

# 催化裂化再生烟气能量回收系统的经济优化<sup>\*</sup>

(华南理工大学) 陈清林 华 贲 王松平 尹清华

[摘要] 应用能量系统的双子系统方法对烟气能量回收系统进行了经济分析优化。在再生烟气物性参数一定的情况下,以系统内动力回收量与热量回收量的最佳分配而产生的最大回收经济效益为系统优化的目标,且根据一定的经济模型对有代表性的烟气能量回收系统进行了优化,得到了系统最大效益下的最优设计操作参数。其优化结果对烟气能量回收系统的优化设计及操作有一定的指导作用。

关键词 催化裂化 经济学 系统优化

中图分类号 TK01

## 1 引言

催化裂化装置是炼油企业中重质油轻质化的一个重要二次加工装置,也是能耗较高的工艺装置之一。待生催化剂在再生烧焦过程中放出大量的热量,一部分经再生催化剂带入反应器供给裂化反应所需的反应热,转换为产品的化学能,另一部分由再生器排出的高温烟气带出。再生烟气能量的有效回

收利用对于降低整个装置的能耗、提高催化裂化技术水平、减少环境污染都有着重大的现实意义。目前,催化裂化烟气的能量回收主要为动力及热能,催化剂再生器与烟机的联合相当于一个燃气轮机组,其目的主要是回收再生烟气中高价值的压

本文将应用能量系统双子系统方法<sup>[1]</sup>对烟气能量回收系统进行了经济分析、优化,以最大的回收经济效益为优化目标,应用经济学方法对某些有代表性的能量回收方案进行分析优化,得出了一定的再生状况下,能量回收系统的优化设计参数,为烟气能量回收系统的优化设计与操作提供理论指导。

## 2 烟气能量回收系统介绍

催化过程中产生的大量焦炭,若采用联产技术完全可以使这些焦炭化学能的转换达到或接近燃机

收稿日期 1997-12-26 收修改稿 1998-03-20

\*国家自然科学基金项目子课题 标准号 2937240

本文联系人 陈清林 男 1964 年生 讲师 510641 广州华南理在大学化工所

换热的同时会引起较大的摩擦阻力损失,从而消耗更多的有用功。本文建立了如何综合考察肋片引起的换热收益和摩擦损失的一个研究理论模型,对肋片结构尺寸的优化做了理论分析,以最大程度地减少不可逆损失,保存有用功。

(2)本文所得到的公式和曲线图对于工业设计计算具有一定的应用价值,本文使用的方法具有一定的指导作用。对于其它形状的肋片可用同样的方法进行研究。

### 参考文献

- 1 杨翔翔. 热特性参数可变时双曲线形截面环肋的最优尺寸. 工程热物理学报, 1988, 9(1).
- 2 Razelos P and Satyaprakash B R. Analysis and optimization of convective trapezoidal profile longitudinal fins. ASME Journal of Heat Transfer, 1993, 115: 461 ~ 463.

- 3 Yeh Rong-hua. An analytical study of the optimum dimension of rectangular fins and cylindrical pin fins. Int. J. of Heat Mass Transfer, 1997, 40(15), 3607 ~ 3615.
- 4 李大鹏 孙丰瑞. 多背压凝汽器熵产生的优化. 电站系统工程, 1997, 13(5).
- 5 杨翔翔 苏亚欣. 延伸表面传热研究. 广州:暨南大学出版社, 1997.
- 6 Bejan Adnan. General Criterion for rating heat-exchanger performance. Int. J. Heat Mass Transfer, 1978, 21: 655 ~ 658.
- 7 Poulidakos D and Bejan A. Fin geometry for minimum entropy generation in forced convection. ASME Journal of Heat Transfer, 1982, 104: 616 ~ 623.
- 8 Gebhart B. Heat Transfer. McGraw-Hill New York, 1971.

作者简介 苏亚欣,男,1972年生,1997年3月毕业于国立华侨大学机械系,获硕士学位,同年9月入浙江大学热能工程研究所攻读博士学位,主要从事传热传质学、气固两相流动与传热,循环床燃烧等的学习与研究,已出版专著一本,论文3篇。通讯处:310027 杭州浙江大学热能工程研究所

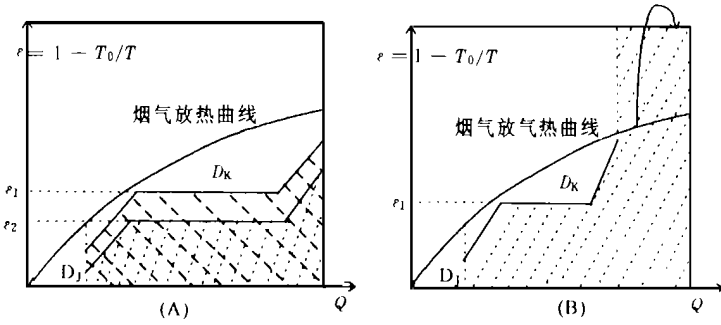


图 1 烟气能量回收的  $\epsilon-Q$  图  
(A—单纯热能回收, B—联产动力回收)  
(点斜线部分为回收有效 / )

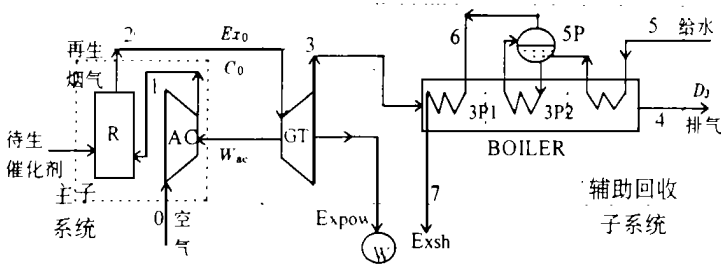


图 2 催化裂化烟气能量回收双子系统模型示意图

联产系统烧用轻油或炼厂气一样高的效率,再生器同时也是燃烧器。烟气能量回收系统经历了包括单纯热能回收与联产动力回收两种流程,早期只从再生烟气中回收热能,在反再系统工艺允许的条件下,尽量提高再生器设计温度;因烟气中包含高价值的压,通过烟机回收则效率更高。图 1(A)/(B)为两类回收方案的  $\epsilon-Q$  图,很明显,单纯热能回收流程的损明显高于联产动力回收流程的损;且可看出,系统发汽压力愈低,损愈大。

### 3 能量系统双子系统方法

借助能量系统优化的双子系统方法<sup>[1]</sup>,采用分解协调优化策略,在子系统优化的基础上使得系统全局趋优。

首先将能量系统按双子系统模型分解成一个主子系统与一个辅助回收子系统<sup>[1]</sup>,然后对子系统进行独立分析优化。由于分解后各子系统结构相对简单,所包含的变量相对较少,且目标明确,所以对它们可以相对容易地进行分析与优化。

在催化裂化烟气能量回收子系统的优化过程

中,并不能简单地将进入能量回收子系统的待回收能( )作为一种燃料来进行系统的优化,因为烟气的价值取决于后续回收系统对它的回收状况<sup>[2]</sup>。作为系统中的能量辅助回收子系统,在边界经济参数确定的情况下,催化裂化烟气能量回收子系统优化的目标为适宜的设备投资费用条件下最大的待回收价。

本文在分析优化过程中将高温烟气近似作为理想气体处理,在忽略烟气未完全燃烧及扩散化学的前提下,各状态点  $(T_i, P_0)$  能量与的计算式为:

$$h_i = C_{p,g}(T_i - T_0) \quad (1)$$

$$e_{xi} = C_{p,g}(T_i - T_0 - T_0 \ln T_i / T_0) + R_g T_0 \ln P_i / P_0 \quad (2)$$

式中  $C_{p,g}$  为烟气的平均比热,  $R_g$  为气体常数,  $T_0$  为基准温度,在此取 288K。

## 4 催化裂化烟气能量回收系统经济优化

催化裂化烟气能量回收系统的设计

由于受当时技术经济条件制约,不同装置间的回收流程结构互有差别;在此,我们以较有代表性的动力回收方案为例来进行经济分析、优化。

### 4.1 子系统划分

对于具体的能量系统,适当的子系统划分可以起到简化系统的优化的目的。就整个催化裂化装置,我们可以将反再系统定义为主子系统,整个烟气能量回收系统为辅助回收子系统来进行系统的优化;而对于烟气能量回收系统,同样可以将动力回收部分—烟机及热能回收部分—余热锅炉作为两个子系统来处理。由于本文只讨论烟气能量回收系统的优化而未涉及反再系统的分析优化,在此将烟气能量回收系统作为一辅助回收子系统来考虑,如图 2 所示,假定余热锅炉由预热器,蒸发器及过热器三部分构成。

### 4.2 经济优化

烟气能量回收系统在热力学上所追求的目标是最大的余能回收及最小的回收损,但过多追求热力学的完善性、强调小的损将导致过大的设备投资,经济学上是不可行的;为此应将最大的总体经济效益作为系统优化的目标。本文在一定的经济边界

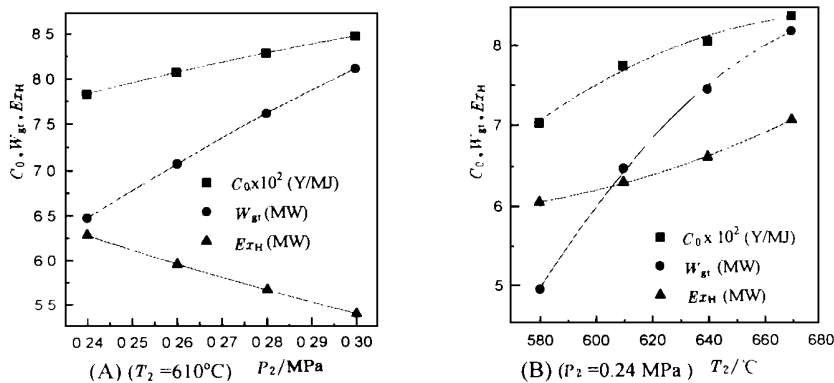


图3 烟机入口压力、温度变化对动力回收 \$W\_{gt}\$、热回收 \$Ex\_H\$ 及待回收价 \$c\_0\$ 的影响

条件下, 寻求催化裂化烟气能量回收系统动力与热能回收的最佳分配以达到回收系统最大的总体经济效益。

4.2.1 经济模型及参数

烟气能量回收系统的优化是在一定的经济约束条件下进行的, 有关烟机及余热锅炉等设备投资费用采用文献 [3] 推荐的关联式估算。

优化中回收产品价格取为: 电价: 0.36 ¥/(kW·h), 3.9 MPa, 420 °C 蒸汽价: 100.0 ¥/t; 以此折合成产品价为 \$c\_{pow} = 0.1\$ ¥/MJ, \$c\_{st} = 0.0775\$ ¥/MJ。

由于优化结果的准确性取决于经济模型的可行性, 因此所得的结果只能是在一定条件下的优化结果, 对实际装置的优化有一定的参考价值, 但所提出的优化策略与方法对任何模型都是可行的。

4.2.2 目标函数

再生烟气作为主子系统的一个副产品, 在存在回收利用可能的情况下, 可以为主子系统分担一定的费用, 其价值的大小随回收利用的不同而异; 如图2所示的双子系统模型中两个子系统由于存在相互联系、制约的关系, 其本质反映在待回收价 \$c\_0\$ 的变化上。由于催化裂化反再系统(主子系统)包括一系列复杂的化学反应及物流变化, 其操作参数主要受原料与生产工艺的影响, 在此暂不对它作分析优化; 假定再生烟气的温度、压力及流率恒定, 在此前提下进行能量回收子系统的优化, 其优化目标可表示为适宜的设备投资费用条件下最大的待回收价 \$c\_0\$。

$$\max_{(x)} c_0 = [c_{pow} Ex_{pow} + c_{st} Ex_{st} - (Z_{GT} + Z_B)] / Ex_p \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{S. t. } & h_k(X, Y) = 0 \\ & k = 1, 2, \dots, K \quad (4) \\ & g_l(X, Y) \geq 0 \\ & l = 1, 2, \dots, L \quad (5) \end{aligned}$$

优化的等式约束为系统的物理结构模型, 热力学模型及经济模型; 不等式约束来自对系统可操作性、安全性以及环境因素等方面的考虑。

动力回收与热量回收两个子单元, 通过串联连结构成烟气能量回收系统。烟机出口温度 \$T\_3\$ 的变化, 受烟机的效率 \$\eta\_{GT}\$ 的制约, 且最终反映在烟机的投资上, 即烟机本身也存在回收收益与投资的权衡; 另外, 通过余热锅炉的投资费用与烟气余热回收限度之间的权衡, 存在一最优排烟温度, 以此选取本优化决策变量为:

$$X = \{T_3, T_4\} \quad (6)$$

烟气能量回收系统的经济优化目标函数为多变量高度非线性函数, 采用混合罚函数非线性约束优化方法进行优化计算。

5 结果与讨论

假定烟气能量回收子系统在优化计算过程中忽略装置散热等损失, 本文以设计处理能力为 120 万吨/年的某催化装置为例, 所采用的烟气有关性质及参数见表 1<sup>[4]</sup>。在给定所产蒸汽参数 (3.9 MPa, 420 °C) 的前提下进行烟气能量回收系统的优化, 优化结果及能量回收情况见表 2。

由于电价高于蒸汽价, 在回收烟气的能量时应尽可能多回收高价值的动力能, 且因热能的回收效益与设备费用之间存在着权衡关系, 余热锅炉的优化排气温度略高于露点温度; 从优化的目标函数值可以看出: \$c\_0\$ 的值介于电价与蒸汽价之间, 这也真实反映了高温烟气的价值, 说明高温烟气存在极大的潜在回收价值。

以上优化结果是在未考虑复杂的反再系统的优化, 即固定反再系统条件的前提下得到的 (\$P\_2 = 0.24\$ MPa, \$T\_2 = 610\$ °C), 所得的优化结果只能是相对的、局部的, 并非全局系统的优化。图 3(A)、(B) 表明了在其参数不变的条件下, 烟机进口压力、温度单变量变化时对目标函数值 \$c\_0\$、动力回收量 \$W\_{gt}\$

及热回收量  $Ex_H$  的影响。

$$(A) (T_2=610\text{ }^\circ\text{C})$$

$$(B) (P_2=0.24\text{ MPa})$$

表 1 优化计算中有关烟气参数

烟机进口温度 $T_2$ , $^\circ\text{C}$	610.0
烟机进口压力 $P_2$ , MPa	0.24
烟机出口压力 $P_3$ , MPa	0.11
烟气比热 $C_{pg}$ , $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	1.17
烟气绝热指数 $\gamma_g$	1.33
烟气分子量 $M$	29.0
烟气流量 $m_g$ , $\text{kg}/\text{s}$	44.5

表 2 优化结果及能量回收情况

烟机出口温度 $T_3$ , $^\circ\text{C}$	485.0
余热锅炉排气温度 $T_4$ , $^\circ\text{C}$	205.0
动力回收, kW	6473.0
热回收, kW	6282.0
发生蒸汽量 $\text{kg}/\text{s}$	4.975
待回收价 $c_o$ , $\text{¥}/\text{MJ}$	0.0783

从图 3 可以看出, 烟机入口压力愈高, 所回收的功愈多, 虽然热回收量略有减少, 但再生烟气待回收价  $c_o$  值趋于增大, 说明烟气能量回收的价值愈大; 随着烟机入口温度的升高, 所回收的功及热均增加,  $c_o$  值也趋于增大, 反映出能量回收潜力及回收量越大。由于反再子系统与能量回收子系统相互关联、相互制约, 全局系统的优化应该包含反再子系统在内, 将再生温度与再生压力作为主子系统优化的决策变量, 通过子系统间优化的协调使整个系统的经济效益最大。不过与烟机进口温度、压力相关联的再生器温度和压力要受生产方案、工艺条件、两器压力平衡及主分馏塔操作条件等因数制约, 在实际生产中, 随着再生压力的升高, 主风机耗功增加, 但烟机回收产功量同时增多。在将烟气近似作为理想气体的前提下, 当烟机效率一定时, 入口压力愈高, 则排气温度愈低, 尽管余热锅炉热回收量趋于减少, 但因烟机回收高价值的功增多, 正如图 3(A) 所示的烟气能量回收系统经济性愈好。同样的, 再生压力愈高, 主分馏塔顶压力相应增大, 则压缩机因压缩比相对降低所耗功减少, 但压力升高后对分馏塔操作的影响有待进一步考证。通过装置内单元间相互权衡寻求最佳的再生温度与压力是下一步工作的重点。

## 6 结论

从以上催化裂化烟气能量回收系统的经济分析优化研究可以得出以下结论:

(1) 通过对催化裂化烟气能量回收系统的分析、优化结果表明, 双子系统策略方法对能量系统的分析优化是可行的, 优化结果对系统的设计优化及操作优化有一定的指导作用。

(2) 在再生温度与再生压力一定的条件下, 通过烟机出口温度与余热锅炉排气温度的权衡可求得能量回收子系统最大的回收经济效益。

(3) 随再生温度、压力的升高, 烟气潜在的回收价值增大, 以此更有利于烟气能量的回收。

### 符号说明

$c$  价,  $\text{¥}/\text{MJ}$   
 $C$  比热, 费用流  
 $D$  损耗  
 $Ex$  , MJ  
 $e_x$  比,  $\text{MJ}/\text{kg}$   
 $h$  比焓,  $\text{MJ}/\text{kg}$   
 $W$  动力, 电  
 $Z$  费用平衡中投资费,  $\text{¥}$   
 $\epsilon$  能级系统  
 $T$  温度, K  
 $P$  压力, MPa

下标:

$g$  烟气  
 $O$  待回收  
 $pow$  动力  
 $sh$  过热蒸汽  
 $st$  蒸汽

上标:

\* 相应变量单位时间流率

### 参考文献

- 1 Hua B, et al A new exergoeconomic approach for analysis optimization of energy systems. Energy-The International Journal, 1997, 22 (11): 1071
- 2 陈清林等. 能量系统分析优化中排弃计价探讨. 热能动力工程. 1998, No. 6
- 3 Valero A, et al CGAM Problem: definition and conventional solution. Energy-The International Journal, 1994, 19(3): 279
- 4 何立人. 催化裂化烟气能量回收系统分析. 炼油设计, 1985 (3).

discussion is conducted of the cylindrical fins when the entropy generation attained a minimum value under forced convection conditions. **Key words:** fin, entropy generation, irreversibility

催化裂化再生烟气能量回收系统的经济优化 = **Exergoeconomic Optimization of a Catalytic Cracking Regeneration Flue-gas Energy Recovery System** [刊, 中] / Chen Qinglin, Hua Ben (South China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 20 ~ 23

By the use of the binary sub-system method of an energy system an exergoeconomic analysis and optimization is conducted of a flue-gas energy recovery system. Under the condition that the regeneration flue-gas physical parameters are constant the maximum economic benefits of recovery as a result of the optimum distribution of energy recovery quantity and heat recovery rate within the system are designated as the system optimization target. In addition, on the basis of a given economic model an optimization is performed of a representative flue-gas energy recovery system. Thereupon, obtained are the optimum design operation parameters when the system enjoys the maximum economic benefits. The optimization results can serve as a useful guide during the optimization design and operation of flue-gas energy recovery systems. **Key words:** fluid catalytic cracking, exergoeconomics, system optimization

舰船用冷凝器冷却管腐蚀寿命的可靠性探讨 = **A Reliability Study of the Cooling Tube Corrosion Life of a Naval Condenser** [刊, 中] / Cha Changsong, Hu Deming, Xu Yigui (Resident Military Representative Office of No. 425 Works) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 24 ~ 26

Local corrosion constitutes a major failure mode of naval condenser cooling tubes. The reliability life calculation of such tubes pertains to a maximal value problem. Based on accumulated corrosion data and the analytical report on naval condenser cooling tubes the authors have set up a reliability mathematical model for Bfe 30-1-1 cooling tube corrosion life assessment. The reliable service life of the main condenser cooling tubes has also been predicted. **Key words:** reliability, condenser, cooling tube, corrosion life, local corrosion

柴—燃交替使用动力装置(CODOG)的实验研究 = **Experimental Study of a Combined Diesel or Gas Turbine (CODOG) Power Plant** [刊, 中] / Zhang Biao, Wang Chuanpu, (Harbin Engineering University) et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 27 ~ 29

On the basis of research and development of a combined diesel or gas turbine (CODOG) power plant test rig an experimental study is conducted of the effect of such a variety of factors as load, diesel engine throttle speed and S.S.S clutch damping on the diesel and gas turbine switch-over process. As a result, some meaningful conclusions have been obtained. **Key words:** CODOG power plant, S.S.S clutch, dynamic process, experimental study

垂直上升管内气水两相流动截面含气率的测量 = **The Measurement of Void Fraction of a Two-phase Flow in Vertical Riser Tubes** [刊, 中] / Cai Jiyong, Chen Tingkuan, Ye Qiang (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 29 ~ 33

The void fraction of gas-water two-phase flow in a vertical riser tube under bubble and slug flow conditions is measured by the use of a combination horizontal-riser tube method. The experimental test results are forecast using a theoretical model. The forecast values agree well with those of experimental results. This proves that the above-mentioned measurement method is a simple, accurate and feasible one. **Key words:** gas-water two-phase flow, void fraction, combination method, vertical riser tube, measurement

油页岩循环流化床锅炉返料系统调节特性试验研究 = **An Experimental Investigation of the Material Return System Regulating Characteristics of a Oil Shale Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 中] / Jiang Xiumin