

石油化工装置工艺设计优化与工程应用研究

陈子航

新地能源工程技术有限公司石家庄能源化工技术分公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]石油化工行业作为国民经济的基础性产业对产品的质量、效益、安全环保水平有着重要的影响。当前我国石化装置存在着流程复杂繁琐、能耗过大以及安全隐患较大的情况, 十分迫切需要进行整体性的工艺设计改造的研究。基于工艺设计的原则, 在此基础上对装置运行过程中出现的一些典型问题进行整理总结, 针对工艺流程设计、节能降耗、自动化程度以及工艺安全等问题进行了深入探究分析, 并提出了以总体方案、工艺路线选择、热能利用方式、安全控制系统为一体的系统优化方法并结合工程实例进行检验比较。研究发现运用多种手段综合起来的整体式优化能大幅度地提高装置运行质量及安全性。

[关键词]石油化工; 工艺设计优化; 节能降耗

DOI: 10.33142/sca.v9i5.19735

中图分类号: TE832.3

文献标识码: A

Research on Process Design Optimization and Engineering Application of Petrochemical Equipment

CHEN Zihang

Shijiazhuang Energy Chemical Technology Branch of Xindi Energy Engineering Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: As a fundamental industry of the national economy, the petrochemical industry has a significant impact on the quality, efficiency, safety, and environmental protection level of products. At present, there is an urgent need for research on the overall process design and renovation of petrochemical plants in China, which have complex and cumbersome processes, excessive energy consumption, and significant safety hazards. Based on the principles of process design, some typical problems that arise during the operation of the device were summarized and organized. In depth exploration and analysis were conducted on issues such as process flow design, energy conservation and consumption reduction, automation level, and process safety. A system optimization method was proposed, which integrates overall scheme, process route selection, thermal energy utilization mode, and safety control system, and was tested and compared with engineering examples. Research has found that comprehensive optimization using multiple methods can significantly improve the quality and safety of device operation.

Keywords: petrochemical industry; process design optimization; energy conservation and consumption reduction

引言

石油化工装置工艺设计改进是增强企业发展优势以及推动“绿色低碳”可持续发展的重要方式。过程建模和过程优化是石油化学加工过程领域内两个紧密相关的前沿研究方向。在全球经济一体化的过程中, 为了更快地发展起来, 石化产业必须掌握一些新技术, 而且对其生产工艺的要求也越来越严苛了, 而目前在现代化的石化产业中所运用到的各种综合自动化技术包括先进的控制、软测量、过程优化等都是建立在模型基础上的过程, 其中过程优化就属于当前及以后很长一段时期内过程工业的主要发展方向。但是我国的一些化工装置的设计还存在着一些问题: 流程设计缺乏完整性造成大量能量浪费; 安全防护体系不

够健全等。信息化自动化程度还有待提高。本文建立了包含理论研究、现状剖析、技术创新、实施方案、项目实践的研究体系, 希望通过全面的研究来给石化化工装置提档升级提供整体性的方案。

1 石油化工装置工艺设计理论基础

石油化工装置工艺设计的理论基础是整个装置长期设计、优化的基础理论, 而石油化工装置以原油或者馏分做为原材料, 经过物理分割和化学反应得到各种燃料和化工产品, 典型的装置有常减压蒸馏、催化裂化、重整、加氢等, 每个装置都由反应系统、分馏系统、回收热量系统以及辅助系统组成, 物料及热量在各个单元进行耦合传输。工艺设计须严格遵守安全第一, 经济、环保、灵活、拓展

五个原则。过程建模及过程最优化是石油炼制过程学科研究中的两个重要而又相互关联的问题,在现代石化工业中综合自动化技术中的先进控制、软测量、过程最优化都是建立在模型之上。重要的工艺变量有反应温度、压力、留置时间、空速等反应因素,还有回流比、板层数等精馏因素,参数优化就是在产物产率最大,能耗最低,操作安全范围之内找到最佳组合。催化裂化反应体积膨胀原理和气固相反应流体结构的复杂性决定了油剂均匀接触程度、反应器轴向温差是否符合标准,是最终影响产品选择性的关键。能量守恒依赖于热力学第一定律,质量守恒满足物质质量平衡,而夹点技术和热力图可以有效分析换热网络的能量匹配情况。本征安全性设计采用较低危害性的原料,缩减储存量,精简加工工艺,从根本上避免危险源,危险和可操作性分析系统找出工艺失误及其结果,保护层分析明确独立保护层的安全需求量。这些都是石油化工装置工艺设计优化的基本理论依据。

2 石油化工装置工艺设计现状与问题分析

目前我国石化装置工艺设计中存在的主要问题是:(1)流程繁琐,工序串接过多造成总的能耗升高、可靠性降低、加热炉供热负荷不够、对水分升高的原料不能有效地提供足够的热源,热量不稳定直接影响反应不均匀。(2)高低温能级的浪费严重,高温能量直接冷凝、低温能量得不到回收的现象普遍存在。(3)设计余量不合理过大造成低负荷下无效运转,过小成为制约产能的因素。就设备的实际运行而言,初期装置单台日产量最小仅 79t,远远小于后续设备,差距明显体现了设计方面的缺陷。换热器结垢造成传热效果差、压缩机喘振、加热炉炉管结焦、塔器液泛等现象属于典型的故障形式,出现的原因大多是由于设计中对于所用原料的适应性和负荷变化等问题考虑不足。而 RTC 技术在采用掺入了 50%劣质重油作为原料的情况下使得乙烯及丙烯的产量分别提高了 0.5%以上以及 2%以上,可见工艺的设计也应当充分考虑到原料劣化的走向。现有的装置设计较为陈旧,存在着流程复杂繁琐、设备老化严重、控制响应慢等缺点,进行改造势在必行。

3 石油化工装置工艺设计优化关键技术

3.1 工艺流程优化技术

工艺流程改造是围绕着反应深度及产品质量分布进行调整,在此基础上结合反应器结构革新以及流程再造进行突破。新开发的高效快速流化床反应器具有准全密相、准均匀速度、准均匀温度特性,很好地解决了催化剂活性低下的缺点,油剂混合不均匀的问题、径向温差大的难题等;流程重新设计技术为:反应-蒸馏一体化改进,去除

中间储罐区采用热进料,塔间热联运等。新型快反流化床反应器从气体分布板与内件的设计入手明显提升气固两相接触效率。与传统的湍动床相比活性提升 30%以上,径向温度波动范围小于 5℃左右,很好地抑制了过度生成的副产物产生。反应-再生系统呈同轴式排布,大大减少了催化剂输送耗能,通过工艺流程再造,反应物可以直接进入到分馏塔中进行热切割,省略了中间冷却及再加热过程,使得整个装置的综合能耗降低了 8%~12%,塔际热整合技术把高压塔顶蒸汽用来作为低压塔再沸器热源,做到能量多次使用。同时反应深度及分馏切割位置协调优化可以通过流程模拟软件进行多个方案的选择比较,在不动设备的情况下发现装置潜力。

3.2 节能降耗优化技术

表 1 典型节能降耗技术对比

技术类别	适用场景	节能原理	预期节能率 (%)
夹点技术	换热网络	优化换热匹配,最小化公用工程	10~20
低温热回收	全厂	回收 60-100℃低品位余热	5~15
热泵技术	精馏、蒸发	提升余热品位替代蒸汽	15~30
变频调速	机泵、风机	降低非满载工况损耗	20~40
五塔四效精馏	甲醇精馏	能量梯级利用,塔间相互搅拌提供热量	25~35

利用超大温差型溴化锂吸收式冷热水机,回收 60~100℃工业低品质余热来生产冷热水,余热利用温差高达 40℃,回收热量达到双效机组的两倍。高效的尿素合成工艺采用了二段法技术,蒸汽使用量可以下降到 650kg/t 以下,节能降耗技术往往是在项目实施当中以多种方法叠加的形式存在的。夹点技术先是对整个过程的换热网络进行热回收潜力评估,得到了最小换热面积及公用系统目标,然后在温度小于 120℃的低温热流股上优先采取溴化锂机组来满足夏季制冷、冬季采暖的要求,全年的平均能效提高 15%以上。对需外供热量的精馏塔,利用热泵技术把塔顶低品位蒸汽加热到再沸器所需要的温度代替高品位蒸汽,变频调速适合负荷变化大的泵类设备,在负荷小于等于 80%额定值时省电效果更为显著,五塔四效分馏采用塔顶和塔釜热联合使蒸汽消耗降低到了传统方法的一半以下。以上新技术应结合实际生产情况有选择性地推广使用,重点是优先建设投资回收期在三年之内的项目。

3.3 自动化控制系统优化

自动化自动最优化从低到高等级有三层:最低等级是分散控制系统自动最优化,通过对参数整定使关键参数变化幅度减小 50%以上;较高等级是对于多变量相关联系

统进行预测建模,每5~10min给出控制调整量;最高等级基于严格的机理模型,每1~2h重新求出全厂的最优运行工况点,把目标函数下发给高级次控制执行。实时最优化系统包括原油系统、换热网络、各塔单元,平均优化时间2h,可在线不改造设备的情况下使工厂自动驾驶在最优工艺路径上。近红外在线监测代替人工采样,在线输出各种关键参数如馏程、密度等,大大减少了被控对象的惯性延迟,原理模型的准确性达到97%,但要及时优化必须依赖高质量的数据,所以在进行在线优化之前要先进行标定及数据预处理。

3.4 工艺安全优化设计

炼油装置工艺安全管理着重于应急切断、设备安全保障、高压窜低压防范、化学物质聚合风险以及安全排放等问题。智能化报警系统通过对报警阈值的合理配置以及对真假报警的有效甄别,可使每小时平均报警量减少60%以上;而盲板智能化管理系统给每个盲板配发电子身份证,做到一块一牌一票一识。安全巡查+远程监控+视频监控+安全督查四位一体的方式进行全时空监管,3046台高清摄像机进行云上鹰眼24h不间断监视施工现场情况。

3.5 环保与绿色工艺优化技术

多元互补清洁能源系统以光热+空压+低氮燃烧+电加热的方式,在保证安全的前提下优先采用光热为热源,太阳能集热器将太阳能转化成热能储存在蓄能罐内,一次加热耗电量由320kWh降低到30kWh。全重力平衡油气水处理工艺达到完全密闭无废气排出的效果。硫铁矿制酸同步应用有机废水硫酸资源化技术,对废酸进行综合利用。

3.6 数字化与智能化设计技术应用

石化行业首个全自主可控DCS系统的627个硬件设备及其配套软件全部完成升级工作,在此过程中解决了硬件适配、数据迁移等一系列重要问题,在DCS操作仿真训练中培养出新系统的操作肌肉记忆;利用数字孪生技术创建虚拟装置,对各种方案进行模拟,做出最优参数的操作决定;即时优化系统把运算的结果定时传送给APC去执行,使设施能够实时自动调节。

4 石油化工装置工艺设计优化实施方案

4.1 工艺优化设计总体思路

总的思路是系统诊查、本源改进、分段应用、智慧监管。一是在整个过程中,进行能量以及物料的平衡计算,找出堵点、损失点,二是针对反应源头对重要参数进行优化,三是通过对于换热网络做夹点处理,实现能量的分等级使用,四是配置智慧监控系统。优化内容包括能效、产能、安全保障、环境保护等多方面的指标。

4.2 工艺流程优化方案设计

方案设计有以下工作内容:反应-分馏系统的集成优化,调节反应深度与分馏切割协调变量;精馏系统的排列重组,分析热耦合精馏及隔板塔的应用价值;整合热进出过程,降低热冷循环次数。方案拟定必须有流程模拟下各种工况下的验证过程。具体做法是反应-分馏系统集成优化,先通过反应温度、剂油比等方式来调控产品分布状况,在此基础上对分馏塔侧线采出方案做出相应调整,使得汽油、柴油馏程达标的情况下尽量提高目标产品的产率;精馏系统排列重组要对相邻塔系统采用完全热耦合还是隔板塔的方案进行评价,对组分较为明确的三元混合物来说,采用隔板塔要比传统的双塔流程节能25%~35%左右。热进出料阶段主要检查中间储罐区,将高温产品直接输送到后工序装置,防止在冷却暂存后再加热输送造成的能量损失,过程模拟验证必须包括正常操作状态,最大和最小两种极值工况,以保证优化措施有操作灵活性,综合以上所提出的措施,整体实施下来可以达到装置总能耗节约8%~12%的目标。

4.3 热能综合利用优化方案

利用溴化锂机组的工业余热回收技术可以做到低温余热夏天制冷,冬天供热。换热网络设计对冷热质流股进行了重新分配及增大了换热面吸收排烟余热。径向透平有机朗肯循环发电机组使用低温有机工质将80~250℃低品质热变成电能。蒸汽动力系统实行梯次开发回收凝结水等。

4.4 安全风险控制方案

工艺安全管理主要侧重于工艺纪律、报警管理、联锁管理、盲板管理等方面。方案有:危险与可操作性分析及保护层分析;安全完整性等级划分与安全仪表设置;报警系统优化;盲板作业信息化管理;变更管理制度化,对典型装置要采取一装置一策的防控措施,在此过程中,危险与可操作性分析发现工艺差错及可能产生的后果以及各独立保护层的失效频率,保护层分析对各个保护层风险降低的要求进行量化,安全完整性等级评估确定安全仪表功能等级,并设置相应的检测、逻辑、执行元件,报警系统合理剔除不必要的报警点,调整报警阈值,使操作工每小时接收报警数目维持在一定水平。盲板工作电子化做到从申请到验收的全过程闭环式管理。变更管理制度规定一切参数变动必须经过风险分析并审核批准。对加氢、催化裂化典型装置制定不同的防控策略。

5 石油化工装置工艺设计优化工程应用分析

5.1 工程应用总体框架

工程项目按照诊断-设计-实施-验证四个步骤流程。诊

断阶段通过对现场实测以及过往的历史数据分析来获得基准数据;设计阶段制定出改进方案并进行仿真实验验证;实施阶段逐步对装置进行更新换代由易到难;验证阶段采用标定的方式来进行考核评价。安庆石油化工 65 万吨/年催化裂解装置经过改造以后,在掺入 50%劣质重油原料的情况下,丙烯收率提升了 18%,焦炭产率降低了 0.5%。

5.2 工艺优化实施效果分析

实施成效主要从四个方面评价:能效方面表现为单位产品综合能耗的变化量;收率方面表现为目标产物的选择性的变化量;经济效益方面表现为每吨原料加工效益的变化量;安全环保方面表现为报警次数减少/降低、非计划停工次数减少/降低、达标排放浓度提高等。扬子石化 3 号常减压装置 RTO 装置投用后每年效益增加了 1800 万元左右。数字化系统投入使用后,控制准确、设备运行可靠、信息实时更新,整个控制系统按照预期进行工作。

6 结语

石油化工装置工艺设计优化是一个系统的工程项目,必须依赖理论知识、核心技术以及解决方案与工程实施紧密结合在一起才能完成。文章首先从理论上建立了工艺设计的基本体系结构,然后在技术上对流程优化、节工省料、

自动化、安全防护、环境保护、数字化等方面进行梳理总结,最后提出了一种整体性的解决方案并通过工程实践进行了印证。结果表明:以严格的机理模型为基础进行实时优化是进行装置智能化控制的重要手段,多种能源利用相结合及能量回收技术对于节能减碳有着巨大的潜力,本质的安全性设计以及智能监测措施极大地提高了装置的安全系数;今后的发展中,绿色环保、智能化和新型材料的研发是工艺设计改进的方向,在此过程中理论和技术的研究要同步进行。

[参考文献]

- [1]蒋自强,杨勇,姚昭旭,等.第一代抚顺式干馏装置运行中存在的问题及优化升级技术研究[J].化学工程与装备,2025(7):85-88.
- [2]刘中勋,秦朝晖,康承琳,等.SKI-320 脱乙基型 C8 芳烃异构化催化剂的工业应用[J].石油化工,2024,53(5):713-717.
- [3]李子月,宋宪胤,张健.化工设计中工艺流程优化的策略与实践[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(8):178-180.

作者简介:陈子航(1998—),男,汉族,河北省定州市人,助理工程师,燕山大学毕业,现就职于新地能源工程技术有限公司石家庄能源化工技术分公司,从事工艺设计工作。