

# 煤层气的压力对液化流程性能的影响

□ 新奥能源控股有限公司 (065000) 徐兆华 董卫峰

**摘要:** 分析了原料气进冷箱压力对制冷剂组份、流量、压缩机功耗、冷却水的冷却量的影响。计算结果表明,对于特定的冷箱,原料气进冷箱的压力对制冷剂的组份、流量及压缩机功耗产生重要影响。

**关键词:** 混合制冷剂 煤层气 功耗 流量

## Effect of the Pressure of Coalbed Methane (CBM) on the Performance of Liquefied Process

ENN Energy Holdings Limited Xu Zhaohua, Dong Weifeng

**Abstract:** The effect of the pressure of CBM into coldbox on the parameters was analysed. Those parameters are components and flux of the Mixed Refrigeration, the power consumption of the compressor, the heat carried away by cold water. Through calculation finds that the pressure into coldbox affects the components and flux of the Mixed Refrigeration, the power consumption of the compressor, the heat carried away by cold water very much to a specified coldbox.

**Keywords:** refrigerant Coalbed Methane power consumption flux

在能源结构中,天然气、石油和煤炭并称为三大能源。而煤层气是一种吸附在煤层中的可燃气体,其主要成份为甲烷,属非常规天然气。开发利用煤层气具有以下意义:

(1) 煤层气中的主要成份为甲烷,甲烷的温室效应是CO<sub>2</sub>的21倍,因此开发利用煤层气有利于环境保护;

(2) 目前国内矿难绝大部分均是由瓦斯爆炸引起的,采煤之前先采气可以有效减少矿道中的瓦斯含量,因此开发利用煤层气可以有效预防煤矿安全事故的发生。

在煤层气液化工艺中由于阶式制冷工艺流程复

杂,膨胀制冷工艺能耗偏高,混合制冷工艺逐步成为煤层气液化领域的选择趋势。在混合制冷工艺中由于涉及的设备众多,整个流程比较复杂,本文以某液化工厂流程原料气进冷箱的压力对制冷剂的组份、制冷剂循环量、压缩机功耗及冷却水带走热量等性能参数的影响。从而通过合理选择工艺参数使压缩机的功耗降低,提高效率。

### 1 流程图和流程性能参数分析方法

本文所研究的煤层气液化流程如图1所示。

结合图1,先简单介绍一下以后用到的流程参数

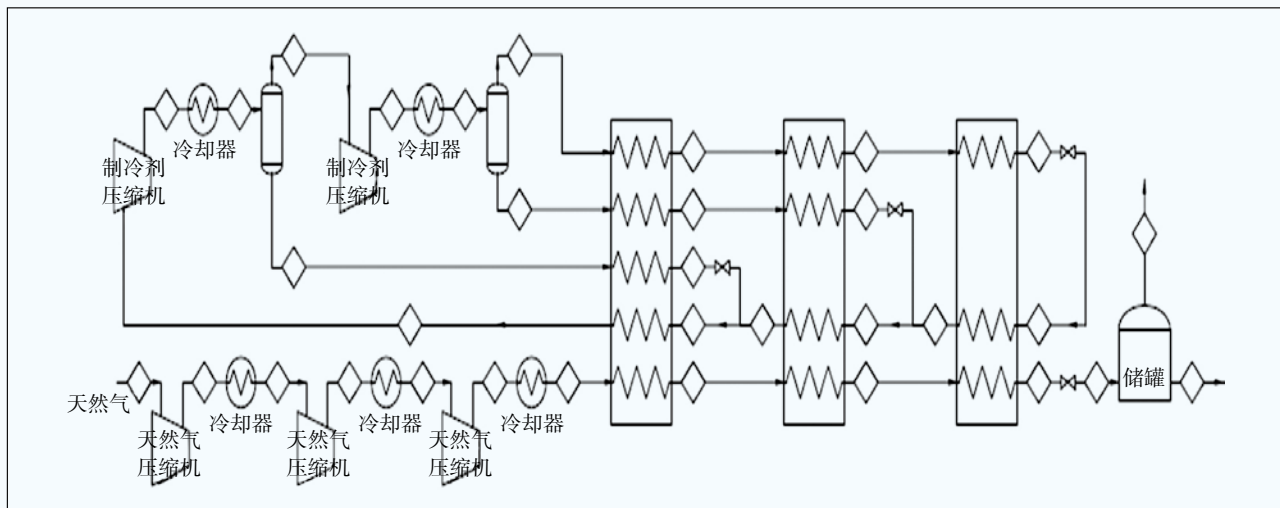


图1 混合制冷工艺流程图

名称及含义；

(1) 原料气进冷箱的压力 $P_n$ ：压缩后的原料天然气（节点7）的温度和压力；

(2) 制冷剂组分：复热回来的混合制冷剂（节点33）的摩尔组分。

流程简述：天然气原料通过压缩机一级压缩并和循环水换热，然后通过二级压缩二次和循环水换热，再经过三级压缩换热进入换热器（LNG100）和制冷剂一次换热，再经换热器（LNG101）二次换热，最后进入换热器（LNG102）换热流入LNG大罐。另一路为制冷剂闭路循环从板翅式换热器LNG100复热回来的制冷混合剂经离心压缩机一级压缩换热，流出分两路，液体进入板翅式换热器进行节流换热。一路混合气体再次经二级压缩换热，分两路气体和液体气体一路进入板翅式换热器，二级压缩分离出来的液体经板翅式换热器（LNG100、LNG100、LNG100）换热汇总到离心压缩机进口。

本文煤层气组分为：甲烷98%、乙烷1%、氮气1%、进气温度20℃；制冷剂的基础组分为：氮气10%、甲烷17%、乙烯41%、丙烷16%、异戊烷16%；LNG的存储压力为0.38MPa。制冷剂循环量 $F_{mr}$ 的计算方法如下：

根据能量守恒可得：

$$H_7 + H_{17} + H_{20} + H_{21} = H_{10} + H_{33}$$

$H_7$ ：原料天然气三级压缩换热后的焓值；

$H_{17}$ ：混合制冷剂一级压缩分离出来液体的焓值；

$H_{20}$ ：混合制冷剂二级压缩分离出来气体的焓值；

$H_{21}$ ：混合制冷剂二级压缩分离出来液体的焓值；

$H_{10}$ ：原料天然气换热后的焓值；

$H_{33}$ ：混合制冷剂入口的焓值。

即：

$$H_7 - H_{10} = H_{33} - H_{17} - H_{20} - H_{21} = F_{mr} h_{33} - F_{mr} (1 - Vf_{15}) h_{17} - F_{mr} Vf_{15} Vf_{19} h_{20} - F_{mr} Vf_{15} (1 - Vf_{19}) h_{21}$$

整理后得：

$$F_{mr} = (H_7 - H_{10}) / [h_{33} - (1 - Vf_{15}) h_{17} - Vf_{15} Vf_{19} h_{20} - Vf_{15} (1 - Vf_{19}) h_{21}] \quad (1)$$

$F_{mr}$ ：制冷剂循环量kmol；

$H$ ：焓值kJ；

$h$ ：摩尔焓kJ/kmol；

$Vf$ ：气相分数。

利用流程模拟图可以原料气P-T-H（P：压力、T：温度、H：焓值）的相关数据，具体数据及曲线图见表1、图2、图3。

煤层气液化过程实际上是一个气态煤层气等压降温成液态煤层气的过程。从表1和图2可以看出煤层气的露点线和泡点线在压力达到某一特定值时则交于一点，即临界点。从图3可以看出由于煤层气是一种混合物，所以与纯组分相比露点线与泡点线已不再是完全重合，说明在汽液两相区煤层气的温度随汽液比的降低而降低。

在特定压力下，利用根据图1建立的系统模型对煤层气从初温-40℃冷却至-140℃的过程中对煤层气

表1 原料气P-T-H数据表

序号	沸点			泡点		
	压力 [MPa]	温度[°C]	焓值 [kJ/kg]	压力[MPa]	温度[°C]	焓值[kJ/kg]
1	0.00	-164.40	-89 060.95	0.00	-164.76	-89 080.88
2	0.10	-137.13	-79 874.44	0.12	-153.59	-88 451.00
3	0.33	-128.31	-79 699.00	0.39	-140.22	-87 662.99
4	0.81	-117.47	-79 579.80	0.93	-124.86	-86 683.57
5	1.72	-104.62	-79 620.32	1.66	-111.94	-85 759.89
6	2.75	-94.40	-79 861.95	2.64	-99.55	-84 718.41
7	3.74	-86.55	-80 306.31	3.36	-92.34	-83 978.01
8	4.47	-81.78	-80 954.67	4.02	-86.55	-83 223.70
9	4.70	-80.73	-81 756.77	4.70	-80.73	-81 756.77

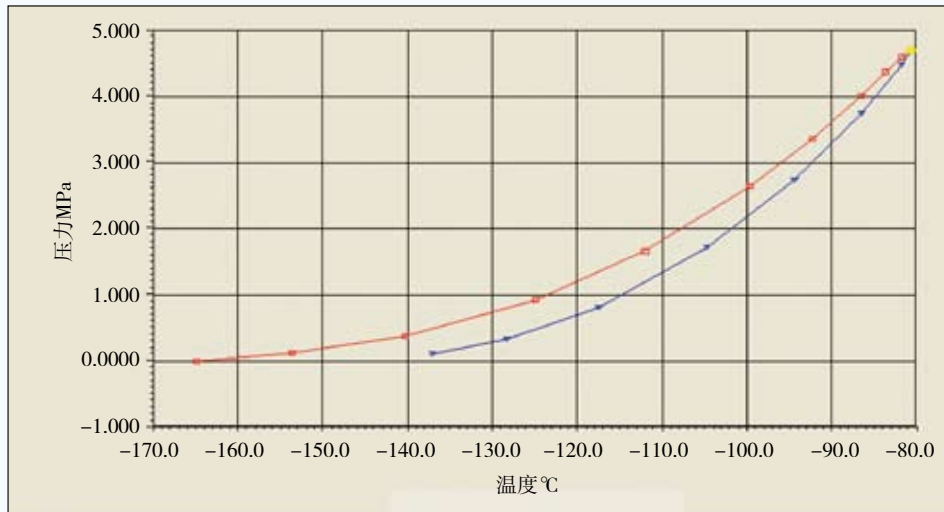


图2 原料气P-T图

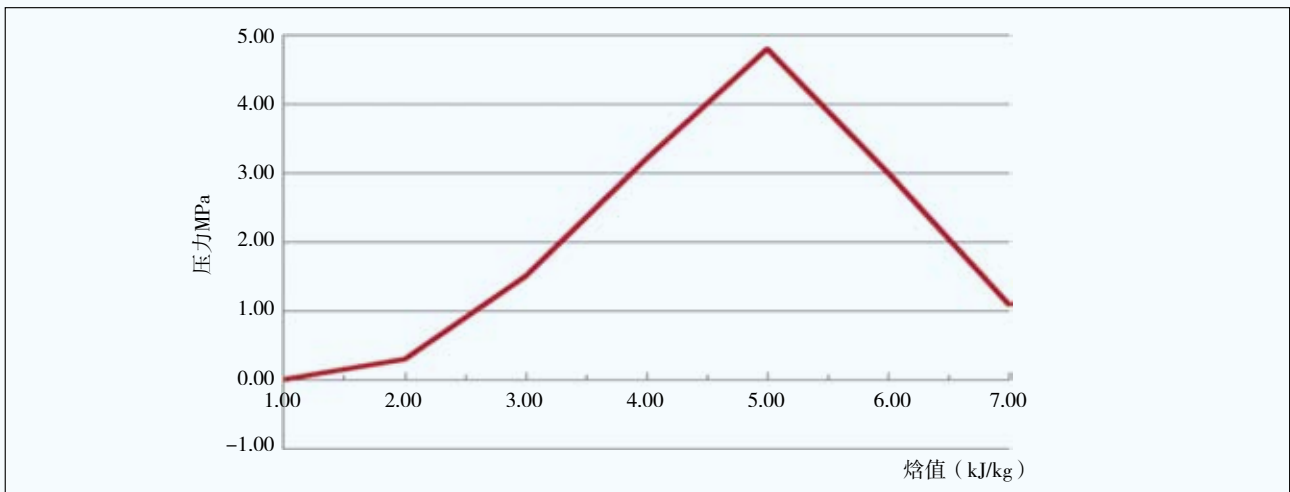


图3 原料气P-H图

的T-H进行模拟计算,结果详见表2。

由图4可以看出当系统压力高于临界压力时,煤层气的等压冷凝过程不再经过两相区,而且等压温度

曲线随着压力的升高愈加平滑;当系统压力低于临界压力时煤层气的等压冷凝过程需经过两相区,而且压力越低在汽液两相区停留的区间就会越大。煤层气压

表2 特定压力下煤层气T-H数据表

序号	压力	3.5MPa	4.0MPa	4.5MPa	5.0MPa	5.5MPa
	温度[C]	焓值[kJ/kg]	焓值[kJ/kg]	焓值[kJ/kg]	焓值[kJ/kg]	焓值[kJ/kg]
1	-40.00	-77 570.60	-77 734.43	-77 903.41	-78 077.61	-78 256.92
2	-50.00	-78 011.12	-78 199.00	-78 395.98	-78 602.78	-78 819.86
3	-60.00	-78 473.84	-78 696.48	-78 936.78	-79 198.08	-79 483.83
4	-70.00	-78 973.50	-79 253.89	-79 576.75	-79 962.89	-80 446.22
5	-80.00	-79 545.58	-79 957.99	-80 594.07	-82 348.49	-82 794.95
6	-90.00	-81 542.49	-83 818.43	-83 930.34	-84 014.54	-84 081.68
7	-100.00	-84 844.37	-84 880.96	-84 912.39	-84 939.68	-84 963.54
8	-110.00	-85 665.42	-85 677.53	-85 688.13	-85 697.39	-85 705.45
9	-120.00	-86 368.89	-86 370.86	-86 372.21	-86 372.99	-86 373.25
10	-130.00	-87 010.09	-87 006.70	-87 003.02	-86 999.06	-86 994.83
11	-140.00	-87 612.45	-87 605.87	-87 599.13	-87 592.25	-87 585.21

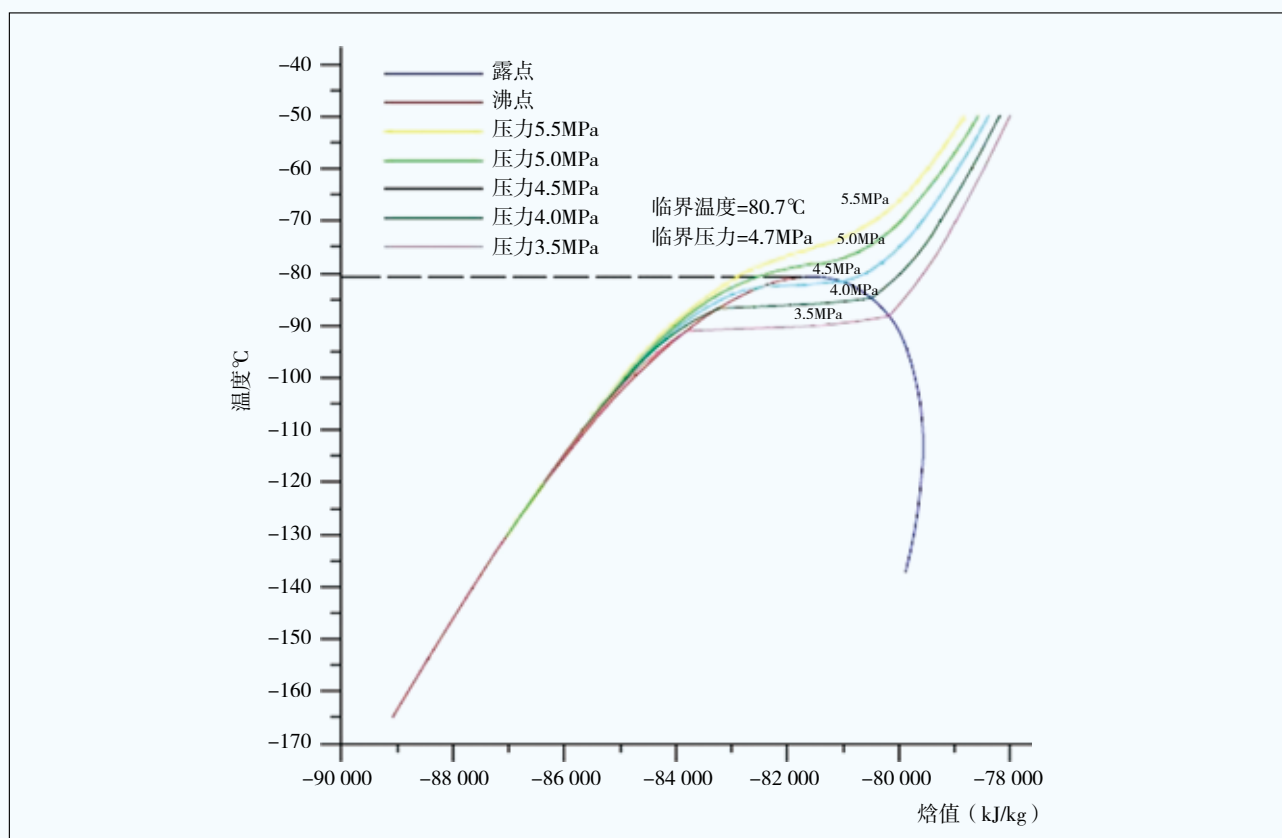


图4 煤层气T-H图

力越高，越有利于冷箱中冷热物流热交换平衡和物流间的平均温差。

本文利用根据图1建立的模型对煤层气不同压力下系统功耗进行了模拟，具体数据见表3。

由于焓值随压力的下降而升高，当 $P_n$ 降低时，在其它参数不变的情况下，由公式（1）可得制冷剂的循环量增加，从而导致制冷剂压缩机的轴功即冷却量增加；但由于 $P_n$ 压力的降低导致原料气压缩机的轴

表3 原料气入冷箱压力对流程性能的影响

$P_n$ (MPa)	5.5	5	4.5	4
$F_{mr}$ (kmol/h)	2.47	2.49	2.50	2.52
$Q_n$ (kW)	2.88	2.78	2.67	2.54
$Q_{mr}$ (kW)	4.94	4.98	5.01	5.04
$Q_0$ (kW)	7.82	7.76	7.68	7.59
$Q_{mv}$ (kW)	2.92	2.80	2.66	2.51
$Q_{mv}$ (kW)	8.60	8.66	8.72	8.78
$Q_w$ (kW)	11.52	11.46	11.38	11.29
Min $\Delta T_0$ (°C)	3.00	3.00	3.00	3.00
Min $\Delta T_1$ (°C)	3.83	3.45	2.87	2.37
Min $\Delta T_2$ (°C)	3.23	2.82	0.02	-3.04
$UA_0$ (W/m <sup>2</sup> °C)	1 871.19	1 894.02	1 917.13	1 940.42
$UA_1$ (W/m <sup>2</sup> °C)	3 975.93	4 173.95	4 391.50	4 630.61
$UA_2$ (W/m <sup>2</sup> °C)	4 341.49	4 983.34	14 684.36	1.0695314.73

注：以上数据为每kmol原料煤层气的相关数据其中：

$P_n$ ：原料煤层气入冷箱压力  
 $F_{mr}$ ：制冷剂循环量  
 $Q_n$ ：原料气压缩机所需轴功

$Q_{mr}$ ：制冷剂压缩机所需轴功  
 $Q_0$ ：系统所需的总轴功  
 $Q_{mv}$ ：原料气冷却量

$Q_{mv}$ ：制冷剂冷却量  
 Min  $\Delta T_1$ ：LNG101的最小温差  
 Min  $\Delta T_2$ ：LNG102的最小温差

$UA_0$ ：LNG100的总传热系数  
 $UA_1$ ：LNG101的总传热系数  
 $UA_2$ ：LNG102的总传热系数

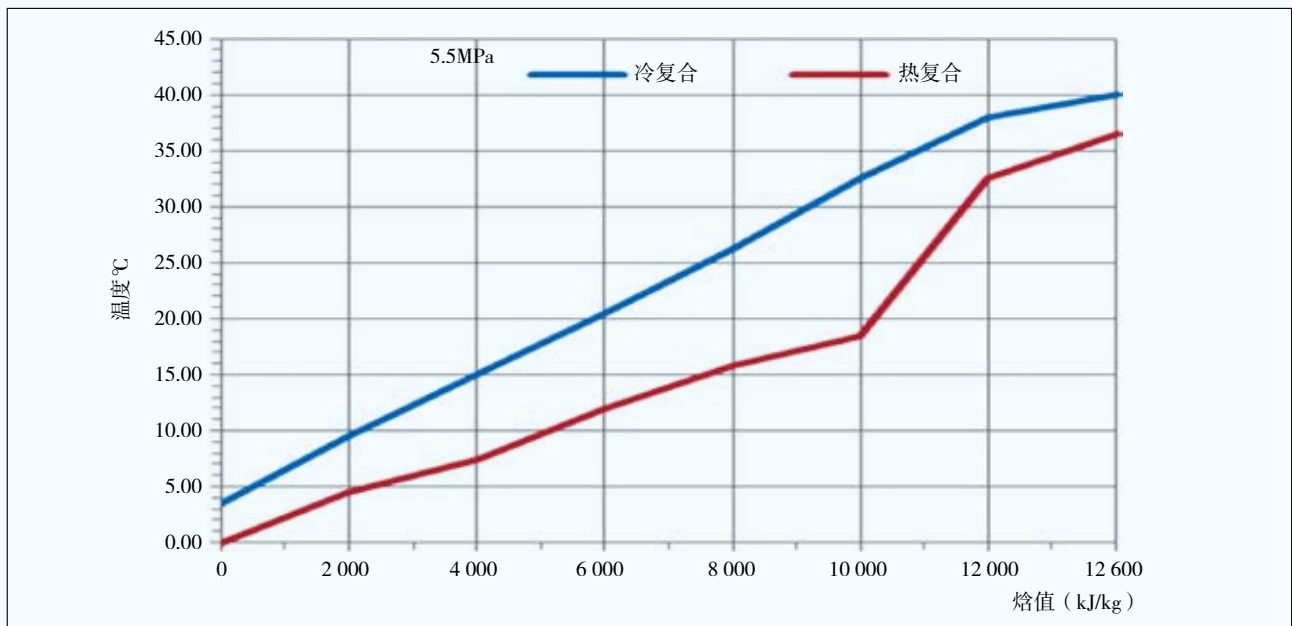


图5 LNG101各种压力下T-H图

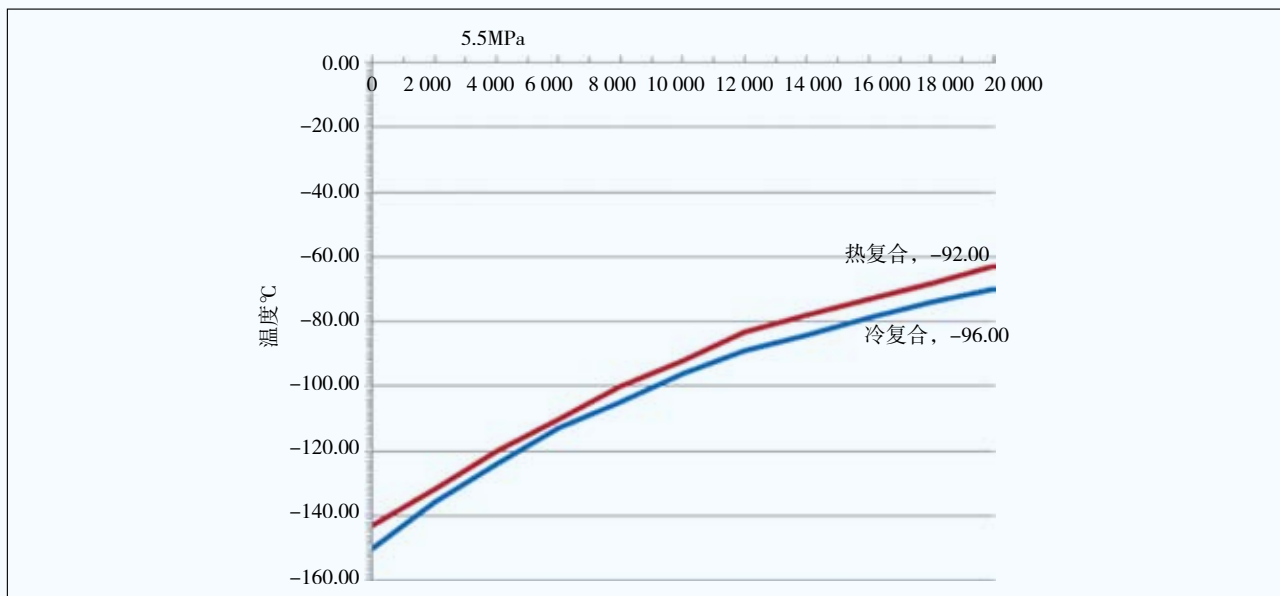


图6 LNG101各种压力下T-H图

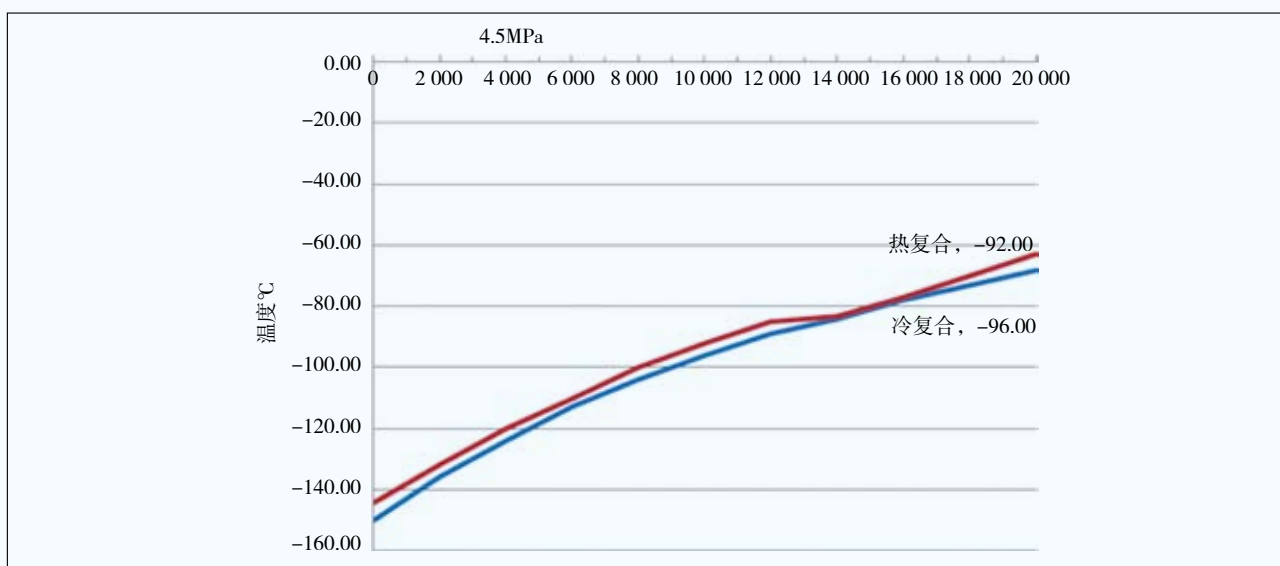


图7 LNG102各种压力下T-H图

功及冷却量减少；但制冷剂压缩机轴功及冷却量的增加量小于原料气压缩机的减少量，所以总功耗及总冷却量称下降趋势。

同时由图4可以看出，随着 $P_n$ 的降低，原料气的液化曲线不断下移，而且愈加不平滑，由图5~图8可见换热器（LNG102）最小换热温差逐渐变小，当压力降至4.0MPa时最小温差变为负值，换热器（LNG102）无法收敛。此外由于换热温差减小，导致LNG换热器的UA值不断增大。对于已建工厂，由于换热器的体

积一定，且换热器内流体的流动状态、各项物性参数也不会发生太大变化，因此其UA值也基本是一个定值，因此此时若不对制冷剂组分进行调整，则需增加制冷剂的循环量。在保证LNG102换热器UA基本不变的情况下增加制冷剂循环量处理每kmol原料气的计算数据见表4。

此外，本文通过HYSYS（流程模拟软件）对增加各种组分分析各种组分对最小换热温差的影响，其结果如下：

表4 制冷剂增加后能耗对比表

对比参数		P <sub>n</sub> (MPa)	
		5.5	4
F <sub>mr</sub>	kmol/h	2.47	3.42
Q <sub>n</sub>	kW	2.88	2.88
Q <sub>mr</sub>	kW	4.94	6.6
Q <sub>0</sub>	kW	7.82	9.48
Q <sub>mw</sub>	kW	2.92	2.92
Q <sub>w</sub>	kW	8.6	10.61
Q <sub>w</sub>	kW	11.52	13.53

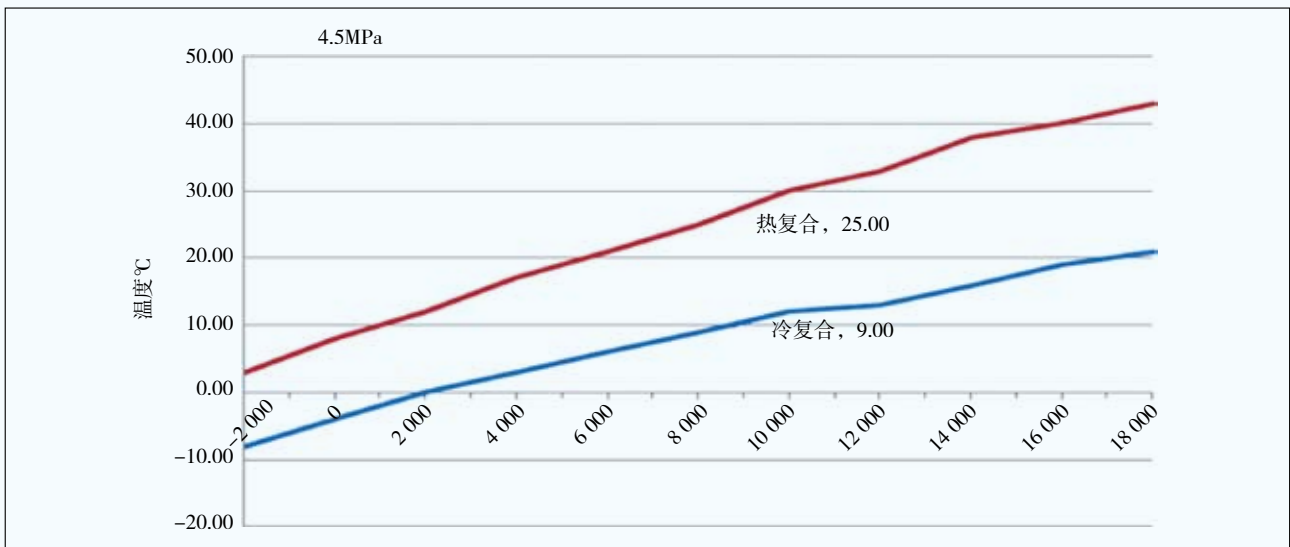


图8 4.5MPa时LNG101的热流曲线

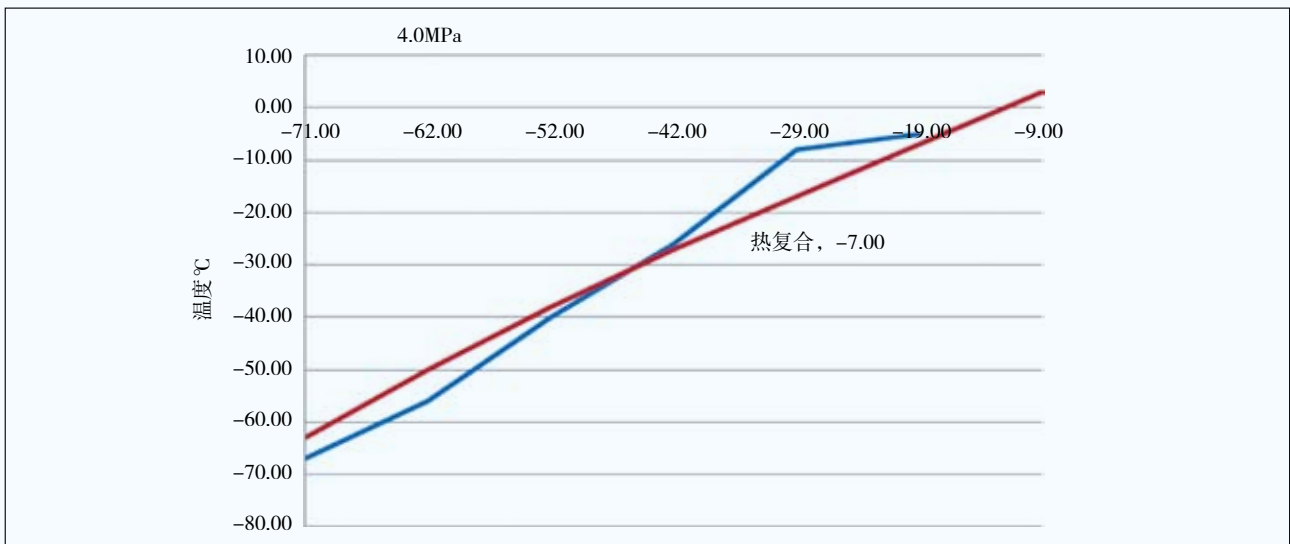


图9 4.0MPa时LNG101的热流曲线

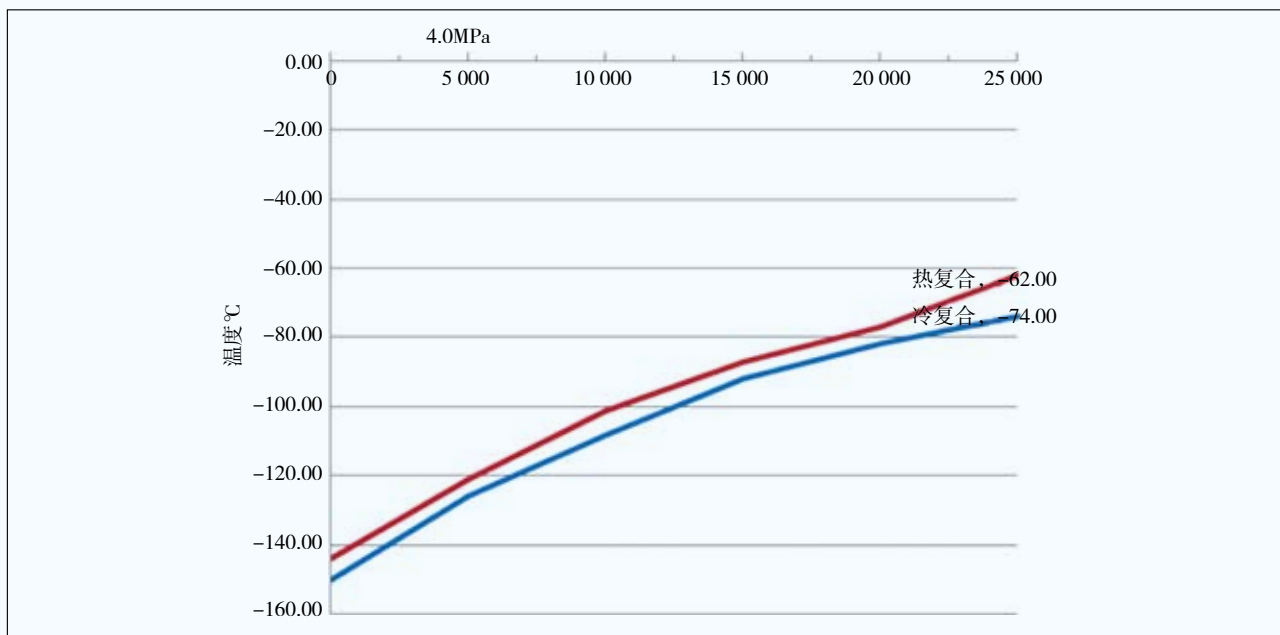


图10 4.0MPa时LNG102的热流曲线

- (1) 甲烷含量对LNG102最小换热温差影响较大;
  - (2) 丙烷含量对LNG100最小换热温差影响较大;
  - (3) 乙烯含量对LNG101最小换热温差影响较大。
- 在保证UA值基本不变的情况下, 通过调整组分,

表5 特定压力下计算结果

$P_n$ (MPa)	5.5	5	4.5	4
$F_m$ (kmol/h)	2.47	2.53	2.61	2.75
$Q_n$ (kW)	2.88	2.78	2.67	2.54
$Q_m$ (kW)	4.94	5.08	5.30	5.60
$Q_b$ (kW)	7.82	7.86	7.96	8.15
$Q_{m1}$ (kW)	2.92	2.80	2.66	2.51
$Q_{m2}$ (kW)	8.60	8.77	9.00	9.34
$Q_w$ (kW)	11.52	11.57	11.66	11.85
制冷剂组分				
甲烷	0.1700	0.1797	0.1991	0.2211
乙烷	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
丙烷	0.1600	0.1592	0.1582	0.1496
戊乙烷	0.1600	0.1576	0.1523	0.1494
乙烯	0.4100	0.4051	0.3943	0.3858
氮气	0.1000	0.0985	0.0960	0.0942

在特定压力下进行计算, 得出表5所示结果:

从以上结果可以看出, 对于一个特定的冷箱, 随着 $P_n$ 的降低甲烷含量不断增加, 从而导致制冷剂循环量及总功耗的增加。

结论: 综上所述, 对于一个特定的冷箱, 原料气入冷箱压力 $P_n$ 降低会导致以下结果:

(1) 煤层气的液化过程会向低温区漂移, 从而导致冷箱的最小换热温差降低;

(2) 由于最小温差降低, 导致冷热物流换热不充分, 从而导致冷箱出口温度升高, 液化率降低;

(3) 采用增加制冷剂循环量的方式能耗高于调整制冷剂的方式;

(4) 需调整制冷剂的组分, 增加甲烷的含量及制冷剂的循环量, 才能充分发挥冷箱的性能, 但系统功耗会增加。

#### 参考文献

- 1 顾安忠. 液化天然气技术. 机械工业出版社
- 2 石玉美, 顾安忠, 汪荣顺等. 制冷剂参数对混合制冷剂循环液化天然气流程性能的影响