

LNG 接收站 BOG 处理技术优化

李 兵 程香军 陈功剑

中海石油气电集团有限责任公司天津浮式 LNG 接收终端筹备组,天津 300452

摘要:

LNG 接收站 BOG 处理工艺分再冷凝和高压压缩两种,均有其不足。就再冷凝工艺而言,接收站无外输时 BOG 只能采取放空或火炬燃烧等措施进行处理;就高压压缩工艺而言,接收站外输期时无法回收 LNG 的冷能。为此,分别采用静态模型、动态模型等计算方法分别计算无外输期和有外输期间最大 BOG 产生量,弄清各种工况下 BOG 的产生量。在此基础上,从 BOG 产生的机理出发,分析降低接收站产生 BOG 的措施。结果表明,优化 BOG 压缩机组合可有效回收产生的 BOG。建议在接收站设计、建设过程中,应综合考虑再冷凝工艺和直接压缩机工艺,采取措施降低 BOG 的产生,实现 BOG 的有效回收利用。

关键词:

再冷凝;BOG 处理;LNG 接收站;安全管理;压缩机

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2012)05-0027-04

0 前言

近年来液化天然气项目快速发展^[1],国内已经运营 LNG 接收站项目有福建、广东大鹏、上海、大连等 LNG 接收站项目^[2-4],这些接收站均是由七大部分组成,即 LNG 卸料码头、LNG 储罐、LNG 罐内泵、外输泵、LNG 汽化器(通常采用 ORV 和 SUV 两种汽化器)、蒸发气处理系统(BOG 处理系统)、公用工程及安全控制系统与基础设施等部门组成。其中 BOG 处理系统是 LNG 接收站核心部分,是 LNG 接收站安全运行的基础。科学合理的 BOG 处理工艺可节约投资和降低生产成本。

关于 BOG 的回收处理工艺国内学者作了大量的理论研究:2000 年上海交通大学杨晓东等人^[5]针对国外 BOG 回收的发展情况讨论了 BOG 再液化回收 BOG 的优缺点;2005 年中国石化石油勘探开发研究院徐正斌等人^[6]从上下游一体化效益等方面阐述了

BOG 再冷凝方案的优势;2006 年中国石化集团上海工程有限公司刘浩等人^[7]从能耗角度阐述了 BOG 冷凝后处理工艺比直接压缩外输更为节能等。这些研究的前提是 LNG 接收站总能提供足够 BOG 再液化的冷量,同时 LNG 接收站下游用户能持续不断大量接收 LNG 接收站输出的 LNG 或 NG。

本文从 LNG 接收站实际情况出发,考虑自然因素及外界不可抗力等因素造成 LNG 储罐液位低于紧急液位以下无法外输情况时的 BOG 回收,及下游用户需求降低时 BOG 回收等多种工况条件下,LNG 接收站 BOG 直接压缩和再冷凝工艺的优化分析。

1 BOG 处理系统工况分析

1.1 BOG 的产生

为便于计算 BOG 的产生量,可将 BOG 产生的原

收稿日期:

2012-02-04

基金项目:

中海石油气电集团有限责任公司天津浮式 LNG 项目资助(E12004)

作者简介:

李 兵(1966年-),男,河北邯郸人,工程师,学士,主要从事液化天然气项目建设管理工作。

因分为：由于储罐及管路系统吸收外部热量产生的BOG，体积置换产生的BOG（如卸料期间），卸船时LNG注入储罐产生的BOG及泵循环时产生的BOG。

1.2 BOG 工况分析

根据 LNG 储罐液位将 BOG 产生的情况分为有外输和无外输两种。有外输情况下常采用再冷凝工艺回收 BOG，再冷凝工艺能有效回收 BOG；无外输情况下，再冷凝工艺无法回收产生的 BOG，BOG 的处理采用直接放空、火炬燃烧，或采用高压压缩机进行压缩后直接输送到高压管网进行回收。结合 LNG 接收站卸料和非卸料情况，将接收站 BOG 分为 8 种工况，具体见表 1。

表1 接收站BOG工况

储罐液位正常				储罐液位紧急低			
卸料期间		非卸料期间		卸料期间		非卸料期间	
正常外输	无外输	正常外输	无外输	无外输(站内保冷)	无外输(站内保冷)	正常外输(站内保冷)	无外输(站内保冷)
1	2	3	4	5	6	7	8

表 1 未考虑储罐液位高报警情况，只考虑储罐正常和紧急低液位的情况。液位紧急低的情况是指储罐液位低于 2 100 mm 高于 793 mm，该工况可根据全厂及 LNG 船的情况，综合考虑是否外输。从表 1 中可看到，接收站 BOG 工况可细分为 8 种，在储罐正常液位条件下，有 2 种工况无法外输；在储罐液位紧急低时，也有 2 种工况无法外输。无法外输的工况有 4 种，此时，再冷凝工艺无法回收储罐及接收站管线中产生的 BOG。

1.3 BOG 产生量计算

BOG 产生量还没通用的计算方法，目前主要有静态模型^[8]、LNG 储罐内 BOG 动态模拟^[9]、LNG 接收站蒸发气系统动态设计模型^[10]和工程设计估算^[11]等计算方法。

1.3.1 无外输工况下 BOG 产生量

采用工程设计估算算法计算接收站无外输工况下 BOG 的产生量。LNG 接收站无外输工况下，BOG 主要来自储罐的自然蒸发、启动罐内泵和循环保冷管线漏热产生的 BOG。

1.3.1.1 LNG 储罐蒸发的 BOG 产生量

LNG 静态蒸发率一般为 0.05 %。以 LNG 组分密度 456 kg/m³ 为例，在储罐液位紧急低(该液位下启罐内泵将发生气蚀)和储罐满液 2 种工况下计算储罐在静态条件下的 BOG 产生量。在液位紧急低时，根据国外总承包商 CB&I 提供的罐容计算表，储罐内的液相

重量为 4 392.235 t。那么，某 LNG 接收站 4 台 160 000 m³ 储罐，BOG 产生量为：

储罐液位紧急低情况下 $W_l = \text{储罐罐容} \times \text{蒸发率} / 24 = 366 \text{ kg/h}$ ；

储罐满液情况下 $W_l = \text{储罐罐容} \times \text{蒸发率} / 24 = 5 000 \text{ kg/h}$ 。

即储罐静态情况下 BOG 产生量在 0.366~5 t/h 之间，最大的 BOG 产生量为 5 t/h。

1.3.1.2 启动罐内泵保冷循环的 BOG 产生量

在接收站无外输工况下，启动 LNG 储罐罐内泵对接收站进行全厂保冷，使接收站的管道和设备保持冷态，在下次外输时能快速启动，恢复生产。

LNG 储罐启动 1 台罐内泵即可满足全厂的保冷要求，LNG 储罐罐内泵流量为 370 m³/h，罐内泵的效率为 73 %，扬程为 220 m，那么转化为热能为 145 kW。合计产生 BOG 约 999 kg/h，即 0.999 t/h。

1.3.1.3 循环保冷管线漏热的 BOG 产生量

经过计算，某 LNG 接收站保冷循环管线面积为 7 330 m²，管道保冷层采用厚度为 150 mm PUR，最大的漏热系数约为 25 W/m²，那么计算 BOG 的产生量为：

$$W_p = \text{管道面积} \times \text{漏热系数} = 1 263 \text{ kg/h} = 1.263 \text{ t/h}$$

1.3.2 接收站正常外输工况下的 BOG 产生量

接收站正常外输工况下，BOG 产生量计算采用静态模型计算法^[8]。相关数据如下：LNG 常压下沸点温度 -162 ℃，密度为 456 kg/m³，汽化潜热为 514 kJ/kg，蒸发气密度（标况）为 0.669 3 kg/m³，BOG 操作温度为 -140 ℃，LNG 储罐配置为 4 座 16×10⁴ m³，储罐操作压力为 18 kPa，LNG 船舱操作压力为 10 kPa，循环管线最大热量输入速率为 25 W/m²，环境大气压力变化速率为 5.6 Pa/h，卸船流速度为 13 200 m³/h，槽车装车速度为 600 m³/h，槽车操作压力为 100 kPa。根据这些参数，计算出接收站的 BOG 产生量。

表2 某接收站BOG产生量的计算结果

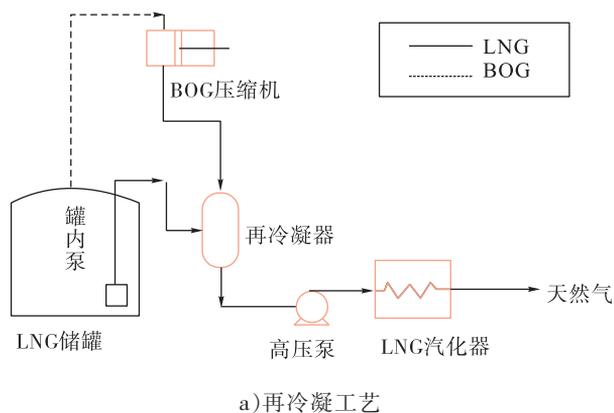
项目	BOG 产生量 /(t·h ⁻¹)	
	卸船工况	非卸船工况
外界热量输入	6.180	6.630
流体置换	9.600	0.732
泵循环热量输入	0.076	0.076
大气压力变化	1.570	1.680
卸船工况下的回气	1.700	0
卸船闪蒸	1.380	0
外输气体的负置换	—	—
总计	20.506	9.118

结合表2和上述分析,在卸船期时BOG最大产生量为20.506 t/h;在非卸船时BOG最大产生量为9.118 t/h,储罐无外输时BOG最大产生量为7.262 t/h。

2 处理工艺分析

2.1 再冷凝工艺

在某接收站投产初期采用的是再冷凝工艺处理产生的BOG,见图1a)。通过刘浩等人^[7]计算结果可发现,正常外输工况下,再冷凝工艺比高压压缩工艺



回收BOG更经济、节能。根据接收站4个储罐产生的BOG量,配备3~4台处理能力为7 t/h的压缩机,压缩机出口压力范围为0.4~0.78 MPa,压缩机可全部回收接收站内产生的BOG。

正常外输工况下,再冷凝工艺可充分回收LNG的冷能,降低压缩机的功率。而采用高压压缩,需要将储罐产生的BOG从10 kPa加压到7 MPa,压缩功急剧增加,能耗快速增加。

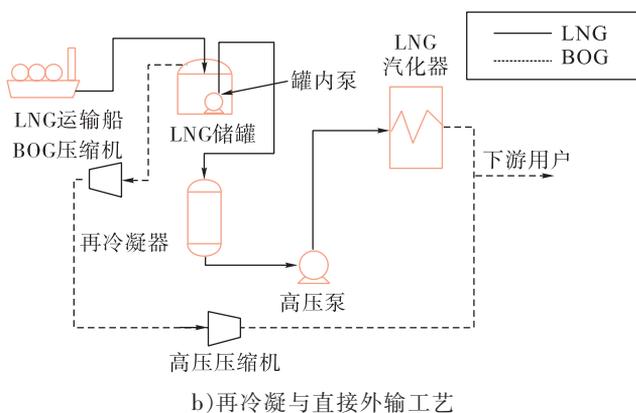


图1 BOG回收的典型工艺

但接收站没有外输时,将无法通过再冷凝器工艺回收LNG的冷能,产生的BOG无法回收。根据计算,无外输情况下每小时产生BOG最高可达7 t左右,造成严重的经济损失。

2.2 高压压缩回收BOG工艺

采用高压压缩工艺回收BOG,是直接将BOG压缩使其压力和接收站外输管网的压力匹配,即压力达到5~8 MPa后将BOG输送到外输高压管网中,流程见图1b)。接收站设4台储罐,BOG最大产生量为20.6 t/h,需要配备3~4台处理能力为7 t/h的BOG压缩机,压缩机出口压力范围为5~8 MPa,可以全部回收接收站内产生的BOG。

根据刘浩^[5]的计算结果,高压压缩工艺回收BOG,压缩机能耗要比再冷凝工艺的能耗增加1倍以上。

2.3 综合BOG回收工艺

将再冷凝和高压压缩工艺结合可避免高压压缩机回收BOG造成的能耗浪费,以及再冷凝工艺在无外输工况及其他特殊情况下停车时无法回收BOG,造成严重经济损失。

接收站设4台储罐,卸船期间接收站内BOG产生量为20.506 t/h,非卸船期间正常外输时BOG产生量为9.118 t/h,无外输期间BOG产生量为7.262 t/h。配置3台低压压缩机,BOG处理能力为7 t/h,出口压

力为0.4~0.78 MPa,进口压力为6~26 kPa。配置1台处理能力为7 t/h的高压压缩机,入口气体来自低压压缩机出口的BOG。综合处理工艺见图2,该工艺能够回收表1中接收站各种工况下产生的BOG,实现接收站经济运行。

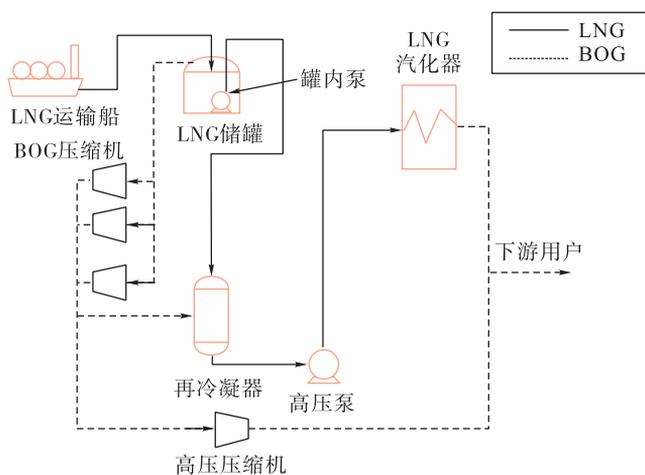


图2 接收站综合BOG回收工艺

3 降低BOG产生措施分析

降低BOG产生量是接收站节能优化BOG压缩机运行的主要途径之一。从BOG产生的原因出发,分析降低BOG产生的措施。

3.1 接收站系统漏热产生的 BOG

储罐及管路系统吸收外部热量产生 BOG 无可避免,罐内泵启动、运行、停止,高压泵的启动、运行、停止等均会产生热量,但可有效降低系统从外界吸收的热量。降低该部分产生的 BOG 需在接收站系统运行过程中加强监视系统的保温情况。即监控储罐、工艺管线、码头管线的温度;现场巡检管道、设备保温层情况,有无冒汗、异常结霜、保温层是否变形损坏等,防止管道局部或整体漏热使管道温度升高,使接收站系统 BOG 量增加。

3.2 闪蒸产生的 BOG

码头卸料的 LNG 进入储罐、高压泵循环回储罐的 LNG、罐内泵回流到储罐的 LNG 均会由于闪蒸产生大量的 BOG。

码头卸料进入储罐闪蒸将产生大量的 BOG,根据流体力学基本原理^[12]:

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + H_f$$

式中 H ——为船仓泵的扬程, m;

z ——储罐进液口与船仓泵出口的高程差, m;

p ——储罐进液口的压力, Pa;

ρ ——LNG 的密度, kg/m³;

u ——储罐进液口流速, m/s;

H_f ——从船仓泵到储罐进液口的阻力损失, m。

从上式中可看到,卸料过程中在满足流量要求情况下,降低储罐进液口的压力可有效降低由于压差过大,LNG 进储罐后膨胀产生大量的 BOG。储罐进液口的压力需要结合管路的特性曲线和船仓泵的特性曲线来进行综合控制,即需要接收站人员和船方人员综合协调。

高压泵循环回储罐将产生 BOG,在满足工艺要求情况下,尽量使高压泵循环管线的 LNG 到再冷凝器进行回收处理。

罐内泵循环管线也将产生 BOG,在满足工艺要求情况下,尽量使循环管线的循环流量降低,从而减少 BOG 的产生。

4 结论

a) 接收站 BOG 处理工艺应综合考虑储罐数量及

各种不同工况下产生的 BOG,尤其在特殊情况下如自然因素、设备大修、事故及其他不可抗力因素造成无法使用再冷凝工艺回收 BOG 的情况。鉴于 BOG 放空的成本及安全因素,在储罐数量满足配置多台 BOG 压缩机时,可优先考虑再冷凝和高压压缩工艺结合的方式进行 BOG 处理。

b) BOG 处理可采用再冷凝或高压压缩工艺,同时应考虑采取相应的措施降低 BOG 的产生量。减少 BOG 的产生应从系统的漏热、回储罐的 LNG 闪蒸、储罐置换产生的 BOG 等几个方面综合考虑,优化 BOG 处理技术。

参考文献:

- [1] 钱伯章,朱建芳.世界液化天然气的现状及展望[J].天然气与石油,2008,26(4):34-38.
- [2] 梁永宽.中国多种气源天然气区域市场特点与定价原则[J].天然气工业,2011,31(3):1-3.
- [3] 邢云.中海油 LNG 产业链的形成及发展[J].天然气工业,2011,30(7):103-106.
- [4] 陈功剑,宋峰彬,王丽丽,等.天然气调压器设计原理及影响因素分析[J].天然气与石油,2011,29(3):67-72.
- [5] 杨晓东,顾安忠.液化天然气生产储运中的蒸发气回收[J].真空与低温,2000,6(4):191-194.
- [6] 徐正斌,王世清,乔志刚.LNG 凝液回收技术经济浅谈[J].天然气工业,2005,25(10):133-135.
- [7] 刘浩,金国强.LNG 接收站 BOG 气体处理工艺[J].化工设计,2006,16(1):13-16.
- [8] 付子航.LNG 接收站蒸发气处理系统静态设计计算模型[J].天然气工业,2011,31(1):83-85.
- [9] 陈雪,李明.LNG 储罐内 BOG 动态模拟研究[J].油气储运,2008,27(11):36-40.
- [10] 付子航.LNG 接收站蒸发气处理系统动态设计技术模型[J].天然气工业,2011,31(6):1-3.
- [11] 吕俊,张昌维,傅皓.LNG 接收站 BOG 压缩机处理能力计算及选型研究[J].化工设计,2011,21(1):14-16.
- [12] 姚玉英,陈常贵,柴诚敬.化工原理(上册)[M].天津:天津大学出版社,2004.29-30.