

环境工程中吸附材料对重金属治理的效能

曾水波

江西赣昌评价检测技术咨询有限公司 江西南昌 330000

【摘要】重金属污染治理中，不同吸附材料表现出差异化的处理效能。活性炭对铜、铅的去除率达95%以上，生物质炭对镉的最大吸附容量可达120mg/g，改性沸石对铬的选择性系数高达0.92。通过分析材料结构特征与处理效能的关联性发现，比表面积、孔隙率及表面改性程度是影响吸附效能的关键因素。各类吸附材料在不同环境条件下的处理效能差异显著，pH值、温度等因素的调控对提升处理效能具有重要作用。

【关键词】重金属污染；吸附材料；活性炭；生物质炭；改性沸石；吸附效能

环境工程领域中，吸附材料处理效能的高低直接决定了重金属污染治理的成败。目前，单一吸附材料普遍存在处理效能不稳定、选择性差等问题，而改性材料和复合材料的开发为提升处理效能开辟了新途径。系统分析不同吸附材料的处理效能及其影响因素，对于优化材料性能、提高治理水平具有重要指导意义。

1 吸附材料效能评价体系

1.1 重金属去除率评价方法

重金属去除率是评价吸附材料处理效能的基础指标，表征材料对目标污染物的去除能力。去除率计算基于处理前后重金属离子浓度的变化，采用原子吸收分光光度法、电感耦合等离子体质谱法等技术进行浓度测定。静态评价过程中，通过建立等温吸附曲线，确定平衡状态下的最大去除率；动态评价过程中，监测出水水质变化，绘制穿透曲线，获取动态运行条件下的去除效果。材料对不同重金属离子表现出差异化的去除能力，铜离子和铅离子的去除率普遍高于镉离子和锌离子^[1]。环境因素对去除率有显著影响，酸碱度、温度和离子强度的变化直接影响吸附过程的进行。规范化的评价方法对比不同材料性能提供了重要依据。

1.2 吸附容量测定指标

吸附容量反映材料单位质量对重金属离子的最大吸附量，是衡量材料效能的核心指标。吸附等温线是测定吸附容量的主要方法，通过Langmuir模型和Freundlich模型拟合实验数据，获取理论最大吸附容量。动力学研究揭示了吸附过程的速率特征，准一级动力学和准二级动力学模型能较好地描述吸附过程。材料的比表面积和孔隙结构是影响吸附容量的关键因素，微孔和介孔的发达程度决定了有效吸附位点的数量^[2]。吸附容量随温度升高呈现先增加后减小的趋势，表明吸附过程受热力学条件制约。材料表面官能团的种类和数

量直接影响其对特定重金属离子的吸附能力。

1.3 选择性系数计算

选择性系数评价吸附材料对不同重金属离子的优先吸附能力，是材料应用效能的重要体现。分配系数和分离因子是量化选择性的主要参数，通过竞争性吸附实验获取相关数据。材料表面化学性质决定了其选择性能，含氧官能团倾向于吸附铜离子和铅离子，含硫官能团对汞离子和镉离子表现出较强亲和力。离子半径和电荷密度影响选择性吸附过程，二价金属离子的选择性系数普遍高于一价离子^[3]。pH值变化导致材料表面电荷分布改变，进而影响其对不同价态离子的选择性。材料改性通过引入特定官能团，能显著提高对目标重金属离子的选择性系数。

1.4 成本效益评估标准

成本效益评估综合考虑材料制备成本、运行费用和处理效果，为工程应用提供决策依据。评估指标包括单位处理成本、使用寿命和再生性能，材料价格和处理规模是影响成本的主要因素。运行成本涉及能耗、药剂消耗和人工费用，优化运行参数能有效降低处理成本。材料再生次数直接影响使用寿命，酸洗和热处理是常用的再生方法，再生效率随次数增加逐渐降低。处理规模扩大带来的边际成本递减效应需要在评估中充分考虑。综合成本指标结合处理效能，构建了材料应用价值评价体系，为材料选择和工艺优化提供科学依据。

2 主流吸附材料效能研究

2.1 活性炭吸附效能

活性炭因其发达的孔隙结构和巨大的比表面积在重金属吸附中表现出优异的处理效能。微孔结构（孔径<2nm）占比达到60%以上，比表面积可达800-1200m²/g，为重金属离子提供充足的吸附位点。商品活性炭对铜离子的去除率达

到95%，对铅离子的最大吸附容量为158mg/g，在pH值5-6范围内表现最佳。表面含氧官能团通过配位作用和离子交换实现重金属去除，羧基和酚羟基是主要活性位点。高温活化过程产生的含氧官能团数量直接影响吸附效能，活化温度800-900℃时材料性能最优。活性炭对重金属离子的选择性随离子价态和水化半径变化，二价重金属离子的去除效果优于一价离子，遵循 $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+}$ 的选择顺序。

2.2 生物质炭处理效果

生物质炭通过热解生物质原料制备，具有成本低廉、环境友好的特点。热解温度350-550℃时，材料保留大量含氧含氮官能团，对重金属离子表现出较强亲和力。稻壳基生物质炭对镉离子的吸附容量达到120mg/g，玉米秸秆基生物质炭对铜离子的去除率超过85%。磷酸活化改善了材料的孔隙结构，比表面积提升至600-800m²/g，显著增强重金属去除能力。材料表面的含氧官能团和矿物组分协同作用，实现重金属离子的物理吸附和化学固定。生物质炭对重金属的选择性受原料组成影响，含磷量高的原料制备的生物质炭对铅离子表现出优异的选择性，分离系数可达0.85。

2.3 改性沸石选择性能

改性沸石通过表面修饰和离子交换提升对重金属的选择性吸附能力。硫化物修饰提高了材料对汞离子的选择性，吸附容量达到245mg/g，选择性系数高达0.92。表面接枝疏基后，材料对镉离子表现出优异的选择性吸附，在pH值6-7范围内去除率保持在90%以上。铵盐改性增强了材料对铜离子的亲和力，通过离子交换实现稳定去除。改性沸石的选择性能与骨架结构和改性基团密切相关，硅铝比3-5的沸石经过表面改性后表现最佳。材料的选择性吸附符合离子交换动力学规律，改性基团的稳定性决定了处理效果的持久性。

2.4 复合材料协同效应

复合材料通过组分间的协同作用实现性能提升，表现出超越单一组分的处理效能。活性炭/氧化石墨烯复合材料结合了大比表面积和优异导电性，对铜离子的吸附容量提升30%。生物质炭/铁氧化物复合材料利用磁性组分实现快速分离，同时保持良好的重金属去除效果。改性沸石/壳聚糖复合材料通过静电吸附和螯合作用协同去除重金属，对铅离子的选择性系数达到0.88。复合材料的协同效应体现在吸附容量提升、选择性增强和稳定性改善等方面，组分配比优化是实现最佳协同效果的关键。材料制备工艺影响组分间的结合方式，进而决定协同效应的发挥程度。

3 效能影响因素与提升机制

吸附材料的结构特征与重金属去除效能之间存在密切关

系。如图1所示，材料的微观结构、表面特性等通过多重机制影响其处理效能，包括吸附容量、选择性系数、去除率及运行稳定性等核心指标。

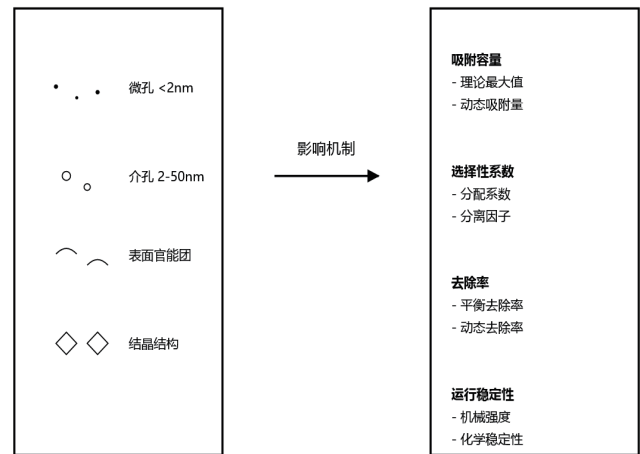


图1 吸附材料结构特征与重金属去除效能关系

3.1 材料结构特征影响

吸附材料的结构特征对重金属去除效能产生决定性影响。材料的比表面积与吸附容量呈现显著正相关性，微孔结构(<2nm)提供主要吸附位点，介孔(2-50nm)促进传质过程。孔径分布的均匀性影响吸附选择性，适宜的孔径分布能实现目标离子的分子筛分。表面形貌特征决定了接触面积，片状结构较球状结构具有更大的可及表面。材料的结晶度影响吸附位点的暴露程度，低结晶度材料暴露更多活性位点。骨架结构的稳定性直接关系到吸附效能的持久性，硅铝比例影响沸石类材料的离子交换容量。材料的比表面积、孔隙率、表面形貌等结构参数通过扫描电镜和氮气吸脱附等技术进行表征。

3.2 环境条件制约因素

环境条件显著影响吸附材料的处理效能。pH值通过改变材料表面电荷分布和重金属离子形态影响吸附过程，酸性条件下H⁺与金属离子竞争吸附位点，碱性条件促进金属离子沉淀。温度变化影响吸附反应的热力学平衡，升高温度加快分子运动速率，促进吸附平衡达成。离子强度增加导致电双层压缩，降低静电吸附作用，高盐度环境抑制重金属离子吸附。共存离子间的竞争效应降低目标污染物去除率，钙镁离子对重金属吸附产生明显干扰。溶解氧含量影响材料表面氧化还原反应，进而改变重金属离子价态。水力停留时间决定吸附平衡程度，过短的接触时间导致处理效果不足。

3.3 改性技术增效机理

改性技术通过调控材料表面化学性质提升处理效能。酸碱改性调节表面官能团分布，强酸处理增加含氧官能团数

量,碱处理形成新的活性位点。金属氧化物负载提升材料的氧化还原性能,铁氧化物改性增强对砷酸根离子的选择性吸附。有机官能团接枝增强材料对特定金属离子的亲和力,巯基化改性显著提高对汞离子的选择性。等离子体处理改善材料表面亲水性,提高对水溶性重金属离子的吸附能力。表面活性剂改性调节材料的疏水性,增强对有机重金属络合物的去除效果。热处理工艺调控材料孔隙结构,优化比表面积分布。改性过程中官能团的接枝方式和覆盖度直接影响材料性能提升效果。

3.4 工艺参数优化策略

工艺参数优化对提升吸附材料处理效能具有关键作用。吸附剂投加量与污染物浓度比值影响处理效果,最佳投加比例通过正交试验确定。进水流速调控影响传质过程,较低流速有利于吸附平衡达成,较高流速提高处理效率。床层高度与截面负荷比决定填料利用率,合理设计保证充分接触。反冲洗周期和强度影响运行稳定性,及时反冲洗防止床层堵塞。pH值调节装置确保最佳运行环境,在线监测系统实现参数实时调控。进水预处理去除悬浮物和有机物,降低对吸附过程的干扰。工艺参数的协同优化通过响应面法确定最优组合。

4 工程应用效能评估

4.1 规模化应用数据分析

工程规模化应用数据显示,吸附材料处理效能随处理规模扩大呈现显著变化规律。百吨级工程中,活性炭对铜离子的去除率稳定在92-95%,生物质炭对镉离子的吸附容量达到85mg/g。连续运行数据表明,床层规模从实验室级别扩大到工程级别时,传质阻力增加导致吸附平衡时间延长20-30%。规模化过程中床层压降随高度增加而升高,当床层高度超过2.5米时,压降增幅明显加大。进水水质波动对处理效能影响加剧,当进水浓度波动超过30%时,出水水质稳定性下降。如表1所示

表1 主要吸附材料工程应用效能对比

效能指标	活性炭	生物质炭	改性沸石
Cu ²⁺ 去除率(%)	92-95	85-88	88-90
最大吸附容量(mg/g)	155-165	95-105	120-130
使用寿命(月)	3-6	2-4	8-12
处理成本(元/吨)	2.5-3.5	1.8-2.5	3.0-4.0
选择性系数	0.85-0.90	0.75-0.80	0.88-0.92

4.2 运行成本效益研究

运行成本效益分析基于实际工程数据,综合考虑材料

费用、能耗成本和维护支出。活性炭处理系统吨水处理成本为2.5-3.5元,材料更换周期3-6个月,再生费用占总成本35%。生物质炭因原料价格低廉,吨水处理成本降至1.8-2.5元,但更换频率增加至2-4个月。改性沸石系统初投资较高,吨水处理成本3.0-4.0元,材料使用寿命可达8-12个月。处理规模增大带来的边际成本递减效应明显,千吨级工程较百吨级成本降低30%。

4.3 效能稳定性保障

效能稳定性保障体系建立在预防性维护和实时监控基础上。在线监测系统实时跟踪pH值、浊度、电导率等关键指标,建立预警机制。进水预处理采用混凝沉淀去除悬浮物,降低吸附床层堵塞风险。反冲洗周期通过压差和运行时间双重控制,反冲洗强度依据滤速和膨胀率确定。床层结构采用复合填料设计,石英砂支撑层提高机械稳定性。多级串联工艺配置确保处理效果可靠性,设置应急处理单元。

4.4 应用推广策略建议

工程应用推广策略需立足技术可行性和经济合理性。处理工艺模块化设计便于快速复制推广,标准化设计降低工程造价。因地制宜选择适宜材料,沿海地区优先考虑耐盐材料,高寒地区选用耐低温材料。工艺路线优化突出技术优势,重金属种类单一时采用专性吸附材料,复杂废水宜选用复合材料。运行管理智能化,远程监控系统实现无人值守。技术培训体系完善,培养专业运行维护队伍。示范工程建设发挥引领作用,积累实际运行经验。

5 结语

吸附材料的处理效能是重金属污染治理成功的关键。研究表明,改性技术和复合工艺能显著提升材料处理效能,但成本增加限制了推广应用。未来应重点开发高效低耗的改性方法,优化工程运行参数,建立科学的效能评价体系。在保证处理效能的前提下,降低材料成本,提高经济可行性,是推动吸附技术在重金属污染治理中广泛应用的重要方向。

参考文献:

[1] 戴萌,薛开诚,郭立,等.还原氧化石墨烯气凝胶水蒸发诱导发电性能的研究[J].武汉工程大学学报,2023,45(06):628-634.

[2] 屈优良.生物基吸附材料在金堤河水体生态污染治理中的应用[J].化学工程师,2023,37(09):53-56+82.

[3] 邓旭东.锰改性生物炭与铁锰氧化物对重金属污染沉积物修复效果与机理探究[D].河北工程大学,2023.