

天然气液化工艺技术比较分析

王 保 庆

中国石油化工股份有限公司天然气分公司

王保庆.天然气液化工艺技术比较分析.天然气工业,2009,29(1):111-113.

摘 要 近期 LNG 工业快速增长再次刺激了 LNG 工艺的技术发展,使得一些传统的 LNG 生产工艺得到了关注,尤其是混凝土结构的、驳船型、浮式 LNG 装置等小规模 LNG 项目的应用。根据工作实践并查阅大量国内外资料,较系统地从小规模 LNG 产量、功耗和生产线效率等方面对 5 种基本负荷型 LNG 工艺进行了比较分析,包括丙烷/混合制冷工艺、复迭式制冷工艺、双混合制冷工艺、单混合制冷工艺和带预冷的氮气膨胀工艺。其中,单混合制冷工艺流程、氮气膨胀制冷循环流程工艺简单,设备数量少,装置占地面积小;丙烷/混合制冷工艺流程、双复迭式制冷工艺流程、双重混合制冷工艺流程工艺较复杂,设备数量多,装置占地面积较大。在热带地区建造大型 LNG 装置采用丙烷/混合制冷工艺最好;氮气膨胀制冷循环流程因其工艺简单,设备数量少,制冷剂易获得和补充,较适用于边远地区和海上小型天然气处理工厂。

关键词 天然气 液化 工艺 对比 分析
DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.01.032

基本负荷型 LNG 大多采用丙烷/混合制冷(C3/MR)工艺(C3 是工艺代号),该工艺是由空气产品及化学公司 APCI(Air Products and Chemicals Inc.)于 20 世纪 70 年代发明的^[1],全世界大约 95% 的 LNG 工艺是在该工艺的基础上演变而来的,该工艺通常采用蒸汽轮机或燃气轮机驱动压缩机,冷却方式可采用水冷和空冷等。近年来,随着低温热交换器制造技术的发展,丙烷/混合制冷工艺得到更加广泛的运用,装置的生产规模达到了每年 400×10^4 t。

近期 LNG 工业快速增长再次刺激了 LNG 工艺的技术发展,也使一些传统的 LNG 生产工艺得到了关注,尤其是混凝土结构的、驳船型、浮式 LNG 装置等小规模 LNG 项目的应用^[2-3]。例如:Phillips 在大西洋 LNG 项目(the Atlantic LNG project)中,采用复迭式工艺,使该工艺再次受到关注。Pritchard 在 PRICO 工艺的基础上对单混合制冷工艺的功耗效率进行了很大改进,使该工艺能用于陆上或海上 LNG 生产装置。

1 比较基础

由于技术内容无法公开获得,所以在实践中对

不同工艺的逐项比较是很困难的。因此,笔者仅使用相同的条件(冷却介质、原料气、标准、费用)对优化的丙烷/混合制冷工艺与其他较好的 4 类工艺进行了比较,它们是:丙烷/混合制冷工艺(C3/MR)、复迭式制冷工艺(CCS)、改进的双混合式制冷工艺(DMR)、改进的单混合式制冷工艺(SMR)和带预冷的氮膨胀制冷工艺(工艺代号为 N2)。为方便比较,假定 LNG 装置采用相同的预处理单元。研究的限定条件为:原料气温度为 25℃、压力为 60 MPa;原料气组分体积含量为甲烷 85.1%、乙烷 6.5%、丙烷 3%、丁烷 1.2%、戊烷及重组分 0.5%、氮气 1.5%、二氧化碳 2.2%;环境平均温度 27℃;回收的 LPG 组分重新注入 LNG;所有的工艺都采用空气冷却系统;LNG 的贮存及装载设施,通用设施不在研究的范围内。

2 工艺流程简述

笔者选用最新型的丙烷/混合制冷工艺作为比较研究的参考。丙烷/混合制冷工艺以丙烷作为预冷介质,混合制冷剂(氮气、甲烷、乙烷、丙烷)作为液化介质,选用一台燃气透平驱动压缩机,对丙烷进行压缩并经空冷后冷凝。气相和液相制冷剂依次冷却

作者简介:王保庆,1973 年生,工程师,硕士;1997 年毕业于原西南石油学院化学工程(石油及天然气加工工程)专业,2007 年取得上海交通大学动力工程博士学位;从事 LNG 接收终端工程和天然气输气管道工程建设管理。地址:(100011)北京市西城区安德路甲 67 号 302 室中石化天然气分公司工程技术部。电话:13910903612。E-mail:baoqingwang@vip.sina.com

及膨胀,达到预定的最佳制冷曲线。天然气在热交换器中被液化,丙烷循环为混合制冷剂及天然气提供预冷冷量。

复迭工艺流程是一个复合制冷系统。该工艺采用高沸点制冷剂,为下一级的制冷剂提供冷量,使用纯净的单组分。丙烷和乙烯制冷循环通常采用封闭式的制冷循环,甲烷采用开式的循环,用釜式热交换器和板式热交换器冷却天然气。使用这种换热器,可以使其传热温差非常大,当甲烷压缩机的压缩比限定后,在高于环境温度条件下,LNG 和闪蒸气进入 LNG 罐,尾气经压缩机增压后返回液化单元原料气入口,构成甲烷循环的一部分^[4]。

双重混合制冷工艺(DMR)采用甲烷、乙烯、丙烷和丁烷混合物作为预冷介质,制冷剂压缩后经过空气冷却系统冷却、膨胀以提供冷量。单重混合制冷工艺(SMR)中只有一个制冷循环将天然气在环境温度和同一压力下变为 LNG。制冷剂为氮气、甲烷、乙烷和丙烷的混合物,制冷剂在压缩机组级间经空冷器部分冷凝,气相被压缩冷却并与液相混合后进入板翅式换热器冷却和膨胀。天然气在同一热交换器中预冷和液化^[5]。

氮气膨胀制冷工艺使用丙烷作为预冷介质,氮

气为液化制冷剂。氮气由丙烷预冷,冷却后的氮气在三台膨胀机中膨胀。

从工艺流程可以看出,单混合制冷工艺流程、氮气膨胀制冷循环流程工艺简单,设备数量少,装置占地面积小;丙烷/混合制冷工艺流程、双复迭式制冷工艺流程、双重混合制冷工艺流程工艺较复杂,设备数量多,装置占地面积较大;氮气膨胀制冷循环流程因其制冷剂单一,易获得,更适合于边远地区或海上平台。

3 主要工艺设施

3.1 运转设备

驱动制冷压缩机的燃气轮机常用的有 GE-5C(双轴、可变速)和 GE-7EA(单轴、不可变速)两种机型,都是由 GE(General Electric)公司制造的。这些燃气透平机组在 LNG 领域的应用较为成功,并且自身能耗相对较低。作为预冷及复迭式制冷中的多级压缩机通常采用离心式压缩机,它们的流量最大,高效率的轴流式压缩机可用于第一级的混合制冷剂和氮气的压缩。压缩机的选用是以设计工程公司经验及用户对机器的使用反馈信息决定的,电动机常用作启动/辅助及尾气压缩动力。笔者所研究的 5 种工艺采用的运转设备见表 1。

表 1 主要运转设备汇总表

工 艺	C3/MR	CASCADE	DMR	SMR	N2
预冷段燃气轮机	GE-7EA	GE-5C(2 台)	GE-7EA	—	GE-5C
预冷段压缩机	4 级	3 级(2 台)	3 级	—	4 级
液化段燃气轮机	GE-7EA	GE-5C(4 台)	GE-7EA	2 台 GE-7EA+辅助电机	GE-7EA
液化段压缩机	轴流式+2 级离心式串列布置	3 级离心式(乙烯 2 台) 4 级离心式(甲烷 2 台)	轴流式+2 级轴向离心式串列布置	2 台轴流式与单级离心式串列布置	氮压缩机与 3 级膨胀机同轴

3.2 热交换器

低温热交换器形式为绕管式(SpoolWound)、板翅式或者釜式(Core-in-kettle)。选择哪一种可根据经验、介质的冷却特性及用户而决定(包括尺寸及费用)。通常条件下低温换热器设备如表 2。

4 工艺比较

4.1 LNG 产量

工艺流程的计算,其目的是计算在给定条件下如可用燃气轮机、空冷器空冷温度、最大热交换面积下的最大 LNG 产量。

从表 3 可以看出,除了氮气膨胀工艺之外,各流程 LNG 产量都较高。氮气膨胀工艺中的 LNG 产量

表 2 主要低温换热器设备表

工 艺	C3/MR	CASCADE	DMR	SMR	N2
预冷热交换器	釜式	釜式	绕管式	板翅式	釜式
液化热交换器	绕管式	釜式	绕管式	板翅式	板翅式

表 3 每条 LNG 生产线日产量表

工 艺	C3/MR	CASCADE	DMR	SMR	N2
LNG 产量(t)	11 900	10 000	13 100	11 300	6 540

低的原因是由于氮气膨胀提供的潜在冷量较少,主要以显热而非潜热的形式提供冷量。

4.2 功耗

对费用及效率进行的粗略比较基准是工艺系统

的单位比功耗,即产量以 t/d 为单位时 LNG 压缩机的轴功率,计算包括所有制冷压缩机及尾气压缩机功耗,不包括液体、气体的膨胀功。其结果如表 4。

表 4 5 种工艺流程的比功耗表

工 艺	C3/MR	CASCADE	DMR	SMR	N2
比功耗 (kW·d/t)	12.2	14.1	12.5	14.5	15.6

从表 4 可以看出,C3/MR 及 DMR 流程的比功耗相对较低;N2 膨胀制冷循环比功耗相对较高。

当环境温度较高时,复迭式制冷工艺存在一定的缺陷,丙烷压缩机驱动必须装备大功率的辅助电机,燃机必须高负荷运行。

4.3 生产线液化装置效率

每套 LNG 生产线自身以及部分公用工程所需的燃料主要来自尾气。

装置的液化率可以定义为有效产品(LNG 及凝结物)量除以进气量。液化装置的效率见表 5。

表 5 LNG 装置生产线的效率表

工 艺	C3/MR	CASCADE	DMR	SMR	N2
效率(%)	92.9	91.2	92.7	91.6	90.4

从表 5 中可以看出 DMR、C3/MR 及 SMR 工艺的效率较高,N2 工艺效率较低。

5 结论

上述的比较研究表明,对于在热带地区建造的大型 LNG 装置,采用 C3/MR 工艺是最好的选择。其他可以用的工艺是双混合式制冷工艺和单混合式制冷工艺。

带预冷的氮膨胀工艺对大型陆上工厂来说不是最经济的选择,但因其工艺简单,设备数量少,制冷剂易获得和补充,较适合用于边远地区和海上小型天然气处理工厂。

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[J].工程热物理学报,2000,21(4).
[2] 杨志毅,王保庆,李晶,等.液化天然气(LNG)贸易面临的机遇和挑战 [J].河南石油,2003(5).
[3] 徐文渊.小型液化天然气生产装置[J].石油与天然气化工,2005,34(3).
[4] 王保庆.天然气液化技术及其应用[J].天然气工业,2004,24(7):92-95.
[5] 顾安忠.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2000.

(修改回稿日期 2008-11-18 编辑 赵 勤)