

关于生物制药废水 AO-MBR 处理技术的研究

胡金龙

上海泓济环保科技股份有限公司, 上海 200433

DOI:10.61369/EAE.2026030010

摘 要 : 生物制药研发及生产活动产生的废水通常兼具高有机负荷、高氮磷负荷、悬浮物与动物毛发含量高、排放波动明显等特征,若预处理和生化系统协同不足,易引发膜污染、硝化效率下降及总磷超标等问题。本项目作为提标改造工程,在原有系统不停机条件下实施,贯彻了“施工不停产、水质不恶化、管理不中断”的总体原则。本文以苏州某医药开发有限公司800 m³/d废水处理站提标改造工程为对象,从生态环境工程技术管理角度,围绕“两级圆盘格栅+两级混凝沉淀+水解酸化+A/O-MBR+次氯酸钠消毒”组合工艺,分析废水水质特征、关键构筑物参数、污染物去除路径、运行控制要点及经济性。结果表明,该工艺通过前端毛发与悬浮物截留、化学除磷强化、水解酸化提升可生化性、A/O-MBR同步脱氮除碳和末端消毒保障,可使COD、NH₃-N、TN、TP、SS及粪大肠菌群等指标满足江苏省地方直接排放要求。结合工程核算,具有较好的达标稳定性和推广应用价值。后续运行管理应重点加强进水波动预警、膜污染控制、药剂精细化投加以及污泥、废气等二次污染全过程管理。

关 键 词 : 生物制药废水; AO-MBR工艺; 水解酸化; 化学除磷; 膜生物反应器

Research on AO-MBR Treatment Technology for Biopharmaceutical Wastewater

Hu Jinlong

Shanghai Hongji Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shanghai 200433

Abstract : Wastewater generated from biopharmaceutical research and production activities typically exhibits characteristics such as high organic load, high nitrogen and phosphorus load, high levels of suspended solids and animal hair, and significant fluctuations in discharge. Inadequate coordination between pretreatment and biochemical systems can easily lead to issues such as membrane fouling, reduced nitrification efficiency, and excessive total phosphorus levels. As an upgrading and renovation project, this project was implemented without shutting down the original system, adhering to the overall principles of "construction without production halt, water quality without deterioration, and management without interruption." This paper focuses on the upgrading and renovation project of an 800 m³/d wastewater treatment station at a pharmaceutical development company in Suzhou. From the perspective of ecological and environmental engineering technology management, it analyzes the wastewater quality characteristics, key structure parameters, pollutant removal pathways, operational control points, and economic aspects of the combined process of "two-stage rotary disc screen + two-stage coagulation sedimentation + hydrolysis acidification + A/O-MBR + sodium hypochlorite disinfection." The results indicate that through the interception of hair and suspended solids at the front end, enhanced chemical phosphorus removal, improved biodegradability through hydrolysis acidification, simultaneous nitrogen and carbon removal by A/O-MBR, and final disinfection, the process can ensure that indicators such as COD, NH₃-N, TN, TP, SS, and fecal coliforms meet the local direct discharge requirements of Jiangsu Province. Combined with engineering calculations, the process demonstrates good compliance stability and potential for widespread application. Subsequent operational management should focus on strengthening early warning of influent fluctuations, membrane fouling control, precise chemical dosing, and comprehensive management of secondary pollution such as sludge and waste gas.

Keywords : biopharmaceutical wastewater; AO-MBR process; hydrolysis acidification; chemical phosphorus removal; membrane bioreactor

引言

生物制药废水主要来源于实验动物饲养冲洗水、生产工艺废水等，排放量大、有机物浓度高、氮磷含量丰富，未经处理将导致水体富营养化。膜生物反应器经持续改进，已发展成当今废水处理领域重要技术分支^[1]。MBR利用微滤膜或超滤膜取代传统二沉池，彻底分离水力停留时间、污泥龄。国内外对含有大量动物毛发、高浓度氮磷的生物制药废水的研究总结尚显不足。本文以苏州某医药公司改造工程为例，系统研究了“水解酸化+A/O-MBR”技术方案的工艺参数设计、污染物去除效能及经济性。

一、工程概况

（一）项目概况

项目服务对象为苏州某医药开发有限公司废水处理站。原有系统运行多年，受处理规模增加、地方排放标准趋严和进水污染物波动影响，既有设施在高峰负荷下难以持续保证 COD、氨氮、总氮、总磷及粪大肠菌群等指标稳定达标。因此，工程采取提标改造和扩建方式，设计处理规模为 800 m³/d，最终出水经计量后接入园区管网或按地方标准进行排放控制。

本项目为提标改造工程，改造期间原有废水处理系统须维持不停机连续运行。为此，本工程在方案设计阶段即明确了“施工不停产、水质不恶化、管理不中断”的总体设计原则。

该工程的核心目标不是单纯扩大池容，而是通过工艺链条优化提升系统抗冲击能力：前端降低毛发和 SS 进入后续系统的风险，中段强化氮磷和有机物去除，末端通过在线监测和消毒形成达标保障，并同步控制污泥、臭气和运行成本。

（二）废水水质水量与排放要求

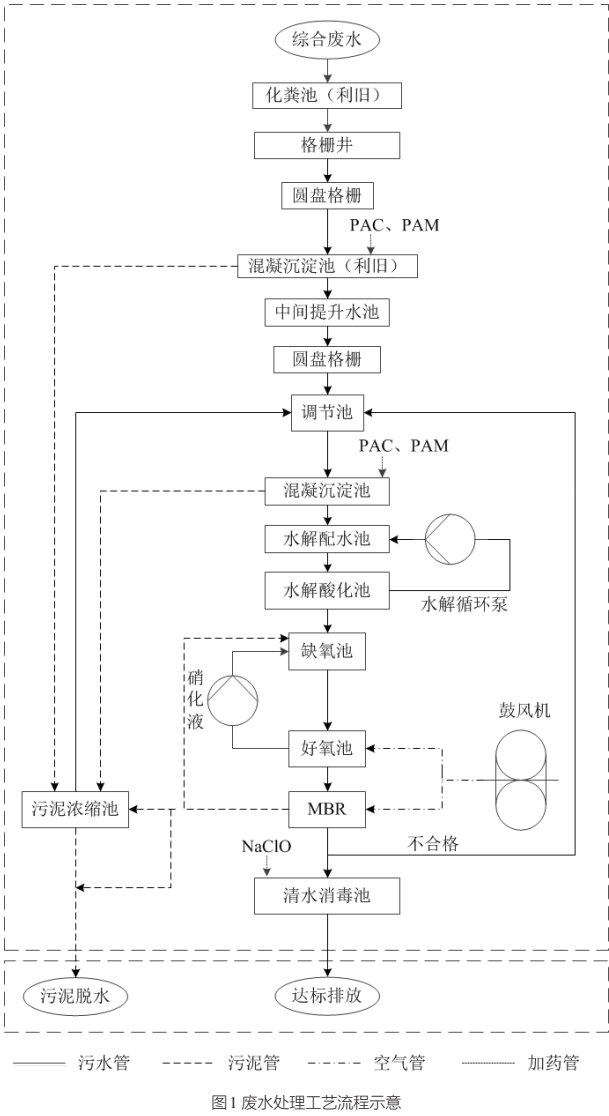
废水主要来源于实验动物笼具冲洗、粪便与尿液冲洗、动物房地面及墙面清洁消毒、员工生活污水以及少量实验器皿清洗水。各股废水排放时段集中于白天，污染物浓度差异较大，进水呈现“高 COD、高氮磷、高 SS、含动物毛发和粪便残渣”的复合特征。设计进水及出水控制指标见表 1。

表 1 设计进水及出水控制指标（除 pH、粪大肠菌群外，单位为 mg/L）

类别	pH	CODcr	SS	NH3-N	TN	TP	粪大肠菌群
设计进水	—	1500	200	80	100	20	—
出水要求	6.0-9.0	≤60	≤50	≤8	≤20	≤0.5	≤500

（三）研究方法与技术管理重点

本文采用工程案例分析方法，以项目设计资料、构筑物参数、水质预测表、设备配置和运行成本核算为基础，对组合工艺的适用性进行分析。评价重点包括：一是工艺路线与水质特征的匹配性；二是主要单元设计参数是否满足水力停留、混合、脱氮和膜分离需求；三是 COD、氮、磷、SS 和粪大肠菌群的协同去除路径；四是药剂、电耗、污泥、臭气和在线监测等运行管理因素。



（四）不停机改造技术方案

针对老系统需在生产状态下完成改造的要求，本工程在方案设计阶段即明确“施工不停产、水质不恶化、管理不中断”的原则，并制定以下专项措施：

1. 在原提升泵房与调节池之间增设三通及闸阀，引出 DN150 临时旁路管道。
2. 配置两台同参数备用潜污泵，可随时将进水分流至临时储存罐或跳过待施工池体直接进入后续老系统单元。旁路系统独立配电、独立控制，与新建系统施工区物理隔离。

3.在老池体的侧壁外侧砌筑临时钢板桩围堰，在围堰内部采用潜水泵将渗漏的废水及时抽至老系统的前端，确保焊接处和法兰连接作业面足够干燥，同时还要保持老池体内的水位稳定不变。

4.老系统一旦因突发情况发生流量中断或导致水质恶化，立即启动旁路回流模式：暂停新系统的进水，将未达标的废水导回到调节池重新进行处理，直至老系统指标恢复正常。

二、预处理系统设计研究

（一）格栅拦截系统

在格栅渠的前端设置一台孔板式的机械格栅除污机、配套机械毛刷清理装置和控制箱。主要用于拦截较大的粪便残渣、垫料碎块等，减轻后续精细格栅的处理负荷^[2]。圆盘格栅是本项目去除动物毛发的核心设备。与传统弧形格栅、转鼓格栅相比，圆盘格栅的过滤面为平面圆盘结构，清污刮板可紧密贴合盘面，截留物质去除干净彻底；同时进水经外筒分配廊道多点布水，充分利用整个盘面面积，过流量均匀；并且刮除的栅渣含水率低，无需设置高压反冲洗管路；其结构紧凑，占地面积小，维护便捷。系统配套设置集水井提升泵2台（利旧），流量 $Q=50\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程 $H=10\text{m}$ ，将废水提升至一级圆盘格栅。两级格栅之间设置中间提升水池，池体尺寸 $3.0\text{m}\times 3.0\text{m}\times 8.0\text{m}$ ，有效容积 68m^3 ，水力停留时间 2.0h ，起到过渡和缓冲作用。

（二）调节池

调节池的主要功能是均化水质、调节水的量，消除或减轻进水波动对后续一系列处理系统的冲击。本项目调节池设计采用非规则的平面布置，池体尺寸 $10.4\text{m}\times 9.6\text{m}\times 8.0\text{m}$ （ $L\times B\times H$ ），有效水深 7.5m ，总有效容积 749m^3 ，水力停留时间 22.5h ，为半地上式钢筋混凝土结构。

调节池内设置潜水搅拌机2台，单台功率是 4.0kW ，选用材质为SUS304，含起吊架。搅拌机的设置不仅能够保证池内废水充分混合达到均质目的，又能防止悬浮固体在池底沉积形成死泥区。搅拌机采用对角布置方式，使池内形成环形流态，混合效果最优^[3]。调节池建设过程中，因涉及与原有池体的管道对接，施工前已制定不停水作业方案，利用原有集水井和临时提升泵将废水短时导流至备用处理单元，确保老系统连续运行。

（三）混凝沉淀系统

本项目设置了一级混凝沉淀（利旧改造）和二级混凝沉淀（新建），两级混凝沉淀的药剂投加策略为：PAC配制浓度10%，投加量约 120mg/L （以商品PAC计）；PAM配制浓度0.1%–0.15%，投加量约为 5mg/L 。根据相关理论计算和同类的工程案例经验，两级混凝沉淀对TP的累计去除率可达98%以上，对SS的去除率可达60%以上，对COD的去除率约为6%–10%，出水TP可稳定降至 0.4mg/L 以下，为后续生化处理和最终出水达标奠定坚实基础。

三、生化处理系统设计研究

（一）水解酸化池设计

本项目水解酸化池分两组并联运行，每组尺寸 $5.0\text{m}\times 4.0\text{m}\times 8.0\text{m}$ （ $L\times B\times H$ ），有效水深 7.4m ，总有效容积 296m^3 ，水力停留时间 8.9h ，上升流速 1.0m/h ，采用半地上式钢筋混凝土结构。

水解酸化池的进水由水解配水池（尺寸 $5.0\text{m}\times 3.0\text{m}\times 8.0\text{m}$ ，有效容积 111m^3 ， $\text{HRT}=3.3\text{h}$ ）供给，通过水解循环泵（卧式离心泵， $Q=50\text{m}^3/\text{h}$ ， $H=10\text{m}$ ，2台）提升。出水经溢流堰收集后自流进入AO生化系统。

（二）A/O–MBR生化工艺原理与膜组件选择

与传统的二沉池重力沉淀相比，MBR具有诸多显著的技术优势：对泥水的分离十分彻底，膜的孔径通常为 $0.04\text{--}0.4\mu\text{m}$ （微滤或超滤级别），同时出水SS接近于零，浊度极低；污泥浓度高，完全截留活性污泥，MLSS可达 $8000\text{--}15000\text{mg/L}$ ，是传统工艺的3–5倍；并且污泥龄长：SRT可延长至30天以上，有利于世代周期较长的硝化菌、厌氧氨氧化菌等专性菌的富集；其出水水质优：除SS极低外，膜对大肠杆菌等细菌的截留率可达99.9%以上（孔径远小于细菌尺寸），为后续消毒减轻负荷；并且剩余污泥量少：长SRT条件下污泥处于内源呼吸期，产率系数低。结合本项目废水特性和运行维护要求，最终选用板式膜组件^[4]。

四、工艺单元污染物去除效果分析

（一）去除效果分析

COD的削减过程主要先预处理去除颗粒态有机物水解酸化改善可生化性，然后使好氧生物氧化，最终使膜进行截留强化。两级混凝沉淀阶段可去除部分悬浮态和胶体态COD，水解酸化将复杂有机物转化为小分子底物，A/O–MBR段则依靠高污泥浓度完成深度降解。根据水质检测来看，整体去除率约97.6%。

表2 主要污染物水质预测及去除效果

指标	设计进水 / (mg/L)	预测出水 / (mg/L)	出水要求 / (mg/L)	总去除率
COD _{Cr}	1500	35.955	≤60	约97.6%
TN	100	11.4	≤20	约88.6%
NH ₃ –N	80	4.18	≤8	约94.8%
TP	20	0.32	≤0.5	约98.4%
SS	200	20	≤50	约90.0%

（二）膜污染控制与生化系统稳定

膜污染是A/O–MBR系统运行管理的重点。生物制药废水中毛发、细小纤维、胶体有机物及高浓度污泥均可能导致膜孔堵塞、滤饼层增厚或跨膜压差上升。为控制膜污染，应从源头预处理、污泥性状和膜运行参数三方面入手：一是定期检查机械格栅和圆盘格栅，确保刮板清污、栅渣外运和设备冲洗正常；二是将MLSS控制在设计范围内，避免污泥浓度过高造成黏度上升；三是保持曝气擦洗强度和间歇抽吸制度，结合跨膜压差变化判断在线

清洗或离线清洗时机。

水温、pH、DO和碱度也是硝化反应稳定性的关键因素。好氧池DO宜保持在满足硝化需求的水平，缺氧池应避免过量溶解氧随内回流进入而抑制反硝化。调试阶段应逐步提高负荷，避免高浓度消毒废水、含卤素有机物或异常pH废水直接冲击水解酸化和好氧菌群。

（三）在线监测与异常水质处置

在线监测系统是生态环境工程项目运行管理过程中的重要抓手。项目在出水端配置了COD、氨氮、总氮、余氯、流量等在线监测设备，可对水的排放状态进行连续性大的跟踪。技术管理人员应建立“监测—预警—复核—处置”的完整流程：当COD、氨氮或总氮出现上升趋势时，应优先排查进水的浓度、曝气量、硝化液回流、污泥浓度和药剂投加等；当总磷波动时，应核查PAC、PAM浓度、投加泵运行、混凝反应时间及沉淀池排泥；当余氯或粪大肠菌群异常时，应复核次氯酸钠有效氯含量、接触时间和混合效果。

五、污泥、废气及二次污染防治

生物制药废水处理不仅要关注出水达标，还需防止污泥、废气和噪声等二次污染。混凝沉淀产生的化学污泥主要由磷酸铝沉淀、氢氧化铝絮体和被截留SS组成；A/O-MBR系统产生的剩余污泥含有较高有机物和微生物；机械格栅及圆盘格栅产生的栅渣则含毛发、粪便残渣和垫料碎屑。上述固体废物应分类收集，进入污泥浓缩池后通过重力浓缩降低含水率，上清液回流至调节池重新处理，浓缩污泥外运处置时应按地方环保和卫生要求执行。

废水站部分池体在水解酸化、污泥浓缩和格栅截留过程中可能释放臭气及少量挥发性有机物。工程应对重点池体进行密闭和负压收集，并设置除雾及活性炭吸附等处理单元，避免臭气无组织扩散。运行管理中应关注引风机风量、管道负压、活性炭饱和和状态和更换周期，使臭气治理设施与污水处理主体系统同步运行。

栅渣：机械格栅和两级圆盘格栅截留的毛发、粪便残渣等，日产量约为0.5–1.0m³（含水率约80%）。

六、工程技术经济分析

主要的工艺设备包括机械格栅1套、圆盘格栅2套、各类水泵35台（含利旧）、潜水搅拌机7台、混凝搅拌机2台、螺杆鼓风机3台、微孔曝气管120套、板式MBR膜组件2套、各类在线分析仪表16台（套）等。

本项目单位水处理成本为4.60元/m³，比一般城市的污水处理成本（约1.0–1.5元/m³）要高一些，原因在于针对制药废水的处理难度较大、排放标准比较严格、工艺流程较长、投加药剂较多。但对比同类的制药废水处理工程，本项目的成本处于中等偏低水平，这得益于水解酸化预处理降低了曝气能耗需求，进水COD经水解酸化降低15%后再进入好氧段，减少了曝气量；同时两级化学除磷虽增加了药剂费，但避免了单一化学除磷为应对波动而过量投药的问题，综合药剂费用可控；并且MBR维持高污泥浓度的同时也实现了污泥减量，减少了污泥处理处置费用。从全生命周期成本分析，该工艺具有良好的技术经济综合效益。

七、结论

本文以苏州某医药开发有限公司生物制药废水提标改造工程为依托，分析了“两级精细格栅+两级化学除磷+水解酸化+A/O-MBR+消毒”组合工艺的应用效果。本文系统总结了水解酸化–A/O-MBR组合工艺在处理以动物粪便为特征污染物的生物制药废水中的协同作用规律，揭示了各单元间污染物的转化与去除路径。结果表明，该工艺能有效解决动物毛发拦截、氮磷去除及膜系统稳定运行等问题，出水COD、NH₃-N、TN、TP、SS等指标均可稳定满足地方直接排放标准。该技术路线具有较强针对性、稳定性和工程推广价值，后续应加强膜污染控制、药剂优化和运行成本管理。

参考文献

- [1] 郑兴灿，李亚新. 污水除磷脱氮技术 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2018：156–180.
- [2] 黄霞，文湘华. 膜生物反应器——在污水处理中的应用与研究前景展望 [J]. 膜科学与技术，2020，40(1)：1–6.
- [3] 张书涛，王浩，刘建国. MBR工艺处理制药废水的研究进展 [J]. 水处理技术，2018，44(2)：1–5.
- [4] 陈静怡，梁昊，孙悦. 化学除磷技术在制药废水处理中的应用与优化 [J]. 工业水处理，2020，40(8)：12–16.
- [5] 周家豪，林峰. 高浓度有机废水处理中水解酸化池的优化设计与运行策略 [J]. 给水排水，2021，47(3)：66–70.
- [6] 赵海龙，李明. AO-MBR工艺处理高氨氮有机废水的工程应用研究 [J]. 环境工程，2019，27(5)：32–36.
- [7] 王志强，刘芳. 两级混凝沉淀–MBR工艺处理高浓度有机磷废水的工程实践 [J]. 中国给水排水，2021，37(12)：88–92.