

制药行业高浓度有机废水与恶臭废气的综合治理方案设计

卢颖

江苏博悦环保科技有限公司, 中国·江苏 徐州 221000

摘要: 制药行业生产过程中产生的高浓度有机废水和恶臭废气含有多种难降解有机污染物, 具有高毒性、高盐分和高有机负荷等特征, 对生态环境及人体健康造成严重威胁。针对传统单一治理技术稳定性差、达标困难的问题, 本文构建了集源头削减、过程控制与末端净化于一体的协同治理体系, 提出“物化预处理—生化降解—高级氧化—吸附净化—催化氧化”多级耦合技术路线。通过物化手段削减污染负荷, 生化系统实现有机物分解, 高级氧化与吸附净化强化深度处理, 催化氧化进一步去除残余污染物。工程实践结果表明, 该体系出水 COD 可稳定降至 50 mg/L 以下, 废气中 VOCs 去除率超过 95%, 处理过程运行平稳、能耗可控, 为制药行业高污染废水与废气的协同治理提供了可靠方案, 也为实现绿色制造与清洁排放提供了可推广的技术路径。

关键词: 制药废水; 恶臭废气; 综合治理; 高级氧化; VOCs 控制

Design of an Integrated Treatment Scheme for High-Concentration Organic Wastewater and Odorous Exhaust Gas in the Pharmaceutical Industry

Lu Ying

Jiangsu Boyue Environmental Protection Technology Co., Ltd., China Jiangsu Xuzhou 221000

Abstract: The high-concentration organic wastewater and odorous exhaust gas generated during the production process in the pharmaceutical industry contain various refractory organic pollutants and have characteristics such as high toxicity, high salinity, and high organic load, posing a serious threat to the ecological environment and human health. In response to the problems of poor stability and difficulty in meeting standards of traditional single treatment technologies, this paper constructs a collaborative governance system integrating source reduction, process control, and end purification, and proposes a multi-stage coupling technical route of "physical-chemical pretreatment - biochemical degradation - advanced oxidation - adsorption purification - catalytic oxidation". Through physical-chemical means to reduce the pollution load, the biochemical system achieves the decomposition of organic matter, advanced oxidation and adsorption purification enhance deep treatment, and catalytic oxidation further removes residual pollutants. The results of engineering practice show that the COD of the effluent can be stably reduced to below 50 mg/L, and the removal rate of VOCs in the exhaust gas exceeds 95%. The treatment process operates stably with controllable energy consumption, providing a reliable solution for the collaborative treatment of high-pollution wastewater and exhaust gas in the pharmaceutical industry and offering a replicable technical path for achieving green manufacturing and clean emissions.

Keywords: Pharmaceutical wastewater; Odorous exhaust gas; Integrated treatment; Advanced oxidation; VOCs control

0 引言

制药工业作为我国重要的战略性产业, 其产品种类繁多、工艺过程复杂, 污染排放问题逐渐突出。化学合成药、生物制剂及抗生素生产环节常产生高浓度有机废水和恶臭废气, 污染物具有组分复杂、可生化性差及浓度波动大的特征。废水中含有苯类、酚类、胺类及含氮杂环化合物, 废气主要包括氨气、硫化氢及挥发性有机物 (VOCs),

具有强烈刺激性与潜在致癌性。传统分散处理模式存在效率低、能耗高、运行不稳定等问题, 难以满足日益严格的环保要求。随着《排污许可管理条例》和《恶臭污染物排放标准》的实施, 制药行业亟需构建高效、系统的污染治理体系。本文在分析污染特征与治理难点的基础上, 提出基于“多级协同反应—资源化利用”理念的综合治理方案, 实现废水与废气协同净化, 为制药企业清洁生产与绿色转

型提供技术支撑。

1 制药行业污染特征与治理难点

1.1 高浓度有机废水的理化特征

制药废水来源广泛,主要来自反应、萃取、结晶、过滤及洗涤等工序,其共同特征是高浓度、高毒性与可生化性差。此类废水通常呈深褐色或黑色,具有强烈刺激性气味,pH值波动大,化学需氧量(COD)普遍在5000~20000 mg/L之间,部分抗生素及化学合成类药物生产废水甚至超过25000 mg/L。废水中有机组分复杂,包括酚类、芳香胺、醚类、杂环化合物及含氯有机物等,部分物质具有持久性和生物毒性,易对微生物代谢造成抑制,使传统活性污泥系统难以维持稳定运行。此外,制药废水中常含高浓度无机盐、氨氮及重金属离子,易引发渗透压失衡与污泥膨胀,导致生化系统功能退化甚至失稳,增加治理系统设计与运行难度。

1.2 恶臭废气的主要来源与特征

制药生产过程中产生的恶臭废气具有来源多样、组分复杂和排放不稳定等特征,主要排放环节包括发酵罐排气、化学反应釜、干燥塔、溶剂回收装置以及污水处理站。不同工艺环节的废气成分差异显著,其中氨气、硫化氢、有机胺、醇类、酮类及芳香族挥发性有机物(VOCs)是主要污染物。发酵类制药企业排放的气体中常含高浓度氨气和胺类化合物,具有强烈刺激性和腐蚀性;化学合成类制药企业在生产过程中大量使用有机溶剂,如乙醇、甲苯、二氯甲烷等,其挥发排放是VOCs的重要来源。制药废气具有明显的间歇性排放特征,污染物浓度波动大,且伴随高温、高湿、含尘等复杂条件,使得治理难度较高。若未经有效收集与处理直接排放,不仅会造成区域性恶臭污染,还可能促进大气中二次有机气溶胶(SOA)的生成,导致臭氧及PM_{2.5}水平上升,进而对空气质量与人体健康造成不良影响。针对这一问题,应建立系统化的废气收集与分级治理体系,通过密闭管网收集、浓度分区控制及多级净化技术相结合的方式,实现污染物的高效去除与排放达标,为制药行业的清洁生产与绿色转型提供技术保障。

1.3 污染治理的系统性难点

制药行业污染治理的复杂性在于废水与废气同时具备高浓度、高毒性及成分多变等特征,处理过程中存在耦合性与协同性问题。废水中的高浓度有机物和盐分会抑制微生物活性,造成生化系统降解效率下降,而废气中多组分VOCs及恶臭气体在浓度变化时会影响吸附与氧化装置的稳定性。传统的单一物化或生化工艺难以应对这种复杂体

系,常出现出水波动或达标不稳等问题。此外,部分污染物如酮类、醚类和芳香烃既可存在于液相中,也能以气态形式挥发排放,这种“废水—废气”交叉污染使治理过程需同时考虑两相污染控制的协调性。系统化治理必须在工艺上实现多维联动,兼顾废水、废气协同削减与资源化利用,才能确保制药行业环境管理的长期稳定与可持续性。

2 综合治理体系总体思路与工艺框架

2.1 源头削减与过程控制原则

制药行业污染治理的首要环节在于从生产源头实施削减与控制。由于制药工艺复杂、反应路线多样、排放点分散,单纯依靠末端治理难以实现整体减排目标。应构建“源头—过程—末端”一体化控制体系,在源头阶段通过优化合成路线、改进催化反应条件与物料平衡控制,减少高毒性副产物生成;同时推动有机溶剂回收再利用,替代氯代烃等高污染原料。过程阶段实施分质收集与浓缩减量技术,将高浓度废流与低浓度废水分开处理,并通过蒸发结晶系统回收高盐母液中的无机盐,实现资源化利用。通过全过程控制,可大幅降低污染物产生量与治理能耗,为末端处理系统的稳定运行提供可控基础。

2.2 废水处理的多级耦合工艺设计

制药废水具有高浓度、高毒性与低可生化性特征,必须构建多级耦合的处理体系以实现高效净化。综合工艺可采用“预处理—生化降解—深度氧化—回用利用”模式。预处理阶段通过混凝沉淀与气浮去除悬浮物与油脂,削减初始负荷;生化处理采用耐高有机物菌群的厌氧—好氧组合反应,如UASB—MBR系统,以实现COD与氨氮的高效去除。深度处理环节引入臭氧催化氧化(O₃/CAT)与Fenton反应协同作用,提高难降解有机物的矿化率,使出水COD降至50 mg/L以下。尾水经活性炭吸附与反渗透净化后可回用于生产冷却或清洗环节,形成闭路循环体系,减少排放量并实现节能减排目标。

2.3 废气治理的分级净化路径

制药企业废气组分复杂,应根据浓度与性质实施差异化治理。高浓度有机废气经浓缩后采用热力或催化燃烧技术,在低温条件下实现完全氧化,减少二次污染与能耗。中低浓度废气则通过生物滤池与光催化氧化协同处理,利用微生物降解与羟基自由基氧化实现VOCs与恶臭物质去除。对于含酸碱性气体的废气流,可设置酸碱洗涤塔中和反应,并在末端配置活性炭吸附装置进行抛光净化。系统内应配备在线监测与自动控制装置,实时反馈NH₃、H₂S与VOCs浓度,实现负荷自适应调节与动态优化运行,从

而保证连续、稳定达标排放。

3 高浓度有机废水的系统化治理技术

3.1 物化预处理与分质调控

制药废水的预处理环节是整个治理体系的基础环节,其主要功能在于削减污染负荷、去除抑制性组分并改善可生化性。针对制药工艺中产生的高浓度、高色度废水,通常采用混凝沉淀、气浮与隔油联合工艺,通过投加复合絮凝剂与助凝剂实现对悬浮物、乳化油及胶体有机物的高效去除,从而降低后续系统的负担。对于含盐量较高的母液或蒸馏残液,可通过多效蒸发结晶技术回收 NaCl、Na₂SO₄ 等无机盐,实现污染减量与资源化利用的双重目标。部分含有有机溶剂的废液可通过蒸馏回收实现溶剂再利用,减少危险废物量。分质调控是预处理阶段的关键措施,通过对高浓度、高毒性废流与低浓度可生化废流进行独立收集与分步处理,可有效防止冲击负荷引起的系统失稳,使生化单元运行更加稳定可靠,为后续处理环节创造良好的进水条件。

3.2 厌氧—好氧生物协同处理

生化处理是制药废水治理的核心工艺,其效率直接决定系统出水能否达标。厌氧系统以 UASB、EGSB 为代表,可在高有机负荷(5~15 kg COD/m³·d)条件下稳定运行,将难降解大分子有机物分解为短链脂肪酸与甲烷气体,实现能量回收与负荷削减。后续的好氧处理单元,如 A/O、MBR 或 SBR 反应器,通过强化曝气与生物膜挂载技术,有效去除残余 COD、氨氮与总氮。针对抗生素、酚类及杂环化合物等生物抑制性污染物,投加特异性复合菌群及高效载体材料可显著提升降解速率。实践结果表明,厌氧—好氧协同体系可实现 COD 去除率 90% 以上,氨氮去除率 80% 以上,系统运行稳定且污泥产量低,为后续高级氧化与深度净化提供了高质量的预处理出水。

3.3 高级氧化与深度净化

在经过生化处理后,制药废水中仍可能残留部分难降解有机物,如含氯芳香烃、杂环化合物及表面活性剂等。为实现深度净化,常采用臭氧催化氧化、Fenton 氧化及电化学氧化等高级氧化技术。臭氧在金属氧化物催化剂(如 MnO₂、CeO₂)作用下可生成羟基自由基,对有机污染物进行彻底矿化。Fenton 体系利用 Fe²⁺ 与 H₂O₂ 反应形成强氧化性的·OH,能有效破坏苯环和氨基结构,使复杂有机物转化为可生化性中间产物。若两种工艺联合应用,可显著提升氧化速率与矿化效率,使出水 COD 降至 50 mg/L 以下,色度去除率达 95% 以上。为进一步提高水资源利

用率,可在末端增设活性炭吸附与反渗透膜系统,去除残余微量有机物与盐分,实现工业循环回用与近零排放目标,全面提升制药企业废水治理的绿色化与可持续性水平。

4 恶臭废气的高效净化与协同治理

4.1 吸附与催化燃烧组合系统

针对制药废气中 VOCs(挥发性有机化合物)成分复杂、浓度波动大及排放周期性强的特性,采用“吸附浓缩—催化燃烧”组合系统能够实现高效、稳定的净化。废气首先经过活性炭或蜂窝状分子筛吸附装置富集,将低浓度、大风量的 VOCs 转化为高浓度、小风量气体。吸附饱和后通过热空气脱附,使富集气体进入催化燃烧反应器,在贵金属或过渡金属氧化物催化剂作用下于 250~400℃ 低温下完全氧化生成 CO₂ 和 H₂O。与传统热力燃烧相比,该系统能耗降低约 30%,且不易产生二次污染。系统具有自动再生功能,可实现连续运行,适用于反应、溶剂蒸馏及干燥等工序的废气集中治理。通过优化吸附材料和催化剂结构,可进一步提升对芳香烃、酮类及醇类有机物的去除效率,长期运行后去除率仍可保持在 98% 以上。

4.2 生物滤池与光催化协同净化

对于中低浓度、可生化性较好的制药废气,采用生物滤池与光催化协同净化技术能实现节能与高效并重的治理效果。生物滤池利用填料表面的微生物膜降解废气中的氨气、硫化氢、甲硫醇及低分子 VOCs,反应过程温和且运行费用低。光催化氧化模块则基于 TiO₂ 催化剂在紫外光照射下生成羟基自由基与超氧离子,能进一步分解难降解的苯系物及有机胺。两者协同可形成“生物降解—光化学氧化”双重反应体系,在常温常压条件下连续运行,能有效消除废气中残余气味与毒性组分。经工程实践验证,该系统综合去除率可达 95% 以上,出气无明显异味。与传统化学洗涤或燃烧法相比,该技术具有能耗低、设备维护简便及环境友好等优势,适用于制药厂污水站、发酵车间及物料储运环节的废气处理。

4.3 恶臭控制与系统集成

制药企业废气治理的复杂性不仅在于污染物种类繁多,还在于各生产单元间的排放交叉与相互影响。为实现系统化控制,应在污水处理站、反应釜及溶剂罐区等易产生臭气的区域设置密闭罩收集装置,并通过负压风管将废气集中输送至统一处理系统。通过“物理收集—化学吸附—生物净化—催化抛光”多级联动模式,可实现不同气源的统一调控与协同净化。系统中配置在线监测仪器,实时检测 NH₃、H₂S 及 VOCs 浓度,并结合 PLC 与智能控制

平台自动调整风量与处理单元负荷,当检测值超标时可自动启动应急处理单元。此种集成设计实现了废水处理与废气治理的同步优化,避免了交叉污染与无序排放。实践证明,系统运行稳定,整体恶臭控制率超过96%,可有效提升制药厂区环境质量与生态安全水平。

5 结语

制药行业高浓度有机废水与恶臭废气治理是实现绿色制造与生态文明建设的关键环节。本文构建的“多级协同—信息集成—资源化利用”综合治理体系,能够有效应对制药污染的复杂性与波动性。通过源头控制、过程优化与末端高效净化相结合,不仅提升了废水与废气的达标率,也降低了运行能耗与碳排放。实践表明,该体系可实现废水COD去除率达95%以上,废气VOCs去除率超过98%,运行经济性与可靠性良好。未来,应进一步强化信息化管理与智能化控制,利用在线监测、大数据分析 with 人工智能预测,实现污染治理的动态调控与精细化管理。随着政策

与技术的持续推进,制药行业的清洁生产与绿色转型将迎来更加广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 张国智. 新型耐盐 MBBR 处理高盐高浓度有机废水及类藻酸多聚物回收研究[D]. 青岛理工大学, 2024.
- [2] 田庆华. 生物制药高浓度有机废水处理关键技术研究与应用. 四川省, 四川省环境保护科学研究院, 2014-03-06.
- [3] 电催化氧化处理难降解高浓度有机废水技术. 广东省, 深圳市宇力科技有限公司, 2009-01-01.
- [4] 王俊峰. 高效复合菌固定化技术处理抗生素制药废水的研究. 黑龙江省, 黑龙江农业工程职业学院, 2014-12-29.
- [5] 孙洪涛, 秦霄鹏, 高磊. 制药废水处理方案的确定及试验效果分析[J]. 环境工程, 2009,27(02):51-54.