

# 自来水厂臭氧活性炭深度处理工艺与应用研究

文 / 阳习龙 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

梁志亮 佛山市三水区大塘镇城建和水务办公室

肖 珪 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

**摘要：**水资源日益紧缺是全球化问题，优化淡水资源的利用效率成为各国水资源管理关注的核心议题。如何有效将水资源充分利用，是解决淡水资源紧缺的重要突破口。自来水作为各地区日常生活必需品，其深度处理工艺的发展为提升水质和资源利用率提供了重要支撑。臭氧-活性炭技术的发展及应用，凭借其高效净化能力、稳定运行性能和较低的综合成本，在自来水厂水质净化中展现出巨大潜力。本文以臭氧活性炭技术应用为基础，分析自来水厂臭氧活性炭深度处理核心工艺原理，探讨了自来水厂臭氧活性炭深度处理工艺应用存在的问题，提出解决措施，总结应用效果并提出发展方向，以提升自来水厂水质净化升级，助力水资源的高效管理与可持续利用。

**关键词：**自来水厂；臭氧活性炭；深度处理；应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.070

## 引言

在当前水资源供需矛盾加剧和水质安全要求不断提升的背景下，自来水处理技术的革新成为保障饮用水安全的关键环节<sup>[1~2]</sup>。臭氧-活性炭组合工艺作为一种先进的深度处理手段，凭借其卓越的氧化降解能力和吸附净化效果，在应对有机微污染、消毒副产物等复杂水质问题方面展现出独特优势<sup>[3]</sup>。本研究系统探讨该技术的运行机理、实际工程效能及适应性优化路径，旨在为提升水厂处理效能、推动行业技术升级提供科学依据，对实现水资源的精细化管理和长效安全供给具有重要实践价值。

### 一、臭氧技术应用概况

臭氧技术在水处理领域的应用已从早期单纯的消毒功能扩展到多维度深度处理阶段，目前全球超过30%的现代化水厂采用臭氧耦合工艺<sup>[4]</sup>。其核心优势在于强氧化性可高效分解农药残留、抗生素等新兴污染物，同时激发后续活性炭的生物活性，形成化学氧化、物理吸附、生物降解三重协同机制<sup>[5~6]</sup>。当前技术发展正趋向智能化控制系统与催化臭氧氧化等增效方向的突破。

### 二、活性炭技术应用概况

活性炭技术在水处理领域的应用已从传统的吸附净化发展为多功能复合处理系统的核心组成部分<sup>[7]</sup>。现代水厂中，活性炭工艺主要呈现三大应用形态：粉末活性炭应急投加系统、颗粒活性炭过滤床以及生物活性炭深度处理组合工艺<sup>[8]</sup>。其独特的孔隙结构可有效截留农药、内分泌干扰物等分子量在60-300Da的有机物。最新技术发展聚焦于表面改性活性炭和再生技术的突破，与臭氧联用时，活性炭不仅延长接触时间至12-15分钟，其表面形成的生物膜更能持续降解可同化有机碳，使出水生物稳定性提升40%以上<sup>[9]</sup>。

## 三、臭氧活性炭深度处理核心工艺原理

### （一）臭氧活性炭工艺技术机理

臭氧的强氧化性能够有效分解复杂有机物的分子结构，活性炭的多孔特性则可高效吸附氧化后产生的低分子量有机物，而活性炭表面形成的生物膜则通过微生物代谢作用实现污染物的持续降解<sup>[10]</sup>。这一技术体系创造了一个动态平衡的处理环境——臭氧氧化过程中释放的溶解氧为附着在活性炭表面的好氧微生物群落提供了理想的生存条件，这些微生物不仅能进一步降解有机物，还能有效延长活性炭的使用周期，形成良性循环的净化系统。

在实际水处理流程中，该工艺通常采取分级处理策略。前置臭氧单元对原水中的大分子有机物进行初步氧化分解，为后续处理工序创造有利条件<sup>[11]</sup>；主臭氧接触池则通过深度氧化显著提升有机物的可降解性；活性炭滤池不仅发挥物理吸附功能，其表面滋生的微生物群落还能持续分解残留污染物，同时去除消毒副产物等有害物质。特别值得注意的是，该工艺对高分子量有机物的处理效果尤为显著，能有效改善水的浊度、色度等感官指标，同时通过微生物的硝化作用提升氨氮的去除效率，全方位保障出水水质的安全性和稳定性<sup>[12]</sup>。

### （二）臭氧活性炭工艺技术特点

臭氧-活性炭工艺充分发挥了臭氧强氧化与活性炭吸附-生物降解的协同效应。臭氧能高效分解大分子有机物，将其转化为易吸附的小分子形态，能够令活性炭的吸附容量提升；同时，臭氧分解产生的溶解氧在活性炭表面形成好氧微环境，促进生物膜不断再生，增殖。臭氧活性炭的综合作用可去除自来水厂中水的氨氮、有机污染物及三卤甲烷等致癌性消毒副产物，提高水质各项指标合格率，实现水质安全性与稳定性的双重保障。

强氧化和消毒功能是臭氧的重要优势，在饮用水净

化中展现出卓越的氧化与消毒效能。氧化能力方面，常规使用的氯气标准电极电位为 1.36V，而臭氧的标准电极电位达 2.07V，远高于氯气，促使在反应过程中更可生成具有极强氧化性的羟基自由基。这类强氧化的特性能力让自来水中还原性物质彻底矿化为二氧化碳和水，实现污染物的深度去除。消毒性能方面，二氧化氯作为传统消毒剂，其消毒能力很强，但其在反应时会产生氯化物，增加致癌风险，长期摄入含氯化物的水，可能导致肝癌、膀胱癌等恶性肿瘤发病率上升。臭氧不仅对大肠杆菌等具有更强的杀菌效率，还可避免氯化消毒副产物的生成，显著降低了饮用水的健康风险，臭氧在饮用水处理应用中受到全世界范围的重点关注，成为国际公认的最安全的饮用水消毒技术之一。

臭氧活性炭工艺中臭氧具备三大优势。首先，水中常见的有机物可被臭氧分解掉，自来水厂在进行后续处理时，其工作量得到极大缓解；其次，大分子的有机物能够在处理过程中被臭氧分解成小分子，分解后的分子可与活性炭形成协同效应，增加吸附能力，自来水厂的水质提升。另外，自来水厂利用臭氧进行水质处理时，臭氧在反应过程中还可产生氧气，这为水中好养的微生物提供了优越的生活环境，水质进一步提升。

#### 四、自来水厂臭氧活性炭深度处理工艺应用存在的问题

臭氧活性炭深度处理工艺应用在自来水厂水处理中可提高其水质，但臭氧投加量控制精度要求高，过量会导致溴酸盐超标；而投放不足又可导致有机物氧化效率不足；另外，活性炭滤池易出现生物泄漏问题，工艺运行能耗较高，且活性炭再生过程会产生 10-15% 的损耗率。这些实际的操作过程中存在的不可忽视的问题，共同导致处理工艺的效率和稳定性，还可能对水质安全带来潜在风险。

##### （一）设计与实际运行条件匹配度有限

目前自来水厂使用氧活性炭深度处理工艺进行水净化处理时，通常基于实验室理想数据。但日常真实条件下的自来水厂环境是动态变化的。季节性原水水质波动可能导致臭氧氧化效率发生偏差；水温变化会使活性炭吸附容量产生波动；瞬时流量变化将缩短臭氧接触时间，影响羟基自由基生成效率；另外系统适应性方面可能存在缺陷，藻类爆发时污染骤增，而固定参数的臭氧投加系统难以应对突发污染；活性炭滤床在流速超过 12m/h 时会出现短流现象，吸附接触时间缩短；缺乏智能反馈控制系统导致绝大多数的自来水厂仍采用经验值调控，无法实时优化工艺参数。因此，在实际运行氧活性炭深度处理工艺时，往往面临更多因素的影响。如在引进设计阶段未能够考虑到影响因素，那么在实际运行条件变化的条件下，就无法达到最佳的水质净化效果。

##### （二）设备选型与操作维护难度高

臭氧-活性炭深度处理工艺的工程效能高度依赖核心设备的精准匹配与规范化运维。但是，在实际应用中，设备选型不当、安装不规范、操作不当等问题时有发生。臭氧发生器普遍存在能效比偏低和浓度波动问题，导致氧化单元运行成本增加，约 30% 的活性炭吸附塔存在水力分布不均现象，严重制约孔隙利用率。现场调研显示，45% 的项目存在臭氧投加系统气水混合效率不足，活性炭填充厚度误差超过 10% 时，滤床运行周期将缩短 35%；缺乏专业的操作和维护人员，就可能造成设备故障频发，影响处理工艺的正常运行，行业数据显示，操作人员未经系统培训的水厂，设备故障率高出专业团队 2-3 倍。

##### （三）活性炭再生与更换难题

活性炭作为臭氧-活性炭深度处理工艺的关键耗材，其性能衰减与更新管理是保证工艺持续高效运行的核心难点。然而，当前热再生法虽能恢复 60-70% 吸附容量，但会造成 10-15% 的质量损耗；化学再生法存在药剂残留风险；生物再生效率仅 30-40%，且周期长达 2-3 周，活性炭的再生遇到技术瓶颈；活性炭传统碘值检测法存在 3-5 天的检测滞后期；超期使用 3 个月的活性炭对 UV254 去除率下降 42%；新炭填充成本约占运行费用的 25-30%，活性炭的更换遭遇管理困境。行业实践表明，采用在线监测与预测性维护系统可将炭床更换决策误差缩减至  $\pm 7$  天，但仅 15% 的水厂配备此类智能管理系统。

##### （四）运行管理成本高

臭氧活性炭深度处理工艺可提高水质，但初始投资比常规工艺高，吨水电耗大，活性炭更换费用占运营成本 20%，因此自来水厂那个运行成本较高。如自来水厂未配备较高的管理队伍，可能导致臭氧活性炭深度处理工艺的运行影响企业运行成本，新工艺的应用非但无法提升效率，还可能影响企业经济效益。

#### 五、自来水厂臭氧活性炭深度处理工艺应用措施

##### （一）强化动态工况适应性设计

提升臭氧-活性炭工艺运行稳定性，关键在于实现工艺参数的动态化精准调控。设计阶段团队必须深入现场进行实地勘探、调研；建立水质特征数据库，全面了解水源特点及工艺运行要求，确保设计方案能够紧密结合实际情况。基于调研结果，紧密联系施工和运行团队，严把施工关，对运行管理团队进行培训，提升管控能力，同时建立方案评估、优化机制，重视方案的检验和修正，开展模拟运行、模拟试验，验证方案的正确性，让工况与设计保持高效稳定，使工艺能实时响应原水水质波动（图 1）。同时预留工艺弹性空间，确保在藻类暴发等极端情况下仍能保持有机物去除率，稳定性提升工艺水平。

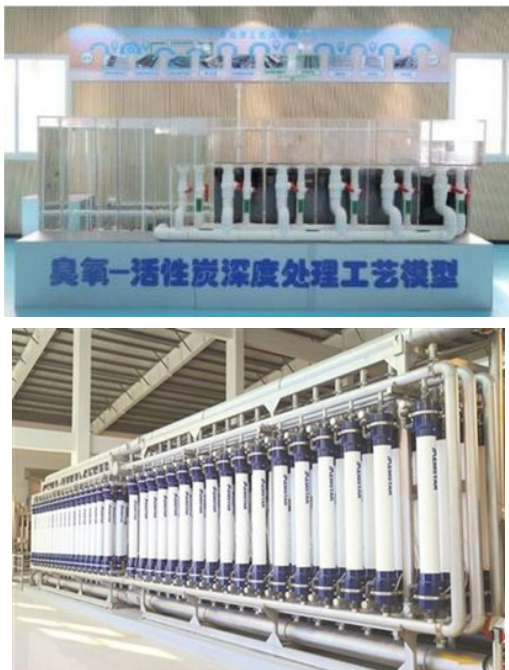


图1 臭氧活性炭深度处理工艺

### (二) 优化设备选型与操作维护

设备选型优化方面，臭氧活性炭工艺设备选型需兼顾技术性能与经济性，对于核心设备如臭氧发生器和活性炭吸附塔，选型过程中应充分考虑其技术性能、运行效率以及耐用性。产品设备的稳定性方面，选型时筛选技术成熟企业作为设备供给点，考察企业的生产工艺与行业标准的符合度，降低设备故障发生率，提高运行效率。设备操作维护方面，首先关注设备安装及调试，各流程均需按照标准执行，严格规范安装调试流程，确保安装规范。使用过程中，强化操作人员培训，采用定期培训加实践操作为一体的培训方案，让操作人员操作技能提升，具备安全责任意识；另外，自来水厂需制定标准化的臭氧活性炭深度处理维护手册，准确记录设备操作流程、维护周期、故障排除方法，同时设立监察部门，对操作全流程进行监督，确保工艺稳定运行。

### (三) 活性炭全周期效能优化管理

在臭氧活性炭工艺中，活性炭管理需构建全生命周期优化体系。活性炭再生方面，应积极探索先进的再生技术，采用热、化学再生技术恢复 60-70% 吸附性能，延长使用寿命，减少更换的频率，达到降低运行成本的目的。活性炭更换管理方面，制定的更换周期，更换频率要同步参考水质的变化以及其吸附效果，定期检测吸附能力，结合在线监测建立动态更换机制；建立失效炭环保处置流程，通过专业机构实现资源化利用，避免因过早更换造成浪费，同时保障处理效果。

### (四) 控制运行成本并提升管理水平

臭氧活性炭工艺需精细管控运行成本，实现方式包括建立严格的成本控制机制，优化设备能效，管控能源消耗，减少药剂消耗等。同时完善管理制度，规范操作

规程，明确各部门的职责和权限，让部门之间紧密结合，形成工作合力，工作有序进行的同时确保工艺经济性与稳定性双提升。

### 结语

臭氧活性炭深度处理工艺作为当前自来水厂提标改造的核心技术，可保障水质安全、提高运行效率，有效利用可提升企业效益，提高国际竞争力。但其运行过程中仍然面临工艺参数动态调控、全生命周期成本控制、智能化运维升级等众多挑战。因此企业需加强臭氧活性炭深度处理工艺的研究和应用，优化完善处理工艺，以保障自来水水质安全为基础，提供优质饮用水资源。未来应重点突破催化臭氧氧化、生物活性炭再生等新技术，推动该工艺向更高效、低碳、智能的方向发展。

### 参考文献

- [1] 李原园, 李云玲, 郭旭宁, 等. 1956-2016 年中国水资源总量时空分布规律及变化特征 [J]. 水科学进展, 2025, (1): 18-27.
- [2] 翟亚军, 戴波. 自来水厂水处理消毒技术价值、优缺点及技术分析 [J]. 数字化用户, 2025 (3): 232-234.
- [3] 陶显明, 周冰洁, 耿冰, 等. 臭氧-上向流生物活性炭工艺运行参数的优化 [J]. 净水技术, 2021, 40 (1): 66-75.
- [4] 吕淑琪, 张莹, 张冠君, 等. 臭氧技术在给水排水污水治理中的作用 [J]. 盐科学与化工, 2025, (2): 21-25.
- [5] 王冠颖, 郭涵, 刘馨瑶, 等. 臭氧催化氧化深度处理焦化废水技术梳理 [J]. 工业水处理, 2025, (5): 29-37.
- [6] 张书芬, 王全林, 沈坚, 等. 饮用水中臭氧消毒副产物溴酸盐含量的控制技术探讨 [J]. 水处理技术, 2011, 37 (1): 28-32.
- [7] 刘元昊, 林英姿, 王熠年. 饮用水消毒副产物及控制方法研究进展 [J]. 云南化工, 2025, (5): 22-25.
- [8] 王莹莹, 王刚. 臭氧-活性炭工艺在东营某水厂升级改造中的应用 [J]. 净水技术, 2024, 43 (6): 179-185.
- [9] 陈春玲. 臭氧生物活性炭深度处理工艺在泉州金鸡水厂的应用研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4 (23): 26-28.
- [10] 张朝升, 曹龙, 陈秋丽. 臭氧、活性炭、超滤及联用工艺去除邻苯二甲酸酯的效能与机理 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2017, 16 (6): 69-76.
- [11] 侯宝芹, 倪杭娟, 张淑媛, 等. 臭氧生物活性炭深度处理工艺机理及其净水效果研究 [C]// 第六届饮用水安全保障技术交流会论文集. 2018: 101-106.
- [12] 许兵, 李珂, 刘佳, 等. 臭氧-生物活性炭工艺处理饮用水研究进展 [J]. 净水技术, 2022, 41 (12): 9-18, 25.