BOG 控制、回收工艺的研究与分析

夏海龙 张福忠 谢淑贤 崔旭 (山东中车同力钢构有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 在 LNG 储运过程中 BOG 处理工艺不同, 本文重点研究 LNG 船舶、LNG 接收站和 LNG 罐箱的 BOG 处理工艺, 对 BOG 控制、回收进行研究和分析, 以提高 LNG 产业的经济效益, 解决 LNG 储运过程中的安全性、节能环保、供销气差率差等问题。

关键词: LNG 储运; BOG; 安全; 节能环保

0 引言

自 21 世纪以来, 我国 LNG 进口量逐年增加, 并在国家“十二五”规划和“十三五”规划的推动下, 我国已经形成完整的 LNG 产业链, 至 2020 年“西气东输”管路铺设相对完善, 并在 LNG 需求量较高的沿海地区建立了很多大型 LNG 接收站。

目前在罐箱设计制造、交通运输组织、接收站设施、应急预案等方面已有较多经验, LNG 接收站、LNG 船舶、LNG 罐箱、LNG 槽车等储运工具已批量投入使用^[1]。LNG 槽车用于公路运输, 但安全性、机动性、可靠性较差, 行业内较为提倡 LNG 罐箱多式联运, 用于铁路、海路、公路运输。

LNG 物理性质特殊, 对运输、储存、装卸条件要求相对较高。例如在 LNG 装卸时存在储罐体积和压力变化、储罐和管路漏热等问题, 即使在绝热措施良好的情况下也不可避免的产生蒸发气 (BOG), 若处理不当, 不仅产生安全隐患, 还造成经济损失和环境污染。目前工艺可以将大部分 BOG 处理再回收, 但仍有一部分 BOG 直接排进大气, 而甲烷是一种温室效应很强的气体, 其温室效应系数为二氧化碳的 21 倍, 所以 BOG 的正确处理对 LNG 产业的发展至关重要^[2], 目前我国 BOG 控制与回收工艺研发相对成熟, 但是核心技术仍有发展空间, 因此亟需在工艺设计、过程控制等方面进一步加强研究, 提高我国在该领域的核心竞争力。

1 LNG 船舶的 BOG 处理工艺

LNG 船舶是将 LNG 从液化厂运输到接收站的专用工具, 有“海上超级冷库”之称, 若其容量为 10 万 m³, 静态蒸发率为 0.1%, 其 BOG 的产生量也相当可观, 目前 LNG 船处理 BOG 方式有以下三种:

①燃烧, 主要是指将蒸发气在气体燃烧装置中做燃烧处理, 或将蒸发气升温处理后作为燃料, 产生蒸汽推动船舶动力装置运转, 减少环境污染和资源浪费;

②放空, 主要是指将燃烧和再液化处理不完的蒸发气排放到大气, 这种处理方式通常是蒸发量增大使液货舱内气体压力大于安全阀整定压力, 安全阀打开, 多余的 BOG 被排入大气;

③再液化, 主要是指将产生的 BOG 进行压缩和再

冷凝处理, 处理后的 BOG 被送回液货舱内, 使液货舱内部的压力和温度保持稳定, 是目前最为科学经济的处理方式^[3]。

2 LNG 船舶的 BOG 处理系统

LNG 船使用的再液化系统主要由以下几种设备组成: 气体压缩机、换热器、制冷机、冷凝器、气体分离器等组成, 根据 BOG 的液化程度再液化装置可分为全部再液化、自持式再液化和部分再液化。

气体压缩工艺可分为单级压缩直接制冷循环、两级压缩直接制冷循环、复叠式直接制冷循环三种, 复叠式直接制冷循环受环境温度影响较小, 能获得较低的制冷温度, 根据 LNG 的低温特性, 复叠式制冷循环更适用于 LNG 船舶的 BOG 控制系统。

本文主要介绍复叠式制冷循环体系, 选用丙烯为制冷剂, 该体系由两个闭式制冷循环和一开式 BOG 制冷循环组成, 制冷剂分别为丙烯和混合制冷剂, 循环过程分别为:

①丙烯循环, 制冷剂经压缩机压缩后, 由海水换热器降温, 一部分经节流阀继续降温作为制冷剂, 另一部分被降温后冷凝在换热器中为另外两个循环提供预冷, 丙烯制冷剂经换热后汇合进入下一轮循环;

②混合剂制冷循环, 混合气体经压缩后由海水换热器、丙烯换热器等进行逐级降温直至液化, 为多股流换热器和混合制冷剂换热器提供冷量, 最后两部分汇合返回压缩机进入下一轮循环;

③ BOG 制冷循环, 液货舱内产生的 BOG 自身温度相对较低, 流经回热器为制冷剂提供预冷量, 后经压缩, 高温 BOG 被送往海水换热器进行降温, 降温后由丙烯换热器和深冷换热器逐步预冷、深冷处理, 最后被再液化的 BOG 返回 LNG 液货舱。

3 LNG 接收站的 BOG 处理工艺

BOG 处理工艺的主要目的是减少 LNG 损失, 维持储罐的工作压力在一个正常范围内。热量变化是产生 BOG 产生的主要原因, 接收站的热量主要来自两部分, 一是外界热量进入接收站的低温系统, 二是设备正常运行期间自身产生的热量输入。其中主要原因是外界热渗入或能量输入, 如机械泵运转、外界热量的导入、环境

的影响、LNG 注入储罐时造成罐内 LNG 体积气相容积的变化,以及装车、装船作业过程中的蒸气产生与返回等^[4]。产生的 BOG 最终在接收站的 LNG 储罐中聚集,需要通过 BOG 控制与回收系统进行处理,以保证 LNG 储罐的正常运行。下面以某 LNG 接收站为例,来介绍 BOG 回收控制与回收系统。

BOG 回收控制与回收系统的主要设备组成为:BOG 压缩机、BOG 压缩机入口分液罐、低压排放罐、BOG 直接回收系统成套包、再冷凝器、BOG 减温器。

目前处理蒸发气总管内收集的蒸发气主要由三种方式:

- ①送回 LNG 船以保持 LNG 液货舱内的操作压力;
- ②送至 BOG 压缩机,经压缩后输送到再冷凝器冷凝;
- ③在接收站运行初期可以经 BOG 压缩机及直接回收系统成套包相继加压后直接外输,这种情况通常外输量小,没有足够的 LNG 来冷凝回收产生的 BOG,此时主要通过此方法回收 BOG。

接收站 BOG 控制系统主要通过 BOG 压缩机和再冷凝器来处理蒸发气。压缩机通过逐级调节压缩机的压缩能力来实现流量控制,其压缩能力主要是通过储罐的压力来调节。为防止压缩机进出口部分温度过高的情况,可输送适量气体到压缩机前的 BOG 减温器对 BOG 进行降温,而后再输入压缩机。从在压缩机的吸入管线温度高于 -95°C 和较低负荷下运行的工况下都能正常工作。经减温器处理后的 LNG 先到入口分液罐中分离,分离后排入低压排放罐,当液位达到一定高度后,用氮气把 LNG 压送到 LNG 低压排放总管。

BOG 压缩机操作模式可分为自动控制和手动控制两种。在自动操作模式下,通过一个总的压力控制器选取压力最高的 LNG 储罐的压力来控制压缩机,该压力控制器可自动确定运行 BOG 压缩机以及自动选择 BOG 压缩机的运行负荷等级。手动控制模式是操作人员来选择压缩机运行负荷等级,储罐压力为主要选择依据。当 BOG 流量过大时,超过了压缩机和再冷凝器的处理能力时储罐和 BOG 总管的压力将增高,增高到一定数值,多余部分的 BOG 将会排至火炬系统。

再冷凝器由两大部分组成,分别为填料段和缓冲段,上部的填料段主要作用是使被压缩的蒸发气 BOG 与过冷 LNG 充分接触后完全冷凝,下部缓冲段主要是高压输送提供缓冲作用。部分未进入冷凝器的部分通过旁路与冷凝的 BOG 混合后进入高压输送泵,旁路不仅有收集剩余气体的功效,还作为再冷凝器检修时的备用通道,以保证 LNG 接收站外输的正常进行。

4 LNG 罐箱的 BOG 控制工艺

LNG 罐式集装箱装具有运输安全、发生事故概率小、

使用寿命 20 多年等优点,我国铁路罐箱运输还处于起步阶段,因此 LNG 罐箱的 BOG 控制技术对罐箱的应用发展十分重要^[5]。

在液体装卸和运输过程中为保持罐箱内气压稳定,控制 BOG 的产生,在罐箱设有操作系统和仪表系统,能够检测罐箱内压力,阀门箱内安装安全附件、安全阀、三通切换阀、液位计、压力表、外罐泄压装置、气动紧急切换阀。对罐内 BOG 过多、火灾等情况进行紧急处理。

在日常充装时,由于罐内存在一定量的 BOG 维持罐内压力,所以在充液时打开气相阀、气相紧急切断阀,排放多余 BOG,泄放罐内压力,完成液体充装。储运过程中,为减少 BOG 的产生,除压力表、液位计、组合式安全阀打开,其余阀门均关闭,若罐内压力升高过快,应将 BOG 及时排除,降低罐内压力,确保罐体安全。罐箱卸液时,在结束前关闭增压紧急切断阀,保证返空充装量不能低于 1.5%,借助增压器将罐内剩余液体汽化,维持排液压力,卸液结束后关闭各项阀门,打开开放散管路,排放管道内的残液和气体。

较多状况将罐箱堆放在船舶甲板上或堆场堆码,在此期间,常有 BOG 的意外排放,若处理不当不仅造成资源浪费,也存在较大安全隐患,所以正确处理方式是将 BOG 排放至安全区域,或将气体收集循环利用,目前常用措施为设置共管透气装置。

5 总结

LNG 储罐、LNG 船、LNG 罐箱,所用 BOG 控制与回收工艺不同,但核心问题是为保证 LNG 储运中的安全性和经济性,目前 BOG 的控制与回收工艺发展尚未完善,制约了 LNG 产业全方面发展,特别是 LNG 罐箱铁路运输尚为空白。需要 BOG 控制与回收工艺的创新与改进,积累 LNG 的储运中 BOG 处理技术经验,为增加系统的稳定性、提高工作效率打下基础,降低 BOG 损耗,优化操作系统,实现 LNG 罐箱大规模有效运用。

参考文献:

- [1] 刘玉丰,张晓瑞.LNG 接收站蒸发气(BOG)的产生和计算[J].化学工程与装备,2019,265(02):134-136.
- [2] Kwak D H,Heo J H,Park S H,et al.Energy-efficient design and optimization of boil-off gas (BOG) re-liquefaction process for liquefied natural gas (LNG)-fuelled ship[J].Energy,2018,148(APR.1):915-929.
- [3] 向丽君,全日,邱奎,等.LNG 接收站 BOG 气体回收工艺改进与能耗分析[J].天然气化工(C1 化学与化工),2012(03):52-54.
- [4] 吕寻贞,张磊,李亚军,等.LNG 接收站 BOG 蒸发量及波动性分析[J].低温工程,2014(2):70-76.
- [5] 田宇忠,刘宇.LNG 罐箱整船运输所面临的问题及其解决方案[J].船舶,2018,029(001):19-25.