

天然气液化装置工艺流程及设备特点分析

李 简

(国家管网集团工程技术创新有限公司 天津滨海 300450)

摘 要: 国内天然气液化装置的不断投用, 为社会提供了更多优质的液化天然气的同时, 也推进了国内天然气液化技术的发展。本文结合国内广泛应用天然气液化技术, 对液化工艺流程、装置特点及关键设备特点进行分析总结, 以便更好的理解液化工艺发展状况及技术, 也为研究新型的天然气液化装置提供一定的价值及意义。

关键词: 天然气; 液化装置; 工艺流程; 设备特点

Analysis of process flow and equipment characteristics of natural gas liquefaction unit

Li Jian

(PipeChina Engineering Technology Innovation Co., Ltd; Tianjin Binhai 300450, China)

Abstract: The continuous use of natural gas liquefaction devices not only provides society with more high-quality liquefied natural gas, but also promotes the development of natural gas liquefaction technology. This article combines the widely used natural gas liquefaction technology in China to analyze and summarize the liquefaction process, device characteristics, and key equipment characteristics, in order to better understand the development status and technology of liquefaction technology, and also has provided value and significance for researching new natural gas liquefaction devices.

Key words: Natural gas; Liquefaction device; Process flow; Equipment characteristics

前言: LNG(Liquefied natural gas)是将天然气经净化处理(脱碳、脱水、脱汞、脱烃等)处理后, 深冷至-162℃而成的低温液体。LNG主要成分为甲烷和少量的乙烷、丙烷、丁烷、戊烷、己烷等重质碳氢化合物和少量的氮气、氧气、二氧化碳和硫化物, 其组分满足GB38753《液化天然气》要求。国内用于LNG液化工厂的原料气包括常规气田气、油田伴生气、煤层气、页岩气、煤制气等, 根据地质形成条件的不同, 天然气的具体组成有所不同。

LNG于19世纪首次由迈克尔·法拉第在实验室制备, 于20世纪末期得到大规模商业化使用, 并于21世纪初期陆续建成SEGAS、Gorgon、Yamal、Cove Point、Qatar等500万吨/年产能的大型液化装置。相比国际LNG行业进程, 国内LNG行业起步较晚, 但自2010年来, 中国LNG产能保持了高速增长, 主要集中在2011年至2015年之间, 年均增速在50%以上。

国内LNG液化工厂特点表现为数量多, 但单厂产能低。截至2022年底, 全国已建液化工厂约300座, 产能主要以20万吨/年以下, 总产能超过3500万吨/年。根据产能规模, 国内LNG装置通常选用混合制冷剂制冷工艺。本文以国内LNG液化装置常用的混合制冷剂制冷工艺为分析对象, 对其工艺流程及设备特点介绍。

一、天然气液化装置总体工艺流程

天然气液化装置总体工艺流程包括天然气预处理、深冷液化、LNG储存和装车^[1]。

通常进入净化装置的原料气, 通过过滤器除去原料气中携带的粉尘、油滴后, 进入脱酸单元, 脱除天然气中酸性气体, 如二氧化碳、硫化氢; 再进入分子筛脱水单元, 将水含量控制在不会导致深冷设备发生冻堵的指标; 然后进入脱汞塔, 脱除气体中可能存在的汞。

表1列出了满足液化要求的净化气中杂质组分的最大允许含量^[2]。

表1 净化气质量要求

杂质组分	允许含量	杂质组分	允许含量
H ₂ O	<0.8ppm*	总硫	10 ~ 50 mg/m ³
SO ₂ 、CO ₂	50ppm	汞	< 0.01 μg/m ³
COS	< 0.1 ppm	H ₂ S	3.5 mg/m ³
芳烃类	1~10 ppm	重烃	< 70 mg/m ³
新戊烷	<5 ppm	环己烷	1~10 ppm

*具体根据天然气组分凝固点计算确定。

净化气进入液化装置, 逐步冷却至-162℃后, 经节流阀节流后进入LNG储罐储存。LNG通过LNG槽车外运。典型液化装置总体流程框图如图1。



图1 液化装置总体工艺流程框图

(一) 预处理系统

预处理的目的在于脱除原料天然气中的二氧化碳、硫化物、水和汞等杂质, 对于重烃含量高的天然气还需考虑重烃的脱除; 以防止二氧化碳、水、重烃在低温系统堵塞设备, 防止硫化物和汞腐蚀设备^[3]。

脱酸工艺一般可分为化学溶剂法、物理溶剂法、化学-物理溶剂法、直接转化法等, 其中醇胺法是LNG液化工厂中最常用的天然气脱硫脱碳方法。当原料气中同时还有少量硫化氢时, 可在脱碳过程中一并脱除, 并在胺液再生阶段对排放气中的硫化氢进行吸附脱除, 防止排放过程中对环境造成污染。干法(固体床)是常用的排放气脱硫方法。醇胺法中MDEA脱酸目前应用最为广泛, MDEA脱酸包括酸性气体吸附脱除和MDEA再生两部分。

干法脱硫技术主要用于低含硫气体处理,代表性的方法包括活性炭法、氧化锌法、氧化铁法等。由于干法脱硫技术通常不可再生,因此对于含硫量较高的天然气,特别是含有较多二氧化硫的天然气需单独设置碱洗脱硫装置。

LNG 液化工厂对脱水深度要求较高,液厂主要采用分子筛进行脱水。常用的分子筛有 3A、4A、13X 分子筛。分子筛填料的选择主要根据原料气中组分进行确定。

脱汞工艺以固体吸附脱除工艺为主,其填料可选载硫活性炭或氧化铝载体吸附剂,填料的选择主要根据使用压力和原料气组分进行确定。

(二) 深冷液化系统

目前世界上通用的基本液化工艺方法有:级联式(阶式)制冷循环、混合制冷剂循环、膨胀机制冷循环^[4]。阶式制冷循环是由若干个不同低温下操作的制冷循环复迭组成;一般由 C₃H₈、C₂H₆(或 C₂H₄)和 CH₄三个制冷循环复迭而成,来提供液化所需的冷量。混合制冷剂循环是利用多组分混合制冷剂,进行逐级冷凝、蒸发、节流膨胀得到不同温度水平的制冷量,以达到逐步冷却和液化天然气的目的;混合制冷剂根据要液化的天然气组分而配制的,经充分混合,内有 N₂、C1~C5 碳氢化合物。透平膨胀制冷循环是利用高压制冷剂通过透平膨胀机绝热膨胀的克劳德循环制冷实现天然气液化的流程。根据国内液厂规模,国内主流的液化工艺为单循环混合制冷工艺(SMR)。

天然气自净化系统而来,经过冷箱或绕管式换热器,由混合制冷剂中的重组份(C3~C5)将天然气温度冷却至-55~-40℃;随后由混合制冷剂中的中组份(C1~C2)将天然气温度冷却至-125~-115℃,最后由混合制冷剂中的轻组份(N₂、CH₄)将 LNG 进行过冷约-162℃,进入 LNG 储罐内储罐。

单循环混合制冷工艺(SMR)相比阶式制冷循环流程简单,投资低,在制冷循环中由一台压缩机压缩节流提供冷源。但混合制冷剂的组成比例需根据原料气的组成、压力进行设计。运行过程中合适的制冷剂配比更有利于节能,因此运行过程中对制冷剂的配比要求较严格,但实际运行过程中,原料气组分变化及压力持续波动,频繁调整制冷剂组分不具备可操作性,因此运行中难以始终保持最优制冷剂的配比。针对该问题,混合制冷工艺通常采用分段液化,以使液化过程的熵增降至最小。

(三) LNG 储存和装车系统

LNG 存储通常采用常压储罐,按容器结构可分为单容、双容、全容、薄膜罐、地下罐等,均在国内外液化工厂有应用,其中最常用的为全容罐。装车系统主要采用智能装车橇完成。

二、天然气液化装置设备特点

LNG 液化装置主要特点表现在工艺流程复杂、安全等级高、设备类型多、敏感管道多等特点。

(一) 工艺流程复杂

LNG 液化工厂通常包括过滤计量、脱汞、脱碳、脱水、液化、制冷剂循环、制冷剂补充、BOG 压缩、LNG 储存与装车等单元。各单元之间相互关联,形成复杂的工艺系统。

(二) 安全等级要求高

LNG 液化工厂中储罐的内 LNG 的存量超过危险临界值,根据《危险化学品重大危险源监督暂行规定》分析,构成一级危险化学品重大危险源,属于危化重点监管工程。需结合 HAZOP、LOPA 分析、QRA、SIL 评估等进行危险辨识、安全回路确认及安全等级计算,引入独立的多层级保护理念,提高仪控自控水平等方式提供液

厂整体安全等级。

(三) 设备类型多

LNG 液化工厂的设备数量通常超过 100 台套,典型设备包括剂循环压缩机、循环泵、换热器、空冷器、塔器、分离器、储罐、阀门等。对设备选型、配管安装、运维管理均提出较高要求。

(四) 敏感管道多

LNG 液化工厂中低温、高温、多相流、高压与振动等类型管道较多,工况复杂,对选材、应力分析提出较高要求。

三、LNG 装置关键设备特点

LNG 液化工厂中核心关键设备包括混合制冷剂压缩机和冷箱。

(一) 混合制冷剂压缩机

混合制冷剂压缩机是 LNG 液化工厂中能耗最大的动设备,在制冷过程中起到关键作用,压缩机与冷箱的匹配程度决定着产品质量和液化能耗,因此压缩机的选型须本着安全、可靠和经济的原则。

LNG 液化工厂中混合制冷剂压缩机可根据不同的液化规模选择离心压缩机、往复压缩机或螺杆压缩机。离心压缩机主要用于大中型液化装置,对于小型液化装置可选用往复压缩机或螺杆压缩机,但往复压缩机因其制冷剂泄漏量大,运行成本高而被应用为混合制冷剂压缩机较少。目前国内撬装式小型天然气液化装置,以螺杆压缩机为主。

离心压缩机用在液化装置中具有单机处理量大、结构简单、制造方便、尺寸小、运行可靠性高、维修工作量小、排压高等优点。但存在流量、压力波动对机组的效率影响较大、低流量下易发生喘振工况的缺点。

螺杆压缩机用在液化装置中具有适应性强、结构简单、制造方便、可靠性高、尺寸小、便于撬装等优点。但存在排压低的缺点。

(二) 冷箱

用于天然气液化的冷箱可以选用铝制板式换热器或绕管式换热器。

国内板式换热器的制造技术较为成熟,单套设备可满足 100 万方/天的天然气液化量,处理气量较大时需多台板式冷箱并联运行。板式换热器具有结构紧凑、质量轻、传热效率高、国内供货商多、安装方面等优点,国内小型装置的液化工厂都用板式换热器。绕管式换热器具有安全性高、承压高、单台设备处理量大、操作弹性大等优点,主要用于大型 LNG 液化装置。

结论:随着液化天然气行业的不断发展,各工艺包供货商研发并应用了多种液化技术。国外以大型液化工厂为主,国内受气源及进口 LNG 影响,液化工厂呈现中小型化、多点布局的特点。本文针对国内液化工厂普遍应用的混合制冷液化技术进行总结,介绍了液化工厂中常用的脱碳工艺、脱水工艺、脱汞、SMR 液化工艺技术,以及液化装置和关键核心设备的特点,有助更好的理解液化工艺发展状况及技术,更好的对液化工艺技术进行改进,也为大型液化工厂的研究提供技术参考。

参考文献:

- [1]张欢,周姿潼,李简. LNG 装置液化工艺技术研究[J]. 化工管理,2015(28):204-205.
- [2]顾安忠,鲁雪生,王荣顺,等. 液化天然气技术[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [3]刘英波. 液化天然气装置净化与液化工艺关键技术研究[J]. 当代化工,2016,45(11):2593-2595.
- [4]白江涛. 浅析液化天然气工厂的生产装置及工艺技术[J]. 化工管理,2018,(31).