

LNG 储罐预冷方式和 BOG 回收技术分析

周 洋 (成都赛普瑞兴科技有限公司, 四川 成都 611730)

摘要: 随着 LNG 接收站的不断建设, LNG 储罐的预冷和 BOG 回收问题日益突出。合理选择 LNG 储罐的预冷方式和 BOG 的回收技术不仅可以大幅度降低建设和运营成本, 还能减少温室气体排放, 具有重要的经济和环保意义。本文介绍了几种常见的 LNG 储罐预冷方式, 并分析了它们各自的优缺点。针对 BOG 回收, 文章重点讨论了再冷凝法、直接输出法、再液化法等几种主要技术。文章还分析了 LNG 接收站调试期间 BOG 回收率问题, 提出通过合理控制冷却速率并启动不同的 BOG 回收工艺, 可以最大限度回收 BOG, 减少放空损失和温室气体排放。最后, 文章展望了未来 LNG 储罐预冷和 BOG 回收技术的发展方向。

关键词: LNG 储罐; 预冷; BOG 回收; 再冷凝; 再液化

0 引言

近年来, 随着全球 LNG 贸易的快速增长, 我国 LNG 接收站建设进入了高速发展期。LNG 储罐作为 LNG 接收站的核心设施之一, 其预冷和运行过程中产生的 BOG 如何有效处理, 已经成为业界关注的焦点。科学合理地选择 LNG 储罐预冷方式和 BOG 回收技术, 不仅关系到项目建设和运行成本, 更关乎能源利用效率和环境保护。

1 LNG 储罐的预冷方式

1.1 液氮供冷法

根据中国 LNG 接收站的实际经验, 使用液氮供冷法预冷一座 16 万 m^3 LNG 储罐通常需要消耗约 1500 吨液氮。液氮的市场价格相对较低, 通常在 500~800 元/吨左右, 因此使用液氮进行预冷的成本相对较低。同时, 氮气作为一种惰性气体, 即使发生泄漏也不会引起燃烧或爆炸, 因此使用液氮供冷的安全风险较小。但是, 氮气的比热容仅为 $1.04\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 显著低于甲烷的 $2.22\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 这意味着使用氮气进行冷却的效率较低, 需要消耗大量的液氮才能达到预期的冷却效果。以上述 16 万 m^3 储罐为例, 若完全使用液氮供冷, 预计总成本可达 120 万元以上。此外, 由于氮气的导热系数较低, 在罐体内流动时易产生温度梯度, 导致罐体局部温度过低, 长期运行可能损坏罐体结构。

1.2 LNG 船舶供冷法

LNG 船舶供冷法是指利用 LNG 运输船在卸料过程中产生的 BOG 和 LNG 对储罐进行预冷的方法^[1]。数据显示, 一艘典型的 17 万 m^3 LNG 船在卸料过程中可产生 5000~7000 m^3/h 的 BOG, 温度通常在 -130°C 至 -140°C 之间, 这部分 BOG 如果直接排放将造成巨

大的能源浪费和环境污染。采用 LNG 船舶供冷法可以将其用于储罐预冷, 既充分利用了 BOG 的冷量, 又减少了排放。以上述 16 万 m^3 储罐为例, 若利用 BOG 进行预冷, 可节省约 500 吨液氮, 折合成本达 40 万元。但是, LNG 船舶供冷法的最大问题在于其进度完全依赖于船期, 一旦 LNG 船舶因故延迟到港或卸料过程中出现中断, 都将导致储罐预冷进度延误。而 LNG 船舶一旦在港口滞留, 将产生巨大的经济损失, 据统计每延迟一天需要支付 20~30 万美元的滞港费。

1.3 LNG 槽车供冷法

与液氮供冷法相比, LNG 槽车供冷所需的冷源更加经济, 每吨 LNG 的价格通常在 2500~3500 元之间, 而且 LNG 的比热容和导热系数均优于液氮, 因此冷却效率更高。以 16 万 m^3 储罐为例, 使用 LNG 槽车供冷预计仅需 1000 吨左右的 LNG, 折合成本约 300 万元, 较液氮供冷节省 50% 以上。同时, 由于采用 LNG 槽车供冷时实际冷却介质为 LNG, 因此在冷却过程中产生的 BOG 可通过管道全部回收利用, 一般来说冷却过程中产生的 BOG 量占槽车供冷总量的 10%~15%, 回收利用可进一步降低冷却成本。但是, LNG 槽车供冷法也存在一定的局限性, 主要体现在前期投资较大。为保证冷却效率, 通常需要在现场建设 1000 m^3/h 以上的 LNG 气化设施, 单套造价可达数千万元^[2]。

2 BOG 的回收技术

2.1 再冷凝法

再冷凝法的基本原理是利用 LNG 的过冷特性, 将 BOG 加压至 0.5~1.0 MPa 后与来自 LNG 储罐的低温 LNG 进行混合, 使 BOG 冷凝为液体后重新输送至储罐或外输管线。该方法的最大优点在于可以充分利用 LNG 的冷量, 通过热交换使 BOG 冷凝液化, 从而大

幅减少 BOG 的压缩功耗。相关数据表明，采用再冷凝法回收 BOG 时，BOG 压缩机的功耗仅为直接压缩 BOG 的 30% 左右。

此外，再冷凝法工艺简单，设备投资相对较低，运行维护也比较便捷。但是，再冷凝法也存在一些不足之处，其中最主要的问题是能耗较高。由于 BOG 的比热容和汽化潜热均显著高于 LNG，为使 BOG 完全冷凝液化，需要消耗大量的 LNG 冷量^[3]。据测算，采用再冷凝法回收 1 吨 BOG，需要消耗约 21 吨 LNG。如此高的 LNG 消耗量将导致整个系统的能耗大幅上升，运营成本居高不下。

2.2 直接输出法

直接输出法是一种简单、灵活的 BOG 处理方式，其特点是将 BOG 加压至管输所需压力后直接外输，可用于多种不同场合。例如，BOG 可加压至 20MPa 后充装入 CNG 槽车，运至加气站作为车用燃料；也可加压至 13MPa 后接入城市燃气管网，用于民用或工业燃烧；还可加压至 10MPa 以上接入长输管线，实现远距离输送。

与再冷凝法相比，直接输出法具有工艺简单、设备投资低、运行灵活等优点。该方法无需考虑 LNG 冷量平衡问题，也不涉及 BOG 冷凝液化过程，系统组成相对简洁。通过调整 BOG 压缩机组的工况，可以根据下游用户需求实时调整 BOG 的输出压力和流量，灵活性较高。但是，直接输出法也存在明显的不足，即能耗大、成本高。由于 BOG 的比热容和压缩系数均高于常规天然气，采用直接输出法需要消耗大量的压缩功，能耗水平通常是再冷凝法的 23 倍。以加压至 20MPa 外输为例，1 吨 BOG 的压缩电耗可达 500kWh

以上，年运行费用高达数百万元。如此高昂的能耗使得直接输出法在大规模、长周期运行时的经济性大打折扣。

此外，由于 BOG 的产生具有明显的波动性和不连续性，采用直接输出法时，下游用户的接收能力也需要相应调整，这进一步增加了系统的运行复杂性。

2.3 再液化法

再液化法是将 BOG 冷却液化后重新输回 LNG 储罐。再液化系统可分为双级压缩直接式冷却循环和复叠式压缩冷却循环两种。

2.3.1 双级压缩直接式冷却循环

双级压缩直接式冷却循环是采用两级压缩机组对 BOG 进行升压，然后通过中间冷却器和末级冷凝器实现 BOG 的分级冷却和液化。与单级压缩系统相比，双级压缩可以有效降低 BOG 压缩过程的功耗，提高压缩机的效率和可靠性。同时，通过在两级压缩机之间设置中间冷却器，可以降低 BOG 的进口温度，减少压缩机的工作压比，从而进一步减小能耗。在 BOG 液化回罐过程中，BOG 先经过压缩机增压升温，然后在中间冷却器中被冷凝液化，液相 BOG 再经过节流降温，最终与来自 LNG 储罐的低温 LNG 混合，实现冷量的梯级利用。

2.3.2 复叠式压缩冷却循环

复叠式循环由一个高温循环和一个低温循环组成，高温循环采用丙烷、R404A 等常规制冷剂，利用常温环境中的冷却水或空气实现 BOG 的初步冷却；低温循环则采用氮气、氦气等特殊制冷剂，利用极低温环境实现 BOG 的深度液化。两个循环通过换热器实现热量传递和梯级利用，从而使 BOG 的温度逐步

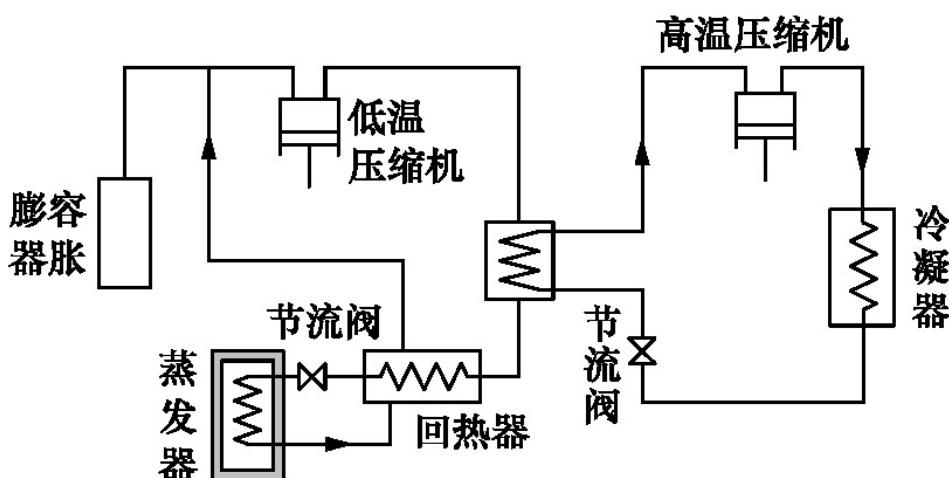


图 1 复叠式压缩冷却循环

降低,最终达到-160℃以下。与直接式冷却循环相比,复叠式循环的优点在于,液化后的BOG温度更低,通常可达到-140℃以下,与LNG储罐温度更加接近,因此在BOG冷凝液回罐时可以大幅减少闪蒸损失。同时,由于采用了不同的制冷剂和温度区间,复叠式循环可以实现制冷能力和温度的精确匹配,大幅提高BOG再液化过程的效率和可靠性。但是,复叠式循环的设备和工艺也相对复杂,投资和运行成本较高,因此更适用于大规模、高标准的BOG回收利用项目。如图1所示。

3 调试期

3.1 降低储罐和管线冷却速率,减少瞬时BOG产生量

在调试过程中,如果冷却速率过高,会导致大量LNG瞬时汽化,产生超出BOG回收系统处理能力的峰值排放。因此,有必要通过合理控制冷却速率,减少瞬时BOG产生量。

具体来说,可以采用分段冷却的方式,先用较低的冷却速率将储罐和管线温度降至临界点以上,再逐步提高冷却速率,直至达到目标温度。同时,还可以优化冷媒的选择和供应方式,采用温度可调的冷媒,或者采用多路并联供冷,避免局部过冷导致的BOG瞬时释放。

3.2 增设BOG缓冲罐,平滑BOG排放波动

BOG的产生具有明显的波动性和不均衡性,在LNG储罐和管线的冷却过程中尤为突出。为了平滑BOG排放波动,减少对BOG回收系统的冲击,可以在BOG回收管线上增设BOG缓冲罐。BOG缓冲罐可以起到调节BOG排放的作用,当BOG产生量超出回收系统处理能力时,多余的BOG可以暂时储存在缓冲罐中;当BOG产生量降低时,再从缓冲罐中补充BOG,维持回收系统的稳定运行。BOG缓冲罐的容积需要根据LNG储罐和管线的规模、冷却速率、BOG排放强度等因素进行设计和优化,通常为BOG回收系统处理能力的1.5~2倍。此外,BOG缓冲罐还可以起到预冷BOG的作用,通过与来自LNG冷箱的低温LNG换热,降低BOG的温度,减少BOG回收系统的冷却负荷,提高系统效率。

3.3 建立BOG回收工艺优选机制

目前常用的BOG回收工艺包括再冷凝法、直接输出法、再液化法等,各有优缺点和适用条件。为了在调试期间实现BOG回收率的最大化,需要建立一套BOG回收工艺优选机制,根据BOG的产生状况和下

游用户需求,灵活切换不同的回收工艺。具体来说,当BOG产生量较小、下游用气需求较大时,可以优先采用直接输出法,将BOG加压后直接外输;当BOG产生量较大、下游用气需求有限时,可以优先采用再液化法,将BOG冷凝液化后重新输回LNG储罐;当BOG产生量和下游用气需求均较为平稳时,可以优先采用再冷凝法,在LNG冷箱中实现BOG的冷凝回收。通过建立完善的工艺优选机制和调度策略,可以实现BOG回收方式的动态匹配和优化,最大限度地提高BOG回收率。

3.4 提高再液化系统处理能力,增大极限工况下的BOG回收量

在LNG接收站和液化厂的调试期间,BOG产生量往往会出现剧烈的波动,短时间内可能高达平均水平的数倍。为了应对这种极限工况,需要提高再液化系统的处理能力,增大BOG的回收余量。具体来说,可以采用模块化设计理念,将再液化系统划分为若干个独立的子系统,每个子系统都具有一定的余量和备用能力,可以根据BOG产生量的变化灵活调配。同时,还可以在再液化系统中配置多台并联的压缩机和冷却器,通过优化启停组合和负荷分配,实现系统能力的柔性匹配。BOG再液化系统的处理能力通常需要覆盖BOG峰值产生量的1.2~1.5倍,同时还需要预留一定的余量,以应对非常规工况和设备检修等情况。

4 结语

LNG储罐预冷和BOG回收是LNG接收站安全经济运行的关键。合理选择预冷方式,科学规划BOG回收工艺,既可以提高能源利用效率,降低运营成本,又可以减少温室气体排放,实现环境友好。随着LNG产业的不断发展,创新更加高效、经济、环保的储罐预冷和BOG回收利用技术,将成为业界的共同目标和发展方向。只有通过不断的技术创新和工艺优化,才能推动LNG产业的可持续发展,实现经济效益、社会效益、环境效益的多赢局面。

参考文献:

- [1] 汪世涛. LNG储罐预冷的方案分析及影响因素研究[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(03): 83-86.
- [2] 王小琬, 庚军, 李亚松, 等. LNG储配站储罐预冷问题分析研究 [J]. 城市燃气, 2023, (03): 6-11.
- [3] 付红艳. 大型LNG储罐预冷过程影响因素分析 [J]. 当代化工研究, 2022, (24): 70-72.