

信息技术应用

基于最佳 ΔT_{\min} 的催化裂化装置 低温余热回收网络设计

薛建良, 沈潺潺, 李石, 赵东风

(中国石油大学(华东)化学工程学院环境与安全工程系, 山东 青岛 266555)

摘要: 为使石化企业大量的低温余热得到充分利用, 以某 12 万 t/a 加工重油的催化裂化中试装置单元存在的低温余热作为研究对象, 采用问题表格法讨论了该系统最小传热温差 ΔT_{\min} 对最小公用工程加热负荷 $Q_{H,\min}$ 的影响, 得到最佳的 ΔT_{\min} 为 15℃, 在此 ΔT_{\min} 下, 该过程最小公用工程加热负荷 $Q_{H,\min}$ 为 409 364.10 kW, 所需的最小公用工程冷却负荷 $Q_{C,\min}$ 为 163 763.95 kW。介绍了夹点技术, 换热网络设计采用夹点之上的设计和夹点之下 2 步分别优化, 并得到最终的综合换热网络。

关键词: 低温余热; 换热网络; 夹点技术; 问题表格法

中图分类号: TE974.14

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)11-0082-04

Design of low temperature heat recovery network of catalytic cracking unit based on the best ΔT_{\min}

XUE Jian-liang, SHEN Chan-chan, LI Shi, ZHAO Dong-feng

(Department of Environmental and Safety Engineering, College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: To make full use of much low temperature heat in petrochemical enterprises, Problem Table Algorithm is used to discuss the effect of the minimum temperature difference (ΔT_{\min}) on the minimum utility heating load $Q_{H,\min}$ by taking a processing of heavy oil catalytic cracking unit with working ability of 12 million tons/year as the research object. The result shows that the optimum ΔT_{\min} is 15℃. With the optimum ΔT_{\min} (15℃), the minimum utility heating load $Q_{H,\min}$ is 409 364.10 kW and the minimum cooling load utility $Q_{C,\min}$ is 163 763.95 kW. According to the pinch technology which includes two steps (up pinch and below pinch), heat exchanger network is designed and the final integrated heat exchanger network is obtained.

Key words: low temperature heat; heat transfer network; pinch technology; problem table

随着经济发展对能源需求的不断增长、国际原油价格不断攀升、全球能源市场供需矛盾的加剧, 以及我国石油资源对外依存度的不断提高, 能源安全问题日益突出^[1], 我国各大石化企业为提高国际竞争力, 掀起新一轮节能降耗、挖潜增效的高潮, 通过热联合等技术措施, 能耗指标大幅降低^[2], 但是同国外具有先进水平的同行相比, 我国石油化工工业在节能方面仍有降低的空间^[3]。特别是低温热的综合优化利用方面潜力巨大^[4]。因此, 针对低温热源的节能挖潜与利用措施是提高石化企业经济效益的另一个重要的途径之一^[5]。

在最近几十年里, 国内外许多研究者致力于开发换热网络优化工作, 研究能量回收利用, 并开发了不同的优化方法^[6], 例如, 夹点设计法、双最小换热温差设计法、数学规划法、神经网络模型法等^[7-9]。在这些技术中以 Linnhoff 为首的英国帝国化学公司开发的夹点技术 (pinch technology) 最为简便、实

用^[10]。据实践和研究表明, 夹点技术对各种用能单元的换热网络的优化具有综合简单有效的特点, 具有应用前景, 因此, 在低温余热回收用能方面可借鉴使用。笔者拟采用夹点技术针对石化企业典型装置存在的低温余热进行换热网络的优化, 实现节能目的, 为石化企业低温余热换热网络的设计提供参考。

1 夹点技术及应用于低温余热回收网络必要性分析

1.1 技术理论

夹点分析方法是由 linnhoff 提出的过程系统能力综合与分析方法^[11], 在换热网络优化过程中是较为成功的方法^[12], 该方法认为热回收系统中的冷物流和热物流直接相互换热, 不足部分由公用工程提供, 当热回收达到最大程度时, 公用工程提供热量最小, 此时冷热物料间的最小允许传热温差 ΔT_{\min} 所在的位置即为夹点^[12]。夹点位置可以通过 T-H 图来

收稿日期: 2011-06-10

作者简介: 薛建良 (1983-), 男, 博士生; 赵东风 (1968-), 男, 教授, 博士生导师, 从事水污染的防治及回用科研和教学等工作, 通讯联系人,

0532-86981576, zhaodf@vip.sina.com。

描述,见图1^[13]。

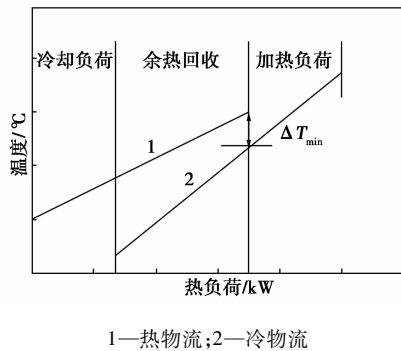


图1 T-H 夹点示意图

从图1中可以确定夹点的意义在于:(1)夹点位置为系统冷热物流间传热温差最小处,即 ΔT_{\min} ,在此限制了进一步回收系统的能量,构成了热回收的瓶颈,为更好地提高用能效率,需要从此入手。(2)夹点位置将冷热物流分开,即夹点上方为热端(通常称为“热阱”),需要加热公用工程,夹点下端为冷端(通常称为“热源”),只需要冷却工程,而位于夹点处热流量为零。故在用能回收达到最优时注意保证夹点处不能有热量穿过,同时热阱部分不能引进冷却工程,热源部分不能引进加热工程。

同时,从图1可以看出,夹点确定后,右上角表示该过程系统所需的最小公用工程加热负荷 $Q_{H,\min}$,左下角表示该过程系统所需的最小公用工程冷却负荷 $Q_{C,\min}$,中间重叠部分表示通过换热最大可回收的热量 $Q_{R,\max}$ 。

“问题表格法”(problem table algorithm)确定夹点位置是比较常见的方法,其主要步骤及说明如下:(1)将冷热物流分布标绘在垂直轴为温度的坐标轴上,由冷热物流的起始温度和目标温度构成每个温度区间作为子网络。(2)依次对每1个子网络进行热量衡算:

$$O_k = I_k - D_k$$

$$D_k = \left(\sum CP_C - \sum CP_H \right) (T_k - T_{k+1})$$

$$I_{k+1} = O_k$$

式中, D_k 为第 k 个子网络为满足热平衡需要的外加热源,正值表示需要外界供热,负值表示向外界输出热量; I_k 为由外界或其他子网络供给该子网络的热量; O_k 为第 k 子网络向外籍或其他子网络排出的热量。

(3)第1个子网络的输入热量设为零,将各个子网络的热量衡算结果计算后标注出来。(4)选取负值的 I_k 或 O_k 绝对值最大者,将其绝对值设为第1个子网络的输入热量,重新进行热量衡算。(5)热

流量为零的地方即为夹点。

在夹点理论中, ΔT_{\min} 通常在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内选择,但是 ΔT_{\min} 的确定对整个换热网络优化有非常重要的意义, ΔT_{\min} 的大小直接影响到夹点的位置,进而影响 $Q_{H,\min}$ 、 $Q_{C,\min}$ 及 $Q_{R,\max}$, 如果选择了不恰当的 ΔT_{\min} , 会导致得到的夹点位置与最优夹点位置偏离,产生完全不同的换热网络,偏离最优解,导致 $Q_{H,\min}$ 、 $Q_{C,\min}$ 偏大,从而不能达到所期望的最低费用目标^[14]。因此,在换热网络设计过程中,首先要解决最佳的最小传热温差 ΔT_{\min} 。

1.2 应用的必要性

炼化企业中存在大量的温度低于 120°C 的热量未被利用,该部分热量通常被称为低温余热^[15],此热量大部分被冷却而未被利用,即使被利用的低温余热也存在着优化回收不够的问题,一般仅限于用简易热联合手段(即单一热源对单一热阱),且存在能级匹配不合理,低温热回收不充分的现象^[4]。因此,为低温余热回收寻找优化的方法成为低温余热回收领域迫切需要解决的问题。

目前,低温热大系统的提出成为解决炼油装置低温余热利用的有效方法,可将炼油部分、生活区、储运区、公用工程等整个厂区内热源和热阱合理地结合,一起进行优化,使夹点技术作为建立低温余热回收系统方法成为可能。采用复合温焓线很繁琐,且不够准确,此时常采用问题表格法来准确计算。

2 低温余热回收系统优化分析

以某12万t/a加工重油的催化裂化中试装置单元作为研究对象。该催化裂化装置中塔顶有气、塔顶循环,产品中的汽油、柴油有被利用的低温余热,其具体参数见表1。

表1 催化裂化装置各低温热源基本参数

产品	产量/ kg·h ⁻¹	质量分 数/%	初温/ °C	终温/ °C	热负荷/ 10 ⁴ kW	热容速率/ kW·°C ⁻¹
塔顶油气	1630.5	9.86	115	40	11.00	1466.67
塔顶循环	4860.5	29.39	140	75	28.43	4373.85
汽油	5574.1	33.70	90	42	1174.57	244702.08
柴油	2210.1	13.36	140	75	30.17	4641.54

从表1中可以看出,本中试装置的重油催化裂化的低温热量非常丰富,约 1244.17×10^4 kW,其中主要以汽油和柴油低温余热为主,目前这些低温余热通过冷却水直接冷却排放,能量损失严重。

经调研发现该装置主要的热阱为原油的加热和

车间及办公室的供热,其具体参数见表 2。

表 2 冷热物流基本参数

产品	产量/ kg·h ⁻¹	初温/ °C	终温/ °C	热负荷/ 10 ⁴ kW	热容流率/ kW·°C ⁻¹
原料重油	16540.0	10	80	1255.52	179360.00
供热用水	4860.5	15	75	13.21	2201.67

2.1 最佳 ΔT_{\min} 的讨论

ΔT_{\min} 影响最终运行费用,故首先根据最小公用工程加热负荷确定最佳的 ΔT_{\min} 。针对催化裂化装置的热源和热阱特点,采用问题表计算不同 ΔT_{\min} 的最小公用工程加热负荷,计算结果见图 2。

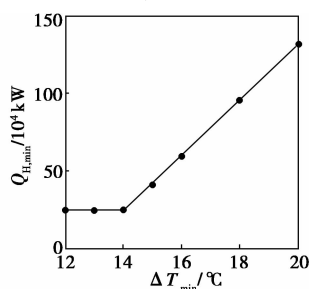


图 2 不同 ΔT_{\min} 与 $Q_{H,\min}$ 对应图

从图 2 中可以看出, ΔT_{\min} 不同,最小公用工程加热负荷 $Q_{H,\min}$ 差别很大, ΔT_{\min} 为 12 ~ 14°C 时,本系统无夹点,属于“门槛问题”,仅有最小公用工程加热负荷且均为 245 600.15 kW;当 ΔT_{\min} 为 15 ~ 20°C 时,本系统通过问题表格法可以找到夹点,且最小公用工程加热负荷 $Q_{H,\min}$ 随温度升高而增大,当 ΔT_{\min} 为 15°C 时, $Q_{H,\min}$ 为 409 364.1 kW;而 ΔT_{\min} 为 20°C 时, $Q_{H,\min}$ 可以达到 131.71 kW;而选择的 ΔT_{\min} 继续增大, $Q_{H,\min}$ 相应也增大, ΔT_{\min} 为 20°C 时, $Q_{H,\min}$ 达到 1 317 135 kW。从加热负荷影响到投资费用角度来看,本催化裂化装置单元换热网络的 ΔT_{\min} 可以选择为 15°C。

2.2 问题表格法确定夹点

采用问题表格法, ΔT_{\min} 为 15°C,对本催化装置单元进行详细计算,确定换热网络的夹点、最小公用工程加热负荷和冷却负荷等。问题表格如图 3 所示,计算结果见表 3。

从表 3 中可以看出,子网络 SN₃ 输入的热量为零,此处即为夹点,夹点处的温差热物流的温度为 90°C,冷物流的温度为 75°C,说明温度高于 90°C 的热物流的热量为可回收热量,该部分热量不可用冷却器冷却,而采用温度高于 75°C 的冷物流冷却;温度低于 75°C 冷物流无需用加热器加热,可采用温度

低于 90°C 的热物流加热。

子网络序号	冷物流 °C	冷物流温度 °C	热物流温度 °C	热物流 °C
SN ₁	125	100	140	115
SN ₂	80	75	95	90
SN ₃	75	60	75	42
SN ₄	60	27	42	40
SN ₅	27	25	15	10
SN ₆	25	15		
SN ₇	15			
SN ₈	10			

图 3 ΔT_{\min} 为 15°C 的问题表格

表 3 问题表格

子网络 序号	赤字 D_k/kW	热量/kW (无外界输入热量)		热量/kW (外界输入最小热量)	
		I_k	O_k	I_k	O_k
SN ₁	-225384.62	0.00	225384.62	409364.10	634748.72
SN ₂	-209641.03	225384.62	435025.65	634748.72	844389.75
SN ₃	844389.74	435025.65	-409364.10	844389.75	0.00
SN ₄	-1104336.97	-409364.10	694972.87	0.00	1104336.97
SN ₅	-2132033.64	694972.87	2827006.51	1104336.97	3236370.61
SN ₆	360190.00	2827006.51	2466816.51	3236370.61	2876180.61
SN ₇	1815616.67	2466816.51	651199.85	2876180.61	1060563.95
SN ₈	896800.00	651199.85	-245600.15	1060563.95	163763.95

该过程所需的最小公用工程加热负荷 $Q_{H,\min}$ 为 409 364.10 kW,所需的最小公用工程冷却负荷 $Q_{C,\min}$ 为 163 763.95 kW。

2.3 换热网络的设计

本催化裂化装置单元的换热网络设计采用夹点之上的设计和夹点之下的设计,最终综合即为整个换热网络^[16-17]。夹点之上网络系统设计的原则为:①高于 90°C 的热物流的热量全部用于加热高于 75°C 的冷物流,不设冷却器;②在满足全部使用热物流的基础上,冷物流不能满足时可采用增设加热器将其加热;③在夹点处,所有的热物流只能和热容流率比本身大或相等的冷物流匹配;④优先使用 1 股物流,用完后才能考虑下一股物流,保证所用物流的热量尽量用尽。

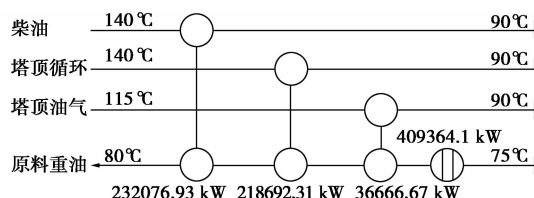


图 4 夹点之上换热网络设计图

从图 4 中可以看出,夹点之上存在 3 股热物流

和1股冷物流,3股热物流(塔顶循环、柴油和塔顶油气)可以向冷物流(原料重油)传递487 435.9 kW热量,而冷物流提高到80℃仍需要409 364.1 kW的热量,此部分热量需要提供加热器加热。因此,夹点之上需要增设1个加热器。

夹点之下网络系统设计的原则为:①低于75℃的冷物流全部用来冷却低于90℃的热物流,不设加热器;②优先使用1股物流,用完后才能考虑下一股物流,保证所用物流的热量尽量用尽;③在满足全部冷物流的基础上,热物流不能满足时可以采用增设冷却器将其冷却。夹点以下的换热网络设计见图5。

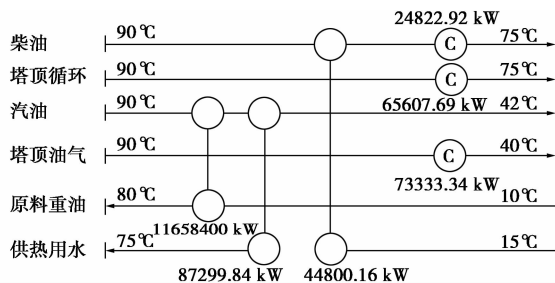


图5 夹点之下换热网络设计图

从图5中可以看出,原料重油需要11 658 400 kW的热量,此部分热量通过汽油提供;供热用水需要132 100.2 kW的热量,由汽油和柴油提供。而柴油、塔顶循环和塔顶油气仍有未被冷却掉的热量,故需要增设3个冷却器,分别为24 822.92、65 607.69 kW和73 333.34 kW,冷却负荷为163 763.95 kW。

综合图4和图5,本催化裂化装置单元在最佳 ΔT_{\min} 情况下的综合换热网络见图6所示。

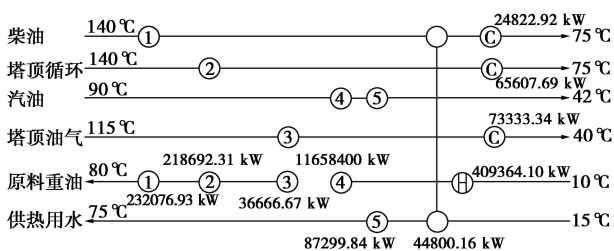


图6 综合换热网络设计图

3 结论

(1)在换热网络优化方面,夹点设计法是最为简便、实用的方法之一,而“问题表格法”确定夹点位置是比较常见的方法,对于石化企业存在着低温余热的回收,夹点设计方法是较为合适的方法之一。

(2)在夹点理论中 ΔT_{\min} 的确定对整个换热网

络优化有非常重要的意义, ΔT_{\min} 的大小直接影响到夹点的位置,进而影响 $Q_{H,\min}$ 、 $Q_{C,\min}$ 及 $Q_{R,\max}$, 关系到能否达到所期望的最低费用目标。以某12万 t/a 加工重油的催化裂化中试装置单元作为研究对象,根据“热源”、“热阱”的特点,确定出最佳的 ΔT_{\min} 为15℃。

(3)在最佳的 ΔT_{\min} 为15℃时,该过程最小公用工程加热负荷 $Q_{H,\min}$ 为409 364.10 kW,所需的最小公用工程冷却负荷 $Q_{C,\min}$ 为163 763.95 kW。

(4)根据夹点,换热网络设计采用夹点之上的设计和夹点之下2步分别优化,并得到最终的综合换热网络。

参考文献

- [1] 作浩,刘二恒,华贲. 低温热利用的新格局和系统优化策略[J]. 计算机与应用化学,2009,26(9):133-136.
- [2] 侯祥麟. 中国炼油技术汇编[M]. 2版. 北京:中国石化出版,2000:649-650.
- [3] 华贲,作浩. 炼油企业低温热大系统优化利用技术[J]. 炼油技术与工程,2007,37(12):33-38.
- [4] 施俊林. 炼厂低温热利用的实践和策略[J]. 炼油技术与工程,2009,39(4):61-64.
- [5] 高维平,刘谦,郑绪光,等. 常减压换热网络的优化节能研究[J]. 化工科技,1999,7(2):49-54.
- [6] 于春江. 换热网络优化的研究进展及前景展望[J]. 辽宁化工,39(7):766-769.
- [7] 张俊华,应启夏,黄为民. 换热器网络优化研究进展[J]. 热能动力工程,2000,15(3):201-204.
- [8] 李志红,尹清华,华贲. 换热网络最优合成研究的进展与展望[J]. 炼油设计,1997,27(3):5-10.
- [9] Gaggioli R, Sama D A, Qian S, et al. Integration of a new process into an existing site: A case study in the application of exergy analysis, journal for engineering for gas turbines and power[J]. ASME Transactions, 1991, 113(2):170-183.
- [10] Linnhoff B. The pinch design method for heat exchanger networks[J]. Chem Eng, 1983, 38(5):745-763.
- [11] Linnhoff B, Flower J R. Synthesis of heat exchanger networks[J]. AIChE J, 1978, 24(4):633-654.
- [12] 刘洪谦,麻德贤. 多夹点换热网络综合与分析[J]. 北京化工大学学报,2000,27(3):9-12.
- [13] Kemp Ian C. Ian C Kemp Pinch Analysis and Process Integration A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy[M]. Second edition. Burlington: IChemE, 2007:18.
- [14] 王利文,陈保东,王利权,等. 夹点理论及其在换热网络中的应用[J]. 辽宁石油化工大学学报,2005,25(2):54-58,62.
- [15] 阎雪峰,李同昌. 炼油厂低温余热利用的几个实例[J]. 炼油设计,2002,32(11):55-57.
- [16] 马连强,郑开学,贺鑫平,等. 利用夹点技术设计换热网络[J]. 化工设计,2005,15(6):28-31.
- [17] 詹世平. 换热网络的夹点设计法[J]. 化学工业与工程技术,1999,20(2):4-6. ■