

天然气液化工艺系统模拟与节能优化

范 峥^{1*}, 姬盼盼¹, 林 亮², 刘 钊¹, 井晓燕¹, 员汝娜³

(1. 西安石油大学化学化工学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安长庆科技工程有限责任公司, 陕西 西安 710018; 3. 西北大学化工学院, 陕西 西安 710069)

摘要:针对天然气液化过程存在能耗大、成本高等问题,通过以 Peng-Robinson 热力学模型为基础的工艺流程模拟探讨了中、高压冷剂压力和温度对装置单位能耗的影响规律,利用二次回归正交设计进行了优化改进并验证了优化改进方案的可靠性。结果表明,由二次回归正交设计拟合得到的回归方程不但能够准确描述混合冷剂各关键操作参数与装置单位能耗之间的关系,而且还可以有效地预测最佳工艺条件。当中、高压冷剂的压力和温度分别为 1 890、3 760 kPa 及 38、37℃ 时,天然气液化装置实际单位能耗仅为 393.228 kWh/t,较改进前降低了 5.54%,节能效果显著。

关键词:液化天然气;流程模拟;操作参数;优化;节能

中图分类号:TE646

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)09-0219-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.09.050

System simulation and energy saving optimization of natural gas liquefaction process

FAN Zheng^{1*}, JI Pan-pan¹, LIN Liang², LIU Zhao¹, JING Xiao-yan¹, YUAN Ru-na³

(1. College of Chemistry & Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Changqing Technology Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

3. School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: To solve the problems including high energy consumption and cost during natural gas liquefaction, the technological process simulation is performed on the basis of Peng-Robinson thermodynamic model and the effect of pressure and temperature of mid- and high-pressure refrigerants on unit energy consumption are explored. The quadratic regression orthogonal design is used to optimize and improve natural gas liquefaction device and the reliability of the optimized and improved scheme is also verified. The results demonstrate that the regression equation obtained by quadratic regression orthogonal design fitting can describe accurately the relationships between key operation parameters of mixed refrigerants and unit energy consumption, and can also predict validly the optimum process conditions. When pressure and temperature of mid- and high-pressure refrigerants are 1 890 kPa, 3 760 kPa and 38℃, 37℃, respectively, the actual unit energy consumption of natural gas liquefaction device is only 393.228 kW·h/t LNG, a drop of 5.54% than before. The optimization plays a very remarkable role in energy saving.

Key words: liquefied natural gas; process simulation; operating parameters; optimization; energy saving

由于液化天然气的体积仅为气态的 1/600,可有效解决天然气在运输、储存和使用过程中存在诸多不便等实际问题,为进一步扩大天然气国际贸易和回收偏、散、小天然气资源提供了极为有利的条件^[1-3]。目前,常见的液化天然气生产工艺主要包括预处理、液化和储存 3 个工段,尤以液化最为重要,其作用是使天然气经冷箱换热后不断降温冷凝^[4-5]。但是,天然气的液化是以消耗大量能量为代价的,运行费用往往占装置总生产成本的 40% 以上^[6-8],因此,采用流程模拟技术对天然气液化工段的关键操作参数进行优化及改进以进一步降低天然气液化装置单位能耗是十分必要和迫切的。

为了有效解决上述问题,以陕北某天然气液化

装置为研究对象,该装置采用闭式混合冷剂液化流程,年产 10×10^4 t LNG,所用混合冷剂的组成及含量为 $N_2 : CH_4 : C_2H_6 : C_3H_8 : i-C_4H_{10} = 9.0 : 25.3 : 28.6 : 19.7 : 17.4$,装置单位能耗为 415 kWh/t,旨在借助 Aspen HYSYS 7.2 在现有工况条件下对该装置液化工段进行全流程模拟,系统研究中压冷剂压力、高压冷剂压力、中压冷剂温度和高压冷剂温度等混合冷剂关键操作参数对装置单位能耗的影响规律,并利用二次回归正交设计对其进行了调节优化,从而最终实现节能降耗、提质增效的目的。

1 液化工段流程模拟

1.1 热力学模型的选择

热力学模型的选择直接影响着模拟结果的准确

收稿日期:2018-02-16;修回日期:2018-07-04

基金项目:陕西省科学技术研究与发展计划项目(2016GY-150)

作者简介:范峥(1982-),男,博士,副教授,研究方向为油气加工过程模拟优化,通讯联系人,fanzheng@xsyu.edu.cn。

性,比如分离过程离不开平衡常数,热量衡算离不开气液两相焓,压缩及膨胀离不开熵等,因此采用合适的热力学模型是决定装置流程模拟与分析优化成功与否的关键^[9-11]。

由于天然气液化涉及 N_2 、 H_2 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 以及氦、氩等惰性气体,属于高度非理想极性体系,故本文中通过 Peng-Robinson 模型估算上述体系的液相活度系数和气相逸度系数,这是因为 Peng-Robinson 模型在计算饱和蒸气压、饱和液相密度方面具有更好的准确性。

1.2 模拟流程的建立

净化天然气从顶部进入冷箱 E-401,经冷却、液化、过冷和节流降压后在闪蒸罐 V-404 得到 LNG 产品和部分闪蒸气。低压冷剂首先进入分离器 V-401 进行气液分离,顶部分离的气体进入冷剂压缩机 C-401 一级入口,压缩后经空冷器 AC-401 冷却再进入冷剂压缩机段间冷却器 E-402 并进入分

离罐 V-402 进行气液分离,中压液态冷剂进入 E-401 冷却,气体进入 C-401 二级入口,压缩后经空冷器 AC-402 冷却再进入冷剂压缩机出口冷却器 E-403,最后进入分离器 V-403 进行气液分离,高压液态冷剂和高压气态冷剂分别进入 E-401 进行换热。来自 V-403 的高压气态冷剂由 E-401 冷却后从冷箱底部流出,节流降压后从 E-401 底部向上流动给净化天然气、中压液态冷剂、高压液态冷剂和高压气态冷剂提供冷量,从 E-401 顶部出来的低压冷剂返回 C-401 压缩循环。来自 V-403 的高压液态冷剂经 E-401 冷却和节流阀节流降压后进入 E-401,低压冷剂向上流动为净化天然气和混合冷剂提供冷量。来自 V-402 的中压液态冷剂在 E-401 中冷却,节流降压后的低压冷剂进入 E-401,向上流动为净化天然气和混合冷剂提供冷量。

天然气液化装置液化工段的模拟流程如图 1 所示,主要物流参数的计算结果见表 1。

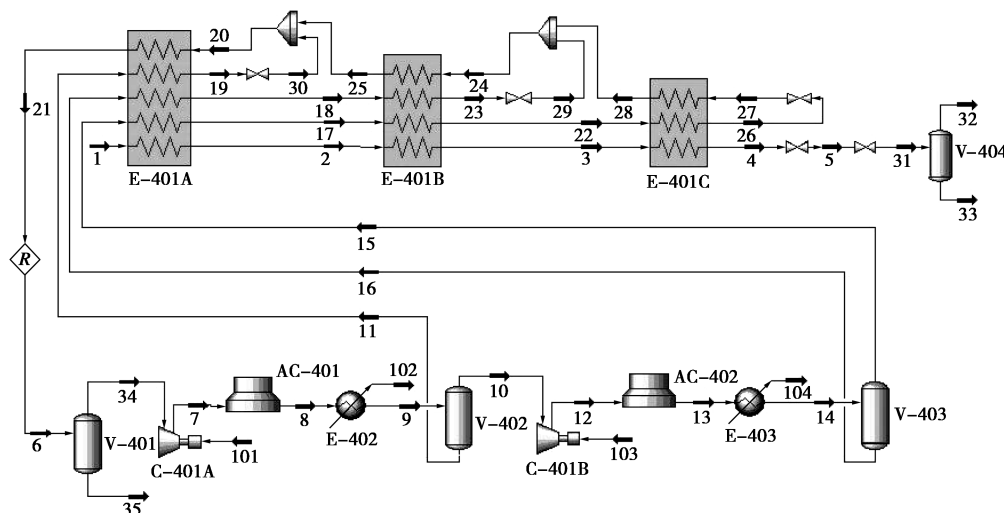


图 1 天然气液化装置液化工段模拟流程图

表 1 天然气液化装置液化工段主要物流参数计算结果

物流名称	1	11	15	21	27	29	33
气相分率	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0877	0.1438	0.0000
温度/℃	24.1	41.0	40.8	34.4	-158.3	-41.5	-161.9
压力/kPa	4369.0	1675.4	3336.2	294.0	399.0	366.0	108.0
摩尔流量/($kmol \cdot h^{-1}$)	901.52	338.42	1772.33	2340.31	1772.33	229.56	844.23
摩尔组成/%							
N_2	0.7010	0.3828	11.6835	9.0000	0.9857	0.2911	9.0000
H_2	0.0181	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000
CH_4	98.6321	2.7981	32.0483	25.3000	6.3725	99.1305	25.3000
C_2H_4	0.0000	9.1144	33.7345	28.6000	17.6849	0.0000	28.6000
C_2H_6	0.5006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5345	0.0000

续表

物流名称	1	11	15	21	27	29	33
C ₃ H ₈	0.0353	22.2026	17.6635	19.7000	31.7335	0.0377	19.7000
n-C ₄ H ₁₀	0.0028	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0030	0.0000
i-C ₄ H ₁₀	0.0025	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027	0.0000
i-C ₅ H ₁₂	0.0000	65.5021	4.8703	17.4000	43.2234	0.0000	17.6849
He	0.1076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000

由表1可以看出,在上述模拟流程中,冷剂循环量、冷剂节流后温度和液化天然气温度等重要控制指标的模拟值均与现场值吻合度良好,表明该模拟流程能够较好地反映出有天然气液化装置的实际运行情况,可作为后续关键操作参数优化及改进的基础模型。

2 关键操作参数影响规律研究

2.1 中压冷剂压力对单位能耗的影响

在液化工段净化天然气气质条件不变的情况,考察中压冷剂压力(即压缩机一级压缩出口处冷剂压力)变化对天然气液化装置单位能耗的作用规律,如图2所示。

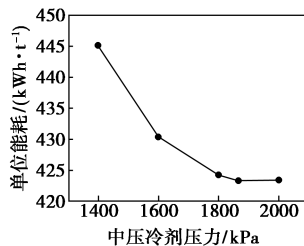


图2 中压冷剂压力对装置单位能耗的影响

由图2可以看出,随着中压冷剂压力的不断升高,一级压缩压比增大而二级压缩压比减小,但由于当中压冷剂压力升高时,混合冷剂中的重组分烃类更容易凝结,导致高压气态冷剂流量减少、冷剂总循环量下降,故装置单位能耗显著降低。需要说明的是,中压冷剂压力也不宜过高,压力过高会造成冷剂在一级压缩出口温度过高,诱发压缩机损坏。

2.2 高压冷剂压力对单位能耗的影响

在液化工段净化天然气气质条件不变的情况,考察高压冷剂压力(即压缩机二级压缩出口处冷剂压力)变化对天然气液化装置单位能耗的作用规律,如图3所示。

由图3可以看出,随着高压冷剂压力的不断升高,二级压缩压比变大,压缩机能耗增加,但由于当

高压冷剂压力升高时,混合冷剂的焓值有所降低且冷剂通过节流阀前后的压差逐渐增大,故能够提供的冷量也随之增加,混合冷剂总循环量开始下降,装置单位能耗略有提高但增幅不明显。

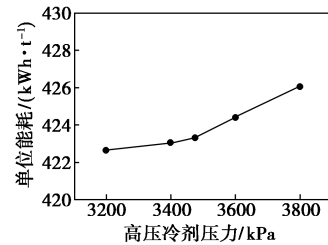


图3 高压冷剂压力对装置单位能耗的影响

2.3 中压冷剂温度对单位能耗的影响

在液化工段净化天然气气质条件不变的情况,考察中压冷剂温度(即中压液态冷剂在冷箱进口处温度)变化对天然气液化装置单位能耗的作用规律,如图4所示。

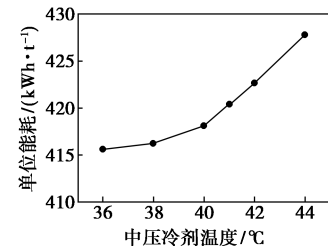


图4 中压冷剂温度对装置单位能耗的影响

由图4可以看出,随着中压冷剂温度的不断升高,装置单位能耗逐渐变大,这是因为当天然气进出冷箱的温度不变,即混合冷剂为天然气液化提供的冷量不变时,中压冷剂温度升高会造成冷剂进出冷箱的焓差减小,使冷剂携冷能力减弱,导致冷剂总循环量上升,装置单位能耗增加。

2.4 高压冷剂温度对单位能耗的影响

在液化工段净化天然气气质条件不变的情况下,考察高压冷剂温度(即高压液态冷剂在冷箱进口处温度)变化对天然气液化装置单位能耗的作用规律,如图5所示。

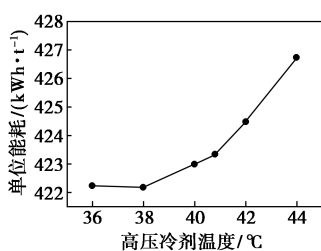


图 5 高压冷剂温度对装置单位能耗的影响

由图 5 可以看出,随着高压冷剂温度的不断提高,装置单位能耗逐渐变大。这是因为高压冷剂温度提高使焓值增加,若高压冷剂在冷箱出口处温度不变,则高压冷剂进出冷箱的焓差减小,冷剂携冷能力减弱直接导致冷剂总循环量增大,引起装置单位能耗升高,因此要尽可能降低高压冷剂在冷箱进口处的温度。

3 关键操作参数优化改进研究

二次回归正交设计不但能够有效减少实验次数,而且还可以得到与实验数据拟合较好的回归方程:

$$\hat{y} = a + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{j < i} b_{ij} x_j x_i + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2,$$

$$j = 1, 2, \dots, m - 1 (i \neq j)$$

同时,由于建立回归方程的目的是预测较优的实验范围或实验点,故根据极值必要条件:

$$\partial \hat{y} / \partial x_i = 0, i = 1, 2, \dots, m$$

即可确定出该回归方程的稳定点和对应的极值大小^[12-13]。

本文中分别以中压冷剂压力(X_1)、高压冷剂压力(X_2)、中压冷剂温度(X_3)、高压冷剂温度(X_4)为自变量,以装置单位能耗(Y)为预测值,利用二次回归正交设计对以上关键操作参数进行调节优化,因素和水平见表 2。

表 2 二次回归正交设计因素与水平

因素	水平		
	-1	0	1
中压冷剂压力 X_1 /kPa	1600	1800	2000
高压冷剂压力 X_2 /kPa	3400	3600	3800
中压冷剂温度 X_3 /°C	36	38	40
高压冷剂温度 X_4 /°C	36	38	40

按照二次回归正交设计的相关要求,设计了 4 因素 3 水平共 29 个实验点,包括了 24 组析因实验和 5 组中心实验,具体方案及实验结果见表 3,方差分析见表 4。

表 3 二次回归正交设计方案及结果

实验序号	X_1	X_2	X_3	X_4	装置单位能耗/(kWh·t ⁻¹)
1	1800	3600	38	38	397.867
2	1600	3600	40	38	404.635
3	2000	3600	38	36	394.599
4	1800	3600	36	40	398.158
5	1800	3800	40	38	402.100
6	1600	3400	38	38	400.356
7	1800	3600	38	38	397.867
8	2000	3400	38	38	399.037
9	1800	3800	36	38	394.569
10	1600	3800	38	38	401.401
11	1600	3600	38	36	397.086
12	1800	3400	38	40	401.607
13	1800	3600	40	40	404.653
14	1800	3800	38	40	401.763
15	1800	3600	40	36	397.945
16	1800	3400	40	38	401.712
17	2000	3600	38	40	401.927
18	1800	3600	38	38	397.867
19	1800	3600	38	38	397.867
20	1800	3600	36	36	390.751
21	1600	3600	36	38	395.861
22	1800	3400	36	38	394.395
23	1800	3400	38	36	394.973
24	1800	3800	38	36	395.369
25	2000	3600	36	38	395.413
26	1600	3600	38	40	403.074
27	1800	3600	38	38	397.867
28	2000	3800	38	38	398.311
29	2000	3600	40	38	401.352

表 4 二次回归正交设计方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	321.66	14	22.98	524.15	<0.0001	**
X_1	11.55	1	11.55	263.55	<0.0001	**
X_2	0.17	1	0.17	3.9	0.0682	
X_3	155.88	1	155.88	3556.14	<0.0001	**
X_4	136.41	1	136.41	3111.98	<0.0001	**
$X_1 X_2$	0.78	1	0.78	17.89	0.0008	*
$X_1 X_3$	2.01	1	2.01	45.84	<0.0001	**
$X_1 X_4$	0.45	1	0.45	10.24	0.0064	*
$X_2 X_3$	0.011	1	0.011	0.26	0.6173	

续表

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
X_2X_4	0.014	1	0.014	0.33	0.5756	
X_3X_4	0.12	1	0.12	2.79	0.1173	
X_1^2	12.79	1	12.79	291.85	<0.0001	**
X_2^2	1.45	1	1.45	32.97	<0.0001	**
X_3^2	7.554×10^{-3}	1	7.554×10^{-3}	0.17	0.6843	
X_4^2	7.849×10^{-4}	1	7.849×10^{-4}	0.018	0.8955	
残差	0.61	14	0.044			
失拟误差	0.61	10	0.061			
纯误差	0	4	0			
总离差	322.27	28				

注:表中“*”表示显著,“**”表示非常显著。

通过对各因素进行拟合后,得到的回归方程为:

$$Y = 329.3985 - 0.055946X_1 - 0.063822X_2 + 6.81846X_3 + 2.16942X_4 - 1.10688 \times 10^{-5}X_1X_2 - 1.77187 \times 10^{-3}X_1X_3 + 8.375 \times 10^{-4}X_1X_4 + 1.3375 \times 10^{-4}X_2X_3 + 1.5 \times 10^{-4}X_2X_4 - 0.043687X_3X_4 + 3.51094 \times 10^{-5}X_1^2 - 1.18 \times 10^{-5}X_2^2 + 8.53125 \times 10^{-3}X_3^2 + 2.75 \times 10^{-3}X_4^2$$

由于上述回归方程的 F 值为 524.15, 故该 Quadratic 模型是十分显著的, 噪音出现的概率小于 0.01%, 同时, 此模型的失拟误差仅为 0.061, 可利用它代替真实实验点来进行数据对比及分析。此外, 回归方程的拟合度 0.9981、预测拟合度 0.9974 和校正拟合度 0.9969 高度近似, 信噪比为 27.65, 各个因素与预测值之间有着非常良好的线性关系, 因此, 通过以上模型不但能够准确描述各个因素与预测值之间的相互作用关系, 而且还可以凭借它来确定最佳的工艺条件。

利用 MATLAB 8.0.0.783 对回归方程取一阶偏导数等于零并联合求解, 最终得到优化的关键操作参数如下: 中压冷剂压力为 1 890 kPa, 高压冷剂压力为 3 760 kPa, 中压冷剂温度为 38℃, 高压冷剂温度为 37℃, 装置预测单位能耗为 391.104 kWh/t, 节能效果显著。

为了进一步验证优化改进方案的可靠性, 陕北某天然气液化装置按照上述优化改进方案于 2017 年 9 月 5 日对液化工段实施了操作参数调整, 并于 72 h 后对此装置进行了现场标定。结果表明, 该装置在标定期间的实际单位能耗为 393.228 kWh/t, 与预测值基本一致, 较改进前的 415 kWh/t 降低了 5.54%, 达到了节能优化效果。

4 结论

(1) 由于天然气液化工段需要消耗大量能量, 装置单位能耗达到 415 kWh/t, 导致运行费用偏高, 故采用流程模拟技术对关键操作参数进行节能优化是十分必要和迫切的。

(2) 在现有工况条件下, 采用 Peng-Robinson 热力学模型对液化工段进行全流程模拟, 所得计算结果与装置实际运行情况吻合度良好, 可作为后续优化改进的基础模型。

(3) 以中压冷剂压力、高压冷剂压力、中压冷剂温度和高压冷剂温度等混合冷剂关键操作参数为自变量, 以装置单位能耗为预测值, 通过二次回归正交设计对各因素进行拟合, 准确得到了对应的回归方程。

(4) 经优化, 当中压冷剂压力为 1 890 kPa, 高压冷剂压力为 3 760 kPa, 中压冷剂温度为 38℃, 高压冷剂温度为 37℃时, 天然气液化装置实际单位能耗仅为 393.228 kWh/t, 较改进前降低了 5.54%, 节能效果显著。

参考文献

- [1] 林畅, 白改玲, 王红, 等. 大型天然气液化技术与装置建设现状与发展[J]. 化工进展, 2014, 33(11): 2916-2922.
- [2] 张盈盈, 李兆慈, 丁杨, 等. 液化天然气的储存与运输技术现状分析[J]. 现代化工, 2016, 36(4): 4-7.
- [3] 杨文, 曹学文, 孙丽, 等. 天然气液化技术研究现状及进展[J]. 天然气化工, 2015, 40(3): 88-93.
- [4] 陶晓伟. 天然气液化工艺探讨[J]. 石化技术, 2016, 23(4): 4, 12.
- [5] 王丽娜, 樊秦, 郑传财. 天然气液化工艺的探讨[J]. 煤气与热力, 2015, 35(8): 11-14.
- [6] 冉田诗璐, 诸林. 高含氮天然气膨胀制冷液化工艺节能分析[J]. 现代化工, 2014, 34(6): 142-145.
- [7] 朱渝, 黄凤林, 司云航, 等. 混合制冷剂循环液化天然气工艺烟分析[J]. 现代化工, 2015, 35(9): 172-175.
- [8] 王方, 付一珂, 范晓伟, 等. 液化天然气(LNG)冷能利用研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 748-753.
- [9] 丁贺, 孙恒, 何明, 等. MFC 液化流程的分析和优化[J]. 低温与超导, 2015, 43(9): 1-5.
- [10] 夏丹, 郑云萍, 李剑峰, 等. 丙烷预冷混合制冷剂液化流程用能优化方案[J]. 油气储运, 2015, 34(3): 267-270, 274.
- [11] 汪蝶, 张引弟, 杨建平, 等. LNG 接收站 BOG 再冷凝工艺 HYSYS 模拟及优化[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(5): 30-34.
- [12] 刘明宝, 杨超普, 阎赞, 等. 基于二次回归正交设计及均匀设计的柞水菱铁矿最佳回收工艺参数[J]. 矿冶工程, 2017, 37(3): 97-100.
- [13] 孙兰香, 辛勇, 丛智博, 等. 通过二次回归正交设计对激光诱导击穿光谱实验参数优化建模[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 292-298. ■