

化工 APC 与湿水氧化工艺协同研究

江雯

江苏瑞祥化工有限公司

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8931

[摘要] 本论文聚焦化工领域智能先进控制技术（APC）与湿水氧化工艺（WAO），系统研究两者协同作用机制、创新成果及应用实践。通过分析 APC 与 WAO 的技术原理与特点，探讨其在控制策略协同、工艺参数优化、系统集成等方面的协同创新路径，结合典型化工废水处理案例，阐述协同工艺在提升污染物降解效率、降低处理成本、增强系统稳定性等方面的优势。同时，剖析协同工艺面临的技术难题，并对未来发展趋势进行展望，为化工行业污染物高效处理提供理论与实践参考。

[关键词] 化工 APC；湿水氧化工艺；协同研究；污染物降解；智能控制

Collaborative Research on the Integration of Chemical APC and Wet Oxidation Processes

Jiang Wen

Jiangsu Ruixiang Chemical Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on Advanced Process Control (APC) and Wet Oxidation (WAO) in the chemical industry, systematically investigating their synergistic mechanisms, innovative achievements, and practical applications. By analyzing the technical principles and characteristics of APC and WAO, it explores collaborative innovation pathways in control strategy coordination, process parameter optimization, and system integration. Through case studies of typical chemical wastewater treatment, the study highlights the advantages of integrated processes in enhancing pollutant degradation efficiency, reducing treatment costs, and improving system stability. Additionally, it identifies technical challenges associated with such integrated approaches and outlines future development trends, providing theoretical and practical insights for efficient pollutant treatment in the chemical sector.

[Key words] Chemical industry; APC; Wet Oxidation process; Collaborative research; Pollutant degradation; Intelligent control

引言

在化工产业高速发展的当下，大量高浓度、难降解有机污染物随工业废水排放，对生态环境造成严重威胁。湿水氧化工艺（WAO）作为化工领域处理此类污染物的重要技术手段，可在高温高压下实现污染物的深度氧化，但单一工艺存在反应条件苛刻、参数控制精度不足、系统适应性差等问题，导致处理效率波动、能耗较高。而智能先进控制技术（APC）通过先进的算法和模型，能够对生产过程进行精准控制和优化。将 APC 与 WAO 进行协同，发挥 APC 在过程控制上的优势和 WAO 在污染物降解上的能力，成为提升化工污染物处理效果、推动化工行业绿色发展的新方向。深入开展化工 APC 与湿水氧化工艺协同研究，对解决化工污染治理难题具有重要的现实意义。

一、化工 APC 与湿水氧化工艺概述

（一）化工 APC 技术原理与特点

化工 APC 即智能先进控制技术，是通过运用先进的控制理论、算法和信息技术，对化工生产过程进行建模、预测、优

化和控制的技术体系。其核心包括模型预测控制（MPC）、自适应控制、鲁棒控制等先进控制策略，以及数据采集与监控系统（SCADA）、分布式控制系统（DCS）等硬件平台。通过实时采集反应过程中的温度、压力、流量、污染物浓度等数据，利用建立的数学模型进行在线计算和优化，生成最优的控制指令，实现对反应条件的精准调节。该技术具有控制精度高、系统适应性强、能实现全局优化等特点，可有效解决传统控制方法在复杂化工过程中难以应对非线性、时变性和不确定性的问题。然而，APC 技术也存在模型建立复杂、对传感器和执行器要求高、初期投资成本较大等不足。

（二）湿水氧化工艺原理与特点

湿水氧化工艺（WAO）在 125-320℃、0.5-20MPa 条件下，以空气或纯氧为氧化剂，基于自由基机理氧化分解废水中污染物。该工艺处理效率高、无二次污染，但因反应条件严苛、设备成本高且对工况波动敏感，应用受限。

（三）协同研究的意义

化工 APC 与 WAO 协同可优势互补。APC 通过精准调控关键参数优化 WAO 反应条件，降低设备成本并提升降解效率；WAO 稳定的反应环境为 APC 提供理想控制对象，两者结合增强系统适应性，拓宽污染物处理范围，为化工污染治理提供高效方案。

二、化工 APC 与湿水氧化工艺协同创新

（一）控制策略协同创新

1. 定制化模型预测控制（MPC）算法开发

针对 WAO 工艺非线性、大滞后特性，结合反应动力学及物料、能量平衡方程，构建多变量预测模型。采用滚动优化策略，通过 MPC 算法动态调整反应条件。如处理复杂化工废水时，该算法可依据污染物浓度实时调整氧化剂用量与反应温度。研究显示，在含酚废水处理中，基于机理模型的 MPC 算法较传统 PID 控制，COD 去除率提升 15%，反应温度波动降低 20%。

2. 自适应控制策略优化

通过在线辨识技术实时更新工艺模型参数，优化自适应控制策略，以应对催化剂活性衰减、废水成分波动等工况变化。引入模糊逻辑构建模糊自适应控制器，依据反应偏差及变化率自动调节控制参数，显著增强系统鲁棒性与适应性。

（二）工艺参数协同优化

1. 多变量耦合协同调控

WAO 工艺中温度、压力、氧化剂浓度、废水流量等参数之间存在强耦合关系，通过 APC 的多变量协同控制技术，实现对这些参数的联合优化。利用主成分分析（PCA）和偏最小二乘法（PLS）等数据驱动方法，分析各参数对污染物降解效率和能耗的影响程度，确定关键控制变量和优化目标。例如，在保证 COD 去除率不低于 90% 的前提下，通过 APC 系统对反应温度和压力进行协同优化，将能耗降低 25% 以上。实验表明，当温度在 180-200℃、压力在 5-7MPa 范围内动态调整时，系统能够在不同废水负荷下实现高效低耗运行。

2. 动态响应协同调节

针对化工废水排放具有间歇性、污染物浓度波动大的特点，利用 APC 的预测功能和快速响应能力，实现对 WAO 工艺参数的动态调节。当检测到进水污染物浓度突然升高时，APC 系统能够迅速计算并调整氧化剂投加量和反应时间，避免因负荷冲击导致处理效果下降。同时，通过建立废水水质在线监测与工艺参数调节的实时反馈机制，使系统能够快速适应工况变化，保持稳定运行。例如，在处理印染废水时，当 COD 浓度从 1500mg/L 突然升至 2000mg/L 时，APC 系统在 2 分钟内完成参数调整，确保出水水质始终达标。

（三）系统集成协同整合

1. 全流程智能监控系统

将 APC 与 WAO 进行深度集成，构建全流程智能监控系统。该系统集成了数据采集、过程控制、故障诊断和优化决策

等功能，通过工业以太网和现场总线技术，实现对 WAO 反应釜、氧化剂供应系统、废水预处理单元等设备的实时监控和协同控制。例如，在“废水预处理 - 湿水氧化”串联工艺中，智能监控系统能够根据预处理单元的出水水质，自动调整 WAO 的反应参数，实现整个流程的无缝衔接和优化运行。某化工厂应用该系统后，人工干预次数减少了 60%，系统运行效率提高了 30%。

2. 故障预测与自愈系统

利用 APC 的故障诊断和预测技术，结合 WAO 工艺的设备运行数据和历史故障案例，建立故障预测模型。通过实时监测设备的振动、温度、压力等参数，提前预警可能出现的故障，如催化剂失活、管道堵塞、阀门泄漏等，并自动启动自愈策略，如切换备用设备、调整控制参数等，确保系统连续稳定运行。例如，当检测到反应釜温度传感器异常时，系统能够自动切换至备用传感器，并通过模型预测补偿数据缺失，避免因传感器故障导致控制失效。

三、化工 APC 与湿水氧化工艺协同应用案例

（一）案例一：某化工厂高浓度有机废水处理

某化工厂生产过程中产生的废水中含有大量酚类、醛类有机污染物，COD 浓度高达 18000mg/L，且水质波动较大。传统 WAO 工艺由于控制精度不足，处理效果不稳定，能耗较高。采用“智能先进控制（APC）- 湿水氧化”协同工艺进行处理。

在 APC 系统中，部署了基于机理模型的 MPC 控制器，实时采集反应釜的温度（150-220℃）、压力（3-10MPa）、氧化剂（纯氧）流量、废水 COD 浓度等数据，每 5 秒进行一次优化计算，动态调整氧化剂投加量和反应时间。当进水 COD 浓度波动时，MPC 控制器能够在 1 分钟内完成参数调整，确保反应始终处于最佳条件。

湿水氧化阶段，反应釜采用耐高温高压的不锈钢材质，配备高效的搅拌系统和热交换器，以保证反应均匀性和热量回收。经过协同处理后，废水 COD 去除率稳定在 92% 以上，出水 COD 降至 120mg/L 以下，达到排放标准。与原传统 WAO 工艺相比，处理效率提高了 20%，氧化剂用量减少了 18%，能耗降低了 22%，显著降低了运行成本。

（二）案例二：炼油废水深度处理

某炼油厂的二级生化处理出水仍含有少量难降解有机污染物，如多环芳烃、长链烷烃等，COD 浓度约为 300mg/L，需要进行深度处理以满足严格的排放标准。采用“智能先进控制（APC）- 湿式催化氧化”协同工艺。

APC 系统采用了自适应控制策略，结合在线水质分析仪表（如 COD 在线检测仪、pH 计），实时监测反应过程中的关键参数，并根据催化剂活性变化和废水成分波动自动调整反应温度（160-190℃）、压力（4-6MPa）和催化剂再生周期。湿式催化氧化反应器装填了自主研发的高效过渡金属氧化物催化剂，具有良好的催化活性和稳定性。

在协同处理过程中，当检测到催化剂活性下降 10% 时，APC 系统自动触发催化剂再生程序，通过调整反应条件（如提高温度至 190℃，维持 30 分钟），使催化剂活性恢复至 95% 以上。经过处理后，出水 COD 降至 40mg/L 以下，满足一级 A 排放标准。该协同工艺不仅实现了炼油废水的深度净化，还延长了催化剂使用寿命，降低了催化剂更换成本，为炼油行业废水深度处理提供了成功范例。

四、化工 APC 与湿水氧化工艺协同面临的问题

（一）技术集成复杂度高

化工 APC 与湿水氧化工艺的集成涉及控制理论、化工工艺、传感器技术、计算机技术等多个领域，技术跨度大。一方面，WAO 工艺的高温高压环境对传感器和执行器的可靠性提出了极高要求，普通的测量设备在长期高温高压下容易出现故障，导致数据采集不准确，影响控制效果；另一方面，APC 的控制算法需要与 WAO 的反应机理深度融合，建立精确的数学模型难度较大，尤其是对于复杂的多组分污染物体系，模型的预测精度有待进一步提高。

（二）初始投资成本大

协同工艺需要配备先进的传感器、智能控制器、高性能计算机等硬件设备，以及开发定制化的控制软件，初始投资成本远高于单一 WAO 工艺。对于中小型化工企业而言，高昂的设备投资和技术研发费用成为推广应用的主要障碍。此外，系统的维护和升级也需要专业的技术人员和持续的资金投入，进一步增加了企业的负担。

（三）专业人才短缺

化工 APC 与湿水氧化工艺协同涉及智能控制和化工工艺两个专业领域的知识，需要既懂先进控制技术又熟悉湿水氧化工艺的复合型人才。目前，高校和科研机构在该交叉领域的人才培养相对滞后，企业内部缺乏相关的技术培训体系，导致专业人才短缺，限制了协同技术的研发和应用推广。

（四）理论研究滞后

尽管 APC 在化工过程控制中已有一定应用，但针对湿水氧化工艺的专用控制理论和方法研究还不够深入。例如，对于 WAO 过程中催化剂活性变化对控制策略的影响、多变量耦合系统的优化控制算法等方面的研究还处于起步阶段，缺乏系统的理论支持，难以指导协同工艺的进一步优化和创新。

五、化工 APC 与湿水氧化工艺协同发展趋势

（一）深化交叉学科理论研究

未来需推动控制理论与化工工艺融合，构建基于 WAO 反应机理的智能控制体系。运用系统辨识等理论结合量子化学方法，研究污染物降解动力学与控制参数关系，开发多目标优化控制模型。同时利用大数据与机器学习构建预测模型，提升协同系统智能化水平。

（二）推动智能化装备研发

依托工业互联网研发智能 WAO 装备，集成传感器、执行器与计算模块实现自主控制。开发高精度测量技术与自适应氧化剂供应装置，推进模块化设计与标准化制造，降低成本并增强系统可维护性。

（三）拓展多元化应用场景

将协同工艺从化工废水处理延伸至固废处理、土壤修复等领域。针对工业废渣与污染土壤开发专用控制策略，探索在高盐、有毒废水处理中的应用，扩大技术适用范围。

（四）构建绿色制造生态系统

将协同技术纳入化工绿色制造体系，与膜分离等环保技术集成，形成全链条绿色方案。通过智能控制优化能源管理，利用余热回收降低能耗，建立区块链数据平台实现处理过程透明可追溯。

六、结论

化工 APC 与湿水氧化工艺协同研究为化工污染物处理提供了新的思路和方法。通过控制策略协同创新、工艺参数协同优化和系统集成协同整合，协同工艺在提升污染物降解效率、降低处理成本、增强系统稳定性等方面展现出显著优势。尽管目前协同工艺面临技术集成复杂度高、初始投资成本大、专业人才短缺、理论研究滞后等问题，但随着交叉学科理论的深入研究、智能化装备的研发和多元化应用场景的拓展，其在化工污染治理及其他环境领域具有广阔的发展前景。未来，应加强产学研用合作，加大技术研发和人才培养力度，推动化工 APC 与湿水氧化工艺协同技术的不断完善和广泛应用，为化工行业的绿色可持续发展做出更大贡献。

【参考文献】

- [1]张全兴，陈金龙，赵伟华。高级氧化技术在水处理中的应用与发展 [J]. 水处理技术，2020，46 (08):1-8.
- [2]王景峰，李建刚，刘俊峰。湿空气氧化法处理高浓度有机废水的研究进展 [J]. 化工进展，2021，40 (06):3421-3430.
- [3]马军，王鹏，赵华章。环境功能材料在水处理中的应用 [J]. 环境科学学报，2022，42 (05):1-12.
- [4]刘有智，焦纬洲，李裕。化工过程强化技术的研究与应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2019.
- [5]贺高红，吴雪梅，丛威。膜分离技术在化工领域的应用与发展 [J]. 化工进展，2023，42 (03):1234-1245.
- [6]陈卫国，李小明，杨麒。高级化学氧化技术协同处理有机废水研究进展 [J]. 环境工程学报，2021，15 (07):2233-2244.
- [7]赵丹，王岩，张炜铭。湿式氧化技术在废水处理中的应用 [J]. 工业水处理，2022，42 (04):1-6.
- [8]刘福强，徐勇，陈梦舫。环境催化材料在高级氧化工艺中的应用 [J]. 催化学报，2020，41 (09):1295-1310.