

Process design of a natural gas liquefaction plant

Xueming Gao

National Pipeline Network Group Guangdong East Liquefied Natural Gas Co., Ltd., Jieyang, Guangdong, 515200, China

Abstract

Natural gas is one of the non-renewable mineral resources with abundant reserves worldwide, featuring advantages in reserves and low-pollution emission during utilization, and it is a widely applied energy type in China at the current stage. As a high-quality clean energy source, natural gas plays a crucial role in the development of the national economy. Based on its physical properties, natural gas can significantly improve transportation efficiency and reduce transportation costs after liquefaction treatment; thus, LNG liquefaction technology has become a core technical direction in the field of natural gas development and utilization. This paper conducts research focusing on the process flow of natural gas liquefaction plants, sorts out three mainstream types of natural gas liquefaction technologies at home and abroad, and conducts an in-depth analysis of the technical details and application key points of the mixed refrigerant liquefaction process, aiming to provide references for relevant engineering practices.

Keywords

Natural gas; LNG; Liquefaction technology; Mixed refrigerant; Technological process; Safety control

某天然气液化工厂的工艺设计

高学明

国家管网集团粤东液化天然气有限责任公司, 中国·广东 揭阳 515200

摘要

天然气是全球储量丰富的不可再生矿产资源之一,兼具储量优势与低污染排放的使用特性,是我国现阶段应用广泛的能源类型。作为优质清洁能源,天然气在国民经济发展中占据关键地位。基于其物理特性,天然气经液化处理后可大幅提升运输效率、降低运输成本,LNG液化技术也因此成为天然气开发利用领域的核心技术方向。本文围绕天然气液化工厂的工艺流程展开研究,梳理了当前国内外主流的三类天然气液化技术,并针对混合制冷剂液化流程的技术细节与应用要点进行深度剖析,旨在为相关工程实践提供参考。

关键词

天然气; LNG; 液化技术; 混合制冷剂; 工艺流程; 安全管控

1 引言

液化天然气(LNG)是将气田开采的天然气经净化处理后,通过超低温冷却工艺转化为常压液态的天然气产品,凭借清洁环保的特性,被视为现阶段最具发展潜力的化石能源之一。LNG的开发与利用不仅能缓解能源结构转型压力,还能推动天然气资源的跨区域调配,对能源安全保障具有重要意义。

2 液化天然气概况

在标准大气压下,天然气需被冷却至约 -163°C 才能实现液化。LNG的主要成分为甲烷,具备无色、无味、无毒且无腐蚀性的特性,其液态体积仅为同量气态天然气的

的1/625,质量约为同体积水的45%。不同液化工厂生产的LNG组分存在差异,依据《GB/T38753-2020 液化天然气》的分类标准,可根据甲烷含量和高位发热量将其划分为贫液类、常规类和富液类。

全球天然气资源分布的不均衡性、LNG技术的持续进步与成本下降,以及贸易模式的多元化发展,推动了LNG的全球化贸易进程,其在天然气国际贸易中的占比逐年提升。随着中国等新兴市场对LNG需求的增长,全球LNG产业呈现出持续扩张的态势。正如顾安忠主编的《液化天然气技术手册(第二版)》中所述,LNG产业的发展不仅依赖资源禀赋,更得益于液化、储运技术的突破,这为天然气的大规模跨区域输送奠定了技术基础。

3 天然气液化原理

天然气液化所需冷量的制取主要依托两类技术路径:气体膨胀制冷与相变制冷。气体膨胀制冷是利用高压气体通过节流阀或膨胀机进行绝热膨胀,借助压力降低实现温度下

【作者简介】高学明(1992-),男,中国河北南宫人,本科,工程师,从事油气储运、天然气液化工艺与优化设计研究。

降,从而获取冷量;相变制冷则是利用制冷剂在相变过程中的吸热效应产生冷量,常见形式包括蒸汽压缩式、蒸汽喷射式与吸收式制冷^[1]。工业实际应用中,天然气液化工艺通常会结合这两类制冷方式的特点,以实现冷量制取的效率最大化。

4 天然气液化技术

4.1 级联式液化流程

级联式液化流程也被称为阶式、复叠式或串联蒸发冷凝液化流程,因能耗低、技术成熟的特点,成为早期基地型 LNG 工厂的主流工艺。该流程采用三级压缩制冷系统,逐级为天然气液化提供冷量,各级分别使用丙烷(常压沸点 -42.3°C)、乙烯(常压沸点 -104°C)和甲烷(常压沸点 -162°C)作为制冷剂,且每个制冷循环配备三台换热器。

级联式液化流程由丙烷、乙烯、甲烷三个密闭的纯烃制冷剂循环构成,其中丙烷循环为天然气、乙烯和甲烷提供冷量,乙烯循环为天然气和甲烷降温,甲烷循环则直接为天然气液化提供深冷量。该工艺的优势在于能耗低、制冷剂为纯物质无需配比、技术成熟稳定;缺点是机组数量多、工艺流程复杂,附属设备与控制系统的维护难度较大。

4.2 膨胀机制冷液化流程

4.2.1 天然气膨胀机制冷液化流程

天然气膨胀液化流程又称开式膨胀机循环,其核心原理是利用原料气管道中的高压天然气,在膨胀机内进行等熵膨胀产生低温冷量,进而对另一股天然气实现液化,膨胀后的低压天然气则送入低压管网供应用户^[2]。

该流程的优点是工艺简单、调节灵活、运行可靠性高,且以天然气自身为制冷介质,省去了制冷剂的生产、运输成本;缺点是原料气需深度干燥处理,回流压力低导致换热面积需求大、设备投资高,同时液化率受低压用户规模限制,若采用循环压缩则会大幅增加能耗。

4.2.2 氮膨胀机制冷液化流程

氮膨胀液化流程又称闭式膨胀机循环,以氮气或氮-甲烷混合物为制冷介质,通过透平膨胀机的绝热膨胀实现冷量制取,适用于中小规模的调峰型 LNG 工厂^[3]。

4.3 混合制冷剂液化流程

混合制冷剂循环(MRC)是天然气液化领域的主流技术,其核心特点体现在以下方面:

- (1) 采用多组分混合制冷剂,仅需一台循环压缩机,相较于级联式流程大幅降低了设备投资;
- (2) 制冷循环的加热曲线可与天然气的冷却曲线高度匹配,有效减少制冷功率消耗;
- (3) 集成式 MRC 主换热器的应用,降低了设备成本与制造难度;
- (4) 节流阀降压可减少 LNG 蒸发损失,压缩机级间分离器则能降低压缩功耗^[4]。

顾安忠在《液化天然气技术手册(第二版)》中指出,

混合制冷剂的组分配比是 MRC 流程的关键,合理的配比可使制冷效率提升 15%-20%,同时减少设备的占地面积与运行能耗^[5]。

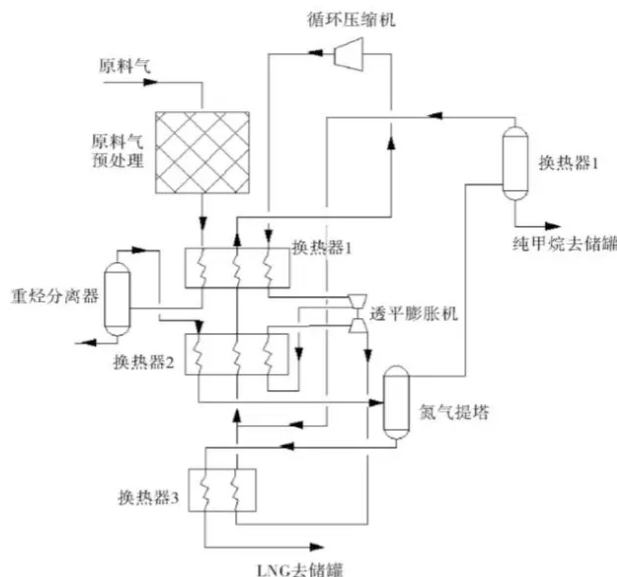


图1 氮膨胀机液化流程图

5 天然气液化厂工艺流程

5.1 液化天然气的主要生产流程

天然气从气田开采后,经集输系统送至液化工厂,依次完成脱水、脱重烃、脱 CO_2 和 H_2S 等净化处理,再进入液化装置转化为 LNG,最终储存于储罐并通过槽车输送至下游用户。LNG 工厂的核心单元包括原料气净化、天然气液化、LNG 储存与装卸,其中 MRC 液化流程因经济性与效率优势,成为当前工程应用的首选^[6]。

5.2 天然气的预处理

原料天然气中含有的水分、硫化物、二氧化碳、重烃和汞等杂质,在低温条件下易造成设备堵塞或腐蚀,因此液化前的净化处理至关重要。预处理的主要目标包括:满足 LNG 产品质量规范、防止低温设备堵塞、避免设备腐蚀与磨蚀^[7]。

预处理工艺路线为:原料气经调压计量与气水分离后,由压缩机增压,再通过 MDEA 溶液吸收塔脱除 CO_2 和 H_2S ;净化后的天然气进入分子筛干燥器,采用 4A 专用分子筛脱除水分,随后经干粉过滤器去除粉尘,再通过活性炭纯化器脱除芳香烃,并利用浸硫煤基活性炭吸附脱汞,最终进入 MRC 液化系统^[8]。

5.3 天然气液化工艺流程

5.3.1 天然气低温液化单元

该单元是 MRC 流程的核心,天然气经增压过滤后从冷箱顶部进入,初冷至 -98°C 后送入脱氮塔提纯,脱氮后的天然气在换热器中冷却至 -162°C 形成液态 LNG,经节流减压后送入储罐储存。混合冷剂则分气液两相进入冷箱,液相

节流后为冷箱提供初级冷量,气相深冷后为系统提供深级冷量,复温后的制冷剂返回压缩机循环使用^[11]。

5.3.2 混合冷剂压缩单元

常温状态的混合冷剂经往复式压缩机两级压缩,每级压缩后均通过冷却器与分离器处理,最终气液两相分别送至冷箱顶部,经两级节流后为系统供冷,完成制冷循环后返回冷剂配制罐^[9]。

5.3.3 冷剂储存和配制单元

MRC 流程采用氮气、甲烷、乙烯、丙烷、异戊烷作为混合冷剂,其中氮气来自公用工程系统,甲烷取自原料气,其余冷剂外购储存。首次开车时,按氮气 8%、甲烷 31%、乙烯 29%、丙烷 16%、异戊烷 16% 的比例配制冷剂;运行中需实时监控冷剂组分,及时补充泄漏的冷剂^[13]。

5.3.4 循环水单元

循环水系统分为内、外循环,内循环为 BOG 再液化装置提供冷却水,外循环通过闭式凉水塔为内循环水降温,补水均来自公用工程系统,保障整个液化装置的冷却需求^[10]。

6 液化天然气储存

6.1 液化天然气储存的主要方式

在 LNG 接收站、调峰型 LNG 工厂和基地型 LNG 生产厂与 LNG 运输过程中,LNG 储存是不可或缺的重要环节。LNG 的路上储存采用 LNG 储罐进行储存^[4]。陆上 LNG 储罐按照最高工作压力可划分为常压储罐和压力储罐,按照放置位置可分为地上 LNG 储罐、半地下 LNG 储罐、地下 LNG 储罐和地下洞穴 LNG 储罐。LNG 储罐形式的选择取决于投资费用、安全因素、工厂位置、地震、土壤沉降、外来侵略和设备、材料等诸多因素。

6.2 液化天然气安全储存的基本要求

首先,储罐及附属设备设施材料应具有良好的耐低温深冷性能,且能满足常温至-162℃的温度范围内的强度要求。材料应具有良好的低温韧性,热膨胀系数小,能保证罐体在任何情况下均不会出现渗漏和破损。LNG 接收站的特大型 LNG 储罐常用 9% 镍钢作为内罐材料。其次,LNG 低温特性对 LNG 储罐的绝热要求极高。储罐必须具有良好的保冷性能,保冷材料应使用热的不良导体。目前国内常见的特大型 LNG 储罐内罐与外罐之间的环形空间均采用珍珠岩填充,吊顶用玻璃棉毡覆盖保冷。

6.3 液化天然气储罐的压力控制

常见的控制储罐压力的方式有以下几种:

(1) 设置处理蒸发气的配套设施,由压缩机抽出输送至处理装置进行处理,以保证罐内压力在正常范围内。

(2) 设置火炬,在蒸发气处理装置满负荷后仍无法控制罐内压力或出现火灾等情况时,可将罐内蒸发气通过火炬燃烧排放。

(3) 根据储罐容积计算并设置相应能力的压力安全阀和真空安全阀,以防止储罐超压和负压。

(4) 设置补气管线,当罐内压力低于操作压力时,可通过高压天然气或氮气对储罐进行补气,以防止储罐出现负压。

6.4 液化天然气储罐的安全保护措施

(1) 在储罐四周设置消防栓、消防炮、雨淋阀等消防水灭火设备设施,且要保证消防设备的出水量足以吸收罐体的辐射热量,以保证罐体不受损坏。

(2) 在已发生泄露、火灾等紧急情况的位置设置火气探头,以检测 LNG 泄露和火灾等情况。同时,火气探头应自动连锁触发消防设施。

(3) 在储罐四周设置 LNG 收集沟、收集池,并在收集沟上方设置低温报警温度探头,在收集池设置泡沫发生器,以保证 LNG 发生泄漏可检测且不会蔓延,收集后可覆盖,防止爆炸混合气体扩散。

(4) 储罐外壳可设置防火层,以延缓关闭温蒂和罐内压力上升,在火灾发生时对罐体提供保护,但成本较高,保护程度有限。

7 结语

我国 LNG 产业目前面临工业化应用经验不足、大型液化技术与装备国产化程度低等问题,制约了产业的快速发展。未来需聚焦天然气液化技术的自主创新,突破全产业链关键技术瓶颈,研发具有自主知识产权的核心设备。目前我国在低温技术装备领域已取得一定进展,后续需进一步推动技术成果的工程化应用,构建完整的 LNG 技术体系,助力能源结构转型与天然气产业高质量发展。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会《GB/T38753-2020液化天然气》[S].中国标准出版社,2020.4.28
- [2] 顾安忠,白改玲《液化天然气技术手册(第二版)》[M].机械工业出版社,2019
- [3] 敬加强,梁光川,蒋宏业《液化天然气技术问答》[M].化学工业出版社,2006
- [4] 张懿君,程玉排《LNG工厂的工艺设计探讨》[J].煤气与热力,2011,31(10):1-5
- [5] 郝文生,史少博,周丹,等,《LNG液化、气化工艺装置的选择》[J].中国化工装备,2017,19(2):30-33
- [6] 郭彦鑫《天然气液化技术与应用研究》[D].西安石油大学,2011
- [7] 李佩铭《丙烷预冷混合制冷剂循环液化天然气热力过程的数值模拟》[D].哈尔滨工业大学,2007
- [8] 宗辉《LNG工厂的工艺设计探讨》[J].现代商贸工业,2017,38(30):187-188
- [9] 王勇《丙烷制冷系统优化运行及节能改造研究》[D].大庆:大庆石油学院,2010
- [10] 韩昊亮,齐彦昌,彭云,等《LNG储罐用焊条不同烘干温度对焊后熔敷金属成分组织性能的影响》[J].焊接技术,2020,49(12):1-5