

基于焓分析的 C_2^+ 回收工艺分析

蒋洪¹, 杨铜林^{1*}, 杨冬磊²

(1.西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;

2.中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:针对国内天然气凝液回收的要求,提出了一种基于干气循环的改进RSV乙烷回收流程:丙烷与混合冷剂制冷的RSV流程(RSV-P-M)。运用HYSYS软件模拟回收乙烷及以上组分。为了分析乙烷回收过程中能耗较高、有效能利用较低的问题,对改进流程进行了焓分析、灵敏度分析。研究表明,塔器及节流阀具有较大不可逆性,冷箱改进潜力明显。以焓效率、焓损、乙烷回收率、能耗为目标函数,采用单因素分析法对不可逆性较小的设备进行参数优化后,乙烷回收率提高了2.58%,综合能耗减少了155 640 MJ/d,流程焓效率提高了10.58%,经济效益得到显著提高。

关键词:焓分析;乙烷回收;单因素分析;优化

中图分类号:TQ221.12

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)11-0219-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.11.045

Analysis on ethane recovery process based on exergy analysis

JIANG Hong¹, YANG Tong-lin^{1*}, YANG Dong-lei²

(1.Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China)

Abstract:In the light of China's requirement on natural gas condensate recovery, one high-efficient modified RSV ethane recovery process is put forward, which recycles split vapor with propane and mixed refrigerant refrigeration cycle (RSV-P-M). By means of HYSYS software, the recovery of ethane and higher alkane components is simulated. In order to solve the problems of high energy consumption and low energy utilization rate in the process of gas-rich ethane recovery, both exergy analysis and sensitivity analysis are performed to the modified process. Analysis results indicate that tower and throttle valves show more irreversible, and the heat exchanger has a greater improvement potential. Taking exergy efficiency, exergy destruction, ethane recovery rate, energy consumption as the objective functions, the single factor analysis method is employed to optimize the parameters of equipment with less irreversibility. After the optimization, the ethane recovery rate increases by 2.58%, the comprehensive energy consumption drops by 155,640 MJ·d⁻¹, the process exergy efficiency is improved by 10.58%, and the economic benefits are significantly improved.

Key words: exergy analysis; ethane recovery; single factor analysis; optimization

天然气乙烷回收是指将 C_2^+ 从甲烷等轻组分中分离出来,回收的乙烷和天然气液体(NGL)可显著提高处理厂的经济效益^[1-2]。近年来,随着乙烯市场需求量的增大,国内各大油田逐渐意识到回收乙烷的重要性。乙烷是一种生产乙烯的优质洁净原料,具有很高的经济价值。因此,国外较早开展了对乙烷回收的研究,工艺体系更为完善,主要形成了以膨胀机制冷、冷剂制冷+膨胀机制冷的联合制冷工艺^[3-5]。针对不同工况,开发了多种乙烷回收流程,美国 Orloff 公司开发的部分干气再循环工艺(recycle split vapor, RSV),因适应性好、经济效益高而广泛应用^[6-8]。对重烃含量多的天然气进行凝液回收时,工艺复杂,能耗较高,流程分析更加重要。目前,能耗分析、焓分析、热集成分析以及经济性分

析是常用的流程评价方法。笔者以国内某气田原料气工况为研究对象,改进设计一种高效乙烷回收流程,通过焓分析、单因素分析法对流程进行有效能利用分析。

1 流程描述

在RSV流程的基础上,提出一种适用于富气乙烷回收的改进流程:丙烷与混合冷剂制冷的RSV改进流程(recycle split vapor with propane and mixed refrigerant refrigeration cycle, RSV-P-M)。

图1为处理流程以及外部制冷系统。原料气通过冷箱LNG-102过冷到-73℃(物流1)进入低温分离器V-101分离出冷凝的液体,冷凝液体3通过节流阀VLV-103降温到-83.47℃进入脱甲烷塔中部

收稿日期:2020-07-19;修回日期:2020-08-27

作者简介:蒋洪(1965-),男,硕士,教授,研究方向为油气集输及处理技术;杨铜林(1996-),男,硕士生,研究方向为天然气集输与处理技术,通讯联系人,934349855@qq.com。

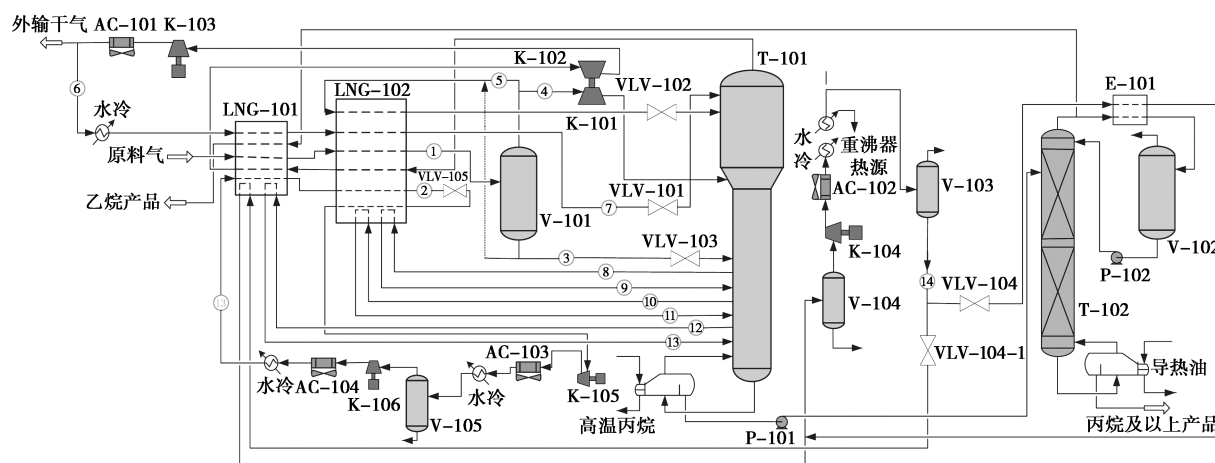


图 1 RSV-P-M 工艺流程

增强精馏效果。V-101 顶部气体分成了 2 部分：73.5% 的气体(物流 4)通过膨胀机 K-101 进入脱甲烷塔,剩余的物流 5 进入 LNG-102 过冷到 -93℃。

脱甲烷塔(T-101)的操作压力为 2.9 MPa。T-101 提供 3 股侧线抽出物流为流程提供必要的冷量。物流 8 和 9 以 -81.91、-35.40℃ 进入冷箱 LNG-102,分别以 -72.89、-13.77℃ 返回塔板;物流 12 以 15.75℃ 进入冷箱 LNG-101,再以 27.10℃ 返回。从 T-101 塔顶流出的外输干气进入 LNG-102、LNG-101 换热后进入压缩机 K-102,增压后的干气分出部分气体返回,物流 6 (7%) 进入过冷冷箱 LNG-102 冷凝到 -93℃ (物流 7),经 VLV-101 节流降压(-97.51℃)进入塔上部。回流干气大部分是甲烷(98.62%),增强了塔上部对乙烷及以上组分的吸收效果,提高了乙烷回收率。混合制冷剂制冷循环仅对冷箱 LNG-102 提供冷量,表 1 所示为混合制冷剂的组成及其配比。物流 13(24℃、3.6 MPa、1 800 kmol/h)经冷箱 LNG-101、LNG-102 预冷降压,物流 2(-73℃)经节流阀 VLV-105 压力降低到 200 kPa,温度降低到 -96.53℃,为冷箱 LNG-102 提供大量冷量。外接丙烷制冷系统提供单温位的制冷温度,减少了丙烷循环量,降低了系统压缩功耗。物流 14(19℃、1.44 MPa、1 174 kmol/h)节流到 435 kPa 为脱乙烷塔顶冷凝器 E-101 以及预冷冷箱 LNG-101 提供 -2.743℃ 的制冷温位。

表 1 混合制冷剂组成 %

组分	C ₁	C ₂ H ₄	C ₃	i-C ₄
摩尔分数	21.2	32.3	33.0	13.5

利用 HYSYS 软件对改进 RSV 流程进行模拟分

析,选用 Peng-Robinson 方程进行工艺计算及热力学计算。膨胀机绝热效率 85%,压缩机绝热效率 75%,换热器最小温差大于 3.0℃。原料气组成及工况参数见表 2。

表 2 原料气气质工况 %

组分	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄
摩尔分数	0.56	0.37	86.04	8.38	2.75	0.63	0.57
组分	i-C ₅	n-C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	
摩尔分数	0.27	0.12	0.13	0.12	0.05	0.01	

注:原料气工况,压力 4.2 MPa,温度 35℃,流量 10 430 kmol/h,外输气压力 4.5 MPa;乙烷产品质量参数, w(C₁) ≤ 1%, w(C₂) ≥ 96.5%;乙烷回收率 ≥ 94%。

2 焓分析

焓分析建立在热力学第二定律基础上,可对系统各个单元进行用能评价分析。焓是理想热力学工况中获得的最大功,通过焓分析可以揭示流程中不可逆损失的位置及数量。对设备的用能评价可以保证能量的有效利用。物流的焓主要包括物理焓、化学焓,通常条件下可以忽略动能焓和势能焓。本文中焓计算以 101.325 kPa、298.15 K 为环境基准态。

物流单位流量总焓、物理焓、化学焓表达式分别为式(1)~(3):

$$e^{\text{tot}} = e_x^{\text{ph}} + e_x^{\text{ch}} \quad (1)$$

$$e_x^{\text{ph}} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (2)$$

$$e_x^{\text{ch}} = \sum_i x_i e_i^{\theta} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (3)$$

式中, h 为物流实际情况的焓, kJ/mol; s 为物流实际情况的熵, J/K; h₀ 为环境基准状态下的焓, kJ/mol; s₀ 为环境基准状态下的熵, J/K; T₀ 为环境基准状态下的

温度, K; x_i 为物流体系中 i 组分的摩尔分数, %; e_i^θ 为 i 组分的标准化学焓, kJ/kg; R 为通用气体常数, 8.314 5 J/(mol·K)。

乙烷回收流程所用标准焓见表 3。

表 3 组分标准焓 kJ/mol

组分	e_i^θ	组分	e_i^θ
N ₂	0.693	<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	2797.29
CO ₂	20.075	<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	2800.66
CH ₄	829.974	<i>i</i> -C ₅ H ₁₂	3449.32
C ₂ H ₄	1359.449	<i>n</i> -C ₅ H ₁₂	3455.10
C ₂ H ₆	1493.549	C ₆ H ₁₄	4108.89
C ₃ H ₈	2148.674	<i>n</i> -C ₇ H ₁₆	4762.79

精馏塔侧线和塔底重沸器在外部换热的焓及精馏塔焓效率计算公式分别为式(4)、(5):

$$E_{XQ} = Q(1 - T_0/T_h) \quad (4)$$

$$\mu_{sys} = \sum E_{x,out} / (\sum E_{x,in} + \sum E_{x,Q,in}) \quad (5)$$

式中, Q 为热物流的换热负荷, kW; T_h 为热物流温度, K。

通常在外部换热过程中热物流温度是变化的, 因而采用对数平均温差的方法来计算温度 T_h , 即:

$$T_h = (T_{ho} - T_{hi}) / \ln(T_{ho}/T_{hi}) \quad (6)$$

式中, T_{hi} 为热物流进换热器温度, K; T_{ho} 为热物流出换热器温度, K。

在系统或设备能量转换和传递过程中, 将体系所收益的焓能量 E_{xg} 与支付的焓代价 E_{xp} 的比值定义为系统或设备的焓效率 μ_{ex} ^[9], 即:

$$\mu_{ex} = E_{xg} / E_{xp} \quad (7)$$

各设备的焓损和焓效率计算公式见文献[7]。

表 4 列出了主要设备的焓损及焓效率, 从整体来看, 流程的焓效率较低, 仅为 47.08%。流程焓损最大的设备是塔器 (≥27.6%), 其次是压缩机, 之后是换热器。这 3 类装置的总焓损量达到 80%, 因此分析这几类装置的焓损情况, 可以有效改善流程的用能效率。

表 4 各设备焓损及焓效率

装置	LNG-101	LNG-102	E-101	K-101	K-102
焓损/kW	306.8	1528	328	103.2	93
焓效率/%	96.01	84.92	95.66	78.03	74.62
装置	K-103	K-104	K-105	K-106	T-101
焓损/kW	866.6	252.5	720.8	292.5	1110
焓效率/%	77.47	77.14	80.47	79.64	99.63

装置	T-102	VLV-101	VLV-102	VLV-103	VLV-104
焓损/kW	1222	27.4	47	156.9	63.69
焓效率/%	99.98	64.51	63.49	75.40	41.52
装置	VLV-105	AC-101	AC-102	AC-103	AC-104
焓损/kW	504.9	171.4	42.23	374.7	230.5
焓效率/%	45.25	16.87	12.14	18.52	50.17
合计/%	47.08				

3 灵敏度分析

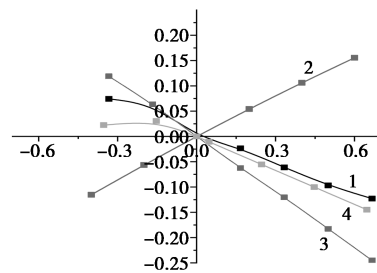
研究变量对目标函数的影响强弱程度, 称为灵敏度。运用此方法可以减少优化工作量。

在乙烷回收流程中, 影响冷箱 LNG-102 的主要变量有原料气预冷温度、混合冷剂节流阀压力、脱甲烷塔压、气相过冷比。基于基础工况(表 5), 对各变量选取合适的取值范围进行灵敏度分析, 考察它们对焓效率、能耗、乙烷回收率的影响, 选择影响最大的优化变量进行工艺优化。

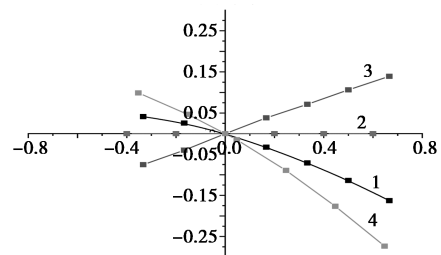
表 5 基础工况

工艺参数	预冷温度/℃	节流压力/kPa	脱甲烷塔压/MPa	气相过冷比/%
取值	-73	200	2.9	26.47

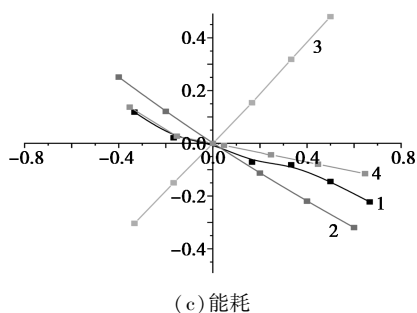
以基础工况为基准, 将上述变量在各自变化范围内的百分比作为横坐标, 焓效率、能耗、乙烷回收率的变化百分比作为纵坐标, 敏感性分析结果如图 2 所示。



(a) 焓效率



(b) 乙烷回收率



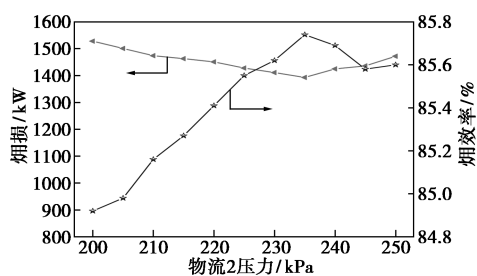
1—预冷温度;2—节流压力;3—脱甲烷塔压;4—气相过冷比

图 2 关键参数敏感性分析结果

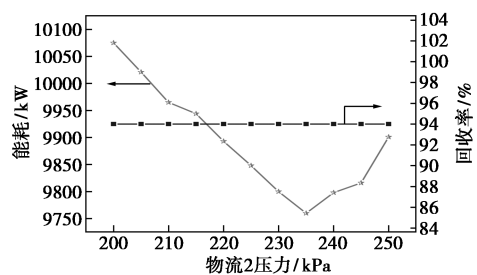
在变化范围内,各变量对 LNG-102 焓效率影响程度为:节流压力>脱甲烷塔压>预冷温度>气相过冷比;各变量对能耗的影响程度为:脱甲烷塔压>节流压力>预冷温度>气相过冷比;各变量对乙烷回收率的影响程度为:气相过冷比>脱甲烷塔压>预冷温度>节流压力。通过分析选取节流压力以及脱甲烷塔压对流程进行优化。

4 参数优化

采用单因素法,以设备焓损、焓效率、流程能耗及乙烷回收率为目标函数,运用 HYSYS 软件模拟分析发现,物流 2 的压力对冷箱 LNG-102、压缩机 K-105 影响较大,对其他设备的影响可忽略不计。调节物流 2 的压力,保持其他参数不变,模拟压力变化对冷箱 LNG-102 焓损、焓效率、流程能耗、乙烷回收率的影响(图 3):物流 2 压力由 200 kPa 升高到 250 kPa,冷箱焓损先下降后上升,焓效率变化趋势



(a) 冷箱 LNG-102 焓损及焓效率

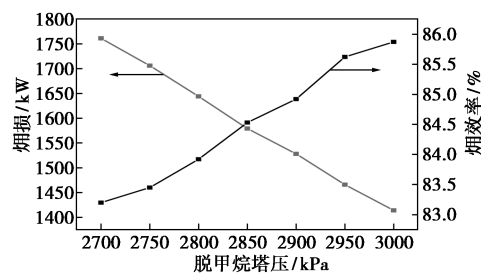


(b) 乙烷回收率及能耗

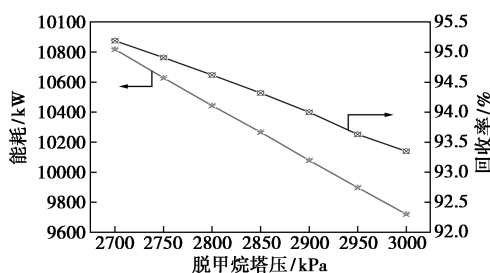
图 3 物流 2 压力对各参数的影响

与焓损恰好相反。当压力升高到 235 kPa 时,冷箱焓损最小且焓效率最大,继续升高压力,将会增大焓损,减小焓效率。主要原因是,继续升高物流 2 的压力,仅依靠调节混合冷剂的参数配比无法保持热端换热最低温差大于 3.0℃,需要增加混合冷剂的流量来提供足够多的冷量,相应地低温位处富余冷量增多,冷箱的焓效率降低,焓损增大。流程综合能耗先下降后上升,乙烷回收率保持不变,导致这种现象是由于混合冷剂流量的增加,使得压缩机 K-105 功耗增加,影响乙烷回收率的关键参数是塔压、过冷温度,仅改变制冷循环节流压力不会对回收率产生影响。为保持冷箱 LNG-102 焓损较小、焓效率较大,物流 2 的压力不宜过大,同时结合流程能耗分析可知,物流 2 压力宜保持在 235 kPa。

脱甲烷塔操作压力的变化对冷箱 LNG-102 的影响较大,在保证其他参数不变的情况下,通过 HYSYS 计算模拟发现(图 4):随着塔顶压力的升高,冷箱焓损下降明显,焓效率由 83.20% 升高到 85.87%,流程单位能耗减少了 1 098 kW,乙烷回收率随塔压的升高而降低。塔压升高增加了塔板操作温度,侧线抽出物流的温度升高,冷箱低温位处冷量富余减少,使得 LNG-102 焓损减少、焓效率升高。塔顶压力影响外输压缩机 K-103 的压缩功耗,较高的塔顶压力减小了外输压缩比,流程总体能耗降低,但随着塔压升高,甲烷与 C₂ 的相对挥发度降低,乙烷回收率降低。脱甲烷塔操作压力过低会影响回收



(a) 换热器 LNG-102 焓损及焓效率



(b) 乙烷回收率及能耗

图 4 脱甲烷塔压对各参数影响

工艺的经济效益^[10-11],在保持较低能耗以及较高回收率的情况下,优选塔顶压力为3 000 kPa。

通过对特定乙烷回收工艺(RSV-P-M)建立焓分析以及优化分析,得到关键设备的优化参数。优化后的设备焓损以及焓效率如表6所示。

表6 优化后设备焓损及焓效率

装置	LNG-101	LNG-102	E-101	K-101	K-102
焓损/kW	289.4	1204	317	92.1	83.45
焓效率/%	96.27	88.28	95.63	78.19	74.61
装置	K-103	K-104	K-105	K-106	T-101
焓损/kW	802.8	252.9	664.1	294	1126
焓效率/%	77.26	77.19	80.07	79.65	99.64
装置	T-102	VLV-101	VLV-102	VLV-103	VLV-104
焓损/kW	1231	25.25	44.86	127.2	77.13
焓效率/%	99.98	70.23	68.46	75.25	42.36
装置	VLV-105	AC-101	AC-102	AC-103	AC-104
焓损/kW	468.3	130.6	46.71	294.7	215.5
焓效率/%	45.72	18.12	10.15	22.42	51.84
合计/%	57.66				

优化后主要设备的焓效率均有一定程度的提高,流程焓效率提高了10.58%,综合能耗减少了155 640 MJ/d,乙烷回收率提高到96.58%(表7),达到了优化流程用能的目的。

表7 流程优化前后对比

对比项	乙烷回收率/%	总压缩功耗/kW	脱乙烷塔重沸器负荷/kW	综合能耗/(TJ·d ⁻¹)	焓效率/%
优化前	94.00	10079	5474	3.56	47.08
优化后	96.58	9580	5365	3.41	57.66

5 结论

(1) 提出一种改进RSV乙烷回收流程:RSV-P-M流程在富气条件下保留了RSV流程高回收率

的特点,保证了乙烷回收率在94%以上。采用混合冷剂对主冷箱进行制冷,极大程度上简化了工艺结构,减少了设备的投资。

(2) 采用灵敏度分析法对影响关键设备的主要变量进行分析,显著降低优化流程的工作量。

(3) 基于热力学第二定律,将焓分析方法用于富气乙烷回收流程的参数优化,通过焓分析建立模型,计算流程各设备的焓损及焓效率,揭示出塔器的不可逆性较小,热交换器可通过优化混合冷剂节流压力、脱甲烷塔压提高有效能利用。运用该方法有效降低了乙烷回收过程中的生产成本,经济效益显著。

参考文献

- [1] 马宁,周悦,孙源.天然气轻烃回收技术的工艺现状与进展[J].广东化工,2010,37(10):78-79.
- [2] 马宁.天然气脱烃工艺技术的工艺现状与进展[J].化工时刊,2018,32(3):44-45.
- [3] 王宇,陈小榆,蒋洪,等.RSV乙烷回收工艺技术研究[J].现代化工,2018,38(2):181-184.
- [4] 王沐云.DHX工艺在膨胀制冷轻烃回收装置上的应用[J].石油与天然气化工,2018,47(4):45-49.
- [5] 杨雨林,陈小榆,何杰,等.乙烷回收改进流程用能分析[J].石油与天然气化工,2019,48(4):61-68.
- [6] Ortloff Engineers, Ltd. Gas processing plants licensed to use ortloff technology. Recycle split vapor process [EB/OL]. <http://www.ortloff.com/files/RSV.pdf>, 2005.
- [7] Jiang Hong, Zhang Shijian, Jing Jiaqiang, et al. Thermodynamic and economic analysis of ethane recovery processes based on rich gas [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 105-119.
- [8] Foglietta J H, Mowrey E R, Patel S N, et al. Cryogenic process utilizing high pressure absorber column; EP, 200220757773 [P]. 2002-03-01.
- [9] Dincer I, Rosen M A. Exergy analysis of heating, refrigerating and air conditioning [M]. UK: Elsevier, 2015.
- [10] 申安云,余祖珊,王宝权.利用天然气压力能的轻烃分离方法[J].煤气与热力,2009,(4):34-37.
- [11] 高春雨.2013年国内乙烯市场分析及2014年预测[J].煤炭加工与综合利用,2014,31(2):47-50. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:<http://www.xdhg.com.cn>