

化工精馏残液资源化回收工艺及危废减量化研究

李志超

广安前峰玖源电子材料有限公司 四川 广安 638000

摘要：化工精馏生产过程会持续产生组分复杂、黏度较高的有机残液，常规处置方式资源利用率低，还易引发二次污染与固废增量问题。本文结合精馏残液的组分特征、理化难点与污染属性，系统优化均质调质、多级净化等预处理工艺，搭建多技术耦合资源化回收体系，配套分级处置与集约化改造策略落实危废减量。整套工艺方案可有效挖掘残液资源价值，削减末端危废排放量，提升化工生产的环保效益与经济价值。

关键词：精馏残液；资源化回收；工艺优化；危废减量化；耦合分离

引言：精馏作为化工物料提纯分离的核心工序，塔底富集累积的有机残液属于典型高危工业危废，具备组分波动幅度大、高温易结焦、污染物存续周期长的特性。焚烧、填埋等传统处置方式仅能完成基础无害化处理，不仅造成大量有价值组分资源浪费，处置运维成本居高不下，还留存长期生态污染隐患。通过工艺改良与多技术耦合联用的方式，推进精馏残液资源化回收与危废源头减量，可为化工行业绿色低碳转型、生产降本增效提供可靠的技术路径。

1 化工精馏残液基础特性与污染属性分析

1.1 残液来源与组分特征

精馏工序依托物料组分相对挥发度差异完成物料分离，轻质组分从塔顶采出供后续生产使用，难挥发、高沸点重质组分持续留存于塔底及配套管路，长期累积后形成工业精馏残液。残液组分结构复杂，主要分为四大类别：一是未完全反应的基础原料与生产工艺中间体；二是精馏过程中通过聚合反应生成的高分子胶质、重组分副产物；三是生产系统带入的机械杂质、催化剂、无机盐等惰性污染物；四是高沸点焦油类重质物质。生产负荷、物料配比、精馏温度、系统压力等工况参数的波动，会导致不同生产批次残液的组分、杂质含量存在明显差异，无固定稳定的组分体系。连续化生产装置运行过程中，残液会混入前序工序微量催化剂残渣，进一步加剧组分复杂化，提升物料精准分离的技术门槛。同时，装置运行周期直接影响残液组分状态，装置连续运行时间越长，塔底重质胶质、聚合副产物累积量越高，物料处理难度逐级递增，也是后续预处理与资源化回收工艺设计需要重点适配的核心问题^[1]。

1.2 理化性质与工艺处理难点

相较于常规化工工艺物料，精馏残液理化性质特殊，工程化处理难度更高，核心技术痛点集中在四个方

面。一是物料流动性能差，残液胶质与高分子组分占比高，整体黏度较大，低温环境下易出现结胶、结晶、管壁挂料等问题，频繁引发管路堵塞、设备积料故障，物料输送稳定性难以保障。二是组分分离难度大，残液各组分沸点跨度极大，多数重质组分沸点超出常规精馏设备运行区间，单一精馏工艺无法实现有效分离提纯。三是体系稳定性强，各类杂质与有机组分均匀融合，无自然沉降、分层特性，静置、过滤等简易分离手段无法有效脱除杂质。四是环境管控难度高，残液中轻质有机组分易挥发、易氧化，储存转运过程中易变质，释放可燃、有毒气体及VOCs废气，存在较高的安全与环保风险。

1.3 危废污染特征与传统处置弊端

精馏残液已纳入危险废物管理名录，核心危害体现在生物毒害性、腐蚀性与污染物持久性三个维度。残液中含有的芳烃、卤代烃及各类有机副产物具备强生物毒性，处置不当随意排放会持续渗透污染土壤与地下水，且污染物自然降解周期长，易引发区域性累积性生态破坏。同时，残液中挥发性有机物持续逸散，会造成生产区域及周边空气污染，兼具安全隐患与环保风险。焚烧、固化填埋等传统处置模式存在显著技术与经济短板。焚烧工艺仅能实现残液无害化，完全浪费内部有价值资源，且高温焚烧过程易生成二噁英等二次污染物，环保管控压力极大。固化填埋无法彻底分解有机毒害组分，残留污染物会长期留存于环境中，形成持续性生态隐患，同时存在土地资源占用、处置成本高昂等问题。

2 精馏残液资源化预处理关键工艺优化

2.1 均质调质工艺优化

精馏残液普遍存在批次黏度差异大、胶质团聚块、组分分散不均等问题，直接制约后续分离工序的运行稳定性与处理效率。针对该问题，采用“温度调控+机械剪切扰动”协同的均质调质工艺，替代传统单一搅

拌处理模式,大幅提升调质效果。实际生产中,根据残液实时粘稠度分级匹配运行参数,高黏度物料采用中温预热结合高速剪切扰动的方式,降低物料黏度、优化流动性能,彻底解决低温挂壁、结晶堵塞等设备故障;常规黏度残液通过恒温低速搅拌处理,保障各组分均匀分散。该工艺可统一不同批次残液的物性指标,削弱工况波动对后端分离设备的冲击,稳定系统进料状态,从源头规避物料不均引发的分离效率下降、设备故障频发等问题。依托在线黏度监测数据动态调节预热温度与剪切速率,既能避免高温造成轻质有价值组分挥发损耗,又可充分破碎胶质团块,实现残液均质化稳定进料,为后续杂质净化与组分分离奠定良好物料基础^[2]。

2.2 多级杂质净化预处理工艺

残液中的固体颗粒、悬浮胶质及惰性杂质,是造成设备磨损、回收产品纯度不达标、分离工艺失效的核心诱因。据此构建“粗滤-精滤-吸附净化”三级梯度杂质脱除体系,实现不同粒径、不同类型杂质的分层精准去除。一级粗滤通过精密滤网拦截大颗粒固体杂质与沉降沉淀物,杜绝大颗粒物料进入后端设备,规避管路磨损、设备堵塞问题;二级精滤依托微孔过滤装置,精准去除体系内细微悬浮胶质与细小颗粒,打破物料稳定悬浮状态;三级吸附净化采用专用有机吸附材料,脱除微量惰性杂质与致色杂质,完成有机液相物料初步提纯。多级净化工艺可在完整保留有价值有机组分的基础上,逐层清除各类干扰杂质,既降低设备运维损耗、延长设备使用寿命,又从源头保障后续回收产品纯度。该工艺有效弥补了传统预处理杂质脱除不彻底、有效组分损耗偏高的短板,为深度资源化回收提供纯净物料条件。

2.3 预处理工艺差异化适配机制

固定统一的预处理工艺无法适配不同工况产出的残液,难以兼顾处理效率与能耗控制。依据残液物性差异,建立分级差异化预处理运行机制,解决工艺适配性不足的问题。针对高黏度、高胶质残液,延长调质扰动时长、适度提升预热温度,强化物料均质化效果;针对高杂质、高浑浊度残液,增加精滤作业频次、强化吸附净化强度,彻底脱除体系内各类杂质;针对杂质含量低、物性稳定的洁净残液,精简冗余预处理工序,直接送入深度分离单元提纯。整套机制依托在线检测设备,实时监测残液黏度、浊度、组分浓度等核心指标,自动匹配最优工艺参数与运行模式,减少人工判断偏差,提升预处理系统的响应速度与作业精准度。

3 精馏残液深度资源化回收工艺体系

3.1 以经济性为核心导向,主次分明梯度回收

精馏釜底残液组分复杂,全组分深度分离技术难度大、工程投资与运行成本偏高,整体经济性较差。工艺路线设计以技术经济性为核心导向,遵循“主次分明、梯度回收、效益优先”原则,规避盲目全组分回收导致的投资失控、效益倒挂问题。通过综合评估残液各组分质量占比、分离难度、市场价值与生产回用价值,分级设定回收优先级。将含量占比高、分离路径简单、经济效益显著的特征组分列为一级回收目标,通过定向分离工艺高效提取核心有价值组分;对于含量低微、分离流程冗长、回收收益无法覆盖投入的微量组分与重质杂组分,不再单独设置回收单元,主组分提取完成后统一纳入末端减容处置体系。该回收模式可实现资源回收效益与工程投入的最优平衡,为后续多工艺耦合分离的工艺设计提供核心依据^[3]。

3.2 多工艺耦合协同分离

精馏残液作为塔底长期累积的重质物料,具备黏度高、组分沸点区间宽、低温易结晶挂壁、共沸杂质混量大等特点,传统单一精馏工艺适配性极差。高黏度物料在塔内气液传质过程中,易出现壁流、偏流、填料堵塞、塔板积液液泛等问题,大幅降低传质效率,无法满足产品纯度要求。为突破单一分离技术局限,采用“过滤+萃取预分离+精馏提纯+结晶精制”多工艺耦合处理方案,实现残液高效分离。整套工艺采用分级递进的处理思路,先通过过滤、液液萃取完成目标组分初步富集,结合组分与杂质的极性、溶解性差异,匹配专用萃取溶剂,将高价值可溶性组分定向转移至萃取相,实现有价值组分与重质胶质、固体杂质、高沸点焦油的初步分离。预分离完成后,根据物料物性匹配差异化精制工艺,对热稳定性好、沸点差值大的物料开展精馏深度提纯;对高沸点、热敏性强且具备固定熔点的物料,采用冷却结晶、熔融结晶工艺精制,通过多次重结晶制备高纯成品,规避高温精馏引发的物料结焦问题,有效降低生产能耗。

3.3 工艺与装备协同适配处理

精馏残液黏度高、传热传质阻力大,受热易结焦、堵塞设备,需搭配适配高粘体系的专用设备开展预浓缩脱轻处理。该单元以强化换热效率、缩短物料受热时间为核心,降低热敏组分结焦、聚合风险,优先选用刮膜式、离心式薄膜蒸发器。此类设备通过旋转刮片在加热内壁形成均匀薄液膜,换热效率高、物料停留时间短,可高效适配超高黏、强热敏重质残液的脱轻作业。预浓缩工序完成后,萃取阶段配套专用设备强化两相分散效果、更新传质界面,杜绝液泛与堵塞问题。其中转盘萃

取塔依靠高速转盘剪切细化液滴,搭配挡板抑制轴向返混,适配场景广泛;往复筛板萃取塔通过筛板往复运动,反复破碎、聚并两相物料,传质效果优异,可适配高黏度、两相密度差小、胶质杂质多的复杂残液体系。工程应用中可根据残液实际物性,灵活组合各类专用装备,搭建“粗浓缩、深度脱轻、萃取富集、精制提纯”的梯度处理流程。

4 基于资源化利用的危废减量化优化策略

4.1 工艺流程规整与精细化管理

传统残液处理工艺存在工序松散、衔接无序、物料滞留时间长等问题,易造成有效组分损耗与次生危废增量。通过系统性规整全流程工艺,梳理预处理、精馏分离、耦合提纯、组分富集各工序的衔接逻辑,剔除无效冗余环节,精准匹配各设备运行负荷与作业时长。优化物料流转路径,缩短物料在设备、管路中的滞留时间,减少挂壁、沉积、变质引发的资源损耗,从源头降低次生危废生成量。同步建立全工况精细化管控机制,规避设备超负荷运行引发的处理不彻底、残渣堆积等问题^[4]。依托自动化控制系统与在线监测仪表,实时采集分析温度、压力、流量、组分浓度等核心参数,动态调控工艺运行状态,保障整套系统长期处于最优工况,实现危废源头减量。

4.2 残液分级分类差异化处置

摒弃传统“一刀切”的粗放处置模式,建立基于残液物性的分级分类处置体系。根据杂质含量、组分复杂程度、有价值组分占比,将残液划分为洁净型、普通型、复杂型三类,精准匹配处置工艺。低杂质、高纯度的洁净型残液,精简预处理工序,直接开展深度资源化回收,避免过度处理造成能耗与资源损耗;物性稳定、杂质适中的普通型残液,采用“常规预处理+标准耦合回收工艺”处置;高杂质、高胶质、组分复杂的疑难残液,强化均质调质与多级净化力度,通过多级分层处理保障回收效果。差异化处置模式可精准适配不同物料处理需求,提升资源化回收效率,最大限度减少处理不彻底引发的次生危废。结合企业产品结构、原料配方调整周期,定期对残液取样检测、重新定级,确保处置方案始

终适配残液实时特性,规避分类偏差导致的效率下降、减量不达标等问题。

4.3 工艺系统集成化改造提升

针对传统设备分散布设、物料转运路径长、挂壁损耗大的弊端,对残液处理系统开展集约化升级改造。将预处理、精馏、提纯、组分富集等核心设备一体化集中布设,压缩物料输送空间,大幅减少管路、接口处的物料附着残留,降低轻质组分挥发损耗。搭建全封闭式闭环处理体系,减少物料与空气接触引发的氧化变质,提升资源回收率。优化系统内部循环机制,将处理过程中产生的低品质残余物料回流至预处理单元,开展二次循环处理,最大限度提取残留有价值组分,压缩末端危废外排量。配套建设废气收集与VOCs治理设施,对闭环体系内少量逸散的挥发性有机物进行集中处置,实现残液从产生、处理到末端排放的全过程绿色管控,保障环保合规。

结束语

精馏残液的无害化处置与资源化减量改造,是化工产业绿色升级的核心重难点。通过改良残液预处理工艺体系,搭配多技术耦合分离工艺与专用配套装备协同作业,能够高效富集回收残液内部有价值组分。依托生产流程精细化管理、物料差异化处置、工艺系统集成化升级等多重举措,可从源头管控次生危废生成量,破解传统处置模式资源浪费、污染管控难度大的弊端,为同类化工有机残液的无害化、资源化集约化处理提供成熟工艺参照。

参考文献

- [1]郭秀强,何伟,全小辉,等.氯乙烯精馏残液中1,1-二氯乙烷提纯技术应用[J].聚氯乙烯,2024,52(6):37-39.
- [2]颜欢,全小辉,何伟,等.氯乙烯精馏残液分离工艺分析及优化[J].中国氯碱,2024(8):52-57,64.
- [3]张东华.电石乙炔法生产醋酸乙烯过程中精馏残渣有效成分的回收与废气综合处理[J].安徽科技,2022(7):50-51.
- [4]方磊,马长鹏.氧弹燃烧-离子色谱法测定精馏残渣中硫的含量[J].水泥技术,2024(1):93-96.