

LNG 接收站 BOG 再冷凝工艺分析

赵诗扬

中石油江苏液化天然气有限公司

摘要: 液化天然气 (LNG) 接收站的 BOG (Boil-off Gas) 再冷凝工艺是一个关键环节, 用于处理由于 LNG 蒸发产生的 BOG。这一过程包括将 BOG 通过压缩和冷却转换回液态, 有效减少气体排放并提高能源利用效率。主要设备包括压缩机、再冷凝器、冷却系统和自动化控制系统。目前工艺重点在优化能效、降低运营成本以及确保环保合规。未来, 面对严格的环境法规和市场变化, BOG 再冷凝技术将向更高的能效、更低的环境影响和更强的系统集成性发展。利用数字化和自动化技术以及整合可再生能源技术将是未来发展的重点。长远来看, LNG 行业将更加注重可持续性和环境合规, 推动技术向更高效、更环保、更智能化的方向发展。

关键词: 接收站; BOG; 工艺分析

在当今快速发展的能源行业中, 液化天然气 (LNG) 作为一种清洁、高效的能源形式, 正日益成为全球能源市场的重要组成部分。LNG 接收站在这一体系中扮演着关键角色, 不但负责接收、储存和再气化液化天然气, 还需要处理一个特别的挑战: BOG (Boil-off Gas) 的有效管理。BOG 是在 LNG 储存过程中因微小的温度波动而产生的蒸发气体, 其处理对于确保接收站运营的安全性和效率至关重要。

本文将深入探讨 LNG 接收站中 BOG 再冷凝工艺的各个方面, 包括其工作原理、关键设备和技术, 以及面临的挑战和未来发展趋势。随着全球对于环境保护和能源效率的日益重视, 理解并优化这一工艺对于推动整个 LNG 行业的可持续发展具有重要意义。

1 BOG 再冷凝工艺

1.1 BOG 的来源

在 LNG (液化天然气) 加气站中, BOG (Boil-off Gas) 的概念至关重要。BOG 是指在 LNG 的储存和输送过程中, 由于 LNG 的自然蒸发而产生的气

体。由于 LNG 是在极低温下储存的 (约 -162°C), 即使在高度绝缘的条件下, 仍然会有少量的 LNG 因为各种原因 (如外部温度变化、储罐的热泄漏、机械操作等) 转变为气态。这个过程是不可避免的, 因为完全阻止热能传递到 LNG 储罐中是非常困难的。例如环境温度的日夜波动、太阳辐射, 甚至储罐内的压力调整, 都可以导致 LNG 的部分蒸发。因此, BOG 的形成是 LNG 储存和运输过程中一个自然且必须应对的现象^[1]。

BOG 的产生不仅会造成 LNG 资源的损失, 还可能引起安全和环境问题。从经济角度来看, BOG 代表了未能有效利用的天然气, 因此其回收和利用对于提高 LNG 加气站的经济效率至关重要。此外, 由于 BOG 主要由甲烷组成, 直接排放到大气中会增加温室气体排放, 对环境产生负面影响。从安全角度来看, 如果 BOG 未能妥善处理, 可能会在储罐或输送系统中积聚过高的压力, 增加泄漏或爆炸的风险。因此, BOG 的有效管理是确保 LNG 加气站安全运行的关键部分。

1.2 工艺原理

BOG (Boil-off Gas) 再冷凝工艺是针对液化天然气 (LNG) 储存和运输过程中液化气体因温度升高而蒸发的现象设计的一种技术方案。在 LNG 的长期储存或海上运输过程中, 由于外界热量的渗透, LNG 会逐渐蒸发变为气态, 形成所谓的 BOG。如果未经处理, 这些蒸发的气体将增加储罐内部的压力, 甚至可能导致安全事故。因此, BOG 再冷凝工艺的目的在于通过有效回收和利用这部分蒸发气体, 既保证了 LNG 储存系统的安全性, 又提高了资源利用率。该工艺通过捕集 BOG, 然后利用压缩和冷却技术将其再次液化, 实现了对 BOG 的有效管理和利用。

具体而言, BOG 再冷凝工艺首先通过压缩机将收集到的 BOG 压缩, 这一过程中 BOG 的温度会升高。随后, 需要通过冷却系统将压缩后的高温 BOG 冷却下来, 冷却介质通常为低温的 LNG 或其他制冷剂。在充分冷却后, BOG 中的大部分或全部气体将凝结成液态, 从而实现再液化。这些再液化后的 LNG 可以重新被送回储罐中储

存,或者用于其他用途如作为燃料等,有效地减少了能源的损失,同时也减少了对环境的影响。通过这一系列的操作,BOG再冷凝工艺不仅优化了LNG的储存与运输效率,还提升了整个系统的经济性和环境友好度^[2]。

1.3 关键设备 - 再冷凝器

再冷凝器是BOG再冷凝工艺中的关键设备之一,主要负责在压缩过程后将BOG从气态冷却并凝结成液态的重要环节。其工作原理基于热交换技术,通过与低温介质(如LNG或其他制冷剂)的热交换,实现BOG的温度降低和再液化过程。在这个过程中,再冷凝器内部设计有高效的热交换结构,如管壳式、板式或螺旋式热交换器,以确保热量能够高效传递^[3]。再冷凝器的设计还须考虑到操作的安全性、设备的耐久性以及维护的便捷性,以适应LNG储存和运输过程中的严苛条件。

在BOG再冷凝工艺中,再冷凝器的性能直接影响到整个系统的效率和安全性。高效的再冷凝器可以最大限度地减少能量损失,提高LNG的回收率,同时降低运营成本。在选择再冷凝器时,需要考虑多种因素,包括BOG的流量、压力、温度以及所需的冷却介质类型等,以确保其能够满足特定工艺要求。因此,再冷凝器的设计和选型成为整个BOG处理系统设计中的一个重要环节,其优化配置和运行管理对于确保LNG储存和运输的经济性与环境友好性至关重要。

2 工艺技术细节

2.1 冷却系统

在BOG再冷凝工艺中,冷却系统负责将压缩后的BOG从高温气态冷却至液态,完成再冷凝过程。该系统通常由一系列冷却装置和热交换器组成,其中包括主冷却器、预冷却器以及与之配套的管线和泵。预冷却器首先对压缩的BOG进行初步冷却,降低其温度,随后主冷

却器进一步将BOG冷却到接近其凝结点的温度。在这一过程中,制冷剂的选择至关重要,常见的制冷剂包括低温液化天然气(LNG)、液氮或其他人工制冷介质,它们通过热交换过程从BOG中吸收热量,实现有效冷却。

此外,冷却系统还需配置高效的热交换器,确保热能传递的效率,同时也要求系统具备良好的密封性能和可靠的安全保护措施,以防制冷剂泄漏或系统过载。整个冷却系统的设计和运行管理直接影响到BOG再冷凝工艺的效率和安全性,因此在设计时需充分考虑各种操作条件 and 环境因素,以确保系统的稳定运行和高效性能。

2.2 自动化控制系统

在BOG再冷凝工艺中,自动化控制系统通过集成先进的传感器、控制器和执行机构,实现对BOG处理过程中的关键参数(如温度、压力、流量等)的实时监测和精确控制。自动化控制系统的核心是一个中央控制单元,通常采用可编程逻辑控制器(PLC)或分布式控制系统(DCS),负责接收来自各传感器的数据,根据预设的控制逻辑和算法,自动调整压缩机、阀门和热交换器等设备的工作状态,以维持工艺过程在最优条件下运行。

系统还具备故障诊断和报警功能,能够在检测到异常情况时立即发出警报并采取相应的保护措施,如自动降低压缩机负荷或关闭部分阀门,以避免潜在的安全风险。自动化控制系统的高度集成和智能化不仅大幅提升了BOG再冷凝工艺的操作便捷性和经济效率,同时也确保了整个系统的高度和可靠性和支持。

3 再冷凝器操作稳定性影响因素

3.1 进出物料的不平衡波动

进、出再冷凝器物料量的瞬时变化,直接影响整个再冷凝器的物料平衡,

进而影响再冷凝器的压力和液位。再冷凝器正常投入运行过程中,可能发生的工况如下。

3.1.1 蒸发气进气量变化

蒸发气进气量,即进入再冷凝器的BOG量,会受到LNG储存容器内部温度波动、外部环境温度变化、储存容器压力变化等多种因素的影响。当LNG储存容器受到外部热量的影响或LNG的提取量发生变化时,蒸发产生的BOG量也会相应增减,导致进入再冷凝器的气体量发生波动。

蒸发气进气量的变化对再冷凝器的操作稳定性产生影响主要体现在两个方面:一是热负荷的变化,导致再冷凝器的冷却效率受到影响。当进气量突然增加时,需要更多的冷却能力来将增加的BOG再液化,这可能超过了再冷凝器设计的最大处理能力,从而影响到再冷凝效率;反之,进气量减少时,过低的热负荷也可能导致再冷凝器运行在非最优状态。二是进气量变化可能导致再冷凝器内部压力和温度的波动,这不仅影响再冷凝过程的稳定性,还可能对设备的长期稳定运行造成影响。

3.1.2 顶部喷淋LNG量变化

在BOG再冷凝工艺中,顶部喷淋LNG的作用是通过直接接触的方式增强冷却效果,从而提高BOG的再液化效率。喷淋LNG量的适当调整对于维持再冷凝器内部的温度和压力平衡至关重要。当喷淋的LNG量增加时,可以增强冷却效果,促进更多BOG的凝结,但过多的LNG喷淋可能会导致再冷凝器内温度过低,影响热交换效率,甚至可能引起部分设备结冰堵塞。相反,如果喷淋的LNG量减少,再冷凝器的冷却能力会降低,导致BOG的再液化效率下降,进而影响整个系统的运行稳定性。

3.1.3 底部LNG压力变化

在BOG再冷凝过程中,再冷凝器底部的LNG压力直接关联到气体的再液化能力和效率。理想情况下,较高的

LNG 压力有助于提高再冷凝效率,因为在压力作用下,BOG 的凝结温度会上升,使得在相同冷却条件下能够凝结更多的气体。

然而,如果底部 LNG 压力过高,超过了再冷凝器设计和安全工作压力,不仅会降低再冷凝效率,还可能对再冷凝器及整个系统的安全稳定运行造成威胁。相反,如果底部 LNG 压力过低,可能不足以支持有效的气体凝结,导致再冷凝效率下降,甚至影响到 LNG 的质量和储存安全。

3.2 间接影响因素

间接影响因素主要包括接收站操作模式及气象条件等因素,如 LNG 装/卸船、槽车装车以及大气压变化等。这些因素不会对再冷凝器的控制参数产生直接影响,但会间接通过影响接收站蒸发气的处理量、蒸发气温度以及低压 LNG 管线压力等参数对再冷凝器的温度及液位控制产生间接的影响。

在 LNG 接收站的日常运营中,LNG 卸船、装船以及槽车装车等活动对再冷凝器操作的稳定性产生显著的间接影响。LNG 卸船过程涉及将 LNG 从船只通过码头卸料臂输送至站内储罐,这一过程中,非卸船期间的卸料臂和管线由于处于常温状态,在卸船开始时需要进行预冷操作。预冷阶段以及卸船过程中,会产生大量高温蒸发气,导致接收站 BOG 系统的压力和温度发生变化。

返装船功能的启用意味着 LNG 装船操作会利用相同的码头和卸料臂进行,其过程中同样需要进行预冷操作,这会影响到 BOG 系统的稳定和压力,与 LNG 卸船操作产生的效果相似。同时,为了维持船舱压力的稳定,需要将船舱内产生的蒸发气通过管线输送回接收站,进一步影响蒸发气的处理量及再冷凝器的运行状态。

在槽车装车方面,当装车量发生较大变化时,需要相应调整 LNG 低压泵的运行数量,这些变化会影响低压 LNG

总管的操作压力稳定性。槽车装车速率的快慢、低压泵的启停均可能导致管线压力波动,从而影响到再冷凝器 LNG 进料管线的调节阀控制稳定性,最终影响再冷凝器顶部的进料量和底部 LNG 的压力,进而影响再冷凝器的操作压力和液位的稳定性。这些间接因素的综合影响要求 LNG 接收站在进行这些关键操作时,必须采取相应的控制和调整措施,确保再冷凝器以及整个 BOG 处理系统的稳定和高效运行。

4 结语

在当前的 LNG 接收站运营中,通过 LNG 卸船、装船和槽车装车等关键操作过程,以及 BOG 再冷凝工艺的有效实施,能够实现对液化天然气的高效接收、储存和转运,同时处理和利用因 LNG 蒸发产生的 BOG,保证了系统的安全性和经济性。这些操作和工艺技术的应用反映了当前 LNG 接收和处理领域的技术成熟度,以及对安全性、效率和环保要求的高度重视。

然而,操作过程中存在的各种挑战,如卸船和装船过程中的卸料臂预冷、槽车装车对低压 LNG 总管压力稳定性的影响,都对 BOG 再冷凝器的操作稳定性提出了严峻的要求。

随着全球能源结构的转型和环保要求的提高,LNG 作为一种清洁能源的需求将持续增长,这为 LNG 接收站及其相关工艺技术的发展带来了新的机遇。未来技术创新将是提升 LNG 处理效率和安全性关键,包括更高效的 BOG 处理技术、更加自动化和智能化的操作系统,以及对极端气候条件和环境变化的适应性设计。同时,面对更加严格的环保标准和运营成本控制的挑战,开发低能耗、低排放的 LNG 处理技术将成为行业的重要发展方向。

长远来看,LNG 行业的发展趋势将朝着更高的效率、更强的灵活性和更低的环境影响方向发展。这包括利

用先进的材料和技术改善 LNG 储运设备的性能,提高 LNG 接收站的处理能力和灵活性,以适应不同来源和规模的 LNG 供应。同时,随着可再生能源技术的发展和应用,LNG 行业可能会更加注重与可再生能源的融合,如通过 LNG 来平衡可再生能源的间歇性,提高能源系统的整体稳定性和可靠性。此外数字化和智能化技术的应用,将使 LNG 接收和处理过程更加高效、安全和环保,推动整个行业向更加可持续的未来发展。

参考文献:

- [1] 殷先平,余伟,付海泉,等. LNG 接收站槽车储罐余气回收工艺分析[J]. 化工管理, 2023 (36): 144-146+161.
- [2] 陶正琿,张国强,刘晓东,等. 浅析 LNG 接收站管道焊接控制要点[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43 (19): 41-43.
- [3] 陈乐. 浅谈 LNG 接收站工艺设备布置与配管[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43 (17): 178-180.
- [4] 梁爽,秦嗣凯,艾奇昌,等. LNG 接收站大型储罐预冷过程状态研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43 (13): 89-91.
- [5] 姚建军. LNG 接收站高压泵及高压管道系统压力等级优化研究[J]. 炼油技术与工程, 2023, 53 (05): 16-20.