

LNG 储罐预冷方式和 BOG 回收技术研究

周闯锋（延长石油天然气股份有限公司，陕西 延安 716000）

摘要：LNG 作为一种清洁能源，其具有安全、方便、快捷、污染小的特点，被广泛的应用于交通、冶金及民用等领域。在 LNG 储罐与外界换热的过程中，会产生大量的 BOG，通常情况下会被放空处理，这种方式会产生资源浪费及影响环境，因此必须予以重视。文章主要分析 LNG 储罐预冷方式和 BOG 回收技术应用的重要性，通过加强 LNG 储罐预冷和 BOG 回收技术，实现 LNG 储罐的效果和节能减排的目的。

关键词：LNG 储罐；预冷；BOG 回收

0 引言

LNG 储罐预冷是 LNG 加工的重要环节之一，通过有效的预冷方式可以降低 LNG 的温度和压力，确保 LNG 的安全运输和储存。BOG 回收技术则可以将 LNG 储罐中产生的 BOG 重新利用，提高 LNG 的利用率和节能减排效果。由于对 LNG 储罐预冷和 BOG 回收技术的研究较少，因此相应的回收技术还不够完善，需进一步探索和研究，以提高 LNG 储罐的效果和环境可持续性。

1 LNG 储罐预冷与 BOG 回收的重要性

LNG 储罐预冷和 BOG 回收是 LNG 行业中至关重要的两个环节，对于安全、经济和环保方面都具有重要意义。

具体来说，第一，LNG 储罐的预冷是将进入储罐的天然气降温至其液化温度的过程。预冷目的是降低天然气的温度，使其经过液化过程将气态天然气转变为液态 LNG。LNG 的液态形式仅占天然气的 1/600 体积，这极大方便了储存和运输。而储存和运输 LNG 的好处在于：①降低了能源储存和运输的成本。LNG 的体积小，可以运输更多的能源在同样大小的船只或储罐中；② LNG 的液态形式更易于储存和调度。气态天然气需要专门管道和设备进行运输和储存，而液态 LNG 可以储存在不同形式的储罐中，并可以根据需求进行调度。此外，液态 LNG 还可以在海上轮船或储罐装载，方便快捷；③ LNG 储罐预冷还有助于减少天然气泄漏的风险。预冷环节是在天然气进入 LNG 储罐之前，将其冷却到极低温度，减少了潜在的泄漏风险。

第二，BOG 指的是液化天然气中的闪蒸汽，它在 LNG 储存和运输过程中会产生。BOG 的回收是将这些气体重新压缩成液态 LNG，并将其注入储罐中的过程。BOG 回收的重要性主要体现在以下方面：① BOG 回收可以提高 LNG 储罐的效率。将 BOG 重新压缩成液

态 LNG，可以确保 LNG 储罐的容量得到充分利用，提高储存效率；② BOG 回收还可以降低 LNG 储存和运输过程中的能量损失。BOG 是从 LNG 中产生的，含有大量的能量。通过回收这些能量，并将其用于 LNG 的液化和运输过程中，可以降低能源浪费和环境影响，提高能源利用效率；③ BOG 回收还对于减少温室气体排放具有重要意义，由于液态 LNG 中的 BOG 主要是甲烷，而甲烷是一种温室气体，对全球变暖起到重要作用。通过回收 BOG，可以降低甲烷的泄漏量，减少对气候变化的负面影响^[1]。

2 LNG 储罐预冷方式分类

2.1 临界降温法

临界降温法（Joule-Thomson 效应），是一种常用的 LNG 储罐预冷方式，利用气体的反应性降温特性，通过扩散阀将高压天然气经过膨胀，使其膨胀损失能量，从而降低温度。在使用过程中，首先，将压缩天然气进行增压，可以提高天然气的温度。增压过程使用压缩机进行，将压力提高到一定程度，增加了气体分子的动能，从而增加了气体的温度。其次，将高压天然气通过膨胀阀膨胀，减少压力。膨胀阀的作用是将高压气体释放到低压区域，这个过程中天然气会发生膨胀，并膨胀损失能量，从而使气体的温度降低。由于气体在膨胀过程中会进行做功，压力下降，因此温度也会下降。再次，将降温后的天然气与冷却介质进行接触。通常情况下，冷却介质是液氮或液氩，这些介质具有很低的温度。冷却介质通过换热器与天然气进行热交换，将天然气的温度进一步降低。换热器的设计使得天然气与冷却介质的接触面积最大化，以便更充分进行热量交换。最后，冷却后的天然气进入 LNG 储罐，经过液化过程变为液态 LNG。LNG 储罐通常使用低温材料构建，以保持 LNG 的低温状态。液化后的 LNG 可以被高效储存和运输^[2]。

通过这种方法的使用,当气体从高压区域进入低压区域时,气体分子之间的相互作用变弱,分子间的距离增加。在这个过程中,由于气体的分子间相互作用势能减少,因此气体的内能也相应减小。由热力学第一定律可知,这部分减小的内能变成气体的动能,从而导致气体温度的降低。临界降温法具有以下优点:①它是一种相对简单且经济的预冷方式;②它对 LNG 储罐的运营要求较低,适用范围广。但临界降温法也存在一些限制,比如膨胀过程可能产生冷凝水,这需要进行处理。此外,临界降温法对于气体品质和组分会有一定要求,需要通过气体分离和净化来满足要求。

2.2 循环混合法

循环混合法,也被称为室外超高压冷却循环法,是一种常用的 LNG 储罐预冷技术。它通过高压循环流体的膨胀冷却效应,将天然气降温,然后与待液化天然气进行换热,进而实现 LNG 的冷却。这种方法的实现流程如下,首先,高压循环流体进入到低压膨胀阀。通过膨胀阀,高压循环流体在流过程中损失了一部分能量,也使得循环流体的温度降低。降温的循环流体随后进入换热器。在换热器中,降温的循环流体与待液化天然气进行热交换。通过热交换,循环流体从天然气中吸收热量,而天然气则被冷却。这一步骤将待液化天然气的温度降低到接近其临界温度,冷却后的天然气随后进入 LNG 储罐。由于温度的降低,天然气的部分成分会从气态转变为液态,并存储在 LNG 储罐中。储罐内的液体 LNG 可用于储存和运输。经过膨胀的循环流体进入压缩机,再次被增压,并重新进入膨胀阀进行循环。这样的循环过程使得循环混合法能够持续进行,以实现预冷的连续供应^[3]。

循环混合法是基于朗肯循环(Linde cycle)实现的。在循环混合法中,高压循环流体通过膨胀阀的膨胀过程中,实现了温度的降低。因为当气体从高压区域膨胀到低压区域时,气体分子之间的碰撞概率下降,使系统内部的能量转化为动能,导致温度的降低。通过这种特性,将循环流体与待液化天然气进行热交换时,循环流体可以吸收更多热量,并将其带走。这种方式能有效降低待液化天然气的温度,使其达到液态状态,并存储到 LNG 储罐中。这种预冷技术可以提高 LNG 储罐的存储容量,还可以减少液化过程中需要消耗的能量。因此,循环混合法在 LNG 行业得到广泛应用,并且在提高 LNG 储罐运行效率和能源利用效率方面具有重要意义。

2.3 深冷循环法

深冷循环法(Linde-Hampson 循环法),通过利用高压液体氮或制冷剂的蒸发过程中损失的能量来冷却待液化天然气,然后与天然气进行换热。该方法在 LNG 行业中被广泛应用,具有高效、可靠的特点。深冷循环法的实际流程分为四个主要步骤:①高压液体氮或制冷剂从储罐中泵入系统。这些液体在高压下被压缩,并通过一个膨胀阀进入低压区域。膨胀阀使液体氮或制冷剂在通过膨胀过程中发生蒸发,此时会损失一部分能量,也会降低温度;②蒸发后的液体氮或制冷剂进入一个换热器,与待液化天然气进行换热。在换热过程中,液体氮或制冷剂的温度进一步降低,并通过与天然气热交换来提取天然气的热能,使其冷却;③冷却后的天然气进入 LNG 储罐,由于受到低温的影响,天然气的温度下降,逐渐变为液态 LNG。在储罐中,液态 LNG 可被存储和运输;④蒸发的液体氮或制冷剂随后通过压缩机进行压缩,再次进入高压区域。这个过程旨在将蒸发的液体氮或制冷剂重新加压,为下一轮循环提供足够的压力。

深冷循环法的关键是利用高压液体氮或制冷剂的蒸发过程中的能量损失来实现天然气的冷却。通过与待液化天然气进行热交换,冷却剂的温度降低,而天然气的温度则升高,实现热能的转移。这种循环过程能够有效降低天然气的温度,将其从气态转化为液态,以便进行储存和运输。

3 BOG 回收技术的应用策略

3.1 直接输出法

直接输出法通过使用压缩机将 BOG 压缩到较高的压力,使其回流至 LNG(液化天然气)系统。这样可以将 BOG 的体积减小,减少对环境的排放,并将其重新注入 LNG 储罐或进行进一步处理。其应用流程如图 1 所示。

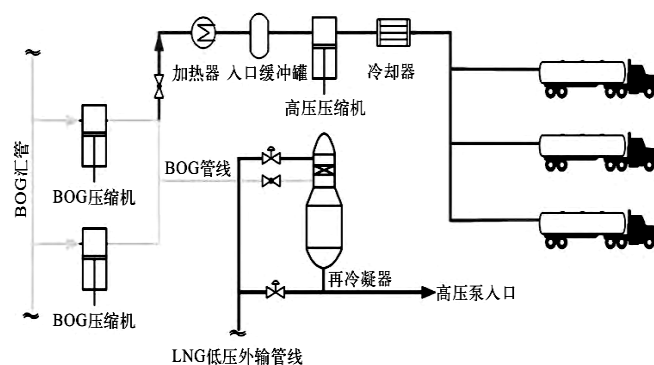


图 1 直接输出法的应用流程

在该方法的应用过程中,压缩机通常采用离心式或螺杆式压缩机,通过旋转机械部件来将气体压缩。压缩过程中,气体的温度也会随之升高。因此,为了防止过热,压缩机通常需要配备冷却系统。直接输出法的应用流程通常包括以下步骤,①将BOG从储罐或系统中收集起来,一般采用抽取系统将BOG送至压缩机;②BOG通过压缩机,压缩至较高的压力。压缩机中的旋转机械部件将气体压缩,也产生了热量,需要通过冷却系统进行散热;③压缩后的BOG可以重新注入LNG储罐,或者经过进一步处理,比如再液化或再气化,以便再利用。

直接输出法具有以下优点:①节能减排:通过回收并再利用BOG,减少了能源的消耗和对环境的排放;②资源再利用:通过压缩后的BOG可以重新注入LNG储罐系统,充分利用了能源资源;③灵活性:可以根据实际需要对BOG进行进一步处理,比如再液化或再气化,以满足不同的用途。然而,这种方式的初始投资高,且压缩过程的能耗较大^[4]。

3.2 再液化法

再液化法的基本原理是将BOG重新冷却并液化,以便再次注入LNG储罐或进行其他应用。具体来说,首先,将BOG通过冷却装置(通常是冷凝器)进行冷却,使其温度降低到液化天然气(LNG)的临界温度以下。这样可以改变BOG的状态,使其由气态转变为液态。其次,在再液化过程中,BOG与液化天然气进行热交换,使BOG的温度进一步降低并转变为液态。热交换的目的是利用LNG的低温来冷却BOG,并将BOG的热量转移到液化天然气中。最后,经过冷却和热交换后,BOG逐渐液化成为LNG。液化BOG可以再次注入LNG储罐,或者用于其他应用,如燃料供应或发电等。再液化技术的使用过程中,应注意以下几点:①要确保选择适当的冷凝器和热交换器,以确保能够有效地冷却和液化BOG;②操作人员必须遵守相关的安全规程,确保再液化过程安全可行;③液化BOG需要储存和运输,要注意适当的储存和运输方式,以确保安全可靠。

再液化技术可以减少能源消耗和环境污染,然而,其能耗较高,液化BOG需要耗费较多的能源和设备投入。同时,再液化技术需要一定的技术经验和专业知识,对设备和操作要求比较高。

3.3 再冷凝法

再冷凝法是一种常用于回收BOG的方法,其原

理是将BOG与过冷液态天然气(LNG)混合后再冷凝回收。这种方法可以对LNG的冷量加以利用,并让BOG压缩功的消耗量得到减少,从而起到能耗降低的效果。在再冷凝法中,首先将BOG加压至一定压力,然后与从LNG储罐输送出来的过冷LNG混合。由于LNG已经过冷,所以可以再次冷凝回收BOG。混合后的气体经过再冷凝器,其中的BOG被冷凝成为液态,然后通过LNG高压泵将液态LNG加压输出到外部使用。但要注意的是,在较低压力下,回收BOG所需的LNG量约为BOG量的10倍左右。为了确保高压泵入口的LNG具有足够的过冷度,以避免气化对设备寿命的影响,进入再冷凝器的LNG与直接送到高压泵入口的LNG的比例应不低于1:1。

再冷凝法技术优点有:①能够充分利用LNG的冷量,减少了BOG压缩功的消耗,从而降低了能耗;②通过回收BOG,可以减少BOG的排放,降低环境污染;③再冷凝法具有较高的BOG回收率,能够有效利用资源。然而,由于液态LNG需要通过高压泵加压输出,因此需要投资较多的设备和能源。

4 结论

通过对LNG储罐预冷方式和BOG回收技术的研究,可以得出如下结论:LNG储罐预冷对于提高储罐效果和保证LNG的安全运输具有重要意义。在LNG储罐预冷的过程中,临界降温法、循环混合法和深冷循环法是常用的方式;并且直接输出法、再液化法和再冷凝法均在BOG回收的过程中得到有效应用。在LNG储存过程中,提高LNG储罐效果和节能减排需要综合运用LNG储罐预冷和BOG回收技术。因此,进一步研究和应用这些技术,对于LNG行业的可持续发展至关重要。

参考文献:

- [1] 刘光晓,吴旻剑,董贵君.LNG接收站扩建储罐工程预冷工艺方案设计及建议[J].油气储运,2023,42(05):517-524.
- [2] 王小琬,庚军,李亚松.LNG储配站储罐预冷问题分析研究[J].城市燃气,2023(03):6-11.
- [3] 杨宇粟,刘强,张峻岭.气化站回收利用LNG槽车BOG工艺方案研究[J].石油与天然气化工,2023,52(01):54-57+68.
- [4] 海航,周小翔,宋斌杰.LNG罐箱储备调峰BOG回收经济性分析[J].低温与特气,2021,39(03):18-21.