

天然气液化技术及其应用

王保庆^{1,2}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 2. 中原石油勘探局勘察设计研究院)

王保庆. 天然气液化技术及其应用. 天然气工业, 2004; 24(7): 92~95

摘要 从目前国内天然气液化工艺技术来源看, LNG 生产利用方面的基础技术研究还不够深入, 国内现有运营装置和在建工程均需引进国外公司的初步设计或软件包, 然后由国内设计院完成配套工程设计。国内 LNG 产业起步较晚, 目前已建成投产的天然气液化装置共有 3 套。在简述阶式制冷工艺、混合制冷工艺和膨胀制冷工艺的基础上, 介绍了上述 3 套国内液化天然气工厂的工艺原理。结合近年来的工作经验、工程实践和我国的天然气资源分布状况, 强调了加快对适合我国特点的天然气液化装置的工艺技术研究、加大对相关应用技术研究的力度和投入的必要性, 还预测了 LNG 的市场前景。

关键词 中国 低温 液化天然气 液化气厂 理论 流程 设备 市场 预测

液化天然气(LNG)运输灵活、储存效率高, 用作城市输配气系统扩容、调峰等方面, 与地下储气库、储气柜等其他方式相比更具优势, 并且具有建设投资小、建设周期短、见效快、受外部影响因素小等优点。作为优质的车用燃料, 与汽车燃油相比, LNG 具有辛烷值高、抗爆性好、燃烧完全、排气污染少、发动机寿命长、运行成本低等优点; 与压缩天然气(CNG)相比, LNG 则具有储存效率高, 续驶里程长, 储瓶压力低、重量轻、数量小, 建站不受供气管网的限制等优点。

天然气液化技术概述

天然气液化系统主要包括天然气的预处理、液化、储存、运输、利用这 5 个子系统。一般生产工艺过程是, 将含甲烷 90% 以上的天然气, 经过“三脱”(即脱水、脱烃、脱酸性气体等)净化处理后, 采取先进的膨胀制冷工艺或外部冷源, 使甲烷变为 -162°C 的低温液体。目前天然气液化装置工艺路线主要有 3 种类型: 阶式制冷工艺、混合制冷工艺和膨胀制冷工艺。

1. 阶式制冷工艺

阶式制冷工艺是一种常规制冷工艺(图 1)。对于天然气液化过程, 一般是由丙烷、乙烯和甲烷为制

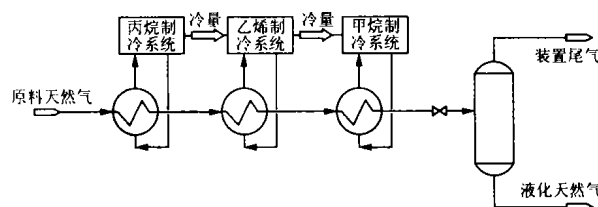


图 1 阶式制冷工艺原理图

制冷剂的 3 个制冷循环阶段组成, 逐级提供天然气液化所需的冷量, 制冷温度梯度分别为 -30°C 、 -90°C 及 -150°C 左右。净化后的原料天然气在 3 个制冷循环的冷却器中逐级冷却、冷凝、液化并过冷, 经节流降压后获得低温常压液态天然气产品, 送至储罐储存。

阶式制冷工艺制冷系统与天然气液化系统相互独立, 制冷剂为单一组分, 各系统相互影响少, 操作稳定, 较适合于高压气源(利用气源压力能)。但由于该工艺制冷机组多, 流程长, 对制冷剂纯度要求严格, 且不适用于含氮量较多的天然气。因此这种液化工艺在天然气液化装置上已较少应用。

2. 混合制冷工艺

混合制冷工艺是六十年代末期由阶式制冷工艺演变而来的, 多采用烃类混合物(N_2 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5)作为制冷剂, 代替阶式制冷工艺中的多个纯组

* 本文属于中国石化中原石油勘探局科研项目成果。

作者简介: 王保庆, 1973 年生; 上海交通大学机械与动力工程学院工程硕士研究生, 主要从事天然气集输处理、天然气液化装置工艺计算和方案研究; 从事油气田地面工程设计、咨询和天然气液化技术装备研发工作。地址: (457001) 河南省濮阳市中原石油勘探局勘察设计研究院。电话: (0393) 4823173, 13938302950。E-mail: baoqingwang@vip.sina.com

分。其制冷剂组成根据原料气的组成和压力而定,利用多组分混合物中重组分先冷凝、轻组分后冷凝的特性,将其依次冷凝、分离、节流、蒸发得到不同温度级的冷量。又据混合制冷剂是否与原料天然气相混合,分为闭式和开式两种混合制冷工艺(图2、3)。

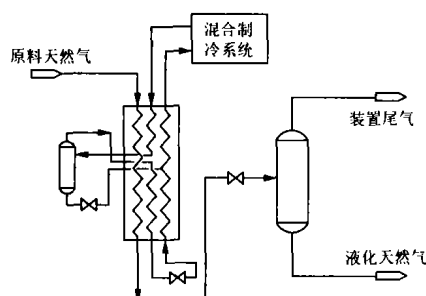


图2 闭式混合制冷工艺原理图

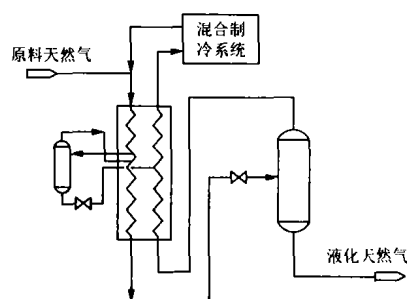


图3 开式混合制冷工艺原理图

闭式循环:制冷剂循环系统自成一个独立系统。混合制冷剂被制冷压缩机压缩后,经水(空气)冷却后在不同温度下逐级冷凝分离,节流后进入冷箱(换热器)的不同温度段,给原料天然气提供冷量。原料天然气经“三脱”处理后,进入冷箱(换热器)逐级冷却冷凝、节流、降压后获得液态天然气产品。

开式循环:原料天然气经“三脱”处理后与混合制冷剂混合,依次流经各级换热器及气液分离器,在逐渐冷凝的同时,也把所需的制冷剂组分逐一冷凝分离出来,按制冷剂沸点的高低将分离出的制冷剂组分逐级蒸发,并汇集构成一股低温物流,与原料天然气逆流换热的制冷循环。开式循环系统启动时间较长,且操作较困难,技术尚不完善。

与阶式制冷工艺相比,混合制冷工艺具有流程短、机组少、投资低等优点;其缺点是能耗比阶式高,对混合制冷剂各组分的配比要求严格,设计计算较困难。

膨胀制冷工艺

膨胀制冷工艺的特点是利用原料天然气的压力

能对外做功以提供天然气液化所需的冷量(图4)。系统液化率主要取决于膨胀比和膨胀效率,该工艺特别适用于天然气输送压力较高、而实际使用压力较低,中间需要降压的气源场合。优点是能耗低、流程短、投资省、操作灵活;缺点是液化率低。

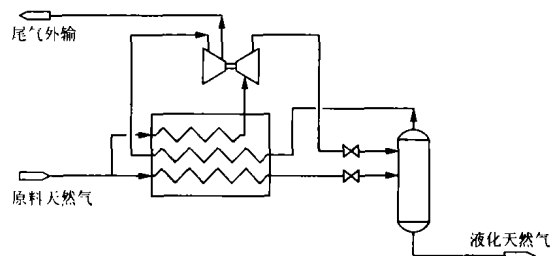


图4 膨胀制冷工艺原理图

我国天然气液化技术现状

1. 中原 LNG 工厂液化工艺

中原油田 LNG 工厂采用阶式制冷工艺。针对中原油田天然气气源压力高的特点,研究人员提出了丙烷+乙烯+节流的工艺技术方案(图5),并通过与设计经验丰富的法国索菲公司合作,进一步完善和细化了该工艺技术方案,使得该项目的投资少、收率高、生产成本低。

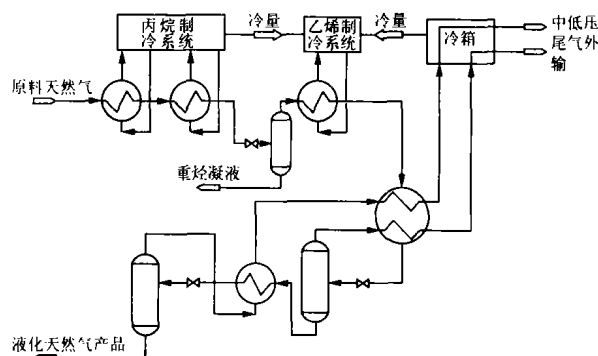


图5 中原 LNG 工厂液化工艺原理图

具体的工艺过程为:120 bar/27℃(1 bar=10⁵ Pa)的高压原料天然气进装置后,经高压分离罐分液,然后进入以 MEA 为吸收剂的脱 CO₂ 系统,并采用分子筛脱水;净化后的高压原料气由丙烷预冷至-30℃左右,节流至 53 bar/-60℃左右;中压天然气分离脱除重烃后,进入脱苯系统脱除微量苯,再经乙烯蒸发器冷凝,节流至 10 bar/-123℃,分离得中压尾气和中压 LNG;中压 LNG 再经节流到 3 bar/-145℃左右,得到的低压 LNG,低压尾气同中压尾气一起经回收冷量后,分别进入低压和中压管网,低

压 LNG 作为产品储存于储罐内。

该工程主要包括高压天然气净化、高压天然气液化、天然气微量苯低温高压脱除、低温液态天然气带压储存等系统。该装置技术特点如下。

(1) 采用阶式制冷工艺装置能耗低

充分利用了原料天然气 12 MPa 的高压力,在合理的温位进行节流,减少了装置能耗。该装置将高压天然气节流降温过程中产生的部分闪蒸气合理地、在不同温位与多种介质换热,充分利用了这些闪蒸气的低温冷量,大大降低了装置能耗。

(2) 低温液态天然气带压储存有利于装置收率的提高

LNG 带压储存,和常压储存相比,液化率得到一定程度的提高。

(3) 天然气微量苯低温高压脱除技术解决了天然气脱苯的技术难题

异戊烷脱苯技术率先在 LNG 工厂应用,脱苯效果良好,具有投资少、工艺简单等特点。

2. 上海浦东 LNG 工厂(东海天然气事故调峰站)工艺

位于上海浦东的 LNG 装置是我国首座以事故调峰为目的天然气液化装置,该装置处理规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。主要用于海上(东海)天然气开采输送因不可抗因素导致停产时,向下游用户提供可靠的气源供应。该装置的净化工艺与中原 LNG 工厂净化工艺相同,液化工艺采用整合式级联液化工艺(图 6)。

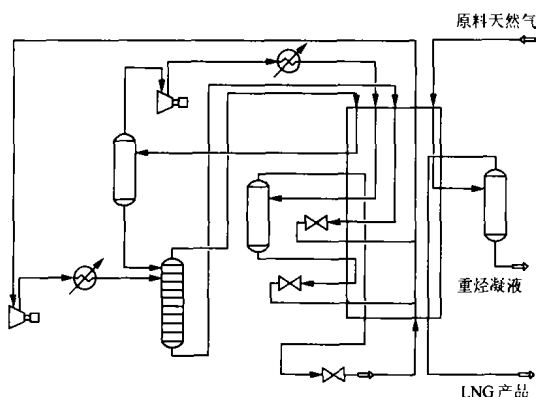


图 6 上海浦东 LNG 工厂工艺原理图

该装置液化单元包括制冷机压缩机组、混合制冷剂分离塔、整体式冷箱等核心该设备。技术特点如下。

(1) 装置工艺流程简单、设备数量少。

(2) 采用高效板翅式冷箱,换热效率高,装置占地面积小。

(3) 动设备数量少,降低了工程投资和维护费用。

3. 新疆广汇 LNG 工厂工艺

新疆广汇 LNG 项目位于吐哈油田鄯善火车站附近,采用混合制冷工艺,装置处理规模 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,装置由净化、液化、储存运输等几大系统组成,主要以长江中下游经济发达地区为目标市场(图 7)。

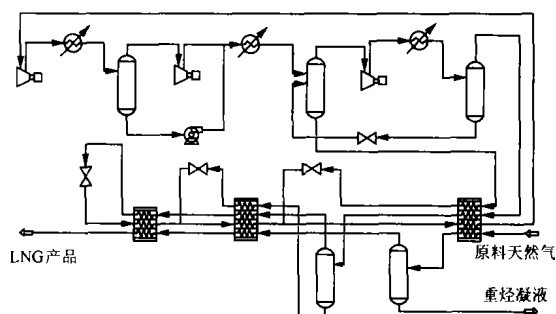


图 7 新疆广汇 LNG 工厂工艺原理图

具体的工艺过程为:来自输气管网的 15 bar 原料天然气经凝液分离、过滤、计量后,进原料天然气增压系统增压至 50 bar;增压后的原料天然气进入以 MEA 为吸收剂的脱 CO_2 和 H_2S 净化系统;净化后的原料天然气经分子筛干燥器脱水后进入液化单元;天然气经液化单元冷凝冷却至 -162°C ,经截流降压至常压(1 bar),得到低温液化天然气产品(LNG);液化后的天然气进入 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LNG 储罐内储存。

该 LNG 工厂的气源来自吐哈油田,处理单元,液化单元除制冷剂压缩机组与上海浦东 LNG 工厂有区别外,其他部分工艺原理基本相同。

天然气液化技术应用前景

笔者认为,我国天然气资源多分布于中西部地区,而东南沿海发达地区则是能源消耗量最大的地区,要合理利用资源,就必须解决利用与运输间的矛盾。“西气东输”管线的建成投产,为我国天然气的广泛应用拉开了序幕,但长距离输送管线巨额的建设投资、地质地貌造成的施工技术困难和高昂的维护运行费用,在很大程度上又影响和制约着对下游用户经济灵活、安全平稳的气源供应;就经济发展迅速的中小型城市而言,近期远期燃气消费量变化趋

势和远期用气规模受社会环境、地理环境和经济政策等诸多因素限制而难以确定,输气管网的经济性恰恰与输气管网输气能力的利用率密不可分,输气管网能否获得预期的经济收益更是各大燃气供应商所关注的焦点,所以“舍远求近”必然成为绝大多数燃气供应商采取的重要战略措施。随着城市燃气消费量的增加,对原输气管网的系统改造和扩容,势必导致原有资产的报废或重复投资,在给各大燃气供应商造成巨大经济损失的同时,更增大了燃气本身的附加成本,不利于燃气市场的开拓和用户的培育。一些城市“气化”以后,由于民用气量季节差异较大、输气管网出故障等,都会造成定期或不定期的供气不平衡,而建设 LNG 调峰工厂(储存气化装置)可以起到很好调峰的作用。据国外资料统计,在美国、日本、欧洲已建成投产 100 多座 LNG 调峰装置,它比建设地面高压储气罐和地下储气库节省土地、资金,缩短工期,而且方便灵活,不受地质条件限制。天然气液化后便于经济可靠的运输,可用专门的 LNG 槽车、轮船把边远、沙漠、海上油气田以及新区分散的天然气,经液化后进行长距商运输到销售地,而且风险性小、适应性强。随着城市居民生活水平的提高

和车用燃料的紧缺,城市车辆对安全、经济、环保和可靠的车用燃料的需求量也会不断增加,天然气以其优良的燃烧、排放性能愈来愈受到广大用户的青睐。

因此,加快对适合我国特点的天然气液化装置的工艺技术研究,加大对相关应用技术研究的力度和投入,已成为天然气应用开发领域的重要课题之一,具有广阔的市场前景。

成文中参考了董秀成等,《拓展天然气在中国的利用中美联合报告》,石油大学·北京、美国太平洋西部国家实验室,2001。在此致谢。

参 考 文 献

- 1 石玉美,顾安忠,汪荣顺等. 混合制冷剂循环液化天然气流程的优化分析. 工程热物理学报,2000;(21):4
- 2 杨志毅,王保庆等. 液化天然气(LNG)贸易面临的机遇和挑战. 河南石油,2003;(9)
- 3 李树祥等. 油田用气调峰方法. 油气田地面工程,2003;(7)

(修改回稿日期 2004-03-08 编辑 居维清)

(上接第 88 页)得到的曲线与实验值吻合的越来越好;随着温度的升高,硫化氢和二氧化碳对于体系的压缩因子的影响越来越小;

在相同的温度和压力条件下,酸性气体含量高的体系偏差因子反而小。

参 考 文 献

- 1 Jesse S Doolittle, Francis J Hale. Thermodynamics for engineers. Department of mechanical and aerospace engineering north carolina state university. JOHN WILEY&SONS,1983
- 2 刘志军等. 用 SHBWR 方程计算石油气的压缩因子. 压缩机技术,1996
- 3 杨继盛等. 采气实用计算. 北京:石油工业出版社,1994
- 4 李相等. 天然气偏差系数模型综合评价与选用. 石油钻采工艺,2001
- 5 韩洪升. 天然气压缩因子计算方法的评价. 油气储运,13(1)

- 6 李士伦等. 天然气工程. 北京:石油工业出版社,2000
- 7 郭绪强等. 特高压下天然气压缩因子模型应用评价. 石油大学学报,2000
- 8 陈元千. 确定酸性天然气偏差系数的方法. 试采技术,1989
- 9 Adel M. Elsharkawy and ali elKamel. Compressibility factor for sour gas reservoirs. SPE64284
- 11 Mohen Mohensen - Nia. Sour natural gas and liquid equation of state. SPE26906
- 12 Gabor Takacs. Comparing methods for calculating Z-factor. Oil&Gas,1989;(5)
- 13 Adel M. Elsharkay. Compressibility factor for gas condensates. SPE59702
- 14 Kcoker A. Program calculates Z-factor for natural gas. Oil&Gas,1993;(2)
- 15 Obeida T A. Accurate calculations of copressibility factor for pure gases and gas mixtures. SPE37440

(收稿日期 2004-03-15 编辑 韩晓渝)