

工艺与设备

全过程系统用能分析与调优

杨万宏¹ 孟小琼² 都 健² 朱康玲¹

(1. 华中科技大学, 武汉 430074; 2. 大连理工大学化工系统工程研究所, 大连 116012)

摘要:大规模化工系统工序多, 物流多, 能耗大, 用能状况复杂, 其节能改造是过程系统热集成的难点。应用全过程系统热集成技术, 对某一大规模化工系统的总体用能状况进行了分析, 确定了系统的用能“瓶颈”, 并利用用能一致性原则对其“瓶颈”即反应器部分进行改造, 通过改变公用工程使用状况等易实施的措施, 节能可达 30%。

关键词:节能; 热集成; 大规模化工系统

中图分类号: TQ021

文献标识码: A

Analysis and optimization of energy for total process system

YANG Wan-Hong¹, MENG Xiao-qiong², DU Jian², ZHU Kang-lin¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Institute of Process Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

Abstract: A large scale chemical system is difficult to carry out energy integration because of excessive working procedures and complicated energy using condition, and energy-saving is a hard problem in heat integration of process system. A large scale chemical system is analyzed in implementation of process energy integration techniques. Based on the location of the “bottle-neck”, an effective designing method has been put forward which would be involved in the modifications of the “bottle-neck” and conditions of the public utilities in the chemical system. 30% of energy can be saved. And the plan is very applicable because of no big change in equipment required.

Key words: energy-saving; heat integration; large scale chemical system

能源作为经济发展的最基本的推动力, 一直是人们关注的焦点。20 世纪 70 年代的能源危机, 使得人们开始对现有的耗能大、能量利用率低的化工产业进行了节能初步改造^[1]。对于化工系统的节能改造, 目前普遍存在着两种途径: 一种是在不改变系统原流程的基础上, 对现有能量进行系统集成, 对其中能量匹配不合理的地方进行优化; 另一种是对原流程进行工艺改进, 使其能量得到最大程度的利用。目前的节能改造主要集中在对原流程、原用能状况进行大幅度改进, 存在着投资大、不易实施的困难。

化工厂中一般都存在着多种品位的公用工程^[2], 且价格一般相差很大。以往的节能一般只着眼于总的公用工程的能量负荷, 而未充分考虑不同温位能量负荷如何与不同品位公用工程合理匹配问题, 降低所用公用工程的品位, 达到所需的供能要

求, 从而降低操作成本, 是化工系统节能的一个主面。

对于大规模化工系统, 存在工序多、物流多、能耗大、用能状况复杂等特点, 其节能改造策略是过程系统热集成的难点。本文应用全过程系统热集成技术^[3,4], 首先对大规模化工系统的总体用能状况进行操作型夹点分析, 确定系统的用能“瓶颈”, 并对其“瓶颈”部分进行局部改造, 改变了公用工程使用状况, 然后对改造后的流程进行设计型计算, 提出了相应的改造方案, 该方案不但节能效果明显, 而且原流程工艺变化幅度小, 易于实施。

1 系统用能分析

1.1 系统描述

本文中所研究的某化工系统具有工序多、物流多、公用工程类别多、耗能大等特点。整个装置由 9

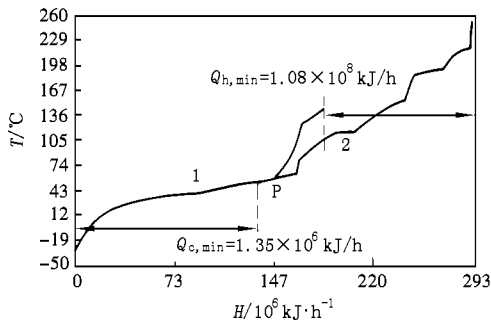
收稿日期: 2002-06-04

作者简介: 杨万宏, 男, 1963 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事聚氨酯技术开发与应用研究; 朱康玲, 女, 1963 年生, 硕士, 副教授, 导师, 主要从事化学工程与工艺方面的教学和科研工作。

个工序组成,包含 81 股主要换热物流;4 种热公用工程:1.9 s 蒸汽(132℃)、5 s 蒸汽(150℃)、导热油(230℃)、30 s 蒸汽(235℃);3 种冷公用工程:循环水(32~38℃)、冷冻循环水(5~10℃)、冷剂 R134(-25℃)。

1.2 系统用能分析

首先采用单一传热温差法^[5]对原系统的用能状况进行了分析,可以得到冷、热物流组合曲线^[6],如图 1。



1—热物流组合曲线;2—冷物流组合曲线

图 1 原系统冷、热流股组合曲线

从图 1 可以看出,该装置现在的冷、热公用工程用量分别为 1.08×10^8 和 1.35×10^8 kJ/h。夹点温度(见图 1 中“P”处)为 63.5℃,且该系统的热回收温差(HRAT)为 41.6℃,根据我们对化工传热设备的设计经验,本系统的传热温差过大,这样的设计虽然能够降低设备的传热面积,也没有违背夹点 3 条原则^[1],但提高了夹点温度,限制了可回收能量的再利用,表 1 是对于系统在不同的 HRAT 下公用工程用量的预测。

表 1 不同最小传热温差下公用工程用量

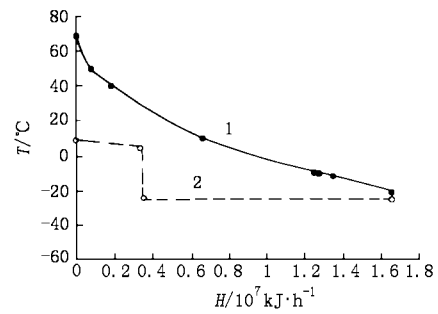
系统的热回收温差/℃	20	30	41.6	50
最小热公用工程用量/ 10^8 kJ·h ⁻¹	0.788	0.955	1.080	1.160
最小冷公用工程用量/ 10^8 kJ·h ⁻¹	1.043	1.218	1.348	1.424

从表 1 中我们可以看出,如果将系统的传热温差降低至 20~30℃,此时热公用工程用量由 1.08×10^8 kJ/h 降至 0.88×10^8 kJ/h,冷公用工程用量由 1.35×10^8 kJ/h 降至 1.13×10^6 kJ/h,节能可达 20% 左右。此时系统的夹点温度会相应的由 63.5℃ 降低至 57℃ 左右。

1.3 系统公用工程使用状况

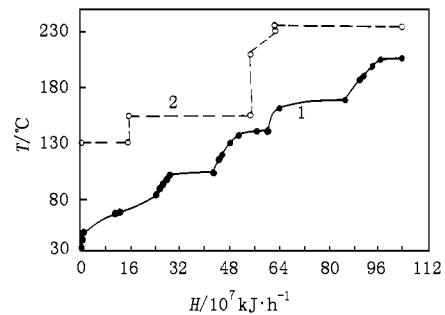
对于原流程中公用工程的使用情况可以采用分离的组合曲线进行分析,图 2 和图 3 可得到较为直

观的表示。



1—冷剂子系统过程;2—冷剂公用工程

图 2 冷剂子系统分离组合曲线



1—加热蒸汽子系统过程;2—加热公用工程

图 3 蒸汽子系统分离组合曲线

由图 2 中可以看到,该子系统有一部分热物流是由高品位的冷剂冷却的,这部分流股匹配换热的传热温差很大,这有利于流股换热,减少传热面积,从而降低设备投资费用;但较大的传热温差必然加大系统传热过程的有效能损失,需要外界为系统提供更多的、品位更高的能量驱动传热过程。通过调整该子系统的传热温差,可以用低品位的冷剂(例如用冷冻水来代替部分 R143a)来冷却和冷凝一部分物流,从而节省高品位的冷剂。在确保一定 ΔT_{min} (最小传热温差)的前提下,可节省高品位的冷剂 3.12×10^6 kJ/h,降低了公用工程的费用。

由图 3 可以看出,该子系统有一部分冷物流是由高品位的蒸汽加热的,平均传热温差达到了 55℃ 左右,大大提高了整个系统的传热温差,而且使得热公用工程的费用大大增加,造成了费用上的较大的浪费。通过调整该子系统的传热温差,可以用低品位的加热蒸汽或热工艺物流来加热,从而节省高品位的蒸汽。在确保一定的 HRAT 的前提下,初步用低品位蒸汽(1.9 s)来代替高品位蒸汽(5 s)来承担 2.97×10^7 kJ/h 的负荷,节省 5 s 蒸汽 13 996.18

kg/h,降低热公用工程费用。

2 系统节能改造

通过对现有系统进行用能分析和诊断,系统虽然已经进行了一定量的热量集成,但仍然存在许多用能不合理的方面,其中反应工序和盐水处理工序存在着较大的节能潜力,是节能改造的“瓶颈”所在。

(1) 反应工序

原料在反应釜 R2001、R2002、R2003、R2004 中的反应为吸热反应,通过 5 s 蒸汽冷凝获得反应所需的热量,4 个反应釜温度依次升高,从而确保产品的收率。反应工序的流程如图 4 所示。

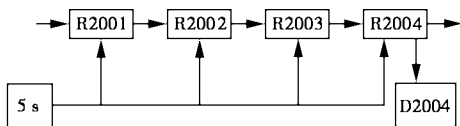


图 4 反应工序流程图

(2) 废水处理工序

该工序主要是回收废水中的有机物,使废水达到环保要求的排放标准。它属于一个用能的大户,废水处理工序流程如图 5 所示。

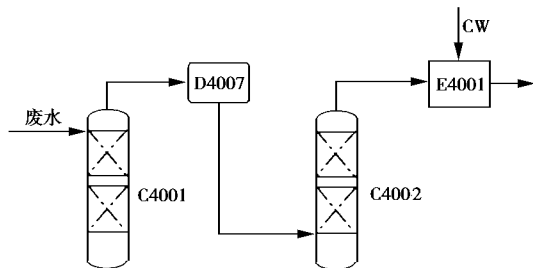


图 5 废水处理工序流程图

在上述两个工序的节能改造中,反应器是节能的关键所在。反应器将原料转化为所需产品的同时还伴有能量的变化。对于放热反应,是将系统的化学能转化为热能,放出热量;对于吸热反应,是将外界提供的热量转化为系统的化学能,需要吸收热量。所以,利用用能一致性原则^[7,8],可以将反应器当作一条冷或热的工艺流股,与换热器网络中的冷、热流股一样,参与整个系统的用能匹配。由于反应器是工艺的核心部分,一般不可能通过反应器条件,如选择性、催化剂效率来追求用能的优化,所以在此讨论的是给定工艺条件下,反应器与其他用能系统的集成。在用能一致性分析之后,作为全系统设计变量,

分析反应器条件与全系统能量集成的关系,为保证反应在一定的温度范围内以一定的速度进行,一般需要通过冷却器取走放热反应的反应热或通过加热器提供吸热反应所需的反应热。对于一台放热反应器来说,即相当于一条热的流股。如图 6 所示的一台放热反应换热器的能量变化。对于一个吸热反应换热器,它在 $T-H$ 图上则可用图 7 表示。

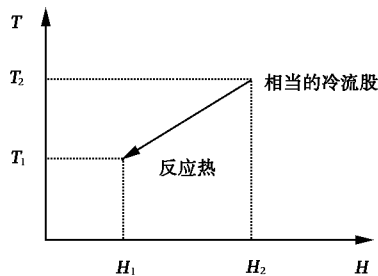


图 6 放热反应器的温焓图

图 6 中 T_1 表示反应器入口流股的温度, T_2 表示反应器出口流股的温度, 线段 H_1H_2 即为放热反应放出的热量。

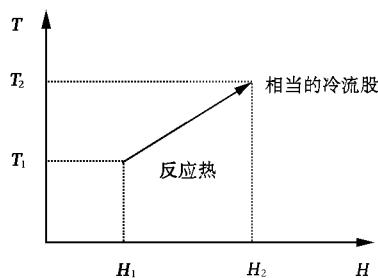


图 7 吸热反应器的温焓图

图 7 中 T_1 表示反应器入口流股的温度, T_2 表示反应器出口流股的温度, 线段 H_1H_2 即为吸热反应吸收的热量。

对于整个系统热集成而言,放热反应器集成于夹点上方,吸热反应器热集成于夹点下方。利用总组合曲线,可以将与反应器有关的流股(相当于冷、热流股),与其余部分的总组合曲线匹配,来参与全过程的能量集成,以确定反应器的适宜匹配问题。

在化工过程系统中,能量密集型的单元除了反应器和燃烧炉外,另一个重要的单元就是精馏塔。它的能耗在整个系统中占有很大的比重,因而对于塔的用能情况进行深入的分析,对于系统的节能是有较大意义的。尤其是对于塔顶蒸汽以及塔底再沸器物流的研究,可以明显的降低公用工程费用。

利用上面介绍的能量一致性原则,可以将需要加热的反应器 R2001、R2002、R2003、R2004 虚拟为 4 个需要加热的冷流股 C1、C2、C3、C4,以上述工序 1 和工序 2 为系统,收集物流数据如表 2,其总组合曲线见图 8。

表 2 物流数据表

名称	质量流量/ kg·h ⁻¹	热负荷/ 10 ⁶ kJ·h ⁻¹	T ₂ / ℃	T ₁ / ℃
C1 R2001 反应物流	9380	19.56	50	85
C2 R2002 反应物流	658	1.34	85	95
C3 R2003 反应物流	340	0.70	95	100
C4 R2004 反应物流	370	0.74	100	105
H1 C4002 塔顶蒸汽	16000	17.48	65.5	61.0

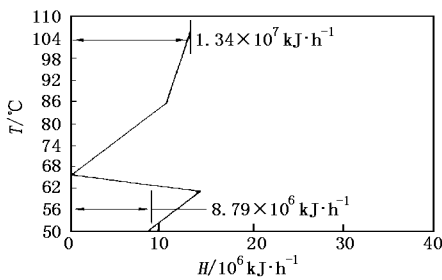


图 8 总组合曲线图

由图 8 可知夹点温度为 65℃,C1 为穿越夹点的冷流股,即吸热反应器 R2001 的温度穿过了夹点,并未完全置于夹点以下,有热流穿越夹点,其穿越夹点的热量为 1.12×10^7 kJ/h,是一个节能的关键点。然后,我们通过分析可知,热流股 H1 的温位离夹点较近,热负荷也很大,完全通过冷公用工程(CW)冷却,既耗费了公用工程,而且本身的热能没有得到有效利用,没有达到一个理想的用能状况。但对于现有的用能状况,对其进行匹配上的改进是没有多大可能的,所以拟进行工艺上的改进。通过利用流程模拟软件 Aspen Plus 进行模拟计算,将塔 C4001 的塔顶蒸汽直接用来加热反应器 R2001,完全能为其提供所需的能量,节约 5 s 蒸汽 9 386.00 kg/h。塔顶物流传递热量至 R2001 的同时自身液化,接着被塔 C4002 的塔底釜液在换热器 E4013 中加热至 130℃ 以上,作为塔 C4002 中部进料。对塔 C4002 加压,使其塔顶蒸汽温度可以达到 125℃ 左右,可以作为塔 C4001 的塔底再沸器的热源,此时就可以将塔顶冷却器 E4001 去掉,回收利用热负荷 1.50×10^7 kJ/h。鉴于以上的分析,对工序 1 和工序 2 的用能状况作

了一些改动,其具体流程见图 9。

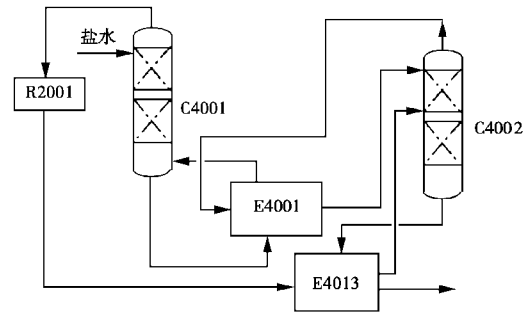


图 9 改造后流程图

3 结论

根据对该工厂用能状况的分析,对该系统可以得到以下结论:

(1) 调整现有物流匹配中传热温差过大的流股,降低系统的热夹点温度,从而可以节能约 2.5×10^7 kJ/h。

(2) 用较低品位的公用工程来代替相对高品位的公用工程,可降低公用工程的费用,可节能高品位的冷剂 3.13×10^7 kJ/h,节省高品位蒸汽(5 s) 2.97×10^7 kJ/h。

(3) 通过反应器和废水处理工序的小幅改进,可以节能 1.67×10^7 kJ/h,投资少,见效大。

(4) 本文所采用的方法,对其他大规模化工系统的节能改造具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 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
- [2] 陈保东, 沈玉英, 陆钟武. 物流匹配分类与公用工程关系[J]. 石油化学高等学校学报, 1999, 12(1): 64 ~ 68
- [3] Francois Marechal, Georges Heyen, et al. Energy savings in methanol synthesis: Use of heat Integration and simulation[J]. Computers & Chemical Engineer, 1997, 21(Supplement): 511 ~ 516
- [4] Mubarak Ebrahim, Kawari A I. Pinch technology: an efficient tool for chemical-plant energy and capital-cost saving [J]. Applied Energy, 2000, 65(1 ~ 4): 45 ~ 49
- [5] 俞红梅, 等. MTBE 合成与裂解联合装置的用能一致性[J]. 化学工程, 1998, 26(6): 52 ~ 58
- [6] 冯霄, 李勤凌. 化工节能原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998. 180 ~ 194
- [7] Linhoff B, Mason D R, Wardel I. Understanding heat exchanger networks [J]. Computer & Chem Engng, 1979, 3: 295
- [8] Yu H M, Yao P J. In: Wang S P, Tan Y K. Proceeding of the 2nd international symposium on heat transfer enhancement and conse-rvation [C]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1997. 237 ■