

带膨胀机的煤层气液化流程计算及热力学分析

蒲亮, 孙善秀, 厉彦忠, 脱瀚斐, 赵敏
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了比较不同煤层气液化流程中的烟损失、能耗的差别, 首先对制冷剂中甲烷(CH_4)的摩尔分数对能耗的影响进行了优化计算, 在此基础上应用流程优化软件和编程手段对2种典型的液化流程方案进行了理论计算, 进而对其烟损失、能耗进行了比较和分析. 结果表明: CH_4 摩尔分数为50%左右时耗功最小, 有利于流程的优化; 理论上“丙烷预冷的 N_2 - CH_4 单级膨胀液化循环”的烟损失和能耗均小于“ N_2 - CH_4 串联双级膨胀液化循环”.

关键词: 煤层气; 液化流程; 烟

中图分类号: TE6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1115-04

Calculation and Thermodynamic Analysis on Liquefaction Processes of Natural Gas with Expanders

Pu Liang, Sun Shanxiu, Li Yanzhong, Tuo Hanfei, Zhao Min
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to compare the exergy loss and energy consumption of different liquefaction processes, the calculations of the energy consumption under different mol fractions of methane in refrigerants were performed. The result shows that the energy consumption is smallest and the liquefied process can be optimized when the mol fraction of methane is 50%. Then two processes for liquefied natural gas production were evaluated, including a single-stage expander nitrogen-methane refrigerant with another propane refrigeration cycle (1st project) and a two-stage expander nitrogen-methane refrigerant (2nd project). Steady-state simulations and calculations were conducted to ensure that each process was compared on an identical basis. The full energy and exergy analysis including feed-in gas and refrigerant stream shows that the 1st project has lower exergy loss and less energy consumption.

Keywords: natural gas; gas liquefying process; exergy

煤层气属于天然气的一种, 其甲烷(CH_4)含量因产地不同而异. 随着全球能源需求不断增长, 供应相对紧张, 煤层气的开采和合理利用已经得到众多学者和企业的关注. 传统的做法是将 CH_4 含量在30%以上的煤层气回收, 而不回收低于此含量的煤层气^[1]. 然而, CH_4 目前作为一种优良的清洁燃料而受到国际能源市场的青睐, 若将 CH_4 放空, 其温室效应是 CO_2 的20倍, 对臭氧层的破坏是 CO_2 的7倍, 因此对于煤层气的利用将不论其含量多少, 都应进行开采和回收. 经过净化、吸附, 除去杂质、水

分、 CO_2 、碳氢化合物等之后, 将煤层气处理为 CH_4 含量很高的天然气, 就可直接利用或者液化为液化天然气(LNG), 便于储存和运输, 而且将天然气液化也是国内外天然气贸易、储运的一种趋势, 天然气正成为继煤、石油之后的第三大能源, 并且其在全球能源结构中所占的比重正在迅速地提高^[2-6].

1 液化流程

1.1 液化流程的选择

煤层气经净化、干燥等预处理之后, 得到高 CH_4

含量的原料气,本文按 CH_4 气处理.在其液化流程中,典型的外部制冷液化流程有以下几种^[7-9]:采用不同制冷剂组成的复叠式制冷液化循环;混合制冷剂制冷液化循环;带膨胀机的制冷液化循环.其中带膨胀机的外部制冷液化循环以其能耗低、调节灵活等优点在煤层气液化流程中被广泛应用, N_2 、 N_2 - CH_4 混合工质作为外部制冷循环的制冷剂在实践中均有应用.

本文以陕西某地煤层气液化项目为背景,流程主要参数如下:原料经净化处理后的质量流量为 2.08 kg/s ;原料气压力 p_1 为 0.2 MPa ,增压至 5.1 MPa ;原料气入口温度 T_1 为 303 K ,环境温度取 293 K ;液化储罐压力为 0.12 MPa ,温度为 110.32 K (过冷),理论上要求 CH_4 液化率为 100% ;各个换热器端面温差以 3 K 为基准,计算时通过换热器热平衡微调;压缩机等温效率取 70% ;膨胀机等熵效率取 78% .外部制冷循环采用 N_2 - CH_4 作为制冷剂.

在 N_2 - CH_4 作为制冷剂的外部制冷循环中, CH_4 是高沸点工质, N_2 是低沸点工质,高沸点工质在高温阶段制冷效果明显,低沸点工质在低温阶段制冷效果明显.当 CH_4 含量高时,低温阶段的制冷效果不佳,含量高到一定程度,节流反而产生热效应;当 N_2 含量高时,高温阶段的制冷效果不佳,传热温差会增加.

N_2 - CH_4 的摩尔比会影响流程的制冷量及其品质、压缩机耗功等指标.本文以丙烷预冷的 N_2 - CH_4 单级膨胀液化循环流程为例,计算了当 CH_4 的摩尔分数 $x(\text{CH}_4)$ 不同时,液化等量的天然气所需要的耗功(见图 1).

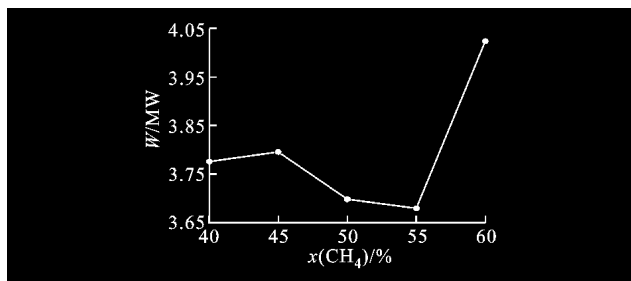


图1 CH_4 的摩尔分数与压缩机耗功的关系

从图 1 可以看出:当 N_2 - CH_4 作为外部制冷的制冷剂、 CH_4 的摩尔分数在 $50\% \sim 55\%$ 左右时,理论耗功达到最小.当 N_2 - CH_4 的摩尔比不同时,根据节流后所要求的状态($p = 0.55 \text{ MPa}$, $T = 105.15 \text{ K}$),计算出节流前的温度等参数(见表 1).

从表 1 可以看到,当 N_2 - CH_4 摩尔比为 $40:60$ 时,节流过程产生热效应,这种情况是我们不希望看到的.此热效应可以解释图 1 中 CH_4 摩尔分数从 55% 变化到 60% 时,耗功突增的原因:本来应该耗功增加,制冷量也增大,可这时在低温下节流产生了热效应,抵消了一部分冷量,只有系统耗功大幅增加才能保证液化所需冷量.基于以上计算和分析,说明在以 N_2 - CH_4 作为外部制冷循环的制冷剂时, CH_4 的摩尔分数不宜超过 55% .综合来说, CH_4 的摩尔分数在 $50\% \sim 55\%$ 左右时,液化流程制冷效应、节能效果均可达到最佳.在以下的讨论中,取 N_2 - CH_4 的摩尔比为 $1:1$.

表 1 制冷剂节流前后状态点的温度

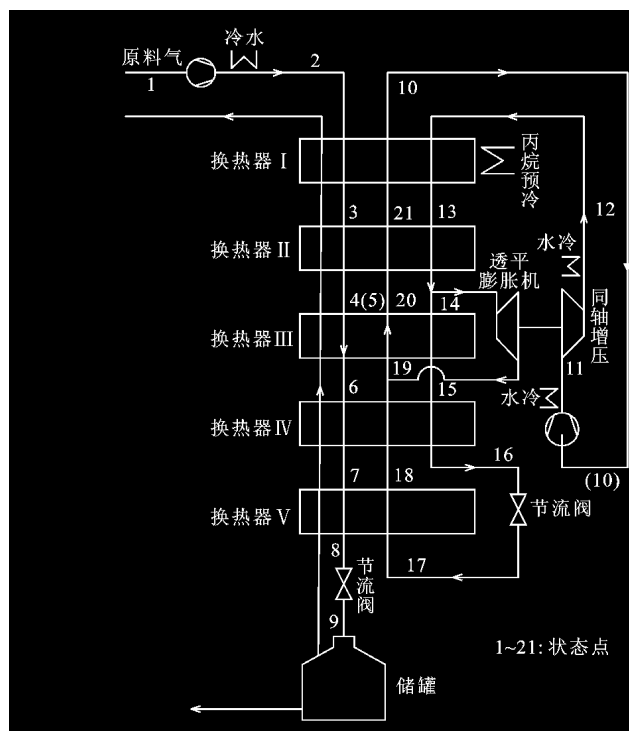
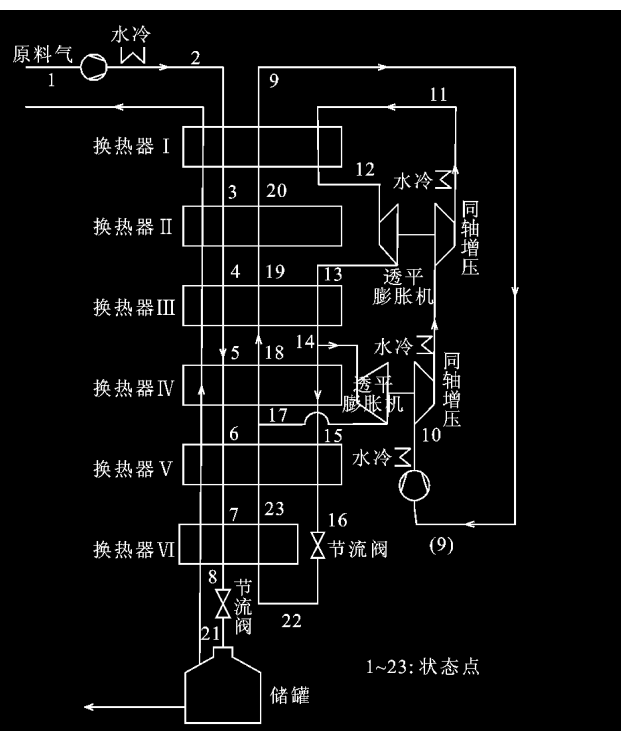
$x(\text{CH}_4)/\%$	节流前 T/K	节流后 T/K
40	132.00	105.15
45	125.78	105.15
50	118.79	105.15
55	111.46	105.15
60	103.83	105.15

1.2 液化流程方案

下面主要对“丙烷预冷的 N_2 - CH_4 单级膨胀液化循环(方案一,见图 2)”和“ N_2 - CH_4 串联双级膨胀液化循环(方案二,见图 3)”进行耗能、焓损失的分析和比较.

方案一制冷循环的参数:低压压力为 0.55 MPa ,中压压力为 2.508 MPa ,增压后高压压力为 3.88 MPa ;原料气经净化、干燥后首先经过丙烷预冷换热器,然后流经多个换热器逐步被冷却至状态点 8,经节流阀降压液化至状态点 9,进入储罐储存,有极少量的闪蒸气回流.外部制冷循环的 N_2 - CH_4 制冷剂经压缩机压缩至状态点 11,再增压至高压的状态点 12,压缩和增压过程均有水冷却带走部分热量,然后通过丙烷预冷器预冷,再经换热器并经膨胀、节流,为原料气液化提供足够的冷量.

方案二制冷循环的参数:低压压力为 0.55 MPa ,一级膨胀后压力为 3.88 MPa ,经 2 次增压后压力分别为 3.724 MPa 和 8 MPa ;其原料气的流程与方案一相同.外部制冷循环的 N_2 - CH_4 制冷剂经压缩机压缩至状态点 10,再经 2 次增压至高压状态点 11,压缩和增压过程均有水冷却带走部分热量,

图2 丙烷预冷的 N_2-CH_4 单级膨胀液化循环图3 N_2-CH_4 串联双级膨胀液化循环

经换热器并进行2级串连膨胀和节流,为原料气液化提供足够的冷量。

2 流程计算

计算流程见图4、图5。

为了使2个方案具有可比性,使方案二中的一级膨胀所获得的冷量等于方案一中丙烷预冷所提供的冷量,从而确定其一级膨胀比。

3 焓损失分析

3.1 焓损失计算

煤层气液化过程中设备很多,有效能损失也很多,在理论计算和分析中,本文主要考虑压缩机、膨胀机、换热器、节流阀的焓损失。

忽略工质的动能、位能以及稳流工质的焓,总焓值可表示为^[8]

$$E_x = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (1)$$

压缩过程的焓损失

$$\Delta E_{yr} = (H_1 - H_2) - T_0(S_1 - S_2) + W_c \quad (2)$$

式中: W_c 为压缩机耗功,下标1、2分别为压缩前、后状态。

膨胀过程的焓损失

$$\Delta E_{pr} = (H_1 - H_2) - T_0(S_1 - S_2) - W_{ex} \quad (3)$$

式中: W_{ex} 为膨胀机输出功,下标1、2分别为膨胀前、后状态。

换热器中的焓损失

$$\Delta E_{kr} = \sum E_{kr,in} - \sum E_{kr,out} \quad (4)$$

式中: $E_{kr,in}$ 是进入换热器的焓值; $E_{kr,out}$ 是离开换热器的焓值。

节流过程的焓损失

$$\Delta E_{jr} = -T_0(S_1 - S_2) \quad (5)$$

式中: T_0 为环境温度; H 为工质的焓; H_0 为环境温度下工质的焓; S 为工质的熵; S_0 为环境温度下工质的熵。

3.2 焓分析和能耗分析

3.2.1 焓损失计算结果与比较 从表2可以看到,在2种方案中,占总焓损失比例最大的都是压缩机,其后是膨胀机、换热器、节流阀。另外,在方案一中,丙烷预冷系统的焓损失占总损失的7.6%。

表2 焓损失计算结果

系统各部分	方案一		方案二	
	焓损失 /kW	占总损失 比例/%	焓损失 /kW	占总损失 比例/%
压缩机	1 558.2	40.1	1 762.0	41.7
透平增压膨胀机	1 158.1	29.8	1 665.1	39.4
所有换热器	796.9	20.5	717.6	17.0
节流阀	81.7	2.1	81.9	1.9
丙烷预冷系统	294.7	7.6		
系统总焓损失	3 889.5	100	4 226.6	100

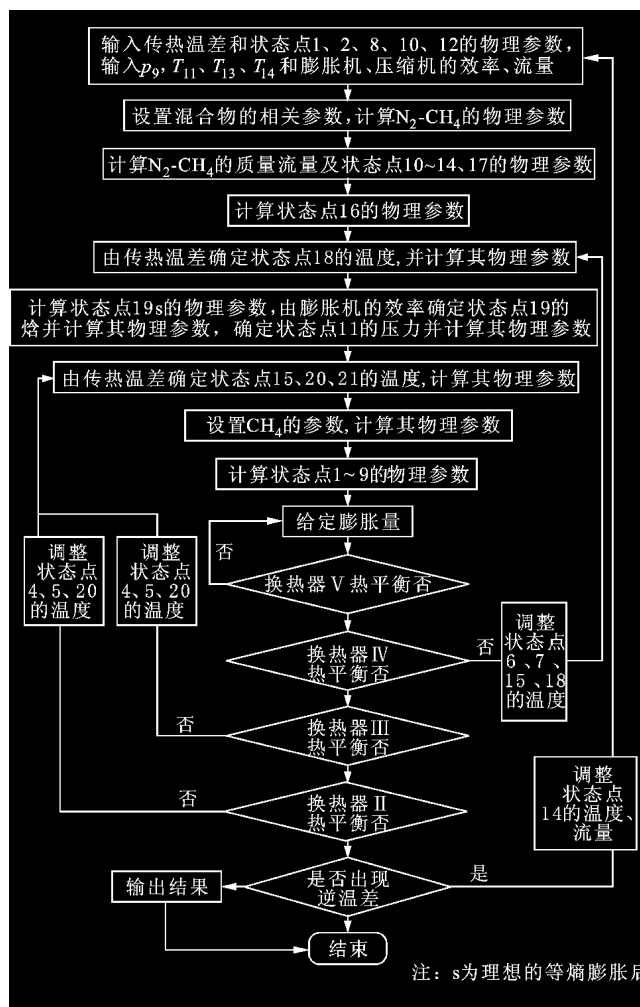


图4 方案一的计算程序框图

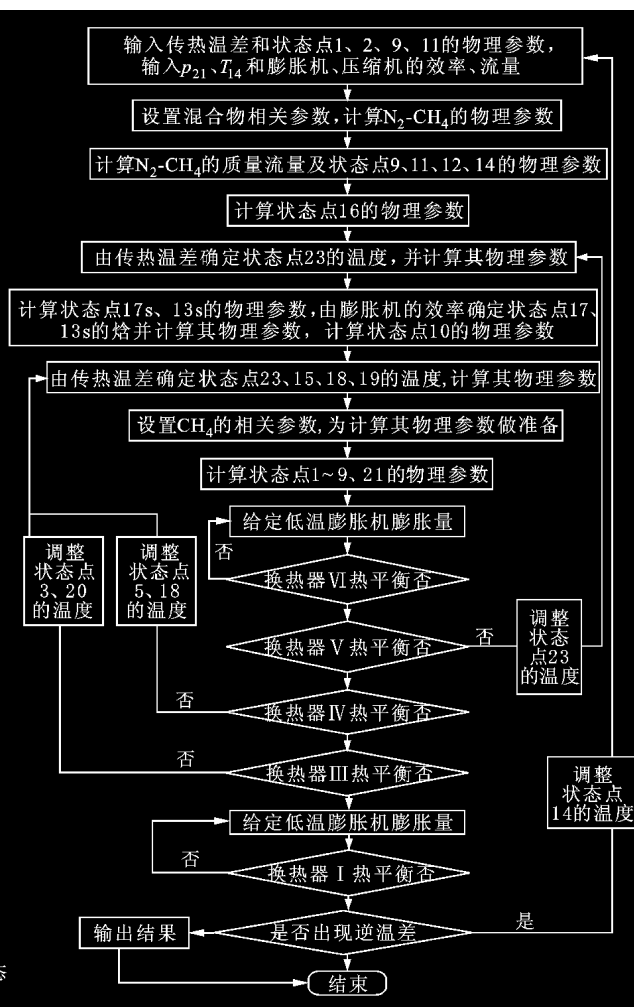


图5 方案二的计算程序框图

3.2.2 能耗计算结果与比较 从表3可以看到,方案一、方案二在生产2.08 kg的LNG时能耗分别为5 796.3和5 883.1 kW,方案一比方案二节能1.5%。

表3 能耗计算结果

系统主要设备	方案一 耗功量/kW	方案二 耗功量/kW
N ₂ -CH ₄ 的压缩机	3 698.2	4 374.5
原料气的压缩机	1 508.6	1 508.6
丙烷预冷系统	589.5	
系统总耗功	5 796.3	5 883.1

4 结论

通过对以N₂-CH₄为制冷剂的外部液化流程的计算,得出CH₄含量在50%左右时,耗功最小,对流程比较有利。通过对某煤层气液化项目的2种液化方案进行的流程计算、焓损失计算和能耗计算与

分析,得出方案一的焓损失和能耗均小于方案二,在节能和理论上的运行经济性方面优于后者,耗能节省1.5%,这在规模生产中所带来的经济效应应该是可观的。在实际工程中,需进一步考虑实际工艺要求、设备投资成本、系统复杂程度、控制难易程度等因素,以确定最优液化方案。通过计算,在理论上给出了比较液化方案能耗的方法和途径,可用于实际工程的预测。

参考文献:

- [1] 蒋孝英,谢海英.煤层气利用新方案[J].天然气工业,2006,26(10):144-146.
Jiang Xiaoying, Xie Haiying. New proposal for coal-bed methane utilization [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(10):144-146.
- [2] 钱伯章.当代天然气工业及其发展前景[J].天然气与石油,2002,20(2):16-20.
Qian Bozhang. World natural gas industrial status and prospect [J]. Natural Gas and Oil, 2002,20(2):16-20.

- [3] EIA. EIA international energy annual 1999 [M]. Washington: EIA,1999:7-11.
- [4] BP Company. BP review of world energy 2002 [M]. London: BP Company,2002:10-15.
- [5] BP Company. BP Statistical review of world energy [M]. London: BP Company,2000:9-12.
- [6] Harbit G K. The LNG market for the world[J]. Oil & Gas Journal,2000,98(30):36-38.
- [7] 蒲亮,徐俊,厉彦忠. LNG 的冷量利用及天然气液化循环[C]//第七届全国低温与制冷工程大会会议论文集. 北京:兵器工业出版社,2005:269-273.
- [8] 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,2004.
- [9] Remelje C W, Hoadley A F A. An exergy analysis of small-scale liquefied natural gas (LNG) liquefaction processes, [J]. Energy,2006,31(12):2005-2019.
- (编辑 王焕雪)