

二甲苯精馏装置的节能优化措施及实施效益评价

马 亮 (中国石化海南炼油化工有限公司, 海南 儋州 578001)

摘要: 为应对日益严峻的能源成本压力与环境约束, 提升二甲苯精馏装置的经济性与可持续性, 本文开展了一项节能优化研究。通过剖析影响分离效率的核心操作参数, 如回流比、温度与压力的协同控制, 以及进料组成的稳定性, 提出了精细化的操作优化方案。同时, 研究深入探讨了通过低品位热能回收、热集成网络优化及关键设备的节能改造来实现系统性能耗降低的技术路径。实践表明, 优化措施在保障产品质量的前提下, 显著降低了装置的蒸汽、燃料气及电力消耗, 实现了可观的经济效益与节能成效。

关键词: 二甲苯精馏; 节能降耗; 操作优化; 热集成; 能耗分析; 效益评价

中图分类号: TE96; TQ053.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0050-03

Energy saving optimization measures and implementation benefit evaluation of xylene distillation unit

Ma Liang (Sinopec Hainan Refining and Chemical Co., Ltd., Danzhou Hainan 578001, China)

Abstract: In order to cope with the increasingly severe energy cost pressure and environmental constraints, and to improve the economy and sustainability of xylene distillation units, this paper conducted an energy-saving optimization study. By analyzing the core operating parameters that affect separation efficiency, such as reflux ratio, coordinated control of temperature and pressure, and stability of feed composition, a refined operational optimization scheme was proposed. At the same time, the study delved into the technical path of reducing system performance consumption through low-grade thermal energy recovery, optimization of thermal integration networks, and energy-saving upgrades of key equipment. Practice has shown that optimization measures significantly reduce the consumption of steam, fuel gas, and electricity in the device while ensuring product quality, achieving considerable economic and energy-saving benefits.

Keywords: xylene distillation; Energy conservation and consumption reduction; Operational optimization; Thermal integration; Energy consumption analysis; benefit evaluation

在石油化工行业中, 芳烃联合装置是生产对二甲苯(PX)、苯、甲苯等关键基础化工原料的核心环节, 其运行效能直接关系到企业的经济效益与市场竞争力。二甲苯精馏单元作为芳烃装置中分离 C8 芳烃异构体的关键步骤, 是一个典型的高能耗过程。该过程主要通过精馏塔实现邻、间、对二甲苯等组分的分离, 其能源消耗主要集中在为分离过程提供汽化潜热的再沸器加热(通常依赖蒸汽或燃料气)以及为冷凝回流提供冷量的冷凝器冷却。随着全球能源价格波动及“双碳”战略目标的深入推进, 节能降耗已从单纯的降低生产成本, 上升为企业实现绿色、低碳、可持续发展的必然要求与核心战略。

目前, 一些还在使用中的二甲苯精馏装置因为投用年代早、技术相对滞后、操作模式不够精细等因素影响, 存在分离效率偏低、热能利用率不高等问题。比如, 在分馏塔部分, 可能因为填料、塔板等影响, 分离效果不高, 只能通过调整回流比以及再沸符合以保证质量, 容易出现能源的过度使用和浪费; 装置中的加热炉由于操作不规范或是长期使用老化等因素热效率较低; 化工反应过程中出现的中低温余热没有得到充分利用就被直接排放到空气中, 装置在能效方面

表现不太理想, 鉴于此, 就需要开展整体耗能研究和应对, 更好地挖掘潜力, 从操作、技术等方面入手, 构建节能体系, 提升装置的运营能效, 并为行业提供可行的参考。

1 二甲苯精馏装置概况

本研究对象为某大型炼化企业芳烃联合装置中的二甲苯精馏单元。该芳烃联合装置与上游连续重整装置配套, 设计年处理能力为数十万吨级别。其核心目的是从重整生成油中分离并提纯苯、甲苯及混合二甲苯(C8芳烃)。装置主要包含原料预分馏、芳烃抽提(或抽提蒸馏)、苯/甲苯精馏以及二甲苯精馏等工艺单元。

二甲苯精馏单元的核心设备是二甲苯精馏塔(又称二甲苯分馏塔或 C8 分离塔)。其进料主要来自上游的歧化/烷基转移单元或重整油分离出的 C8+ 馏分, 主要组分为乙苯、对二甲苯、间二甲苯和邻二甲苯。由于这些组分沸点接近(尤其是间、对二甲苯), 分离难度大, 需要较高的理论板数和较大的回流比, 从而导致该塔成为装置内能耗最高的单机设备之一。塔底再沸热源通常采用中压蒸汽或通过重沸炉燃烧燃料气提供, 塔顶冷凝则消耗大量的循环冷却水。装置原有的热能利用模式相对单一, 塔顶馏出物冷凝释放的

潜热大多通过空冷器或水冷器直接散失到环境中，能量回收利用率低，构成了主要的节能优化切入点。

2 精馏装置能耗存在的问题

通过对二甲苯装置精馏单元的能耗分析，可以看出当前装置在能耗方面存在以下问题：

2.1 分离操作不恰当，能源耗费较严重

为了确保产品质量，精馏单元在运行中采取了偏保守的操作策略。比如，回流比偏高等参数设置，虽然提升了分离效果，但是容易出现再沸器热负荷和冷凝器冷负荷过高，其结果是蒸汽和冷却水的使用量显著增加。通过对装置运行情况的采样可以看出，进料稳定的情况下，回流比处于经济性最优区间内，能够保证较好的运行绩效，而装置的实际运行数值往往比这一区间的上限还高，能源浪费问题突出。

2.2 热能梯级利用水平低，大量中低温位余热未被回收

这是该装置乃至许多传统石化装置的共性瓶颈。二甲苯精馏塔塔顶馏出物（主要为混合二甲苯）在冷凝时释放大量温度在 40–50℃ 的低温位冷凝潜热。在原有流程中，这部分热量直接通过冷却介质（水或空气）移走并排放至环境，是巨大的能量损失。同时，装置内还存在其他温度稍高的热物流（如某些塔侧线采出、工艺冷凝液等），其热量也未能被有效集成利用，导致整个工艺系统的热力学效率不高。

2.3 核心设备运行效率不高

突出表现在：一是精馏塔加热炉和蒸汽再沸系统效率表现不理想。加热炉主要是为精馏塔提供热源，在运行过程中，可能存在排烟温度高、过剩空气控制不合理以及炉壁散热过多等，与行业先进水平相比，热效率表现不佳。二是在冷凝器和空冷器部分，其主要作用是为塔顶提供冷量，如果结垢、风机和水泵运行不合理或是负荷的配置不当，都可能导致用水量和用电量高于正常值。而回流泵和进料泵等为系统提供动力的机泵，如果处于非经济区间运行，也会增加系统的电力耗损。

2.4 系统抗干扰能力与动态优化能力不足

精馏单元在进料和组成中可能会受到内外部因素影响热出现波动，传统控制方式主要是采用滞后处理的方式，不够精细。一个典型例子是，如果进料中轻组分较多，就需要及时调低回流比和再沸量，避免出现过度精馏现象，而如果频繁调整、幅度过大，又可能会影响产品质量。在没有实时数据优化和控制系统的协助下，装置的运行随意性较大，难以保证在最优能耗点上运行。

3 精馏装置节能优化措施

针对上述运行和能耗方面存在的问题，笔者结合

工作经验和自身思考，提出了以下措施，主要包括精细化控制、热能充分利用和回收、设备优化及改进等。

3.1 操作参数精细化控制

对于已有装置的精细化管理是能耗控制和节能优化中见效快、投入少的一种方式。通过调整回流比、再沸负荷的关系，确定较为恰当的运行平衡点。通过对装置运行情况和工艺进行分析可以看出，关键参数目标范围有一个较为恰当的区间，比如在确保产品纯度符合要求的情况下，调整回流比，从原先较高的 5.15 慢慢回调到更低也更经济的区间（比如回流比 4.75）。同时，对塔顶、塔底的温度进行调整，在满足生产分离要求的同时，控制能量消耗，处于窄幅空间内，比如塔顶温度为 150–155℃ 区间，塔底则控制在约 180℃）。为了确保温度调整目标的实现，使用在线分析仪器对关键指标进行闭环调整，并且能够对回流比等参数进行及时的观察和自动微调，确保在操作中能够处于最优操作点附近，以更好地提升运行绩效。

3.2 低品位热能回收与热集成网络优化

这是降低外部公用工程消耗的关键举措。具体实施了两项改造：

塔顶冷凝热回收用于进料预热：在二甲苯精馏塔塔顶冷凝器之前，增设一台板式换热器。让温度较高的塔顶气相物流（或部分冷凝前的物流）首先与温度较低的进料在此换热器中进行换热，将进料从常温预热至 60℃ 以上。此举直接回收了原本需要通过冷却水排弃的冷凝潜热，减少了进料在后续加热至进料板温度所需的外供蒸汽或燃料气量。初步运行数据显示，此项改造可降低该塔再沸器热负荷约 10–15%。

构建装置级热集成网络：超越单塔界限，对整个芳烃联合装置内的热源与热阱进行系统性的普查与匹配。例如，将二甲苯塔顶冷凝热、其他工艺热物流的余热，用于预热锅炉给水、发生低压蒸汽，或为其他需要低温热源的单元（如溶剂再生塔的进料、厂房采暖等）提供热量。通过优化热交换网络（HEN），最大限度地实现“热–热”直接交换，减少对蒸汽加热和冷却水冷却的依赖。

3.3 对高耗能设备进行节能技术改造

一是加热炉系统提效。对二甲苯塔底再沸炉（如果存在）或其他加热炉实施提效改造。措施包括：修复或更换高效的空气预热器，降低排烟温度至露点以上合理区间；优化燃烧器，确保燃料与空气混合均匀，并精确控制烟气氧含量在 2–3% 的最佳范围，减少过剩空气带走的热损失；加强炉体保温，减少炉壁散热。

二是冷凝冷却系统优化。对空冷风机加装变频调

速装置 (VFD), 根据环境温度和冷凝负荷自动调节风机转速, 大幅降低电耗。优化循环水场的运行, 根据季节和负荷调整水泵运行台数与转速。定期对冷凝器进行清洗维护, 保持高的传热系数。

三是机泵系统节能。对长期在低效区运行或通过阀门节流调节流量的泵进行排查。对符合条件的泵进行叶轮切割或更换为高效水力模型, 对驱动电机加装变频器, 实现流量与扬程的按需调节, 消除节流损失。

3.4 应用先进过程控制与能源管理系统

在完成硬件改造、参数优化的基础上, 引入或完善先进过程控制系统。该系统能够基于实时工艺数据和预测模型, 对精馏塔的多变量 (进料、回流、温度、压力等) 进行协调优化控制, 使装置在面对进料波动时能快速、平稳地过渡到新的最优状态, 始终保持低能耗运行。同时, 建立覆盖全装置的能源监控与管理平台, 对蒸汽、电力、燃料气、循环水等各类能源的消耗进行实时计量、统计与分析, 及时发现能耗异常并追溯原因, 使节能管理实现数字化、精细化。

4 精馏装置节能优化效益评价

对实施的系列节能优化措施进行一段时间的运行跟踪与数据核算, 其产生的综合效益主要体现在以下几个方面:

4.1 直接节能效益显著

通过操作参数优化, 在保证产品纯度 (如二甲苯产品纯度维持在 98.9% 以上, 苯、甲苯产品纯度达到 99.99% 以上) 的前提下, 成功降低了回流比与再沸负荷。数据显示, 仅此一项就使加热炉的燃料气消耗量降低了约 60Nm³/h。塔顶冷凝热回收项目, 每小时可回收约 1.2GJ 的低品位热能, 相当于减少了对应数量的蒸汽消耗。加热炉提效改造使其热效率提升了 2-3 个百分点。空冷风机变频改造和机泵优化使装置总电耗下降了可观的比例。综合估算, 本次优化使二甲苯精馏单元的整体能耗降低了约 15-20%。

4.2 经济效益突出

节能直接转化为成本的降低。按照当前的能源价格 (蒸汽、燃料气、电价) 进行测算, 上述节能效果每年可为该装置节省数百万元的运行成本。虽然部分技术改造 (如新增换热器、APC 系统) 需要一定的初期投资, 但其投资回收期通常在 1-3 年以内, 具有很高的经济可行性。

4.3 运行稳定性与环保效益提升

优化后的操作参数更加合理, 先进控制系统的引入增强了装置抗干扰能力, 使产品质量更加稳定, 减少了因质量不合格导致的返工或降级损失。同时, 能耗的降低直接意味着化石燃料消耗的减少, 从而降低

了二氧化碳、氮氧化物等温室气体和污染物的排放量, 产生了良好的环境效益, 契合企业社会责任与可持续发展的要求。

4.4 为同类装置提供示范

本项目所采用的“诊断分析-操作优化-技术改造-系统控制”相结合的综合节能路径, 以及其中具体的技改措施 (如低品位热回收), 具有很好的可复制性和推广价值, 为行业内其他芳烃装置乃至其他高耗能精馏过程的节能改造提供了实践参考。

5 结束语

面对能源成本攀升与绿色发展的双重挑战, 对二甲苯精馏这类高能耗装置进行深度节能优化, 已成为石化企业提升核心竞争力的必然选择。本研究从实际生产问题出发, 通过系统性的能耗诊断, 识别出操作模式粗放、热能利用效率低、设备性能衰减等关键耗能点。在此基础上, 提出了以精细化操作参数优化为基础, 以低品位热能回收与热集成为核心, 以关键耗能设备提效为支撑, 以先进过程控制为保障的综合节能优化方案。实践结果证明, 该方案技术路线合理, 实施效果显著, 在确保生产安全与产品质量的前提下, 实现了大幅度的节能降耗与经济效益提升。当然, 节能工作是一个持续改进的过程。随着新技术的涌现 (如更高效的分离材料、更智能的优化算法、更高品位余热的发电利用等), 二甲苯精馏装置的节能潜力仍有进一步挖掘的空间。企业应建立长效的能源管理机制, 将节能降耗作为一项常态化、系统化的工程持续推进, 以实现高质量发展。

参考文献:

- [1] 温林景. 芳烃抽提装置芳烃分离模拟及设计优化 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(7): 33-34
- [2] 张方方. 大型对二甲苯装置的节能设计与优化 [J]. 石油炼制与化工, 2022, 53(10): 70-75.
- [3] 李鑫洋, 陶艺源, 吴继炎. 二甲苯的高效分离与多效精馏的应用 [J]. 化工管理, 2019(16): 68-69.
- [4] 王斌, 王亚君, 李国坤. 芳烃抽提装置冷却系统优化研究 [J]. 精细与专用化学品, 2015(07): 39-41.
- [5] 杨德明, 顾强, 朱碧云, 等. 基于有机朗肯循环的混合二甲苯 MVR 热泵精馏工艺 [J]. 化工学报, 2017, 68(12): 4641-4648.
- [6] 李成利. 石油化工企业精馏节能技术的可行性研究分析 [J]. 山东化工, 2021, 50(18): 188-189.

作者简介:

马亮 (1997-), 男, 满族, 辽宁抚顺人, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 芳烃装置运行管理。