

# 催化汽油加氢装置能效优化

黄炎彬<sup>1,2</sup>, 李士雨<sup>1\*</sup>, 杨慧<sup>3</sup>

(1. 天津大学化工学院, 天津 300350; 2. 中国石油广东石化公司, 广东 揭阳 515200;  
3. 云南大学, 云南 昆明 650000)

**摘要:**采用 Aspen Energy Analyzer 对某石化公司 170 万 t/a 催化汽油加氢装置进行换热网络分析, 运用夹点技术对装置换热网络进行节能潜力分析, 明确了该装置公用工程消耗的运行值及目标值, 通过分析找出换热网络不合理的换热匹配, 针对装置现行换热网络存在的热量回收不完全、公用工程节能效果较差的问题, 提出了一套换热网络优化方案。优化后的换热网络节约冷公用工程 6 860 kW、热公用工程 6 860 kW, 优化后冷公用工程消耗降低 15.92%、热公用工程消耗降低 20.41%。

**关键词:**汽油加氢; 夹点技术; 换热网络; 优化; 公用工程

**中图分类号:**TE624

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2022)10-0213-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.10.041

## Optimization of energy efficiency of catalytic gasoline hydrogenation unit

HUANG Yan-bin<sup>1,2</sup>, LI Shi-yu<sup>1\*</sup>, YANG Hui<sup>3</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. PetroChina Guangdong Petrochemical Company, Jieyang 515200, China; 3. Yunnan University, Kunming 650000, China)

**Abstract:** Aspen Energy Analyzer software is used to analyze the heat exchange network of 1.7 million tons/year catalytic gasoline hydrogenation unit. Pinch point technology is utilized to analyze the energy saving potential of heat exchange network of the unit, therefore the operating value and target value of the consumption of public works of the unit are determined. Through analysis, the unreasonable heat exchange network matching is found out. In the light of the problems existed in the current heat exchange network of the unit, such as incomplete heat recovery and poor energy saving effect of utilities, a set of heat exchange network optimization scheme is proposed. The optimized heat exchange network saves 6,860 kW of cold utility and 6,860 kW of hot utility. After the optimization, the consumption of cold and hot utilities drops by 15.92% and 20.41%, respectively.

**Key words:** gasoline hydrogenation; pinch point technology; heat exchange network; optimization; utility

某石化催化汽油加氢装置采用 PHG 催化汽油选择性加氢脱硫技术, 以催化汽油为原料, 对催化汽油进行深度加氢脱硫, 工艺路线为: 全馏分催化汽油预加氢-分馏(轻、重汽油分离)-重汽油加氢脱硫-加氢后处理, 主要目标是以最小的辛烷值损失实现催化汽油的脱硫, 汽油产品满足调合生产国 VI 排放标准车用汽油的需要<sup>[1]</sup>。作为新兴清洁汽油生产技术<sup>[2]</sup>, 目前对催化汽油加氢装置热集成研究内容较少, 存在较大能量回收空间, 可通过换热网络分析从而进行能效优化, 进而提高经济效益。

能效优化方法主要有人工智能法、数学规划法以及夹点技术法<sup>[3]</sup>。自 Linnhoff 等<sup>[4]</sup>提出了夹点技术(pinch technology)以来, 夹点技术便以简便直观得到广泛的应用, 使用夹点技术分析网络能够较好地确定系统的用能“瓶颈”, 从而有效指导优化换热网络配置<sup>[5]</sup>。

本文中以某石化催化汽油加氢装置生产数据为

基础, 采用 Aspen Energy Analyzer V11 软件对装置进行换热网络分析, 运用夹点技术对该流程进行换热网络优化, 提出一套能够降低装置能耗的优化方案, 可为催化汽油加氢装置换热网络优化提供参考依据。

## 1 装置简介

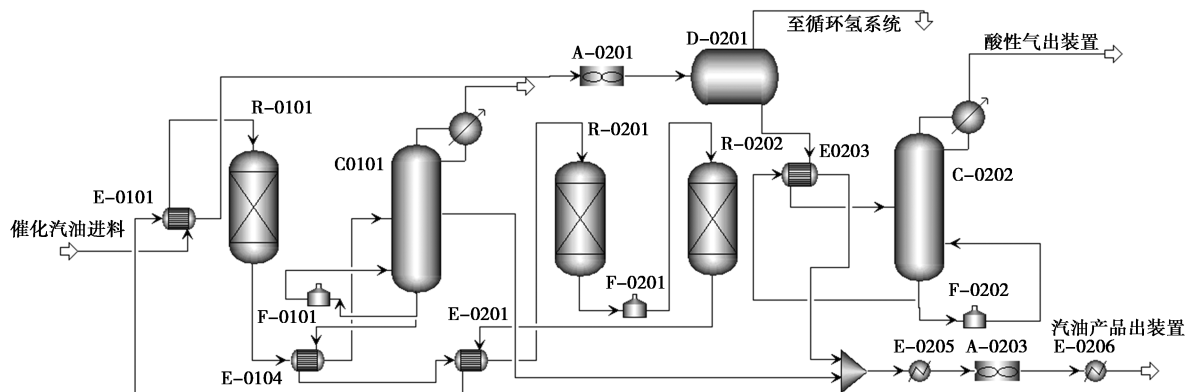
以某石化 170 万 t/a 催化汽油加氢装置为背景展开研究。某石化催化汽油加氢装置是以催化裂化装置稳定汽油作为原料, 与氢气混合后, 经过预加氢反应器(R-0101)将稳定汽油中二烯烃转化为烯烃, 并将稳定汽油中小分子硫醇和硫化物转化为大分子硫醇和硫化物; 预加氢后进入分馏塔(C-0101)内进行轻、重汽油分离, 将硫含量满足控制要求的轻汽油从分馏塔上端抽出, 分馏塔底抽出的重汽油先后进入加氢脱硫反应器(R-0201)、加氢后处理反应器(R-0202)脱硫脱氮反应; 反应后的重汽油

收稿日期: 2021-11-01; 修回日期: 2022-08-05

作者简介: 黄炎彬(1991-), 男, 硕士生, 工程师, 806416523@qq.com; 李士雨(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为化工系统工程, 通讯联系人, shyli@tju.edu.cn。

在稳定塔 (C-0202) 内分离酸性气后与轻汽油混合作为精制汽油产品出装置, 产品满足调合生产国 VI 排放标准车用汽油的需要, 汽油产品要求硫

含量不大于 10 μg/g, 硫醇硫含量小于 10 μg/g。催化汽油加氢装置流程简图 (循环氢系统未列入) 如图 1 所示。



E-0101—原料油/加氢脱硫反应产物换热器; R-0101—预加氢反应器; E-0104—分馏塔进料/塔底油换热器; C-0101—分馏塔; F-0101—分馏塔底重沸炉; E-0201—加氢脱硫进料/反应产物换热器; R-0201—加氢脱硫反应器; F-0201—加氢脱硫反应产物加热炉; R-0202—加氢后处理反应器; A-0201—加氢脱硫反应产物空冷器; E-0203—稳定塔进料/塔底油换热器; C-0202—稳定塔; F-0202—稳定塔重沸炉

图 1 催化汽油加氢装置流程简图

## 2 换热网络夹点分析

### 2.1 物流数据

通过对催化汽油加氢装置正常运行换热网络位的分析, 提取装置流股数据, 如表 1 所示, 系统共有 6 股热物流数据和 7 股冷物流数据, 本文中装置热物流编号 H1~H6, 装置冷物流编号 C1~C7。热公用工程为加热炉使用的燃料气, 燃料气由全厂燃料气管网供给, 燃料气进装置后经燃料气分液罐、过滤器和阻火器送至分馏塔底重沸炉 (F-0101)、加氢脱硫反应加热炉 (F-0201)、稳定塔底重沸炉 (F-0202) 作为燃料气燃烧使用; 冷公用工程为循环冷却水、热媒水、空气。公用工程参数见表 2。

表 1 工艺物流数据

编号	进口温度/°C	出口温度/°C	热负荷/kW	物流描述
H1	290	50	37980	加氢后处理反应器出口至分离罐
H2	213	115	9190	稳定塔底重汽油与进料换热
H3	208	126	7880	分馏塔底产品
H4	122	50	18550	分馏塔顶冷却
H5	119	40	9800	汽油产品出装置
H6	113	50	1730	稳定塔顶冷却
C1	243	280	4560	加氢脱硫反应产物加热炉
C2	213	231	6860	稳定塔底重沸炉
C3	208	225	22190	分馏塔底重沸炉

C4	109	215	19980	重汽油混氢进加氢脱硫反应器
C5	50	160	9190	稳定塔进料
C6	97	150	7880	预加氢反应器至分馏塔
C7	50	90	4980	催化汽油原料进料至预加氢反应器

表 2 公用工程参数

公用工程	进口温度/°C	出口温度/°C
空气	30	35
循环水	33	43
热媒水	70	95
燃料气	40	—

### 2.2 最小传热温差

催化汽油加氢装置换热网络优化分析需要确定最小传热温差 ( $\Delta T_{min}$ ),  $\Delta T_{min}$  是指换热设备冷热物流在逆流的情况下热端与冷端之间的最小温度差值, 该数值反映了换热设备投资与装置能耗之间的权衡关系<sup>[6]</sup>。  $\Delta T_{min}$  越大, 装置热回收量越小, 同时能量的费用减少, 相对的整体换热网络各个换热设备传热温差均相应增大, 换热设备换热面积减少, 设备投资费用减少。  $\Delta T_{min}$  确定后便可以计算出装置换热网络的最小能耗目标。

在不断地探索实践与科学研究中, 对于典型炼油装置已探索出换热系统各个传热类型经验取值范围, 如常减压装置、重整装置、加氢装置、催化裂化装

置、气分装置、延迟焦化装置等,适用的最小传热温差经验值和所选值如表 3<sup>[6]</sup>。综合考虑经验取值、设备投资费用及操作费用等因素,催化汽油加氢装置最小换热温差  $\Delta T_{\min}$  确定为 20℃。

表 3 炼油装置换热设备最小传热温差经验值和所选值

传热类型	$\Delta T_{\min}$ 经验值/℃	$\Delta T_{\min}$ 所选值/℃
工艺物流+空气	15~25	15
工艺物流+空气	10~20	10
工艺物流+空气	10~20	10
工艺物流+空气	20~40	20

### 2.3 夹点分析

利用 Aspen Energy Analyzer 对催化汽油加氢装置流股数据进行换热网络能量利用分析,最小换热温差  $\Delta T_{\min}$  确定为 20℃ 的情况下,根据模拟计算可得平均夹点温度为 203℃,热组合曲线夹点位置在 213℃,冷组合曲线夹点位置在 193℃,该换热网络所需最小冷公用工程用量为 35 060 kW,最小热公用工程用量 25 570 kW。如图 2 组合曲线所示,图中夹点之下冷热流股的焓差代表最小冷公用工程的用量,夹点之上冷热流股焓差代表最小热公用工程的用量<sup>[5]</sup>。现行换热网络冷公用工程用量为 43 100 kW,热公用工程用量 33 610 kW,与模拟计算的最小公用工程量对比,冷公用工程节能潜力为 18.65%,热公用工程 23.92%,现行换热网络系统存在较大的优化空间,如表 4 所示。

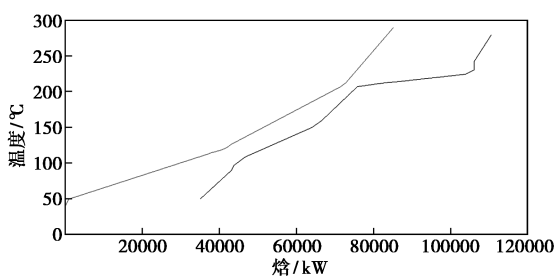


图 2 催化汽油加氢装置换热网络组合曲线

表 4 现行公共工程热负荷与最小公用工程对比

公用工程	现行热负荷/kW	最小值/kW	节能潜力/%
冷	43100	35060	18.65
热	33610	25570	23.92

### 2.4 现有换热网络不合理的换热匹配

现行换热网络级联图如图 3 所示,分析催化汽油加氢装置现行换热网络满足夹点技术的设计原

则:①不要通过夹点传递热量;②夹点以上不要使用冷公用工程;③夹点以下不要使用热公用工程<sup>[7]</sup>。但催化汽油加氢装置现行换热网络仍存在下述问题。

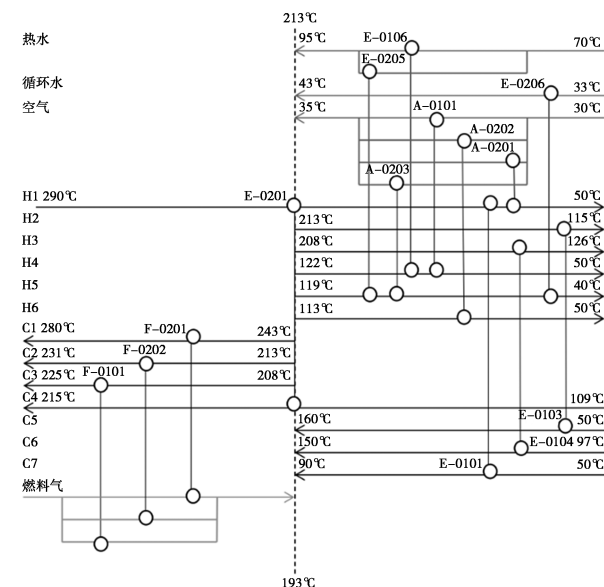


图 3 催化汽油加氢装置换热网络级联图

(1) 高温位热量回收不完全。热流股 H1 的第三段(132.3~50℃)温位较高,热负荷为 13 020 kW,在现行工况中直接被冷公用工程的空冷器冷却,热量没有被合理利用。

(2) 分馏塔底重沸炉(F-0101)、加氢脱硫反应加热炉(F-0201)、稳定塔底重沸炉(F-0202)使用加热炉的加热形式,未充分利用工艺物流取热。

### 2.5 现有换热网络的能效优化方案

根据 Aspen Energy Analyzer 模拟换热网络分析,加氢后处理反应器出口至分离罐的工艺流股 H1 的热量未能够充分利用,冷公用工程热负荷消耗过大。在该装置生产运行中,装置能耗大部分为燃料气能耗,因此可以优化加热炉布置,减少燃料气消耗,有效提高装置能效。针对上述问题,对装置现有换热网络进行优化,所得最终换热网络优化方案如图 4,具体优化措施如下。

(1) 取消稳定塔塔底重沸炉(F-0202),由加氢后处理反应器出口至分离罐的工艺流股 H1 为稳定塔底 C2 流股提供热源,因此增加 H1 与 C2 工艺流股换热的换热器(E-0001),回收 H1 能量,且减少燃料气消耗。

(2) H1 回收热量的同时,将减少 H1 第三段冷公用工程热负荷,因此将减少加氢脱硫反应产物空冷器(A-0201)热负荷及规模。

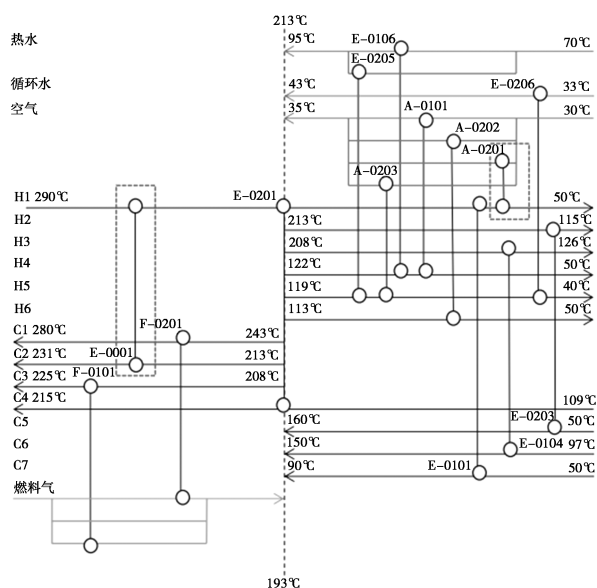


图 4 催化汽油加氢装置换热网络优化后级联图

优化后的换热网络如图 4 所示,与优化前换热网络相比,优化后换热设备减少了负荷为 6 860 kW 的加热炉,同时增加了 1 台同负荷的换热器,加氢脱硫反应产物空冷器规模减小,可相对减少设备投资;优化后的换热网络公用工程减少了稳定塔塔底重沸炉燃料气,减少了空冷器热负荷,因此节约冷公用工程 6 860 kW,热公用工程 6 860 kW,优化后冷公用工程消耗降低了 15.92%,热公用工程消耗降低了 20.41%,有效地降低了装置能耗,优化效果如表 5 所示。

表 5 换热网络优化效果表

公用工程	现行用量/ kW	优化量/ kW	优化后/ kW	节能效果/ %
冷	43100	6860	36240	15.92
热	33610	6860	26750	20.41

(上接第 212 页)

- [3] Abdul K Halil H P S, Chong E W N, Owolabi F A T, et al. Microbial-induced CaCO<sub>3</sub> filled seaweed-based film for green plasticulture application [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 150-163.
- [4] Kong H S, Kim B J, Kang K S. Synthesis of CaCO<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> composite using CO<sub>2</sub> for fire retardant [J]. *Materials Letters*, 2019, 238: 278-280.
- [5] 程国君, 陈晨, 李世迁, 等. CaCO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 纳米粒子的表面改性及其对天然胶乳膜抗紫外光老化性能的影响 [J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2019, 37(6): 12-21.
- [6] 刘润静, 邹海魁, 郭奋, 等. 核壳结构型纳米 CaCO<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O 复合粒子的制备 [J]. *材料研究学报*, 2001, 15(1): 61-64.
- [7] 王文. 碳酸钙型酸响应农药缓释体系的设计与研究 [D]. 武

### 3 结论

(1) 对某石化催化汽油加氢装置换热网络进行了系统的夹点分析, 分析结果表明, 装置现行换热网络具有较高的运行效率, 但仍存在一定的能量回收空间, 可通过换热网络分析从而进行能效优化。

(2) 针对装置现行换热网络存在的能量回收不完全、公用工程节能效果较差的问题, 提出了一套换热网络优化方案, 优化后的换热网络节约冷公用工程 6 860 kW, 热公用工程 6 860 kW, 优化后冷公用工程消耗降低了 15.92%, 热公用工程消耗降低了 20.41%。

(3) 换热网络优化方案的关键是取消塔底加热炉, 并通过增设换热器充分回收系统内部的高温热源的热量。既节省燃料气、空冷能耗, 又降低设备投资, 降低了改造成本, 同时也取得了较好的节能效果。

### 参考文献

- [1] 王宝成, 陶磊, 宋丽丽, 等. M-PHG 技术在国 VI 标准清洁汽油生产中的应用 [J]. *当代化工*, 2019, 48(11): 2694-2697.
- [2] 胡徐腾. 走向炼化技术前沿 [M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2010: 47-48.
- [3] 齐少宁, 李士雨, 李金来. 煤制甲醇气化与变换单元的能效优化 [J]. *计算机与应用化学*, 2014, 31(5): 601-604.
- [4] Linnhoff B, Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks [J]. *Chemical Engineering Science*, 1983, 38(5): 745-763.
- [5] 郭欣, 李士雨, 李金来. 低温甲醇洗装置低温段系统能效优化 [J]. *化学工程*, 2012, 40(10): 10-12, 24.
- [6] 尚建龙, 王婷, 沈琳, 等. 利用夹点技术优化催化裂化装置的换热网络 [J]. *石油炼制与化工*, 2015, 46(7): 89-94.
- [7] 肯普著, 项曙光, 贾小平, 等. 能量的有效利用—夹点分析与过程集成 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010. ■
- 汉: 华中农业大学, 2021.
- [8] 刘旭. 纳米 CaCO<sub>3</sub> 碳化法制备、表面改性及在水性乳液中的应用 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [9] Fatma A Morsy, Said M El-Sheikh, Ahmed Barhoum. Nano-silica and SiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> nanocomposite prepared from semi-burned rice straw ash as modified papermaking fillers [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, 12(7): 1186-1196.
- [10] 毛艳红. 氨基酸接枝和二氧化硅包覆纳米碳酸钙的合成研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [11] 法文君, 王威, 魏亚君, 等. 具有核壳结构的纳米 CaCO<sub>3</sub>@SiO<sub>2</sub> 的制备与表征 [J]. *化工新型材料*, 2012, 40(5): 71-73.
- [12] 陈西知, 陈雪梅, 吴秋芳. 纳米碳酸钙/二氧化硅复合粒子的制备及其在丁苯橡胶中的应用 [J]. *无机盐工业*, 2012, 44(4): 43-45. ■