

研究论文

基于大冷量斯特林制冷机的 LNG 加气站 BOG 再液化回收技术

张宁^{1,2}, 徐雅¹, 沈愫³, 张冲⁴, 邵斌⁴, 孙大明^{1,2}

⁽¹⁾ 浙江大学制冷与低温研究所, 浙江 杭州 310027; ⁽²⁾ 浙江大学常州工业技术研究院, 江苏 常州 213000;

⁽³⁾ 浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027; ⁽⁴⁾ 江苏克劳特低温技术有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 对比分析了 LNG (液化天然气) 加气站 3 种 BOG (蒸发气) 回收方式, 指出采用大冷量斯特林制冷机的 BOG 再液化回收技术, 不仅解决了传统回收方式对天然气管网和 CNG (压缩天然气) 站的依赖, 而且实现了液化天然气储运过程中的“零排放”, 经济和社会效益显著。在此基础上, 探讨了单级整体式斯特林制冷机的制冷能力以及 BOG 的液化量, 试验和计算结果表明: 单级斯特林制冷机的制冷量达到 1 kW@77 K 和 2 kW@110 K, 每月 BOG 液化能力 ≥ 8 t, 满足了我国小型 LNG 站 BOG 回收过程对冷量的需求。

关键词: 液化; 天然气; 回收; 加气站; 蒸发气; 斯特林制冷机

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150756

中图分类号: TE 85

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) S2—0166—06

BOG recovery technology of LNG station based on a high power Stirling cryocooler

ZHANG Ning^{1,2}, XU Ya¹, SHEN Qie³, ZHANG Chong⁴, SHAO Bin⁴, SUN Daming^{1,2}

⁽¹⁾ Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

⁽²⁾ Changzhou Industrial Technology Research Institute, Zhejiang University, Changzhou 213000, Jiangsu, China;

⁽³⁾ Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

⁽⁴⁾ Jiangsu Cryote Cryogenic Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China)

Abstract: Three kinds of boil-off gas (BOG) recovery method of liquefied natural gas (LNG) filling station were comparatively analyzed and the recovery technology using a high power Stirling cryocooler was the best choice. This recovery method was not restricted by the nature gas pipeline network and compressed nature gas (CNG) and the “zero emissions” in LNG storage and transportation was performed. Its economy and social benefit were distinct. On the basis of the above analysis, refrigerating capacity of the single integral Stirling cryocooler and liquefaction capacity of BOG were discussed. The experimental and calculation results showed that the cooling capacity of cryocooler are 1 kW at 77 K and 2 kW at 110 K. The monthly liquefaction capacity of BOG is more than 8 t and meets the demands of cooling capacity of BOG recovery.

Key words: liquefaction; natural gas; recovery; gas station; BOG; Stirling cryocooler

2015-05-27 收到初稿, 2015-06-05 收到修改稿。

联系人: 孙大明。第一作者: 张宁 (1984—), 男, 博士后, 助理研究员。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51406218, 51276156)。

Received date: 2015-05-27.

Corresponding author: Prof. SUN Daming, sundaming@zju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51406218, 51276156).

引言

液化天然气 (LNG) 是一种优质的清洁能源, 它的主要成分为甲烷, 其燃烧热值高, 对环境污染轻微。随着提高环境质量的呼声越来越高, LNG 日益受到人们的重视, 目前已广泛地应用于居民生活、汽车燃料、发电及其他的各种工业应用领域中^[1-3]。

近年来, 汽车工业面临着世界能源问题和环境保护问题的严峻挑战, LNG 作为汽车燃料已经被世界许多国家重视和推广, 与汽油、柴油以及压缩天然气相比, LNG 具有环保性、经济性和安全性等优点, LNG 汽车已经成为天然气汽车行业新的发展趋势。为了满足 LNG 汽车的加气需求, LNG 加气站的数量日益增多, 与传统的 CNG 加气站相比, LNG 加气站的建设不受管网的束缚和限制, 而且具有占地面积较小、安全性能高的特点, 所以 LNG 加气站具有较大的发展空间和优势^[4]。

但是 LNG 在生产、储运过程中的蒸发气 (BOG) 损耗巨大, BOG 的回收利用是及其重要的。目前, 大型 LNG 接收站 BOG 处理工艺主要有以下 4 种^[5-9]: ①BOG 直接压缩工艺; ②BOG 再冷凝液化工艺; ③BOG 间接热交换再液化工艺; ④蓄冷式再液化工艺。但是这些 BOG 回收工艺只适用于大型的接收站和储备库, 对于小型的 LNG 加气站, 尚没有应用成熟、使用广泛的回收工艺。这将导致 LNG 加气站的 BOG 大量损耗, 造成巨大的经济浪费, 以单站日加气量 8 t 的 LNG 加气站为例, BOG 月经济损失达 4×10^4 CNY, 全国 2000 座 LNG 加气站, 一年经济损失将高达 9.6×10^8 CNY。同时, 如果 BOG 直接放空燃烧, 还将造成严重的资源浪费和环境污染。因此为了保证

LNG 加气站的节能环保和安全运行, 必须明确 BOG 产生的原因, 并确定合理的 BOG 气体处理工艺。

本文采用大冷量斯特林制冷机的 BOG 再液化回收技术, 以期解决传统回收方式对天然气管网和 CNG (压缩天然气) 站的依赖, 实现液化天然气储运过程中的“零排放”, 并探讨了单级整体式斯特林制冷机的制冷能力以及 BOG 的液化量, 以满足我国小型 LNG 站 BOG 回收过程对冷量的需求。

1 基于斯特林制冷机的 BOG 再液化回收方式及比较

根据现有资料, LNG 加气站的 BOG 一般都是直接放空燃烧, 不做回收利用, 浪费和污染巨大。有的学者根据广州 LNG 加气站的实际情况, 提出了如下两种回收方案^[10-11]。

方案一, 将 BOG 就近回收到加气站附近的民用燃气管网, 如图 1 所示, LNG 产生的 BOG 经管路汇集接到空温式气化器, 加热到常温后, 再经过 BOG 调压、BOG 计量、加臭, 最后送入民用燃气管网。

方案二, 在加气站自身有 CNG 储气设施的情况下, 将 BOG 回收到高压气罐 (瓶组) 中, 作为 CNG 的补充装置, 如图 2 所示, LNG 产生的 BOG 经管路汇集接到空温式气化器, 加热到常温后, 经过调压, 送入 BOG 高压压缩机, 增压到 25 MPa, 成为 CNG 加气站的气源。

这两种回收方式都是将 BOG 复温后增压输入到民用管网或者作为 CNG 气源, 回收系统的建立必须以民用管网和 CNG 气站作为依靠, 使用范围受到限制, 无法广泛应用于 LNG 加气站。

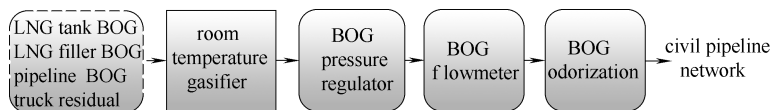


图 1 BOG 回收方式一

Fig. 1 The first recovery method of BOG

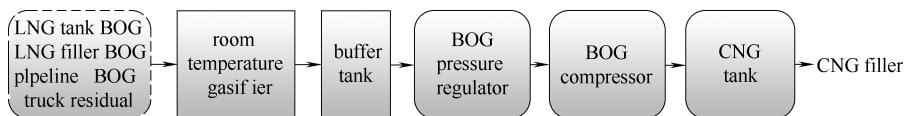


图 2 BOG 回收方式二

Fig. 2 The second recovery method of BOG

本课题组（公司）依据自身的专业背景和技术储备，提出了第 3 种回收方案，即一种基于大冷量斯特林制冷机提供冷源，实现 BOG 再液化回收技术，技术原理如图 3 所示，LNG 加气站的 BOG 气体经管路汇集后进入 BOG 液化装置，再液化为 LNG，最后通过自身重力或者低温泵送回 LNG 储罐，实现 BOG 的回收利用。

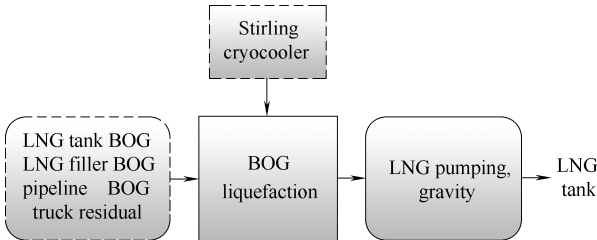


图 3 BOG 回收方式三

Fig. 3 The third recovery method of BOG

以 2013 年广东惠州石油分公司 LNG/L-CNG 加气站为例，对比分析上述 3 种回收方案的优劣。单站 LNG 储罐为 60 m³，每月加气量约 240 t，BOG 总损耗为 5.16 t，经济损失 3×10⁴ CNY。其中，考虑 LNG 泵池、LCNG 高压柱塞泵手工排气、密封件慢性渗漏等不可回收量，BOG 实际可回收率约 70%，折合 LNG 为每月 2.70 t；同时考虑 LNG 槽车卸液结束后仍需保留 0.2 MPa 压力不可回收，按 50%回收率、每月 13 车次计算，可回收 LNG 为 0.65 t。总计，LNG 单站每月可回收量为 3.35 t，可回收效益月为 2×10⁴ CNY。分别采

用上述 3 种回收方式，对比分析如表 1 所示。

通过上述对比可以发现，BOG 回收方案一最简单经济，但是受制约也最大，LNG 加气站附近必须有城市燃气管网，而且还需要和燃气公司沟通合作。回收方案二投资成本高，高压压缩机功耗大，而且必须是 LNG/CNG 混合加气站才能使用。这两种方案设计，LNG 加气站都不能独立使用，使用范围的限制必然影响这两种 BOG 回收方案的应用和推广。而采用大冷量斯特林制冷机的 BOG 再液化回收方案三，虽然一次性设备投资高，但是回收效益更高。由于对比方案中 BOG 回收量为每月 3.35 t，远没有达到单模块每月设计回收量 8 t，所以投资回收周期较长，达到 35 月，但是仍远高于一次性投资成本相同的方案二，而且月经济效益也略高于方案一。当 BOG 再液化回收模块满负荷工作时，月经济效益将成倍数增加，只需要 17 个月即可回收投资成本，即回收方案三*，而且作为一个独立的回收模块，使用和推广不受地域和环境的限制，占地较小，安全可靠，安装方便，可以根据 LNG 加气站的需求，灵活安装，对气站改造较小，安装周期短。

如图 4 所示，为应用斯特林制冷机模块实现 LNG 储罐 BOG 再液化回收的 3 种方式。图 4（a）所示为过冷方式，通过低温泵将 LNG 储罐内液体抽吸到斯特林制冷机内过冷，然后喷淋到 LNG 储罐的上部，将 BOG 气体重新冷凝。图 4（b）所示为重力回流方式，LNG 储罐的 BOG 气体在制冷机

表 1 回收方案对比分析

Table 1 Analysis of BOG recovery method

Method	1 st	2 nd	3 rd	3 rd *
overall investment×10 ⁻⁴ /CNY	26	65	65	65
monthly profit×10 ⁻⁴ /CNY	1. 75	1. 25	1. 86	3. 78
payback period/month	15	52	35	17
advantages	simple equipment; low energy cost; low operation cost; easy operation; convenient maintenance	effective loss recovery; recovered BOG as CNG supplement	efficient recycle, safe and stable; less area occupation; modularized; low restriction	
drawbacks	rely on civil gas networks, cooperation with gas company required	high investment; large area occupation; high energy cost; neighbor CNG station required	high investment; professional maintenance required	

Note: Method 3rd * is based on the condition that Stirling cryocooler works full day to achieve maximum BOG recovery at 8 t • month⁻¹.

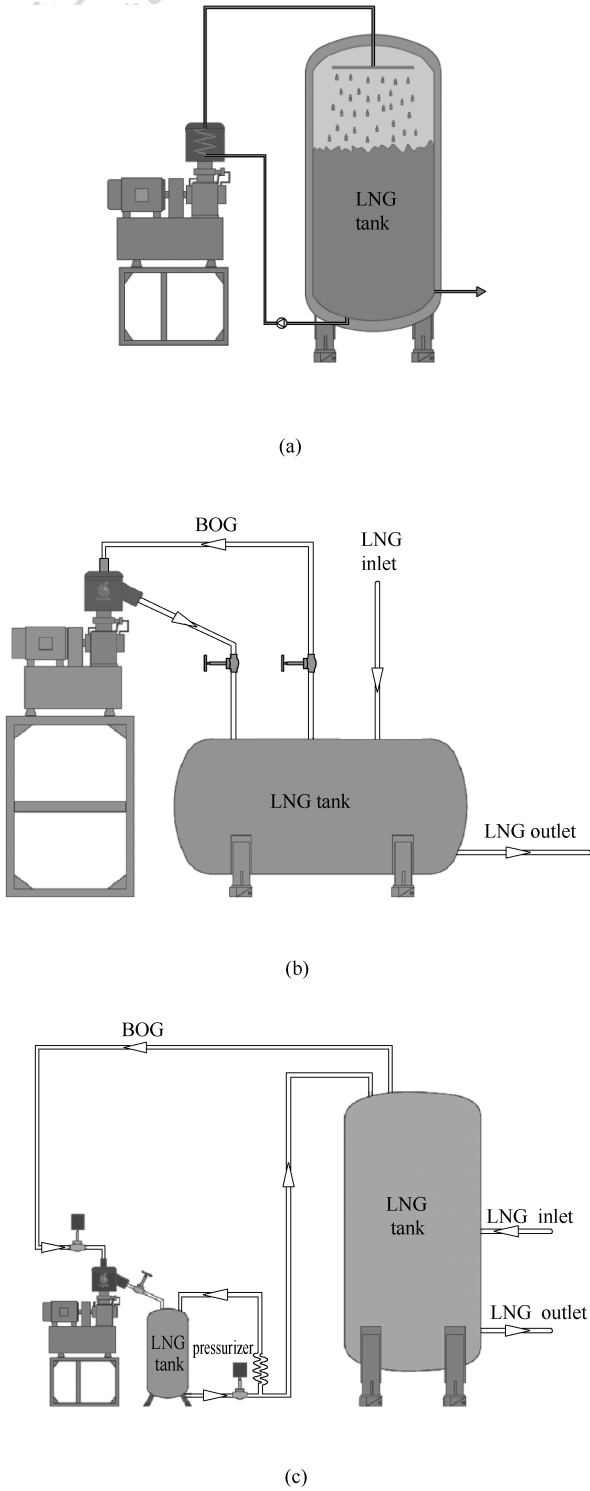


图 4 LNG 储罐 BOG 回收方式
Fig. 4 BOG recovery method of LNG storage tank

内部冷凝后，通过重力回流到储罐。图 4 (c) 所示为泵送回流方式，LNG 储罐的 BOG 气体在制冷机内部冷凝后，在冷凝储罐内汇集，最后通过低温泵泵送（或者自增压方式）回 LNG 储罐（即方案三和方案三* 的安装方式）。这 3 种回收方式各有优势，

都是通过斯特林制冷机产生的冷量来弥补 LNG 储罐从环境吸收的热量，实现 LNG 储运中的“零排放”。

2 大冷量斯特林制冷机制冷性能与 BOG 再液化能力

BOG 再液化的冷量由斯特林制冷机^[12-15]提供。斯特林制冷机以氦气或氢气为工质，在封闭系统中应用回热原理实现气体制冷循环以获得低温和冷量的机械^[16-17]，单级单台制冷机在 173~77 K 温区内提供 kW 级的冷量，满足 BOG 再液化所需要的冷量。图 5 所示为课题组开发的新型斯特林制冷机。系统主要包括驱动模块、制冷模块以及附属装置。附属装置主要包括封闭式冷却水系统、控制系统和高真空泵机组。制冷模块主要包括回热器、室温端换热器、冷端换热器、压缩腔和膨胀腔，制冷机构的主要尺寸由 Sage 软件设计完成^[18-20]。

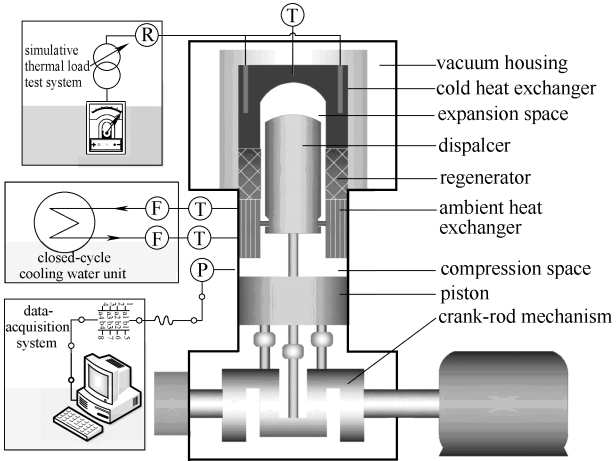


图 5 大冷量斯特林制冷机
Fig. 5 High power Stirling cryocooler

图 6 所示为斯特林制冷机在充气压力为 1.4 MPa 时的降温曲线，在该工况下获得 77 K 所需的时间为 2.26 min，获得 110 K 仅需 1.85 min，制冷机最低制冷温度可以达 35.7 K，且冷端温度稳定性好，温度波动范围在±0.3 K 以内。在 77K 时，可以提供 1 kW 的冷量；在 110 K 时，可以提供约 2.0 kW 的冷量，满足小型 LNG 储备和运输过程中的冷量需求。

斯特林制冷机通过管壳式^[21]冷端换热器为 BOG 气体提供冷量，制冷机冷量 Q 和冷头壁面温度 T_w 的性能曲线拟合式为

$$Q = -593.65 + 22.16T_w \quad (1)$$

在一定的冷凝压力下，纯质蒸汽的冷凝温度

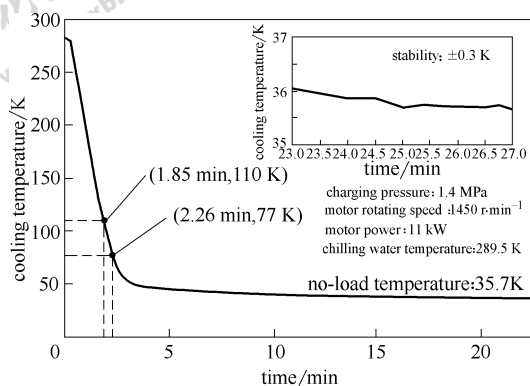


图 6 斯特林制冷机降温曲线

Fig. 6 Cooling curve of Stirling cryocooler

T_{sat} 可以确定。因此, 如果冷端换热器的换热性能不佳, 则换热温差 $\Delta T = T_{\text{sat}} - T_{\text{w}}$ 就会增大, 导致制冷机冷头壁面温度 T_{w} 下降, 进而使得冷量 Q 的输出下降。

根据传热基本方程

$$Q = UA\Delta T \quad (2)$$

式中, U 为总传热系数, A 为传热面积, ΔT 为传热温差。且 $U = 1/R_{\text{t}}$, R_{t} 为总热阻。

在管壳式冷端换热器中, 蒸气在竖直壁面发生层流冷凝, 采用 Nusselt 公式^[22] 计算冷凝传热系数 α

$$\alpha = 0.943 \left(\frac{gL_H \lambda_l \rho_l^2}{\eta_l l (T_s - T_w)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中, g 为重力加速度, L_H 为冷凝潜热, λ_l 为液体热导率, ρ_l 为液体密度, η_l 为液体黏度, l 为竖壁长度, T_s 为蒸气饱和温度, T_w 为壁面温度。则冷凝换热热阻

$$R_{\text{con}} = \frac{1}{\alpha} \quad (4)$$

管壁传热热阻^[23]

$$R_w = \frac{d_o}{2\lambda} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) \quad (5)$$

式中, λ 为固体热导率, d_o 、 d_i 分别为管外径和管内径。

总换热热阻

$$R_{\text{t}} = R_w + R_{\text{con}} \quad (6)$$

管壁热阻与冷凝热阻之比设为 w

$$w = R_w / R_{\text{con}} \quad (7)$$

制冷机对 1 MPa 以内压力的 BOG 再液化性能计算结果见图 7 所示, 产液量 m 随着压力上升逐步升高, 传热温差 ΔT 也随着压力的上升稳步增加。与此同时, 冷凝传热系数 α 也随着压力的上升而缓慢下降, 下降速度趋缓。 w 表明管壁导热热

阻为冷凝热阻的 10%~15%, 判断冷凝热阻为换热主要热阻。总体性能上, 制冷机的 BOG 再液化量折算为每月 ≥ 8 t。

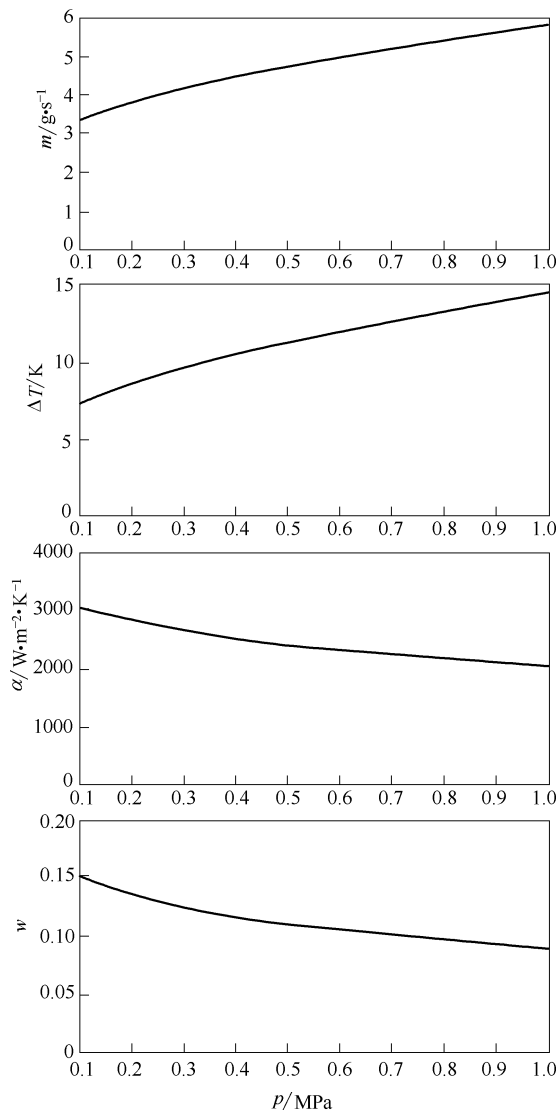


图 7 BOG 回收液化能力

Fig. 7 Cooling capacity of BOG recovery

3 结 论

本文探讨了 LNG 加气站中 BOG 的产生和回收问题, 通过经济性和实用性对比分析, 指出了基于大流量斯特林制冷机的 BOG 再液化回收技术具有更高的经济效益, 投资回收周期短。提供冷量的单级整体式斯特林制冷机的制冷量达到 1 kW@77 K 和 2 kW@110 K, 每月 BOG 再液化能力 ≥ 8 t, 满足了我国小型 LNG 站 BOG 回收过程对冷量的需求。而且作为一个独立的 BOG 再液化回收模块, 可以根

据 LNG 加气站的需求, 灵活安装, 对气站改造较小, 安装周期短, 使用和推广不受地域和环境的限制, 占地较小, 安全可靠, 可以完美地解决 LNG 储运过程中的资源浪费和安全环保问题。

符 号 说 明

- A ——传热面积, m^2
 d_i ——管内径, m
 d_o ——管外径, m
 G ——重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
 L_H ——冷凝潜热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
 l ——竖壁长度, m
 Q ——制冷机冷量, W
 R_{con} ——冷凝换热热阻, $\text{K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{W}^{-1}$
 R_t ——总热阻, $\text{K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{W}^{-1}$
 T_s ——蒸汽饱和温度, K
 T_{sat} ——冷凝温度, K
 T_w ——冷头壁面温度, K
 ΔT ——换热温差, K
 U ——总传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 ω ——热阻之比
 α ——传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 η_l ——液态黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 λ ——固体热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 λ_l ——流体热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 ρ_l ——液态密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

References

- [1] Gu Anzhong (顾安忠). Liquefied Natural Gas Technology (液化天然气技术) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004: 3-15.
- [2] Gu Anzhong (顾安忠). Handbook of Liquefied Natural Gas Technology (液化天然气技术手册) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010.
- [3] Hu Jie (胡杰), Li Zhenyu (李振宇), Huang Gesheng (黄格省). Opportunity analysis and development advices on accelerating utilizing natural gas in low carbon age for China [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2013, **32** (10): 2267-2273.
- [4] Wen Yonggang (温永刚), Chen Yunwen (陈运文), Fan Shuanshi (樊栓狮). Development of LNG vehicles technology and its prospect of popularization and application [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas* (石油与天然气工业), 2013, **42** (3): 257-260.
- [5] Li Bing (李兵), Cheng Xiangjun (程香军), Chen Gongjian (陈功剑). Optimization of BOG treatment process in LNG terminal [J]. *Oil and Gas Treating and Process* (油气加工), 2012, **30** (5): 27-30.
- [6] Yang Xiaodong (杨晓东), Gu Anzhong (顾安忠). Recovery of boil off gas generated from the storage transportation and production of LNG [J]. *Vacuum & Cryogenics* (真空与低温), 2000, **6** (4): 191-194.
- [7] Wang Xiaoshang (王小尚), Liu Jingjun (刘景俊), Li Yuxing (李玉星). A case study of processing and optimization of BOG gas treatment in an LNG terminal in Qingdao [J]. *Nature Gas Industry* (天然气工业), 2014, **34** (4): 125-130.
- [8] Yang Zhiguo (杨志国), Li Yajun (李亚军). Optimization of boil-off gas recondensation process in LNG receiving terminal [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, **60** (11): 2876-2881.
- [9] Li Yajun (李亚军), Chen Meng (陈蒙). Simulation-based optimization and analysis of BOG multi-stage compression and recondensation process at LNG receiving terminal [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2013, **64** (3): 986-992.
- [10] Chen Ziru (陈子如), Xia Yunfeng (夏云峰), Yao Sansan (姚三三). Discussion on the feasibility of BOG recycling of LNG/LCNG station [J]. *Petroleum Products Application Research* (石油商技), 2014, (5): 84-89.
- [11] Feng Boyuan (冯伯媛), Feng Xueyuan (冯雪源), Qu Ping (曲平). Recycling of BOG in combined LNG and CNG vehicle filling station [J]. *Gas & Heat* (煤气与热力), 2013, **33** (11): 13-14.
- [12] Radebaugh R. Status and recent trends in cryocooler research // International Conference of Cryogenics & Refrigeration (ICCR) [C]. Shanghai, 2008: 11-22.
- [13] Walker G. Stirling Engines [M]. Oxford: Clarendon Press, 1980.
- [14] Radebaugh R. Cryocoolers: the state of the art and recent developments [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, **21** (16): 164219.
- [15] Chen Guobang (陈国邦). Advanced Cryogenic Refrigeration Techniques (最新低温制冷技术) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003.
- [16] Walker G. Cryocoolers [M]. New York: Plenum Press, 1983.
- [17] Gromoll B, Huber N, Dietrich M, et al. Development of 25 K pulse tube refrigerator for future HTS-series products in power engineering // Cryogenic Engineering Conference (CEC22) [C]. Keystone, Colorado, USA, 2006: 643-652.
- [18] Xu Y, Cai Y C, Sun D M, et al. Study on a High-Power Stirling Cryocooler [M]. Boulder: ICC Press, 2014: 163-168.
- [19] Cai Y C, Xu Y, Sun D M, et al. Numerical Simulation of a High Power Stirling Cryocooler [M]. Boulder: ICC Press, 2014: 177-183.
- [20] Sun D M, Dietrich M, Thummes G. Investigation on High-power Stirling-type pulse tube coolers for cooling HTS Motors [J]. *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 2012, **22** (3): 4703704.
- [21] Shi Meizhong (史美中), Wang Zhongzheng (王中铮). Principle and Design of Heat Transfer Device (热交换器原理与设计) [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2014.
- [22] Nusselt W. Surface condensation of water vapour [J]. *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, 1916, (60): 541-546.
- [23] Yang Shiming (杨世铭), Tao Wenquan (陶文铨). Heat Transfer (传热学) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.