

小型页岩气液化流程设计及焓分析

王 昊^{1*}, 李光让², 邹 宇¹, 仝 雷¹, 刘少山¹

(1. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000;

2. 浙江省能源集团城市燃气有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要:为解决页岩气开采中单井产量低、管网设施不发达等不利因素,设计了一种小型混合制冷剂液化流程。以单位功耗为目标函数,利用 Aspen Hysys 软件对流程模拟优化,优化后液化率为 99.09%,单位功耗为 0.253 kWh/m³;同时采用焓分析的方法,对液化装置进行改进,改进后装置的焓损降低了 13.5%,单位功耗降至 0.23 kWh/m³。

关键词:页岩气;液化;装置;焓分析

中图分类号:TE646

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)09-0140-03

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2015.09.034

Design and exergy analysis of small scale shale gas liquefaction process

WANG Hao^{1*}, LI Guang-rang², ZOU Yu¹, TONG Lei¹, LIU Shao-shan¹

(1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China;

2. Zhejiang Provincial Energy Group Urban Gas Company Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: Shale gas reserves are abundant in China, but shale gas industry is facing with low single well production, inadequate pipeline network facilities and other factors. To explore and utilize shale gas effectively, a small-scale liquefaction process by adopting mixed refrigerant is developed. Taking unit energy consumption as the objective function, Aspen HYSYS is employed to simulate and optimize the process. The liquefaction rate of 99.09% and unit energy consumption are 99.09% and 0.253 kWh/m³, respectively. At the same time, the exergy analysis is employed to improve the liquefaction facility. The exergy loss of the improved facility can be decreased by 13.5%. The unit energy consumption drops down to 0.23 kWh/m³. It can provide a reference for the industrial application.

Key words: shale gas; liquefaction; facility; exergy analysis

我国页岩气可采量为 $10 \times 10^{12} \sim 15 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 加快页岩气开发,可以在很大程度上降低我国能源对外依存度^[1]。然而,页岩气产业化发展面临着单井产量低、管网设施不发达等因素的制约^[2]。小型液化装置可以发挥其机动、灵活的特点,将页岩气液化为 LNG,并通过 LNG 槽车运往销售市场,避免了地面设施及管道投资^[3]。

页岩气液化:净化后的页岩气在换热器 LNG-100 和 LNG-101 中降温液化生成 LNG 并节流至储存压力,储存于储罐中;少量液态 C₃H₈ 在分离器 SEP-1 中分离并回收,作为副产品或冷剂来源。

混合制冷剂循环:制冷剂(16)增压水冷后进入分离器 SEP-2,生成气液两相。液体制冷剂(7A)经过换热器 LNG-100 预冷后,再经节流阀 VLV-102 节流降温,为换热器 LNG-100 提供冷量,复温后回到压缩机;气体制冷剂(7B)经过换热器 LNG-100 与 LNG-101 预冷,然后经过节流阀 VLV-103 节流降温,为换热器 LNG-100 与 LNG-101 提供冷量,复温后回到压缩机,完成一个循环。

1 流程设计和初始参数

1.1 流程设计

小型页岩气液化流程如图 1 所示,主要包括 2 部分,页岩气液化和混合制冷剂循环。

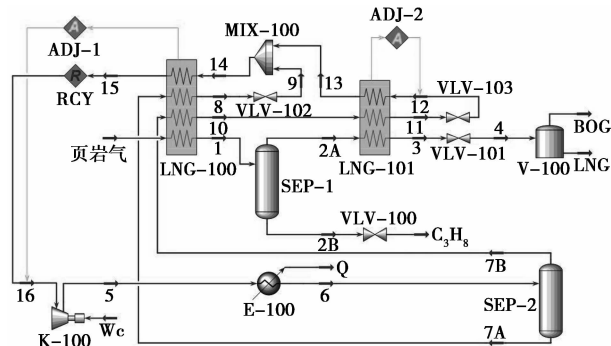


图 1 小型页岩气液化流程

1.2 初始参数

流体包选择 Peng-Robinson, 流程初始参数设定:环境温度 25℃,压缩机绝热效率 85%,换热器最小温差 3℃,忽略换热器与水冷却器压降^[4-6],页岩气与制冷剂物性参数如表 1 所示。

表 1 页岩气与制冷剂物性参数

物质	温度/ ℃	压力/ kPa	流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	组分/mol					
				CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₅ H ₁₂	N ₂
页岩气	30	5000	10000	0.95	0	0.05	0	0	0
制冷剂	20.87	120	18870	0.3	0.33	0.13	0.06	0.16	0.02

衡量液化装置性能的指标主要有单位功耗和液化率,公式如下:

$$\omega = W_c / q_{LNG} \quad (1)$$

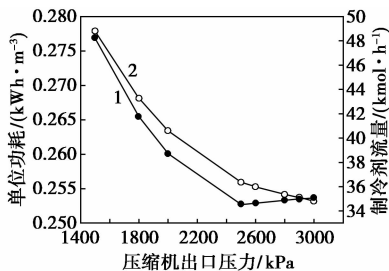
$$\alpha = (q_{LNG} / q_{SG}) \times 100\% \quad (2)$$

式中, W_c 为压缩机功耗, kW; q_{LNG} 为 LNG 标准体积流量, m^3/h ; q_{SG} 为页岩气标准体积流量, m^3/h ; ω 为单位功耗, kWh/m^3 ; α 为液化率, %。

2 关键参数优化

2.1 压缩机出口压力

选定页岩气压力 5 000 kPa、LNG 储存压力 300 kPa、水冷却器出口温度 30℃, 其余参数不变, 在一定范围内改变压缩机出口压力, 可得到单位功耗与制冷剂流量随压缩机出口压力的变化关系, 如图 2 所示。



1—单位功耗;2—制冷剂流量

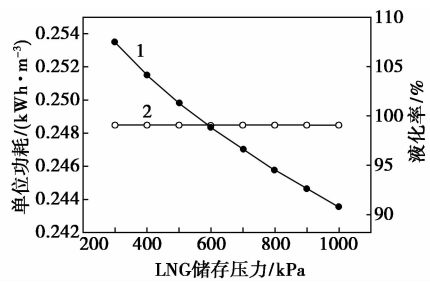
图2 单位功耗与制冷剂流量随压缩机出口压力的变化关系

随着压缩机出口压力的增大,单位功耗先减小后增大;制冷剂流量先大幅下降后趋于平缓。因为压缩机出口压力越高,制冷剂的制冷量越大,所需制冷剂流量越少,压缩机功耗越少;当压缩机出口压力 > 2 500 kPa 时,制冷剂流量趋于平缓,随着压缩机压比的增大,焓损失增大,总功耗增加;由公式(1)可知, q_{LNG} 保持不变,单位功耗的变化是由 W_c 决定的。选取制冷剂压缩机出口压力为 2 900 kPa,此时单位功耗和制冷剂流量都相对较低,有利于压缩机设备的小型化。

2.2 LNG 储存压力

在页岩气压力 5 000 kPa、压缩机出口压力 2 900 kPa、水冷却器出口温度 30℃ 条件下,通过调节 LNG 储存压力,得到单位功耗与液化率随 LNG 储存压力的变化关系,如图 3 所示。

单位功耗随 LNG 储存压力的增大而减小,液化率随 LNG 储存压力不变。因为 LNG 储存压力越高,其沸点越高,液化所需的冷量越少,因此单位功耗越低;由公式(2)可知, q_{LNG} 、 q_{SG} 保持不变,液化率



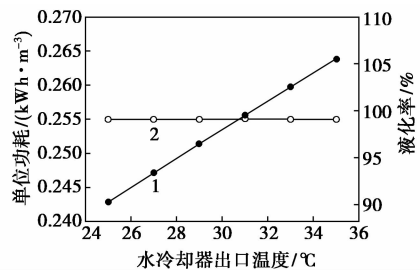
1—单位功耗;2—液化率

图3 单位功耗与液化率随 LNG 储存压力的变化关系

保持不变;LNG 储存方式有常压储存和压力储存,主要取决于储量的大小,选取 LNG 储存压力为 300 kPa。

2.3 水冷却器出口温度

在页岩气压力 5 000 kPa、压缩机出口压力 2 900 kPa、LNG 储存压力 300 kPa 条件下,通过调节水冷却器出口温度,得到单位功耗与液化率随水冷却器出口温度的变化关系,如图 4 所示。



1—单位功耗;2—液化率

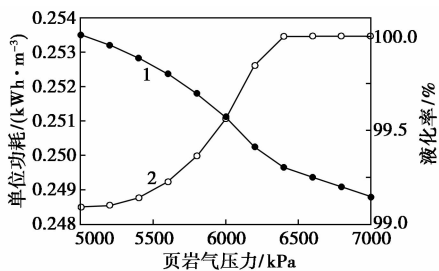
图4 单位功耗与液化率随水冷却器出口温度的变化关系

单位功耗随水冷却器出口温度的降低而降低,液化率随水冷却器出口温度不变。因为水冷却器出口温度越低,制冷剂温度越低,压缩机的功耗因制冷剂进口温度的降低而降低;LNG 和页岩气标准体积流量保持不变,液化率保持不变。此外,由于分离器 SEP-2 中制冷剂的气液量分配随温度而变化,水冷却器出口温度有一工作范围。选定水冷却器出口温度为 30℃,高于环境温度 5℃^[7]。

2.4 页岩气压力

在压缩机出口压力 2 900 kPa、LNG 储存压力 300 kPa、水冷却器出口温度 30℃ 条件下,通过调节页岩气压力,得到单位功耗与液化率随页岩气压力的变化关系,如图 5 所示。

单位功耗随页岩气压力的升高而减小,液化率随页岩气压力的升高而增大。因为页岩气压力越



1—单位功耗;2—液化率

图 5 单位功耗与液化率随页岩气压力的变化关系

高,其液化温度也越高,所需冷量越少,压缩机功耗越低;同时,页岩气压力越高,高于页岩气临界压力时,造成气、液相分离困难^[8],LNG 标准体积流量的增大是液化率升高的原因。

因此,针对页岩气甲烷含量高、不含重烃的特点,可不用考虑 C₃H₈ 的分离,建议采用高压液化,有利于单位功耗的降低、液化率的提高以及装置的小型化。

3 焓分析

采用焓分析来评价制冷系统,能够确定出焓损的分布情况,为设备的改进提供理论指导^[9-11]。焓损计算公式如下:

$$\Delta E_x = m[(h - T_0s)_{in} - (h - T_0s)_{out}] \quad (3)$$

式中, m 为流体的质量流量, kg/s; h 为流体的比焓, kJ/kg; s 为流体的比熵, kJ/(kg·K); T_0 为环境温度, K; ΔE_x 为流体流入与流出设备的焓损, kW。

焓损主要发生在压缩机、水冷却器和换热器上。降低压缩机和水冷却器焓损可采取多级压缩,选择合理的入口参数和压比;降低换热器焓损可采取增加换热面积,降低换热温差^[12-13],对于小型液化装置,压缩机压比的选择应兼顾装置的功耗与重量。按照等压比分配原则进行两级压力分配,对流程设备进行改进,改进前后各设备焓损详见表 2。

表 2 流程改进前后设备的焓损

状态	功耗/ kW	液化 率/%	单位功耗/ (kWh· m ⁻³)	焓损/kW				
				压缩 机	水冷 却器	换热 器	节流 阀	混合 器
改进前	104.7	99.09	0.253	10.56	30.47	20.9	8.64	0.53
改进后	95.07	99.09	0.23	11.34	20.09	20.9	8.64	0.53

改进后流程的焓损降低了 13.5%,单位功耗降至 0.23 kWh/m³(0.297 kWh/kg),可与典型级联式

液化流程 0.33 kWh/kg 单位功耗相媲美^[14],具有较好的经济性,可为行业应用提供参考。

4 结束语

通过对小型页岩气液化流程模拟,分析压缩机出口压力、LNG 储存压力、水冷却器出口温度和页岩气压力对单位功耗和液化率的影响,得出如下结论。

(1) 制冷剂组分的配比直接影响压缩机出口压力、制冷剂流量、制冷剂在分离器中的气液量分配和换热器的焓损。

(2) 制冷剂组分一定时,压缩机出口压力存在一个较优点,单位功耗和制冷剂流量都相对较低。

(3) 单位功耗随 LNG 储存压力的增大而减小。

(4) 单位功耗随水冷却器出口温度的降低而降低。

(5) 针对页岩气甲烷含量高,不含重烃的特点,可不用考虑 C₃H₈ 的分离,建议采用高压液化,有利于单位功耗的降低、液化率的提高以及装置的小型化。

参考文献

- [1] Wang Hongyan, Liu Yuzhang, Dong Dazhong, *et al.* Scientific issues on effective development of marine shale gas in southern China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 615 - 620.
- [2] 廖永远, 罗东坤, 袁杰辉. 促进中国页岩气开发的政策探讨 [J]. *天然气工业*, 2012, 32(10): 1 - 2.
- [3] 张维江, 石玉美, 汪荣顺. 小型天然气液化装置在我国天然气工业中的应用前景分析 [J]. *低温技术*, 2007, 36(3): 15 - 17.
- [4] Ji-Hyun Hwang, Myung-II Roh, Kyu-Yeul Lee. Determination of the optimal operating conditions of the dual mixed refrigerant cycle for the LNG FPSO topside liquefaction process [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2013, 49: 25 - 36.
- [5] 熊晓俊, 林文胜, 顾安忠. 气体膨胀式天然气带压液化流程的设计与优化 [J]. *天然气工业*, 2013, 33(6): 97 - 101.
- [6] Castillo L, Dorao C A. Influence of the plot area in an economical analysis for selecting small scale LNG technologies for remote gas production [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2010(2): 302 - 309.
- [7] 李莹珂, 蒲黎明, 祁亚玲. LNG 工艺中压缩机的选型研究 [J]. *天然气与石油*, 2014, 32(5): 25 - 28.
- [8] 王遇冬. *天然气处理原理与工艺* [M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 88 - 89.
- [9] 尹全森. 混合制冷剂循环优化设计和动态特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

当 $p_i > p_d$ 时,齿间容积与排气孔口连通的瞬时,齿间容积中的气体会迅速流入排气孔口中,齿间容积中的气体压力突然降至 p_d ,然后再随着齿间容积的继续缩小排出气体,该过程称为“过压缩”,如图 2。

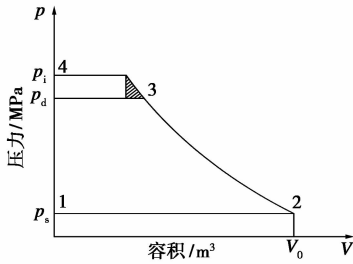


图 2 内压比大于外压比

当螺杆式压缩机的运行压比与设计压比不一致时,压缩机的内压比和外压比可能不相等,出现过压缩或欠压缩,产生附加能量损失,使压缩机耗功增大,影响压缩机效率。为了避免内外压比不一致时产生附加损失,内容积比计算式为:

$$\varepsilon_v = (\varepsilon_d)^{1/k}$$

式中, ε_v 为内容积比; ε_d 为压比; k 为多变指数。

无油喷水工艺螺杆压缩机常用在工艺场合,其压缩的介质并不是同一种气体,成分比较复杂,因此通常用内容积比作为设计参数,区分无油喷水螺杆压缩机。无油喷水螺杆压缩机的内容积比一般有 1.5、2.5、3.5、4.5 4 个系列^[3]。在螺杆式压缩机中,通过调节内容积比设计值获得所需的内压力比,可使螺杆式压缩机高效、经济运行。

螺杆压缩机的实际工作过程中,齿间容积内的气体要通过间隙发生泄漏,气体流经吸、排气孔口时,会产生压力损失,被压缩气体要与外界发生热交换等。这些都会影响内容积比的设计与确定。内容积比对压缩机的能耗、性能有什么样的影响,下面将通过具体的试验来说明。

3 试验流程简介

该试验是对不同内容积比的压缩机进行空气试

验,通过测量压缩机的流量、功率,得到相关的数据,对其处理,来分析内容积比对压缩机能耗、性能的具体影响。

试验将压缩机与电机、气液系统安装在一个撬块底座上,在压缩机试验台架上进行试验。机组系统上设有 PLC 控制,将其与水、电及试验台数据采集与分析系统连接,即可对压缩机组系统进行数据采集,流程如图 3。

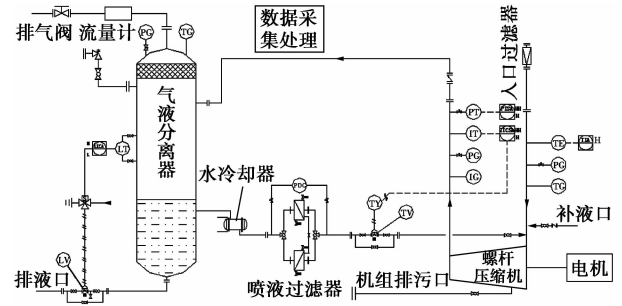


图 3 试验流程图

空气经过入口过滤器进入压缩机,经压缩机压缩后进入气液分离器,分离出来的水经水冷却器冷却和喷雾过滤器过滤后,喷入压缩机压缩腔内,根据排气温度来控制喷水量。分离后的气体经过流量计排出,通过控制排气阀来控制排气压力。该试验仅进行简单的测量,主要通过对 2 种不同内容积比的压缩机进行试验,来比较内容积比对压缩机功耗和性能的影响。

试验步骤:

- (1) 试验前对所试验系统中的连接管路、设备接口、阀门状态、电器仪表接线等全部设备做严格检查,保证系统安全可靠。
- (2) 启动压缩机,同时打开进口补液阀,等分离器液位达到一定的高度,喷雾循环系统开始工作后,关闭补液阀。
- (3) 空载运行正常后,进行升压试验。先逐渐关小排气阀,使排气压力升高。先从 0 MPa 升至 0.1 MPa,以后再将排压逐渐升高。
- (4) 当压力升至 0.2 MPa 时,开始记录其稳定

(上接第 142 页)

[10] He T B, Ju Y L. A novel process for small-scale pipeline natural gas liquefaction[J]. Applied Energy, 2014, 115: 17 - 24.
 [11] In-Hwan Choi, Sangick Lee, Yutaek Seo, et al. Analysis and optimization of cascade Rankine cycle for liquefied natural gas cold energy recovery[J]. Energy, 2013(61): 179 - 195.

[12] 李秋英, 巨永林. 海上油田伴生气液化流程设计及焓分析[J]. 上海市制冷学会, 2009: 26 - 29.
 [13] Ho-Myung Chang, Myung Jin Chung, Sanggyu Lee, et al. An efficient multi-stage Brayton-JT cycle for liquefaction of natural gas [J]. Cryogenics, 2011(51): 278 - 286.
 [14] 顾安忠. 液化天然气技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 83. ■