

新型纳米吸附材料在电镀废水中重金属高效去除与回收的应用研究

赵志峰

运城市生态环境局稷山分局 山西 运城 043200

摘要: 随着电镀工业的快速发展,电镀废水的排放成为环境污染的重要来源。废水中含有的重金属离子对生态环境和人体健康具有严重危害。传统处理方法在去除和回收重金属方面存在诸多不足,而新型纳米吸附材料因其独特的物理化学性质展现出巨大优势。本文详细探讨了新型纳米吸附材料在电镀废水中重金属高效去除与回收的应用,介绍了相关纳米材料的特性、吸附机理、应用实例以及未来发展方向,为解决电镀废水重金属污染问题提供新的思路与方法。

关键词: 新型纳米吸附材料; 电镀废水; 重金属去除; 重金属回收

1 引言

电镀行业作为现代工业的重要组成部分,广泛应用于机械制造、电子、汽车等多个领域。然而,电镀过程会产生大量含有重金属离子的废水,如铬(Cr)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)等。这些重金属离子在环境中难以降解,会通过食物链不断积累,对生态系统和人体健康造成严重威胁。例如,长期暴露于含镉废水中会导致人体肾脏和骨骼损伤,引发痛痛病;六价铬具有强致癌性。

传统的电镀废水处理方法,如化学沉淀法、离子交换法、膜分离法等,虽在一定程度上能够去除重金属离子,但存在成本高、效率低、产生大量污泥、易造成二次污染以及难以实现重金属回收等问题。因此,开发高效、经济且环保的电镀废水处理技术迫在眉睫。新型纳米吸附材料的出现为这一难题提供了新的解决方案。纳米材料由于其尺寸处于纳米量级(1-100nm),具有比表面积大、表面活性高、吸附位点多等独特性质,在重金属废水处理领域展现出良好的应用前景。

2 新型纳米吸附材料

2.1 纳米活性炭纤维

纳米活性炭纤维(ACF)作为一种具备卓越性能的新型功能吸附材料,在材料科学领域备受瞩目。其微观结构精妙,主要由大量微细孔隙构成,这些微孔半径普遍处于2nm以下,呈现出极为狭窄的孔径分布,在某些特殊制备条件下,甚至能够达成单分散分布状态。ACF的纤维丝束在其结构体系中扮演着大孔的角色,这一独特构造使其在吸附气相和液相物质方面展现出非凡的能力。其比表面积约为1,200m²/g,相较于普通活性炭有着

显著优势,在经历苛刻条件下的活化处理后,其比表面积更是能够飙升至3,000m²/g^[1]。

深入探究ACF的表面化学性质,会发现其表面富含多种含氧基团,像羧基(-COOH)、酚基(-OH)、酮基(C=O)等,此外还存在含硫基、氮元素以及卤素等不同类型的官能团。这些丰富多样的官能团赋予了ACF独特的表面化学性能,与吸附过程中的平衡机制紧密相连。以羧基为例,在与电镀废水接触时,羧基能够凭借自身的酸性特质,与废水中带正电荷的重金属离子发生离子交换反应。在这一过程中,羧基中的氢离子(H⁺)会脱离羧基,与溶液中的重金属离子进行交换,从而使重金属离子被固定在ACF的表面,成功实现对电镀废水中重金属的吸附,展现出ACF在废水处理领域的巨大潜力。

2.2 纳米二氧化钛

纳米二氧化钛(TiO₂)具有化学性质稳定、催化活性高、耐光腐蚀等优点。在废水处理中,其较大的比表面积能够提供更多的吸附位点。同时,纳米TiO₂在光照条件下会产生光生电子-空穴对,这些电子和空穴可以与水中的溶解氧及水分子反应,生成具有强氧化性的羟基自由基(·OH)等活性物种。这些活性物种不仅能够氧化分解废水中的有机污染物,还能将部分重金属离子氧化或还原为更易去除的价态。例如,将六价铬(Cr(VI))还原为毒性较低的三价铬(Cr(III)),从而提高重金属的去除效率。

2.3 纳米磁性吸附材料

纳米磁性吸附材料是一类具有磁性的纳米复合材料,如Fe₃O₄纳米颗粒负载其他功能性物质。这类材料的突出特点是在外加磁场作用下能够快速分离,便于从处

理后的废水中回收吸附剂^[2]。其表面修饰的各种官能团可以与重金属离子发生螯合、离子交换等反应,实现对重金属的高效吸附。例如,在Fe₃O₄纳米颗粒表面修饰氨基(-NH₂),氨基可以与铜离子(Cu²⁺)形成稳定的络合物,从而实现对Cu²⁺的吸附。而且,吸附饱和后的材料通过外加磁场即可从废水中分离出来,经过简单的解吸处理后还能重复使用。

3 新型纳米吸附材料对电镀废水中重金属的吸附机理

3.1 离子交换

许多新型纳米吸附材料表面带有可交换的离子,如纳米活性炭纤维表面的含氧官能团在一定条件下可以解离出氢离子(H⁺)等。当电镀废水与纳米吸附材料接触时,废水中的重金属离子会与吸附材料表面的可交换离子发生交换反应。以纳米活性炭纤维吸附铜离子为例,其表面的羧基(-COOH)中的H⁺可以与Cu²⁺发生交换: $2\text{-COOH} + \text{Cu}^{2+} \rightleftharpoons (\text{-COO})_2\text{Cu} + 2\text{H}^+$,从而将铜离子吸附到材料表面。

3.2 络合作用

纳米吸附材料表面存在着多种具有独特化学活性的官能团,这些官能团带有孤对电子,能够与重金属离子发生特定的化学反应,其中络合反应便是一种重要的作用机制。以纳米磁性吸附材料为例,其表面经修饰后引入的氨基(-NH₂)展现出卓越的络合能力。在氨基结构中,氮原子由于其外层电子排布,拥有一对未参与成键的孤对电子,这对孤对电子成为与重金属离子发生作用的关键位点。常见的重金属离子如Cu²⁺、Ni²⁺等,具有空的电子轨道,能够接受来自氨基氮原子孤对电子的配位,进而形成稳定的络合物。以氨基与Cu²⁺的络合过程来说,一个Cu²⁺离子能够与四个-NH₂基团发生络合反应,其反应方程式为: $\text{Cu}^{2+} + 4\text{-NH}_2 \rightleftharpoons [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ 。在这个动态平衡反应中,当反应正向进行时,Cu²⁺离子通过配位键与氨基紧密结合,从电镀废水中游离态转变为被固定在纳米磁性吸附材料表面的络合态,实现了重金属离子在吸附材料表面的有效富集与固定,为后续从废水中分离去除重金属离子奠定了基础。

3.3 静电吸附

电镀废水中常见的重金属离子,如镉离子(Cd²⁺)、锌离子(Zn²⁺)、铜离子(Cu²⁺)等,由于其原子结构特性,在溶液中通常呈现正电荷状态。部分纳米吸附材料,在特定条件下会展现出独特的表面电荷性质。以纳米二氧化钛为例,当处于一定的pH值环境时,其表面会发生羟基化反应。这一过程中,纳米二氧化钛表面的钛原子会与水分子中的羟基(-OH)结合,使得表面形成大

量带负电的官能团,从而使整个纳米二氧化钛颗粒表面带有负电荷。

依据静电吸引的基本原理,带正电的重金属离子与带负电的纳米吸附材料表面之间会产生强烈的静电吸附作用。就像带有不同磁极的磁铁相互吸引一样,这种静电引力促使重金属离子向纳米吸附材料表面靠近并吸附。研究表明,在重金属离子初始浓度较低的情况下,溶液中重金属离子数量相对较少,此时纳米吸附材料表面的负电荷位点未被大量占据,能够更有效地与重金属离子发生静电吸附,因此这种静电吸附作用表现得尤为明显。例如,当废水中Cd²⁺初始浓度处于较低水平时,纳米二氧化钛对其吸附量随时间增长迅速上升,去除效率可在短时间内达到较高数值;对于Zn²⁺同样如此,在初始浓度较低区间,纳米二氧化钛展现出良好的吸附性能,能显著降低废水中Zn²⁺的含量。

3.4 氧化还原

如前文所述,纳米二氧化钛等具备光催化活性的纳米材料,在光照环境下会发生一系列复杂且独特的物理化学反应,进而引发氧化还原反应。在众多重金属离子中,像Cr(VI)这类具有可变价态的离子,成为了研究关注的重点对象。当纳米TiO₂受到光照激发时,会产生光生电子与空穴对。其中,光生电子展现出强大的还原能力,能够有效地将Cr(VI)还原为Cr(III)。在酸性条件占据主导的电镀废水中,Cr(VI)主要以Cr₂O₇²⁻的形态稳定存在。在纳米TiO₂光催化体系里,其还原反应遵循特定的化学反应式: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$ 。相较于Cr(VI),还原后生成的Cr(III)化学性质发生显著变化,其在溶液中的稳定性降低,这使得通过沉淀法将其从废水中去除变得更加容易操作。同时,Cr(III)由于其独特的离子特性,也更易于被各类吸附材料所捕获,为后续进一步从废水中分离回收重金属提供了更为有利的条件。

4 新型纳米吸附材料在电镀废水处理中的应用

4.1 纳米活性炭纤维处理含铜电镀废水

某电镀厂采用纳米活性炭纤维处理含铜电镀废水。废水初始铜离子浓度为150mg/L,pH值为5.5。将纳米活性炭纤维填充到吸附柱中,以一定流速让废水通过吸附柱。实验结果表明,当废水流速为5mL/min时,经过吸附柱处理后的废水中铜离子浓度降至0.5mg/L以下,去除率高达99.7%以上。通过对吸附饱和后的纳米活性炭纤维进行解吸再生,采用0.5mol/L的盐酸溶液作为解吸剂,解吸率可达95%以上,且再生后的纳米活性炭纤维重复使用5次后,对铜离子的吸附性能仍能保持在初始性能的

85%以上^[3]。

4.2 纳米二氧化钛光催化协同吸附处理含铬电镀废水

在实验室模拟含铬电镀废水处理实验中,向初始浓度为80mg/L、pH值为3.0的含Cr(VI)废水中加入纳米二氧化钛粉末,并在紫外光照射下进行反应。研究发现,在光照60min后,废水中Cr(VI)浓度降至2mg/L以下,去除率达到97.5%。这是由于纳米二氧化钛在光催化作用下将Cr(VI)还原为Cr(III),同时纳米二氧化钛对Cr(III)具有一定的吸附作用。进一步研究表明,当纳米二氧化钛投加量为1.5g/L时,处理效果最佳。与单纯的吸附方法相比,光催化协同吸附显著提高了含铬电镀废水的处理效率^[4]。

4.3 纳米磁性吸附材料处理含镍电镀废水

针对某电子厂产生的含镍电镀废水(初始镍离子浓度为120mg/L, pH值为6.0),采用表面修饰氨基的纳米磁性吸附材料进行处理。在室温下,将一定量的纳米磁性吸附材料加入到废水中,搅拌反应30min后,通过外加磁场将吸附材料与废水分离。检测结果显示,处理后的废水中镍离子浓度低于1mg/L,去除率达到99.2%。吸附饱和后的材料经过用0.1mol/L的硫酸溶液解吸后,重复使用4次,对镍离子的吸附去除率仍能维持在95%左右。该方法操作简便,且能够实现吸附剂的快速分离与回收利用。

5 新型纳米吸附材料应用面临的挑战与对策

5.1 材料成本问题

部分新型纳米吸附材料的制备过程较为复杂,需要使用昂贵的原料和先进的设备,导致材料成本较高,限制了其大规模应用。例如,一些纳米复合材料的制备需要采用纳米级的原材料,并且在合成过程中需要精确控制反应条件,如温度、压力、反应时间等,这增加了制备成本。需要研发更简便、高效且低成本的纳米材料制备工艺,寻找可替代的廉价原材料。例如,利用生物质废弃物制备纳米活性炭纤维,通过对废弃木材、秸秆等进行碳化、活化处理,不仅降低了原料成本,还实现了废弃物的资源化利用。同时,优化生产流程,提高生产效率,降低单位产品的生产成本。

5.2 吸附选择性问题

在实际电镀废水中,往往含有多种重金属离子以及其他杂质,纳米吸附材料在吸附目标重金属离子时,可能会受到其他离子的干扰,导致吸附选择性不高。例如,在处理同时含有铜离子和锌离子的电镀废水时,纳米吸附材料可能对两种离子都有吸附作用,难以实现对单一离子的高效选择性吸附。要通过对纳米吸附材料进行表面修饰,引入对特定重金属离子具有高亲和力的官能团。例如,在纳米磁性吸附材料表面修饰对铜离子具

有特异性络合能力的硫醇基(-SH),使其能够优先与铜离子发生络合反应,提高对铜离子的吸附选择性。此外,还可以结合离子交换树脂等其他技术,通过调整工艺参数,实现对不同重金属离子的分步选择性吸附^[5]。

5.3 材料稳定性问题

一些纳米吸附材料在实际应用过程中,可能会受到废水的pH值、温度、离子强度等因素的影响,导致材料结构破坏或活性降低,影响其吸附性能和使用寿命^[6]。例如,在强酸性或强碱性的电镀废水中,部分纳米材料表面的官能团可能会发生分解或变性,从而降低对重金属离子的吸附能力。需要对纳米吸附材料进行改性处理,提高其稳定性。例如,采用无机包覆的方法,在纳米颗粒表面包覆一层二氧化硅等惰性材料,增强材料的抗酸碱腐蚀能力。同时,在实际应用中,根据废水的性质,合理调整处理工艺条件,如控制废水的pH值在适宜范围内,避免对纳米吸附材料造成损害。

结束语

新型纳米吸附材料凭借其独特的物理化学性质,在电镀废水中重金属的高效去除与回收方面展现出巨大的潜力。通过离子交换、络合作用、静电吸附和氧化还原等多种吸附机理,不同类型的纳米吸附材料如纳米活性炭纤维、纳米二氧化钛、纳米磁性吸附材料等能够有效地去除电镀废水中的铬、镍、铜、锌等重金属离子,并在一定程度上实现重金属的回收利用。然而,目前新型纳米吸附材料在应用过程中仍面临着材料成本高、吸附选择性和稳定性有待提高等挑战。通过研发低成本制备工艺、优化表面修饰技术以及增强材料稳定性等对策,有望进一步推动新型纳米吸附材料在电镀废水处理领域的广泛应用,为解决电镀行业重金属污染问题提供更加有效的技术手段,实现电镀行业的绿色可持续发展。

参考文献

- [1]陈丹.重金属废水制备新型Ferrite/LDH纳米复合材料及其催化吸附机理研究[J].上海大学学报,2024.
- [2]杨金月,侯宝红,王景康.纳米材料去除废水中重金属的研究进展[J].纳米材料,2019,9(3):424.
- [3]王传义.新型聚乙烯亚胺功能化壳聚糖-木质素复合海绵用于快速高效去除水溶液中的Hg(II)离子[J].环境科学: 纳米,2020,7:793-802.
- [4]刘斌,李孟斌,王红华.水中染料在活性炭上的动态吸附行为研究[J].工业水处理,2018,(5).
- [5]于成文.城市污水处理厂污水处理方法探讨[J].中国化工贸易,2018,(2).DOI:10.3969/j.issn.1674-5167.2018.02.153.
- [6]王荷芳,高美丹,王莉,等.烟柴杆废渣对Pb²⁺的吸附性能研究[J].工业水处理,2017,(1).