

引用格式:韩岳松,刘晨阳. 电化学技术处理重金属废水最新研究进展[J]. 有色设备,2025,39(2):34-41.

HAN Yuesong, LIU Chenyang. Latest research progress of electrochemical treatment of heavy metal wastewater[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(2): 34-41.

电化学技术处理重金属废水最新研究进展

韩岳松, 刘晨阳

(东华理工大学, 江西 南昌 330000)

[摘要] 在工农业生产、矿物开采及城市化进程中会产生大量含多种不可自然降解的重金属离子的废水。此类持久有毒环境污染物若不经任何处理而直接排放,会对包括人类在内的生物多样性造成严重威胁。重金属废水可通过多种净化分离技术进行处理,其中电化学技术作为新兴的处理手段,在重金属废水处理方面具有显著的优越性和发展潜力。基于净化废水中重金属离子的重要性和紧迫性,本文介绍了基于不同作用机理的电化学处理方法的最新进展,并深入分析了不同电化学处理方法所采用的不同电极材料处理重金属离子的研究现状,以期为重金属离子废水的处理的进一步发展提供理论参考。

[关键词] 重金属; 电化学; 电容去离子; 电沉积; 电化学耦合技术

[中图分类号] X758; TF81 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)02-0034-08

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.004

随着我国工业化和城市化的迅猛发展,会排放大量的重金属废水^[1]。若得不到妥善处理,严重危害生态环境及人类健康。重金属可通过工业废水、废气排放及固体废物等途径进入生态环境,并在土壤、水体和大气中积累^[2],其可通过食物链累积并最终进入人体,对器官造成不可逆损伤^[3]。因此,水体的高效净化和再生利用成为重要的研究课题^[4-5]。

目前,已经采用了多种技术手段净化重金属废水,如化学法、膜技术、离子交换与吸附及光电催化等方法。但现有的方法仍存在处理能力不足及易产生二次污染等问题。因此,开发一种性能更优的技术以处理重金属废水成为亟需解决的问题。电化学技术因其高效的处理能力、能够破坏金属的配位结构、便于重金属的回收和再利用、占用空间小以及产生的污泥量低等优势而受到学者的广泛关注与重视^[6],是一种极具潜力的重金属废水处理技术^[7-8]。电极材料是电化学技术的核心,电极材料的选取直

接影响重金属离子处理过程中的去除效率。作者所在课题组在利用电化学技术的提取铈的探索中,通过开发 PAA/GO 气凝胶^[9]新型电极材料进行高效提取铈,利用该材料独特的 3D 框架及其特定的 C=O=C=O 区域链,能够以低电压、高效率 and 可持续的特性对含铈溶液进行去除,对铈的去除率可达 92%。此外,开发的另一种新型二硫化钼/氧化石墨烯异质结^[10]作为电极材料,在实际含铈废水中能够达到 90.74% 的去除率。本文深入探讨不同电化学技术的处理机制、工作条件和所需材料,同时总结各种技术的优势及局限性,为重金属离子污染物的处理提供理论参考。

1 电容去离子技术

1.1 机理

电容去离子技术(Capacitive Deionization, CDI)能够有效地将导电溶液的重金属离子污染物快速去除。当对电极材料施加外部电压时,通过电场力使

[收稿日期] 2024-12-22

[基金项目] 国家自然科学基金(20171ACB20021,41662024);江西省自然科学基金(20242BAB26038);江西省重点研发计划重点项目(20212BBG71011);东华理工大学研究生创新基金资助(YC2024-B208)。

[第一作者] 韩岳松(2000—),男,河北定州人,硕士研究生,主要研究方向为辐射防护与环境保护。

[通信作者] 刘晨阳(2000—),男,河北定州人,硕士,主要研究方向为材料的研究与开发。

溶液中的重金属离子向逆电荷的电极移动,将废水中的重金属离子富集在电极表面,从而使重金属离子被吸附固定在电极上。在吸附达到饱和状态后,

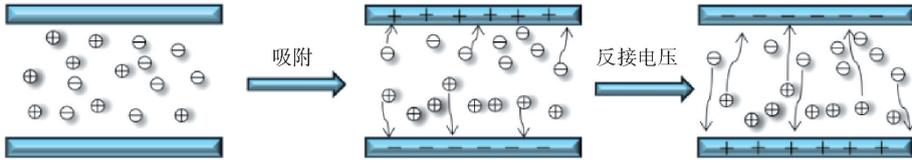


图1 电容去离子技术工作原理

Fig.1 Working principle of capacitive deionization technology

CDI 的理论基础基于双电层原理^[11]。Helmholtz^[12]最早提出双电层理论,即当电极与电解质溶液通电接触时产生的电势差,当荷电粒子(如电子或离子)在2种不同介质间转移时,会在界面两侧产生过量电荷。这些过量电荷在界面附近的薄层中分布,形成了双电层。在此之后,提出了考虑离子扩散的双电层模型,即扩散双电层模型^[13],并进一步发展为 Gouy - Chapman - Stern (GCS) 模型。该模型考虑了因热运动引起的离子空间分布及电荷分布的非均匀性的改变,这些离子在溶液中会呈现扩散分布,且在静电吸引力和热运动的平衡下,靠近带电表面离子的浓度会高于溶液内部,形成扩散层。在扩散层内,离子浓度随着离带电表面的距离增加而逐渐减少。为进一步探究和发展 GCS 模型,其可发展为 Grahame 模型, Grahame 模型划分为 Helmholtz 内层 (IHP) 和外层 (OHP)^[14] (图 2),该模型可较好描述孔隙内外的离子存储和电荷平衡及分布等因素对溶液中离子吸附作用的影响^[15]。

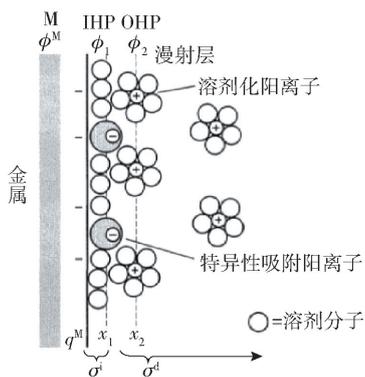


图2 Grahame 模型示意

Fig.2 Grahame model schematic

1.2 电极材料

CDI 技术主要采用 2 种类型的电极材料:①依

通过改变电极的电压极性,使原本吸附于电极材料上的离子释放回溶液中,从而实现电极材料的再生过程(图 1)。

赖于双电层电容原理的碳基材料;②基于法拉第反应的电极材料^[16]。

1.2.1 碳基材料

碳电极材料的种类多种多样,主要包括活性炭、介孔碳和石墨烯等。其中,活性炭 (AC) 因其较高的比表面积、多孔结构以及成本效益而备受青睐,其已成为目前 CDI 技术中最普遍使用的商业电极材料之一。以废水中的铅为例, Pb^{2+} 能够与碳材料表面的含氧官能团发生配合,如羟基和羧基,这种配合作用能够有效提升 Pb^{2+} 的去除效率^[17]。为了提高碳基材料的比表面积、降低传质阻力,牟祺等^[18]通过改变碳结构制备了一种二维层状阳离子插层电极 Ti_3C_2 , 将其作为阴极,以改善废水中 Pb^{2+} 的吸附量,结果显示, Ti_3C_2 表面携带的羟基基团与 Pb^{2+} 发生作用,使得 Pb^{2+} 的去除率达 98.48%, 平衡时吸附量达 96.36 mg/g, 且 Ti_3C_2 在 Pb^{2+} 与 Ca^{2+} 共存溶液中对 Pb^{2+} 有较好的选择性。S 是用于碳掺杂的一个重要元素。魏永^[19]制备了掺硫石墨烯气凝胶 (SGAs), 作为电极材料来处理重金属废水。相比原始石墨烯气凝胶材料,因 SGAs 的比表面积较大, Pb^{2+} 的去除率提高了 10%。同时,在选择性去除离子试验探究中,由于过渡金属硫化物本身含有丰富的硫元素,其形成的 Pb—S 键能相对较低,远不及 Na—S 和 Ca—S 键能,这使得过渡金属硫化物对 Pb^{2+} 显示出较强的吸附亲和力。因此,将过渡金属硫化物与碳材料掺杂,可以制备出具有高效选择性去除 Pb^{2+} 的复合材料。成卓轩^[20]合成了富氧空位的海胆状 Co_3O_4 电极材料,因特有的海胆状结构,提供更大的反应接触面积,缩短离子传输距离,此外通过构造氧空位的方法,增加了离子吸附的活性位点数量,并且由于内部局部电场的形成,为离子的迁移提供了额外的推动力,从而显著增强了材料的导电性和吸附能力。该

材料对铅离子(Pb^{2+})的吸附量可达 183.4 mg/g。

1.2.2 法拉第(赝电容)材料

与碳基材料通过电吸附机制来捕获和释放离子不同,法拉第(赝电容)材料主要依赖于电荷转移过程来实现离子的存储和释放。法拉第材料的种类包括无机导电材料、普鲁士蓝类似物及氧化还原活性复合材料等。这些材料可通过氧化还原反应实现离子的吸附和脱附,表现出更高的离子存储容量^[21]。Gao 等^[22]利用三聚氰胺泡沫框架通过水热、碳化和硫化 3 个步骤制备了包覆氮掺杂碳纳米管的 Fe_7S_8 纳米颗粒($Fe_7S_8@NCNT$),实现了在高浓度的 Na^+ 和 Ca^{2+} 情况下选择性分离 Pb^{2+} 。研究表明, Pb^{2+} 可以在赝电容电极表面的 S 原子耦合形成 Pb—S 键,从而表现出对 Pb^{2+} 的高亲和度。在 1.2 V 电压初始条件下, Pb^{2+} 电吸附量达到 237.8 mg/g。Jung 等^[23]在活性炭上涂覆两性离子聚合物,显著提高了 CDI 电极的电化学稳定性和去离子效率。法拉第材料因其较高的容量和充电效率而受到关注,但由于制备成本较高,尚未大规模投入使用。

2 电化学氧化法

2.1 机理

电化学氧化(Electrochemical Oxidation, ECO)通过电极反应来实现重金属离子的氧化,从而将其转化为不溶性或低毒性的物相,以便从溶液中去除(图 3)。电化学氧化通常发生在阳极区域,在此过程中,重金属离子通过电极表面或由电场产生的具有强氧化性自由基的作用下而被氧化,形成不溶于水的金属氧化物沉淀或其他无毒形式,从而实现高效去除。根据作用机理,电化学氧化一般分为直接氧化和间接氧化技术^[24]。直接氧化涉及重金属离子向电极表面迁移,并在该表面发生氧化反应。间接氧化是通过通电使阳极间接的氧化剂来处理分散在废水中的重金属离子。电化学氧化技术因其高效和环境友好的特性,在重金属废水处理中得到了广泛的应用。

2.2 电极材料

皇甫志杰等^[25]对含有高浓度铜、铅、镍等重金属离子的废水进行处理,采用新型钛基金属复合电极对预处理过后的废水实施电化学氧化,通过调整钛基复合电极的电流密度和电解时间等关键参数,实现了对废水中铜、铅、镍离子的高效去除。袁春燕

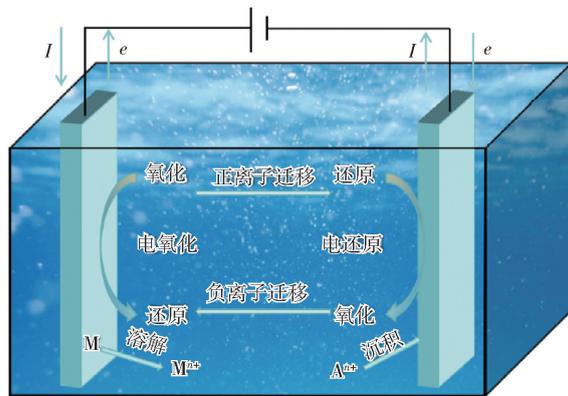


图 3 电化学氧化法模型图

Fig. 3 Electrochemical oxidation model diagram

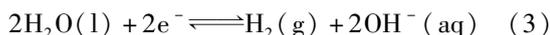
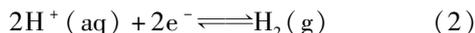
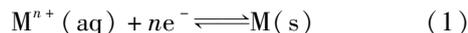
等^[26]将电化学技术与纳米晶磁技术相结合用于重金属废水处理,相比普通斜板沉淀池,其固液分离区域(沉淀区域)表现出较好的性能,其表面水力负荷率达到了 $15 m^3/m^2 \cdot h$ 。该技术在增大沉降速率、减小地面占用率、工程和运行成本上有优势,具有广阔的应用前景。

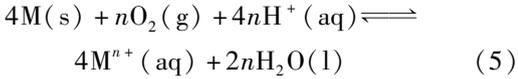
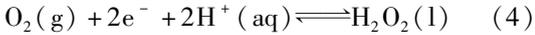
3 电沉积法

3.1 机理

电沉积法是通过在电极表面析出金属的技术(图 4)。其基本原理是利用电流通过电解质溶液时,溶液中的金属阳离子迁移到与电源负极相连的阴极,使其阴极处被还原成单质形态。电沉积反应在电极界面上进行,这一过程受到电荷转移和物质传递 2 个方面的影响。电极反应中的电荷转移可以通过化学反应、结构重排以及吸附作用这几种方式实现^[27]。在重金属废水处理中,重金属离子向电极的传输主要依赖于扩散、迁移和对流 3 种机制。其中,扩散过程主要是由电极周围与电解液之间存在的浓度梯度所驱动,而迁移过程则是在化学势差的影响下发生^[28]。电沉积过程中,当氧气浓度增加时,可能会导致沉积在阴极表面的重金属单质发生腐蚀,进而导致这些重金属重新溶解。这一过程会降低重金属处理的效率。主要反应及副反应见式(1)~(7)。

阴极:





阳极：

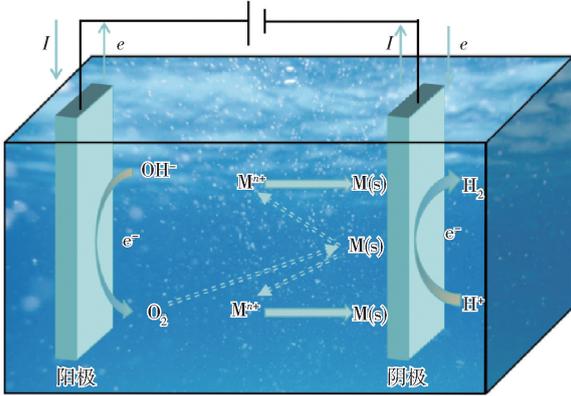
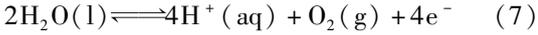
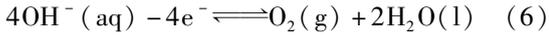


图4 电沉积法模型图

Fig. 4 Electrodeposition model diagram

电沉积法因其高效性、环保性受到了研究者的广泛关注。在电沉积法处理重金属废水的过程中,影响效果的关键因素包括反应器的设计类型和所用电极材料等。

3.2 反应器

反应器是电沉积技术的核心,一般使用较为广泛的为三维反应器,与二维反应器相比,三维反应器拥有更大的表面积和更快的传质效率,可降低能耗的同时提高去除率^[29]。Chellammal 等^[29]通过对比不同电极处理含 Cu^{2+} 废水的能耗,发现使用 3D 电极的铜回收率高达 99.5%,能量消耗水平仅为 4.064 kW·h/kg,这一能耗水平仅是 2D 电极能耗的 21.4%。Su 等^[30]采用低成本的不锈钢阴极(大表面积三维圆柱体阴极),该电极能够在低能耗的情况下以 81.3% 的电流效率从硫酸溶液中同时回收 93.2% 的铜和 97.6% 的硒,同时沉积的纳米粉末更容易收集,证明圆柱状湍流电池体系具有良好的质量传输能力。更高效的反应器设计能够大幅度增强电沉积过程中的物质传输效率,从而有效提升金属回收率,并减少能源消耗。

3.3 阴极电极材料

电沉积技术阴极电极通常是由碳纸、泡沫镍、金属氧化物或不锈钢板等制成。阴极材料的性能提升

能够明显改变电沉积工艺。Hannula 等^[31]应用碳纳米管(CNT)薄膜作为工作电极,具有较低能耗的同时可从溶液中提取出高纯度金属沉积物。碳基材料因具有高导电性、较大比表面积、价格低廉等特性,是首选材料。Liu 等^[32]开发使用氧化石墨烯改性碳毡电极(CF-GO),通过直流电(DC)或交流电(AC)电沉积来处理不同浓度重金属废水。氧化石墨烯可提供高密度的表面官能团来辅助电沉积,与传统吸附方法相比,对高浓度废水,交流电沉积可以回收超过 99.9% 的重金属离子。该材料可以应用于污水中含有金属离子较多的情况。采用 CF-GO 电极进行直流电沉积处理,能够有效地将单一重金属离子(如铜、镉和铅)以及多种离子混合污染降至安全饮用水标准以下。还可以通过改变交流电的频率和电压,实现对 Cu、Cd 和 Pb 等重金属的选择性回收,从而使得这些重金属的回收过程更加精准和高效。Fatemeh 等^[33]开发出一种聚苯胺/8-羟基喹啉(PAn-HQ)复合材料作为新型高效电极材料,用于去除废水中的 Hg、Cd、Pb、Cu、和 Zn 等重金属离子,重金属离子去除率可达到 97.14%,此复合材料结构具有优异的机械强度和热稳定性,在连续循环 10 次的电沉积之后电极的回收效率几乎不变。

4 电-化学耦合技术

4.1 机理

电吸附是利用电极材料表面吸附性能对重金属离子进行去除,操作简便,可实现电极的循环再生,无二次污染,吸附过程中无需添加其他辅助材料^[34]。化学吸附是利用材料的化学特性与重金属离子发生配合反应从而固定重金属离子的一种方法。将电吸附和化学吸附技术相结合,可以有效地从溶液中去掉重金属离子。这种方法不仅利用外加电场将重金属离子吸引到电极材料的双电层中进行电吸附,还能促使这些离子与电极材料表面的官能团形成配合物,增强了对重金属离子的去除能力。相比于传统的处理技术,电-化学复合吸附方法可以互相弥补电吸附和化学吸附的劣势,将能量消耗和成本降低,并且具有高效性和无二次污染的优势。As 主要以 As^{3+} 与 As^{5+} 的形式存在, As^{3+} 流动性和毒性更大^[35],但是 As^{5+} 更易于吸附,因此在处理含 As 的废水中,需要预先将 As^{3+} 转化为 As^{5+} 。

4.2 吸附材料

高晓慧等^[36] 通过利用金属材料与复合氧化物的协同作用,对水中的 As^{3+} 和 As^{5+} 进行吸附处理,通过电化学氧化和化学吸附的方法降低了砷的毒性。其中,铁锰复合氧化物具有 $280 \text{ m}^2/\text{g}$ 的比表面积,体现出较强的吸附能力。铁铝复合氧化物表面相比其他材料具有较多的羟基基团数量,对 As 也具有较强的吸附能力。张曼^[37] 使用辉钼矿对含有 Pb 的重金属离子溶液进行吸附试验,发现电-化学复合吸附法对含 Pb^{2+} 废水达到较高的去除率,在 1.2 V 电压下吸附量达 $86.26 \text{ mg}/\text{m}^2$ 。Liu 等^[38] 通过电化学辅助技术,构建 Cu^{2+} 印迹膜 (Cu^{2+} -IIF),实现了低浓度下重金属离子的高效去除。在初始浓度为 5 ppm 时,所制备的离子印迹膜对 Cu^{2+} 的吸附容量达到 $7.57 \text{ mg}/\text{g}$,去除率达到 90% 以上,并且表现出对 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的高选择性。

4.3 膜技术

膜技术在水处理行业,包括饮用水净化和废水处理等方面,已经取得了突破性的进展。超滤膜和纳滤膜技术在工业废水的再利用和饮用水的净化过程中发挥了至关重要的作用^[39]。因此,对膜分离技术在水处理领域应用的深入探究,不仅具有显著的现实价值,还预示着巨大的发展潜力。电化学技术可以应用在膜分离工艺的前后阶段,进一步增强水质净化的效果,尤其是在处理难以去除的重金属离子方面。通过合理地结合电化学处理与膜分离技术,并进行技术优化,不仅能提升整个水处理系统的效能和能源效率,还能有效减少操作成本。电控离子交换技术通过将活性的离子交换材料固定在导电基底上形成膜电极,并利用电化学手段调整其氧化还原电位,实现从溶液中对特定离子的可逆吸附和释放,从而达成对目标离子的精准分离^[40]。Du 等^[41] 制备了一种新型高结晶质子化沸石 Socony Mobil-5@ polyaniline/聚苯乙烯 (HZSM-5@ PANI/PSS) 有机-无机复合膜,该薄膜对 Pb^{2+} 表现出快速电化学捕获/释放能力,吸附平衡时间小于 60 min 。此外,将插层剂(2HT)和 PANI 嵌入 TiO_2 夹层中,成功合成了用于选择性和快速分离 Pb^{2+} 的 TiO_2 /PANI 电活性材料纳米片,该材料具有超高的吸收能力和循环稳定性,在 Pb^{2+} 的提取/释放方面具有明显的应用前景。

5 电化学处理技术实际应用

电化学处理技术应用起源于美国,因其较好的工作效率和净化精度得到了快速发展,现如今该技术主要在中国、美国、韩国、日本、德国等国家有实际的应用。近年来,随着新型材料的应用,电化学处理装置正逐步优化和更新。

目前,国外主要有 INDRA Water 公司、Ecolab 公司、Desalitech 公司、Voltea 公司、Water Tectonics 公司等大型电化学处理公司,主要用在处理工业废水和生活用水方面,减少水资源的消耗和污染。其中,Electrox Series 系统是 INDRA Water 公司最先进的工业废水处理系统,结合了 Activated Flow Series 和电氧化技术,实现多阶段控制的废水处理,在处理含有高含量重金属离子和有机物质的废水方面极为有效,并且能有效处理工业废水中存在的其他多种污染物,是一种注重于提供高效、低成本、易于操作且环境友好的工业废水处理方法。荷兰的 Voltea 公司采用微单元模块化的单极式 MCDI 产品来对工业废水进行处理,能够满足岛屿、船只等小型系统的重金属废水净化需求。另外,Water Tectonics 公司在处理重金属废水中将电化学处理技术与离子交换膜技术相结合,此种耦合技术可明显提高处理效率和净化程度。

在国内,一些重金属废水处理的公司在国家大力发展绿色科技的目标下,电化学处理技术也得到了飞速的完善和发展^[42-46]。例如,华时捷环保研发的 HSJ-EC 电化学处理废水技术与成套沉淀絮凝设备能同时去除水中的多种重金属离子,具有无须添加其他化学药剂、处理效果稳定、自动化程度高、可控性好等优势,并已在多个行业获得成功应用,工艺流程如图 5 所示^[47]。煜城环保开发了 YC-ECO 高效密闭式电化学技术,采用独特的电极结构设计和去极化装置,解决了传统电化学设备普遍存在的极板钝化的问题,使得设备能够高效稳定的运行。新锋科技基于 BDD 电极采用槽式一体化设备,通过对设备结构的优化,解决了传统设备在进水预处理阶段处理效率较低的技术问题,并且实现了设备的智能自动化运行。

6 总结和展望

随着材料应用技术的快速发展,科研工作者对

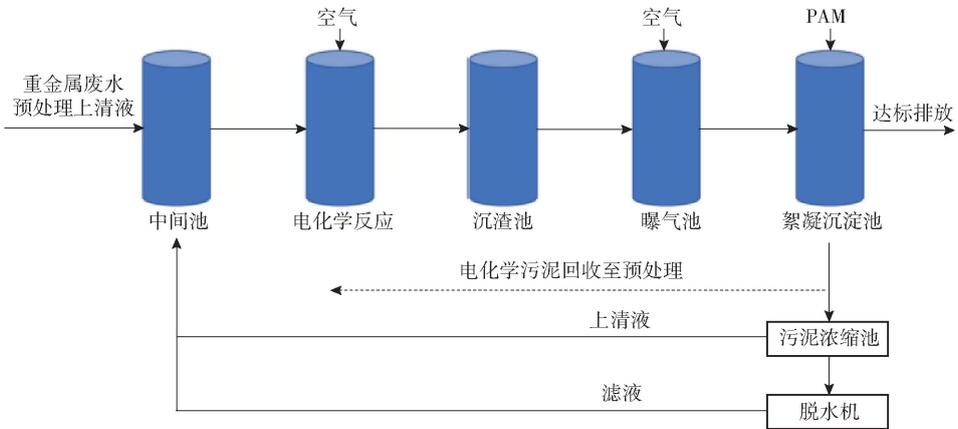


图5 HSJ-EC 电化学处理技术工艺流程

Fig. 5 HSJ-EC electrochemical treatment technology process flow

电化学技术处理重金属废水的研究逐步深入,从单元材料到多元复合材料,从单一技术到耦合技术,从只注重净化纯度到注重低成本、高效率、可持续性等多重特性的材料,表明电化学重金属废水处理已形成系统的体系,并得到了长足的进步。

尽管电化学处理技术陆续有了小范围的应用,但仍然面临一些挑战,主要为以下几个方面。

1) 重金属的回收和再利用。通常废水中的重金属离子不止一种,如何将废水的重金属离子尽可能地去除并将不同的金属有效地分类回收和再利用,是一个挑战。

2) 结合智能化与自动化规模应用。发展智能化控制系统,将实验室规模的电化学处理技术快速放大到工业规模,实现对电化学处理过程的实时监控和优化是一个提高效率的解决方案。

3) 低成本电极材料的创新与性能提升。集低成本、高导电性、耐腐蚀性和高机械强度等优良特性为一体的电极材料研发是一个重要的课题。

电化学处理重金属废水技术作为一种高效、环保、节能的处理方法仍需要不断完善和发展,在未来会有更多的探索 and 发现。

[参考文献]

- [1] 张益硕,周仲魁,李龙祥,等. 新型三元复合材料对低浓度含铀废水的去除性能及机制[J]. 稀有金属,2024,48(2):196-213.
- [2] 马梦月,杨仕仪. 含铀废水的危害及其重要处理技术研究进展[J]. 有色设备,2024,38(4):34-43,64.
- [3] Liying L, Meiling H, Qiang Y, et al. Toxic heavy metal ions contamination in the aqueous environment, its toxicity and methods of microbial remediation[J]. Green Chemistry

Letters and Reviews, 2024, 17(1): 2317824.

- [4] R. B. S, Sarah F, Ashraf R, et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(2): 87-101.
- [5] 张益硕,周仲魁,杨顺景,等. 用 CTAB 改性膨润土从低浓度废水中吸附去除 U(VI) [J]. 湿法冶金, 2022, 41(2):145-149.
- [6] 唐丽. 重金属废水处理技术及设备的研究[J]. 有色设备,2024,38(3):10-18.
- [7] Wang Y, Zhang Y, Cai N, et al. A novel composite electrode with multiple pore structures for efficient treatment of heavy metal ions in capacitive deionization[J]. Journal of environmental management, 2024, 367:121974.
- [8] 张延青,赵桂瑶,黄滨,等. 重金属离子 Fe^{3+} 和 Mn^{2+} 对废水生物处理效果影响的研究进展[J]. 环保科技, 2019, 25(6):41-46.
- [9] Yuhui L, Rongteng T, Shuang Z, et al. Capacitive deionization of uranium mediated by dioxygen functionalities in the $C=O=C=O$ segment of polyacrylic acid-functionalized graphene aerogel[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481:148388.
- [10] Liu Y, Zhao J, Bo T, et al. Enhanced uranium extraction via charge dynamics and interfacial polarization in MoS_2/GO heterojunction electrodes[J]. Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), 2024, 20(37): e2401374.
- [11] 翟作昭,张利辉,王晓磊,等. 电吸附处理重金属离子的研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(2):47-51, 57.
- [12] Helmholtz. Ueber einige gesetze der vertheilung elektrischer strome in körperlichen leitern mit anwendung auf die thierisch-elektrischen versuche [J]. Annalen der Physik, 1853, 165:211-233.

- [13] Chapman D L. A contribution to the theory of electrocapilarity[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 2010, 25: 475 – 481.
- [14] Yan C, Li H R, Chen X, et al. Regulating the inner Helmholtz plane for stable solid electrolyte interphase on lithium metal anodes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2019, 141(23): 9422 – 9429.
- [15] Grahame D C. Components of charge and potential in the non-diffuse region of the electrical double layer: potassium iodide solutions in contact with mercury at 25[J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 80: 4201 – 4210.
- [16] Sushil K, Maher N A, Emad A, et al. Electrode materials for desalination of water via capacitive deionization[J]. Angewandte Chemie (International ed. In English), 2023, 62(35): e202302180 – e202302180.
- [17] Zhao M, Dai Y, Zhang M, et al. Mechanisms of Pb and Zn adsorption by different biochars: biochar characteristics, stability, and binding energies[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 136894.
- [18] 牟祺, 程国玲. Ti_3C_2 层状电极电吸附去除水中铅离子研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(10): 95 – 98.
- [19] 魏永, 赵威, 姚维昊, 等. 掺 S 三维石墨烯气凝胶对水中铅离子的电吸附去除[J]. 环境化学, 2018, 37(10): 2305 – 2314.
- [20] 成卓轩. 三维海胆状富氧空位 Co_3O_4 电极材料的构建及其对废水中 Pb^{2+} 去除性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [21] Myriam T, Gbenro F, Marc C, et al. Recent advances in capacitive deionization: A comprehensive review on electrode materials[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(6): 111368.
- [22] Gao Y, Xu Y, Xiang S, et al. Nitrogen-doped carbon nanotube encapsulated Fe_7S_8 nanoparticles for the high-efficiency and selective removal of Pb^{2+} by pseudocapacitive coupling[J]. Environmental Science: Nano, 2022, 9(6): 2051 – 2060.
- [23] Youngsuk Jung, Yooseong Y, Taeyoon K, et al. Enhanced electrochemical stability of a Zwitterionic-Polymer-Functionalized electrode for capacitive deionization[J]. ACS applied materials & interfaces, 2018, 10(7): 6207 – 6217.
- [24] 张佳, 王国祥, 夏明芳, 等. 电化学氧化降解磺胺嘧啶模拟废水的工艺优化[J]. 精细化工, 2014, 31(8): 991 – 997.
- [25] 皇甫志杰, 张维, 姚继明. 电化学高级氧化工艺降解印染废水的研究进展[J]. 毛纺科技, 2020, 48(9): 40 – 45.
- [26] 袁春燕, 蒋晓云, 徐先锋, 等. 电化学与纳米晶磁组合技术在重金属废水处理中的应用研究[J]. 有色设备, 2020, 34(1): 24 – 29.
- [27] Almazón-Ruiz J F, Caballero V F, Cruz-Díaz R M, et al. Scale-up of rotating cylinder electrode electrochemical reactor for Cu(II) recovery: Experimental and simulation study in turbulence regimen[J]. Electrochimica Acta, 2012, 77: 262 – 271.
- [28] 于栋, 等. 重金属废水电沉积处理技术研究及应用进展[J]. 化工进展, 2020, 39(5): 1938 – 1949.
- [29] CHELLAMMAL S, RAGHU S, KALAISELVI P, et al. Electrolytic recovery of dilute copper from a mixed industrial effluent of high strength COD[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 180(1): 91 – 97.
- [30] Su J, Lin X, Zheng S, et al. Mass transport-enhanced electrodeposition for the efficient recovery of copper and selenium from sulfuric acid solution[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 182: 160 – 165.
- [31] Hannula P, Khalid K M, Janas D, et al. Energy efficient copper electrowinning and direct deposition on carbon nanotube film from industrial wastewaters[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 1033 – 1039.
- [32] Chong L, Tong W, Po-Chun H, et al. Direct/Alternating current electrochemical method for removing and recovering heavy metal from water using graphene oxide electrode[J]. National Library of Medicine 2019, 13(6): 6431 – 6437.
- [33] Fatemeh G, Adibi Z N, Jalal A, et al. Novel polyaniline/8-hydroxyquinoline composite electrode materials for simultaneous electrochemical removal of heavy metal ions from water resources[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(6): 108830.
- [34] Yoram Oren, Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment - past, present and future[J]. Desalination, 2008, 1(228): 10 – 29.
- [35] Mohan D, Pittman C U. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents - a critical review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 142(1–2): 1 – 53.
- [36] 高晓慧, 董玉良, 任丽英, 等. 复合氧化物对水中砷的去除作用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 201 – 206.
- [37] 张曼. 电-化学复合吸附去除水中重金属离子的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [38] Weifeng Liu, Zhuolin An, Lei Qin, et al. Construction of a

- novel ion imprinted film to remove low concentration Cu^{2+} from aqueous solution[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 411:128477.
- [39] 聂心童, 孙超, 何亚其, 等. 超滤膜技术在废水处理领域中的应用研究进展[J]. *当代化工研究*, 2023, (12): 5-7.
- [40] 高凤凤, 杨言言, 杜晓, 等. 电控离子(交换)膜分离技术—从 ESIX 到 ESIPM[J]. *化学进展*, 2020, 32(9):1344-1351.
- [41] Du Xiao, Zhang D, Ma X, et al. Electrochemical redox induced rapid uptake/release of Pb(II) ions with high selectivity using a novel porous electroactive HZSM-5@ PANI/PSS composite film [J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 282:384-394.
- [42] 樊小磊, 詹作泰, 高柏, 等. 重金属废水处理技术研究进展[J]. *中国有色冶金*, 2023, 52(4):112-127.
- [43] 李秒. 冶炼废水零排放处理工艺[J]. *有色冶金节能*, 2020, 36(1):64-66.
- [44] 韩玲玲, 曹惠昌, 代淑娟, 等. 重金属污染现状及治理技术研究进展[J]. *有色矿冶* 2011, 27(3):94-97.
- [45] 贾乙东. HDS 工艺处理高酸高污染负荷型重金属废水[J]. *有色矿冶*, 2007(5):57-59.
- [46] 魏睿, 兰亚茹. 有色冶炼含重金属离子污酸处理新工艺[J]. *硫酸工业*, 2023(2):1-5.
- [47] 蒋晓云, 徐先锋. 用于重金属废水处理的工艺方法[P]. 湖南:CN201610756318.1, 2016-12-14.

Latest research progress of electrochemical treatment of heavy metal wastewater

HAN Yuesong, LIU Chenyang

(East China University of Technology, Nanchang 330000, China)

Abstract: During the process of industrial and agricultural production, mineral mining and urbanization, a large amount of wastewater containing a variety of naturally non-degradable heavy metal ions will be produced. If such persistent toxic environmental pollutants are discharged directly without any treatment, they will pose a serious threat to biodiversity, including humans. Heavy metal wastewater can be treated by a variety of purification and separation technologies. As an emerging treatment method, electrochemical technology has significant advantages and development potential in the treatment of heavy metal wastewater. Based on the importance and urgency of purifying heavy metal ions in wastewater, this paper introduces the latest progress of electrochemical treatment methods based on different action mechanisms, and deeply analyzes the research status of different electrode materials used in different electrochemical treatment methods to treat heavy metal ions, in order to provide theoretical reference for the further development of heavy metal ion wastewater treatment.

Keywords: heavy metal; electrochemistry; capacitor deionization; electrodeposition; electrochemical coupling technology

