

油田伴生气的液化联产工艺方案 技术研究

黄靖珊^{1*}, 杨铜林², 田 银³, 李浩玉⁴, 朱友庄¹

1. 中油(新疆)石油工程有限公司设计分公司, 新疆 克拉玛依 834000;
2. 中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院, 新疆 库尔勒 841000;
3. 新疆新建盈天勘测规划设计有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;
4. 中国石油长庆油田分公司苏里格气田开发公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 为了对国内油田伴生气进行高效回收利用, 以某油田伴生气为基础, 对油田伴生气回收技术方案进行研究, 开发出适合于小规模油田伴生气的液化联产工艺, 并对工艺进行了热力学分析及参数优化设计。基于 Aspen HYSYS 软件对液化联产方案进行模拟计算, 对流程中特性参数脱乙烷塔压力、原料气液化温度、混合冷剂增压压力以及混合冷剂节流压力进行模拟分析。研究表明, 设备的焓损改进潜力明显, 其中改进设备性能、提高系统效率最快的是压缩机, 其次是换热器以及水冷器。大多数设备的可避免内源焓损($E_{D,K}^{AV,EN}$) 在总焓损中占比最高, 且焓损量大, 对 $E_{D,K}^{AV,EN}$ 占比多的压缩机进行改进是减小流程焓损最有效的措施。通过减小冷箱夹点, 提升脱乙烷塔效率也可大幅降低流程总焓损。水冷器的 $E_{D,K}^{AV,EN}$ 和可避免外源焓损($E_{D,K}^{AV,EN}$) 占比均较高, 降低水冷器焓损不仅可从自身内源焓损入手, 还可改善其他设备性能以降低空冷器焓损。

关键词: 油田伴生气; 液化联产; 常规焓分析; 能耗分析; 高级焓分析

中图分类号: TE89

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)11-0232-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.11.041

Study on technology scheme for liquefaction co-production of associated gas in oilfield

HUANG Jing-shan^{1*}, YANG Tong-lin², TIAN Yin³, LI Hao-yu⁴, ZHU You-zhuang¹

1. Design Branch, PetroChina (Xinjiang) Petroleum Engineering Co., Ltd., Karamay 834000, China;
2. Oil & Gas Engineering Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China;
3. Xinjiang Xinjian Yingtian Survey, Planning and Design Co., Ltd., Urumqi 830000, China;
4. Sulige Gas Field Development Company, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: In order to efficiently recover and utilize the associated gas in China's oilfields, the oilfield associated gas recovery technical process scheme is studied on the basis of associated gas in a certain oilfield in China, and a liquefaction co-production process suitable for small-scale oilfields is developed. Thermodynamic analysis and parameter optimization design are performed on the process. Based on Aspen HYSYS software, the simulation calculation is conducted for the liquefaction co-production process, and the characteristic parameters of the process are simulated and analyzed, including de-ethane column pressure, feedstock gas liquefaction temperature, mixed refrigerant booster pressure and mixed refrigerant throttling pressure. It is found from study that the exergy loss of equipment has obvious potential for improvement, of which the compressors are the most efficiency equipment in improving equipment performance and system efficiency, followed by heat exchangers and water coolers. For most equipment, avoidable internal exergy loss accounts for the highest proportion of overall exergy loss and is large. Therefore, to improve compressors, which accounts for a large number and proportion, is the most effective measure to reduce exergy loss in the process. Through reducing the pinch point of the cold box, the exergy efficiency of the de-ethane tower can be improved, which can greatly reduce the overall exergy loss of the process. Both exergy loss and avoidable external exergy loss of air coolers are relatively high. Exergy loss of air coolers can be decreased from their own internal exergy loss, and also from the performance of other equipment.

Key words: oilfield associated gas; liquefaction coproduction; normal exergy analysis; energy consumption analysis; advanced exergy analysis

目前,我国很多油田伴生气进行放空处理,据国内报道,我国每年放空的油田伴生气高达 10 亿 m^3 , 不仅浪费了大量的油气资源,还对环境造成了污染。目前,制约小规模油田伴生气利用的关键因素是运输问题。由于气源分散、规模小,同时远离输气管网,采用常规输送方式成本较高且不合理。而将伴

生气进行液化处理,采用车辆运输销售是一个良好的解决方案^[1]。油田伴生气普遍重烃含量较高,直接进行液化处理,在低温条件下可能会造成设备堵塞问题,因此,针对此类气源的特点,对小规模油田伴生气的回收利用采用凝液回收与液化联产的工艺技术,不仅能够实现油田伴生气的分级利用,还能节

收稿日期:2023-12-12;修回日期:2024-09-06

作者简介:黄靖珊(1996-),女,硕士,助理工程师,从事油气储运及油气加工的设计工作,通讯联系人,1369675835@qq.com。

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

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

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; h_0 为环境基准状态下的焓, kJ/mol; s_0 为环境基准态下的熵, J/K; T_0 为环境基准态下的温度, 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)。

2.2 焓分析

利用上述焓分析模型以及各类设备焓损以及焓效率公式, 计算得出各类设备的焓损及焓效率, 结果见表 2。

表 2 联产工艺系统焓分析结果

设备	焓损/kW	焓效率/%
E-401	113.40	83.56
K-401	70.29	80.46
K-402	46.02	80.19
T-401	34.85	99.89
P-401	0.45	73.93
WC-401	52.04	23.06
WC-402	43.54	27.45
VLV-401	3.39	74.40
VLV-402	2.73	9.50
VLV-403	12.91	62.98
VLV-404	17.46	8.71
VLV-405	19.62	2.56
系统	416.69	22.11

表 2 显示了基于混合制冷剂制冷的液化联产方案主要设备的焓损量以及焓效率, 流程焓损最大的设备是压缩机, 其次是换热器, 之后是水冷器。水冷器在流程中用于冷却经压缩机增压后的制冷剂, 由于压缩机出口制冷剂温度高且循环量大, 导致经过水冷器降温后, 制冷剂品位降低明显, 水冷器焓效率较低, 改进其用能情况能够显著降低系统焓损变量。

3 油田伴生气液化联产方案高级焓分析

常规焓分析只能揭示各设备焓损及焓效率, 不能提出各系统改进的有效措施。高级焓可以进一步分析各设备之间节能潜力, 更能准确有效提出各系统能源有效改进方案^[8]。其中内源焓损 $E_{D,K}^{EN}$ 为当所有设备都在理想状态运行时该设备所获得的焓损, 外源焓损 $E_{D,K}^{EX}$ 为整个系统不可逆性所造成的焓损。根据当今制造、经济等技术发展的限制, 可将设备焓损分为可避免焓损 $E_{D,K}^{AV}$ 及不可避免焓损 $E_{D,K}^{UN}$ 。具体焓损分析关系如图 2 所示。

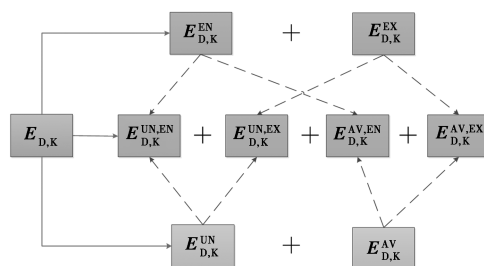


图 2 焓损分类描述图

3.1 高级焓分析理论

(1) 内源焓损及外源焓损

设备焓损包括内源焓和外源焓, 计算公式如下:

$$E_{D,K} = E_{D,K}^{EN} + E_{D,K}^{EX} \quad (4)$$

式中, $E_{D,K}$ 为设备 K 的焓损, kW; 上标 EN 为内源焓损, EX 为外源焓损, kW。

内源焓损采用工程法计算。工程法利用整个系统的热力学焓的敏感性来计算设备的内源焓损, 在此过程中不需要保证其他设备处在理想状态, 只需要保持研究对象处在实际状态, 改变其他设备参数, 最后利用描点作图的方法来得到设备的内源焓损。运用工程法, 系统的总焓损可按照公式 (5) 进行细分:

$$E_{D,tot} = E_{D,K}^{EN} + E_{D,K}^{EX} + E_{D,other} \quad (5)$$

$E_{D,tot}$ 为系统总焓损, kW; $E_{D,other}$ 为除设备 K 外其他设备的总焓损, kW; $E_{D,K}^{EX}$ 是由于其他设备的不可逆性所产生焓损, 同时也是 $E_{D,other}$ 的函数, 当 $E_{D,other}$ 的值趋近于零时, $E_{D,K}^{EX}$ 的大小也趋近于零, 此时系统所产生的焓损就是由于设备本身的不可逆性所引起的, 因此系统的总焓损等于内源焓损 $E_{D,K}^{EN}$ 。运用工程法计算 $E_{D,K}^{EN}$ 的过程中, 需要绘制如图 3 所示的图形。从图中可以看出, 延长直线并与纵坐标相交, 截距即为所求设备的内源焓损, 在绘制直线的过程中需要保证设备的焓效率恒定不变。图形的线性关系已经在文献[9]得到了证明。

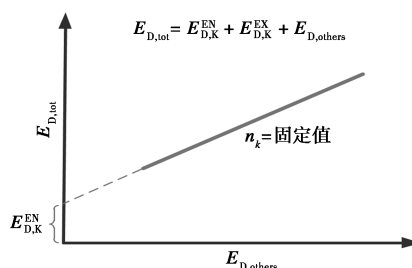


图 3 工程法求取内源焓的示意图

(2) 可避免及不可避免焓损

由于现实客观原因存在, 设备焓损分为可避免焓损和不可避免焓损, 如式 (6) 所示:

$$E_{D,K} = E_{D,K}^{AV} + E_{D,K}^{UN} \quad (6)$$

式中,上标 AV 为设备 K 的可避免焓损,kW;UN 为不可避免焓损,kW。

各焓损计算如式(7)~(9)所示。

$$E_{D,K}^{UN} = E_{P,K}^{real} \times (E_{D,K}/E_{P,K})^{UN} \quad (7)$$

$$E_{P,K} = [E_{D,K}/(1-\eta)] \times \eta \quad (8)$$

$$E_{D,K}^{AV} = E_{D,K} - E_{D,K}^{UN} \quad (9)$$

式中, $E_{P,K}^{real}$ 为实际运行工况下设备 K 的产品焓,kW; $E_{P,K}$ 为设备 K 处于不可避免状态下的产品焓,kW; η 为设备 K 的焓效率,%。各设备不可避免焓损的假设情况如表 3 所示^[9-12]。

表 3 计算不可避免焓损的假设

设备	不可避免状态 ^①	理想状态
换热器	夹点温度等于 0.5℃ 对数平均温差等于 2℃ 压降等于 0 ^②	夹点温度等于 0℃ 对数平均温差等于 0℃ 压降等于 0
压缩机	绝热效率等于 95%	绝热效率等于 100%
泵	等焓效率等于 95%	等焓效率等于 100%
脱乙烷塔	压降为 0 最大理论塔板 20 块 热绝缘	热绝缘 压降为 0 理论塔板趋近无穷
水冷器	夹点温度等于 5℃ 压降为 0	夹点温度等于 0℃ 压降为 0

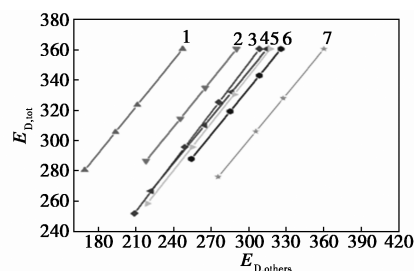
注:①不可避免状态:设备及工艺在未来达到极高水平仍会存在的能量损失;②制造水平到一定高度可以忽略换热管程的压降损失。

3.2 高级焓分析

采用工程法计算设备的内源焓损时,需要保证研究设备的焓效率不变,且其他设备的焓损失不是波动变化的,对于节流阀这类设备,本身就是不可逆

性的,不能采用工程法对其计算,因此本文中对设备内源焓损的计算不考虑节流阀。

根据前文所述的工程法,通过描点作图得到关于各设备的系统总焓损 $E_{D,tot}$ 以及除去研究设备的其他焓损 $E_{D,others}$,并在图中得到总焓损关于其他焓损的关系直线,延长该直线与纵轴的截距即为该设备的内源焓损,描点作图结果见图 4,高级焓分析结果的详细数据见表 4。结合图 4 可以看出,大部分设备的内源焓损大于外源焓损,从此处可以得知,在小规模伴生气液化与凝液回收联产工艺中设备的焓损主要是由设备本身的不可逆性造成的,其他设备的性能对研究对象的影响程度相对较小,系统总的内源焓损占比为 82.02%,系统可避免焓损占比较高为 51.24%,焓损改进潜力较大。通过整个系统分析, $(E_D/E_P)_k^{UN}$ 相对较小的是压缩机和制冷系统泵。 $(E_D/E_P)_k^{UN}$ 越小,能效利用率越高,经过一定技术改造,压缩机和泵有效能利用率将会提高。对于塔设备,不可避免状态与实际工况相近,因此为了提高塔设备有效能利用率很困难。



1—E-401;2—K-401;3—WC-401;4—K-402;5—WC-402;
6—T-401;7—P-401

图 4 工程法求解设备内源焓损

表 4 流程焓分类

设备	焓损类型/kW										
	$E_{D,K}^{EN}$	$E_{D,K}^{EX}$	$E_{P,K}$	$(E_D/E_P)_k^{UN}$	$E_{D,K}^{UN}$	$E_{D,K}^{AV}$	$E_{P,K}^{EN}$	$E_{D,K}^{UN,EN}$	$E_{D,K}^{UN,EX}$	$E_{D,K}^{AV,EN}$	$E_{D,K}^{AV,EX}$
K-401	62.910	7.380	289.43	0.0414	11.310	58.980	259.040	10.720	0.59	52.190	6.790
K-402	41.740	4.280	186.29	0.0419	7.370	38.650	168.960	7.080	0.29	34.660	3.990
E-401	106.950	6.450	576.38	0.1489	83.690	29.710	543.590	80.940	2.75	26.010	3.700
T-401	29.460	5.390	149.15	0.2034	30.590	4.260	126.080	25.640	4.95	3.820	0.440
P-401	0.057	0.388	1.26	0.0838	0.104	0.341	0.162	0.014	0.09	0.043	0.298
WC-401	24.440	27.600	15.60	0.6385	26.360	25.680	7.330	4.680	21.68	19.760	5.720
WC-402	30.200	13.340	16.47	0.3761	16.410	27.130	11.430	4.300	12.11	25.900	1.230

根据常规焓分析,焓损占比较高。通过高级焓进一步分析,主要焓损在可避免内源焓损,通过改变冷箱结构形式可以降低焓损。脱乙烷 T-401 可避免内源焓损占比很低(10.96%),由于其结构复杂,设备投资成本较高,通过改变结构形式降低可避免内源焓损经济效益较差,不推荐。水冷器 WC-401

与 WC-402 焓损比例分布差异较大,WC-401 可避免内源焓损较低为 38.12%,而 WC-402 可避免内源焓损大于 50%,造成这种差异主要原因是,制冷压缩机 K-401 增压后冷剂出口温度高于 K-402 增压后的出口温度,而水冷器出口温度相同,因此水冷器 WC-401 焓损受压缩机的性能影响更大。

通过高级焓分析结果表明,大部分设备的焓损由自身不可逆性造成的,提高设备自身的工作性能,能够减少系统运行过程中的能量损失,此外对系统的焓损分类表明,可避免内源焓比例最高,证明流程中能量利用效率改进空间较大。

4 结论

我国存在大量规模较小的油田伴生气,由于没有合理且经济的回收技术,这些资源大部分被浪费,本文中以某油田伴生气为研究基础,提出 GSP 与混合冷剂制冷液化联产工艺方案,通过从流程能耗、常规焓分析、高等焓分析等角度对流程进行研究和对比,主要结论如下。

(1) GSP 与混合冷剂制冷液化联产方案可有效实现油田伴生气的综合利用,可以提高整体系统的热集成度,为油气田带来良好的社会效益和经济效益。

(2) 通过常规焓分析方法对液化联产方案中设备进行有效能利用分析,发现液化联产方案中换热器、压缩机以及水冷器焓损较大。

(3) 根据高级焓进一步进行分析,进一步揭示系统改进潜力。高等焓分析发现,大多数设备总焓损中可避免内源焓损占比最高。压缩机数量多,可避免内源焓损比例高,对压缩机效率进行改进,是减小流程焓损最有效的措施。其次通过减小冷箱夹点温度,提升脱乙烷塔焓效率也可大幅降低流程总焓损。空冷器的可避免内源焓损和可避免外源焓损占

比均较高,降低空冷器焓损不仅可从自身内源焓损入手,还可改善其他设备性能降低空冷器焓损。

参考文献

- [1] 许冬进. 油田伴生气高效回收和利用研究 [C]. 2015 年全国天然气学术年会, 2015: 682-687.
- [2] 邓骥, 魏芳, 申世勇, 等. 基于 RSM 的轻烃回收装置 C_3 收率分析及优化 [J]. 现代化工, 2016, 36(8): 178-181, 183.
- [3] 向辉, 蒲红宇, 卫浪. 基于 PSO 算法的 GSP 流程 C_3 轻烃回收参数优化 [J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 2020, 45(3): 70-74, 127.
- [4] 陈波, 李莎, 沈丽军, 等. DHX 工艺丙烷收率理论计算公式推导及影响因素研究 [J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 2021, 46(1): 61-65.
- [5] He T B, Ju Y L. A novel process for small-scale pipeline natural gas liquefaction [J]. Applied Energy, 2014, 115: 17-24.
- [6] Amidpour M. Exergetic and economic assessment of oxygen production from two columns cryogenic air separation unit [J]. Energy, 2015, 90(2): 1298-1316.
- [7] Chen J, Havtun H, Palm B. Conventional and advanced exergy analysis of an ejector refrigeration system [J]. Applied Energy, 2015, 144: 139-151.
- [8] Tao B, Yu J, Gang Y. Advanced exergy analysis on a modified auto-cascade freezer cycle with an ejector [J]. Energy, 2016, 113: 385-398.
- [9] Kelly S. Energy systems improvement based on endogenous and exogenous exergy destruction [D]. Berlin: Technische University, 2008.
- [10] Ansarinab H, Mehrpooya M, Mohammadi A. Advanced exergy and exergoeconomic analyses of a hydrogen liquefaction plant equipped with mixed refrigerant system [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144: 248-259.
- [11] Zhang S J, Jing J Q, Jiang H, et al. Advanced exergy analyses of modified ethane recovery processes with different refrigeration cycles [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119982.
- [12] Fallah M, Mahmoudi S M S, Yari M, et al. Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 108: 190-201. ■

(上接第 231 页)

优化导流板、折流板及整流格栅等,实现锅炉烟气脱硝系统的喷氨调平,降低氨逃逸。改造完成投用后,锅炉运行状况稳定,喷嘴结垢问题得到极大的改善,氨逃逸率和 NO_x 浓度均满足相应指标。

(2) 燃煤锅炉 SCR 法烟气脱硝喷氨调平技术目前已应用于多套装置,技术比较成熟,能够有效地控制锅炉外排烟气中的氮氧化物 (NO_x) 浓度,同时氨逃逸控制效果十分显著。随着环保标准的日益严格以及工程设计手段的日渐丰富,喷氨调平技术会得到更广泛的应用与改进优化。在国家可持续发展战略及空气质量持续改善行动计划下,为实现低能耗、高效率的烟气脱硝和超低排放环保治理贡献力量。

参考文献

- [1] 黄润秋. 国务院关于 2021 年度环境状况和环境保护目标完成情况

况的报告 [J]. 环境保护, 2022, 50(8): 8-11.

- [2] 尹海芮; 王远洋. 燃煤电厂烟气脱硝废弃 SCR 催化剂的再生和回收研究进展 [J]. 现代化工, 2019, 39(9): 16-20.
- [3] 王明星, 李欣, 李勇, 等. 分区控氨技术在烟气 NO_x 超低排放中的应用 [J]. 化工环保, 2021, 41(4): 524-528.
- [4] 海坤, 尹晓春, 刘隆键, 等. 烧结烟气 SCR 脱硝系统流场模拟及导流结构优化 [J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(4): 89-95.
- [5] 曹志勇, 谭城军, 李建中, 等. 燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝系统喷氨优化调整试验 [J]. 中国电力, 2011, 44(11): 55-58.
- [6] 韩发年, 闫志勇. SCR 烟气脱硝工艺喷氨混合装置研究进展 [J]. 化工进展, 2015, 34(12): 4151-4157.
- [7] 张云. 燃煤机组 SCR 脱硝系统 AIG 喷氨优化调整 [J]. 中国高新技术企业, 2014, (21): 49-50.
- [8] 徐波, 陈锋, 孙滴清, 等. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝喷氨静态混合技术研究 [J]. 能源与节能, 2017, (10): 86-87.
- [9] Nischt W, Bigalbal J, Wooldridge B. Recent SCR retrofit experience on coal-fired boilers [R]. New Orleans: U. S. Babcock & Wilcox, 2009. ■