

催化裂化全流程模拟 及低温发电技术研究

姚玉婷, 李士雨*, Sibhat Kiflegiorgis

(天津大学化工学院, 天津 300350)

摘要:应用 Aspen Plus 软件对某工厂 65 万 t/a 催化裂化装置主分馏塔和吸收稳定系统进行全流程模拟, 模拟结果与生产标定符合, 在最小换热夹点温差 20 K 时, 应用夹点技术进行分析, 温度为 363.15~393.15 K 的物流直接采用冷公用工程冷却, 浪费了大量低温热。针对主分馏塔塔顶油气的低温热, 以 R245fa 为工质进行了有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle)发电技术的模拟, 以热效率和余热利用率作为评价模型, 分析了运行参数对系统性能的影响。结果表明, 热源温度为 364.65 K、冷凝温度为 305.15 K 时, 优化的 ORC 系统循环参数是夹点温差 7 K, 最佳蒸发温度 339.15 K, 此时输出功率 485.6 kW, 热效率 5.26%, 余热回收利用率 35.6%。

关键词:催化裂化; 夹点技术; R245fa; 有机朗肯循环; 低温发电

中图分类号: TM617

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)06-0220-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.06.051

Simulation for whole fluid catalytic cracking process and study on low-temperature generation technology

YAO Yu-ting, LI Shi-yu*, Sibhat Kiflegiorgis

(School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aspen Plus software is applied to simulate entirely the main fractionating tower and absorption-stabilization system in the 650 kt/a fluid catalytic cracking (FCC) unit of a plant. The simulation results exhibit good coincidence with the factory data. After extracting data from the model, the pinch technology is applied to analyze the existing heat exchanger network (HEN) with a minimum heat transfer pinch temperature difference of 20 K. The analysis shows that a great deal of low-temperature heat has been wasted when the substance stream with a temperature of 363.15~393.15 K is cooled directly by cold utility. In the light of the low-temperature heat brought by the overhead flow from the main fractionating tower, the Organic Rankine Cycle (ORC) low-temperature generation technology is simulated by using R245fa as working fluid, and the effects of operational parameters on the performance of system are analyzed with thermal efficiency and recovery efficiency of remaindering heat as evaluation models. The result show that the output power can reach 485.6 kW, the thermal efficiency will be 5.26% and the recovery efficiency of remaindering heat can reach 35.6% when the heat source temperature and condensing temperature are 364.65 K and 305.15 K, respectively, the optimized cycle parameter of ORC system is that the pinch temperature difference is 7 K and the best evaporation temperature is 339.15 K.

Key words: fluid catalytic cracking; pinch technology; R245 fa; Organic Rankine Cycle; low-temperature generation technology

石油的加工过程按加工工序分为一次加工和二次加工, 一次加工为原油常减压蒸馏, 二次加工有催化裂化、热裂化、加氢裂化、加氧处理和气体分离等^[1]。催化裂化作为石油炼制工业中最重要二次加工过程之一, 已成为炼油企业获取化工原料的重要加工手段^[2-3]。石油石化企业既是能源供应商, 也是能耗大户, 节能降耗不但是降低成本的有效途径, 也是服从于国家、社会和谐发展的选择^[4-5]。国外催化裂化装置的能耗一般是 2 500~3 000 MJ/t, 相比之下我国 2 800~3 500 MJ/t 的能耗明显偏高^[6]。

Linnhoff 等^[7]提出了夹点技术(pinch technology)。由于催化裂化装置的复杂性, 换热网络夹点技术在国内催化裂化装置中应用较少^[8], 导致了許多不合理用能。

有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)发电系统对回收 370 K 以下的低品位能量相比以水为工质的朗肯循环具有效率高、适用性强、维修费用低等优点^[9]。热功转换技术虽然与热交换技术不具有最高的余热回收率, 但由于输出的电功是高级能量, 所以在余热回收中受到很大的重视^[10]。国外应用的 ORC 发电系统较多, 国内目前以实验研究较

收稿日期: 2017-11-22

作者简介: 姚玉婷(1993-), 女, 硕士生; 李士雨(1964-), 男, 教授, 主要研究方向为化工系统工程, 通讯联系人, shyli@tju.edu.cn。

多而应用到实际化工工业中的较少,实验的低温热源大都是学者自己设计并非工厂真实的低温热源。

本文中用 Aspen Plus 软件对实际工厂催化裂化装置进行了全流程模拟,并针对主分馏塔塔顶油气的低温能量,考察了运行参数对 ORC 系统性能的影响,为工厂以后建立低温发电装置做出参考指导。

1 主分馏塔和吸收稳定系统流程模拟

1.1 工艺流程模拟

本文中对催化裂化主分馏塔以及吸收稳定系统进行了模拟。由于反应油气中含氢、水量较高且分馏各产品沸程较宽,对主分馏塔选用 Grayson 物性方法;吸收稳定系统富气中有 H_2S 等极性分子,选用 PENG-ROB 方程。

反应油气的温度约 $500^\circ C$ 且馏程宽,含水蒸汽、可凝性轻烃类及不凝气体,工厂无法测其 TBP 数据。考虑到进入分馏塔的反应油气基本上没有发生化学变化,故按照物料平衡原则,利用产品对进入分馏塔的油气组分进行反算。模拟时,严格按照产品比例混合的分馏塔进料经分离后,因模型选择及计算精度要求差异,其模拟产品分布难以与标定值相吻合。因此在保持物料平衡的原则下对反应油气组成进行微调,调整前后参数见表 1。油品利用虚拟组分法恩氏蒸馏温度进行模拟。

表 1 产品流量及模拟进料流量表 kg/h

物料名称	实际产品质量流量	模拟进料质量流量
液化石油	3785	3785
干气	10933	10933
汽油	45000	45000
柴油	13000	12000
油浆	21000	22000
回炼油	3060	3060
水	9459	9459
总流量	106237	106237

1.2 模型验证

产品主要有干气、液化石油、汽油、柴油、回炼油、油浆及含硫污水。干气中 C_3 及 C_3 以上组分摩尔分数为 0.4%, 小于 1%, 符合要求。液化石油气中 CH_4 及 C_2 组分摩尔分数 $< 0.5\%$, 液化石油气中大于 C_5 的组分摩尔分数 $< 1\%$, 符合要求。

各油品模拟结果,除粗汽油初馏点模拟值 $-1.89^\circ C$,与标定值 $31.4^\circ C$ 相差较大外,其他油品数

值均符合要求。这是由于粗汽油中有易挥发组分,在采样分析时容易挥发而导致恩氏蒸馏数据出现偏差。

2 工厂现行换热网络分析

2.1 流股提取

在 Aspen Plus 模型的基础上对全流程换热流股进行提取。提取共计 7 组冷流股和 6 组热流股。利用夹点技术在最小换热夹点温差 $\Delta T_{\min} = 20^\circ C$ 时,绘制得总组合曲线如图 1 所示。

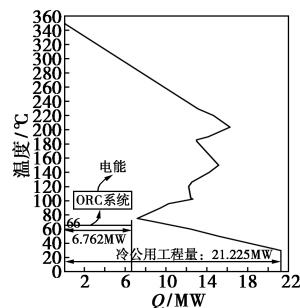


图 1 催化裂化全流程换热网络总组合曲线

2.2 夹点分析

从图 1 中可知,夹点温度为 $360^\circ C$,热公用工程目标为 0,冷公用工程目标为 21 225 kW。工厂实际未使用热公用工程,已达目标,没有跨越夹点换热,而冷公用工程却有一定的节能潜力。针对 T201 塔顶油气 $91.5^\circ C$ 的低温热,提出通过有机朗肯循环低温发电来将余热转化为高级能量的方案,从图 1 分析知,若 ORC 系统蒸发温度为 $66^\circ C$ 时,则工质蒸发吸热 6 762 kW,相当于为流程提供了冷公用工程并输出电功。针对此方案,本文中应用 Aspen Plus 软件对 ORC 系统进行模拟,考察循环参数对低温发电系统的影响。

3 ORC 低温发电系统模拟分析

3.1 ORC 系统流程简介及建模

ORC 系统包括蒸发换热器、透平及发电机组、冷凝器和工质泵,如图 2 所示。低温热源和工质在

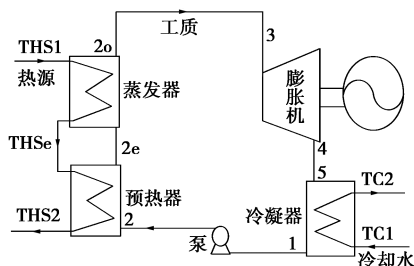


图 2 ORC 系统流程

预热器、蒸发器处进行换热,工质蒸发为蒸汽,通过透平转动带动发电机进行发电,然后工质乏气进入冷凝器被冷源冷却,再由泵加压输送至蒸发换热器,完成一次朗肯循环。

本文中低温热源初温是 364.65 K,流量是 21.90 kg/s。冷源采用冷却水,初温为 293.15 K。有学者研究得有机朗肯循环中泵的实际运行效率一般在 0.6 以下^[11],所以本文中设定为 0.6;膨胀机等熵效率在 0.67~0.71^[12],定为 0.7,机械效率定为 0.9。本文中忽略管路输送引起的损失。工质选择单工质 R245fa。据文献[13]知工质 R245fa 在有机朗肯循环中具有良好的环保性能、较高的热效率和低的总不可逆损失,所以本文中选定其作为工质。

3.2 ORC 系统评价模型

本文中余热源固定,通过系统热效率和余热回收利用率来评价系统的性能。设余热源所含能量为 Q_H ,工质吸热蒸发所吸收能量为 Q_1 ,膨胀做功为 W_{comp} ,工质泵所耗功为 W_{pw} ,冷却水泵所耗功 W_c 。

系统净输出功率:

$$W_n = W_{comp} - W_{pw} - W_c$$

系统热效率:

$$\eta_n = W_n / Q_1$$

余热回收理论效率:

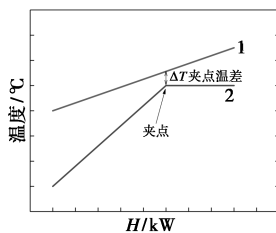
$$\psi = 1 - [T_0 / (T_{Hsl} - T_0)] \ln(T_{Hsl} / T_0), T_0 = 288.15 \text{ K}$$

余热回收利用率:

$$\eta_{EX} = W_n / (\psi * Q_H)$$

3.3 采用夹点理论对换热器的分析

换热器是 ORC 系统中产生不可逆损失的主要设备,其夹点温差是决定不可逆损失的最主要参数^[14]。对夹点温差的研究及优化非常重要。如图 3 所示,热源和工质换热时,工质存在相变,在发生相变时的温度是热源和工质之间的最小温差,称为换热器的夹点温差^[15]。夹点温差大会导致蒸发温度较低,增大热源和工质之间的换热温差,不可逆损失增大,同时工质流量会减少,膨胀输出功就会减



1—热源温焓曲线;2—有机工质温焓曲线

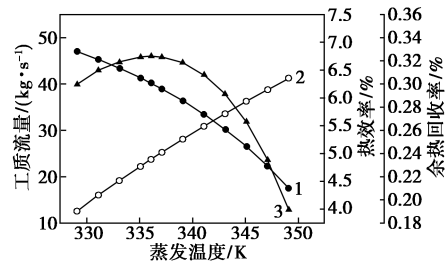
图 3 工质蒸发过程夹点温差分析

小;而夹点温差过小导致换热器面积太大,设备费用增大。可见,优化夹点温差是必要的^[16-17]。

3.4 ORC 系统运行参数模拟分析

有机朗肯循环的性能不仅与有机工质的热物性相关,而且与蒸发温度、冷凝温度、过热度、夹点温差等循环参数有关。

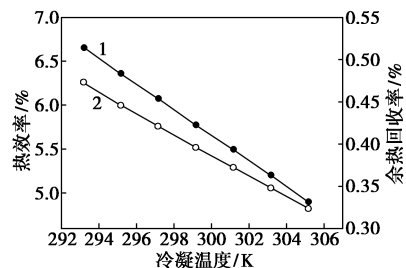
图 4 是在蒸发器夹点温差为 10 K,过热度为 0 K,冷凝温度为 305.15 K 的工况下,改变工质蒸发温度进行的模拟分析。ORC 系统的热效率随蒸发温度升高而单调增大,但存在最佳蒸发温度使得系统的余热回收利用率最大,这是由于随着蒸发温度增大,压力也增大,一方面膨胀机入口温度压力增大,工质焓降增加;另一方面工质蒸发潜热减小,蒸发器热负荷减小,工质流量减少。工质的焓降增加和流量减少两者变化相反,导致系统的输出功率随蒸发温度先增大后减小。模拟中发现 335.15、337.15 K 2 个蒸发温度下余热回收率很接近,取 336.15 K 试验,余热回收率更高,所以认为 336.15 K 为最佳蒸发温度。



1—工质流量;2—热效率;3—余热回收率

图 4 蒸发温度对 ORC 系统性能的影响

图 5 是根据蒸发温度对系统的影响,在选定最佳蒸发温度 336.15 K,蒸发器夹点温差 10 K,过热度 0 K,工质流量 40.16 kg/s 的工况下,改变工质冷凝温度进行的模拟分析。ORC 系统热效率和余热利用率随冷凝温度的增大而减小。冷凝温度增大,膨胀机背压增大,促使工质的膨胀焓降减小,进而减

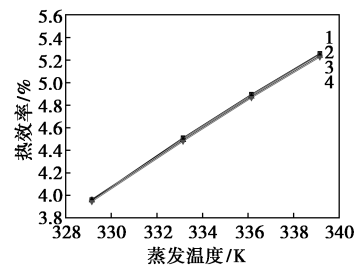


1—热效率;2—余热回收率

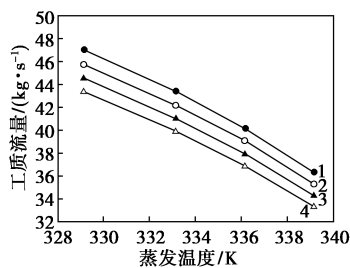
图 5 冷凝温度对 ORC 系统性能的影响

小了系统输出功率,从而系统余热回收利用率减少。预热器的负荷随冷凝温度的增大而减小,但减小幅度小于膨胀做功的减小幅度,从而热效率仍表现为减小。由于化工厂中冷却介质一般为水或空气,温度不会太低,假设冷却水 293.15 K,换热温差 5 K,温升 7 K,所以冷凝温度定为 305.15 K 比较合适。

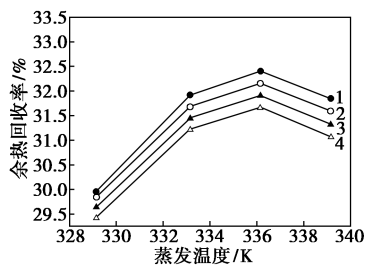
图 6 是在冷凝温度为 305.15 K,蒸发器夹点温差为 10 K 的工况下,过热度分别选 0、5、10、15 K 进行的模拟。由图 6(a)可知,同一蒸发温度下,增大过热度并不能使得系统热效率提高。由于低温余热源最高温度和能量是固定的,增大过热度使得增大了工质的膨胀焓降,但为了维持夹点温差 10 K,过热度的增加使得工质流量显著减少,如图 6(b);导致输出功率和余热回收利用率降低,如图 6(c)。另外,从 3 个图中可看出不同过热度最佳蒸发温度没有发生变化。因此,该 ORC 系统不需要过热,工质以饱和状态进入膨胀机能获得较好的系统性能。



(a)



(b)

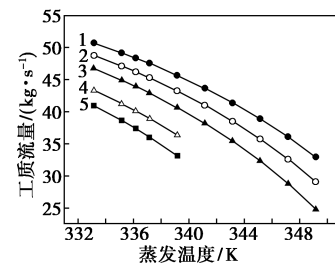


(c)

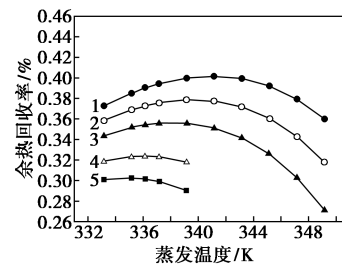
过热度: 1—0 K; 2—5 K; 3—10 K; 4—15 K

图 6 过热度对系统性能的影响

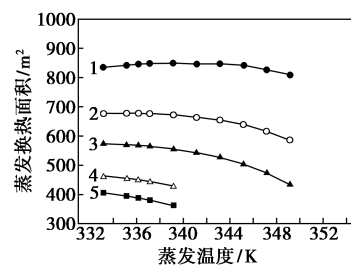
图 7 是在冷凝温度为 305.15 K,过热度为 0 K 工况下,在不同蒸发温度时选夹点温差为 3、5、10、12 K 进行的模拟分析。由于热源的限制,当夹点温差较大时限制了蒸发温度的升高,所以 10、12 K 时数据点有限。图 7(a)显示不同夹点温差随蒸发温度的变化趋势相同,夹点温差增大,工质流量减少。图 7(b)显示同一蒸发温度,夹点温差越小,余热回收率越大;不同夹点温差时,余热回收率均随蒸发温度的增大先增大后减小,均存在最佳蒸发温度,但不同夹点温差 ORC 系统的最佳蒸发温度不同,随夹点温差的增大,最佳蒸发温度呈减小趋势。



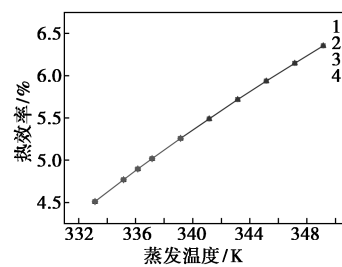
(a)



(b)



(c)



(d)

ΔT : 1—3 K; 2—5 K; 3—7 K; 4—10 K; 5—12 K

图 7 蒸发器夹点温差对 ORC 系统性能的影响

图 7(c) 显示同一蒸发温度, 夹点温差越小, 蒸发器换热面积越大, 夹点温差为 3 K 时, 蒸发器换热面积远大于其他夹点温差; 不同夹点温差随蒸发温度的增大蒸发器换热面积有减小的趋势, 但不明显。图 7(d) 显示同一蒸发温度下不同夹点温差对应的热效率几乎不变。

综合工质流量、余热回收率和蒸发器换热面积的影响, 夹点温差 7 K 较为合适, 蒸发换热面积按 600 m² 设计。

4 结论

(1) 对工厂 65 万 t/a 的催化裂化装置主分馏塔和吸收稳定系统应用 Aspen Plus 软件进行全流程模拟, 模拟结果与生产标定符合。

(2) 应用夹点技术对全流程换热网络进行分析, 冷公用工程具有较大的节能潜力, 尤其主分馏塔塔顶油气直接使用冷公用工程浪费了大量低温热量。

(3) 针对主分馏塔塔顶油气的低温段热量, 以 R245fa 为工质进行了 ORC 系统低温发电模拟, 结合夹点技术, 以热效率和余热利用率作为评价模型, 分析此发电系统存在最佳的蒸发温度, 在最佳蒸发温度 339.15 K 时, 较优的 ORC 系统循环参数是蒸发器夹点温差为 7 K, 工质流量为 40.67 kg/s, 此时蒸发器换热面积为 600 m², 输出功率为 485.6 kW, 热效率为 5.26%, 余热回收利用率为 35.6%。

参考文献

- [1] 陈俊武, 卢捍卫. 催化裂化在炼油厂中的地位和作用展望—催化裂化仍将发挥主要作用[J]. 石油学报: 石油加工, 2003, 19(1): 1-11.
- [2] Qian Yu, Jiang Yanrong, Li Xiuxi. The development of a real-time expert system for fault diagnosis of chemical processes[J]. Expert Systems with Application, 2003, 39(31): 425-432.
- [3] 许红星. 我国能源利用现状与对策[J]. 中外能源, 2010, 15(1): 3-14.
- [4] Badr Abdullah Al-Riyami, Jiri Klemes, Simon Perry. Heat integration retrofit analysis of a heat exchanger network of a fluid catalytic cracking plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, (1): 1449-1487.
- [5] 王海宁, 梁顶华, 徐学明, 等. 对催化裂化装置节能降耗技术的研究[J]. 化学工程与装备, 2012, (10): 38-39, 108.
- [6] 侯波, 曹志涛. 催化裂化工艺及催化剂的技术进展[J]. 化学工业与工程技术, 2009, 30(6): 39-44.
- [7] Linnhoff B, Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks[J]. Chemical Engineering Science, 1983, 38(5): 745-763.
- [8] Lancu M, Agachi P S. Optimal process control and operation of an industrial heat integrated fluid catalytic cracking plant using model predictive control[A]. 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering[C]. Ischia, ITALY, 2010, 28: 505-510.
- [9] 国国防, 祝建军. 工业余(废)热在水源热泵中的应用[J]. 制冷与空调, 2008, 8(S1): 140-145.
- [10] 李艳. 低温有机朗肯循环及其透平的研究与设计[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [11] 王大彪, 段捷, 胡哺松, 等. 有机朗肯循环发电技术发展现状[J]. 节能技术, 2015, 33(3): 235-242.
- [12] 顾伟, 翁一武, 王艳杰, 等. 低温热能有机物发电系统热力分析[J]. 太阳能学报, 2008, (5): 608-612.
- [13] 叶依林. 基于太阳能的有机朗肯循环低温热发电系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [14] ÖnderKaşka. Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77(77): 108-117.
- [15] 刘轩. 低温有机朗肯循环系统性能分析及试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [16] Zhu Yadong, Hu Zhe, Zhou Yaodong, et al. Applicability of entropy, entransy and exergy analyses to the optimization of the Organic Rankine Cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2014, (88): 267-276.
- [17] Srinivasan K K, Mago P J, Krishnan S R. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle[J]. Energy, 2010, 6(35): 2387-2399. ■

欢迎浏览《现代化工》网站 <http://www.xdhg.com.cn>