

液化天然气接收站 BOG 处理系统的研究

董龙伟

中石化北海液化天然气有限责任公司, 广西 北海 536000

摘要:针对 LNG 接收站 BOG 处理系统选择较多的问题,研究计算了不同工况下 BOG 的产生量。应用模拟计算与理论分析结合的方式,分别研究了 BOG 的处理量、再冷凝器的压力对 BOG 处理能耗的影响。提出增设冷换器的方式,降低 BOG 处理的能耗。研究表明:BOG 处理的平均能耗随 BOG 处理量的增加而增大且趋于稳定;再冷凝器的压力对平均能耗影响较小且存在最优压力值使平均能耗降到最小。研究成果可以为新建 LNG 接收站 BOG 处理系统的选择提供依据。

关键词:LNG 接收站;BOG 处理;平均能耗;模拟计算;再冷凝器

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.05.008

Research on Boil-Off Gas Processing System of LNG Receiving Terminals

Dong Longwei

Sinopec Beihai Liquefied Natural Gas Co., Ltd., Beihai, Guangxi, 536000, China

Abstract: According to the problem of more selection for boil-off gas processing system in LNG receiving terminals, the production of boil-off gas under different working conditions is studied and calculated. The means of the combination for numerical calculation and theoretical research is used to analyze the effects of boil-off gas treatment capacity and the re-condenser pressure on energy consumption for boil-off gas treatment. The way of adding the heat exchanger is put forward, which reduces the energy consumption of boil-off gas treatment. The results show that the average energy consumption of boil-off gas treatment is increasing with the increase of boil-off gas treatment, tending to be stable. The re-condenser pressure has little effect on the average energy consumption, and there exists an optimal pressure value to minimize the average energy consumption. The results can provide a basis for the selection of boil-off gas processing system for new LNG receiving terminals.

Keywords: LNG receiving terminals; Boil-off gas treatment; Average energy consumption; Numerical calculation; Re-condenser

0 前言

随着我国经济的快速发展,对清洁能源的需求日益增长。液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)作为一种清洁高效的能源正在被世界各国推广应用,其在全球各国所占的能源比重日趋增长^[1]。据统计天然气在世界一次能源结构中所占比例为 20.5%^[2],并以每年 3% 的速度保持增长^[3]。液化天然气接收站在储存 LNG 过程中由于自身的物性特点,会不断产生蒸发气(Boil-Off Gas, BOG)^[4]。BOG 处理不及时会对整个接收站造成重大的安全隐患。

目前,国内外学者对 BOG 处理系统进行了大量的研究。Park C 等人研究了最小 LNG 外输工况下 BOG 的处理量并通过新增换热设备的方式降低 BOG 的处理成本^[5]。Querol F 等人应用 Aspen Plus 研究了卸船工况下 BOG 的最大产生量并通过对比分析得出 BOG 的再冷凝处理相比于直接压缩能够减少 50% 的能耗^[6]。王小尚等人研究了 BOG 处理的 4 种工艺方法并针对青岛 LNG 接收站提出了 BOG 再冷凝工艺的优化措施^[7]。当前 BOG 处理系统的研究多集中于整个工艺外输系统总能耗的分析。本文将重点研究处理每吨 BOG 所需增加的能耗进行理论分析与数值计算。研究成果可为新建 LNG 接收站 BOG 处理系统的选择提供依据。

1 BOG 的产生

目前,国内 LNG 接收站多采用地面全包容式混凝土穹顶罐^[8]。LNG 在储存与运输过程中由于储罐与 LNG 管线保冷材料的冷损失、设备运行散热以及接卸船时 LNG 物料的置换等均会造成 BOG 的产生^[9-10]。

1.1 LNG 储罐自然蒸发产生 BOG 的量

储罐在正常储存 LNG 过程中,由于保冷材料的冷损失以及储罐内外环境温度的差异导致 LNG 吸收外部热量气化产生 BOG 气体。工程计算中通常采用式(1),计算产生的 BOG 的量 M_1 ^[11]。

$$M_1 = A \frac{\rho_{\text{LNG}} V_e}{24} \quad (1)$$

式中: M_1 为储罐自然蒸发产生 BOG 的量,kg/h; A 为 LNG 的静态蒸发率,一般取 0.05%; V_e 为储罐内 LNG 的存储量, m^3 ; ρ_{LNG} 为 LNG 的密度, kg/m^3 。

1.2 LNG 输送管道吸热产生的 BOG 的量

管道在输送 LNG 时,由于保冷管线与外界环境存在热传导、热辐射等方式的换热,管线内部的 LNG 因吸收外界环境的热量气化产生 BOG,其产生量 M_2 的计算公式如下^[12]:

$$M_2 = \frac{3.6 S_j Q t_0}{\gamma} \quad (2)$$

式中: M_2 为 LNG 输送管道吸热产生 BOG 的量,kg/h; S_j 为站内 LNG 管道的表面积, m^2 ; γ 为 LNG 的气化潜热, kJ/kg ; t_0 为管道输送 LNG 的运行时间,h; Q 为单位面积保冷层的冷损失量, W/m^2 , Q 可以通过式(3)计算^[13]。

$$Q = \frac{T_0 - T_1}{\frac{1}{2\lambda} D_1 \ln \frac{D_1}{D_0}} \quad (3)$$

式中: D_0 为裸管道的外径,m; D_1 为管道保冷层的外径,m; λ 为保冷材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,通常取 $0.0121 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[14]; T_0 为管道外表面的温度,K; T_1 为环境温度,K。

1.3 接卸船过程中产生 BOG 的量

在接卸 LNG 运输船期间,LNG 进入储罐将置换出储罐内气相空间的 BOG^[15]。在不考虑新旧物料参混时产生 BOG 量的前提下,可以采用式(4)计算卸料置换产生 BOG 的量 M_3 。

$$M_3 = \frac{Q_{\text{LNG}} M_v T p_T}{22.4 T_p} \quad (4)$$

式中: M_3 为卸料置换产生 BOG 的量,kg/h; Q_{LNG} 为卸料时的全速流量, m^3/h ; M_v 为混合 BOG 的摩尔质量, g/mol ; T 为标准状态温度,273.15 K; T_T 为 LNG 储罐顶部气相空间的温度,K; p 为标准大气压,101.325 kPa; p_T 为 LNG 储罐顶部气相空间的压力,kPa。

在进行槽车充装时,同样可以采用式(4)计算 LNG 装车时置换产生 BOG 的量。

1.4 高低压泵运行过程中产生 BOG 的量

储罐内低压泵对 LNG 升压后通过保冷循环管线再次进入到储罐内部,低压泵对 LNG 所做的功将最终转换为热量被 LNG 吸收^[16]。单台低压泵做功产生的 BOG 的量可以用式(5)计算^[11]。

$$M_L = \frac{W_z t_z Q_b}{\gamma Q_z} \quad (5)$$

式中: M_L 为单台低压泵运行产生 BOG 的量,kg/h; W_z 为低压泵正常工作时的功率,kW; t_z 为低压泵的运行时间,3 600 s; Q_b 为保冷循环流量,t/h; Q_z 为低压泵正常输送的量,t/h。

低压 LNG 经过高压泵增压后一部分进入高架式海水汽化器气化后外输,另一部分通过零输出保冷循环管线返回储罐。高压泵对返回储罐 LNG 所做的功最终转化成热量被 LNG 吸收。单台高压泵做功产生 BOG 的量同理可以采用式(5)计算。

1.5 不同工况下 LNG 接收站产生 BOG 的量

根据 LNG 接收站的工艺状况不同,可将 LNG 接收站运行分为 8 种工况。本文以广西某 LNG 接收站为例,进行不同工况下 BOG 产生量的计算。相关参数如下:4 座 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LNG 储罐,高液位为 33 m,低液位为 3

m, 罐内压力为 18.8 kPa, LNG 常压下沸点为 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, 密度为 425 kg/m^3 , 气化潜热为 523.4 kJ/kg , BOG 的操作温度为 $-126.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中, LNG 与 BOG 组分的摩尔百分比, 见表 1。卸船工况下全速卸料速度为 $11\ 147\text{ m}^3/\text{h}$, 槽车充装速度为 $720\text{ m}^3/\text{h}$, LNG 管线的表面积为 $4\ 077\text{ m}^2$ 。码头与槽车的保冷循环流量为 79.5 t/h 。零输出循环管线的保冷循环流量为 10.3 t/h 。根据以上参数, 对

表 1 LNG 与 BOG 的组分表

(%)

项目	组分 x							
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	N ₂	O ₂	CO ₂
LNG	98.37	1.18	0.34	0.01	0.01	0.08	0.01	0.00
BOG	99.75	0.21	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00

表 2 LNG 接收站不同工况下 BOG 的产生量表

t/h

项目	储罐高液位				储罐低液位			
	卸船期间		非卸船期间		卸船期间		非卸船期间	
	槽车外输	零槽车外输	槽车外输	零槽车外输	槽车外输	零槽车外输	槽车外输	零槽车外输
BOG 产生量	29.2	28.3	8.4	7.5	23.9	22.9	3.1	2.2

2 BOG 的工艺处理

2.1 BOG 处理方式

目前, 国内外处理 BOG 的方式主要为以下四种类型: 直接压缩 BOG 外输、BOG 再冷凝外输、BOG 间接热交换再液化、蓄冷式再液化^[17-18]。其中, 直接压缩 BOG 外输分为直接压缩高压外输和直接压缩低压外输; BOG 再冷凝外输又可分为再冷凝低压外输, 再冷凝高压外输。直接压缩 BOG 外输、BOG 再冷凝外输处理方式多数国内 LNG 接收站所采用。直接压缩 BOG 外输即工艺区产生的 BOG 通过 BOG 总管输送到低压 BOG 压缩机压缩至 0.75 MPa , 然后送入高压压缩机压缩至 7.74 MPa , 通过汇管与汽化器来的天然气汇合后进行高压外输。工艺流程见图 1, 其中虚线框内代表直接压缩 BOG 低压外输给下游低压用户。

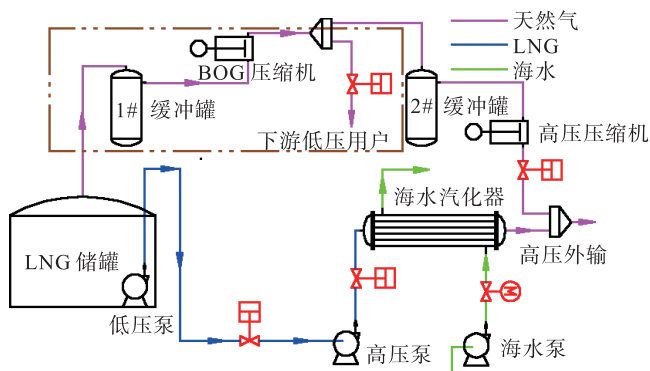


图 1 直接压缩 BOG (高压/低压) 外输工艺流程图

LNG 接收站在不同工况下 BOG 的产生量进行计算, 结果见表 2。

由表 2 分析可知, 在卸船期间产生大量的 BOG, 当储罐处于较高液位时槽车正常外输的工况下 BOG 产生量最大为 29.2 t/h 。该 LNG 接收站在正常工况下非卸船模式, BOG 的产量在 $3.1\sim 8.4\text{ t/h}$ 之间。

BOG 再冷凝外输即工艺区产生的 BOG 通过 BOG 总管输送到低压 BOG 压缩机压缩至 0.75 MPa , 然后送入再冷凝器, 低压总管的 LNG 一部分进入再冷凝器对 BOG 进行液化, 经液化后通过低压总管汇入高压泵入口, 通过高压增压至 7.5 MPa 送入汽化器进行气化后外输, 工艺流程见图 2, 其中虚线框内代表 BOG 再冷凝低压外输的工艺流程。

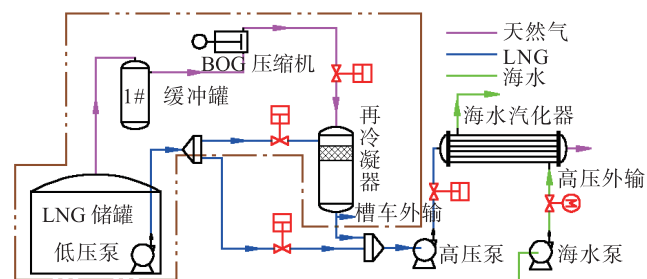


图 2 BOG 再冷凝 (高压/低压) 外输工艺流程图

通过文献分析对比, 直接压缩外输与再冷凝外输的优缺点见表 3^[19-20]。

表 3 直接压缩 BOG 外输与 BOG 再冷凝外输的对比表

外输方式	低压	高压
直接压缩	优点: 设备少, 能耗低 缺点: 下游需有低压用户	优点: 适用于多种工况 缺点: 能耗大
BOG 再冷凝	优点: 能耗低, 无低压用户要求 缺点: 必须维持最低的槽车充装量	优点: 能耗较低, 可以适用于多种工况 缺点: 设备较多, 工艺调整复杂

2.2 BOG 处理量对能耗的影响

以广西某 LNG 接收站为例,通过模拟计算研究不同 BOG 处理量时,处理 1 t BOG 所需增加消耗的能耗(即平均能耗,单位 kW/t)见图 3。

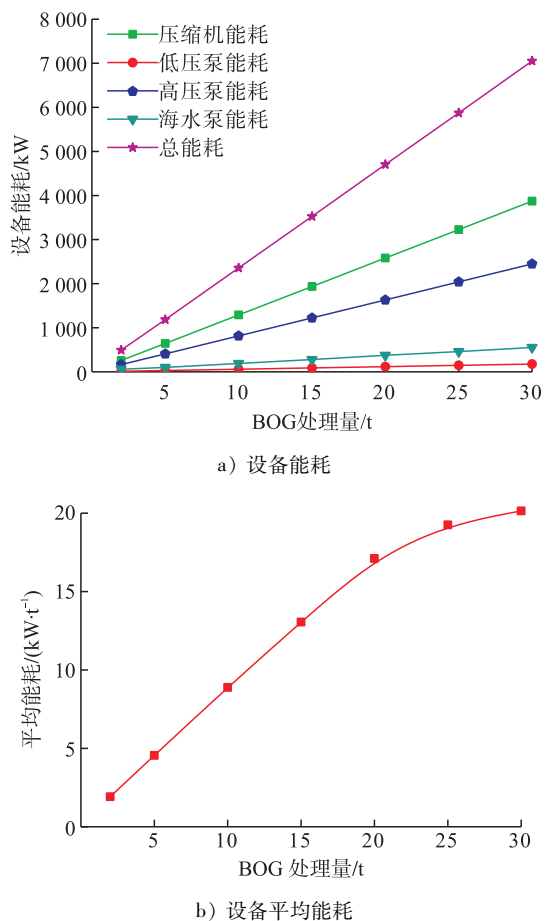


图 3 BOG 处理量对能耗的影响曲线图

分析图 3 可知,随着 BOG 处理量的增加,设备的总能耗不断增加。相比于其它设备,压缩机在处理不同 BOG 量时其能耗增加量更大,这是由于压缩气体过程中,一部分功转换成热量损失掉,处理 BOG 所需的平均能耗随 BOG 处理量的增加逐渐增多。以广西某 LNG 接收站为例,最小 BOG 处理量的平均能耗与最大 BOG 处理量的平均能耗相差 17.9 kW/t。当 BOG 产生量大于 25 t 时,其平均能耗增幅速度减缓并趋于稳定。当前工况下,该稳定值为 20.1 kW/t。

2.3 再冷凝器的工作压力对能耗的影响

再冷凝器在工作过程中其压力的调整对整个工艺运行的平稳性影响较大。本文将从能耗的角度对再冷凝器的工作压力进行分析,确定再冷凝器的工作压力。以 LNG 接收站在正常工况非卸船模式下 BOG 的产量为 8.4 t/h 为参数,进行不同压力下设备能耗的计算,计算结果见图 4。

分析图 4 可知,再冷凝器的工作压力对 BOG 处理设备的总能耗影响较小。随着再冷凝器工作压力的增加,

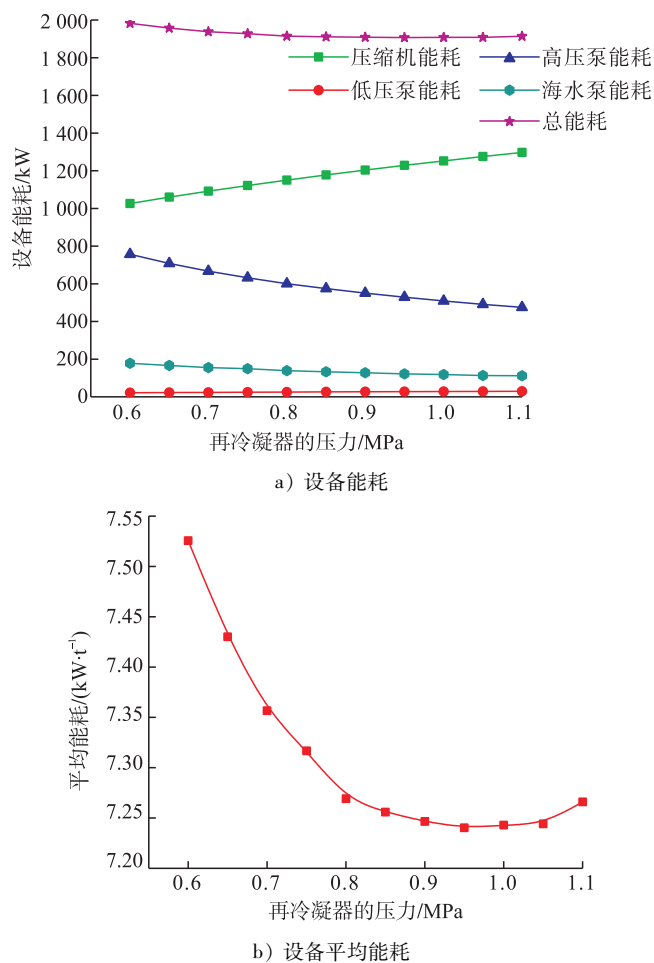


图 4 再冷凝器的工作压力对能耗的影响曲线图

压缩机出口压力增大其对应的能耗增加。由于再冷凝器工作压力的增大,高压泵入口的压力增加,在高压外输压力保持不变的前提下,高压泵的能耗降低。分析图 4-b)可知,BOG 处理设备的平均能耗随再冷凝器压力的增加呈现先降低后升高的趋势。在不考虑工艺运行条件限制的前提下,再冷凝器存在最佳工作压力。当前工况下,再冷凝器的最佳工作压力为 0.95 MPa。对比分析 BOG 处理设备的平均能耗可以获知,平均能耗的最大值与最小值仅相差 0.28 kW/t,对其影响较小。再冷凝器日常运行中考虑到工艺操作的平稳性,一般将其运行压力控制在 0.75~0.9 MPa。

2.4 BOG 再冷凝工艺的改进

再冷凝器在实际运行过程中,其气液的质量比一般为 1:10(即液化 1 t BOG 需要约 10 t 的 LNG)。这是由于 BOG 经压缩机压缩后温度可达 75 ℃,在未经冷却的前提下直接进入再冷凝器进行液化,需要大量的 LNG 对其进行冷却、液化^[21]。LNG 经过高压泵增压后进入汽化器进行气化,LNG 进入海水汽化器的温度越高其气化所需要的水流量越低。为了降低 BOG 进入再冷凝器的温度,增加进入海水汽化器 LNG 的温度,减少 LNG 的用

量,降低泵的能耗。综合分析,可以采用增设 BOG 冷换器设备的方式来实现,见图 5。

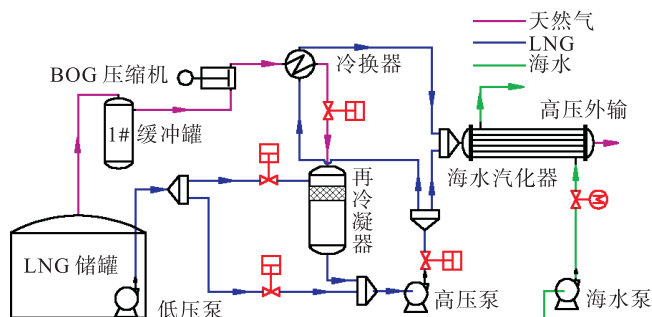
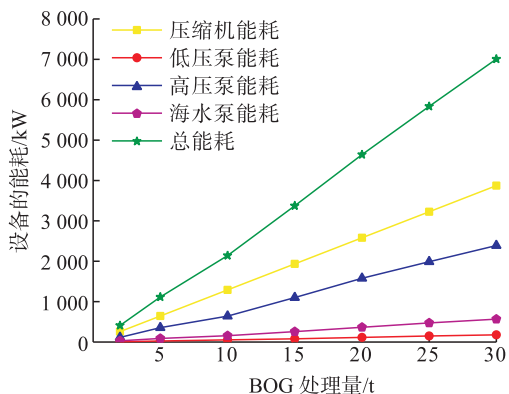
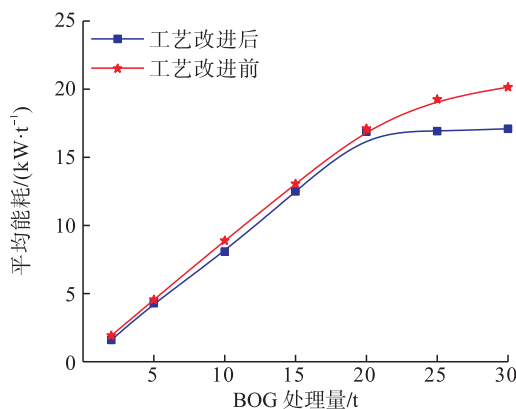


图 5 BOG 再冷凝工艺的改进流程图

BOG 再冷凝工艺改进后,分别模拟计算不同 BOG 处理量时的设备能耗,见图 6。



a) 工艺改进后设备能耗



b) 工艺改进后设备平均能耗

图 6 BOG 再冷凝工艺改进后的能耗对比曲线图

分析图 6 可知,随 BOG 处理量的增大,单台设备的能耗与设备总能耗均呈一次函数增长。与 BOG 再冷凝工艺改进前不同,平均能耗在改进后均小于改进前。随着 BOG 处理量的增加,改进工艺前、后平均能耗的差值逐渐增大。以广西某 LNG 接收站为例,最小 BOG 处理量 2.2 t 时平均能耗相差 0.24 kW/t,最大 BOG 处理量 29.2 t 时平均能耗相差 2.88 kW/t。因此,增设 BOG 冷换器后,可以减少 BOG 处理设备的平均能耗,进而减少 LNG 接收站工艺处理的用电量。

3 结论

1) BOG 处理设备的平均能耗,随 BOG 处理量的增加而增大,且平均能耗增幅速度逐渐减缓并趋于稳定。

2) 再冷凝器的工作压力对 BOG 处理设备的平均能耗影响较小,存在最优压力值使平均能耗降到最低。当前工况最优压力值为 9.5 MPa。一般考虑工艺因素,再冷凝器的压力值控制在 0.75 ~ 0.9 MPa。

3) 增设冷换器能够降低 BOG 处理设备的平均能耗,且 BOG 处理量越大,其平均能耗降低越多。

4) 平均能耗作为参数的计算结果可以为新建 LNG 接收站 BOG 处理系统的选择及其工艺优化提供依据。

参考文献:

- [1] Yun G W, Rogers W J, Mannan M S. Risk Assessment of LNG Importation Terminals Using the Bayesian-LOPA Methodology [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22 (1): 91 - 96.
- [2] 陈利琼,许培林,孙 磊,等. LNG 冷能发电技术现状分析 [J]. 天然气与石油, 2013, 31 (6): 39 - 44.
Chen Liqiong, Xu Peilin, Sun Lei, et al. Analysis on Current Situation of LNG Cold Energy Power Generation Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31 (6): 39 - 44.
- [3] 王文凯,李兆慈,盖晓峰,等. LNG 接收站 BOG 再冷凝系统操作参数优化 [J]. 天然气与石油, 2015, 33 (2): 46 - 52.
Wang Wenkai, Li Zhaoci, Gai Xiaofeng, et al. Optimization of BOG Recondensation Process at LNG Receiving Terminals [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (2): 46 - 52.
- [4] Shin M W, Shin D, Choi S H, et al. Optimization of the Operation of Boil-Off Gas Compressors at a Liquefied Natural Gas Gasification Plant [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46 (20): 6540 - 6545.
- [5] Park C, Song K, Lee S, et al. Retrofit Design of a Boil-off Gas Handling Process in Liquefied Natural Gas Receiving Terminals [J]. Energy, 2012, 44 (1): 69 - 78.
- [6] Querol E, Gonzalez-Regueral B, García-Torrent J, et al. Boil off Gas (BOG) Management in Spanish Liquid Natural Gas (LNG) Terminals [J]. Applied Energy, 2010, 87 (11): 3384 - 3392.
- [7] 王小尚,刘景俊,李玉星,等. LNG 接收站 BOG 处理工艺优化——以青岛 LNG 接收站为例 [J]. 天然气工业, 2014, 34 (4): 125 - 130.
Wang Xiaoshang, Liu Jingjun, Li yuxing, et al. A Case Study of Processing and Optimization of BOG Gas Treatment in an LNG Terminal in Qingdao [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 34 (4): 125 - 130.

- [8] 熊光德,毛云龙. LNG 的储存和运输[J]. 天然气与石油, 2005,23(2):17-20.
Xiong Guangde, Mao Yunlong. LNG Storage and Transportation [J]. Natural Gas and Oil, 2005, 23 (2): 17-20.
- [9] Bates S, Morrison D S. Modelling the Behaviour of Stratified Liquid Natural Gas in Storage Tanks: A Study of the Rollover Phenomenon [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1997, 40 (8): 1875-1884.
- [10] Kim H, Shin M W, Yoon E S. Optimization of Operating Procedure of LNG Storage Facilities Using Rigorous BOR Model [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41 (2): 10923-10926.
- [11] 康正凌,孙新征. LNG 接收站蒸发气量计算方法[J]. 油气储运,2011,30(9):663-666.
Kang Zhengling, Sun Xinzhen. Calculation Method of Evaporating Volume for LNG Receiving Station [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30 (9): 663-666.
- [12] 李兵,程香军,陈功剑. LNG 接收站 BOG 处理技术优化[J]. 天然气与石油,2012,30(5):27-30.
Li Bing, Cheng Xiangjun, Chen Gongjian. Optimization of BOG Treatment Process in LNG Terminal [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (5): 27-30.
- [13] 中国工程建设标准化协会化工分会. 工业设备及管道绝热工程设计规范:GB 50264-2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
Branch of Petrochemical Industry, China Association for Engineering Construction Standardization. Code for Design of Industrial Equipment and Pipeline Insulation Engineering: GB 50264 - 2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [14] 谢刚,王天明,邵拥军,等. LNG 管路保冷厚度的计算[J]. 石油与天然气化工,2007,36(5):373-376.
Xie Gang, Wang Tianming, Shao Yongjun, et al. Calculations for the Heat Insulation Thickness of LNG Pipe [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2007, 36 (5): 373-376.
- [15] Zellouf Y, Portannier B. First Step in Optimizing LNG Storages for Offshore Terminals [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2011, 3 (5): 582-590.
- [16] 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.
Chen Xue, Li Ming. Dynamic Simulation Research on BOG in LNG Tank [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27 (11): 36-40.
- [17] 金光,李亚军. LNG 接收站蒸发气体处理工艺[J]. 低温工程,2011,(1):51-56.
Jin Guang, Li Yajun. Boil-Off Gas Treatment in LNG Receiving Terminal [J]. Cryogenics, 2011, (1): 51-56.
- [18] Li Y, Chen X, Chein M H. Flexible and Cost-effective Optimization of BOG (Boil-Off Gas) Recondensation Process at LNG Receiving Terminals [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, 90 (10): 1500-1505.
- [19] 汪蝶,张引弟,杨建平,等. LNG 接收站 BOG 再冷凝工艺 HYSYS 模拟及优化[J]. 石油与天然气化工,2016,45(5):30-34.
Wang Die, Zhang Yindi, Yang Jianping, et al. HYSYS Simulation and Optimization of BOG Recondensation Process at LNG Receiving Terminal [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2016, 45 (5): 30-34.
- [20] 薛倩,刘名瑞,肖文涛,等. LNG 接收站 BOG 处理工艺优化及功耗分析[J]. 油气储运,2016,45(5):376-380.
Xue Qian, Liu Mingrui, Xiao Wentao, et al. Optimization and Energy Consumption Analysis of BOG Treatment Processes in LNG Terminal [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 45 (5): 376-380.
- [21] Kurlle Y M, Wang Sujing, Xu Qiang. Simulation Study on Boil-Off Gas Minimization and Recovery Strategies at LNG Exporting Terminals [J]. Applied Energy, 2015, 156: 628-641.

欢迎订阅 2020 年《天然气与石油》

《天然气与石油》是中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司主办的石油化工类科技刊物,以“推广国内外油气田地面建设先进技术,探讨建设及运行中难点问题”为办刊宗旨,主要报道油气储运与处理,油气勘探与开发,腐蚀与防护,公用工程,工程勘察,安全、信息与管理,技术经济等方面的最新科技成果。

《天然气与石油》每期定价 20.00 元,全年共 120.00 元(含邮费),详情咨询编辑部。地址:(610041)四川省成都市高新区升华路 6 号,电话/传真:(028)82978130。