

LNG 液化工厂工艺流程分析

王 丽 (新地能源工程技术有限公司, 河北 廊坊 065001)

摘 要: 伴随着世界能源的快速发展, 液化天然气技术也在不断进步, 液化天然气工程工艺流程是生产的关键环节。基于此, 本文将对 LNG 液化工厂的天然气液化工艺流程进行探究, 分析天然气液化流程的不同, 以此选择适宜的天然气液化流程, 为我国 LNG 液化工厂工艺选用提供一些建议。

关键词: 液化天然气; 工厂生产; 工艺流程

0 引言

LNG 是通过将常压下气态天然气冷却至 -162°C , 使之凝结成液体。可以节约运输空间, 并且具有热值大、性能高的特点。LNG 能源消费也逐渐引起世界各国的注意, 我国对 LNG 的发展越来越重视, 其地位日益提升。

1 天然气液化的工艺流程

1.1 级联式液化流程

级联式天然气液化流程也被称为复迭式或阶段式, 是利用制冷剂在常压下沸点不同的特点, 逐级降低制冷温度达到天然气液化的目的。常用的制冷剂为水、丙烷、乙烯、甲烷。该液化流程由三级独立的制冷循环组成, 制冷剂分别为丙烷、乙烯、甲烷, 每个制冷循环中均含有三个换热器。正常流程为原料气进入第一级丙烷制冷剂的液化循环系统进行冷却, 冷却温度为 -30°C , 可以为天然气、乙烯和甲烷提供冷量; 之后进入第二级乙烯制冷循环系统冷却, 冷却温度为 -90°C , 为天然气和甲烷提供冷量; 最后进入第三级甲烷制冷循环系统冷却, 冷却温度为 -150°C , 继续为天然气提供冷量, 在通过连续 9 个换热器的冷却后, 天然气的温度逐步降低至液化标准, 经过节流降压完成气液分离。其优点在于换热器之间的温差较小, 降低因温差转变所引发的功耗, 技术也较为成熟, 生产工艺稳定。缺点在于制冷设备和机组较多, 液化流程与相应配置要求较高。现阶段, LNG 液化工厂已经少有采用此生产工艺的了。

1.2 混合制冷剂液化流程

混合制冷剂液化流程即 MRC 是以 $\text{C}_1\sim\text{C}_5$ 的碳氢物及 N_2 等五种以上的多组分的混合制冷剂, 实现逐级的冷凝、蒸发、膨胀, 得到不同温度水平的制冷量, 逐步冷却和液化天然气。混合制冷剂液化流程主要分为四种方式的制冷循环。

第一种是闭式混合制冷剂液化流程, 在闭式液化流程中, 制冷剂循环系统和天然气液化过程分离开来, 各自形成一个独立的制冷循环。制冷剂循环中制冷剂常由 N_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_4H_{10} 、 C_5H_{10} 组成。这些组分都可以从天然气中提取。液化流程中的天然气依次经过四个换热器后, 温度会逐渐降低, 大部分天然气都会液化, 最后节流后在常压下保存, 而闪蒸分离产生的气体可直接利用, 也可回到天然气入口在进行液化^[1]。

第二种是开式混合制冷剂液化流程, 开式液化流程

中, 天然气不仅是制冷剂也是需要液化的对象。原料气经净化处理后, 经压缩机压缩后达到高温、高压状态, 首先用水冷却, 经分离器分离掉重烃, 得到的液体在第一级换热器冷却, 并经节流后, 与返流气混合后为第一级换热器提供一定冷量。第一级分离器分离的气体经第一级换热器冷却后, 进入第二级分离器, 产生的液体在第二级换热器中冷却, 再经过节流后, 与返流气混合为第二级换热器提供冷量。以此类推至第三级分离器和换热器, 直至最后的第四级分离器, 所分离出的液体就可以导入液化天然气储罐储存。

第三种是丙烷预冷混合制冷剂液化流程, 其液化流程主要由混合制冷剂循环和丙烷预冷循环组成, 还包含连接两者的回路。在此液化流程中, 原料气向进入丙烷预冷系统进行预冷, 之后经过混合制冷剂液化系统的逐步冷却循环, 再经节流阀降压, 得到液化天然气。

第四种是双混合制冷剂循环流程, 此循环流程包含两个制冷循环, 都采用混合制冷剂, 即预冷制冷剂压缩机和预冷换热器, 以及深冷制冷剂压缩机和深冷换热器。双混合制冷剂循环流程是以混合制冷剂液化流程为基础, 其循环流程与丙烷预冷循环类似, 主要的区别在于双混合制冷剂循环流程采用高沸点混合制冷剂作为预冷级换热器提供冷源。双混合制冷剂循环能够降低系统生产功率, 增强系统生产能力, 在经济效益上比丙烷预冷混合制冷冷却液化流程更具优势。

1.3 膨胀机制冷液化流程

带膨胀机的液化基本原理是逆克劳德循环制冷, 利用高压制冷剂通过透平膨胀机绝热膨胀实现制冷的流程。气体在膨胀机中膨胀降温的同时能够输出功, 可用于驱动流程中的压缩机。膨胀机制冷液化流程可分为氮气膨胀循环、氮甲烷膨胀循环和天然气膨胀循环三种。

氮气膨胀液化流程较为简单, 造价较低, 适应性强。不过其制冷剂采用的是单组分气体, 能耗比混合制冷剂液化高出 40% 左右。目前多采用二级氮气膨胀液化流程, 经过合理变形, 在原料气经预处理装置预处理后, 进入换热器冷却, 再经过第二级换热器在氮气提塔分离出部分氮气, 最后进入第三级换热器进行冷却, 生成液化天然气。氮气膨胀液化流程的优势在于氮气经过循环压缩后产生的低压氮气可为换热器提供冷量, 并在离开换热器后可以进入下一次循环, 节约一定量制冷消耗。

氮甲烷膨胀液化流程是为了降低膨胀机的功耗用氮气和甲烷的混合气体替代纯氮，与混合制冷剂液化流程相比，流程也较为简单，启动操作方便，并且氮甲烷膨胀液化流程缩小了冷锻换热温差，相比较纯氮膨胀液化流程能够节省 15% 左右的动力消耗。

天然气膨胀液化流程是利用高压天然气在膨胀机中绝热膨胀到输出管道的压力使天然气液化，优点是功耗小、只需对液化天然气部分进行除杂、天然气消耗量更为优化。不过液化流程无法产生氮气膨胀的低温度和液化率，膨胀机受气压和组成变化影响较大^[2]。

2 天然气液化流程比较分析

2.1 天然气液化正常流程比较

LNG 制冷方式在上文已经阐述，而 LNG 的功能主要有事故调峰型和基本负荷型两种，需要通过比较不同的天然气液化流程来确定其适用的领域。

级联式液化流程主要采用九台串联换热器，每台换热器内部温差较小，减少了因温差引起的不可逆损失，从而降低了系统的功耗比。在实际应用中压缩级数是影响级联式液化流程的主要原因之一，级数多就会造成初期投资成本大，后期功耗低、运行费用小；而级数少则是初投资成本低，但后续功耗大、运行费用高。综合考虑初期投资费用、运行费用等多方面因素。可以明确级联式液化流程更适用运用于基本负荷型液化装置，并在级联基础工艺上不断进行优化改进，提高级联式液化流程的经济效益^[3]。

混合制冷剂液化流程的优点是机组设备少、流程简单、投资费用比正常级联式液化流程低 15%~20%，工厂生产管理方便，混合制冷剂组分可以部分或全部从天然气本身提取与补充。缺点是能耗较高，组分配比具有难度。国际上如壳牌、挪威国家石油公司、美国气体化工产品公司都对混合制冷剂液化流程进行了优化，使其在基本负荷型天然气液化装置有着广泛应用。

膨胀机的液化流程简单、工作可靠，易启动、易操作、维护方便。若采用天然气本身作为冷剂能够节省生产、运输、储存的费用。不过其缺点是原料气需要深度干燥、回流压力低、换热面积大，设备投入量大，并且液化率较低，如果采用循环方式，会大幅增加功耗。因此，带膨胀机的液化流程特别适用于液化能力小的调峰型天然气液化装置，操作简便，投资适中的优点使其在工艺技术上有多重选择。

2.2 原料气组分对液化流程影响比较

一般情况下，天然气本身由多种烃类组成，其中甲烷占比最多，还含有少量非烃气体。当其中某一组分发生变化时，其他组分的增减也会对液化流程产生一定影响。以天然气中含量较多的甲烷和乙烷为例，原料气在压力 4.5MPa，温度 35℃，LNG 存储压力为 1.12MPa 的条件下，分析原料气组分中甲烷变化对流程功耗、制冷剂使用量以及冷却水液化率的影响。当原料气中甲烷含量增加时，功耗、制冷剂使用量以及冷却水液化率均有

明显上升，这是因为天然气甲烷含量增加，低沸点组分的含量也有所增加，在相同的工艺流程下天然气更不容易被液化。这就表明若要产生相同的液化天然气，需要更多的天然气，也就导致制冷剂和功耗的上升。其中低温区 CH₄ 和 N₂ 含量将有所增加，而中温区和高温区主要由 C₂H₆、C₃H₈ 和 C₄H₁₀ 组成。因此，可以通过降低 C₂H₆ 和 C₃H₈ 的组分含量，促使原料气液化率升高，来优化制冷效率，为工程应用提供更多经济效益。

2.3 原料气温度对液化流程影响比较

在固定原料气液化量以及液化率在 97% 以上的生产条件下，原料气温度上升时，需要的冷量也会逐渐增多。

表 1 原料气温度与冷却负荷变化

原料气温度	冷却负荷 kJ/h	差值	百分率
25	26198626.59	158990.948	0.006068
31	26675256.17	158682.920	0.005948
39	27309637.69	158499.769	0.005803
43	27626627.62	158493.858	0.005736

在温度升高 18℃ 时，总制冷负荷提高 5% 左右。依然在原料气压力 4.5MPa，LNG 存储压力为 1.12MPa 的条件下，当原料气温度提高后，工艺流程功耗、制冷剂使用量、冷却水负荷均呈现增大趋势。而且当入口天然气温度增加时，入口天然气焓值也会增加，导致液化流程进出口天然气的焓值差变大，致使液化所需冷量增大，而冷量是由制冷剂循环提供的，当换热器保持不变，制冷剂使用量就会提升，导致整个液化系统不可逆性增大，液化流程总功耗增加。

3 结论

LNG 产业在世界能源需求不断增长的背景下，已经进入了快速发展的时期，需对 LNG 液化工艺技术进行充分了解，分析工厂工艺技术的优缺点和使用情况，根据市场需求，选择合适的工艺流程有助于降低生产过程中的资源消耗，提升 LNG 液化系统功效，提高企业经济效益，促进 LNG 液化工厂工艺流程的进步发展。

参考文献：

- [1] 郭琦, 赵小平, 贺炳成, 等. 混合制冷剂循环液化工艺能耗优化研究 [J]. 能源化工, 2019, 40(06): 63-69.
- [2] 沈晓谋, 马维新. 关于混合制冷剂循环液化天然气工艺的研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2019(10): 183-184.
- [3] 孙冲, 李雅娴, 赵怡斐, 等. 高含氮天然气液化工艺的研究与优化 [J]. 化学工程, 2020, 48(12): 62-67+72.

作者简介：

王丽 (1982-), 女, 汉族, 河北沧州人, 中级, 硕士, 研究方向: 机械电子。