

吸收 LNG 冷能的丙烷冷凝器低温传热性能

徐会金, 罗璇, 黄善波, 巩亮

(中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580)

摘要: 利用丙烷作为中介介质回收 LNG 冷量是解决 LNG 冷能利用过程中大温差传热问题的有效途径。对超临界 LNG 丙烷在冷凝器中的传热进行理论研究。根据丙烷所处的状态将 LNG 与丙烷的传热分为过热区、两相流区及过冷区。通过参数分析研究丙烷入口温度、冷凝器尺寸、丙烷流量等对冷凝器整体传热结果的影响规律。结果表明: 适量增大 LNG 流量、减小丙烷通道的尺寸有利于 LNG 冷量的回收, 而过热丙烷的入口温度对 LNG 冷量的回收影响不大; 提高冷凝器传热效能的途径包括: 找出最佳丙烷入口温度、适当减小丙烷流量以及减小丙烷通道尺寸。

关键词: 天然气; 气化; 超临界流体; 传热; 优化设计

中图分类号: TE 124 **文献标志码:** A

引用格式: 徐会金, 罗璇, 黄善波, 等. 吸收 LNG 冷能的丙烷冷凝器低温传热性能[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(4): 140-146.

XU Huijin, LUO Xuan, HUANG Shanbo, et al. Low-temperature thermal performance of propane condenser for recovering LNG cryogenic energy[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 140-146.

Low-temperature thermal performance of propane condenser for recovering LNG cryogenic energy

XU Huijin, LUO Xuan, HUANG Shanbo, GONG Liang

(College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Using propane to recover LNG cold energy is an effective way to avoid the problem of heat transfer with large temperature difference. The heat transfer between supercritical LNG and propane in the condenser was theoretically investigated, which is significant for the utilization of LNG cold energy. According to the propane state, LNG-propane heat transfer area can be divided into overheating region, two-phase region and sub-cooling liquid region. By means of parameter analysis method, the effects of some main parameters (propane inlet temperature, condenser size, propane flow rate) on the overall heat transfer performance of condenser were discussed. The results show that properly increasing LNG mass flow rate and decreasing channel width are beneficial to the recovery of LNG cold energy, while the effect of inlet temperature of propane gas on the recovery of LNG cold energy turns out to be little. The approaches that can improve the condenser effectiveness include determining the optimal propane inlet temperature, properly decreasing the propane mass flow rate and decreasing the width of propane-side channel.

Keywords: natural gas; gasification; supercritical fluid; heat transfer; optimization design

液化天然气(LNG, 111 K)在汽化过程中吸收大量热量。LNG 冷能回收可产生较好节能效果, 有利于保护生态环境。目前 LNG 冷能利用途径较多, 包括发电、空气分离、海水淡化、食品冷冻等。国内外针对 LNG 冷能利用途径进行了研究^[1-13]。对于

LNG 汽化这类低温传热过程, 国内外也进行了一定程度的研究^[14-20]。目前 LNG 低温传热领域的工艺设计与优化的研究在公开发表的文献中较少涉及。超临界流体状态介于液态和气态之间, 扩散性更接近气体, 密度类似液体, 王英杰等^[21-23]对超临界流

体性质与流动换热特性进行了研究。采用具有合适相变物性参数的中间介质吸收 LNG 冷能是减小低温传热过程温差的一种可行方法,丙烷是一种常用的中间介质^[24]。针对利用 LNG 冷能的 ORC 中的丙烷冷凝器,笔者对高压 LNG 超临界流体与具有过热、两相及过冷 3 个状态的丙烷工质在冷凝器内的整体传热过程进行研究。通过计算换热器效能得出提高冷凝器传热效能的途径。

1 物理模型

图 1 为利用 LNG 冷能的丙烷冷凝器的物理模型。该冷凝器是一种平板换热器^[25],整体是一个长方体。图 1 中 1 表示丙烷通道,2 表示 LNG 通道。图 1(b)为冷凝器剖面图,流体从左至右流动。取丙烷通道的中线到 LNG 通道的中线为一个研究单位(图 1(c))进行研究,图中 b_1 、 b_2 分别为丙烷通道和 LNG 通道的半高。换热器长为 l (10 m), a (2 m) 和 b 分别为换热器截面的宽和高,中间壁厚为 0.01 m。冷凝器的 4 个壁面均绝热,LNG 与丙烷的流动方式采用顺流。丙烷的入口压力 $p_1 = 0.3$ MPa; LNG 的入口压力 $p_2 = 12$ MPa,入口温度 $T_2 = 111$ K,属于超临界流体。在计算过程中两种流体的压力与 LNG 入口温度保持不变,流体物性随温度发生变化。

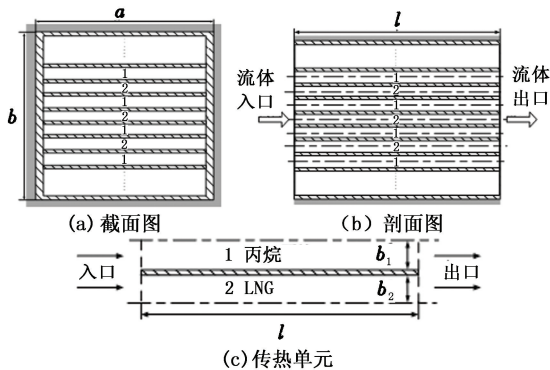


图 1 丙烷冷凝器传热模型

Fig. 1 Heat transfer model of propane condenser

2 数学描述过程

采用超临界状态下的 LNG 和 0.3 MPa 下的丙烷进行流动与传热计算,LNG 处于超临界状态,因此超临界 LNG 在整个传热过程中不发生相变,而丙烷在冷凝器内由于向低温 LNG 放热而发生凝结换热过程。考虑到低温 and 高压条件,换热器的材料选用奥氏体不锈钢耐压钢板^[26]。

2.1 工质热物性计算及关联式选取

通过 NIST 软件计算 LNG 以及丙烷的物性参数

值。为方便对丙烷及 LNG 物性参数进行数值计算,采用最小二乘法对丙烷和 LNG 物性进行了拟合,得到了相应的拟合关联式。其中针对丙烷的过热、过冷状态,得到了 0.3 MPa 的丙烷在 100 ~ 300 K 下过热丙烷蒸汽密度、导热系数、动力黏度、比定压热容及比焓等各项物性参数随温度变化的关联式。随温度的升高,其密度减小、导热系数减小、动力黏度减小、比定压热容和比焓都增大。拟合了 12 MPa 压力下 LNG 的比焓、导热系数、密度、动力黏度、比定压热容等参数与温度的关系式。随温度的升高,LNG 的比焓增大、导热系数减小、密度减小、动力黏度减小、比定压热容先增大后减小。

根据丙烷所处的状态将传热分为 3 个区域:(1)过热丙烷蒸汽与 LNG 传热;(2)丙烷两相流体与 LNG 传热;(3)丙烷液体与 LNG 传热。LNG 和丙烷单相对流传热关联式采用 Dittus-Boelter 和 Gnielinski 公式,丙烷凝结换热采用膜状凝结关联式^[27]。

2.2 传热模型及冷凝器效能

根据整体能量平衡方程,可以得到

$$\varphi = m_1(h_{1i} - h_{1o}) = m_2(h_{2o} - h_{2i}) = kA\Delta T. \quad (1)$$

式中, φ 为丙烷及 LNG 进出口间的焓差,W; h_{1i} 、 h_{1o} 分别为冷凝器中丙烷入口及出口比焓,J/kg; h_{2i} 、 h_{2o} 分别为冷凝器中 LNG 入口及出口比焓,J/kg; m_1 、 m_2 分别为丙烷与 LNG 的质量流量,kg/s; k 为整体传热系数,W/(m²·K); A 为整体传热面积,m²; T 为 LNG 与丙烷间整体传热温差,K。

对图 1 所示的几何结构采取沿流动方向进行网格划分,可将其划分为数段传热微元进行传热计算。

(1)第 i 个微元体内焓差方程为

$$\varphi_{1[i]} = m_1(h_{1[i-1]} - h_{1[i]}) = m_2(h_{2[i]} - h_{2[i-1]}). \quad (2)$$

式中, $\varphi_{1[i]}$ 为第 i 个微元体内丙烷与 LNG 进出口的焓差,W; $h_{1[i]}$ 、 $h_{2[i]}$ 为 i 处丙烷与 LNG 焓值,J/kg。

(2)第 i 个微元体位于第一、三区域和第二区域,传热方程分别为

$$\varphi_{2[i]} = k_{1[i]}A_{[i]}(T_{1[i]} - T_{2[i]}). \quad (3)$$

$$\varphi_{2[i]} = k_{2[i]}A_{[i]}(T_{1[i]} - T_{2w[i]}). \quad (4)$$

式中, $\varphi_{2[i]}$ 为第 i 个微元体内丙烷与 LNG 之间的传热量,W; $A_{[i]}$ 为第 i 个微元体内丙烷与 LNG 之间的传热面积,m²; $T_{1[i]}$ 、 $T_{2[i]}$ 分别为第 i 个微元体内丙烷侧以及 LNG 侧流体的平均温度,K; $T_{2w[i]}$ 为第 i 个微元体内中间管壁的壁面温度,K; $k_{1[i]}$ 为处于第一、三区域中的 i 微元体内丙烷与 LNG 之间的传热系数,其值由丙烷、LNG 侧换热热阻以及中间壁的导热热阻决定; $k_{2[i]}$ 为处于第二区域中的 i 微元体内丙

烷与 LNG 之间的传热系数,由丙烷换热热阻以及中间壁的导热热阻决定。

(3)在第 i 个微元体内,能量守恒方程为

$$\varphi_{1[i]} = \varphi_{2[i]} \quad (5)$$

式中, $\varphi_{1[i]}$ 、 $\varphi_{2[i]}$ 分别为用能量方程和传热方程求得的热流量, W。

为对丙烷冷凝器的传热性能进行评价,本文中 将换热器的效能定义为换热器的实际传热效果与最大可能传热效果之比,表示为

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left\{-\frac{kA}{(mc)_{\min}} \left[1 + \frac{(mc)_{\min}}{(mc)_{\max}}\right]\right\}}{1 + \frac{(mc)_{\min}}{(mc)_{\max}}} \quad (6)$$

式中, $(mc)_{\max}$ 与 $(mc)_{\min}$ 分别为质量与比热容乘积中的大者与 小者; k 为总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A

为总传热面积, m^2 。

对于本文中涉及的两流体换热器,为了区分丙烷侧和 LNG 侧的物理量,假定下标 1 代表丙烷侧,下标 2 代表天然气侧。

3 结果及其分析

3.1 丙烷入口温度 T_1 对传热的影响

图 2 给出了丙烷入口温度对沿程丙烷干度、丙烷温度以及 LNG 温度的影响 ($T_1 = 265 \text{ K}$, $m_1 = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $m_2 = 4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)。由图 2 可以看出,丙烷入口温度越高,丙烷开始液化的起始位置越靠后,但第二阶段的长度是一样的。不同丙烷入口温度下 LNG 温度分布差别很小,焓增值差别也很小,可见 LNG 焓增主要来自丙烷液化放出的潜热。由此可见,丙烷入口温度对 LNG 冷量回收的影响不大。

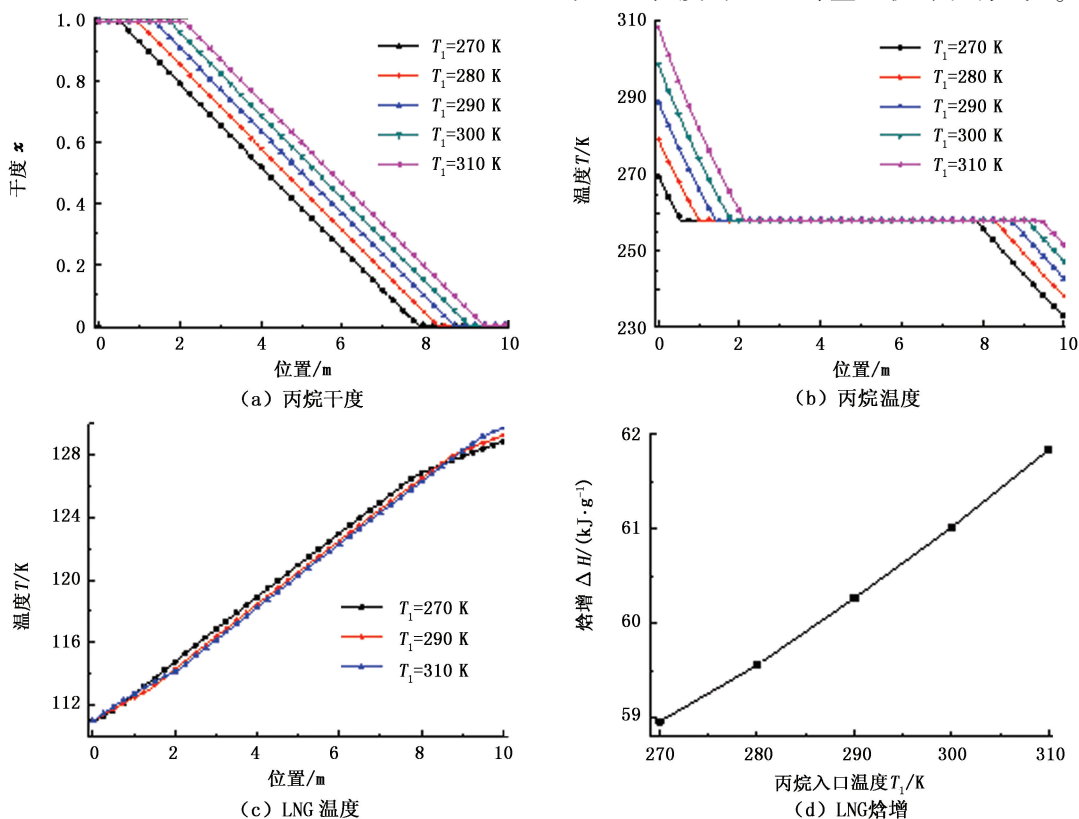


图 2 丙烷入口温度对传热的影响

Fig.2 Effect of inlet temperature on heat transfer

3.2 丙烷流量 m_1 对传热的影响

图 3 给出了丙烷流量对沿程丙烷干度、丙烷温度以及 LNG 温度的影响 ($T_1 = 265 \text{ K}$, $b_1 = 0.01 \text{ m}$, $m_2 = 8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)。由图 3 可知,丙烷流量对其开始凝结的位置影响不大,但变为饱和液体的位置随流量增加而推后。这是由于流量增多导致丙烷冷凝所需要

的冷量增加。图 3(d) 中, LNG 的焓增值随流量的增大而增加,增长趋势随着流量的增加变得缓慢。这是由于流量增多,其两相流区域的长度增加,在一定的换热通道长度下,过冷丙烷与 LNG 传热的沿程长度变短,第三区域的传热量减少。在一定范围内,回收 LNG 冷量的值随丙烷流量的增大而增多。

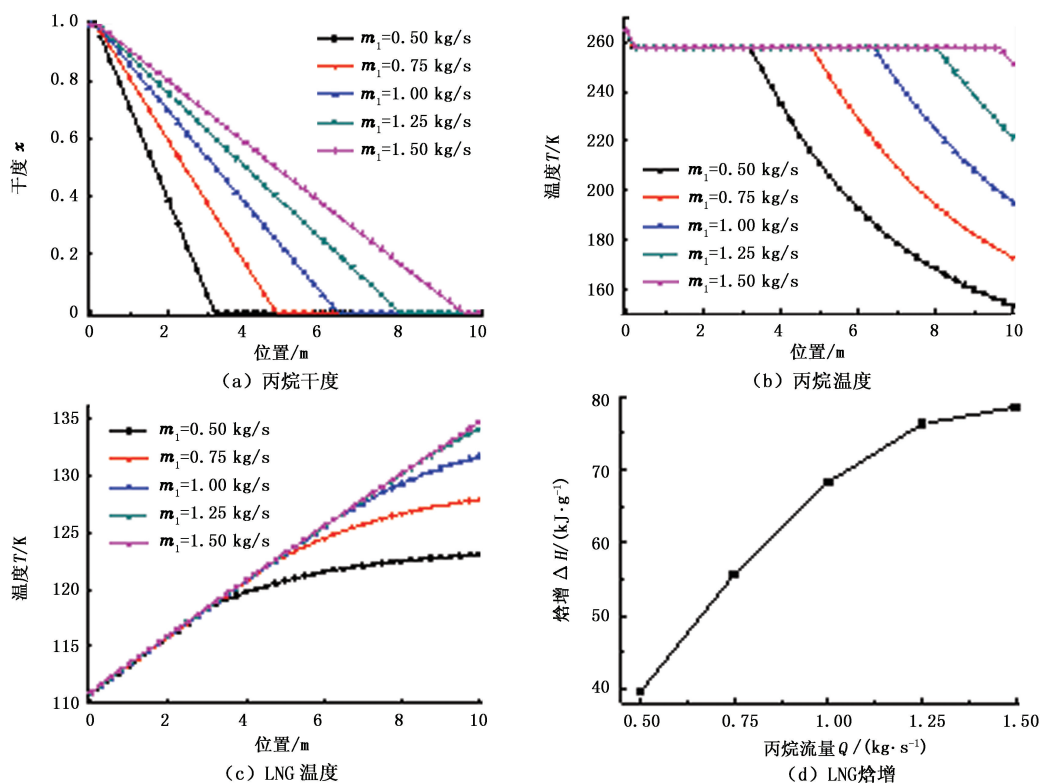


图 3 丙烷流量对传热的影响

Fig. 3 Effect of propane mass flow on heat transfer

3.3 丙烷通道尺寸 b_1 对传热的影响

图 4 给出了丙烷通道尺寸对沿程丙烷干度、丙

烷温度以及 LNG 温度的影响 ($b_2=0.02\text{ m}, m_1=1\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}, m_2=4\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)。

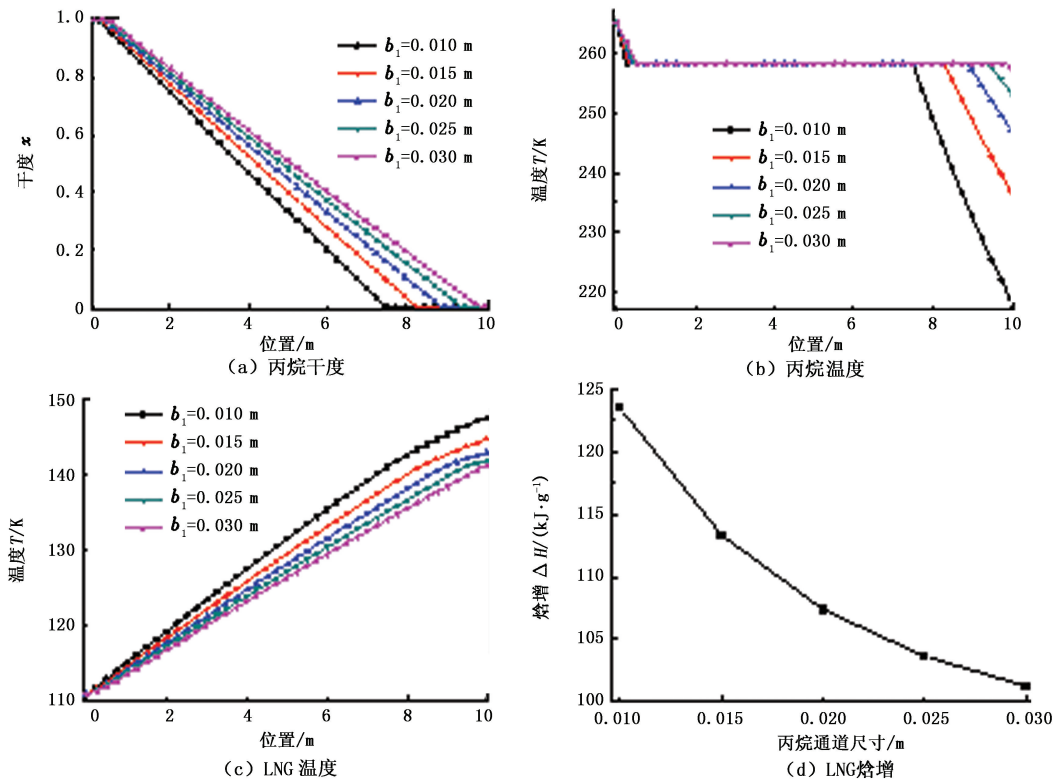


图 4 丙烷通道尺寸对传热的影响

Fig. 4 Effect of channel size on heat transfer

由图4发现,丙烷通道尺寸越大,丙烷开始凝结的位置越靠后,变为饱和液体的位置也越靠后。这是由于丙烷通道尺寸增大后,丙烷流动截面积增大,流速降低,因此传热量也相应减少。在图4(d)中,LNG焓增随丙烷流动通道参数 b_1 的增大而减少,减少的趋势随流量的增加变得缓慢。这是由于丙烷流动通道参数 b_1 增大后,流体间的换热变弱,其两相流阶段所需长度增加,在一定的换热通道长度下,相应的第三阶段的长度变短,第三阶段的换热量也减少。由此可见,其他条件相同时,丙烷流动通道参数 b_1 越小,回收LNG的冷量越多。

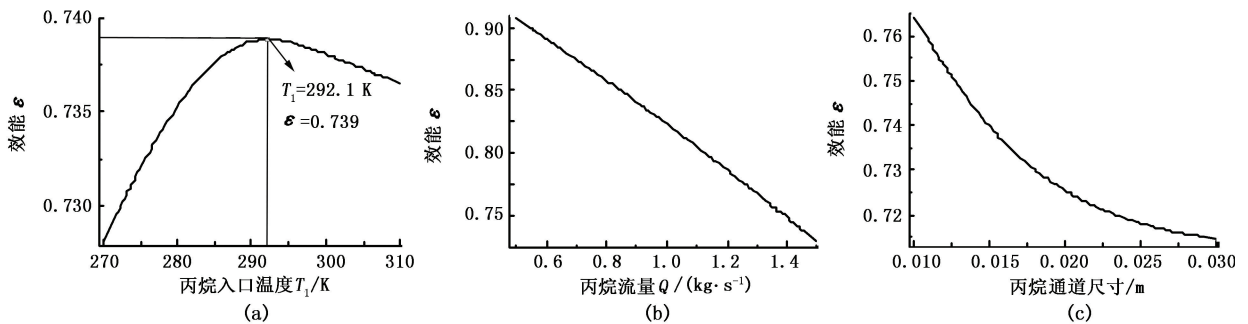


图5 基本参数对丙烷冷凝器效能的影响

Fig. 5 Effect of key parameters on effectiveness of propane condenser

4 结论

(1) 丙烷入口温度越高,丙烷开始液化的起始位置越靠后,但对LNG冷量回收的影响不大。

(2) 丙烷流量对其凝结的起始位置影响不大,但丙烷变为饱和液体的位置随流量的增加而推后。随丙烷流量增大,LNG出口温度升高,升高趋势逐渐放缓。在一定范围内,回收LNG冷量的值随丙烷流量的增大而增多。

(3) 其他条件相同时,丙烷通道尺寸越大,丙烷开始凝结的位置和变为饱和液体的位置越靠后。LNG出口温度随丙烷通道尺寸的增大而降低,但降低的趋势随着流量的增加变得缓慢。丙烷通道尺寸越小,回收LNG的冷量越多。

(4) 存在使冷凝器效能最大的最佳丙烷入口温度,减小丙烷流量及丙烷通道尺寸可以有效地改善冷凝器的效能。

参考文献:

[1] ROCCA V L. Cold recovery during regasification of LNG

3.4 丙烷冷凝器的传热性能评价

图5给出了丙烷入口温度 T_1 、流量 m_1 及通道尺寸 b_1 对换热器效能的影响。由图5(a)发现,冷凝器效能随丙烷入口温度的增大先增大后减小,存在一个最佳丙烷入口温度(292.1 K)使得冷凝器的效能(0.739)最大。由图5(b)可以看出,随着丙烷流量增大,冷凝器的效能减小,可以通过减小丙烷流量提高冷凝器的传热效能。由图5(c)可以看出,随着丙烷通道尺寸增大,冷凝器的效能也减小,因此可以通过减小丙烷通道尺寸提高冷凝器的传热效能。

part one: cold utilization far from the regasification facility [J]. Energy, 2010, 35: 2049-2058.

[2] ROCCA V L. Cold recovery during regasification of LNG part two: applications in an agro food industry and a hypermarket [J]. Energy, 2011, 36: 4897-4908.

[3] TSATSARONIS G, MOROSUK T. Advanced exergetic analysis of a novel system for generating electricity and vaporizing liquefied natural gas [J]. Energy, 2010, 35: 820-829.

[4] LIU Y N, GUO K H. Efficiency of power generation by LNG cold energy: Power and Energy Engineering Conference [C]. Chengdu: IEEE, 2010.

[5] DISENZA C, DISENZA G, ROCCA V L, et al. Exergy recovery during LNG regasification: electric energy production-part one [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 380-387.

[6] LIU Y N, GUO K H. A novel cryogenic power cycle for LNG cold energy recovery [J]. Energy, 2011, 36: 2828-2833.

[7] MIYAZAKI T, KANG Y T, AKISAWA A, et al. A combined power cycle using refuse incineration and LNG cold energy [J]. Energy, 2000, 25: 639-655.

- [8] 顾安忠,鲁雪生. 液化天然气技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2010:402-403.
- [9] ZHANG N, LIOR N. A novel near-zero CO₂ emission thermal cycle with LNG cryogenic exergy utilization[J]. Energy, 2006,31:1666-1679.
- [10] ZHANG N, LIOR N, LIU M, et al. COOLCEP (cool clean efficient power): a novel CO₂-capturing oxy-fuel power system with LNG (liquefied natural gas) coldness energy utilization[J]. Energy, 2010,35:1200-1210.
- [11] SHEN Q Q, LIN W S, GU A Z, et al. A simplified model of direct-contact heat transfer in desalination system utilizing LNG cold energy[J]. Energy, 2011,10:1-7.
- [12] GAO T, LIN W S, GU A Z. Improved processes of light hydrocarbon separation from LNG with its cryogenic energy utilized[J]. Energy Conversion and Management, 2011,52:2401-2404.
- [13] 王坤,鲁雪生,顾安忠. 液化天然气冷能利用发电技术浅析[J]. 低温工程 2005,1:53-58.
WANG Kun, LU Xuesheng, GU Anzhong. Analysis of utilization of LNG cold energy for power generation[J]. Cryogenics, 2005,1:53-58.
- [14] 焦波,邱利民,张学军,等. 应用于超导磁体冷却的新型低温传热元件[J]. 低温物理学报,2005,27(5):1085-1089.
JIAO Bo, QIU Limin, ZHANG Xuejun, et al. A new cryogenic heat transfer unit used in cooling superconducting magnet[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2005, 7(5):1085-1089.
- [15] 陈叔平,来进琳,陈光奇,等. 低温工况下翅片管换热器的设计计算[J]. 低温技术,2008,36(4):12-15.
CHEN Shuping, LAI Jinlin, CHEN Guangqi, et al. Design calculation of finned-tube heat exchanger under low temperature conditions[J]. Cryogenics, 2008,36(4):12-15.
- [16] 朱建炳,王根生. 空间低温热管的设计与实验研究[J]. 真空与低温,2000,6(2):91-97.
ZHU Jianbing, WANG Gensheng. Design and experiment of a space cryogenic heat pipe[J]. Vacuum & Cryogenics, 2000,6(2):91-97.
- [17] 杨儒周,宫兵,何琛. 板式换热器设计计算影响因素[J]. 石油化工设备 2009,38:12-13.
YANG Ruzhou, GONG Bing, HE Chen. Effectiveness of design and calculation on plate heat exchangers[J]. Petro-Chemical Equipment, 2009,38:12-13.
- [18] JIAO B, QIU L M, ZHANG X B, ZHANG Y. Investigation on the effect of filling ratio on the steady-state heat transfer performance of a vertical two-phase closed thermosyphon[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28:1417-1426.
- [19] 郭少儒,张尚文,郭长瑞,等. LNG开架式海水气化器强化传热过程数值模拟[J]. 石油化工设备,2013,42(6):50-53.
GUO Shaoru, ZHANG Shangwen, GUO Changrui, et al. Numerical simulation in the course of heat progress for rib-tube of open rack vaporizer[J]. Petro-Chemical Equipment, 2013,42(6):50-53.
- [20] AFRIANTO H, TANSHEM M R, MUNKHBAYAR B, et al. A numerical investigation on LNG flow and heat transfer characteristic in heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014,68:110-118.
- [21] 王英杰. 超临界流体传热特性研究综述[J]. 科技导报, 2012,30(33):74-79.
WANG Yingjie. Review on supercritical fluid heat transfer characteristics[J]. Science & Technology Review, 2012,30(33):74-79.
- [22] 李仲珍,郭少龙,陶文铨. 超临界LNG管内流动与换热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2013,34(12):2314-2317.
LI Zhongzhen, GUO Shaolong, TAO Wenquan. Studies of supercritical convective heat transfer of LNG in tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(12):2314-2317.
- [23] 赵丹,尹洁. 超临界流体萃取技术及其应用简介[J]. 安徽农业科学, 2014,42(15):4772-4780.
ZHAO Dan, YING Jie. Overview on supercritical fluid extraction and its application[J]. Journal of Anhui Agriculture, 2014,42(15):4772-4780.
- [24] 吴集迎,马益民. 利用LNG梯级冷能的冷库系统构建与载冷剂选择[J]. 集美大学学报:自然科学版, 2012,17(2):126-130.
WU Jiyong, MA Yimin. System configuration and secondary refrigerant selection of cold store using LNG cascade cold energy[J]. Journal of Jimei University(Natural Science), 2012,17(2):126-130.
- [25] 邹同华,杜建通,刘晓东. 板式换热器设计选型及使用中应注意的问题[J]. 设计与安装, 1999(4):40-

44.
ZOU Tonghua, DU Jiantong, LIU Xiaodong. Points should be paid attention to in the selection and application of plate heat exchanger[J]. Building Energy & Environment, 1999(4):40-44.
- [26] 陈永东,陈学东. LNG 成套装置换热器关键技术分析[J]. 天然气工业 2010,30(1):96-100.
- CHEN Yongdong, CHEN Xuedong. Key technical analysis of LNG complete sets of heat exchangers[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(1):96-100.
- [27] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006.
- (编辑 沈玉英)