

高含氮天然气膨胀制冷液化工艺节能分析

冉田诗璐, 诸林*

(西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500)

摘要:在利用 HYSYS 对某高含氮天然气膨胀制冷液化工艺进行模拟的基础上, 应用有效能分析法考察了该工艺过程中有效能损失的数量与分布, 并提出节能的措施。研究表明, 有效能损失主要集中在膨胀机、压缩机与冷箱, 分别占总有效能损失的 51.30%、35.61% 和 8.13%; 适当降低制冷剂中 N_2 摩尔分数、提高低压制冷剂温度与压力、减少高压制冷剂流量, 可以达到改善膨胀机和压缩机能量利用效率的目的; 回收储罐蒸发气 (boil oil gas, BOG) 的冷量用以预冷原料气及适当减少冷箱内换热温差、增大换热面积, 能够有效降低冷箱的有效能损失。

关键词:高含氮天然气; 膨胀制冷; 液化; 节能; 有效能损失

中图分类号: TE08

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)06-0142-04

Energy-saving analysis on expanding refrigeration process of high- N_2 natural gas

RAN Tian-shilu, ZHU Lin*

(College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: An expanding refrigeration process simulation of the natural gas with high content of nitrogen is conducted by HYSYS. The amount and distribution of exergy loss for high- N_2 natural gas in this process are investigated. The energy-saving strategy is also put forward. The results show that the exergy loss is mainly in the expander, compressor and heat exchanger, and account for 51.30%, 35.61% and 8.13% of the total exergy losses, respectively. Decreasing the N_2 content in the refrigerant properly, improving the pressure and temperature of the low pressure refrigerant and reducing the flow of the high pressure refrigerant achieve the improved energy utilization efficiency of expander and compressor. For the heat exchangers, decreasing heat transfer temperature difference, enlarging heat transfer area and recycling the BOG cooling energy can reduce exergy losses of the heat exchangers effectively.

Key words: high- N_2 natural gas; expanding refrigeration; liquefaction; energy saving; exergy loss

近年来, 部分含油气盆地陆续开采出含氮量较高的天然气。高含氮天然气热值低, 集输能耗大, 难以直接用作车用燃料和化工原料, 如何合理、有效地脱除这类天然气中的氮气, 对提高天然气的综合利用价值具有重要意义。目前, 天然气脱氮方法主要有深冷脱氮、溶剂吸收和变压吸附^[1-3]。深冷脱氮方法中的膨胀制冷液化工艺因具有氮脱除率高、同时又能生产高品质液化天然气 (LNG) 的特点而得到普遍应用。但该工艺存在能耗高、能量利用效率低的不足。为此, 本文中在对高含氮天然气膨胀制冷液化工艺进行流程模拟的基础上, 应用有效能分析法考察该工艺过程中有效能损失的多少与分布, 并有针对性地提出了节能降耗的措施。

1 膨胀制冷液化工艺分析

1.1 流程模拟

初步净化后的某高含氮天然气温度为 25℃, 压

力为 3.6 MPa, 处理量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其组成如表 1^[4] 所示。

表 1 某高含氮天然气组成

组分	C_1	C_2	C_3	$i-C_4$	$n-C_4$
摩尔分数	78.01	0.83	0.26	0.06	0.06
组分	$i-C_5$	$n-C_5$	C_6H_{14}	N_2	
摩尔分数	0.04	0.02	0.08	20.64	

模拟流程如图 1 所示。物流代号为 1 的低压制冷剂 (N_2) 经压缩机三级 (C-101、C-102、C-103) 压缩至 3.5 MPa 左右后, 进入预冷冷箱。经预冷后, 一部分 (15%) 高压制冷剂进入液化冷箱进一步降温, 接着制冷剂去精馏塔上部给冷却器提供冷量; 剩余高压制冷剂去膨胀机绝热膨胀, 降压至 200 kPa 左右后, 依次进入液化冷箱与预冷冷箱, 作为冷箱主要冷源, 使原料气逐级降温, 最后全部液化为 LNG^[5-6]。

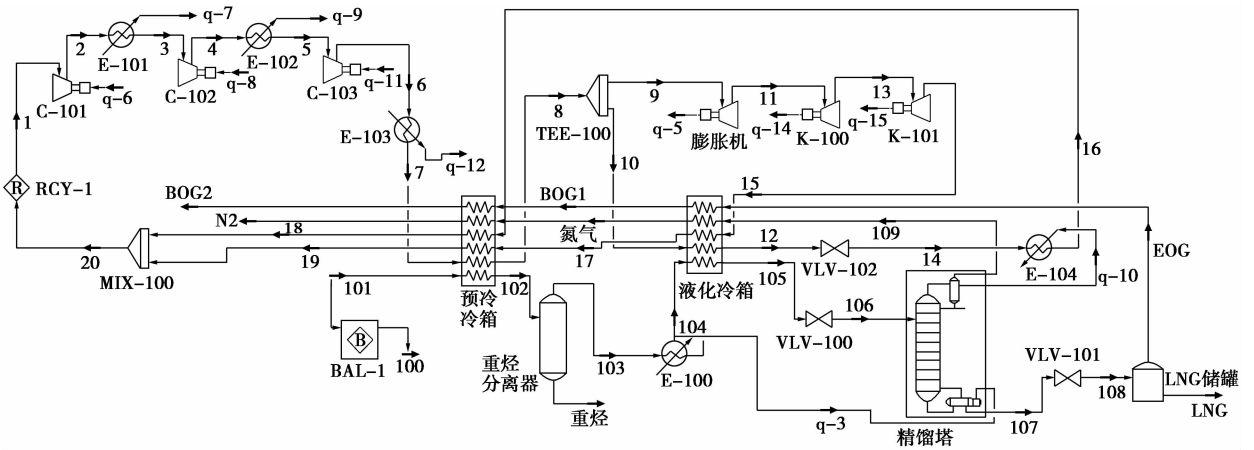


图1 高含氮天然气膨胀制冷液化工艺模拟流程图

物流代号为101的原料气首先在预冷冷箱中降温($T = -50^{\circ}\text{C}$ 左右),接着经重烃分离器分离出重烃。脱重烃后的原料气进入精馏塔塔底作为再沸器的热源,温度降至 -95°C 左右。从精馏塔再沸器出来的原料气经液化冷箱深冷至其全部液化,此时温度为 -113°C 。液化天然气经节流阀(VLV-100)降压($P = 0.8\text{ MPa}$ 左右)后进入精馏塔脱氮。塔顶脱出的氮气经冷箱复热后外输,塔底产品LNG经节流

阀(VLV-101)节流至常压后,进入LNG储罐储存。LNG储罐产出少量BOG去冷箱复热后,送火炬或排入大气^[7]。

1.2 有效能损失

经模拟,得到主要物流点数据如表2所示。把表2中各物流的焓值与熵值代入表3^[8-10]的有效能损失计算公式,可计算出每股物流的有效能损失,结果如表4所示。

表2 膨胀制冷液化工艺主要物流点数据

物流号	101	102	103	104	105	106	107	LNG
温度/ $^{\circ}\text{C}$	25*	-50*	-50	-95.35	-112.83	-139.76	-122.7	-160.66
压力/kPa	3500*	3500	3500	3495	3495	800*	850	100
流量/ $(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	185.90*	185.90	176.20	176.20	176.20	176.20	139.29	104.83
焓/ $(\text{kJ}\cdot\text{kmol}^{-1})$	-62747.2	-66570.8	-63634.9	-65143.9	-71168.5	-71168.5	-89396.7	-92532.4
熵/ $(\text{kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	152.43	137.44	140.00	132.82	98.51	101.31	92.42	76.70

物流号	1	7	8	9	15	10	109	N ₂
温度/ $^{\circ}\text{C}$	17.59*	40*	-45*	-45	-123	-45	-170.64	20*
压力/kPa	190*	3495	3490	3490	200*	3490	650	640
流量/ $(\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1})$	1000*	1000	1000	850*	850	150	36.91	36.91
焓/ $(\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1})$	-231.0	210.4	-2460.0	-2460.0	-5026.2	-2460.0	-6084.8	-201.1
熵/ $(\text{kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	142.08	119.43	109.48	109.48	117.27	109.48	98.55	132.13

注:“*”为输入值。

表3 设备有效能损失计算公式

设备名称	有效能损失计算方法
膨胀机	$\Delta E = Q[-(H_2 - H_1) + T_0(S_2 - S_1) + W_e]$
压缩机	$\Delta E = Q[-(H_2 - H_1) + T_0(S_2 - S_1) + (H_2 - H_1)/\eta]$
冷箱	$\Delta E = QT_0(\sum S_2 - \sum S_1)$
节流阀	$\Delta E = QT_0(S_2 - S_1)$
混合器	$\Delta E = QT_0(S_3 - S_2 - S_1)$
冷却器	$\Delta E = QT_0(S_2 - S_1)$

表4 有效能损失计算结果

项目	设备名称	有效能损失/kW	占总损失量比例/%	
制冷循环	膨胀机	1515.17	51.30	
	压缩机	1051.91	35.61	
	预冷冷箱	156.93	8.13	
	液化冷箱	83.11		
	节流阀	23.997	0.81	
	冷却器	73.261	2.48	
混合器	混合器	32.7	1.11	
	精馏塔	再沸器	7.031	0.24
		冷却器	9.477	0.32
共计		2953.586	100	

注: T_0 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; Q 为物流摩尔流量, kmol/h ; H_1 、 H_2 为设备进出口物流的焓值, kJ/kmol ; S_1 、 S_2 为设备进出口物流的熵值, $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot^{\circ}\text{C})$; W_e 为设备功耗, kW ; η 为压缩机机械效率(统一取75%),%。

由表 4 可知,工艺中有效能损失主要集中在制冷循环,制冷循环中的有效能损失又主要分布于膨胀机、压缩机及冷箱,分别占总有效能损失的 51.30%、35.61% 和 8.13%。

2 节能措施

2.1 膨胀机与压缩机节能措施

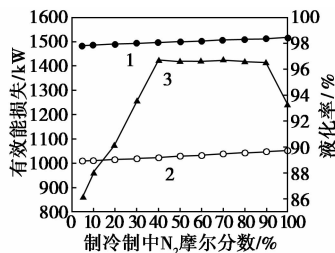
压缩机和膨胀机的有效能损失主要由过程热力学不可逆性造成,可通过合理选择其进出口参数、采取多级膨胀或多级压缩等措施来改善^[11]。

2.1.1 适当降低制冷剂中 N₂ 含量

当制冷剂温度、压力一定时,改变制冷剂的 N₂ 摩尔含量(制冷剂为甲烷与 N₂ 混合物),利用 HYSYS 计算不同制冷剂组成时的压缩机与膨胀机有效能损失及整个工艺液化率,作图 2。由图 2 可知,随着制冷剂 N₂ 摩尔分数减少,压缩机和膨胀机有效能损失均不断降低。这是由于 N₂ 的比热容 c_p 低于甲烷,制冷剂中 N₂ 摩尔分数的减少使制冷剂平均比热容 c_p 增加,依据公式:

$$Q = mc_p \Delta T$$

式中, Q 为制冷剂提供的冷量, kW; m 为制冷剂质量流量, kg/h; c_p 为制冷剂比热容, kJ/(kg·°C)。



1—膨胀机有效能损失;2—压缩机有效能损失;3—液化率

图 2 制冷剂中 N₂ 摩尔分数对有效能损失与液化率影响

Q 、 ΔT 一定时,所需制冷剂流量 m 减小,因此压缩及膨胀单位流量制冷剂所需的有效能损失减少。制冷剂中 N₂ 摩尔分数从 100% 降至 90%,液化率上升,由于 N₂ 沸点低于甲烷,甲烷摩尔分数的增加使制冷剂焓值迅速减小,对于相同流量的制冷剂,在膨胀机与压缩机进出口压力、进口温度不变的条件下,膨胀机与压缩机出口温度降低,因此所能提供的冷量增加,则液化率略有升高;N₂ 摩尔分数从 90% 降至 40%,液化率基本不变,这是由于甲烷摩尔分数继续增加,制冷剂焓值减小幅度不明显,提供的冷量基本相同,则对液化率影响不大;N₂ 摩尔分数 < 40% 之后,液化率下降,这是因为甲烷摩尔分数大于 N₂ 后,实际所需制冷剂流量减少,焓值减小使冷

量增加的程度不及制冷剂流量减小使冷量减少的程度,则液化率呈下降趋势。

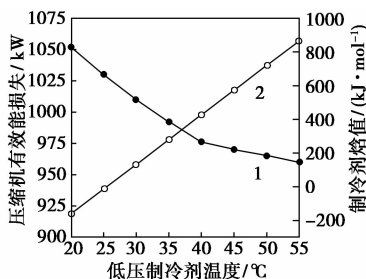
如图 2 所示,采用 N₂ 摩尔分数为 50% ~ 80% 的制冷剂,在减少压缩机与膨胀机有效能损失的同时,可维持较高液化率。

2.1.2 适当提高低压制冷剂温度与压力

图 3、图 4 依次描述了物流代号为 1 的低压制冷剂温度、压力对压缩机有效能损失的影响。由图 3 可知,随着低压制冷剂温度升高,压缩机有效能损失减少。根据焓值与温度的关系,低压制冷剂温度的升高使单位流量制冷剂焓值增大,依据公式:

$$Q = m\Delta H$$

式中, Q 为制冷剂提供的冷量, kW; m 为制冷剂质量流量, kg/h。



1—压缩机有效能损失;2—制冷剂焓值

图 3 低压制冷剂温度对压缩机有效能损失影响

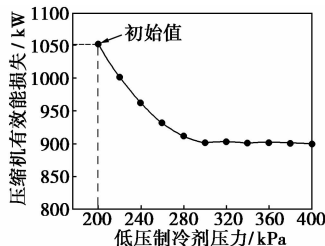


图 4 低压制冷剂压力对压缩机有效能损失影响

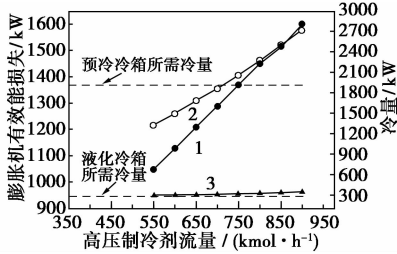
在 Q 及压缩机进出口压力不变情况下,低高压制冷剂 ΔH 增大,导致所需制冷剂流量 m 下降,从而压缩机有效能损失减小。

由图 4 可知,当低压制冷剂温度一定时,随着低压制冷剂压力升高,压缩机有效能损失迅速减少(初始值为模拟时低压制冷剂压力的取值)。这是由于压缩机出口压力不变,压缩机进口制冷剂压力的增加使压缩机压缩比减小,从而使压缩机压缩单位流量制冷剂有效能减少。而制冷剂压力的升高易使制冷剂中有液体产生,进而发生液击现象损坏压缩机。为避免这种情况的发生,制冷剂压力不能太高。

2.1.3 适当减少高压制冷剂流量

图 5 描述了高压制冷剂(物流代号为 9)不同流

量对膨胀机有效能损失及对提供冷箱的冷量的影响。由图5可知,随着高压制冷剂流量减少,膨胀机有效能损失减少。在膨胀机进出口压力固定的条件下,由于制冷剂流量的减少使膨胀机膨胀单位流量制冷剂所需的有效能损失减少。随着高压制冷剂流量减少,制冷剂提供给冷箱冷量减少,制冷剂提供的冷量过少便不能满足冷箱所需冷量,不能达到深冷要求。



1—膨胀机有效能损失;2—制冷剂提供预冷冷箱的冷量;
3—制冷剂提供液化冷箱的冷量

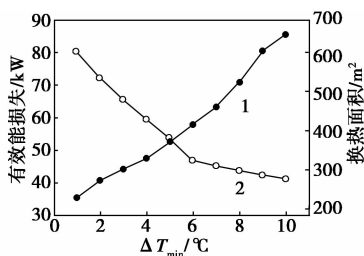
图5 高压制冷剂流量对膨胀机有效能损失影响

如图5所示,高压制冷剂流量 ≥ 700 kmol/h时,所提供的冷量可满足2个冷箱所需,保证冷箱把原料气冷却到指定温度。

2.2 冷箱节能措施

液化流程中冷箱的换热温差较大、换热面积较小,是导致有效能损失量增加的主要原因^[12]。

利用 Aspen Energy Analyzer 计算不同 ΔT_{\min} 对应的液化冷箱换热面积 A 。图6表征了液化冷箱的最小换热温差 ΔT_{\min} 变化对冷箱有效能损失及换热面积的影响。由图6可知,当 ΔT_{\min} 从 10°C 降至 0°C ,液化冷箱有效能损失减少。由传热过程冷箱有效能损失计算公式 $\Delta E = QT_0 (\sum S_2 - \sum S_1) = QT_0 [\Delta T/T_H T_L]$ 可知,冷热物流摩尔流量 Q 、热物流温度 T_H 和冷物流温度 T_L 一定时,冷热物流换热温差 ΔT 的减小使冷箱有效能损失减小。在原料气进入冷箱前,利用 LNG 储罐排出的 BOG 气体的冷量对原料气进行预冷,可达到减小冷箱换热温差的目的。



1—有效能损失;2—换热面积

图6 换热温差 ΔT_{\min} 对冷箱有效能损失及换热面积的影响

由图6可知,当 ΔT_{\min} 下降时,换热面积增大,这是由于在传递同样的热流量 Q 条件下,由传热过程基本方程式 $Q = KA\Delta t_m$ ^[13] 可知,换热温差减小,对数平均推动力 Δt_m 减小,则所需换热面积 A 增大。而换热面积增大,设备投资费用必然增加。为同时降低冷箱有效能损失与设备投资费用,需控制换热面积不能太高。

3 结语

(1) 该高含氮天然气膨胀制冷液化工艺的有效能损失主要分布于制冷循环中的膨胀机、压缩机与冷箱,其有效能损失 ΔE 分别占总有效能损失的 51.30%、35.61% 和 8.13%。

(2) 适当减少制冷剂中 N_2 摩尔分数,提高低压制冷剂温度、压力及降低高压制冷剂流量,可有效减少压缩机与膨胀机的不可逆损失,从而提高能量利用效率。

(3) 利用 BOG 的冷量预冷原料气,适当减少冷箱换热温差与增大换热面积,可改善冷箱有效能利用效率。

参考文献

- [1] 刘成军,王志刚,钟建强. 天然气脱氮工艺综述[J]. 石油规划设计,2000,11(4):18-20.
- [2] Remelje C W, Hoadley A F A. An energy analysis of small-scale liquefied natural gas (LNG) liquefaction processes[J]. Energy, 2006,31:2005-2019.
- [3] Finn A J, Johnson G L, Tolison T R. Development in natural gas liquefaction[J]. Hydrocarbon Processing, 1999, (4):28.
- [4] 左俊青,郭方飞,商丽娟. 高含氮天然气液化工艺的探讨[J]. 山东化工,2012,41(5):8-11.
- [5] 商丽娟,郭方飞,曲顺利,等. 国内外两种高含氮天然气液化工艺的对比分析[J]. 天然气工业,2011,31(1):93-95.
- [6] Wang Meiqian, Zhang Jian, Xu Qiang, et al. Thermodynamic-analysis-based energy consumption minimization for natural gas liquefaction[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50: 12630-12640.
- [7] 赵路,杨敬一,徐心茹,等. LNG 混合制冷剂制冷系统有效能分析[J]. 计算机与应用化学,2010,27(9):1276-1281.
- [8] 欧阳福承. 有效能分析及其应用[J]. 吉林化工学院学报, 1985, (4):65-66.
- [9] George G Dimopoulos, Lason C Stefanatos, Nikolaos M P Kakalis. Exergy analysis and optimization of a steam methane pre-reforming system[J]. Energy, 2012, 58:17-27.
- [10] 边海军,徐文东,李秀喜,等. 利用液化天然气冷能的天然气凝液回收工艺[J]. 现代化工,2010,30(10):74-78.
- [11] 陈庚良. 天然气液化流程的发展及其有效能分析[J]. 天然气与石油,2013,31(1):27-32.
- [12] 何耀文. 深冷过程的有效能分析[J]. 深冷技术,1981,(6):1-20.
- [13] 陈敏恒,丛德滋,方图南,等. 化工原理[M]. 北京:化学工业出版社,2000:212-213. ■