

LNG 接收站 BOG 处理工艺改进及节能分析

肖荣鸽^{1*}, 戴政¹, 靳文博¹, 祝月¹, 陈雨辞²

(1. 西安石油大学陕西省油气田特种增产技术重点实验室, 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西液化天然气投资发展有限公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了提高 LNG(液化天然气)接收站 BOG(蒸发气)处理工艺的节能效果,改善工艺对工况波动的适应性,从 LNG 站无外输、BOG 产生量过大这 2 种特殊工况入手,对 LNG 接收站 BOG 处理工艺进行改进,增设压缩 BOG 储罐来储存无法进行再冷凝处理和需要排空燃烧的 BOG 气体。在此基础上进行了工艺模拟,并分析了 LNG 储存量、外输压力、压缩比对改进后工艺节能效果的影响。模拟结果表明,改进后工艺较改进前节能约为 10.8%,改进后工艺节省能耗随 LNG 储存量增加而增加,随外输压力增加而增加,随压缩比减小而增加。

关键词: LNG 接收站; BOG 处理; 压缩 BOG; 工艺改进; 节能分析

中图分类号: TE85

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)09-0172-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.09.036

Process improvement and energy efficiency analysis of BOG treatment at LNG receiving terminal

XIAO Rong-ge^{1*}, DAI Zheng¹, JIN Wen-bo¹, ZHU Yue¹, CHEN Yu-ci²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Stimulation Technology for Oil & Gas Reservoirs, College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. Shaanxi Liquefied Natural Gas Investment & Development Co., Ltd., Yangling 712100, China)

Abstract: In order to improve the energy-saving effect of BOG (boil-off gas) treatment process at LNG (liquefied natural gas) receiving terminal and the adaptability of the process to the fluctuation of the working conditions, the BOG treatment process is improved from two special conditions, including no external transmission at LNG terminal and excessive BOG production. A storage tank for compressed BOG is added to store BOG gas that cannot be re-condensed and needs to be discharged for combustion. On this basis, the process simulation is carried out, and the effects of LNG storage, external pressure and compression ratio on the energy efficiency of the improved process are analyzed. The simulation results show that about 10.8% of energy is saved after the improvement, the energy saved by the improved process increases with the increases of LNG storage amount and external pressure, and with the decrease of compression ratio.

Key words: LNG receiving terminal; BOG treatment; compressed BOG; process improvement; energy efficiency analysis

天然气作为绿色能源,液化后具有运输方便、品质纯净等优点,因而备受欢迎。随着天然气使用量的逐渐增大,LNG接收站的建设速度也日益加快^[1-3]。这些接收站主要由 LNG 储罐、LNG 罐内泵、外输泵、气化器、BOG 处理系统等部分组成,上述部分在运行中都会产生 BOG,不及时处理会产生超压,所以 BOG 处理系统是 LNG 接收站安全运转的关键部分^[4-6]。

2006 年刘浩等^[7]提出了再冷凝工艺比直接压缩工艺节能的观点;2009 年杨志国等^[8]分析了再冷

凝器运行参数对 BOG 处理工艺的影响;2012 年李兵等^[9]为了提高 BOG 处理系统对工况波动的适应性,提出了直接压缩与再冷凝综合处理工艺;2014 年王小尚等^[10]提出了 BOG 进入再冷凝器前进行预冷,可比原工艺降低能耗;2015 年杨志国等^[11]、Cui 等^[12]提出 LNG 预冷 BOG 二级压缩后进入再冷凝器,可以减小能耗。以上研究都是基于 LNG 接收站有外输时,能提供 LNG 冷能回收液化 BOG,且均没有考虑直接排空燃烧 BOG 造成的能源浪费问题。

为了解决上述问题,从 LNG 接收站无外输、

收稿日期:2018-11-16;修回日期:2019-07-10

基金项目:陕西省工业科技攻关项目(2015GY094);西安石油大学博士启动基金(2015BS11);西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划资助(YCS18212025)

作者简介:肖荣鸽(1978-),女,博士,副教授,从事多相管流与油气田地面集输技术方面的研究和教学工作,通讯联系人,xiaorongge@163.com。

BOG产生量过大这2种特殊工况出发,改进了现有的BOG处理工艺,同时对改进前后工艺的能耗进行了比较,最后分析了改进后BOG处理工艺随工况波动的节能效果,可为LNG接收站使用改进后BOG工艺提供参考。

1 BOG处理工艺改进

1.1 LNG接收站改进前工艺

LNG接收站现有BOG处理工艺多为直接压缩与再冷凝工艺的综合运用^[13-14],工艺流程如下:储罐内产生的BOG根据再冷凝器设定比例,一部分经压缩机1加压至外输压力,输送至外输管网,其余部分经压缩机2加压至再冷凝器工作压力后,与部分外输LNG在再冷凝器中换热冷凝后流出,与LNG混输进入高压泵加压,经过气化器换热气化,输送至外输管网外输,工艺流程如图1所示。

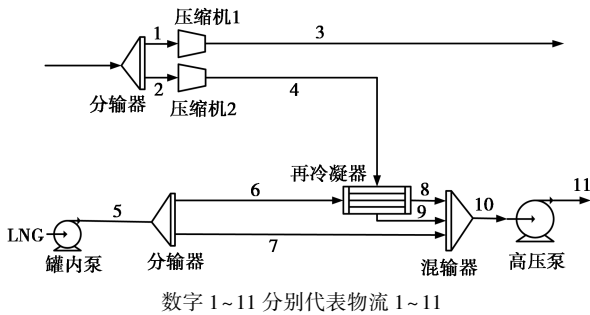


图1 LNG接收站改进前工艺流程

但当不可抗因素引起BOG生成量过大时,为了使储罐压力在安全范围内,会直接将BOG排空燃烧;另外在LNG接收站无外输时,无法提供冷能冷却产生的BOG,只能将BOG直接压缩后外输^[15-17]。由此引起的能耗增加以及BOG浪费问题仍然没有得到很好解决。因此针对上述2种特殊工况,提出了改进后工艺。

1.2 LNG接收站改进后工艺

BOG根据再冷凝器设定比例,一部分经压缩机1加压至外输管网压力,进入管网外输,剩余部分经压缩机2压缩,体积流量减小后进入压缩BOG储罐,储罐内的BOG经减压阀后,进入再冷凝器中与部分LNG换热冷凝,之后与LNG共同进入高压泵加压,经过气化器换热气化,输送至外输管网外输,改进后工艺流程如图2所示。

比较改进前工艺,改进后工艺流程中设备增设了压缩BOG储罐、减压阀。若遭遇LNG站无外输时,BOG无法进行再冷凝处理,利用压缩机压缩BOG气体,使其体积减小进入压缩BOG储罐,对暂

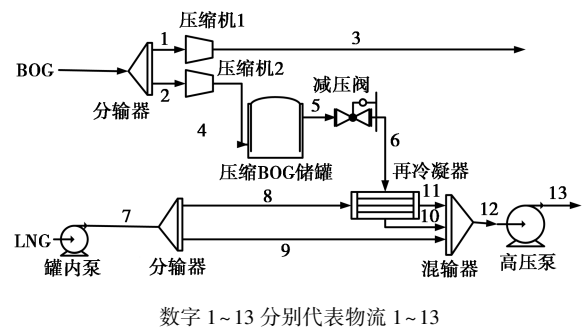


图2 LNG接收站改进后工艺流程

时无法进行再冷凝处理的BOG储存,降低能耗损失;BOG产生量过大,需排空燃烧时,可压缩储存需排空燃烧的BOG,使整个处理工艺系统对工况波动的适应能力提高。此外压缩BOG储罐可起到缓冲作用,减压阀可维持进入再冷凝器的BOG压力稳定,两者均为无耗能设备。

2 工艺模拟

以表1中LNG和BOG各组分摩尔分数为例,假定LNG接收站储罐的操作压力为0.115 MPa,LNG外输量为200 000 kg/h,BOG输量为4 150 kg/h,再冷凝器的工作压力为0.9 MPa,外输压力为6.5 MPa。利用Aspen Hysys软件模拟工艺流程,采用Peng-Robinson方程^[18-19]进行相关计算,得到了改进前后BOG处理工艺物流运行参数和所需能耗,如表2~4所示。

表1 LNG和BOG各组分摩尔分数 %

介质	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄	N ₂
LNG	96.23	1.77	0.38	0.06	0.05	1.51
BOG	96.46	0.01	0	0	0	3.53

表2 改进前BOG处理工艺物流运行参数

物流	温度/°C	压力/kPa	体积输量/(m ³ ·h ⁻¹)
BOG	-140	115	2370
LNG	-160	200	461
1	-140	115	1185
2	-140	115	1185
3	152.1	6500	66.93
4	-19.52	900	285.9
5	-159.6	900	460.9
6	-159.6	900	46.09
7	-159.6	900	414.8
8	-132.1	900	5.413

续表

物流	温度/°C	压力/kPa	体积输量/(m ³ ·h ⁻¹)
9	-128.5	900	52.469
10	-156.1	900	471.6
11	-152.9	6500	470.7

表 3 改进后 BOG 处理工艺物流运行参数

物流	温度/°C	压力/kPa	体积输量/(m ³ ·h ⁻¹)
BOG	-140	115	2370
LNG	-160	200	461
1	-140	115	1185
2	-140	115	1185
3	152.1	6500	66.93
4	-19.52	900	285.9
5	-19.52	900	285.9
6	-19.52	900	285.9
7	-159.6	900	460.9
8	-159.6	900	46.09
9	-159.6	900	414.8
10	-132.1	900	5.413
11	-128.5	900	52.469
12	-156.1	900	471.6
13	-152.9	6500	470.7

表 4 改进前后 BOG 处理工艺能耗表 kW

工艺	压缩机 1	压缩机 2	低压泵	高压泵	总能耗	节省能耗
改进前	696.4	0	119.5	955.9	1771.8	
改进后	348.2	135.4	119.5	978.1	1581.2	190.6

由表 3 知,物流 4 的体积流量近似为物流 2 的 1/4,故在意外停工导致无法外输的工况条件下,经压缩后,物流 2 体积缩小,进入压缩 BOG 储罐中暂时储存,无需进入直接压缩工艺流程处理,可减少部分能耗。由表 4 可得,在无外输工况下,改进后工艺较改进前节能 190.6 kW,节能 10.8%。

3 节能效果分析

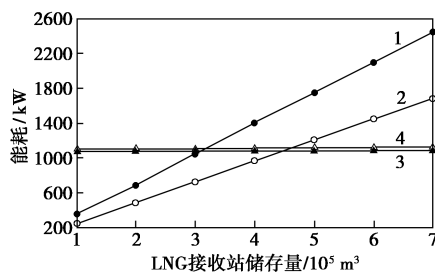
3.1 LNG 接收站储存量对改进后工艺能耗的影响

为了改进后工艺更加具有实际工程意义,分析 LNG 接收站不同储量下对改进后工艺节省能耗的影响,分别选取 7 组不同储存量,利用文献[20]中的公式得到不同储存量下的 BOG 产生量,如表 5 所示。

表 5 LNG 接收站不同储存量的 BOG 产生量

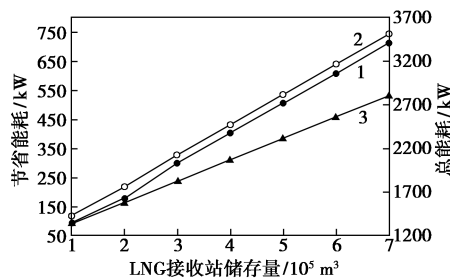
储存量/10 ⁵ m ³	1	2	3	4	5	6	7
BOG 产生量/(kg·h ⁻¹)	2059	4118	6177	8236	10295	12354	14413

在外输压力为 6.5 MPa、LNG 外输量为 461 m³/h 的工况下,利用表 5 中不同储存量下的 BOG 产生量进行工艺模拟,可得 LNG 接收站不同储存量下的节省能耗,如图 3 所示。



1—改进前压缩机能耗;2—改进后压缩机能耗;
3—改进前泵能耗;4—改进后泵能耗

(a) 工艺改进前后压缩机与泵能耗随 LNG 接收站储存量变化



1—节省能耗;2—改进前工艺总能耗;3—改进后工艺总能耗

(b) 工艺改进前后总能耗与节省能耗随 LNG 接收站储存量变化

图 3 LNG 接收站储存量对改进后工艺能耗节省的影响

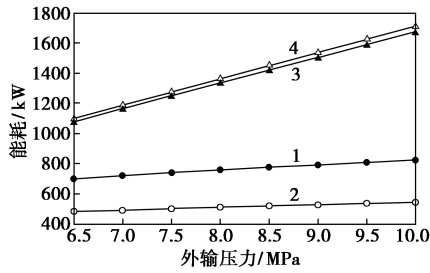
由图 3(a)知,随着 LNG 接收站储存量的增长,导致进入再冷凝系统中的 BOG 产生量增多,冷凝后,进入高压泵的 LNG 量也增加,所以改进后工艺中泵能耗较改进前泵能耗稍有增加,且 BOG 产生量越大,泵能耗增加越多;由图 3(b)可得,在意外停工无法外输时,LNG 接收站储存量越大,节省能耗越多,节能效果越明显。

3.2 不同外输压力对改进后工艺能耗的影响

为了使改进后工艺具有工程实际意义,按照不同外输压力进行软件模拟。在同一物流条件下,因外输压力不同引起的能耗节省情况如图 4 所示。

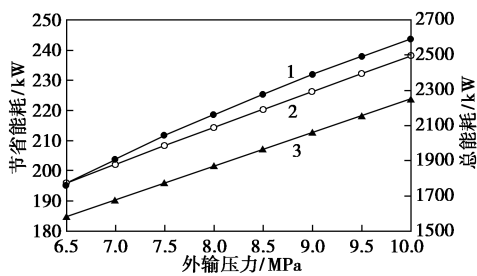
图 4(a)表明改进后工艺中泵能耗较改进前泵能耗高,同样由进入高压泵的 LNG 量增加引起,且泵能耗增加的原因均是外输压力的增加;由图 4(b)可知,在意外停工无法外输时,外输压力越高,节省

的能耗越多,节能效果越明显。



1—改进前压缩机能耗;2—改进后压缩机能耗;
3—改进前泵能耗;4—改进后泵能耗

(a)工艺改进前后压缩机与泵能耗随LNG接收站外输压力变化



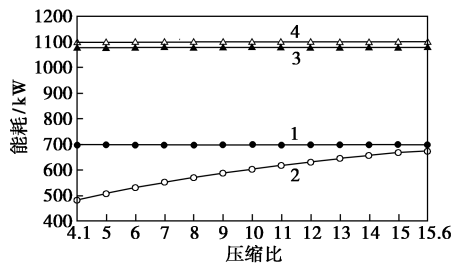
1—节省能耗;2—改进前工艺总能耗;3—改进后工艺总能耗

(b)工艺改进前后总能耗与节省能耗随LNG接收站外输压力变化

图4 外输压力对改进后工艺能耗节省的影响

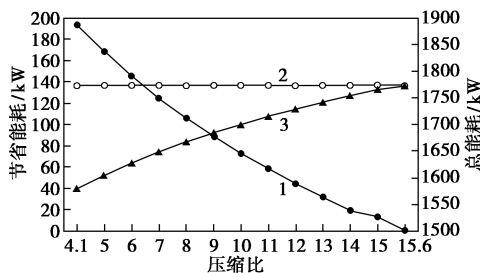
3.3 不同压缩比对改进后工艺能耗的影响

选用外输压力为6.5 MPa、LNG外输量为461 m³/h,BOG产生量为4 150 kg/h的工况参数,



1—改进前压缩机能耗;2—改进后压缩机能耗;
3—改进前泵能耗;4—改进后泵能耗

(a)工艺改进前后压缩机与泵能耗随压缩比变化



1—节省能耗;2—改进前工艺总能耗;3—改进后工艺总能耗

(b)工艺改进前后总能耗与节省能耗随压缩比变化

图5 压缩比对改进后工艺能耗节省的影响

通过改变压缩机压缩比,BOG体积流量变小,使之满足因意外停工导致LNG无法外输时,进入压缩BOG储罐储存,节省部分能耗。因再冷凝器的工作压力为0.9 MPa,所以最小压缩比为4.1;最大的压缩比为15.6,此时改进后的工艺与直接压缩工艺耗能相同,不具有减少能耗的能力,如图5所示。

图5(a)表明,改进后工艺中泵能耗比改进后泵能耗高,并且改进后泵能耗保持不变,分析后得出原因:BOG产生量一定,再冷凝器中BOG的处理量也保持一定,高压泵的LNG流量较改进前虽增加但恒定;由图5(b)可知,在意外停工无法外输时,压缩比越低,节省能耗越高,节能效果越明显。

4 结论

(1)通过对LNG接收站BOG处理工艺改进前后的能耗比较得出,在无外输的情况下,可节省能耗190.6 kW,改进后BOG处理工艺较改进前节能约为10.8%。

(2)LNG罐内压力过大时,改进后BOG处理工艺可压缩储存需要排空燃烧的BOG气体。

(3)在无法外输期间,压缩比越小、外输压力越大、LNG接收站储存量越大,节能效果越明显。企业可根据自身的LNG储存量、外输压力以及停工时间,选取适当的压缩比(4.1~15.6),达到节省能耗的目的。

参考文献

- [1] 仇德朋.LNG接收站BOG综合处理方法的研究[J].天然气化工:C1化学与化工,2017,42(5):99-103.
- [2] Park C, Lim Y, Lee S, et al. BOG Handling method for energy saving in LNG receiving terminal[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2011, 29(2): 1829-1833.
- [3] 张弛,潘振,商丽艳,等.LNG接收站BOG处理工艺改进及能耗分析[J].油气储运,2017,36(4):421-425.
- [4] 李立婉,万宇飞.LNG接收站BOG再冷凝工艺模拟及分析[J].现代化工,2014,34(6):129-132.
- [5] 曹玉春,陈其超,陈亚飞,等.液化天然气接收站蒸发气回收改进技术[J].化工进展,2016,35(5):1561-1566.
- [6] 汪蝶,张引弟,杨建平,等.LNG接收站BOG再冷凝工艺HYSYS模拟及改进[J].石油与天然气化工,2016,45(5):30-34.
- [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] 杨志国,李亚军.液化天然气接收站再冷凝工艺改进研究[J].现代化工,2009,29(11):74-77.
- [9] 李兵,程香军,陈功剑.LNG接收站BOG处理技术改进[J].天然气与石油,2012,30(5):27-30.

(下转第180页)

- human health impacts, and current remediation technologies [J]. *Environment International*, 2014, 71: 118-138.
- [2] 郭斌, 律国黎, 任爱玲, 等. 维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性 [J]. *环境科学*, 2013, 34(12): 4654-4660.
- [3] Shin H, Mckone T E, Bennett D H. Volatilization of low vapor pressure volatile organic compounds (LVPeVOCs) during three cleaning products-associated activities: Potential contributions to ozone formation [J]. *Chemosphere*, 2016, 153: 130-137.
- [4] 王玉芬, 张肇铭, 胡筱敏. SBR 处理模拟氯苯废水 [J]. *环境工程学报*, 2013, 50(7): 1709-1716.
- [5] Priya V S, Philip L. Treatment of volatile organic compounds in pharmaceutical wastewater using submerged aerated biological filter [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 266: 309-319.
- [6] 李朝宇, 张潇, 吕佳佳, 等. 石墨烯/SiO₂ 气溶胶对苯、甲苯水溶液的吸附 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 972-979.
- [7] 张璇, 廖银念, 罗云, 等. 花状氧化铜催化降解甲苯的性能研究 [J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(8): 30-35.
- [8] Eberle D, Ball R, Boving T B. Peroxone activated persulfate treatment of 1,4-dioxane in the presence of chlorinated solvent co-contaminants [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 728-735.
- [9] Kambhu A, Gren M, Tang W, *et al.* Remediating 1,4-dioxane-contaminated water with slow-release persulfate and zerovalent iron [J]. *Chemosphere*, 2017, 175: 170-177.
- [10] Viladomat F G, Souchon I, Athès V, *et al.* Membrane air-stripping of aroma compounds [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 277: 129-136.
- [11] 吴方同, 苏秋霞, 吴淑娟. 空气吹脱法去除饮用水中的三卤甲烷 [J]. *给水排水*, 2009, 35(12): 26-30.
- [12] 张伟. 曝气吹脱去除水源水中挥发性有机物的应急处理技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [13] Feng C, Khulbe K C, Tabe S. Volatile organic compound removal by membrane gas stripping using Electro-spun nanofiber membrane [J]. *Desalination*, 2012, 287: 98-102.
- [14] Ayyildiz O, Anderson P R, Peters R W. Laboratory batch experiments of the combined effects of ultrasound and air stripping in removing CCl₄ and 1,1,1-TCA from water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 120: 149-156.
- [15] Libralato G, Ghirardini A V, Avezzù F. Evaporation and air-stripping to assess and reduce ethanalamines toxicity in oily wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(3): 928-936.
- [16] 刘有智. 超重力化工过程与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [17] Quan Xuejun, Wang Fuping, Zhao Qinghua, *et al.* Air stripping of ammonia in a water-sparged aerocyclone reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170(2/3): 983-988.
- [18] 程治良, 全学军, 代黎, 等. 水力喷射空气旋流器喷孔分布优化 [J]. *化工学报*, 2013, 64(9): 3182-3188.
- [19] 徐飞, 罗丹, 全学军, 等. 底部挡板与进气位置对水力喷射空气旋流器传质性能的影响 [J]. *化工进展*, 2015, 34(11): 3864-3868.
- [20] 赵清华, 全学军, 程治良, 等. 水力喷射-空气旋流器中气液传质特性及其机理 [J]. *化工学报*, 2013, 64(10): 3653-3657.
- [21] Joanna K, Sophie C, Wojciech K. Highly hydrophobic ceramic membranes applied to the removal of volatile organic compounds in pervaporation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 260: 43-54.
- [22] 程治良, 全学军, 晏云鹏, 等. 水力喷射空气旋流器中射流流型及其对传质面积和气相压降的影响 [J]. *化工学报*, 2014, 65(8): 2914-2920.
- [23] 赵清华, 全学军, 项锦欣, 等. 水力喷射空气旋流器的气相压降特性 [J]. *化工学报*, 2011, 62(9): 7-11.
- [24] 汪艳. 曝气吹脱技术去除水源水氯苯的初步研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. ■

(上接第 175 页)

- [10] 王小尚, 刘景俊, 李玉星, 等. LNG 接收站 BOG 处理工艺改进——以青岛 LNG 接收站为例 [J]. *天然气工业*, 2014, 34(4): 125-130.
- [11] 杨志国, 李亚军. 液化天然气接收站蒸发气体再冷凝工艺的优化 [J]. *化工学报*, 2009, 60(11): 2876-2881.
- [12] Cui M, Yuan Z, Song R, *et al.* Performance improvement of a boil-off gas Re-condensation process with Pre-cooling at LNG terminals [J]. *International Journal of Thermodynamics*, 2015, 18(2): 74-80.
- [13] 薛倩, 刘名瑞, 肖文涛, 等. LNG 接收站 BOG 处理工艺改进及功耗分析 [J]. *油气储运*, 2016, 35(4): 376-380.
- [14] 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 & Design*, 2012, 90(10): 1500-1505.
- [15] 李亚军, 夏岩. LNG 接收站 BOG 蒸发量的影响因素及稳定性 [J]. *低温工程*, 2012, (4): 38-43.
- [16] 孔令海, 黎文锋, 邓文源, 等. LNG 接收站储罐冷却过程中蒸发气体的零排放技术 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(5): 81-87.
- [17] 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(6): 85-88.
- [18] 鹿晓斌, 郭雷, 曲顺利. 利用 Hysys 模拟计算接收站 BOG 蒸发量 [J]. *化工进展*, 2015, 34(S1): 47-50.
- [19] Battistelli A. Investigation of a concept for simultaneous reliquefaction of boil-off-gas and vaporization of LNG for marine atmospheric LNG fuel tanks [J]. *Plastic & Reconstructive Surgery*, 2014, 45(5): 820-824.
- [20] 孙宪航, 陈保东, 张莉莉, 等. 液化天然气 BOG 的计算方法与处理工艺 [J]. *油气储运*, 2012, 31(12): 931-933. ■