

一种浮式液化天然气流程设计与分析

吴建修,梁光川*,周 军

(西南石油大学石油与天然气工程学院,四川 成都 610500)

摘要:设计了一种浮式基于 CO₂ 预冷—N₂-CH₄ 膨胀制冷液化天然气流程。对流程进行了模拟和比较,结果显示,该流程比功耗为 0.54 kWh/m³,液化率为 91.0%,综合性能优异。对流程进行了参数分析,分析结果对实际生产具有一定指导意义。

关键词:FLNG;天然气液化;预冷;膨胀制冷;参数分析

中图分类号:TE64

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)10-0185-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.10.044

Design and analysis of a floating process for liquefying natural gas

WU Jian-xiu, LIANG Guang-chuan*, ZHOU Jun

(College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: A floating process to liquefy natural gas is designed based on CO₂ pre-cooling and N₂-CH₄ expansion refrigeration. This process is then simulated and compared. The results show that the specific power consumption of this process is 0.54 kWh·m⁻³, and the liquefaction rate of natural gas is 91.0%, indicating an excellent comprehensive performance. The parameters analysis is carried out on this process, and the results have a certain guiding significance for the actual production.

Key words: FLNG; natural gas liquefaction; pre-cooling; expansion refrigeration; parameter analysis

近年来,浮式液化天然气开发生产系统(floating liquefied natural gas system, FLNG)的概念得到了很快的发展,它是集海上天然气/石油气的液化、储存和装卸为一体的新型油气田生产装置。相比其他开发方式,具有投资少、风险小、便于移动等特点^[1], FLNG 的出现解决了深远海开发天然气的技术难题。随着我国对南海等海域油气资源的不断开采,FLNG 必将是未来不可或缺的重要装备,深入开展 FLNG 相关技术的研究工作,对我国海上气田的开发意义重大。

天然气液化工艺是 FLNG 系统的技术核心,由于海上工作环境的特殊性,FLNG 对液化流程提出了如下要求^[2]:①流程简单,设备数量少,占甲板面积小;②液化流程能够制取制冷剂,并且对进料天然气的适应性强,热效率高;③安全可靠,具有较强的抗船体晃动的性能;④操作方便,便于启动和停车。此外,还要考虑流程的能耗、制冷剂类型及可燃组分的储量等因素。

膨胀制冷液化工艺通常能够满足 FLNG 对液化工艺的基本要求,本文中旨在设计一种实用性较强的 FLNG 膨胀制冷液化工艺流程,并通过参数分析

为实际生产提供理论指导。

1 流程设计

1.1 预冷剂的选择

增加预冷循环可以降低流程功耗。预冷循环通常采用的纯组分预冷剂有丙烷、R-134a、二氧化碳。丙烷具有可燃性,安全级别较低。二氧化碳和 R-134a 均不易燃、不易爆、无毒无害,但二氧化碳较 R-134a 更容易制取,在船用制冷方面具有很大的优势^[3],故本流程选用 CO₂ 作为预冷剂。

1.2 制冷剂的选择

FLNG 膨胀制冷液化工艺中通常采用 N₂ 作为制冷剂。而 CH₄ 比 N₂ 有更高的气化潜热,CH₄ 和 N₂ 的混合组分较纯 N₂ 组分有更高的制冷效率,故本流程采用 CH₄ 和 N₂ 的混合组分作为制冷剂。

1.3 流程简介

基于 CO₂ 预冷—N₂-CH₄ 双级膨胀天然气液化流程如图 1 所示,由 CO₂ 预冷循环、N₂-CH₄ 双级膨胀制冷循环和天然气液化管理路 3 大部分组成。

在 CO₂ 预冷循环中,低压预冷剂 CO₂ 经压缩、冷却后进入节流阀,节流后的 CO₂ 温度降至

收稿日期:2017-03-13

作者简介:吴建修(1990-),男,硕士生;梁光川(1972-),男,博士,教授,从事油气地面集输系统节能改造、天然气地下储气库优化、油气管道输送理论及技术方面的科研、教学工作,通讯联系人,109174359@qq.com。

-38.0℃,低温 CO₂ 经换热器 LNG-1 对天然气和制冷剂进行预冷。在 N₂-CH₄ 双级膨胀制冷循环中,低压制冷剂经压缩、冷却后进入换热器 LNG-1 预冷,被预冷至 -35.0℃ 的制冷剂通过分流器分为 2 股,一股经透平膨胀机降温;另一股依次经换热器 LNG-2、LNG-3 和节流阀降温至 -165℃,后经换热器 LNG-3 对天然气进行过冷。2 股低压制冷剂通过混合器混合至 -140℃,并经换热器 LNG-2 对天然气进行深冷,换热后的制冷剂经 LNG-1 进行冷量回收,回收完毕后进入下个循环。预处理后的天然气先经换热器 LNG-1 被预冷至 -35.0℃,并通过分离罐 V-100 脱出 NGL(天然气凝液);其次经换热器 LNG-2 被深冷至 -110.0℃;然后经换热器 LNG-3 被过冷至 -153.8℃;再经节流阀使压力降至 120 kPa;最后通过分离罐 V-101 分离出 LNG。

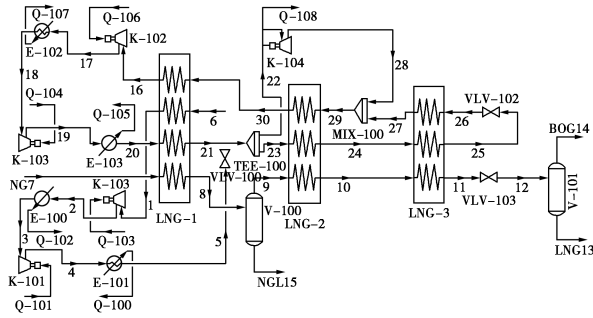


图 1 基于 CO₂ 预冷—N₂-CH₄ 双级膨胀天然气液化流程

2 流程模拟

本文中选用 HYSYS 软件对流程进行模拟。

2.1 模拟条件

选取南海某气田预处理后的天然气作为气源。流程模拟初始条件如下:①天然气各组分的摩尔分数为甲烷 89.9%、乙烷 5.8%、丙烷 2.2%、丁烷 0.5%、异丁烷 0.4%、戊烷 0.2%、异戊烷 0.2%、己烷 0.2%、庚烷 0.2%、氮气 0.4%;②天然气压力 5 000 kPa,温度 30℃,流量 114.5 kmol/h (65 000 m³/d);③LNG 储存压力 120 kPa;④压缩机等熵效率 0.75,透平膨胀机等熵效率 0.80;⑤制冷剂 N₂ 和 CH₄ 比例为 55:45;⑥水冷却器压降 0 kPa,出口温度 30℃;⑦制冷剂低压压力 650 kPa,高压压力 8 000 kPa;⑧CO₂ 节流后温度 -38℃;⑨LNG 换热器物流压降 0 kPa。

2.2 模拟结果

模拟结果如表 1~表 3 所示。

表 1 预冷和制冷循环关键参数

管路节点	压力/kPa	温度/℃	流量/(kmol·h ⁻¹)	气化率/%
1	1047.0	25.0	85.1	100.0
5	8000.0	30.0	85.1	0.0
6	1047.0	-38.0	85.1	56.8
16	650.0	25.0	390.0	100.0
19	8000.0	172.9	390.0	100.0
22	8000.0	-35.0	312.0	100.0
23	8000.0	-35.0	78.0	100.0
26	650.0	-165.0	78.0	14.6
29	650.0	-140.0	390.0	100.0

表 2 液化管理路关键参数

管路节点	压力/kPa	温度/℃	流量/(kmol·h ⁻¹)	甲烷含量/%
LNG13	120.0	-159.1	104.1	91.9
BOG14	120.0	-159.1	5.5	95.2
NGL15	5000.0	-35.0	4.8	40.6

表 3 流程重要数据

总功耗 ^① /kW	比功耗 ^② /(kWh·m ⁻³)	液化率 ^③ /%
997.2	0.54	91.0

注:①总功耗(kW)=压缩机组总功率(kW)-膨胀机功率(kW);②比功耗(kWh/m³)=总功耗(kW)/LNG 摩尔流量(kmol/h);③液化率(%)=LNG 流量(kmol/h)×100%/天然气进气流量(kmol/h)。

3 流程比较

为对设计流程进行评价,特选取了几种 FLNG 天然气液化流程进行比较,如表 4^[4]所示。

表 4 几种 FLNG 液化流程比较表

	CO ₂ 预冷—N ₂ -CH ₄ 双级膨胀液化流程	双氮膨胀液化流程	丙烷预冷—双氮膨胀液化流程	混合制冷剂—膨胀(并联)液化流程	混合制冷剂—膨胀(串联)液化流程
比功耗/(kWh·m ⁻³)	0.54	0.56	0.42	0.39	0.36
液化率/%	91.0	93.0	93.0	93.0	93.0
紧凑性	高	中	中	低	低
设备投资	低	中	高	高	高
设备数量 ^①	8	13	14	11	15
晃动影响	低	低	低	中	中
易燃制冷剂储存要求	无	无	低	中	中
综合性能	优	良	优	良	良

注:①计数设备包括压缩机组、膨胀机组、换热器、分离罐、塔。

由表4对比可知,本文中设计流程虽然能耗稍大,液化率略低,但相比其他几种流程,紧凑性最高、设备数最少、设备投资最低,且流程受晃动影响小,无易燃制冷剂储存要求,综合性能优异。

4 参数分析

为保证在进行参数分析时流程收敛,特将制冷剂流量上调至500 kmol/h。在分析时,只变动要分析的数值,其他设定参数保持不变^[5]。

4.1 天然气进气温度对流程的影响

本流程中预冷后天然气的温度是设定的,故天然气进气温度上升对液化率没有影响,如图2所示。天然气的进气温度升高会增加预冷循环制冷负荷,使流程总功耗增加、比功耗上升,如图3所示。在实际生产中,如天然气进气温度较高,可考虑用海水对天然气降温。

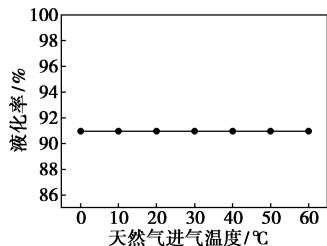


图2 液化率随天然气进气温度变化图

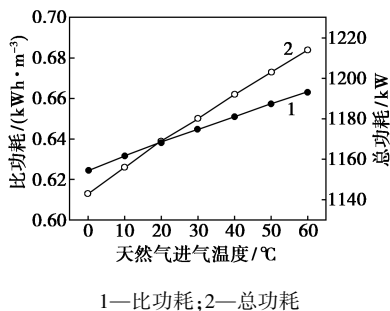


图3 功耗随天然气进气温度变化图

4.2 天然气进气压力对流程的影响

液化率随天然气进气压力变化图见图4,功耗随天然气进气压力变化图见图5。由图4可知,液化率随进气压力的升高而降低。因为进气压力的升高会导致预冷后天然气的气化率降低,NGL流量增大,且节流前天然气压力的增大对节流后天然气温度的影响很小,BOG比率变化也很小,故液化率呈下降的趋势。由图5可知,比功耗呈先上升后下降的趋势。因为天然气进气压力的升高使天然气进出口焓差变小,总功耗降低,总功耗的下降会使比功耗减小,而液化率的下降会使比功耗增大。当进气压力小于6000 kPa时,后者作用超过了前者;当进气

压力大于6000 kPa时,前者作用超过了后者。故比功耗先上升后下降。

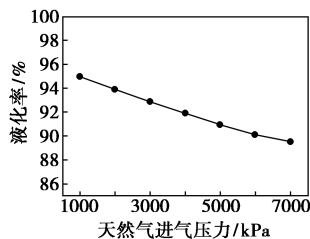


图4 液化率随天然气进气压力变化图

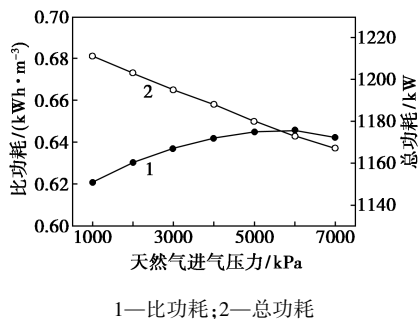


图5 功耗随天然气进气压力变化图

4.3 制冷剂高压压力对流程的影响

制冷剂高压压力的增加不影响液化管路参数,故对液化率没有影响,如图6所示。由于制冷剂流量不变,制冷剂高压压力的增加,会直接导致制冷压缩机功耗升高,使得总功耗和比功耗增加,如图7所示。制冷剂高压压力的增加同时也会使换热器换热温差变大,换热效率降低,造成冷量的浪费。在实际生产中,制冷剂高压压力不宜过高。制冷剂高压压力过高,不但会增加工艺能耗,还会降低工艺的安全性。

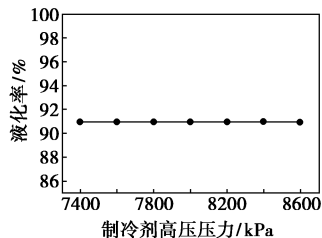


图6 液化率随制冷剂高压压力变化图

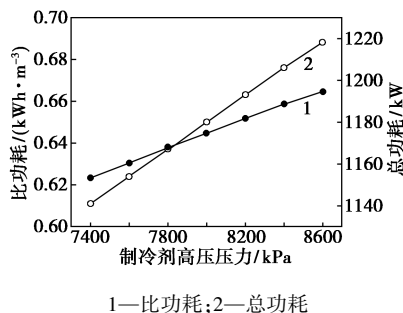


图7 功耗随制冷剂高压压力变化图

4.4 LNG 储存压力对流程的影响

图 8 为液化率随 LNG 储存压力变化图,图 9 为功耗随 LNG 储存压力变化图。节流前后气体是等焓的,故 LNG 储存压力(节流后压力)的变化不影响天然气进出口焓差,即总功耗不变。由图 8、图 9 可知,当 LNG 储存压力在 120~250 kPa 时,压力的升高会使液化率快速上升,比功耗快速下降。当压力达到 250 kPa 时,继续增加 LNG 储存压力对液化率和比功耗影响极小。在实际生产中,适当增加 LNG 储存压力可以有效提高天然气液化率。

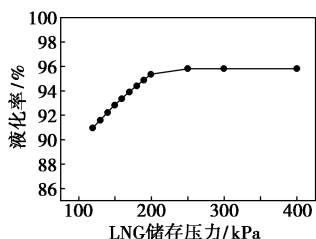


图 8 液化率随 LNG 储存压力变化图

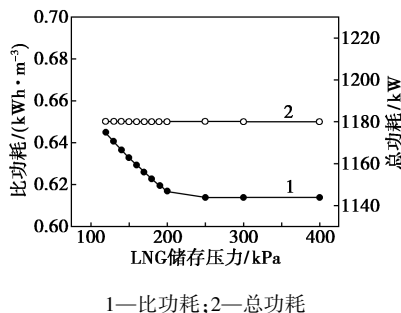


图 9 功耗随 LNG 储存压力变化图

5 结论

设计了一种应用于 FLNG 装置的液化流程,通过对流程进行模拟、比较和参数分析,得到了如下结论。

(1)该流程处理量为 65 000 m³/d,比功耗为 0.54 kWh/m³,液化率为 91.0%,能够实现海上中小规模 LNG 的生产。

(2)该流程综合性能优异,具有如下优点:流程简单,设备数少,设备投资低;结构紧凑,占地面积小;受晃动因素影响小,海上适应性强;无易燃剂储存要求,安全性高。

(3)该流程中,当 LNG 储存压力升至 250 kPa 时,液化率可达 96%,因此,如需达到较理想的液化效果,可采用微正压储存 LNG 的方式。

参考文献

- [1] 喻西崇,谢彬,郭亚玲,等.大型 FLNG/FLPG 装置上部模块二氧化碳预冷双氮膨胀液化工艺方法[J].油气储运,2014,(1):89-94.
- [2] Barclay M.Selecting offshore LNG process[J].LNG Journal,2005,(10):33-35.
- [3] 丁国良,黄冬平.二氧化碳制冷技术[M].北京:化学工业出版社,2007:1-4.
- [4] 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,(3):98-104,133.
- [5] 曹文胜.小型 LNG 装置的预处理与液化流程研究[D].上海:上海交通大学,2008.■

我国实施重点地区、重点行业 VOCs 污染减排

为了全面加强挥发性有机物(VOCs)污染防治工作,强化重点地区、重点行业、重点污染物的减排,遏制臭氧上升势头,促进环境空气质量持续改善,环境保护部、发展改革委、财政部、交通运输部、质检总局、能源局等六部门近日联合发布了《“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案》。

《工作方案》提出的主要目标是,到 2020 年,建立健全以改善环境空气质量为核心的 VOCs 污染防治管理体系,实施重点地区、重点行业 VOCs 污染减排,排放总量下降 10% 以上。通过与 NO_x 等污染物的协同控制,实现环境空气质量持续改善。

治理的重点地区包括:京津冀及周边、长三角、珠三角、成渝、武汉及其周边、辽宁中部、陕西关中、长株潭等区域,涉及北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、安徽、山东、河南、广东、湖北、湖南、重庆、四川、陕西等 16 个省市。

《工作方案》要求重点推进石化、化工、包装印刷、工业涂装等重点行业以及机动车、油品储运销等交通源 VOCs 污染防治,实施一批重点工程。各地应结合自身产业结构特征、VOCs 排放来源等,确定本地 VOCs 控制重点行业;充分考虑行业产能利用率、生产工艺特征以及污染物排放情况等,结合环境空气质量季节性变化特征,研究制定行业生产调控措施。

加强活性强的 VOCs 排放控制,主要为芳香烃、烯烃、炔烃、醛类等。《工作方案》要求各地应紧密围绕本地环境空气质量改善需求,基于 O₃ 和 PM_{2.5} 来源解析,确定 VOCs 控制重点。

对于控制 O₃ 而言,重点控制污染物主要为间/对-二甲苯、乙烷、丙烯、甲醛、甲苯、乙醛、1,3-丁二烯、1,2,4-三甲基苯、邻-二甲

苯、苯乙烯等;对于控制 PM_{2.5} 而言,重点控制污染物主要为甲苯、正十二烷、间/对-二甲苯、苯乙烯、正十一烷、正癸烷、乙苯、邻-二甲苯、1,3-丁二烯、甲基环己烷、正壬烷等。同时,要强化苯乙烯、甲硫醇、甲硫醚等恶臭类 VOCs 的排放控制。

《工作方案》强调,重点地区要严格限制石化、化工、包装印刷、工业涂装等高 VOCs 排放建设项目。新建涉 VOCs 排放的工业企业要入园。未纳入《石化产业规划布局方案》的新建炼化项目一律不得建设。

《工作方案》要求,加快石化行业 VOCs 排污许可工作,到 2017 年底前,完成京津冀鲁、长三角、珠三角等重点地区石化行业排污许可证核发。到 2018 年底前,完成制药、农药等行业排污许可证核发。到 2020 年底前,在电子、包装印刷、汽车制造等 VOCs 排放重点行业全面推行排污许可制度。

《工作方案》明确了主要任务,一是加大产业结构调整力度,加快推进“散乱污”企业综合整治,严格建设项目环境准入,实施工业企业错峰生产;二是加快实施工业源 VOCs 污染防治,全面实施石化行业达标排放,加快推进化工行业 VOCs 综合治理,加大工业涂装 VOCs 治理力度,深入推进包装印刷行业 VOCs 综合治理,因地制宜推进其他工业行业 VOCs 综合治理;三是深入推进交通源 VOCs 污染防治,统筹推进机动车 VOCs 综合治理,全面加强油品储运销油气回收治理;四是有序开展生活源农业源 VOCs 污染防治,推进建筑装饰行业 VOCs 综合治理,推动汽修行业 VOCs 治理,开展其他生活源 VOCs 治理,积极推进农业农村源 VOCs 污染防治;五是建立健全 VOCs 管理体系,加快标准体系建设,建立健全监测监控。(中化新网)