

LNG 冷能利用工艺技术研究

丁 乙¹ 朱建鲁² 王雨帆³

1. 中国石化青岛液化天然气有限责任公司, 山东 青岛 266400;
2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院/山东省油气储运安全省级重点实验室/
青岛市环海油气储运技术重点实验室, 山东 青岛 266580;
3. 青岛能源华润燃气有限公司, 山东 青岛 266000

摘 要:近年来,在清洁能源政策的支持与推动下,LNG 越来越受到欢迎,其相关的冷能利用技术也逐渐成为研究热点。以某大型 LNG 接收站为背景,对 LNG 冷能用于轻烃分离工艺进行模拟分析,得到轻烃回收率为 93.43%,单位轻烃能耗为 97 kJ/kg;通过工艺的敏感性分析,考察对流程性能的影响,得到最优的操作条件及适应性要求,通过焓分析得到 LNG 冷焓的利用效率比较低,约 23.82%;在此基础上,按照能量梯级利用的原则,提出了轻烃分离与橡胶低温粉碎相集成的 LNG 冷能利用工艺,将分离出轻烃的贫 LNG 冷能用于橡胶粉碎装置,每吨贫 LNG 可节省制冷用电 196.38 kW·h,节能效果显著;焓分析结果表明,集成的流程中 LNG 冷焓的利用效率有了大幅提高,可以实现冷能的高效利用。

关键词:LNG;冷能利用;梯级利用;轻烃分离;橡胶粉碎;集成;焓分析;敏感性

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.05.006

0 前言

LNG 在使用时需要重新汽化,使之满足用户要求(一般为 5℃),这个过程中会释放出大量的冷能,约 240 kW·h/t。通常这些冷能在汽化器中随海水或空气被舍弃,造成能源浪费和环境冷污染^[1-2]。因此,充分回收利用这部分能量,可以达到节约能源、提高经济效益和环境效益的目的。当前国家进口的一些 LNG 中 C₂₊轻烃的含量较高,利用 LNG 冷能不仅可以从 LNG 中分离回收 C₂₊轻烃,为制取乙烯提供优质的原料^[3-5],而且可以用于低温发电^[6-7]、空气分离^[8-9]、低温冷库^[10-11]、制造液态 CO₂ 和干冰^[12-13]、橡胶粉碎^[14-15]和海水淡化^[16]等,节省大量制冷所需的电耗。但无论哪种方式都很难充分利用冷能,冷焓的利用效率不高。因而现在有很多学者都在进行 LNG 冷能的梯级利用研究,以期实现 LNG 冷能最大化利用^[17-19]。本文针对某大型 LNG 接收

站 LNG 中 C₂₊轻烃含量较多的情况,改进国内外已有的 LNG 冷能用于轻烃分离的流程,进行工艺模拟分析流程中焓的利用情况,并对某些工艺参数进行敏感性分析,同时考虑与其他工艺联合梯级利用冷能,以提高 LNG 接收站中富气的冷能利用率。

1 LNG 冷能用于轻烃分离

1.1 工艺流程

LNG 冷能用于轻烃分离的流程见图 1。图 1 储罐中的低压富 LNG 经泵升压至 2.0 MPa,再经 HEX 1、HEX 2 两级换热,温度升高至 -101℃左右,闪蒸出富含 CH₄ 的天然气(物流 5),通过 HEX 1 与富 LNG 换热而液化,再增压到 3.3 MPa。闪蒸塔底部富含 C₂₊轻烃的 LNG(物流 8)利用脱甲烷塔进料泵将压力提高至 3.0 MPa,预热至 -84℃左右进入脱甲烷塔。脱 CH₄ 塔塔顶得到富 CH₄ 天

收稿日期:2016-02-01

基金项目:山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2014ZZ009);青岛市应用基础研究计划项目(14-2-4-81-jch)

作者简介:丁 乙(1980-),男,湖北黄冈人,高级工程师,工程硕士,主要从事液化天然气接收站运行管理、技术研究工作。

然气(物流 11),经 HEX 2 换热液化后增压至 3.3 MPa,一部分送至脱甲烷塔塔顶作为回流,其余部分与加压后的闪蒸 CH₄ 液体(物流 7)混合,利用泵增压至管输压力后(物流 16)进汽化器。脱甲烷塔塔底得到 C₂₊ 轻烃,节流降压至 1.5 MPa 左右进入脱乙烷塔,在脱乙烷塔塔顶得到

气相 C₂H₆(物流 21),进入 HEX 3 中吸收脱甲烷塔进料的冷量而被冷凝,一部分送至脱乙烷塔塔顶作为回流,其余部分(物流 26)送至储罐作为 C₂H₆ 产品,压力 1.3 MPa。塔底得到 C₃₊ (LPG) 产品(物流 27),压力 1.34 MPa,节流降至常温后外输到储罐中。

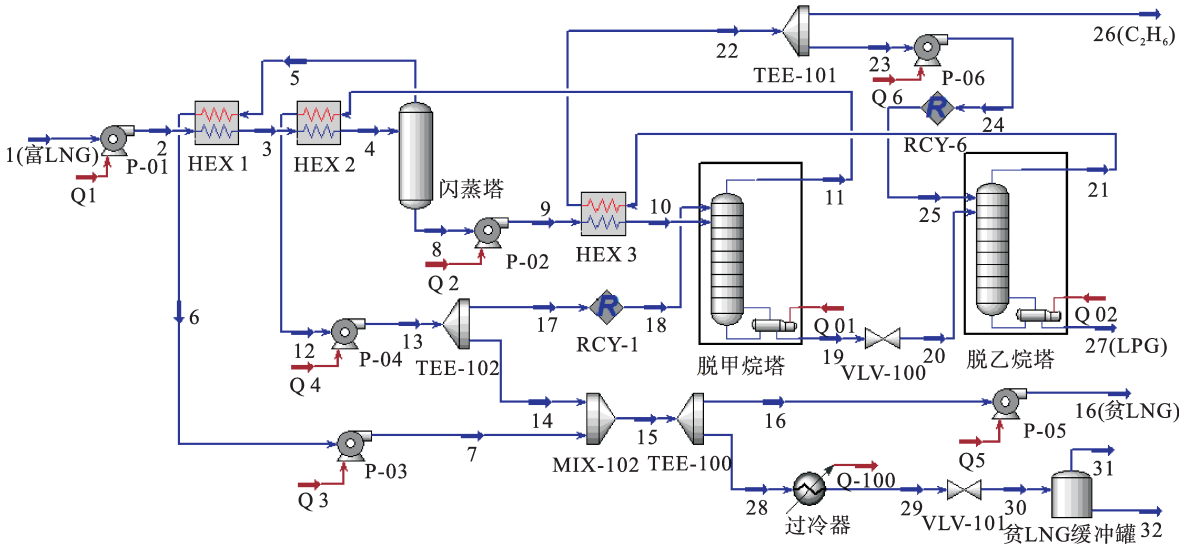


图 1 LNG 冷能用于轻烃分离的流程

1.2 流程模拟分析

对图 1 的 LNG 冷能用于轻烃分离工艺进行流程模拟和分析,热力学方法采用 PR 方程,泵的等熵效率取 80 %,环境温度 T_0 取 25 ℃,忽略换热器的热损失和压力损失。以国内某大型 LNG 接收站为背景,某种气源轻烃含量较高,组成见表 1。LNG 进入轻烃装置时压力为 0.101 MPa,温度为 -161 ℃。假设贫 LNG 的汽化量满足下游用户的气量需求,流程的模拟结果见表 2~3。

表 1 某大型 LNG 接收站的 LNG 组成

组成	含量 x /(%)
C ₁	86.77
C ₂	8.13
C ₃	3.67
iC ₄	0.55
nC ₄	0.55
iC ₅	0.05
nC ₅	0.05
C ₆	0.01
N ₂	0.22
合计	100

表 2 轻烃分离流程的模拟结果

项目	富 LNG	贫 LNG	C ₂ H ₆	LPG
温度 /℃	-161.0	-100.3	-49.84	46.54
压力 /MPa	0.101	8.0	1.30	1.34
质量流量 /(t·h ⁻¹)	228.3	173.9	25.8	28.6

表 3 轻烃分离流程的模拟设备能耗 kW

设备	能耗
泵 P-01	317.75
泵 P-02	135.24
泵 P-03	97.67
泵 P-04	51.75
泵 P-05	859.79
泵 P-06	2.81
总功耗	1 465

注:单位轻烃能耗 97 kJ/kg。

从表 2~3 可知,装置的富 LNG 处理量为 228.3 t/h,共分离得到 C₂₊ 轻烃 54.4 t/h,即轻烃回收率为 93.43 %,其中回收 C₂H₆ 25.8 t/h,纯度 99.84 %,回收率达到 86.74 %,回收 C₃₊ 28.6 t/h,回收率达到 99.47 %。分离后贫 LNG 中 CH₄ 含量达到 98.68 %,外输天然气中 C₂₊ 轻烃的质量含量由 25.49 %降至 2.2 %,发热量降至 36.14 MJ/m³,满足商品天然气的质量指标。流程总功耗约 1 465 kW,单位轻烃能耗(即流程总功耗与 C₂₊ 轻烃

回收量的比值)约 97 kJ/kg,能耗较低。

1.3 冷能利用焓分析

LNG 从初态经一系列可逆过程,达到与环境相平衡的状态时,对外所能做的最大有用功^[20]即 LNG 冷焓。LNG 与热物流换热利用冷能的过程中冷焓损失 D_K 为:

$$D_K = \sum E_{Xin} - \sum E_{Xout} \quad (1)$$

式中: D_K 为冷焓损失,kW; E_{Xin} 和 E_{Xout} 分别为所有物流输入和输出换热装置时的焓,kW。

冷能利用系统中 LNG 冷焓的利用效率 η 为:

$$\eta = 1 - \frac{\sum D_K}{E_{X(LNG)}} \quad (2)$$

式中: $E_{X(LNG)}$ 为 LNG 从初始状态(-161℃、0.101 MPa)汽化到外输条件(5℃、8.0 MPa)过程中可供利用的冷焓,kW。

轻烃分离流程主要是利用 LNG 冷能再液化分离出富 CH_4 、 C_2H_6 天然气。利用式(1)计算得到 LNG 与热流体在换热器 HEX 1、HEX 2 和 HEX 3 中传热的冷焓损失分别为 3 516.69、1 255.54、2 370.53 kW;精馏塔的焓损失主要发生在再沸器中,其加热过程中也会有一部分 LNG 冷焓随着循环水或低压蒸汽循环而损失掉,这部分冷焓损失共有 395.02 kW;同时通过轻烃分离获得的贫 LNG 去汽化器时温度在 -100℃左右,仍有大量冷能未得到利用,这部分冷焓损失为 22 266.88 kW。因此轻烃分离流程利用 LNG 冷能的总冷焓损失为 29 804.66 kW,富 LNG 可供利用的冷焓为 39 123.77 kW,根据式(2)计算得到轻烃分离流程中 LNG 冷焓的利用效率为 23.82%。

1.4 工艺参数敏感性分析

主要分析工艺流程对原料气物性变化的适应性以及系统参数的操作弹性。敏感性分析时,只变动进行分析的参数值,其余值不变。

1.4.1 闪蒸塔入口温度的影响

LNG 经过富 CH_4 天然气两级预热,部分汽化,进入闪蒸塔分离出一部分 CH_4 。当闪蒸塔入口温度升高时,进入闪蒸塔的气相增多,意味着闪蒸出的 CH_4 增多,则脱甲烷塔的处理量减少,可以减少再沸器的热负荷,降低装置能耗。闪蒸塔入口温度对流程性能的影响见图 2,从图 2 可看出,随着闪蒸塔入口温度逐渐升高,闪蒸塔液相出口物流的 C_{2+} 含量降低,通过闪蒸塔气相出口进入贫 LNG 缓冲罐的 C_{2+} 升高,导致 C_2H_6 回收率及 C_{3+} 回收率减小,说明不利于轻烃回收;虽然单位轻烃能耗减小,但由于分离得到的贫 LNG 量增加,汽化时未能回收利用的冷量升高,冷焓损失增加,导致 LNG 冷焓利用效率也减小,因此闪蒸塔的入口温度不能过高,以免 LNG 冷能得到有效利用。为保证轻烃回收率,建议闪蒸塔入口温度不低于 -100℃。

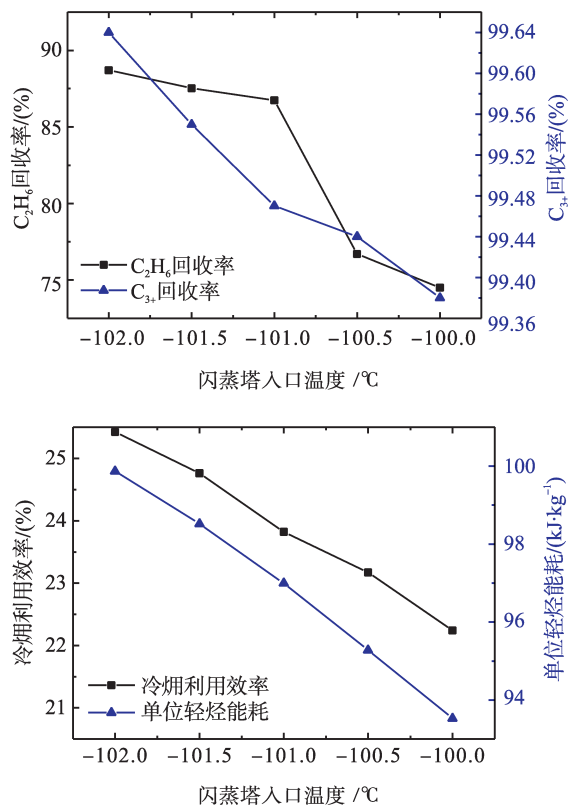


图 2 闪蒸塔入口温度对流程性能的影响

1.4.2 脱甲烷塔塔顶压力的影响

脱甲烷塔塔顶压力对流程性能的影响见图 3,由图 3 可知,脱甲烷塔塔顶压力的变化基本不影响 C_2H_6 及 C_{3+} 轻烃的回收,其回收率分别维持在 86.75%和 99.47%左右。脱甲烷塔塔顶压力增大意味着塔顶出来的 CH_4

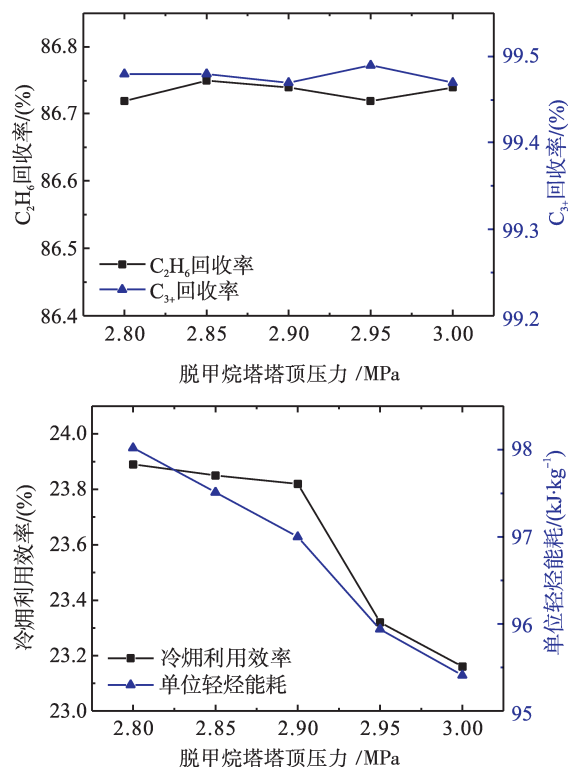


图 3 脱甲烷塔塔顶压力对流程性能的影响

压力越高,导致泵 P-04 的功耗减小,而轻烃回收量不变,因此单位轻烃能耗减小;随着塔顶 CH_4 压力增大,其液化温度升高,导致换热器 HEX 2 中换热温差增大,换热损失增大,则流程中利用 LNG 的总冷焓损失增大,因而冷焓利用效率降低,因此脱甲烷塔塔顶压力过高不利于冷能回收。为了保证 LNG 冷焓利用效率,建议脱甲烷塔塔顶压力不高于 3.0 MPa。

1.4.3 脱 C_2H_6 塔塔顶压力的影响

脱乙烷塔塔顶压力对流程性能的影响见图 4。由图 4 可知,脱乙烷塔塔顶压力的变化基本不影响 C_3 , 轻烃回收,但 C_2H_6 回收率随脱乙烷塔塔顶压力的增大而减小,说明脱乙烷塔塔顶压力太高不利于 C_2H_6 的分离;由于脱乙烷塔塔顶压力越高意味着塔顶出来的 C_2H_6 压力越高,因而泵 P-06 的功耗减小,但脱乙烷塔塔顶回流量较小,泵 P-06 的功耗占流程总功耗的比例不大,因此单位轻烃能耗稍有减小。且塔顶 C_2H_6 压力增大,液化温度升高,导致换热器 HEX 3 中换热温差增大,换热损失增大,则流程中利用 LNG 的总冷焓损失增大,因而冷焓利用效率降低,说明脱乙烷塔塔顶压力太高不利于冷能回收。为了保证 C_2H_6 回收率和 LNG 的冷焓利用效率,建议脱乙烷塔塔顶压力不高于 1.5 MPa。

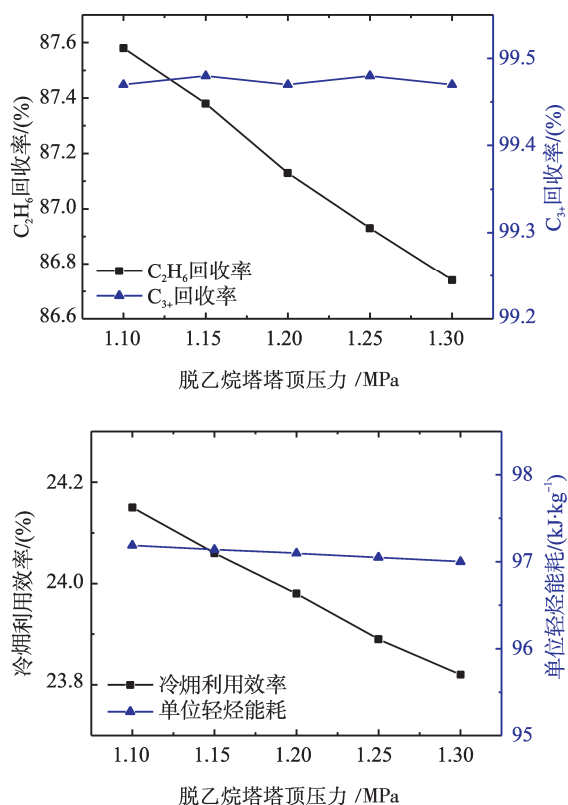


图4 脱乙烷塔塔顶压力对流程性能的影响

2 冷能利用工艺集成

对轻烃分离与橡胶粉碎冷能利用进行工艺集成。

2.1 流程集成

轻烃分离流程计算得到 LNG 冷焓利用效率并不高,主要是由于分离 C_2 , 轻烃后得到的贫 LNG 去汽化器时带走很大一部分冷焓,未被利用。因此提高 LNG 冷焓利用效率的关键在于充分利用贫 LNG 的冷能,进一步拓展符合其温位的冷能利用领域,减少 LNG 汽化时对海水和燃气的消耗,降低对环境的影响。

低温粉碎技术中废旧橡胶的脆化温度约 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,与贫 LNG 的温度 ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右) 比较匹配,因此可将贫 LNG 的冷能用于废旧橡胶低温粉碎中,轻烃分离与低温粉碎集成流程见图 5,如图 5 所示,将橡胶粉碎装置接驳在贫 LNG 原汽化流程上,贫 LNG 吸收热量汽化升温,达到供气温度和压力的要求进入外输管网供用户使用。当出现紧急情况如橡胶粉碎装置 (LNG 冷能回收系统) 发生故障不能正常运转或者进行正常停工检修时,立即关闭阀 V 2,打开阀 V 1,贫 LNG 全部由海水汽化器汽化外输,以保证供气的安全和稳定;同时,橡胶粉碎装置切换至电压缩制冷系统,保证装置的稳定用冷。当橡胶粉碎装置的用冷负荷超出贫 LNG 供应的冷量时,也可以开启电压缩制冷系统来补充供冷,保证尽可能地利用 LNG 冷能的同时,又不影响冷能用户用冷。考虑到安全问题,橡胶粉碎装置中利用 N_2 作为中间冷媒回收贫 LNG 的冷能^[13], N_2 与贫 LNG 换热后,再送入冷冻室、低温粉碎机和预冷室中提供冷量。

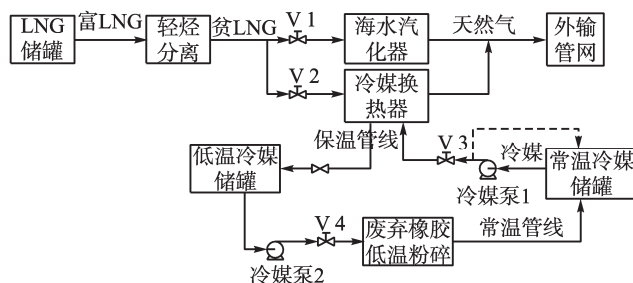


图5 轻烃分离与低温粉碎集成流程

2.2 流程模拟分析

假设分离轻烃得到 173.9 t/h 、 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的贫 LNG 冷能全部用于橡胶粉碎, N_2 由常温冷却到 $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 对贫 LNG 与 N_2 的换热过程进行模拟计算可知,需要 N_2 758.9 t/h 。按照生产 1 t 胶粉耗用低温 N_2 1.5 t 计算,约可生产胶粉 505.9 t/h 。如果采用膨胀制冷来提供橡胶低温粉碎的冷能,生产 $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温 N_2 约耗电 $45\text{ kW}\cdot\text{h/t}$,则每吨贫 LNG 用于低温粉碎可节省制冷用电 $196.38\text{ kW}\cdot\text{h}$,节能效果显著。

橡胶粉碎装置主要利用 LNG 冷能冷却 N_2 ,由式(2)计算得到 LNG 与 N_2 换热过程的冷焓损失约 285.2 kW ,将贫 LNG 汽化过程的冷焓损失大大减小。因此 LNG 冷

能用于轻烃分离及橡胶粉碎的集成流程中冷炯损失共约 9 822.98 kW, 根据式(2)可计算出集成流程的 LNG 冷炯利用效率为 74.89%, 比贫 LNG 直接汽化时有了大大提高, 避免了冷能浪费。

3 结论

1) 模拟得到轻烃回收率为 93.43%, C_2H_6 回收率达到 86.74%, C_{3+} 回收率达到 99.47%, 单位轻烃能耗为 97 kJ/kg, 轻烃分离工艺利用 LNG 冷炯效率较低, 约为 23.82%。

2) 提出了轻烃分离与橡胶粉碎相集成的 LNG 冷能梯级利用流程, 将分离出轻烃的贫 LNG 冷能用于橡胶低温粉碎装置, 每吨贫 LNG 可节省制冷用电 196.38 kW·h, 节能效果显著。

3) 炯分析结果表明, 集成的流程中 LNG 冷炯利用效率可提高到 74.89%, 通过梯级利用 LNG 冷能不仅可以实现冷能的高效利用, 而且有助于 LNG 冷能产业的发展。

参考文献:

- [1] Rosetta M J, Price B C, Himmelberger L. Optimize Energy Consumption for LNG Vaporization [J]. Hydrocarbon Processing, 2006, 85 (1): 57-64.
- [2] Dharmadhikari S. Optimize LNG Vaporizers [J]. Hydrocarbon Processing, 2004, 83 (10): 95-99.
- [3] 华 贵, 熊永强, 李亚军, 等. 液化天然气轻烃分离流程模拟与优化[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 127-129.
- Hua Ben, Xiong Yongqiang, Li Yajun, et al. Simulation and Optimization of the Process of Light Hydrocarbons Recovery from LNG [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (5): 127-129.
- [4] 熊永强, 李亚军, 华 贵. 液化天然气中轻烃分离工艺的优化设计[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 62-66.
- Xiong Yongqiang, Li Yajun, Hua Ben. Optimized Design of Recovery Process of Light Hydrocarbons from LNG [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 35 (7): 62-66.
- [5] 熊永强, 李亚军, 华 贵. 液化天然气冷量利用与轻烃分离集成优化[J]. 现代化工, 2006, 26(3): 50-53.
- Xiong Yongqiang, Li Yajun, Hua Ben. Integration and Optimization for Recovery Light Hydrocarbons from Liquefied Natural Gas with Its Cryogenic Energy Utilized [J]. Modern Chemical Industry, 2006, 26 (3): 50-53.
- [6] 暨穗璘, 彭 艳. 液化天然气(LNG)冷能用于冷却发电燃气轮机进气的分析[J]. 能源技术, 2005, 26(4): 182-184.
- Ji Suilin, Peng Yan. The Analysis of Gas Turbine Generating Unit Inlet Air Cooling Based on the Liquefied Natural Gas (LNG) Chill [J]. Energy Technology, 2005, 26 (4): 182-184.
- [7] 杨红昌, 鹿院卫, 刘广林, 等. 基于 LNG 汽化分段模型的低温动力循环炯分析[J]. 天然气工业, 2010, 30 (7): 98-102.
- Yang Hongchang, Lu Yuanwei, Liu Guanglin, et al. Exergy Analysis of the Model on a LNG Cryogenic Power Generation System Based on the Rankin Cascading Cycle [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30 (7): 98-102.
- [8] 陈则韶, 程文龙, 胡 芑. 一种利用 LNG 冷能的空气分离装置新流程[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(6): 913-916.
- Chen Zeshao, Cheng Wenlong, Hu Peng. A New Air Separation System by Using Cold Energy of LNG [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25 (6): 913-916.
- [9] 燕 娜, 厉彦忠, 脱瀚斐. 基于液化天然气冷量的液体空分系统新流程[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (1): 122-124.
- Yan Na, Li Yanzhong, Tuo Hanfei. Novel Liquid Product Air Separation System Based on Cold Energy of Liquefied Natural Gas [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41 (1): 122-124.
- [10] 黄美斌, 林文胜, 顾安忠. 利用 LNG 冷能的低温冷库流程比较[J]. 制冷学报, 2009, 30(4): 58-62.
- Huang Meibin, Lin Wensheng, Gu Anzhong. Process Comparison of Low Temperature Cold Store Using LNG Cold Energy [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30 (4): 58-62.
- [11] 吴集迎, 马益民, 陈仕清. LNG 冷能用于冷库的系统设计及分析[J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2010, 15(1): 44-47.
- Wu Jiying, Ma Yimin, Chen Shiqing. System Design and Analysis of Applying LNG Cold Energy to Refrigerated Warehouses [J]. Journal of Jimei University: Natural Science Edition, 2010, 15 (1): 44-47.
- [12] Zhang Na, Lior Noam, Liu Meng, et al. COOLEP (Cool Clean Efficient Power): A Novel CO_2 Capturing Oxy Fuel Power System with LNG (Liquefied Natural Gas) Coldness Energy Utilization [J]. Energy, 2010, (35): 1200-1210.
- [13] 熊永强, 华 贵. 利用液化天然气冷能捕集 CO_2 的动力系统的集成[J]. 化工学报, 2010, 61(12): 3142-3138.
- Xiong Yongqiang, Hua Ben. Integration of Energy Power System in CO_2 Capture by Utilization of Cold Energy from Liquefied Natural Gas [J]. CIESC Journal, 2010, 61 (12): 3142-3148.

(上接第29页)

- [14] 陈叔平, 谢振刚, 陈光奇, 等. 基于液化天然气(LNG)冷量的废旧橡胶低温粉碎工艺流程[J]. 低温工程, 2009, 167(1): 46-48.

Chen Shuping, Xie Zhengang, Chen Guangqi, et al. Cryogenic Pulverization Process of Waste Rubber Based on Cold Energy of Liquefied Natural Gas (LNG) [J]. Cryogenics, 2009, 167(1): 46-48.

- [15] 熊永强, 华 贵, 李亚军, 等. 废旧橡胶低温粉碎中 LNG 冷能利用的集成分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(12): 58-63.

Xiong Yongqiang, Hua Ben, Li Yajun, et al. Integration Analysis of LNG Cold Energy Utilization in Cryogenic Pulverization of Waste Rubber [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(12): 58-63.

- [16] 黄美斌. 利用液化天然气冷能的海水淡化技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

Huang Meibin. Research of Seawater Desalination Technology with LNG Cold Energy Utilization [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.

- [17] 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.

- [18] 梁光川, 蒲 鹤, 李 俊, 等. 利用 LNG 冷能的空气分离流程[J]. 天然气与石油, 2013, 31(3): 28-30.

Liang Guangchuan, Pu He, Li Jun, et al. Air Separation Process by Usage of LNG Cold Energy and Its Performance [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(3): 28-30.

- [19] 贾 磊. LNG 冷能利用与低温半导体温差发电研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.

Jia Lei. LNG Cold Energy Utilization and Research Semiconductor Thermoelectric Power Generation at Low Temperature [D]. Hefei: China University of Science and Technology of China, 2006.

- [20] 罗惠芳. 液化天然气冷能利用的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

Luo Huifang. Research on Cold Energy Utilization of Liquefied Natural Gas [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.