

新型吸附材料在重金属废水处理中的应用研究

张宏光

济宁市生态环境局泗水县分局, 中国·山东 济宁 273200

摘要: 针对重金属废水处理中传统吸附材料效率有限及新型材料应用复杂的问题, 系统梳理了新型吸附材料在污染治理中的作用机理与性能基础, 并对碳基纳米材料、生物质基材料、金属有机框架材料及改性矿物吸附剂的结构特征与吸附性能进行了对比分析。在此基础上, 进一步归纳了实际应用过程中存在的技术经济性约束、复杂水体环境适应性不足以及再生与处置风险等关键问题。通过综合分析材料性能与工程应用之间的耦合关系, 提出了以技术协同创新、性能评价体系完善及全生命周期管理为核心的优化路径。研究为提升新型吸附材料在重金属废水处理中的应用效率与可持续性提供了理论依据。

关键词: 新型吸附材料; 重金属废水处理; 吸附机理; 材料性能; 环境治理

Research on the Application of New Adsorption Materials in Heavy Metal Wastewater Treatment

Zhang Hongguang

Sishui County Branch of Jining Ecological Environment Bureau, China Shandong Jining 273200

Abstract: In response to the limited efficiency of traditional adsorption materials and the complex application of new materials in heavy metal wastewater treatment, this paper systematically summarizes the mechanism and performance basis of new adsorption materials in pollution control, and compares and analyzes the structural characteristics and adsorption performance of carbon based nanomaterials, biomass based materials, metal organic framework materials, and modified mineral adsorbents. On this basis, key issues such as technical and economic constraints, insufficient adaptability to complex water environments, and risks of regeneration and disposal in practical applications were further summarized. By comprehensively analyzing the coupling relationship between material properties and engineering applications, an optimization path centered on technological collaborative innovation, improved performance evaluation system, and full lifecycle management has been proposed. The research provides a theoretical basis for improving the application efficiency and sustainability of new adsorption materials in heavy metal wastewater treatment.

Keywords: New adsorbent materials; Heavy metal wastewater treatment; Adsorption mechanism; Material properties; Environmental governance

0 引言

重金属废水因其毒性强、难降解及易在生态系统中富集等特点, 已成为工业污染治理中的重点难题。吸附法因操作简便、适用范围广及处理效果稳定, 在重金属去除领域具有重要应用价值^[1]。随着材料科学的发展, 新型吸附材料在比表面积、表面官能团及结构可调性等方面不断优化, 为提升处理效率与选择性提供了新的技术路径。然而, 不同类型材料在性能表现、适用条件及工程可行性方面存在差异, 且在复杂水体环境中仍面临稳定性与经济性等多重制约。因此, 有必要从机理基础、材料类型及应用问题等方面对新型吸附材料进行系统梳理, 以明确其技术优势与发展方向。

1 新型吸附材料的作用机理与性能基础

新型吸附材料在重金属废水处理中的核心作用源于其对污染物的界面富集与选择性结合能力, 其本质是通过多种物理与化学过程将溶解态重金属离子从液相转移至固相表面^[2]。常见作用机理包括静电吸附、离子交换、表面络合以及配位作用等。在含有丰富官能团的材料体系中(如羧基、羟基、氨基等), 重金属离子可与表面活性位点形成稳定络合结构, 从而实现高效去除; 对于多孔结构材料, 则依赖其发达的孔隙网络与比表面积, 通过物理吸附与扩散过程增强传质效率。同时, 不同机理之间往往呈现协同效应, 使材料在复杂水环境中仍具备一定的吸附稳定性与选择性。

从性能基础来看,新型吸附材料的处理效果主要受比表面积、孔径分布、表面官能团类型及其密度等因素影响。较大的比表面积有助于提供更多吸附位点,而合理的孔径结构则有利于重金属离子的扩散与进入,从而提高吸附速率与容量。此外,材料表面化学性质对吸附选择性具有决定性作用,不同官能团对特定金属离子的亲和力存在差异^[3]。同时,环境因素如溶液 pH 值、温度及共存离子浓度等也会显著影响吸附过程,例如 pH 变化会改变材料表面电荷状态及金属离子形态,从而影响吸附效率。因此,在实际应用中,需要综合考虑材料结构特征与运行条件之间的耦合关系,以实现吸附性能的最优发挥。

2 主要新型吸附材料的类型与特性

2.1 碳基纳米吸附材料

以石墨烯及其衍生物(如氧化石墨烯)、碳纳米管为代表的碳基纳米材料,因其巨大的比表面积和丰富的表面官能团而备受关注^[4]。氧化石墨烯表面含有大量的含氧官能团(如 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$),这些官能团能够通过静电吸引、离子交换和表面络合等多种方式与水体中的重金属离子(如 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+})发生强力结合,实现高效去除。其优势在于吸附容量高、吸附速率快。然而,其制备成本相对较高,且在水处理后如何从水体中高效分离、避免二次污染是其实际应用中需要解决的关键问题。

2.2 生物质基吸附剂

生物质基吸附剂是利用天然高分子或农业废弃物经过物理或化学改性制备而成的绿色环保材料^[5]。例如,从虾蟹壳中提取的壳聚糖,其分子链上含有大量的氨基($-\text{NH}_2$)和羟基($-\text{OH}$),是吸附重金属离子的优良活性位点。通过交联、接枝等改性手段可进一步提升其机械强度和在酸性环境中的稳定性。此类材料的核心优势在于来源广泛、成本低廉、可生物降解,符合可持续发展理念。但其吸附容量通常低于纳米材料,且易受 pH 值影响。

2.3 金属有机框架材料

金属有机框架材料是一类由金属离子或团簇与有机配体自组装形成的具有周期性网络结构的晶态多孔材料。MOFs 拥有极其规整的孔道结构、超高的比表面积(可达 $7000\text{ m}^2/\text{g}$ 以上)和可调的孔径尺寸。这些特性使其能够精准地“捕获”特定尺寸的重金属离子,表现出极高的吸附容量和选择性。部分 MOFs 材料的孔道环境还可以通过功能化修饰,进一步增强对目标污染物的亲和力。目前,其主要挑战在于合成成本较高以及在复杂水环境中的化学稳定性有待提高。

2.4 改性矿物吸附剂

天然矿物如沸石、蒙脱石、凹凸棒石等,因其本身具有的多孔结构和离子交换能力,是传统的吸附材料。通过酸碱处理、表面活性剂改性或纳米化等技术手段,可以显著增加其比表面积、优化孔道结构并引入更多活性吸附位点,从而大幅提升对重金属的吸附性能。改性矿物吸附剂的最大优点是原料易得、成本极低,适合大规模废水处理工程。其性能虽经提升,但与前沿纳米材料相比,在吸附容量和选择性上仍有一定差距。

3 新型吸附材料在实际应用中面临的共性挑战

3.1 技术经济性与成本效益的平衡难题

不同材料的技术经济性差异巨大,构成了应用推广的首要门槛。如第二章所述,以金属有机框架材料(MOFs)和石墨烯基材料为代表的高性能吸附剂,其合成工艺复杂、原料成本高昂,导致其单位处理成本远高于传统方法。这使得许多中小企业即便认可其技术优势,也因经济压力而望而却步。相反,生物质基吸附剂和改性矿物虽具备显著的成本优势,但其吸附容量、选择性和循环稳定性通常不及前者,在处理高浓度或复杂组分废水时可能难以达标,导致其应用场景受限。如何在保证治理效果的前提下,实现技术性能与应用成本的最佳平衡,是所有新型材料商业化必须解决的核心问题。

3.2 复杂水体环境下的性能稳定性挑战

工业废水成分复杂且波动性强,与实验室理想条件存在显著差异,这对新型吸附材料的结构稳定性与吸附性能提出了更高要求。首先,pH 值的变化会直接影响材料表面的电荷特性及官能团状态,从而改变其对重金属离子的吸附能力。在强酸或强碱条件下,部分材料的晶体结构或表面活性位点可能发生破坏或失活。例如,某些金属有机框架材料在酸性环境中易发生结构降解,而生物质基吸附剂表面的氨基等官能团在低 pH 条件下会发生质子化,降低其与金属离子的络合能力,进而导致吸附效率明显下降。此外,pH 波动还会改变重金属离子的存在形态,使其更难被材料有效捕获,从而进一步加剧性能不稳定问题。

其次,共存离子与有机物的干扰也是影响吸附稳定性的重要因素。工业废水中通常含有多种阳离子与阴离子,这些离子会与目标重金属离子竞争有限的吸附位点,尤其在材料选择性较弱的情况下,会显著削弱其去除效果。最后,废水中的天然有机物、表面活性剂等大分子物质易在材料表面形成覆盖层,或进入孔道内部造成堵塞,减少有

效吸附位点数量, 形成明显的“基质效应”。该效应不仅降低瞬时吸附效率, 还会在长期运行过程中引起材料性能持续衰减, 缩短其使用寿命, 进而影响整体处理系统的稳定性与可靠性。

3.3 吸附剂的再生、处置与二次污染风险

吸附过程本质上是将溶解态重金属由液相转移至固相, 并未实现污染物的彻底去除与转化, 因此吸附剂在达到饱和状态后的处理问题成为该技术面临的重要风险来源。在再生环节中, 吸附剂通常需要通过酸洗、碱洗等方式释放已吸附的重金属离子, 但这一过程往往会对材料结构产生一定破坏, 导致孔隙结构塌陷或表面活性位点减少, 从而引起吸附性能逐步衰减。同时, 再生过程中产生的洗脱液通常富含高浓度重金属, 其污染程度较原废水更为集中, 若处理不当将形成新的污染源。此外, 不同材料在多次循环使用过程中表现出明显的性能不稳定性, 吸附容量与选择性均可能下降, 这进一步加剧了再生过程中的环境与运行风险。

在处置环节中, 吸附剂的固体形态及其稳定性同样带来潜在环境隐患。以碳基纳米材料为代表的粉末状吸附剂, 由于粒径较小且分散性强, 在实际应用后难以实现完全回收, 部分颗粒可能随出水进入环境体系, 对水体生态系统造成潜在影响。同时, 吸附饱和后的材料中富集了大量重金属, 一旦进入填埋或长期堆存状态, 在外界环境因素作用下, 可能发生重金属的再释放与迁移, 进而对土壤及地下水环境产生持续性污染风险。此外, 复杂水体条件下材料表面吸附的有机物及其他杂质, 也可能在后续处置过程中引发复合污染效应, 进一步增加环境安全的不确定性。

4 新型吸附材料高效可持续应用路径

4.1 目标导向技术协同创新与成本稳定性优化

针对高性能材料成本高昂、低成本材料性能不足及复杂水体中稳定性差的核心技术瓶颈, 应组织产学研联合攻关, 实现关键技术的突破。这需要聚焦于低成本合成与绿色制备, 鼓励开展针对金属有机框架(MOFs)、石墨烯等材料的低成本合成路线研究, 例如利用工业副产品或生物质为前驱体开发温和工艺, 从源头解决“用不起”的问题。同时, 应大力发展复合材料技术与结构优化, 将高成本的功能性纳米材料负载于低成本载体上, 制备成兼具高效与经济的复合吸附剂。更重要的是, 通过开发整体式、易于分离的吸附材料(如吸附凝胶、纤维膜等), 取代传统粉末, 从根本上解决材料回收难、易造成二次污染的工程难题。此外, 还需系统性开展材料的表面化学改性研究,

通过引入特定功能基团或构建保护层, 提升材料在实际废水中对 pH 波动、共存离子竞争及有机物污染的抗干扰能力和化学稳定性, 确保其长期高效运行。

4.2 构建基于实际应用场景的性能评价标准体系

为改变当前评价标准与实际工况脱节的现状, 应建立一套更能反映材料真实应用性能的、科学、统一的国家标准体系。该体系应在传统的静态吸附容量测试之外, 强制引入在模拟真实废水(即含有多种竞争离子、有机物且 pH 动态变化)条件下的动态穿透测试, 以更准确地评价材料的实际处理能力和选择性。同时, 标准必须将吸附剂的循环再生性能确立为核心评价指标, 例如, 要求企业提供材料在连续进行多次吸-脱附循环后吸附容量的衰减率数据, 从而引导市场从关注一次性效果转向关注长期经济效益与可持续性。最后, 标准还应强制纳入环境安全性与处置风险评价, 包括对再生废液的毒性评估, 以及对吸附饱和和后拟作固废处置的材料进行浸出毒性测试, 以评估其在填埋等环境下的重金属释放风险, 严防二次污染。

4.3 建立全生命周期管理与精准政策激励机制

要实现吸附技术的可持续发展, 必须将其纳入全生命周期的管理框架, 并辅以精准的政策激励。可以探索推行生产者责任延伸制度, 建立“谁生产、谁负责回收”的机制, 鼓励生产企业与用户合作建立区域性的饱和吸附剂回收与集中再生中心, 从而专业化、规模化地处理再生废液, 降低单个企业的成本与技术门槛。在此基础上, 实施与性能标准挂钩的精准激励措施, 将环保补贴、税收优惠、绿色信贷等政策工具, 与新建立的高性能、高稳定性、高安全性标准直接关联。对于采用那些通过了严格再生性能和环境安全测试的新型吸附材料的企业, 给予更大力度的政策支持, 从而形成“优质优价”的市场导向, 激励全行业主动选择并投入研发真正高效且环境友好的技术。

5 结语

新型吸附材料通过多种吸附机理实现对重金属离子的高效去除, 不同材料在结构特征与性能表现上各具优势, 形成了多元化的发展格局。碳基纳米材料与金属有机框架材料在吸附容量与选择性方面表现突出, 而生物质基与改性矿物材料则在成本与可持续性方面具有优势。与此同时, 技术经济性、复杂水体适应性及再生处置问题仍是制约其工程化应用的关键因素。通过加强材料改性复合设计、完善性能评价体系并推进全生命周期管理, 可有效提升材料的应用稳定性与环境安全性。未来应进一步强化面向实际工况的技术研发与标准支撑, 推动新型吸附材料在重金

属废水治理中的高效应用与持续发展。

参考文献:

[1] 麦天邦. 重金属废水治理中纳米纤维素材料的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(23):13-15.

[2] 刘乃明. 电镀废水中重金属绿色分离与高效回收研究[J]. 中国战略新兴产业, 2025,(35):94-96.

[3] 徐莹, 吴宝程, 陈学勇. 纳米材料在工业废水处理中的研究进展[J]. 上海轻工业, 2025,(06):186-188.

[4] 盘祥星. 电镀废水中重金属的资源化回收工艺及经济性分析[J]. 中国资源综合利用, 2025,43(11):97-99.

[5] 杨丹红, 刘明灯, 陈世洪等. 电镀重金属废水处理技术研究进展[J]. 江西化工, 2025,41(05):14-18.