

DOI: 10.20176/j.cnki.nxdz.000060

# 基于纳米复合材料的高效吸附剂在 污水深度处理中的研究进展

施卜银, 王卓玉

(宁夏大学 省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**随着工业化的不断推进,工业废水、农业废水已对人类生活及生态环境造成较大影响,亟需对污染水体进行深度处理。纳米复合材料作为吸附剂,在污水深度处理中具有吸附容量大、操作简单及再生性能好等优势。同时,纳米复合材料具有高比表面积、高活性优势,能够规避纳米材料因粒径过小引发的团聚失活等缺陷。因此,纳米复合材料被广泛用于污水的深度处理。根据现阶段污水处理现状,阐述纳米复合材料的种类及基于纳米复合材料的污水深度处理新技术。

**关键词:**纳米复合材料;废水污染;深度除污技术

**分类号:**(中图)TB33;X703

**文献标志码:**A

水资源是所有生灵赖以生存的重要自然资源,水资源污染及短缺是不可忽视的生态环境问题<sup>[1]</sup>,不仅严重威胁人类身体健康,也制约了国家经济建设与生态环境保护的协同推进<sup>[2]</sup>。因此,对污染废水进行深度处理迫在眉睫。研究者对传统污水处理方法的去除效率及如何创新与优化传统污水处理方法,进行了大量探究<sup>[1-9]</sup>,致力于通过新的处理方法与途径来高效处理废水,进而提升污水处理方法的深度处理能力,这为解决污水处理问题提供了新的方向与思路。文中根据现阶段污水处理现状,详细阐述纳米复合材料的种类、基于纳米复合材料的污水深度处理新技术及其发展现状与趋势,研究结果可为工业废水、城市污水及地下水的深度处理研究,提供一定的参考。

## 1 废水污染现状

随着现代工业领域生产技术的持续迭代革新,工业化进程不断向前推进,工业规模不断扩大。虽然这些变革提升了工业生产效率,但生产活动所产生的废水问题也日益突出,尤其是工业废水、城市污水及地下水的深度处理变得愈发困难。其中,工

业废水对人类及生态环境造成的危害较大。例如,硫酸行业废水中含有重金属Tl。在用硫铁矿制备硫酸的过程中,由于Tl与硫的亲合力较强,Tl在硫铁矿中以伴生元素存在<sup>[3]</sup>,其质量比高达50 mg/g(广东云浮硫铁矿)<sup>[4]</sup>。在制备硫酸的过程中,除了少量附着于固体表面而随着烟气排掉的Tl,大部分的Tl则在净化过程随着废水排出。范真真等<sup>[3]</sup>的调查显示,在相关企业的废酸中,Tl的质量浓度为6.01~400 μg/L。

废水中含有大量化学物质和有害物质,为了保护人类健康及生态环境,国家在环保方面对废水排放标准的要求越来越高,对工业废水污染物的排放控制标准也逐步提高<sup>[5]</sup>。目前,对于工业废水的处理,常用的处理技术:物理处理法,如吸附法、膜过滤法及离子交换法等;化学处理法,如混凝-絮凝技术、光解法及电化学法等;生物处理法,即使用酶、细菌或真菌辅助处理污水;高级氧化过程与多种技术混合的方法<sup>[6-9]</sup>。

为了高效处理城市污水,我国各地大规模兴建污水处理厂,且这些污水处理厂多采用活性污泥、厌氧-缺氧-好氧、氧化沟、序列间歇式反应器及生

收稿日期:2024-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21574042,51273066)

作者简介:施卜银(1992—),女,讲师,博士,主要从事高分子纳米材料及应用研究,(电子信箱)13122198595@163.com。

引用格式:施卜银,王卓玉.基于纳米复合材料的高效吸附剂在污水深度处理中的研究进展[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2026,47(2):185-192.

物膜反应器等工艺处理污水<sup>[10-11]</sup>。这些污水处理厂对当地生态环境起到了一定保护作用,但由于污水成分复杂、处理工艺繁琐,许多地区的污水处理技术落后,尤其是对于工厂较多的城市,污水处理将面临严峻挑战<sup>[12]</sup>。同时,在污水处理体系并不发达的农村,污水处理较为困难,且由于受到经济发展水平不高及技术落后等因素的影响,我国中西部地区农村的污水处理率低于30%<sup>[13]</sup>。农业污水中含有的氨氮化合物及N、P等元素,主要来源于农药、肥料等农副产品,会随着降雨逐渐渗入土壤,最终污染地下水系。同时,农村污水流量的波动性较大,给污水处理厂也带来较大的压力<sup>[14]</sup>。我国在农业农村污染治理规划中要求,2025年农村污水治理率达55%<sup>[15-17]</sup>。

在工业发展过程中,印染纺织、电镀、半导体加工以及玻璃制品等行业排放的废水,是造成生态水中As、F、P等微量元素含量升高的主要原因<sup>[2,18-20]</sup>。这些微量元素对于人类身体健康与农作物生长是不可或缺的,但水体中若含有过量的这些元素,会造成严重后果,如P过量会造成水体富营养化,进而危害水生态健康<sup>[19]</sup>;人若长期饮用F含量超标的水,会引发氟骨症、氟斑牙等病症,甚至导致氟中毒<sup>[20]</sup>,严重危害人体健康。

## 2 纳米复合材料

对于工农业污水及生活污水的处理,传统的处理方法有物理法、生物法、化学法及物理化学法<sup>[21]</sup>,并被广泛应用<sup>[2,21]</sup>。但随着生产工艺大幅进步,这些传统方法不能满足污水深度处理的要求,对污水的处理效果达不到国家及行业标准的要求<sup>[2]</sup>。

在众多处理方法中,物理吸附法逐渐脱颖而出。该方法操作简单且运行稳定,对污水中的污染成分吸附量大,经济效率高,且对生态环境友好。对于废水量大、污染物浓度低的污水,该方法具有极大的优势,因此被广泛探究<sup>[19,22]</sup>。该方法中,常用的吸附剂有纤维素、离子交换树脂、活性炭及改性黏土等,但由于这些材料在污水处理后期,即分离回收过程中,存在回收困难或再生效率不高等缺点,限制了该方法在污水处理中的广泛应用<sup>[22]</sup>。

近年来,纳米材料作为一种高效吸附剂,在污水处理行业崭露头角,并逐渐被广泛应用<sup>[19]</sup>。纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺寸(1~100 nm)或由它们作为基本单元构成的材料<sup>[22]</sup>。纳米材料因较高的比表面积及表面活性而被广泛研究,但是若单独以纳米材料为吸附剂,在

吸附过程中,纳米颗粒易失活且聚集成块,故需要选择合适且具有纳米孔结构的载体,将纳米材料负载于载体上,形成纳米复合材料。这样既保留了纳米材料的自身优势,又能很好地规避纳米材料因聚集而失活的缺陷,且载体的支撑使纳米复合材料的稳定性大幅度增加<sup>[19]</sup>。

### 2.1 纳米复合材料的限域效应

如上所述,将纳米材料负载于载体上,需要依赖具有多孔性特殊结构的载体,其中,纳米级的载体,即被称为纳米限域材料<sup>[2]</sup>。可作为纳米限域材料的载体有多种,如介孔材料、天然矿物、层状材料、聚合物以及金属氧化物等<sup>[23]</sup>。将纳米材料固定在纳米尺度限域材料中,由于限域载体对纳米材料自由迁移的限制,纳米材料的活性得以有效保持<sup>[24]</sup>,但是纳米材料的生长结晶过程、化学反应途径均会发生改变<sup>[23]</sup>,如产生亚稳态晶型,使某些特定晶型的结晶速度加快等。Yang等<sup>[25]</sup>采用粗粒度(coarse grained, CG)分子动力学,对聚乙烯醇(PVA)的结晶行为进行探究:构建PVA-CG模型,采用分子动力学,探究纳米限域效应对PVA结晶过程的影响。同时,对比不同纳米限制水平(0级、2级、4级)PVA的结晶过程,发现在同等温度条件下,远离纳米限域空间的区域几乎不产生结晶,且纳米限制等级越高,限域区域的结晶晶粒越大,这表明纳米限域效应可降低晶体成核和生长的活化能,从而使结晶生长速率提高。

纳米限域体系的空间效应,对反应底物与催化剂间的相互作用也产生一定影响,最终影响产物的生成;并且由于限域空间尺寸较小,一些大的杂质颗粒不能进入活性中心区域,进而大幅度减少了副反应发生,从而提高了反应速率<sup>[24]</sup>。上述由纳米限域空间特性引发的调控现象,被定义为“纳米限域效应”<sup>[26]</sup>。

### 2.2 纳米复合材料的活性

随着对纳米复合材料的深入研究,对于如何提高纳米复合材料的反应活性,研究者进行了大量实验。结果显示,增加活性位点的暴露,或者改变载体与纳米活性中心的相互作用,可以有效提高纳米复合材料的反应活性<sup>[1]</sup>。例如,Song等<sup>[1]</sup>将一种惰性载体CeO<sub>2</sub>负载到活性纳米颗粒Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>上,制备出新型纳米复合材料(Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CeO<sub>2</sub>)。实验结果显示,该材料可作为催化剂用于过氧单硫酸盐的类芬顿反应。该材料中生成的Co...O<sub>v</sub>...Ce结构(氧空位结构),可作为新的活性位点,促进反应进行,进而大大提高了纳米复合材料的反应活性。Zhang等<sup>[27]</sup>采用β-二酮(乙酰丙酮,AcAc)合成并功能化金纳

米颗粒,以此提高金纳米材料的稳定性。实验结果显示,对于经 AcAc 功能化的纳米材料,可通过调节发光强度或 AcAc 浓度,来调节纳米材料的粒径大小,且使其在水中的分散稳定性、对光化学反应的稳定性均大幅度提高。Chen 等<sup>[28]</sup>利用金纳米粒子与 Ni(II) 相互作用产生的紫外-可见光谱差异,设计一种可识别水体中不同 Ni(II) 络合物的传感器。该传感器可准确地识别出不同 Ni(II) 的存在形态,这为研究人员有针对性地制定污水处理方案提供了依据。武金龙等<sup>[29]</sup>制备海藻酸-碳酸钙杂化纳米粒子,

并通过杂化方法对纳米粒子的性能进行改进。实验结果显示,经过杂化的纳米粒子对紫杉醇与阿霉素这两种物质的负载效果良好,且其负载能力提高。

### 2.3 不同处理方法对含 Cr 废水处理效果的对比

近年来,随着纳米复合材料的广泛应用,传统污水处理方法的效率低、操作复杂和后处理困难等弊端逐渐暴露,使传统污水处理方法的使用范围大大缩小<sup>[30]</sup>。为了直观地对比传统污水处理方法与基于纳米复合材料的污水处理方法的区别与差异,以含 Cr 工业废水体系为例,对比它们的处理效果(表 1)。

表 1 不同处理方法对含 Cr 废水体系处理的对比

Tab. 1 Comparison of different treatment methods for Cr-containing wastewater systems

处理方法	Cr(VI) 的去除率/%	操作要求或弊端
传统处理方法	酸浸法	61 后期硫酸溶液的处理较困难,易造成二次污染,实验成本较高
	复合菌群吸附法	60 菌群存活条件苛刻,使实验操作难度增加
纳米复合材料处理方法	纳米 FeS 除 Cr 法	81 前期纳米 FeS 的制备,需要采用超声波辅助技术;后期处理方法简单,且无二次污染风险
	聚吡咯-铁酸镍纳米复合材料吸附法	>95 吸附效率高,后期处理操作方便,无二次污染风险

徐梦雅<sup>[31]</sup>采用传统酸浸法,即使用硫酸对含 Cr 废水进行处理,在  $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=2 \text{ mol/L}$  时, Cr(VI) 的去除率仅为 61%,且该方法的后处理较困难,增加了实验成本。叶锦韶等<sup>[32]</sup>采用传统生物吸附法对含 Cr 废水进行吸附探究,即使用复合菌群进行实验,当体系的  $\text{pH}=1.0\sim 5.0$  时, Cr(VI) 的去除率为 60%,且由于生物复合菌群的生存条件较为苛刻,该实验不易操作。郭旭颖等<sup>[33]</sup>采用超声波辅助法制备的纳米 FeS 材料,对含 Cr 废水体系进行除污实验。结果显示, Cr(VI) 的去除率达 81%。孙万虹等<sup>[34]</sup>制备纳米级吸附材料(聚吡咯-铁酸镍纳米复合材料),并采用该材料对含 Cr 废水体系进行除污实验。结果显示, Cr(VI) 的去除效率在 95% 以上。

显示,由于 TE 膜的限域空间效应抑制了亚稳态氧化铁晶体向赤铁矿转化,限域小尺寸空间有利于亚稳态晶型稳定,使限域氧化铁在应用中保持高表面缺陷和反应活性,并在长时间内保持较高的吸附性能,从而大幅度提高了氧化铁对污水中 As(V) 的吸附能力。实验结果显示,限域氧化铁的吸附容量普遍大于体相氧化铁。

王继承<sup>[36]</sup>采用“悬浮共聚-表面胺基化修饰”方法合成聚苯乙烯微球,再使用三乙胺对该微球进行修饰。随后,采用“离子交换-原位沉积”工艺,将纳米氧化铁负载到聚苯乙烯球上,制得一种新型纳米复合材料,即 HFO@TPR。实验结果显示,该材料具有较好的吸附效果,可同时去除磷元素、硝酸根基团。同时,在碱性条件下,该材料可实现高效再生,且再生后对相关元素的吸附能力未明显下降。Li 等<sup>[37]</sup>通过硫化物对纳米零价铁进行改性,制备出一种新型的硫化物改性纳米零价铁,即 S-NZVI 材料,并将该材料用于含高浓度 Cu-EDTA 重金属络合物的污水处理。实验结果显示, S-NZVI 材料具有广泛的酸碱适应性,可在较宽的 pH 范围内使用;对 Cu 及其络合物具有较高的反应性及亲和性,对高盐废水中的 Cu-EDTA 具有优异的去除能力。 S-NZVI 材料去除 Cu-EDTA 络合物的过程见图 1<sup>[37]</sup>。

## 3 污水深度处理技术

传统的污水处理方法过于单一,不能高效地处理污水,且弊端较多,因此基于纳米复合材料的污水处理技术逐渐被广泛应用<sup>[35]</sup>。文中从纳米铁系除污技术、构建人工神经网络模型、聚合物基纳米晶复合材料研发以及绿色纳米技术应用 4 方面进行阐述。

### 3.1 纳米铁系除污技术

蒋朝<sup>[2]</sup>采用一种新方法吸附污水中的 As,即以径迹刻蚀膜(TE 膜)为限域载体,将纳米氧化铁负载到 TE 膜上,制备新型纳米复合材料。实验结果

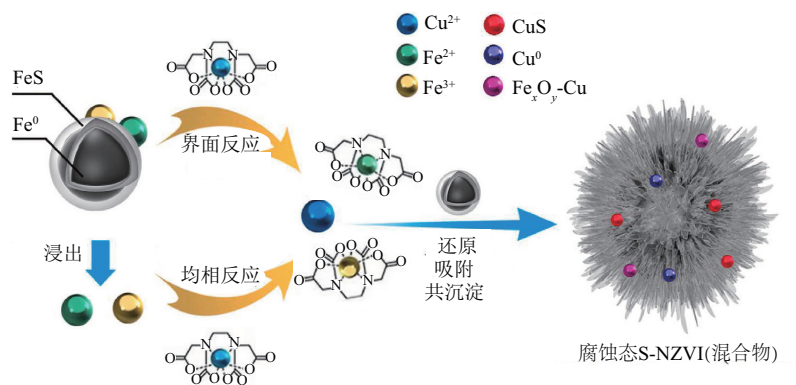


图 1 S-NZVI 去除 Cu-EDTA 的过程

Fig. 1 Process of Cu-EDTA removal by S-NZVI

### 3.2 人工神经网络模型

采用纳米复合材料对工业废水及污染水体进行吸附除污,已成为一种新的应用趋势,但是该方法在实际应用中受到一些因素的影响,如水体中的干扰离子、水体的酸碱度以及环境温度等。因此,需通过数学模型对吸附过程进行优化。大多数吸附过程的高效完成,需要建立在对吸附机理深入了解的基础上,而对机理认识不足的吸附过程,可采用数学模型,对吸附的过程与结果进行合理预测和模拟<sup>[19]</sup>。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)模型是一种经验型数学模型,通过现有数据模拟复杂的非线性关系,从而对陌生机理的吸附过程进行模拟与优化。该模型在水样的相关参数分析、多种反应过程模拟等方面已有较多成功案

例<sup>[38]</sup>。张延扬<sup>[19]</sup>通过三层前馈式神经网络构建 ANN 模型,并使用误差反向传播算法,对构建的 ANN 模型进行训练,最后结合遗传算法对铁系纳米复合材料在污水体系中的除磷过程,进行模拟预测及实验条件优化。实验结果显示,ANN 模型可实现准确的外推预测,展现出较强的预测能力与优化吸附条件的能力。Khan 等<sup>[39]</sup>采用 ANN 模型,优化 Synozol 红染料废水的电解处理过程参数,从而合理预测实验结果,达到对废水处理过程中的条件进行深度优化的目的。通过 ANN 模型对电流密度、体系初始 pH 值及电解液浓度等实验参数进行优化,并利用优化后的参数,对 Synozol 红染料废水进行降解(图 2)<sup>[39]</sup>。实验结果显示, Synozol 红染料废水的降解效果显著提升,说明使用数学统计建模方法,可以合理预测及优化实验参数。

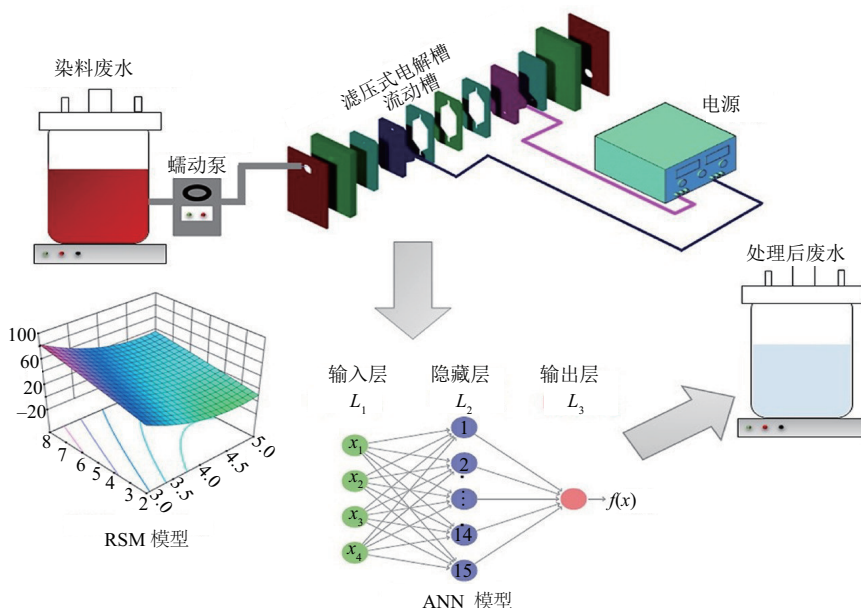


图 2 ANN 模型优化 Synozol 红染料废水电解处理过程

Fig. 2 Optimization of electrolytic treatment process for synozol red dye wastewater by ANN model

### 3.3 聚合物基纳米晶复合材料

层状双金属氢氧化物 (layered double hydroxides, LDHs) 是一类具有层状结构的无机功能材料<sup>[40]</sup>, 其空间结构呈层状, 主要由主体层板及层间阴离子构成。主体层板主要由 2 价或 3 价金属阳离子构成, 并形成上下夹层, 其中, 2 价金属阳离子主要为  $Mg^{2+}$ 、 $Ni^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  等, 3 价金属阳离子主要为  $Al^{3+}$ 、 $Cr^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Sc^{3+}$  等; 主体层板间插入的阴离子使结构的电荷平衡, 主要有无机离子、有机离子及络合离子<sup>[41-42]</sup>。LDHs 材料具有优异的可调控性, 可对其层间各类阴离子的交换, 材料中晶粒分布及粒径大小, 主体层板的组成元素种类及比例等进行调控。但若单独使用 LDHs 材料进行吸附, 由于 LDHs 的粒径过小, 可能造成其质量大量流失, 并在后期因不易分离而产生固体废弃物。因此, 需对 LDHs 进行杂化或功能化, 制备 LDHs 复合材料, 从而大大提升 LDHs 在吸附过程中的适用性及稳定性<sup>[20]</sup>。

蔡建国<sup>[20]</sup>首先采用共沉淀技术合成 Li-Al-LDHs 与 Mg-Al-LDHs, 然后采用稀土元素 La 对这两种 LDHs 进行改性, 制备出 La 掺杂的 LDHs (La-LDHs), 并探究 La-LDHs 的吸附性能。实验结果显示, 无论是否采用 La 改性, 都存在因吸附剂团聚成大颗粒而活性下降、堵塞设备等弊端。因此, 他们又以阴离子交换树脂 D201 为载体, 将 La 改性前后的 LDHs, 负载到载体的纳米孔道, 成功制备出新

型 LDHs 纳米复合材料。实验结果显示, 该纳米复合材料对污水中的  $F^-$  具有较强的吸附能力, 且其脱附再生效果优异, 不受水体中竞争离子的影响。值得一提的是, La 掺杂的 LDHs 纳米复合材料的吸附性能优于未掺杂的。

Qian 等<sup>[43]</sup>制备出 CoFe 层状双金属氢氧化物/泡沫镍复合材料 (CoFe-LDHs/NF), 并将该材料作为一种可回收的过氧单硫酸盐 (PMS) 催化剂, 回收废水体系中的单甲基胍 (MMH)。实验结果显示, CoFe-LDHs/NF 材料的酸碱度适用范围较宽, 且 CoFe-LDHs 与 NF 间的界面协同作用, 促进了电荷转移, 使 CoFe-LDHs/NF 对废水中的 MMH 具有优异的降解能力。CoFe-LDHs/NF-PMS 体系降解 MMH 的机制见图 3<sup>[43]</sup>。

### 3.4 绿色纳米材料

Paradva 等<sup>[44]</sup>的研究结果显示, 在使用有机或无机溶剂合成纳米材料的过程中, 经常会使用有毒试剂, 这给后续污水处理带来一定的困难, 且危害环境及人身健康。因此, 他们提出发展绿色技术, 即以从环境中直接获得的天然物质为原料, 如维生素<sup>[45]</sup>、植物提取物<sup>[46]</sup>、生物聚合物<sup>[47]</sup>及糖和肽<sup>[48]</sup>等, 通过简单加工工艺制备纳米材料。

Das 等<sup>[49]</sup>采用绿色合成工艺, 以长叶马府油树提取物为原料, 成功制备出 CuO 纳米颗粒 (图 4)<sup>[49]</sup>, 并分析该颗粒对亚甲基蓝的光催化降解效率。结果显示, 因原料为天然物质, CuO 纳米颗粒

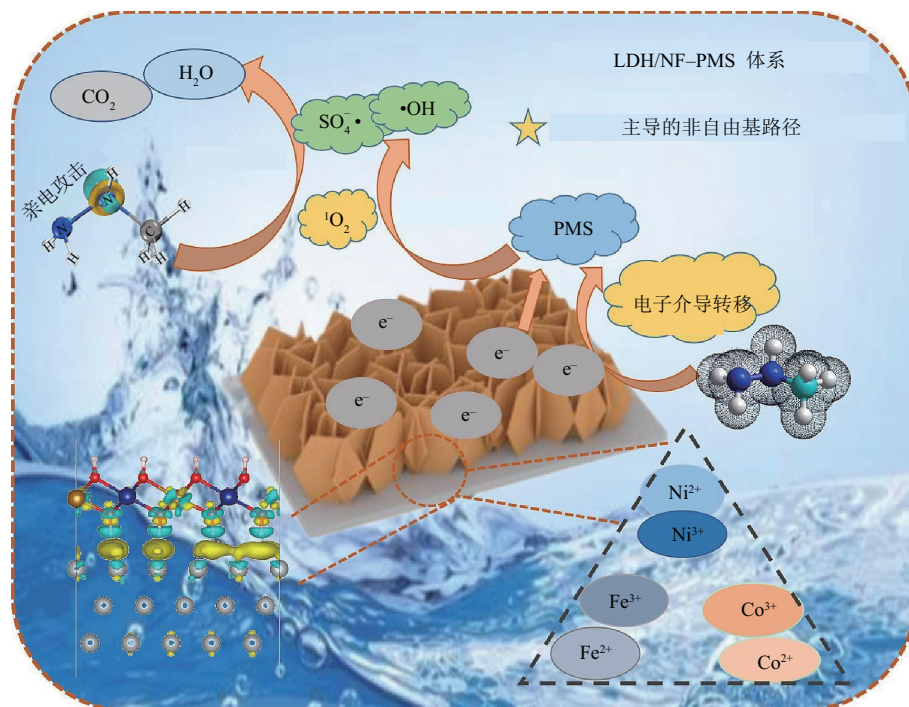


图 3 CoFe-LDHs/NF-PMS 体系降解 MMH 的机制

Fig. 3 Degradation mechanism of MMH by CoFe-LDHs/NF-PMS system

的分散性、光响应性优异,抑制了光生载流子复合,从而大幅度提高了 CuO 纳米颗粒对亚甲基蓝的降解效率。该合成工艺对环境的二次污染较小,拓宽了纳米材料合成技术的设计思路。目前,对于天然化学成分的提取,存在操作较为困难,成本较高,且原料来源受限等问题。因此,绿色合成工艺并未被大规模应用,还处在实验室阶段。

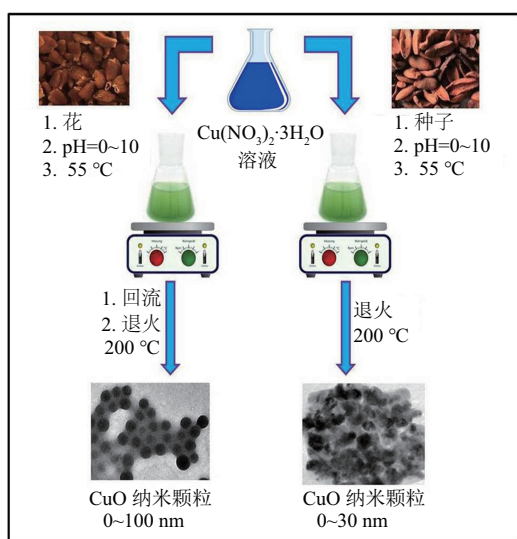


图 4 以花、种子提取物合成 CuO 纳米颗粒

Fig. 4 Synthesis of CuO nanoparticles using flower and seed extracts

## 4 结语与展望

现阶段,纳米复合材料作为高效吸附剂,在污水深度处理方面已取得显著成果:从空间结构角度对层状双金属氢氧化物进行杂化或功能化,可使纳米复合材料的吸附(脱附)效率大大提升;结合纳米铁系除污技术与纳米限域效应合成的复合吸附材料,可大幅度提高污水的处理效率;借助人神经网络模型等,可对未知或复杂污水处理过程进行模拟及实验参数优化。

研究者通过改进纳米复合材料的制备工艺,对纳米复合材料的性能进行优化,进而提高了纳米复合材料的吸附效果与吸附容量,从而高效且有针对性地对污水中的重金属离子、有机污染物等进行深度处理。同时,纳米复合材料的再生性能也得到提升。目前,基于纳米复合材料的污水深度处理技术,已被广泛用于电镀、皮革纺织品制造、石油开采炼制及玻璃制造等行业。

在实际应用中,纳米复合材料在对污水进行深度处理的过程中,还存在一些弊端。例如,纳米复合材料的制备成本较高,制备过程存在二次污染风险,这大大限制了纳米复合材料在污水处理中的大

规模应用。同时,对于纳米复合材料的长期稳定性和环境安全性,需要进一步的研究和评估。

综上所述,基于纳米复合材料的污水深度处理技术具有很大的发展潜力,在后续研究中,需对纳米复合材料的制备工艺与性能优化、绿色纳米技术进行深入研究,并对绿色纳米技术的工业化应用进行探究。同时,要提高纳米复合材料在实际应用中的长期稳定性与环境安全性,从而为污水的深度处理研究,提供新的思路和夯实的工艺技术基础。

## 参考文献:

- [1] 王田力,陈伊宁,李昂,等. 人工智能在废水处理领域研究的发展态势分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24 (5):1985-1996.
- [2] 蒋朝. 纳米氧化铁的限域生长及其吸附除砷性能初探[D]. 南京:南京大学, 2021.
- [3] 范真真,赵艺,李崇,等. 硫酸工业废水重金属砷污染管控现状与建议[J]. 无机盐工业, 2022, 54 (6): 6-12.
- [4] 张海龙,齐剑英,李祥平,等. 广东省含砷企业污染现状及其处理方法初探[C]//中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第15届学术年会论文摘要集. 长春:环境保护部华南环境科学研究所, 广州大学化学学院, 2015.
- [5] 徐喆. 基于UV强化氧化的铜-有机络合物高效处理新技术及其原理[D]. 南京:南京大学, 2016.
- [6] CHAN Yijing, CHONG M F, LAW C L, et al. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(1/2):1-18.
- [7] JEGATHEESAN V, PRAMANIK B K, CHEN Jingyu, et al. Treatment of textile wastewater with membrane bioreactor: A critical review [J]. Biore-source Technology, 2016, 204:202-212.
- [8] SOLAYMAN H M, HOSSEN M A, AZIZ A A, et al. Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11 (3) : 109610. DOI: 10.1016/j.jece. 2023. 109610.
- [9] WIJERATHNA W S M S, WIMALAWEERA T I P, SAMARAJEWA D R, et al. Imperative assessment on the current status of rubber wastewater treatment: Research development and future perspectives [J]. Chemosphere, 2023, 338: 139512. DOI: 10.1016/j.chemosphere. 2023. 139512.
- [10] LI Yanbo, WANG Xu, BUTLER D, et al. Energy use and carbon footprints differ dramatically for diverse wastewater-derived carbonaceous substrates: An integrated exploration of biokinetics and life-cycle assess-

- ment [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1) 243. DOI: 10.1038/s41598-017-00245-1.
- [11] WANG Xu, LI Meiya, LIU Junxin, et al. Occurrence, distribution, and potential influencing factors of sewage sludge components derived from nine full-scale wastewater treatment plants of Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2016, 45: 233-239.
- [12] SHEN Baohua, LI Daoguo, QIAN Feng, et al. Optimal design and simulation for the intelligent control of sewage treatment based on multi-objective particle swarm optimization [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13 (2): 735. DOI: 10.3390/app13020735.
- [13] ZHANG Chunhui, QUAN Bingxu, TANG Jiawei, et al. China's wastewater treatment: Status quo and sustainability perspectives [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103708. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103708.
- [14] XIE Yadong, ZHANG Qionghua, WU Qi, et al. Novel adaptive activated sludge process leverages flow fluctuations for simultaneous nitrification and denitrification in rural sewage treatment [J]. *Water Research*, 2024, 255: 121535. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121535.
- [15] ZHA Xiao, MA Jun, LU Xiwu. Performance of a coupling device combined energy-efficient rotating biological contactors with anoxic filter for low-strength rural wastewater treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 1106-1115.
- [16] LI Hongfang, LIU Feng, LUO Pei, et al. Performance of integrated ecological treatment system for decentralized rural wastewater and significance of plant harvest management [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 124: 69-76.
- [17] ZHANG Chunhui, JIANG Shan, TANG Jiawei, et al. Adsorptive performance of coal based magnetic activated carbon for perfluorinated compounds from treated landfill leachate effluents [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 117: 383-389.
- [18] JIA Yuqin, SHAN Chao, FU Wanyi, et al. Occurrences and fates of per- and polyfluoroalkyl substances in textile dyeing wastewater along full-scale treatment processes [J]. *Water Research*, 2023, 242: 120289. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120289.
- [19] 张延扬. 基于纳米复合材料的污水深度除磷与磷回收的应用基础研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [20] 蔡建国. 聚合物基纳米晶层状双金属氢氧化物复合材料的研制及其除氟性能与应用[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [21] 李安琪. 煤矿废水污染处理与综合利用方法探析 [J]. *清洗世界*, 2023, 39(11): 79-82.
- [22] 王芬, 张雪莲, 王和兰, 等. 纳米铁氧体复合材料在污水处理中的最新研究进展 [J]. *化学与生物工程*, 2021, 38(12): 1-7.
- [23] WANG Xuening, LI Hongchao, SHAN Chao, et al. Construction of model platforms to probe the confinement effect of nanocomposite-enabled water treatment [J]. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2022, 9: 100229. DOI: 10.1016/j.cej.2021.100229.
- [24] 程美娜, 陈燧钧, 刘锋, 等. 纳米限域材料的制备及其在污染治理中的应用研究进展 [J]. *材料科学与工艺*, 2024, 32(2): 73-88.
- [25] YANG Ji, CHEN Yitong, YANG Zhangke, et al. Unveiling the nanoconfinement effect on crystallization of semicrystalline polymers using coarse-grained molecular dynamics simulations [J]. *Polymers*, 2024, 16(8): 1151. DOI: 10.3390/polym16081155.
- [26] 包信和. 纳米限域体系的催化特性 [J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2009, 39(10): 1125-1133.
- [27] ZHANG Li, ZHENG Hongcen, GAN Yonghai, et al. An all-in-one approach for synthesis and functionalization of nano colloidal gold with acetylacetone [J]. *Nanotechnology*, 2021, 33 (7). DOI: 10.1088/1361-6528/ac38e7.
- [28] CHEN Ningyi, WU Shuang, PAN Bingjun, et al. Engineering nano-Au-based sensor arrays for identification of multiple Ni(II) complexes in water samples [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57 (26): 9874-9883.
- [29] 武金龙, 程巴雪. 高分子/无机杂化纳米粒子用于药物共传递系统的研究 [J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 339-341.
- [30] 刘飞, 陆浩翔, 文明, 等. 传统工艺和新兴工艺处理重金属废水方法的对比研究 [J]. *皮革制作与环保科技*, 2022, 3(10): 10-12.
- [31] 徐梦雅. 环境规制下制革工业含铬废水脱铬处理与回收利用研究 [J]. *中国皮革*, 2023, 52(11): 15-18.
- [32] 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 等. 高效生物吸附剂处理含铬废水 [J]. *中国环境科学*, 2005 (2): 245-248.
- [33] 郭旭颖, 姜国亮, 狄军贞, 等. 超声波辅助法制备纳米 FeS 处理酸性含铬废水工艺研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(6): 31-35.
- [34] 孙万虹, 朱利云, 姚绍铭, 等. 聚吡咯/铁酸镍纳米复合材料制备和应用研究 [J]. *高分子通报*, 2016 (2): 65-71.
- [35] 邹静, 王正良, 余跃惠. 生物纳米复合材料的合成及其在污水处理中的应用 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39 (4): 1534-1546.
- [36] 王继承. 聚苯乙烯基纳米铁复合吸附剂同步去除污水中磷和硝酸盐的研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [37] LI Rui, WANG Xiaozhi, SUN Xiuyun, et al. Sulfide-modified nanozerovalent iron for rapid decontamination of Cu(II) complexes in high-salinity wastewater [J].

- Environmental Pollution, 2023, 338: 122710. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122710.
- [38] 许家龄. 人工神经网络在污水处理过程模拟中的应用与研究进展[J]. 现代商贸工业, 2020, 41(8): 202-204.
- [39] KHAN S U, KHAN H, ANWAR S, et al. Computational and statistical modeling for parameters optimization of electrochemical decontamination of synozol red dye wastewater [J]. Chemosphere, 2020, 253: 126673. DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.126673.
- [40] 蒋柱武, 吴梦帆, 李登胜, 等. 层状双金属氢氧化物吸附剂的功能化改性策略[J]. 精细化工, 2023, 40(6): 1239-1252.
- [41] XU Zhipeng, WU Yuchen, ZHANG Zhangmin, et al. Insight into ion exchange behavior of LDHs: Asynchronous chloride adsorption and intercalated ions release processes [J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 147: 105433. DOI: 10.1016/j.cemcomp.2024.105433.
- [42] BAI Jing, ZHANG Xiangling, WANG Chen, et al. The adsorption-photocatalytic synergism of LDHs-based nanocomposites on the removal of pollutants in aqueous environment: A critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 436: 140705. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140705.
- [43] QIAN Jin, MA Rui, CHEN Zhijie, et al. Hierarchical Co-Fe layered double hydroxides (LDH)/Ni foam composite as a recyclable peroxydisulfate activator towards monomethylhydrazine degradation: Enhanced electron transfer and  $^1\text{O}_2$  dominated non-radical pathway [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 469: 143554. DOI:10.1016/j.cej.2023.143554.
- [44] PARADVA K C, JANGIR R, KALLA S. Green nanomaterials: Synthesis and applications in wastewater treatment [J]. Inorganic Chemistry Communications, 2023, 158: 111584. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111584.
- [45] NADAGOUDA M N, VARMA R S. A greener synthesis of core (Fe, Cu)-shell (Au, Pt, Pd, and Ag) nanocrystals using aqueous vitamin C [J]. Crystal Growth Design, 2007, 7(12):2582-2587.
- [46] KUMAR V, YADAV S K. Plant-mediated synthesis of silver and gold nanoparticles and their applications [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2009, 84(2):151-157.
- [47] HE Feng, ZHAO Dongye. Manipulating the size and dispersibility of zerovalent iron nanoparticles by use of carboxymethyl cellulose stabilizers [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(17):6216-6221.
- [48] VIRKUTYTE J, VARMA R S. Green synthesis of metal nanoparticles: Biodegradable polymers and enzymes in stabilization and surface functionalization [J]. Chemical Science, 2011, 2(5):837-846.
- [49] DAS P, GHOSH S, GHOSH R, et al. Madhuca longifolia plant mediated green synthesis of cupric oxide nanoparticles: A promising environmentally sustainable material for waste water treatment and efficient antibacterial agent [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2018, 189:66-73.

## Progress in High-Efficiency Adsorbents Based on Nanocomposites for Advanced Treatment of Wastewater

SHI Buyin, WANG Zhuoyu

(State Key Laboratory of High-efficiency Utilization of Coal and Green Chemical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In recent years, with the ongoing industrialization, industrial and agricultural wastewater have significantly impacted human life and the ecological environment, therefore, there is an urgent need for the advanced treatment of polluted water. Nanocomposites, as adsorbents for wastewater treatment, offer several advantages, including large adsorption capacity, ease of operation, excellent regeneration capacities. As nanocomposite materials, they retain the advantages of nanomaterials, such as high surface area and activity, while avoiding the drawbacks associated with small particle sizes, such as agglomeration and deactivation; therefore, they can be effectively used in the advanced treatment of wastewater. This paper discusses the current status of wastewater treatment, provides a detailed description of nanocomposites, and explores new technologies for advanced wastewater treatment.

**Key words:** nanocomposites; wastewater pollution; deep decontamination technology

(责任编辑 高继红)