

新型除磷剂在含磷废水中的应用与展望

李传义, 景绍慧

(宜昌邦普宜化新材料有限公司, 湖北 宜昌 443000)

[摘要] 含磷废水的排放问题日益严峻, 对水体环境造成严重影响。综述含磷废水常见的除磷方法, 包括化学沉淀法、离子交换法、结晶法、生物吸收法、膜生物反应法、吸附法、电解法等, 并对不同除磷方法的原理及优劣势进行比较。介绍磷酸盐废水处理中新型除磷剂海绵铁吸附除磷剂、阳极氧化废水除磷剂、复合除磷剂、改性膨润土材料除磷剂的开发与应用, 通过实际案例分析, 验证这些新型除磷剂在处理磷酸盐废水中的有效性和可行性, 为磷酸盐废水处理提供了新的技术路径和解决方案。对除磷剂的未来发展提出建议。

[关键词] 新型除磷剂; 含磷废水; 海绵铁吸附除磷剂; 阳极氧化废水除磷剂; 复合除磷剂; 改性膨润土; 应用

[中图分类号] X703 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 03-0080-07

Application and prospect of new phosphorus removal agents in phosphorus containing wastewater

LI Chuanyi, JING Shaohui

(Yichang Yihua-Brunp New Material Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: The discharge problem of phosphorus containing wastewater is becoming increasingly severe, causing serious impacts on the water environment. The common phosphorus removal methods for phosphorus containing wastewater are summarized, including chemical precipitation method, ion exchange method, crystallization method, biological absorption method, membrane bioreactor method, adsorption method, and electrolysis method, and the principles, advantages and disadvantages of different phosphorus removal methods are compared. The development and application of new phosphorus removal agents in the treatment of phosphate wastewater are introduced, such as sponge iron adsorption phosphorus removal agent, anodizing wastewater phosphorus removal agent, composite phosphorus removal agent, and modified bentonite material phosphorus removal agent. Through practical case analysis, the effectiveness and feasibility of these new phosphorus removal agents in the treatment of phosphate wastewater are verified, providing new technical paths and solutions for phosphate wastewater treatment. The suggestions for the development of phosphorus removal agents in future are provided.

Key words: new phosphorus removal agents; phosphorus containing wastewater; sponge iron adsorption phosphorus removal agent; anodizing wastewater phosphorus removal agent; composite phosphorus removal agent; modified bentonite; application

随着我国经济和工业的快速发展, 磷酸盐作为不可或缺的组成部分, 在工业和生活中被广泛应用^[1]。与此同时, 磷酸盐废水排放问题日益严峻, 对水体环境造成严重影响。磷酸盐废水来源于化工、农业和食品加工等众多产业, 大量含磷污水若不进行处理或经过处理后的磷含量仍未达标, 便排入河流、湖泊、海洋等高敏水体环境中, 无疑会造成水体富营养化, 当水体中的TP(总磷)质量浓度超过0.02 mg/L时, 会导致水体缺氧, 从而呈

现出富营养化状态^[2-4]。面对“磷污染”和“磷危机”问题, 磷的高效去除以及可持续利用引起研究者普遍关注。

针对日益严格的磷排放要求, 为实现城市污水高效、经济的深度除磷净化, 研发高性能新型化学除磷剂是关键。传统的除磷方法, 例如化学沉淀法和生物处理法虽然得到了广泛的应用, 但仍然存在处理费用较高、效果不够稳定等问题。近年来, 随着材料科学与化学工程技术的发展, 新型除磷剂层

收稿日期: 2024-12-19; 修回日期: 2025-12-09

作者简介: 李传义(1979—), 男, 湖北宜昌人, 化工工程师, 磷化工技术组经理, 从事磷化工工艺技术研究。

出不穷，给磷酸盐废水的处理带来新的契机与挑战。本文结合实际情况，就新型除磷剂的开发与应用进行综述，旨在为实际工作提供一定的帮助。

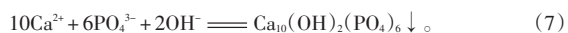
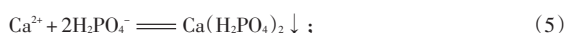
1 含磷废水除磷方法概述

含磷废水除磷方法大致可分为物理化学处理法、生物处理法和其他方法^[5]。

1.1 物理化学处理法

1.1.1 化学沉淀法

化学沉淀法除磷是指添加某种化学药剂到含磷废水中，与废水中的磷酸盐反应生成不溶性沉淀物，以达到除磷目的^[6]。该方法应用广泛、操作简便、成本低、去除效果好，且不易受废水水质影响，被广泛应用到实际化工生产过程中^[7]。部分研究者发现化学沉淀法可以形成最稳定且难溶性金属磷酸盐，但必须对溶液的酸碱度进行调节，从而进一步控制金属离子与磷之间的浓度比^[8]。化学沉淀法除磷根据药剂的作用进程，会经历以下 4 个阶段：沉淀反应、凝聚作用、絮凝作用以及固液分离。前两个阶段是在同一个混合体系内进行，目的是加快沉淀剂在污水中的混合；絮凝过程中阴、阳离子会相互结合，形成更大的粒子絮体团，增加沉淀颗粒物的质量和体积，便于后续的固液分离。常见的化学沉淀法除磷包括以下反应：



在整个化学沉淀法除磷过程中要格外注意体系 pH、金属离子与磷之间的浓度比，以形成稳定的、难溶性的金属磷酸盐^[8-9]。

1.1.2 离子交换法

离子交换法主要是利用阴离子型交换树脂有选择性地对污水中的磷进行交换，通过化学反应将水中的无机磷离子吸附到树脂表面，从而实现去除废水中磷的目的^[10]。反应的一般形式为：

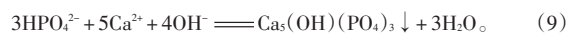


但树脂易中毒、交换容量低和共存阴离子干扰严重等问题限制了该法的发展，因此在实际工业化应用过程中难以得到应用。

1.1.3 结晶法

结晶法除磷是利用污水中的磷酸根离子与钙离

子和氢氧根离子发生反应，在作为晶核的除磷剂上析出羟基钙磷灰石 ($\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$)，该过程被称为晶吸现象^[11]。其反应式如下：



作为晶核的除磷剂大部分都是含钙的矿物质材料，如磷矿石、骨炭、高炉铁渣等，其中以磷矿石和骨炭的效果最好^[12]。结晶法除磷一般采用过滤式通水法，占地面积小、管理费用低且易于控制，但当污水中存在大量有机物时，容易造成除磷剂失效，大量的固体悬浮物会造成通水反应塔堵塞^[11]。

1.2 生物处理法

1.2.1 生物吸收法

生物吸收法是利用生物吸收氮、磷元素进行代谢这一自然规律来去除水体中的营养物质的方法^[13]。国内外常采用藻类等水生植物除去富营养化水体中的氮、磷，这是因为藻类能在富营养化水体环境中大量地生长、繁殖，并吸收水体中的营养成分，若能采取有效手段有效地控制其生长繁殖，就可以得到较好的去氮除磷效果^[14]。图 1 是最常见的生物吸收除磷法 A₂O 工艺流程^[13]。

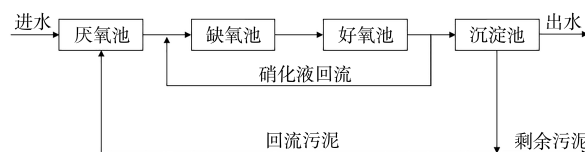


图 1 生物吸收法除磷 A₂O 工艺流程

Fig. 1 Process flow of phosphorus removal by biological method

由图 1 可知，废水先进入厌氧段进行氨化反应及释磷，接着进入缺氧段进行反硝化，最后为好氧段进行硝化反应及吸磷，部分硝化液回流至缺氧段，部分污泥回流至厌氧段^[13-14]。A₂O 工艺具有工艺流程简单、活性污泥不易膨胀、基建及运行费用低等特点。但生物吸收法的最大缺点是具有局部性，对水质环境要求比较苛刻。因此，生物吸收法只有与其他方法相结合使用，才能达到最佳的除磷效果。

1.2.2 膜生物反应法

膜技术用于废水处理除磷主要是与生物法相结合组成膜生物反应器^[5]。当今膜生物反应器有许多种类，根据膜组件在膜生物反应器中所起的作用不同大致可分为分离膜生物反应器、无泡曝气膜生物反应器和萃取膜生物反应器^[15]。膜生物反应法与生物吸收法相比较，在经济和技术上都有显著的优势；但无论是除磷还是回收磷，膜生物反应法只适用于特定的化合物、特定的污水，这是其除磷、回收磷难以克服的应用上的障碍^[16]。

1.3 其他方法

1.3.1 吸附法

吸附法除磷主要是依靠某些多孔或大比表面积的吸附剂吸附污水中的磷酸根离子,达到去除磷的目的^[4]。同时利用吸附剂可解吸的性质,吸附—解吸来回切换,既能消除磷污染,又可回收磷资源。该方法产生污泥少,且所需的处理设备简单,效果较为稳定^[5]。

吸附法的关键在于吸附剂的选择,吸附剂是具有很强吸附能力的多孔物质,主要包括活性炭、膨润土和一些天然吸附剂(如玉米棒子、椰子壳和棕榈纤维)等^[17],此外还可以使用微生物和污泥中的

腐殖质作为吸附剂。据报道,将天然沸石、膨润土作为基材,经氯化镁和氯化铝处理并活化后制得的新型吸附剂FMA和BMA,对磷有着良好的吸附能力,用来处理含磷废水时,磷去除率高达95%以上^[18]。

1.3.2 电解法

电解法常将铜、铝、铁等作为电极的主要材料,来去除水中的杂质。相对于其他方法,电解法装置简单,控制容易,但易产生大量含磷污泥^[19]。电解法除磷率高但电极材料消耗量较大,运行费用较高。

1.4 小结

对不同除磷方法的综合比较见表1。

表1 不同除磷方法对比

Table 1 Comparison of different phosphorus removal methods

除磷方法	除磷原理	优势	劣势
化学沉淀法	添加化学药剂到废水中,使其与废水中磷酸盐反应生成不溶性沉淀物,以达到除磷的目的	应用广泛、操作简便、磷去除效果好	需严格把控体系pH、金属离子与磷之间的浓度比,以形成稳定的难溶性金属磷酸盐
离子交换法	利用阴离子型交换树脂,有选择性地对污水中的磷进行交换,将无机磷离子吸附到树脂表面,以去除废水中的磷	对待定磷形态选择性好	树脂易中毒、交换容量低,在实际废水中,硫酸根、硝酸根等共存阴离子会优先占据交换位点,导致除磷效率下降
结晶法	污水中的磷酸根离子与钙离子和氢氧根离子发生反应,在除磷剂上析出羟基钙磷灰石	占地面积小、管理费用低、易于控制	除磷剂易失效,大量的固体悬浮物会造成通水反应塔堵塞
生物吸收法	利用生物吸收氮、磷元素进行代谢这一自然规律,来去除水体中营养物质的方法	工艺流程简单,活性污泥不易膨胀、基建及运行费用低	具有局部性,对水质环境要求比较苛刻
膜生物反应法	与生物法相结合组成膜生物反应器,对特定含磷物质进行吸附	高效、无污染,具有显著技术和经济优势	只适用于特定的化合物、特定的污水
吸附法	依靠多孔或大比表面积的吸附剂吸附污水中的磷酸根离子	产生污泥少,所需的处理设备简单,效果较为稳定	可供选择的吸附剂较少
电解法	将铜、铝、铁等作为电极的主要材料,来去除水中的杂质	装置简单,控制容易,除磷率高	易产生大量含磷污泥,运行费用高

从表1可以看出,各种除磷方法各有利弊,若想达到更好的除磷效果,须综合考虑操作性、经济性和环保性等因素,常采用两种或多种除磷方法相互配合以获得更佳效果。

2 新型除磷剂应用实例

2.1 海绵铁吸附除磷剂

海绵铁作为一种新型水处理材料,是由铁精矿粉或氧化铁经过研磨、磁选后再经过高温烧结、冷却、冲洗、破碎和筛选得到的多孔状颗粒物质,其主要成分是铁氧化物。图2^[20]是海绵铁除磷的工艺示意图。

海绵铁的除磷机制主要是吸附和还原作用。

(1) 吸附作用:海绵铁表面存在大量的极高活性的物理吸附与化学吸附官能团,这些官能团自带一定的电负性,可吸附阳离子和 π -电子层等^[21]。

(2) 还原作用:铁可以形成不同的氧化态,而不同氧化态的铁呈现出不同价态,其还原能力也有所不同。海绵铁所具有的还原能力对变形、分裂结

构的P—O化合物相当活跃,因此磷酸盐的还原过程也会加速,而自由基产生的过程可极大地缓解进

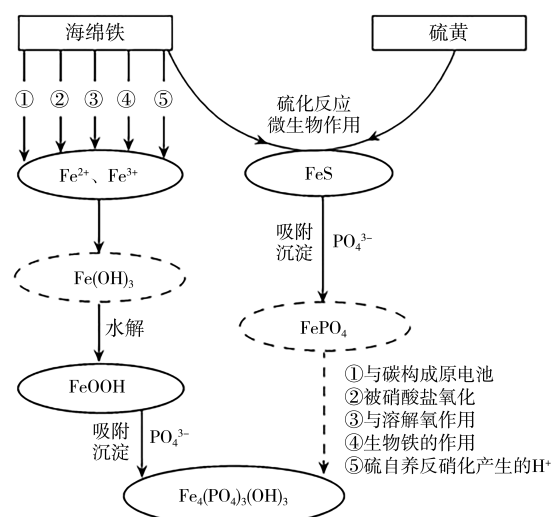


图2 海绵铁除磷工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phosphorus removal process with sponge iron

一步自氧化过程,从而能够解决磷酸盐废水去除过程中间产物产生的问题^[20]。

2.2 阳极氧化废水除磷剂

阳极氧化废水除磷剂主要是利用化学沉淀、吸附和离子交换等手段来脱除废水中磷^[22]。当废水中磷酸盐浓度较高时,除磷剂有效成分与磷酸盐起化学反应生成难溶磷酸盐沉淀实现除磷^[8]。同时,该除磷剂对废水中磷离子也有一定吸附性能,进一步增强除磷效果。阳极氧化废水除磷剂除磷过程一般包括下列步骤^[23]。

(1) 选料:选用合适的化学原料,如铝盐、铁盐、钙盐等为主要除磷剂。这类原料除磷效果好,价格比较便宜。

(2) 配方设计:针对阳极氧化废水特性及除磷要求,制定合理的除磷配方。配方中可加入某些辅助成分,如表面活性剂和絮凝剂来提升除磷剂性能。

(3) 工艺方法:采用混合、搅拌和加热等手段,按照预定的配方比例混合原料。

在后续工艺参数调控方面,必须严格控制反应条件,如温度、pH等,以确保除磷剂的质量和性能^[22]。

(1) pH:控制废水的pH在特定范围内,一般为酸性或弱酸性条件,以促进阳极氧化反应的进行和磷的去除。

(2) 电流密度:调整电流密度,确保阳极氧化过程中有足够的电化学反应强度,提高除磷效率。

(3) 反应时间:确定除磷剂反应时间,根据废水的磷含量和处理要求,合理设置时间,保证充分除磷。

焦伟丽等^[23]使用一种阳极氧化废水的处理系统,依次经第一pH调节池调节pH至3.0、第二pH调节池投加氢氧化钠调整pH至4.0,再依次经过滤系统、超滤系统和反渗透系统,将回用水集中收集于蓄水池,减少超滤系统和反渗透系统的污垢。吴文明等^[24]公开了一种阳极氧化化学抛光工艺中产生的含磷废水的除磷方法:该方法工艺简单、废水处置成本低、污水产泥量低,对低浓度含磷废水($w(\text{P}) \leq 1\,000 \times 10^{-6}$)磷去除率可达95%以上,对高浓度含磷废水($\rho(\text{P}) 10\,000 \sim 50\,000 \text{ mg/L}$)磷去除率可达97%,可广泛应用于阳极氧化行业化学抛光废水的处理。

2.3 复合除磷剂

在处理磷酸盐废水时,研制复合除磷剂成了一个重要研究领域,复合除磷剂一般由几种组分复配

而成,以协同作用达到高效去除磷酸盐的目的,如化学沉淀剂、吸附剂、絮凝剂与其他各种组分复合使用,能同时起到化学沉淀、吸附与絮凝的效果,以提高磷酸盐去除效率^[25]。普通复合除磷剂包括铁盐、铝盐、高分子絮凝剂等,通过调节各组分配比,使其性能达到最佳,如加大铁盐或铝盐占比可改善化学沉淀效果;加大高分子絮凝剂占比可改善沉淀絮凝效果^[5, 25]。

通常情况下,复合除磷剂以中性或弱碱性除磷效果为佳,同时有机物的存在有可能与磷酸根离子争夺除磷剂活性成分而使除磷效果下降,所以有必要针对废水具体情况选用适当的复合除磷剂和调节其使用工况^[26]。复合除磷剂除磷过程一般包括下列步骤^[27]。

(1) 选料:选用适当的铝盐、铁盐、钙盐、镁盐及其他化学原料为复合除磷剂主体,同时可选用某些辅助成分如絮凝剂和助凝剂。

(2) 配方设计:针对废水特点及除磷要求,制定复合除磷剂的合理配方。

此外,配方还需综合考虑各组分间的协同作用来改善除磷效果,通过调控以下参数可有效发挥除磷剂作用。

(1) 复合除磷剂配方比例:制备过程中通过优化复合除磷剂的配方比例,使各成分协同作用,以发挥最佳的除磷效果。

(2) pH:调节废水的pH,以适应复合除磷剂的作用环境,提高磷的去除率。

(3) 搅拌转速与反应时间:通过控制搅拌转速和时间,确保复合除磷剂与废水充分混合反应。

马俊华等^[28]公开了一种高效复合除磷剂及其制备方法,该方法在三氯化铁溶液中加入聚合氯化铝和添加剂并搅拌均匀,采用液碱调节溶液pH至1.0~2.5获得高效复合除磷剂,应用于污水处理时除磷效果优良。马韩静等^[29]为使出水达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类标准($\rho(\text{P}) \leq 0.3 \text{ mg/L}$),将 FeCl_3 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 按 $n(\text{Fe}):n(\text{Al})=3:1$ 配制复合除磷剂,考察在分次投加方式下的除磷效果,结果表明:选择复合除磷剂应用于实际生产时效果较好,每处理1 t $\rho(\text{P}) 5 \text{ mg/L}$ 的废水成本约为0.22元。袁霄等^[30]公开了一种高效复合除磷剂的制备方法,借助生物炭多孔结构的吸附作用对污水中磷元素进行吸附,大大增强了除磷剂的除磷效果。

2.4 改性膨润土材料作为除磷剂

膨润土为天然黏土矿物,其比表面积大、孔

隙结构丰富、吸附磷酸盐能力强,但未改性膨润土吸附性能受到限制,无法达到磷酸盐废水处理要求^[31]。因此,改性膨润土除磷性能已成为人们关注的焦点。

改性膨润土材料有物理与化学改性两种制备工艺^[32-33]:物理改性主要改变膨润土颗粒大小、比表面积和其他物理性质,从而改善吸附性能,如通过超声波处理和机械研磨可使膨润土颗粒更小,比表面积更大,以增强吸附磷酸盐的能力;化学改性则是通过在膨润土表面引入特定的化学基团,改变其表面性质,提高其对磷酸盐的吸附选择性和吸附容量,如通过酸处理、碱处理和有机改性可将羟基、羧基和胺基作为官能团引入膨润土的表面,它们可与磷酸根离子发生化学反应形成稳定化学键,使膨润土吸附磷酸盐能力增强。

在实践中,改良后的膨润土不仅可以单独作为高效除磷剂,还可与其他除磷剂结合,从而增强磷酸盐废水的处理能力,以协同方式达到有效脱除磷酸盐的目的^[34]。另外,改性膨润土材料投入使用后,可采用简易处理方式回收再生,降低了环境二次污染。改性膨润土材料制备一般由如下步骤组成^[35]。

(1) 选材:选用品质较佳的天然膨润土(需纯度高)为原料,吸附性能强。

(2) 改性处理:用合适的改性方法处理天然膨润土,常用方法有酸改性、碱改性和有机改性。酸改性可溶蚀膨润土中的杂质矿物,优化孔隙结构,增大膨润土比表面积,强化吸附性能等;碱改性则活化膨润土表面的硅铝结构,引入大量羟基基团,提升其对磷酸根离子的化学吸附能力;有机改性可将有机基团引入膨润土表面以增强其选择性吸附磷的性能。

(3) 制备过程:改性膨润土经烘干、破碎等步骤制得改性膨润土材料。在配制过程中要对反应条件进行控制,例如温度、时间以及改性剂的添加量,这样才能保证改性膨润土材料的品质以及性能。

曹琳等^[36]为解决富营养化水体同步除藻、除磷的问题,采用膨润土作为基质材料,通过壳聚糖和钨进行复合改性处理,制备了壳聚糖-钨复合改性膨润土(CLMB),结果表明:制备的CLMB在投加量为50 mg/L时,叶绿素a(Chl-a)和浊度去除率分别为95.63%和92.55%;CLMB在pH为4~8及淡水环境下除藻效率较高;在35℃时CLMB对磷的饱和吸附量达到13.46 mg/g。范恒等^[37]以C8烷基多糖苷季铵盐和AlCl₃为改性剂对钠基膨润土进行改性,结果

表明:在有机改性剂用量0.03 g/g、铝改性剂用量9 mmol/g条件下制备的改性膨润土,对初始质量浓度50 mg/L的模拟含磷废水磷去除率达到96%以上,对实际矿山含磷废水平均磷去除率为87.83%。

3 除磷剂未来发展建议

针对日益严格的磷排放要求,为实现城市污水高效、经济深度除磷净化,研发高性能新型化学除磷剂是关键。当前,除磷剂行业面临的主要挑战包括:技术创新不足,导致产品同质化严重;原材料价格波动大,影响企业成本控制;环保政策调整带来的市场风险。但这些挑战也孕育着巨大的机遇,未来除磷剂的发展可从以下几个方面入手。

(1) 技术创新是推动行业发展的关键。企业需要加大研发投入,推动产品升级和技术创新,以满足市场多样化的需求。例如开发新型高效除磷剂、优化除磷工艺等,以提高除磷效率和降低处理成本。

(2) 环保政策调整为行业迎来新的发展机遇。随着国家对环保事业的重视和投入增加,污水处理和磷污染治理将成为重点发展领域,高效除磷剂的研发将作为重要环保药剂,在这一领域发挥重要作用。

(3) 国际合作与交流将为行业发展注入新动力。通过与国际先进企业和研发机构的合作与交流,引进先进技术和管理经验,推动我国高效除磷剂行业向更高水平发展。

总之,未来建议进一步推进高效除磷剂的推广应用研究,拓展应用范围,探索其可行性,通过优势互补原则,开发新型高效的多功能脱氮除磷药剂,可更有效地解决水污染问题,同时推动行业的健康发展。

[参考文献]

- [1] 秦晓鹏.新型除磷剂在水体中除磷的应用性研究[J].云南化工,2018,45(6):75-76.
QIN X P. Study on the Application of a New Type of Phosphorus Detector in Water [J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45 (6):75-76.
- [2] 邸诗雨,齐泽宁,单保贞.新型高效除磷剂的应用研究[J].给排水,2017,53(5):108-110.
- [3] 张端鑫.城市污水处理化学除磷药剂的应用[J].化工设计通讯,2020,46(11):188-189.
ZHANG D X. Application of Chemical Phosphorus Removal Agents in Municipal Wastewater Treatment [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020,46(11):188-189.
- [4] 刘君,邱敬贤,梁凤仪,等.除磷剂在废水处理过程中的研究进展[J].再生资源与循环经济,2019,12(9):42-44.
LIU J, QIU J X, LIANG F Y, et al. Research progress of

- phosphorus removal agent in wastewater treatment[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2019, 12(9):42-44.
- [5] 邱敬贤,孙慧智,李婕,等.废水除磷技术的研究进展[J].*广州化工*, 2024, 52(19):4-7.
- QIU J X, SUN H Z, LI J, et al. Research Progress on Phosphorus Removal from Wastewater [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2024, 52(19):4-7.
- [6] 瞿晶晶,黄胜,韩康,等.AAO+MBR+化学沉淀除磷工艺在高磷生活污水中的工程应用[J].*环境保护与循环经济*, 2024, 44(3):39-44.
- [7] 竺叶青,黄焱,江博.几种化学除磷剂除磷效果研究[J].*广东化工*, 2018, 45(12):114-115.
- ZHU Y Q, HUANG Y, JIANG B. Study on Phosphorus Removal Efficiency of Several Chemical Phosphorus Removal Agents [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(12):114-115.
- [8] 谢朝新,王嘉粤,龙向宇,等.同步化学沉淀除磷影响生物除磷性能的研究进展[J].*当代化工*, 2021, 50(6):1412-1418.
- XIE C X, WANG J Y, LONG X Y, et al. Research Progress in the Effect of Simultaneous Chemical Precipitation on the Performance of Biological Phosphorus Removal [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2021, 50(6):1412-1418.
- [9] 刘欣.污水化学除磷剂的筛选及应用研究[D].大连:大连交通大学, 2019.
- LIU X. Study on Chemical Phosphorus Removal Agent and Application for Sewage [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- [10] 赵鹏.离子交换型活性炭的制备及其脱氮除磷性能[D].太原:太原理工大学, 2020.
- ZHAO P. Preparation of Ion-exchange Activated Carbon and Its Performance of Nitrogen and Phosphorus Removal [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [11] 齐震,刘汝鹏,徐林煦,等.诱导结晶法除磷的影响因素对去除效果的影响[J/OL].*工业水处理*. <http://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2023-0926>.
- QI Z, LIU R P, XU L X, et al. Factors influencing phosphorus removal by induced crystallization method and the effect of reactors on the efficiency [J/OL]. *Industrial Water Treatment*. <http://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2023-0926>.
- [12] 邢超,裴董超,林梓希,等.结晶法去除与回收废水中磷的研究进展[J].*净水技术*, 2022, 41(3):20-25.
- XIN C, QIU D C, LIN Z X, et al. Research progress of phosphorus removal and recovery from wastewater by crystallization methods [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(3):20-25.
- [13] 陈仁杰,荆肇乾,谢禹,等.污水生物强化磷回收技术研究[J].*应用化工*, 2021, 50(5):1377-1381.
- CHEN R J, JING Z Q, XIE Y, et al. Research on wastewater biological enhanced phosphorus recovery technology [J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(5):1377-1381.
- [14] 罗丽芳.污水生物脱氮除磷研究进展[J].*生物化工*, 2021, 7(2):137-141.
- LUO L F. Research Progress of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal in Wastewater [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2021, 7(2):137-141.
- [15] 毕贞,武静,欧阳志康,等.聚磷生物膜法磷回收研究进展[J].*微生物学通报*, 2022, 49(8):3387-3400.
- BI Z, WU J, OUYANG Z K, et al. Phosphorus recovery by polyphosphate-accumulating organisms biofilm system: A review [J]. *Microbiology China*, 2022, 49(8):3387-3400.
- [16] 张星宇.生物膜法在低进水磷浓度条件下的磷酸盐富集研究[D].苏州:苏州科技大学, 2022.
- ZHANG X Y. Study on phosphate enrichment under low influent phosphorus concentration by biofilm method [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2022.
- [17] 万琼,贾真真,喻盈捷,等.吸附除磷剂的研究进展[J].*当代化工研究*, 2020(21):4-6.
- WAN Q, JIA Z Z, YU Y J, et al. Research Progress in Phosphorus-removal Absorbents [J]. *Modern Chemical Research*, 2020(21):4-6.
- [18] 李晓燕.吸附法除磷技术发展[J].*中国高新区*, 2017(10):13-14.
- [19] 聂利维.高磷铁矿湿法脱磷废水除磷工艺的探讨[J].*化工设计通讯*, 2017, 43(2):165.
- NIE L W. Study on Phosphorus Removal Process of High Phosphorus Iron Ore [J]. *Chemical Engineering Design Communication*, 2017, 43(2):165.
- [20] 朱红娟,王亚娥,李杰,等.海绵铁在脱氮和除磷中的研究进展[J].*应用化工*, 2023, 52(4):1182-1187.
- ZHU H J, WANG Y E, LI J, et al. Application and prospect of sponge iron in nitrogen and phosphorus removal [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(4):1182-1187.
- [21] 胡飞飞,朱韩依,郭巧换,等.海绵铁对污水中氮磷去除实验研究[J].*当代化工研究*, 2023(3):77-80.
- HU F F, ZHU H Y, GUO Q H, et al. Study on the Effect of Sponge Iron on Removal of Nitrogen and Phosphorus in Tail Water of Sewage Plant [J]. *Modern Chemical Research*, 2023(3):77-80.
- [22] 刘欣,文淦斌,黄春梅.金属外壳阳极氧化废水分类处理及回用[J].*广东化工*, 2017, 44(14):183-184.
- LIU X, WEN G B, HUANG C M. Classification Treatment and Reuse of Anodic Oxidation Wastewater from Metal Enclosures [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44(14):183-184.
- [23] 焦伟丽,吕彩霞,曹志.一种阳极氧化废水的处理系统:CN216236466U[P].2022-04-08.
- [24] 吴文明,周元康,蒋双隆,等.一种阳极氧化化学抛光工艺中产生的含磷废水的除磷方法:CN106186415A[P].2016-12-07.
- [25] 汤爱华,韦芳,李艳艳,等.复合除磷剂及其在市政污水深度除磷中的应用[J].*广东化工*, 2020, 47(10):114-115.
- TANG A H, WEI F, LI Y Y, et al. A Complex Phosphorus Removal Agent and Its Application in Deep Phosphorus Removal of Municipal Sewage [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(10):114-115.
- [26] 李含,许海民,赵雨,等.生物质金属氧化物复合纳米材料用于污水除磷的研究进展[J].*化工新型材料*, 2023, 51(1):238-243.
- LI H, XU H M, ZHAO Y, et al. Research progress of biomass based metal oxide nanocomposites for phosphate removal from wastewater [J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(1):238-243.
- [27] 高耀文,段宁,吴克明,等.硅藻土基复合除磷剂的制备及其吸附性能[J].*生态与农村环境学报*, 2012, 28(6):706-711.
- GAO Y W, DUAN N, WU K M, et al. Preparation and Adsorption Performance of Diatomite-Based Composite

- Phosphorus Removal Agent [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(6): 706-711.
- [28] 马俊华, 董信华. 一种高效复合除磷剂及其制备方法: CN109824131A[P]. 2019-05-13.
- [29] 马韩静, 李玲玲, 孙子惠, 等. 复合除磷剂的使用与分次投加方式对除磷效果的影响[J]. 净水技术, 2019, 38(3): 76-81.
- MA H J, LI L L, SUN Z H, et al. Effect of Compound Phosphorus Removal Agent and Fractional Dosing Method on Phosphorus Removal Efficiency [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(3): 76-81.
- [30] 袁霄, 赵黄浦, 周维啸, 等. 一种高效复合除磷剂、制备方法及应用: CN202110009036.6[P]. 2021-04-23.
- [31] 宋珍霞, 郑伏安, 徐大勇, 等. 微波有机改性膨润土处理含磷废水工艺优化研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(3): 65-68.
- SONG Z X, ZHENG F A, XU D Y, et al. Process Optimization of Phosphorus Wastewater Treatment by Using Organic Modified Bentonite Enhanced by Microwave [J]. Non-Metallic Mines, 2015, 38(3): 65-68.
- [32] 慕利梅, 王图锦, 曹琳, 等. 改性膨润土对水中磷和藻类的同步去除[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(3): 310-315.
- MU L M, WANG T J, CAO L, et al. Simultaneous removal of phosphorus and algae in water by modified bentonite [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(3): 310-315.
- [33] 李广斌. 改性膨润土在水处理中的应用[J]. 科学技术创新, 2018(23): 195-196.
- LI G B. Application of modified bentonite in water treatment [J]. Science and Technology Innovation, 2018(23): 195-196.
- [34] 陆彩妹, 张连峰, 汤睿, 等. 新型膨润土除磷剂的除磷与脱水沉降性能研究[J]. 当代化工, 2023, 52(6): 1261-1266.
- LU C M, ZHANG L F, TANG R, et al. Phosphorus Removal and Sludge Amelioration by New Bentonite-based Dephosphorization Agent [J]. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(6): 1261-1266.
- [35] 李杰松, 黄璐. 改性膨润土对重金属的吸附性能研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(5): 56-62.
- LI J S, HUANG L. Adsorption of Some Heavy Metals in Landfill Leachate by Modified Bentonite [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(5): 56-62.
- [36] 曹琳, 刘煌, 许国静, 等. 壳聚糖-铜改性膨润土的制备及除藻除磷性能[J]. 环境工程学报, 2021, 15(8): 2555-2562.
- CAO L, LIU H, XU G J, et al. Chitosan-lanthanum modified bentonite preparation and its removal performance of algae and phosphorus [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(8): 2555-2562.
- [37] 范恒, 聂锦旭, 吴光锋, 等. 微波改性膨润土对含磷废水的吸附性能研究[J]. 非金属矿, 2014, 37(1): 69-71.
- FAN H, NEI J X, WU G F, et al. Study on Microwave Modified Bentonite and Its Adsorption Properties of Phosphorus [J]. Non-Metallic Mines, 2014, 37(1): 69-71.

(上接第79页)

[参考文献]

- [1] 刘正东, 谭顺仓, 朱桂华. 大型硫酸装置的节能降耗措施[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2024, 39(11): 65-69.
- LIU Z D, TAN S C, ZHU G H. Energy conservation and consumption reduction measures for large-scale sulfuric acid plants [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(11): 65-69.
- [2] 李崇, 杨曼. 2022年上半年我国硫酸行业运行与展望[J]. 磷肥与复肥, 2022, 37(9): 4-8.
- LI C, YANG M. Operation of sulfuric acid industry in China in the first half of 2022 and prospect [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(9): 4-8.
- [3] 王艳红, 龚明. 大型硫磺制酸装置低温热能回收系统运行控制[J]. 硫酸工业, 2012(6): 35-38.
- WANG Y H, GONG M. Operation control of low-level heat recovery system of a large-scale sulphur-burning sulphuric acid plant [J]. Sulphuric Acid Industry, 2012(6): 35-38.
- [4] 马青艳. 800 kt/a 硫磺制酸装置 HRS 高温吸收塔出口酸雾控制[J]. 硫酸工业, 2018(9): 13-15.
- MA Q Y. The acid mist control of the HRS high temperature absorption tower of the 800 kt/a sulphur-burning sulphuric acid plant [J]. Sulphuric Acid Industry, 2018(9): 13-15.
- [5] 何韵涛, 邹玉霜, 孙正东, 等. 250 kt/a 硫磺制酸装置国产化低温热回收系统(DWRHS)设计总结[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2010(4): 1-4, 54.
- HE Y T, ZOU Y S, SUN Z D, et al. Design Summary for a Chinese Low-Temperature Heat Recovery System (DWHR System) of a 250 kt/a Sulfur-based Sulfuric Acid Plant [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2010(4): 1-4, 54.
- [6] 李游. HRS 系统在硫磺制酸装置中的应用[J]. 硫酸工业, 2017(6): 27-28, 33.
- LI Y. Application of HRS system in sulphuric acid plant [J]. Sulphuric Acid Industry, 2017(6): 27-28, 33.
- [7] 杨建全. 硫磺制酸装置低温余热回收技术应用与改进[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2015(4): 44-47, 6.
- YANG J Q. Application and Improve me nt of Low-grade Heat Recovery Technology for Sulfur-burning Sulfuric Acid Plant [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2015(4): 44-47, 6.
- [8] 杨四秦, 张兴旺, 自振华. FD 合金负压稳流型分酸器在铜冶炼烟气制酸中的应用[J]. 硫酸工业, 2019(9): 47-51.
- YANG S Q, ZHANG X W, ZI Z H. Application of FD alloy negative pressure steady flow separator in acid production from copper smelting flue gas [J]. Sulphuric Acid Industry, 2019(9): 47-51.
- [9] 刘纪状, 吴清寰. 大型硫磺制酸装置的热能回收利用[J]. 硫酸工业, 2008(6): 49-52.
- LIU J Z, WU Q H. Heat recovery and utilization in large-scale sulphur-burning sulphuric acid plants [J]. Sulphuric Acid Industry, 2008(6): 49-52.