

多级耦合工艺在化工反应釜废液处理中的应用

王志同 毛海峰 陈玉坤

广饶六合化工有限公司

摘要: 针对反应釜清洗过程中产生的高浓度、有机负荷大、泡沫丰富且异味强烈的废液处理难题, 设计了集过滤、曝气脱氧、泡沫控制与臭氧氧化于一体的多级耦合处理工艺。阐述了各处理单元的结构设计与协同运行机制, 重点分析了泡沫闭环控制与臭氧分段供氧的技术实现路径。结合山东某精细化工企业的工程应用案例, 对装置配置、运行流程及处理效果进行了系统研究。研究表明, 该系统可有效提升废液处理效率, 出水水质稳定达标, 具备运行稳定、维护便捷和成本可控等综合优势。

关键词: 反应釜; 清洗废液; 耦合工艺; 泡沫控制; 臭氧氧化

反应釜在化工生产中频繁用于多品类物料的合成与转化, 其清洗过程产生的废液成分复杂、污染负荷高、处理难度大, 特别是泡沫控制与有机物去除成为关键问题。探索高效、稳定的处理技术, 是实现源头减排与清洁生产的重要方向。

1 反应釜清洗废液污染特点与处理难点

1.1 清洗废液的来源与典型污染物

化工反应釜生产不同批次的化学品后, 需进行定期清洗, 清洗过程会产生大量含残留原料、中间体和副产物的废液。废液含高浓度的 COD、BOD、悬浮固体 (SS)、油类及表面活性剂等污染物, 具有高有机负荷和强刺激性。表面活性剂可形成稳定乳化体系, 影响水体净化过程。上述污染物若不经处理直接排放, 易造成严重的水污染。

1.2 废液中泡沫产生的典型机理

清洗废液中含有的表面活性剂与有机污染物含量较高, 易在曝气或搅

拌条件下形成泡沫。在曝气系统运行过程, 空气与废液的持续接触会加剧泡沫堆积, 造成液面上浮沫层增厚, 影响氧气传质效率与反应动力学过程, 加大后续处理难度^[1]。

1.3 治理难点分析

反应釜清洗废液成分复杂浓度波动大、泡沫难以控制、治理难度大且污染物组成随产品批次及清洗方式而改变, 因此处理系统负荷波动剧烈, 运行不稳定。泡沫大量堆积还会影响曝气效率, 阻碍氧气溶解和传质过程, 若强行压低曝气强度又会影响处理效率。而且传统加药消泡手段成本高、易引起二次污染, 不适应动态运行条件^[2]。

2 多级耦合废液处理工艺原理与流程设计

2.1 总体工艺路线说明

本文设计的“多级耦合”处理工艺, 包括过滤预处理、曝气脱氧与泡沫控制、臭氧氧化反应以及二级排出 4 个环节, 反应釜废液处理总体工艺路线

如图 1 所示。1) 废液经检测与酸碱调节后进入多级过滤装置, 去除大颗粒杂质与悬浮物, 减轻后续处理负荷; 2) 进入引流仓与喷淋破泡装置的曝气池, 强化溶氧并同步削减泡沫; 3) 在混合仓内通过臭氧充氧管道进行深度氧化, 脱除有机残留并消除异味; 4) 二次过滤后达标排放。

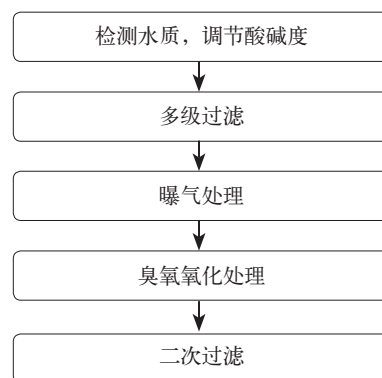


图 1 反应釜废液处理总体工艺路线图

2.2 总体结构设计

系统由过滤机构、曝气机构和反应机构 3 部分组成, 按工艺顺序联接, 形成闭环处理路径, 反应釜废液处理装置整体结构如图 2 所示。过滤机构

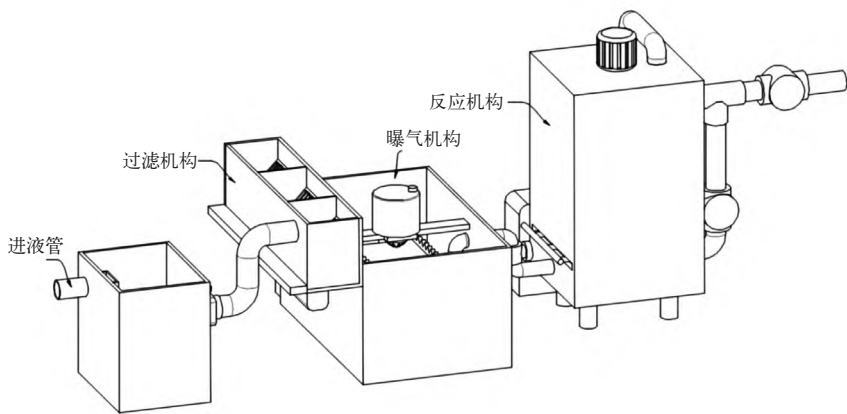


图2 反应釜废液处理装置整体结构示意图

采用多级横向栅板与斜导板组合，利用三角穿槽引导废液分流，延长水流路径、提高杂质分离效率，并设计了集废槽与电动闸门便于清理。曝气机构以引流仓与液下水泵构建内部循环流场，通过锯齿边、喷淋器和滤网联动有效破除泡沫，提升氧气接触效率。反应机构设有分层臭氧注入结构、压力感应控制和抽气系统，实现定量臭氧投加和异味同步抽排。各单元间通过三通管、水泵切换装置进行流量调节，确保系统灵活高效运行。

2.3 各单元结构及功能

- 1) 过滤系统。过滤系统由过渡仓、过滤仓、栅板组件、斜导板、集废槽与电动闸门组成，过滤机构结构如图3所示。废液经进液管进入过渡仓，完成初步水质检测和pH值调节后，借助水泵进入过滤仓。过滤仓内布置多层孔径递减的栅板，并通过隔板与侧支板隔断，形成横向过滤路径。三角穿槽引导水流多次折返，提高杂质沉积效率。斜导板表面设置交错鳞片，扩大接触面积、避免堵塞。沉积物最终落入方形漏槽，并经电动闸门冲洗至集废槽中，便于清理。过滤系统主要作用为去除悬浮物与大颗粒杂质，保障后续单元运行稳定^[3]。
- 2) 曝气系统。曝气系统以曝气池为主体，内部设置引流仓、液下水泵、隔板与多条曝气管道。废液经过滤后

- 进入曝气池，通过液位差自然溢流至引流仓，再由液下水泵抽吸形成循环流动，实现动态曝气。部分曝气管道延伸至引流仓内部，增强局部溶氧能力。为控制泡沫积聚，引流仓顶设滤网，在其正上方布置高压喷头，连接储水罐形成喷淋装置，持续击碎聚集泡沫。曝气系统兼顾曝气效率与泡沫控制，通过构建稳定液体循环路径，提升气液接触效果，防止泡沫上浮溢出造成污染。
- 3) 臭氧氧化系统。反应机构采用立式混合仓结构，设有搅拌器、加热器、臭氧充氧管道、抽气系统及控制组件。混合仓底部设置多层空心隔板，每层内部布设臭氧充氧管道，管道末端带有微孔分散头，与压力感应板相

连。液面上升至感应板高度即触发该层供氧，精准控制臭氧使用量。通过搅拌器与加热器协同作用，增强絮凝剂、助凝剂与臭氧在废液中的混合反应效率。顶部抽气管连接抽气机，及时排除反应中产生的异味气体。臭氧氧化系统具备高效氧化与自动控制双重功能，可提高废液脱色与有机物降解效果。

3 关键技术探讨

3.1 泡沫控制机制研究

采用流动诱导、喷淋破泡与锯齿边多重破泡结构协同设计来解决泡沫堆积问题。当废液在液下水泵作用下形成环流，泡沫随水流被引导至引流仓顶端滤网集中，储水罐高压喷头精准喷淋击碎泡沫，顶部设置的锯齿边在水流扰动中对泡沫进行二次剪切破碎。实现泡沫“集中—破除—回流”全过程闭环，控制泡沫扩散，提高曝气效率。

3.2 臭氧分段供给与反应效率优化

- 1) 压力感应反馈机制。为实现臭氧供给的动态调节，系统在混合仓内部设置多层隔板，每层内置臭氧充氧管道，并于底部安装压力感应板。当液位上升至某层感应板高度，即自动触发该层臭氧供给，实现“液位驱动—分段供氧—精准反应”的反馈闭环控制^[4]。

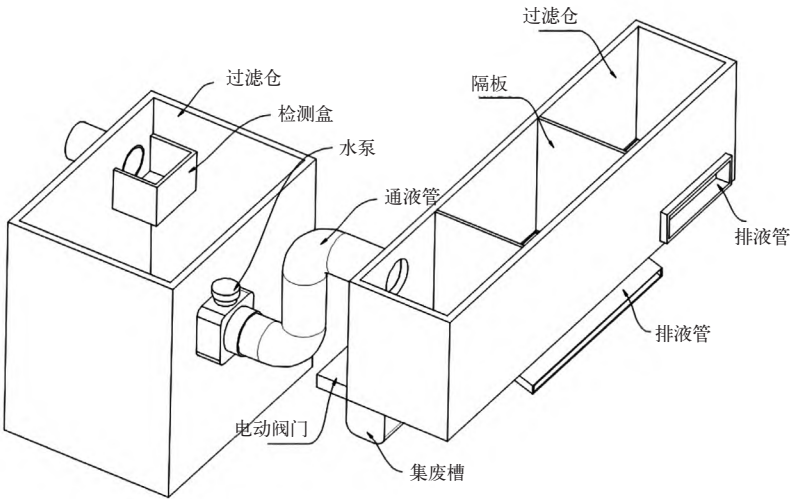


图3 过滤机构结构示意图

2) 反应深度提升策略。为提升臭氧氧化反应效率,系统配套设置搅拌器与加热器,增强废液中氧化剂、反应药剂与污染物的均匀混合。臭氧由底部上行、分层供给,延长气液接触路径,提升传质效率。通过三通管切换装置构建内循环通道,使废液反复进入反应仓进一步处理,适用于高浓度、有机污染物复杂的工况。

4 案例分析

4.1 项目背景

本项目位于山东省东营市某精细化工园区内,服务对象为一家年产5万t有机中间体的化工企业。该企业拥有10条自动化反应釜生产线,生产周期短、品类切换频繁,平均每23天需对反应釜进行一次高压清洗。清洗过程中产生大量含有残留原料、反应副产物、溶剂及表面活性剂的废液,高COD、高泡沫、异味重。

4.2 实施方案配置

1) 处理装置规格参数。选用的多级耦合处理装置处理能力为15 t/d,设计峰值流量20 t/d,满足企业高频清洗与水量波动需求。过滤系统采用五级栅板过滤结构,材质为316不锈钢,设有电动闸门与自动反冲清洗装置;曝气系统设立容量为4 m³的曝气池,内置2台3 kW液下泵与1套多点分布式曝气装置;破泡装置由储水罐(0.5 m³)与6组喷淋喷头组成;臭氧氧化系统配备3层反应隔板,1台5 g/h臭氧发生器及功率1.5 kW搅拌器与1.5 kW加热装置。

2) 实际运行流程设置。废液首先

通过地埋排管进入预处理模块的过渡仓,进行水质检测与pH值调节后由水泵输送至过滤仓,依次通过不同孔径的栅板进行分级过滤,杂质经侧向集废系统排出。过滤后的液体经排液管流入曝气池,在液下泵驱动下构建内循环流场,通过曝气管增氧并配合高压喷淋器对泡沫进行破除。废液经三通管注入混合仓,完成臭氧氧化反应及药剂混合,顶端抽气机同步抽除异味气体。最后,反应液经三通切换系统排出或回流循环,确保反应彻底后达标排放。整体流程布置紧凑,运行流畅,已实现连续、稳定、高效运行。

4.3 效果与效益分析

1) 排放水质达标率提升。系统运行初期通过动态调节工艺参数,在一周内实现废液出水水质的稳定控制。经连续监测,出水COD、BOD、pH、SS等主要指标达标率由改造前的不足65%提升至98%以上,满足园区污水处理厂预处理进水标准。脱色率稳定在95%以上,异味基本消除,改善了厂区周边的环境质量。

2) 装置运行稳定性与维护频率。运行连续性强,结构集成度高,设备之间协同运行良好。在自动化控制系统支持下,各单元参数可实时监测与调整,保障运行稳定。过滤模块设置自清理结构,需人工干预频率低;臭氧系统采用液位感应供气,避免过氧现象。整套装置运行3个月内未出现设备故障,日常维护工作量较轻,显著降低了运维管理难度与人员依赖度^[5]。

3) 企业环保合规性与运行成本比较。装置投入使用后,企业在环保合

规方面由“被动应对”转为“主动达标”,通过第三方检测机构评估,所有指标均满足排放标准。与原有化学投加+简单沉淀法相比,新系统在处理深度提升的同时,单吨废液处理成本下降约22%,节约了大量药剂费用和人工成本。

5 结论

本文通过结构集成与功能优化,建立了适应性强、运行高效的多级耦合处理系统,针对反应釜废液“高泡沫、高COD、强异味”等特点,实现了污染物的有效去除与全过程闭环控制。实际应用表明,该工艺提升了排放水质的达标率,降低了运维成本,具备较强的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 刘慧,王树众,杨健乔,等.酸性蚀刻废液超临界水热制备纳米铜和氧化铜[J/OL].上海交通大学学报,1-21[2025-07-23].<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.618>.
- [2] 崔皎,边伟,杨欣静,等.高放废液蒸发器的选型设计研究[J].广东化工,2022,49(11):188-189+180.
- [3] 秦芳芳.化学耗氧量废液处理与银回收的方法探究[J].现代职业教育,2018(20):79.
- [4] 付培清.酸洗废液资源化技术应用的研究[J].广东化工,2015,42(04):94-95.
- [5] 付培清.含铜三氯化铁废液资源化利用的研究[J].广东化工,2014,41(21):162+167.