

引用格式: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.

TANG Li. Research progress of heavy metal wastewater treatment equipment[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(3): 10-18.

# 重金属废水处理技术及设备的研究

唐丽

(东华理工大学, 江西 南昌 330013)

**[摘要]** 在工业生产、矿山开发、农业活动及城市生活等人类活动中通常会排放含有重金属离子的废水。这类废水具有毒性高和难降解性等特点,若未经处理而直接排放,会对周边生态环境造成严重污染,重金属离子易通过食物链传递,对人类健康造成不利影响。基于此,本文综述了处理含有重金属离子废水的技术、设备和工艺流程,以期为重金属废水的处理提供基础理论。

**[关键词]** 重金属废水; 废水处理; 化学沉淀; 离子交换法; 膜分离; 电化学; 吸附; 光催化

**[中图分类号]** TG113.12 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)03-0010-09

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.03.002

各种工业活动和人类生活会排放大量含有重金属离子的废水<sup>[1-2]</sup>,例如镉(Cd)、铜(Cu)、汞(Hg)、锌(Zn)、砷(As)、镍(Ni)、铬(Cr)、钴(Co)和铅(Pb)等<sup>[3-4]</sup>。重金属废水具有积累性、持续性、难降解性和毒害性等特点,不仅会污染环境,还会通过食物链进入人体,由于这些重金属离子具有难降解及剧毒性,一旦体内的重金属含量累积超过限度,会产生各种疾病<sup>[5-6]</sup>。例如,微量元素锌是人体所必须的元素,但如果体内锌含量过量,会引起恶心、胃痉挛和贫血等健康问题<sup>[7]</sup>。因此,处理含有重金属离子的废水成为当今社会亟需解决的环境问题。

在这一背景下,众多研究人员致力于开发和优化不同的废水处理技术,以有效去除重金属离子,实现废水资源化、再利用和环境保护。本文将深入探讨包括化学沉淀法、离子交换法、膜分离法、电化学法、吸附法、光催化法等废水处理技术<sup>[8-9]</sup>,重点关注各种技术的原理、设备和工艺流程,以探讨其的优势和局限性。同时,还将简要阐述各类技术中的一

些研究成果,以展示重金属废水处理中各种新型材料和设备的应用前景和潜力,将有助于提高对重金属废水处理技术的理解,推动环境保护领域的进步与创新。

## 1 化学沉淀法

### 1.1 简介

化学沉淀法一般通过在重金属废水中投加一定量的化学试剂(如苛性钠、石灰、纯碱和石灰石等),使废水中的重金属离子与化学试剂发生沉淀反应,生成难溶于水的沉淀物(如硫化物、碳酸盐或氢氧化物),从而有效地去除从废水中重金属离子<sup>[10]</sup>。采用化学沉淀法去除重金属离子具有操作简单、选择性良好、成本低等优点<sup>[11]</sup>。然而,该方法存在污泥生成量大、污泥的需处理和处置等需要解决的问题;同时,在处理浓度偏低的重金属废水时,其去除效率可能会受影响<sup>[12]</sup>。

Habib K等<sup>[13]</sup>研究了利用硫化钠和碳酸钠通过沉淀法去除废水中的铅离子,发现在pH值为11.0时,使用碳酸钠和硫化钠对实际废水和合成废水的最高铅去除效率分别为96.8%、95.7%和98.9%、99.3%。Wang R等<sup>[14]</sup>利用二氧化硅干凝胶作为沉淀剂,回收废水中的Ni<sup>+</sup>,凝胶将氨释放至溶液中,形成绿色沉淀,二氧化硅干凝胶经多次回收循环后,镍的去除效率为99.34%~99.65%,保持不变。

**[收稿日期]** 2024-03-20

**[第一作者]** 唐丽(1999—),女,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为辐射防护与环境保护。

**[基金项目]** 国家自然科学基金“优先流作用下非饱和和多孔介质中可移动胶体与放射性核素复合共迁移研究”;国家自然科学基金江西721矿铀污染土壤环境特征及微生物修复技术研究。

## 1.2 沉淀槽

在对废水中重金属离子的化学沉淀处理过程中,沉淀池(图1)是一种重要设备。其工作原理是依靠物理和化学的沉淀过程,通过添加特定的化学物质,使废水中的重金属离子转化为不溶性沉淀物,实现重金属离子的高效分离和去除。沉淀槽通常与混凝、絮凝等工艺相结合使用,具有结构简单、操作方便、适用范围广等优势,但存在污泥沉积不均、处理效果有限、易产生二次污染等问题。

为提高水质,降低冲渣水中细渣含量,刘伟等<sup>[15]</sup>提出了组合式锥斗沉淀槽,其系统运行稳定、高效,细渣分离效果良好,冲渣系统自动化程度高,水质优良,日常维修工作量和劳动强度显著降低。谢俊雅等<sup>[16]</sup>公开了一种立式斜管沉淀结构,提高了斜管沉淀槽的表面负荷,减少了占地面积。

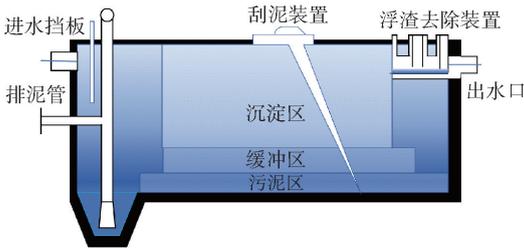


图1 沉淀槽

Fig.1 Sedimentation tank

## 1.3 工艺流程

化学沉淀法去除废水中重金属离子的工艺流程如图2所示。首先,向沉淀槽中加入适量的沉淀剂,

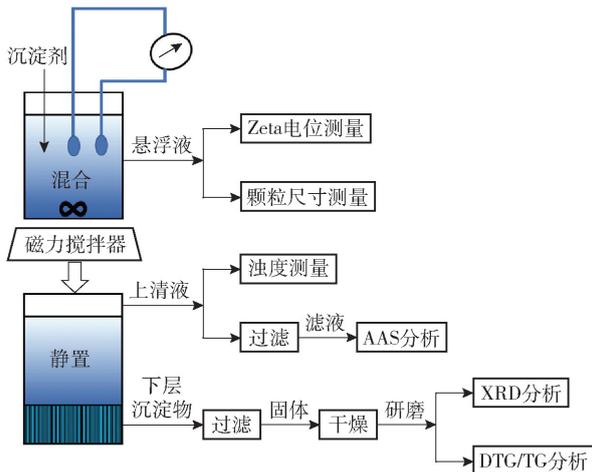


图2 化学沉淀法重金属去除过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of heavy metal removal process using chemical precipitation method

使其与废水中的重金属离子发生化学反应,生成不溶性沉淀物。例如,对于含铜废水,可加入硫化钠作为沉淀剂,生成硫化铜沉淀;对于含锌废水,可添加氢氧化钠,生成氢氧化锌沉淀。此外,沉淀槽通常会配备搅拌装置,以促进废水与沉淀剂的充分混合和反应从而确保更好的沉淀效果,沉淀物会在沉淀槽的底部沉积。同时,废水中的其他成分如悬浮物、胶体等也会被一同沉淀下来。此时,可以通过排放上清液的方式,将处理后的废水排出沉淀槽。而底部的沉淀物则需要进一步处理,如固液分离、干燥、回收等。

## 2 离子交换法

### 2.1 简介

离子交换法通常将含重金属离子废水流过离子交换树脂,使废水中的重金属离子与离子交换树脂的活性基团(如羟基、羧基等)发生配合反应,从而去除废水中的重金属离子<sup>[17]</sup>。离子交换技术具有高效性、适应性广泛、操作简单等优点,可有效去除废水中的重金属离子,如铅、汞、镉等,去除率最高可达99%以上,适用于不同类型的水处理。然而,离子交换树脂存在强度低、不耐高温、价格高昂、产生二次污染等缺点,需要定期更换离子交换树脂<sup>[18]</sup>。

Zhao等<sup>[19]</sup>用乙胺模板化的硫化铜作为离子交换剂,从水溶液中去除了 $Ba^{2+}$ 、 $Co^{2+}$ 和 $Ni^{2+}$ ,其最大交换量分别为211.73 mg/g、103.57 mg/g和111.78 mg/g。赵瑾等<sup>[20]</sup>利用MV860型离子交换树脂去除溶液中的锰离子,在25℃条件下,树脂对锰离子的饱和吸附量为12.55 mg/g,最大去除率可达98%以上。

### 2.2 离子交换设备

离子交换树脂具有特殊的吸附官能团,这些官能团能够吸附和释放离子。当含重金属离子废水通过离子交换设备(图3),重金属离子会与树脂的官能团发生离子交换反应。具体来说,重金属离子会替代树脂的离子,从而被吸附在树脂上。同时,树脂会释放等量的其他离子,以维持电荷平衡<sup>[21]</sup>。离子交换树脂具有高选择性,可以根据需要选择和设计去除的特定重金属离子类型,如铜、铅、锌、镉等。离子交换器操作简便,节约水资源,具有高效、环保等优点,但也存在高成本、对操作条件敏感、对其他污染物去除效果有限、可能产生废液等问题。

刘洋<sup>[22]</sup>提出的模块化离子交换设备可实现内部离子交换树脂的翻转,有利于脱水处理,提高净化效率。杨顺利等<sup>[23]</sup>设计的离子交换树脂脱盐装置能够实现自动化排水,分流高低浓度污水,降低后续废液处理系统的能耗。

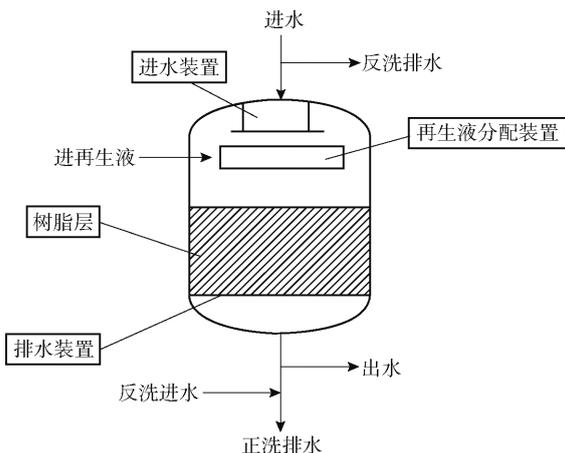


图3 离子交换设备

Fig.3 Ion exchange equipment

## 2.3 工艺流程

离子交换法去除废水中重金属离子的工艺流程如图4所示。含重金属离子废水通过管道进入废水调节池,投加适量碱性或酸性溶液调节pH值后,废水进入连续过滤池去除固体悬浮物,再经提升泵导入离子交换柱内,重金属离子与离子交换树脂发生离子交换反应,被固定到离子交换树脂上;一部分水被用于淋洗再生后的树脂,其余水被排出;进行树脂的反洗和再生后;洗脱液富集了重金属离子,导入废酸收集槽;树脂转型后的废碱液导入废碱收集槽;废酸和废碱同时导入中和池,最终重金属回收处理。

## 3 膜分离法

### 3.1 简介

当废水通过膜时,由于水分子具有较小的尺寸和特定的物理化学性质,能够顺利通过膜孔,而重金属离子由于较大的尺寸或电荷效应而被膜截留在膜一侧。膜分离技术能够高效地去除废水中的重金属离子,实现废水的净化和重金属的回收<sup>[24]</sup>。该技术具有高分辨效率、连续操作、低能耗等优点,但膜表面易受污染,需要定期清洗和维护<sup>[25]</sup>。

Moradi等<sup>[26]</sup>研制了PES/四硫代对苯二甲酸酯(TTTP)纳米复合膜,0.1% TTTP的通量回收率

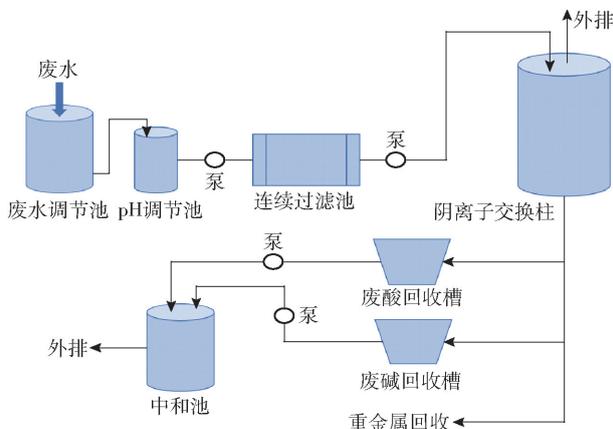


图4 离子交换工艺流程

Fig.4 Ion exchange process flow

(FRR)达到98.2%(比裸PES高3.1倍),对 $Zn^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 和 $Pb^{2+}$ 的去除率分别为99.2%、98.5%和97.4%。Zheng等<sup>[27]</sup>通过简便的搅拌交联方法制备了聚乙烯亚胺(PEI)交联P84纳滤膜,该膜具有优异的透水性,对 $ZnCl_2$ 、 $PbCl_2$ 、 $Ni(NO_3)_2$ 和 $Cu(NO_3)_2$ 等单组分重金属盐的去除率达到90%以上。

### 3.2 装置

利用半透膜的选择过滤特性,可实现重金属离子和水的有效分离。在膜分离过程中,废水通过膜分离器时,其中的重金属离子被选择性地截留在膜的一侧,而水和其他小分子物质则通过膜孔道顺利分离。膜分离器基于膜的孔径和表面性质,实现了对重金属离子的有效截留<sup>[28-29]</sup>。膜分离装置结构如图5所示,膜分离装置作为一种高效且环保的设备,该装置利用天然或人工合成的高分子薄膜,通过外部能量或化学位差的推动,对废水中的重金属离子进行分离、提纯和富集。膜分离器具有高分离效率、低能耗、简单设备、操作方便、适用广泛、环保等优点,但存在摩擦阻力高、水质要求高、膜污染和堵塞、选择性和透过性有限、操作条件受限等问题。

肖贤汉<sup>[30]</sup>提出了一种重金属废水智能膜分离装置,有利于防止膜的堵塞、延长膜寿命,保持分离性能,确保装置稳定高效处理重金属废水,减少人工干预,提高工作效率。陈健等<sup>[31]</sup>公开了一种电驱动膜分离装置,可通过三次电渗析处理原液,分离出含盐量极低的脱盐液,可直接排放。

### 3.3 流程

采用膜分离技术处理重金属废水的工艺流程如图6所示。含重金属离子废水进入废水池,然后通

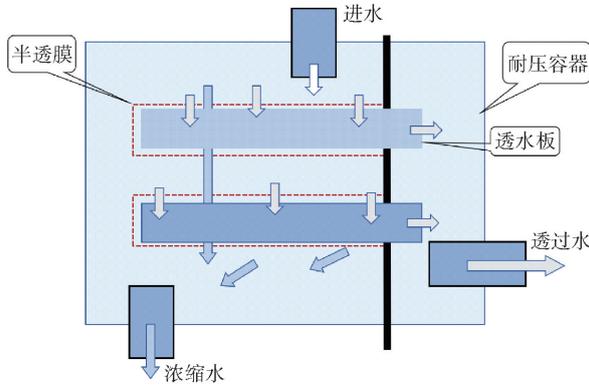


图5 板框式膜组件工作示意

Fig. 5 Schematic diagram of plate and frame membrane module operation

过管道进入中间池。其中的固体物质沉淀后经过管道排出,经板框压滤机处理成泥饼;沉淀后的废水经泵导入SF过滤器,由于废水中的重金属离子是分子量比膜孔径大的大分子,从而被滤膜截留下来,进入中间池中,再经板框压滤机压成泥饼。滤膜截留的重金属离子进入清液槽,再经过提升泵进入反渗透装置处理。无法通过反渗透滤膜的废水经管道进入废水池,调节后,导入废水池再次处理。

## 4 电化学法

### 4.1 简介

电化学法去除废水中的重金属离子是通过在废水中引入电极,并在外加电流的作用下,促使发生一系列氧化还原、分解、沉淀和气浮反应,以实现去除重金属离子的目的<sup>[32]</sup>。该方法具有处理速度快、能够破坏配位金属链、便于重金属回收利用、占地面积小、生成污泥量少等优点。此外,电化学法还包括电

凝聚法、磁电解法、内电解法等多种技术分支,每种方法都具有独特的应用场景和优势。然而,电化学法也存在一些缺点,例如极板消耗快、耗电量大、处理低浓度电镀废水时效果不佳。因此,在实际应用中,需要根据废水特性和处理要求选择适当的方法,并进行优化和改进<sup>[33-34]</sup>。

Wang等<sup>[35]</sup>以酚醛树脂为成型剂,导电秸秆生物炭为原料,制备了高强度三维圆形秸秆生物炭电极;以该电极为阴极,采用直流电沉积法处理镉污染废水,在电流密度为 $7.80 \text{ mA/cm}^2$ 条件下,溶液中镉的去除率在240 min内达到76.60%。此外,通过酸洗将电极与镉分离,实现镉的有效回收和电极再生,再生后镉的去除率仍达到74.16%。Liu等<sup>[36]</sup>合成了活性炭布/六氰基铁酸镍(ACC/NiHCF)电极,该电极具有介孔和配位骨架结构,为离子或电子提供了便捷的传输通道,对 $\text{Sr}^{2+}$ 最大去除效率为77.20%。

### 4.2 电解槽

在电化学领域,电解槽被视为关键设备(图7),通常由电极板、电解液和电源组成。电解槽的电极板通常采用导电性能良好的材料,如不锈钢、石墨等。电解液的酸碱性,取决于废水中的污染物种类。电源通常为直流电源,为电解过程提供所需的电流和电压。在电解过程中,电流通过电极板,促使氧化还原反应发生,将废水中的有机物和重金属离子转化为无害物质或易处理形态。有机物可经电化学氧化分解为简单的有机物或无机物,重金属离子则可以通过电化学还原过程被还原为金属单质或低毒性的化合物。电解槽具有高效能量转换、适用范围广、产品纯度高、环保等优点,但存在能源消耗高、操作

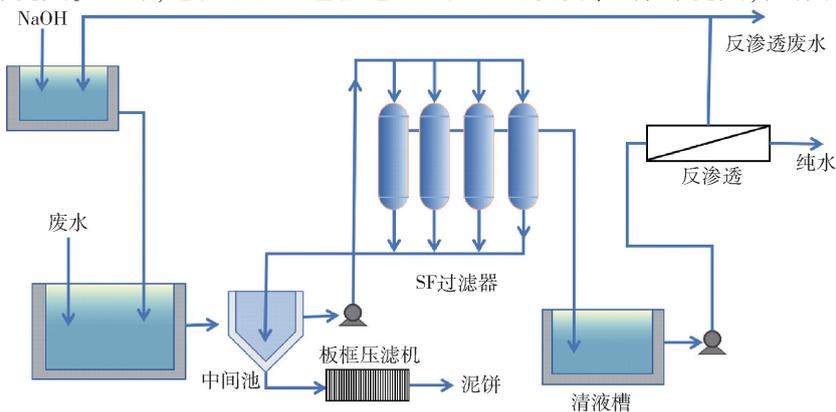


图6 膜分离工艺流程

Fig. 6 Membrane separation process flow

复杂、设备投资大、维护成本高、水质要求高等缺点。徐国名等<sup>[37]</sup>提出了改进的大面积电解槽装置,相同电流下,槽电压更低,降低电耗,节能减排,当产品需求增加时可提升运行电流,实现增产效果。向可阳<sup>[38]</sup>提出了一种改进型电解槽内挡板,可根据使用者需求,通过挡板结构隔离电解液到各区域。

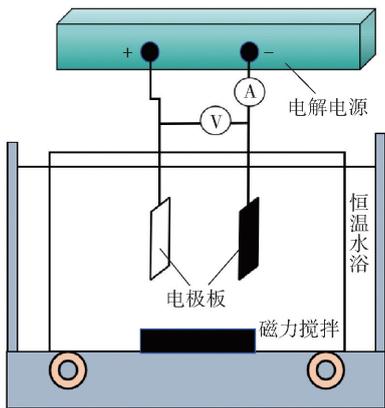


图 7 电解槽

Fig. 7 Electrolytic cell

### 4.3 工艺流程

电化学法处理重金属废水的工艺流程如图 8 所示。首先,将含有重金属离子的废水输送至废水调节池进行预处理,去除废水中的大颗粒物质及杂质。处理后的废水被引入中和池,通过适量的酸或碱进行中和处理。处理后的溶液进入电化学反应池,进行电化学反应,促使废水中的重金属离子发生氧化还原反应,生成可沉淀物质。接着,经化学处理后的溶液被排入沉淀池沉淀,沉淀后的污泥通过排泥口输送到污泥浓缩池进行浓缩,然后输送至压滤机处理。对经压滤处理的滤渣进行回收处理,同时将压滤后的滤液回收至废水调节池中进行循环处理。

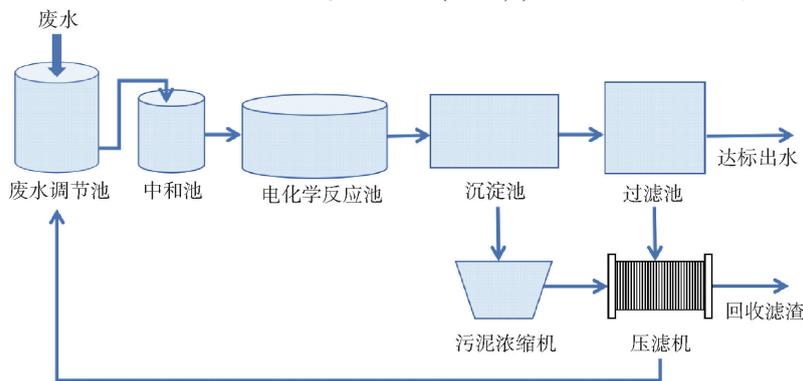


图 8 电化学工艺流程

Fig. 8 Electrochemical process flow

## 5 吸附法

### 5.1 简介

吸附法是指通过化学吸附和物理吸附两种方式进行重金属废水处理。物理吸附法是指利用吸附剂表面的范德华力或静电作用与金属离子结合,而化学吸附则涉及吸附剂表面的官能团与重金属离子之间的化学键合。随着吸附过程进行,越来越多的重金属离子被固定在吸附剂上,实现从废水中去除重金属离子的目的。同时,通过适当的解吸或再生方法,吸附剂可以恢复吸附能力,实现循环利用<sup>[39]</sup>。吸附法具有吸附剂来源广泛、操作灵活、能耗低、处理效果好、费用低等优点。然而,有些吸附剂吸附完成后难以回收且重金属难以再次回用,容易产生大量含有重金属的废弃物,造成二次污染<sup>[40-41]</sup>。

钟等<sup>[42]</sup>揭示了两性改性剂改性的麦草对重金属具有很高的吸附能力,对 Cu(II) 和 Cr(VI) 的最大吸附能力分别为 90.9 mg/g 和 241.1 mg/g。Wu 等<sup>[43]</sup>发现,利用壳聚糖基电纺丝纳米纤维膜在 120 min 内建立对 Cu(II) 的吸附平衡,最大 Cu(II) 吸附能力为 90.3 mg/g。Wang 等<sup>[44]</sup>将 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs)和 CaO NPs 负载在沸石球载体上制备了纳米 Fe-Ca 双金属氧化物(Fe-Ca-NBMO)改性基材。实验表明,Fe-Ca-NBMO 改性基质对 Cu(II) 和 Ni(II) 的平衡吸附量分别为 706.48 mg/kg 和 410.59 mg/kg,对 Cu(II) 和 Ni(II) 的去除效率分别达到 99.7% 和 99.9%。

### 5.2 吸附罐

吸附装置是吸附法处理重金属离子的核心设备(图 9),通常由进水系统、吸附材料层、出水系统及

可能的再生系统组成。进水系统引入待处理的废水,吸附材料层含有活性炭、黏土矿物、海泡石、聚糖树脂等可吸附重金属离子的多孔结构材料,提供较大的吸附表面积,有效去除废水中的重金属离子。部分吸附材料可能需要配备再生系统,以便在吸附饱和后进行再生,恢复吸附能力,实现材料的循环利用。吸附罐(图9)具有高效吸附性能、广泛适用性、结构紧凑、运行成本低、操作简便以及高安全性等优点。然而,其局限性在于吸附容量有限、吸附过程耗能以及吸附剂成本可能较高。

倪健<sup>[45]</sup>公开了一种工业废水处理技术,采用的装置包括三个并联的吸附罐和一个与吸附罐相连的脱附罐,其中两个吸附罐交替工作,第三个备用,优化了树脂罐内吸附和脱附过程为“体内吸附+体外脱附”方式,显著提高了污染树脂的脱附效果。黄震等<sup>[46]</sup>提出了一种活性炭吸附罐,其具备自动抬升功能,便于清理和更换活性炭。

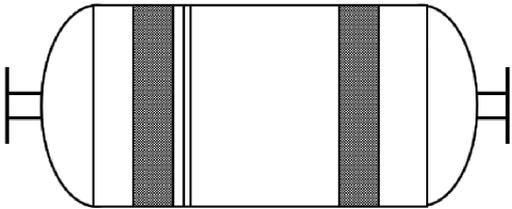


图9 吸附罐

Fig. 9 Adsorption tank

### 5.3 工艺流程

吸附法处理重金属废水的工艺流程如图10所示。首先将含重金属离子废水导入pH调节池中,通过添加适量的酸或碱调节其pH值。随后,向废水中投加适量的吸附剂,利用吸附剂与重金属离子之间的物理或化学作用,去除溶液中的重金属离子。由于不同种类的重金属离子需要不同的吸附工艺,

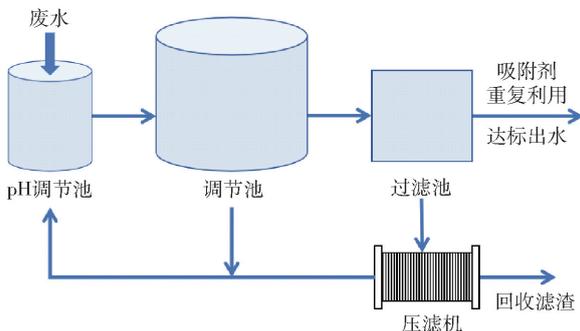


图10 吸附法工艺流程

Fig. 10 Adsorption process flow

因此需进行多次吸附试验,以保证全面去除溶液中所有的重金属离子。吸附处理后的溶液输送至过滤池,若过滤后的溶液符合排放标准则可直接排放,否则需继续进行吸附处理。在吸附工艺完成后,吸附剂可通过洗涤和解吸进行回收和再利用。

## 6 光催化

### 6.1 简介

在光照条件下,光催化剂如  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $\text{CdS}$ 、 $\text{ZnS}$ 、 $\text{SnO}_2$  等能够吸收光能<sup>[47]</sup>,激发其内部的电子跃迁。这种电子跃迁过程会产生电子和空穴,具有极强的氧化还原能力。当废水中存在重金属离子时,被激发的电子可以与之发生还原反应<sup>[48]</sup>。具体来说,电子可以与重金属离子结合,将其还原成较低价态或单质状态。这些反应使得废水中的重金属离子由溶解态转变为不溶态,实现了重金属的去除<sup>[49]</sup>。此外,光催化反应产生的自由基具有强氧化性,可以降解废水中的有机污染物,实现废水的有效处理。光催化技术处理废水中的重金属离子具有高效、环保等明显的优势,但仍面临技术挑战和经济考量,需要进一步研究和优化其应用性能和效率。

Sun 等<sup>[50]</sup>制备了可见光响应的  $\text{Zn}_3\text{In}_2\text{S}_6/\text{AgBr}$  复合材料,成功去除了甲硝唑(MNZ)和  $\text{Cr(VI)}$ 。在  $\text{Cr(VI)}$ -MNZ 混合体系中,使用优化后的  $\text{Zn}_3\text{In}_2\text{S}_6/\text{AgBr}-15$  光催化剂, MNZ 和  $\text{Cr(VI)}$  的去除率分别达到 98.2% 和 94.8%。Zhang 等<sup>[51]</sup>利用超声辅助煅烧方法制备了一种新型  $\text{CuBi}_2\text{O}_4/\text{煅烧 ZnAlBi}$  层状双氢氧化物(CBO/CLDHs)复合材料,成功去除率  $\text{Cr(VI)}$  和四环素,其去除率均在 95% 以上。

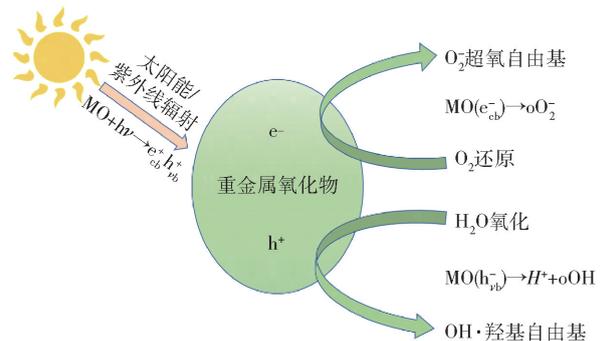


图11 光催化处理重金属离子

Fig. 11 Photocatalytic treatment of heavy metal ions

### 6.2 光催化反应器

光催化反应器(图12)是光催化处理重金属离

子的核心设备,通常设计为一个密闭容器,内部装有光催化剂(如二氧化钛、氧化锌等)。废水通过反应器时,光源照射激活光催化剂,产生光生电子和空穴,引发氧化还原反应。这些反应有助于将重金属离子转化为无害或低毒性的物质,从而去除废水中的重金属离子<sup>[52]</sup>。光催化反应器具有光源波长可调、灵活性高、安全性能高、加热控温准确等优点,但存在光催化利用率低、传质效率低、材料选择受限等问题。

习虎<sup>[53]</sup>公开了一种紧凑结构、占地面积小的平板型防爆光催化反应器,通过增大紫外催化反应面积和吹尘除尘,提高了处理能力并延长了使用寿命。赵振兵等<sup>[54]</sup>研发了一种光催化反应器,光损失小、结构简单、成本低,适用于连续化放大生产。

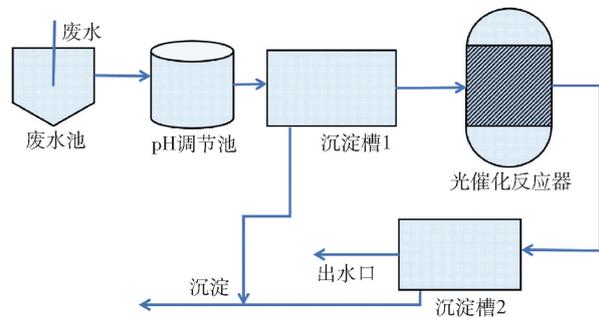


图 13 光催化工艺流程

Fig. 13 Photocatalytic process flow

理技术的研发取得了重要进展。本文评估了多种重金属废水的处理技术、设备和工艺,这些方法虽然存在各自优缺点,但都在不断完善,可以预见一些未来潜在的发展和研究方向。

1) 技术整合与优化:各种技术的整合与优化将有望提高重金属废水处理的效率。例如,结合化学沉淀法和其他物理化学方法,可实现更全面和高效的重金属去除。

2) 材料创新与性能提升:高效的吸附剂、光催化剂或膜材料的开发和改进将对技术性能和成本效益产生积极影响。

3) 循环利用与资源化:研究重金属离子的回收利用方式,有助于降低资源浪费,增加可持续性。

4) 智能化与自动化:引入智能化技术和自动化设备,有望降低人工干预,进一步提高处理效率和减少成本。

5) 废弃物综合治理:致力于解决污泥处理和处置问题,实现废物综合治理和资源化利用,最大限度减少对环境的影响。

重金属废水处理技术在不断发展和完善中,其未来将会在综合技术应用、材料创新、资源化和智能化方面有更多探索与发展。

[参考文献]

[1] 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.  
 [2] 冯楠. 废金属桶资源化回收系统[J]. 有色设备,2022,36(6):97-101.  
 [3] 褚洁. 重金属废水生化处理技术的研究进展[J]. 化工管理,2013(18):93.  
 [4] 李辉军,王雄. 重金属废水处理技术和资源化研究[J]. 皮革制作与环保科技,2021,2(24):25-27.  
 [5] 崔海波. 重金属离子铅废水的处理研究进展[J]. 西部皮革,2016,38(2):13.

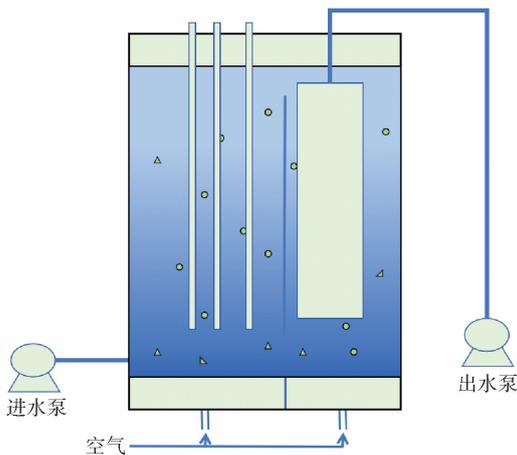


图 12 悬浮床光催化膜分离反应器系统

Fig. 12 Suspension bed photocatalytic membrane separation reactor system diagram

6.3 工艺流程

光催化处理重金属废水的工艺流程如图 13 所示。含重金属离子废水进入废水池,经过处理后进入 pH 调节池,加入适量的酸或碱调节溶液的 pH 后,通过管道引流至沉淀槽 1 沉淀。随后,进入光催化反应器进行光催化反应,重金属离子从溶解态转变为不溶性沉淀物质,再经沉淀槽 2 沉淀,最终溶液中的重金属离子达到排放标准;如未达标,需进行循环处理直至满足排放标准<sup>[55]</sup>。

7 总结和展望

近年来,重金属废水的污染问题日益严重,重金属废水的处理受到科研工作者关注,重金属废水处

- [6] 傅晓铎, 吴雪琦. 探究重金属废水处理技术和资源利用[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(22): 8-10.
- [7] 魏亦. 工业废水中重金属离子的去除方法研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2021.
- [8] 刘勇. 重金属废水处理技术现状与发展趋势的研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2020, 1(16): 66-71.
- [9] 郑海华, 徐礼春. 重金属废水处理技术研究进展[J]. 江西化工, 2019(4): 85-88.
- [10] 马宗云. 重金属废水处理技术及其研究进展[J]. 冶金与材料, 2018, 38(3): 59-60.
- [11] 冯霄. 电去离子技术浓缩与脱除水中重金属离子和营养盐研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [12] 陈向强, 宋言. 锌浮渣干湿法处理工艺对比与干法处理工艺关键设备选型及应用[J]. 有色设备, 2024, 38(1): 86-93.
- [13] Habib K, Mehraban S, Hadi M A. Removal of lead ions from industrial wastewater using precipitation process[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2017, 16(7): 1563-1568.
- [14] Wang R, Ng H D, Liu S. Recovery of nickel ions from wastewater by precipitation approach using silica xerogel[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 380: 120826.
- [15] 刘伟, 农理敏, 方凌, 等. 组合式锥斗沉淀池的设计与优化[J]. 冶金动力, 2023(6): 59-63.
- [16] 谢俊雅, 张海涛. 一种立式斜管沉淀结构及应用: CN202211664725.1[P]. 2023-03-10.
- [17] 杨海, 黄新, 林子增, 等. 离子交换法处理重金属废水的研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(7): 1675-1680.
- [18] 邹涛, 刘明远. 离子交换法处理工业废水中重金属的现状与发展[J]. 山东化工, 2017, 46(10): 190-192.
- [19] Yi-Ming Z, Meng S, Lin C, et al. Efficient removal of  $Ba^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  and  $Ni^{2+}$  by an ethylammonium-templated indium sulfide ion exchanger[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 425.
- [20] 赵瑾, 曹军瑞, 王文华, 等. 离子交换树脂对锰离子的吸附特性及工艺优化[J]. 水处理技术, 2020, 46(5): 55-59, 70.
- [21] 杨永峰, 张志, 刘子凤. 离子交换法处理重金属矿山水的试验研究[J]. 工程建设与设计, 2004(8): 56-58.
- [22] 刘洋. 一种模块化离子交换设备: CN202322169780.X[P]. 2024-02-23.
- [23] 杨顺利, 杨亮. 离子交换树脂脱盐装置: CN202322099199.5[P]. 2024-03-15.
- [24] 宋光敏. 膜分离法在水和废水处理中的应用[J]. 清洗世界, 2023, 39(10): 80-82.
- [25] 沈倩, 徐孙杰, 许振良, 等. 含重金属废水膜分离技术的应用进展[J]. 山东化工, 2019, 48(5): 59-65.
- [26] G. Moradi, S. Zinadini, L. Rajabi, Development of the tetrathioterephthalate filler incorporated PES nanofiltration membrane with efficient heavy metal ions rejection and superior antifouling properties, J. Environ. Chem. Eng. (2020).
- [27] Junfeng Z, Xin Z, Guichuan L, et al. Selective removal of heavy metals from saline water by nanofiltration[J]. Desalination, 2022, 525.
- [28] 陈建伟. 膜分离技术在重金属废水处理中的应用研究进展[J]. 广东化工, 2009, 36(4): 132-135.
- [29] 康雪晶, 魏永杰. 膜分离法处理重金属废水研究进展[J]. 广东化工, 2016, 43(12): 143-144.
- [30] 肖贤汉. 一种重金属废水智能膜分离装置: CN202322171316.4[P]. 2024-04-05.
- [31] 陈健, 陈雷. 一种电驱动膜分离装置: CN202322055844.3[P]. 2024-03-01.
- [32] 方程, 王旭彤, 杨涛, 等. 电化学法脱除污泥中重金属研究进展[J]. 环境生态学, 2022, 4(6): 80-84, 90.
- [33] 顾祝禹, 艾克拜尔·伊拉洪, 吐尔逊·吐尔洪. 电化学方法去除污泥中重金属的研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(10): 2547-2551.
- [34] 苏丹丹, 杨晓霞, 贾庆明. 电化学处理废水研究进展[J]. 化工技术与开发, 2010, 39(9): 38-41.
- [35] Zongwei W, Zhongxin T, Hui L, et al. Direct current electrochemical method for removal and recovery of heavy metals from water using straw biochar electrode[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 339.
- [36] Xiaojing L, Jinling W, Jianlong W. Electro-adsorption of Sr(II) from aqueous solution by activated carbon cloth/nickel hexacyanoferrate composite electrode through capacitive deionization[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 380: 2.
- [37] 徐国民, 郭立涛, 王建红, 等. 一种改进的大面积电解槽装置: CN202220495545.4[P]. 2022-08-30.
- [38] 向向阳. 一种改进型电解槽内挡板: CN202321746518.0[P]. 2024-01-02.
- [39] 朱亦珺. 生物吸附法处理污泥中重金属镍[J]. 有色金属工程, 2019, 9(7): 104-108.
- [40] 张益硕, 周仲魁, 李龙祥, 等. 羟基磷灰石改性膨润土对铀的吸附效果及其机制[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6740-6755.
- [41] 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.
- [42] Zhong Q, Yue Q, Li Q, et al. Removal of Cu(II) and Cr(VI) from wastewater by an amphoteric sorbent based on cellulose-rich biomass[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 111: 788-796.

- [43] Ren-Xiang W, Gao-Feng Z, Wen-Wang L, et al. Electro-spun chitosan nanofiber membrane for adsorption of Cu(II) from aqueous solution: fabrication, characterization and performance. [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2018, 18(8):5624-5635.
- [44] Xiaoyan W, Wenyue W, Wenpeng W, et al. Enhanced effect and mechanism of nano Fe-Ca bimetallic oxide modified substrate on Cu(II) and Ni(II) removal in constructed wetland. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 456131689-131689.
- [45] 倪健. 一种工业废水处理方法: CN202210145599. 2 [P]. 2022-05-27.
- [46] 黄震, 李家滨, 李明春, 等. 一种活性炭吸附罐: CN202123133113. 3 [P]. 2022-04-22.
- [47] 高君丽, 韩雪涛, 张剑勇, 等. 湖山铀矿离子交换工艺的改进优化研究[J]. 有色设备, 2023, 37(2):65-69.
- [48] 王有群, 郑智阳, 张志宾, 等. 改性 TiO<sub>2</sub> 光催化剂去除废水中重金属离子研究进展[J]. 湿法冶金, 2018, 37(4):260-266.
- [49] 龚逸, 李小燕, 张益硕, 等. 石榴皮炭负载 CaTiO<sub>3</sub> 复合材料去除溶液中 U(VI) 的性能与机制[J]. 复合材料学报, 2024, 41(3):1327-1337.
- [50] Jiangli S, Yanping H, Zebin Y, et al. Visible-light-driven Z-scheme Zn<sub>3</sub>In<sub>2</sub>S<sub>6</sub>/AgBr photocatalyst for boosting simultaneous Cr(VI) reduction and metronidazole oxidation: Kinetics, degradation pathways and mechanism[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 419126543-126543.
- [51] Jiyong Z, Yuhao M, Wentao Z, et al. CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/calcined ZnAlBi-LDHs heterojunction: simultaneous removal of Cr(VI) and tetracycline through effective adsorption and photocatalytic redox [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 365
- [52] 刘畅, 窦琳, 张益硕. 不同形貌硫化锡对六价铀的光催化性能及机理[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(5):144-150.
- [53] 习虎. 一种平板型防爆光催化反应器: CN202321942377. X [P]. 2024-03-22.
- [54] 赵振兵, 龚力迅, 罗长锋, 等. 光催化反应器和光催化反应装置: CN202321626299. 2 [P]. 2024-04-26.
- [55] 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.

## Research progress of heavy metal wastewater treatment equipment

TANG Li

(East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Heavy metal ions containing cadmium (Cd), copper (Cu), copper (Cu), mercury (Hg), zinc (Zn), arsenic (As), nickel (Ni), chromium (Cr), cobalt (Co) and lead (Pb) are usually discharged in industrial production, mine discharge, agricultural activities and urban life. This kind of wastewater is characterized by toxicity, refractory degradation and metabolic difficulties. If not treated, directly discharged, it will cause pollution to soil and water, will be transmitted through the food chain, and will affect human health. This paper summarizes the technology, equipment and process for treating wastewater containing heavy metal ions.

**Key words:** heavy metal wastewater; wastewater treatment; chemical precipitation; ion exchange; membrane separation; electrochemical method; adsorption; photocatalysis ▲