

## 液化天然气冷能回收利用技术研究进展

杨婷<sup>1</sup> 寇鹏<sup>2</sup> 赵艳锋<sup>3</sup> 商丽艳<sup>3</sup> 商丽凤<sup>4</sup>

(1 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院 抚顺 113001; 2 中国石油集团工程有限公司北京项目管理公司 北京 102206;

3 辽宁石油化工大学环境与安全工程学院 抚顺 113001; 4 抚顺市特种设备监督检验所 抚顺 113000)

**摘要** 本文阐述了近些年针对LNG(液化天然气, liquefied natural gas)冷能利用的技术研究成果,并指出了这些技术的优缺点、面临的挑战以及实际应用情况。根据应用研究的交叉性、综合性、工程实际性展望未来LNG冷能利用的发展趋势,提出了LNG冷能低温贮藏生物技术,并在目前利用LNG的联产系统基础上展望多联产系统的发展趋势和研究策略,提出了加快搭建工艺实验平台、加强系统多角度性能研究、加强系统安全性评估的必要性。提出并分析了LNG冷能未来可应用的领域和总体研究方向。

**关键词** 液化天然气;冷量回收;梯级利用;低温技术

中图分类号: TB61<sup>+</sup>1; TB661; TE644

文献标识码: A

## Research Progress of Liquefied Natural Gas Cold Energy Recovery and Utilization Technology

Yang Ting<sup>1</sup> Kou Peng<sup>2</sup> Zhao Yanfeng<sup>3</sup> Shang Liyan<sup>3</sup> Shang Lifeng<sup>4</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Fushun, Liaoning Petrochemical University, Fushun, 113001, China;

2. China Petroleum Engineering Corporation Beijing Project Management Branch, Beijing, 102206, China; 3. School

of Environmental and Safety Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun, 113001, China; 4. Fushun

City Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Fushun, 113000, China)

**Abstract** This study describes the technical research results on liquefied natural gas (LNG) cold-energy utilization in recent years and highlights the advantages, disadvantages, challenges, and practical applications of these technologies. Based on the intersectionality, comprehensiveness, and practicality of applied research, this study discusses the future development trend of LNG cold-energy utilization, constructively proposes LNG cold-energy cryogenic-storage biotechnology, and suggests the development trend and research strategy of a multi-combined generation system based on the current cogeneration system utilizing LNG. It also emphasizes the necessity of accelerating the establishment of a process experimental platform, thereby strengthening research on system performance from multiple perspectives and enhancing the safety assessment of the system. Finally, future applicable fields and overall research directions for LNG cold energy are proposed and analyzed.

**Keywords** liquefied natural gas; cold recovery; cascade utilization; cryogenic technology

随着人类大量开采和浪费非再生能源,已产生大量环境污染,而非再生能源将越来越少,能源危机已引起广泛关注。LNG(液化天然气, liquefied natural gas)作为最清洁的化石能源,不仅有助于减少对煤炭燃料的依赖,而且还被视为实现能源转型和减少碳排放目标的过渡燃料。LNG在我国的“十四五”规划中视为提高能源供应灵活性的关键组成部分。由于其安全性和低CO<sub>2</sub>排放特性,LNG成为理想的能源选择,能够有效支持经济发展与环保目标的平衡。根据海关总署数据,2024年我国LNG进口量达到7 665万t,据《中国天然气发展报告(2024)》统

计,国内全年LNG消费量达3 921万t<sup>[1]</sup>。通过推广LNG的应用,我国将会使能源结构进一步优化,大大增强能源供应的安全性和可靠性。在输送至用户终端之前,LNG接收站传统的再气化方式是使用气化器直接将LNG气化至常温,过程中释放约830 kJ/kg的冷能,该过程需要大量的热量,气化器通常采用海水和空气等作为热源,将被冷却后的热源直接排放会导致周围环境温度降低,造成环境冷污染,同时也会造成额外的能源消耗。日本根岸LNG接收站于1969年投产,是目前冷能利用技术开发最全面的接收站,包括冷能发电、空气分离、制取液态CO<sub>2</sub>和干

冰、深冷仓库等,冷能利用率高达43%<sup>[2]</sup>。而我国仅部分LNG接收站(如福建、大鹏、上海)利用率可达20%~30%,但整体行业均值不足25%,远低于日本的冷能利用率水平。我国各LNG接收站冷能利用效率统计如图1所示。但随着“双碳”目标推进和冷能利用技术成熟,参考日本技术水平,未来利用率有望提升至40%~50%。回收利用LNG冷能时,通常将LNG用作热力循环冷源,冷却工作流体,同时降低了冷凝器压力,增加了循环功率。且回收LNG冷能无需对气化系统进行重大改造,可以节约财政和自然资源。

### 1 国内外主要技术研究进展

随着能源系统的开发和研究,LNG冷能利用技术突飞猛进,在系统进行产品制备过程中主要将LNG作为冷源或进料流股。LNG冷能是高品质低温能,应根据冷能品质分级利用,冷能温度与工作温度匹配才能提高系统效率<sup>[3]</sup>。因此,LNG冷能利用技术

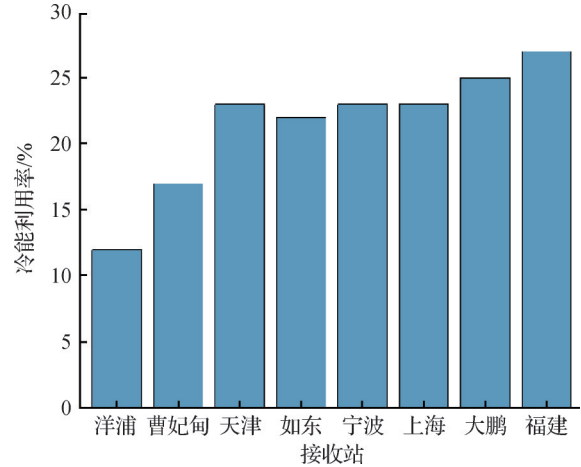


图1 我国各LNG接收站冷能利用率  
Fig.1 Utilization rate of cold energy of LNG terminals in China

遵循能量梯级利用思想,在不同的冷能温度下开发出了多种多样的工艺系统。图2所示为目前在LNG再气化过程中在不同温位下的主要的冷能利用技术。

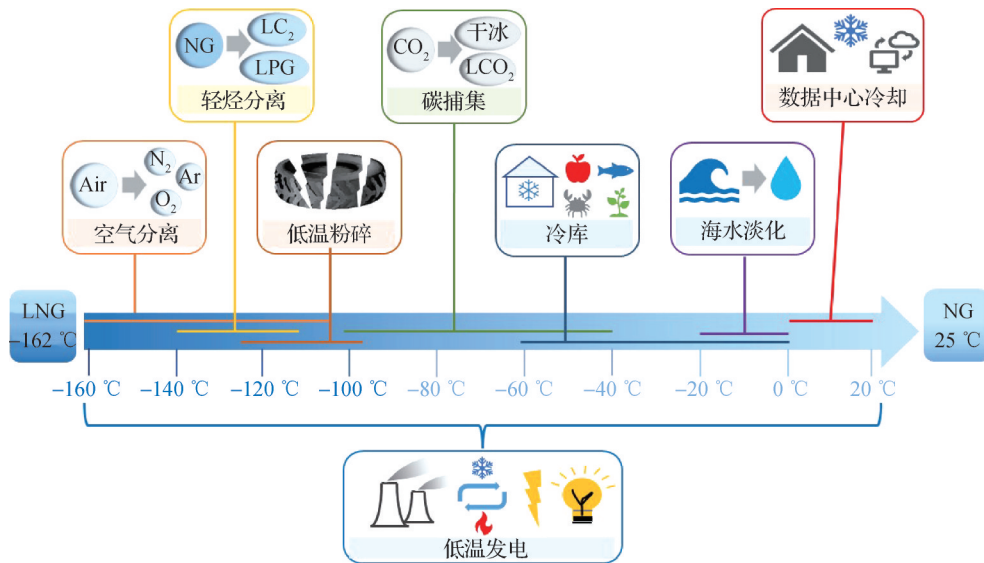


图2 LNG冷能不同温位区间的主要利用技术

Fig.2 Main utilization technologies of LNG cold energy in different temperature ranges

表1汇总了LNG利用主要技术的优缺点、面临挑战以及适用条件和场景。本节将详细介绍这些工艺技术,并分析它们的特点和需要解决的问题。

#### 1.1 空气分离

利用-162℃的LNG冷能可在很短的时间内为空气分离系统生产液体产品提供所需的冷量,与传统机械制冷相比,大幅缩短了空分装置的启动时间,简化了工艺流程,提高了装置的生产效率,降低了焓消耗并节约了运行成本和建设费用。如图3所示,典型的LNG冷能空气分离工艺有2种:1)LNG直接换热空

分,系统结构简单,成本低;2)以氮气为制冷剂的LNG间接换热空分,系统结构较复杂,但更稳定可靠<sup>[4]</sup>。

Han Fenghui等<sup>[4]</sup>提出了不同压力匹配条件下LNG再气化和氮气冷却能量转换的4种空气分离外循环设计方案,实现了LNG冷能的梯级利用。4种方案均可大幅降低单位液体产品的能耗,最低能耗仅为0.189 kW·h/kg根据不同方案的对比,采用高压LNG和低压循环氮的外循环,LNG需求量最小,焓损失最小,焓效率最大,为0.869。M. H. Hamayun等<sup>[5]</sup>

表 1 LNG 主要利用方式对比  
Tab.1 Comparison of the main utilization methods of LNG

技术	优点	缺点	面临挑战	适用LNG温度范围	应用场景
空气分离	节能降耗,用能成本低	装置复杂,设备投资高	LNG 出口流股冷能回收; 冷能远距离运输	-162~-100 °C	大中型工厂
轻烃分离	能耗低;经济效益好;产品 状态便于储存和运输	气源组分复杂,轻烃分离产品 质量不稳定	确保气源组分丰富;优化 装置、流程	-140~-110 °C	大中型工厂
低温粉碎	环保节能;废物回收	设备、工艺要求高;安全投资高	寻找更经济的载冷剂;冷 能远距离运输	-125~-100 °C	大中小型工厂; LNG 动力船
CO <sub>2</sub> 捕集	减碳环保;效率高	固液态产品影响设备性能;研究 理想化,实际投产困难	烟气组成复杂;冷能远距 离运输	-100~-40 °C	大中小型工厂
冷库	距离 LNG 接收站近;占地 面积小;投资少	焓损大;冷能利用率低	优化系统结构和制冷剂	-60~0 °C	物流冷库; 超市保鲜
海水淡化	经济性高;操作简单;环 保节能	脱盐率低;存在结霜现象	实验台搭建;后处理技术 研究	-20~0 °C	淡水厂; LNG 动力船
数据中心冷却	节能降耗	初始投资成本高	冷能远距离运输	0~20 °C	数据中心
低温发电	技术成熟;节能环保	初始投资成本高、运行维护成本 高,小型接收站可能由于冷能量 不足而难以实现经济效益	流程结构优化;适配性更 高的工质筛选	-162~25 °C	大中小型工厂

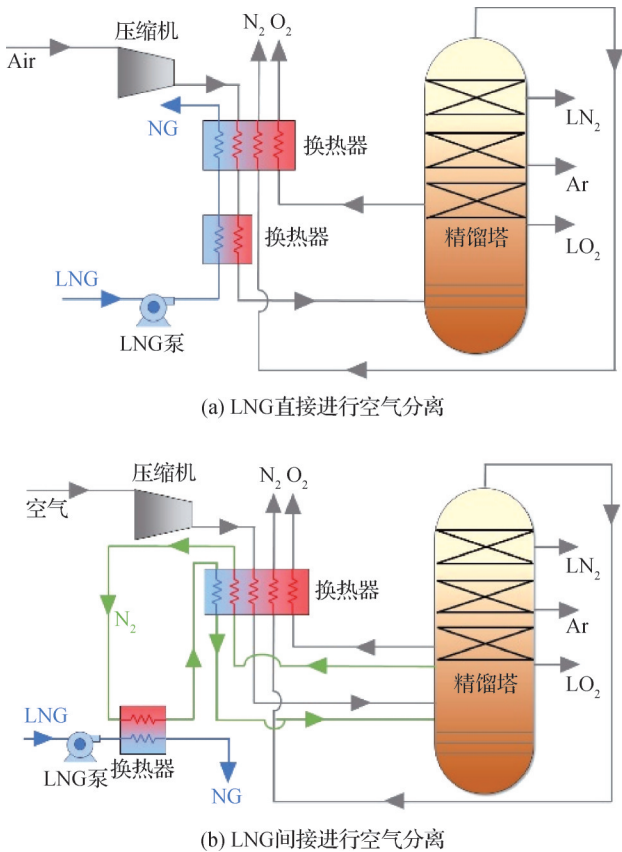


图 3 利用 LNG 冷能进行空气分离的流程<sup>[4]</sup>

Fig.3 Process of air separation using LNG cold energy<sup>[4]</sup>

结合燃气电厂设计要求,研发了一种集成的液化天然气再气化空气分离工艺,并将其与独立的空气分离工艺进行了对比。常规焓分析表明,无论是总能耗还是总焓破坏率,集成流程均优于单独的空分流

程。袁建涛<sup>[6]</sup>针对国内冷能空分装置面临的 LNG 供冷温度过高、影响产能达标的问题,通过剖析 2 种拟议中的降低 LNG 供冷温度策略,成功克服了这一难点。并在此基础上提出了 2 项技术解决方案,这些方案不仅安全可靠、经济实用,且均能有效提升 LNG 供应品质,确保冷能空分装置的运行稳定性。

在全球范围内,特别是在日本、韩国、法国及中国,LNG 再气化与空分系统的联合应用已有多个实例,总计建成了约 35 座 LNG 冷能驱动的空分装置。该技术能够有效降低能源消耗并缩减运营成本。以中国福建的 LNG 冷能空分项目为例,该项目每日能生产液氮、液氧及液氩等产品总计达到 600 t。比常规生产节能 50%、节水 70% 以上。但该技术装置复杂,设备投资较大。在目前的研究中,大多数空分装置 LNG 出口流股低于 -100 °C,距离常温 NG 还有很多冷能未被利用,因此,可将空气分离过程定位为液化天然气冷能利用的上游阶段,而将其他利用技术定位为下游阶段,从而实现冷能的梯级利用。由于 LNG 卫星站多数处于偏远地区,将 LNG 冷能输送至空气分离装置需要额外的经济成本,因此空分系统可以选在 LNG 站场附近建立,以避免产生额外的运输和维护费用。

### 1.2 轻烃分离

NG 由具有高附加值的甲烷、乙烷、丙烷和丁烷等轻烃组成,轻烃分离工艺所需温度约为 -128.25 °C,因此通过有效利用 LNG 气化中释放的冷能,可将液化轻质烃和液化石油气等轻烃低能耗地从 NG 中分

离出来。许多国家将轻烃分离作为调节天然气热值的方法<sup>[7]</sup>。其工艺流程如图4所示。

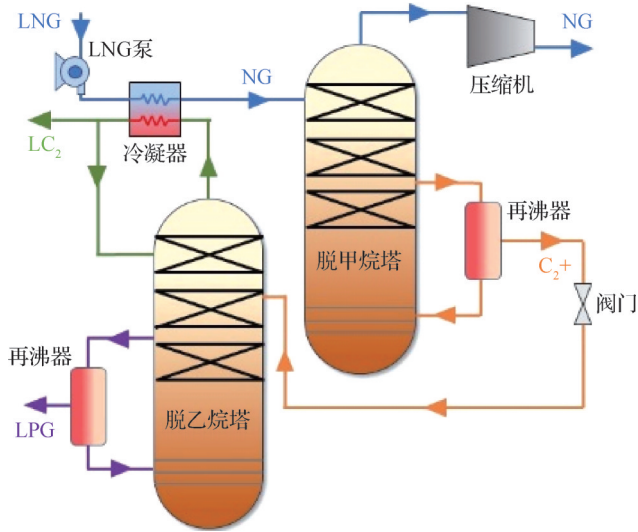


图4 使用LNG冷能的轻烃分离工艺流程<sup>[8]</sup>

Fig.4 Light hydrocarbon separation process using LNG cold energy<sup>[8]</sup>

Zhang Ruihang等<sup>[9]</sup>基于LNG冷能,提出了一种空气分离和轻烃回收的集成流程,优化后该系统的冷能利用率达到67.05%,乙烷回收率为99.76%,部分年化成本为 $3.144 \times 10^8$ 美元/年。Pan Jie等<sup>[10]</sup>为实现LNG冷能的梯级利用,新颖地提出了结合轻烃分离的多联产系统,在该系统中,LNG深冷冷能用于轻烃分离,剩余冷能一部分用于有机朗肯循环及数据中心冷却,另一部分用于冷库。结果表明,该系统的净输出功率为4259.72 kW,该系统20年的收益为 $2.998 \times 10^9$ 美元。邓志安等<sup>[11]</sup>提出一种LNG轻烃回收工艺,并对其进行了优化。优化措施包括安装脱甲烷塔进料泵,以提升进料压力,进而减少脱甲烷塔的能耗。进入脱甲烷塔的物质会与脱乙烷塔顶部排出的气相乙烷进行热交换,这既预热了进料,又使气相乙烷得以液化。同时,引入少量的甲烷和乙烷回流,以提升分离效率。该工艺在提升甲烷产量、乙烷回收率及设备用能分析等方面均展现出一定的优越性。

轻烃分离可以低能耗的回收天然气轻烃资源,该技术已在意大利、西班牙、我国等国家的LNG接收站有所应用,我国青岛LNG接收站设计了国内首套轻烃回收装置,该系统运用了LNG两级升压与一级闪蒸无压缩工艺流程,能够从年处理能力达200万t的富液LNG中高效分离出约40万t/年的液化轻质烃及液化石油气。该技术经济效益可观,分离出的产品状态便于储存和运输。然而,由于气源产地不同,

进口LNG组分含量不同,复杂的气源组分难以保证稳定的轻烃分离产品质量,确保稳定的进口气源组分是应用的前提。目前关于LNG冷能的轻烃分离研究仍然很少,这是一种很有前景的LNG冷能利用技术,未来理论研究中可结合其他技术进一步优化装置、流程,探究系统的热力效率、环境影响等性能。

### 1.3 低温粉碎

将废弃橡胶低温粉碎成小颗粒再回收利用既能满足环保要求又可实现资源再生,这一过程需要大量冷能,LNG以其 $-162\text{ }^\circ\text{C}$ 的低温在低温粉碎工艺中具有光明前景,LNG作为低温冷源将冷能传递给冷媒(液氮、液空等),再将低温冷媒喷洒在需要粉碎的材料上进行深冷粉碎。这种方式避免了使用填埋、焚烧等传统处理方式处理造成的土壤污染和地下水资源污染。简化工艺流程如图5所示。

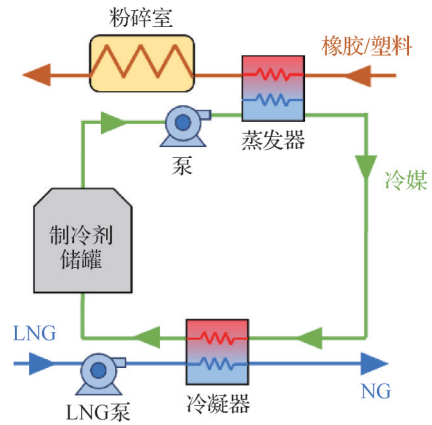


图5 LNG冷能低温粉碎系统<sup>[12]</sup>

Fig.5 LNG cold energy cryogenic grinding system<sup>[12]</sup>

苗沃生等<sup>[13]</sup>采用Aspen HYSYS软件对将现有LNG冷能应用于橡胶粉碎过程的流程进行了模拟与分析,进而对该系统进行了深入的热力学探讨。基于焓分析的结果对流程进行了优化,使改进后的焓效率由73.64%提升至77.94%。同时,优化后的流程使LNG的消耗量每小时降低了30.77%,实现了约670 kW的节能效果。国际上多数学者对具体粉末制备技术进行了深入研究<sup>[14]</sup>,而在利用LNG冷能进行降温工艺流程方面的研究较少。D. H. Lee等<sup>[15]</sup>将海洋废弃物处理和LNG船中的LNG冷能利用耦合,建立了一个生态友好和经济高效的低温粉碎系统。该系统以LNG做冷源代替液氮,乙二醇水溶液和空气做冷媒,粉碎海洋塑料垃圾,气化后的NG用做船舶的燃料气。结果表明,该系统可替代 $2831\text{ kg/h}$ 的液氮,与传统海洋废弃物处理系统相比,利用LNG冷能的粉碎系统可将存储容量提高10倍以上,同时大幅

降低耗能。

在低温粉碎技术中,直接购买液空或液氮来进行橡胶的低温粉碎是不经济的,LNG可以为它们的制备提供低温条件,间接利用LNG冷能。美国TSI Supercool公司已将该技术应用于工厂。我国海洋石油公司以废旧轮胎为原料,将LNG空分和低温粉碎联合起来,处理废旧轮胎2万t,生产80~200目高附加值精细胶粉1.3万t。但LNG具有易燃、易爆的特性,对粉碎设备、生产工艺和运行管理等方面有更严格的操作要求,对安全生产方面投入成本也更多。目前对应用LNG冷能的低温粉碎流程研究较少,仍需进一步开发新型粉碎流程。寻找更合适的载冷剂以提高产品质量也是研究的课题。此外,由于处理厂与LNG站场存在距离问题,该技术应用于陆地上的废物粉碎处理仍存在一定的运输成本,因此在LNG动力船上应用该技术回收海洋垃圾是未来更易实现的应用思路。

#### 1.4 CO<sub>2</sub>捕集

CO<sub>2</sub>减排技术除了从源头上减少CO<sub>2</sub>排放以外,回收利用CO<sub>2</sub>既能保护环境又能创造一定价值。为了从低温烟气中回收CO<sub>2</sub>,需要温度低于约-100℃的冷源。利用LNG所蕴含的冷能作为该冷源,能够有效地将CO<sub>2</sub>直接从气态转变为固态。图6所示为LNG冷能制备固/液CO<sub>2</sub>简化流程。

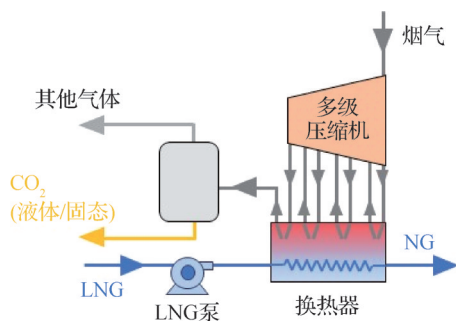


图6 LNG冷能捕集CO<sub>2</sub>过程

Fig.6 LNG cold energy CO<sub>2</sub> capture process

Xin Yue等<sup>[16]</sup>基于实际工作量为100万t/a的中国CCUS项目,提出了利用LNG冷能通过CO<sub>2</sub>管道输送进行CO<sub>2</sub>压缩液化的新工艺方案。经济分析表明,拟议流程的经济性受到距离因素的显著影响,当LNG接收站距离热电厂25、50、75、100 km时,可分别节约31%、23%、16%、8%的成本。秦锋等<sup>[17]</sup>在针对低体积浓度(体积分数低于12%)CO<sub>2</sub>烟气的处理方面,提出了一种创新的膜-深冷分离碳捕集耦合系统工艺,该工艺结合了LNG所蕴含的冷能。此方案有效弥补了单独采用碳捕集技术的不足,并成功将工

艺中的最低CO<sub>2</sub>捕集能耗降至2.183 MJ/kg。

通过上述列举的研究可知,由于工业烟气中CO<sub>2</sub>在捕集过程中有大量余热可利用,CO<sub>2</sub>捕集技术越来越趋向于成为综合联产系统的子系统。日本作为目前世界上LNG冷能利用率达50%的国家,已将LNG制取液态CO<sub>2</sub>和干冰投产应用。但是该技术普遍推广应用仍存在难度,因为在实际生产中,冷凝后凝固的CO<sub>2</sub>可能积聚在换热器的表面上,且烟气的组成一般不只有CO<sub>2</sub>,这给CO<sub>2</sub>的冷凝、分离、提纯的实际操作带来了技术挑战。同时,由于工厂往往与LNG接收站有一定距离,选用合适的储能技术来减少LNG冷能远距离输送成本也是该技术落地所面临的主要难题。目前捕集烟气中CO<sub>2</sub>的主流应用方法是化学提纯和变压吸附,因此,将模拟理论推进至实验室阶段是该技术发展的必要环节。

#### 1.5 冷库

冷库的温度区间大多数在-60~0℃,传统的低温冷库系统采用复叠式压缩机制冷,需要消耗大量机械能和电能,而利用LNG冷能为冷库提供冷量将节约能耗,具有良好的经济可行性。与低温粉碎类似,冷库工艺中LNG将冷能传递给中间冷媒(如R23、R744、乙二醇水溶液等),冷媒再进入冷库降温。其简化工艺流程如图7所示。

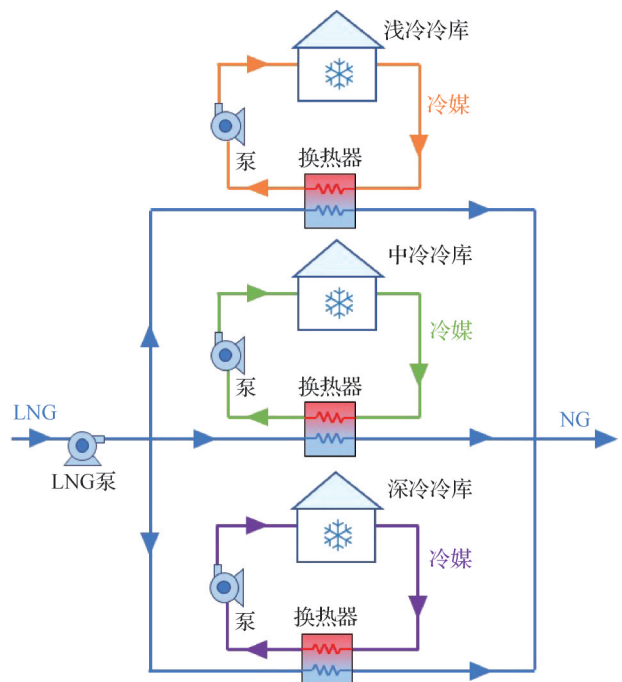


图7 LNG冷能冷库工艺流程

Fig.7 Process flow of LNG cold storage

Pan Jie等<sup>[10]</sup>将冷库工艺与其他技术相结合并进行了详细的性能分析。张玉健等<sup>[18]</sup>在针对某型号

LNG 燃料驱动的渔船研究,提出了一种创新的冷能利用系统,该系统能够高效整合船舶发电、冷库制冷及空调制冷的需求。优化后,烟效率提升了 51.14%,单位烟值成本降至 10.19 美元/GJ,显著降低了渔船的运营开支,并带来了显著的环境效益。

在实际应用中,进口物流冷库建于沿海地区,距离 LNG 接收站较近,且无需制冷机,占地面积小,投资少,因此这是一种可以较快实现的利用技术。LNG 冷库技术在日本、韩国以及我国已均有应用,我国的杏坛 LNG 卫星站库容总量为 3 000 t,包含 -30 °C 中冷冷库和 -15 °C 浅冷冷库。为便于检修,冷库采用并联工艺,但这种连接方式不能实现冷能的梯级利用,换热器温差过大会增大烟损失和成本。在公开文献中很少有对 LNG 冷库系统的流程结构、冷媒选用进行全面定量的研究。因此,如何将不同温度区间的冷库穿插在合适的 LNG 温度等级中是值得思考的问题,将其与发电循环结合起来梯级利用冷能是可以采用的方法。找到合适的制冷剂来更好地与 LNG 换热并向制冷对象释放尽量多的冷量是一种可行的研究策略。

### 1.6 海水淡化

传统的海水淡化工艺有很多种,与基于蒸发和膜的脱盐方法相比,冷冻脱盐经济性高、可在常温下操作、无需热量且对环境友好<sup>[19]</sup>。因此,LNG 冷能对于冷冻脱盐而言是非常适用的。LNG 接收站位于海滨,而冷冻脱盐最佳冷却液在约 -8 °C,可以合理利用 LNG 冷能冷冻海水。利用 LNG 冷冻脱盐主要原理是海水与 LNG 冷能直接或间接低温换热形成淡水冰晶并从浓盐水中分离,融化后获得淡水。其简化工艺流程如图 8 所示。

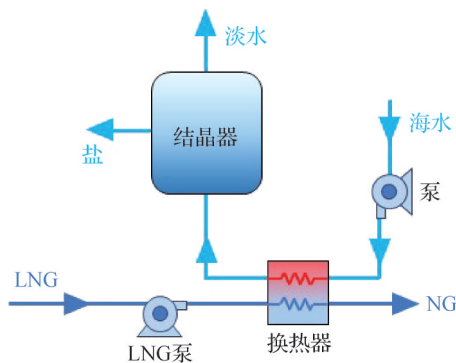


图 8 LNG 冷能海水冷冻淡化流程

Fig.8 Process of LNG cold energy seawater freezing and desalination

谢春刚等<sup>[20]</sup>设计了一种利用 LNG 冷能驱动流化床式海水冷冻淡化的具体方案,此方案展现出卓越

的传热性能,其传热系数超过 5 000 W/(m<sup>2</sup>·K),流化床内固体颗粒的流动特性近似于液体,促进了大量热量与质量的高效传递于不同传热管之间,便于实现连续化操作及系统规模的扩大。曹文胜等<sup>[21]</sup>则运用 HYSYS 软件设计并模拟了利用 LNG 冷能的片冰机制冷海水淡化流程,gPROMS 仿真结果显示,每千克当量的 LNG 冷能可产出 1.9~2.1 kg 的冰融水,该组合工艺的制冷剂泵能耗为 3.725 kW·h/100 kg。苗旺等<sup>[22]</sup>提出一种海水淡化与冷电联产相结合的水合物混联耦合系统,并对系统中发电单元的关键参数进行了敏感性分析。最终优化后,该系统分别取得了最高 42.93% 的烟效率与 5.93 亿美元的净现值。

虽然基于模拟系统的 LNG 脱盐工艺效率较高,但实验台搭建困难,由于海水的快速结冰,实验制冰脱盐率仍然很低,需要结合后续处理技术提高晶体质量。

### 1.7 数据中心冷却

随着国内大型数据中心的快速发展,机房制冷能耗大幅增加,制冷能耗约占总能耗的 30%~50%,同时冷却装置也会间接产生大量碳排放,急需用更可持续的方式节能降温。使用 LNG 冷能作为数据中心散热的冷源使用,可以大大节省能耗并降低运营成本。

数据中心冷却主要利用 LNG 冷能与中间冷媒(水、乙二醇等)换热后冷却数据中心,其需要的冷却温度仅在约 7 °C,主要利用 LNG 高温区冷能。其简化工艺流程如图 9 所示。

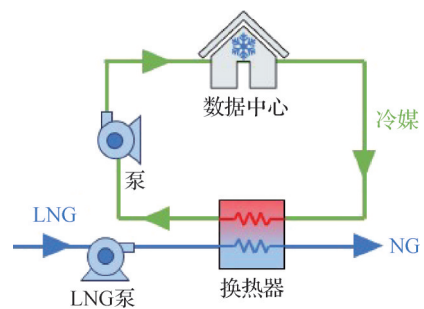


图 9 数据中心 LNG 冷能制冷流程

Fig.9 Process of LNG cold energy cooling for data center

M. Sermsuk 等<sup>[23]</sup>设计了新型数据中心冷却系统,将 LNG 冷能传递给海水以取代数据中心的传统冷却系统,计算结果表明该系统每年可降低 987 万美元的数据中心冷却运营成本,并减少 CO<sub>2</sub> 排放量 34 772 t。经济分析显示,该系统可能导致数字公司的投资回收期为 2.21 年,内部收益率为 45%,LNG 接收站的投资回收期为 7 年,内部收益率为 13%。Tian Zhen 等<sup>[24]</sup>

将数据中心冷却同发电、制氢和CO<sub>2</sub>捕集结合到一起以利用LNG冷能,拟议系统的平准化能源成本和投资回收期分别为0.071美元/(kW·h)和7.9年。LNG冷能利用效率、系统能效和焓效率分别为43.20%、19.08%和29.28%,系统的负碳指数为29.47 t/h。

目前数据中心主要应用空调降温,将其与LNG冷能利用耦合不仅合理利用LNG高温冷能,而且回收热能,节约电能。但由于地理位置不同,如何将冷能稳定、低成本地运输至数据中心仍是值得探究的方向,王瑜等<sup>[25]</sup>对数据机房中喷雾冷却系统的核心要素进行了综合归纳,重点研究了该系统在传热效率、冷源选取、流体输送配置优化以及系统控制与反馈机制等方面面临的挑战。他们的研究揭示,现有潜在的冷源在供给喷雾冷却所需冷能前,均需经过复杂的转换过程,且尚未形成一个系统化、具体的冷源解决方案。故目前该技术仍处于理论阶段,在后续研究中应尽量贴合工程实际,考虑冷量动态变化、距离成本以及储能技术等问题。在电子信息技术蓬勃发展的未来,人们将越来越重视数据中心冷却技术,LNG冷能在数据中心冷却领域的应用有很大拓展空间。

## 1.8 低温发电

低温发电是这些LNG冷能利用技术中工艺最成熟,实际投产最广泛的一项。LNG替代传统的冷源海水将工质冷却液化,国内外学者设计了很多利用LNG冷能的不同结构的发电循环,并为实现发电循环的最佳性能进行了大量研究。刘梅梅等<sup>[26]</sup>对直接膨胀法进行了改进,使用多级膨胀进行冷能利用,与太阳能热水系统联合发电,经过模拟分析得出结果:从每年5月起至次年1月期间,LNG冷能发电系统的发电量均高于太阳能热水系统所需的辅助加热量,且系统还能额外产生 $1.13 \times 10^5$  kW·h的富余电力。蔡东旭等<sup>[27]</sup>提出一种改进型三级串联多股流联合循环系统,通过遗传算法优化计算,当天然气排气压力为5.5 MPa,系统内各级循环工质均选取丙烷时,系统的最大净输出功为6 027 kW。Sun Wenyi等<sup>[28]</sup>将LNG冷能用于朗肯循环、有机闪蒸循环和布雷顿循环进行联合发电并与冷库系统进行耦合。优化结果表明,系统的能源利用效率、焓效率、产品单位焓经济成本和产品单位焓环境影响分别为72.08%、45.45%、98.04美元/GJ和 $1.478 \times 10^{-2}$  mpt/kJ。表2所示为利用LNG冷能的主要发电循环特点及未来研究方向。

表2 主要发电循环特点及未来研究方向

Tab.2 Characteristics of the main power generation cycle and future research directions

发电循环	优点	局限性	未来研究方向	参考文献
直接膨胀循环	发电量大;原理简单	效率低;浪费冷能	与其他循环结合提高效率	[26]
朗肯循环	原理简单;经济性好	效率低;焓损大	探究与LNG匹配的混合环保工质,以达到更高的系统效率	[27]
卡琳娜循环	效率高	氨水有毒;结构复杂	探究完美替代氨水并与LNG冷能良好匹配的工质	[29]
有机闪蒸循环	效率高;运行稳定	动力消耗大;设备成本高	从循环工质、参数和结构等方面优化LNG冷能回收效率的有机闪蒸循环	[28]
燃气轮机循环	发电量大;效率高;节能环保	结构复杂;投资高	将开式闭式2种燃气轮机循环结合起来回收LNG冷能和燃烧气化NG	[30]
斯特林循环	结构简单;热效率高;经济性好	焓效率低	探究斯特林循环内工质与LNG匹配情况、斯特林循环与其他流程组合方式	[31]

## 2 发展方向展望

LNG冷能利用技术多种多样,除前文回顾的方法以外,随着科技发展,人们越来越重视能源应用研究的交叉性、综合性、工程实际性。基于此,分析以下几种有很大发展潜力的研究空间。

### 2.1 生物材料贮藏

LNG优质的低温特性使其在低温冷冻领域有很大应用空间,除了食品保鲜和冷冻以外,生物材料的

冷冻贮藏也是一种可应用的强有力的生物技术。在合适的规模下,超低温保存可以保护物种多样性,是冷水水产养殖、胚胎培养、植物无性繁殖的有力工具。

低温保存技术是在稳定状态下将生物遗传信息或生物幼体储存在低温液氮中,且是长期保存不同种类植物遗传物质的唯一可行技术<sup>[32]</sup>。该技术通过综合运用低温保护剂、调控冷冻速度等多种措施,在极低温度环境(一般达到-80℃或-196℃)下,确保了

细胞、组织、器官及其他生物材料能够长期且高质量地保存。然而,高浓度的低温保护剂可能对细胞产生毒性效应,尤其是在随后的复温阶段,保护剂的清除过程有可能进一步引发细胞损伤。而LNG及其释放冷能的过程均无毒,避免了对生物材料的毒性和损伤。低温保存技术是在稳定状态下将生物组织直接储存在低温液氮中,无需载冷剂,使用LNG作为低温保护剂替换液氮也不需要载冷剂,CH<sub>4</sub>对生物组织无害。同时,不同研究方案对生物的冷冻温度区间不同(-196~-1℃不等)<sup>[33]</sup>,通常通过液氮实现制冷,但这些温度区间也非常适合LNG冷能的应用。因此不仅可以通过LNG冷能空分系统的液氮流股连接生物冷冻库,还可以根据LNG冷库原理建立不同温区的生物冷库。由于LNG气化站位于港口附近,将医疗生物冷库建立在LNG气化站附近也将减少对于医疗物品的进出口造成的低温运输费用。同时,医疗生物制品对温度波动极为敏感,港口冷库的近距离存储可大幅缩短暴露在运输环境中的时间,降低因温控失效导致的货损风险和因长距离运输产生的温控设备损耗、能源消耗及人工成本。《“十四五”冷链物流发展规划》明确提出加强国家骨干冷链物流基地建设,完善港口冷链设施布局。中国作为全球第二大医药市场,疫苗、血液制品、诊断试剂等冷链医药产品进出口需求旺盛。港口冷库需满足-196~-25℃等多温区存储,尤其是超低温保存箱(如-150℃设备)需求快速增长。中国主要港口(如上海、深圳、天津)正加速建设专业化医疗冷库集群。天津东疆综合保税区已建成8.9万m<sup>3</sup>保税和非保税全温区冷库,为默沙东、赛诺菲等跨国药企提供多温区仓储、口岸查验、供应链金融等服务,直接服务于疫苗、生物制剂等医疗产品的进出口需求。

## 2.2 功能多样化

基于对LNG冷能温度分布特性的深入理解,单一利用方式难以充分发掘LNG冷能的潜力。因此,国内外学者设计了多种系统组合,构建了功能各异的LNG冷能多联产系统。潘本艺等<sup>[34]</sup>提出了一种结合氮气回热布雷顿循环与乙烯-丙烷二级有机朗肯循环的联合系统,该系统不仅能实现冷热电三联供,还能有效回收烟气中的CO<sub>2</sub>。郭媛媛等<sup>[35]</sup>则构建了一个以太阳能为热源的双级有机朗肯循环与跨临界有机闪蒸循环集成的冷热电联供系统,并将其与单级有机朗肯循环与亚临界有机闪蒸循环组合的系统进行了对比分析。研究结果显示,该冷热电联供系统在性能上展现出更优的表现。

近年来设计出回收LNG冷能的多功能多产品系

统已成为研究的主流趋势。但具有基础功能(制冷、制热、发电)的系统研究居多,在海水淡化、轻烃分离的联产系统方向上仍有很大探索空间,融入更加新颖功能理念的研究是稀少的。在未来,建造综合型低能耗的环保工业园区是工业规划发展必然趋势,因此,研究人员应大力发展LNG冷能的综合利用,研究多功能联产系统,不仅应聚焦于制冷、制热和发电,还可结合海水脱盐、轻烃分离、其他化工生产等工艺进行设计。

## 2.3 工艺简化

小规模LNG冷能利用系统应用于内陆地区要比复杂的大型多联产系统更具有经济性和可持续性,进一步探究小型系统的LNG利用技术有利于将LNG冷能全面应用进社会生活,例如将LNG冷能用于船舶、宾馆、写字楼等微型多联产系统。

LNG是最有前途的用于船舶的清洁燃料替代品之一,通过基于LNG气化的有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)可有效回收船舶余热,实现更高的系统效率<sup>[36]</sup>。朱柏彤等<sup>[37]</sup>针对特定型号双燃料船舶主机的天然气燃料冷能及其排烟余热特性,设计了一套将主机余热与LNG冷能相结合的回收方案,并评估了该方案在船舶余热回收领域的实际效益。夏睿等<sup>[38]</sup>提出一种新型特种液货船低温能量管理系统,该系统搭载于浮式液化天然气生产储卸装置(floating liquefied natural gas, FLNG)上,通过基于液态低温空气储存的冷能,同时集成液化天然气生产、液化CO<sub>2</sub>及电力输出功能,实现了冷能在特种液货船上的多级高效利用。

目前LNG冷能在冷能宾馆、写字楼等建筑中的应用情况仍不乐观,有少部分学者研究了利用LNG冷能的建筑供能系统案例,利用LNG冷能的区域分布式供能系统有望在未来建筑供能中得到实际应用,因此可以从建筑案例分析入手进行LNG冷能利用多联产系统的研究。

## 2.4 其他利用方式

大部分冷能利用技术均需克服LNG冷能的远距离输送问题,若应用合适的储能技术可解决冷能按时按需供应问题。目前已有许多研究对LNG储能进行探索,例如液态CO<sub>2</sub>储能<sup>[39]</sup>、压缩空气储能<sup>[40]</sup>,相变材料储能<sup>[41]</sup>等。

卢昕悦等<sup>[42]</sup>设计了2种储能系统:一种是耦合LNG的液态空气储能系统(LNG-LAES),另一种是耦合LNG的液态CO<sub>2</sub>储能系统(LNG-LCES),并对两系统热力学性能与经济性的参数的进行了对比分析。

研究结果显示,LNG-LAES在最优焓效率、膨胀发电能力以及储能密度方面均优于LNG-LCES但LNG-LCES表现出更高的循环效率和冷能利用率,对LNG温度变化的适应性更强,且在经济性方面更具优势。苏要港等<sup>[43]</sup>提出了一种创新的液化空气储能系统,该系统巧妙地将LNG冷能与ORC相结合。在此系统中,LNG冷能被用作辅助能源,与储能系统深度融合,实现了能量的灵活释放与发电。此外,该系统还采用了冷能梯级利用策略,即先将冷能用于液化空气,随后用于ORC发电和数据中心冷却,从而显著提升了能量利用效率,有效降低了能量损失。

储能是将LNG冷能应用于内陆各行各业的关键,但高昂的成本及价格成为制约储能技术推广及其产业发展的主要因素,为了更好地实际应用,仍需进一步探究LNG储能技术与前文所提技术低成本高效率的契合方法。

## 2.5 安全性评估

除了提出新技术和搭建实验平台以外,加强对系统的多角度性能评估也是必要的,研究人员不仅要评估系统的热力和经济性,还要将安全性、稳定性、环境影响等多方面因素综合考虑进系统的评估指数中。同时,为克服相互冲突的系统性能,筛选出系统最优运行策略,加强智能优化算法的开发和应用也是必不可少的。

在LNG储运过程中涉及极低温和高压,有很多潜在的危險,一旦发生安全事故,将会造成巨大损失,在实际工程设计中考虑以上安全风险是十分必要的,但在目前的LNG冷能利用研究中以安全性为评估标准之一非常少见。在后续关于LNG冷能利用技术的设计中,安全性评估也应成为研究的评估理念,这将更贴合实际工程应用。本节对技术工艺需注意的问题进行介绍。

由于LNG的低温特性,一旦被运输到接收站,就被储存在高度隔热的储罐中,再气化后通过管道系统输送至用户。这一过程中,低温LNG可能会使设备材料脆化断裂,泄漏后会导致与之接触的人员冻伤甚至窒息。因此,接触LNG的储罐、管道和阀门必须由耐低温的特殊低温材料制成。

基于LNG本身性质,工厂可能发生的危險包括:直接接触引起低温组织损伤、窒息、快速相变引起的爆炸、蒸发气(boil-off gas, BOG)爆炸、爆燃和池火<sup>[44]</sup>。在LNG处理厂,由于罐壁连接处的管路、焊缝、阀门和法兰处腐蚀或裂缝很容易发生泄漏,有可能引起爆炸、爆燃或火灾。当LNG与水接触后,由于二者之间巨大的温差将使其发生高强度的热量交换,进而

造成局部压力飙升,会发生快速相变引起爆炸。LNG储罐和管道会产生BOG,BOG在密闭空间中不断增加可能会发生气体爆炸,LNG储罐面临的主要问题就是LNG翻滚造成BOG量直线上升从而扰动储罐稳定,发生安全事故<sup>[45]</sup>。因此在LNG卸载、储存期间都应配备BOG放空系统和回收装置。当设备发生LNG泄漏,会形成一个同时扩散和蒸发的液池,并逐渐形成蒸气云。蒸气云一旦遇到明火就会发生爆燃,而未蒸发的蔓延液池会导致池火<sup>[46]</sup>。因此LNG接收站及相关处理厂必须防止明火、静电的产生,并装有相应消防措施。

在设计回收LNG冷能工艺时,不仅要考虑冷源LNG的安全性,还要选择安全无毒、性质稳定、经济环保的工质。并且在操作参数方面,流体的正常沸点要低于冷凝温度,以便在大气压力以上运行,并避免空气渗透的风险,冰点必须足够低,以避免与LNG进行热交换时出现结晶问题<sup>[47]</sup>。

## 3 结论

LNG作为清洁型一次能源,充分利用其气化释放的冷能对能源行业的技术进步和经济发展具有不可估量的潜力。本文介绍了LNG冷能应用主要技术,指出了各项技术研究的优缺点,结合这些技术最新的科研成果与实际应用现状展示了技术发展动态,提出了可以改进之处,为LNG冷能利用技术的科研方向和实际应用提供了思路。同领域综述多致力于总结实际应用现状,本文不仅对每种技术的科研现状与实际应用项目进行了评价,还根据应用研究的交叉性、综合性、工程实际性展望了未来LNG冷能的可应用领域,指出了总体研究方向,包括提出发展LNG冷能低温贮藏生物技术、发展功能多样化梯级联产系统提高能源利用率、发展小型系统使工艺简化以及其他利用方式如发展储能技术以解决冷能按时按需供应问题。最后对LNG再气化利用工厂需注意的潜在风险进行了安全讨论,提出建议如下:

1)为了提高能源利用效率,进一步扩大LNG冷能应用领域,根据温度区间不同进一步发展数据中心冷却及水产养殖、胚胎培养和植物无性繁殖。将多种功能结合到一起的多联产系统成为研究趋势,在考虑制冷制热和发电的同时,还可将空分、轻烃分离等功能结合设计,也可以根据温度区间不同进一步发展数据中心冷却、水产养殖以及生物材料贮藏等技术。

2)将多种功能结合到一起的多联产系统是研究趋势,不仅应考虑制冷制热和发电,还可将空分、轻

烃分离等功能结合设计。目前对 LNG 冷能利用系统的文献研究主要集中在 LNG 冷能系统的能量和焓效率上。在提高效率的同时,应更加重视技术经济研究,以提高 LNG 再气化终端主要关注的 LNG 冷能利用系统的经济性能问题。

3)进一步探究将 LNG 冷能用于船舶、宾馆、写字楼等小型系统的 LNG 利用技术,有利于微型多联产系统,有助于推进 LNG 广泛应用,加快 LNG 冷能全面应用到社会生活。

4)目前对于 LNG 冷能利用系统的研究主要以模拟为主,还需要进一步的实验研究和现场测试来证明系统的可行性、热力学效率和成熟度,应搭建实验平台为模拟结果提供实际数据支撑,使模拟结果更具可靠性。

5)在系统性能评估中除考虑经济性以外,加入安全性设计将更贴合工程实际,同时为了遵循国际环保策略的系统设计思路,还要利用环境学对系统进行分析。

本文将有助于研究人员对 LNG 冷能利用技术的全面了解和 designs。尽管 LNG 冷能利用技术的应用面临诸多挑战,但随着科技进步,在不久的将来, LNG 冷能将被更加高效的利用和应用到实际当中。

本文受中国石化天然气分公司委托技术开发项目(35151101-23-ZC0607-0001)资助。(The project was supported by Sinopec Tianranqi Company Entrusted Technology Development Project (No. 35151101-23-ZC0607-0001).)

#### 参考文献

- [1] 马晓敏.《中国天然气发展报告(2024)》发布[N].中国矿业报,2024-07-30(002).(MA Xiaomin. China Natural Gas Development Report 2024released[N]. China Mining News,2024-07-30(002).)
- [2] 李峰.大型 LNG 接收站冷能利用技术分析与实践[J].化工管理,2022(13):149-152.(LI Feng. Technical analysis and engineering practice of cold energy utilization in large LNG receiving terminal[J]. Chemical Management, 2022(13):149-152.)
- [3] XU Wendong, DUAN Jiao, MAO Wenjun. Process research and analysis on potential development of a novel air separation process cooled by LNG cold energy [J]. Advanced Materials Research, 2013, 805/806: 609-615.
- [4] HAN Fenghui, WANG Zhe, JIANG Yuemao, et al. Energy assessment and external circulation design for LNG cold energy air separation process under four different pressure matching schemes [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27: 101251.
- [5] HAMAYUN M H, RAMZAN N, HUSSAIN M, et al. Conventional and advanced exergy analyses of an integrated LNG regasification-air separation process [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61 (7): 2843-2853.
- [6] 袁建涛.关于降低冷能空分供冷温度的方法研究[J].山东化工,2024,53(6):195-197.(YUAN Jiantao. Study on the method of reducing the cooling temperature of cold energy air separation [J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(6): 195-197.)
- [7] WANG Shuting, HUANG Kun, WANG Xiaoshang, et al. Study and economic evaluation on the process of calorific value adjustment in the LNG receiving terminal [J]. The Open Petroleum Engineering Journal, 2016, 9 (1) : 226-235.
- [8] GAO Ting, LIN Wensheng, GU Anzhong. Improved processes of light hydrocarbon separation from LNG with its cryogenic energy utilized [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(6): 2401-2404.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.)
- [12] 崔国彪,刘阳,安海燕,等.利用 LNG 冷能粉碎废旧橡胶工艺[J].天然气与石油,2013,31(2):24-26,5.(CUI Guobiao, LIU Yang, AN Haiyan, et al. Rubber comminution by utilizing LNG cold energy[J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(2): 24-26, 5.)
- [13] 苗沃生,李琦芬,杨涌文,等. LNG 冷能用于橡胶粉碎的流程优化研究[J].天然气化工(C1化学与化工),2020,45(2):77-80,94.(MIAO Wosheng, LI Qifen, YANG Yongwen, et al. Process optimization of LNG cold energy use in rubber crushing based on exergy analysis[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2020, 45 (2) : 77-80, 94.)
- [14] ABBAS-ABADI M S, KUSENBERG M, SHIRAZI H M, et al. Towards full recyclability of end-of-life tires: Challenges and opportunities [J]. Journal of Cleaner

- Production, 2022, 374: 134036.
- [15] LEE D H, PARK S, KIM H T, et al. Proposing a new solution for marine debris by utilizing on-board low-temperature eco-friendly pulverization system[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 24364.
- [16] XIN Yue, ZHANG Yindi, XUE Peng, et al. The optimization and thermodynamic and economic estimation analysis for CO<sub>2</sub> compression-liquefaction process of CCUS system using LNG cold energy [J]. Energy, 2021, 236: 121376.
- [17] 秦锋, 陈海平, 明红芳, 等. 基于 LNG 冷能的膜-深冷分离碳捕集耦合系统工艺模拟与分析[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49 (2): 96-104. (QIN Feng, CHEN Haiping, MING Hongfang, et al. Process simulation and analysis of membrane-cryogenic separation carbon capture coupling system based on LNG cool energy [J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2024, 49 (2): 96-104.)
- [18] 张玉健, 顾丛汇, 姚寿广. 某渔船燃料 LNG 冷能利用方案的设计和优化[J]. 船舶工程, 2022, 44(1): 1-7, 40. (ZHANG Yujian, GU Conghui, YAO Shouguang. Design and optimization of cold energy utilization scheme for a LNG fuel-powered fishing boat [J]. Ship Engineering, 2022, 44(1): 1-7, 40.)
- [19] NAJIM A. A review of advances in freeze desalination and future prospects[J]. NPJ Clean Water, 2022, 5: 15.
- [20] 谢春刚, 孙靖. 基于 LNG 冷能的海水冷冻淡化机理研究[J]. 低温与超导, 2012, 40(2): 11-15. (XIE Chungang, SUN Jing. Mechanism research on seawater freezing desalination using cold energy of LNG [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2012, 40(2): 11-15.)
- [21] 曹文胜, 徐建壮, 郭兆春, 等. 冷能利用片冰机海水淡化动态仿真[J]. 化工进展, 2021, 40(增刊1): 61-68. (CAO Wensheng, XU Jianzhuang, GUO Zhaochun, et al. Dynamic simulation of cold energy desalination using ice-sheet machine [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(Suppl.1): 61-68.)
- [22] 苗旺, 鲍军江, 张宁, 等. 利用 LNG 冷能水合物海水淡化 - 冷电联产系统[J]. 工程热物理学报, 2023, 44 (6): 1452-1458. (MIAO Wang, BAO Junjiang, ZHANG Ning, et al. A combined system of hydrate seawater desalination, cooling and power generation using LNG cold energy [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(6): 1452-1458.)
- [23] SERMSUK M, SUKJAI Y, WIBOONRAT M, et al. Utilising cold energy from liquefied natural gas (LNG) to reduce the electricity cost of data centres [J]. Energies, 2021, 14(19): 6269.
- [24] TIAN Zhen, QI Zhixin, GAN Wanlong, et al. A novel negative carbon-emission, cooling, and power generation system based on combined LNG regasification and waste heat recovery: Energy, exergy, economic, environmental (4E) evaluations[J]. Energy, 2022, 257: 124528.
- [25] 王瑜, 吴露露, 康娜, 等. 数据中心喷雾冷却系统研究进展和要素分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7391-7403. (WANG Yu, WU Lulu, KANG Na, et al. Research progress and factors analysis of spray cooling system in data center [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7391-7403.)
- [26] 刘梅梅, 赵金文, 刘鑫, 等. LNG 卫星站冷能与低温太阳能联合发电循环[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50 (3): 40-48. (LIU Meimei, ZHAO Jinwen, LIU Xin, et al. Combined power generation cycle of cold energy and low-temperature solar energy in LNG satellite station [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50 (3): 40-48.)
- [27] 蔡东旭, 王荧光, 刘豪爽, 等. 改进型三级串联多股流 LNG 冷能发电系统性能研究[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49 (11): 122-132. (CAI Dongxu, WANG Yingguang, LIU Haoshuang, et al. Research on the performance of improved three-stage series multi-stream LNG cold energy power generation system [J]. Low Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2024, 49 (11): 122-132.)
- [28] SUN Wenyi, LI Ming, PAN Zhen, et al. A heat source self-supplied thermodynamic system using liquefied natural gas: Performance evaluation and three-objective optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 429: 139545.
- [29] 张丽, 马贵阳, 潘振, 等. 基于 SAGD 稠油开采余热利用的冷热电三联供系统[J]. 工程热物理学报, 2018, 39 (9): 1890-1898. (ZHANG Li, MA Guiyang, PAN Zhen, et al. Thermodynamic analysis of combined cooling heating and power (CCHP) system based on waste heat recovery in heavy oil extraction with steam assisted gravity drainage (SAGD) process [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(9): 1890-1898.)
- [30] CHA S H, NA S I, LEE Y H, et al. Thermodynamic analysis of a gas turbine inlet air cooling and recovering system in gas turbine and CO<sub>2</sub> combined cycle using cold energy from LNG terminal [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 230: 113802.
- [31] ENTEZARI A, BAHARI M, ASLANI A, et al. Systematic analysis and multi-objective optimization of integrated power generation cycle for a thermal power plant using Genetic algorithm [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 241: 114309.
- [32] KAVIANI B, KULUS D. Cryopreservation of endangered

- ornamental plants and fruit crops from tropical and subtropical regions[J]. *Biology*, 2022, 11(6): 847.
- [33] BELLAS J, PAREDES E. Advances in the cryopreservation of sea-urchin embryos: Potential application in marine water quality assessment[J]. *Cryobiology*, 2011, 62(3): 174–180.
- [34] 潘本艺, 杨帆, 周莉, 等. 液化天然气冷能利用的联合动力循环[J]. *高校化学工程学报*, 2021, 35(4): 702–710. (PAN Benyi, YANG Fan, ZHOU Li, et al. Combined power cycle for cold energy utilization of liquefied natural gas [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2021, 35(4): 702–710.)
- [35] 郭媛媛, 魏鹤鸣, 潘振, 等. 基于LNG冷能的联合循环系统多目标性能[J]. *高校化学工程学报*, 2022, 36(6): 870–878. (GUO Yuanyuan, WEI Heming, PAN Zhen, et al. Multi-objective performance of combined cycle systems using LNG cold energy [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2022, 36(6): 870–878.)
- [36] KONUR O, COLPAN C O, SAATCIOGLU O Y. A comprehensive review on organic Rankine cycle systems used as waste heat recovery technologies for marine applications [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2022, 44(2): 4083–4122.
- [37] 朱柏彤, 李彦军, 张强, 等. 双燃料船舶主机余热及LNG冷能利用分析[J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(11): 2893–2903. (ZHU Baitong, LI Yanjun, ZHANG Qiang, et al. Analysis of waste heat and LNG cold energy utilization of main engine of dual fuel ship [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(11): 2893–2903.)
- [38] 夏睿, 王哲, 董博, 等. FLNG船舶能量管理系统设计与性能优化[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(8): 3165–3177. (XIA Rui, WANG Zhe, DONG Bo, et al. Design and performance optimization of energy management system for FLNG ships [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(8): 3165–3177.)
- [39] BAO Junjiang, HE Xiang, DENG Yuanyuan, et al. Parametric analysis and multi-objective optimization of a new combined system of liquid carbon dioxide energy storage and liquid natural gas cold energy power generation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132591.
- [40] 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.
- [41] TAN Hongbo, LI Yanzhong, TUO Hanfei, et al. Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of Liquefied Natural Gas (LNG) refrigerated vehicle [J]. *Energy*, 2010, 35(5): 1927–1935.
- [42] 卢昕悦, 陈锐莹, 姜夏雪, 等. 耦合LNG冷能的液态空气储能系统和液态CO<sub>2</sub>储能系统对比分析[J]. *化工学报*, 2024, 75(9): 3297–3309. (LU Xinyue, CHEN Ruiying, JIANG Xiaxue, et al. Comparative study on liquid air energy storage system and liquid carbon dioxide energy storage system coupled with liquefied natural gas cold energy [J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2024, 75(9): 3297–3309.)
- [43] 苏要港, 吴晓南, 廖柏睿, 等. 耦合LNG冷能及ORC的新型液化空气储能系统分析[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(6): 1996–2006. (SU Yaogang, WU Xiaonan, LIAO Borui, et al. Analysis of novel liquefied-air energy-storage system coupled with LNG cold energy and ORC [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(6): 1996–2006.)
- [44] LUKETA-HANLIN A. A review of large-scale LNG spills: experiments and modeling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 132(2/3): 119–140.
- [45] HUANG Bin, LI Jiaoyang, FU Cheng, et al. A comprehensive review of stratification and rollover behavior of liquefied natural gas in storage tanks [J]. *Processes*, 2022, 10(7): 1360.
- [46] VÍLCHEZ J A, VILLAFANE D, CASAL J. A dispersion safety factor for LNG vapor clouds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 246: 181–188.
- [47] ATIENZA-MÁRQUEZ A, BRUNO J C, AKISAWA A, et al. Fluids selection and performance analysis of a polygeneration plant with exergy recovery from LNG-regasification [J]. *Energy*, 2019, 176: 1020–1036.

#### 通信作者简介

赵艳锋, 女, 讲师, 辽宁石油化工大学环境与安全工程学院, 15704234046, E-mail: zhao761806873@foxmail.com。研究方向: LNG冷能利用。

#### About the corresponding author

Zhao Yanfeng, female, lecturer, School of Environmental and Safety Engineering, Liaoning Petrochemical University, 86–15704234046, E-mail: zhao761806873@foxmail.com. Research fields: LNG cold energy utilization.