

大型 FLNG 装置上部模块混合制冷剂 液化工艺的适应性评价分析

王清¹, 李玉星², 谢彬¹, 喻西崇¹

[1. 中海油研究总院, 北京 100027; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580]

摘要 对于大型浮式液化石油气(FLNG)装置,液化工艺是整套装置非常关键的技术之一。混合制冷剂液化工艺具有流程简单、设备少、效率高、功耗小等优点,已广泛应用于陆上液化化工厂,且将用于海上 FLNG 装置。混合制冷剂可细分成不同的工艺,不同的液化工艺具有不同的特点和适用范围。利用 HYSYS 软件对不同进料流量、甲烷组分比例和重组分比例下的三种混合制冷剂工艺进行了模拟,对比了三种流程的能耗与设备特征,分析了适用于不同液化能力浮式装置的工艺流程。结果表明:在天然气进气流量为 65 000 m³/d 的条件下,丙烷预冷混合制冷剂循环(C₃MR)压缩机比功耗为 0.330 9,双混合制冷剂循环(DMR)比功耗为 0.225 4,单混合制冷剂循环(SMR)比功耗为 0.245 1;C₃MR 流程关键设备数量最多,DMR 次之,SMR 设备最少;C₃MR 所需的制冷剂量最大,SMR 最小;随着原料气中甲烷含量的变化,C₃MR 比功耗的变化最大,DMR、SMR 比功耗变化较小。

关键词 FLNG; 混合制冷剂工艺; 敏感性分析; 海上适应性

中图分类号 U473.2+1

文献标志码 A

文章编号: 2095-7297(2014)01-0042-08

Adaptability Evaluation of Mixed Refrigerant Liquefaction Process for Large Scale FLNG Topsides

WANG Qing¹, LI Yu-xing², XIE Bin¹, YU Xi-chong¹

[1. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China; 2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract As one of the key technologies of the whole device for large scale floating liquid natural gas (FLNG) equipment, liquefaction process is mainly dominated by foreign companies at present. Mixed refrigerant liquefaction process has the advantages of simple process, less equipments, high efficiency and lower power consumption, so it has been widely applied to liquefaction plant on land. It will also be adopted in the offshore FLNG which is about to put into production firstly in the world. Mixed refrigerant liquefaction process can be divided into different types of processes, and different liquefaction processes have different characteristics and scope of application. HYSYS software is used to simulate the three mixed refrigerant cycles under various conditions of feed flow, methane component ratio and heavy components ratio. Energy consumption and device features of different processes are compared. Processes which are suited to different liquefaction capacities are analyzed. The results show that, the ratios of power consumption of propane pre-cooled mixed refrigerant (C₃MR), double mixed refrigerant (DMR) and single mixed refrigerant (SMR) are 0.330 9, 0.225 4 and 0.245 1 respectively in the condition of 65 000 m³/d natural gas inflow. Mixed refrigeration process which has the largest number of key equipments is C₃MR, followed by the DMR, and the minimum is SMR. C₃MR requires the most refrigeration while SMR requires the least. With the change of methane content in the feed gas, the ratio of power consumption of C₃MR changes the most, while those of DMR and SMR change less.

Key words FLNG; mixed refrigerant liquefaction process; sensitivity analysis; offshore adaptability

收稿日期: 2014-02-21

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05026-006)

作者简介: 王清(1987—), 女, 硕士, 主要从事海上 FLNG 液化工艺方面的研究。

0 引言

海洋中天然气资源十分丰富,随着对海上深水气田的不断开发,新型油气田生产装置浮式液化天然气船(FLNG,又称 FPSO-LNG)的发展越来越受到重视。目前,FLNG 应用于深水油气田开发只是一种新的工程方案,世界上还没有正式投入运行的 FLNG,但众多石油大公司(如 Shell、ABB Lummus Global、SBM 等)都在致力于 FLNG 液化工艺和新船型的开发^[1]。目前,世界上处于概念设计阶段的 FLNG 项目共有 16 个,即将进入工程实施的 FLNG 项目有 14 个,其中有 2 个 FLNG 装置处在建造阶段,分别是 Shell 作为作业者的 Prelude FLNG 装置和马来西亚国家石油公司作为作业者的 Kanowit FLNG 装置。Prelude FLNG 装置采用法国 TECHNIP 公司的双混合制冷剂液化工艺,年处理天然气规模为 50 亿方,液化天然气(LNG)产量为年产 350 万吨,目前正在韩国三星重工建造,预计 2016 年底在澳大利亚的 Prelude 气田投产运行;Kanowit FLNG 装置采用双氮膨胀液化工艺,年处理天然气规模为 20 亿立方米,LNG 产量为年产 120 万吨,目前正在韩国大宇造船厂建造,预计 2015 年底在马来西亚的 Kanowit 气田投产运行。从调研的国际上 FLNG 液化工艺来看,级联式工艺、混合制冷剂(MR)工艺及膨胀制冷三种基本类型的液化工艺都有采用^[2-4];其中,混合制冷剂工艺因其具

有效率高、功耗小、流程简单、设备少等优点而比较适合海上特殊的作业环境。目前,常见的混合制冷剂液化循环有丙烷预冷混合制冷剂循环(C_3 MR)、双混合制冷剂循环(DMR)和单混合制冷剂循环(SMR)。国外的 Sunrise 项目设计的生产装置采用了 Shell 的双混合制冷剂液化流程^[5];博莱克·威奇公司现已开发的几个海上项目采用了单混合制冷剂 PRICO 流程^[6]。国内的海上天然气液化技术起步较晚,尚处于研究阶段。本文借助 HYSYS 软件,对三种常见的混合制冷剂液化流程进行模拟、敏感性分析和海上适应性评价,为国内开发和应用海上天然气液化装置提供理论支持。

1 三种常见的混合制冷剂液化流程介绍

本文采用 HYSYS 软件分别对三种混合制冷剂循环进行稳态模拟,并在此基础上进行入口流量、组分敏感性分析及海上适用性评价。HYSYS 是一种常用的石油化工工艺流程模拟软件,主要用于石油天然气工程设计计算分析和油田地面工程建设设计。

图 1 是丙烷预冷混合制冷剂液化工艺流程图。该流程主要包括丙烷预冷循环和混合制冷剂循环。丙烷预冷循环用于预冷天然气和混合制冷剂,混合制冷剂循环则用于深冷和液化天然气。

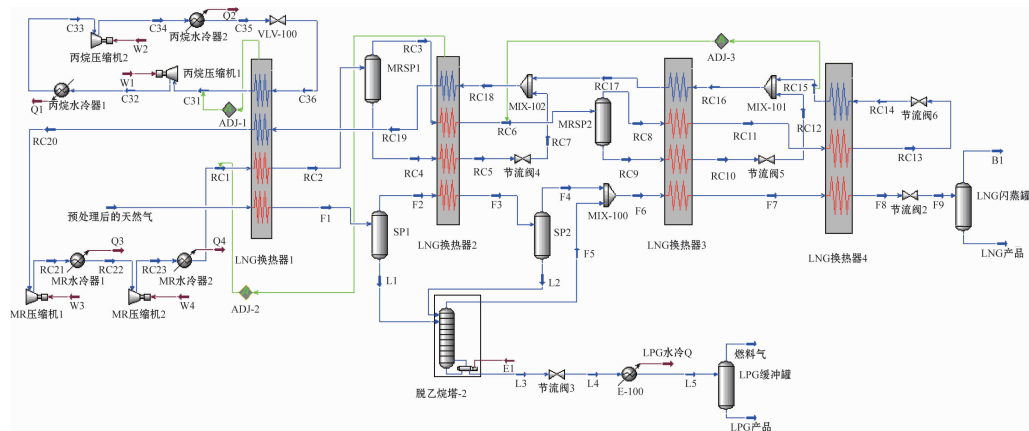


图1 丙烷预冷混合制冷剂液化工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of propane pre-cooled mixed refrigerant process

图 2 给出了双混合制冷剂液化工艺流程图。该流程有两个独立的制冷循环,一个用于天然气和混合制冷剂的预冷,另一个用于天然气最终的冷却和

液化(混合制冷剂循环)。与 C_3 MR 流程十分相似,只是它的预冷采用的是混合制冷剂,而不是纯净的丙烷。

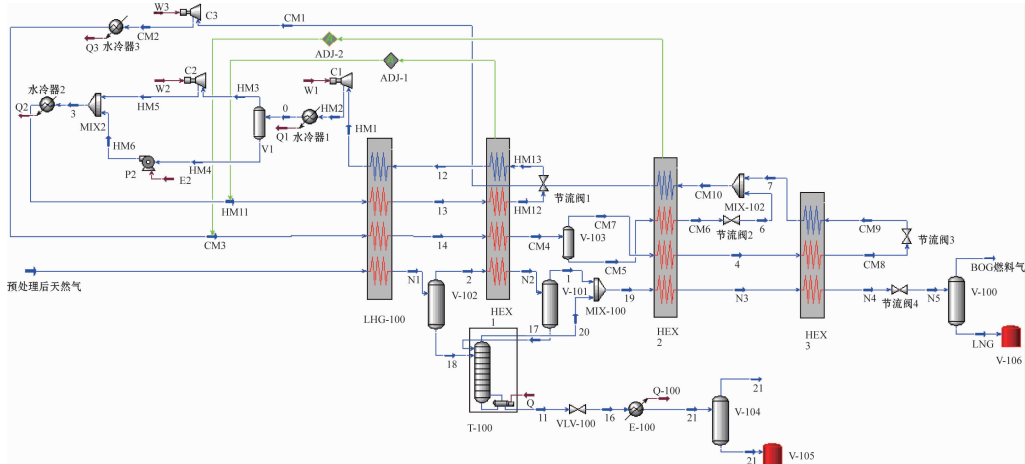


图 2 双混合制冷剂液化工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of double mixed refrigerant process

图 3 给出了单混合制冷剂液化工艺流程。该流程采用了一个简单的闭式制冷循环,混合制冷剂经

压缩、部分冷凝、冷却、节流后,与天然气换热并提供冷量。

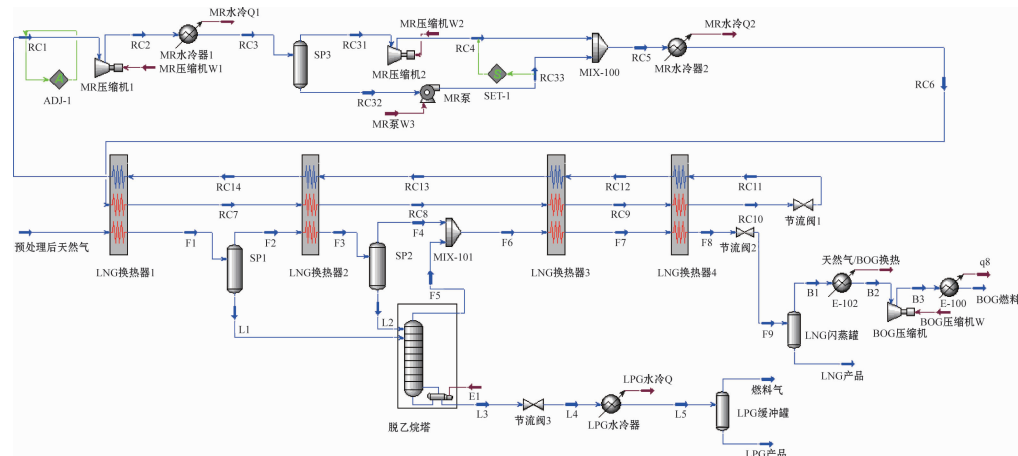


图 3 单混合制冷剂液化工艺流程图

Fig. 3 Flow chart of single mixed refrigerant process

2 三种混合制冷剂液化流程敏感性分析

2.1 模拟分析基础参数

经脱酸、脱水单元后的天然气流量为 65 000 m³/d,其余物性参数如表 1、表 2 所示。

表 1 预处理后天然气压力、温度与 LNG 存储状态的压力、温度参数

Table 1 Pressure and temperature of pretreated natural gas and LNG storage condition

状态	天然气	LNG 储存条件
压力/kPa	5 000	120
温度/°C	34.5	-159.3

表 2 预处理后天然气组分数据表(物质的量分数)

Table 2 Component data sheet of pretreated natural gas

%

天然气组成	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄	i-C ₅	n-C ₅
含量	89.956 6	5.728	2.126 2	0.422 3	0.525 8	0.240 5	0.175 7
天然气组成	n-C ₆	n-C ₇	n-C ₈	n-C ₉	n-C ₁₀	N ₂	CO ₂
含量	0.173	0.171 4	0.058 6	0.016 7	0.003 4	0.395 5	0.006 3

2.2 三种流程敏感性分析

2.2.1 进料流量的影响

模拟中,只改变流程的进料流量,流程中操作参

数及制冷剂流量保持不变,以软件模拟是否成功为依据来判断流程的适用性。表 3~5 分别为对 C₃MR 流程、DMR 流程、SMR 流程的流量变化适用性分析结果。

表 3 C₃MR 流程流量变化适用性分析Table 3 Analysis on process applicability of flow variation in C₃MR

改变后流量/ 设计流量	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04
软件模拟 是否成功	否	是	是	是	是	是	是	是	是	否
比功耗 (kW·h·m ⁻³)		0.3972	0.3805	0.3553	0.3424	0.3309	0.3395	0.3367	0.3339	

表 4 对 DMR 流程流量变化适用性分析

Table 4 Analysis on process applicability of flow variation in DMR

改变后流量/设计流量	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06
软件模拟是否成功	否	是	是	是	是	是	是	否
比功耗 (kW·h·m ⁻³)		0.2336	0.2310	0.2287	0.2266	0.2246	0.2227	

表 5 SMR 流程流量变化适用性分析

Table 5 Analysis on process applicability of flow variation in SMR

改变后流量/设计流量	0.77	0.78	0.79	0.80	0.90	1.00	1.01	1.02	1.03
软件模拟是否成功	否	是	是	是	是	是	是	是	否
比功耗 (kW·h·m ⁻³)		0.2964	0.2935	0.2906	0.2655	0.2451	0.2433	0.2415	

从以上三个表中可以看出,在操作参数及制冷剂流量不变的情况下,C₃MR 液化流程进料流量最大可以增加 4%,最小可减小 20%;对于 DMR 液化流程,进料流量最大可以增加 4%,最小可减小 6%;对于 SMR 液化流程,进料流量最大可以增加 2%,最小可减小 22%。因此,若流程的操作参数及制冷剂流量不变,三个流程进料流量的可调范围都比较有限,流程对流量变化的适用性较差。

2.2.2 天然气中甲烷含量的影响

天然气中甲烷含量是指预处理后天然气中甲烷的物质的量分数。分析计算中,改变甲烷的含量,甲烷和乙烷的物质的量分数总和保持不变。天然气中

甲烷含量对 C₃MR、DMR 和 SMR 三个流程性能的影响分别见图 4~6。

从图 4 可以看出,对于 C₃MR 流程,当天然气的温度、压力和流量不变时,随着甲烷含量的增加,其流量增大,压缩机功耗增大。天然气预冷到相同温度所需冷量减小,所以要求预冷冷箱中预冷天然气的冷量减小,综合作用使其流量略有减小,压缩机功耗也略有减小。由于进入液化单元的天然气增量较大使流程总功耗增大,但同时 LNG 产量增大,综合作用使比功耗略有减小。

从图 5 可以看出,对于 DMR 流程,当天然气的温度、压力和流量不变时,随着甲烷含量的增加,乙烷含量减小,深冷混合制冷循环要提供更多的冷量,

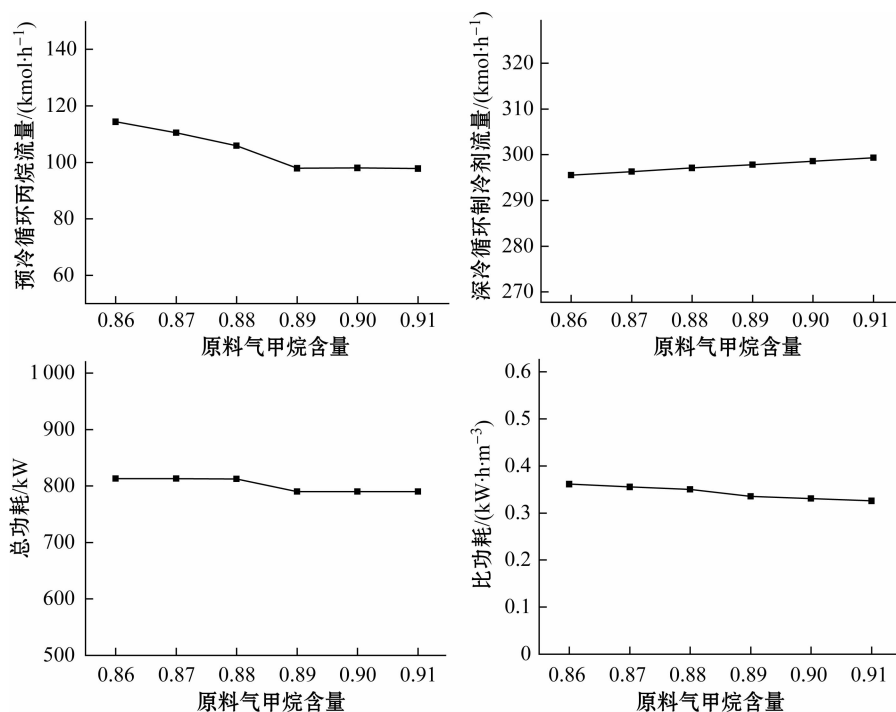
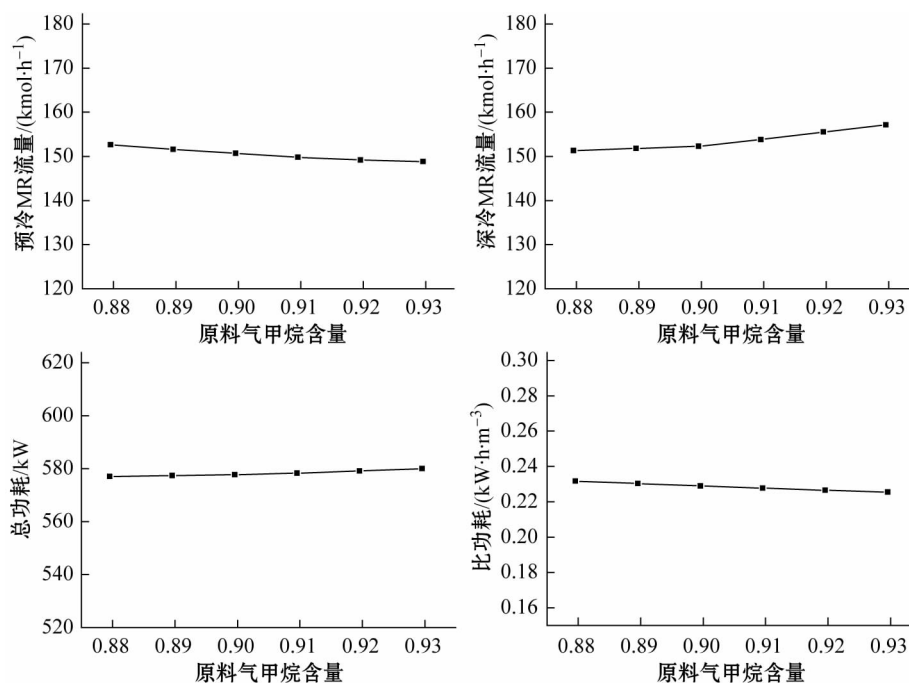
图 4 天然气中甲烷含量对 C₃MR 流程性能的影响Fig. 4 Influence of methane content in natural gas on process performance in C₃MR

图 5 天然气中甲烷含量对 DMR 流程性能的影响

Fig. 5 Influence of methane content in natural gas on process performance in DMR

预冷冷箱中预冷制冷剂流量减小。压缩机总功耗增加,但同时 LNG 产量增大,综合作用使比功耗略有减小。

从图 6 可以看出,对于 SMR 流程,当天然气的温度、压力和流量不变时,甲烷含量增加,乙烷含量减小,混合制冷剂流量略有减小,压缩机功耗也略有

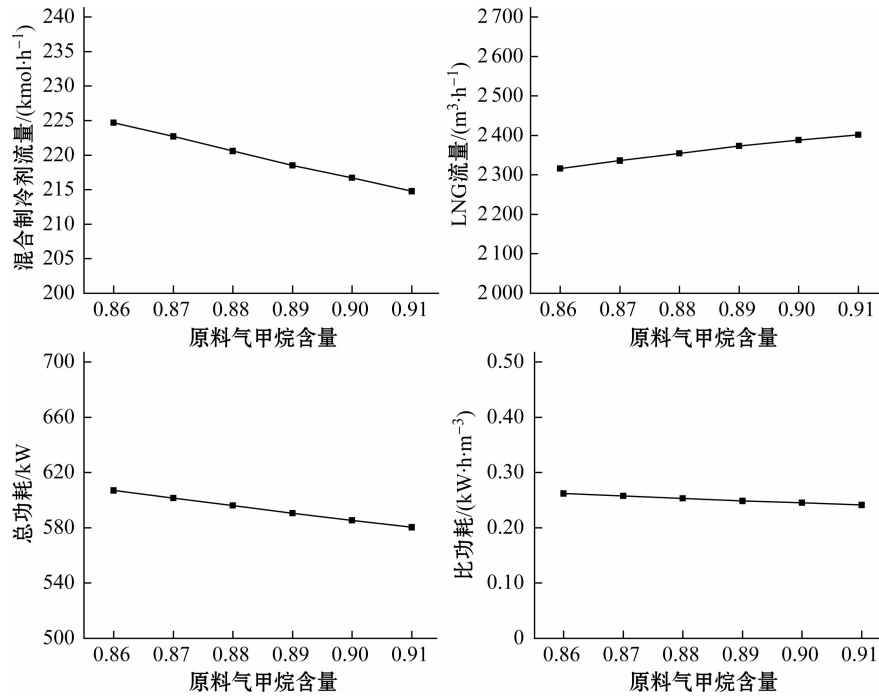


图 6 天然气中甲烷含量对 SMR 流程性能的影响

Fig. 6 Influence of methane content in natural gas on process performance in SMR

减小。同时 LNG 产量增大,则比功耗减小。

2.2.3 天然气中重组分含量的影响

把甲烷、乙烷作为轻组分, C_3^+ 作为重组分,保

持轻重组分内部各组分比例不变,来分析重组分变化对流程性能的影响。天然气中重组分含量对 C_3 MR、DMR 和 SMR 三个流程性能的影响分别见表 6~8。

表 6 天然气中重烃含量对 C_3 MR 流程参数的影响Table 6 Influence of heavy hydrocarbon content in natural gas on process performance in C_3 MR

$C_1 + C_2$ 含量/%	91.69	92.69	93.69	94.69	95.69	96.69	97.69
C_3^+ 含量/%	7.9	6.9	5.9	4.9	3.9	2.9	1.9
其他组分含量/%	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
丙烷预冷流量/($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$)	91.65	93.20	94.72	96.26	97.96	99.35	100.50
深冷 MR 流量/($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$)	261.8	271.0	280.2	289.4	298.6	306.0	317.1
LNG 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	3.421	3.533	3.642	3.771	3.899	4.034	4.179
总功耗/kW	707.5	728.2	748.8	769.4	790.1	806.8	829.5
比功耗/($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.3375	0.3364	0.3348	0.3331	0.3309	0.3266	0.3243

表 7 天然气中重烃含量对 DMR 流程参数的影响

Table 7 Influence of heavy hydrocarbon content in natural gas on process performance in DMR

$C_1 + C_2$ 含量/%	92.626	93.622	94.618	95.684	96.610	97.606	98.602
C_3^+ 含量/%	6.972	5.976	4.980	3.914	2.988	1.992	0.996
其他组分含量/%	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402
预冷 MR 流量/($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$)	151.5	151.5	150.4	150.4	150.4	150.4	150.4
深冷 MR 流量/($\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$)	149.8	151.4	153.4	155.5	157.6	160.1	163.5
LNG 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	4.468	4.433	4.398	4.362	4.330	4.296	4.262
总功耗/kW	575.8	576.4	578.2	580.1	581.8	583.8	586.5
比功耗/($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.2219	0.2222	0.2229	0.2237	0.2244	0.2252	0.2263

表 8 天然气中重烃含量对 SMR 流程参数的影响

Table 8 Influence of heavy hydrocarbon content in natural gas on process performance in SMR

C ₁ +C ₂ 含量/%	92.6264	93.6224	94.6183	95.6847	96.6103	97.6063
C ₃ ⁺ 含量/%	6.9719	5.9759	4.9799	3.9136	2.9879	1.9920
其他组分含量/%	0.4017	0.4017	0.4017	0.4017	0.4017	0.4017
MR 流量/(kmol·h ⁻¹)	212.3	214.8	216.7	218.0	219.0	219.7
液化率	0.9295	0.9296	0.9298	0.9300	0.9301	0.9303
LNG 流量/(m ³ ·h ⁻¹)	3.759	3.804	3.850	3.900	3.945	3.997
总功耗/kW	573.7	580.2	585.3	588.9	591.5	593.5
比功耗/(kW·h·m ⁻³)	0.2577	0.2539	0.2498	0.2451	0.2402	0.2344

从表 6 可以看出,对于 C₃MR 流程,当天然气的温度、压力和流量不变,重烃含量增加,轻烃含量减小时,深冷制冷剂的流量减小,MR 压缩机功耗减小。预冷制冷剂的流量略有减小,丙烷压缩机功耗减小。进入液化单元的天然气量减小使流程总功耗减小,但同时 LNG 也产量减小,综合作用使得比功耗略有增加。

从表 7 可以看出,对于 DMR 流程,当天然气的温度、压力和流量不变时,重烃含量增加,轻烃含量减小,深冷制冷剂的流量减小,压缩机功耗减小,预冷冷箱中预冷制冷剂提供的冷量增大。进入液化单元的天然气量减小使流程总功耗减小,同时 LNG 产量增加,使得比功耗略有降低。

从表 8 可以看出,对于 SMR 流程,当天然气的温度、压力和流量不变时,重烃含量增加,轻烃含量减小,混合冷剂的流量减小,压缩机功耗减小。但同时 LNG 产量减小,综合作用使得比功耗增大。

2.2.4 海上适应性分析

对三种混合制冷剂液化方案进行比较,并分析其海上适应性。表 9 对比了三个流程在相同液化率条件下的性能参数。

从表 9 可以看出,在进口原料气压力、温度、流量保持一定的情况下,当三种混合制冷剂液化流程的液化率相同时,C₃MR 流程压缩机总功耗最大,DMR 流程总功耗最小。在关键设备数量上,C₃MR 流程设备最多,DMR 流程次之,SMR 流程设备最少。在制冷剂流量上,C₃MR 所需的制冷剂储存量最大,DMR 流程次之,SMR 流程储存量最小。

表 10 给出了三种液化工艺流程的比功耗随着天然气中甲烷含量变化而变化的趋势,从而比较三种液化流程对原料气组分变化的敏感性。

表 9 三种液化方案的比较

Table 9 Comparison among the three liquefaction methods

液化方案	C ₃ MR	DMR	SMR
制冷剂流量 /(kmol·h ⁻¹)	预冷:97.96 深冷:298.6	预冷:137.2 深冷:159	216.7
功耗 /kW	790.1	549.7	585.3
比功耗 /(kW·h·m ⁻³)	0.3309	0.2254	0.2451
液化率	0.93	0.93	0.93
压缩机	4	3	3
关键 膨胀机	0	0	0
设备 换热器	4	4	4
数量 塔器	1	1	1
分离器	6	6	5
总计	15	14	13
LNG 产量 /(t·a ⁻¹)	14953.32	15671.60	14953.32

表 10 三种液化方案甲烷含量敏感性的比较

Table 10 Comparison of sensitivity to methane content among the three liquefaction methods

甲烷含量/%	比功耗/(kWh·m ⁻³)		
	C ₃ MR	DMR	SMR
78.96	0.4106	0.2382	0.2981
80.96	0.3961	0.2340	0.2875
83.96	0.3758	0.2287	0.2719
85.96	0.3633	0.2258	0.2621
87.96	0.3519	0.2233	0.2532
89.96	0.3309	0.2212	0.2451
90.96	0.3264	0.2202	0.2416

从表 10 可以看出,三种混合制冷剂液化流程中,随着原料气中甲烷含量的变化,C₃MR 流程的比功耗变化比 DMR、SMR 的比功耗变化大,相对来说,C₃MR 对原料气组分的变化更敏感。

3 结 论

通过对三个混合制冷剂流程的敏感性分析和海

上适应性评价,可以得到以下结论:

(1) C_3MR 流程虽然在陆上 LNG 工厂应用广泛,但由于其大量制冷剂的使用和丙烷的储存,所需设备较多,比功耗相对较大,对原料气组分的变化比较敏感,应用于海上天然气液化的优势并不明显。

(2) 对于 DMR 流程,它的设备较少,结构紧凑,比功耗小,液化率高,对原料气组分的变化不敏感,灵活性更大,热效率高,比较适合应用于海上 FLNG 液化装置。

(3) 对于 SMR 流程,由于其设备最少、流程简单、关键设备采取模块化设计、投资成本低、操作费用低、对原料气组分的变化不敏感等优点,所以是浮式装置比较理想的流程。

通过对三种混合制冷剂液化工艺进行模拟、分析和比较,虽然得出 DMR 和 SMR 应用于海上 FLNG 装置更具优势的结论,但该结论是在一定原料气入口条件的前提下得出的。目前尚不能定论采用哪种流程更好,当遇到不同生产规模、海况条件时

还需要进一步论证分析,同时需要通过方案设计及设备选型来进行经济分析,最终提出适合于不同生产规模、海况条件下的 FLNG 液化工艺。

参 考 文 献

- [1] Danielsen H K, Andreassen G. The commercial advantages and limitations: onshore versus offshore LNG import facilities[C]. OTC, 2009: 19551.
- [2] 王保庆. 天然气液化工艺技术比较分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 111.
- [3] 朱建鲁, 李玉星, 王武昌, 等. 海上天然气液化工艺流程优选[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 98.
- [4] 朱建鲁, 李玉星, 王武昌, 等. CO_2 预冷双氮膨胀天然气液化工艺的海上适应性分析[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 89.
- [5] 李兆慈. 海上小型天然气液化装置研究[C]. 2008 年第四届中国 LNG 卫星站专题研讨会论文集, 2008: 67.
- [6] Javid H, Brian C. Development of floating LNG production units with modular/scalable SMR processes [C]. OTC, 2011: 21976.

• 书 讯 •

《海洋工程环境》简介

曾一非 编

上海交通大学出版社出版

定价:25.00 元

内容提要:

本书以海洋工程环境为主线,重点描述了风、海浪、海流、潮汐、海冰的运动特征和规律以及它们对海洋工程结构物的作用影响;介绍了海水温度、盐度、密度的基础知识及其分布变化特征;介绍了海岸海底地形、海洋光学现象、海洋声学现象、海洋腐蚀与防护等相关方面的知识;讨论了海洋生物、海洋生态与海洋环境及其保护问题。书中还结合最新资料介绍了海洋资源及其产业、海洋技术、海洋科学研究发展特点、海洋政策法规等内容,介绍了中国近海海域的地理、地质、水文等特点。

本书涉及的海洋工程环境知识,内容广泛、资料新颖。本书面向工程应用,提供了常用的计算方法和图表。本书既适合于船舶工程、海洋工程等专业大学本科与研究生的学习与参考,对航海与港航管理、海洋工程与开发、海洋环境保护与管理等相关方面的海洋科技工作者也有一定参考价值。

