

高效环保型含乙酸乙酯尾气回收再生系统的开发与应用

顾永华

上海正海活性炭有限公司 上海 201107

摘 要：面向乙酸乙酯等有机溶剂尾气排放控制需求展开围绕高效环保型尾气回收再生系统开发与工程应用的技术研究，设计构建了全流程系统：以双塔交替吸附与自动解吸为核心且整合预处理、二级吸附、冷凝分离、层析回收等模块，配置西门子PLC程序控制与多重安全联锁，可实现高负荷波动条件下乙酸乙酯溶剂稳定高效回收，具备结构紧凑、运行自动化程度高、能耗低特点，有在制药与精细化工等行业推广应用的可行性与经济性，为有机废气资源化回收技术提供工程化实践路径与数据支撑。

关键词：乙酸乙酯尾气；活性炭吸附；溶剂回收；环境工程

1 引言

在精细化工、制药、涂料等行业快速发展从而产生大量含乙酸乙酯等有机溶剂尾气的情形下，对大气环境质量构成显著压力，鉴于乙酸乙酯高挥发性与较低爆炸下限的特点，排放时存在安全隐患且易导致资源浪费，又因挥发性有机物（VOCs）排放已成为当前环境治理重点难点之一，所以开发兼具高回收效率与环保排放标准的溶剂尾气处理技术，成为提升企业清洁生产水平及环境管理能力的关键路径，且在当前尾气治理技术里，颗粒活性炭吸附凭借工艺成熟、适用性强、再生性能好等优势而广受关注，基于实际工况构建一套高效、智

能、稳定的尾气回收再生系统，对于推动有机溶剂资源化利用及绿色制造体系建设意义十分重大。

2 尾气回收系统的开发设计

2.1 系统构成与功能划分

依据有机溶剂排放的波动性与成分复杂性对高效环保型含乙酸乙酯尾气回收系统进行功能模块划分，构建起涵盖气体预处理、吸附净化、解吸再生、冷凝分离及溶剂回收的闭环回收结构，以两座吸附塔作核心装置在控制逻辑下交替运行完成吸附与解吸循环形成连续稳定处理流程的整体系统^[1]，有下图1所示的吸附塔装置示意图：

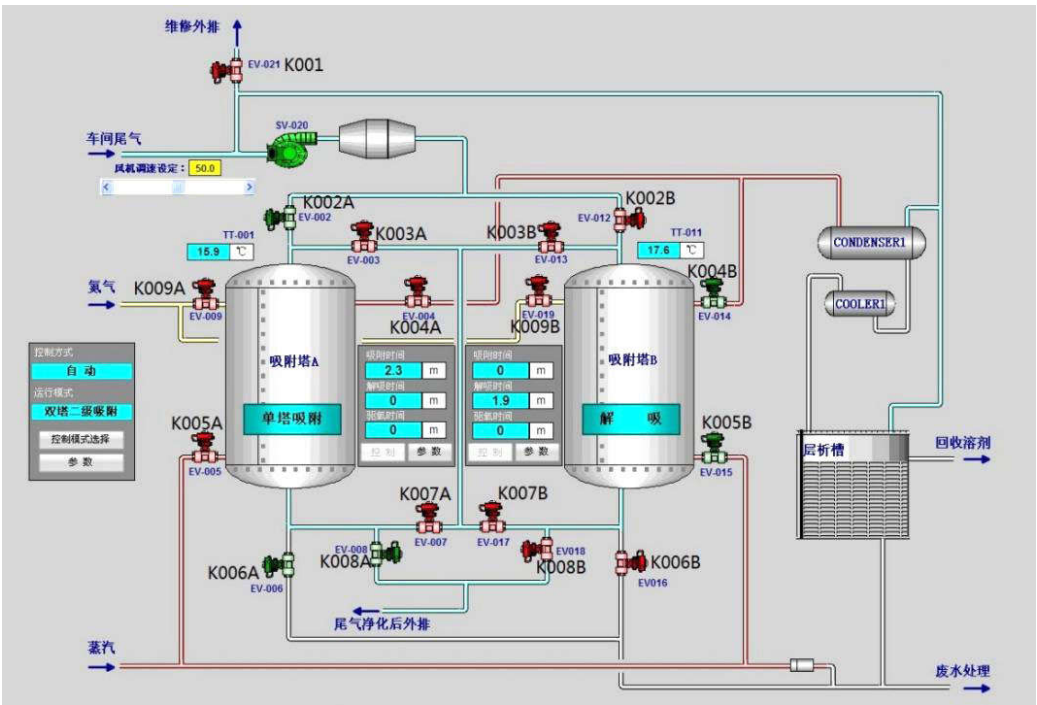


图1 吸附塔装置示意图

尾气进入系统前需先经风冷器冷却至设定温度后再由风机增压进入由两级串联塔体构成的吸附流程,其中一级塔优先吸附高浓度溶剂组分,二级塔对穿透气体深度净化,在一级吸附塔趋于饱和时其状态转换为解吸段且系统自动启动蒸汽解吸流程将吸附质脱附后经冷凝分离处理回收再用,把冷凝产物引入不锈钢层析槽依据密度差完成有机溶剂与水的相分离,此闭环循环系统可适应不同工况下有机尾气波动排放并对回收率和排放浓度动态调节。

2.2 工艺流程设计与自动控制策略

为实现气体组分稳定吸附及溶剂高效回收,流程逻辑划分为两个相互联动的主工段,在不影响生产线排气连续性的前提下完成工作状态切换。吸附工段在冷却降温后进入一级吸附塔,GAC吸附材料对乙酸乙酯等极性有机物表现出较强亲和性,尾气中大部分目标组分在一级塔中被截留,剩余部分进入二级吸附塔进行补充净化处理。饱和后的塔体进入解吸工段,系统控制自动接通饱和蒸汽,蒸汽经吸附床层促使吸附物质解吸,在经过列管冷凝器冷却后凝结为液相混合物。

集成西门子PLC系统的控制层,结合阀门执行装置、电磁联控及压力/温度检测节点形成具备闭环调节能力的智能控制网络,通过程序设定解吸时间、阀位切换与风机负载调节逻辑完成吸附塔状态的循环切换且极大减少人工干预,解吸蒸汽流量与温度依据信号反馈自动调节且冷凝器启停受控于解吸段温度与压力设定值,整个系统运行状态、阈值报警与数据采集均在控制终端图形化界面实时呈现。

2.3 颗粒活性炭的选择与吸附性能优化

活性炭材料对系统性能的影响贯穿吸附容量、吸附速率、解吸效率等核心技术指标,本系统选定颗粒活性炭(GAC)作为吸附介质主要基于其在气固界面吸附效率高、结构强度好、比表面积大的材料优势^[2],乙酸乙酯作为酯类化合物与GAC微孔结构中的官能团作用能力显著强于其他非极性吸附介质能在短时间内实现较高的单位质量吸附容量,在系统工作压力与风速参数设定范围内GAC表现出稳定的吸附等温线特性与良好的气阻适应性可避免吸附层堵塞、压损波动等问题,表1针对乙酸乙酯与系统中伴随的环己烷成分列出了其分子量与爆炸下限等关键物理化学参数:

表1 主要溶剂参数

溶剂	分子量	爆炸下限(%v/v)
乙酸乙酯	88.11	2
环己烷	84.16	1.3

吸附过程动态加载条件下,通过工况调整可将动态吸附率维持在0.1g溶剂/g炭以上,平均吸附周期超过5小时,单次解吸回收乙酸乙酯量可达70kg以上。与传统粉状或纤维活性炭相比,GAC的抗磨性能与脱附后干燥速率均明显优于其他材料,具备较长使用周期与稳定性能表现。

2.4 安全防护与冗余机制设计

在乙酸乙酯尾气处理过程中,存在系统运行压力、溶剂浓度及温度的多变量波动风险,易形成燃爆或设备负荷过高异常状态的情况下,于系统安全设计层面引入多项预警、防护与隔离控制策略以构建多级防御体系,且在风机段配置防爆变频电机通过调整频率控制尾气风量让混合气体浓度维持在爆炸下限的70%以下,还在风管与吸附系统之间安装阻火器阻断回火通道以避免燃爆传播^[3]。

设有温度探头于吸附塔顶部,一旦监测温度高于150℃预警值,便触发系统之氮气惰化模块以释放高压氮气置换塔内氧气来降低氧浓度进而抑制自燃或氧化反应;处于故障状态或压力异常升高阶段,控制系统自动联动全起式安全阀进行泄压以防吸附塔壳体膨胀失稳;采用正压防爆结构于电气系统以隔离非本安型元器件与尾气区气氛且所有信号通道均配隔离型安全栅确保操作控制环节安全稳定。

3 工程应用

3.1 实际工况下的运行性能指标

含乙酸乙酯尾气回收系统于上海诺华动物保健有限公司生产线上投入运行后所表现出的运行效率颇为稳定且处理效果良好,针对不同工艺环节排放的有机尾气,其在连续运行条件下所展现的吸附性能较高、净化能力也稳定,GAC吸附床层平均吸附率维持在约85%左右且动态吸附能力未现明显衰减,即便在高负荷波动下穿透浓度波动仍能维持较小,回收段系统在解吸与冷凝环节可完成溶剂高效回收,经统计测算乙酸乙酯平均回收率达76%^[4],尾气最终排放口的非甲烷总烃浓度长期保持在80ppm以下,低于国家《大气污染物综合排放标准》GB 16297 - 1996所限定的100ppm上限符合清洁生产排放规范,系统自投运以来未出现高温、过压、漏气等异常现象且吸附塔压力差控制稳定、温度上升幅度低于10℃,表明吸附层气流均布性能良好且床层无局部失效区域,对比投入运行前后的尾气监测数据可见系统在有机组分控制、流量响应、温度调节等方面展现出的良好适应性为生产线稳定运行提供了有力支撑。

3.2 回收效益与运行成本分析

依据生产工况与运行数据推算,年尾气中乙酸乙酯

总排放量为100kg/d，在135个生产工作日内，系统年处理总量为13.5吨。结合溶剂平均回收率测算，可回收乙酸乙酯约9.45吨，按市场价格10元/kg计算，年可创造回收溶剂价值约为9.1万元。

运行成本方面，电耗主要由风机及PLC控制系统构成，对应全年约3240小时运行时间，电费约0.78万元；蒸汽解吸段以每吨溶剂耗汽2.5吨、蒸汽单价160元/t计，其运行成本全年约0.38万元；活性炭材料年更换费用6万元，主要反映材料更新和设备维护开支，综合计算后，系统年运行与维护总费用达7.16万元，年净收益约1.94万元，具备良好的投资回报周期与经济可行性。

3.3 环保合规性与再利用效果

经尾气处理后所含的乙酸乙酯经冷凝形成液相混合物，随即被引入具不锈钢结构的层析槽完成相分离处理，上层富溶剂相即乙酸乙酯组分，直接返回生产车间二次投用作原料以避免溶剂资源浪费，下层含水相经自动排口导入废水处理系统进入厂区集中污水处理环节，未检测到可挥发性残留溶剂成分而符合废水排放要求^[5]；系统外部各节点处VOC浓度均未超标，采用检测管与光离子化仪进行区域检测后的数据表明设备运行期间无溶剂泄漏迹象且风机出口及塔体周围无异味扩散，反映出设备密封性与溶剂捕集性能达设计标准，表2列出设备运行期间不同检测点的气味浓度与有机组分检测值为系统达标运行提供依据：

表2 VOCs检测点数据汇总

检测点位置	浓度值（ppm）
吸附塔进气管道	2540
一级吸附塔出口	620
二级吸附塔出口	78
排放总管出口	80
控制柜周边环境	未检出
层析槽呼吸口	未检出

吸附塔进气管道VOCs浓度达2540 ppm，进入一级吸附塔后尾气中溶剂大量被捕集致使一级吸附塔出口浓度降至620 ppm，初步表明GAC材料吸附能力较强；尾气继而进入二级吸附塔深度净化，出口浓度进一步降低至78 ppm且显著低于国家排放限值，说明二级串联结构对尾气中未吸附组分穿透有效抑制；最终排放总管出口浓度为80 ppm且长期稳定维持在《大气污染物综合排放标准》要求的100 ppm以下，验证了解吸—吸附双工位切换系统

运行的稳定性与连续性。

3.4 系统可靠性与运维体验反馈

选用SUS304与SUS316不锈钢材质的系统设备主体，有着优异耐腐蚀性能及高强度结构表现保障在高温高湿环境下长期稳定运行之态；基于抗化学腐蚀特性选型的吸附塔内壁涂层与阀体衬材，有着可有效抵御乙酸乙酯与水蒸气长期作用引发金属疲劳或腐蚀穿孔情况之能；结构合理的控制系统，有着所有操作功能借由一键启停与远程界面完成具备自动报警、状态联锁与紧急停机之能之况；系统运行过程中，有着值守人员反馈操作简便、监控清晰，操作界面图形直观且维护频次较低之感之态；设备投运后，呈现出维保周期稳定未发生主动停机事件系统日志记录显示运行故障频率极低之状态体现良好设备集成度与工艺成熟性之态；有着生产负责人所表示该套系统在降低环境风险、提升资源利用效率方面有着显著工程价值其系统稳定性与安全性达到车间管理预期目标之况之态。

4 结论

高效环保型含乙酸乙酯尾气回收再生系统于结构设计、工艺集成与智能控制等方面达成多环节协同，展现出实际工况下良好的吸附效率与稳定的回收能力，做到排放浓度长期维持于国家标准限值以下满足绿色生产要求，实现吸附材料与解吸工艺参数合理匹配，达成溶剂回收过程闭环无泄漏具备较高资源再利用价值与环境效益，达到系统运行成本可控且经济收益明确，经工程应用结果验证其在环保效能、自动化水平及安全运行方面的综合优势，进而为有机溶剂尾气治理提供可推广的技术路径与示范参考的良好成效。

参考文献

[1] 栾燕华,田建华,符强,等.溶剂萃取法分离回收钒的研究进展[J/OL].天津理工大学学报,1-11[2025-03-24].
[2] 聂云妮.低温等离子体协同掺杂锰基催化剂降解乙酸乙酯和间二甲苯的特性与机制[D].浙江工商大学,2022.
[3] 张天昱.吸收耦合高级氧化工艺降解低浓度挥发性有机废气研究[D].浙江大学,2021.
[4] 刘春,高立涛,张静,等.微气泡臭氧氧化强化吸收-氧化处理高浓度乙酸乙酯气体[J].环境工程学报,2021,15(05): 1616-1624.
[5] 陈思.低温等离子体协同N型半导体催化降解NOx与乙酸乙酯的性能提升机制[D].浙江大学,2020.