

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-13

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250710001

# LNG冷能梯级利用研究进展及展望

刘穆禹 陈哲文 张玉明 李家州 张炜 杨云杰

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室 北京 102249)

**摘要** 在“双碳”目标背景下,液化天然气(LNG)冷能的高效梯级利用对能源结构低碳转型与资源循环利用具有重要意义。本文系统综述了LNG冷能梯级利用的技术进展、应用场景及未来挑战,结合技术成熟度评估框架,提出适配不同场景的冷能综合利用方案。研究表明,LNG冷能在气化过程中释放的冷能可通过深冷段(-162~-100℃)、中冷段(-100~-50℃)和浅冷段(-50~0℃)的梯级利用实现高效回收。当前主流技术包括冷能发电、空气分离、冷冻冷藏及CO<sub>2</sub>捕集等,其中空气分离技术成熟度最高(TRL9),已在国内多座接收站实现规模化应用;冷能发电(TRL8)通过联合循环优化显著提升效率,但系统复杂性与稳定性仍需突破。本文指出,我国LNG冷能利用率普遍较低,主要受限于波动性较大、冷能时空分布不均、工艺耦合度低及产业链协同不足。未来需聚焦三大方向:优化建设布局,建设产业园区就地消纳冷能;构建综合评价体系,推动多模式协同的高效冷能梯级利用;通过建设储能系统,提升冷能利用的灵活性和稳定性。本文为LNG冷能梯级利用的技术优化与产业化发展提供了建议与参考。

**关键词** LNG冷能;梯级利用;技术成熟度;应用场景

中图分类号:TE64;TE09

文献标识码:A

## Research Progress and Prospects for LNG Cold-Energy Cascade Utilization

Liu Muyu Chen Zhewen Zhang Yuming Li Jiazhou Zhang Wei Yang Yunjie

(National Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

**Abstract** Under the backdrop of the "dual carbon" strategy, the efficient cascade utilization of liquefied natural gas (LNG) cold energy plays a critical role in facilitating the low-carbon transition of the energy structure and promoting resource recycling. This paper systematically reviews the technological progress, application scenarios, and future challenges. Based on a technology maturity assessment framework, comprehensive cold-energy utilization schemes tailored to different scenarios are proposed. Research indicates that the cold energy released during LNG regasification can be efficiently recovered through cascade utilization across three temperature ranges: deep cryogenic (-162 °C to -100 °C), mid-cryogenic (-100 °C to -50 °C), and low cryogenic (-50 °C to 0 °C). Current mainstream technologies include cold-energy power generation, air separation, freezing/cold storage, and CO<sub>2</sub> capture. Among these, air separation has the highest maturity (TRL9), with large-scale applications achieved in multiple domestic receiving terminals. Cold-energy power generation (TRL8) has significantly improved the efficiency through combined cycle optimization; however, challenges remain in terms of the system complexity and stability. This study found that the LNG cold-energy utilization rate in China is generally low and is primarily constrained by an uneven spatiotemporal distribution, weak process coupling, and insufficient industrial chain coordination. Future efforts should focus on three key directions: optimizing the construction layout by establishing industrial parks for onsite cold-energy consumption, constructing a comprehensive evaluation system to promote efficient cascade utilization of cold energy through multimode collaboration, and enhancing the flexibility and stability of cold-energy utilization by developing energy-storage systems. This paper provides recommendations and references for the technological optimization and industrial development of LNG cold-energy cascade utilization.

**Keywords** LNG cold energy; cascade utilization; technology readiness level (TRL); application scenarios

液化天然气(liquid natural gas, LNG)是天然气(natural gas, NG)在低温下的液化产物。1 m<sup>3</sup>的LNG含有约625SCM(标准立方米)的天然气,LNG无色、无味、无毒且无腐蚀性<sup>[1]</sup>。LNG气化过程中释放的冷

能达830~860 kJ/kg,每吨LNG蕴含270 kW·h冷能<sup>[2]</sup>。高效地回收气化产生的冷能对能源循环的利用和可持续发展具有重大意义。当前LNG冷能利用技术的核心挑战在于开发与接收站相协同的冷能梯级利用

基金项目:国家自然科学基金(52206036, 22278432)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52206036 & No. 22278432).)

收稿日期:2025-07-10;修回日期:2025-09-07;录用日期:2025-10-13

系统,这需要突破传热优化、系统集成等关键技术瓶颈<sup>[3]</sup>。因此,如何在保障再气化终端运行稳定性的前提下高效回收利用LNG冷能,成为广泛关注的焦点。

以日本、韩国以及中国为代表的国家,对LNG冷能利用展开了广泛的研究,并在多个领域实现了工业化应用。日本在LNG冷能回收利用方面处于世界领先地位。在冷能发电、空气分离、CO<sub>2</sub>回收利用(干冰制取)以及低温冷库等领域均取得了显著成果<sup>[3]</sup>,约有20%~30%的LNG冷能得到有效利用。其中,低温发电占比超过70%,空气分离约占20%。韩国的LNG冷能利用率不足20%,主要在空气液化分离与食品冷藏等方面进行了深入研究<sup>[4]</sup>。

近年来,中国LNG进口量持续增长,建成并投产的LNG接收站数量大幅增加。截至2024年底,中国已投产31座LNG接收站,并有多座在建及规划的接收站<sup>[5]</sup>。虽然冷能利用产业已取得较大进展,但仍面临诸多挑战。在工艺开发方面,系统性技术整合与优化方面有待进一步拓展<sup>[6]</sup>。此外,针对LNG冷能利用技术成熟度等级(Technology Readiness Level, TRL)尚未有体系评价。因此,本文从LNG冷能利用技术角度出发,旨在总结和评价LNG冷能梯级利用进展。根据目前装备技术成熟度评价体系,对多种LNG冷能利用技术进行评级,并提出在高附加值工业联产模式、能源-环保协同模式以及分布式灵活利用模式下,冷能的潜在利用方案,并对LNG冷能梯级利用前景提出建议。

## 1 目前主流利用技术

1959年,世界第一艘改装LNG运输船“甲烷先锋”号成功地将LNG从美国运送至英国,由此拉开了世界LNG贸易的序幕,并对LNG冷能回收利用展开研究<sup>[7]</sup>。根据不同的温度范围和利用需求,可将LNG气化温度段分为深冷段(-162~-100℃)、中冷段(-100~-50℃)和浅冷段(-50~0℃)3个阶段<sup>[8]</sup>。深冷段利用LNG在极低温度下的冷能,适用于需要超低温条件的领域,如空气储能、空气分离、轻烃分离(light hydrocarbon separation, LHS)等。中冷段冷能的应用领域相对广泛,包括冷能发电、干冰制备、低温粉碎、冷库制冷、海水淡化、数据中心冷却等。浅冷段冷能的利用方式主要包括空调制冷、冷能储运、淡水养殖等。

### 1.1 冷能发电

利用LNG气化释放的冷能,可以在-162~-60℃温度区间内进行发电。主流LNG冷能发电基本方式如图1所示<sup>[9]</sup>,直接膨胀法、有机朗肯循环(Organic

Rankine Cycle, ORC)法、布雷顿循环法(Brayton Cycle, BC)、卡琳娜循环法(Karina Cycle, KC)以及对应联合循环法是主要的发电方式。目前研究机构对冷能利用率的定义如下:

$$\eta_{\text{cold}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{cs}}} = \frac{W_{\text{exp}} - W_{\text{pump}}}{Q_{\text{cs}}}$$

式中: $\eta_{\text{cold}}$ 为冷能利用率; $W_{\text{net}}$ 为系统净输出功,kW; $Q_{\text{cs}}$ 冷源在冷凝器内部换热量,kW; $W_{\text{exp}}$ 为汽轮机的机械输出功,kW; $W_{\text{pump}}$ 为工质泵的功耗,kW。

直接膨胀法<sup>[10]</sup>如图1(a)所示,LNG通过泵进行加压,高压LNG通过蒸发器形成高压蒸气,通过汽轮机膨胀,汽轮机将机械能转化为电能。该过程中LNG的低温能量在气化过程中会消散。膨胀发电仅利用LNG的机械能。

有机朗肯循环<sup>[11]</sup>以有机化合物为循环工质,其循环配置高效简单。ORC系统由泵、蒸发器、汽轮机和冷凝器组成,如图1(b)所示。循环工质经泵加压,在蒸发器内转化为高压蒸气,在汽轮机内膨胀发电。膨胀后的低压蒸气通过冷凝器,冷凝成液态工质,完成整个循环。

布雷顿循环法<sup>[12]</sup>如图1(c)所示,布雷顿循环由4个部分组成,分别为蒸发器、汽轮机、压缩机和预热器。压缩过程是绝热的,循环工质在压缩机内被压缩至高压状态。高压工质吸收热源热量后,进入汽轮机膨胀做功,之后与低温LNG换热降温完成循环。布雷顿循环最常见的工质是空气、氮气等,系统复杂且成本较高。

卡琳娜循环法<sup>[13]</sup>如图1(d)所示,其基本结构与朗肯循环相似,以氨水混合物作为循环工质。由于氨和水的沸点不同,卡琳娜循环在蒸发和冷凝过程中实现了变温传热,从而更有效地匹配热源和冷源的温度变化。目前,卡琳娜循环通常与ORC或直接膨胀法组成联合发电。

基于ORC和直接膨胀发电的联合循环法如图2所示,可进一步提高LNG冷能利用率。目前用于LNG冷能发电的主流联合循环均采用直接膨胀法与ORC相结合。

Liu Fuyu等<sup>[14]</sup>提出了一种在接收终端的再气化过程中利用LNG冷能的方法。将低温热能转化为电能的ORC系统是回收冷能最有前景的技术。然而,显著的换热温差导致单级ORC系统难以有效利用能量。因此进一步提出了级联设计的ORC系统。该系统基于仿真的优化方法和粒子群优化方法进行了改进,发现LNG集成系统最高净功率输出为0.096 kW·h/kg。H. W. Choi等<sup>[15]</sup>提出将ORC与液化天然气再气化装

置结合。重点是在LNG换热和传热能力都有限的情况下,找到热能和设备尺寸等资源的最佳分布。研究发现导热系数主要集中在蒸发器上,其次为冷

凝器和微调加热器。强调LNG再气化过程ORC系统设备的影响。J. Joy等<sup>[16]</sup>研究三级ORC系统在利用液化天然气冷能发电方面的潜力。

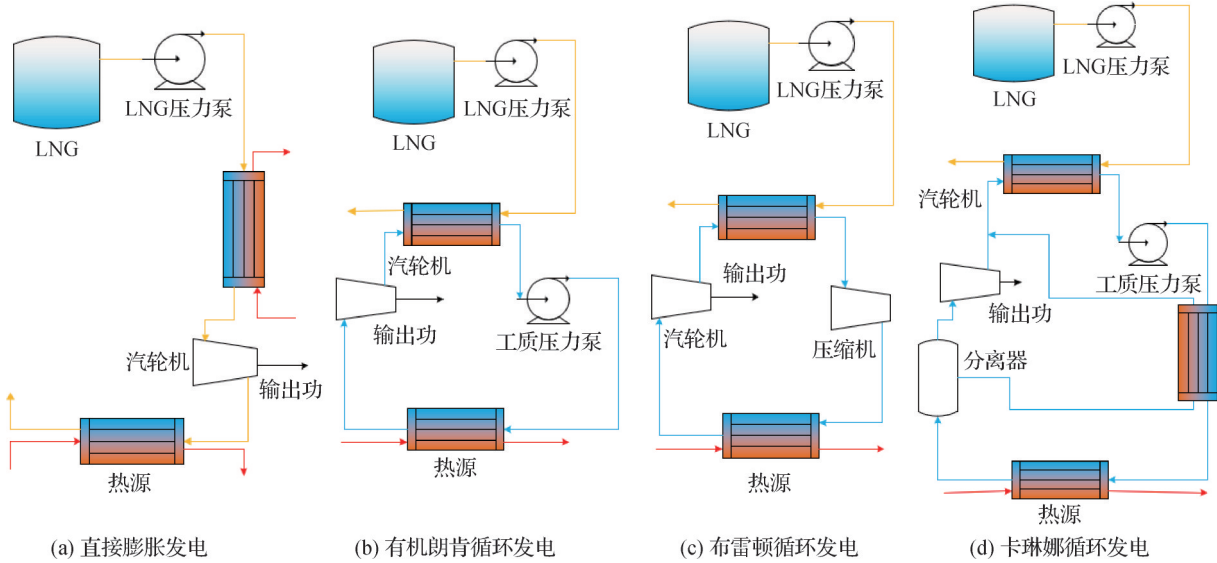


图1 主流LNG冷能发电基本方式

Fig.1 Basic methods of LNG cold energy generation

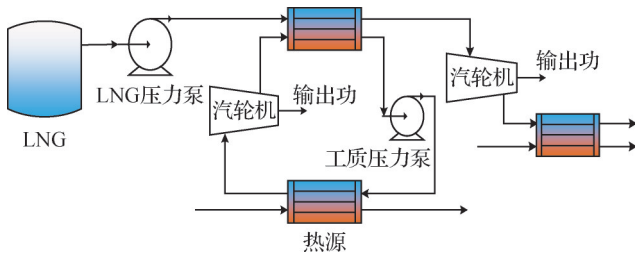


图2 LNG冷能联合循环发电法

Fig.2 LNG cold energy combined cycle power generation method

研究发现,三级系统具有最高的发电潜力,然而成本较高。该研究使用海水作为热源,评估的工作流体为乙烯、乙烷和丙烷。Tian Cong等<sup>[17]</sup>提出回收天然气联合循环废热系统,使用ORC进行发电。使用R-141b作为工作流体的发电循环的能量效率为12.49%。研究发现,将更多的热源引导至ORC循环可以提高系统的总有效能效率。该研究还评估了经济方面,发现拟议方案的年化总成本为\$1 559 491.11,年投资回报率为\$598 833.11。上述国内外研究核心目标为利用LNG气化释放的冷量进行发电,ORC发电被一致认为是最有前景的技术。但目前冷热源温差较大,导致换热过程不可逆损失大,效率低下。目前国外采用多级串联的方式,利用不同的工质,适应不同的温度区间,使工质的温度变化能更好地匹配热源和冷源的温度变化,从而显著降低不可逆损失,国内研究者则多通过集成系统等联合废热等其他热

源,提高系统综合利用率。国内外部分LNG冷能发电投产项目如表1所示。依托沿海LNG接收站布局,截至2024年9月<sup>[18]</sup>,我国已投产LNG冷能发电项目3个,详见表1。

发电系统中,上海洋山LNG项目采用丙烷为工质的朗肯循环系统,设计年发电量为2 400万kW·h,约占接收站年用电量的1/4,减少能耗约7000吨标煤/年,减少碳排放约1万t/a<sup>[19]</sup>;浙江舟山项目以丙烷和乙烯为介质,是全国首套冷能双环发电系统,通过两级冷能回收,年发电量达2 300万kW·h,每年可减少碳排放1.8万t<sup>[20]</sup>;宁波“绿能港”接收站项目采用低温朗肯循环工艺发电,累计突破500万kW·h,相当于每年减少CO<sub>2</sub>排放约1.4万t<sup>[21]</sup>。日本北九州与中部电力冷能发电项目均采用直接膨胀和朗肯联合循环发电,发电功率可达9.4 MW与7.2 MW。日本大阪瓦斯冷能发电项目采用直接膨胀发电,功率可达5 MW。台湾中油永安接收站采用直接膨胀和朗肯联合循环发电功率可达2.6 MW。综合上述冷能发电模式,直接膨胀法和朗肯循环法工艺流程简单,且投资较低,均已在实际工程应用中实现<sup>[22]</sup>。

## 1.2 空气分离

在中国LNG接收站中,空气分离技术应用最为广泛<sup>[23]</sup>。低温空气分离设备需要极低的工作温度,而LNG深冷段恰好能够提供高质量的冷能。因此LNG冷能用于空气分离可以获得较高的价值产物。其原理是基于不同气体成分的沸点差异进行分离。

表1 国内外部分LNG冷能发电投产项目

Tab.1 Partial LNG cold energy power generation project in domestic and abroad

序号	项目名称	接收站	规模/MW
1	北九州冷能发电项目	新日铁	9.4
2	中部电力冷能发电项目	知多	7.2
3	大阪瓦斯冷能发电项目	姬路	5
4	浙江LNG冷能发电项目	浙江宁波	4.5
5	台湾中油冷能发电项目	永安	2.6
6	大阪瓦斯冷能发电项目	泉北NO.1	2.4
7	上海LNG冷能发电项目	上海洋山	2
8	浙江LNG冷能发电项目	浙江舟山	2

经典空气分离系统工艺流程如图3所示<sup>[8]</sup>,空气经过压缩、净化后冷却至液态,进入空分冷箱,在与工质的换热下逐步升温,将空气分离为氮气、氧气和氩气等。

M. Nakaiwa等<sup>[24]</sup>在1996年提出了一种将空气分离装置(air separation unit, ASU)与LNG冷能利用相结合的高性能电力供应系统。通过引入LNG并集成低温空气分离技术,实现了能源的高效利用,与传统系统相比,电力消耗可降低66%。D. Kim等<sup>[25]</sup>提出了将LNG冷能供应给空气分离装置,以替代传统的外部制冷过程并减少功耗的问题。结果表明,利用LNG冷能预冷的单塔ASU工艺相比带有液氮生产循环方案,能够实现更低的单位能耗,可以在保证空气分离效果的同时显著降低电力消耗。

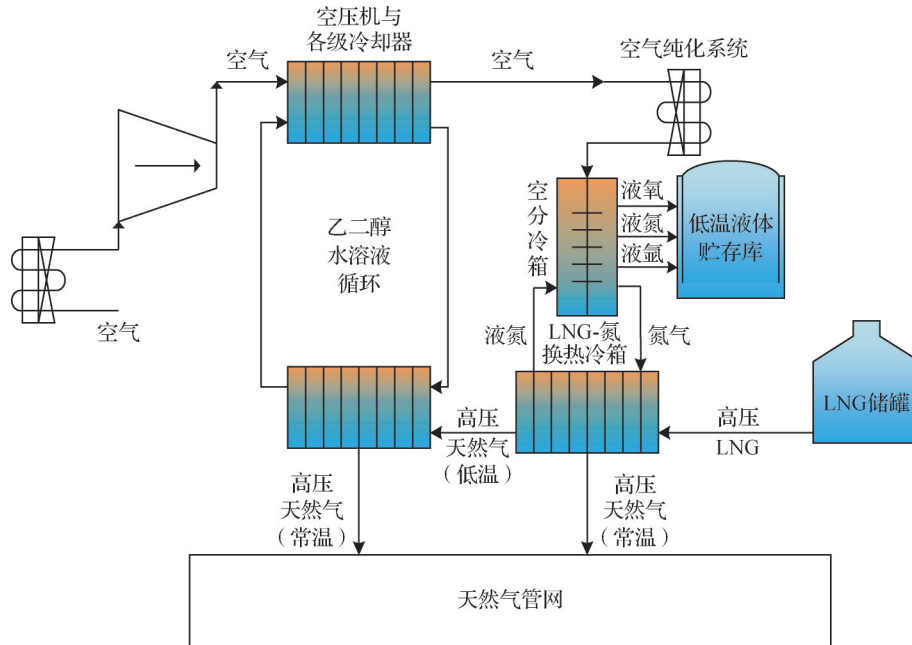


图3 经典空气分离系统工艺流程

Fig.3 Process flow of classic air separation system

B. SHINGAN等<sup>[26]</sup>提出了一种将ASU与LNG的直接膨胀相结合的空分发电系统,采用Aspen Hysys对一座发电量为3 993 kW的发电厂进行了仿真。结果显示,生产高纯氧和高纯氮气所需的比能量低于独立系统的比能量。Wang Zhikang等<sup>[27]</sup>提出了一种包含空气分离装置的多代系统(LNG-LAES-ASU),具有适应LNG汽化波动,降低空分装置能耗等特点。通过能源、经济和调峰性能的分析表明,该系统实现了91.07%的往返效率。空分装置的平均能耗为0.14~0.15 kW·h/Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>,远低于独立ASU的0.4 kW·h/Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>。

冷能空分技术在我国应用广泛,依托沿海LNG接收站,已建成多个大型冷能空分项目。截至2024年

9月<sup>[28]</sup>,我国已投产LNG空分项目5个,在建LNG空分项目3个,详见表2。

### 1.3 LNG冷冻冷藏、冷链物流

冷库根据温度需求,被划分为多个等级,例如约-60℃的冻结间(超低温冷藏库)、-35℃的冻结物冷藏间、0℃以下的冷却库以及0~10℃的冷却物冷藏间,遵循“温度对口,梯级利用”的策略,其制冷流程如图4所示。

LNG冷能作为冷冻冷藏的冷源,将冻结间、冻结物冷藏间、冷却库与冷却物冷藏间等功能模块通过管路串联起来,实现制冷剂的整体化流通,从而提升LNG的冷能利用效率。

日本是最早利用LNG冷能的国家,打造了第一

表2 国内LNG冷能空分项目

Tab.2 Domestic LNG cold energy air separation projects

序号	项目名称	接收站	规模/(t/d)	状态
1	福建LNG冷能空分项目	福建莆田	610	投产
2	宁波LNG冷能空分项目	浙江宁波	614.5	投产
3	珠海LNG冷能空分项目	广东珠海	614.5	投产
4	如东LNG冷能空分项目	江苏如东	612	投产
5	唐山LNG冷能空分项目	河北唐山	723	投产
6	宁波LNG冷能空分项目	浙江宁波	859	在建
7	广钢气体冷能空分项目	广汇启东	710	在建
8	天津LNG冷能空分项目	天津南港	610	在建

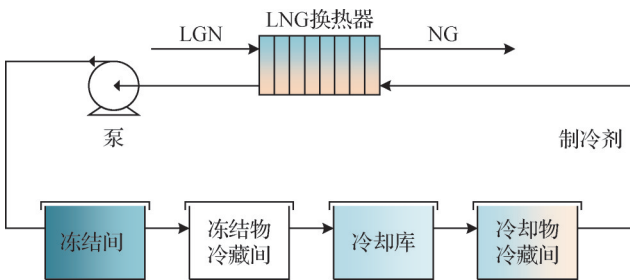


图4 串联梯级利用冷冻冷藏流程图

Fig.4 Flow chart of tandem cascade utilization of freezing and refrigeration

座LNG冷库,冷库存储温度为 $-50\sim-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。典型案例有日本根岸LNG接收站建设的金枪鱼低温冷库项目<sup>[29]</sup>,其冷能利用率低于15%。杜琳琳等<sup>[30]</sup>对LNG冷库建设进行了设计,包括筛选工艺制冷剂、计算冷库消耗量,并以总容量为 $1.5\times 10^4\text{ t}$ 的冷库进行了模拟计算。余艺森等<sup>[31]</sup>设计了应用于船舶的LNG冷能梯级利用系统,涵盖低温发电、低温冷库以及船用空调等多个模块,其冷能利用效率达到36.7%,可节省燃油 $0.11\text{ t/d}$ 。2010年,中国广东佛山杏坛LNG接收站投产运行规模为3000t的冷库制冷项目,每小时可向冷库提供 $-45\sim-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的液氨800~1600kg,节能效果良好<sup>[32]</sup>,流程如图5所示。

### 1.4 CO<sub>2</sub>捕集与液化

传统液态CO<sub>2</sub>制备方法为外部制冷系统冷却液化CO<sub>2</sub>。将LNG的气化与CO<sub>2</sub>捕集过程相结合,可显著降低系统功率、节约能源,液态CO<sub>2</sub>进一步加工处理可得到固体CO<sub>2</sub>干冰<sup>[33]</sup>,其制冷流程如图6所示。

蒋沁锟等<sup>[34]</sup>提出一种利用LNG冷能对天然气田脱硫脱烃后的高浓度CO<sub>2</sub>伴生气进行碳捕集的液化提纯工艺,流程由2个有机朗肯循环、1个制冷循环、1个乙二醇水溶液循环以及精馏系统组成,对伴生气进行液化提纯处理,并制取纯度为99.99%的液体

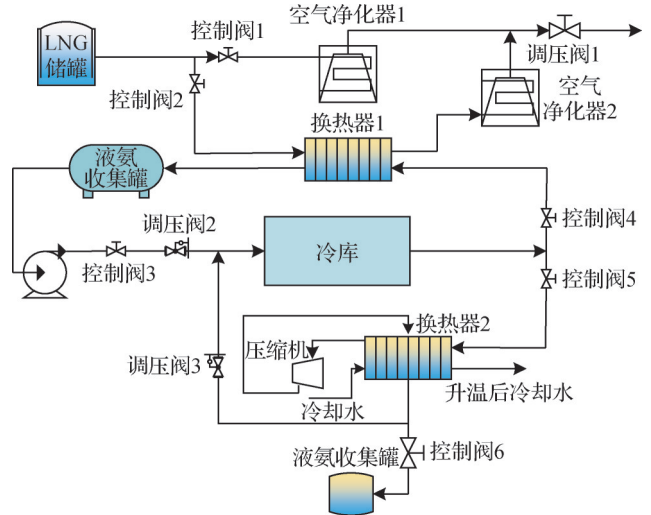


图5 广东佛山杏坛LNG接收站冷库利用流程图

Fig.5 Guangdong Foshan Xingtan LNG receiving station cold storage flow chart

CO<sub>2</sub>产品。雷霆等<sup>[35]</sup>针对常规CO<sub>2</sub>压缩工艺中能耗高和LNG气化过程中冷能浪费的问题,提出一种新型CO<sub>2</sub>两级压缩中间液化工工艺,使压缩功降低了34.5%,大幅减少冷却负荷和设备数量。Xiong Yongqiang等<sup>[36]</sup>提出一种带CO<sub>2</sub>捕集的新型天然气联合循环系统,充分利用冷能来降低制氧和CO<sub>2</sub>捕集能耗,较传统采用LNG冷能利用的碳捕集动力循环相比,LNG用量减少了54.5%。

目前国外在LNG冷能用于液态CO<sub>2</sub>与干冰制备方面,实践经验较为丰富。以日本为例,日本泉北LNG接收站旁建有液化CO<sub>2</sub>厂,其建设投资节省10%,运行节能50%,生产能力为 $3.3\times 10^4\text{ t/a}$ 。据统计,日本已有3套产能达到100t/d的干冰制备装置,LNG冷能大部分用于发电,部分剩余冷能用于制备干冰。目前国内尚无实体项目投产<sup>[37]</sup>。

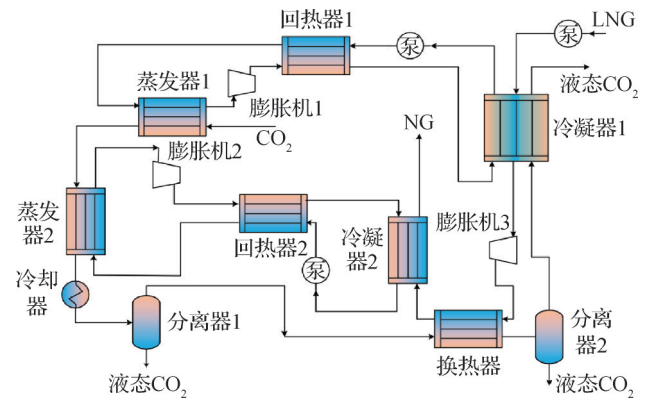


图6 LNG冷能发电和CO<sub>2</sub>捕集结合的系统流程图

Fig.6 System flow chart of LNG cold energy generation and CO<sub>2</sub> capture

## 2 LNG冷能梯级利用模式分析

LNG气化过程温度区间较大,冷能利用存在效率低等问题,许多学者开展了LNG冷能梯级利用的相关研究。

目前许多LNG接收站或卫星站冷能利用项目仍处于规划、建设阶段,冷能利用方式较为单一,利用率普遍较低,深圳大鹏LNG接收站冷能利用涉及空气分离、橡胶粉碎、轻烃分离等过程,未对LNG冷能进行梯级利用,整体利用率较低<sup>[38]</sup>。福建莆田LNG接收站冷能利用方式包括空气分离、轮胎粉碎、冷冻冷藏等方面,冷能利用率较低<sup>[39]</sup>。向腾龙等<sup>[40]</sup>提出一种分级回收LNG冷能的工艺,并把LNG按照温度分为深冷、中冷、浅冷3个阶段,通过CO<sub>2</sub>捕集系统、余热回收系统和冷能发电系统,将3个阶段的LNG冷能充分利用。郝广宇<sup>[41]</sup>将LNG冷能利用分为4级,根据温度变化,综合空气分离、干冰制备、冷库换热和分布式能源冷凝4个过程,进一步提升冷能利用效率。Pan Jie等<sup>[42]</sup>利用LNG深冷部分冷能进行轻烃分离,多余冷能一部分用于有机朗肯循环和数据中心冷却,另一部分用于冷库制冷,系统的净输出功可达4259.72 kW,大于参考LHS单独利用系统。Li Zetong等<sup>[43]</sup>提出了一种集液态空气储能(liquid air energy storage, LAES)、冷能发电和冷能空调于一体的三级冷能利用系统。在LAES储能阶段,利用LNG深冷段冷能液化空气并储存,在电力需求高峰期,液态空气在压力下蒸发,驱动发电,实现电能的转换,有助于电网调峰;中冷段冷能用于发电;浅冷段冷能用于冷能空调,冷却汽化站前的办公区域。该系统比传统LAES系统能效提高6.18%。Chen Kang等<sup>[44]</sup>提出了一种LNG冷能回收的并联发电系统,由1个再生N<sub>2</sub>布雷顿循环系统,1个新型CO<sub>2</sub>循环系统和液化天然气直接膨胀系统组合而成。N<sub>2</sub>布雷顿循环和CO<sub>2</sub>液化系统对LNG冷能进行级联回收,增加系统稳定性。He Tianbiao等<sup>[45]</sup>提出了一种基于低温储能的ORC发电耦合直接膨胀的操作系统,系统包括低温储能模式和能量释放模式。LNG冷能依次用于液化空气、ORC循环发电、直接膨胀输出,新增储能释能环节的系统输出功为103.30 kW,比原系统高22.48%,且系统可为数据中心提供217.22 kW的冷能。Wan Teng等<sup>[46]</sup>提出了一个结合制冷循环的发电系统,将LNG冷能分别用于ORC发电及制冷工艺,采用遗传算法对每个关键参数进行了优化,净发电量增至230.38 kW,提高了13.40%,最大焓能效率提高至45.58%,比优化前提高了7.21%。表3及图7总结了LNG冷能梯

级利用工艺以及对应温度范围。

通过梳理现有研究,可将其归纳为3类:温度梯级串联模式,遵循“温度对口,梯级利用”原则,将LNG气化的温度曲线划分为深冷、中冷、浅冷等多个温区段。为特定温区段匹配最吻合的工艺流程,实现冷能的价值最大化,如向腾龙和郝广宇等;冷能储能模式:LNG冷能供应波动性较大、调峰属性较强,导致供需不匹配, Li Zetong和He Tianbiao等通过引入“储能”环节,将冷能用于液化并储存空气;冷热电多联产模式:通过构建综合能源系统并耦合发电、制冷等多种应用。

在不同LNG气化温度区间,采用梯级利用系统相比单一的单元利用系统能够实现更高的发电量和制冷量。根据目前LNG冷能梯级利用相关研究,现有LNG冷能梯级利用多考虑有机朗肯循环发电、空气分离、以及数据中心冷却和冷库等。

整体上,梯级利用仍处于理论研究阶段,国内尚未实现冷能梯级利用项目投产<sup>[47]</sup>。LNG冷能利用的最佳方案是按照梯级利用的原则,形成上下游协同发展的产业集群。与接收站及周边工业用户、气体用户协调、集聚式发展,才能提高冷能利用率,提升冷能利用项目的盈利能力<sup>[48]</sup>。

## 3 不同冷能利用技术成熟度

本文引入装备技术成熟度<sup>[49]</sup>概念,有助于进一步理解各种LNG冷能利用技术的发展阶段、面临的挑战及未来发展趋势。技术成熟度等级是用于衡量技术成熟程度的尺度,包括美国航空航天局、美国国防部、美国能源部、欧盟、国际标准化组织以及中国总装备部在内的组织和机构,均研究制定了技术成熟度评价标准规范,包括技术成熟度等级(TRL)的定义及判定条件等内容,根据技术成熟度等级和所属发展阶段的论述,对当前主流冷能利用技术的技术成熟度、应用现状及技术瓶颈进行了系统梳理。

LNG冷能利用技术成熟度等级如表4所示,空气分离技术成熟度最高(TRL9),已在国内深圳大鹏、福建莆田等LNG接收站实现规模化应用,冷能综合梯级利用技术尚有完善空间<sup>[50]</sup>;轻烃分离、橡胶粉碎、冷能发电及冷链运输等技术均处于TRL8阶段,已在沿海多个工业基地开展示范应用,换热器和工艺流程的优化需要进一步加强,在成本优化方面还有一定的加强空间<sup>[51-53]</sup>;处于TRL7阶段的冷能利用技术以海水淡化为代表,受冷量时空分布不均、工艺耦合度高等因素制约,实际应用场景受限<sup>[54]</sup>;低温水产养殖与冷水空调处于TRL6阶段,目前有试点项目落

表3 LNG冷能梯级利用工艺温度范围  
Tab.3 LNG cold energy cascade utilization process temperature range

研究团队	一级	LNG温度变化范围/°C	二级	LNG温度变化范围/°C	三级	LNG温度变化范围/°C
向腾龙等 <sup>[40]</sup>	CO <sub>2</sub> 捕集	-162~-120	冷能发电	-120~20		
郝广宇等 <sup>[41]</sup>	空气分离	-162~-90	干冰制备	-90~-60	冷库换热和分布式能源系统的冷源	-60~-20
Pan Jie等 <sup>[42]</sup>	轻烃分离	-162~-100	冷能发电	-100~-10	数据中心冷却和冷库	-100~20
Li Zetong等 <sup>[43]</sup>	液态空气储能(LAES)	-162~-90	冷能发电	-80~-45	冷能空调	-45~1
Chen Kang等 <sup>[44]</sup>	N <sub>2</sub> Brayton循环	-162~-110	膨胀发电	-110~0		
He Tianbiao等 <sup>[45]</sup>	低温储能	-151~-56	冷能发电	-56~-19	直接膨胀	-19~-2

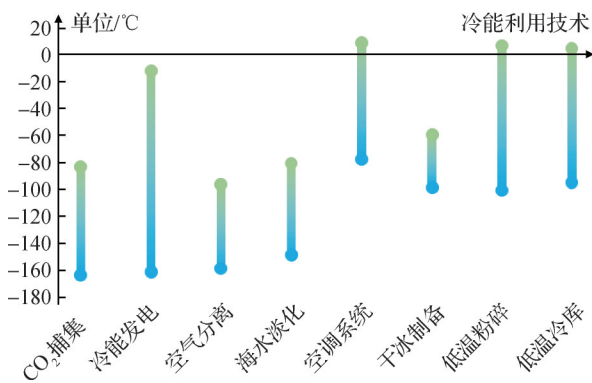


图7 LNG冷能梯级利用工艺温度使用范围

Fig.7 LNG cold energy cascade utilization process temperature range

地,如深圳大鹏接收站钻石水养鱼项目,处于实验室向工程化过渡阶段,存在运维成本高昂等瓶颈<sup>[55-57]</sup>。CO<sub>2</sub>捕集和干冰制备技术(TRL5)仍处于模拟研究阶

段,国内目前没有投产项目<sup>[58-60]</sup>。整体而言,高成熟度技术需通过梯级利用冷能提升能效,中低成熟度技术需解决系统集成难题,以实现冷能梯级利用的规模化发展。

#### 4 LNG冷能梯级应用方案

冷能利用的全面提升无法依赖单一技术的孤立发展,需以场景需求为导向。根据LNG利用环境的不同,通过构建“冷能梯级适配”模式,将高成熟度技术作为核心支撑,中低成熟度技术作为功能补充,构建高附加值工业联产模式、能源-环保协同模式及分布式灵活利用模式。

高附加值工业联产模式中,重点关注资源高效利用与产物价值。LNG深冷段冷能(-162~-100 °C),用于轻烃分离产生高价值产物如乙烷等。

表4 LNG冷能利用技术成熟度等级  
Tab.4 LNG cold energy utilization technology maturity level

冷能利用技术	现存等级	应用单位	存在限制问题
空气分离 <sup>[50]</sup>	TRL9	福建莆田LNG接收站,规模610 t/d	换热器换热效率较低、系统布局不佳和工艺流程待优化
轻烃分离 <sup>[52]</sup>	TRL8	山东青岛董家口LNG项目,分离C <sup>2+</sup> /C <sup>3+</sup> 组分约40万 t/a	换热器和工艺流程的优化需要进一步加强
橡胶粉碎 <sup>[51]</sup>	TRL8	福建莆田LNG接收站	设备成本高昂,低效使用LNG冷能
冷能发电 <sup>[53]</sup>	TRL8	上海洋山LNG接收站,规模2 400 kW·h/a	采用混合介质或者复合循环导致系统过于复杂
冷冻冷藏 <sup>[61]</sup> 冷链运输	TRL8	佛山杏坛LNG卫星站, 含有冷冻库(-30 °C)、储藏库(-15 °C)	换热器换热效率较低、用冷与LNG供冷在时间上不同步
海水淡化 <sup>[54]</sup>	TRL7	登塘LNG气化站制冰项目	工艺耦合复杂性高,冷冻法的脱盐率及产水率较低
冷水空调 <sup>[57]</sup>	TRL6	广东粤东LNG接收站	安全性较低,受周围产业配套和选址影响
低温水产养殖 <sup>[55-56]</sup>	TRL6	广东大鹏LNG接收站 预计年产量可达50 000 kg	受海域生态环境 水温波动等特殊环境影响 无法规模化复制
CO <sub>2</sub> 捕集 <sup>[59]</sup>	TRL5	模拟阶段,暂无应用单位	运行成本高、能耗高、捕集率过低
干冰制备 <sup>[58, 60]</sup>	TRL5	模拟阶段,暂无应用单位	原料稳定性不足、相变能量匹配困难、工业化应用需长期研发

在LNG中冷段(-100~-40℃),重点关注冷能发电与数据中心冷却两大应用领域。利用中冷段冷能为数据中心提供冷量,利用LNG温度范围为-130~-50℃,通过低温制冷剂介质交换热量,可显著降低数据中心的能耗。数据中心电能使用效率(power usage effectiveness, PUE)是数据中心总耗电量与IT设备耗电量的比值,反映了数据中心中非IT设备(如冷却系统、照明系统、UPS电源等)的能耗占比。陈焯等<sup>[62]</sup>研究发现,相比于传统电驱空调供冷(PUE为1.35),采用LNG冷能供冷,数据中心PUE值最低可达1.1。年可节能2100万kW·h,减排CO<sub>2</sub>1.65万t。较传统数据中心电费成本能够减少22% LNG冷能。数据中心业务作为一种新兴业态,具有巨大的市场潜力和广阔的发展前景。

在LNG浅冷段(-40~0℃),低温养殖与制冰经济价值较高。在低温养殖方面<sup>[63]</sup>,冷能与海水换热后,维持海水温度在15~20℃,这种温度的海水适用于高价值偏低温水域鱼类生长,南方海域接收站周边稀缺的冷水资源,刚好填补冷能空缺;在冷能制冰的过程中,低温制冷剂首先与LNG换热并存储冷能,之后在制冰环节将冷量传递给水,完成制冰。孙雷<sup>[64]</sup>针对LNG冷能回收制冰项目进行了成本分析,与传统电制冰相比,每年可以节约电能67.2万kW·h,相当于约268.8t标准煤燃烧所发出的电量。

能源-环保协同模式中,重点关注能量的梯级利用和节能减排。LNG的深冷区间(-162~-100℃)释放的冷能,可进行CO<sub>2</sub>捕集和空气分离。我国辽宁大连、河北唐山等地接收站已经开展了相关项目。研究者们对低温碳捕集进行了广泛研究,提出了多种碳捕集模型,还可用于空气分离,既能满足对深冷的低温需求,又能显著降低分离能耗。

LNG中冷部分(-100~-40℃)释放的冷能,可用于低温粉碎和海水淡化技术,其在节能减排方面展现出较大的应用优势。因废旧橡胶难以自然降解,不仅造成了比塑料污染更严重的黑色污染,还导致了宝贵橡胶资源的浪费。LNG低温橡胶粉碎技术应运而生,低温粉碎需要LNG冷能的温度区间为-100~-50℃。自然粉碎的40~50目的胶粉经过与低温中介质的换热达到脆性状态,完成粉碎过程。我国福建莆田、海南八所港等地接收站已开展相关项目;海水气化LNG可能导致局部海域温度下降以及盐度增加,从而影响海洋生态环境。以LNG气化释放的冷能为能量来源之一,通过与中介制冷剂介质进行换热,将冷能转移并应用于海水淡化系统。在洗涤塔中,利用低温条件促使海水中的水蒸气与高盐分

分离,从而实现淡水的制取。此技术具有较大的开发前景,目前并没有落地项目。

LNG浅冷部分(-40~0℃)释放的冷能,可用于厂区的空调系统,替代传统的压缩式制冷方式,实现低温供冷。既提高了能量利用率,又可以减少氟利昂等对臭氧层的破坏,有效减少温室气体的排放。目前,广东深圳LNG接收站成功将低温LNG冷能用于供冷系统。

在分布式灵活利用模式中,重点关注高效储能和能量灵活利用。LNG深冷部分(-162~-100℃)的冷能,可用于液化空气技术。液化空气不仅储能密度高、容量大、方式灵活,而且效率高、响应快,符合环保低碳的运行原则,可灵活参与电力市场的调峰调频、黑启动等服务。LNG中冷部分(-100~-40℃)的冷能,可面向制备干冰和低温冷能发电。干冰制备需要LNG冷能的温度区间为-100~-70℃,具有长期储存和灵活运输等特点;低温冷能发电的温度区间较广,为-120~-40℃,低温发电技术可用于电力调峰,在用电高峰时期提供额外的电力支持,有效平衡电网负荷。LNG浅冷部分(-40~0℃)的冷能,可应用于冷链物流以及低温冷库、冷藏车等领域。对需要在-18℃以下低温保存的食品、药品等,冷藏车内配备有先进的制冷和保温设备,能够确保产品在运输过程中始终处于规定的低温环境,满足不同场景下的冷能需求。

综上所述,通过梯级利用LNG冷能,可以满足分散、波动性的冷能需求。以提升核心区域能源弹性为目标,推动LNG冷能的高效利用,图8总结了LNG冷能在不同应用模式下的组合方案,表5所示为部分LNG冷能利用梯级利用模式工艺能效对比。

## 5 LNG冷能利用存在问题

目前我国LNG接收站及进口量快速增加,但LNG冷能利用项目较少、冷能利用率较低、运行成本高,主要原因如下:

1) LNG空间分散性较大,接收站多位于沿海,而高耗冷产业,如数据中心、低温粉碎等集中于内陆,区域跨度大,长距离输送低温输送压力损失与热耗散问题严重,尚缺少有效研究方法进行准确的描述和预测。

2) 接收站建设未能与冷能利用项目同步规划,存在冷能梯级利用开发不完全、利用方式单一、项目规划不当等问题。且针对冷能利用评价,缺少完整的体系,目前冷能评价以焓效率表达热力学的完善性,还应结合政策、技术经济性、技术安全性等构建

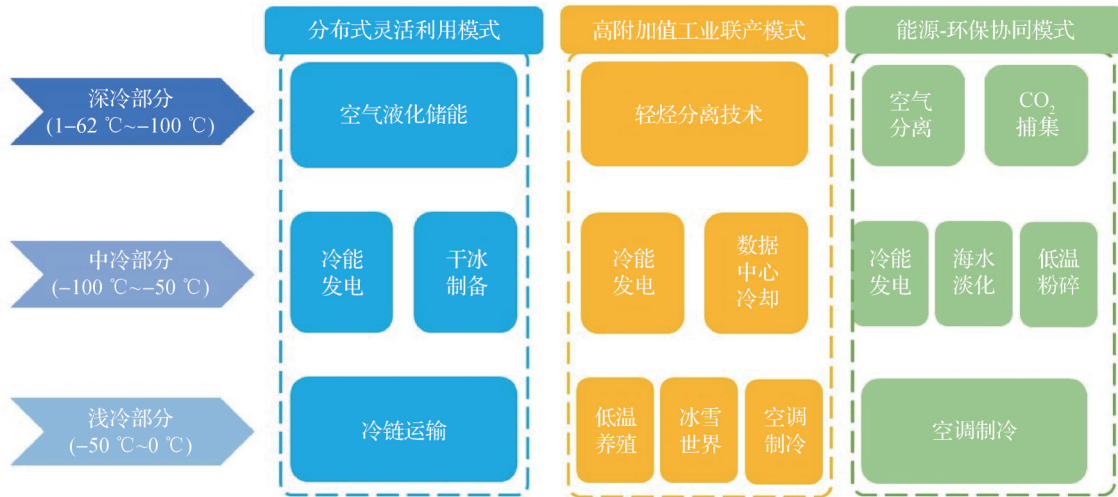


图8 冷能利用梯级组合方案

Fig.8 Step combination scheme of cold energy utilization

表5 LNG冷能利用梯级利用模式工艺能效对比

Tab.5 Process energy efficiency comparison of LNG cold energy cascade utilization modes

研究单位	梯级利用模式	利用工艺	能效分析	经济性
李璐伶等 <sup>[65]</sup>	能源-环保协同模式	空分+干冰/液态CO <sub>2</sub> +发电	冷能利用率为27.89%	经过经济性分析按每年运行8000h计算,则年利润为15269万元
李雪莹等 <sup>[66]</sup>	分布式灵活利用模式	冷库+空调	冷能利用率为48.4%	
Ouyang Tiancheng等 <sup>[67]</sup>	能源-环保协同模式	ORC发电+海水淡化+低温储存和空调	冷能利用率为22.7%	
何为等 <sup>[68]</sup>	分布式灵活利用模式	冷能发电+海水淡化+冷库	气化量200万t/a;发电效率接近8%,淡水产量20万t;冷库容量6063t	
肖荣鸽等 <sup>[69]</sup>	高附加值工业联产模式	轻烃回收+LNG提氮工艺	与单一工艺相比,综合能耗降低14.10% 粗氮回收率和浓度分别达到93.77%、60.43%	
师慧灵等 <sup>[70]</sup>	高附加值工业联产模式	数据中心+LNG冷能冷源利用	经过分析,LNG供给超80%冷能,年节约电能8549万kW·h	项目投产后所得税前内部收益率为16.7%,大于基准收益率12%

一个综合评价体系。

3)LNG冷能供给固有的间歇性与波动性。接收站作为天然气调峰枢纽,其运行负荷直接受下游能源市场需求波动影响,气化量与冷能供应呈现显著的不稳定性,提高了项目的投资风险与运营成本。

## 6 总结展望

本文简要介绍了几种发展较为成熟的LNG冷能利用技术,包括冷能空气分离、冷能发电、冷冻冷藏、冷链物流以及CO<sub>2</sub>捕集等。重点介绍了目前LNG冷能梯级利用的进展,并总结了我国冷能梯级利用局限性的主要因素。通过引入装备技术成熟度概念,进一步理解各种冷能利用技术的发展阶段、面临的挑战及未来趋势。最后提出在3种工业模式需求下,LNG梯级利用的优势组合方式。

未来LNG冷能利用技术的发展与产业化可从以下几个方面开展:

1)针对“空间分散,冷能远距离传输损耗大”问题,应主动引导数据中心、低温物流基地、高附加值冷链加工、精密制造等企业在接收站周边园区布局,形成“冷能利用产业园”,实现冷能就地消纳,规避传输问题。

2)面对“规划不同步与评价体系不健全”问题,构建综合评价体系应包含政策符合程度、经济性、社会效益、技术先进性以及热力学评价体系。

建议后续冷能项目开发以图9所示路线图进行。围绕典型应用领域,如高附加值工业联产模式、能源-环保协同利用模式、分布式灵活利用模式等,结合LNG冷能梯级利用温度范围,探索多种高效协同的冷能利用模式,提升冷能利用的整体效益。

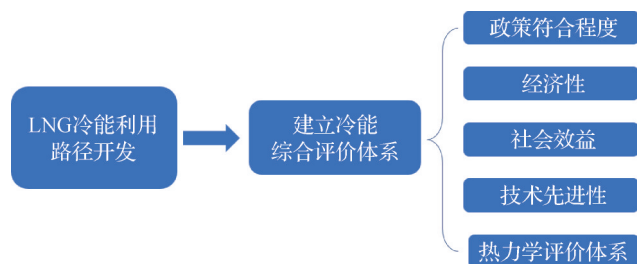


图9 LNG冷能项目开发路线

Fig.9 LNG cold energy project development roadmap

3)针对“LNG供给间歇性与波动性”问题,应建立完善储能系统,包括液化空气储能、蓄冷技术储能等。将冷能波动性的劣势转化为调峰服务的优势。建立智能能源管理系统,根据冷能实时供应情况,进行优先级调度和自动启停,消纳波动冷能,是重要的发展方向之一。

本文受北京市中国石油大学(北京)科研基金项目课题(2462024YJRC009)资助。(The project was supported by the Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (No. 2462024YJRC009).)

参考文献

[1] 张超,金海刚,邵国芬,等. LNG冷能发电工质选择与参数优化[J]. 石油与天然气化工, 2015, 44(4): 54-58. (Zhang Chao, Jin Haigang, Shao Guofen, et al. Selection of working fluid and parameters optimization for cryogenic power generation of LNG[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2015, 44(4): 54-58.)

[2] 杨红昌,鹿院卫,马重芳. LNG冷能发电方案的设计与优化[C]//中国制冷学会2009年学术年会, 2009.(Yang Hongchang, Lu Yuanwei, Ma Chongfang. Design and optimization of LNG cold energy power generation scheme [C]//2009 Academic Annual Meeting of the Chinese Association of Refrigeration, 2009.)

[3] 李秋阳. LNG冷能回收利用技术研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016.(Li Qiuyang. Research on LNG cold energy recovery and utilization technology [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.)

[4] 余黎明. 高效利用LNG冷能的途径探析[J]. 化学工业, 2014, 32(5): 1-12.(Yu Liming. The analysis of efficient use of LNG cold energy pathway [J]. Chemical Industry, 2014, 32(5): 1-12.)

[5] 高芸,王蓓,胡逸丹,等. 2024年中国天然气发展述评及2025年展望[J]. 国际石油经济, 2025, 33(2): 55-67.(Gao Yun, Wang Bei, Hu Yidan, et al. Review of China's natural gas development in 2024 and outlook for 2025 [J]. International Petroleum Economics, 2025, 33(2): 55-67.)

[6] 万腾,周卫红. 液化天然气冷能利用研究进展[J]. 煤气与热力, 2023, 43(4): 21-26. (Wan Teng, Zhou Weihong. Research progress in cold energy utilization of liquefied natural gas [J]. Gas & Heat, 2023, 43(4): 21-26.)

[7] Kaneko K, Ohtani K, Tsujikawa Y, et al. Utilization of the cryogenic exergy of LNG by a mirror gas-turbine [J]. Applied Energy, 2004, 79(4): 355-369.

[8] 梁威,姚辉超. “双碳”背景下LNG冷能利用技术前景分析[J]. 山东化工, 2023, 52(17): 114-117. (Liang Wei, Yao Huichao. Analysis of the future of LNG cold energy utilization technology in the context of “double carbon” [J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(17): 114-117.)

[9] 薛菲尔,陈煜,巨永林. 基于LNG冷能的低温动力循环研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 60-68, 80. (Xue Feier, Chen Yu, Ju Yonglin. Development of cryogenic power generation cycles with LNG cold energy utilization [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 60-68, 80.)

[10] Tsatsaronis G, Morosuk T. Advanced exergetic analysis of a novel system for generating electricity and vaporizing liquefied natural gas [J]. Energy, 2010, 35(2): 820-829.

[11] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, et al. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles [J]. Energy, 2007, 32(7): 1210-1221.

[12] 白芳芳. 提高LNG冷能发电效率的集成优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011. (Bai Fangfang. Integrated optimization research on improving the efficiency of LNG cold energy power generation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.)

[13] 张玉健. 基于LNG冷能利用的工业余热回收集成利用系统研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022. (Zhang Yujian. Research on integrated utilization system of industrial waste heat recovery based on LNG cold energy utilization [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.)

[14] Liu Fuyu, Hu Xiangping, Yu Haoshui, et al. Cascaded organic Rankine cycles (ORCs) for simultaneous utilization of liquefied natural gas (LNG) cold energy and low-temperature waste heat [C]//Advanced Manufacturing and Automation IX, 2020.

[15] Choi H W, Na S I, Hong S B, et al. Optimal design of organic Rankine cycle recovering LNG cold energy with finite heat exchanger size [J]. Energy, 2021, 217: 119268.

[16] Joy J, Chowdhury K. Appropriate number of stages of an ORC driven by LNG cold energy to produce acceptable power with reasonable surface area of heat exchangers [J]. Cryogenics, 2022, 128: 103599.

- [17] Tian Cong, Su Chang, Yang Chao, et al. Exergetic and economic evaluation of a novel integrated system for cogeneration of power and freshwater using waste heat recovery of natural gas combined cycle[J]. *Energy*, 2023, 264: 126227.
- [18] 王溪, 杨晖, 张思凡. 液化天然气冷能利用研究进展[J]. *低碳化学与化工*, 2025, 50(9): 107-115. (Wang Xi, Yang Hui, Zhang Sifan. Research progress on liquefied natural gas cold energy utilization [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 50(9): 107-115.)
- [19] 董亦华, 成鸣峰, 严艺敏. 上海LNG接收站冷能利用可行性路径初步研究[J]. *上海节能*, 2018(1): 35-42. (Dong Yihua, Cheng Mingfeng, Yan Yimin. Preliminary study on feasibility roadmap of cooling energy utilization at LNG receiving station[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2018(1): 35-42.)
- [20] 刘浩, 戎浩. 绿色能源发展的舟山“蓝色方程式”[N]. *舟山日报*, 2024-06-04(1). (Liu Hao, Rong Hao. The "Blue Equation" of Zhoushan for green energy development [N]. *Zhoushan Daily*, 2024-06-04(1).)
- [21] 张国飞, 张金亮, 吴建忠, 等. 宁波发展使用液化天然气的研究[J]. *宁波工程学院学报*, 2014, 26(3): 43-46. (Zhang Guofei, Zhang Jinliang, Wu Jianzhong, et al. Use of liquefied natural gas in Ningbo [J]. *Journal of Ningbo University of Technology*, 2014, 26(3): 43-46.)
- [22] 吕剑雄, 王北福, 聂立宏, 等. 液化天然气(LNG)冷能发电方法比较和研究[J]. *农村经济与科技*, 2017, 28(13): 270-273. (Lyu Jianxiong, Wang Beifu, Nie Lihong, et al. Comparison and research on cold energy power generation methods of liquefied natural gas (LNG) [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2017, 28(13): 270-273.)
- [23] Zhang Ruihang, Wu Chufan, Song Wuwenjie, et al. Energy integration of LNG light hydrocarbon recovery and air separation: Process design and technic-economic analysis[J]. *Energy*, 2020, 207: 118328.
- [24] Nakaiwa M, Akiya T, Owa M, et al. Evaluation of an energy supply system with air separation [J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37(3): 295-301.
- [25] Kim D, Giametta R E H, Gundersen T. Optimal use of liquefied natural gas (LNG) cold energy in air separation units [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(17): 5914-5923.
- [26] Shingan B, Vijay P, Pandiyan K. Cryogenic air separation process integrated with cold utilization of liquefied natural gas: design, simulation and performance analysis [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48(12): 16921-16940.
- [27] Wang Zhikang, Li Junxian, Li Yihong, et al. Thermodynamic and economic analysis of multi-generation system based on LNG-LAES integrating with air separation unit[J]. *Energy*, 2024, 306: 132441.
- [28] 龚硕锴, 许海超. 我国LNG冷能利用发展现状及存在问题[J]. *化学工业*, 2024, 42(4): 57-60. (Gong Shuokai, Xu Haichao. The development situation and problems of cold energy utilization of LNG in China [J]. *Chemical Industry*, 2024, 42(4): 57-60.)
- [29] 李子欣, 杨晴, 刘斌. LNG在制冷行业中的应用[J]. *冷藏技术*, 2024, 47(4): 55-59. (Li Zixin, Yang Qing, Liu Bin. Application of LNG in refrigeration industry [J]. *Journal of Refrigeration Technology*, 2024, 47(4): 55-59.)
- [30] 杜琳琳, 罗东晓, 徐文东. 南方地区冷库利用液化天然气冷能的技术研究[J]. *天然气工业*, 2007, 27(6): 115-117. (Du Linlin, Luo Dongxiao, Xu Wendong. Technical study on lng cryogenic energy used for cold storage in South China[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(6): 115-117.)
- [31] 余艺森, 崔文彬, 熊子禹, 等. LNG冷能应用及船用方案设计[J]. *世界海运*, 2023, 46(11): 1-6. (Yu Yisen, Cui Wenbin, Xiong Ziyu, et al. Application of LNG cold energy and design of marine scheme [J]. *World Shipping*, 2023, 46(11): 1-6.)
- [32] 刘宗斌, 黄建卫, 徐文东. LNG卫星站冷能用于冷库技术开发及示范[J]. *城市燃气*, 2010(9): 8-11. (Liu Zongbin, Huang Jianwei, Xu Wendong. Development and demonstration of LNG satellite station cold energy used in cold storage technology [J]. *Urban Gas*, 2010(9): 8-11.)
- [33] 宁静红, 马志成. 利用LNG的环保工质发电制干冰系统分析[J]. *低温与超导*, 2025, 53(1): 87-94. (Ning Jinghong, Ma Zhicheng. Power generation and dry ice-produced system using LNG and green working fluid [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2025, 53(1): 87-94.)
- [34] 蒋沁锴, 倪宏伟, 江蓉, 等. 基于LNG冷能的精馏型碳捕集流程及其性能模拟分析[J]. *低温工程*, 2024(1): 22-30. (Jiang Qinkun, Ni Hongwei, Jiang Rong, et al. Process and performance simulation analysis of rectifying carbon capture based on LNG cold energy [J]. *Cryogenics*, 2024(1): 22-30.)
- [35] 雷霆, 梁友才, 朱雁, 等. 基于余热回收和液化天然气冷能利用的NGCC电厂燃烧后碳捕集工艺优化[J]. *热力发电*, 2025, 54(6): 194-203. (Lei Ting, Liang Youcai, Zhu Yan, et al. Process optimization of post-combustion carbon capture for NGCC power plants based on waste heat recovery and liquefied natural gas cold energy utilization [J]. *Thermal Power Generation*, 2025, 54(6): 194-203.)

- [36] Xiong Yongqiang, Luo Peng, Hua Ben. A novel CO<sub>2</sub>-capturing natural gas combined cycle with LNG cold energy utilization [J]. *Energy Procedia*, 2014, 61: 899-903.
- [37] 徐文东, 彭曦, 严万波. LNG冷能利用技术研究进展[J]. *天然气与石油*, 2024, 42(3): 75-85. (Xu Wendong, Peng Xi, Yan Wanbo. Research progress in LNG cold energy utilization technology [J]. *Natural Gas and Oil*, 2024, 42(3): 75-85.)
- [38] 姚明见. 大型LNG接收站冷能利用策略分析[J]. *石化技术*, 2018, 25(7): 26. (Yao Mingjian. Cold energy utilization strategy analysis of large LNG receiving station [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2018, 25(7): 26.)
- [39] 郑楚渝, 高宏亮, 马晓东. LNG冷能利用产业发展形势分析[J]. *化工管理*, 2024(10): 10-12. (Zheng Chuyu, Gao Hongliang, Ma Xiaodong. Analysis of the development situation of LNG cold energy utilization industry [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2024(10): 10-12.)
- [40] 向腾龙, 王治红, 汪贵, 等. 液化天然气冷能梯级利用的多功能集成系统研究[J]. *化工学报*, 2024, 75(10): 3401-3413. (Xiang Tenglong, Wang Zhihong, Wang Gui, et al. Research on multifunctional integrated system for cold energy cascade utilization of liquefied natural gas [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(10): 3401-3413.)
- [41] 郝广宇. 梯级利用LNG冷能的新型冷热电联供系统及其在冷库中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2021. (Hao Guangyu. [D]. Jinan: Shandong University, 2021.)
- [42] Pan Jie, Li Mofan, Li Ran, et al. Design and analysis of LNG cold energy cascade utilization system integrating light hydrocarbon separation, organic Rankine cycle and direct cooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118672.
- [43] Li Zetong, Si Xiaolei, Zhao Yongchao, et al. Analysis of coupled liquid air energy storage and liquefied natural gas cold energy cascade utilization system [J]. *Energies*, 2025, 18(6): 1415.
- [44] Chen Kang, Yu Haibin, Fan Gang, et al. Multi-objective optimization of a novel combined parallel power generation system using CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> for cascade recovery of LNG cryogenic energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 256: 115395.
- [45] 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.
- [46] Wan Teng, Zhou Weihong, Bai Bin, et al. Evaluations of energy, exergy, and economic (3E) on a liquefied natural gas (LNG) cold energy utilization system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 65: 308-318.
- [47] 李俊, 陈煜. LNG冷能回收及梯级利用研究进展[J]. *制冷学报*, 2022, 43(2): 1-12. (Li Jun, CHEN Yu. Research progress of cold energy recovery and cascade utilization of LNG [J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(2): 1-12.)
- [48] 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. Present situation and existing problems of LNG cold energy utilization at home and abroad [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2021(6): 163-165.)
- [49] 顾建疆, 屈会力, 李卫, 等. 技术成熟度发展综述[J]. *玻璃纤维*, 2022(6): 24-29. (Gu Jianjiang, Qu Huili, Li Wei, et al. Overview of the development of technology readiness [J]. *Fiber Glass*, 2022(6): 24-29.)
- [50] 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. (Huang Yong. The influence of LNG temperature on the LNG assist air separation unit [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2019, 47(8): 20-23.)
- [51] 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(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(1): 46-48.)
- [52] 邓志安, 李莉, 胡永群, 等. LNG轻烃回收工艺的设计与分析[J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(4): 176-182. (Deng Zhian, Li Li, Hu Yongqun, et al. Design and analysis of LNG light hydrocarbon recovery process [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2023, 48(4): 176-182.)
- [53] Wang Fei, Li Panfeng, Gai Limei, et al. Enhancing the efficiency of power generation through the utilisation of LNG cold energy by a dual-fluid condensation Rankine cycle system [J]. *Energy*, 2024, 305: 132113.
- [54] 兰文超, 刘曦, 叶楷, 等. 基于LNG冷能的冷冻淡化与蓄冷系统[J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(11): 3239-3242. (Lan Wenchao, Liu Xi, Ye Kai, et al. Freezing desalination with thermal energy storage system based on LNG cold energy [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(11): 3239-3242.)
- [55] 李静波, 吴新龙, 孙可达, 等. 一种天然气分布式能源系统用在农业温室大棚的工艺系统: 210671483U[P]. 2020-06-05. (Li Jingbo. A process system for natural gas distributed energy system used in agricultural greenhouses: 201921384844.5[P]. 2020-06-05.)
- [56] 陆晓如. 钻石水养鱼, LNG冷能利用的大鹏示范[J]. *中*

- 国石油石化, 2024(S1): 62-63. (Lu Xiaoru. Dapeng demonstration of diamond water fish farming and LNG cold energy utilization [J]. China Petrochem, 2024 (S1): 62-63.)
- [57] 许婧焯, 林文胜. 数据中心LNG冷电联供系统性能的对  
比分析[J]. 制冷技术, 2018, 38(2): 66-73. (Xu  
Jingxuan, Lin Wensheng. Comparison and analysis on  
performance of combined cooling and power systems by  
LNG for Internet data centers [J]. Chinese Journal of  
Refrigeration Technology, 2018, 38(2): 66-73.)
- [58] 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.)
- [59] 李鹏飞, 杨帆, 田大微, 等. 基于LNG冷能的冷电联产  
CO<sub>2</sub>捕集系统热力学[J]. 化学工程, 2025, 53(3): 83-  
88. (Li Pengfei, Yang Fan, Tian Dawei, et al.  
Thermodynamics of cogeneration CO<sub>2</sub> capture system  
based on LNG cold energy [J]. Chemical Engineering  
(China), 2025, 53(3): 83-88.)
- [60] 赵建河. LNG冷能用于液体CO<sub>2</sub>及干冰制备过程工艺开  
发及优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. (Zhao  
Jianhe. Development and optimization of LNG cold energy  
for liquid CO<sub>2</sub> and dry ice preparation process [D].  
Guangzhou: South China University of Technology, 2015.)
- [61] 张连乙, 李小玲, 刘乐, 等. LNG冷能在冷冻冷藏库中  
的应用[J]. 当代化工, 2016, 45(10): 2360-2362.  
(Zhang Lianyi, Li Xiaoling, Liu Le, et al. Application of  
LNG cold energy in cold storage [J]. Contemporary  
Chemical Industry, 2016, 45(10): 2360-2362.)
- [62] 陈烨, 侍子杰. LNG冷能在数据中心的应用[J]. 电信快  
报, 2024(11): 45-48. (Chen Ye, Shi Zijie. The application  
of LNG cold energy in data center [J]. Telecommunications  
Information, 2024(11): 45-48.)
- [63] 党文婷. [这些提振经济的好做法]“钻石水”里养鱼  
[N]. 光明日报, 2024-05-22(1). (Dang Wenting.  
"[These Good Practices for Boosting the Economy] Fish  
Farming in 'Diamond Water'" [N]. Guangming Daily,  
2024-05-22(1).)
- [64] 孙雷. LNG冷能回收制冰技术的应用实践[J]. 科技创  
新与应用, 2023, 13(36): 185-188. (Sun Lei. Application  
practice of LNG cold energy recovery ice-making  
technology [J]. Technology Innovation and Application,  
2023, 13(36): 185-188.)
- [65] 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, 2019.  
(Li Luling, Wang Wenxiang, Chen Yunwen, et al.  
Simulation study on cascade utilization process of LNG  
cold energy [C]//The 10th China Gas Operation and Safety  
Symposium and the 2019 Academic Annual Meeting of the  
Gas Branch of the Chinese Society of Civil Engineering,  
2019.)
- [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. (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.)
- [67] 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.
- [68] 何为, 代顺豪, 杜娟, 等. LNG冷能梯级利用研究[J].  
设备管理与维修, 2025(6): 50-54. (He Wei, Dai  
Shunhao, Du Juan, et al. Study on cascade utilization of  
LNG cold energy [J]. Plant Maintenance Engineering,  
2025(6): 50-54.)
- [69] 肖荣鸽, 李雨泽, 刘亚龙, 等. 联产轻烃回收与LNG提  
氦工艺设计与模拟[J]. 现代化工, 2025, 45(1): 239-  
244. (Xiao Rongge, Li Yuze, Liu Yalong, et al.  
Simulation and analysis of light hydrocarbon recovery  
combined with LNG helium extraction process [J]. Modern  
Chemical Industry, 2025, 45(1): 239-244.)
- [70] 师慧灵, 陈曼, 张科, 等. LNG接收站与数据中心冷热  
源耦合利用技术及经济性分析[J]. 化肥设计, 2023, 61  
(6): 1-4. (Shi Huiling, Chen Man, Zhang Ke, et al.  
Technical and economic analysis of coupled utilization of  
data centers and LNG cold energy-cold and heat sources  
[J]. Chemical Fertilizer Design, 2023, 61(6): 1-4.)

#### 通信作者简介

陈哲文,男,副教授,中国石油大学(北京)大学机械与储运工  
程学院学院,15120004120,E-mail:2022880013@cup.edu.cn。  
研究方向:碳捕集与封存;超临界水煤气化基础理论以及发电  
系统集成与优化;LNG冷能利用;冷热电联供,地热能利用。

#### About the corresponding author

Chen Zhewen, male, associate professor, College of Mechanical  
and Transportation Engineering, China University of Petroleum,  
Beijing, 86-15120004120, E-mail: 2022880013@cup.edu.cn.  
Research fields: carbon capture and storage; supercritical water  
gasification; utilization of cold energy from LNG; combined  
cooling, heating and power; geothermal energy utilization.