

文章编号:0253-4339(2022)02-0001-12  
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2022.02.001

LNG 冷能回收及梯级利用研究进展

李 俊 陈 煜

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院能源与动力工程系 上海 201620)

**摘 要** 本文在分析 LNG 冷能利用特点的基础上,根据“高能高用、低能低用、温度对口、梯级利用”原理,总结了 LNG 冷能用于发电、空气分离、海水淡化、CO<sub>2</sub> 捕获和低温冷库等单元利用的工艺方法、温位区间、工质选择以及优缺点,对比了现有的 LNG 冷能梯级利用工艺温度范围,以实现温位的良好匹配。并分别针对大型 LNG 气化站、小型 LNG 气化站和大型远洋 LNG 船舶,给出 LNG 冷能梯级利用的具体方案。

**关键词** 液化天然气;冷能;梯级利用;温位区间利用

**中图分类号**:TB61<sup>+</sup>1;TE89

**文献标识码**:A

Research Progress of Cold Energy Recovery and Cascade Utilization of LNG

Li Jun Chen Yu

(Department of Energy and Power Engineering, School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Science, Shanghai, 201620, China)

**Abstract** In this study, the amount and grade of cold energy in liquefied natural gas (LNG) were analyzed. According to the principles of "high-grade-demand with high-grade-energy, low-grade-demand with low-grade-energy, temperature matching, and cascade utilization", LNG cold energy can be used in power generation, air separation, seawater desalination, CO<sub>2</sub> capture, and low-temperature cold storage, and the process methods, temperature range of utilization, working fluid properties, and advantages and disadvantages of LNG cold energy were discussed. The temperature ranges of existing LNG cold energy cascade utilization processes were compared to achieve more suitable temperature level matching. Specific schemes for cascade utilization of LNG cold energy were provided for large LNG gasification stations, small LNG gasification stations, and large ocean-going LNG ships.

**Keywords** liquefied natural gas; cold energy; cascade utilization; temperature range of utilization

2019 年全球液化天然气 (liquefied natural gas, LNG) 贸易量达到 3.58 亿吨,2020 年达到 3.6 亿吨,面临新冠肺炎疫情带来的巨大的影响,贸易量数据的小幅增长体现了全球 LNG 市场的韧性和灵活性<sup>[1]</sup>。在标准大气压下,气态天然气的液化温度约为 -162 ℃,用储罐运输 LNG 可以解决全球天然气储量的不平等分布和远距离运输问题。LNG 不同液化方式的能耗在 700~850 kW·h/kg 之间<sup>[2]</sup>,因此天然气的液化过程需要消耗大量能量。

LNG 温度从 -162 ℃ 升至 25 ℃ 时,会释放约 830 kJ/kg 的冷能<sup>[3]</sup>,然而目前大多数 LNG 再气化终端都将冷能释放至海水或空气中,造成了冷能的巨大浪费。因此研究人员提出大量的冷能利用方法,包括空气分离<sup>[4]</sup>、低温发电<sup>[5]</sup>、海水淡化<sup>[6]</sup>、低温 CO<sub>2</sub> 捕获<sup>[7]</sup>、低温冷库<sup>[8]</sup>等。

1 LNG 冷能利用特点

LNG 的储存温度为  $T_1$ ,  $T_1$  与环境温度  $T_0$  之间存在巨大温差,当 LNG 从  $T_1$  升至  $T_0$  时,两点之间的焓差即为 LNG 释放的冷量<sup>[9]</sup>。图 1 所示为不同气化压力下 LNG 冷能释放规律。

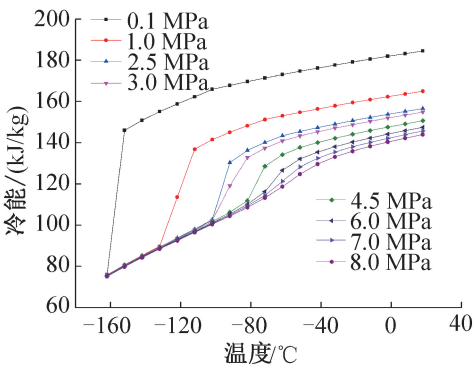


图 1 不同气化压力下 LNG 冷能释放规律  
Fig.1 LNG cold energy release under different gasification pressure

由图 1 可知,压力为 1.0~4.5 MPa 时,在 LNG 的液相显热阶段,温度上升较快,直至泡点温度;在潜热换热阶段,LNG 发生相变,吸收大量潜热,但温度变化不显著,此阶段 LNG 为气液共存状态;在气相显热阶段,NG 温度会显著升高,直至管网或用户所需温度。由 7 MPa 和 8 MPa 的 LNG 气化曲线可知,两相潜热段退化,仅剩液相显热段和气相显热段。

2 LNG 冷能利用方式

LNG 从-162 ℃至常温这一温度范围内,温位越低,冷能品位越高,低温价值越大。将 LNG 冷能在不

同温位下利用可以取得更大的经济效益和社会效益,表 1 所示为 LNG 冷能可利用工艺与温度分布。

2.1 低温冷能发电

LNG 冷能低温发电技术较为成熟,应用广泛,主要利用 LNG 冷能降低循环工艺的冷凝温度<sup>[10]</sup>。LNG 冷能低温发电的循环形式包括:直接膨胀、低温朗肯循环(organic Rankine cycle,ORC)、布雷顿循环、卡琳娜循环、联合法、结合燃气轮机循环等 6 种循环方式<sup>[11]</sup>。LNG 冷能直接膨胀发电如图 2 所示,流程简单、成本较低,但 LNG 冷能利用效率很低,因此一般与其他循环相结合,以提高系统的发电效率。

表 1 LNG 冷能利用工艺与温度分布  
Tab.1 LNG cold energy utilization process and temperature distribution

| LNG 冷能利用技术 | LNG 可利用温区/℃ | 优点                | 缺点                           |
|------------|-------------|-------------------|------------------------------|
| 空气分离       | -162~-100   | 工艺较为成熟,能耗比传统空分装置小 | 工艺复杂,投资大                     |
| 低温发电       | -110~-40    | 技术较为成熟,应用广泛       | 负荷波动大,发电不稳定                  |
| 制作干冰       | -80~-60     | 能耗低,产品纯度高         | 选址有要求,周边有 CO <sub>2</sub> 气源 |
| 直接利用       | 海水淡化        | -53~-43           | 能耗低,前景广阔                     |
|            | 低温冷库        | -80~-18           | 温度梯度分明,方便维护                  |
|            | 低温养殖        | -10~0             | 实用性强                         |
|            | 空调系统        | -10~7             | 实用性强,能耗低                     |
| 间接利用       | 低温粉碎        | -162~-100         | 实用性强,能耗低                     |
|            | 运输冷藏食品      | 0~20              | 实用性强,方便实现                    |

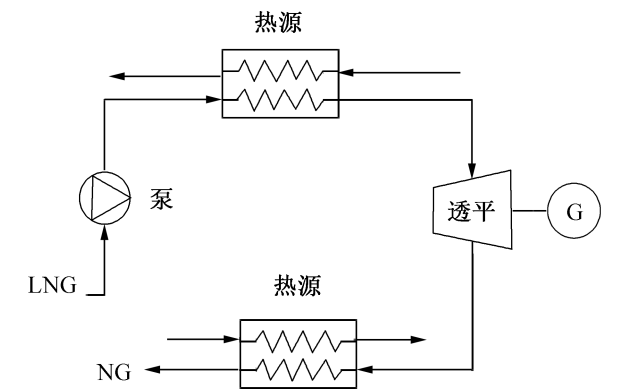


图 2 LNG 冷能直接膨胀发电流程图

Fig.2 Flow chart of LNG cold energy direct expansion power generation

图 3 所示为 LNG 冷能低温朗肯循环发电流程图,工质依次经过压缩、蒸发、膨胀和冷凝来发电,该工艺流程简单且效率较高,因此被广泛使用。

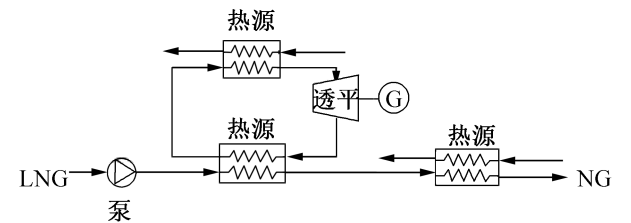


图 3 LNG 冷能用于低温朗肯发电工艺流程图

Fig.3 Flow chart of LNG cold energy Rankin power generation process

杨红昌<sup>[12]</sup>研究了 LNG 冷能二级有机朗肯循环发电系统,发现气化压力为 3 MPa 时,LNG 温度区间在-92.23~-43.52 ℃。李佳星<sup>[13]</sup>设计了一个 LNG 冷能用于两级循环发电系统,第一级为朗肯循环,第二级为卡琳娜循环。朗肯循环中 LNG 温度利用范围为-162~-101.46 ℃,卡琳娜循环中 LNG 温度利用范围为-101.46~-15 ℃。Sun Zhixin 等<sup>[14]</sup>研究了利

用 LNG 冷能的三种不同 ORC 配置的优化,即单级 ORC、并联两级 ORC 和级联两级 ORC。优化结果表明,并联两级 ORC 更适合于较低的热源温度,而级联两级 ORC 对较高的热源温度有较好的效果。

在 LNG 冷能用于朗肯循环发电过程中,LNG 作为冷源在冷凝器中传递冷量给循环工质,工质的冷凝温度决定了 LNG 冷能利用率和焓损失。循环工质的冷凝温度由工质的组分与冷凝压力决定,工质的冷凝温度存在一个最佳值,可以使系统的发电量达到最大。对工质进行优选可以使 LNG 的气化曲线和工质冷凝曲线达到更好的匹配,如表 2 所示。

表 2 工质优选结果<sup>[12]</sup>

Tab.2 Results of the working fluids' selection<sup>[12]</sup>

| 热源温度/℃ | 冷凝温度/℃    | 工质选择            |       |       |
|--------|-----------|-----------------|-------|-------|
| <-82.5 | -150~-110 | CH <sub>4</sub> | —     | —     |
| <9     | -100~-90  | R1150           | —     | —     |
| 9~25   | -89~-80   | R170            | —     | —     |
| <9     | -80~-48   | R1150           | R170  | R23   |
| 9~25   | -80~-48   | R170            | R23   | —     |
| <70    | -48.2~-42 | R1270           | R404A | —     |
| <70    | -42~-35   | R1270           | R290  | R404A |
| <70    | -35~-25   | R407C           | R1270 | R290  |
| <70    | -25~0     | R152A           | R1270 | R290  |
| <70    | >0        | R152A           | R600  | R1270 |

例如若热源为 25℃ 的海水,冷凝温度为-80℃,则 R170、R23 可作为循环工质。王德鹏等<sup>[15]</sup>使用甲烷、乙烯、丙烷组成的混合制冷剂,LNG 用于发电的冷能使用范围为-150~-26.53℃。

章润远<sup>[16]</sup>设计了 LNG 冷能利用发电装置,工质为丙烷,模拟计算得出 LNG 温度用于发电使用范围约为-150~-50℃。黄思嘉等<sup>[17]</sup>对燃气电厂 LNG 一体化冷能发电系统进行参数研究,计算发现此工况下 LNG 出口温度为-31.8℃。曾丽瑶<sup>[18]</sup>对 LNG 冷能低温发电进行研究,工质分别为丁烷、乙烷、丙烷时,对应 LNG 经过换热器出口温度为 32、-62、-29℃。

布雷顿循环发电工艺、卡琳娜循环发电工艺和低温朗肯发电工艺流程类似。布雷顿循环工质不发生相变,不需要利用相变过程进行冷能吸收。卡琳娜循环的工质通常为氨水溶液,但氨具有毒性,在卡琳娜循环中使用氨水溶液来回收 LNG 冷能非常危险,且不环保<sup>[19]</sup>。因此寻找代替卡琳娜循环中氨水溶液的混合工质是 LNG 冷能用于卡琳娜循环发电的关键。

刘燕妮等<sup>[20]</sup>用乙烯-丙烷作为混合工质,该 LNG 冷能卡琳娜循环发电流程的可用能利用率为 25.3%。联合法发电工艺联合了直接膨胀和有机朗肯循环法。A. Franco 等<sup>[21]</sup>在直接膨胀循环的基础上,提出了一种具有多级涡轮机 LNG 直接膨胀装置,可以使 LNG 的产量接近 160 kJ/kg 以上。结合燃气轮机循环是利用 LNG 冷能来冷却燃气轮机循环的涡轮废气,使用 LNG 进行进气冷却和中间冷却也可以提高联合动力循环的热效率。Zhang Guoqiang 等<sup>[22]</sup>提出一种利用 LNG 冷能的新型燃气轮机进气冷却系统,该循环功率输出比常规进气冷却系统提高 2.47%。

2.2 空气分离过程

由于低温空分设备要求非常低的温度(-196~-150℃),LNG 具有高品位冷能,因此 LNG 用于空气分离过程可以获得较高的焓效率<sup>[23]</sup>。同时空气分离可以提供高纯度氧气,氧燃料燃烧可以减少传统天然气电厂的 CO、SO<sub>2</sub> 等有害气体的排放。学者们对 LNG 冷能用于空分进行了广泛研究,图 4 所示为 LNG 冷能空分流程图,将 LNG 冷能用于空气分离,载冷剂与 LNG 换热后获得的冷能传递给空气,可以减少压缩机的能耗。

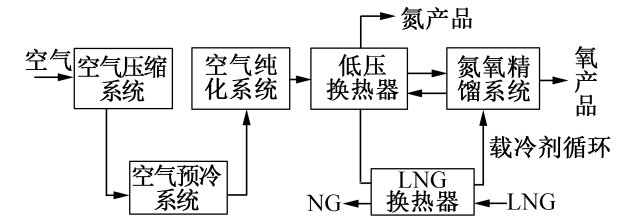


图 4 LNG 冷能空分流程图  
Fig.4 Flow chart of LNG cold energy air separation

燕娜等<sup>[24]</sup>提出利用 LNG 冷能用于空气膨胀制冷和氮气膨胀制冷流程,与原始流程相比,空气膨胀制冷能耗降低约 49%,氮气膨胀制冷能耗降低约 53%。Xu Wendong 等<sup>[25]</sup>提出了一种 LNG 冷能冷却空分工艺,LNG 冷能运行温度范围从 133~203 K 扩大至 113~283 K,空分压力从 0.5 MPa 降至约 0.35 MPa,LNG 消耗量下降 44.2%,效率提高 42.5%。罗鹏等<sup>[26]</sup>提出一种利用 LNG 冷能的三塔空分流程,结果表明该流程功耗降低了 50%,利用 LNG 冷能的焓效率可达到 62.9%。马国光等<sup>[27]</sup>提出 LNG 冷能用于空分工艺的双级氮膨胀制冷循环,得到单位液态产品能耗为 0.475 kW·h/kg。黄永<sup>[28]</sup>分析了 LNG 温度对冷能空分装置的影响,结果表明当 LNG 温度高于-135℃时,关闭低压氮压机装置总体收益更高,LNG 温度高于设计温度时,温度每上升 1℃,冷能空分装

置将减少 13.69 t/d 产量。Wu Yiqian 等<sup>[29]</sup>介绍了一种新型的三塔低温空分流程,结果表明液氧和液氮的比功耗分别为 0.252 kW·h 和 0.258 kW·h。表 3 总结了 LNG 冷能空分工艺的温度使用范围。由表 3 可知,空气分离需要的冷能品位高,与-162℃的 LNG 冷能品位差较小,适合于大型气化站的 LNG 冷能梯级利用的第一级。但对于气化压力和用电量都很小的中小型气化站而言,空分工艺庞大复杂,并不适用。

| 表 3 LNG 冷能用于空分工艺温度使用范围<br>Tab.3 Range of temperature of LNG cold energy for air separation process |                                                    |                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|
| 研究者                                                                                                | LNG 冷能利用温度/℃                                       | 流程特点                       |
| 陈则韶等 <sup>[30]</sup>                                                                               | 设计了 4 种工况, LNG 出口温度分别为: -31.15、1.85、-41.15、-41.15℃ | 单位质量液氧的能耗减少 60%~73.5%      |
| 金滔等 <sup>[31]</sup>                                                                                | -162~-21.15℃                                       | 单位质量液氧的能耗为 0.405 7 kW·h/kg |
| 马文婷等 <sup>[32]</sup>                                                                               | -162.15~-23.15℃                                    | 装置整体效率提高 2.8%              |
| 段娇 <sup>[33]</sup>                                                                                 | -162~-50℃                                          | 单位液态产品能耗降低 49.7%           |
| 罗鹏等 <sup>[26]</sup>                                                                                | -153.0~-19.5℃                                      | 冷能利用率提高 2.5 倍              |
| 罗璇 <sup>[34]</sup>                                                                                 | -102.7~-24.53℃                                     | 冷能利用效率提高 1.84%             |
| 王林 <sup>[35]</sup>                                                                                 | -162.15~-9.85℃                                     | 能耗减少约 62%~68%              |

2.3 海水淡化工艺

海水淡化是另一个需要大量能量的过程,利用 LNG 冷能可以减少系统的动力输入,主要方法有冷冻法和水合物法。冷冻法包括制冷剂直接接触法、制冷剂间接冷冻法、流化床式冷冻法等。LNG 冷能制冷剂直接接触法的流程如图 5 所示,预冷后的海水与制冷剂在结晶器中直接换热。

LNG 冷能间接冷冻法海水淡化如图 6 所示,原料海水与低温的淡水和浓海水先进行一次换热降温,然后进入结晶器中与 LNG 换热后的二次制冷剂进行间接换热。

黄美斌等<sup>[36]</sup>对比了制冷剂是否相变的 LNG 冷能间接冷冻法海水淡化流程,结果表明:制冷剂没有发生相变,虽然流程简单,但所需的制冷剂质量流量

大;制冷剂发生相变,制冷剂的质量流量小,但流程复杂。对于冷冻法海水淡化而言,冷源的选择是关键问题。表 4 所示为常见制冷剂的物理性质。

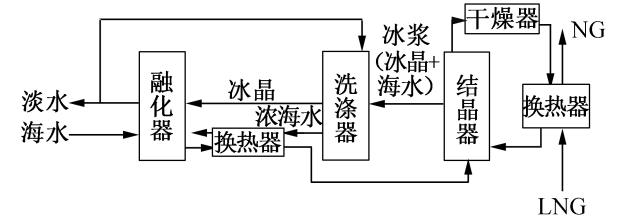


图 5 LNG 冷能直接接触法海水淡化流程图  
Fig.5 Flow chart of LNG cold energy for direct contact desalination

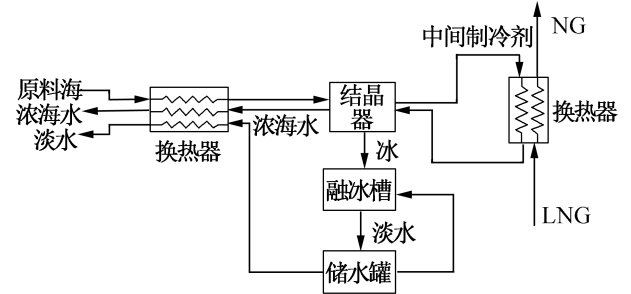


图 6 LNG 冷能间接冷冻法海水淡化流程图  
Fig.6 Flow chart of seawater desalination by indirect freezing of LNG cold energy

| 表 4 常见制冷剂的物理性质 <sup>[37]</sup><br>Tab.4 Physical properties of common refrigerants <sup>[37]</sup> |        |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|
| 工质                                                                                                 | 标准沸点/℃ | 标准凝固点/℃ |
| 乙烷                                                                                                 | -88.6  | -183.2  |
| 丙烷                                                                                                 | -42.2  | -187.1  |
| 正丁烷                                                                                                | -0.6   | -135.0  |
| 异丁烷                                                                                                | -11.7  | -159.6  |
| 乙烯                                                                                                 | -103.7 | -169.5  |
| 丙烯                                                                                                 | -47.7  | -185.0  |
| R12                                                                                                | -29.8  | -155.0  |
| R22                                                                                                | -40.8  | -160.0  |
| R407C                                                                                              | -43.6  | -115.0  |
| R170                                                                                               | -183.0 | -88.8   |
| R23                                                                                                | -82.1  | -155.2  |
| R115                                                                                               | -38.0  | -106.0  |
| R134a                                                                                              | -26.1  | -103.0  |
| R1270                                                                                              | -47.7  | -185.0  |
| R717                                                                                               | -33.4  | -77.7   |
| R116                                                                                               | -78.2  | -100.7  |
| R125                                                                                               | -48.5  | -103.0  |
| R410A                                                                                              | -51.5  | -155.0  |
| R600                                                                                               | -42.2  | -187.1  |
| R1150                                                                                              | -169.0 | -103.7  |

碳氢化合物如乙烷、丙烷、乙烯、丙烯等和烷烃类

化合物如 R600、R1270 等均属于易燃易爆物质且有毒不安全,不适合作为载冷剂。R717、R134a、R407A 等的凝固点相对 LNG 的温度而言较高,不适合于 LNG 进行换热。R12、R22 等属于单工质氟利昂,会对臭氧层造成严重的破坏,不利于保护环境。R410A 的凝固点为 $-155\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与 LNG 气化温度接近,沸点与 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 接近,且无毒不会爆炸,是较为理想的工质。

LNG 冷能用于流化床式海水淡化冷冻法的流程如图 7 所示,孙靖等<sup>[38]</sup>提出一种流化床式海水淡化流程,该工艺的载冷剂为乙二醇水溶液, $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 LNG 与乙二醇水溶液换热后的出口温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

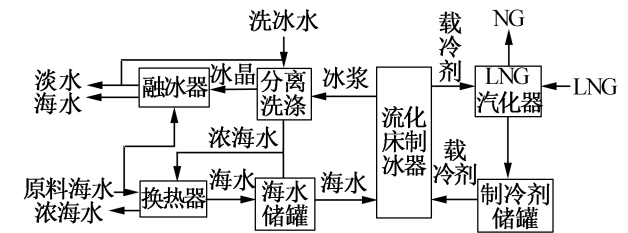


图 7 LNG 冷能流化床式海水淡化流程图  
Fig.7 Flow chart of LNG cold energy for fluidized bed desalination

He Tianbiao 等<sup>[39]</sup>提出将 LNG 冷能结合 ORC 发电与水合物法海水淡化的工艺,结果表明可达到最大淡水产量和发电量分别为 $165.3\text{ t/h}$ 和 $3\text{ }480\text{ kW}$ 。A. Antonelli<sup>[40]</sup>提出了正丁烷为中间制冷剂进行蒸发冷冻法工艺,LNG 通过发电从 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热至 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再用于海水淡化,被加热至 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。沈清清等<sup>[41]</sup>介绍了一种利用 LNG 冷能进行海水淡化的间接冷冻法,LNG 冷能温度使用范围在 $-137.8\sim-23.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,该流程能效为 $93.8\%$ ,焓效率为 $38\%$ 。王凌士等<sup>[42]</sup>改进了 LNG 冷能用于气体直接接触法制取冰浆的研究流程,结果表明 LNG 直接利用的温度范围在 $-162\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而使用 LNG 梯级利用方式的 LNG 冷能温度使用范围在 $-55\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。田堃等<sup>[43]</sup>设计 LNG 冷能用于海水淡化技术的工艺中,LNG 冷能利用温度为 $-162\sim-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.4 低温 CO<sub>2</sub> 捕获

中国将在 2030 年实现“碳达峰”,到 2060 年实现“碳中和”<sup>[44]</sup>。在碳达峰和碳中性指标的指导下,加快绿色低碳发展已成为我国的必然选择。传统的低温 CO<sub>2</sub> 捕获需要外部制冷循环来冷却和压缩 CO<sub>2</sub> 至 $2.5\sim3.0\text{ MPa}$ ,然后通过液化工艺实现液化,需要大量的功率消耗。如果发电厂使用 LNG 冷能将液化装置的运行压力降至约 $0.9\text{ MPa}$ ,将 LNG 再气化过程与 CO<sub>2</sub> 捕获过程相结合可以显著节约能源<sup>[45]</sup>。CO<sub>2</sub>

的液化温度约为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,LNG 冷能用于低温 CO<sub>2</sub> 捕获通常与发电相结合,如图 8 所示。

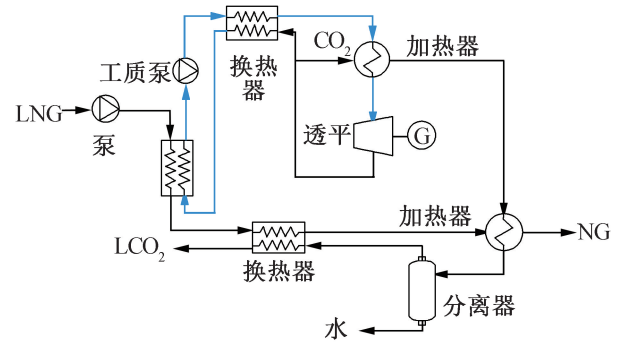


图 8 LNG 冷能用于有机朗肯循环与 CO<sub>2</sub> 捕集工艺  
Fig.8 LNG cold energy is used in organic Rankine cycle and CO<sub>2</sub> capture process

Zhao Liang 等<sup>[46]</sup>提出一种结合发电和 CO<sub>2</sub> 捕获利用 LNG 冷能的新系统,结果表明 $1\text{ t}$  LNG 可产生 $119.42\text{ kW}$ 的电力输出和 $0.75\text{ t}$ 液态 CO<sub>2</sub>。杨枫桐等<sup>[47]</sup>介绍了一种将卡琳娜循环、有机朗肯循环、LNG 冷能利用和 CO<sub>2</sub> 捕获集成的发电系统,LNG 出口温度为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,系统焓效率为 $59\%$ 。张丽<sup>[48]</sup>提出了 LNG 冷能用于废气发电和 CO<sub>2</sub> 捕集相结合的余热回收利用系统,结果表明余热回收效率为 $34.2\%$ ,CO<sub>2</sub> 捕集量可提高 $28.6\%$ 。表 5 总结了 LNG 冷能用于低温 CO<sub>2</sub> 捕获工艺温度使用范围。由表 5 可知,LNG 冷能直接用于低温 CO<sub>2</sub> 捕获会造成冷能品位差过大,系统焓效率较低。

表 5 LNG 冷能用于低温 CO<sub>2</sub> 捕获工艺温度使用范围  
Tab.5 Temperature range of LNG cold energy for low temperature CO<sub>2</sub> capture process

| 研究者                           | LNG 冷能利用<br>温度/ $^{\circ}\text{C}$                                          | 焓效<br>率/% | 热效<br>率/% |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Deng Shimin 等 <sup>[49]</sup> | 162.0~8.0                                                                   | 50.3      | 71.0      |
| 黄美斌等 <sup>[50]</sup>          | 162.0~37.2                                                                  | 36.3      | 44.3      |
| Zhang Na 等 <sup>[51]</sup>    | 162.0~15.0                                                                  | 51.6      | 66.5      |
| 熊永强等 <sup>[52]</sup>          | CO <sub>2</sub> 预冷:<br>-154.9~-100.5<br>CO <sub>2</sub> 液化:<br>-100.5~-28.0 | 55.7      | —         |
| 王道广 <sup>[53]</sup>           | 162.0~21.5                                                                  | 43.7      | 50.8      |
| 李俊丽等 <sup>[54]</sup>          | CO <sub>2</sub> 预冷:<br>-162.0~-154.0<br>CO <sub>2</sub> 液化:<br>-154.0~-13.0 | —         | —         |

2.5 低温冷库

靠近 LNG 码头的港口区存在大量的低温冷库，而 LNG 在再气化过程中可以释放出大量的冷能，因此将 LNG 冷能用于低温冷库可以减少冷库运行过程中消耗的大量电力。各冷库温度分布不同，冷却物冷藏间（高温冷藏库）温度在 0~5℃，冷却库（中温冷藏库）温度在-15~-4℃，冻结物冷藏间（低温冷藏库）温度在-28~-15℃，冻结间（超低温冷藏库）温度在-50~-23℃。杜琳琳等<sup>[55]</sup>采用 R410A 作为制冷剂，设计 LNG 冷能用于总容量为 1.5×10<sup>4</sup> t 的冷库工艺，-150℃ 的 LNG 高品位冷能经过一次利用后温度升至-70℃，在冷库中与 R401A 制冷剂蒸气进行换热。黄美斌等<sup>[56]</sup>以 R23 作为中间制冷剂，根据 R23 是否发生相变提出了两种 LNG 用于低温冷库的工艺。图 9 所示为无相变的冷库流程图，制冷剂无相变流程是指制冷剂与 LNG 换热后依次通过各冷库去释放冷能，该流程中各冷库采用串联模式。

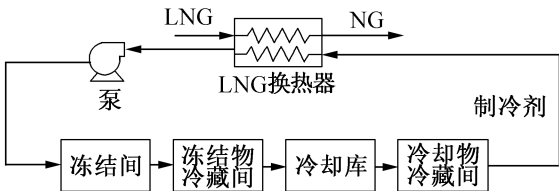


图 9 LNG 冷能制冷剂无相变的冷库流程图  
Fig.9 Flow chart of LNG cold energy for refrigerant without phase change cold storage

制冷剂有相变流程是由于制冷剂在各冷库的蒸发温度均不同，对应的蒸发压力也不同，若依旧采用各冷库串联流程会导致压力控制不均衡，因此考虑并联流程，如图 10 所示，即把各冷库的换热器并行在一起，通过泵将与 LNG 逐级换热后的制冷剂液化，输送至各冷库。

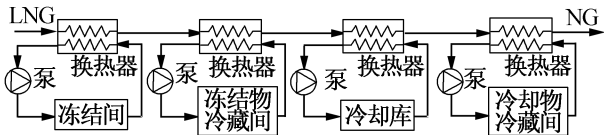


图 10 LNG 冷能制冷剂有相变的冷库流程图  
Fig.10 Flow chart of LNG cold energy for refrigerant with phase change cold storage

由于各冷库温度差异较大，因此可以选择不同的冷库制冷剂。表 6 所示为 LNG 冷能用于低温冷库工艺的制冷剂和温度使用范围。

表 6 LNG 冷能用于低温冷库工艺的制冷剂和温度范围

Tab.6 Refrigerant and temperature range of LNG cold energy used in cryogenic cold storage process

| 研究者                  | 制冷剂             | LNG 冷能利用温度/℃ |
|----------------------|-----------------|--------------|
| 陶建生 <sup>[57]</sup>  | 液氨              | -162.0~-25.0 |
| 吴集迎等 <sup>[58]</sup> | 乙二醇水溶液          | —            |
| 杨春 <sup>[59]</sup>   | 60%乙醇溶液         | -145.0~6.0   |
| 熊永强等 <sup>[60]</sup> | 65%甲烷+35%乙烷     | -155.0~5.0   |
| 何君妍等 <sup>[61]</sup> | 45%R290+55%R744 | —            |
| 赖建波等 <sup>[62]</sup> | 丙烷              | -59.0~-29.0  |
| 韩淑洁等 <sup>[63]</sup> | R600A           | -50.4~-41.6  |

3 LNG 冷能梯级利用

由于 LNG 冷能单元利用工艺会造成 LNG 冷焓的浪费，整体的焓效率较低，因此许多学者根据 LNG 温位区间利用原则，对 LNG 冷能梯级利用进行了研究。李璐伶等<sup>[64]</sup>提出了 LNG 冷能用于空分、液化 CO<sub>2</sub> 和发电的梯级工艺流程，将-162~-100℃ 左右的低温段冷能用于空气分离，氮气作为空气分离的载冷剂；-100~-70℃ 左右的中温段冷能用于液化 CO<sub>2</sub>，-70~0℃ 左右的高温段冷能用于双级朗肯循环发电，通过 Hysys 模拟得到整个工艺的总能耗为 2 618 kW，LNG 冷能利用率为 27.89%。方运惠等<sup>[65]</sup>针对小型 LNG 动力船提出了“制取液态 CO<sub>2</sub>、冷库、空调和缸套水冷却”的 LNG 冷能梯级利用工艺，-162℃ 的 LNG 从储罐流出依次进入到船用消防液体 CO<sub>2</sub> 制取、冷库、空调和缸套水冷却系统中，LNG 出口温度依次为-122、-40、5、40℃。冷库系统由于利用了 LNG 潜热，因此在该系统中冷能回收量最大。李雪莹等<sup>[66]</sup>针对小型 LNG 气化站，提出 LNG 冷能用于“冷库+空调”的梯级利用工艺。液态 CO<sub>2</sub> 作为冷库的载冷剂，-162℃ 的 LNG 到达冷库系统的出口温度为-86℃，冷库系统中 LNG 的冷能利用率为 61.2%；乙二醇溶液作为空调系统的载冷剂，-86℃ 的 LNG 到达空调系统的出口温度为 5℃，空调系统中 LNG 的冷能利用率为 48.4%。该设计可以满足小型 LNG 气化站的冷能日常需求，但在该设计中冷库需求量为 81.62 kW，而用于冷库的 LNG 冷量回收量为 133.27 kW，远大于冷库需求。张丹等<sup>[67]</sup>提出了 14 种 LNG 冷能梯级利用方案并进行优劣对比，结果表明“轻烃回收+低温粉碎+海水淡化”的冷能利用量最大。但这仅仅是理论模拟，如果投入实际的工程中会遇到很多未知的困难。Ouyang

Tiancheng 等<sup>[68]</sup>针对大型船舶提出了有机朗肯循环发电、海水淡化、低温储存和空调相结合的 LNG 冷能梯级利用工艺,并分析了 6 种排列这些工艺的组合方案,结果表明,第一阶段到第四阶段的最佳流程为 ORC、低温储存、海水淡化和空调,R290、NH<sub>3</sub>、R32 和 R152A 分别被确定为 ORC、低温储存、海水淡化和空调模块的最佳工质,此方案中热效率和炯效率分别达到 22.71%和 50.31%。刘梅梅<sup>[69]</sup>计算了 LNG 中小型气化站的冷能单独利用工艺的炯效

率,LNG 冷能单独发电的直接膨胀工艺炯效率为 45.74%,朗肯循环工艺炯效率为 36.24%,布雷顿循环炯效率为 45.27%,LNG 冷能单独液化 CO<sub>2</sub> 工艺炯效率为 41.93%,LNG 冷能单独用于低温冷库炯效率为 14,36%,LNG 冷能单独用于空调系统的炯效率为 5.14%。由此可知若高品位 LNG 冷能单独用于低温冷库、空调系统会造成高能低用,导致冷能浪费。表 7 总结了 LNG 冷能梯级利用工艺温度使用范围。

表 7 LNG 冷能梯级利用工艺温度使用范围  
Tab.7 Range of temperature used in LNG cold energy cascade utilization process

| 研究者                  | 第一级                          | LNG 温度<br>变化范围/℃ | 第二级    | LNG 温度<br>变化范围/℃ | 第三级    | LNG 温度<br>变化范围/℃ | 第四级         | LNG 温度<br>变化范围/℃ |
|----------------------|------------------------------|------------------|--------|------------------|--------|------------------|-------------|------------------|
| 李雪莹等 <sup>[66]</sup> | 液态 CO <sub>2</sub> 制取        | -162~-86         | 船舶空调系统 | -86~5            |        |                  |             |                  |
| 唐亮 <sup>[70]</sup>   | 冷能发电                         | -162~-45.6       | 海水淡化   | -45.55~-10       |        |                  |             |                  |
| 何翠兰 <sup>[71]</sup>  | 冷能发电                         | -162~-60         | 供冷     | -60~10           |        |                  |             |                  |
| 李璐伶等 <sup>[64]</sup> | 空分                           | -162~-100        | 制干冰    | -100~-70         | 发电     | -70~0            |             |                  |
| 俞光灿等 <sup>[72]</sup> | 空分                           | -150~-101.8      | 低温粉碎   | -101.8~8.3       | 低温冷库   | -101.8~0.1       |             |                  |
| 钱德松 <sup>[73]</sup>  | 海水淡化                         | -151~-90         | 空调系统   | -90~-50          | 低温冷库   | -50~-25          |             |                  |
| 方运惠等 <sup>[65]</sup> | 船用消防液体<br>CO <sub>2</sub> 制取 | -162~-122        | 船舶冷库系统 | -122~-40         | 船舶空调系统 | -40~5            | 缸套水冷<br>却系统 | 5~40             |

LNG 冷能利用主要是根据温度变化而定,提高 LNG 冷能温位使用范围的精确度可以增强冷能利用效率,将 LNG 冷能利用划分为 4 个温度段,约为 -162~-100℃,-100~-70℃,-70~0℃,0~40℃。对于不同的气化站 LNG 冷能梯级利用方式不同,需要充分考虑周围的环境和可利用资源。对于大型气化站,LNG 冷能利用第一级为空气分离或液化空气,LNG 出口温度约为-100℃;第二级为发电、液态 CO<sub>2</sub> 制取或制干冰,CO<sub>2</sub> 的液化温度为-70℃,干冰的生成温度为-78.5℃;第三级用于冷库、海水淡化;第四级用于空调系统或者供给管网用户。同时空气分离产生的液氧可以转化为臭氧用于污水处理,液氮可用于冷冻食品、橡胶粉碎、低温干燥。对于中小型气化站,空气分离设备复杂,且中小型气化站气化压力和所需能量小,因此空分不适用于中小型气化站。第一级为发电、液态 CO<sub>2</sub> 制取或制干冰,第二级用于冷库、海水淡化,第三级用于空调系统。对于大型远洋 LNG 船舶,第一级为发电或船用消防液体 CO<sub>2</sub> 制取,第二级用于冷库、海水淡化,第三级用于空调系统。许多 LNG 动力船或运输船白天不需要连续供大量的电能,因此 LNG 冷能梯级利用可以结合储能技术,在

用电高峰时释放冷能,在非用电高峰时储存冷能,以平衡能源需求。

4 结论

本文主要将 LNG 冷能利用的研究分为 LNG 冷能单元利用和 LNG 冷能梯级利用,基于“高能高用、低能低用、温度对口、梯级利用”的使用原则,研究了 LNG 冷能用于各工艺的温度区间,以合理实现 LNG 冷量的梯级分配。但就 LNG 冷能梯级利用的研究现状而言,还有一些方面需要深入研究,主要包括:

1) 创新性研究。在 LNG 冷能梯级利用的过程中一般不需要持续性供能,因此可以将 LNG 冷能利用与储能技术相结合。He Tianbiao 等<sup>[74]</sup>提出了 LNG 冷能用于液态空气储能、ORC 和直接冷却的梯级利用,即液态空气储能回收低温范围内的大部分 LNG 冷能、ORC 在中温范围内回收 LNG 冷能和液态空气冷能和直接冷却回收高温范围的冷能。J. Park 等<sup>[75]</sup>提出一种将 LNG 冷能与液态空气储能耦合的新型电力系统,该工艺有两种运行模式,即能量储存模式和能量释放模式。在能量储存模式下,工艺无需电力消耗来满足相对较高的电力需求,LNG 冷能通过液态

丙烷回收和储存。而在能量释放模式下,工艺同时使用 LNG 和液态丙烷的冷能,有效地将可用冷能增加一倍,并增强工艺灵活性。

2)可行性和经济性分析。在 LNG 冷能梯级利用工艺方面,可以增加对前期设备成本、设备选型及设备优化等工程造价、安全性、净发电量、GWP 等分析视角。

3)模拟研究和现场实验相结合。一方面,大多数 LNG 冷能的研究和参数结果均由模拟软件得出,过于理想化,在实际工程中会出现很多的设备和系统的误差;另一方面,现场实验因为设备流程过多、场地及资金限制等问题也难以展开。因此需要将模拟研究和现场实验相结合,既考虑实际误差,也可以降低现场实验的难度。

#### 参考文献

- [1] IGU. World LNG report 2020[R]. Barcelona: International Gas Union, 2020.
- [2] 胡国华, 李越. 浅谈 LNG 接收站冷能利用技术[J]. 能源与节能, 2021(2): 15-16, 186. (HU Guohua, LI Yue. Discussion on cold energy utilization technology of LNG receiving station[J]. Energy and Energy Conservation, 2021(2): 15-16, 186.)
- [3] 穆月风. LNG 冷能梯级利用的技术研究[J]. 化工管理, 2020(36): 100-101. (MU Yuefeng. Study on technology of cascade utilization of LNG cold energy[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(36): 100-101.)
- [4] 陈仕卿. LNG 冷能在空气分离系统中的集成与优化研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2019. (CHEN Shiqing. Research on the integration of LNG regasification and air separation units[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.)
- [5] 贺雷, 张磊, 高为, 等. 发电与制冷相结合的 LNG 冷能梯级利用技术研究[J]. 低温与超导, 2015, 43(5): 22-27. (HE Lei, ZHANG Lei, GAO Wei, et al. Technology study on the cascade utilization of LNG cold energy with combination of power generation and air conditioning refrigeration system[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2015, 43(5): 22-27.)
- [6] 孙正阳. LNG 冷能用于冷冻脱盐与区域供冷的研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018. (SUN Zhengyang. Study on LNG cold energy used in freezing desalination and district cooling[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018.)
- [7] ŁACIAK M, SZTEKLER K, SZURLEJ A, et al. Possibilities of Liquefied Natural Gas (LNG) use for power generation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 214: 012138.
- [8] 陈超, 阚安康, 杨帆, 等. 应用 LNG 冷能的渔船冷库制冷模拟研究[J]. 低温与特气, 2017, 35(5): 11-15. (CHEN Chao, KAN Ankang, YANG Fan, et al. Simulation study on cold storage of fishing vessels using LNG cold energy[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2017, 35(5): 11-15.)
- [9] CAO Wensheng, BEGGS C, MUJTABA I M. Theoretical approach of freeze seawater desalination on flake ice maker utilizing LNG cold energy[J]. Desalination, 2015, 355: 22-32.
- [10] BAO Junjiang, YUAN Tong, ZHANG Lei, et al. Comparative study of liquefied natural gas (LNG) cold energy power generation systems in series and parallel[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 184: 107-126.
- [11] 白宸瑞. 利用 LNG 冷能的发电工艺设计及优化研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020. (BAI Chenrui. Research on design and optimization of power generation process using LNG cold energy[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.)
- [12] 杨红昌. 液化天然气(LNG)冷能发电系统的优化研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010. (YANG Hongchang. Optimization of power generation system based on cold energy of liquefied natural gas (LNG)[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.)
- [13] 李佳星. 液化天然气冷能发电系统的模拟与优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2017. (LI Jiaxing. Simulation and optimization of the power system utilizing the cold energy of liquefied natural gas (LNG)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.)
- [14] SUN Zhixin, LAI Jianpeng, WANG Shujia, et al. Thermodynamic optimization and comparative study of different ORC configurations utilizing the exergies of LNG and low grade heat of different temperatures[J]. Energy, 2018, 147: 688-700.
- [15] 王德鹏, 黄永, 魏林瑞. 利用液化天然气冷能发电新流程及模拟分析[J]. 化学工业, 2019, 37(2): 14-18. (WANG Depeng, HUANG Yong, WEI Linrui. New process and simulation analysis of cold energy generation using LNG[J]. Chemical Industry, 2019, 37(2): 14-18.)
- [16] 章润远. 上海 LNG 接收站冷能利用发电的研究[J]. 上海煤气, 2019(4): 25-28, 38. (ZHANG Runyuan. Study on power generation by cold energy utilization at Shanghai LNG receiver station[J]. Shanghai Gas, 2019(4): 25-28, 38.)
- [17] 黄思嘉, 李新成, 李鹏霄. 燃气电厂 LNG 一体化冷能发电系统参数研究[J]. 能源与环境, 2019(5): 17-18. (HUANG Sijia, LI Xincheng, LI Pengxiao. Research

- on the parameters of LNG integrated cold energy power generation system in gas power plant[J]. *Energy and Environment*, 2019(5): 17-18. )
- [18] 曾丽瑶. LNG 冷能发电技术及 ORC 工质优选研究[J]. *四川化工*, 2021, 24(2): 22-24. (ZENG Liyao. Research on LNG cold energy power generation technology and ORC working medium optimization [J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2021, 24(2): 22-24. )
- [19] XUE Xiaodi, GUO Cong, DU Xiaoze, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a two-stage organic Rankine cycle for liquefied natural gas cryogenic exergy recovery[J]. *Energy*, 2015, 83: 778-787.
- [20] 刘燕妮, 郭开华. 液化天然气冷能发电效益分析[J]. *低温与超导*, 2010, 38(2): 13-17. (LIU Yanni, GUO Kaihua. Efficiency of power generation by LNG cold energy [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2010, 38(2): 13-17. )
- [21] FRANCO A, CASAROSA C. Thermodynamic analysis of direct expansion configurations for electricity production by LNG cold energy recovery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 649-657.
- [22] ZHANG Guoqiang, ZHENG Jiongzhi, YANG Yongping, et al. A novel LNG cryogenic energy utilization method for inlet air cooling to improve the performance of combined cycle[J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 638-649.
- [23] 马百通. LNG 冷能空分的流程优化及模拟分析[J]. *化学工程与装备*, 2019(3): 138-141, 38. (MA Baitong. Process optimization and simulation analysis of LNG cold energy air separation [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2019(3): 138-141, 38. )
- [24] 燕娜, 厉彦忠, 脱瀚斐. 基于液化天然气冷量的液体空分新流程[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. )
- [25] XU Wendong, DUAN Jiao, MAO Wenjun. Process study and exergy analysis of a novel air separation process cooled by LNG cold energy [J]. *Journal of Thermal Science*, 2014, 23(1): 77-84.
- [26] 罗鹏, 熊永强, 赵钟兴, 等. LNG 冷能利用与低温空气分离的集成[J]. *低温工程*, 2016(1): 47-53. (LUO Peng, XIONG Yongqiang, ZHAO Zhongxing, et al. Integration of cryogenic air separation process with LNG cold energy utilization[J]. *Cryogenics*, 2016(1): 47-53. )
- [27] 马国光, 李雅娴, 张晨. LNG 冷能用于空分工艺的研究与优化[J]. *天然气化工 (C1 化学与化工)*, 2018, 43(4): 81-87. (MA Guoguang, LI Yaxian, ZHANG Chen. Research and optimization of LNG cold energy use in air separation process [J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2018, 43(4): 81-87. )
- [28] 黄永. LNG 温度对冷能空分装置的影响分析[J]. *低温与超导*, 2019, 47(8): 20-23, 38. (HUANG Yong. The influence of LNG temperature on the LNG assist air separation unit[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2019, 47(8): 20-23, 38. )
- [29] WU Yiqian, XIANG Yanlei, CAI Lei, et al. Optimization of a novel cryogenic air separation process based on cold energy recovery of LNG with exergoeconomic analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 123027.
- [30] 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. )
- [31] 金滔, 胡建军. 一种利用 LNG 冷能的空分流程[C]//中国通用机械工业协会气体分离设备分会. 空分设备技术交流会议论文集. 成都, 2005. (JIN Tao, HU Jianjun. An air separation process using LNG cold energy [C]//China General Machinery Industry Association Gas Separation Equipment Branch. Air separation equipment technology exchange conference Proceedings. Chengdu, 2005. )
- [32] 马文婷, 黄宇. 空分工艺中 LNG 冷能利用的热力学优化设计[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2012, 33(15): 87. (MA Wenting, HUANG Yu. Thermodynamic optimization design of LNG cold energy utilization in air separation process [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2012, 33(15): 87. )
- [33] 段娇. LNG 冷能用于空分系统工艺研究与工程化设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. (DUAN Jiao. Technological development and engineering design of LNG cold energy for air separation system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. )
- [34] 罗璇. LNG 冷能回收梯级利用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2016. (LUO Xuan. Analysis for cascade recycling of LNG cold energy [D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2016. )
- [35] 王林. 基于 LNG 冷能的空分流程模拟分析及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. (WANG Lin. Study on simulation and application for air separation process based on LNG cold energy [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. )
- [36] 黄美斌, 沈清清, 林文胜, 等. 利用 LNG 冷能的间接冷冻法海水淡化流程比较[J]. *低温与超导*, 2010, 38(3): 16-20. (HUANG Meibin, SHEN Qingqing, LIN Wensheng, et al. Comparison of indirect freezing seawater desalination processes utilizing LNG cold energy [J]. *Cryo-*

- genics and Superconductivity, 2010, 38(3): 16–20.)
- [37] 龚美茹. LNG 接收站冷能用于发电与制冰工艺研究及优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. (GONG Meiru. Research and optimization of cold energy of LNG receiving terminal for power generation and ice making process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.)
- [38] 孙靖, 韩克鑫, 谢春刚, 等. 基于 LNG 冷能的液固流化床海水制冰淡化[J]. 现代化工, 2020, 40(7): 197–201, 205. (SUN Jing, HAN Kexin, XIE Chungang, et al. Freezing desalination of seawater in liquid/solid fluidized bed by utilizing LNG cold energy[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(7): 197–201, 205.)
- [39] HE Tianbiao, ZHANG Jibao, MAO Ning, et al. Organic Rankine cycle integrated with hydrate-based desalination for a sustainable energy-water nexus system[J]. Applied Energy, 2021, 291: 116839.
- [40] ANTONELLI A. Desalinated water production at LNG-terminals[J]. Desalination, 1983, 45(2): 383–390.
- [41] 沈清清, 林文胜, 顾安忠, 等. 利用 LNG 冷能的间接冷冻法海水淡化流程及其初步分析[J]. 低温与超导, 2009, 37(4): 10–13. (SHEN Qingqing, LIN Wensheng, GU Anzhong, et al. Preliminary analysis of the process of indirect freezing desalination of sea water utilizing LNG cold energy[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 37(4): 10–13.)
- [42] 王凌士, 张学军, 王晓蕾, 等. LNG 冷能用于气体直接接触法制取冰浆研究[J]. 低温工程, 2012(2): 26–30. (WANG Lingshi, ZHANG Xuejun, WANG Xiaolei, et al. Study on ice slurry production by air direct contact method on basis of utilizing LNG cold energy[J]. Cryogenics, 2012(2): 26–30.)
- [43] 田堃, 徐文东, 梁嘉韵, 等. LNG 冷能用于海水淡化技术研究与工程化设计[J]. 煤气与热力, 2015, 35(3): 20–25. (TIAN Kun, XU Wendong, LIANG Jiayun, et al. Technical study and engineering design of LNG cold energy used for seawater desalination[J]. Gas & Heat, 2015, 35(3): 20–25.)
- [44] LI Yinan, CHEN Keren, ZHENG Nan, et al. Strategy research on accelerating green and low-carbon development under the guidance of carbon peak and carbon neutral targets[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 793(1): 012009.
- [45] LIU Yang, HAN Jitian, YOU Huailiang. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a CCHP system based on LNG cold energy utilization and flue gas waste heat recovery with CO<sub>2</sub> capture[J]. Energy, 2020, 190: 116201.
- [46] ZHAO Liang, DONG Hui, TANG Jiajun, et al. Cold energy utilization of liquefied natural gas for capturing carbon dioxide in the flue gas from the magnesite processing industry[J]. Energy, 2016, 105: 45–56.
- [47] 杨枫桐, 张丽, 田宇航, 等. 一种发电和 CO<sub>2</sub> 捕集相结合的 LNG 冷能利用系统[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2019, 39(6): 54–60. (YANG Fengtong, ZHANG Li, TIAN Yuhang, et al. An LNG cold energy utilization system combined with power generation and CO<sub>2</sub> capture[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2019, 39(6): 54–60.)
- [48] 张丽. 基于 LNG 冷能的余热回收利用系统的研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2019. (ZHANG Li. Research on waste heat recovery and utilization system based on LNG cold energy[D]. Fushun: Liaoning Petrochemical University, 2019.)
- [49] DENG Shimin, JIN Hongguang, CAI Ruixian, et al. Novel cogeneration power system with liquefied natural gas (LNG) cryogenic exergy utilization[J]. Energy, 2004, 29(4): 497–512.
- [50] 黄美斌, 林文胜, 贺红明, 等. LNG 冷能用于 CO<sub>2</sub> 跨临界朗肯循环和 CO<sub>2</sub> 液化回收[J]. 低温与超导, 2009, 37(4): 17–21. (HUANG Meibin, LIN Wensheng, HE Hongming, et al. LNG cold energy utilized in a transcritical CO<sub>2</sub> Rankine cycle and CO<sub>2</sub> recovery by liquefaction[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 37(4): 17–21.)
- [51] ZHANG Na, LIOR N. A novel near-zero CO<sub>2</sub> emission thermal cycle with LNG cryogenic exergy utilization[J]. Energy, 2006, 31(10/11): 1666–1679.
- [52] 熊永强, 华贲. 利用液化天然气冷能捕集 CO<sub>2</sub> 的动力系统的集成[J]. 化工学报, 2010, 61(12): 3142–3148. (XIONG Yongqiang, HUA Ben. Integration of energy power system in CO<sub>2</sub> capture by utilization of cold energy from liquefied natural gas[J]. CIESC Journal, 2010, 61(12): 3142–3148.)
- [53] 王道广. 利用 LNG 冷能液化二氧化碳的动力循环技术分析[J]. 山东化工, 2014, 43(9): 95–99, 105. (WANG Daoguang. Analysis of the power cycle technologies for CO<sub>2</sub> liquefaction with LNG coldness energy[J]. Shandong Chemical Industry, 2014, 43(9): 95–99, 105.)
- [54] 李俊丽, 陈丽娴. LNG 冷能用于干冰和 LCO<sub>2</sub> 技术开发及应用[J]. 广州化工, 2015, 43(21): 167–170. (LI Junli, CHEN Lixian. Technological development and application of LNG cold energy in dry ice and LCO<sub>2</sub>[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(21): 167–170.)
- [55] 杜琳琳, 滕云龙. 利用 LNG 冷能橡胶低温粉碎技术[J]. 煤气与热力, 2012, 32(8): 10–13. (DU Linlin, TENG Yunlong. Utilization of LNG cold energy for cryo-

- genic comminution of rubber[J]. Gas & Heat, 2012, 32(8): 10-13.)
- [56] 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.)
- [57] 陶建生. 冷库利用 LNG 冷能的工艺设计[J]. 广东化工, 2011, 38(6): 179-180. (TAO Jiansheng. Design of the cold storage process with LNG cryogenic energy[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(6): 179-180.)
- [58] 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 Jiying, 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.)
- [59] 杨春. LNG 冷能用于冷库—冷水的联合技术开发及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. (YANG Chun. Research and application of integrated technology of LNG cold energy utilization in cold storage and cold water [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.)
- [60] 熊永强, 华贲. 基于 LNG 冷能利用的低温冷库与冷能发电系统的集成[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(9): 20-25. (XIONG Yongqiang, HUA Ben. Integration of low-temperature cold storage and cryogenic power generation system based on LNG cold energy utilization[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(9): 20-25.)
- [61] 何君妍, 余克志. 基于 LNG 冷能利用的低温冷库群仿真模拟[J]. 煤气与热力, 2020, 40(4): 6-9, 14, 44. (HE Junyan, YU Kezhi. Simulation of low-temperature cold storage group based on LNG cold energy utilization [J]. Gas & Heat, 2020, 40(4): 6-9, 14, 44.)
- [62] 赖建波, 郭保玲, 陈照烽, 等. LNG 冷能用于发电、冷库及数据中心联合技术[J]. 煤气与热力, 2020, 40(8): 8-12, 44. (LAI Jianbo, GUO Baoling, CHEN Zhao-feng, et al. Combined technology of LNG cold energy used in power generation, cold storage and data center[J]. Gas & Heat, 2020, 40(8): 8-12, 44.)
- [63] 韩淑洁, 张晓荣, 李博洋, 等. 基于 HYSYS 的 LNG 运输船冷能利用方案设计与模拟优化[J]. 船舶工程, 2018, 40(2): 12-16, 87. (HAN Shujie, ZHANG Xiaorong, LI Boyang, et al. Design and simulation optimization of LNG carrier cold energy utilization scheme based on HYSYS[J]. Ship Engineering, 2018, 40(2): 12-16, 87.)
- [64] 李璐伶, 王文想, 陈运文, 等. LNG 冷能梯级利用工艺模拟研究[C]//中国土木工程学会燃气分会. 中国燃气运营与安全研讨会(第十届)暨中国土木工程学会燃气分会 2019 年学术年会论文集(下册). 上海, 2019: 1182-1186. (LI Luling, WANG Wenxiang, CHEN Yunwen, et al. Study on process simulation of cascade utilization of LNG cold energy [C]//China Civil Engineering Society Gas Branch. China Civil Engineering Society Gas Branch 2019 Academic Annual Conference Proceedings (Volume 2). 2019: 1182-1186.)
- [65] 方运惠, 童军杰. 船舶 LNG 冷能梯级利用能量和熵分析[J]. 广州航海学院学报, 2019, 27(2): 26-28, 6. (FANG Yunhui, TONG Junjie. Energy and exergy analysis of ship LNG cold energy cascade utilization[J]. Journal of Guangzhou Maritime University, 2019, 27(2): 26-28, 6.)
- [66] 李雪莹, 张万里, 程金亮, 等. LNG 冷能梯级利用[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 461-465, 474. (LI Xueying, ZHANG Wanli, CHENG Jinliang, et al. LNG cascade utilization[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2020, 36(4): 461-465, 474.)
- [67] 张丹, 宋鹏飞, 姜夏雪, 等. 国内外 LNG 冷能利用现状及存在的问题[J]. 科学技术创新, 2021(6): 163-165. (ZHANG Dan, SONG Pengfei, JIANG Xiaoxue, et al. Current situation and existing problems of LNG cold energy utilization at home and abroad [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(6): 163-165.)
- [68] OUYANG Tiancheng, TAN Jiaqi, XIE Shutao, et al. A new scheme for large marine vessels LNG cold energy utilization from thermodynamic and thermoeconomic viewpoints [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113770.
- [69] 刘梅梅. 中小型 LNG 气化站冷能利用研究[D]. 荆州: 长江大学, 2020. (LIU Meimei. Study on cold energy utilization of small and medium LNG gasification stations [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2020.)
- [70] 唐亮. LNG-FSRU 再气化系统的冷能利用研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018. (TANG Liang. Research on the cold energy utilization of LNG-FSRU regasification system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.)
- [71] 何翠兰. 基于 HYSYS 的 LNG 冷电联产工艺研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018. (HE Cuilan. Research on LNG cooling and power generation process based on HYSYS [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.)
- [72] 俞光灿, 李琦芬, 宋丽斐, 等. LNG 冷能利用方式分类

- 及其工艺流程[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 728–737. (YU Guangcan, LI Qifen, SONG Lifei, et al. Classification and technological processes of LNG cold energy utilization modes[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7): 728–737.)
- [73] 钱德松. 大型远洋 LNG 船舶冷能梯级利用方案研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018. (QIAN Desong. LNG cold energy cascading utilization research of lager ocean-going vessel[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2018.)
- [74] HE Tianbiao, LYU Hongyu, SHAO Zixian, et al. Cascade utilization of LNG cold energy by integrating cryogenic energy storage, organic Rankine cycle and direct cooling[J]. Applied Energy, 2020, 277: 115570.
- [75] PARK J, CHO S, QI Meng, et al. Liquid air energy storage coupled with liquefied natural gas cold energy: focus on efficiency, energy capacity, and flexibility[J]. Energy, 2021, 216: 119308.

#### 通信作者简介

陈煜,女,博士,副教授,上海工程技术大学,13917658469, E-mail: yvettee1976@126.com。研究方向:天然气液化流程及其冷能利用。

#### About the corresponding author

Chen Yu, female, Ph. D., associate professor, Shanghai University of Engineering Science, + 86 13917658469, E-mail: yvettee1976@126.com. Research fields: natural gas liquefaction process and its utilization of cold energy.