

华欣远, 张帆, 梁曼丽, 等. 光催化强化常规生物处理耦合工艺深度净化难降解工业废水[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 15-22, 85.

HUA X Y, ZHANG F, LIANG M L, et al. Integrated process of enhanced Photocatalytic and conventional biotreatment for deep purification of refractory industrial wastewater[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 15-22, 85.

光催化强化常规生物处理耦合工艺深度净化难降解工业废水

华欣远¹, 张帆², 梁曼丽², 袁维波^{1,*}, 魏亮亮³

(1. 同方水务集团有限公司, 江苏南京 210046; 2. 南京同方水务有限公司苏北分公司, 江苏淮安 223022; 3. 哈尔滨工业大学环境学院, 黑龙江哈尔滨 150090)

摘要 【目的】针对工业废水中难降解有机物组分复杂、化学结构稳定等特性, 对环境治理造成的重大挑战, 当前广泛应用的生物法、电化学法、絮凝、吸附、沉淀等传统处理技术在处理工业废水时均面临着难以实现完全降解的困境。在此背景下, 文章旨在利用工艺改性优化等有效手段达成难降解工业废水深度净化之目的, 进而为工业可持续发展与环境保护提供有力支撑。【方法】传统生物处理技术作为污水处理厂中常见的处理手段, 其优势在于处理成本相对较低。然而, 难降解工业废水所呈现出的低生物降解性和生物毒性使其在微生物分解目标污染物过程中受到明显阻碍, 从而极大地限制了传统生物处理技术应用于工业废水深度高效净化。相较之下, 基于光催化的高级氧化技术主要依赖于光活化产生活性自由基, 并通过氧化还原等系列化学反应高效分解目标有机污染物, 其已被证明是深度处理难降解工业废水最常用、高效的方法之一。耦合光催化技术与生物处理技术已成为近年来的研究热点, 为了合理设计具有高催化性能、低成本的光反应器, 有效强化耦合工艺净化效果, 研究需全面优化光催化技术并系统优选光催化反应体系最佳反应条件。【结果】光催化强化传统生物处理耦合工艺具有深度高效强化工业废水净化效果等技术优势, 其能够充分发挥光催化技术高效分解难降解有机物组分的能力, 并耦合低成本生物处理工艺以优化其应用潜能。【结论】化学-生物耦合工艺可有效解决当前难降解工业废水处理所面临的困局, 并可期成为工业废水深度净化的关键技术策略, 对于工业可持续发展和环境保护意义重大。

关键词 深度净化 难降解有机污染物 工业废水 光催化 传统生物处理 耦合工艺

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0015-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.003

Integrated Process of Enhanced Photocatalytic and Conventional Biotreatment for Deep Purification of Refractory Industrial Wastewater

HUA Xinyuan¹, ZHANG Fan², LIANG Manli², YUAN Weibo^{1,*}, WEI Liangliang³

(1. Tongfang Water Group Co., Ltd., Nanjing 210046, China;

2. North Jiangsu Branch of Nanjing Tongfang Water Service Co., Ltd., Huai'an 223022, China;

3. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract [Objective] The refractory organic pollutants in industrial wastewater pose a major challenge to environmental governance, which attributed by the compositional complexity and chemical stability of target contaminant. The traditional wastewater treatments, such as biotechnology, electrochemical method, flocculation, adsorption and precipitation etc., are not sufficient for the complete removal of refractory organic pollutants in industrial wastewater. In this context, the modification and optimization of wastewater treatments is aiming at deep purification on refractory industrial wastewater, and further supporting the industrial sustainable development and environmental protection. [Methods] As the common treatment in wastewater treatment plants, traditional biological treatment has the advantage of low cost. Nevertheless, the refractory industrial wastewater with poor biodegradability and high biotoxicity significantly impede the microbial decomposition process, thus greatly limiting the application of traditional treatment in deep and efficient purification of industrial wastewater. Comparatively, advanced oxidation processes based on photocatalysis generate

[收稿日期] 2024-04-11

[作者简介] 华欣远(1968—), 男, 高级工程师, 研究方向为市政污水及工业废水处理, E-mail: huaxinyuan@foxmail.com。

[通信作者] 袁维波, 研究方向为市政污水及工业废水处理、厂网一体化建设、智慧水务平台打造等, E-mail: 110612343@qq.com。

reactive oxygen species in photo-activation, which can efficiently decompose the refractory organic pollutants via chemical reactions (e.g., reduction-oxidation reaction, etc.). It has been proven that photocatalysis is one of the most common and efficient treatments for the in-depth purification of refractory industrial wastewater. Recently, traditional biological treatment coupled with photocatalysis integrated process has been regarded as the hotspot of industrial wastewater treatments. In order to properly design the photoreactor with high catalytic performance and low cost, and further enhance the efficiency of composite biological-photocatalysis system, it's necessary to comprehensively optimize the photocatalytic technology and systematically select the best reaction conditions for the photocatalytic reaction system. [Results] coupling technology of photocatalysis and biological treatment has technical advantages of deep and efficient purification on refractory industrial wastewater, which attributing to the ability of photocatalysis treatment and further enhance the application potential by coupling the low-cost biological treatment. [Conclusion] The chemical-biological coupling process can effectively deal with the dilemma of refractory industrial wastewater treatment and is expected to be the critical strategy for deep purification on refractory industrial wastewater, which is of great significance for industrial sustainable development and environmental protection.

Keywords deep purification refractory organic pollutants industrial wastewater photocatalysis conventional biological treatment integrated process

近年来,随着工业文明的急速发展,人类日常生活过程中常会产生大量高浓度工业废水。故而,工业化的逐步深化现已对自然环境和生态系统造成严重危害,一定程度上威胁着人类健康和社会可持续发展^[1-2]。其中,我国作为初级原料加工生产的主力发展中国家,则是受到工业废水污染影响的代表国家之一^[3]。具体地,工业废水是指在工业生产过程中产生的废水和废液,其中含有随地表径流流失的工业生产用料、中间产物、副产品以及生产过程中产生的多种污染物^[4]。大量现有研究^[5]表明,工业废水具备高盐、高毒性、难降解、复杂种类等特性,故而传统污水处理工艺无法高效治理难降解工业废水,同时可能会消耗大量可用资源。与此同时,工业废水中所含染料、农药等有机污染物可能会增加水环境中生物激素和抗生素耐药基因丰度,致使其环境风险严重威胁水环境安全质量^[6]。综上所述,难降解工业废水高效、节能治理技术的研发优化对生态环境保护具有重要意义。

当前,污水处理技术主要包含生物法、物理法、化学法等^[7],其中,由于生物法针对难降解工业废水所表现出的技术局限性、性能低下、高碳排放等技术壁垒,涌现出大量新型技术尝试高效、经济地处理难降解工业废水^[4,8]。目前,广泛应用于工业废水深度处理的技术手段主要有高级氧化法、吸附法和膜分离技术等^[9]。其中,吸附、膜过滤等物理处理技术无法实现对难降解有机污染物的分解,仅能实现分离^[10]。综上所述,对于难降解工业废水的有效处理及循环利用,以期减少水污染的产生,提高水资

源利用率,是解决国际废水污染问题的重要着力点。近年来有大量研究^[11]论证说明基于光催化的高级氧化技术是深度净化工业废水技术中兼备环境友好性、高效性、可持续性的资源化手段,其利用光源作为活化驱动力代替化学药品投加,不仅可有效降低污水净化工艺的运行成本,同时减缓二次污染现象。

针对光催化技术应用领域的欠缺及其所存在的重复稳定性差等技术问题,现有大量研究^[12]尝试将其与低成本生物处理技术相结合应用于工业废水高效深度净化。于此,传统生物处理技术与光催化技术耦合的复合工艺处理体系可兼并双方技术优势,并规避两者技术的局限性^[13]。其中,传统生物处理技术为当前污水处理单元中应用较为成熟的技术手段,而高效的光催化技术可有效强化耦合体系的处理效能,解决其应用于难降解工业废水净化所体现的技术壁垒。综合分析认为,优化构建生物-光催化耦合工艺体系应用于工业废水深度处理具有巨大实用潜能,可期用作难降解工业废水的大规模经济处理技术,以有效降低水体环境中风险及影响。

1 工业废水的理化特性

报道^[14]称,人类工业、农业活动产生的有机污染物、放射性核物质、类金属、有机金属等复杂污染物均会对自然水体造成不同程度的毒性干扰。例如,应用于纺织、染色和油漆等领域的高负荷生产原料中有2%~20%损失并通过排水成为工业废水,同时多环芳烃(PAHs)的不完全燃烧使其大量存在于地表水和城市污水中^[15];应用于药品、个人护理产

品等生产中的新兴污染物,约有 90% 的药物以稳定或部分不完全分解形式保留在污水系统中;巨量农业生产副产物,如农药等物质持续通过径流、排放等方式进入自然水体。而工业废水中的难降解有机污染物对人类生产生活及自然环境所产生的影响更是全面且显著的。其中大部分属于有毒化学物质,具有致癌性、环境持久性和生物富集性,若过量进入生态系统将严重威胁动植物及微生物的稳定及安全。

为合理设计针对难降解工业废水高效净化的工艺技术,系统分析工业废水呈现如下特征:含有复杂

多样的高浓度有机物、高色度、高毒性、低 BOD₅/COD 值、低生物降解性^[16]。与此同时,将工业废水可分类为乳制品、啤酒厂出水、造纸废水等,并列举其各项化物指标如表 1 所示^[17]。具体地,根据上述不同种类工业废水的各项指标,分析总结认为,垃圾渗滤液、石化废水、医疗废水、焦化废水等多种工业废水均具有高毒性且组分复杂^[18]。其中,医疗废水呈现出尤为突出的基因毒性,可能使生物处理中作用的微生物产生抗性基因,进而增加工业流程的负荷和处理难度^[19]。此外,多来源工业废水均表现出低生物分解性、高色度等特点。

表 1 不同种类工业废水全面指标对比

Tab. 1 Comparison of Comprehensive Indicators of Different Types of Industrial Wastewater

工业废水 种类	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	总有机碳 (TOC)/ (mg·L ⁻¹)	pH 值	总悬浮固体 (TSS)/ (mg·L ⁻¹)	总溶解固体 (TDS)/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	总酚/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / COD	TOC/ COD	参考 文献
垃圾填埋 场渗滤液	3 000	<300	<1 400	>7.5	1 448	1 000~2 500	400~1 500	/	<0.1	>0.500	[20~21]
石化废水	300~1 020	150~570	220~440	6.5~10.0	100	1 000~1 500	13~70	<200	<0.5	0.200~0.400	[22]
制药废水	375~32 500	200~6 000	860~4 940	3.9~9.2	370~1 202	675~9 320	74~363	95~125	0.1~0.6	<0.152	[23]
印刷废水	900~3 791	102~1 197	/	6.5~10.0	235~1 241	/	/	/	<0.2	/	[24]
纺织废水	300~12 000	188~550	/	2.0~13.5	110~8 000	50~6 100	50	/	<0.4	/	[25]
酿造废水	11 886~15 553	6 570~8 858	1 349~1 876	5.3	760~1 700	/	13	205~292	>0.4	~0.200	[26]
焦化废水	807~6 600	330~1 000	723~1 990	7.8~9.5	40~80	/	50~400	60~1 452	~0.1	0.150~0.400	[27]
乳业废水	4 000~6 000	2 800~4 480	1 416	6.5~12.0	100~1 000	/	/	/	>0.5	<0.230	[28]

2 工业废水危害及处理现状

随着当前社会现代化、智能化、工业化的逐步推进,不仅使国民经济发展水平日益优化,同时也推动扩大了社会工业技术的急速发展。工、农业生产运作过程中所产生的工业废水也日益成为当前生态环境及水质健康的重要危险因素。针对工业废水所呈现的难降解、高有机物等特性,现有污水处理技术无法满足水质水量,而未达标排放的工业废水可能会造成重金属、化学毒物以及酸污染等恶劣问题,其存在的主要危害如下:直接危害,未达标排放的工业废水若进入土壤、地表水等水循环系统中将直接破坏土壤、水体等多种环境平衡,造成动植物和微生物的大量死亡、变异^[29];间接危害,未达标排放的工业废水通过生态系统逐步富集至人体将严重威胁人体健康^[30]。

据此,欧盟卫生和消费者所公布的研究表明,工业废水中多种复合有机化合物的危害作用远大于单

一化合物对生态健康产生的威胁。对此,世界范围内大量国家设立了相对更为严格、具体的指导方针,实现对工业废水的切实监管。其中,新加坡、澳大利亚和日本等国家水法均限制排放水体 COD 限值为 15~60 mg/L, BOD₅ 限值为 15~20 mg/L,同时,近年来还补充执行了针对新兴污染物相关的制约排放法规^[31]。针对难降解工业废水的治理技术,大量研究报道^[32]普遍认为,生物处理技术呈现缓慢的反应动力学,这将严重限制工业废水的充分净化,使其无法达标排放。分析各类工业废水的指标说明,其普遍的低 BOD₅/COD 数值说明其可生化性较差,因而表明其水体均对生物处理效果存在不同程度的潜在抑制作用。此外,工业废水所包含的无机物也可能会抑制化学氧化分解性能。

3 工业废水净化技术及性能对比

3.1 传统生物处理技术

传统生物处理技术在固定水力停留时间内难以

达到污水排放标准,但若延长水力停留时间将增加生物运行成本^[33]。与此同时,工业废水中抗生素等残留组分将对反应系统中微生物产生抑制作用,甚至使其中部分细菌(如好氧细菌)中毒。故而,研究论证利用传统生物及物理处理技术无法有效分解水体中大量持久性有机物,同时,其处理水平的低稳定性也将进一步增加水体中生物累积现象,并对水体环境和生物健康造成严重威胁。

3.2 膜分离技术

膜分离技术因其高效分离性、能耗低、投资成本低、操作便利性,成为废水处理领域一种先进的处理技术。与此同时,膜分离技术也存在着明显的技术壁垒——膜污染问题。根据膜分离技术在实际应用过程中调研结果可知,依托于聚酰胺等膜材料的膜分离技术存在耐溶性差、分离控制能力差、浓缩过滤率低等问题,其直接导致膜污染现象并限制了膜分离技术实际应用于工业废水深度净化。因此,如何有效地去除工业废水中高浓度有机物和中间产物,提高污水利用率,并优化膜材料耐有机溶剂腐蚀性已成为膜分离技术亟待解决的关键问题。对此,当前有大量研究致力于制备新型膜材料用于优化膜分离技术,主要着力于开发具备高选择性、高渗透性、长使用寿命等特性的膜材料。如 An 等^[34]设计结合膜分离技术和化学氧化还原催化技术的氧化石墨烯复合膜用于工业废水深度处理,其具有良好的化学稳定性、亲水性、低生产成本等技术优势。此外,电芬顿催化膜的构建可以有效提高膜材料传质率,使膜表面污染物实现原位浓缩并降解,进而一定程度上缓解膜污染现象。

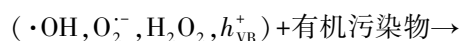
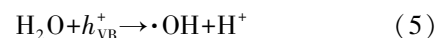
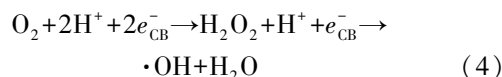
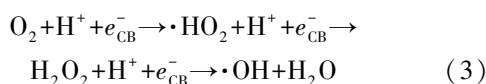
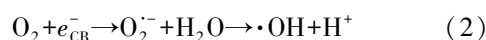
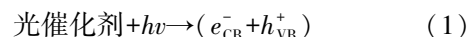
3.3 高级氧化技术

现有研究^[35]表明,针对难降解工业废水深度处理,高级氧化技术具有应用普遍性、高效等技术优势。近年来,高级氧化技术的实际应用进程正在极速推进,其中主要包含电化学催化、光催化、光电催化等。现有研究^[36-37]表明,高级氧化技术所依托活性自由基的高氧化还原电位可以有效地将难降解有机污染物氧化分解,并深度矿化成为小分子无机组分,因而认为高级氧化技术是一种相对高效、环保的工业废水处理技术。在众多高级氧化技术中,芬顿法是目前最广泛应用的深度处理技术,其主要利用铁基催化剂将过氧化氢(H_2O_2)氧化剂分解产生羟基自由基,进而非选择性分解目标有机污染物。芬

顿催化技术所呈现的高效、易操作等技术优势提高了该技术的实际应用潜能。但在实际应用过程中,高能源、药品投加量、高投资成本、伴有有毒副产物、低分解选择性等问题严重限制了其发展及使用的推进进度。

4 光催化耦合强化传统生物处理工业废水机理

光催化技术作为难降解工业废水深度净化技术中最为新颖且可期实现可持续性发展的一种技术手段,大量研究分析说明纳米光催化剂呈现高物化活性、优异比表面等特性可广泛应用不同种类工业废水。对比其他高级氧化技术和生物处理技术,研究分析认为光催化过程不产生有毒副产物,因此,现已广泛应用于细菌消毒、废水深度处理等多领域。光催化应用过程中,半导体光催化剂在光源活化条件下吸收辐照光能,受到激发与光生电子组合生成电子(e^-)-空穴对(h^+)[式(1)],并导致电子从价带(VB)转移至导带(CB),过程中生成活性自由基发生氧化还原反应,并实现对目标污染物的分解[式(2)~式(7)]。相较于其他传统污水处理方法,光催化技术对于难降解有机物的分解程度更为彻底且环保可持续,其可以将难降解有机污染物完全矿化分解为二氧化碳和水等小分子无机物^[38],光催化技术降解目标污染物机理如图1所示。不过单一传统光催化剂存在电荷载流子重组率高、稳定性低、氧化还原电位低等技术缺陷,其造成光催化剂性能对光源及反应条件的依赖性,也很大程度上限制了光催化技术应用于实际工业废水的进程推进。针对光催化技术现存技术缺陷,研究尝试构建半导体异质结、金属沉积、负载量子点等策略调节带隙能量并增加可见光吸收效率,进而提高光催化技术的实用性(表2)。



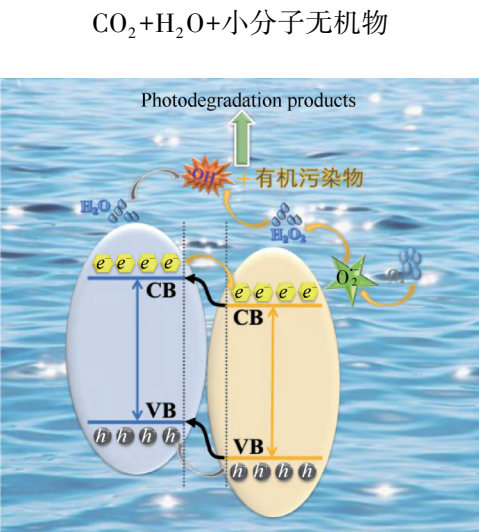


图 1 光催化技术降解目标污染物机理
Fig. 1 Mechanism of Degradation of Target Pollutants
by Photocatalytic Technology

现有研究主要通过优化光催化剂产生活性自由基效率,提高催化体系活性自由基产量,缩小光催化

剂带隙,有助于在可见光范围内吸收更大光源能量,避免激发电子无法到达半导体表面;延长光激发电子和空穴的使用寿命,同时降低所需带隙能量、延迟 $e^- - h^+$ 重组、促进其分离。

除此之外,由于粉末催化剂在反应过程中的金属离子溢出现象会随反应时间的延长抑制目标污染物分解性能,并对水体环境造成二次污染。现有研究尝试将粉末状光催化剂固定在固体支撑材料(如金属、塑料、导电玻璃、有机膜等)上,光催化剂的固定化可以很大程度上缓解二次污染现象,并有助于催化材料的回收和重复利用。在此基础上,光催化载体也可以为催化反应提供稳定反应介质,综合优化光催化进程稳定性和易操作性。其中,对比不同种类光催化剂载体,有机载体包裹法是相对最为稳定简易的途径,其可以在实际水流冲刷过程中保证光催化剂被紧密包裹,同时可以为光催化剂提供一定的吸附性能,将目标污染物分子固定在载体中以便催化降解反应发生。

表 2 构建半导体异质结应用于不同种类工业废水的比较
Tab. 2 Comparison of Semiconductor Heterojunction Construction for Different Types of Industrial Wastewater

工业废水种类	光催化剂种类	催化剂投加量/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	目标污染物	污染物质 量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	光源类型	合成方法	降解效率	文献
染料	CeO_2/ZnO	0.100	罗丹明 B	10.0	200 W 氙灯	共沉淀-煅烧法	96.00%	[1]
	$\text{TiO}_2/\text{BiOBr}$	0.200	甲基橙	10.0	300 W 氙灯	原位生长法	91.00%	[39]
	$\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{MnFe}_2\text{O}_4$	0.250	亚甲基蓝	15.0	自然光	水热法	98.00%	[40]
农药	MOF/CuWO_4	0.200	4-硝基苯酚	10.0	发光二极管 (LED)可见光	水热法	81.00%	[41]
	$\text{BiVO}_4/\text{Bi}_2\text{O}_3$	0.001	多氯并二苯 对二恶英	10.0	150 W 卤化物灯	共沉淀法	82.50%	[42]
苯酚及其 衍生物	$\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Fe-TiO}_2$	1.000	苯酚	20.0	300 W 氙灯	水热法	100.00%	[43]
	MgO@CNT	0.900	磺胺嘧啶	45.0	150 W 紫外光	水热法	96.00%	[44]
	$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2\text{-Ag}$	1.500	4-氯苯酚	40.4	8 W 紫外线 C 波段光	水热法	97.12%	[45]
石化废水	$\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2(\text{Er}^{3+})$	0.800	柴油	200.0	可见光	水热法	87.74%	[46]
	$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2/\text{PT}/\text{SiMo}_{12}$	1.500	石油燃料	250.0	200 W 卤素灯	水热法	99.70%	[47]
医药废水	$\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{BiOBr}$	0.500	环丙沙星	10.0	可见光	离子交换	42.00%(COD)	[48]
	$\text{AgBr}/\text{CuBi}_2\text{O}_4$	0.500	四环素	10.0	300 W 氙灯	水热法	90.00%	[49]
	$\text{MnO}_2/\text{CNK-OH-M}$	0.500	TOC	5.0~20.0	300 W 氙灯	煅烧-浸渍法	74.90%	[50]

5 传统生物处理耦合光催化技术构建及工业废水应用效能

综合分析表明,传统生物处理工艺用于处理工业废水所凸显的性能短板严重制约了污水厂净化效能。与此同时,对于现有高效的高级氧化技术(如芬顿法)也同样在实际应用过程中存在铁基催化剂/铁基污泥运行成本过高, H_2O_2 用量过大等技术壁垒。为高效处理高浓度难降解工业废水,大量研究尝试根据其生物毒性进行分流处理,并在传统生物处理技术基础上复合高级氧化技术,以实现难降解工业废水的高效深度处理。对此,现有大量试验研究尝试构建传统生物处理技术-高级氧化耦合工艺对工业废水进行分类处理,处理策略流程如图2所示。在上述耦合工艺流程中,生物处理部分已较为成熟,应适当调节水力停留时间,在保证处理效率的同时尽量降低运行成本。与此同时,研究利用耦合光催化技术弥补传统生物处理工艺壁垒,利用可见光资源作为活化剂产生多种活性自由基,并用于难降解有机污染物的分解,其可有效加强工业废水深度净化过程中矿化程度,进一步强化工艺体系应用于难降解工业废水的效能。

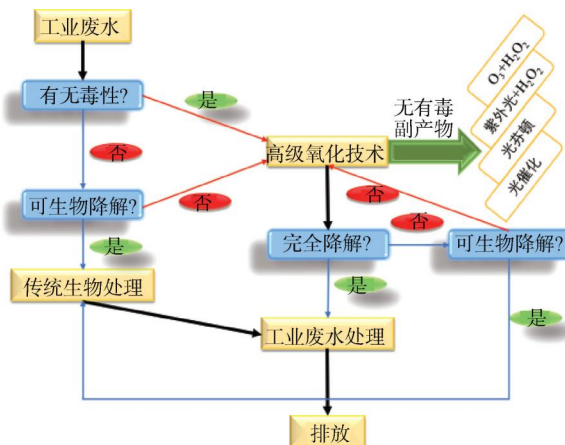


图2 生物处理技术耦合高级氧化技术深度处理工业废水流程

Fig. 2 Flow of Advanced Treatment of Industrial Wastewater Coupled with Biological Treatment and AOP Technology

6 展望与结论

近年来,大量研究表明,难降解工业废水的不达标排放已对人类健康、生态环境造成严重威胁,故而开发高效、可实际应用的工业废水深度处理技术被认为是水体净化的研究重点。相较于传统生物处理

技术的不稳定性及性能局限性,将生物处理技术与光催化技术相结合的耦合复合工艺是工业废水处理领域最重要、有前途的处理途径之一。该耦合工艺具有易于操作、良好重现性、高效、低成本,同时在实际应用过程中稳定、无毒、实现对于难降解有机污染物的深度矿化。文章着重于耦合技术及半导体光催化剂的研究进展,综合分析了光催化技术针对不同种类工业废水的处理效果,并深度探讨了光催化体系优化技术。综上所述,设计运行耦合工业废水深度处理工艺有助于推动实现高效、低成本、无毒净化的自然水体。

参考文献

- [1] ZHU L Y, LI H, XIA P F, et al. Hierarchical ZnO decorated with CeO_2 nanoparticles as the direct Z-scheme heterojunction for enhanced photocatalytic activity [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(46): 39679-39687.
- [2] LEE J W, SHIN Y J, BOO C H, et al. Performance, limitation, and opportunities of acid-resistant nanofiltration membranes for industrial wastewater treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2023, 666: 121142. DOI: 10.1016/j.memsci.2022.121142.
- [3] 李亚星, 吴升, 阎波杰. 中国工业废水排放空间分异影响机制研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(9): 1089-1093. LI Y X, WU S, YAN B J. Influence mechanism of spatial differentiation of industrial wastewater discharge in China [J]. Environmental Pollution and Control, 2021, 43(9): 1089-1093.
- [4] 刘琪, 雷培树, 余琴芳, 等. 工业废水难降解有机物深度处理技术与设计综述[J]. 净水技术, 2024, 43(4): 34-45. LIU Q, LEI P S, YU Q F, et al. Review on advance treatment and design of non-degradable organic matters for industrial wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 34-45.
- [5] YU H F, ZHUANG L L, ZHANG M, et al. The mechanism study of attached microalgae cultivation based on reverse osmosis concentrated water (WROC) [J]. Resources Conservation and Recycling, 2022, 179(6): 106066. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106066.
- [6] 杨铭, 费伟良, 刘兆香, 等. 长江经济带工业园区依托城镇污水处理厂处理工业废水问题分析与整改策略研究[J]. 环境保护, 2020, 48(15): 68-71. YANG M, FEI W L, LIU Z X, et al. Analysis on the existing problems and rectification strategies of industrial wastewater treatment in industrial parks relying on urban sewage plants in the Yangtze River Economic Belt [J]. Environmental Protection, 2020, 48(15): 68-71.

- [7] 刘智晓, 吴凡松. 污水生化处理工艺发展阶段化技术特征及未来趋势[J]. 给水排水, 2024, 50(4): 12-22.
- LIU Z X, WU F S. Technical characteristics and development trend of different stages of wastewater biological treatment process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(4): 12-22.
- [8] SINGH A, SRIVASTAVA A, SAIDULU D, et al. Advancements of sequencing batch reactor for industrial wastewater treatment: Major focus on modifications, critical operational parameters, and future perspectives[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 317: 115305. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115305.
- [9] 杭利斌. 工业有机废水深度处理技术研究[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(12): 191-193, 207.
- HANG L B. Research on advanced treatment system technology for industrial organic wastewater [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49(12): 191-193, 207.
- [10] CHEN R H, LIN B R, LUO R. Recent progress in polydopamine-based composites for the adsorption and degradation of industrial wastewater treatment [J]. Heliyon, 2022, 8(12): e12105. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e12105.
- [11] JOSS A, ZABCZYNSKIS E, GBEL A, et al. Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme [J]. Water Research, 2006, 40(8): 1686-1696.
- [12] 赵舒. 高级氧化法在工业废水处理领域中的应用[J]. 辽宁化工, 2024, 53(1): 129-131, 169.
- ZHAO S. Application of advanced oxidation method in industrial wastewater treatment[J]. Liaoning Chemical Industry, 2024, 53(1): 129-131, 169.
- [13] YU M L, WANG J J, TANG L, et al. Intimate coupling of photocatalysis and biodegradation for wastewater treatment: Mechanisms, recent advances and environmental applications [J]. Water Research, 2020, 175: 115673. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115673.
- [14] GADD G M. Biosorption: Critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2009, 84(1): 13-28.
- [15] BALMER J E, HUNG H, YU Y, et al. Sources and environmental fate of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Arctic[J]. Emerging Contaminants, 2019(5): 128-142.
- [16] ISHAK A R, HAMID F S, MOHAMAD S, et al. Stabilized landfill leachate treatment by coagulation-flocculation coupled with UV-based sulfate radical oxidation process [J]. Waste Management, 2018, 76: 575-581. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.02.047.
- [17] SUN J, LI X, FENG J, et al. Oxone/Co²⁺ oxidation as an advanced oxidation process: Comparison with traditional Fenton oxidation for treatment of landfill leachate[J]. Water Research, 2009, 43(17): 4363-4369.
- [18] TRIPATHY B K, KUMAR M. Sequential coagulation/flocculation and microwave-persulfate processes for landfill leachate treatment: Assessment of bio-toxicity, effect of pretreatment and cost-analysis [J]. Waste Management, 2019, 85: 18-29. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.12.014.
- [19] AHMED Y, YAAKOB Z, AKHTAR P. Degradation and mineralization of methylene blue using a heterogeneous photo-Fenton catalyst under visible and solar light irradiation [J]. Catalysis Science & Technology, 2016, 6(4): 1222-1232.
- [20] HASSAN M, ZHAO Y P, XIE B. Employing TiO₂ photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 285: 164-275. DOI: 10.1016/j.cej.2015.09.093.
- [21] RESHADI M A M, BAZARGAN A, MCKAY G. A review of the application of adsorbents for landfill leachate treatment: Focus on magnetic adsorption [J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: 138863. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138863.
- [22] DIYA'UDDEEN B H, DAUD W M A D, AZIZ A R A. Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review [J]. Process Safety & Environmental Protection, 2011, 89(2): 95-105.
- [23] RANA R S, SINGH P, KANDARI V, et al. A review on characterization and bioremediation of pharmaceutical industries' wastewater: An Indian perspective[J]. Applied Water Science, 2017, 7: 1-12. DOI: 10.1007/s13201-014-0225-3.
- [24] ABEDINZADEH N, SHARIAT M, MONAVARI S M, et al. Evaluation of color and COD removal by Fenton from biologically (SBR) pre-treated pulp and paper wastewater [J]. Process Safety & Environmental Protection, 2018, 116: 82-91. DOI: 10.1016/j.psep.2018.01.015.
- [25] YASEEN D A, SCHOLZ M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: A critical review[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 16: 1193-1226. DOI: 10.1007/s13762-018-2130-z.
- [26] IOANNOU L A, PUMA G L, FATTA-KASSINOS D. Treatment of winery wastewater by physicochemical, biological and advanced processes: A review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 286: 343-368. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.12.043.
- [27] ZHOU X, HOU Z L, LÜ L, et al. Electro-Fenton with peroxi-coagulation as a feasible pre-treatment for high-strength refractory coke plant wastewater: Parameters optimization, removal behavior and kinetics analysis [J]. Chemosphere, 2020, 238: 124629. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124649.
- [28] BRUGUERA-CASAMADA C, ARAUJO R M, BRILLAS E, et al. Advantages of electro-Fenton over electrocoagulation for disinfection

- of dairy wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 376: 119975. DOI: 10.1016/J.CEJ.2018.09.136.
- [29] 陈超, 高文郑, 熊文浩, 等. 工业废水处理中厌氧生物技术的应用[J]. 工程技术研究, 2023, 8(11): 217-219.
CHEN C, GAO W Z, XIONG W H, et al. The application of anaerobic biotechnology in industrial wastewater treatment [J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(11): 217-219.
- [30] 吴昭平. 人工湿地在工业废水处理中的应用分析[J]. 环境与发展, 2018, 30(8): 55-57.
WU Z P. Application analysis of constructed wetland in industrial wastewater treatment[J]. Environment and Development, 2018, 30(8): 55-57.
- [31] CAI Q Q, LEE B C Y, ONG S L, et al. Fluidized-bed Fenton technologies for recalcitrant industrial wastewater treatment-Recent advances, challenges and perspective [J]. Water Research; A Journal of the International Water Association, 2021, 190: 116692. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116692.
- [32] BILIŃSKA L, GMUREK M, LEDAKOWICZ S. Comparison between industrial and simulated textile wastewater treatment by AOPs-Biodegradability, toxicity and cost assessment [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 306: 550-559. DOI: 10.1016/j.cej.2016.07.100.
- [33] BANDINI S, VEZZANI D. Nanofiltration modeling: The role of dielectric exclusion in membrane characterization[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(15): 3303-3326.
- [34] AN Y C, GAO X X, JIANG W L, et al. A critical review on graphene oxide membrane for industrial wastewater treatment[J]. Environmental Research, 2023, 223: 115409. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115409.
- [35] MOREIRA F C, BOAVENTURA R A R, BRILLAS E, et al. Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters [J]. Applied Catalysis B Environmental, 2017, 202: 217-261. DOI: 10.1016/j.apcatb.2016.08.037.
- [36] GARCIA-SEGURA S, BRILLAS E. Applied photoelectrocatalysis on the degradation of organic pollutants in wastewaters [J]. Journal of Photochemistry & Photobiology C Photochemistry Reviews, 2017, 31: 1-35. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2017.01.005.
- [37] NIDHEESH P V, ZHOU M H, OTURAN M A. An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes[J]. Chemosphere, 2018, 197: 210-227. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.12.195.
- [38] JABBAR Z H, EBRAHIM S E. Synthesis, characterization, and photocatalytic degradation activity of core/shell magnetic nanocomposites ($\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2@ \text{Ag}_2\text{WO}_4@ \text{Ag}_2\text{S}$) under visible light irradiation [J]. Optical Materials, 2021, 122: 111818. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111818.
- [39] WANG X J, YANG W Y, LI F T, et al. Construction of amorphous $\text{TiO}_2/\text{BiOBr}$ heterojunctions via facets coupling for enhanced photocatalytic activity [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 292: 126-136. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.03.030.
- [40] ABROSHAN E, FARHADI S, ZABARDASTI A, et al. Novel magnetically separable $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{MnFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite and its high photocatalytic degradation performance for organic dyes under solar-light irradiation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 178: 154-163. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.01.026.
- [41] RAMEZANALIZADEH H, MANTEGHI F. Synthesis of a novel MOF/ CuWO_4 heterostructure for efficient photocatalytic degradation and removal of water pollutants [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 2655-2666. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.145.
- [42] LEE Y H, CUI M C, CHOI J B, et al. Degradation of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in real-field soil by an integrated visible-light photocatalysis and solvent migration system with *p-n* heterojunction $\text{BiVO}_4/\text{Bi}_2\text{O}_3$ [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 344: 1116-1125. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.002.
- [43] LI D X, LI R Q, ZENG F J, et al. The photoexcited electron transfer and photocatalytic mechanism of *g*- $\text{C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ heterojunctions: Time-domain ab initio analysis [J]. Applied Surface Science, 2023, 614: 156104. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.156104.
- [44] HAYATI F, LSARI A A, ANVARIPOUR A B, et al. Ultrasound-assisted photocatalytic degradation of sulfadiazine using $\text{MgO}@\text{CNT}$ heterojunction composite: Effective factors, pathway and biodegradability studies[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381:122636. DOI:10.1016/j.cej.2019.122636.
- [45] SHOJAIE A, FATTAHI M, JORFI S, et al. Hydrothermal synthesis of $\text{Fe-TiO}_2\text{-Ag}$ nano-sphere for photocatalytic degradation of 4-chlorophenol (4-CP): Investigating the effect of hydrothermal temperature and time as well as calcination temperature [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(5): 4564-4572.
- [46] JI Q Y, YU X, ZHANG J, et al. Photocatalytic degradation of diesel pollutants in seawater by using $\text{ZrO}_2(\text{Er}^{3+})/\text{TiO}_2$ under visible light [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(2): 1423-1428.
- [47] RO G, KIM Y H. H_2 generation using Pt nanoparticles encapsulated in $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2@ \text{TiO}_2$ multishell particles[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 577: 48-52. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.05.057.

(下转第 85 页)

水引水相融合作为城市建设可持续发展的创新理念的突破口,充分利用邕江上游左江、右江两处非同源河流取水的水文、水质条件,高效实施结合既有水利输水设施供水安全保障的改造技术,更高程度上实现了城市生态保护和可持续发展的水资源配置多重目标。

(2)全面系统的低碳设计,实现引水的节能高标准。规划和设计优化低水头、大断面重力流隧洞、矩形渠道引水输水给水系统,成功实现了 17 km 大流量输水“零能耗”的工程实践。

(3)统筹规划,分期建设。南宁市的水源地建设通过统筹多个水源特征,分期规划和建设,既可以缩短城市重大工程建设工期要求,又可以为大型工程充分研究论证提供必要的时间,对于同类型的城市具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 南宁交通投资集团有限公司. 广西南宁市邕宁水力枢纽工程环境影响报告书[R]. 广东: 珠江水资源保护科学研究所, 2013.
Nanning Communications Investment Group Co., Ltd. Environmental impact report of Yongning hydropower project in Nanning [R]. Guangdong: Pearl River Water Resources Protection Research Institute, 2013.
- [2] 南宁市水利局. 南宁市 2022 年水资源公报 [R]. 广西: 南宁市水资源公报, 2023.
Nanning Water Resources Bureau. Nanning Water Resources Bulletin 2022 [R]. Guangxi: Nanning Water Resources Bulletin, 2023.
- [3] 于大海. 上海原水系统现状及发展规划[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(4): 15-23.
YU D H. Present situation and development planning of raw water system in Shanghai [J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(4): 15-23.
- [4] 南宁市人民政府. 关于同意南宁市水功能区划的批复: 南府复[2012]107 号[EB/OL]. (2012-10-22) [2024-03-27]. <https://s1.nanning.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/zcfg/t196048.html>.
The People's Government of Nanning City. Approval on agreeing to the water function zoning of Nanning City: Nanfu Fu [2012] No. 107 [EB/OL]. (2012-10-22) [2024-03-27]. <https://s1.nanning.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/zcfg/t196048.html>.
- [5] 王健, 黄东海, 梁侠津. 河道补水与城市原水系统集成设计[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 106-110.
WANG J, HUANG D H, LIANG X J. Systematic application of in raw water and river supplement [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(6): 106-110.
- [6] 王健, 龙文波, 韦永平. 大型输水干渠的多功能系统性利用研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(22): 41-46.
WANG J, LONG W B, WEI Y P. Multifunction research of large water transfer tunnel [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(22): 41-46.
- [7] 焦琰. 我国饮用水水源保护地方立法的目标优化、模式创新与制度完善[J]. 环境保护, 2021, 49(9): 48-51.
JIAO Y. Objective optimization, mode innovation and system improvement of local legislation for drinking water source protection [J]. Environment Protection, 2021, 49(9): 48-51.
- [8] 范丽霞. 集中式饮用水水源地环境治理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
FAN L X. Study on environmental treatment of centralized drinking water source [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [9] 陈蓓. 南宁市水源地的生态系统涵养功能研究与污染预测[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
CHEN B. Water conservation function and pollution prediction of ecosystem in water source area of Nanning City [D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [48] HONG Y Z, LI C S, MENG Y D, et al. *In situ* synthesis of a nanoplate-like Bi-based heterojunction for photocatalytic degradation of ciprofloxacin [J]. Materials Science and Engineering: B, 2017, 224: 69-77. DOI: 10.1016/j.mseb.2017.07.010.
- [49] GUO F, SHI W L, WANG H B, et al. Study on highly enhanced photocatalytic tetracycline degradation of type II AgI/CuBi₂O₄ and Z-scheme AgBr/CuBi₂O₄ heterojunction photocatalysts [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 349: 111-118. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.01.042.
- [50] ZHANG Q, YU P, DENG F, et al. Porous Z-scheme MnO₂/Mn-modified alkalized g-C₃N₄ heterojunction with excellent Fenton-like photocatalytic activity for efficient degradation of pharmaceutical pollutants [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 246: 116890. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116890.

(上接第 22 页)