用下, 其氧化基团可以和重金属离子进行反应, 生成一种稳定的化合物<sup>[2]</sup>。

### 1.2 纳米材料

纳米材料具有极高的比表面积, 提供了大量的吸附位点, 显著提升了吸附容量, 纳米材料表面易于功能化和修饰, 可以通过引入不同的官能团, 提高对特定重金属离子的选择性和吸附能力。纳米材料的小尺寸使得重金属离子能够迅速扩散到吸附位

点, 缩短了吸附平衡时间。某些纳米材料如纳米氧化铁具有磁性, 便于通过外加磁场回收和再生, 减少了处理成本和环境污染。纳米材料具有多种功能, 可以在吸附重金属的同时, 实现其他功能如光催化降解有机污染物。

### 1.3 改性生物材料

纤维素是自然界中最丰富的生物高分子, 广泛存在于植物细胞壁中, 纤维素具有优良的机械性能和生物降解性, 但其表面活性位点有限, 需要通过改性提高其吸附性能。通过引入醚化、酯化、羧甲基化等基团, 增强纤维素的吸附性能。通过机械处理或物理吸附的方法增加纤维素的表面积和孔隙率, 如超声波处理、冷冻干燥等。利用酶促反应对纤维素进行改性, 形成具有特定功能的纤维素衍生物<sup>[3]</sup>。

壳聚糖富含氨基等活性基团, 具备优异的吸附性能。通过引入羧基、磺酸基、羟基等功能基团, 增强壳聚糖的吸附能力, 常用的方法包括交联、接枝共聚和酰化等。通过物理方法将壳聚糖与其他材料如纳米颗粒、活性炭等复合, 形成复合吸附材料, 以提高吸附性能和机械强度<sup>[4]</sup>。

## 2 吸附机制研究

### 2.1 物理吸附与化学吸附

物理吸附是指通过范德华力、静电力等弱相互作用力, 将吸附质分子吸附在吸附剂表面的过程,

作者简介: 蒋晓雷(1976—), 本科, 工程师, 研究方向: 活性炭吸附与再生。

这种吸附通常是可逆的,不涉及化学键的形成或断裂。物理吸附的吸附力较弱,通常发生在低温下,并且吸附速率较快。高效吸附材料在重金属废水处理中的物理吸附机制主要依赖于材料的比表面积和孔隙结构,比表面积较大的材料,如活性炭、硅胶和某些纳米材料,能够提供更多的吸附位点,从而提高吸附容量。此外,孔隙结构的优化能够增强对特定重金属离子的选择性吸附,例如,活性炭的微孔结构可以有效地捕捉较小的重金属离子,而介孔和大孔结构则更适合吸附较大的金属离子。物理吸附的优势在于其操作简便、能耗较低,但缺点是吸附容量受限,且在高温或高浓度条件下易发生解吸现象。因此,在实际应用中,通常需要结合其他吸附机制或改性吸附材料以提高处理效果<sup>[5]</sup>。

化学吸附是通过化学键的形成或断裂,将吸附质牢固地固定在吸附剂表面的过程,该吸附机制涉及化学反应,如离子交换、配位键合或共价键的形成。化学吸附的吸附力较强,通常是不可逆的,且吸附容量较高。高效吸附材料在重金属废水处理中的化学吸附机制主要依赖于材料表面的化学功能团和活性位点。例如,含有羟基、羧基、氨基等功能团的材料可以与重金属离子形成稳定的配合物,从而提高吸附效果。此外,通过改性技术引入特定的功能团,可以增强材料对目标重金属离子的选择性吸附。例如,将壳聚糖进行改性以引入巯基,可以显著提高其对汞离子的吸附能力。化学吸附的优势在于其吸附容量大、选择性强,且在高温高压下也能保持较高的吸附效率。然而,化学吸附也存在一些挑战,如吸附剂的再生困难、成本较高等。因此,在实际应用中,需要根据具体情况选择合适的吸附材料和吸附机制,以实现最优的废水处理效果。

## 2.2 金属离子的化学性质对吸附过程的影响

重金属离子的电荷影响其与吸附材料表面带电基团之间的静电吸引力,高电荷离子(如 $\text{Cr}^{2+}$ )与负电荷基团的吸附能力通常强于低电荷离子(如 $\text{Cu}^{3+}$ )。离子半径影响重金属离子的水合能和扩散性,较小的离子半径有助于重金属离子更容易进入吸附材料的微孔结构,从而提高吸附效率。重金属离子的配位数和几何结构决定了其在吸附过程中与吸附材料表面基团的相互作用方式,某些重金属离子能够通过配位形成多齿配合物,从而增强吸附能力。

在水溶液中,重金属离子常以水合离子的形式存在,水合离子的稳定性和结构影响其与吸附材料表面基团的相互作用,水合离子较稳定的重金属离子通常具有较低的吸附速率和吸附容量。

## 2.3 吸附材料表面官能团与重金属离子的相互作用机制

第一,不同类型的官能团在吸附过程中发挥不同的作用。羟基和羧基等极性基团通过氢键和静电引力,与重金属离子形成稳定的物理吸附。这些基团还可以通过离子交换和络合作用,与重金属离子形成牢固的化学键。如羧基可以与 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 等重金属离子形成配位键,显著提高吸附效果。

第二,通过官能团的定向引入和改性,可以增强吸附材料的选择性和吸附容量。通过分子设计将特定功能团如巯基或胺基引入到多孔材料表面,可以显著提高对 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 等特定重金属离子的吸附能力。如巯基引入到壳聚糖材料中,不仅可以提高对汞离子的选择性吸附,还能通过形成强键的 $\text{Hg-S}$ 络合物来提高吸附稳定性<sup>[6]</sup>。

第三,纳米技术为吸附材料表面官能团的精确调控提供了新途径。通过纳米尺度上的改性和表面修饰,可以显著增加吸附材料的比表面积和活性位点。利用金属-有机框架(MOFs)或共价有机框架(COFs)作为基底,进行表面功能化修饰,可以实现对不同重金属离子的高效选择性吸附,材料的纳米孔道结构有助于增大吸附位点的密度,并通过表面官能团的优化设计,提升吸附性能<sup>[7]</sup>。

## 3 吸附设备的设计与性能分析

### 3.1 吸附设备的基本结构

固定床吸附器是最常见的吸附设备类型,其基本结构包括一个填充有吸附材料的柱状容器,废水通过吸附床,重金属离子在吸附床中被去除。固定床吸附器通常由进水口、吸附床层、支撑层和出水口组成,吸附床层填充有颗粒状吸附材料如活性炭、树脂等,支撑层通常使用粗砂或砾石以防止吸附材料流失。废水从顶部或底部进入吸附器,沿吸附床层的高度方向流动,重金属离子在流经吸附床层时被吸附材料捕获,净化后的废水从出水口排出。

移动床吸附器是一种改进型吸附设备,吸附材料在设备内部连续或间歇移动,以提高吸附效率和材料利用率。移动床吸附器包括进水口、吸附床层、出水口、吸附材料进出口和驱动系统,吸附材料在设备内部沿固定路径移动,通常采用螺旋输送、链条传动等方式。废水从进水口进入吸附器,与移动的吸附材料接触,重金属离子被吸附,吸附饱和的材料通过再生装置进行再生,再生后的材料重新投入吸附器中循环使用。

流化床吸附器通过使吸附材料处于流化状态,吸附器包括进水口、流化床层、气液分离器、出水

口和循环泵,流化床层填充有颗粒状或粉末状吸附材料,循环泵用于维持吸附材料的流化状态。废水从底部进入流化床吸附器,推动吸附材料处于悬浮状态形成流化床,重金属离子在流化床中被吸附材料迅速捕获,净化后的废水从顶部出水口排出,吸附饱和的材料通过再生装置进行再生,再生后的材料重新回到流化床中。

### 3.2 吸附设备的设计优化

吸附设备的设计优化旨在提高吸附效率、降低操作成本和延长设备寿命。通过优化吸附器内的流体力学条件如流速、流型等,可以提高吸附材料与废水的接触效率,减少死角和短路流动。采用多级吸附系统可以逐步去除废水中的重金属离子,提高整体吸附效率,例如,串联多个固定床吸附器或移动床吸附器,可以提高废水处理的深度。优化吸附材料的再生技术,减少材料损耗和性能下降,提高材料的使用寿命,常用的再生方法包括热再生、化学洗脱和电再生等。引入自动化控制系统,可以实时监控吸附器的运行状态调整操作参数,提高设备的稳定性和处理效率。

### 3.3 吸附设备的性能评价

#### 3.3.1 吸附容量、吸附速率等关键性能指标

吸附容量是评价吸附材料和吸附设备性能的关键指标,高吸附容量意味着吸附材料具有更高的处理能力,能够有效去除废水中的重金属离子。在特定条件下,吸附材料在达到平衡时每单位质量所吸附的重金属离子量,通常通过实验测定,并绘制吸附等温线进行分析。在吸附等温线模型中,最大吸附容量是理论上吸附材料所能达到的最大吸附量,反映了吸附材料的极限处理能力。

吸附速率是指吸附过程中重金属离子被吸附材料捕获的速度,通常用  $\text{mg/g/min}$  表示,吸附速率决定了吸附设备的处理效率,是评价吸附设备性能的重要指标。初始吸附速率是吸附过程开始时的吸附速率,反映了吸附材料与重金属离子之间的初始相互作用强度。

#### 3.3.2 吸附设备的使用寿命与再生能力

吸附设备的使用寿命是指吸附材料在多次吸附-再生循环过程中保持高效吸附性能的时间,使用寿命受多种因素影响,高稳定性的吸附材料在多次再生过程中不易降解或结构损坏,具有更长的使用寿命。选择适当的再生方法可以有效恢复吸附材料的吸附性能,延长其使用寿命,常见的再生方法

包括热再生、化学洗脱和电再生等。废水中污染物的种类和浓度、pH 值、温度等因素都会影响吸附材料的使用寿命,复杂废水会导致吸附材料迅速饱和或失效。

再生效率是指再生过程后,吸附材料恢复到初始吸附性能的比例,通常用百分比表示,高再生效率意味着吸附材料能够多次循环使用,降低运行成本。热再生方法是通过高温热处理去除吸附材料表面的重金属离子和其他杂质,热再生适用于耐高温的吸附材料如活性炭。化学洗脱是使用酸、碱或其他化学试剂洗脱吸附材料表面的重金属离子,化学洗脱适用于大多数吸附材料,但需要考虑化学试剂的选择和废液处理。

## 4 结论

综上所述,文章系统地分析了高效吸附材料在重金属废水处理中的应用及其吸附机制,探讨了活性炭、纳米材料和改性生物材料的特性和优势。通过优化吸附设备的设计和操作条件如固定床、移动床和流化床吸附器,提高了吸附效率和材料再生能力。适宜的溶液 pH 值、温度和离子强度,以及高比表面积和多功能表面官能团的吸附材料,显著提升了重金属去除效果。

### 参考文献

- [1] 高雨雨,陈进,郑路,等.碳纳米吸附材料在水处理中的应用进展[J].化工新型材料,2024,52(01):287-291,298.
- [2] 陆浩翔,文明,刘飞,等.重金属废水处理中新型改性材料的应用研究[J].皮革制作与环保科技,2023,4(13):9-11.
- [3] 杜昭兮.活性炭复合吸附剂吸附重金属的研究[D].东北石油大学,2023.
- [4] 张乐.纤维素基类吸附材料的制备及其吸附性能研究[D].沈阳理工大学,2023.
- [5] 刘博文,李文,廖悦,等.碳基纳米复合材料吸附剂的制备及应用进展[J].化工新型材料,2023,51(12):294-297.
- [6] 张青松,高利坤,陈晓鸣,等.改性煤矸石处理重金属废水研究进展[J].化工矿物与加工,2023,52(07):64-73.
- [7] 畅如.软化树脂吸附重金属废水的研究[J].化工设计通讯,2021,47(07):79-81.