

# 煤制烯烃企业全厂能量系统优化策略及应用

李初福<sup>1</sup>, 姚金松<sup>1</sup>, 巴黎明<sup>1</sup>, 郗丽娟<sup>1</sup>, 黄峰<sup>1</sup>, 张朝环<sup>1</sup>, 张峰<sup>1</sup>, 姜兴剑<sup>2</sup>

(1. 神华集团有限责任公司 北京低碳清洁能源研究所, 北京 102209;

2. 中国神华煤制油化工有限公司 包头煤化工分公司, 内蒙古 包头 014060)

**摘要:**为了实现煤制烯烃企业全厂能量系统优化,提出了煤制烯烃企业全厂能量系统基于单元、子系统和全局划分的渐进协同优化策略,包括全厂用能状况分析、工艺装置用能及换热网络优化、低品位热回收和优化利用、全厂蒸汽动力系统优化等步骤。应用上述优化策略,对某 60 万 t/a 煤制烯烃企业全厂能量系统优化进行研究,得到全厂各单元能耗分布,提出了甲醇合成和甲醇制烯烃单元换热网络优化、全厂蒸汽动力系统降低蒸汽减温减压量及低品位热合理匹配利用等节能方案,理论上可以提高全厂系统能效 3% 以上,年节约标煤 10 万 t 以上,投资回收期小于 1 a。

**关键词:**煤制烯烃;全厂能量系统;夹点分析;协同优化;节能减排

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)04-0128-05

## Strategy and its application for the overall energy system optimization of coal to olefin plant

Li Chufu<sup>1</sup>, Yao Jinsong<sup>1</sup>, Ba Liming<sup>1</sup>, Gao Lijuan<sup>1</sup>, Huang Feng<sup>1</sup>, Zhang Zhaohuan<sup>1</sup>, Zhang Feng<sup>1</sup>, Jiang Xingjian<sup>2</sup>

(1. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Shenhua Group Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. Baotou Coal Chemical Branch, China Shenhua Coal Chemical Co., Ltd., Baotou 014060, China)

**Abstract:** To optimize the overall energy system of coal to olefins plant, a progressive and collaborative strategy based on the unit, subsystem and global division is proposed for overall energy system optimization of coal to olefins plant. The whole plant energy consumption analysis, process equipment energy efficiency improvement, heat-exchanger network optimization, low grade heat recovery and utilization optimization and the whole plant steam and power system optimization were systematically studied. Based on the strategy, an overall energy system of a coal to olefins plant with 600 thousand tons olefin output per year was optimized. Energy consumption proportion for all processes was obtained, and some optimization schemes for saving energy were proposed. Accordingly, heat exchanger network of methanol synthesis and MTO units and steam decompression in the steam power system and rational utilization of low grade heat were thus optimized. Theoretically, it can improve the overall energy efficiency of more than 3%, save over 100 thousand ton standard coal, and achieve the investment recovery period of less than 1 year. The optimization strategy can provide reference for energy saving and emission reduction in the coal to olefin industry.

**Key words:** coal to olefin; overall energy system; pinch analysis; collaborative optimization; energy saving

## 0 引言

近年来,我国煤(甲醇)制烯烃产业快速发展,2015 年底达到 900 万 t/a,预计 2020 年将达到 2 860 万 t/a<sup>[1]</sup>。煤制烯烃是石油替代战略重要途径之

一,同时也是高耗能的产业,煤制烯烃能量转化效率约为 40%,吨烯烃能耗为 3.5~4.5 tce<sup>[2]</sup>。在低油价和环境保护的双重压力下,煤制烯烃企业迫切需要进行节能减排和提升技术竞争力。炼油企业和石化企业的研究和实践表明,进行全厂能量系统优化,

收稿日期:2016-10-08;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.021

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A202)

作者简介:李初福(1980—),男,广西桂林人,高级工程师,博士,从事化工过程系统工程方面的科研工作。E-mail:lichufu@nicenergy.com

引用格式:李初福,姚金松,巴黎明,等.煤制烯烃企业全厂能量系统优化策略及应用[J].洁净煤技术,2017,23(4):128-132.

Li Chufu, Yao Jinsong, Ba Liming, et al. Strategy and its application for the overall energy system optimization of coal to olefin plant[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 128-132.

是实现节能减排的有效途径之一。炼化企业的全厂能量优化利用包含3个层次:第1层次主要体现在局部的余热回收,管线保温,控制“跑、冒、滴、漏”等方面<sup>[3-4]</sup>;第2层次是考虑单个设备的节能和局部系统优化层次,主要体现在优化分馏塔操作,强化换热器传热,热量的局部集成,公用工程系统优化等方面<sup>[5-6]</sup>;第3层次是能量系统全局优化阶段,主要体现在工艺装置间、工艺装置与公用工程系统之间的能量集成方面,提出了炼化企业全局过程集成方法<sup>[7-9]</sup>和全厂用能优化策略<sup>[9-12]</sup>。

煤制烯烃是新兴产业,工艺流程长,生产装置多,全厂能量系统复杂。煤制烯烃企业节能优化研究主要集中在单元内部,如MTO(甲醇制烯烃)级甲醇精馏优化<sup>[13-14]</sup>、MTO产品气分离优化<sup>[15]</sup>、甲醇合成与MTO过程联合优化<sup>[16-17]</sup>等,而对全厂能量系统优化的研究还很少。本文根据系统工程方法论,借鉴炼化企业全厂能量系统优化的经验,结合煤制烯烃企业的生产工艺特点,对煤制烯烃全厂能量系统优化策略进行研究,可为煤制烯烃企业节能减排提供参考。

## 1 能量系统优化方法

能量系统是所有完成能量转换、利用和回收环节的系统集合,包括热回收换热网络子系统和蒸汽、动力、冷却、冷冻等公用工程子系统,担负着生产过程物流的加热和冷却、机泵动力供应、工艺和加热用蒸汽等任务,对装置生产特别是生产中的能源消耗起着十分重要的作用<sup>[3]</sup>。煤制烯烃能量系统与核心工艺过程的联系如图1所示。

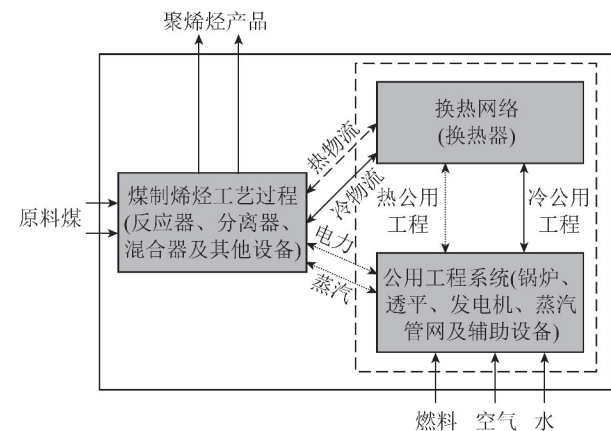


图1 能量系统与工艺系统的相互关系

Fig.1 Relationship between energy system and process system  
能量系统优化方法主要有夹点技术、基于数学

规划的方法和“三环节”能量综合优化方法,以及上述方法之间的集成应用,并从单工艺装置用能优化向全厂用能优化发展。其中,应用最为广泛的是夹点技术。

### 1.1 夹点技术

夹点技术是英国学者 Linnhoff<sup>[7]</sup>于20世纪70年代提出的换热网络优化设计方法。该技术是以热力学为基础,从宏观的角度分析过程系统中能量流沿温度的分布,从中发现系统用能的“瓶颈”所在。应用夹点技术可以方便地找出换热网络中不合理的用能设备,对优化换热网络提供指导,使能量达到最大回收。化工工艺过程中存在多股冷、热物流,冷、热物流间的换热量与公用工程耗量的关系可用温-焓( $T-H$ )图表示。夹点是冷流组合曲线与热流组合曲线间传热温差 $\Delta T$ 达到最小值的点,如图2所示,冷热复合线横坐标重叠部分为过程内部换热负荷(图中B部分),右边为公用工程加热负荷(图中A部分),左边为公用工程冷却负荷(图中C部分)。利用夹点技术对换热网络进行设计时,需遵循3个基本原则:①不应有跨越夹点的传热;②夹点之上不应设置任何公用工程冷却器;③夹点之下不应设置任何公用工程加热器。

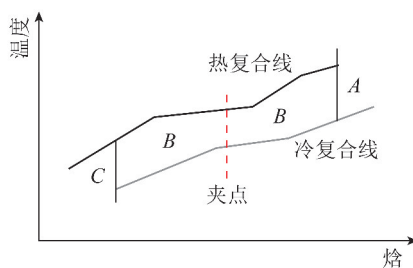


图2 冷热流复合曲线示意

Fig.2 Schematic diagram of cold and heat flux composite curve

### 1.2 全厂能量系统集成

全厂能量系统集成(total site integration, TSI)是夹点技术的拓展<sup>[4]</sup>,传统的夹点技术多用于研究单个过程的热量回收(局部),而TSI关注的是包含多个工艺过程和蒸汽动力系统的全局热量集成。全局过程包含多个工艺过程,由于各工艺过程的夹点位置一般不重合,因此,一个工艺过程的热源可以加热另一个工艺过程的热阱,这为不同工艺过程之间的能量集成提供了可能。为进行各工艺过程之间及其与公用工程的能量集成,可以将各工艺过程的冷、热物流数据分别汇总,绘制全局温焓曲线。

全局温焓曲线可以指出热源部分的剩余热量和热阱部分的需求热量,如果各过程之间允许直接进行换热,则全局热阱曲线和全局热源曲线通过横向平移可以找到新的夹点,从而减少冷、热公用工程耗量。若装置之间不允许直接换热,可考虑用热源部分产生高、中、低压(HP、MP、LP)蒸汽,而热阱部分采用相应蒸汽加热。此时,热量的传递是通过蒸汽管网实现的,因此,全局夹点不是全局冷、热温焓曲线相切的部位,而是位于公用工程之间不可能再产生重叠的部位。

## 2 煤制烯烃全厂能量系统优化策略

煤制烯烃企业能量系统是一个复杂的大系统,在现有的模拟计算方法以及硬件条件下,较难实现整体优化。根据系统工程方法论,通过借鉴炼化企业全厂能量系统优化方法,对煤制烯烃企业全厂能量系统优化,提出基于单元、子系统和全局划分的渐进协同优化策略(图3),包括全厂用能状况分析→工艺装置用能及换热网络优化→低品位热回收和优化利用→全厂蒸汽动力系统优化等步骤:

1)按照 GB 30180—2013《煤制烯烃单位产品能源消耗限额》和 GB T/2589—2008《综合能耗计算通则》要求,计算煤制烯烃全厂各单元能耗,分析各单元能耗分布,确定重点耗能单元。

2)针对重点耗能单元,应用过程模拟技术,对反应、分离等核心过程工艺改进和参数优化,进行工艺装置用能优化。

3)针对重点耗能单元,应用夹点分析技术,进行单元内部换热网络优化;应用热出料优化策略,进行不同单元之间能量利用优化。

4)对全厂的低品位热进行分析,按照“品位匹配、就近利用”的原则,结合全厂平面布置,进行综合回收利用。

5)应用全局夹点分析技术,对全厂蒸汽动力系统提出优化改造和运行策略,在全局范围内实现能量的综合优化利用。

## 3 案例研究

以某60万t/a煤制烯烃企业为例,应用全厂能量系统优化策略,进行全厂能量系统优化研究。

### 3.1 煤制烯烃各单元能耗分布

根据企业的生产统计数据,按照 GB 30180—2013《煤制烯烃单位产品能源消耗限额》和 GB T/

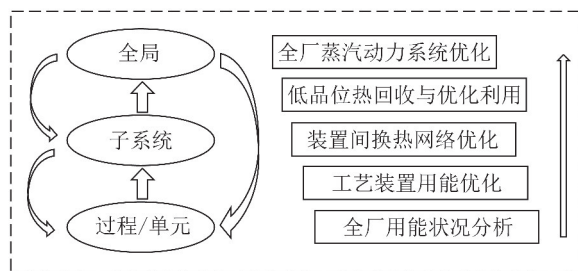


图3 煤制烯烃全厂能量系统渐进协同优化策略

Fig. 3 Progressive and collaborative optimization strategy for the whole plant energy system of coal to olefins

2589—2008《综合能耗计算通则》要求,对煤制烯烃过程主要单元能耗进行计算,得到主要单元的能耗分布(图4),为确定全厂能量优化利用方向提供指导。根据计算结果,煤气化单元能耗占比最大(约29%),其次是空分单元(约24%),然后是甲醇合成单元(约16%)、变换及净化单元(约11%)和MTO单元(约8%)。

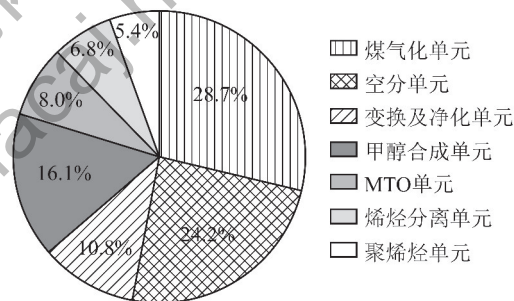


图4 煤制烯烃各单元能耗分布

Fig. 4 Energy consumption distribution of each unit of coal to olefins

### 3.2 装置间换热网络优化

根据单元能耗分布结果,结合各单元工艺特点,对重点耗能单元甲醇合成及MTO单元换热网络进行夹点分析,寻找能量利用不合理的环节。由于空分单元自身的特点,是要把空气通过深冷分离生成氧气和氮气,本来就是高能耗的过程;气化过程采用的是水煤浆气化工工艺,煤燃烧产生的热量一部分要加热气化水煤浆里含有的水分,对气化过程有效气的计量是通过水洗塔顶出来的气量计算,所以得出的结果能耗较高,另外气化炉的效率也会影响整个单元的能耗,这些由工艺特点以及技术限制造成的高能耗问题不在本文的论述范围内。

#### 1) 甲醇合成单元换热网络优化

根据甲醇合成单元实际生产运行情况,利用 Aspen Plus 软件建立甲醇合成过程模拟模型,对相



关参数进行校核。然后,在此基础上进行换热网络夹点分析,冷热流复合曲线如图5所示。结果显示,其温焓图呈现的是一阈值问题:需要热物流的热量远大于需要加热的冷物流的热量,从理论上分析,整个过程是不需要引入公用工程加热介质的。但是,实际生产过程中,甲醇合成单元仍消耗部分低压蒸汽用于预热合成气。根据夹点理论分析结果,提出利用部分甲醇合成反应尾气的来预热合成气,理论上可以节省低压蒸汽用量32 t/h左右,提高全厂系统能效0.8%左右,年节约成本约800万元,所需投资约100万元。

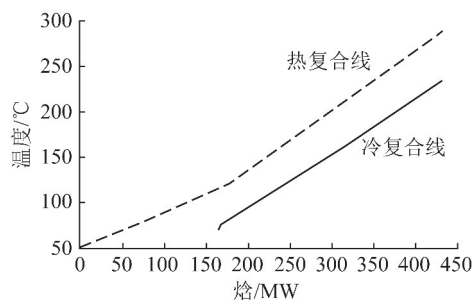


图5 甲醇合成单元冷热流复合曲线

Fig. 5 Composite curves for cold and hot flow of methanol synthesis unit

## 2) MTO单元换热网络优化

根据MTO单元实际生产运行情况,利用Aspen Plus软件建立MTO单元模拟模型,对相关参数进行校核。然后,在此基础上进行换热网络夹点分析,冷热流复合曲线如图6所示。结果显示,其温焓图呈现的也是阈值问题:需要热物流的热量远大于需要加热的冷物流的热量,从理论上分析,整个过程是不需要引入公用工程加热介质的。但是,实际生产过程中,MTO单元仍消耗部分低压蒸汽用于预热和汽化甲醇。根据夹点理论分析结果,提出通过强化汽提气与甲醇换热效果,充分利用汽提气热量,理论上可以节省低压蒸汽用量约56 t/h,提高全厂系统能效1.3%左右,年节约成本约1300万元,而所需要的投资改造费很少。

## 3.3 低品位热回收与优化利用

煤制烯烃主要低品位热包括甲醇合成反应尾气(约120℃)、MTO催化剂再生尾气(240℃)、MTO急冷水(约110℃)、凝结水(约110℃)和低压蒸汽等。由于低温热用户较少,这些低品位热要么通过空冷或循环水冷损失掉,要么直接放空,造成能量浪费。低品位热利用是煤制烯烃企业难点,可能的利

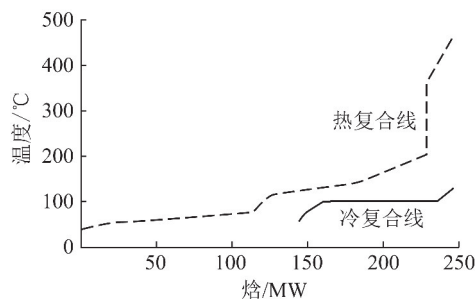


图6 MTO单元冷热流复合曲线

Fig. 6 Composite curves for cold and hot flow of MTO unit

用方向包括:用热水伴热代替蒸汽伴热、凝结水预热锅炉除盐水、低压蒸汽用于发电或供冷等。另一方面,需要对废气进行回收利用,减少排放到火炬系统废气量,减少能量损失,如气化废水闪蒸气回收利用、聚乙烯弛放乙烯回收等。低品位热回收及优化利用可以提高全厂系统能效1%~2%。

## 3.4 全厂蒸汽动力系统优化

根据实际生产运行情况,绘制全厂蒸汽系统平衡曲线如图7所示。结果显示,该系统存在大量(约200 t/h)高品位蒸汽(10 MPa)直接减温减压现象,造成能量损失。如果用背压透平代替减温减压,理论上可以联产电力约15 MW,提高全厂系统能效1.5%左右,年节约成本约5000万元,所需要投资约2000万元。

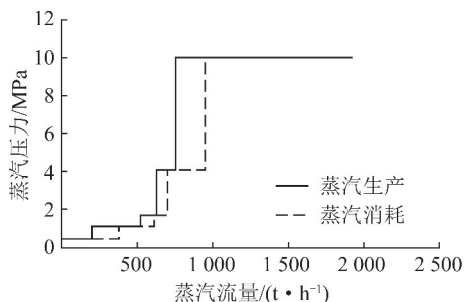


图7 全厂蒸汽系统平衡曲线

Fig. 7 Equilibrium curves of the whole steam system

## 4 结 论

1)提出了煤制烯烃企业全厂能量系统基于单元、子系统和全局划分的渐进协同优化策略,包括全厂用能状况分析→工艺装置用能及换热网络优化→低品位热回收和优化利用→全厂蒸汽动力系统优化等步骤。

2)对某60万t/a煤制烯烃企业全厂能量系统优化进行研究,得到煤制烯烃全厂单元能耗分布情况,其中煤气化单元能耗占比最大(约29%),其次是空

分单元(约24%),然后是甲醇合成单元(约16%)、变换及净化单元(约11%)和MTO单元(约8%)。

3)对某60万t/a煤制烯烃企业,提出了甲醇合成单元换热网络优化、甲醇制烯烃单元换热网络优化、全厂蒸汽动力系统降低蒸汽减温减压量及低品位热合理匹配利用等节能方案,理论上可以提高全厂系统能效3%以上,年节约标煤10万t以上,投资回收期小于1a,可以为煤制烯烃企业节能减排工作提供参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 亚化咨询. 2015 中国煤(甲醇)制烯烃年度回顾和展望[EB/OL]. (2015-11-19)[2017-04-21]. <http://www.ccen.net/news/detail-179692.html>.
- [2] 国家节能中心. 能效评价技术依据(一)[M]. 北京:中国发展出版社,2014.
- [3] 唐孟海,高国正. 炼油过程能量优化和低温余热回收利用[J]. 石油炼制与化工,2010,41(2):64-68.  
Tang Menghai, Gao Guozheng. Energy integration and utilization of low-level heat in petroleum processing[J]. Petroleum Processing and Petrochemical, 2010, 41(2): 64-68.
- [4] 杨又年. 炼油厂余热发电方案比较与效益分析[J]. 炼油技术与工程,2014,44(2):48-51.  
Yang Younian. Comparison and analysis of refinery cogeneration schemes and benefits[J]. Petroleum Refinery and Engineering, 2014, 44(2): 48-51.
- [5] 冯朝森,李振峰. 炼化企业蒸汽管网的整合及优化[J]. 中国石油和化工,2014(4):49-53.  
Feng Chaosen, Li Zhenfeng. The integration and optimization of refinery steam pipe network[J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2014(4): 49-53.
- [6] 黄雪琴,龚燕,朱宏武,等. 炼化企业蒸汽动力系统优化分析方法进展综述[J]. 节能,2010(5):6-10.  
Huang Xueqin, Gong Yan, Zhu Hongwu, et al. Progress review of refinery steam power system optimization and analysis method[J]. Energy Conservation, 2010(5): 6-10.
- [7] 魏志强,孙丽丽,袁忠勋,等. 炼油企业能量系统全局优化研究进展:中国石化节能减排技术交流大会论文集[C]. 深圳:中国石油学会,2012:852-859.
- [8] 华贲. 中国炼油企业节能降耗—从装置到全局能量系统优化[J]. 石油学报(石油加工),2009,25(4):463-471.  
Hua Ben. Energy conservation of China's refinery - from focus on units to total system[J]. ACTA Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2009, 25(4): 463-471.
- [9] 姚平经. 全过程系统能量优化综合[M]. 大连:大连理工大学出版社,1995.
- [10] 王北星,田涛,陈清林,等. 炼化企业全厂能量系统优化节能技术研究与应用实践[J]. 当代石油化工,2011(11):13-17.  
Wang Beixing, Tian Tao, Chen Qinglin, et al. The research on refining enterprise all-factory energy system optimization energy-saving technology and its application practice[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2011(11): 13-17.
- [11] 张冰剑,陈清林,刘家海,等. 石化企业整厂用能优化策略及应用[J]. 计算机与应用化学,2009,26(4):399-402.  
Zhang Bingjian, Chen Qinglin, Liu Jiahai, et al. Total site optimization strategy of energy system and application for petrochemical Industry[J]. Computers and Applied Chemistry, 2009, 26(4): 399-402.
- [12] 尹兆林. 炼油企业全厂用能分析及节能优化[J]. 石油炼制与化工,2012,43(10):86-91.  
Yin Zhaolin. Energy consumption analysis and optimization of a refinery enterprise[J]. Petroleum Processing and Petrochemical, 2012, 43(10): 86-91.
- [13] 陈翠翠,付玉川,赵勇. 精甲醇及MTO级甲醇精馏工艺技术进展[J]. 煤化工,2012(3):31-33.  
Chen Cuicui, Fu Yuchuan, Zhao Yong. Technology progress methanol and MTO grade methanol distillation process[J]. Coal Chemical Industry, 2012(3): 31-33.
- [14] 闫红莲. MTO级甲醇单塔精馏工艺能耗分析[J]. 山东化工,2014,43(9):184-187.  
Yan Honglian. Analysis of MTO methanol single tower distillation process energy consumption[J]. Shandong Chemical Industry, 2014, 43(9): 184-187.
- [15] 孙高攀. 甲醇合成与甲醇制烯烃入料甲醇预热工艺流程的优化[J]. 神华科技,2014,12(2):91-92.  
Sun Gaopan. The optimization of the technology between the methanol synthesis and the preheating of the feeding methanol in MTO[J]. Shenhua Science and Technology, 2014, 12(2): 91-92.
- [16] 孙高攀,余建良,张朝格,等. 甲醇制烯烃工艺的优化设计[J]. 山东化工,2013,42(6):108-110.  
Sun Gaopan, Yu Jianliang, Zhang Chaoge, et al. The optimization design of the technology of MTO[J]. Shandong Chemical Industry, 2013, 42(6): 108-110.
- [17] 祝佳. MTO分离新工艺技术研究[J]. 广东化工,2011,38(11):222-225.  
Zhu Jia. Separation of MTO process technology[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(11): 222-225.