

高分子材料在污水处理中的应用研究

陈雨彤 方子璇

河北工业大学化工学院 天津 300401

【摘要】随着水资源短缺与污染问题日益严峻,开发高效污水处理技术至关重要,而高分子材料因其独特的分子结构与功能特性,在污水净化领域展现出巨大应用潜力,采用案例分析与效能评估方法探讨各类高分子材料作为絮凝剂、吸附剂及膜材料在污水处理中的应用机制、实际效能、应用过程与污染物去除效果,可知高分子材料能显著提升污水处理效率,尤其在去除重金属和有机污染物方面优势明显,是一种具有广阔发展前景的环境功能材料。

【关键词】高分子材料;污水处理;絮凝剂;吸附剂;膜分离

Research on the Application of Polymer Materials in Wastewater Treatment

Chen Yutong Fang Zixuan

College of Chemical Engineering, Hebei University of Technology Tianjin 300401

【Abstract】With water scarcity and pollution becoming increasingly severe, developing efficient wastewater treatment technologies has become crucial. Polymer materials, due to their unique molecular structures and functional characteristics, demonstrate significant potential in wastewater purification. Through case analysis and performance evaluation methods, this study explores the application mechanisms, practical effectiveness, operational processes, and pollutant removal efficiency of various polymer materials as flocculants, adsorbents, and membrane materials in wastewater treatment. The results indicate that polymer materials can significantly enhance wastewater treatment efficiency, particularly excelling in removing heavy metals and organic pollutants. These materials represent promising environmental functional materials with broad development prospects.

【Key words】polymer materials; wastewater treatment; flocculant; adsorbent; membrane separation

1.引言

水资源短缺与水环境污染成为制约全球可持续发展的重要挑战,因工业生产规模扩大和城市化进程加速,大量含重金属、难降解有机物及营养盐的污水排入自然水体,对生态系统和人类健康构成严重威胁;传统污水处理方法如物理沉淀、化学氧化和生物降解在处理高效性、成本及特定污染物去除方面存在局限性,难以满足日益严格的排放标准与回用需求;在此背景下,开发高效、经济且环境友好的新型水处理材料与技术极为迫切;高分子材料科学发展为解决这一难题提供新途径,此类材料凭借可设计的分子链结构、丰富官能团、优异吸附架桥能力及良好成膜特性,在污水深度处理领域展现巨大应用潜力,像合成及天然高分子絮凝剂有效强化固液分离过程,功能化高分子吸附剂针对性捕获重金属离子,高分子分离膜实现污染物高效筛分与截留;深入研究高分子材料在污水处理中的应用,对推动水处理技术升级、提高水资源循环利用效率、缓解环境压力具有重要现实意义与科学价值。

2.污水处理用高分子材料的类型与特性

2.1 高分子絮凝剂的种类与功能

依据电荷特性与来源,高分子絮凝剂分为阳离子型、阴离子型、非离子型及两性型,其中阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)凭借分子链上携带的季铵盐等正电基团,静电中和作用有效压缩水中带负电胶体颗粒的双电层,且凭借长达数百万分子量的线性结构在颗粒间进行吸附架桥,破坏胶体稳定性,促使微细悬浮物和部分溶解性有机物聚集成体积庞大、结构密实的絮凝体,显著加速沉降或浮选过程,提高固液分离效率^[1]。天然改性高分子絮凝剂如壳聚糖,因其生物相容性和可降解性受到关注,其分子中的氨基和羟基与重金属离子发生螯合作用,并对带负电的胶体产生电性和中和架桥,特别适用于食品、造纸等工业废水中有机胶体的去除,展现环境友好优势;无机高分子絮凝剂如聚合氯化铝(PAC)虽不属于有机高分子范畴,但其预聚态的多核羟桥络离子具有明确高分子形态和高效电中和能力,常与有机高分子絮凝剂复配使用,利用无机絮凝剂电中和与有机絮凝剂吸附架桥的协同效应,处理高浊度、高色度废水时形成更结实、更易分离的矾花,降低处理成本并提升出水水质。

2.2 高分子吸附剂的结构与性能

以多孔网络骨架结构、高比表面积特性及化学修饰引入

的特定功能基团为性能核心,由苯乙烯-二乙烯基苯共聚物形成大孔或凝胶型树脂构成,吸附机制归纳为物理吸附、化学吸附及离子交换等多种形式的高分子吸附剂。其中针对重金属离子去除的螯合树脂,如整合亚氨基二乙酸(IDA)或硫脲基团的聚合物,凭借功能基团中N、O、S等原子提供孤对电子与重金属离子(如 Cu^{+} 、 Pb^{+} 、 Hg^{+})形成稳定配位键,实现从复杂废水体系中对特定金属离子高选择性吸附与富集且吸附容量显著高于传统活性炭;用于去除有机污染物(如酚类、染料、农药)的吸附树脂主要靠发达孔隙结构和巨大比表面积(可达 $1000\text{ m}^2/\text{g}$ 以上),范德华力、疏水相互作用及 $\pi-\pi$ 共轭效应实现对非极性或弱极性有机分子物理吸附,经磺化、胺化等表面改性后树脂引入离子交换位点或极性官能团,增强对极性有机物亲和力与吸附容量;备高吸附速率和卓越吸附选择性且再生循环使用性能为经济可行性关键,多数树脂能通过酸、碱或有机溶剂有效脱附再生恢复吸附能力以满足工业废水深度处理与有价值物质回收连续化操作需求的这些吸附剂。

2.3 高分子膜材料的分离机理

高分子膜材料的分离过程作为一个涉及多种物理化学原理协同作用的复杂过程,分离效能根本上取决于膜材料的化学组成、微观形态结构(含孔径分布、孔隙率、表面粗糙度)以及膜-溶液界面性质;由聚偏氟乙烯(PVDF)、聚砜(PSF)等材料通过相转化法制成的微滤(MF)和超滤(UF)膜,有典型的不对称结构(致密皮层和多孔支撑层),以筛分效应为主的分离机理依靠膜孔径的物理排阻截留悬浮颗粒、细菌、胶体及大分子有机物来实现溶液的澄清除浊^[2]。多为界面聚合制备的聚酰胺薄层复合膜的纳滤(NF)膜,表面通常带负电荷,分离机制为尺寸排阻(筛分效应)与电荷效应(道南排斥)共同作用的结果,对二价及多价离子(如 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+})、小分子有机物(分子量 $200-1000\text{ Da}$)以及染料分子有高截留率且对一价离子保持部分透过性,因而在废水脱色、软化及去除微量有机污染物方面具备独特优势;拥有更为致密的几乎无孔的聚酰胺分离层的反渗透(RO)膜,传质过程遵循溶解-扩散模型,水分子在高压作用下优先吸附并溶解于膜材料中后扩散透过膜层,而水中溶解性盐类、离子及小分子有机物被高效阻隔,从而达成极高度的脱盐和净化,成为海水淡化与再生水回用的核心技术;制约其广泛应用的主要挑战——膜污染,表面接枝改性(如引入聚乙二醇、两性离子聚合物)或制备有机-无机纳米复合膜(如掺杂 TiO_2 、氧化石墨烯)增强膜表面亲水性和抗污染性能,成为提升膜通量、延长膜寿命并降低运行成本的关键研究方向。

3. 高分子材料在污水处理中的作用机制

3.1 絮凝过程中的电荷中和与吸附架桥

高分子絮凝剂核心作用机制始于其链状分子结构所带电荷与污染物表面的静电相互作用,像阳离子型高分子絮凝剂聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDADMAC)或阳离子聚丙烯酰胺(CPAM),因分子链上高密度正电荷基团能迅速中和污水中带负电胶体颗粒(如粘土、细菌、有机碎屑)表面电荷,有效压缩其扩散双电层,显著降低颗粒间静电斥力势能,破坏胶体体系稳定性,为颗粒聚集创造热力学有利条件^[3]。电荷中和后,具有超长分子链(分子量常达数百万至上千万)的高分子聚合物借线性柔性结构在溶液中充分伸展,链节上活性基团通过范德华力、氢键或离子键吸附到多个已脱稳胶体颗粒表面,形成“胶体-高分子-胶体”桥联结构,吸附架桥作用将大量微小絮凝前体拉扯、捆绑,最终聚集成具三维网状结构、密实且易沉降或上浮分离的宏观絮凝体,极大强化固液分离效率并提升出水水质;高分子絮凝过程动力学与最终絮体形态深受聚合物分子量、电荷密度、投加量及溶液化学环境(如pH值、离子强度)影响,过低分子量聚合物可能无法有效长距离架桥,过高电荷密度可能致胶体颗粒表面电荷反转引起再稳现象,最优投加量通常在电中和与再稳区域临界点附近,此时絮凝效果显著,形成絮体尺寸大、强度高、抗剪切能力强,便于后续沉淀或过滤工序高效进行。

3.2 吸附行为中的物理与化学作用

高分子吸附剂对污染物的去除是一个由物理吸附与化学吸附多机制协同的复杂界面过程。物理吸附主要依赖于吸附剂因巨大比表面积和高度发达孔隙结构所产生的强大范德华力和疏水相互作用,如超高交联聚苯乙烯树脂,其BET比表面积超 $1000\text{ m}^2/\text{g}$,庞大疏水聚合物骨架与水体中非极性或弱极性有机污染物(苯系物、氯代烃、多环芳烃等)产生强烈疏水亲和作用,使这些有机物优先从水相中分离并富集于吸附剂孔道内部,实现快速且高容量去除。化学吸附涉及吸附剂表面特异性功能基团与目标污染物间的定向化学键合,如含亚氨基二乙酸(IDA)基团的螯合树脂,其功能基团中氮原子和氧原子作为电子供体,与废水中重金属离子(Cu^{+} 、 Ni^{+} 、 Pb^{+} 等)形成稳定且具特定空间构型的五元环内络合物(螯合物),这种基于配位键的化学作用具极高选择性和结合强度,能将重金属离子从高背景浓度竞争性离子(Na^{+} 、 Ca^{2+} 等)中特异性提取,适用于复杂基质深度净化与贵金属资源回收。吸附过程的效率与极限容量由吸附剂-吸附质间亲和力及吸附剂自身孔道结构共同决定,微孔提供巨大比表面积和主要吸附位点,中孔作为传输通道;化学吸附虽速度可能慢于物理吸附,但因其结合牢固、选择性高,在低浓度、高毒性污染物深度处理方面不可替代,且多数经设计的吸附树脂可通过适当酸、碱或有机溶剂洗脱实现再生循环,保证技术经济可行性。

4. 高分子材料的具体应用与效能分析

4.1 在工业废水处理中的实施案例

在印染行业废水处理中,阳离子聚丙烯酰胺作为高效絮凝剂成功应用于实际工程,凭借其长分子链结构及高密度正电荷基团,有效中和废水中有机染料胶体颗粒表面负电荷、迅速压缩双电层破坏胶体稳定性,强大吸附架桥作用,将微细色度物质、悬浮物及部分溶解性有机物聚集致密且沉降性能优良的絮凝体,显著提升沉淀池固液分离效率,使出水色度与COD指标稳定达到国家排放标准,解决传统工艺处理效果不佳的难题^[1]。在电镀废水深度处理领域,采用装有亚氨基二乙酸螯合树脂的固定床吸附系统净化含镍、铜等重金属的废水,依靠树脂表面精确设计的配位基团与重金属离子发生特异性络合反应形成稳定螯合物,实现重金属离子的高效捕获与富集,让出水重金属浓度持续低于0.1mg/L的严格限值,饱和树脂经盐酸溶液再生后可循环使用多次,不仅实现废水达标排放,更实现有价值金属资源的回收利用,展现循环经济模式的技术优势;高分子材料在工业废水处理中的成功应用,体现其针对特定污染物的精准治理能力,工程实践表明需根据废水水质特性选择合适类型的功能材料并优化工艺参数,这些案例为技术推广提供扎实的实践基础与设计依据。

4.2 对重金属离子的去除效果评估

专为重金属去除设计且整合硫脲、氨基磷酸等特异性螯合基团的功能化高分子吸附材料,对汞、铅等剧毒重金属离子呈现极高亲和力和选择性,在含高浓度钙、镁等竞争性离子的复杂废水环境中仍保持优越吸附容量,实现对目标污染物深度去除直至达到痕量甚至超痕量水平,满足最严格水质标准要求,表现出卓越净化效能;与传统化学沉淀法相比,高分子吸附技术通过吸附-脱附-回收的闭路循环工艺,不仅彻底避免大量含重金属危险废渣产生,极大降低后续危废处置成本与环境风险,还实现有价值金属资源的浓缩与回用,在环境效益与经济效益层面展现显著优势,为可持续废水处理提供可靠路径;对重金属离子去除效能的全面评估需

综合考量吸附容量、选择性系数、动力学速率及再生稳定性等关键指标,功能性高分子材料因在这些方面展现综合性能优势而成为废水深度脱毒与资源化领域的技术首选。

4.3 与传统处理工艺的经济技术对比

相较于依赖大量投加如硫酸铝、聚合氯化铝等无机混凝剂的传统混凝沉淀工艺,采用高效合成高分子絮凝剂虽单位质量成本较高,但以极低投加量即可形成密实度高、沉降速度快的粗大絮体,进而大幅减少(降幅可达30%-50%)污泥产生量并显著缩短水力停留时间,在整体运营成本、占地面积及污泥处置费用方面展现出显著竞争优势,尤其适用于高悬浮物浓度工业废水的预处理;在深度处理环节,与颗粒活性炭吸附相比,功能化高分子吸附树脂虽初始投资较高,却凭借更优异的机械强度、规整的球形颗粒形态以及可定向设计的功能基团,实现更优越的选择性吸附性能、更快的传质动力学以及更便捷的固定床柱式操作与在线再生能力,在长期连续运行条件下的单位污染物处理成本与资源回收价值方面更具经济可行性;全面的经济技术对比揭示出高分子材料应用在提升处理效率、降低污泥产量、实现资源回收以及节约占地面积带来综合效益的全生命周期成本效益优势,完全超越单纯比较药剂费用的传统视角,成为水处理工艺升级与可持续发展的重要方向。

结语

精确设计的分子结构与功能基团,在絮凝沉降、吸附分离及膜过滤等关键环节发挥核心作用,从而在污水处理领域展现出不可替代技术价值的高分子材料,其各类功能性材料能针对性去除污水中的悬浮物、重金属及有机污染物,不仅大幅提升处理效率与出水水质,更实现污泥减量化与重金属资源回收利用,且相较于传统工艺具有高效、经济且环境友好综合优势,为工业废水治理与水资源循环利用提供切实可行解决方案,对推动水处理技术升级与可持续发展具有重要工程指导意义。

参考文献

- [1]许景文. 功能性高分子材料在污水处理中的应用 [J]. 沈阳化工, 1987, (06): 29-34.
- [2]张彩凤. 腐植酸吸附性能的研究及其在污水处理中的应用 [J]. 腐植酸, 2010, (01): 30.
- [3]郝敬辉. 新型高分子材料物理法处理油田污水 [J]. 油气田地面工程, 2010, 29 (07): 101-102
- [4]毛锦龙,胡利华,冯香玲,等. 吸附性高分子材料在油田污水处理中的应用前景分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 34 (05): 268+265.

作者简介: 陈雨彤 (2005—), 女, 河北廊坊人, 本科三年级在读, 研究方向为高分子材料与工程。