我国 LNG 工厂的生产流程介绍*

曹文胜　鲁雪生　顾安忠　石玉美　汪荣顺
（上海交通大学制冷与低温工程研究所）

曹文胜等.我国 LNG 工厂的生产流程介绍.天然气工业,2005;25(5):100～102

摘　要　介绍了我国的 LNG 示范装置、调峰型工厂和基本负荷型工厂的状况,包括这些装置和工厂的生产规模和工艺流程。这些流程包括:级联式、混合制冷剂、带膨胀机的液化流程制冷,并比较了各自的使用特点和优劣。最后指出了我国 LNG 工厂的发展方向:根据国情,依据具体的设计条件和外围条件,对不同液化流程的投资成本、比功耗、运行要求进行全面的对比分析;要紧跟当前天然气液化流程追求简便、高效的发展趋势,综合考虑各种液化流程的技术特点,开发适合我国实际情况的新型液化流程——流程精简、设备少,冷箱结构紧凑,换热效率高,㶲损小,压缩机和驱动机高效、可靠,应大力发展具有调峰、机动能力的中、小型 LNG 装置,以适应我国已经面临大规模开发利用天然气的新形势。

主题词　中国　天然气液化　工艺　流程　生产　规模　级联　混合　制冷剂　膨胀机　对比

LNG 工厂按功能分为基本负荷型和调峰型 2 种。LNG 工厂液化流程按制冷方式分为 3 种模式:①级联式液化流程;②混合制冷剂液化流程,包括闭式、开式、丙烷预冷、CII;③带膨胀机液化流程,包括天然气膨胀、氮气膨胀、氮—甲烷膨胀等。

一、级联式液化流程(Cascade Cycle)

1.工程

2001 年,中原石油勘探局建造了国内首座生产性质的 LNG 工厂,日处理量为 15×10^4 m^3,采用丙烷和乙烯为制冷剂的级联式循环,见图 1。

①净化:原料气先后进入原料分液罐 1(除液)、过滤器 2(脱粒)、脱 CO_2 塔 3 (MEA 法)、分子筛干燥器 4(脱水)。②液化:净化后的天然气,首先利用丙烷制冷循环经换热器 5 和 6 冷却,节流降温进入分离器 8 气液分离;液相返流回收冷量回收,气相利用乙烯制冷循环经换热器 9 和 10 冷却,节流降温进入分离器 12 气液分离;气相返流回收冷量回收,液相经换热器 13 冷却及节流后进入分离器 15 气液分离,气相返流回收冷量回收,液相流入 LNG 储罐 16 储存。

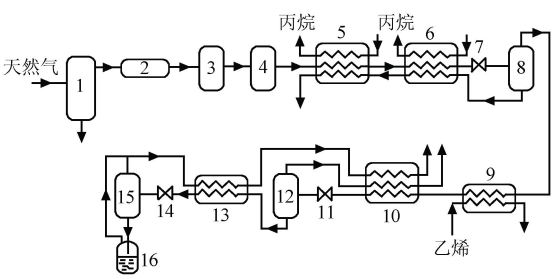

图 1　中原天然气液化流程示意图

1.分液罐;2.过滤器;3.脱 CO_2 塔;4.干燥器;5.中压丙烷换热器;6.低压丙烷换热器;7、11、14.节流阀;8.高压天然气分离器;9.乙烯换热器;10.中压 LNG 换热器;12.中压天然气分离器;13.低压 LNG 换热器;15.低压天然气分离器;16.LNG 储槽

2.特点

该流程充分利用了原料气的高压力,采用了三级 J—T 节流降温,并注重回收闪蒸气的冷量,这些措施使得本来就以能耗低著称的级联式液化流程在能耗上更具优势。但是应该看到,它的每一级制冷循环都是独立的,都要配备压缩机和水冷却器,这会使管道和控制系统复杂化,LNG 的单位投资成本较大。此外,由于附属设备多,要有专门生产和储存多种制冷剂的设备,维护不便。考虑到级联式液化流

*本成果为福建省自然科学基金计划资助项目(项目编号:E0440002)。

作者简介:曹文胜,1973 年生;上海交通大学制冷及低温工程博士研究生,集美大学教师。地址:(200030)上海交通大学制冷与低温工程研究所。电话:(021)62932602,13585703377。E-mail:wscao@sjtu.edu.cn

程技术成熟,操作稳定,对于国内首家生产性质的 LNG 工厂,采用此种流程应是不错的选择。

二、混合制冷剂液化流程(MRC)

1.工程Ⅰ

1999 年,上海建造了国内首座日处理量为 10×10^4 m^3 的调峰型 LNG 工厂,采用混合制冷剂液化流程(CII),见图 2。

①液化:预处理后的天然气进入冷箱上部冷却,经重烃分离器气液分离,液相回收,气相进入冷箱下部冷凝和过冷,最后节流至 LNG 储槽。②制冷循环:混合制冷剂是 N_2 和 C_1 ~ C_5 的烃类混合物。冷

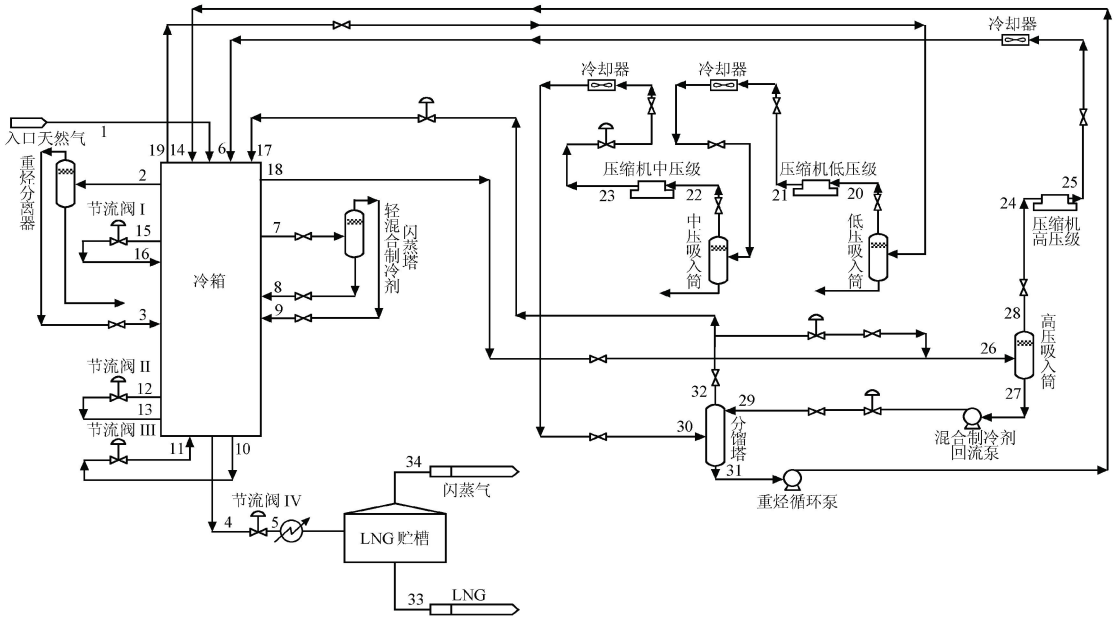

图 2　上海 LNG 调峰站 CII 液化流程示意图(由于篇幅所限,图中数字节点所代表的意义解释从略)

箱出口的低压混合制冷剂蒸气先后经低压吸入筒分离、压缩机低压级压缩、冷却器冷却进入中压吸入筒分离,再经压缩机中压级压缩、冷却器部分冷凝后进入分馏塔。混合制冷剂分馏后分成两部分,分馏塔底部的重组分液体主要含有丙烷、丁烷和戊烷,进入冷箱预冷后节流降温,返回冷箱上部蒸发制冷;分馏塔上部的轻组分气体主要成分是氮、甲烷和乙烷,进入冷箱冷却并部分冷凝,经高压吸入筒气液分离,液相作为分馏塔的回流液,气相经压缩机高压级压缩、冷却器冷却后进入冷箱预冷,再进入轻混合制冷剂闪蒸塔气液分离,得到的气液两相分别进入冷箱预冷后节流降温,返回冷箱下部的不同部位提供冷量。

2.工程Ⅱ

2002 年,新疆广汇实业兴建了国内第一座大规模基本负荷型 LNG 工厂,日处理天然气 150×10^4 m^3,采用高效混合制冷剂液化流程,见图 3。

①液化:预处理后的天然气进入冷箱,经预冷段分离重烃、液化段冷凝,过冷段过冷,最后节流至 LNG 储槽。②制冷循环:从冷箱返流的混合制冷剂蒸气经三级压缩机压缩、风冷器冷却、分离器气液分

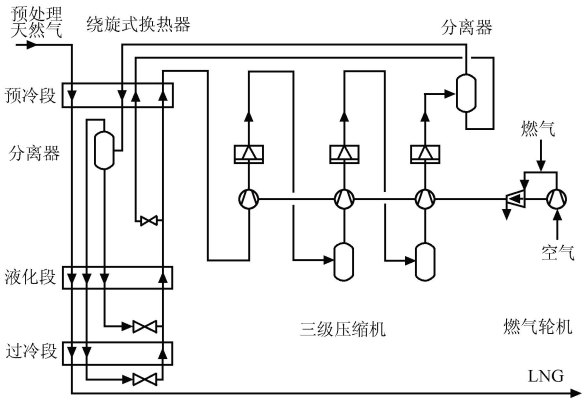

图 3　新疆鄯善 LNG 工厂液化流程示意图

离,气液相分别进入预冷段。液相经预冷段过冷、节流阀节流降温,与后续流程的返流气混合后为预冷段提供冷量;气相经预冷段冷却、分离器气液分离,气液相分别流入液化段。液相经过冷和节流降压降温后,与返流气混合为液化段提供冷量;气相经液化段冷却、过冷段过冷、节流降压降温后返回该段,为过冷段提供冷量。

3.**特点**

MRC 是目前最具活力和生命力的制冷工艺,它的最大特点是混合工质在换热器内的热交换过程是个变温过程,能与同样是混合组分的天然气相匹配。因此可使冷热流体间的换热温差保持较低的水平,其实它等价于级联式液化流程在无穷级数时的极限,但又避免了级联式系统复杂的缺点。目前全球各大 LNG 设备公司为争夺市场展开了激烈的竞争,如美国空气制品公司开发的 APCI 和 AP—X 流程,法国燃气公司开发的 CII 流程,它们均代表了天然气液化技术的发展趋势。

MRC 中最具代表性的是丙烷预冷混合制冷剂液化流程(C_3/MRC),其目的是通过丙烷制冷循环预冷进入主流程的天然气,可使流程的功耗和制冷剂流量大为降低。C_3/MRC 流程虽然较级联式流程简单、投资省,但机组设备还显复杂,主要原因是增加了丙烷制冷循环。上海 LNG 调峰站采用的 CII 流程,通过对制冷剂组分的合理选取、分馏设备与整体式冷箱的巧妙组织,使得流程进一步精简,同时又兼具了 C_3/MRC 流程的技术优势。但其核心部件——高效板翅式换热器冷箱,可采用 HTFS.MUSE 进行设计。新疆 LNG 工厂没有采用丙烷预冷,其能耗较高。

三、带膨胀机液化流程(Expander Cycle)

1.**工程Ⅰ**

20 世纪 90 年代初,中国科学院低温中心等单位先后为四川石化企业和吉林石化企业建成了 2 座 LNG 示范装置:前者生产能力为 0.3 m^3/h,采用天然气膨胀制冷循环,进气压力 4 MPa,见图 4;后者生产能力为 0.5 m^3/h,采用氮气膨胀闭式制冷循环。

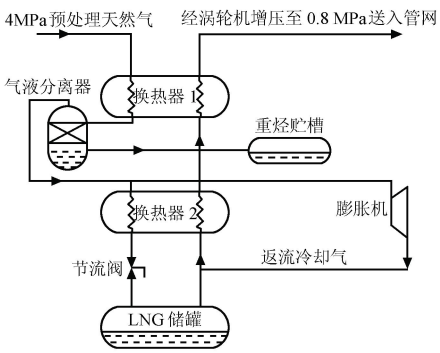

图 4　四川石化天然气膨胀液化流程示意图

高压气体经换热器 1 预冷,进入气液分离器分离掉重烃。分离器产生的气体一部分进入膨胀机膨胀降温,进入换热器 2,冷却需液化的天然气。另一部分经过换热器 2 冷却,节流降温后进入 LNG 储罐储存。储罐中自蒸发的气体冷量回收后进入管网。

2.**工程Ⅱ**

20 世纪 90 年代中期,长庆石油勘探局建立了 1 座示范性 LNG 工程,日处理量为 3×10^4 m^3,采用气波制冷机和透平膨胀联合进行低温制冷,进气压力 4.1 MPa,见图 5。

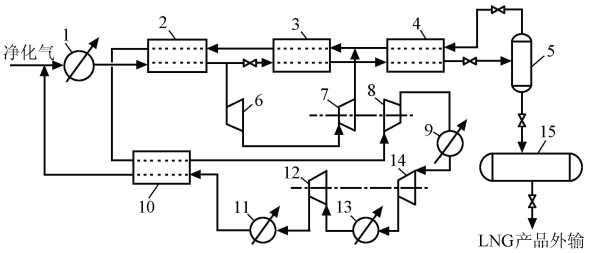

图 5　陕北气田 LNG 示范工程液化过程工艺流程图

1.氨蒸发器;2.第二预冷器;3.第三预冷器;4.深冷换热器;5.分离器;6.气波制冷机;7.透平膨胀机;9、11、13 水冷却器;10.第一预冷器;8、12、14 循环压缩机;15.LNG 储罐

高压原料气经氨蒸发器 1、预冷器 2 冷却,一部分气体进入气波制冷机 6 和透平膨胀机 7 膨胀降温,与返流气混合为预冷器 3、预冷器 2、预冷器 10 提供冷量;另一部分气体经预冷器 3、换热器 4 冷却并节流后进入分离器 5 气液分离,气相返流冷量回收,液相进入 LNG 储罐 15。

3.**特点**

膨胀机具有较高的等熵效率及膨胀功可回收的优点,因此越来越受到液化能力较小的调峰型 LNG 工厂的青睐。但由于靠压差通过膨胀机来制冷,所以压缩机需要消耗较多的功来增压气体。以上两个工程都是采用天然气膨胀液化流程,省去了专门生产、运输、储存制冷剂的费用,但不能获得像氮气膨胀液化流程那样低的温度、循环气量大、液化率低,膨胀机的工作性能受原料气压力和组成变化的影响较大,对系统的安全性要求较高。

采用氮气膨胀液化流程虽然可以避免以上缺点,但由于冷热流体间的换热温差大,为缩小温差促使换热面积增加,导致换热器金属投入量增大。若是采用氮—甲烷膨胀液化流程,可缩小冷端的换热温差,节省动力消耗。

四、结束语

目前天然气液化流程追求高效率、低能耗与低投资,以此降低产品生产费用,增强市场竞争力,这

需要对工艺流程进行合理的分析和评价。级联式液化流程虽然能耗最低,但是投资大,流程复杂,管理极为不便。混合制冷剂液化流程以丙烷预冷最具竞争力,但是流程设备还是显得复杂,适应于大型基本负荷型 LNG 工厂。带膨胀机液化流程紧凑、规模较小,但是能耗高,适应于调峰型 LNG 工厂。

参 考 文 献

1 顾安忠,鲁雪生,汪荣顺,石玉美,林文胜.液化天然气技术.北京:机械工业出版社,2004

2 顾安忠,石玉美,汪荣顺.中国液化天然气的发展.石油化工技术经济,2004;(1)

3 王保庆.天然气液化技术及其应用.天然气工业,2004;24(7)

4 Brautigam M. LNG baseload plant in remote north-West of China. LNG journal, November/December,2003:19—20

5 朱刚.天然气迁移性质与调峰型液化流程的优化研究.上海交通大学博士学位论文,2000

6 徐烈,徐永生等.我国液化天然气(LNG)的陆地储存与运输.天然气工业,2002;22(3):89～91

(修改回稿日期　2005-03-11　编辑　**居维清**)