

基于二甲苯装置吸附分离系统的 C9 芳烃脱除研究与经济性分析

胡哲兴 (恒力石化 (大连) 炼化有限公司, 辽宁 大连 116318)

摘要: 现代工业与社会生产范畴对二甲苯 (PX) 的需求持续增长, 这使得吸附分离系统在二甲苯装置中的地位日益突出。C9 芳烃在吸附分离过程中易引发选择性衰减、解吸剂污染与能耗上升, 影响装置长周期稳定运行与产品纯度。对此, 本文围绕吸附分离系统开展 C9 芳烃脱除的系统进行研究, 从吸附剂与再生工艺优化、操作参数调整、预处理与后处理单元增设、过程监控与自动化控制等方面提出可实施的工程措施, 并以全生命周期视角开展经济性分析, 评估不同技术路径在投资、能耗、维护与产品收益上的综合表现, 以期装置提效与降本提供决策依据。

关键词: 二甲苯装置; 吸附分离系统; C9 芳烃; 脱除措施; 经济性分析

中图分类号: TQ241.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0049-03

Research on the Removal of C9 Aromatics from an Adsorption Separation System in a Xylene Unit and Economic Analysis

Hu Zhexing (Hengli Petrochemical (Dalian) Refining & Chemical Co., Ltd., Dalian Liaoning 116318, China)

Abstract: The demand for xylene (PX) in modern industrial and social production fields continues to grow, which makes the adsorption separation system increasingly prominent in xylene plants. C9 aromatics are prone to selective attenuation, desorption agent contamination and increased energy consumption during the adsorption and separation process, which affects the long-term stable operation of the device and the purity of the product. In this regard, this paper conducts research on the system for removing C9 aromatics in the adsorption separation system. It proposes feasible engineering measures from aspects such as the optimization of adsorbents and regeneration processes, adjustment of operating parameters, addition of pretreatment and post-treatment units, process monitoring and automatic control, and conducts economic analysis from a full life cycle perspective. Evaluate the comprehensive performance of different technical paths in terms of investment, energy consumption, maintenance and product returns, with the aim of providing decision-making basis for improving the efficiency and reducing costs of the equipment.

Key words: Xylene plant Adsorption separation system C9 aromatics Removal measures; Economic analysis

C9 芳烃作为邻近组分, 常在重整、异构化、抽提等上游单元带入, 进入吸附分离系统后易造成吸附剂选择性下降、解吸剂循环污染与塔器负荷升高, 进而影响产品纯度与装置稳定性。目前而言, 如何在保证分离性能的前提下实现 C9 芳烃的高效脱除与过程经济最优化, 仍是工程实践中的关键课题。应从吸附剂与再生策略优化、工艺操作窗口调整、增设预处理或后处理单元、强化在线监控与智能控制等环节协同发力, 构建稳定、经济、可维护的技术路线, 以期实现装置的长周期、低能耗与高收益运行。

1 二甲苯装置吸附分离系统工艺分析

1.1 吸附分离系统基本原理

吸附分离以固体吸附剂对混合 C8 芳烃中不同组分的选择性吸附差异为基础, 工业上普遍采用模拟移动床实现连续操作。吸附剂多为 X/Y 型分子筛或改性吸附材料, 对二甲苯具有较高亲和力, 而对邻二甲苯、间二甲苯及乙基苯亲和力较低, 从而在周期性切

换的吸附—解吸过程中实现组分分离。系统以对二乙基苯等作为解吸剂, 利用其与 PX 相近的吸附亲和力和与 C8 芳烃较大的沸点差, 完成 PX 的置换与解吸, 并通过分馏实现解吸剂循环与产品提纯。该过程遵循吸附等温线与动力学规律, 受温度、压力、液时空速与床层传质条件共同影响; 低温有利于吸附、升温有利于解吸, 压力维持液相并影响选择性窗口^[1]。

1.2 系统主要设备与流程

工业装置通常由两台串联吸附塔、多路旋转阀、抽余液塔、抽出液塔与对二甲苯塔构成, 并配套解吸剂循环与净化系统、换热网络与公用工程。两台吸附塔内设置多床层与液体分配器, 旋转阀按设定周期步进, 将进料、解吸剂、抽出液、抽余液及冲洗物流依次切换至不同床层, 从而在空间上模拟固体吸附剂的“移动”, 在时间上实现连续分离。典型流程为: 来自上游的混合 C8 芳烃进入吸附塔, 在吸附区被选择性吸附; 塔底抽出贫 PX 的 C8 芳烃与解吸剂混合物,

塔顶侧得到富含 PX 与解吸剂的抽出液；抽出液进入抽出液塔分离出粗 PX 与解吸剂，粗 PX 再经对二甲苯塔精制为高纯 PX；抽余液塔回收解吸剂并返回系统，塔底贫 PX 的 C8 芳烃送往异构化单元。

1.3 C9 芳烃在系统中的来源与分布

C9 芳烃主要来源于重整油与裂解汽油等上游单元的副产物流，成分以丙苯、异丙苯、三甲苯异构体及多乙基苯为主，通常在重整油分馏与芳烃抽提前的预处理阶段被部分脱除，但难以实现完全清除。进入吸附分离系统的 C9 芳烃多以微量或痕量随混合 C8 芳烃夹带进入吸附塔，因分子尺寸与极化率差异，其在分子筛孔道内的扩散与吸附势垒不同于 C8 组分，倾向于在吸附区前缘与缓冲区发生弱吸附或“路过”，并通过抽余液管线迁移至下游。少量 C9 芳烃可能在解吸区被解吸剂携带进入抽出液，进而在对二甲苯塔中表现为塔底重组分负荷上升、分离难度加大与再沸能耗增加。空间分布上，C9 芳烃在吸附塔内总体呈现入口附近富集、沿床层递减的趋势；时间分布上，随原料波动与操作工况变化呈周期性起伏。

2 基于二甲苯装置吸附分离系统的 C9 芳烃脱除措施

2.1 优化吸附剂选择与再生工艺

吸附剂是吸附分离系统的“核心资产”，其孔道结构、表面性质与阳离子状态决定了对二甲苯选择性、C9 芳烃容忍度与抗污染能力。工程选型应在 X/Y 型沸石体系内，结合阳离子交换（如 K^+ 、 Ba^{2+} ）与骨架 SiO_2/Al_2O_3 比优化，兼顾吸附容量、选择性、传质速率与机械强度。面向含 C9 原料，宜采用对 PX 具有更高选择性的改性配方，并通过控制孔道微环境与表面酸性位点分布，降低 C9 在强吸附位上的竞争吸附概率。为缓解 C9 在解吸剂中的富集—返混风险，可评估采用与 C9 沸点差更大的“重解吸剂”，例如二乙基甲苯等异构体混合物，其平均沸点显著高于多数 C9 芳烃，便于通过简单分馏实现解吸剂净化与循环使用，从源头削弱 C9 在系统内的累积趋势^[2-3]。

再生策略需与解吸剂体系、床层热容与杂质负荷联动设计，形成“温度—时间—流量”的协同窗口。热再生阶段宜采用分段升温—恒温—降温的曲线控制，先脱附弱吸附的 C8 非目标组分，再在更高温度下解吸 PX 与残余 C9，避免一次性高温造成床层热点与局部烧结。对于采用重解吸剂的体系，应配置解吸剂“轻端切除—重端返洗—干燥—冷却”的闭环净化流程，定期剔除轻组分与高沸点残渣，维持解吸剂物性与选择性稳定。化学/溶剂再生宜作为补充手段，针对 C9 高负荷或极性芳烃引起的孔道阻塞，选择对

吸附质溶解性强且不破坏骨架的溶剂进行低压洗脱，随后进行干燥与活化，恢复孔道畅通与位点可达性^[4]。

2.2 调整工艺操作参数

操作参数的协同优化是抑制 C9 穿透、稳定产品纯度与降低能耗的关键抓手。液相模拟移动床应在保证分离区长度与缓冲区冗余的前提下，合理设定各区的流量分配与切换时序，使吸附前沿保持陡峭、可控，减少 C9 在床层前缘的“路过”与后缘的返混。液时空速应匹配吸附剂有效容量与传质速率，过高会缩短接触时间导致前沿拖尾与 C9 提前突破，过低则增大设备尺寸与循环量，提升能耗与泵送成本。温度窗口需兼顾吸附与解吸平衡：吸附段宜维持较低温度以增强选择性，解吸段适度升温并配合解吸剂置换以提高 PX 置换效率；在采用重解吸剂时，应关注其与工艺介质的沸点差缩小对塔系热负荷的影响，合理上调抽余液塔与抽出液塔的再沸与冷凝能力，确保解吸剂循环稳定与产品塔分离效率。

分区冲洗与流量配比的精细化同样重要。一次冲洗用于清除强吸附组分在塔顶与管线中的滞留，二次冲洗用于抑制不同区之间的“串区”与 C9 夹带，冲洗流量与周期需根据 C9 负荷与床层压差动态调整。解吸剂“轻端切除—重端返洗”的频率应与解吸剂中 C9 增长速率联动，避免解吸剂返塔后把 C9 重新带入吸附区。抽余液与抽出液的塔系操作应关注塔顶/塔底关键组分与热负荷的匹配，通过侧线采出与回流比优化，降低塔底重组分负荷与再沸能耗。原料侧的轻端稳定与异构化单元性能对吸附分离单元的 C9 入口负荷具有“源头”影响，需在装置层面统筹控制上游波动，避免短时峰值穿透吸附前沿^[5]。

2.3 增设预处理或后处理单元

在吸附分离系统前端设置 C9 预处理单元，是削减入口负荷、延长吸附剂寿命与降低塔系能耗的高效路径。工程上可配置脱 C9 塔或 C9 切出一回流系统，将 C9+ 芳烃在进吸附塔前尽可能移除，使吸附段专注于 C8 异构体的精细分离。对于采用重解吸剂的工艺，前端预处理还能显著降低解吸剂净化塔的热负荷与操作复杂度，减少循环系统中 C9 的累积与返混。预处理塔的塔顶温度与回流比应兼顾 C9 切除深度与 C8 损失控制，采用灵敏的在线色谱或折光/密度计进行组分监测，动态调整切割点，避免过切造成 PX 损失或欠切导致吸附剂快速污染。若装置空间受限，可考虑在吸附塔前增设保护床，以物理拦截高沸点重组分与极性芳烃，作为轻量化预处理方案，但其设计需避免引入新的压降瓶颈与分配不均问题。

后处理侧宜聚焦解吸剂与抽出液的净化与回用。

解吸剂循环侧建议设置“轻端切除塔+重端返洗塔+干燥器”的闭环系统：轻端切除塔去除低沸物以维持解吸剂选择性，重端返洗塔剔除高沸残渣与C9富集相，干燥器控制微量水对吸附与塔系腐蚀的影响。抽出液塔与对二甲苯塔应配置侧线抽提或再沸优化，降低塔底重组分中C9残留，减少再沸炉负荷与结垢风险。对于C9含量波动较大的工况，可评估设置缓冲罐与“旁路一回流”控制，在峰值阶段临时分流，避免对吸附塔造成冲击^[6-7]。

2.4 强化过程监控与自动化控制

面向C9脱除的过程监控应覆盖原料、吸附、解吸剂、产品、能量的全链路关键变量，构建以组分、流量、温度、压差与相态为核心的在线监测体系。原料侧建议配置在线近红外或气相色谱对C9进行快速定量，结合阈值控制与趋势预警，联动上游异构化与分馏单元的负荷调整；吸附塔侧应在各床层关键截面布置差压与温度测点，辅以多点取样，实时跟踪吸附前沿位置与“串区”迹象；解吸剂侧设置轻端/重端组分在线监测与密度计，闭环控制切除与返洗策略；产品侧对抽出液与对二甲苯塔顶/塔底实施在线色谱与折光联动，确保纯度与收率双目标受控^[8]。

自动化控制上，以模型预测控制或先进过程控制对SMB的流量分配、切换时序、冲洗与解吸剂循环进行多变量协同优化，利用组分与压差的前馈信息，提前补偿原料波动对吸附前沿的影响。解吸剂净化塔与抽出液塔可采用RMPCT策略，以能量与组分双目标函数优化再沸与回流，降低塔系综合能耗。旋转阀与多路阀的步进控制应引入阀位偏差监测与步序互锁，避免因阀位漂移或卡涩造成区带错位与C9穿透。

3 经济性分析

从全生命周期视角评估C9芳烃脱除路径，应综合考量投资成本、能耗支出、维护费用与产品收益的联动影响。吸附剂与再生工艺的优化主要体现在材料与能耗的此消彼长：高性能吸附剂提升选择性并延长运行周期，推迟更换频率，但前期投入较高；分段热再生与余热回收可降低热负荷与公用工程消耗，减少停机损失。操作参数的精细化调整以“小幅投入、稳健收益”为特征，通过优化液时空速、温度窗口与冲洗配比，在几乎不增加资本开支的前提下，改善前沿陡峭度与返混，降低C9穿透概率，进而稳定PX纯度与收率，压缩塔系再沸与泵送能耗。

增设预处理或后处理单元属于结构性降本方案，前端脱C9塔或保护床直接削减入口负荷，延长吸附剂寿命并降低塔系热负荷，但会带来一定的固定投资与压降成本；后端解吸剂闭环净化与抽出液塔再沸优化，

虽增加设备与运维复杂度，却可通过降低再沸与循环损失改善综合能耗与产品收益。自动化与在线监控的引入提升过程稳定性与异常响应速度，减少非计划停机与质量偏差带来的隐性损失，并通过MPC/APC实现多变量协同优化，带来持续能效改进与人力成本下降。

4 结语

面向二甲苯装置的长周期运行与PX品质稳定，建议以“低成本快回报—稳健优化—系统重构”的路线推进C9芳烃脱除。优先实施参数精细化与在线监控，快速降低C9穿透与能耗，同步开展吸附剂与再生优化，延长运行周期并抑制解吸剂污染；在扩能或深度节能阶段择机推进前端预处理与后端净化能量重构，实现全装置成本与现金流的协同改善。在未来，可结合装置边界条件，评估引入轻解吸剂型吸附剂与甲苯解吸剂的工艺方案，以进一步降低系统能耗并适度放宽上游C9+切割要求；同步前瞻布局C9+选择性加氢脱烷基/脱甲基等路线，将重芳烃转化为BTX或高附加值多甲基芳烃，并与烷基转移等单元进行联合优化，构建更具韧性的芳烃资源利用体系。

参考文献：

- [1] 李世伟. 对二甲苯吸附分离装置更换RAX-4000吸附剂后的运行分析及优化[J]. 石油炼制与化工, 2024, 55(12): 46-52.
- [2] 周彬. 对二甲苯装置实现芳烃资源最大化利用的改造策略[J]. 石油炼制与化工, 2023, 54(11): 29-33.
- [3] 郑晨, 吴智睿, 姜晓花, 等. 对二甲苯装置吸附分离系统脱除C9芳烃研究[J]. 油气与新能源, 2023, 35(04): 82-86.
- [4] 胡珺, 厉勇, 陈建兵, 等. 二甲苯装置能效提升优化措施及效果[J]. 石油炼制与化工, 2022, 53(02): 23-29.
- [5] 蒋飘逸. 对二甲苯分离装置的在线拉曼分析关键技术研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [6] 陈建兵, 胡珺, 厉勇. 对二甲苯装置中C9+芳烃分布及对能耗影响的模拟分析[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(8): 87-92.
- [7] 杨卫胜, 贺黎明. 芳烃联合装置吸附分离单元节能降耗技术途径分析[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(10): 100-105.
- [8] 夏浩, 杨明磊, 王振雷. 基于数据驱动的对二甲苯吸附分离过程操作优化[J]. 化工学报, 2019, 70(11): 4309-4318.

作者简介：

胡哲兴(1992-), 男, 汉族, 陕西宝鸡人, 本科, 研究方向: 二甲苯精馏分离, 二甲苯异构化反应, 芳烃吸附分离技术。