

LNG 轻烃分离工艺流程设计及优化

肖荣鸽*, 郑子烁

(西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要:针对 LNG 轻烃分离存在 LNG 冷能利用不足、设备负荷过大、工艺流程综合能耗过高等问题,基于 2 种已有的轻烃分离技术发明专利,提出了一种新型的 LNG 轻烃分离工艺流程,使用 HYSYS 软件对 3 种流程进行模拟比较,分析影响甲烷质量分数、乙烷回收率和综合能耗等关键参数。结合响应面法和遗传算法,建立了多目标优化模型,采用自适应第二代非支配排序遗传算法(NSGA2)进行最佳解集的求解。结果表明,相比较于专利 A,新工艺在乙烷回收率提高了 4.31%,综合能耗降低了 2 002.79 kW;相比较于专利 B,乙烷回收率提高了 3.05%,综合能耗降低了 24 709.9 kW,降幅约 46.6%。优化前后综合能耗相近时,优化后乙烷回收率可提高 1.05%;优化前后乙烷回收率相近时,优化后综合能耗减少 3 098.9 kW,综合能耗降低 10.94%,相对误差均在 2%以内。

关键词:LNG;轻烃分离;乙烷回收率;综合能耗;参数优化

中图分类号:TQ116.41

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)09-0223-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.09.039

Design and optimization of LNG light hydrocarbons separation process

XIAO Rong-ge*, ZHENG Zi-shuo

(College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710000, China)

Abstract:Current LNG light hydrocarbons separation process suffers the problems such as insufficient use of LNG cold energy, excessive equipment load, and high comprehensive energy consumption, etc. In the light of these problems, a novel LNG light hydrocarbons separation process is proposed based on two existing light hydrocarbons separation technology inventions and patents. Three processes are simulated and compared with each other by using HYSYS software. The key parameters affecting methane content, ethane recovery rate and comprehensive energy consumption are analyzed. Combining with response surface method and genetic algorithm, a multi-objective optimization model is established, and the adaptive second-generation non-dominated sequential genetic algorithm (NSGA2) is utilized to solve the best solution set. Results show that compared with Patent A, the novel process increases the ethane recovery rate by 4.31% and reduces the comprehensive energy consumption by 2 002.79 kW. Compared with Patent B, the novel process increases the ethane recovery rate by 3.05% and reduces the comprehensive energy consumption by 24 709.9 kW, which presents a reduction of about 46.6%. The ethane recovery rate can be increased by 1.05% after the optimization when the comprehensive energy consumption remains unchanged before and after the optimization. The comprehensive energy consumption declines by 3 098.9 kW or 10.94% after the optimization when the ethane recovery rate remains the same before and after the optimization. The relative errors are both less than 2%.

Key words: LNG; light hydrocarbons separation; ethane recovery rate; comprehensive energy consumption; parameter optimization

LNG 通过轻烃分离工艺可以回收甲烷、乙烷等烃类^[1-2]。C₂+轻烃是高附加值的产品,具有多种用途,其中的乙烷和丙烷可以替代汽油制乙烯,可以使综合成本下降 10%^[3-4],因此,采用 LNG 作为低碳烃的分离过程,对其进行甲烷和乙烷的回收具有重要意义。既可以有效地满足国内对乙烯的需求,又可以减少国内对石油的严重依赖,提高了 LNG 使用的经济效益^[5]。

在 LNG 轻烃分离工艺中,国内外都进行了大量的研究。国外研究人员^[6-8]研究得出,在轻烃分离

中,低压工艺比高压工艺节省 4.6% 的电力资源。Pan 等^[9]设计了一种新型 LNG 冷能梯级综合利用系统。Zhang 等^[10]提出了一种由 LNG 冷能驱动的空气分离和轻烃回收的能量集成过程。张小峰等^[11]提出通过将 LNG 轻烃分离,为乙烯深冷分离提供冷量。2009 年高婷等^[12]提出了一种高压的 LNG 轻烃分离工艺。

本文中通过对 2 种已有的轻烃分离技术发明专利与新设计的一种 LNG 轻烃分离工艺进行软件模拟,通过 HYSYS 软件的模拟,对这 3 种流程进行甲

收稿日期:2024-11-14;修回日期:2025-07-03

作者简介:肖荣鸽(1978-),女,博士,教授,研究方向为天然气处理与加工、油气田地面工程与多相管流技术,通讯联系人,xiaorongge@163.com。

烷质量分数对比、乙烷回收率对比以及工艺流程的综合能耗对比,再进行相关的参数分析和算法优化,最后得出相应的结论与建议。

1 2 种已有的轻烃分离技术发明专利工艺流程分析

1.1 专利 A 轻烃分离工艺流程分析

专利 A 是中国最早的一批 LNG 轻烃分离工艺流程,该专利通过对 LNG 的冷能进行利用,通过换热网络,将脱出的甲烷与 LNG 自带的冷能进行换热,进而得到液态甲烷,减少了压缩机的使用^[13]。工艺流程如图 1 所示。

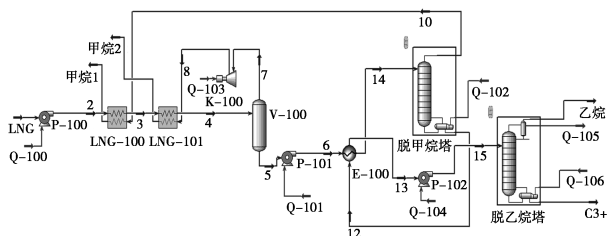


图 1 专利 A 轻烃分离工艺流程

通过模拟分析可以发现流程的几个不足之处：
①脱乙烷塔的工作压力大,对塔的负荷大且会增加塔的成本。
②脱甲烷塔与脱乙烷塔的能耗较高。
③外输的甲烷液体,有大量冷量未利用。

1.2 专利 B 轻烃分离工艺流程分析

专利 B 是由何友祥^[14]提出申请的,该工艺利用减压阀降低了物流进入脱乙烷塔的压力,从而减少了塔的工作压力,并将脱乙烷塔的塔顶气与 LNG 的冷能进行热交换,让系统内的能量得到充分的利用,提高能源利用率^[13]。工艺流程如图 2 所示。

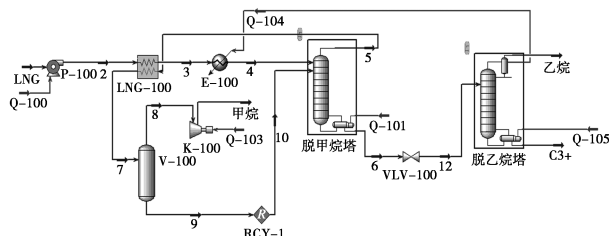


图 2 专利 B 轻烃分离工艺流程

通过模拟分析可以发现流程的几个不足之处：
①物流加热后直接进入脱甲烷塔,脱甲烷塔的热负荷过大。
②流程整体能耗过高。
③外输的甲烷液体有大量冷量未利用。
④压缩机能耗较高。

2 新型 LNG 轻烃分离工艺流程设计

在 2 种已有的轻烃分离技术发明专利的基础上,对换热系统和冷能利用进行重新设计,增加了物流分割器,降低了流股的压力,设计出一种新型的 LNG 轻烃分离工艺,该工艺流程如图 3 所示。

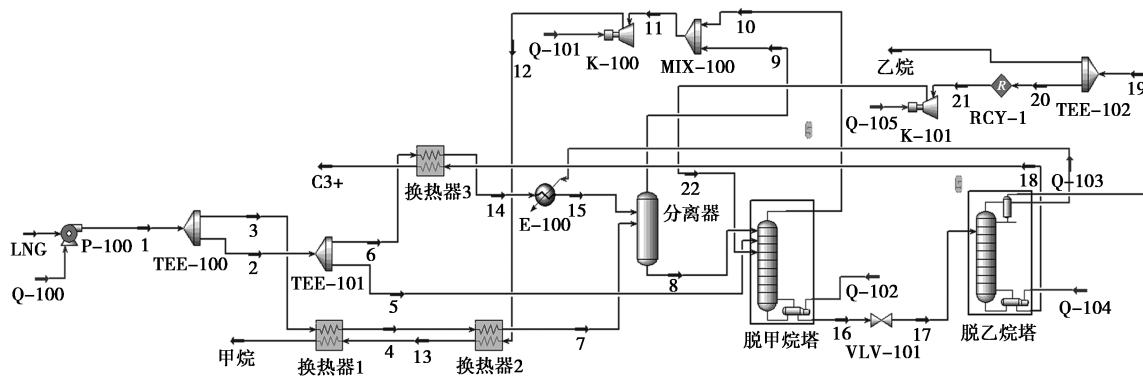


图 3 新型轻烃分离工艺流程

如图 3 所示,该流程主要包括 4 部分:原料分流预热、预分离、脱甲烷和脱乙烷^[15]。
①原料分流预热:原料 LNG 经过泵的加压,由分流器分割为 2 股,较大的一股经过换热器 1、2 与分离器分离的甲烷气相和脱甲烷塔塔顶的甲烷气相进行热交换,随后进入分离器进行气液分离。较小的一股再经过分流器分割为 2 股,较大的一股经过换热器 3 与脱乙烷塔塔底液进行热交换,再经过加热器加热进入分离器进行气液分离;较小的一股直接进入脱甲烷塔进行

分离。
②预分离:物流 15、7 这 2 股物流进入分离器进行气液分离,塔顶排出气相的甲烷,塔底排出液相物流进入脱甲烷塔进一步分离。
③脱甲烷:塔底液相物流 8 与物流 5 一起流入脱甲烷塔进行分离,脱甲烷塔塔顶排出富甲烷的气体,塔底流出的是液态 C₂+ 组分,液态 C₂+ 组分再通过节流阀进行降压后,进入脱乙烷塔进行精馏分离。
④脱乙烷:C₂+ 组分通过节流阀的降压后,进入脱乙烷塔脱乙烷,塔顶排出富乙烷气体,塔底流出的是液态 C₃+ 组分。

3 新型 LNG 轻烃分离工艺流程模拟及参数分析

3.1 新型 LNG 轻烃分离工艺流程模拟

本文中对一个大型 LNG 接收站的轻烃分离过程进行了仿真模拟。该 LNG 接收站日处理能力为 350 t/h, 进入分离时的气压是 101.3 kPa, 温度是 -162°C , 组成如表 1 所示。

表 1 LNG 气源组成 %

气体	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷
质量分数	87.97	7.08	2.87	0.39	0.42
气体	异戊烷	正戊烷	正庚烷	氮气	
质量分数	0.06	0.03	0.99	0.19	

本研究以表 1 所示的 LNG 为原料, 采用 HYSYS 对新流程进行了数值模拟, 使用 PR 方程, 其在气-液两相流动中的精度较高。热力学方法选用 Peng-Robinson 状态方程^[16]。新型工艺模拟流程如图 3 所示。主要设备能耗见表 2。

表 2 主要设备能耗

设备	加压机	压缩机 1	压缩机 2	脱甲烷塔	脱乙烷塔
能耗/kW	269.8	1734	1242	16540	8540

3.2 新型 LNG 轻烃分离工艺与 2 种发明专利的比较

通过对新型工艺与 2 种发明专利的乙烷回收率、甲烷乙烷质量分数以及综合能耗模拟结果进行对比, 得到的具体情况如表 3 所示。可以看出, 相比较于专利 A, 新工艺甲烷质量分数增加了 0.35%, 乙烷回收率提高了 4.31%, 另外综合能耗也降低了 2 002.79 kW, 相比较于专利 B, 虽然甲烷质量分数略有减少, 但是乙烷质量分数有所增加, 且乙烷回收率提高了 3.05%, 最关键的是能耗方面有着大幅降低, 降低了 24 709.9 kW, 降幅达到了约 46.6%。由此可见, 相比较于发明专利, 新型工艺在轻烃分离方面, 以及降低能耗方面有着更好的效果。

表 3 工艺模拟结果对比表

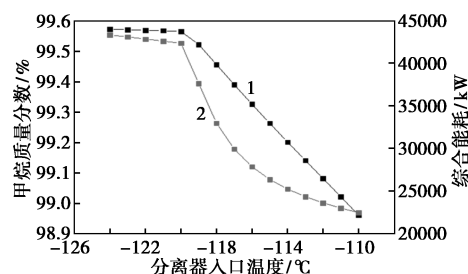
工艺	专利 A 轻烃分离工艺	专利 B 轻烃分离工艺	新型轻烃分离工艺
甲烷质量分数/%	99.02	99.71	99.37
乙烷质量分数/%	97.95	98.32	98.54
乙烷回收率/%	89.94	91.20	94.25
流程综合能耗/kW	30328.59	53035.70	28325.80

3.3 关键参数分析

根据工艺流程主要设备能耗表, 发现工艺流程的主要能耗设备为脱甲烷塔和脱乙烷塔, 占总能耗的 88.5%。受各种因素影响, 甲烷质量分数、乙烷回收率、工艺流程综合能耗都会发生变化。因此对影响因素进行分析, 考虑分离器入口温度、脱甲烷塔压力、脱乙烷塔压力和 LNG 加压后的压力等关键参数的变化对工艺流程性能的影响。

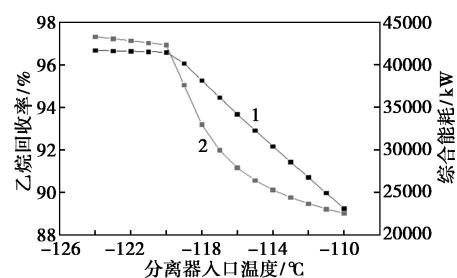
3.3.1 分离器入口温度对工艺流程性能的影响

保持其他参数不变, 选择 -124°C 作为初始值, 步长 1°C , 在 $-124\sim-110^{\circ}\text{C}$ 范围内, 通过改变进口温度来模拟其对过程的影响, 如图 4 所示。由图可知, 随着分离器入口温度的升高, 在 $-124\sim-120^{\circ}\text{C}$ 甲烷质量分数基本保持不变, 随后开始下降, 综合能耗随着温度升高而减少。乙烷回收率的变化情况与甲烷质量分数相似。由图可以看出分离器入口温度对工艺流程性能的影响较为显著。根据图初步确定温度范围为 $-120\sim-113^{\circ}\text{C}$ 。



1—甲烷质量分数; 2—综合能耗

(a) 分离器入口温度对甲烷质量分数及综合能耗的影响



1—乙烷回收率; 2—综合能耗

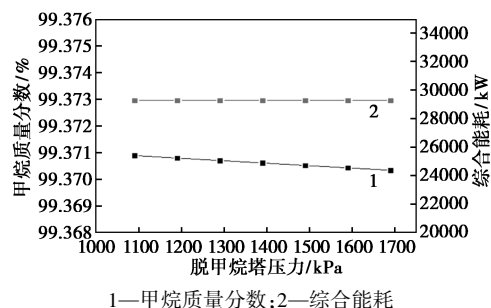
(b) 分离器入口温度对乙烷回收率及综合能耗的影响

图 4 分离器入口温度对各参数的影响

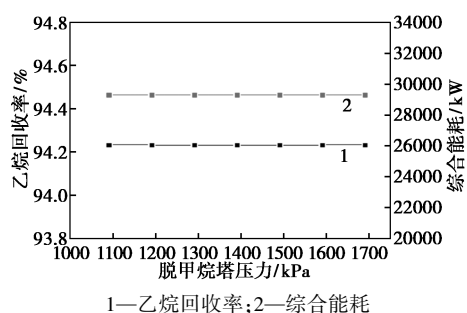
3.3.2 脱甲烷塔压力对工艺流程性能的影响

在维持其他参数不变的前提下, 以 1 090 kPa 为起始, 100 kPa 为步长, 在 1 090~1 690 kPa 范围内, 改变脱甲烷塔压力, 模拟其对流程的影响, 如图 5 所示。由图可知, 随着脱甲烷塔压力的增加, 甲烷质量分数略微降低, 降幅不明显, 仅为 0.001%, 可忽略脱甲烷塔的压力对甲烷质量分数的影响。随着压力

增加,乙烷回收率保持不变,可忽略脱甲烷塔的压力对乙烷回收率的影响,且随着压力增加,综合能耗保持不变。



(a) 脱甲烷塔压力对甲烷质量分数及综合能耗的影响

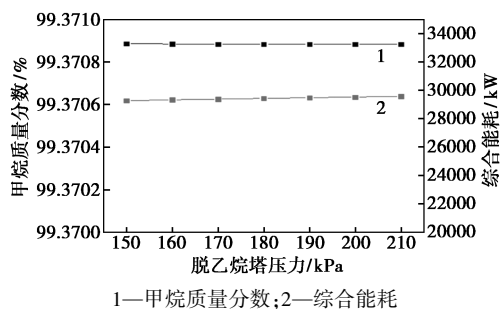


(b) 脱甲烷塔压力对乙烷回收率及综合能耗的影响

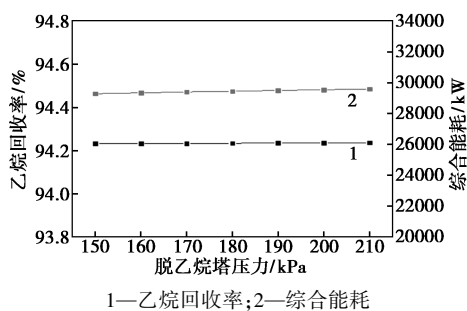
图 5 脱甲烷塔压力对各参数的影响

3.3.3 脱乙烷塔压力对工艺流程性能的影响

在维持其他参数不变的前提下,以 150 kPa 为起始,10 kPa 为步长,在 150~210 kPa 范围内,改变脱乙烷塔压力,模拟其对流程的影响,如图 6 所示。



(a) 脱乙烷塔压力对甲烷质量分数及综合能耗的影响



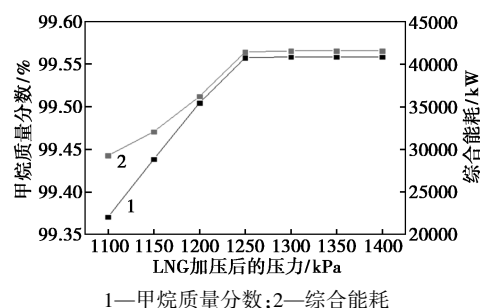
(b) 脱乙烷塔压力对乙烷回收率及综合能耗的影响

图 6 脱乙烷塔压力对各参数的影响

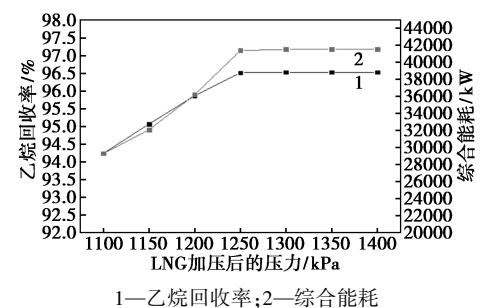
由图可知,随着脱乙烷塔压力的增加,甲烷质量分数、乙烷回收率保持不变,可忽略脱乙烷塔的压力对甲烷质量分数、乙烷回收率的影响。随着脱乙烷塔压力增加,综合能耗略微上涨。

3.3.4 LNG 加压后的压力对工艺流程性能的影响

在维持其他参数不变的前提下,以 1 100 kPa 为起始,50 kPa 为步长,在 1 100~1 400 kPa 范围内,改变 LNG 加压后的压力,模拟其对流程的影响,如图 7 所示。由图可知,随着压力的增加,甲烷质量分数、乙烷回收率先增加,随后保持不变,综合能耗先增加,随后保持不变。可以看出 LNG 加压后的压力对工艺流程性能的影响较为显著。



(a) LNG 加压后的压力对甲烷质量分数及综合能耗的影响



(b) LNG 加压后的压力对乙烷回收率及综合能耗的影响

图 7 LNG 加压后的压力对各参数的影响

4 工艺参数优化

由上述分析可以看出,总体来看,乙烷回收率、甲烷质量分数和综合能耗均表现出一致的变化趋势,但各个因素对其影响程度有所不同。在此基础上,选取综合能耗及乙烷回收率,对其进行定量解析和多目标优化,明确各个影响因素的作用程度,获得最优的乙烷回收率与综合能耗平衡方案。实现工艺流程效率最大化^[17]。

4.1 回归方程的建立

采用软件 Design - Expert 建立目标函数模型^[18],选用 Box-Behnken Design 作为回归试验拟合方法建立各因素与响应值之间的关系,选择分离器

入口温度(X_1)、脱甲烷塔压力(X_2)和 LNG 加压后的压力(X_3)为决策因素,乙烷回收率(Y)和综合能耗(E)为响应值。根据决策因素的低、中、高水平,建立三因素三水平表,具体见表 4。

表 4 关键参数取值范围

关键参数	水平(-1)	水平(0)	水平(1)
分离器入口温度/°C	-120	-116.5	-113
脱甲烷塔压力/kPa	1090	1390	1690
LNG 加压后的压力/kPa	1100	1250	1400

每组试验共设计 17 个试验点,由 HYSYS 模拟得到各试验点的乙烷回收率和综合能耗,对所得的数据进行回归拟合,得到乙烷回收率 Y ,以及综合能耗 E 的回归方程,如下所示,其中 X_1 、 X_3 为极显著因素。

$$Y = -11.13789 - 0.166824X_1 + 0.000169X_2 + 0.003159X_3 - 3.26084 \times 10^{-9}X_1X_2 + 0.000021X_1X_3 - 6.76799 \times 10^{-11}X_2X_3 - 0.000585X_1^2 - 6.09696 \times 10^{-8}X_2^2 - 2.48022 \times 10^{-7}X_3^2 \quad (1)$$

$$E = -3.49855 \times 10^6 - 47591.90262X_1 + 99.41144X_2 + 907.91661X_3 - 0.000379X_1X_2 + 5.63146X_1X_3 - 0.000069X_2X_3 - 165.95754X_1^2 - 0.035741X_2^2 - 0.088275X_3^2 \quad (2)$$

4.2 多目标优化模型建立和求解

在此基础上,以最大回收率和最小能耗为目标,将回归方程(1)、(2)联立,构建多目标优化模型,如式(3)所示。在此基础上,用 Matlab 软件采用 NSGA2 算法进行最佳解集的求解。NSGA2 算法比传统算法更加优越,计算也较为简单^[19]。将种群大小设定为 100、进化代数为 200、交叉因子为 0.8、变异因子为 0.1,求出最优解集如图 8 所示^[20-21]。

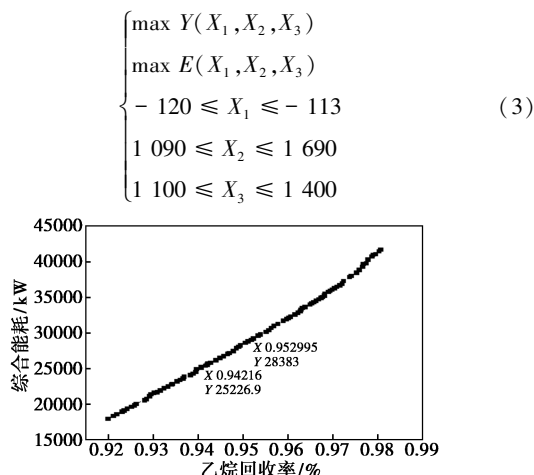


图 8 Pareto 最佳解集

图 8 中,有坐标的 2 点分别代表与优化前综合能耗、乙烷回收率相近的可优化目标。

优化前后的数据如表 5 所示,优化后(A)代表优化前后乙烷回收率相近的可优化目标,优化后(B)代表优化前后综合能耗相近的可优化目标,由表 5 知,当优化前后乙烷回收率相近时,可减少能耗 3 098.9 kW,综合能耗可下降 10.94%。将优化后的数据代回 HYSYS 软件进行模拟计算,综合能耗模拟值与 Matlab 软件预测值的相对误差为 1.1%,乙烷回收率相对误差为 0.6%;综合能耗相近时,乙烷回收率可提高 1.05%。将优化后的数据代回 HYSYS 软件进行模拟计算,综合能耗模拟值与 Matlab 软件预测值的相对误差为 0.7%,乙烷回收率相对误差为 1%,结果表明相对误差均在 2%以内,说明该模型可靠,能够用以开展工艺优化。

表 5 NSGA2 优化前后工艺流程数据对比

项目	优化前	优化后(A)	优化后(B)
分离器入口温度/°C	-116.5	-113	-113
脱甲烷塔压力/kPa	1090	1109	1090
LNG 加压后的压力/kPa	1100	1200	1266
乙烷回收率/%	94.25	94.22	95.30
综合能耗/kW	28325.8	25226.9	28383

5 结论

(1)在结合其他专利的基础上,提出一种新型的 LNG 轻烃分离工艺流程,该工艺流程不仅提高了 LNG 的冷能利用率,降低了整个流程的能耗,而且减少了脱甲烷塔的热负荷,降低了脱乙烷塔的工作压力,并提高了乙烷的回收率,实现了能源利用的最大效益化。

(2)相比较于专利 A,新工艺乙烷回收率提高了 4.31%,另外综合能耗也降低了 2 002.79 kW,相比较于专利 B,乙烷回收率提高了 3.05%,综合能耗降低了 24 709.9 kW,降幅约 46.6%。由此可见,相比较于发明专利,新型工艺在轻烃分离方面,以及降低能耗方面有着更好的效果。

(3)以乙烷回收率最大、综合能耗最小进行多目标优化,采用响应面法,利用 Design-Expert 软件得到回归方程,联立得到多目标优化模型,使用 NSGA2 算法得到的最优解集为:综合能耗相近时,乙烷回收率可提高 1.05%;乙烷回收率相近时,可减少能耗 3 098.9 kW,综合能耗可下降 10.94%,相对误差均在 2%以内。

参考文献

- [1] 林珑,曹传超,刘燕妮,等.液化天然气发展现状及前景展望[J].能源研究与利用,2017,(3):30-32.
- [2] 王舒婷.山东 LNG 接收站轻烃回收工艺优化设计研究[D].成都:西南石油大学,2017.
- [3] 钱伯章.天然气化工技术现状与发展趋势[J].江苏化工,2004,(5):1-6.
- [4] Patel K N,Patel R N.Process for Separating and recovering ethane and heavier hydrocarbons from LNG; US 13/277351 [P]. 2012-04-26.
- [5] 李铭,宋成文.LNG 轻烃脱除工艺及其经济性浅析[J].油气田地面工程,2007,(10):8-9.
- [6] Uwitonze H,Han S,Jangryeok C, et al.Design process of LNG heavy hydrocarbons fractionation; Low LNG temperature recovery[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2014,85:187-195.
- [7] Uwitonze H,Lee I,Hwang K S.Alternatives of integrated processes for coproduction of LNG and NGLs recovery[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2016, 107: 157-167.
- [8] Pellegrini L A,De Guido G,Valentina V.Energy and exergy analysis of acid gas removal processes in the LNG production chain[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 61: 303-319.
- [9] Pan J,Li M,Li R, et al.Design and analysis of LNG cold energy cascade utilization system integrating light hydrocarbon separation, organic Rankine cycle and direct cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118672.
- [10] Zhang R,Wu C,Song W, et al.Energy integration of LNG light hydrocarbon recovery and air separation; Process design and technico-economic analysis[J]. Energy, 2020, 207: 118328.
- [11] 张小锋,冯霄.LNG 轻烃分离与乙烯冷分冷量联合[J].化工学报,2014,65(12):4844-4849.
- [12] 高婷,林文胜,顾安忠.利用 LNG 冷能的轻烃分离高压流程[J].化工学报,2009,(S1):73-76.
- [13] 吴学谦.LNG 轻烃回收工艺研究及过程模拟[D].西安:西安石油大学,2020.
- [14] 何友祥.LNG 轻烃回收流程模拟及参数优化[J].上海煤气,2023,(5):1-3,13.
- [15] 李莉,胡永群,王博涛,等.利用 HYSYS 软件优化 LNG 轻烃分离工艺[J].中外能源,2022,27(6):94-100.
- [16] 薛倩,王晓霖,刘名瑞,等.基于混合工质的 LNG 冷能分段利用研究[J].工程热物理学报,2018,39(6):1197-1204.
- [17] 李子元,李长俊,贾文龙,等.基于响应面法的 SCORE 丙烷回收工艺参数优化[J].天然气化工:C1 化学与化工,2022,47(6):155-161.
- [18] 王晓磊,吕小明,廖明旺,等.基于响应面分析法的天然气乙烷回收工艺参数优化[J].天然气化工:C1 化学与化工,2022,47(2):122-128.
- [19] 高峰,艾浩泉,梁耀东,等.基于 NSGA-II 算法的废石及尾砂混合充填料配比优化[J].黄金科学技术,2022,30(1):46-53.
- [20] 钱欣,戴国华,李国豪,等.基于遗传算法的三甘醇脱水系统减碳策略[J].石油与天然气化工,2023,52(2):16-22.
- [21] 肖荣鸽,庞琳楠,刘亚龙.联产 LNG 天然气低温提氦工艺参数优化研究[J].低温与超导,2023,51(10):47-53,60. ■

(上接第 222 页)

参考文献

- [1] 李志科,胡玉杰,于杰,等.有机玻璃增韧改性的研究[J].贵州工业大学学报:自然科学版,2006,35(3):74-77.
- [2] 罗建勋,蓝振川.新型丙烯酸复鞣剂的合成与应用研究[J].中国皮革,2009,38(17):23-26.
- [3] 邹文俊.涂附磨具专用 MMA/BMA/MAA——环氧树脂粘结剂合成研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2000,(1):33-35.
- [4] 朱燕.丙烯酸丁酯的国内外市场分析[J].精细与专用化学品,2011,19(10):1-3.
- [5] 冯朔,贺新,倪璇,等.酯交换法合成甲基丙烯酸酯工艺的催化剂研究进展[J].应用化工,2018,47(7):1493-1498.
- [6] 王庆军,刘福胜,于世涛.酯交换法制备甲基丙烯酸类酯催化剂研究进展[J].精细石油化工进展,2006,7(4):19-21.
- [7] 王鹏,邓慧君,钱海文.甲基丙烯酸丁酯的酯交换合成[J].广东化工,2021,48(11):11-12,20.
- [8] Sert E,Atalay F S.n-Butyl acrylate production by esterification of acrylic acid with n-butanol combined with pervaporation[J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2014, 81: 41-47.
- [9] Shinji T,Takuya N,Naoto S, et al.Epoxy as pre-catalyst for metal-free catalytic transesterification[J]. Tetrahedron Letters, 2019, 60(30):2009-2013.
- [10] 彭世仁,王燕,蔡旺锋.钛酸四丁酯催化甲基丙烯酸甲酯与正丁醇酯交换反应动力学研究[J].化学工业与工程,2024,41(1):1-11.
- [11] 吴庆娜.均相催化法合成甲基丙烯酸丁酯[J].内蒙古石油化工,2012,38(3):83-84.
- [12] 施英,张文泉,朱萌,等.酸烯酯化合成甲基丙烯酸叔丁酯工艺研究[J].应用化工,2015,44(10):1867-1870.
- [13] Felicia J N,Hao-Yeh L,Moonyong L.Reactive distillation with pervaporation hybrid configuration for enhanced ethyl levulinate production[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 190: 297-311.
- [14] 彭世仁.甲基丙烯酸甲酯与正丁醇酯交换反应动力学及反应精馏模拟研究[D].天津:天津大学,2022.
- [15] 韩文韬,韩振为,李洪,等.乙酰丙酸乙酯的反应精馏模型及隔壁塔节能优化设计[J].化工进展,2022,41(4):1759-1769.
- [16] 郑梁.碳酸二乙酯反应精馏隔壁塔的设计与控制[D].天津:天津大学,2017. ■