

流程参数对 C₃/MRC 天然气液化 流程性能的影响(上)*

石玉美 汪荣顺 顾安忠

(上海交通大学)

石玉美等. 流程参数对 C₃/MRC 天然气液化流程性能的影响(上). 天然气工业, 2004; 24(2): 88~90

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(C₃/MRC)应用得最多。在对 C₃/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。

关键词 天然气液化 C₃/MRC 流程 参数 流程 工艺

LNG 由于其在远洋运输贸易方面不可替代的优越性, 发展很快。在基本负荷型天然气液化装置中, 用得最多的液化流程是美国 APCI 公司的丙烷预冷混合制冷剂液化流程(C₃/MRC)。在 C₃/MRC 中, 由于天然气和混合制冷剂都是混合物, 且在液化过程中, 天然气和制冷剂都会发生相变, 因此流程计算复杂, 且影响流程性能的参数很多。笔者在此定量分析了天然气压力对制冷剂流量、混合制冷剂和丙烷压缩机耗功、丙烷预冷量、混合制冷剂提供的冷量和天然气消耗的冷量的影响。其他参数分析计算内容见本刊下期连载。

流 程

图 1、2 是丙烷预冷混合制冷剂循环液化天然气流程图: 一部分是主循环(图 1), 即 MRC 循环; 另一部分则是丙烷预冷循环(图 2)。

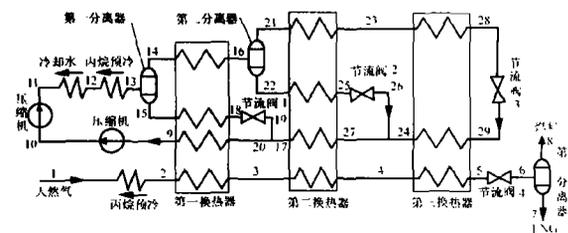


图 1 混合制冷剂循环

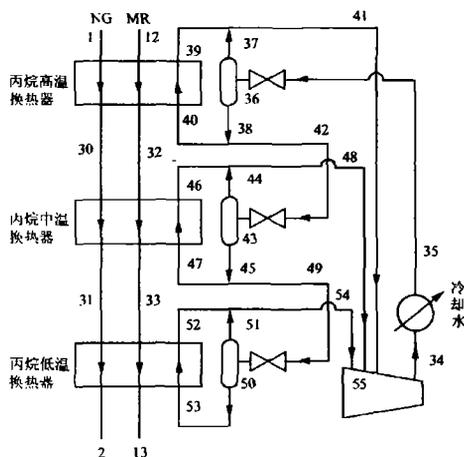


图 2 丙烷预冷循环

在此流程中, 丙烷预冷循环用于预冷混合制冷剂和天然气, 而混合制冷剂循环用于深冷和液化天然气。在液化流程中, 天然气首先经过丙烷预冷循环预冷, 然后流经各换热器逐步被冷却, 最后经节流阀 4(图 1)进行降压, 从而使液化天然气可在常压下贮存。混合制冷剂经两级压缩机压缩至高压, 首先用水冷却, 带走一部分热量, 然后通过丙烷预冷流程循环预冷, 再经各个多股流换热器为天然气提供冷量。丙烷预冷循环中, 丙烷通过三个温度级的换热器为天然气和混合制冷剂提供冷量。

* 本成果得到国家自然科学基金资助(59576001)。

作者简介: 石玉美, 女, 副教授, 1970 年生; 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 30 余篇。地址: (200030) 上海市华山路 1954 号。电话: (021) 62932602。E-mail: ymshi@sjtu.edu.cn

下面介绍以下各节中用到的流程参数名称及含义:①天然气的压力是指天然气管路中节流阀 4 之前各节点的压力;②预冷后天然气的温度指天然气管路中节点 2 的温度;③高压制冷剂的压力指第一个气液分离器入口处节点 13 的压力;④低压制冷剂的压力和温度指第一个换热器热端面节点 9 的压力和温度。

流程参数分析方法

笔者主要从热力学的角度来分析各参数对流程性能的影响。流程的性能指标都涉及到焓值。焓值是由某一状态点的压力 p 、温度 T 、摩尔分率 z_{mol} 及流量 F 决定的,其中 p 、 T 、 z_{mol} 影响混合制冷剂和天然气单位流量焓值。

表 1 列出了本文参数分析中用到的性能参数的计算公式。表 1 所示的表达式中焓值是流程模拟分析的结果。

表 1 性能参数的计算公式表

性能参数	计算公式
制冷剂流量 F_{mr}	$(H_2 - H_7 - H_8)/(h_9 - h_{13})$
低压混合制冷剂提供的冷量 Q_{cmr}	$(H_9 - H_{20}) + (H_{17} - H_{27}) + (H_{21} - H_{27})$
混合制冷剂循环中天然气消耗的冷量 Q_{ng}	$H_2 - H_5$
丙烷预冷循环为天然气提供的冷量 Q_{png}	$H_1 - H_2$
丙烷预冷循环为混合制冷剂提供的冷量 Q_{pmr}	$H_{12} - H_{13}$
丙烷预冷循环提供的冷量 Q_p	$(H_{39} - H_{10}) + (H_{16} - H_{17}) + (H_{12} - H_{53})$ 或 $(H_1 - H_2) + (H_{12} - H_{13})$
混合制冷剂循环中压缩机耗功 W_c	$H_{11} - H_9$
丙烷预冷循环中压缩机耗功 W_p	$H_{34} - H_{35}$

注:表中 H 为总焓值, h 为单位流量的焓值, $H = F_{\text{mr}}h$ 。

在下述分析流程参数对流程性能的影响时,首先分析流程参数对焓值的影响,其次再分析焓值的变化对以上这些性能指标的影响。

已知参数

计算中假定生成的液化天然气流量为 1 mol/s。在参数分析中已知的参数值见表 2、3。

表 2、3 中混合制冷剂的摩尔分率、天然气温度、高低压制冷剂温度均为第一个换热器热端面处的数

表 2 已知压力和温度

项目	天然气	高压制冷剂	低压制冷剂	LNG 储存条件
压力(MPa)	5	2.5	0.2	0.15
温度(K)	235	235	220	117.2

表 3 组分的摩尔分率 %

组分	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀
天然气	0.7	82.0	11.2	4.0	1.2	0.9
混合制冷剂	5.0	41.0	34.0	20.0	0.0	0.0

值。各个换热器热端面的温差为 3 K。天然气入口温度,即流程中节点 1 的温度为 298 K。压缩机的机械效率为 0.75。丙烷预冷循环的压缩机出口压力为 1.3 MPa。

进行参数分析时,只变动进行分析的参数值,其余值不变。

天然气压力的影响

对于需要液化的天然气,当进入液化流程的压力升高时,天然气的焓值 H_2 降低。流程中,液化天然气的储存压力、温度、天然气中各组分的摩尔分率不变,则节点 6 闪蒸分离的条件不变,因此产生气液两相的流量和摩尔分率不变,同时节点 7 和节点 8 的温度、压力也未变化,从而天然气被液化后目标状态的焓 H_7 和 H_8 也相同;因此,随着天然气入口压力升高,天然气入口状态与液化后状态间的焓差减少,即液化天然气所需的冷量减少。在制冷剂循环其他参数不变的情况下,第一个换热器热端面的高低压制冷剂焓值 h_{13} 、 h_9 相同。据表 1 所示计算式可知,所需的制冷剂流量减少,见图 3。

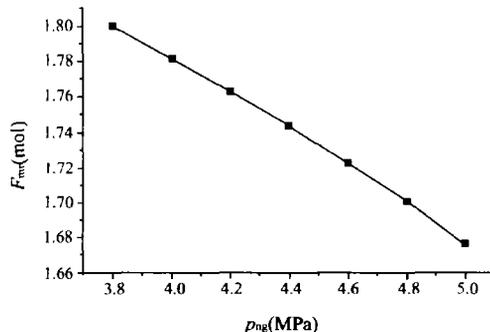


图 3 天然气压力对 F_{mr} 的影响

由上一段分析可知,天然气冷却回路中节点 6 的焓值不变,而在流程中,假设节流阀是等焓节流,

则节点5的焓值 h_5 也不变。而由于压力升高,节点2的焓值 h_2 下降,则 h_2-h_5 降低,由于天然气流量不变,所以在混合制冷剂循环液化天然气所需的总冷量下降,见图4。从图中也可看出,低压制冷剂提供的总冷量也下降。低压制冷剂提供的冷量与它在换热器两侧的焓差有关,焓差决定于换热器两侧的 p 、 T 、流量、摩尔分率,在图1所示的流程中,除了第一个换热器热端面的强度参数是一定的外,流程中其他各换热器两侧的参数均受流程其他众多因素的影响,即受换热器两侧各节点处的压力、温度、流量、摩尔分率、节流阀温降的影响,得到的结果是各参数平衡计算的结果。所以,为了能充分发挥各设备的功效,应使流程参数和换热器的数量有效匹配。

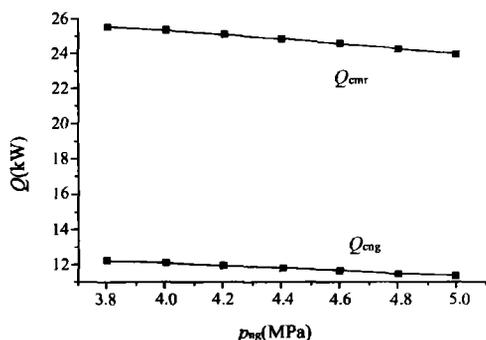


图4 天然气压力对 Q_{cmr} 和 Q_{eng} 的影响

对于 Q_{png} ,当天然气的压力升高时,气相区相同温差间的焓差增加,但是增加量比较小,据表1所示计算式,天然气流量不变, h_1-h_2 有少量增加,这使 Q_{png} 增加。对于 Q_{pmr} ,据表1所示计算式, h_{12} 和 h_{13} 不变,而流量降低,则 Q_{pmr} 减小;这两部分影响综合的结果是丙烷的预冷量减少,见图5。丙烷预冷循环的功耗也下降,见图6。

在制冷剂循环其他参数不变时,压缩比、压缩机进口状态和制冷工质状态不变,则单位流量工质压缩过程不发生变化。因此,压缩机进出口状态单位工质的焓 h_9 、 h_{11} 不变,而制冷剂流量 F_{mr} 下降,则 W_c

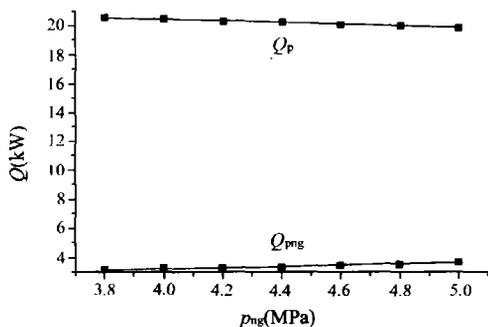


图5 天然气压力对 Q_p 和 Q_{png} 的影响

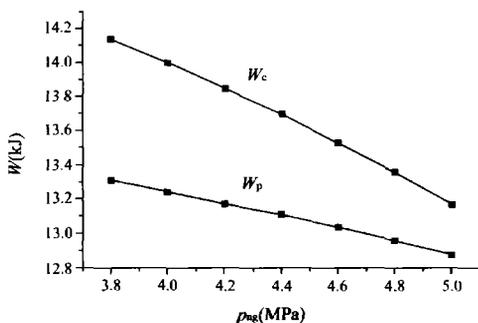


图6 天然气压力对 W_c 和 W_p 的影响

与 F_{mr} 同比例减少。

天然气压力增加时,液化天然气所需的总冷量几乎不变,但天然气压力增加时总的压缩机功耗降低。这对降低流程运行成本是有利的。但是流程中压力较高时,也存在着缺点:①在天然气进入液化流程之前,输送天然气的管路需能承受较高的压力,这就需要管路用高强度的材料或需加大管道的壁厚,使运输成本增加;②在同一温度下,压力较高时,根据气体的基本热力学关系可知,天然气及混合制冷剂中的重组分容易液化,甚至会凝固,这样会引起管道的堵塞。

结 论

表4中列出了天然气流程参数对流程性能参数的影响。

表4 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_{cmk}	Q_p	Q_{png}	$Q_{cmk}+Q_{png}$
p_{nrg} 升高31.58%	-6.83	-6.86	-3.23	-5.10	-6.11	-6.88	-3.26	16.35	-2.08

注:表中数据前带“-”号表示该数据值下降。

天然气压力对混合制冷剂的流量、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、天然气消耗的冷量及丙烷预冷量影响较大。

对丙烷预冷量的影响尤其明显。(未完,待续)

(收稿日期 2002-08-28 编辑 居维清)