

化工废水处理工艺中有毒气体逸散风险控制技术研究

黄云飞

泛华保险公估股份有限公司河北分公司，河北 石家庄 050000

[摘要]化工废水成分复杂，在格栅、调节池、厌氧反应等处理工段极易逸散出诸如硫化氢（H₂S）、氨气（NH₃）、挥发性有机物（VOCs）、氯气（Cl₂）等具有高度毒性的气体，不仅会引发严重的安全事故，而且会造成严重的环境危害，破坏生态平衡，对现场人员的人身安全造成严重影响。文章通过多层级、全方位的技术手段构建“源头抑制-过程拦截-末端净化”风险控制技术体系，并提出基于数值模拟与智能调控的技术优化路径。研究表明，三级控制体系协同运行可实现对化工废水处理过程中有毒气体逸散风险的有效管控，确保化工废水处理领域的安全生产，保护环境，以供参考。

[关键词]化工废水处理；有毒气体逸散；风险控制；源头抑制；末端净化

DOI: 10.33142/aem.v7i12.18650 中图分类号: TQ522 文献标识码: A

Research on Risk Control Technology for Toxic Gas Release in Chemical Wastewater Treatment Process

HUANG Yunfei

Hebei Branch of Fanhua Inc., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Chemical wastewater has complex components and is prone to release highly toxic gases such as hydrogen sulfide (H₂S), ammonia (NH₃), volatile organic compounds (VOCs), chlorine gas (Cl₂), etc. in treatment sections such as grilles, regulating tanks, and anaerobic reactions. These gases not only cause serious safety accidents, but also pose serious environmental hazards, disrupt ecological balance, and have a serious impact on the personal safety of on-site personnel. The article constructs a risk control technology system of "source suppression process interception end purification" through multi-level and all-round technical means, and proposes a technical optimization path based on numerical simulation and intelligent regulation. Research has shown that the collaborative operation of a three-level control system can effectively control the risk of toxic gas emissions during chemical wastewater treatment, ensuring safe production and environmental protection in the field of chemical wastewater treatment, for reference.

Keywords: chemical wastewater treatment; release of toxic gases; risk control; source suppression; end purification

引言

化工生产的工艺流程基本都会有废水排放，水中掺入了多种不同类型的毒害性物质，它们相互存在联系和作用，导致废水处理难度增加，且充满风险^[1]。例如，废水中的有机物和无机物在特定条件下可能发生化学反应，生成毒性更强的物质^[2]。不同物质的挥发性、溶解度等理化性质方面差异很大，使废水处理面临重重困难^[3]。为实现废水达标排放，企业普遍采用物理、化学及生物联合处理工艺，但在处理过程中，传统的废水处理技术受水质稳定性的影响很大，且水质波动让废水处理流程变得异常错综复杂，要求配置更加先进的工艺流程、质量性能更强的处理设施。据统计，化工废水处理场是工业有毒气体逸散的高发区域，逸散的H₂S、NH₃、苯系物、Cl₂等气体不仅具有恶臭特性，还具有毒性、腐蚀性甚至易燃易爆性，对操作人员健康、厂区周边生态环境及生产安全构成严重威胁^[4]。

随着环保法规日益严苛，对化工行业有毒气体排放浓度提出了更严格的要求。在此背景下，传统单一的末端治理技术已难以满足精准防控需求，亟需构建覆盖全处理流

程的有毒气体逸散风险控制体系，实现从源头到末端的全链条管控^[5]。因此，开展化工废水处理工艺中有毒气体逸散风险控制技术研究，有利于保护生态环境，为企业节约资源消耗量，压缩成本开支，提高经济效益，推动化工产业安全可持续发展。

1 化工废水处理中有毒气体类型与影响因素

化工废水处理逸散的有毒气体分四类：一是恶臭类（H₂S等），多源于厌氧和污泥处理；二是有机有毒气体（如 VOCs、苯等），来自高浓度有机废水挥发降解；三是无机有毒气体（如 Cl₂等），由化学氧化等反应产生；四是酸雾/碱雾，产生于酸碱调节等工艺。这些气体理化特性各异，逸散后危害程度和范围不同。

影响有毒气体逸散的关键因素有四类：①废水特性：pH值影响酸碱污染物逸散，如低 pH 促 H₂S 逸散、高 pH 促 NH₃逸散；温度升高加快分子扩散，每升高 10°C 逸散速率提 1.5~2 倍；污染物浓度越高逸散驱动力越强。②工艺参数：厌氧处理溶解氧浓度和停留时间影响微生物代谢产物及 H₂S、NH₃ 逸散量；曝气量与强度大促 VOCs 逸

散；化学药剂投加不合理会生成有毒气体。③水力条件：废水流动速率和搅拌强度大，液膜薄、传质阻力小，逸散速率提升；构筑物液面面积大，气液接触面积大，逸散量增加。④环境条件：环境风速大促气相污染物扩散，增大传质推动力；环境气压降低提升污染物挥发度，增加逸散速率。

2 有毒气体逸散风险三级控制技术体系。

2.1 源头抑制技术

2.1.1 工艺参数优化

在污水处理流程中，针对不同的处理工段所呈现的易散特性对关键工艺参数进行针对性优化。在调节池阶段，鉴于不同污染物易受 pH 值影响有效控制废水的逸散潜能，含有硫化物的废水把 pH 值调节至 8.5~9.0 范围，能够对 H₂S 逸散起到抑制作用。氨氮多以铵离子形式存在，将含氮废水的 pH 值调节至 6.5~7.0，能够对 NH₃ 逸散起到抑制的作用。在厌氧处理工段要对溶解氧浓度以及停留时间进行优化，溶解氧浓度严格控制在 0.2mg/L 以下，停留时间控制 24~48h，此外，引入分段厌氧工艺，从而降低单个工段的污染物负荷，减少代谢副产物产量。在曝气工段，采用低强度曝气方式，控制曝气量在 1.5~2.0m³/ (m² · h)，并优化曝气装置布局，减少气液接触面积，降低 VOCs 逸散速率。

2.1.2 化学预处理技术

对于含有高浓度氰化物与硫化物的化工废水，通过进行预处理环节将其中易逸散的污染物去除或转化，可以保障后续处理过程中的安全性与稳定性。当前主要采用的预处理技术主要有两种，一种是化学氧化法，借助过氧化氢、次氯酸钠等具备强氧化性的化学药剂将废水中的硫化物氧化为硫酸盐。

在氧化反应的操作过程中氰化物氧化为无害的 CO₂ 与 N₂，把控氧化剂的投加量，通常为理论需求量的 1.2~1.5 倍区间内，在确保硫化物与氰化物充分氧化的同时可以有效避免过量氧化剂而衍生出二次有毒气体^[6]。另一种是化学沉淀法，在操作过程采用氯化铁、硫酸亚铁等药剂，与废水中的硫化物发生化学反应生成难溶性硫化物沉淀，该技术的应用可以提高沉淀去除率，同时经此处理后可以有效降低后续处理工段的 H₂S 逸散风险。

2.1.3 微生物调控技术

在生物处理的环节中，通过对微生物群落进行精准性的调控，可以对产毒微生物活性到抑制作用，进一步促进污染物的高效降解作用。于厌氧处理系统内按 5~10mg/L 的浓度投加钼酸盐抑制硫酸盐还原菌活性，减少硫化氢 (H₂S) 生成量。除此之外，通过接种高效降解菌强化系统对有机物的降解效能，降低产毒代谢途径的底物浓度。

2.2 过程拦截技术

2.2.1 密闭化改造

对格栅等高逸散工段密闭设计，用密封设备隔绝气液与大气接触。密封材料选不锈钢或 FRP，振动大设备用柔

性密封接头。地下构筑物全密闭防毒气，露天池用弧形盖板。密闭化改造可减无组织逸散量 60%~80%，是过程拦截核心技术。

2.2.2 分级收集系统

依据工段逸散气体浓度特性，采用分区分级收集，提升效率降能耗。高浓度工段（如厌氧反应器等）用整体密闭+多点集气，罩全覆盖防泄漏；中低浓度工段（如调节池等）用局部集气罩，设于逸散强处。风量按构筑物容积与逸散速率，以 6~10 次/h 换气次数设计，高浓度取上限、中低浓度取下限，确保收集效率≥90%。

2.2.3 负压控制技术

在密闭空间与收集系统的协同运作中采用负压控制方式确保内部气压低于外界大气压，达成-50 至-100Pa 的精准负压控制，可以有效避免有毒气体的泄漏风险。同时在管道系统中配置压力监测装备，对管道内的压力变化进行实时监测，如果压力偏离了所预设的参数，自动对系统运行参数进行调整。除此之外，在管道连接处创新性地运用了气动密封技术对阀轴与阀座进行二次密封处理，以此确保封密性与实现臭气实现零泄漏。

2.3 末端净化技术

2.3.1 吸收法

末端净化技术用于处理收集的有毒气体以确保达标排放，需依气体成分、浓度及处理要求选针对性技术。吸收法适用于水溶性强且呈酸性或碱性的有毒气体（如 H₂S、NH₃ 等），通过气液接触使污染物溶于吸收液实现净化。常用吸收设备有喷淋塔、填料塔，吸收剂依污染物特性选：酸性气体用碱性吸收剂（如 8% 氢氧化钠溶液，pH 控制在 9~10，由 pH 自动控制系统调节投加量）；碱性气体用酸性吸收剂（如 5% 硫酸溶液）。吸收塔填充 PP 规整填料增大气液接触面积，控制气体停留时间≥1.5s，吸收效率超 95%。吸收后的富液可通过再生工艺回收有用物质，如 H₂S 吸收富液可回收硫单质。

2.3.2 吸附法

吸附法适用于处理低浓度、高毒性的苯系物、甲硫醇等 VOCs 与恶臭气体，靠吸附剂多孔结构和高比表面积吸附污染物实现净化。常用吸附剂有活性炭等，活性炭因优势明显应用最广。为提升效果，选比表面积≥1000m²/g 的特种活性炭，控制气速 0.5~1.0m/s、停留时间≥1.5s、动态吸附容量 20%~25%。吸附系统双罐交替运行，再生用蒸汽脱附，脱附物可再处理。此法效果稳定、操作简单，但吸附剂要定期换，成本较高。

2.3.3 氧化法

氧化法处理高浓度、难降解 VOCs 与有毒气体，将其氧化分解为无害物质，常用技术有蓄热式热氧化（RTO，主流技术，核心为氧化室与蓄热室，净化及热效率高，需配预处理单元）和催化燃烧（适用于中低浓度废气，能耗低、净化效率高，但催化剂易中毒，需控制废气杂质）。

2.3.4 生物法

生物法处理中低浓度、易生物降解有毒气体（如 H₂S 等），用微生物代谢转化污染物。常用工艺有生物滤池等，核心是构建高效微生物群落并控温、湿、pH 值。生物滤池填充载体形成生物膜降解气体，去除率 80%~90%。其运行成本低、无二次污染，但受环境因素影响大，但是对于难降解污染物处理效果有限。

3 控制技术优化

3.1 基于数值模拟的参数优化

利用 OpenFOAM 等 CFD 软件建立化工废水处理构筑物气体逸散数值模型，模拟不同工况下气体逸散情况。据此优化密封盖板结构、集气罩布置与风量分配，减少气流死角，如集气罩设液面上方 1.5m、按浓度区域分配风量，收集效率可提升 10%~15%。同时，用数值模拟优化 RTO、吸收塔等末端设备内部结构参数，提高处理效率与能耗利用率。

3.2 基于智能调控的系统优化

化工企业可在生产线上安装智能化监控系统，实时跟踪采集废水处理技术参数，实现稳定可靠的废水处理流程。这种实时监测控制系统，可辅助管理人员对废水处理流程和参数设置进行持续优化，大幅提升处理成效。技术革新和普及推广，不仅可提升化工企业产能，还可防止废水潜在的环境污染，达到保护生态环境的目的。构建一套智能化调控体系可以有效实现对三级控制体系（源头抑制、过程拦截、末端净化）的实时监测与调控。在源头抑制阶段，部署污染物浓度传感器、温度传感器等多类型传感器实时捕捉废水各项关键特性的细微变化，基于具体情况自动且精准地调节药剂投加量以及各类工艺参数，从而在源头上可以对污染物的产生与扩散起到抑制作用。进入过程拦截阶段安装气体浓度传感器、压力传感器，对管道内的气体浓度以及压力进行实时监测，智能控制器根据传感器反馈的数据自动调节风机转速确保负压稳定。在末端净化阶段，安装能耗监测仪以及进出口气体浓度传感器，基于实际工况自动调节吸收剂浓度、氧化温度等关键参数。同时，引入机器学习算法，对海量历史运行数据进行深度挖掘与分析，基于历史运行数据训练预测模型洞察系统运行过程中可能出现的逸散风险，实现提前预警与参数的精准调控，避免了因突发状况导致的处理中断提升系统的稳定性与经济性。

3.3 技术融合与创新

为了可以提高污染物处理效果以及应用范围，积极推动多元控制技术的深度融合与协同创新的优势互补与集成优化。以生物法与吸附法的融合为例，通过构建生物吸附联用工艺，利用吸附剂的高吸附容量在处理初期迅速捕捉并去除高浓度污染物，随后，借助生物降解的强大能力实现吸附剂再生，进而实现循环利用效果，提高去除污染物的效率，同时可以降低运行成本。将催化燃烧技术与蓄热技术有机融合应用于催化燃烧领域，通过开发高效蓄热

式催化燃烧设备，能够在燃烧过程中高效回收并降低燃烧温度，催化燃烧技术借助催化剂的催化作用提升能耗利用率。同时，研发新型纳米吸附材料、高效抗中毒催化剂等新型高效材料作为提升技术核心性能的关键突破口。相较于传统活性炭，新型纳米活性炭的比表面积提高，可以更加彻底快速的吸附各种污染物。

4 结论与展望

4.1 结论

化工企业生产过程中产生大量废水，对人类健康、水环境、土壤以及生态系统等带来严重污染和危害。传统废水处理技术和方法存在诸多弊端，在国家强调可持续发展、社会呼唤绿色环保的大背景下，本文研究化工废水处理有毒气体逸散风险控制技术，结论如下：有毒气体逸散是物理挥发、微生物代谢与化学反应共同作用所致，关键影响因素有废水 pH 值、温度等，pH 值与温度对逸散速率影响最大。“源头抑制-过程拦截-末端净化”三级控制体系可全链条管控风险，提高各种污染物。

4.2 展望

未来可从以下方向开展进一步研究：深入研究复杂组分化工废水处理过程中有毒气体的逸散机理，建立多因素耦合的逸散预测模型，提升风险预测的精准度。研发新型高效、低成本的控制技术与材料，如新型光催化氧化技术、高效生物降解菌剂等，推动控制技术的升级迭代。化工废水处理工艺中有毒气体逸散风险控制技术与智能调控技术进行高度融合，通过结合人工智能技术、大数据、物联网等技术实现逸散风险的实时监测、提前预警，基于具体工况精准调控，推动绿色化工技术持续向前发展，为化工废水处理工艺中有毒气体逸散风险控制技术提供更多支持。

[参考文献]

- [1]江涛,谭田立,裴文丑.含氟废水改造工程实例[J].给水排水,2024,60(12):69-74.
- [2]严晓红,王丽,叶红,等.废水中微塑料吸附去除技术与调控方法研究进展[J].塑料科技,2025,53(8):212-218.
- [3]盛艳.化工工程工艺中的绿色化工关键技术分析[J].化纤与纺织技术,2023,52(7):22-24.
- [4]罗建军.化工工程中绿色化工技术的应用[J].汽车博览,2022(14):100-102.
- [5]慕杨,张鑫,卢立泉,等.芬顿-臭氧联合氧化用于化工园区污水处理厂深度处理[J].给水排水,2025,61(8):95-99.
- [6]王卫红,冉丽君,杨金涛,等.我国工业园区污水处理厂废水管控现状及建议 [J].环境工程学报,2025,19(7):1619-1626.

作者简介：黄云飞（1982.6—），毕业院校：河北科技大学，所学专业：药学，当前就职单位：泛华保险公估股份有限公司河北分公司，职务：安全工程师，职称级别：中级注册安全工程师。