

# 流程参数对 C<sub>3</sub>/MRC 天然气液化流程性能的影响(下)\*

石玉美 汪荣顺 顾安忠

(上海交通大学)

石玉美等. 流程参数对 C<sub>3</sub>/MRC 天然气液化流程性能的影响(下). 天然气工业, 2004; 24(3): 111~114

**摘 要** 在基本负荷型天然气液化装置中, 丙烷预冷的混合制冷剂液化流程(C<sub>3</sub>/MRC)应用得最多。在对 C<sub>3</sub>/MRC 流程进行热力模拟的基础上, 分析了流程中天然气压力对制冷剂的流量、制冷剂压缩机的耗功、丙烷压缩机的耗功、混合制冷剂循环中制冷剂提供的冷量和天然气消耗的冷量、丙烷预冷循环丙烷提供的冷量及天然气消耗的冷量的影响。

**主题词** 天然气液化 C<sub>3</sub>/MRC 流程 参数 流程 工艺

(接上期第 90 页) 流程介绍, 流程中参数的分析计算方法, 流程分析计算所需的已知参数参见本文的上篇。在此主要分析经丙烷预冷后天然气的温度、制冷剂进入压缩机时的温度和压力及制冷剂压缩机排气压力对制冷剂的流量、制冷剂压缩机的耗功、丙烷压缩机的耗功、混合制冷剂循环中制冷剂提供的冷量和天然气消耗的冷量、丙烷预冷循环丙烷提供的冷量及天然气消耗的冷量的影响<sup>[1]</sup>。

## 丙烷预冷后天然气温度的影响

丙烷预冷后天然气的温度, 即节点 2 的温度往增大的方向变化时, 节点 2 的焓值  $H_2$  也增加。在天然气液化后储存条件不变的情况下, 节点 7、8 的焓  $H_7$ 、 $H_8$  不变。同时, 混合制冷剂循环中各项条件均不变, 高低压制冷剂单位流量的焓  $h_{13}$ 、 $h_9$  不变。据本文上篇表 1 的计算式制冷剂的流量增加(见图 1)。

由于节点 2 的焓值增大, 节点 5 的焓值不变, 据本文上篇表 1 所示计算式, 混合制冷剂循环为天然气提供的冷量  $Q_{\text{cng}}$  增加, 见图 2。节点 1 的焓值不变, 据本文上篇表 1 所示计算式, 丙烷预冷循环为天然气提供的冷量  $Q_{\text{png}}$  降低, 见图 3。由于节点 1、5 的状态不变, 所以液化天然气所需冷量的总和不变。所以改变节点 2 的温度也就是重新分配两个循环为天然气提供的冷量。

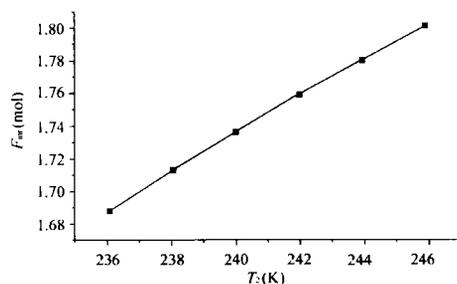


图 1 T<sub>2</sub> 对 F<sub>mr</sub> 的影响

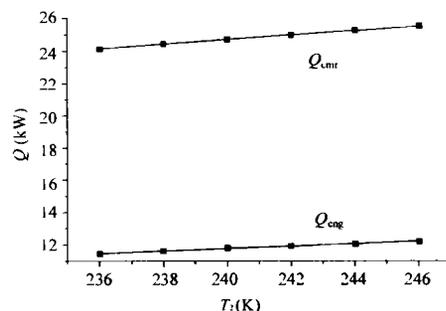


图 2 T<sub>2</sub> 对 Q<sub>cng</sub> 和 Q<sub>png</sub> 的影响

由上可知, 当  $T_2$  增大时, 丙烷预冷天然气的冷量  $Q_{\text{png}}$  减小。对于预冷混合制冷剂的冷量  $Q_{\text{pmr}}$ , 本文上篇表 1 所示计算式中,  $h_{12}$  和  $h_{13}$  不变, 流量  $F_{\text{mr}}$  增加使  $Q_{\text{pmr}}$  增加。两者综合影响结果使丙烷带走的热

\* 本成果得到国家自然科学基金资助(59576001)。

**作者简介:** 石玉美, 女, 1970 年生, 副教授; 1998 年毕业于上海交通大学, 获工学博士学位; 现为上海交通大学机械与动力工程学院制冷与低温工程研究所教师, 已发表论文三十余篇, 现为《天然气工业》编委。地址: (200030) 上海市华山路 1954 号。电话: (021) 62932602。E-mail: ymshi@shtu.edu.cn

量  $Q_p$  增加,但增量较小,见图3。这说明随着节点2的温度上升,预冷循环提供的冷量被天然气利用的百分比下降,从能量充分利用的角度出发,天然气经丙烷预冷后的温度不能太高。

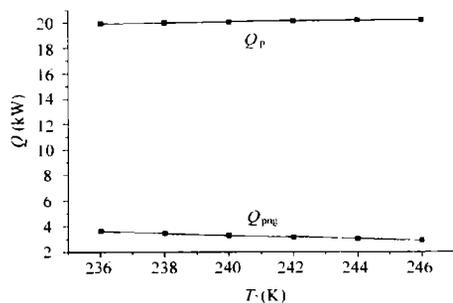


图3  $T_2$  对  $Q_p$  和  $Q_{pre}$  的影响

丙烷预冷循环所提供的冷量增加,相应功耗也略有增加,见图4。

在其他流程参数不变时,节点9、11单位流量焓值  $h_9$ 、 $h_{11}$  不变,随着制冷剂流量增加,据本文上篇表1所示计算式,压缩机耗功  $W_c$  增加,见图4。

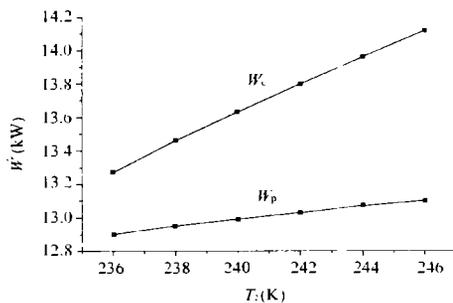


图4  $T_2$  对  $W_c$  和  $W_p$  的影响

由本文上篇表1可知,天然气经丙烷预冷后温度往增大方向变化时,两个循环压缩机总的耗功增加。这对流程的经济性不利,故在进入流程前,要用丙烷预冷。这也是采用丙烷预冷天然气的目的。

### 低压制冷剂温度的影响

低压制冷剂的温度升高时,其单位流量的焓值  $h_9$  相应增加,在其他条件不变的情况下,单位流量的高压制冷剂  $h_{13}$ 、天然气起始点的焓  $H_2$  及终点的焓  $H_7$ 、 $H_8$  均不发生变化。由本文上篇表1计算式可知,混合制冷剂的流量降低,见图5。

天然气回路中参数不变,所以混合制冷剂为天然气提供的冷量不变,见图6。

对于丙烷预冷天然气和高压制冷剂带走的热量:天然气管路中带走的热量不变;制冷循环回路

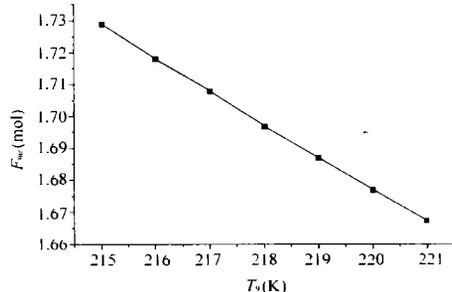


图5  $T_9$  对  $F_{mr}$  的影响

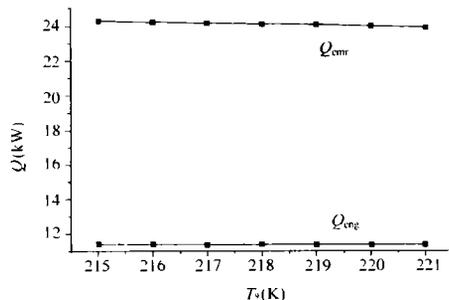


图6  $T_9$  对  $Q_{cmr}$  和  $Q_{cng}$  的影响

中,节点12和节点13单位流量的焓均不变,则单位流量下两节点间的焓差不变,但是制冷循环中制冷剂流量降低了,预冷制冷剂的丙烷预冷量相应降低。因此总的丙烷预冷量降低,见图7。丙烷预冷循环中压缩机耗功也降低,见图8。节点9温度升高,则焓

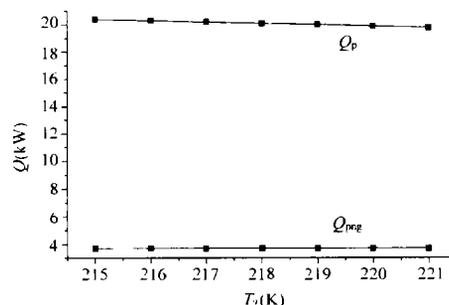


图7  $T_9$  对  $Q_p$  和  $Q_{pre}$  的影响

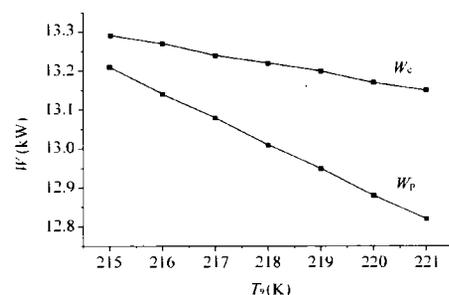


图8  $T_9$  对  $W_c$  和  $W_p$  的影响

值增加,而节点 11 的焓值不变,则  $h_{11} - h_9$  降低。当流量降低时,代表压缩机耗功的节点 11 与节点 9 之间总的焓差也降低,见图 8。节点 9 温度升高后,混合制冷剂循环和丙烷预冷循环提供的冷量均降低。

### 低压制冷剂压力的影响

其他参数不变的情况下,低压制冷剂压力升高,则单位流量低压制冷剂的焓值  $h_9$  降低,其他焓值  $H_2$ 、 $H_7$ 、 $H_3$ 、 $h_{13}$  均不变。据本文上篇表 1 计算式,制冷剂的流量增加。由于压力对焓值的影响不是很大,故从计算结果看,流量增加的比例不大(图 9)。

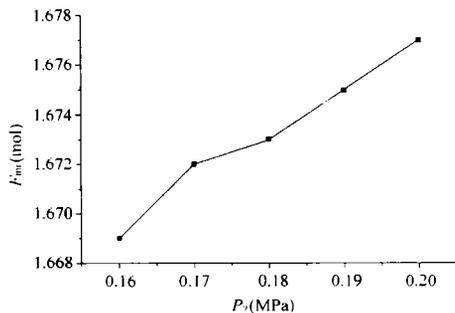


图 9  $P_9$  对  $F_{mr}$  的影响

天然气回路中参数不变,所以混合制冷剂为天然气提供的冷量不变,见图 10。

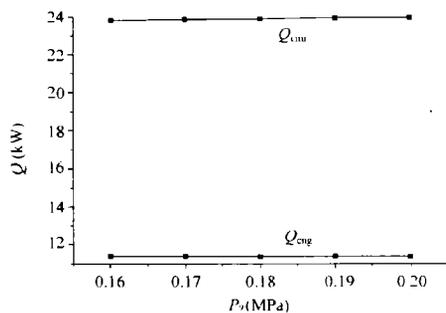


图 10  $P_9$  对  $Q_{cmr}$  和  $Q_{cng}$  的影响

对于丙烷的预冷量,预冷天然气部分所需的冷量不变。预冷制冷剂所需的冷量为  $H_{12} - H_{13}$ ,流程中,  $h_{12}$  和  $h_{13}$  均不变,流量增加引起丙烷预冷量增加,见图 11。相应的丙烷压缩机的功耗也增加,见图 12,由于流量增量小,  $Q_{pnr}$  增量也很小。

对于混合制冷剂循环压缩机的耗功,一方面由于低压制冷剂的压力升高,引起压比降低,进而可使单位流量的耗功减小;另一方面由于流量增加会使总耗功往增大的方向变化。在本例中,第一方面的作用远远超过第二方面的影响,随着低压制冷剂压

力的升高,压缩机耗功迅速下降。功耗下降的比例要比流量增加的比例大得多,见图 12。

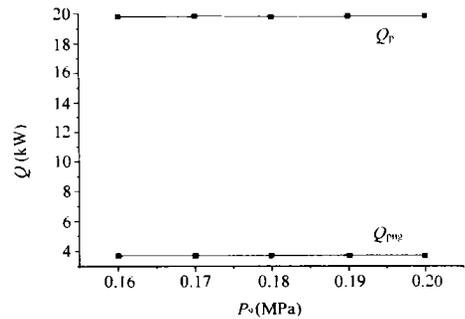


图 11  $P_9$  对  $Q_p$  和  $Q_{pnr}$  的影响

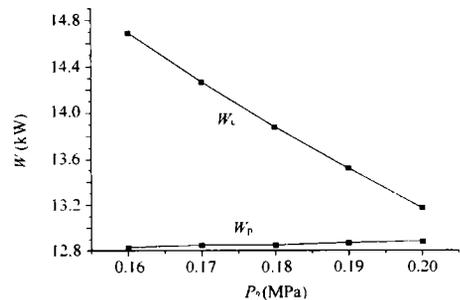


图 12  $P_9$  对  $W_c$  和  $W_p$  的影响

### 高压制冷剂压力的影响

其他参数不变的情况下,高压制冷剂压力升高,则单位流量低压制冷剂的焓值  $h_{13}$  降低,其他焓值  $H_2$ 、 $H_7$ 、 $H_8$ 、 $h_9$  均不变。据本文上篇表 1 的计算式,制冷剂的流量降低。由于压力对焓值的影响不是很大,故从计算结果看,流量增加的比例不大(图 13)。

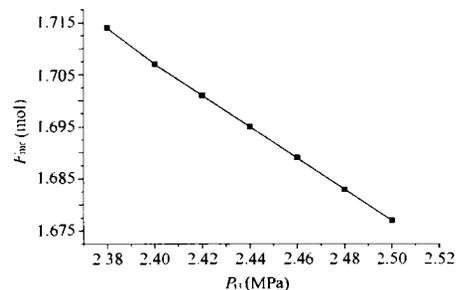


图 13  $P_{13}$  对  $F_{mr}$  的影响

天然气回路中参数不变,所以天然气消耗的冷量不变,见图 14 和图 15。

对于丙烷的预冷量,预冷天然气部分所需冷量不变。预冷制冷剂所需的冷量为  $H_{12} - H_{13}$ ,流程中  $h_{13}$  降低,  $h_{12}$  不变,则单位流量所需的丙烷预冷量增

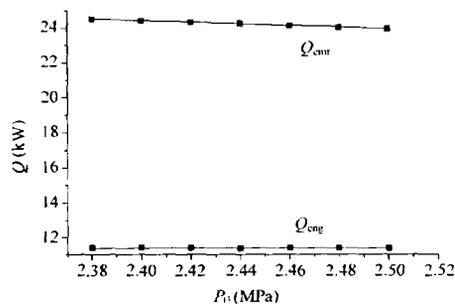


图 14  $P_{13}$  对  $Q_{cmr}$  和  $Q_{cng}$  的影响

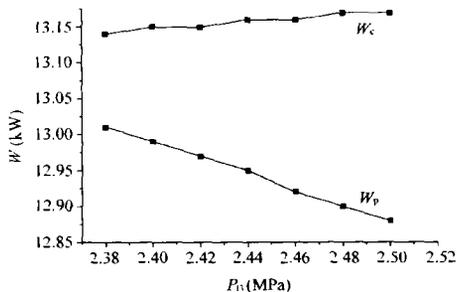


图 16  $P_{13}$  对  $W_c$  和  $W_p$  的影响

加,但流量降低,其综合影响结果是丙烷预冷量略降(图 15)。相应的丙烷压缩机的功耗也略降(图 16)。

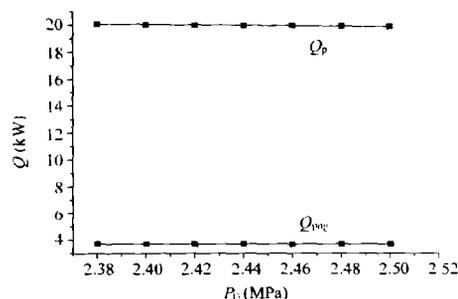


图 15  $P_{13}$  对  $Q_p$  和  $Q_{png}$  的影响

对于混合制冷剂循环压缩机的耗功,一方面由于高压制冷剂的压力升高,引起压比升高,进而可使单位流量的耗功增加;另一方面由于流量降低会使总耗功往减少的方向变化。在本例中,第一方面的作用远远超过第二方面的影响,即随着高压制冷剂压力的升高,压缩机耗功增加,见图 16。

### 结 论

表 1 中列出了部分流程参数对流程性能参数的影响。通过对表中数据的分析,可得到如下结论。

(1) 预冷后天然气的温度对混合制冷剂的流量、

表 1 流程参数的变化对流程性能参数的影响

| 影响参数及变化趋势         | $F_{mr}$ | $W_c$  | $W_p$ | $W_c + W_p$ | $Q_{cmr}$ | $Q_{cng}$ | $Q_p$ | $Q_{png}$ | $Q_{cmr} + Q_{png}$ |
|-------------------|----------|--------|-------|-------------|-----------|-----------|-------|-----------|---------------------|
| $T_2$ 升高 4.23%    | 6.01     | 6.02   | 1.53  | 3.86        | 5.41      | 6.07      | 1.53  | -25.69    | 0.00                |
| $T_3$ 升高 2.79%    | -3.59    | -1.05  | -2.95 | -2.00       | -1.52     | 0.00      | -2.94 | 0.00      | 0.00                |
| $P_9$ 升高 25.00%   | 0.48     | -10.35 | 0.39  | -5.34       | 0.71      | 0.00      | 0.40  | 0.00      | 0.00                |
| $P_{13}$ 升高 5.04% | -2.16    | 0.23   | -1.00 | -0.42       | -2.20     | 0.00      | -1.00 | 0.00      | 0.00                |

注:表中,数据前带“-”表示该数据下降。

混合制冷剂压缩机的耗功、混合制冷剂循环低压制冷剂提供的冷量及天然气消耗的冷量、丙烷预冷量影响较大。对丙烷预冷量的影响尤其明显。

(2) 压缩机入口处制冷剂的温度变化对混合制冷剂流量、丙烷压缩机耗功、丙烷预冷量影响较大。

(3) 低压制冷剂压力对混合制冷剂压缩机的耗功影响很大。

(4) 高压制冷剂压力对混合制冷剂的流量和混合制冷剂提供的冷量影响较大。

### 参 考 文 献

1 石玉美. 混合制冷循环液化天然气流程的热力研究. 上海交通大学(动力与能源工程学院), 1998

2 Wolfgang Foerg, Wilfried Bach *et al.* A new LNG baseload and the manufacturing of the main heat exchangers. Twelfth international Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, Perth, Australia, 1998-02-06

3 Johnson G L, Finn A J *et al.* Offshore & smaller-scale liquefiers. LNG Journal, 1999; Jul/Aug; 19~22

4 Vink K J. Comparison of baseload liquefaction process. Twelfth international Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, Perth, Australia, 1998-03-06

5 Yoshitugi Kikkawa, Moritaka Nakamura. Development of liquefaction process for natural gas. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1997; 30(4): 626~630

(收稿日期 2002-08-28 编辑 居维清)