

向文慧, 朱琼慧, 陈翠灵, 等. 原子力显微镜在废水处理领域中的应用研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 22-31.

Xiang W H, Zhu Q H, Chen C L, et al. Research progress on application of atomic force microscope in the field of wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 22-31.

原子力显微镜在废水处理领域中的应用研究进展

向文慧, 朱琼慧, 陈翠灵, 苏云, 余箴佳, 何诗淼, 王芳*

(湖北民族大学化学与环境工程学院, 湖北恩施 445000)

摘要 【目的】 人类活动过程中会排放大量废水,然而废水中含有的污染物对人类健康及环境均具有严重的危害,因此研究污染物特性对治理废水有着重要意义。在现有水处理技术基础上,深入探索环境微界面过程的污染控制及净化原理,对改进提升水处理技术具有重要意义。【方法】 文章综述了原子力显微镜(AFM)的工作原理以及近年来 AFM 在工业废水、农业废水、生活废水和医疗废水 4 类废水治理中的应用研究进展,并对 AFM 在废水治理领域的应用前景进行展望。【结果】 AFM 作为一种新型表面微观尺度测量工具,具有纳米级高分辨率、高环境兼容性、多属性分析等优势,在表面形貌和物理性质测量领域备受瞩目。AFM 在废水治理领域中也展现出巨大的应用潜力。研究表明,在工业废水处理中,AFM 可表征膜材料表面形貌与污染层结构,揭示膜污染机理;在农业废水处理中,AFM 能观察农药与土壤胶体间的微观界面作用;在生活废水处理中,AFM 主要用于解析生物处理系统中微生物聚集体的表面特性;在医疗废水处理中,AFM 则被应用于研究抗生素等新污染物与处理材料的纳米尺度作用机制。【结论】 AFM 已成为废水污染物界面行为研究和材料优化的关键工具。未来需进一步深化 AFM 原位观测污染物迁移转化机制的研究,并加强其与拉曼光谱、红外光谱等技术的联用,从分子层面系统揭示污染物在复杂环境微界面的赋存状态与反应过程,以推动废水资源化处理技术的创新发展。

关键词 原子力显微镜; 工业废水; 农业废水; 生活废水; 医疗废水

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)06-0022-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.003

Research Progress on Application of Atomic Force Microscope in the Field of Wastewater Treatment

Xiang Wenhui, Zhu Qionghui, Chen Cuiling, Su Yun, She Zhenjia, He Shimiao, Wang Fang*

(School of Chemistry and Environmental Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China)

Abstract [Objective] During human activities, a large amount of wastewater is discharged, and the pollutants contained in the wastewater pose serious threats to human health and the environment. Therefore, studying the characteristics of pollutants is of great significance for wastewater treatment. On the basis of existing water treatment technologies, in-depth exploration of the pollution control and purification principles of environmental microinterface processes is of great significance for improving and enhancing water treatment technologies. [Methods] This paper reviews the working principle of atomic force microscopy (AFM) and the research progress of AFM applications in the treatment of four types of wastewater: industrial wastewater, agricultural wastewater, domestic wastewater, and medical wastewater. It also looks forward to the application prospects of AFM in the field of wastewater treatment. [Results] As a new tool for measuring surface microstructure, AFM has advantages such as nanometer-level high resolution, high environmental compatibility, and multi-attribute analysis. It has attracted much attention in the field of surface morphology and physical property measurement. AFM also shows great application potential in the field of wastewater treatment. Studies have shown that in industrial wastewater treatment, AFM can characterize the surface morphology of membrane materials and the structure of the fouling layer, revealing the mechanism of membrane fouling; in agricultural wastewater treatment, AFM can observe the microscopic interface

[收稿日期] 2025-06-17

[基金项目] 湖北省自然科学基金计划联合基金项目(2023AFD088);湖北民族大学大学生创新创业训练计划项目(S202310517018)

[作者简介] 向文慧(2002—),女,研究方向为资源化磷回收,E-mail:1615052117@qq.com。

[通信作者] 王芳,女,硕士生导师,研究方向为环境电化学工程,E-mail:fangwangvip2017@163.com。

interaction between pesticides and soil colloids; in domestic wastewater treatment, AFM is mainly used to analyze the surface characteristics of microbial aggregates in biological treatment systems; in medical wastewater treatment, AFM is applied to study the nanoscale interaction mechanism between emerging pollutants such as antibiotics and treatment materials. [**Conclusion**] AFM has become a key tool for studying the interface behavior of wastewater pollutants and optimizing materials. In the future, it is necessary to further deepen the research on the in-situ observation of pollutant migration and transformation mechanisms by AFM, and strengthen its combination with techniques such as Raman spectroscopy and infrared spectroscopy to systematically reveal the existence state and reaction process of pollutants at the complex environmental microinterface at the molecular level, so as to promote the innovative development of wastewater resource treatment technologies.

Keywords atomic force microscope (AFM); industrial wastewater; agricultural wastewater; domestic wastewater; medical wastewater

随着工业和农业等的不断发展,水污染问题日益严重,水体质量不断下降,各类污染物排入水体之中造成部分水资源变为废水,严重地影响了人类的生存环境以及身体健康。废水作为自然界三大公害之一,对人类生存环境以及身体健康有着严重影响。因此,探究运用各类技术或各类材料对废水进行治理且能够更好地对废水中的污染物进行去除成为研究热点。目前,常用的污水处理技术包括生物膜法、催化氧化法、化学法沉淀、活性污泥法等^[1]。在现有水处理技术基础上,深入探索环境微界面过程的污染控制及净化原理,对提升水处理技术具有重要意义。近年来,研究者开发了多种表面形貌检测仪器,包括扫描电子显微镜(SEM)、射电子显微镜(TEM)、扫描隧道显微镜(STM)、原子力显微镜(AFM)等^[2]。其中,AFM因其纳米级高分辨率、高环境兼容性、多属性分析等优势,在表面形貌和物理性质测量领域备受关注。

利用AFM纳米级别的成像分辨率以及皮牛顿级别的力学测量灵敏度进行检测,可获得物质微观结构、局部微区力学和物理性质等信息,并可进行纳米尺度机械加工与检测^[3]。作为表征污染物的微界面环境行为的技术代表,AFM在物质的表面形貌及其环境行为的研究中备受关注。

目前,已有一些关于废水处理技术的研究。例如,Singh等^[4]探讨了碳纳米材料处理水中有机污染物和重金属的能力等。陈虹雨等^[5]系统性地综述了石墨烯、导电聚合物等功能材料在工业废水领域的处理效果。张耀鹏等^[6]用AFM测定2种不同纤维素膜的表面形貌,得到含有不同聚合物含量的膜的孔径大小及分布情况。根据国内外研究现状,AFM技术在水处理研究中应用已逐渐成熟,但目前未有学者对AFM在废水治理领域的应用进行综述。基

于以上论述,本文对AFM在工业废水、农业废水、生活废水、医疗废水处理方面的应用进行综述,并进行总结与展望,以期AFM在废水处理及其他领域中的应用提供参考。

1 AFM 概述

AFM是通过测量探针和被测样品之间的相互作用力的大小,以高分辨反推样品的表面形貌和物理化学性质的检测分析仪器,是研究样品表面形貌和表面力学性质的重要工具^[7]。

1.1 AFM 基本结构

AFM主要由以下几个系统构成:激光系统用于产生激光;微悬臂系统用于进行力-距离反馈;压电驱动器用于进行样品表面扫描和Z轴定位;光电探测器接收光反馈信息;反馈电子线路用于处理反馈信息并输送信号给激振器等。除上述系统之外,AFM还配备有防振系统、防噪声系统、样品探测环境控制系统(温度、湿度、气环境控制),以及计算机控制系统和数据处理系统等,其中的核心部件是激光系统、微悬臂系统、压电驱动器与光电探测器这四大系统^[8]。

1.2 AFM 成像原理

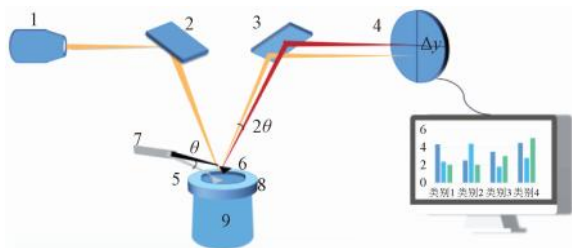
借助AFM测量并记录纳米级探针在探测样品表面这个过程中所受到的力,可以得到探针针尖和样品之间的力-距离曲线^[9]。再通过分析力-距离曲线,就可以得到样品表面的粗糙度、颗粒度、孔结构硬度、黏弹性、压弹性等性质。如图1^[8]所示,在AFM工作时,将其中一端固定,而将另一端装在弹性微悬臂的纳米级针尖上,当探针接近样品表面达一定距离后,样品会在针尖下面被扫描,移动扫描器在X和Y 2个方向扫描,得到探针针尖与样品间相互作用的吸引力或排斥力,从而转换为可被探测到的微悬臂的不同程度的形变量 Δz ^[10]。再根据微悬

臂在移动过程中平衡受力,由胡克定律简单地描述,得式(1)。

$$F = k\Delta z \quad (1)$$

其中: F ——悬臂所受弹力, N;
 k ——微悬臂的弹性系数, N/m;
 Δz ——悬臂的形变量, m。

在 k 和 Δz 已知的情况下,通过式(1)直接求出针尖-样品间相互作用力 F ,即为针尖与样品表面之间的范德华力大小。微悬臂产生的形变或振幅改变十分微小,为了能检测出这个微小的变化,AFM 采用了光杠杆原理。通过将激光束照射在悬臂顶端,利用位置敏感光电二极管检测器 (PSPD) 接收反射激光信号,可实现对样品表面起伏形貌变化的光学放大检测^[11]。



注:1—激光系统;2—平面镜 A;3—平面镜 B;4—四象限光电检测器;5—微悬臂;6—探针;7—压电驱动器;8—样品台及样品;9—压电扫描管。

图 1 AFM 光电检测系统的原理

Fig. 1 Principle of AFM Photoelectric Detection System

AFM 主要有 3 种工作模式:接触模式、非接触模式和轻敲模式。接触模式是 AFM 操作的最简单模式^[12]。接触模式中,悬臂角度是用户设定的一定范围的值,并在整个扫描过程中保持不变。针尖与样品一直保持接触状态,并在其表面上简单的移动,如图 2 中 1~2 段。非接触模式是将控制探针与样品保持一定距离,针尖与样品表面的距离为几纳米到几十纳米,两者的相互作用主要表现为分子间的引力,如图 2 中 3~4 段。轻敲模式是 AFM 的一种新发展工作模式,介于接触模式和非接触模式之间,轻敲模式的针尖与样品表面之间的距离如图 2 中 1~4 段^[13-17]。

2 AFM 在废水治理领域中的应用

AFM 能够更准确地观察物质微界面环境行为,对去除废水中污染物有着重要作用。国内外研究人

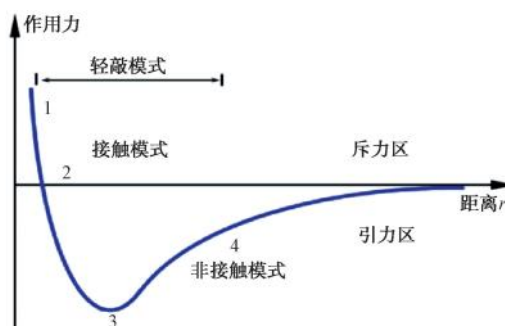


图 2 AFM 的 3 种工作模式在力-距离曲线上的分布^[15]

Fig. 2 Distribution of Three Working Modes of AFM on Force-Distance Curve^[15]

员广泛将 AFM 应用在废水治理领域,根据废水中污染物的来源,主要可将废水分为工业废水、生活废水、医疗废水及农业废水等 4 类。下面将分别介绍 AFM 在这 4 类废水治理中的研究进展。

2.1 工业废水

工业废水种类繁多,成分复杂,含有多种有毒物质,对人类生活和环境造成了严重的影响。AFM 是一种纳米级表面形貌和物理性质测量仪器,在污水处理过程中,可以利用 AFM 观察污染物去除材料的表面形貌及物理性质,是研究者们处理污水中的污染物的一种直接有利的工具。AFM 量化分析与跨学科融合显著提升了纳米尺度问题的解决效率,在废水治理中的应用呈现以下技术演进趋势。

(1) 表面形貌-功能性能定量关联

工业废水中所存在的铬主要为三价铬离子,制革废水中含有大量的重金属铬,三价铬在自然环境中有可能会转变为六价铬,毒性更强,因此铬的超标排放会严重危害生态环境^[18]。Gervas 等^[19]使用 AFM 来确定合成的有机硅介孔材料的颗粒形状和粒径大小。结果表明,以葵花籽油为表面活性剂制备的材料具有小颗粒形态和大的表面积,是废水处理中良好的吸附剂,其适用于制革废水中三价铬离子的去除。

染料废水主要来源于印染、造纸、纺织、制革等行业,具有水量大、污染物含量高、毒性高及致癌等特点,是一种对生态环境和人类健康有着严重影响的工业废水^[20-21]。AFM 被广泛用于处理染料废水的膜的研究,其主要用途是测定膜表面粗糙度的变化,这有助于了解不同种类膜污染的机理与特性,对已制备的膜进行改性,提高对染料废水的处理效果。

Ahmad Norrahma 等^[22]利用 AFM 观察了纳米纤维复合滤膜(NFC)表面的粗糙度。结果显示,粗糙度参数的增加证明了 NFC 能够有效过滤废水中的污染物。陶瑞等^[23]在模拟染料废水处理中,利用 AFM 观察纳米二氧化钛(TiO_2)修饰聚酰胺/聚多巴胺/聚偏氟乙烯(PA/PDA/PVDF)复合纳滤膜的表面形貌和粗糙度,结果表明,添加纳米 TiO_2 颗粒可以使膜表面的有效过滤面积增加,在添加纳米 TiO_2 颗粒质量分数为 0.006% 及以下时,复合纳滤膜处理模拟染料废水能够取得良好的效果。李明等^[24]利用 AFM 技术对 PA/PDA/氯化聚氯乙烯复合纳滤膜的化学结构、微观结构、表面粗糙度等进行了表征,结果表明,在模拟染料废水处理试验中,该膜表现出良好的去除染料性能,对染料的去除率达到了 90% 以上。Soo 等^[25]在载体百分比不同条件下应用 AFM 测定膜的表面粗糙度来表征膜的表面形貌,结果表明,随着载体百分比的增加,膜的表面变得更加粗糙,提取纺织工业废水中污染物孔雀石绿(MG)染料的效率越高。

(2) 跨尺度动态行为解析

AFM 既能够详细地表征膜表面粗糙度的变化,又可以评价孔隙孔径、孔径分布和结核尺寸。Shirazi 等^[26]利用 AFM 对制备的电纺丝聚苯乙烯膜进行修饰前后的全面表征,结果表明,当用该膜处理生物柴油的洗涤废水时,分离性能有所提高。此外,这 2 种膜均能有效处理高污染的皂化废水。此外,McGuire 等^[27]探究了 AFM 如何被用于研究氯碳与零价金属还原剂和金属硫化物的反应,进而利用零价铁和含铁矿物对氯碳进行脱卤,达到去除工业废水中的有机卤化物的目的。Sadiq 等^[28]利用 AFM 研究提供了壳聚糖(CS)与 Fe_3O_4 复合材料的平均粒度和粒度累积分布的测量值,如图 3^[28]所示。在该材料中加入铬后,AFM 图像显示,该材料的粒径增大,随着比表面积的增加,反应位点数量也随之增多,材料对废水中亚甲基蓝降解率提高。陈颖青等^[29]采用 AFM 测量膜与污染物探针之间的黏附力,对膜的表面亲水性、抗黏附性能和抗污染性能进行表征,直接评估污染物在界面的吸附和解吸行为。结果证实,改性膜表面丰富的亲水基团以及超支化结构的位阻效应可以有效改善 PVDF 膜的抗污染性能。

(3) 含油废水处理技术突破

由于溢油和漏油事故频发,人类日常生活以及

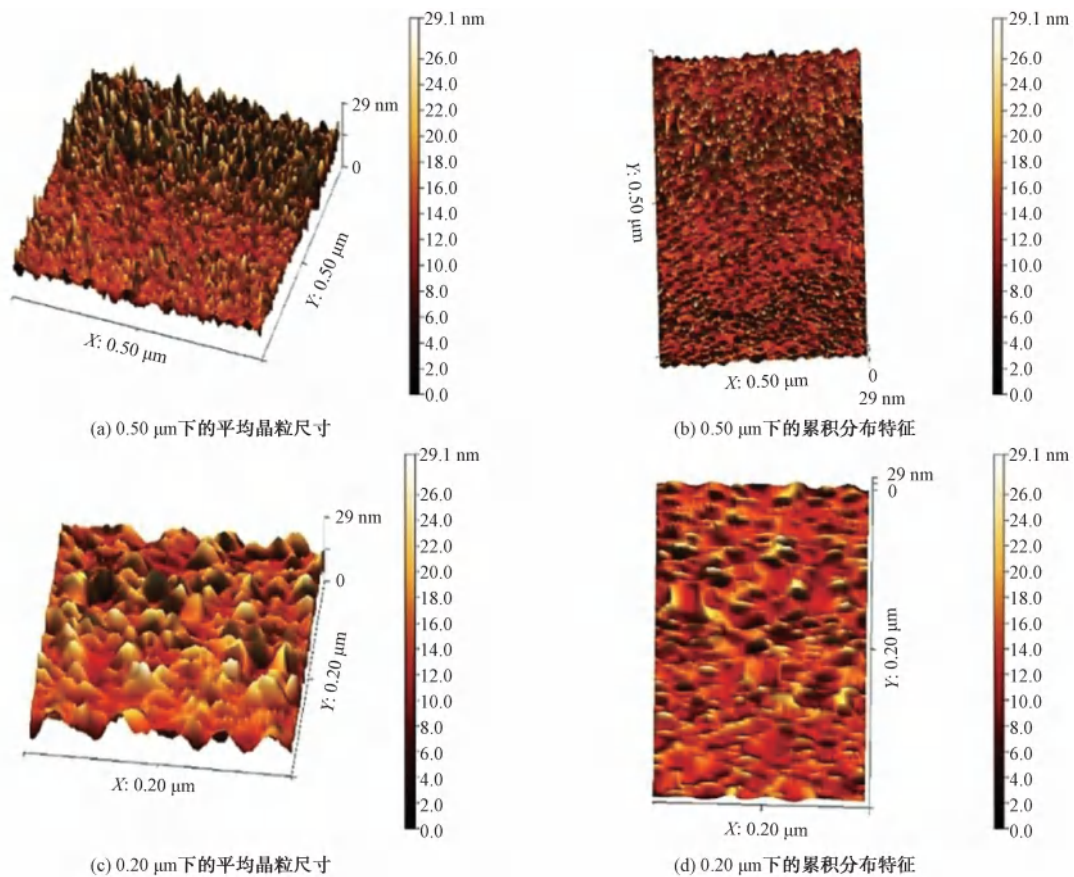
各行各业不断产生含油废水,含油废水的分离处理已成为一个巨大的挑战^[30]。含油废水不仅会对自然环境造成污染,对生态系统产生威胁,甚至会影响人类的身体健康^[31]。肖帆等^[32]利用 AFM 观察油滴表面的形貌和结构变化,并考察了聚合物 4-苯乙烯磺酸钠(PSS)和阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)对油滴稳定性的影响。结果发现,在高盐条件下,当体系中同时存在 100 mg/L PSS 和 0.1 mmol/L SDS 时,水相中的油滴再次发生聚并,造成整个系统不稳定。因此,在实际的油水分离和污水处理过程中,可以利用两者间的相互作用达到控制油水体系稳定性的目的,从而实现油水分离。研究表明,PSS 在工业废水处理中具有高效、经济、环保等优点,因此受到广泛的关注和应用,研究人员也在不断探索和改进 PSS 的应用技术,以提高其处理效果并降低成本。

(4) 污泥资源化创新应用

污泥是对人们生活和生态环境产生巨大影响的城市和工业活动的副产物,而污泥制备成污泥活性炭的方式可以将其资源化。污泥活性炭是一种吸附剂,能够有效地吸附废水中的污染物,并以较低的成本达到“以污治污”的效果^[33]。王由好等^[34]以杭州某污水处理厂二沉池出水为研究对象(该污水厂进水是由生活污水和工业废水组成的混合污水,其中工业废水又以印染废水为主),研究了污泥活性炭的表面结构特征以及其作为曝气生物滤池填料在污水深度处理领域的应用。结果表明,泥状活性炭的气孔更发达,表面更加凹凸不平,这些特点使其吸附性更好。

(5) 跨学科技术融合驱动应用创新

在对污水进行处理的过程中,催化剂可以通过吸附、氧化还原作用加速废水中有害物质的转化和降解,从而达到净化水质的目的。因此,选择合适的催化剂,不仅能提高废水处理的效率,同时也能节约资源和保护环境。Kazemi 等^[35]利用 AFM 对磁性氧化石墨烯(MGO-NH-SH)和磁性纳米颗粒($\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2\text{-NH-SH}$)进行了表征,结果表明,MGO-NH-SH 作为一种有前景的吸附剂,在有效去除污染水中的 $\text{Hg}(\text{II})$ 方面比 $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2\text{-NH-SH}$ 更高效、更环保。MGO-NH-SH 的成本相对较高,制备工艺复杂且原材料昂贵,随着技术和产能的提高,成本有望降低,成为主流的水处理材料。聚丙烯酰胺(PAM)因具



注:CS/Fe₃O₄ 的制备过程:将 CS 悬浮于 1% 醋酸溶液中,在持续搅拌后静置 10 min 直至完全分散。随后加入 Fe₃O₄,使用超声波设备处理 4 min 以确保颗粒均匀分布且无团聚现象,操作温度控制在 20 °C。接着缓慢滴加氨水(NH₄OH)溶液并再次进行超声处理,最终获得磁性复合材料的均质溶液,该溶液经 24 h 自然干燥后即得成品。

图 3 利用 AFM 测定 CS/Fe₃O₄ 分别在 0.50 μm 和 0.20 μm 下的平均晶粒尺寸及其累积分布特征图^[28]

Fig. 3 Average Grain Size and Cumulative Distribution Characteristics of CS/Fe₃O₄ at 0.50 μm and 0.20 μm by Determination of AFM^[28]

备较高的性价比,常作为絮凝剂用于选矿废水处理,但经过处理后,选矿废水中残余的 PAM 会影响回水水质及其回用。饶博等^[36]通过 AFM 分析了 PAM 分子构象的变化,并对其影响机理进行分析,结果显示,当 K⁺ 和 Ca²⁺ 浓度分别从 10 mmol/L 和 1 mmol/L 增加到 100 mmol/L 和 10 mmol/L 时,均方根粗糙度 R_q 分别从 80.4 nm 和 120.0 nm 增加到 124.0 nm 和 145.0 nm。该研究实现了对 PAM 的快速定量检测,对开展选矿水处理中 PAM 的迁移规律研究具有重要意义。

AFM 可用于各种材料的表面形貌观测及理化性质表征,进而分析合成材料的颗粒形状和粒径大小,并为其在工业废水中的应用提供依据。同时,AFM 与电化学氧化技术的相互结合在废水处理中

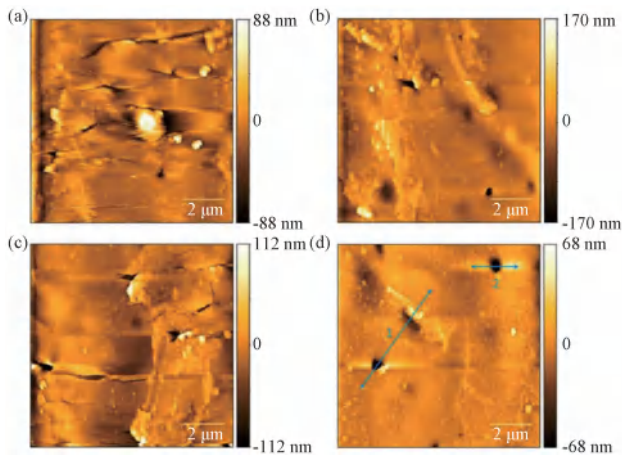
具有良好的成效,显示出巨大的优势。但是,以上研究大多是将 AFM 作为一种间接工具对废水进行治理,但实际上如果能够使用 AFM 直接观察工业废水中的污染物表面形貌,将提高工业废水治理的效率。

2.2 生活废水

生活废水中含有大量的危险废物,如处理不当将会对环境造成严重的影响。基于此,在对城市生活废水进行处理时,应及时对其中的污染物进行处理,同时还应提高处理效率。AFM 是一种利用薄探针与表面相互作用进行表面表征的技术,其固有的纳米级形貌成像和定量粗糙度分析在生活废水研究中具有广泛应用前景。

AFM 技术可以准确地跟踪微塑料(MPs)表面降解特征的数量和深度,为跟踪水中 MPs 降解提供

一种新的方法。Easton 等^[37]通过试验利用 AFM (图 4^[37])考察了不同短波紫外线(UVC)剂量和过氧化氢(H₂O₂)质量浓度对洗衣废水的聚酯纤维的影响。结果表明,通过延长处理时间和增加 UVC 辐照度来增加 UVC 剂量,都可以提高 UVC/H₂O₂ 对污染物的去除率。



注: H₂O₂ 质量浓度为 500 mg/L, 初始纤维质量浓度为 16.7 mg/L, UVC 辐照度为 4.0 mW/cm²。

图 4 UVC/H₂O₂ 处理 48 h 的聚酯纤维表面的 AFM 高度图像及显示典型的降解特征^[37]

Fig. 4 AFM Height Images of Polyester Fibre Surface Treated with UVC/H₂O₂ for 48 h and Displaying Typical Degradation Features^[37]

AFM 是一种具有高分辨率的显微镜技术,可以用于评估纳米塑料的存在和特性,观察和测量材料的表面形貌和力学性质。在饮用水处理厂中, Li 等^[38]研究使用 AFM-红外光谱(IR)仪对纳米塑料进行初步评估,可以确定塑料的类型和化学结构。通过这种方法,可以确定饮用水处理厂中是否存在纳米塑料,并了解其特性和来源。

在处理生活废水方面,可以选择使用生物膜支持培养基,在异养生物存在下可促进其中硝化剂的生长,而 AFM 可以用于确定增强硝化作用的重要介质特性。Stephenson 等^[39]通过试验筛选出有利于硝化的生物膜载体,并将 8 种不同类型塑料(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯、尼龙、聚碳酸酯、聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯、聚氯乙烯和聚氟乙烯)浸入好氧分批式反应器中处理生活污水。通过 AFM 测量发现,生物膜的硝化速率与引力呈负相关。

AFM 作为一个间接工具,可用于分析样品特性

对生活废水中污染物的去除作用及去除效果。因此,AFM 技术在污水处理领域具有巨大的潜力和广泛的应用前景,可以为污水处理和饮用水处理提供新的方法和技术。除了作为一种间接工具,还可以将 AFM 用于研究污染物的降解和转化过程,研究污染物对环境的影响。

2.3 医疗废水

随着经济社会的快速发展,我国医疗事业迅速发展,医疗机构在运行过程中会产生大量的医疗废水。医用废水含有大量的病毒、有毒有害物质、放射性物质、难以降解的有机物等^[40],如果得不到妥善处理,在对生态环境产生严重污染的同时也会给人体健康带来不利的影响。因此,伴随全球医疗废水处理市场不断扩大,对该领域废水处理技术的需求也不断增加。在医疗废水处理过程中,可借助 AFM 对样品进行表征,分析观察到的样品形貌、性质的变化以及医疗废水中污染物的去除状况,该技术有助于医疗废水的处理。

Kadadou 等^[41]将 TiO₂ 纳米颗粒修饰于二维过渡金属碳/氮化物(MXene)表面,并通过真空辅助过滤技术将其堆叠成多层结构,负载于亲水性 PVDF 微滤膜上,形成 PVDF/TiO₂@MXene 复合膜。通过 AFM 观察复合膜的三维形貌,试验结果显示,在抗生素截留率方面,对四环素的截留率为 87.8%,对美罗培南的截留率为 60.7%。结果表明,该膜在有效去除受污染水源中的抗生素,尤其是四环素和美罗培南方面具有明显的发展潜力。Moradi 等^[42]通过表面修饰将勃姆石(γ-AlOOH)与柚皮素(naringenin)结合,形成勃姆石-柚皮素(γ-AlOOH@Nar)生物纳米复合物,并将该复合物掺入 PVDF 基体,制备薄层复合(TFC)纳滤膜,试验得出,掺杂 γ-AlOOH@Nar 质量分数为 0.4% 的 TFC 膜(TFC-0.4)对头孢曲松(CTX)和头孢氨苄(CEX)的抑制率均为 99.8%,在药物废水过滤方面拥有良好性能,在医疗废水处理设施中展示出巨大的应用潜力。此外,该膜也可用于处理工业废水,并且适用于不同环境。

在生物废水处理过程中,广泛使用抗生素降解细菌对抗生素进行生物降解,理解这些细菌暴露于抗生素时的行为和生物降解过程有重要意义。Zhou 等^[43]深入研究了从处理环丙沙星抗生素废水的生物反应器中分离出的双发酵副梭菌对环丙沙星分子的黏附行为,通过 AFM 观察和表征了这种行为。研

究有助于认识到抗生素生物降解的先决条件,并为改善抗生素降解细菌在含抗生素废水处理中的应用提供了潜在的策略。

综上所述,利用 AFM 对样品进行表征并对样品的形貌、性质及样品间的相互作用力进行分析,可以得到样品在医疗废水处理领域的潜力和应用前景。如果能够将 AFM 与其他技术联用,可从形貌、化学组成和力学性质等多个维度对污染物进行表征,全面提高分析的完整性,从而更有效地指导污染物去除率的提升。

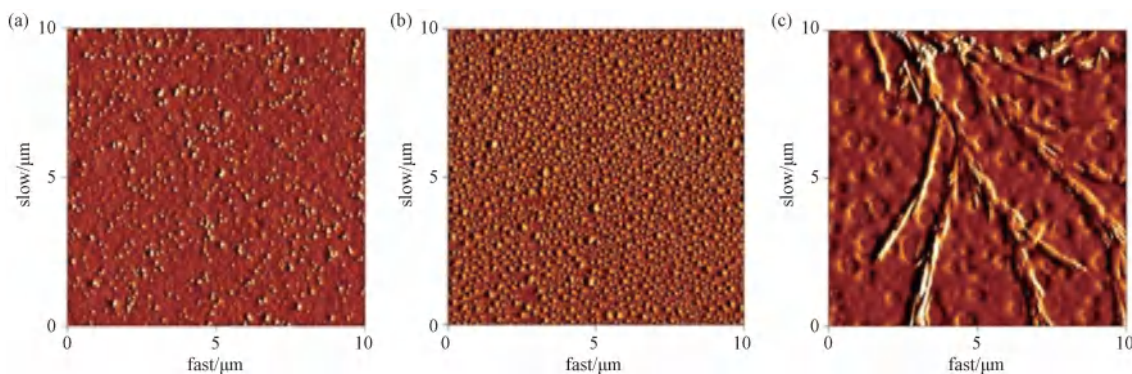
2.4 农业废水

农业废水是指人类在进行农作物种植、畜禽养殖、农产品加工等过程中所产生并排放的废水。农业废水具有水量大、影响面积广泛的特征,影响的水域面积占总水域总面积的 68%。跟生活废水和工业废水相比,农业废水会造成水体中的五日生化需

氧量(BOD_5)增加 5~6 倍。

Foletto 等^[44]在试验中用 AFM 测定了在 pH 值为 9.5 条件下合成的鸟粪石样品的形貌。结果表明,通过形成鸟粪石沉淀来去除磷和氮的过程速度较快,pH 对鸟粪石沉淀去除氮和磷的效率有较大的影响,而过量的氨没有影响,合成的鸟粪石在 pH 值为 9.5 下呈结晶相。

Lee 等^[45]利用非离子型 PAM (NPAM) 的混凝和絮凝法处理养猪废水,利用 AFM 的轻敲模式观察不同 pH 条件下 NPAM 在玻璃表面的形貌,如图 5^[45]所示。结果表明,pH 值在 11 以上有利于 NPAM 的混凝和絮凝,NPAM 在碱性溶液中可成为性能良好的絮凝剂,这是一种可行的应用条件。这种现有有机肥生产和发电相结合的水循环方法是一种养猪废水处理的循环策略,可以进一步促进养猪业的可持续发展。



注:fast 指沿快扫方向对应的长度,slow 指沿慢扫方向对应的长度。

图 5 (a) pH 值=3.0;(b) pH 值=6.0;(c) pH 值=11.0 条件下 NPAM 在玻璃表面的 AFM 图^[45]

Fig. 5 AFM Diagram of NPAM on Glass Surface at (a) pH Value=3.0; (b) pH Value=6.0; (c) pH Value=11.0^[45]

Özdemir 等^[46]利用 AFM 评估屠宰场废水处理过程中膜表面的污染情况和粗糙度变化。通过比较清洁膜和经过废水处理后的膜的 AFM 图像,如图 6^[46]所示,可以观察到膜表面的粗糙度变化。AFM 图像显示,经过废水处理后的膜的均方根粗糙度值比清洁膜更高。

在处理农业废水中,应用最广泛的是通过 AFM 的轻敲模式观察样品的表面形貌以及粗糙度变化。因此,借助 AFM 研究样品形貌对提高废水中污染物的去除率提供了巨大支持。但是,如果能将 AFM 应用于废水中观察废水与去除材料表面相互作用的机理和动力学机理,就可以更好地达到资源化处理废水的目的。

3 结语

本文主要介绍了 AFM 的基本结构与工作模式,并对 AFM 在废水治理领域的应用进行总结,从工业废水、生活废水、医疗废水、农业废水 4 个方面论述了 AFM 在废水处理过程中的应用。AFM 是一种用于研究表面形貌和表面物理性质的强大工具,能够提供真正的三维表面图。同时,AFM 不需要对待观测样品进行任何特殊处理,也不会伤害样品,影响研究结果。此外,AFM 在液体环境下可以良好工作。随着科学技术的发展,AFM 也会得到不断改造和升级,在治理环境污染这个方面拥有至关重要的地位,具有良好的发展与应用前景。

随着污水处理要求的不断提高,AFM 技术作为

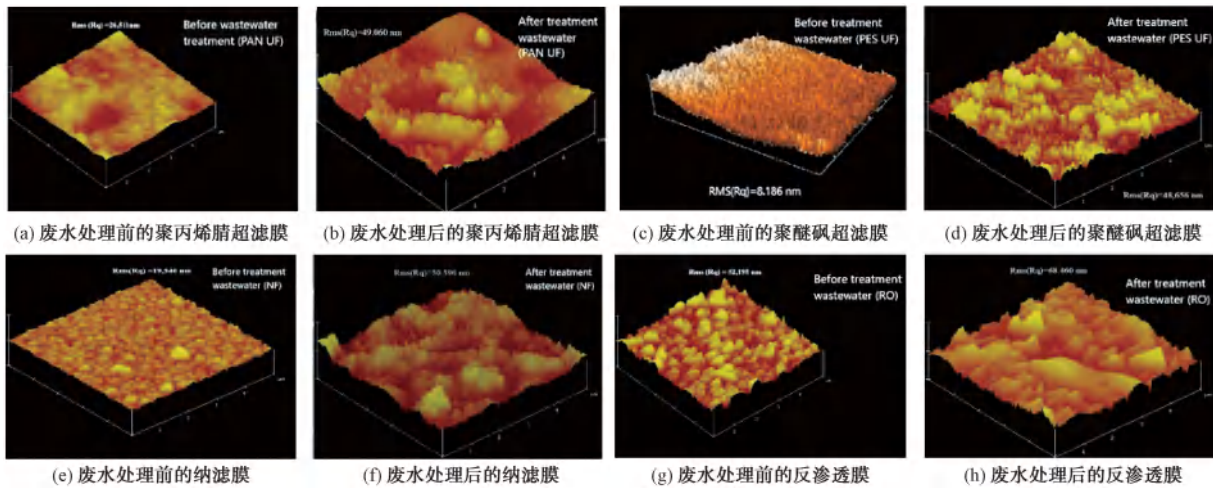


图 6 不同类型膜在废水处理前后的 AFM 图像^[46]

Fig. 6 AFM Images of Different Types of Membranes before and after Wastewater Treatment^[46]

新兴的第三代微观检测技术,其在废水处理领域也展现出巨大的潜力。结合上述的研究进展,AFM 的未来工作可考虑从以下方向展开。

(1)利用 AFM 观察污染物的微界面环境行为。在 AFM 下,可以观察到污染物在微界面环境中的存在状态、分布、形貌及与周围环境相互作用的情况。此外,AFM 还可以用于研究污染物的降解和转化过程。

(2)利用 AFM 观察材料废水中可回收物质的作用机理,从而达到更高的污染物回收率。

(3)AFM 与其他技术进行创新组合,这些深入的探索和创新将提高污水中污染物研究的多维分辨率和全面性,使获取更详细、多维的数据成为可能,增强研究的深度和彻底性,并将 AFM 技术的应用范围扩大到界面特征。

总而言之,AFM 有广泛的应用前景,现如今对 AFM 的了解受到技术以及认知上的限制,相信在不久的将来,随着科技的不断发展,AFM 技术的不断改造和创新,将带给科研工作者一个全新的思考方向。

参考文献

[1] 付泽轩,张伟.水环境监测与污水处理技术分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(8):120-122,125.
Fu Z X, Zhang W. Technical analysis of water environment monitoring and sewage treatment[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2024, 5(8): 120-122, 125.

[2] 张若朋,薛守洪,王焕伟,等.锂电池本体材料研究中几种常见的理化表征方法[J].今日制造与升级,2022(8):124-

126.

Zhang R P, Xue S H, Wang H W, et al. Several common physical and chemical characterization methods in the study of lithium battery bulk materials [J]. *Manufacture & Upgrading Today*, 2022(8): 124-126.

[3] 赵伟高,崔丽敏,贾世超,等.原子力显微镜在水处理领域的应用及展望[J].环境工程,2023,41(S1):219-226.

Zhao W G, Cui L M, Jia S C, et al. The application and expectation outlook of atomic force microscopy (AFM) in the field of water treatment [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S1): 219-226.

[4] Singh R, Samuel M S, Ravikumar M, et al. Processing of carbon-based nanomaterials for the removal of pollutants from water/wastewater application [J]. *Water*, 2023, 15(16): 3003.

[5] 陈虹雨,王庆刚,胡林,等.功能材料在工业废水治理中的研究进展[J].复合材料学报,2024,41(11):5924-5934.

Chen H Y, Wang Q G, Hu L, et al. Recent research progress of functional materials in industrial wastewater treatment [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(11): 5924-5934.

[6] 张耀鹏,邵惠丽,沈新元,等.用原子力显微镜研究纤维素膜表面形貌和孔径大小及分布[J].膜科学与技术,2002,22(2):13-16.

Zhang Y P, Shao H L, Shen X Y, et al. Study on the topography and determine surface pore distribution of cellulose membrane using AFM method [J]. *Membrane Science and Technology*, 2002, 22(2): 13-16.

[7] 程利群,曲英敏,杨焕洲,等. AFM 及其应用研究进展 [J]. *电子世界*, 2018(19): 39-40.

Cheng L Q, Qu Y M, Yang H Z, et al. Research progress of AFM and its application [J]. *Electronics World*, 2018(19): 39-40.

[8] 苏峻,胡建桥.原子力显微镜工作原理演示仪 [J]. *物理实验*, 2019, 39(12): 31-34, 39.

- Su J, Hu J Q. Device for demonstrating the working principle of atomic force microscope[J]. *Physics Experimentation*, 2019, 39(12): 31-34, 39.
- [9] 刘雨. 原子力显微技术在纺织材料研究中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(7): 16-21.
- Liu Y. Research on application of textile materials based on atomic force microscopy [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, 37(7): 16-21.
- [10] 刘国林, 曾瑜, 刘锦灏, 等. 关于轻敲式原子力显微镜动力学系统中能量耗散的研究[J]. *力学学报*, 2023, 55(11): 2599-2613.
- Liu G L, Zeng Y, Liu J H, et al. Study on energy dissipation in the dynamic system of tapping mode atomic force microscope[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(11): 2599-2613.
- [11] 刘金超, 崔洁. 原子力显微镜的工作原理及其在电化学原位测试中的应用[J]. *材料导报*, 2022, 36(14): 191-201.
- Liu J C, Cui J. Atomic force microscopy: Principles and applications in the field of *in-situ* electro-chemical characterization[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(14): 191-201.
- [12] Joshua A M, Cheng G, Lau E V. Soft matter analysis *via* atomic force microscopy (AFM): A review [J]. *Applied Surface Science Advances*, 2023, 17: 100448. DOI: 10.1016/j.apsadv.2023.100448.
- [13] 李航宇, 聂鹏程, 关东石. 探索微纳世界的手——原子力显微镜[J]. *力学与实践*, 2021, 43(5): 806-822.
- Li H Y, Nie P C, Guan D S. A hand of exploring the micro- and nano-scale world—Atomic force microscope [J]. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(5): 806-822.
- [14] 徐井华, 李强. 原子力显微镜的工作原理及其应用[J]. *通化师范学院学报*, 2013, 34(2): 22-24.
- Xu J H, Li Q. The working principle and application of atomic force microscope [J]. *Journal of Tonghua Normal University*, 2013, 34(2): 22-24.
- [15] 赵春花. 原子力显微镜的基本原理及应用[J]. *化学教育(中英文)*, 2019, 40(4): 10-15.
- Zhao C H. Principles and applications of atomic force microscopy [J]. *Chinese Journal of Chemical Education*, 2019, 40(4): 10-15.
- [16] 李艳青, 智丽丽. 原子力显微镜的原理及其在生命科学中的应用[J]. *昌吉学院学报*, 2010(3): 112-116.
- Li Y Q, Zhi L L. Principle of atomic force microscope and its application in life science [J]. *Journal of Changji University*, 2010(3): 112-116.
- [17] 郭昊冉, 唐纪琳. 原子力显微镜在原位电化学研究中的研究进展[J]. *分析化学*, 2023, 51(5): 733-743.
- Guo H R, Tang J L. Recent progress of atomic force microscopy for *in situ* electrochemical studies [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(5): 733-743.
- [18] 徐梦雅. 环境规制下制革工业含铬废水脱铬处理与回收利用研究[J]. *中国皮革*, 2023, 52(11): 15-18.
- Xu M Y. Dechromium treatment and recycling of chromium-containing wastewater in tannery industry under environmental regulation[J]. *China Leather*, 2023, 52(11): 15-18.
- [19] Gervas C, Mubofu E B, Mdoe J E G, et al. Functionalized mesoporous organo-silica nanosorbents for removal of chromium (III) ions from tanneries wastewater [J]. *Journal of Porous Materials*, 2016, 23(1): 83-93.
- [20] 徐绮坤, 汪晓军. 曝气生物滤池在印染废水处理中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(6): 177-180.
- Xu Q K, Wang X J. Application of biological aerated filter process to treatment of dyeing and printing wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(6): 177-180.
- [21] 王宇峰, 陶星名, 孙建平, 等. 曝气生物滤池在印染废水回用处理中的应用[J]. *水处理技术*, 2009, 35(11): 69-71, 74.
- Wang Y F, Tao X M, Sun J P, et al. Reuse and treatment of printing and dyeing wastewater by biological aerated filter [J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35(11): 69-71, 74.
- [22] Ahmad Norrahma S S, Hamid N H A, Hairom N H H, et al. Industrial textile wastewater treatment using Neolamarckia cadamba NFC filter paper *via* cross-flow filtration system [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 55: 104188. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104188.
- [23] 陶瑞, 姜泽源, 王军. 纳米TiO₂修饰PA/PDA/PVDF复合纳滤膜及其在模拟染料废水处理中的应用研究[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(12): 264-270.
- Tao R, Jiang Z Y, Wang J. The modification of Nano-TiO₂ to PA/PDA/PVDF composite nanofiltration membrane and its application in simulated dye wastewater treatment [J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(12): 264-270.
- [24] 李明, 张皓阳, 王军. PA/PDA/CPVC复合纳滤膜的制备及其在模拟染料废水处理中的应用[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(1): 121-126.
- Li M, Zhang H Y, Wang J. Preparation of PA/PDA/CPVC composite nanofiltration membrane and its application in simulated dye wastewater treatment [J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(1): 121-126.
- [25] Soo J A L, Makhtar M M Z, Shoparwe N F, et al. Characterization and kinetic studies of poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) polymer inclusion membrane for the malachite green extraction[J]. *Membranes*, 2021, 11(9): 676.
- [26] Shirazi M M A, Kargari A, Bazgir S, et al. Characterization of electrospun polystyrene membrane for treatment of biodiesel's water-washing effluent using atomic force microscopy [J]. *Desalination*, 2013, 329: 1-8. DOI: 10.1016/j.desal.2013.08.019.

- [27] McGuire M M, Carlson D L, Vikesland P J, et al. Applications of surface analysis in the environmental sciences; Dehalogenation of chlorocarbons with zero-valent iron and iron-containing mineral surfaces[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, 496(1/2): 301–313. DOI: 10.1016/S0003–2670(03)01009–2.
- [28] Sadiq Y K, Saleh K A. Effect of chromium (VI) on the oxidation of methylene blue dye by Fe₃O₄/chitosan composite [J]. *Baghdad Science Journal*, 2023, 20(6): 13.
- [29] 陈颖青, 文越, 吴志超, 等. 基于HBP的接枝的PVDF膜亲水改性及抗污染性能[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(9): 3736–3743.
Chen Y Q, Wen Y, Wu Z C, et al. Hydrophilic modification of PVDF membrane based on HPBs and its antifouling properties [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(9): 3736–3743.
- [30] Xue C H, Ji P T, Zhang P, et al. Fabrication of superhydrophobic and superoleophilic textiles for oil-water separation[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 284: 464–471. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.120.
- [31] Wang B, Liang W X, Guo Z G, et al. Biomimetic superlyophobic and superlyophilic materials applied for oil/water separation: A new strategy beyond nature[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(1): 336–361.
- [32] 肖帆, 王玮, 陈龙鑫, 等. 利用AFM探究聚合物和表面活性剂对油滴间稳定性的影响[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2024, 38(5): 216–223.
Xiao F, Wang W, Chen L X, et al. Effects of polymers and surfactants on the stability of oil droplets, an AFM study[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2024, 38(5): 216–223.
- [33] 张俊杰, 邵敬爱, 黄河洵, 等. 利用污泥制备活性炭及其吸附特性的研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(10): 3876–3886.
Zhang J J, Shao J A, Huang H X, et al. Review on the preparation of activated carbon from sludge and its adsorption characteristics[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(10): 3876–3886.
- [34] 王由好, 朱五星. 污泥活性炭填料在污水深度处理领域中的应用[J]. *给水排水*, 2023, 49(S1): 640–643.
Wang Y H, Zhu W X. Application of sludge activated carbon filler in the field of wastewater treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(S1): 640–643.
- [35] Kazemi A, Bahramifar N, Heydari A, et al. Synthesis and sustainable assessment of thiol-functionalization of magnetic graphene oxide and superparamagnetic Fe₃O₄@SiO₂ for Hg(II) removal from aqueous solution and petrochemical wastewater[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2019, 95: 78–93. DOI: 10.1016/j.jtice.2018.10.002.
- [36] 饶博, 邹文杰, 赵伟, 等. 低浓度聚丙烯酰胺含量的检测及溶液离子的影响[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(6): 1012–1023.
Rao B, Zou W J, Zhao W, et al. Rapid detection of low-concentration polyacrylamide and study on the influence of ions in solution[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(6): 1012–1023.
- [37] Easton T, Koutsos V, Chatzisyseon E. Removal of polyester fibre microplastics from wastewater using a UV/H₂O₂ oxidation process[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(1): 109057.
- [38] Li Y, Zhang C M, Tian Z Y, et al. Identification and quantification of nanoplastics (20–1000 nm) in a drinking water treatment plant using AFM-IR and Pyr-GC/MS[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 463: 132933. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132933.
- [39] Stephenson T, Reid E, Avery L M, et al. Media surface properties and the development of nitrifying biofilms in mixed cultures for wastewater treatment [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91(4): 321–324.
- [40] 王磊. 医疗废水处理技术现状与展望[J]. *广东化工*, 2023, 50(18): 106–107, 127.
Wang L. Status and prospect on processing technology of medical wastewater[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(18): 106–107, 127.
- [41] Kadadou D, Hasan S W. Binary hetero-structured PVDF/TiO₂@MXene composite membranes for the removal of antibiotics from wastewater[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112787.
- [42] Moradi G, Zinadini S, Rahimi M. Designing of the green γ -AlOOH@Naringin thin film composite PVDF based nanofiltration membrane and application for pharmaceutical wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 109952.
- [43] Zhou S N, Jia Y Y, Fang H T, et al. A new understanding on the prerequisite of antibiotic biodegradation in wastewater treatment: Adhesive behavior between antibiotic-degrading bacteria and ciprofloxacin [J]. *Water Research*, 2024, 252: 121226. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121226.
- [44] Foletto E L, dos Santos W R B, Jahn S L, et al. Organic pollutants removal and recovery from animal wastewater by mesoporous struvite precipitation [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(13/14/15): 2776–2780. DOI: 10.1080/19443994.2012.749378.
- [45] Lee W C, Chang C C. Effectively recycling swine wastewater by coagulation-flocculation of nonionic polyacrylamide [J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1742.
- [46] Özdemir S, Uzal N, Gökçek Ö B. Investigation of the treatability of pre-coagulated slaughterhouse wastewater using dead-end filtration[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2021, 96(7): 1927–1935.