

浮式液化天然气液化技术的选择及国产化面临的问题

李玉龙*, 程喜庆, 宋少光, 黄永刚, 尹宪志, 李 婵

(中国寰球工程公司, 国家能源液化天然气技术研发中心, 北京 100012)

摘要:浮式液化天然气 (FLNG) 已由研究走向实施及建造阶段。FLNG 首先要确定选择何种液化技术, 其选择受到许多因素的影响, 最终确定的技术必然是一个综合比选后的结果。国产化液化技术及装备在应用于 FLNG 之前, 需加快开展“运动对液化技术及设备影响的试验及研究”。

关键词:浮式液化天然气; 液化技术选择; 液化关键设备; 国产化

中图分类号:TE646

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)09-0008-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.09.002

The issues of the selection and localization of liquefaction technology for floating liquefied natural gas (FLNG)

LI Yu-long*, CHENG Xi-qing, SONG Shao-guang, HUANG Yong-gang, YIN Xian-zhi, LI Chan

(China Huanqiu Contracting & Engineering Corp., National Energy R&D Center for LNG Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: The development of floating liquefied natural gas (FLNG) has been changed from research to implementation and construction stage. Selection of liquefaction technology is the first step for FLNG, while it is influenced by many factors. The final selection of liquefaction technology is definitely based on the result of comprehensive comparison. Before the localization of liquefaction technology and equipment applied in FLNG, the experiments and studies of the influence of movement to liquefaction technology and equipment should be accelerated.

Key words: floating liquefied natural gas (FLNG); selection of liquefaction technology; key equipment of liquefaction; localization

随着天然气需求的不断上升, 陆上油气资源开发的条件日益复杂, 而海上油气资源储量巨大, 从陆地走向海洋已成为全球油气开发的趋势。

我国海洋是世界四大海洋油气聚集中心之一, 油气开发潜力巨大。根据我国海洋水域的环境条件, 对油气资源进行传统方式的开发, 经济性不高。浮式液化天然气 (FLNG) 集海上天然气的净化、液化、储存、装卸和外运为一体, 可直接系泊于气田上方进行作业, 从而降低气田的开发成本, 是一种新型海上气田开发技术。FLNG 技术具有造价低、建造期短、便于迁移、可重复使用、远离人口密集区、对环境影响小等优点, 可以灵活适应海上天然气田的生产状况, 很可能成为当前深海和近海海域天然气主要的开采方式。

陆上天然气液化技术的商业运行已经进行了半个世纪。有关海上 FLNG 技术的论证和研究也已经有 20 多年的时间, 该技术的发起人有大型油气公司、油气钻采公司、FPSO (Floating Production Storage

and Offloading, 浮式生产储油卸油装置) 运营公司、工程公司、LNG 船运公司等各类公司。近年来, FLNG 得到了快速发展, 已经有 4 个 FLNG 项目由研发走向建造, 其他的一些项目也在研究和准备中。随着首批 FLNG 投入运营带来的示范效应, 未来可能会有更多的 FLNG 项目投入建造、运营。

FLNG 项目首先要确定的是采用何种液化技术。由于液化技术各有特点, 选择液化技术的过程需要将用户需求与技术特点进行反复综合比较, 最终达到一个相对满意的结果。

1 天然气液化技术

天然气液化技术按照制冷循环原理可以分为两个大类, 一类是蒸汽制冷循环, 即逆朗肯循环, 这类液化技术占据着天然气液化技术的主导地位; 另一类是气体膨胀制冷循环, 即逆布雷顿循环, 这类液化技术在一些小型 LNG 生产中使用广泛。上述两类制冷循环按照循环级数又可分为单循环、双循环和

三循环等^[1-5]。

蒸汽制冷循环按照循环级数划分后的典型代表液化技术如下:

单循环蒸汽制冷:SMR(单循环混合冷剂技术),PRICO(BV公司的单循环混合冷剂技术),LIMUM(Linde公司的单循环混合冷剂技术)等;双循环蒸汽制冷:C3MR(丙烷预冷混合冷剂技术),DMR(双循环混合冷剂技术),OSMR(优化单循环混合冷剂技术)等;三循环蒸汽制冷:优化级联(Optimized Cascade),MFC(混合冷剂级联技术)等。

气体膨胀制冷循环按照膨胀级数划分后的典型代表技术是:单级循环的单级氮气膨胀技术等;双级循环的双级氮气膨胀技术、氮气甲烷膨胀等;三级膨胀的三级氮气膨胀技术等。

两个及两个以上的制冷循环可以由这两类制冷循环组合,这样可以派生出许多新的液化技术,例如AP-X、带预冷的氮膨胀、带预冷的双氮膨胀等。典型的液化技术见表1。

表1 典型的液化技术

名称	单循环	双循环	三循环
蒸汽制冷循环	SMR、PRICO、LIMUM等	C3MR、DMR、OSMR等	优化级联、MFC等
气体膨胀制冷循环	单级氮气膨胀	双级氮气膨胀、氮气甲烷膨胀等	三级氮气膨胀等
组合		带预冷的氮膨胀等	AP-X、带预冷的双氮膨胀等

陆上天然气液化技术产能的占比情况见表2。

表2 陆上天然气液化技术产能比 %

液化技术	C3MR	C3MR/Split	MFC	AP-X	级联	SMR	DMR
相应液化技术产能比	45.5	14.4	1.4	15.7	16.9	2.3	4.2

以丙烷预冷为基础的C3MR、Split MR和AP-X占据国际LNG产能总量的76%,居主导地位,剩余部分的产能由优化级联、DMR、SMR和MFC等提供。

2 影响 FLNG 液化技术选择的因素

根据陆上LNG的运行情况及近20年FLNG的研究,液化技术的能耗、生产能力、制冷剂是否是可燃组分,以及储存量、重量和空间的限制,工艺及设备对运动的反应、操作的难易程度、设备维护的便捷

性等因素会影响FLNG液化技术的选择。

2.1 能耗

液化工艺的能耗,代表着液化装置运行的经济性。液化技术常用的能耗表示方法为比功耗(采用制冷压缩机的功率消耗除以产能),即单位产品的制冷压缩机功耗(kWh/t LNG)。主要液化技术的比功耗见表3。

表3 主要液化技术的比功耗 kWh/t

液化技术	优化级联	C3MR	DMR	SMR	氮膨胀
比功耗	298	302	313	339	443

从能耗上看,氮膨胀技术能耗最高,SMR技术次之,优化级联、C3MR和DMR技术能耗最小。

2.2 生产能力

各种液化技术受技术本身及设备能力的限制,有各自技术的单线生产能力范围。对于确定的目标生产能力,通常是单线或双线的配置,三、四条线的配置较少,这主要是因为生产线越多,设备数量就越多,投资和空间占用相应变大,后期的运行就更加复杂。表4列出了典型的液化技术单线产能的范围。

表4 典型的液化技术单线产能 10⁶ t/a

液化技术	氮膨胀	SMR	级联、MFC
典型的单线产能	~1.1	~2.8	1.7~7.9
液化技术	C3MR	DMR	PMR、AP-X
典型的单线产能	1.7~6.5	1.7~7.1	5.1~10.0

2.3 制冷剂类型及可燃组分的储量

对于FLNG,一些业主希望在制冷循环中使用最少的易燃制冷剂。

氮气膨胀制冷液化技术采用完全不可燃的氮气,使用该技术的优点是可减少FLNG船中易燃组分的储量。

陆上产能最多的是以C3MR为基础的液化技术,该技术的预冷循环冷剂使用丙烷,如果再大量使用釜式换热器,必然需要储存大量的丙烷冷剂。考虑到丙烷的易挥发性,且挥发气比空气重,容易在甲板聚集,国外C3MR专利商没有首推在陆上广泛使用的C3MR技术,而是首推了专门为FLNG开发的DMR技术。

通常DMR技术中也会部分使用丙烷组分,相较于C3MR技术,DMR使用的丙烷量要少得多。若业主要求最少的丙烷储量,可以通过调整混合冷剂的配方,使丙烷的使用量达到最少。当然,冷剂配方

调整的前提应保证液化工艺技术的能耗不增加。

优化级联技术专利商为将其技术应用于 FLNG, 采用丙烷冷箱代替釜式换热器, 这样的设计既减少了设备台数, 又节省了使用空间, 同时也减少了丙烷的使用储量。冷箱采用特殊的双包容结构, 虽然增加了部分费用, 但是能够避免可燃冷剂泄露带来的危险, 使该技术的安全性得到加强。

2.4 质量和空间的限制

由于 FLNG 的液化部分建造在甲板上, 液化设备占用的空间及质量要受到船体建造尺寸的限制。如果设备台数多, 操作线多, 那么占用空间就相应较大。几种液化技术占用空间从大到小的顺序是级联液化技术、双循环混合冷剂技术、单循环混合冷剂技术、氮膨胀技术。

一些专利商为了减少设备的总量, 采用重量轻的材料代替重的材料, 降低设备的重量, 如外壳采用不锈钢材料, 内部采用铝材料的新型设备。

2.5 工艺及设备对运动的反应

FLNG 船体设计和稳定控制系统虽然会将甲板上的运动最小化, 但不能完全消除运动。船体运动对工艺及设备的影响主要体现在两个方面, 一方面是对机械的影响, 另一方面是对工艺性能的影响。

船体运动对工艺设备会产生附加的机械应力; 液体的晃荡会产生附加的机械应力; 在极端海况情况下, 设备要承受极端海况条件下船体运动产生的极端应力。这 3 种运动产生的加速度和机械疲劳在机械设计中都需要考虑, 才能保证设备的安全可靠。

船体运动对带有两相流的工艺设备, 特别是液化换热器的分配带来影响, 分配的不均匀导致工艺性能的降低, 无法达到预期的工艺指标。船体运动对带有液体分布的工艺设备也会产生影响, 导致分配效果变差。将陆上液化技术用于海上工况, 需要建立一套运动对工艺性能影响的预测程序, 另外还要建立一套如何对陆上设备优化设计, 从而抵消这种运动对工艺性能影响的新型设计方法。

氮气膨胀液化技术中使用气态制冷剂, 可以避免两相流或液体分配不均匀产生的对工艺性能的影响, 因此氮气膨胀液化技术对运动的适用性较好。

2.6 操作的难易程度及设备维护的便捷性

从操作复杂性来看, 单循环液化技术设备台数少, 其操作比双循环液化技术简单、容易。对于选定的液化技术, 采用单线技术比采用双线液化技术操作更简单、容易。

氮膨胀液化技术启动要使用大量的氮气, 为使原始启动及再启动速度加快, 一种方案是使用一台小的液化换热器, 该换热器在正常操作时可以生产液化天然气, 也可以生产液氮, 生产的液氮储存于船体中可用于 FLNG 装置能快速再启动。

2.7 在建 FLNG 选择的液化技术

FLNG 是一个新的领域, 许多因素都影响到浮式液化技术的选择, 单纯就一个因素比较 FLNG 液化技术的优劣, 往往难于得到准确的结果。液化技术的选择通常是上述各种影响因素综合比较的结果, 也是液化技术特点与业主需求的符合程度综合的结果。现阶段在建的 4 套 FLNG 使用了 DMR、SMR 和氮膨胀 3 种液化技术, 也说明了浮式液化技术的选择不是唯一的, 是各种因素综合考虑的结果。

在建的壳牌公司 Prelude 的 FLNG 项目, 采用单线 DMR 液化技术, 年产 360 万 t 的 LNG、130 万 t 的凝析油、40 万 t 的 LPG, 船长 488 m, 宽 74 m。装置规模大, 选择单线生产能力大的 DMR 技术, 可以降低能耗及运行费用, 减少设备台数, 降低甲板上的占用空间, 操作简单、方便。

马来西亚石油公司的 PFLNG 项目采用的是氮膨胀液化技术, 双线并联, 年产 120 万 t 的 LNG, FLNG 船长 300 m, 宽 60 m。选择双线的氮膨胀技术, 液化的制冷剂为气体, 船体的运动对其不产生影响, 并联双线的配置, 能够适应原料的大范围波动, 减少了甲板上可燃组分的储量。

Exmar 公司的 FLNG 项目采用的是 SMR 液化技术, 单线生产, 年生产 50 万 t 的 LNG, FLNG 船长 140 m, 宽 32 m。该项目是近岸的驳船型 FLNG 装置, 采用的是多点系泊方式。Golar 公司的 FLNG 项目采用的是 SMR 液化技术, 现正在实施的是由运输船改装成 FLNG 船的项目。

目前, 除了以上这些在建 FLNG 外, 澳大利亚天然气开发商 Woodside, 挪威租赁商 Flex LNG、Höegh LNG、Golar LNG, 法国能源公司道达尔、GDF Suez, 美国石油公司 Excelebrate Energy、Noble Energy、埃克森美孚、Sempra Energy, 荷兰租赁商 SBM, 日本 Inpex, 泰国 PTTEP, 巴西国家石油公司等多家石油公司和专业运营商均在开展 FLNG 技术的相关工作。

3 FLNG 国产化面临的问题

3.1 浮式液化技术国产化

天然气液化技术在我国起步比较晚, 我国第一

座天然气液化装置于2001年建成,其LNG产能为15万 m^3/d ,采用的工艺路线为丙烷、乙烯制冷加天然气节流膨胀的制冷液化工艺。之后国内建设了一些小规模LNG工厂,氮膨胀液化技术、单循环混合冷剂技术、双循环混合冷剂技术等在这些小LNG工厂中都得到了应用。除了国产液化技术外,国内也引进过一些100万~150万 m^3/d 的单循环混合冷剂液化技术。

中国石油天然气集团公司为了拓展海外天然气项目,曾经进行过双循环混合冷剂、优化级联液化工艺的研究,中国海洋石油公司也进行过碳三预冷混合冷剂液化工艺的研究。这些研究面对的是大型气田的开发,装置规模在200万~500万 t/a 。中国寰球工程公司研发的260万 t/a 双循环混合冷剂液化技术,在山东泰安进行的60万 t/a 示范项目已经投产运行,技术及装备都进行了验证,装置能耗与国外相同技术的能耗相当,该项目也是国家能源局指定的大型LNG装备国产化依托工程。

多数的天然气液化技术都已经在我国国产化,并已经有陆上运行的装置,这些国产化技术是潜在的可用于FLNG的液化技术。但是若将国产化技术用于FLNG,还需解决以下一些问题。

我国使用氮膨胀液化技术的装置规模小,将这种技术放大应用到FLNG中,需要解决工程放大效应。随着装置规模扩大,设备形式需要调整以适应装置规模。

由于国内装置规模小,整体的能耗相对较高,随着装置加工能力的提高,设备的效率也有提高,能耗会有所下降。同时随着装置规模扩大,原有小装置上的不经济方案会变得更具有吸引力,可以通过进一步地优化,进一步降低能耗。

对于希望在制冷循环中最少使用易燃制冷剂这种需求,混合冷剂液化技术需对冷剂配方进行研究,形成不同系列的冷剂配方,满足用户对不同可燃组分储存量的需求。

船体运动对工艺及设备的影响是国产化中的一个薄弱环节。由于FLNG的研究起步晚,需要加强“运动对液化工艺技术及设备影响的基础研究和专项研究”,这是国产化应用亟待解决的问题。

3.2 浮式液化关键设备国产化

国内小型及中型规模的板翅式冷箱换热器已在陆上得到应用,国产绕管换热器虽在其他行业得到了应用,但在天然气液化上还没有应用。海上运动

工况对这些液化换热器影响的研究也刚刚开始。

若将国产液化换热器用于FLNG,还需开展运动对液化换热器影响的研究。运动对液化换热器影响的研究可以借鉴国外的研究方式,首先进行基础研究,开发模型拟合基础研究数据,然后进行中试验证的方法。模型的开发要能够预测液化换热器的性能与液化换热器的几何尺寸、运动条件、换热器重心以上的高度和工艺条件的关系函数。模型除能准确地预测运动对液化换热器的影响以外,还应包括在换热器设计中进行怎样的调整才能抵消运动对传热性能的影响,从而达到所要求的工艺性能。

4 结论

国际上使用氮膨胀技术、SMR技术和DMR技术的FLNG已经陆续建成,并将投入使用。每种液化技术都有其各自独特的特点,没有一种液化技术能够满足FLNG的所有需求。在选择液化技术时,需要综合考虑到能耗、生产能力、安全、船舶运动、占用空间情况及操作检修方面等因素的影响。

国产化液化技术和装备已经在陆上应用与运行,要将陆上的国产化技术和装备应用于FLNG上,一方面要进行液化装置长周期运行经验的总结和积累,另一方面要加快海上特殊环境(晃动)对液化技术及设备影响的研究。研究成果除能准确地预测运动对工艺设备的影响以外,还应包括如何进行优化操作来抵消运动对工艺设备的影响。

参考文献

- [1] Andress D L. The Phillips optimized cascade LNG process: A quarter century of improvements [EB/OL]. http://Inglicensing.conocophillips.com/Documents/SMID_016_The_Phillips_Optimized_Cascade_LNG_Process_quartercentury.pdf, 1996.
- [2] Spilsbury C, Liu Y N, Petrowski J, et al. Evolution of liquefaction technology for today's LNG business [EB/OL]. <http://www.airproducts.com/~media/Files/PDF/industries/Ing-evolution-liquefaction-technology-todays-lng-business.pdf>, 2006.
- [3] Pek J J B, van Driel A, de Jong E C J N, et al. Large capacity LNG plant development [EB/OL]. <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4215/innhold/LNG%20Conferences/2004/Data/Papers-PDF/PS5-3-Pek.pdf>, 2004.
- [4] Bauer H. The mixed fluid cascade (MFC®) Process [EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/277191472_Mixed_Fluid_Cascade_Experience_and_Outlook, 2009.
- [5] 顾安忠,鲁雪生. 液化天然气技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2010:54-63. ■