

炼油厂 能量系统优化技术 研究与应用

LIANYOUCHANG NENGLIANG XITONG YOUHUA
JISHU YANJIU YU YINGYONG

华 贲 主编



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

炼油厂能量系统优化技术 研究与应用

华 贵 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书汇集了作者及其学术团队多年来对工艺过程能量系统优化的研究开发思路,以及在炼油企业节能降耗实际工程项目中所取得的应用成果。具体包括如何从工程实践中凝练出技术进步所要求解决的理论研究课题,采用从热力学、烟经济学到过程系统工程和信息技术等多学科交叉集成的研究方法,通过集成建模、开发相应的软件,或凝练出系统的方法步骤,形成理论或技术、方法,再用回到实际工程项目中,反复提高的过程。尤其是比较详细地论述了作者独创的过程系统“三环节”能量流结构理论和综合优化的系统方法,值得一读。

本书可供企业管理、技术人员,设计单位的工艺设计和工厂设计师,大学和研究机构从事节能技术研究的工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

炼油厂能量系统优化技术研究与应用 / 华贲主编.
—北京:中国石化出版社,2008
ISBN 978-7-80229-751-7

I. 炼… II. 华… III. 炼油厂-节能-研究 IV. TE683

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 164518 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京密云红光制版公司排版

北京科信印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 31 印张 779 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

定价:68.00 元

序 言

本书作者华贵教授曾在中国石化洛阳炼油设计研究院(现洛阳石化工程公司)工作12年,他从1978年起开始从事炼油企业节能的工程研究开发工作,先后承担了常减压装置节能改造、炼厂能量核查和节能规划、新装置和炼厂的节能设计等工作。为了给石油系统节能技术培训班,厂长、总工程师节能班讲课和编写炼厂节能讲义,他又在节能的基础理论方面,进行了深入的探索,把热力学第二定律分析(“有效能分析”或“焓分析”)的理论结合到炼油节能技术中,并且提出了可应用于包括炼油工艺过程在内的各种工艺过程的“三环节”能量流结构模型和综合优化的思路。

1987年调到华南理工大学后,他充分利用了在大学里研究力量强,与国际学术界联系紧密等条件,进一步深入发展了“三环节理论”,更利用2000年主持国家973项目“高效节能的关键科学问题”的机会,结合过程系统工程、软件工程的研究进展,把系统节能的技术上升到复杂能量系统集成建模和优化的科学高度,并且结合工程实际问题,陆续开发出一些应用于工程实际的软件。

华贵教授的工作特点是坚持深入工程实践的第一线,研究、解决工程实践中的问题,不论在设计院还是在高校工作时都是如此。在华南理工大学的20年中他为企业做了七、八十项工程可行性研究、咨询、规划、设计等项目,每年到现场十几次。他带的几十个研究生的论文课题,基本上都是从工程实践中抽提出来,上升到理论上研究,获得的成果再运用到工程实践中检验、

修正、进一步改进。

他与中国炼油工业节能的事业贴得很紧，所以在中国开展炼油节能 30 年的各个历史阶段，他都能热心而中肯地指出问题，并且通过持续地研究开发和理论创新指导实际的典型工程项目，展示解决的途径。

这本书汇集了华贵教授多年来有关炼油节能的研究工作，从中反映出作者运用实践——理论——再实践的辩证方法，研究和实践炼油节能的成果。因为具备理论深度、创新性和密切结合实际，能够经受时间的考验。在当前我国能源形势严峻，炼油节能任务十分艰巨之时，本书的出版不仅会给从事炼油节能的同志提供许多技术方法和理论，而且会在如何运用理论，解决实际问题，提供有益的启示。

陈俊武

序 言

本书是华贵教授对我国炼油企业节能工作从理论到工程实践；从单元过程和设备到工艺装置、辅助系统、一直到全局；从设计、改造到运行、管理；从用能分析到系统综合优化的全面、具体，也是相当深入的工作成果的反映。对于当前我国炼油和石化企业进一步深入开展节能有重要的参考价值。

华贵教授是石化战线上的一名老战士，在炼油厂、设计院工作多年。20世纪80年代后期转到高等院校从事教学和科研工作，但却从未脱离炼油和石化节能工程实践的第一线。二十多年来为企业做了七、八十项节能改进的工程项目。仅2002年完成的“过程工业能量系统综合优化在石油、石化行业中的工程应用”和2005年完成的“炼油企业运行管理和低温热利用优化节能”两个科研成果就使企业获得能耗降低10%~20%的节能效果。除此之外，书中还举例了他多年来理论联系实际的研究、开发、创新的成果用于解决实际工程问题的典型实例。

希望本书的出版发行能使更多的人掌握能量综合优化的系统方法和技术，更广泛地应用于炼油和石化企业，为推动我国炼油和石化工业的节能做出新贡献。

徐承恩

目 录

中国炼油企业节能降耗——从装置和局部到系统全局(代序)	1
-----------------------------	---

炼油企业节能形势分析与节能规划

我国炼油工业的节能问题	11
我国能源形势与炼油企业节能	17
炼油企业能源构成和转换技术的发展趋势	22
节能与制订炼厂规划	28
大连炼油厂能量综合优化改进的建议	33
林源炼油厂热集成节能改造	40
世纪之交的中国炼油工业节能问题	45
炼厂低温热的利用	53
炼油企业低温热大系统优化利用技术	59
炼油企业全局能量优化中的储运系统节能	66

运行和管理的能量优化

基于能量流程模拟的过程系统操作调优	71
发展过程系统运行中的节能技术	80
炼油企业全厂多周期生产计划优化研究	84
炼油企业生产计划优化的边际价格研究	90
通过优化运行和管理实现炼油厂节能降耗	95

资源与能源的协同优化

用好轻烃资源,优化我国乙烯工业原料路线	99
炼油化工产业资源与能源的集成优化配置	104
利用海外 LNG 资源的战略思考	109
中国能源和资源优化配置的战略思考	113

工艺装置节能

运用能量综合技术制定装置优化改造方案	119
常减压装置改造中的热能利用问题	124

酮苯脱蜡脱油装置设计的能量综合改进·····	133
气体分馏装置的扩产和能量综合优化·····	138
糠醛精制装置扩产的换热网络结构调优与能量综合优化·····	143
吸收稳定系统集成化的设计、优化和改进的方法·····	148

单元过程与设备的能量优化与设计

原油分馏塔节能设计改进·····	154
以模拟为基础的简单分馏塔焓经济优化·····	162
制冷蒸发器的焓经济评价及其优化设计·····	167
蒸发系统的热经济学优化·····	172
喷雾干燥系统的焓经济优化研究·····	178

换热设备的强化与优化设计

炼油厂节能与冷换设备的更新改造·····	184
从节能角度评价换热器·····	195
强化传热技术在我国石化工业中的应用·····	204
利用设备更新机会和资金促进技术进步和节能增收·····	209
管壳式换热器及其强化传热的焓经济评价和优化·····	214
基于焓经济评价的换热器最优传热温差·····	220
管壳式换热器的优化选型·····	225
空心环管壳式换热器在南京烷基苯厂的工业应用·····	230
FCC 烟气能量回收系统的现状与设想·····	234

蒸汽动力系统优化调度

石化企业蒸汽动力系统的多工况操作优化·····	238
石化企业蒸汽动力系统的多周期运行优化·····	244
石化企业热能动力系统的优化调度·····	250
炼油厂蒸汽动力系统优化调度策略研究·····	254
炼油企业蒸汽动力系统优化运营软件设计与开发·····	259

蒸汽管网模拟与优化

石化企业蒸汽管线的优化设计·····	265
考虑蒸汽密度变化的长距离动力蒸汽管道的优化设计·····	271
基于管网模拟的蒸汽动力系统多周期运行优化·····	277

热 电 联 产

加快燃气轮机功热联产技术在我国炼厂应用的步伐.....	283
热能动力联产及其系统优化.....	291

炼油过程用能分析与系统综合优化

炼厂能量平衡及其分析评价.....	295
炼油工艺过程用能的理论基础和实用分析.....	306
炼油过程用能技术经济分析.....	324
负荷率对炼油装置能耗影响的分析及估算方法.....	335
寒冷地区炼厂节能的几个问题.....	345
应用焓分析和总体优化技术, 促进石化企业节能进一步深入.....	351
过程系统能量综合技术研究与开发.....	360
过程系统能量综合与优化.....	366
炼厂能量综合优化与挖潜增效.....	375
过程能量综合的研究进展与展望.....	382

焓分析与焓经济学应用

石油及其馏分物理焓的实用计算.....	391
基准相态为气相的液态烃物理焓计算.....	400
分馏塔网络能量综合的焓经济优化方法.....	404
同时考虑流动焓损费和传热强化的换热网络合成.....	412
制冷蒸发器的焓经济评价与优化设计.....	419
炼厂散热的实用计算和焓经济分析.....	424
催化裂化再生烟气能量回收系统的焓经济优化.....	434
化工过程能量综合的焓经济调优法.....	439
焓分析和总体优化技术在上海石化总厂涤纶二厂节能改进工作中的应用.....	448
能量综合和工艺同时优化的焓经济学方法.....	455
过程能量综合的分解协调优化策略.....	462
过程系统扩产与能量综合同时优化的焓经济模型及其策略.....	469
过程系统焓经济学优化策略.....	475

中国炼油企业节能降耗

——从装置和局部到系统全局

(代序)

一、炼油企业深入节能：从装置节能走向全局能量系统优化

我国炼油企业自 20 世纪 70 年代末开展节能以来，已取得了很大的成绩，其能耗从 1978 年的高于 100kg 标油/t 降低到目前的 78.4kg 标油/t^[1]，与国际先进水平的差距在逐渐缩小。图 1 给出了中国石化所属企业与国外炼油能耗对比的数据^[2,3]。

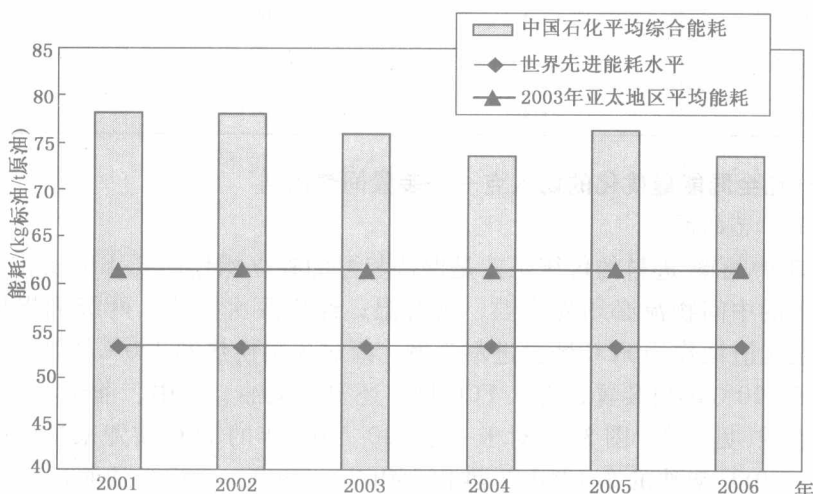


图 1 “十五”期间中国石化与国外综合能耗对比^[2,3]

进入本世纪以来，随着经济持续快速增长，中国炼油企业也进入了新一轮大发展的时期。其特点是：(1) 产品需求总量不断扩大(3.4 亿吨/年→4.0 亿吨/年)；(2) 产品质量要求不断提高(国Ⅲ→国Ⅳ、国Ⅴ)；(3) 地区发展平衡要求布局重新调整。除了千万吨/年级新炼厂在建之外，几乎所有原有的炼油企业也都面临扩建和质量升级的改造。在 2007 年石油对外依存度直逼 50% 的局势下，新老企业都面临着节能减排的巨大压力。2006 年石油化工全行业能耗占全国总能耗 16%，高居工业能耗首位；钢铁工业占 9%，居次席。炼油企业自用石油加工产品 2000 余万吨/年。节能降耗任务艰巨。

分析我国炼油企业能耗数据并与国外对比，可以发现：一些企业主要装置能耗不高，总能耗却因储运和其他辅助系统能耗高而居高不下；主要装置如蒸馏、催化能耗不算高，但加氢、重整等装置能耗高；存在大量低温余热，没有得到很好的利用；蒸汽动力系统能耗普遍较高，功热联产的潜力远未能发挥出来等等。这种情况，与我国 30 年来炼油节能工作重点一直放在抓装置节能，较少重视和深入研究、促进和着力解决全局用能优化问题，不无关系。

30 年来，炼油技术已经有了很大的进步。主要体现在：(1) 装置开工周期从 1 年延长到 3~5 年，而且几乎全厂检修同步；(2) 装置大型化，平均规模几乎增加了 3~4 倍；

(3)装置的平面布置更加紧凑；(4)设备技术水平提高，可靠性增加；(5)过程控制技术大大提升。上述种种，使得能源优化利用要求的在大系统内各装置、单元间更紧密的能量集成在工程上有了实现的可能，在安全上有了可靠的保障。

近几年原油价格大幅度上涨。2008年3月已突破110美元/桶，比20世纪70年代上涨了几十倍，比20世纪末也上涨了十几倍。然而设备，如节能项目主要投资所在的换热器，其价格不过增加了3~5倍，这就使得节能改造项目的经济效益和投资回报率大大增加。表1列出了加热炉排烟温度和换热器传热温差的变化。这些变化条件既对现有的换热网络匹配提出了挑战，也为实现“温度对口，梯级利用”的科学用能提供了新机会，使跳出装置的圈子，在炼油企业全局范围内优化用能成为可能。

表1 排烟温度和传热温差随经济条件的变化

年 代	石油价格/(美元/桶)	排烟温度/℃	传热温差/℃
20 世纪 70 年代	1 ~ 3	>400℃	80 ~ 100
20 世纪 80 年代	10 ~ 30	<200℃	~ 30
21 世纪初	>100	<100℃	~ 10

二、新一轮全局能量优化的切入点——装置间热出料

1. 传统的工艺的问题

出料冷却-中间罐-进料的传统工艺是保持装置的独立操作所要求的安排。显然，衔接上、下游装置的中间物流必须先降温，再升温；经历两次换热、两级烟损耗、两组换热器。以蒸馏装置渣油作为FCC装置进料为例。经过3次换热的220℃渣油，还要经过两次换热，降温到120℃再出装置；进入FCC后，还要用柴油、一中、油浆加热到220℃，进入提升管反应器(见图2、图3)。对于一个120万吨/年的FCC装置来说，这相当于利用42t/h，200~130℃柴油的3.13GJ/h热和350t/h，330℃-287℃油浆的21.393GJ/h热，去同渣油4、5次换热的60~90℃、120~160℃的脱前、脱后原油换热，造成有效能的巨大损失。此外，冷却水的消耗，中间罐的投资、占地，出料泵的投资、功耗，保温热耗也不可忽视。

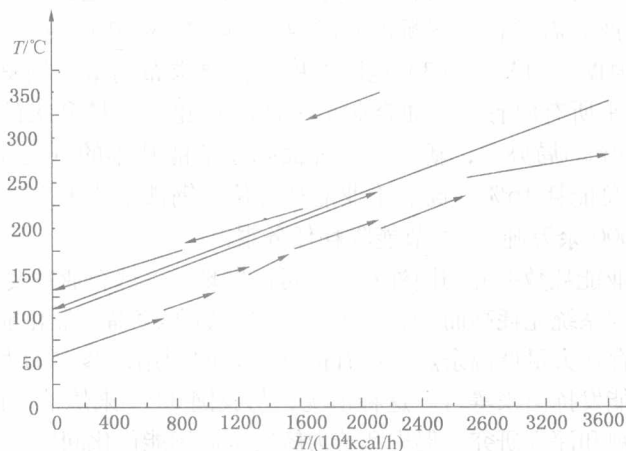


图2 CU渣油进入FCC的温-焓图

(注：1 cal = 4.18J，下同)

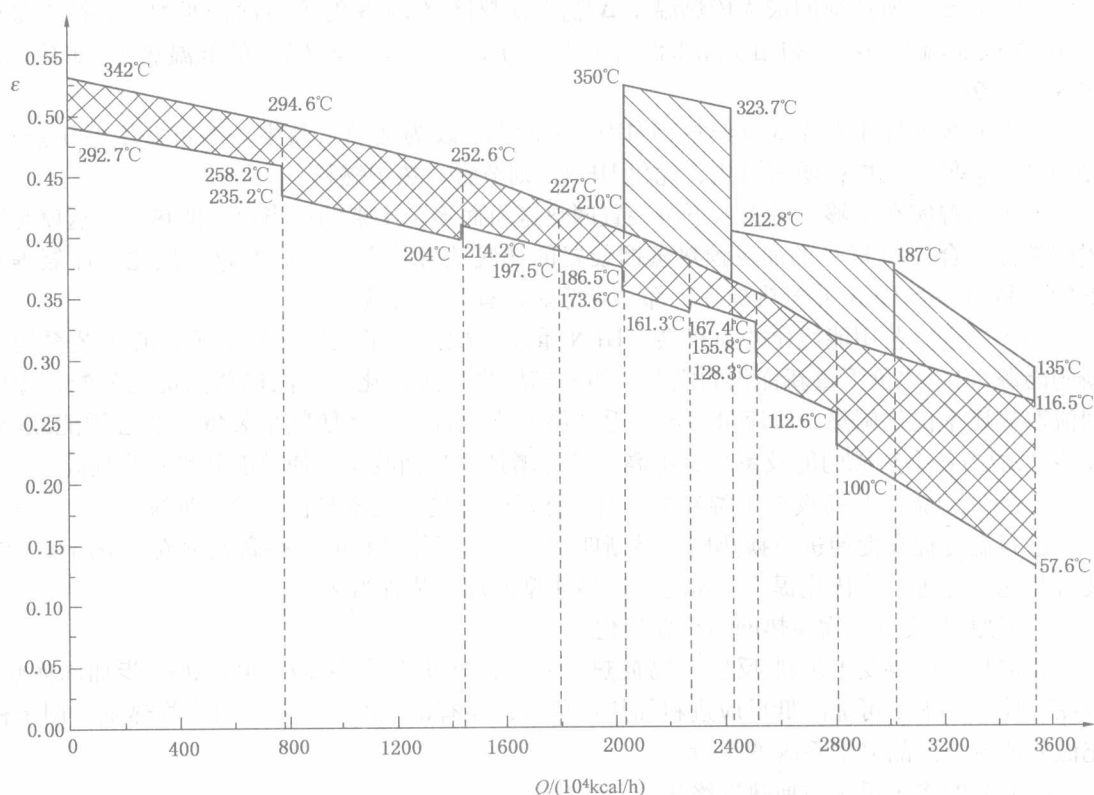


图3 CU渣油进入FCC过程焓分析图

2. 热出料适宜温度的选择和优化

停用原来出装置冷却器的热出料是起码的。从节能原理看，热出料温度越高效益越大。但须充分考虑所有相关的安全、工程、操作、控制等问题，寻求最优的热出料温度。研究表明，这基本上是一个受下游某种工艺条件限制的门槛问题。例如FCC/RCC类装置，温度高限是进提升管温度。各类加氢装置的温度限制是充分利用反应器出口反应产物热量的约束，及进料加热炉在反应末期的调节裕量。延迟焦化热进料温度限制是余热利用方案和长距离输送高温油品的热损失约束等等。对于要求操作柔性较大的情况，还须预留少部分供随时调节的冷进料。下面是“十一五”节能规划改造中较典型的热出料改进目标：

- (1) 减压渣油、脱沥青油热出料供焦化，由原来150~180℃提高到200~230℃；
- (2) 减压、焦化蜡油热出料供催化，由150~165℃提高到180~195℃左右；
- (3) 直馏、催化、焦化汽柴油热出料供加氢，由40~50℃升高到100~120℃；
- (4) 加氢裂化、加氢改质热进料，由60~120℃提高到130~170℃左右。

热出料改变了上、下游装置物流的热匹配关系，给上、下游装置优化用能，以及各装置与系统全局之间的能量集成，带来了新的改进机遇，是新一轮全局优化的切入点。

三、热出料推动装置深入优化用能和热联合

1. 热出料温度提高促使上游装置换热网络重新匹配

上游装置，以蒸馏装置为例。蜡油、常渣、减渣等出料温度提高后，必然使原来原油换热网络热源减少，给HEN优化匹配提供了新的机遇。补充所缺热量的三个途径是：

(1) 在表 1 所述新的最优传热温差 ΔT_{opt} 下换热网络 HEN 的重新优化匹配, 其结果是整个 HEN 接近温差缩小, 利用了原来没有利用、需要冷公用工程(CW)的低温热源(如初、常顶油气潜热)。

(2) 减少或停止发生低压蒸汽(1MPa, 0.3MPa)改为换热。其中, 停止发生低压蒸汽, 相当省一台低压锅炉; 增加换热、优化 HEN, 则节省加热炉燃料。

(3) 热源实在不够, 可引入下游装置因热进料而多余出来的适当温位的热量, 这就是装置间的热联合。如 FCC 的油浆预热蒸馏装置的初底油可节省常压炉燃料, 焦化、加氢等装置的产品向蒸馏 HEN 补充热源等, 都对降低能耗有重要贡献。

(4) 核心工艺用能优化的新机会。HEN 重新匹配提供了反应、分馏等核心工艺系统在新的能源/设备比价下重新优化的机会, 如分馏塔降低过汽化率, 汽提蒸汽优化分配, 中段回流取热比率优化调整, 回流量与出、返塔温差优化等。这将使整个装置工艺总用能减小, HEN 匹配中各个热源的能及系数 ε 提高, 从而增加能量回收率, 使总能效进一步提高。

2. 热进料温度提高改变下游装置热利用格局, 促使装置能量优化进一步深入

进料温度提高促使进料换热网络重新匹配, 原来预热进料的一些高温热流多余出来, 给装置其他部分进一步优化提供了机遇, 以最典型的加氢装置为例。

(1) 原料-反应产物换热网络重新优化

高进料温度改变了进料-反应产物换热条件, 借此机会采用 ΔT_{opt} 可以进一步加深换热, 能在可控条件下尽可能降低反应进料加热炉负荷; 还有富余的反应器出口产物热量, 用于补充低分油带去产品分馏系统的热量。

(2) 分馏塔子系统与换热网络的重新优化

低分油进分馏系统温度的提高, 促进了分馏塔子系统的用能改进。即使加氢装置分馏系统原来的设计是优化的, 在能源/设备比价大幅度提高的新经济条件下, 也有重新优化的理由。在分馏塔模拟的基础上, 优化体现为适当提高塔板数, 降低回流比, 即减少进料加热炉或再沸炉的负荷。在此基础上再优化 HEN, 则可进一步提高分馏塔的进料温度, 降低分馏塔再沸炉/进料加热炉负荷。

(3) 塔顶冷凝、塔底产品余热在大系统范围内获得利用, 或者向上游装置供较高温热, 或者纳入低温热媒水循环系统, 都是热输出。

结果是, 加氢装置进料从 40 ~ 60℃ 提高到 100 ~ 160℃ 带进来的是低品位的热量, 而通过内部优化以后, 顶替出来的是两个加热炉的燃料、接近 200℃ 的产品输出热和借助热媒水外输的低温热, 并且总量更大。这其实是借热出料的契机, 挖掘出加氢装置原有的改进潜力和新的经济条件下深入节能的潜力。几个工程实例表明, 装置能耗可降低 20% ~ 40%。

3. 实际工程因素的考虑和应对

热出料、加深换热、装置间热联合对现有的操作、控制、安全保障等等都会带来一定的冲击, 必须配置充分的软、硬件措施加以应对。

(1) 操作问题。尽管有上述开工周期延长、同步检修等有利条件, 但并不排除会发生上、下游装置非同步停工的情况。这就必须有相应的辅助设备和管线, 能把未停工的一方热流冷却下来, 使进罐、冷流适当升温保持正常运行。在特殊事故状态下, 要求有最快切断联合, 处理事故部分的辅助流程。

(2) 平面布置约束。现有的炼油企业并不都是如新设计的千万吨级炼厂那样紧凑布置的。热出料、热联合都会付出较远的管线投资、散热损失、压降的代价, 这是必须仔细进行

技术经济核算的。通常认为合理热联合距离大致在 300 ~ 500m 以内,但随着能源价格的飙升和热出料、热联合方案技术经济优化比较的深入,实际可行的优化距离要远得多。平面布置约束的另一个体现是随 ΔT_{opt} 减小,会增加换热器的台数,给现场空间布置造成问题,这可以采用强化换热技术和适当改造框架来解决。

(3) 投资和效益的权衡。所有这些辅助措施,都需要适当增加投资以保障操作、控制、安全等方面的绝对可靠性。已完成的几个项目的投入产出核算表明,当前能源/设备的比价异常高企,使得尽管上了不少辅助设施,投资回报率依然很高。

四、炼油企业储运系统深入节能的方向和潜力

1. 炼油企业储运系统节能面临的新技术经济条件和节能潜力

多年来炼油节能努力中,对储运用能没有深入分析,重视不够,储运系统与装置之间只有物流关系,没有能流集成。储运系统设施多半是按照老的技术经济条件设置和操作:冷罐、盘管蒸汽维温伴热;对这些老工艺已经习惯;在计划经济和廉价石油下,没有节约流动资金利息压力。所以,炼油储运系统节能潜力甚大。

随着我国石油工业的持续发展和科技进步,炼油企业油品储运技术经济条件也有了很大的变化。主要有:(1)绝大部分原油实现了管线运输,能够按计划到厂,含水量合格;(2)本轮以热出料为切入点的节能改造将停用大部分中间罐,只留少数作为运营储备,正常缓冲;(3)在线调和技术的推广应用将节省成品油调和倒罐操作,罐数减少;(4)随着石油价格暴涨,减少罐存,节约油品储运所积压的流动资金利息的运营压力增大;(5) $> 100^{\circ}\text{C}$ 热罐储存技术成熟;(6)厂区地块面积越来越珍贵,节省大量储罐占地,可给新、扩建装置紧凑、优化布置创造条件。这些变化条件对储运系统节能和优化产生了重要的影响。

2. 储运节能的基本原则

原则一:储量最小化

在热出料创造条件省去大部分中间罐,原油管输进厂且不须脱水,在线调和节省成品油调和倒罐操作等新的技术经济条件下,在保证全厂正常生产的前提下,努力将必要储量维持在最小,以减少维温、伴热、泵送能耗、设备折旧和流动资金利息支出。以一个中等规模炼厂原油罐区为例,在 3000 元/吨价格下,储存量减少 6 万吨,维温蒸汽将下降 2.0t/h,效益 155 万元/年,减少流动资金占用 1.8 亿元,节约利息 1260 万元/年,总经济效益 1415 万元/年,能耗降低 0.26kg 标油/t。

原则二:储运参数最优化——最小维热温负荷

储运参数优化的实质可以表述为:合理提高进罐油品温度指标 t_i 降低允许储存温度 t_s ,同时优化储罐的保温设施,使得在最小储量对应的最短必要储存时间 τ 内,油品由进罐 t_i 降温到 t_s 所释放出的显热 $c_p(t_i - t_s)$,能够平衡油罐在此期间的大部分散热损失,以使必须由外部补充的维温热负荷减到最少。

不同油品、不同地域气候条件不同,认真细致地优化选择这些参数,修订和监控储运工艺操作卡片的执行,调动操作人员的节能积极性,完全能够把储运能耗降到最小。

原则三:选择适宜的加热方式

罐底盘管-蒸汽维温的自然对流传热系数只有 $40 \sim 60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$,依靠蒸汽与油品之间的大传热温差 $\Delta T \approx 100^{\circ}\text{C}$ 来维持热强度,是高能低用。在上述参数优化、维温热负荷成倍减少的基础上,有可能以热媒水替代蒸汽,通过盘管维温,实现能源的梯级利用。在盘管传热面积不够的情况下,可以采用提高传热系数的其他加热方式来实现能量梯级利用。例如,在进

(出) 罐油品管线上, 采用高 5~6 倍的传热系数 $K=300\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 以上的管壳式换热器, 便可以用 $80\sim 90^\circ\text{C}$ 的热媒水, 在 $\Delta T\approx 20^\circ\text{C}$ 下使油品升温。还可以在罐出口/泵入口设置抽吸式加热器, 只加热抽出部分的油品, 保证泵送油黏度要求。

五、低温热利用的新格局和系统优化策略

1. 当前炼油厂低温热利用现状和问题

我国炼油企业较普遍存在着大量工艺低温余热未能获得合理利用的情况。究其原因, 主要是在因扩大规模或改善产品质量而陆续增建新装置时均为孤立设计, 没有考虑与原有装置和系统的能量集成优化, 这就使每上一个新装置, 就增加一批公用工程和一批低温热。在试图利用这些已经产生的低温热的努力中, 也存在着一些问题。一是无视装置内外冷热流的不合理匹配, 而只把现有冷却负荷看作是确定的“低温热资源”, 高能低用。某企业两股最大的低温热是:

减压蜡油 $122\text{t}/\text{h}$, $140\sim 63^\circ\text{C}$, $373\times 10^4\text{kcal}/\text{h}$

减压渣油 $124\text{t}/\text{h}$, $158\sim 109^\circ\text{C}$, $291\times 10^4\text{kcal}/\text{h}$

显然, 它们都将随着蜡油、渣油的热出料而不再存在。二是随机、分散和孤立地选配低温热阱, 导致“高热低用”, 例如用分馏塔侧线或回流 $150\sim 200^\circ\text{C}$ 温位的余热, 作为采暖、预热除盐水等 $40\sim 70^\circ\text{C}$ 的热阱的热源, 严重降质利用。

2. 炼油厂低温热大系统优化利用

在热出料和装置间热联合的基础上, 低温热在全厂大范围内优化利用是可能的。采用除氧软水为热媒, 按温度高低依次从多个装置, 多股串、并联的热流取热, 储存于高温热媒水缓冲罐中。然后, 在借助于辅助加热器的温度控制和流量控制下, 依照温位高低依次向多个串、并联的热阱供热。在最低温端, 设辅助冷却器控制回水温度恒定, 这就可以保证任何作为热源的中段回流, 作为热阱的塔再沸器, 都得以良好控制。

3. 以水为热媒的炼油厂低温热利用系统的优化设计

以水为热媒的低温热大系统设计的关键是: 在一定的热源/热阱复合曲线条件下, 以热源与热媒水、热媒水与热阱之间的最优传热温差为尺度, 求解热源和热阱两条复合曲线在 $T-H$ 图上的最优相对位置, 以及在它们之间代表热媒水循环线的直线的斜率。最优解将给出两个 HEN 中各个换热器的传热温差和传热面积, 以及最优的热媒水循环量和温升。图 3 和图 4 分别是一个千万吨级炼油企业低温热利用系统规划方案的流程和负荷曲线匹配关系。实例比较表明, 由于能够在全厂范围内实现各种低温热源和热阱的“温度对口, 梯级利用”, 使热媒水总流量显著减小, 温升加大, 并且在新的能源/设备比价下做到换热器投资与节能经济效益之间的优化权衡, 所以尽管热媒水管网投资较多, 总体的经济效益和节能效果仍十分显著。

六、炼油企业一次能源构成面临新的选择

1. 中国炼油企业一次能源构成的演变

20 世纪 80 年代以前, 中国炼油企业一直以副产渣油和外部供电为主要一次能源, 典型配置是 3 台 $120\text{t}/\text{h}$ 中压锅炉, $2\times 12\text{MW}$ 抽凝机组, 加热炉燃用渣油和炼厂气。20 年来, 随着二次加工装置快速发展, 炼厂气和焦碳在能耗构成中的比例大大增加。但迄今还有不少中压锅炉烧炼厂气和部分渣油发电、产汽, 总的能源转换效率提高不大。

国外自 80 年代起逐渐改以天然气为一次能源, 采用燃机—锅炉/加热炉热电联产技术, 能源利用效率可达 $80\%\sim 90\%$ 。联产的电基本上能够自给, 炼油副产的渣油等得以进一步加工, 大大改善了能源构成, 提高了能效和经济效益, 但国内因缺乏天然气而一直没有采用。

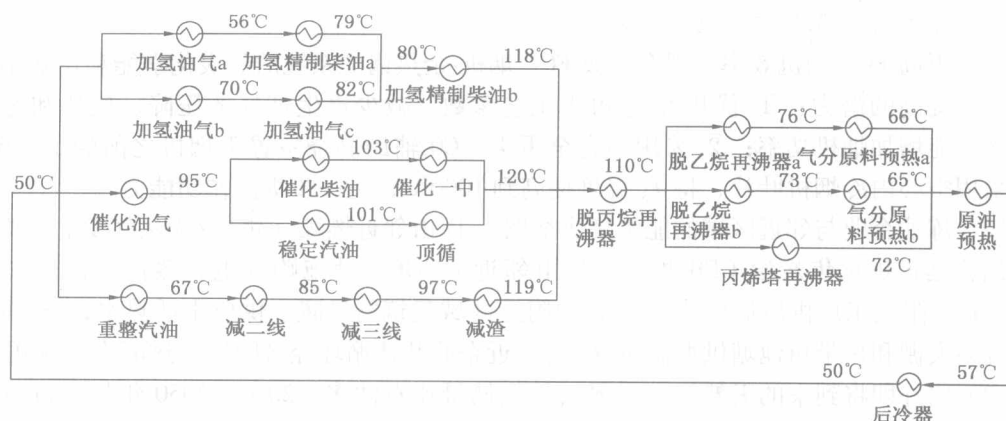


图4 某炼油厂通过热媒水的低温热大系统换热流程图

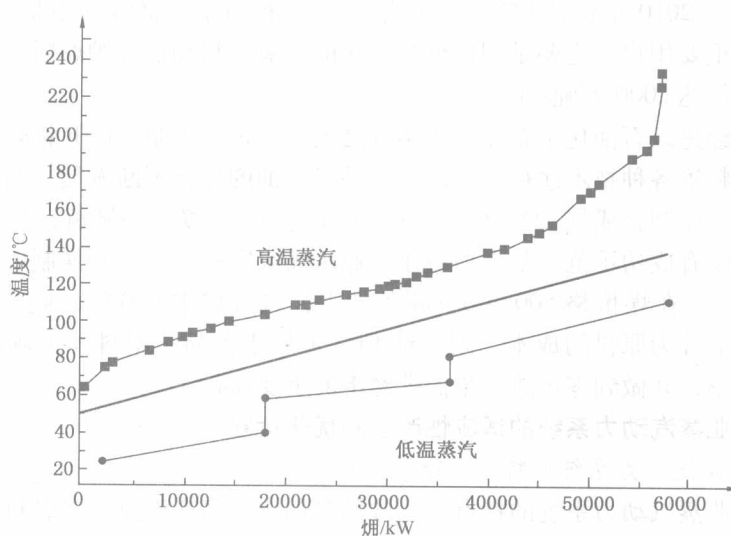


图5 某炼油厂低温热媒水系统换热网络匹配

本世纪以来，随着国际石油价格暴涨，燃料油价已高达 4000 元/t；中压燃油机组自产电成本已高达 1.2 元/kW·h，远远超过电网电价。因此，燃用自产渣油和炼厂气的习惯思维必须打破，根据当地情况优化炼厂一次能源构成已势在必行。

2. 当前优化调整能源构成的基本思路

(1) 充分利用 FCC 再生器烧焦-烟机-余锅系统工艺和 CFB 炉脱硫工艺的优势，最高效、洁净地利用氢转移加工过程中形成的焦炭，使其具有与天然气和煤相同的使用价值；

(2) 其他的“一、二次”加工产物（包括炼厂气中的氢气和轻烃、油浆、渣油）都尽可能通过经济的途径转化为车用燃料和化学品，而不烧掉；

(3) 不足部分，发挥炼油厂热电比的优势，高效利用更廉价的外部煤和天然气一次能源；

(4) 发展能源循环经济，以总体优化为目标，规划所在地区一次能源转换利用的大系统集成优化方案：各压力等级蒸汽、电、热与邻近企业联合（包括买入和售出），这是中国炼油企业一次能源结构优化的大趋势。

3. 优化调整能源构成的重点对策

(1) 提高 FCC 烟机效率。现有多数 FCC 烟机-余热锅炉系统的焦炭化学能利用效率都还有进一步提高的潜力：① 优化反应-再生工艺参数，减少再生烟气的压降、散热和旁路损失，尽可能增加烟机功率；② 采用不完全再生—CO 辅助燃烧室置于烟机之前的工艺流程，同时采用空心内冷烟机叶片，将 T_3 温度提高到 1000℃，进一步提高作功能力。

(2) 炼油企业与邻近区域的能量集成举例。① 由邻近燃煤（焦）/天然气发电厂购入蒸汽（出售延迟焦化焦炭给 CFB 炉）；② 由邻近的 IGCC 设施购入电、蒸汽、合成气（制氢）；③ 向附近工厂供应低压蒸汽；④ 向附近区域建筑物供暖、供应生活热水；⑤ 向附近农村蔬菜大棚和热带鱼塘塘供低温热 ⑥ 与邻近企业共建循环经济园区，热电冷集成联供。

(3) 用好即将到来的天然气。世界天然气储量比石油多，2030 ~ 2050 年将超过石油成为最多的一次能源。天然气的利用效率可达到 80%， CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等排放最小。在节能减排的重大需求下，国家已经实行大力发展天然气的战略。天然气在一次能源中的比率：2007 年仅 3.36%；2010 年将达 6%；2020 年 12%，相当于 3 亿吨油当量/年。届时，炼油厂应是天然气的重要用户，主要是用作炼油企业的制氢原料和加热炉燃料，替代目前耗用的轻烃。市场规模约达 2000 万吨/年。

(4) 煤炭已经进入石油化工企业一次能源之列。通过水煤浆、CFB 锅炉、超临界机组—蒸汽动力系统燃料等各种技术途径生产蒸汽，替代燃油的项目不断发展。而最具潜力的技术途径则是煤富氧气化制合成气 $\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow$ 合成气进一步变换 $\rightarrow$ 制氢，具有高效环保和高效优势，在国内已有成功示范。某大型石化企业水煤浆富氧气化—变换制氢技术已实现连续 130 天工业化运行。在煤价格 500 多元/吨条件下，氢气成本 9000 元/吨，远低于天然气、轻烃、沥青、渣油等为原料的成本。副产纯 CO_2 可用于食品、塑料等工业，还可以回注油气田，提高采收率，并做到零排放，是低碳经济的重要途径。

七、炼油企业蒸汽动力系统的适应性改造和优化运营

1. 炼油企业蒸汽动力系统的特点和新的挑战

(1) 炼油企业蒸汽动力系统的特点：分散的多用户、多产汽点，多燃料来源，多压力等级，包括季节、加工量、生产方案、市场价格所引起的多工况变化；动力设施运行的连续负荷稳定，但大功率电机开、停时对电力系统冲击大；突发事件预案要求各级蒸汽、动力有完善的紧急备用设施；为绝对保证工艺系统需求，功热联产效率目标常被牺牲等。

(2) 炼油企业蒸汽动力存在的问题：① 锅炉、汽轮机容量小、参数低且陈旧；② 配合全厂扩产而陆续增建，缺乏全面规划；③ 缺乏柔性，在变化工况下不能保持功热联产效率要求，表现在夏季低压蒸汽放空，冬季中压蒸汽减温减压；④ 相当多的地方仍在烧渣油或炼厂气；⑤ 炼油化工大工业园区、各企业蒸汽动力系统分别建设，分散管理，缺乏集成。其节能潜力：占目前我国炼油厂节能潜力的 1/3 左右。

(3) 热进料-低温热利用对蒸汽动力系统的挑战和机遇。本轮以热出料为切入点的系统全局能量优化对蒸汽动力系统的冲击是：① 低温热利用将大量减少 1.0MPa、0.5MPa 蒸汽用量，减少凝结水的产生，并且大大缩小冬、夏季蒸汽耗量之差；② 热出料会使上（下）游装置减少发低压蒸汽；③ 热联合技术使 FCC 装置油浆少发中压蒸汽；④ 大量低温热可用于原水、除盐水、除氧水预热，省汽。以上各点使各级蒸汽供需格局将发生较大变化，给蒸汽动力系统提供了一个优化改造、提高转换效率的重大机遇。

(4) 需要柔性的蒸汽动力系统。目前系统都是按照给定的工况设计的，然而加工量变