

# LNG接收站冷能利用方案比选

胡超<sup>1</sup> 郑元杰<sup>1</sup> 焦长安<sup>1</sup> 生动<sup>1</sup> 韩荣鑫<sup>1</sup>

**摘要:** 为了高效利用LNG蕴藏着的大量优质冷能,探索最适合于山东LNG接收站的冷能利用方式,对冷能空分与冷能发电两种方案进行了研究。首先从市场容量、冷能利用量、冷能利用率、操作稳定性影响和清洁低碳5个方面进行对比分析,认为LNG冷能发电方案不存在市场问题,冷能利用量大,利用效率高,操作稳定性强,更加绿色环保。其次,以LNG利用量190 t/h为基准,对混合工质+双循环、混合工质+单循环、单工质+单循环三种LNG冷能发电技术进行了建模计算分析,结果表明混合工质+双循环的冷能发电模式发电量更大,能效更高,因此推荐采用该冷能发电方案。

**关键词:** LNG接收站;冷能发电;冷能空分;流程组合

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.10.032

## Comparison of Cold Energy Utilization Scheme in LNG Terminal

Hu Chao, Zheng Yuanjie, Jiao Changan, Sheng Dong, Han Rongxin

**Abstract:** For efficient utilization of high-quality cold energy in LNG, and to probe out the most suitable cold energy utilization pattern for Shandong LNG terminal, this article researched two common scenarios which are cold energy generation and air separation. Firstly, by contrast and analysis on five aspects of market capacity, the amount and ratio of cold energy utilization, operation stability, environment protection, it is deemed that the scheme of LNG cold energy generation do not exist market problems, and have large consumption, high utilization, strong operational stability, also more green environment. Then, based on 190t/h of LNG consumption, three kinds of LNG cold energy generation technologies of mixture refrigerant dual cycle, mixed refrigerants-single cycle and single refrigerant-single cycle, that were analyzed by modeling calculation. The results show that the mode of mixture refrigerant dual cycle can generate more power and have high efficiency, and so it was recommended for cold energy generation.

**Key words:** LNG terminal; cold energy generation; cold energy air separation; process combination

LNG冷能利用技术主要用于冷能发电、冷能空分、冷冻食品及仓库制冷、低温干燥与粉碎、制取液体二氧化碳等<sup>[1-3]</sup>,其中冷能发电和冷能空分是利用温位最低、利用量最大、利用效率最高的两种冷能利用方式<sup>[4-6]</sup>。日本是世界上冷能利用较好的国家,目前有26台独立的冷能利用设备,其中冷能发电15台套<sup>[7]</sup>;1990年,中国台湾中油公司永安LNG接收站建成1座LNG冷能发电站<sup>[8]</sup>;2009年,福建莆田LNG接收站建成中国第一套冷能空分装置;2013年,江苏如东LNG接收站建成一套冷能空分装置。如何高效利用LNG蕴藏着的大量优质冷

能,实现能量利用及利益的最大化目前成为关注的热点<sup>[9]</sup>。以山东LNG接收站为研究对象,从市场容量、冷能利用量、冷能利用率、操作稳定性影响和清洁低碳5个方面对冷能发电与冷能空分两个方案进行了对比,并进行相关建模分析,提出了适合于该接收站发展的冷能综合利用方案。

## 1 冷能利用方案

### 1.1 LNG冷能空分方案

空气中的主要成分是氧气和氮气,两者的沸点不同。首先把空气压缩、预冷、净化,进一步冷却

<sup>1</sup>中国石化青岛液化天然气有限责任公司

至摄氏零下一百多度，使之成为液态空气。然后利用氧和氮的沸点差，经精馏塔将液态空气进行多次蒸发和冷凝，使氧气和氮气分离，得到提纯的氧气和氮气<sup>[10]</sup>。

由于空分装置所需温度比LNG温度还要低，因此利用LNG的冷量冷却空气可大幅度降低能耗，简化空分流程，减少建设投资及操作费用。同时，冷能空分与冷能发电类似，其生产替代了部分LNG汽化器功能，使得LNG接收站的汽化费用也有所降低。

## 1.2 LNG冷能发电方案

LNG冷能发电原理是利用LNG的低温冷能使工质液化，工质经加热汽化后再到汽轮机中膨胀做功带动发电机发电<sup>[11]</sup>。常规使用的冷能发电循环主要包括以下三种方法<sup>[12]</sup>：

(1) 直接膨胀循环法。利用低温泵将LNG加压后送至汽化器，经海水换热再送至膨胀透平机做功，带动发电机工作从而输出电能。

(2) 朗肯循环法。利用LNG冷能将冷媒（中间介质）冷凝为液体后通过增压泵增压送至汽化器，汽化后的冷媒进入膨胀透平机做功带动发电机发电，完成做功后的低压冷媒再进入冷凝器进入下一个循环。

(3) 联合法。联合法是朗肯循环法和直接膨胀法的组合。LNG经低温泵加压后通过冷媒换热器，经过冷媒换热器换热后的LNG温度有所升高，再利用海水换热后完全汽化，将汽化后的LNG送至膨胀透平机做功发电；而冷媒换热后经过增压泵增压然后送至汽化器，汽化后的冷媒进入膨胀透平机做功，输出电能。

## 2 方案对比分析

### 2.1 产品市场容量和冷能利用量

冷能空分一般是液体产品，需要低温罐储存和车辆运输周转，而冷能发电则无需储存和运输。从原理上讲，两者都能起到LNG汽化器的作用，可全部或部分替代LNG接收站的汽化器。

(1) LNG接收站建在海边，离大容量空分气体产品市场（如大型钢厂、煤化工企业）较远，没有稳定的大容量的气体产品用户市场，如果建设冷能空分装置只能生产液体产品。经市场调研发现，山东LNG接收站周边300 km范围内空分产品用户数量较少，市场容量不足，主要是分散的液氧、液氮和液氩用户。若建设两套600 t/d的冷能空分相当于每年需销售 $43.2 \times 10^4$  t液体产品量，要完成全

量销售较为困难。如果不能满产全销，则冷能空分的冷能利用量、装置能耗和经济效益就不能达到预期的指标。

(2) 出于安全性和经济性的考虑，空分液体产品的最佳销售半径一般为100~300 km以内，液体产品储罐也不可能做得很大，单罐一般为3 000 m<sup>3</sup>为宜，一旦销售不畅或车辆运输周转受阻极易发生涨库，同样会对冷能空分的冷能利用量、装置能耗和经济效益造成负面影响<sup>[13]</sup>。

(3) 冷能空分的冷能利用量受到空分液体产品产量的制约，而冷能发电则可以将轻烃回收后的LNG全部进行利用。冷能发电作为一种清洁能源无论是自用还是外输均不存在市场问题，也不存在储存和运输问题。

### 2.2 冷能利用率

冷能发电利用的温位比冷能空分低15℃左右，能更加充分地利用LNG冷能。从世界范围来看，低温冷能发电是利用LNG冷能最多的方式。冷能空分除利用LNG蕴藏的冷能外还需要另外耗电，其能量利用形式是将冷能和电能转化后蓄藏在液体产品中，以产品价格形式体现出来，下游用户一般是将液体产品作为原料使用，此部分冷量直接浪费掉；而冷能发电则是将LNG中蕴藏的冷能全部回收发电，冷能利用率高，能量利用更为合理。

### 2.3 操作稳定性影响

从冷能利用装置与LNG接收站操作稳定性的相互关联度分析可知冷能发电更好。冷能发电装置的操作弹性一般为60%~100%，更具有灵活性。如上所述，冷能发电只是起到LNG汽化器的作用，电能产品没有运输、储存和销售的后顾之忧，完全可以使冷能发电装置尽可能满负荷运行，同时以LNG汽化器作为平衡、备用手段，全厂的操作稳定性较好。

空分装置是否能满负荷稳定运行，受液体产品销售影响很大。因储罐容量有限，且用汽车点对点运输，一旦销售不畅容易引起涨库，空分装置无法满负荷运行。空分装置生产的波动又会反过来影响LNG汽化器的负荷调节，相互影响。

另外，空分装置的生产从启动、维冷到出产品，达到正常运行需要较长时间，对LNG冷源供应稳定性要求更高。而冷能发电生产的全过程启动、停车更快，负荷调节更灵活，受LNG冷源供应影响小。

### 2.4 清洁环保、绿色低碳

冷能发电是无污染排放的清洁生产电能，而冷

能空分是消耗电能, 前者的清洁环保、节能降耗和绿色低碳性能较为显著, 更加符合国家产业发展政策导向和企业发展方向。

## 2.5 发展空间和节省投资

如前所述, 冷能发电和冷能空分均可起到全部或部分替代 LNG 汽化器的作用, 基于产品市场容量的原因, 在 LNG 接收站扩建时, 前者可以同步扩建, 而后者受市场容量限制扩建较难。因此, 冷能发电扩建时, LNG 接收站的扩建项目可不建或少建 LNG 汽化器, 这样可大幅节省投资。而冷能空分则难以起到为 LNG 接收站扩建节省投资的作用。

## 3 技术方案选择

### 3.1 三种工质与流程组合的分析比较

推荐山东 LNG 接收站采用联合冷能发电方案, 所需的冷能来源于经轻烃回收装置处理后的贫 LNG, 工艺流程见图 1。

常用的 LNG 冷能发电方案中联合效率最高<sup>[14]</sup>, 考虑到 LNG 接收站周围环境, 选用海水为循环提供热源。对于朗肯循环法面临着混合工质与单一工质、多循环与单循环的选择。

基于山东 LNG 冷能利用项目建设条件, 假定在相同 LNG 利用量的基准下, 对混合工质+双循

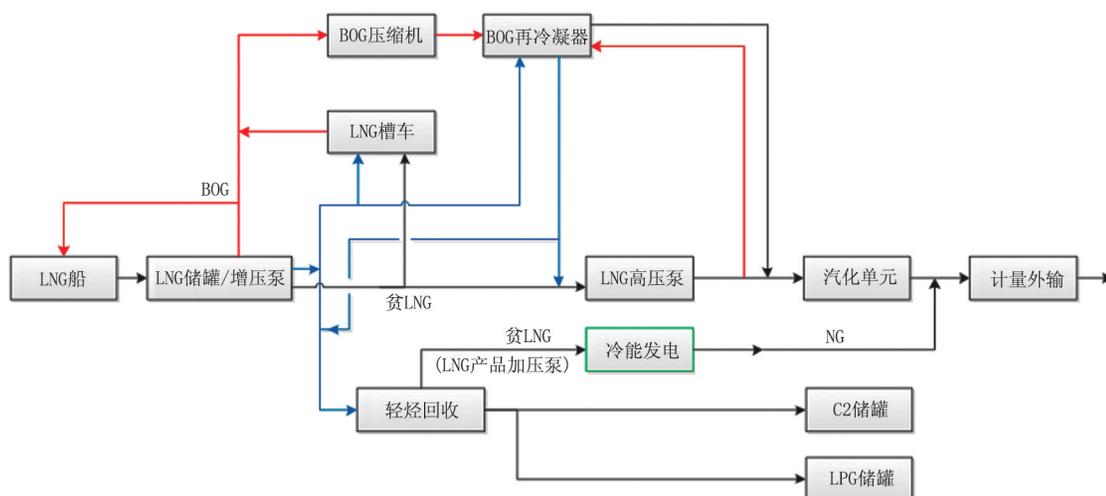


图 1 接收站工艺流程示意图

环、混合工质+单循环、单工质+单循环三种 LNG 冷能发电技术进行建模计算, 得到理论上三种技术在冬季和夏季的全系统各项数据和结果 (表 1)。

表 1 三种方案的 LNG 冷能发电主要结果

技术指标	混合工质+双循环		混合工质+单循环		单工质+单循环	
	夏	冬	夏	冬	夏	冬
输出功率/kW	4 777.5	3 549.6	4 065	3 056	3 914	2 840
输入功率/kW	236.5	293.2	172.7	201.0	207.8	168.0
净发电量/kW	4 541	3 256	3 892	2 855	3 706	2 672
LNG 流量/(t·h <sup>-1</sup> )	190		190		190	
海水流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 892~5 545		3 298~6 942		5 793~6 107	

注: 假定夏季海水最高温度取 25℃, 冬季海水最高温度取 5℃。

分析表 1 数据可以得出如下结论: ①冬季与夏季相比较, 由于充当热源的海水温度相对较低, 在其他条件不变的情况下其输出功率有所减少; ②无论冬季还是夏季, 从工质选择来看混合工质优于单一工质, 从发电量来看, 双循环优于单循环; ③将工质和流程组合后能效从高到低依次为: 混合工质-双循环、混合工质-单循环和单工质-单循环。因此, 推荐采用混合工质+双循环的冷能发电工艺

流程。

需要注意的是, 由于低温朗肯循环发生在环境温度与 LNG (-162℃) 温度之间, 该循环需要工质的相变。为充分利用 LNG 冷能, 应重点考虑两个因素: 一是工质的蒸发温度应尽可能地接近 LNG 温度 (-162℃), 这样可使实际循环温差拉大, 因此效率也越高; 二是工质在极端的环境下应保证相变能力, 使循环能顺利完成, 保持全年运行<sup>[15-16]</sup>。据此, 本方案构建的混合工质为甲烷、乙烷、丙烷、丙烯等组分。

### 3.2 混合工质+双循环方案效果分析

(1) 山东 LNG 接收站一期工程用电量 (含码头、管输) 为 15 931~24 453 × 10<sup>4</sup> kWh/a, 冷能发电装置的年平均发电量为 3 898.5 × 10<sup>4</sup> kWh, 仅占 LNG 接收站一期总用电量的 13%~20%, 占接收站扩建后总用电量的 10%。而山东 LNG 接收站一期工程在低负荷运行情况下, 晚间最小用电负荷为 4 167 kWh/h, 仍然高于冷能利用工程所发电量。根据冷能发电电能自用原则, 自发电能不外输, 不存在市场问题, 因此本方案较为现实。

(2) 与生产能力为 600 t/d 的两套冷能空分装置相比较, 两种方案电能相差约  $1.8 \times 10^4$  kWh; 以燃煤发电时 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放指标测算, 两种方案中三种排放物的排放量差值分别为  $14.7 \times 10^4$ 、 $838 \times 10^4$  和  $478 \times 10^4$  t/a, 证明利用 LNG 冷能发电更加绿色环保。

(3) 以两套 600 t/d 冷能空分方案为例, 经测算利用的 LNG 量只有 104.30 t/h (以 8 400 h/a 计), 仅占山东 LNG 接收站富 LNG 轻烃回收后输量 ( $160 \times 10^4$  t/a) 的 55% 左右, 从能量利用的角度看, LNG 冷能没有得到充分利用。而本方案冷能发电的 LNG 利用量为 190 t/h, 是冷能空分方案的 1.8 倍以上, 冷能利用更为充分。

## 4 结论

(1) LNG 冷能发电与冷能空分方案相比较, 冷能发电方案无需储存和运输, 不存在市场问题, 并且冷能利用量大、利用率高、操作稳定性强、更加绿色环保, 因此冷能发电方案比较适合于山东 LNG 接收站。

(2) 通过对混合工质+双循环、混合工质+单循环、单工质+单循环三种 LNG 冷能发电技术进行建模计算分析, 结果表明混合工质+双循环的冷能发电工艺较其他两种模式发电量更大、能效更高, 因此推荐使用该模式的冷能发电方案。

## 参考文献

- [1] TSATSARONIS G, MOROSUK T. Advanced exergetic analysis of a novel system for generating electricity and vaporizing liquefied natural gas[J]. Energy, 2010, 35 (2): 820-829.
- [2] 陈则韶, 程文龙, 胡芑. 一种利用 LNG 冷能的空气分离装置新流程[J]. 工程热物理学报, 2004, 25 (6): 913-916.
- [3] MESSINEO A, PANNO G. LNG cold energy use in agro-food industry: A case study in Sicily[J]. Journal of Natural

Gas Science and Engineering, 2011, 3 (1): 356-363.

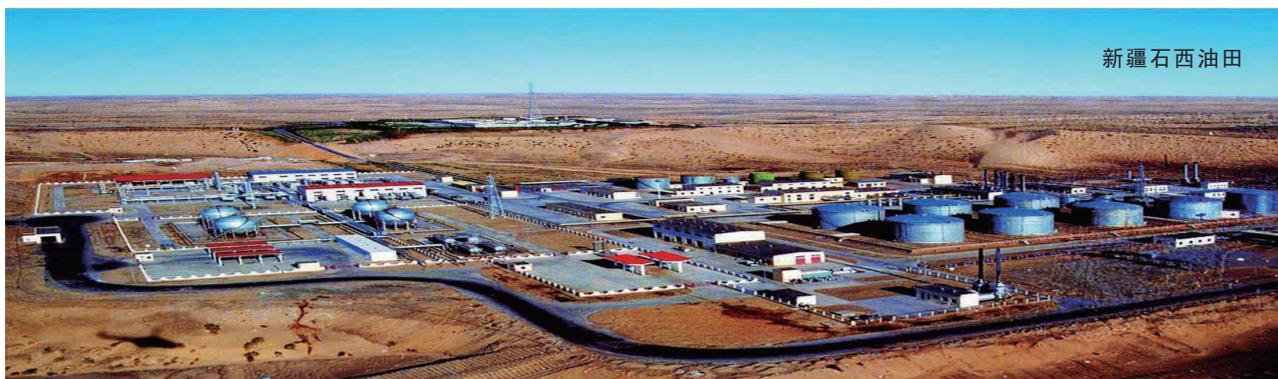
- [4] 李静, 李志红, 华贲. LNG 冷能利用现状及发展前景[J]. 天然气工业, 2005, 25 (5): 103-106.
- [5] 周廷鹤, 彭世尼. LNG 冷能利用技术探讨[J]. 上海煤气, 2009 (1): 37-39.
- [6] 刘刚, 张国忠. 液化天然气 (LNG) 发电及其冷能利用[J]. 热力发电, 2006, 35 (2): 65-66.
- [7] 夏永强, 高为, 张磊. 基于液化天然气接收站的冷能发电简析[J]. 化学工业, 2013, 31 (11): 13-15.
- [8] 黄建明, 廖文俊, 曾乐才. 液化天然气冷能的综合利用[J]. 上海电机学院学报, 2008, 11 (2): 87-91.
- [9] 徐文东, 段娇, 陈运文, 等. 液化天然气冷能利用技术及其产业化进展[J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2013 (5): 79-83.
- [10] 陆山. 浅谈空气分离技术的发展和改进[J]. 甘肃冶金, 2011, 33 (3): 89-90.
- [11] 王坤, 顾安忠, 鲁雪生, 等. LNG 冷能利用技术及经济分析[J]. 天然气工业, 2004, 24 (7): 122-124.
- [12] 李玲. LNG 接收站冷能发电方式初探[J]. 石油化工设计, 2014, 31 (2): 26-29.
- [13] 任会芹. LNG 冷能空分利用前途光明[J]. 气体分离, 2014 (5): 42-45.
- [14] 刘燕妮, 郭开华. 液化天然气冷能新型低温动力循环经济性分析[C]//第三届中国 LNG 论坛. 广州: 中山大学出版社, 2012: 122-126.
- [15] 王毅, 林文胜, 顾安忠. 利用 LNG 冷能的有机朗肯循环系统的工质研究和变工况性能分析[J]. 化工学报, 2010, 61 (S2): 107-111.
- [16] 杨红昌. 液化天然气 (LNG) 冷能发电系统的优化研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.

## 作者简介

胡超: 工程师, 硕士研究生, 毕业于中国石油大学(北京)机电工程专业, 现从事山东 LNG 接收站设备管理工作, 18853220093, huchao2011@163.com, 山东青岛西海岸新区双珠路卓越金融广场 3 号楼 1401, 266400。

收稿日期 2016-01-07

(栏目编辑 樊韶华)



新疆石西油田