

净水技术前沿与热点综述

陈朝阳, 焦志恒, 吴奕洋, 等. 介质阻挡放电等离子体协同光催化工艺对难降解废水处理的研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(7): 1-11.

Chen C Y, Jiao Z H, Wu Y Y, et al. Research progress of dielectric barrier discharge plasma coupled with photocatalysis process for non-biodegradable wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(7): 1-11.

介质阻挡放电等离子体协同光催化工艺对难降解废水处理的研究进展

陈朝阳¹, 焦志恒¹, 吴奕洋¹, 王 婕², 吕 娟^{1,*}

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘 要 【目的】随着工业化进程加快, 水体中污染物浓度日益上升, 威胁生态与健康安全。为实现高效、绿色的水体净化, 亟须开发新型的氧化技术。文章旨在综述介质阻挡放电(DBD)等离子体-光催化技术在有机污染物降解中的应用进展, 探讨其反应机制及协同效应。【方法】本文通过系统梳理近年来相关文献, 重点分析 DBD 等离子体-光催化体系中活性氧物种的生成路径、电子激发机制及其对污染物降解率的提升作用, 并总结各种催化剂构型及其在典型污染物去除中的实际表现。【结果】DBD 等离子体-光催化体系在处理染料、抗生素、酚类和农药等复杂有机污染物方面具有明显优势, 协同体系中, DBD 等离子体产生的高能电子和活性自由基可有效促进催化剂表面电子-空穴对的分离, 提高活性物种生成速率与反应选择性。【结论】DBD 等离子体-光催化技术具备反应速率快、适用范围广与能效高等优点, 是未来水污染控制的重要研究方向。未来研究应聚焦于反应器结构优化、催化剂性能提升及协同机制的深入解析, 以推动该技术在实际工程中的规模化应用。

关键词 难降解废水; 介质阻挡放电; 光催化; 活性氧物种; 高级氧化工艺; 水污染控制

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)07-0001-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.07.001

Research Progress of Dielectric Barrier Discharge Plasma Coupled with Photocatalysis Process for Non-Biodegradable Wastewater Treatment

Chen Chaoyang¹, Jiao Zhiheng¹, Wu Yiyang¹, Wang Jie², Lü Juan^{1,*}

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] With the acceleration of industrialization, the concentration of pollutants in water bodies is continuously increasing, posing serious threats to ecosystems and human health. To achieve efficient and environmentally friendly water purification, novel oxidation technologies are urgently required. This review aims to summarize recent progress in the application of dielectric barrier discharge (DBD) plasma-photocatalysis for the degradation of organic pollutants, with particular attention given to the reaction mechanisms and synergistic effects. [Methods] Recent literature is systematically reviewed, focusing on the generation pathways of reactive oxygen species, the electronic excitation processes, and their roles in improving degradation efficiency. Various catalyst configurations and their performance in removing representative pollutants are also summarized. [Results] DBD plasma-photocatalysis systems exhibit significant advantages in the treatment of complex organic pollutants such as dyes, antibiotics, phenols, and pesticides.

[收稿日期] 2025-07-05

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFD2400502); 国家现代农业产业技术体系(CARS-46); 中央公益性科研院所基本科研业务费(2025CG04、2023TD67)

[作者简介] 陈朝阳(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光催化处理水体中的有机污染物, E-mail: 1472060884@qq.com。

[通信作者] 吕娟(1983—), 女, 副教授, 研究方向为水体中 PPCPs 类物质的去除, E-mail: lujuan@usst.edu.cn。

In the coupled systems, high-energy electrons and reactive radicals generated by DBD are found to facilitate the separation of photogenerated electron-hole pairs on the catalyst surface, thereby enhancing both the production rate and selectivity of reactive species. [**Conclusion**] DBD-photocatalytic technology is characterized by a fast reaction rate, broad applicability, and high energy efficiency, making it a promising strategy for water pollution control. Future research is expected to focus on the optimization of reactor structures, the enhancement of catalyst performance, and a deeper understanding of synergistic mechanisms to promote large-scale engineering applications.

Keywords non-biodegradable wastewater; dielectric barrier discharge (DBD); photocatalysis; reactive oxygen species; advanced oxidation processes (AOPs); water pollution control

随着工业化和城市化的快速推进,水体中持久性污染物的种类与浓度持续增加,严重威胁生态系统安全与人类健康。为实现高效、绿色的水体净化,开发新型高级氧化工艺已成为水污染控制领域的研究热点^[1]。近年来,介质阻挡放电(DBD)等离子体技术是一种基于气体放电产生高活性氧物种[如羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、臭氧(O_3)等]的高级氧化技术,具有反应速度快、适用范围广等优点。光催化技术则利用光催化剂(如 TiO_2)在光照下产生的电子-空穴对,引发氧化还原反应降解污染物。DBD等离子体与光催化的协同作用可通过多种机制提高污染物的降解率,成为近年来的研究热点。

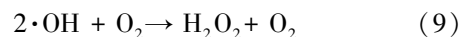
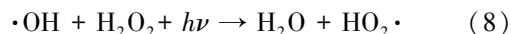
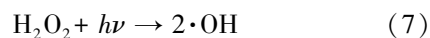
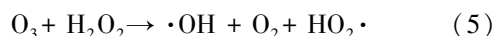
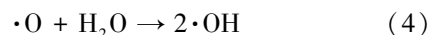
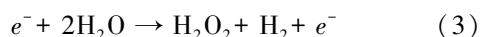
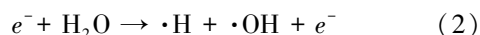
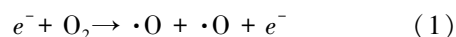
DBD-光催化体系通过DBD等离子体放电过程产生的活性氧物种[如 $\cdot\text{OH}$ 、 O_3 、超氧阴离子($\cdot\text{O}_2^-$)等]、高能电子和紫外辐射,与光催化剂在光照激发下生成的光生电子(e^-)、空穴(h^+)等产生协同作用,从而提高能量利用效率^[2]。此外,DBD过程中,电场、电荷作用与激发态分子的生成可有效促进光催化反应中载流子的分离迁移,提高体系整体的氧化能力与反应稳定性。研究^[3-4]表明,DBD-光催化体系在去除水体中多类污染物(如染料、抗生素、酚类及农药残留等)中展现出良好效果,具备研究价值及应用潜力。

本文从DBD等离子体-光催化技术的基本原理出发,系统综述了该技术在污染物降解中的反应机理、催化剂构型与典型应用,重点剖析体系的协同机理,并提出当前研究中存在的关键问题与未来发展方向,以期为DBD-光催化体系在水污染治理中的高效应用提供理论参考与实践指导。

1 DBD 等离子体

等离子体被认为是宇宙中除固、液、气三态以外物质存在的“第四态”。等离子体技术是一种新型的高级氧化技术,即利用放电将空气电离成电子、离

子、激发态原子、光子等形态,生成大量的活性氧和活性氮[式(1)~式(9)],同时具有紫外光、微波、超声、冲击波等物理效应,可使常温条件下无法开展或速度缓慢的化学反应高效进行^[5-6]。等离子体技术兼具电化学、光催化、高能电子轰击等高级氧化效应,具有效率高、运行成本低等优势,在医疗、环保、材料、隐形技术等领域已得到快速发展与推广应用^[7-8]。等离子体技术有望成为未来环境污染治理和工业节能减排的重要手段之一。DBD是非热等离子体中最常见的形式,能够在常温常压下高效运行^[9],与其他等离子体放电方式相比,降低了操作难度和成本,并具有较高的能量利用效率,从而在规模化水处理应用中表现出显著的优势^[10]。



尽管DBD等离子体在有机污染物降解方面展现出广阔应用前景,但其效率与稳定性仍受到多方面制约。界面传质是影响DBD工作效率的一个因素,DBD活性物种在气相或气液界面易发生非靶向反应而失活,难以有效进入液相与污染物作用,限制了其对溶解污染物的直接降解。另一方面,DBD产生的活性物种寿命极短,在接触目标污染物之前会被反应器内壁或液相中的其他组分消耗,其与非目标物质的竞争性反应使得整体矿化效率进一步降

低^[11]。DBD 系统中紫外光未得到充分利用也是影响系统效率的一个重要因素。Zhang 等^[12]研究了 DBD 放电产生的紫外光辐射对双酚 A (BPA) 的降解效果,在 Ar-DBD 中,紫外辐射使 BPA 降解约 7%,而在空气-DBD 中,紫外辐射使 BPA 降解约 2%。研究证实了 DBD 放电产生的紫外光无法单独用于降解污染物,总体来看,活性物种传输受限、矿化效率偏低及对紫外光的利用不足共同限制了单一 DBD 系统的性能,亟须通过协同策略提升整体的降解效果。

2 光催化氧化反应

光催化是一种高级氧化技术,当半导体氧化物被能量大于或等于其禁带宽度的光子激发时,价带电子会跃迁至导带,从而产生具有强氧化还原能力的电子-空穴对。这些光生载流子可与表面吸附的 H₂O 和 O₂ 发生反应,生成·OH、·O₂等活性氧物种,进而实现有机污染物的高效降解甚至完全矿化^[13] [式(10)~式(13)] (图 1)。相较于传统的高级氧

化技术,光催化氧化具有温和反应条件、低能耗、简便操作且无二次污染等优势。在全球能源紧缺的背景下,该技术实现了光能向化学能的高效转化,展现出广阔的应用前景。目前,基于光催化氧化技术降解水体中污染物的研究已成为国际环境领域的热点方向^[14]。光催化的效率与 3 个方面有关,电荷的分离与传输、光吸收及利用,以及催化剂表面的自由基反应^[15]。然而,受限于催化剂本身的性质,光生电子与空穴容易发生快速复合,有效载流子的数量减少,进而抑制了光催化反应效率。此外,部分光催化剂在可见光区域的光吸收能力不足,限制了其在实际应用中太阳光等宽谱光源的利用。催化剂表面有限的反应位点也进一步影响了最终的催化性能^[16]。

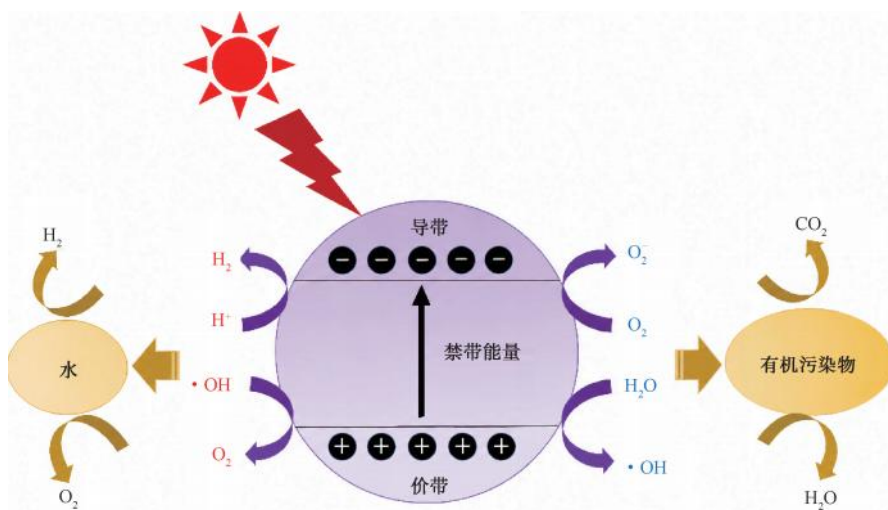
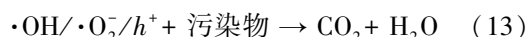
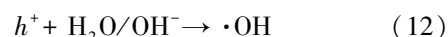
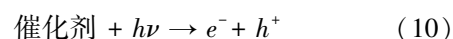


图 1 光催化氧化降解有机物的过程

Fig. 1 Process of Photocatalytic Oxidation for Organic Pollutants Degradation

3 DBD-光催化体系中污染物降解的关键机制

3.1 等离子体诱导的伪光催化效应

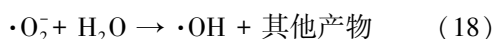
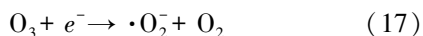
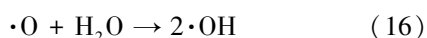
在 DBD 等离子体放电过程中会产生大量高能电子、自由基及活性粒子,这些物种不仅可直接降解污染物,还可与光催化体系协同作用以提升降解率^[17]。其中,伪光催化是一种由高能电子在液相界面或催化剂表面激发半导体材料、形成电子-空穴对的非传统催化机制。Chen 等^[18]研究发现,DBD

放电过程产生的高能电子能够有效激活 N 型半导体催化剂,促进电子-空穴对的形成,进而实现类似光催化的反应路径。伪光催化的运行无需光照,其通过 DBD 等离子体生成的高能电子来激发半导体材料,使得体系能够在黑暗条件下运行。Guo 等^[19]制备了 N 型异质结石墨烯-ZnO 纳米颗粒,在暗环境下研究发现,位于 DBD 放电针尖附近的催化剂的氧化性能显著优于远离放电区的催化剂。伪光催化对异质结光催化也具有显著促进作用。Wang 等^[20]

发现对于 $\text{Bi}_2\text{MoO}_6\text{-MnO}_2$ 异质结复合催化剂, DBD 高能电子通过激发 Bi_2MoO_6 生成电子-空穴对, 电子在异质结界面的作用下迁移至 MnO_2 , 促进 Mn^{4+} 再生并增强其氧化能力。相比单一 MnO_2 催化剂, 伪光催化效应在异质结体系中得到了充分发挥, 显著提升了催化效率。伪光催化反应通过等离子体提供的电子启动光催化反应, 克服了传统光催化对光源的依赖性。在实际应用中, 光照条件常常受到限制, 尤其在工业环境或夜间运行时, 光源不足会使光催化的效果大打折扣, “伪光催化”可有效解决这一问题。

3.2 DBD 产生的 O_3 与光催化活性物种的耦合

DBD 生成的 O_3 在协同体系中发挥着重要的作用。 O_3 主要通过氧分子与高能电子解离 O_2 产生的 $\cdot\text{O}$ 反应生成[式(14)]。然而, O_3 易与背景气体发生反应被消耗, 从而造成能源浪费^[21]。大比表面积的催化剂能够提供丰富的活性位点, 促进 O_3 在其表面富集反应, 减少其在体系中的无效消耗^[22]。 O_3 可通过 3 种机制吸附在光催化剂表面: 路易斯酸位的解离/分子吸附、物理吸附以及与表面存在的 $\cdot\text{OH}$ 形成弱 H_2 键^[23]。 O_3 在光催化剂表面吸附后, 可被光生空穴或热激活分解, 生成 O_2 、 $\cdot\text{O}$ 或过氧化物[式(15)], 进一步与水反应生成 $\cdot\text{OH}$, 此过程显著增加体系中自由基浓度[式(16)], 强化氧化能力; 同时, 光生电子 e^- 可将 O_3 还原为 $\cdot\text{O}_2^-$, 抑制电子-空穴复合, 延长载流子寿命, 并促进 $\cdot\text{OH}$ 生成, 从而提高污染物降解率^[24-25][式(17)~式(18)]。Ren 等^[26]的研究表明, DBD 等离子体产生的 O_3 能够与钴氧羟化物晶格表面的大量氧空位和路易斯酸位点相互作用, 这一过程中, O_3 在催化材料的活性位点上发生吸附-解离反应, 其解离产物与水 and 电子进一步发生反应, 生成 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 等强氧化性中间体, 这些中间体与光生空穴和电子协同作用, 提升了协同体系中自由基的浓度和载流子的利用效率。



3.3 DBD 等离子体紫外光增强光催化效率

在单一 DBD 系统中, 等离子体放电过程中产生的紫外光辐射往往无法得到有效利用, 从而导致能量损失^[27]。在 DBD 体系中引入光催化剂可有效利用这部分能量, 在 DBD 光催化协同系统中, 等离子体放电产生的紫外光可直接激发光催化剂, 增加电子-空穴对的生成量^[28]。同时, O_3 对紫外光有强吸收性, 其分解产生的能量可间接传递给光催化剂, 促进载流子分离。研究者^[29]常通过构建 ZnO 与赤铁矿等磁性半导体的异质结结构来拓宽光催化剂的可见光响应范围, 并利用材料自身的磁性提高光生载流子的分离效率。Achouri 等^[30]制备的 $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 异质结正是这一策略的典型应用, 在微反应器中使用紫外光照射降解水杨酸来评价光催化效率。随着光照时间的增长, 水杨酸在 297 nm 的特征峰逐渐降低, 反应 60 min 后降解率达到 64%。Ansari 等^[31]合成了 $\text{ZnO}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 复合催化剂, 并与 DBD 反应器协同使用降解水中的阿莫西林。复合体系的阿莫西林降解率达到 99.3%。Xie 等^[32]进一步揭示了异质结的机理, 在 DBD 的紫外辐射下, Fe_2O_3 中生成的电子可以被注入 ZnO , 而在 ZnO 中生成的空穴可以被注入 Fe_2O_3 。当 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 ZnO 的电子和电荷在耦合颗粒的边界处的光生电子浓度足够高时, 紫外光生成的电子可以很容易地从 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 颗粒的导带转移到 ZnO 的导带, 同时, 空穴从 ZnO 的价带转移到 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的价带。在 DBD-光催化协同系统中, 尽管 DBD 产生的紫外光强度有限, 但在特定的异质结构下能够充分利用 DBD 产生的紫外光激发催化剂, 从而促进光生电荷的有效分离, 抑制载流子复合并提升光催化效率。

3.4 DBD 电场对光生载流子迁移行为的调控

DBD 过程会产生一个持续的强电场。放电过程中产生的表面电荷会扭曲电介质之间的电场, 并影响反应性物质的产生^[33]。电场通过尖端效应和介电常数差异效应进一步集中在催化剂表面, 形成高能电子和离子密度区域, 促进活性氧物种(如 $\cdot\text{OH}$ 、 O_3)的生成。在光催化过程中, 电场驱动电子向阴极迁移, 空穴向阳极迁移, 缩短载流子复合路径。外加强电场的存在可以防止电子与催化剂表面的空穴之间重新连接, 从而提升光催化效率^[34]。Lu 等^[35]研究发现, 加入 P25/M3 光催化剂

后,氟茚的降解率相比于单独使用 DBD 等离子体处理时提高了 25.1%。在 P25/M3 吸收 DBD 产生的高能量后,其束缚的价带电子发生电子跃迁,转变为自由的导带电子,光催化剂表面产生大量的电子空穴对,其在 DBD 产生的紫外光和电场力的抑制下不易复合,从而得以使空穴氧化水分子生成 $\cdot\text{OH}$ 。

4 DBD-光催化体系降解水体中污染物的研究进展

本文对近年来已报道的污染物类型、试验参数及降解效果进行了系统整理与归纳,具体信息如表 1 所示^[36-55]。在多种类型光催化剂的协同作用下,DBD-光催化体系能够高效降解多类典型污染物,体现了该体系在应对复杂水体处理中的实际应用潜力。

表 1 DBD-光催化体系对水体中污染物降解的应用汇总^[36-53]
Tab. 1 Summary of Applications of DBD-Photocatalytic Systems in Pollutants Degradation in Water Bodies^[36-53]

污染物种类	光催化剂种类	最佳 DBD 参数	最佳催化 剂用量	污染物质量浓 度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最佳 pH 值	反应速率常数/ ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	降解率	参考 文献
亮蓝	TiO_2	21 kV	0.3 g/L	10	—	—	98%	[36]
孔雀石绿	$\text{ZnS}/\text{GO}/\text{聚苯胺}$	输入功率为 60 W	0.1 g/L	20	—	0.29	97%	[37]
活性橙 16	TiO_2	—	2 g/L	50	—	0.073 1	100%	[38]
亚甲基蓝	ZnO 纳米颗粒	7 kV, 放电频率 为 18 kHz	0.2 g/L	35	—	—	95%	[39]
酸性绿 25	$\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{TiO}_2$	输入功率 80 W	0.33 g/L	150	—	—	94.2%	[40]
酸性蓝 25	TiO_2	15 kV	0.5 g/L	50	2	—	90%	[41]
四环素	纳米 TiO_2	输入功率为 36 W	1.5 g/L	50	—	—	85.1%	[42]
诺氟沙星	TiO_2	放电功率为 15 W 或 25 W	2.5 g/L	30	3 和 11	0.08	92.6%	[43]
左氧氟沙星	$\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{活性炭}$ 纤维(ACFs)	14 kV	0.49 g/L	20	2.69	—	93%	[44]
邻苯二甲酸二甲酯	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	15 kV	1 g/L	100	3	0.128	98.09%	[45]
苯酚	还原氧化石墨烯 (RGO)- TiO_2	90 kV	1.5 g/L	99.76	11.1	0.127 9	99.2%	[46]
苯酚	Ag/TiO_2	20 kV	0.2 g/L	50	—	—	98%	[47]
BPA	ZnO 纳米颗粒	5 kV	50 mg/L	20	—	0.054 7	85.4%	[48]
BPA	WO_3	5 kV	175 mg/L	20	—	—	83%	[49]
硝基苯酚	纳米 ZnO	12 kV	250 mg/L	15	—	0.066 5	98%	[50]
布洛芬	$\text{g-C}_3\text{N}_4$	11.6 kV	75 mg/L	10	—	0.123	98%	[51]
罗丹明 B	TiO_2 -柱状蒙脱石 (PAMMH)	13 kV	1 g/L	40	—	—	91%	[52]
Cr(VI)	TiO_2/rGO	22 kV	0.3 g/L	100	2	—	100%	[53]

5 影响 DBD-光催化降解率的关键因素

5.1 DBD 参数

DBD 电压决定了等离子体中活性物种的生成,进而影响污染物的降解率。在 Lin 等^[47]的研究中,DBD 与 Ag/TiO_2 的协同体系电压由 15 kV 升至 17 kV 时,降解率由 32% 升至 92%,表明高电压有利于活性物种的生成。然而,电压并非越高越好,Sang

等^[46]的研究在 90 kV 的电压下达到 94.7% 的降解率,但与低电压的处理效果相比,过高的电压会导致能量的浪费。因此,协同体系中需针对污染物与催化剂的特性,合理设定放电参数,以实现反应效率与能耗的最优平衡。

5.2 污染物初始质量浓度

在 Xin 等^[40]降解酸性绿 25 的研究中,酸性绿

25 质量浓度为 150 mg/L 时使用 DBD 协同 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{TiO}_2$ 降解,降解率可达 94.2%,而对于质量浓度为 300 mg/L 的酸性绿 25 去除率仅为 84%。同样,He 等^[42]的试验中协同体系对 100 mg/L 初始质量浓度下的四环素降解率仅为 59.1%,远低于其他中低浓度四环素的降解效果。高浓度的污染物分子以及氧化过程生成的大量中间产物会加快 DBD 放电产生的自由基的消耗速率,从而影响污染物的降解。此外,当污染物初始浓度较高时,大量分子会竞争光催化剂上有限的活性位点,导致部分污染物无法被有效降解。过多分子吸附在活性位点上会导致光催化剂表面钝化,降低电子-空穴对的产生速率。在实际工程中,建议采用预处理措施控制污染物浓度,避免浓度过高而导致系统处理效率下降。

5.3 催化剂类型

光催化剂的结构与组成对协同体系性能起重要作用。单一半导体材料(如 TiO_2 、 ZnO)虽然反应活性较高,但常受限电子-空穴复合速率导致降解率偏低,在 DBD 协同体系中往往效果不佳。相比之下,复合型催化剂(如 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 、

RGO-TiO_2)通过构建异质结、引入多相界面等合成策略,增强了对 DBD 产物的捕获与利用,实现与 DBD 放电的高效协同。汇总结果表明,在低剂量条件下, Ag/TiO_2 仅用 0.2 g/L 即实现对苯酚 98% 的降解率^[47],说明复合材料在光响应、表面吸附与反应活性等方面具备显著优势。未来的研究应注重构建 DBD 协同作用显著的复合催化剂。

5.4 初始 pH

pH 不仅影响等离子体放电过程中 O_3 和 $\cdot\text{OH}$ 等活性氧物种的生成与稳定性^[54],还会调节光催化剂的表面电荷状态及污染物的形态,从而共同作用于污染物的吸附与降解过程。 $\cdot\text{OH}$ 在 DBD-光催化体系中的生成机制如图2所示,该过程涉及多种反应,pH 的变化会影响这些反应的进行。Gong 等^[44]和 Ahmadi 等^[45]的研究分别在 pH 值为 2.69 和 3 的条件下达到最高降解率,酸性环境能够抑制 H_2O_2 的分解,同时促进其与光催化剂表面的电子和空穴反应,生成更多 $\cdot\text{OH}$ ^[55]。在碱性环境中, O_3 易与水反应生成大量 $\cdot\text{OH}$ ^[56],Sang 等^[46]的研究中,当 pH 值分别为 8.9 和 11.1 时,苯酚的去除率分别提高至

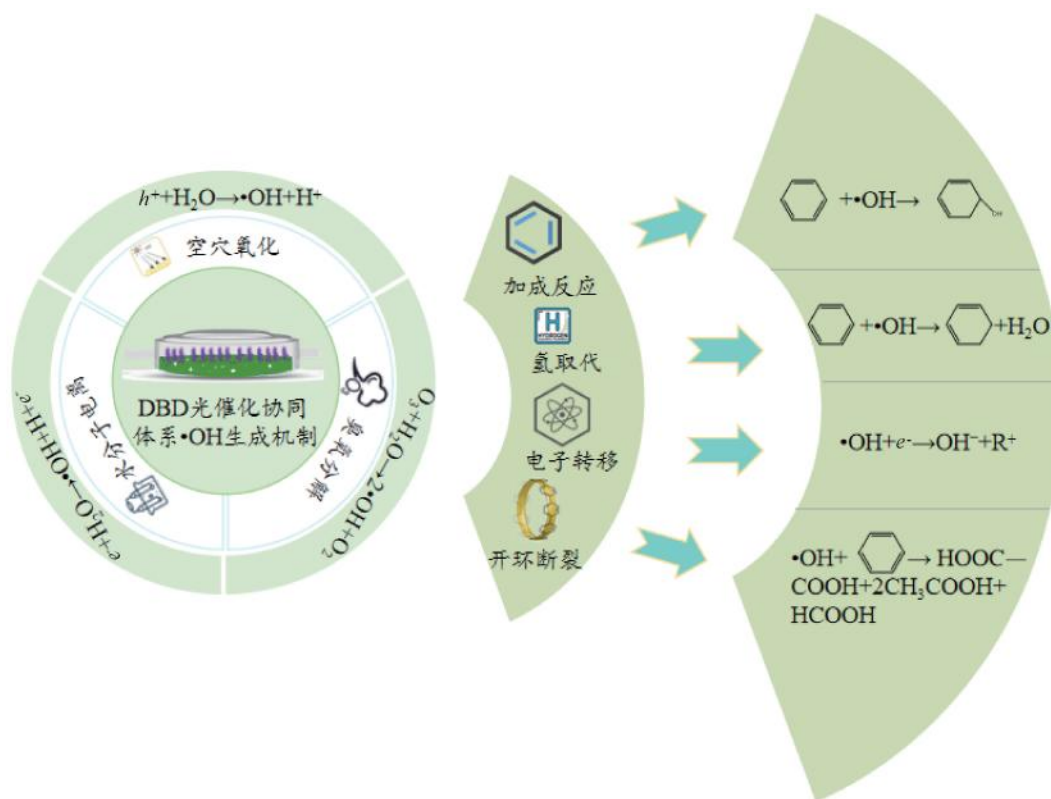


图2 $\cdot\text{OH}$ 在 DBD-光催化体系中的生成机制及其作用

Fig. 2 Formation Mechanism and Role of $\cdot\text{OH}$ in DBD-Photocatalytic Systems

97.4%和99.2%。这一现象可通过协同体系中 O_3 的变化来解释,随着pH的升高, O_3 的分解速率增加,溶解的 O_3 可分解生成更多的 $\cdot OH$,从而促进协同体系中污染物的降解。Feng等^[43]研究发现,在pH值为3和11的条件下,DBD-光催化体系对诺氟沙星均表现出较高的降解率,表明该协同体系在酸碱环境中均具有良好的适应性。同时,一些研究表明,在中性环境下协同体系依然能够维持较高的降解率,Vaziri等^[57]用协同体系降解2,4-二硝基甲苯发现,pH值从3升高至11时,降解率呈先增大后减小的趋势,在pH值为7时达到最佳效果。此时2,4-二硝基甲苯的质子化程度降低,减弱了其带正电荷的纳米复合材料之间的静电排斥力,更容易附着于光催化剂被活性氧物种降解。在实际运用中应针对污染物和催化剂特性合理调控体系的pH,以达到最佳处理效果。

5.5 环境因素和外部条件

水中共存物质对DBD-光催化降解体系的影响主要表现在竞争活性物质、改变反应环境、遮蔽效应及生成副产物等方面。水体中无机阴离子和腐植酸等物质会与目标污染物竞争活性物种从而使降解率下降。无机阴离子主要通过调控活性物种的生成与迁移路径、改变溶液pH以及影响体系对光的吸收行为来介导反应过程,Sang等^[48]的研究探讨了 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 对体系的影响, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 在低离子浓度下通常表现出对 $\cdot OH$ 等高活性氧物种的猝灭作用,导致协同体系的反应速率显著下降;而在较高离子浓度下, Cl^- 可通过生成 $\cdot Cl$ 、 $\cdot Cl_2$ 等次级活性物种,弥补了 $\cdot OH$ 的损耗。 SO_4^{2-} 则在高离子浓度条件下生成氧化能力较强的 $SO_4^{\cdot -}$ 和 $S_2O_8^{\cdot -}$,抵消部分对其原本的抑制作用。 CO_3^{2-} 在低离子浓度下会抑制 $\cdot OH$,但较高离子浓度的 CO_3^{2-} 可通过提高溶液碱度促进 O_3 的分解,从而生成更多 $\cdot OH$,显著增强了对苯酚的氧化效果。

腐殖质在DBD光催化协同体系中的作用复杂且具有两面性。其不仅通过与活性自由基的竞争反应,抑制了部分污染物的降解速率,还通过光敏化作用生成活性氧物种,促进污染物的降解^[58]。Li等^[59]的研究表明,DBD光催化协同体系中,腐殖质的适量存在能够显著提高目标污染物氧氟沙

星的降解率。研究数据表明,当腐殖质质量浓度为30 mg/L时,氧氟沙星的去除率达到95.08%;在腐殖质质量浓度提升至50 mg/L时,去除率进一步提高到97.58%。腐殖质在光敏化作用下生成 $\cdot OH$ 和 $\cdot O_2^-$ 直接参与污染物降解,补偿体系中因捕获作用而消耗的 $\cdot OH$,从而维持并提高体系的降解能力。

6 DBD-光催化协同体系在实际运用中面临的挑战

6.1 反应器结构优化

DBD反应器的结构设计在决定等离子体活性物种的传递效率和光催化剂的利用方面具有关键作用。Wright等^[60]将等离子体放电区域布设于气液界面附近,可有效促进活性氧物种和活性氮物种向液相的迁移,从而提高短寿命活性物种从气相到液相的转移效率。此外,在DBD反应器设计中引入微气泡技术,能够使短寿命物种在液相中保持更久,从而提升与污染物的反应概率。Meropoulis等^[61]在DBD反应器中设置了等离子体微泡柱,结果表明,相较于常规气液DBD系统,液相中 $\cdot OH$ 的生成量提升了约两倍。

不同的放电结构设计在催化剂分布、气液界面行为等方面存在显著差异,从而直接影响光催化剂的空间布设方式与可回收难易程度。针对水相体系中光催化剂易于流失、团聚、难以分离的特点,反应器结构应优先考虑与催化剂形态相匹配的布设方案。在平板式反应器中,催化剂可采用固定化技术均匀负载于电极表面或载体基底,而在针板式或管式结构中,可采用磁性复合光催化剂结合磁场辅助分离技术,在反应器内部或出口区布设磁控模块,实现光催化颗粒的磁场定向富集与分离。

综上所述,未来的DBD反应器设计应围绕光催化材料与等离子体界面的耦合机制展开,在提升氧化效率的同时强化催化剂的可控回收,并推动智能化与规模化应用,以实现协同体系在实际水处理场景中的高效、稳定与可持续运行。

6.2 光催化剂循环利用的稳定性

在现代环境治理中,光催化材料因其在污染物降解中的高效性而备受关注。然而,为了在实际应用中实现经济和环境效益最大化,光催化材料不仅需要展现出优异的催化活性,还必须具备良好的稳

定性和可重复利用性^[62]。稳定性和可重复利用性直接影响材料的使用寿命和长时间应用中的性能保持,这对于减少资源浪费、降低成本和防止二次污染至关重要。探讨在 DBD 环境下光催化材料在实际应用中的稳定性表现,能够为开发高效且耐久的环境修复材料提供重要的指导。

研究^[63]表明,DBD 等离子体产生的化学和物理效应会在高压下使催化剂的表面结构崩溃,降低可用活性位点的数量。在 Zhang 等^[64]的研究中,制备的 TiO_2 -rGO 随着循环次数的增加对乙酰氨基酚的降解率逐步下降。其原因是重复使用导致催化剂的结构性退化,导致催化剂表面有效含氧官能团的减少。X 射线电子表征证实了这一猜想。含氧官能团的减少导致了 rGO 片层的重新堆叠增加,降低了它们的亲水性,从而降低催化剂对有机污染物的吸附能力。此外,含氧官能团的减少也减少了与金属氧化物结合的位点,导致 rGO 片层上附着的 TiO_2 减少,从而降低了 TiO_2 -rGO 的光催化性能。

不同类型的光催化材料在多次使用后的性能往往受其独特的结构和组成影响。材料的结构特性不仅决定了其在催化反应中的活性和选择性,也在一定程度上影响了其在重复使用过程中的稳定性和循环利用能力。Ansari 等^[31]在 DBD 环境下将 ZnO 与 Fe_2O_3 复合,5 次运行后观察到的污染物降解率仍高达 97.0%,仅下降了 2.0%。研究认为,高结构阵列的金属结构强化了催化剂在 DBD 环境下的循环稳定性,材料复合形成的异质结构能够显著提升其长期使用性能。催化剂的晶体结构在长期使用中的稳定性至关重要。稳定的晶体结构有助于维持催化剂在多次循环中的性能,避免因晶格畸变或晶相转变而导致的活性降低^[65]。另一方面,晶体结构的稳定性还影响到催化剂的抗污染物吸附和表面再生能力^[66]。保持表面官能团的稳定性也是实现催化剂高效重复利用的关键,催化剂的多次使用可能会导致表面官能团发生变化或流失,造成催化剂的光催化性能下降。

为提高催化剂的使用寿命,未来的研究应优化催化剂的结构设计,设计具有更强耐久性和抗氧化性的光催化材料,要求其需要有对复杂环境的适应性。除此之外,需要改进反应流程并优化操作,在反应和回收过程中减少对材料的损伤。

7 总结与展望

本文详细地介绍了 DBD 等离子体与光催化技术相结合去除水体中难降解污染物的研究进展。探讨了光催化与 DBD 等离子体 2 种工艺协同作用下的促进机制,梳理了 DBD-光催化降解污染物的最新研究进展,并探讨了影响因素对体系处理效果的动态作用机制。该技术有望为水体中的污染物治理提供新的解决方案,助力“双碳”目标下的水资源可持续利用。为了更好地适应实际应用场景,未来还需深入开展以下几方面的研究。

(1) 大多数研究仍主要集中于一元光催化剂的探索,今后可优化光催化剂的设计与合成,以提高在 DBD 环境下光催化材料在实际应用中的稳定性和重复使用性。

(2) 目前对 DBD-光催化体系的研究多集中于实验室规模的模拟,实际应用案例仍显不足。未来研究应重点关注实际污水处理过程中有机污染物的降解路径、副产物的生成及其潜在毒性变化,以及共存物质对反应效率的影响。

反应器的结构特性对催化剂的空间布设和回收性具有重要影响,未来研究应着重于利用光催化材料与 DBD 界面的耦合机制对反应器结构设计进行调控,从而推动协同技术在水处理领域的规模化应用。

参考文献

- [1] Wang H, Yang L. A sustainable solution for environmental purification: A review of high-performance hydrogels based on chitosan[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 309: 142834. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.142834.
- [2] Zhou J, Wei T C, An X Q. Combining non-thermal plasma technology with photocatalysis: A critical review[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2023, 25(3): 1538-1545.
- [3] Dong B Y, Wang P X, Li Z D, et al. Degradation of salicylhydroxamic acid in mineral beneficiation wastewater by dielectric barrier discharge and $\text{La-Fe}_3\text{O}_4$ -doped activated carbon: Parametric optimization, kinetics, activation process, and transformation pathway[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2023, 16(9): 105048.
- [4] Giardina A, Tampieri F, Biondo O, et al. Air non-thermal plasma treatment of the herbicides mesotrione and metolachlor in water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 372: 171-180. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.098.

- [5] Li J, Ma C H, Zhu S J, et al. A review of recent advances of dielectric barrier discharge plasma in catalysis [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(10): 1428.
- [6] Li S J, Dang X Q, Yu X, et al. The application of dielectric barrier discharge non-thermal plasma in VOCs abatement: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 388: 124275. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124275.
- [7] Zhang J C, Du Q J, Yang Y X, et al. Research progress and future trends of low temperature plasma application in food industry: A review[J]. *Molecules*, 2023, 28(12): 4714.
- [8] Liu F, Zhang L H, Zhang Z, et al. The application of plasma technology for the preparation of supercapacitor electrode materials[J]. *Dalton Transactions*, 2024, 53(13): 5749–5769.
- [9] Okazaki K, Nozaki T. Ultrashort pulsed barrier discharges and applications[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2002, 74(3): 447–452.
- [10] Subedi D P, Joshi U M, Wong C S. Dielectric barrier discharge (DBD) plasmas and their applications[M]//Rawat R S. *Plasma science and technology for emerging economies: An AAAPT experience*. Singapore: Springer Singapore, 2017; : 693–737. DOI: 10.1007/978-981-10-4217-1_13.
- [11] Cheng F, Wang J L. Regulation of reactive species during ionizing radiation by peroxydisulfate for enhanced degradation of typical pollutants in coking wastewater [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 359: 124581. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.124581.
- [12] Zhang H, Huang Q, Li L M, et al. Distinguish the role of DBD-accompanying UV-radiation in the degradation of bisphenol A [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2016, 36(2): 585–598.
- [13] Tong H, Ouyang S, Bi Y P, et al. Nano-photocatalytic materials: Possibilities and challenges[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(2): 229–251.
- [14] Yu Y D, Wang S S, Teng J R, et al. Photocatalytic material-microbe hybrids: Applications in environmental remediations [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 9: 815181. DOI: 10.3389/fbioe.2021.815181.
- [15] Li S G, Ji N, Huang H W. Coupling morphology control and surface I grafting for boosting the photocatalytic activity of Bi₂O₃ [BO₂(OH)] nanosheets[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 582: 152407. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.152407.
- [16] Kuang X Y, Jin X K, Chen F J, et al. Construction of the V₀BiOBr/V₂S₅ZnIn₂S₄ heterojunction for photocatalytic hydrogen production and dye removal under simulated sunlight [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 74: 361–371. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.088.
- [17] Chen B Y, Gao X X, Chen K, et al. Regulation characteristics of oxide generation and formaldehyde removal by using volume DBD reactor [J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20(2): 024009.
- [18] Chen S, Wang H Q, Shi M P, et al. Deep oxidation of NO by a hybrid system of plasma-N-type semiconductors: High-energy electron-activated “pseudo photocatalysis” behavior [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(15): 8568–8577.
- [19] Guo H, Yang H, Huang J W, et al. Theoretical and experimental insight into plasma-catalytic degradation of aqueous p-nitrophenol with graphene-ZnO nanoparticles [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 295: 121362. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121362.
- [20] Wang H Q, Chen S, Wang Z, et al. A novel hybrid Bi₂MoO₆-MnO₂ catalysts with the superior plasma induced pseudo photocatalytic-catalytic performance for ethyl acetate degradation [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 254: 339–350. DOI: 10.1016/j.apcatb.2019.05.018.
- [21] Navascués P, Obrero-Pérez J M, Cotrino J, et al. Isotope labelling for reaction mechanism analysis in DBD plasma processes[J]. *Catalysts*, 2019, 9(1): 45.
- [22] Gonfa M T, Shen S, Chen L, et al. Selective hydroxylation of benzene *via* enhanced generation and utilization of hydroxyl radicals with CuZnSbO photocatalyst [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 706: 135746. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.135746.
- [23] Hafeez A, Shezad N, Javed F, et al. Synergetic effect of packed-bed corona-DBD plasma micro-reactor and photocatalysis for organic pollutant degradation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 269: 118728. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118728.
- [24] Mouele E S M, Tijani J O, Badmus K O, et al. A critical review on ozone and co-species, generation and reaction mechanisms in plasma induced by dielectric barrier discharge technologies for wastewater remediation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(5): 105758.
- [25] Ye H L, Liu Y Q, Chen S, et al. Synergetic effect between non-thermal plasma and photocatalytic oxidation on the degradation of gas-phase toluene: Role of ozone [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2019, 40(5): 631–637.
- [26] Ren J Y, Jiang N, Shang K F, et al. Synergistic degradation of trans-ferulic acid by water falling film DBD plasma coupled with cobalt oxyhydroxide: Performance and mechanisms [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 372: 321–331. DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.147.
- [27] Laroussi M, Leipold F. Evaluation of the roles of reactive

- species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2004, 233 (1/2/3): 81 – 86. DOI: 10. 1016/j. ijms. 2003. 11. 016.
- [28] Jie J, He C T, Zhao J P, et al. Laser-induced plasma irradiation driven rapid photocatalytic degradation of methylene blue with TiO₂ nanoparticles [J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12 (9): 3810.
- [29] Couture P, Williams G V M, Kennedy J, et al. Nanocrystalline multiferroic BiFeO₃ thin films made by room temperature sputtering and thermal annealing, and formation of an iron oxide-induced exchange bias [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 3061 – 3068. DOI: 10. 1016/j. jallcom. 2016. 11. 344.
- [30] Achouri F, Corbel S, Aboulaich A, et al. Aqueous synthesis and enhanced photocatalytic activity of ZnO/Fe₂O₃ heterostructures [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2014, 75 (10): 1081–1087.
- [31] Ansari M, Hossein Mahvi A, Hossein Salmani M, et al. Dielectric barrier discharge plasma combined with nano catalyst for aqueous amoxicillin removal: Performance modeling, kinetics and optimization study, energy yield, degradation pathway, and toxicity[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 251: 117270. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2020. 117270.
- [32] Xie J, Zhang L, Li M X, et al. α -Fe₂O₃ modified ZnO flower-like microstructures with enhanced photocatalytic performance for pentachlorophenol degradation [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(8): 9420–9425.
- [33] Lu Y M, Ono R, Komuro A. Simultaneous measurement of electrical potential on both sides of the dielectric surface in a parallel-plate dielectric barrier discharges and analysis of net electric field [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2024, 33(4): 04LT01.
- [34] Neyts E C. Plasma-surface interactions in plasma catalysis[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2016, 36(1): 185–212.
- [35] Lu H Y, Deng C X, Yu Z M, et al. Synergistic degradation of fluorene in soil by dielectric barrier discharge plasma combined with P25/NH₂-MIL-125 (Ti) [J]. *Chemosphere*, 2022, 296: 133950. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2022. 133950.
- [36] Drhimer F, Rahmani M, Regraguy B, et al. Treatment of brilliant blue by plasma and combination plasma with photocatalysis process intensification[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2024, 104 (20): 9215 – 9233.
- [37] Bagheri H, Pasha M A, Lakouraj M M, et al. A novel combination of non-thermal plasma process and a heterogenous nanophotocatalyst-sorbent comprising zinc sulfide, graphene oxide and polyaniline as an efficient strategy for treatment of organic-contaminated water[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 55: 104254. DOI: 10. 1016/j. jwpe. 2023. 104254.
- [38] Mitrović T, Tomić N, Djukić-Vuković A, et al. Atmospheric plasma supported by TiO₂ catalyst for decolourisation of reactive orange 16 dye in water [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11(12): 6841–6854.
- [39] Abdel-Fattah E, Alotibi S. Synergistic effect of nonthermal plasma and ZnO nanoparticles on organic dye degradation [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(18): 10045.
- [40] Xin L, Sun Y B, Feng J W. Ag₃PO₄/TiO₂-assisted degradation of malachite green in aqueous solution treated by dielectric barrier discharge plasma [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2016, 91(7): 2131–2142.
- [41] Ghodbane H, Hamdaoui O, Vandamme J, et al. Degradation of AB25 dye in liquid medium by atmospheric pressure non-thermal plasma and plasma combination with photocatalyst TiO₂ [J]. *Open Chemistry*, 2015, 13: 000010151520150040. DOI: 10. 1515/chem-2015-0040.
- [42] He D, Sun Y B, Xin L, et al. Aqueous tetracycline degradation by non-thermal plasma combined with nano-TiO₂ [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 258: 18–25. DOI: 10. 1016/j. cej. 2014. 07. 089.
- [43] Feng J W, Pan L J, Liu H Y, et al. Synergistic degradation of the aqueous antibiotic norfloxacin by nonthermal plasma combined with defective titanium dioxide exposed { 001 } facets [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 300: 121761. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2022. 121761.
- [44] Gong S, Sun Y B, Zheng K, et al. Degradation of levofloxacin in aqueous solution by non-thermal plasma combined with Ag₃PO₄/activated carbon fibers: Mechanism and degradation pathways [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 250: 117264. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2020. 117264.
- [45] Ahmadi E, Shokri B, Mesdaghinia A, et al. Synergistic effects of α -Fe₂O₃ – TiO₂ and Na₂S₂O₈ on the performance of a non-thermal plasma reactor as a novel catalytic oxidation process for dimethyl phthalate degradation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 250: 117185. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2020. 117185.
- [46] Sang W J, Zhan C, Hao S W, et al. Effect of the presence of inorganic anions on the degradation of phenol by dielectric barrier discharge plasma combined with RGO-TiO₂ [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 41: 101997. DOI: 10. 1016/j. jwpe. 2021. 101997.
- [47] Lin Q H, Peng H Y, Xie W M, et al. Evaluation catalytic performance of Ag/TiO₂ in dielectric barrier discharge plasma

- [J]. Vacuum, 2022, 197: 110844. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110844.
- [48] Yan X, Yi C W, Wang Y H, et al. Multi-catalysis of nano-zinc oxide for bisphenol A degradation in a dielectric barrier discharge plasma system; Effect and mechanism [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 231: 115897. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.115897.
- [49] Wang H J, Shen Z, Yan X, et al. Dielectric barrier discharge plasma coupled with WO_3 for bisphenol A degradation [J]. Chemosphere, 2021, 274: 129722. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129722.
- [50] Farzinfar B, Qaderi F. Synergistic degradation of aqueous p-nitrophenol using DBD plasma combined with ZnO photocatalyst [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 168: 907–917. DOI: 10.1016/j.psep.2022.10.060.
- [51] Wang X P, Luo J H, Huang Y Z, et al. Degradation of pharmaceutical contaminants by bubbling gas phase surface discharge plasma combined with $\text{g-C}_3\text{N}_4$ photocatalysis [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2021, 7 (3): 610–621.
- [52] Butman M F, Gushchin A A, Ovchinnikov N L, et al. Synergistic effect of dielectric barrier discharge plasma and TiO_2 -pillared montmorillonite on the degradation of rhodamine B in an aqueous solution [J]. Catalysts, 2020, 10(4): 359.
- [53] Peng H Y, Duan L J, Xie W M, et al. Enhanced removal of Cr (VI) from wastewater by dielectric barrier discharge plasma coupled with TiO_2/rGO nanocomposites; Catalytic performance and reduction mechanism [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 298: 121609. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121609.
- [54] Wang Z, Lin X Z, Huang Y X, et al. The role of hydroxylation on $\cdot\text{OH}$ generation for enhanced ozonation of benzoic acids; Reactivity, ozonation efficiency and radical formation mechanism [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 431: 128620. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128620.
- [55] Fijolek L, Świetlik J, Frankowski M. The role of sulphate and phosphate ions in the recovery of benzoic acid self-enhanced ozonation in water containing bromides [J]. Molecules, 2021, 26 (9): 2701.
- [56] He Y D, Cai Y J, Fan S Y, et al. Hydroxyl radicals can significantly influence the toxicity of ofloxacin transformation products during ozonation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 438: 129503. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129503.
- [57] Vaziri Y, Asgari G, Ghorbani-Shahna F, et al. Degradation of 2, 4-dinitrotoluene in aqueous solution by dielectric barrier discharge plasma combined with Fe-RGO-BiVO_4 nanocomposite [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 2480. DOI: 10.1038/s41598-024-52286-y.
- [58] Liu Y N, Duan J P, Zhou Q, et al. Effective degradation of lindane and its isomers by dielectric barrier discharge (DBD) plasma; Synergistic effects of various reactive species [J]. Chemosphere, 2023, 338: 139607. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139607.
- [59] Li M, Guo L, Zhao Y M, et al. Construction of an efficient synergistic catalytic system using DBD plasma and $\text{Fe-TiO}_2\text{-rGO/HCP}$ catalytic coating for ofloxacin removal [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2026, 277: 104791. DOI: 10.1016/j.psep.2023.11.044.
- [60] Wright A, Taglioli M, Montazersadgh F, et al. Microbubble-enhanced DBD plasma reactor; Design, characterisation and modelling [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 144: 159–173. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.01.030.
- [61] Meropoulis S, Aggelopoulos C A. Plasma microbubbles vs gas-liquid DBD energized by low-frequency high voltage nanopulses for pollutants degradation in water; Destruction mechanisms, composition of plasma-activated water and energy assessment [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(3): 109855.
- [62] Li S M, Shan S S, Chen S, et al. Photocatalytic degradation of hazardous organic pollutants in water by Fe-MOFs and their composites; A review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 105967.
- [63] Lee D, Hong S H, Paek K H, et al. Adsorbability enhancement of activated carbon by dielectric barrier discharge plasma treatment [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200 (7): 2277–2282.
- [64] Zhang G Y, Sun Y B, Zhang C X, et al. Decomposition of acetaminophen in water by a gas phase dielectric barrier discharge plasma combined with $\text{TiO}_2\text{-rGO}$ nanocomposite; Mechanism and degradation pathway [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 323: 719–729. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.10.008.
- [65] Adeli B, Taghipour F. Facile synthesis of highly efficient nano-structured gallium zinc oxynitride solid solution photocatalyst for visible-light overall water splitting [J]. Applied Catalysis A: General, 2016, 521: 250–258. DOI: 10.1016/j.apcata.2016.01.001.
- [66] Chen P, Li K L, Lei B, et al. Crystal-structure-dependent photocatalytic redox activity and reaction pathways over Ga_2O_3 polymorphs [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13 (43): 50975–50987.