

基于液化天然气冷量的液体空分新流程

燕娜, 厉彦忠, 脱瀚斐

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 分析了空分装置中应用液化天然气(LNG)冷量的优势. 从流程设计和现有流程改造的角度, 分别提出了采用 LNG 冷量冷却循环氮气的液体空分装置的新方案, 并采用 Aspen Plus 软件对其进行模拟计算. 研究表明: 与传统流程相比较, 新方案采用 LNG 作为冷源冷却循环氮气后, 可以代替氟利昂制冷机以及氮透平膨胀机组, 取消了氮气外循环, 系统得到简化, 所需循环氮气的量明显减少; 系统最高运行压力由传统流程的 4.2~5.0 MPa 降低到 2.3~2.6 MPa; 液态产品的单位能耗从 1.05~1.25 kW·h/kg 降低到 0.317~0.384 kW·h/kg.

关键词: 液化天然气; 冷量回收; 空分装置

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0122-03

Novel Liquid Product Air Separation System Based on Cold Energy of Liquefied Natural Gas

Yan Na, Li Yanzhong, Tuo Hanfei

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

液化天然气(LNG)具有便于远距离运输、储运成本低、热值高、清洁、环保等特点. 在 LNG 接收站, 一般将 LNG 气化后再使用, 气化过程中放出的冷量约为 830 kJ/kg, 这部分冷能通常随海水或空气被舍弃, 造成能源的极大浪费, 如何回收 LNG 的冷量近年来已经成为国内外研究的热点问题^[1-5]. LNG 作为冷源温度等级很低, 冷量相当宝贵, 因此对其冷能利用时, 低温的冷量应尽可能低温利用, 才能达到提高经济效益的目的. 鉴于此, 本文着重对 LNG 冷能在空分装置中的应用进行探讨.

1 LNG 冷能应用在空分装置中的优势

LNG 冷量利用的过程就是将 LNG 的冷量传递给需要冷却的工质, 达到冷量回收的目的. 该过程是不可逆的热力学过程, 存在着 焓损失, 且传热温差越大, 焓损失也越大. 与其他利用方法相比, 空分装置中循环氮气温度较低, 在 150~200 K 之间, 与 LNG 的温差相对较小, 冷能回收过程中的不可逆损失也相对较少, 是比较理想而高效的利用方法.

有预冷的一次节流液化循环液化系数可以表示成

$$z = \frac{-\Delta h_T + q_{0c} - q_L}{h'_1 - h_0} \quad (1)$$

式中: Δh_T 表示等温节流效应; $h'_1 - h_0$ 表示气体液化过程中的焓降; q_L 表示系统冷损失; q_{0c} 表示预冷过程带入系统的冷量. 在传统的液化循环中, 该冷量通过制冷机组产生, 若将 LNG 的冷量回收用在这里, 不仅提高了循环的液化率, 可得到大量的液态产品, 同时节省了能耗.

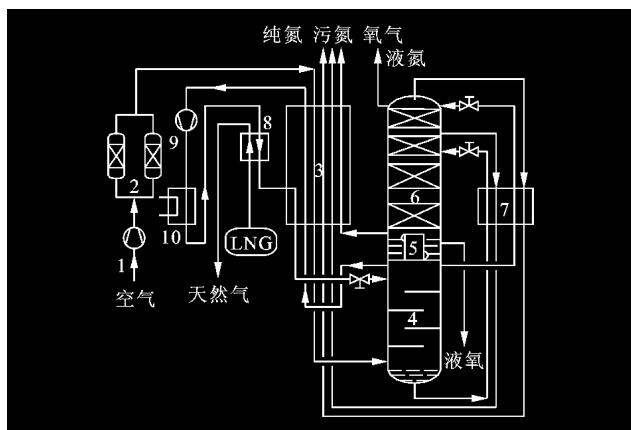
2 采用 LNG 冷量的液体空分装置

近年来, 随着我国 LNG 进口量的增加, 国内学者已对空分装置中如何引进 LNG 的冷量作了一定的探讨^[6-7]. 本文认为空分装置中引进 LNG 冷量的方案大致可以分为 2 种情况: 一种是设计新型的引进 LNG 冷量的流程方案, 并投资建设一套新的系统; 另一种是在原有的设备基础上进行改进设计, 引进 LNG 的冷量. 2 种方案的目的是利用 LNG 的冷量生产更多的液态产品. 在总结了前人的研究成

果的基础上,本文针对上述2种不同的情况各提出了一种新方案。

方案1针对新系统的投资建设提出,如图1所示。该方案为采用LNG预冷的中压氮气循环的液体空分流程,其中精馏系统与传统的中压氮气循环液体流程基本相同,主要区别在于制冷系统。在传统流程中,循环氮气分为内外2股循环,内循环为精馏塔提供冷量,而外循环为内循环氮气提供冷量。新流程取消了氮气外循环制冷系统,这部分冷量由LNG气化过程释放的冷量代替。新流程是这样运行的(见图1):来自下塔顶部的循环氮气首先通过主换热器吸收热量,将原料空气冷却,再进入循环压缩机压缩至约2.6 MPa,经冷水机组降温后,直接进入LNG换热器吸收LNG气化释放的冷量,被冷却到120 K左右,然后通过节流阀降压至约0.55 MPa,回到下塔提供冷量,接着进入下一次循环。

新流程的特点在于:①取消了氮气外循环系统,在设备上省去了氮透平膨胀机和增压压缩机,使流程组织更加简单;②用LNG换热器代替了传统流程中的氟利昂制冷机组,有效回收了LNG的冷量,同时节约了能耗;③由于LNG冷量的引进,降低了循环氮气的预冷温度,从而降低了系统的最高运行压力,使安全得到保证;④与文献[6-7]中的方案相比,提高了循环氮气进压缩机的温度,避免了低温压缩的困难。



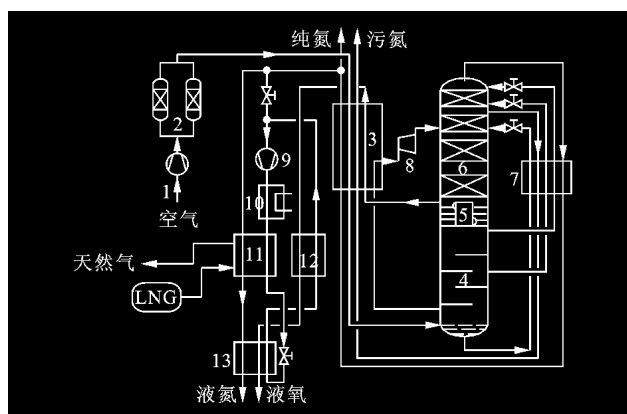
1:空气压缩机;2:空气纯化器;3:主换热器;4:下塔;5:冷凝蒸发器;
6:上塔;7:过冷器;8:LNG换热器

图1 LNG预冷中压氮气循环液体空分流程

方案2针对现有设备改造提出,如图2所示。该方案为利用LNG预冷的中压氮气循环塔外液化空分流程,其运行方式如下:上塔引出的纯氮气经主换热器复热后,抽取一部分(抽取量取决于需要生产的液态产品的量)首先经LNG换热器冷却,再在液化器中液化,作为液态产品输出。上塔底得到的气态纯

氧复热后先在预冷器中预冷,吸收循环氮气的冷量,再进入液化器中液化得到液氧,作为产品引出。装置开动初期,从氮气产品中引出一部分作为循环氮气进行积累,当流量达到要求以后,通过阀门切换,使循环氮气与精馏系统隔离。循环氮气在压缩机中被压缩到约2.3 MPa,然后通过冷水机组冷却并在LNG换热器中液化,此高压低温循环氮气经节流后为换热器提供冷量,再回到压缩机进口,进行下一个循环。

该方案是在传统的全低压气体产品流程的基础上改良得到的,其最大的优势是不需要改变任何原有设备就可以生产液体产品,只需在原有流程的基础上添加1台循环氮气压缩机、3台换热器和1台冷水机组,非常适合原来只生产气体产品现又改装为生产液态产品的流程。另外,产品液化系统独立于精馏系统,在不同的需求情况下,对气液产品的产量可以进行灵活的调节。该流程的最高运行压力进一步降低,比方案1还要低约0.3 MPa。



1:空气压缩机;2:空气纯化器;3:主换热器;4:下塔;5:冷凝蒸发器;
6:上塔;7:过冷器;8:空气膨胀机;9:循环氮气压缩机;
10:冷水机组;11:LNG换热器;12:氧气预冷器;
13:产品液化换热器

图2 LNG预冷中压氮气循环塔外液化液体空分流程

本文使用ASPEN PLUS软件对2个新方案进行了模拟计算,下面介绍一组算例的运行参数。原料空气初始状态参数为0.1 MPa、285 K,假设为两组分,即氮气的质量分数为79.1%,氧气的质量分数为20.9%,加工气量为20 000 Nm³/h。在模拟计算中,物性选用RKS方程,压缩机的等熵效率取0.85,机械效率为0.9,系统总的冷损失取20 kW。LNG的进口参数取为3 MPa(作为城市燃气的天然气管输压力)、113 K,出口参数为3 MPa、300 K。2个新流程生产的产品均为:液氮3 000 Nm³/h(0.13 MPa、79.5 K,其质量分数为0.99 999),液氧4 000 Nm³/h(0.15 MPa、92 K,其质量分数为0.999),氮

气 $2\,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ (0.1 MPa 、 282 K , 其质量分数为 $0.99\,999$). 新流程模拟计算结果汇总如表 1 所示. 表中其他能耗指的是辅助设备如分子筛纯化器、冷水机组等的能耗, 根据参考文献[7]选取. 由于本文的方案生产双高纯的液态产品, 为了便于比较液态产品的能耗(包括液氧和液氮), 引入单位液态产品能耗 N 的概念, 它揭示了生产 1 kg 液态产品所要消耗的电能, 按下式计算

$$N = \frac{N_{\text{total}}}{m_{\text{LIN}} + m_{\text{LOX}}} \quad (2)$$

式中: N_{total} 表示系统总能耗; m_{LIN} 表示液氮产品的质量; m_{LOX} 表示液氧产品的质量.

从计算结果可以看出, 2 种新流程与传统的液体流程相比较有明显的改善. 新流程所需循环氮气量大大减少, 系统的最高运行压力分别是 2.6 、 2.3 MPa , 而传统液体流程在 $4.2\sim 5.0\text{ MPa}$ 左右. 从能耗上来看, 与传统的流程约 $1.05\sim 1.25\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$ 相比, 2 种方案均有大幅度的降低, 分别为 0.317 、 $0.384\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$, 而能耗节约的根本原因在于循环气量的减少和最高运行压力的降低. 2 种新方案在产品产量相同的条件下相比, 方案 2 液态产品的能耗高于方案 1, 但方案 1 的循环氮气量和最高压力大于方案 2, 对比之后综合考虑, 2 种新方案适用场合不同, 各具优势, 应根据不同的需要合理选用.

表 1 2 种新方案模拟结果汇总

技术指标	方案 1	方案 2
LNG 用量/ $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$	300	270
循环氮气与空气流量之比	0.687 5	0.615
原料空气消耗的压缩功/ kW	170 4	170 4
循环氮气压缩初始温度/ K	190	167
循环氮气消耗的压缩功/ kW	692	1 330
其他能耗/ kW	600	600
系统最高运行压力/ MPa	2.6	2.3
单位液态产品能耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.317	0.384

在流程模拟的过程中, 对循环氮气压缩机的进口温度和输出压力进行了多次优化设计, 避免了超低温压缩机的选用, 若能够进一步提高循环氮气的进口温度, 利用这部分冷量, 氮气的低温压缩问题将完全解决, 但经过计算由于进口温度的提高, 循环氮气的压缩功将有大幅度的增加, 装置的能耗也将增加.

3 结 论

(1) 空分流程中引进 LNG 冷量不仅有利于冷量的合理利用, 而且有利于空分系统液化率的提高, 以及装置启动时间的缩短, 适用于生产液体产品较

多的场合. LNG 采用液泵加压节省能耗, 而换热压力的提高对空分性能影响较小, 综合考虑后本文建议将 LNG 的气化安排在加压之后进行.

(2) 液体空分流程引进 LNG 冷量后取消了高压氮气压缩机、氮透平膨胀机以及氟利昂制冷机组, 使流程得到简化. 气体空分流程引进 LNG 冷量后在不改变现有设备的基础上添加压缩机、换热器等部件便可生产便于运输的液体产品, 投资费用较少, 能耗也相对较低.

(3) 与传统流程相比, 新流程所需循环氮气量明显减少, 系统最高运行压力从 $4.2\sim 5.0\text{ MPa}$ 降低到了 $2.3\sim 2.6\text{ MPa}$, 液态产品的单位能耗从传统流程的 $1.05\sim 1.25\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$ 降低到 $0.317\sim 0.384\text{ kW}\cdot\text{h/kg}$, 节能效果明显.

参考文献:

- [1] Nagamura T, Yamashita N. Air separating method using external cold source: USA, 5220798[P]. 1993-06-22.
- [2] Nakaiwa M, Akiya T, Owa M, et al. Evaluation of an energy supply system with air separation[J]. Energy Supply System, 1996, 37(3): 295-301.
- [3] 燕娜, 厉彦忠. 液化天然气冷能在空分装置中应用的发展现状和前景[C]//孙国民. 中国工业气体工业协会第十五次会员代表大会暨气体行业发展研讨会论文集. 北京: 中国工业气体工业协会, 2005: 142-146.
- [4] 王强, 厉彦忠, 张朝昌. LNG 汽车冷能回收在低温冷藏车中的应用[J]. 制冷与空调, 2002, 2(6): 38-40.
Wang Qiang, Li Yanzhong, Zhang Chaochang. LNG cold energy recovering and applying in low temperature cold storage vehicle [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2002, 21(6): 38-40.
- [5] 顾安忠, 石玉美, 汪荣顺. 中国液化天然气的发展[J]. 石油化工技术经济, 2004, 19(1): 1-7.
Gu Anzhong, Shi Yumei, Wang Rongshun. The development of China liquefied natural gas [J]. Petrochemical Technique Economy, 2004, 19(1): 1-7.
- [6] 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.
Chen Zeshao, Cheng Wenlong, Hu Peng. A new air separation system by using cold energy of LNG [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(6): 913-916.
- [7] 金滔, 胡建军. 一种利用 LNG 冷能的空分流程[J]. 气体分离, 2005, 5: 15-20.
Jin Tao, Hu Jianjun. An air separation system by using cold energy of LNG [J]. Air Separation, 2005, 5: 15-20.

(编辑 王焕雪)