

# 苯乙烯生产装置的能效分析与综合成本控制策略

陈豪聪 (中国石化海南炼油化工有限公司, 海南 洋浦 578001)

**摘要:** 对现阶段石化工业发展情况进行分析可得, 苯乙烯属于一类基础性的有机化工原料, 其生产过程的能效水平可对装置运行所具备的可持续发展能力带来直接影响。本文对目前苯乙烯生产装置运行当中存在的能效问题展开研究, 提供构建科学的成本控制策略来对装置运行情形进行改良, 协助苯乙烯生产向着更为完善的方向发展。此项工作不但可提升生产装置的运行效率, 更可为同类芳烃衍生物生产系统的节能降耗与精益化管理提供理论支持与实践参考。

**关键词:** 苯乙烯; 生产装置; 能效分析; 成本控制

**中图分类号:** TQ241.21; F407.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5167 (2026) 009-0061-03

## Energy Efficiency Analysis and Comprehensive Cost Control Strategies for Styrene Production Units

Chen Haocong (China Petrochemical Hainan Refining & Chemical Co., Ltd., Yangpu Hainan 578001, China)

**Abstract:** Analysis of the current development of the petrochemical industry shows that styrene is a fundamental organic chemical raw material, and the energy efficiency level of its production process can directly impact the sustainable development capability of the unit operation. This paper investigates the energy efficiency issues currently present in styrene production units, providing scientific cost control strategies to improve unit operation conditions and assist styrene production in developing towards a more refined direction. This work not only enhances the operational efficiency of production units but also offers theoretical support and practical references for energy conservation, consumption reduction, and lean management in similar aromatic derivative production systems.

**Keywords:** styrene; production unit; energy efficiency analysis; cost control

苯乙烯的工业生产主要依赖乙苯催化脱氢工艺, 该过程具有高温吸热、反应转化率受限以及副产物复杂等典型特征, 导致整个装置对能量输入的依赖程度极高。尤其在反应器供热、蒸汽系统配置与真空维持等环节消耗大量高品质热能与动力能源。相关工作者可通过深入剖析苯乙烯装置的能量流动规律, 识别各单元过程之间的热力耦合关系来做好能效提升工作, 结合成本控制来协助相关企业做好装置整体运行水平改进工作, 增强企业抗风险能力以推动行业绿色转型。

### 1 苯乙烯生产装置的能效分析

#### 1.1 苯乙烯生产装置简介

苯乙烯的生产流程分为脱氢和精馏两个工艺阶段, 而脱氢工艺又分为乙苯蒸发、脱氢反应、工艺凝液处理及汽提尾气压缩吸收这几个工段, 技术人员可优先选择设计规模在每年 25 万 t 至 65 万 t 之间的装置, 满足下游聚苯乙烯、ABS 树脂、丁苯橡胶等聚合材料生产的原料需求, 装置运行周期普遍设定为连续运行 8000h 以上, 期间通过优化操作参数与强化设备管理维持稳定产出。原料乙苯的纯度要求不低于 99.8%, 水分含量严格控制在 50ppm 以下以避免催化剂中毒与副反应加剧的问题, 而进料系统则应配备高精度质量流量计与自动调节阀组, 做好进料速率精确控制的基

础上将波动范围维持在  $\pm 1.5\%$  以内, 保障反应体系的热力学与动力学平衡。反应系统采用多段固定床绝热反应器配置, 内部催化剂床层依据动力学曲线进行分段装填与温度梯度设计, 利用此类方式确保脱氢反应可在热力学不利条件下保持高效推进状态, 配合在反应器入口设置高精度预热装置来帮助进料物料达到相对适宜的反应温度。反应过程中还需通过外部烟气加热与内部热量自平衡机制维持反应体系的稳定运行状态, 而反应产物经急冷处理后随之进入分离单元, 由此规避高温停留所引起的目标产物损耗问题。

分离精制系统由一系列功能明确的蒸馏塔构成, 各塔依据组分相对挥发度差异进行逐级分离, 塔内采用高效传质结构以增强气液接触效率, 塔顶冷凝与塔底再沸系统在运行当中可利用热量耦合来达成装置内能量循环。精馏工作则强调严格控制回流比与操作压力条件, 保障各馏分纯度达到聚合级标准从而为后续产出打下相应基础。能量集成系统贯穿整个装置运行过程, 通过系统化热网络设计做好高温热源向低温用能单元的有效传递, 而夹点技术在前期使用当中可协助全厂热交换网络达到理论最小能耗水平。高温烟气、反应产物与塔顶蒸汽等余热资源经过收集可用于预热原料、产生蒸汽或驱动工艺泵机当中, 通过构建多层

次的能量回馈机制来做好资源再利用工作<sup>[1]</sup>。

## 1.2 苯乙烯耗能装置分布及影响因素分析

苯乙烯生产装置的能耗分布主要集中在反应转化、分离精制、能量回收及公用工程四大关键环节。其中反应单元属于工艺链的核心耗能区，其能量需求主要体现在维持高温反应环境所需的外部供热以及催化剂活性保持过程中的热补偿。脱氢反应本身属于强吸热过程，需要从外界持续输入热能来实现稳定生产，而反应器外部加热系统依赖燃料燃烧或电加热装置提供热源，烟气余热虽经初步回收但仍存在较大焓损失。反应进料预热温度在前期设定方面会直接对后续反应段的热负荷分配情况带来影响，若进料温度偏低则会使得反应器入口区域热需求急剧上升，最终增加燃料消耗总量。催化剂在活性衰减当中为维持转化率需逐步提高反应温度，此时便会出现单位产品能耗量逐步递增的情况，若采用低压控制方案提高平衡转化效率，则需配置大功率压缩机来维持系统负压，同样会导致耗电量上升<sup>[2]</sup>。

分离精制系统属于能耗量占比较高的单元，其能量消耗主要集中在多塔精馏流程中的再沸器热负荷与塔顶冷凝器冷量消耗当中。而精馏塔的理论级数与回流比可对苯乙烯生产过程的热力学效率带来直接影响，若回流比过高则会直接增加塔底再沸器的蒸汽消耗量，在这一过程中提升塔顶冷凝器的冷却负荷。塔间热集成程度则可对系统现有的能效水平带来一定影响，未实施热量耦合的塔系存在高温位热源与低温位热阱无法匹配的问题使得生产当中需要相关工作者有针对性地增加外部能源补充量。

能量回收系统的运行效率则可对全厂综合能耗指标带来影响，其中高温烟气、反应产物、塔顶蒸汽等载热介质的热量捕获能力，在一定程度上取决于换热设备的传热系数及污垢控制水平，若出现传热面结焦或积灰等现象将大幅度降低换热效率进而引起余热资源流失等问题。换热网络的拓扑结构设计则可决定当前热能传递路径的合理性，若存在布局不合理的问题则会引起热量短路或传热温差过大并增加能耗总量。

在另一方面，对设备进行维护保养同样属于影响能耗的主要因素，堆砌进行定期检查与维护则可第一时间发现并推进故障修复处理，尽可能规避因设备性能下滑而引起的设备故障与能耗增加。其中相对具有代表性的便是换热器在清洗以及防腐处理当中可有效恢复传热效率，通过减少能量损失来做好能效管控。相关工作者还要对设备运行状态予以多方监测，配合故障预警系统来识别其中潜在的各类问题，尽可能规避故障现象并确保装置得以保持稳定运行状态<sup>[3]</sup>。

## 2 苯乙烯装置的综合成本控制策略

### 2.1 对蒸汽管网进行优化

由于苯乙烯生产过程中，每天的用汽气量和产汽量不平衡，而且蒸汽管道分布在各个车间，又由高压、中压、低压之分，因此蒸汽管网在实际管理当中存在有管理难度较大且流程繁琐的问题。技术人员在推进蒸汽管网优化工作时，首先需基于全厂热力平衡模型进行系统重构，依据不同工艺单元对蒸汽参数的需求差异构建高压、中压、低压三级蒸汽供应体系，其中高压蒸汽压力维持在4.0MPa，主要用于反应器外部供热与高温再沸器驱动，中压蒸汽压力控制在1.6MPa左右从而满足精馏塔再沸及中间加热任务的运作需求，低压蒸汽压力管控在0.4MPa这一范围当中，通过做好保温伴热以及低温预热负荷处理来规避高品位蒸汽降压所引起热损失现象。

管网布局的优化工作在推进当中需要遵循最短路径原则与阻力最小化准则，通过减少弯头、变径与阀门数量来降低沿程压降以及局部压力，确保蒸汽在前期输送当中保持相对稳定的压力状态，做到压降控制目标低于0.02MPa/100m，维持末端用汽设备的正常操作条件从而规避由压力波动所引起的调节失稳与能耗上升。

管道材质在选择方面需要兼顾耐高温、抗腐蚀与导热性能，选择优质碳钢或合金钢管材并结合气凝胶毡等高效复合型保温材料，将管道表面散热损失控制在50W/(m<sup>2</sup>·h)，通过充分抑制传输过程中存在的显热散失问题来延长蒸汽有效作用距离，在这一过程中提高热能的整体传达效率。而保温层厚度设计方面要求依据环境温度与经济性分析确定，通常在50~150mm这一范围当中选取最优值，在这一过程中兼顾初始投资与长期节能回报<sup>[4]</sup>。

对冷凝水进行回收则是蒸汽管网优化的关键环节，其回收率直接影响锅炉补水温度与燃料消耗水平，技术人员在前期工作当中可通过设置密闭式冷凝水回收装置，配合高温疏水阀与闪蒸罐组来将冷凝水回收率提升到92%。此时所回收的冷凝水温度通常维持在90℃以上，可直接回用于除氧器或锅炉给水系统以减少新水加热所需热量，降低燃料消耗约8%~12%，同时减少水处理化学品用量与排污热损失。闪蒸产生的低压蒸汽可并入0.4MPa管网，将其用于辅助加热以及驱动小型蒸汽透平当中做到能量的二次利用，在这一过程中提高系统的整体散热效率。而疏水阀选型与分布则要结合用汽设备特性予以配置，尽可能规避蒸汽泄露以及冷凝水积存的基础上，减少无效蒸汽排放造成的资源浪费。

蒸汽管网在具体优化当中可利用夹点分析技术构建全局热交换网络,将高温工艺流股热量用于产生蒸汽或预热锅炉给水,以此来做到热能的跨单元循环利用并减少外部燃料的输入总量。此时苯乙烯装置的蒸汽系统综合能耗可下降15%以上,年节约燃料成本可达数百万元,配合降低碳排放强度来提高苯乙烯生产装置所具备的可持续发展能力。

## 2.2 对苯乙烯的生产工艺进行优化

在乙苯脱氢反应中,水蒸气的压力、反应温度、水与乙苯的质量比等对乙苯的转化效果和苯乙烯的选择性影响较大。而乙苯催化脱氢反应为强吸热可逆反应,反应温度通常控制在580℃~630℃这一区间,反应压力维持在约0.06MPa的负压状态,通过引入过热蒸汽作为稀释剂降低乙苯分压,推动化学平衡向产物方向移动,过热蒸汽与乙苯的质量比控制在1.5~2.2之间,因此需通过动态调节实现稀释比的最优匹配,避免因蒸汽过量而引起能源浪费以及操作成本上升等问题。

由于反应器设计方案与催化剂选型情况可直接影响反应效率,由此需要相关工作者采用多段绝热固定床反应器配合外部供热系统,做好温度梯度管控的基础上减少因局部过热所引起的副反应。催化剂活性组分以铁系氧化物为主,辅以钾、铈等助催化剂提升选择性与抗积碳能力,此类催化剂的使用寿命可达个月以上,期间乙苯单程转化率维持在65%~72%,苯乙烯选择性不低于93%,技术人员可利用定期评估在线监测催化剂活性衰减速率等方式来减少非计划停车频次,在这一过程中充分提高装置的运行周期及产能利用效率。

分离精制流程在优化方面强调采用多塔串联精馏工艺实现苯、甲苯、乙苯与苯乙烯的逐级分离,而各塔操作压力与温度需根据组分相对挥发度精确设定,脱非芳塔顶温度控制在80℃~90℃,乙苯塔釜温度维持在160℃~170℃,配合将操作压力设定在0.02MPa以防止高温聚合。精馏塔回流比可对能耗数值变动带来直接影响,乙苯塔回流比需要控制在3~3.8,苯乙烯塔控制在5.5~6.2,通过热集成技术将高温塔顶蒸汽用于低温塔再沸形成热量耦合网络,使全系统蒸汽消耗减少22%以上,冷却水用量下降15%。通过上述工艺优化措施的集成实施,苯乙烯装置单位产品综合能耗可下降16%~20%,年节约成本可达千万元级别,配合同步提升产品产出效率与装置运行可行性来强化市场竞争能力<sup>[5]</sup>。

## 2.3 优化精馏塔生产工艺

精馏塔操作压力设定情况可对塔釜温度与热分解

风险带来直接影响,其中苯乙烯精馏塔采用减压操作以降低聚合倾向,操作压力控制在0.025MPa,对应塔釜温度则需控制在110℃左右,避免苯乙烯在高温环境下发生热聚合反应,此时可配合将聚合物生成速率降低至2.8kg/h以下降低非计划停车频次与清焦作业的人工与材料支出,同时减少因聚合物沉积导致的传热效率下降与压降上升问题。真空系统采用三级蒸汽喷射器与液环真空泵组合配置,驱动蒸汽消耗量控制在1.75t/h以内,通过优化喷嘴喉径与冷凝器换热面积俩提升抽气效率,年节约蒸汽成本可达数百万元。塔顶冷凝器选用高效螺旋缠绕管式结构,传热系数达到880W/(m<sup>2</sup>·K),冷却水进出口温差控制在9℃,减少循环水量与泵送电力消耗进而将冷却水系统年节电效益提升到60万kW·h以上。

多塔系统可采取深度热集成方案,利用夹点分析构建塔顶蒸汽与塔釜再沸的热量耦合网络,将乙苯塔顶87℃的饱和蒸汽用于苯塔再沸,减少外部蒸汽输入量从而将蒸汽消耗由3.6t/t苯乙烯降至2.65t/t苯乙烯,降幅达26.4%,冷却水用量下降18%,热回收率提升至77.5%以降低公用工程支出。塔内件采用高性能规整填料,比表面积达到520m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>,压降控制在0.28kPa/m以下,使分离效率提升16%的同时减少塔高与钢材用量,在这一过程做到设备投资成本降低约12%。

## 3 结语

综上所述,在对苯乙烯生产装置的能效分析与综合成本控制策略进行研究时,需要技术人员对主要能耗区域进行综合分析,结合生产装置运行情况分别提出生产管理措施,通过优化蒸汽管网、优化苯乙烯的生产工艺以及优化精馏塔的生产过程来做好生产成本的有效管控。

### 参考文献:

- [1] 杜佳楠,杨克,崔永刚,等.GS-DS催化剂在乙苯脱氢生产苯乙烯装置上的工业应用[J].化学反应工程与工艺,2025,41(04):534-540.
- [2] 周坤,傅吉品.浅谈苯乙烯生产装置事故处置[J].化工安全与环境,2022,35(48):16-18.
- [3] 蒋翠萍,李成益.苯乙烯生产工艺及技术经济分析[J].石油化工技术与经济,2020,36(02):16-19+30.
- [4] 徐彬.乙苯苯乙烯装置生产过程优化和先进控制系统应用[J].化工管理,2020(10):204-206.
- [5] 董新军,任振亭.苯乙烯生产中存在的问题及解决措施[J].化工设计通讯,2020,46(02):172-173.

### 作者简介:

陈豪聪(1995-),男,广东茂名,本科,助理工程师,从事石油化工工作。