

# $N_2$ - $CH_4$ 膨胀天然气液化流程影响因素分析

郑云萍<sup>1\*</sup>, 张玮城<sup>1</sup>, 郝振鹏<sup>2</sup>, 金俊卿<sup>3</sup>, 李沙沙<sup>4</sup>

- (1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;
2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000;
3. 大港油田公司采油工艺研究院, 天津 300280;
4. 四川石油天然气建设工程有限责任公司, 四川 成都 610215)

**摘要:** 使用 Hysys 软件对  $N_2$ - $CH_4$  膨胀制冷液化工艺进行模拟计算, 分析了天然气压力、混合气预冷温度、混合气预冷压力和混合气中组分的组成等参数对该流程混合气的制冷能力和主要设备功耗的影响。结果表明, 提高天然气压力, 控制混合气中甲烷摩尔分数在 50% 左右时, 能增强混合气的制冷能力, 减少主要设备的功耗。而降低混合气的预冷温度和增加混合气的预冷压力, 都会增加系统的功耗。

**关键词:** 天然气液化;  $N_2$ - $CH_4$  混合制冷剂; 膨胀制冷; Hysys; 模拟计算

**中图分类号:** TE626.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2015)03-0165-04

## Influence factors analysis of $N_2$ - $CH_4$ expansion and refrigeration process

ZHENG Yun-ping<sup>1\*</sup>, ZHANG Wei-cheng<sup>1</sup>, HAO Zhen-peng<sup>2</sup>, JIN Jun-qing<sup>3</sup>, LI Sha-sha<sup>4</sup>

- (1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China;
3. Oil Production Technology Institute of Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China;
4. Sichuan Petroleum Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu 610215, China)

**Abstract:** Hysys is employed to simulate the  $N_2$ - $CH_4$  expansion and refrigeration process. The effects of natural gas pressure, pre-cooling temperature, pre-cooling pressure and compositions of gas mixture on refrigeration capacity and major equipment energy consumption are studied. The results show that when the methane molar content is about 50% of the total gas mixture, the refrigeration capacity can be improved with higher natural gas pressure and the energy consumption of main equipment can be reduced. However, lower pre-cooling temperature and higher pre-cooling pressure of mixture gas result in the increase in the total energy consumption.

**Key words:** liquifaction of natural gas;  $N_2$ - $CH_4$  mixed refrigerant; expansion refrigeration; Hysys; simulation

天然气液化的流程主要有 3 种: 级联式液化流程、混合制冷剂液化流程和膨胀液化流程。然而, 最近的研究已经表明, 膨胀液化方法是综合考虑能源消耗、经济性、安全性、机动性和可操作性中最适合的方法<sup>[1-2]</sup>。

$N_2$ - $CH_4$  膨胀制冷液化工艺是膨胀制冷液化工艺的一种, 其制冷循环属于闭式膨胀机循环。这种工艺是利用高压制冷剂通过透平膨胀机绝热膨胀的克劳德循环制冷实现天然气液化的流程, 流体通过膨胀机膨胀时有功的输出, 这部分功可提供给流程中的压缩机。与混合制冷剂液化流程相比,  $N_2$ - $CH_4$  膨胀液化流程具有启动时间短、流程简单、控制容易、制冷剂测定和计算方便等优点<sup>[3]</sup>。由于上述特点, 该流程特别适合于小规模液化厂<sup>[4]</sup>, 可以用于一些较远的天然气用户, 或者工业用户用于调峰, 还

可以用于煤层气的液化<sup>[5-6]</sup>。

Hysys 可以精确设置和模拟流程中各物流及设备的参数, 是常用的油气加工模拟软件, 其技术广泛应用于石油开采、储运、天然气加工、石油化工、精细化工、制药、炼制等领域。它在世界范围内石油化工模拟、仿真技术领域占主导地位<sup>[7]</sup>。在  $N_2$ - $CH_4$  膨胀制冷液化工艺中, 许多参数将影响工艺流程的性能, 比如天然气压力、混合气预冷温度、混合气预冷压力和混合气中组分的组成等<sup>[8]</sup>。本文将运用 Hysys 分析这些参数对流程的影响, 提出降低能耗的方案, 达到节约成本的目的。

## 1 工艺模拟流程

$N_2$ - $CH_4$  膨胀制冷是以甲烷和氮气的混合气体, 经压缩机压缩, 形成高压气体, 冷却后, 通过透平

膨胀机膨胀,为天然气冷却和液化提供冷量。这种制冷过程中,N<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>组成的制冷剂循环与天然气液化回路分开,自成一个单独的系统<sup>[9]</sup>。

天然气在进入液化系统前,先进行脱H<sub>2</sub>S、脱重烃和脱水等净化流程,为简化研究,本文中针对净化后的天然气液化流程进行模拟。N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>膨胀制冷液化流程<sup>[8]</sup>如图1所示。

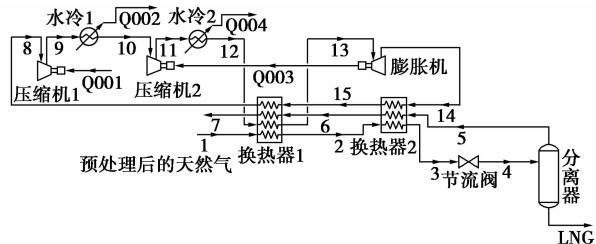


图 1 N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 膨胀制冷液化流程图

### 1.1 天然气液化回路

净化后的天然气按顺序进入换热器1和换热器2,然后经节流阀节流减压,最后进入分离器,分离器底部得到LNG产品,分离器顶部得到低温低压天然气。低温低压天然气按顺序回到换热器2和换热器1,回收其部分冷能。

### 1.2 N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 循环

N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气体经过压缩机1、压缩机2和中间冷却后,得到高压N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气体,再进入换热器1预冷,然后进入膨胀机膨胀,得到低温N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气体。低温N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气体依次为换热器2

和换热器1提供冷能。重新升高温度后再次进入压缩机进行循环。由于实际情况下,循环中会有N<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的损失,所以在N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气体重新进入压缩机前会对N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气体进行N<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>补充,使N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气体在循环中保持一定比例。

## 2 N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 膨胀液化流程模拟

### 2.1 模拟参数

模拟时需要定义物流1(原料气)和物流8(N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气)的组成,其组成成分如表1所示。

表 1 原料气和混合气组成(质量分数) %

| 组分  | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | i-C <sub>4</sub> | n-C <sub>4</sub> | i-C <sub>5</sub> | n-C <sub>5</sub> | N <sub>2</sub> |
|-----|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| 原料气 | 92.15          | 3.94           | 0.42           | 0.28             | 0.24             | 0.09             | 0.09             | 2.79           |
| 混合气 | 50.00          | 0.00           | 0.00           | 0.00             | 0.00             | 0.00             | 0.00             | 50.00          |

天然气设定初始温度为25℃,压力为5 000 kPa,质量流量为4 × 10<sup>4</sup> kg/h。天然气经换热器1、换热器2后的温度分别设定为-50、-120℃,经过节流阀后的压力设定为200 kPa。设定N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气经压缩机1、2压缩后的压力分别为3 000、6 500 kPa,中间冷却后温度均为35℃<sup>[8]</sup>。混合气体经换热器1预冷后的温度为-30℃。模拟采用Peng-Robinson状态方程进行物流计算。

### 2.2 流程模拟结果

根据上述参数,使用图1所示流程图模拟结果如表2所示。

表 2 计算结果汇总

| 流号                           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | LNG    |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 气相分数                         | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 | 0.2638 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 温度/℃                         | 25.00  | -50.00 | -120.0 | -152.9 | -152.9 | -80.00 | 20.00  | 31.82  | 408.6  | 35.00  | 121.9  | 35.00  | -30    | -155.7 | -74.59 | -152.9 |
| 压力/kPa                       | 5000   | 5000   | 5000   | 200.0  | 200.0  | 200.0  | 200.0  | 159.6  | 3000   | 3000   | 6500   | 6500   | 6500   | 159.6  | 159.6  | 200.0  |
| 摩尔流率/(kmol·h <sup>-1</sup> ) | 2398   | 2398   | 2398   | 2398   | 632.6  | 632.6  | 632.6  | 6850   | 6850   | 6850   | 6850   | 6850   | 6850   | 6850   | 6850   | 1766   |
| 质量流率/(kg·h <sup>-1</sup> )   | 40000  | 40000  | 40000  | 40000  | 10560  | 10560  | 10560  | 150900 | 150900 | 150900 | 150900 | 150900 | 150900 | 150900 | 150900 | 29440  |

## 3 流程参数对N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>膨胀液化性能的影响

本文中在研究某一参数对流程性能影响的时候,其他参数不改变。根据模拟结果,分析天然气压力、混合气预冷温度、混合气预冷压力和混合气中组分的组成这4个参数对系统中压缩机和水冷器功耗、混合气制冷能力等方面的影响。

### 3.1 天然气压力对功耗的影响

天然气入口压力增加,天然气液化所需冷量减

少,从而所需混合气的流量减少,如图2所示。并且由于对冷量的需求减少,整个系统所需的功耗降低,使得压缩机和水冷器的功耗降低,如图3所示。

由于膨胀机的膨胀功直接用于压缩机2压缩,整个流程主要考虑压缩机1和水冷却器的功耗。功耗的降低有利于流程的改善,计算结果表明,天然气压力从3 MPa升高到5 MPa,混合气的流量降低7.0%,压缩机1的功耗降低6.5%,压缩机2的功耗降低7.0%,水冷器1的功耗降低6.1%,水冷器2

的功耗降低 7.0%，整个系统的功耗降低约 6.5%。所以增加天然气压力对降低功耗有一定作用，可以在管道承压能力下适当提高天然气压力。

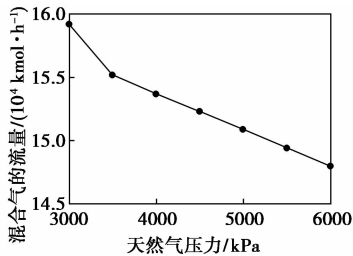
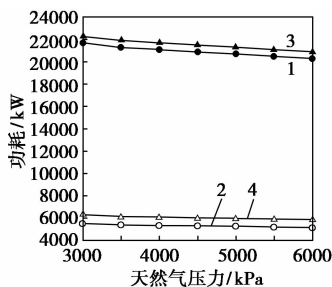


图2 天然气压力对混合气流量的影响

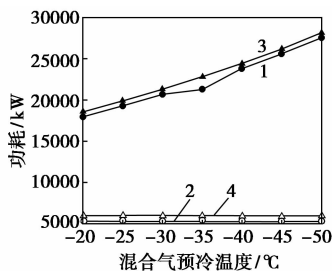


1—压缩机1;2—压缩机2;3—水冷器1;4—水冷器2

图3 天然气压力对功耗的影响

### 3.2 混合气预冷温度对功耗的影响

混合气预冷温度降低,最明显的变化是混合气体经膨胀机膨胀后的压力降低,这就增加了压缩机1和水冷器1的功耗。压缩机2和水冷器2的功耗由于制冷剂流量略微减少而少量减少,如图4所示。



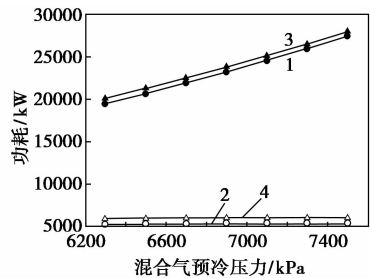
1—压缩机1;2—压缩机2;3—水冷器1;4—水冷器2

图4 混合气预冷温度对功耗的影响

计算结果表明,混合气预冷温度从  $-20^{\circ}\text{C}$  降低到  $-50^{\circ}\text{C}$ ,混合气的流量变化不是很明显,只降低了 0.6%。压缩机1的功耗增加 53.8%,水冷器1的功耗增加 53.1%,而压缩机2和水冷器2的功耗都只减少了 0.7%。同时发现膨胀后的压力减小 56.7%,整个系统的功耗增加 39.8%。模拟结果表明,预冷温度的降低会引起整个系统的功耗增加,但是温度又不能太高,否则可能会导致膨胀后混合气的冷能达到所需的量。

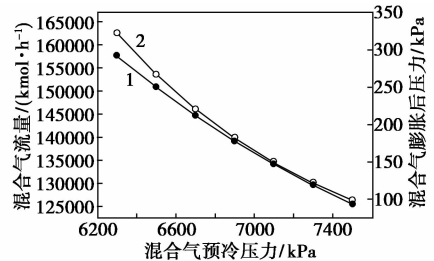
### 3.3 混合气预冷压力对功耗的影响

混合气的预冷压力增加,增大了压缩机2和水冷器2的功耗,所以膨胀机需要提供更多的能量给压缩机2,使得膨胀后的混合气体的压力下降,同时使压缩机1和水冷器1的功耗也随之增加,如图5和图6所示。由于混合气的预冷压力增加,同时膨胀后的压力减小,使得混合气膨胀后具有的冷能增加,所以需要的混合气流量随之减少。



1—压缩机1;2—压缩机2;3—水冷器1;4—水冷器2

图5 混合气预冷压力对功耗的影响



1—混合气流量;2—混合气膨胀后压缩

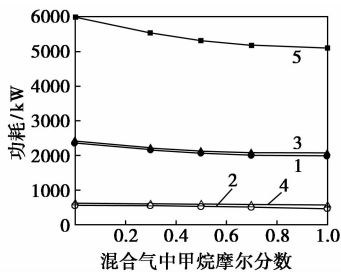
图6 混合气预冷压力对混合气流量和混合气膨胀后压力的影响

计算结果表明,混合气预冷压力从 6.3 MPa 增加到 7.5 MPa,混合气的流量减少了 20.4%。压缩机1和水冷器1的功耗分别增加了 40.9% 和 39.2%,压缩机2和水冷器2的功耗分别增加了 0.8% 和 1.5%,整个系统的功耗增加了 31.5%。预冷压力的增加虽然会大大减少混合气的流量,但系统功耗的增加也十分明显。同时,预冷压力不能过高或过低,过高会使膨胀后压力过低,不能使混合气体在系统中正常流动;过低会使膨胀后的混合气体的冷能达到生产 LNG 所需要的冷量。由于  $N_2$  和  $CH_4$  在生产中都是容易获得的制冷剂,降低预冷压力提高制冷剂的质量流量以减少系统功耗。

### 3.4 混合气中 $N_2$ 和 $CH_4$ 组成比例对功耗的影响

混合气中  $N_2$  和  $CH_4$  组成对功耗的影响如图7所示。甲烷的含量增加,混合气循环量减少,混合气制冷能力增加。这就表明,在氮气中加入甲烷,可以

增强流程的制冷能力。



1—压缩机 1;2—压缩机 2;3—水冷器 1;  
4—水冷器 2;5—系统总功耗

图 7 混合气组分的组成对功耗的影响

根据图 7 可知,在氮气中加入甲烷摩尔分数在低于 50% 时<sup>[10]</sup>,增加甲烷可使系统功耗下降明显,高于 50% 时,甲烷摩尔分数增加系统功耗减少变缓。因此,混合气中甲烷摩尔分数最好控制在 50% 左右。

#### 4 结论

(1) 提高天然气的压力能提高混合气的制冷能力,减少压缩机和水冷器的功耗,但变化不是很大。

(2) 降低混合气体的预冷温度,会使压缩机 1 和水冷器 1 的功耗明显增大,从而使整个系统的功耗增加,不利于降低功耗。

(3) 提高混合气体的预冷压力能大幅减少混合气循环量,但压缩机和水冷器的功耗增加,也不利于降低系统功耗。

(4) 增加混合气中甲烷摩尔分数能增加混合气

的制冷能力,也能减少系统的功耗。甲烷摩尔分数在 50% 左右时,效果最明显。

#### 参考文献

- [1] Yuan Zongming, Cui Mengmeng, Xie Ying. Design and analysis of a small-scale natural gas liquefaction process adopting single nitrogen expansion with carbon dioxide pre-cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 64: 139 - 146.
- [2] 徐文东, 高丽荣, 华贵, 等. 液化天然气冷能梯级集成利用技术研究 [J]. 现代化工, 2007, 27(4): 11 - 12.
- [3] 顾安忠, 鲁雪生, 汪荣顺, 等. 液化天然气技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 60 - 62.
- [4] 孟令雅. 液化天然气流程分析比较 [J]. 油气田地面工程, 2005, 24(5): 48.
- [5] Cao Wen-sheng, Lu Xue-sheng, Lin Wen-sheng. Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction processes in skid-mounted packages [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 898 - 904.
- [6] Gao Ting, Lin Wensheng, Gu Anzhong. Coalbed methane liquefaction adopting a nitrogen expansion process with propane pre-cooling [J]. Applied Energy, 2010, 87: 2142 - 2147.
- [7] 郑云萍, 夏丹, 刘晓红, 等. 基于 Hysys 的 C<sub>3</sub>/MRC 天然气液化流程影响因素分析 [J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(5): 473 - 477.
- [8] 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.
- [9] 李士富, 呼延念超, 李亚萍. 调峰型天然气液化 HYSYS 软件模型 [J]. 石油与天然气化工, 2010, 39(1): 1 - 2.
- [10] 蒲亮, 孙善秀, 厉彦忠. 带膨胀机的煤层气液化流程计算及热力学分析 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(9): 1115 - 1118. ■

### 艾仕得上海嘉定水性漆工厂投产

液体和粉末涂料供应商艾仕得涂料系统在上海嘉定投资兴建的最新一代水性漆工厂 2015 年 3 月 3 日正式投产。该工厂生产环保的水性涂料以满足中国汽车市场对环保涂料日益增长的需求。作为艾仕得最新、最先进的水性涂料工厂之一,该水性漆工厂体现了中国市场在艾仕得全球发展战略中的重要地位。艾仕得致力于为客户提供可持续的产品和应用系统,同时减少涂料生产过程对环境的影响。新工厂毗邻 2008 年兴建的艾仕得嘉定涂料工厂。

新工厂采用先进的生产技术和设计理念,比如集成化生产布局旨在减少涂料生产过程中的生态足迹;高度自动化的工厂努力将原材料使用率最大化,并能加快制造周期。先进的空气过滤系统可优化工厂内的空气质量并降低排放。该工厂使艾仕得中国水性涂料的产能翻番,进一步巩固其在中国——这一世界最大汽车市场的

行业领导地位。

作为艾仕得上海嘉定水性漆工厂投产庆典的一部分,“艾仕得可持续发展战略展”展示了艾仕得通过可持续的生产系统、可持续的产品、可持续的应用、可持续的创新和可持续的社区五个方面践行其可持续发展战略。该展览也生动诠释了艾仕得新水性漆工厂通过降低生产和应用过程中挥发性有机化合物(VOC)的排放和能源消耗,帮助客户减少生态足迹。

上海嘉定水性漆工厂的投产是艾仕得在华发展的重要里程碑,新工厂与艾仕得在中国的另外两家液体涂料生产工厂、亚太区技术研发中心、全球色彩实验室、4 个修补涂料培训中心,以及 6 家合资粉末涂料生产工厂共同构成其中国发展版图,并合力支持中国汽车行业以及其他使用艾仕得涂料的行业的长期可持续发展。(孙涵文)