• 研究进展 •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0050

LNG冷能利用技术与清洁能源系统融合对策建议

付 强[1†] 赵 雯[2†] 王君傲[1] 王博弘[2*] 周守为[1]

1. 中海油研究总院有限责任公司 海洋天然气水合物全国重点实验室,北京 100028
2. 浙江海洋大学 临港石油天然气储运技术国家地方联合工程实验室和浙江省临港石化污染控制重点实验室,浙江 316022

[摘 要] 推广液化天然气(Liquefied Natural Gas,LNG)冷能利用技术,构建多能互补、清洁低碳、安全高效的能源系统,是新型能源体系发展的重要方向。本文调研分析了国内外LNG冷能利用发展现状及技术瓶颈,聚焦LNG冷能利用技术与清洁能源系统融合的高质量发展布局,通过能量匹配及集成方法结合经济性和技术可行性评估,梳理和总结了LNG冷能梯级利用和多能融合利用的典型案例,分析了LNG冷能与传统能源以及风能、太阳能、地热能等可再生能源的互补性以及在可再生电力的储存和调峰中对LNG冷能的综合利用,为LNG/天然气产业链集群与清洁能源系统协同发展提供了参考。研究建议根据各区域的实际需求与资源禀赋推广建设融合LNG冷能的清洁能源中心,围绕能源结构绿色转型、天然气储运的设备制造/设施建设、清洁资源开发与可持续综合利用等重点内容创新驱动,研制国产化装备并工程化应用。

[关键词] LNG冷能梯级利用;多能互补;LNG冷能储能;过程集成;能源系统规划

液化天然气(Liquefied Natural Gas,LNG)是天然气储运的重要中间环节和大规模天然气远洋贸易的唯一手段,占进口天然气总量62%[1]。LNG产业链拓展了天然气管网的建设规模,提升了运营效能,将成为能源互联网中消纳可再生能源的重要参与者[2]。LNG再气化时温度由−162 ℃液态恢复至常温气态天然气,1吨LNG理论上可利用的冷能约为190~230 kWh[3]。LNG战略储备将起到承担中国能源中长期供应安全与应急调峰保障的作用,我国2024年LNG总进口量约为7 665万吨,是全球最大的LNG进口国,沿海LNG接收站的天然气储备能力已达1.83×10^{10} m^3[4],可利用的冷能约$1.47\sim1.79\times10^{10}$ kWh。LNG冷能利用通常是在系统的需冷过程中集成换热设备,以回收大量低温冷量应用于低温分离过程、发电、CO_2捕集和液化、食品冷藏、低温养殖等[5]。但由于冷能利用技术工艺不成熟且天然气资源供应紧张,导致LNG供给用户时通常采用海水开架式气化器或空温式气化器加热进行气化[6]。另外,当前部分LNG接收站在设计阶段与周边冷能利用产业链协同规划不足,部分站点因地理位置限制缺乏适配的冷能利用产业链,造成了冷能资源的浪费[7]。随着LNG产业运输、储存及再气化技术的持续进步,LNG冷能回收与综合利用具有重大战略意义与广阔发展前景。

中国的能源绿色转型正在向能源多元化发展[8],主要从两个角度进行:(1)化石燃料向可再生能源(如风能、太阳能和水电的增长尤为显著)的转型,(2)不同化石燃料之间的替代,以煤为代表(如煤制油、煤制气)。此外,氢能、新型储能技术及地热能等也在能源供应结构中占据重要位置。在国家“双碳”相关政策约束下,未来将依靠先进科技与工业体系,打造以传统化石能源为辅,低碳/零碳新能源为主,安全高效的清洁能源系

收稿日期:2025-09-11; 修回日期:2025-10-19

† 共同第一作者。

* 通信作者,Email:wangbh@zjou.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(52302420)、中国工程院战略研究与咨询项目(2024-HZ-32、2025-HZ-31)和浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C04048)的资助。

引用格式: 付强,赵雯,王君傲,等. LNG冷能利用技术与清洁能源系统融合对策建议. 中国科学基金,2026,40(2):385−398.
Fu Q,Zhao W,Wang JA,et al. Strategic recommendations for integrating lng cold energy utilisation technology with clean energy systems. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2026,40(2):385−398.(in Chinese)

统[9]。我国发布了诸多政策以促进LNG等清洁能源的融合发展:国家发展和改革委员会《石油天然气基础设施规划建设与运营管理办法》要求供气企业应形成不低于其年供气量5%的储气能力;国务院《关于促进天然气协调稳定发展的若干意见》明确提出要加快推进LNG产业的发展,提高清洁能源供应比重,优化调整能源结构;交通运输部《关于深入推进水运行业应用液化天然气的意见》要求加快推进沿海LNG动力船舶发展和港口LNG清洁能源应用,提升研发与集成应用水平;国家能源局《加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系》强调加大非化石能源供给,巩固拓展新能源产业优势,推动大型风电、高效率光伏、光热等技术创新;《"十四五"现代能源体系规划》强调应推广LNG冷能综合利用。

将LNG冷能利用技术与化石燃料替代及新能源互补发展融合是能源结构绿色转型的重要途径,构建融合LNG冷能的清洁能源系统,可以推动多产业协同发展,优化区域能源布局,提升资源综合利用效率,节能降耗创造经济价值。LNG冷能如何以最小成本高效回收并稳定运行、如何与清洁能源系统融合发展是LNG产业所面临两大难题。本研究调研分析了国内外LNG冷能利用发展现状及趋势,聚焦LNG冷能利用技术与清洁能源系统融合的高质量发展布局,通过能量匹配及集成方法结合经济性和技术可行性评估,梳理和总结了LNG冷能梯级利用和多能融合利用的典型案例,分析了LNG冷能与传统能源以及风能、太阳能、地热能等可再生能源的互补性,以及在可再生电力的储存和调峰中对LNG冷能的综合利用方式,为规划建设LNG储运行业的配套冷能利用方案,推动清洁资源开发与LNG冷能可持续综合利用,促进LNG/天然气产业链集群与清洁能源系统协同发展提供参考,研究框架如图1所示。

1 LNG冷能利用发展现状

在LNG冷能利用的各方式中,冷能被利用的初始温度及温差范围如图2所示[10]。目前LNG冷能利用可行的方案包括以下五种。方案一:冷能空气分离项目,市场空间大、选址限制少、收益较好,是目前使用较为广泛的工程应用方案,主要使用LNG深冷温区冷能,与常规空分装置相比节省一半电力[11]。方案二:冷能发电项目,经济效益相对较弱,但电的用途广且产业链短,不用考虑与下游产业匹配问题,若纳入绿电交易体系可增加收入,适合LNG接收站位于海岛等空分产品不易于外运的地区应用[12]。方案三:冷能轻烃分离项目,产生的C_2、C_3产品可以应用于乙烯和丙烯行业,在邻近炼化基地的LNG接收站实施轻烃分离项目,具有收益高、降低原油对外依赖度、弥补原料短缺等优势[13]。方案四:冷库,可分成冻结库(−65 ℃)、冷冻库(−40 ℃)、冷藏库(−22 ℃)和预冷库(−5 ℃),对周围配套产业要求较高,在具备冷物流集散枢纽功能的临港工业区或冰雪世界很有市场竞争力[14]。方案五:集中供冷,将LNG冷能应用于卫星站或数据中心等,具有相应的节能效果和经济环保效益[15]。

LNG贸易增长迅速,但现阶段LNG冷能利用率仍不高,目前全球范围仅有1%的LNG低温潜力得以开发利用,在130多个再气化终端中,配备冷能回收系统的仅占极微小的比例[16]。LNG冷能利用项目仍处于高效利用技术研发、综合应用探索以及接收站周边配套设施完善的进程中。从工业回收方案来看,日本作为全球第二大LNG进口国,在LNG接收站与电厂一体化建设及LNG冷能利用方面有许多可借鉴的成熟经验。调研显示日本LNG接收站的LNG冷能大约有20%~30%被有效利用,目前约有26套独立的冷能利用装置,其中15套为冷能发电(每套独立发电装置容量达到兆瓦级)、7套为冷能空分(处理能力约1~2×10^4 Nm^3/h)、3套为冷能制干冰(处理能力约100 t/d)、1套为深度冷冻仓库(容量超过3万吨)[17]。韩国是第三大LNG进口国,冷能利用率不到20%,主要用于空气分离和食品冷冻库。其他部分国家的冷能利用情况有:印度主要用于冷能发电,法国主要用于空气分离和轻烃分离,西班牙和意大利的LNG接收站设有LNG轻烃回收装置。目前,我国LNG冷能应用集中在空气分离和低温发电两方面[17]。据调查研究显示[18]:某LNG接收站冷能用于空气分离装置,可利用5.7×10^5 t/a LNG所携带的冷能,其销售冷能的年收益约为144.5万元,预计碳减排1 232 t/a;用于冷能发电,则一台冷能发电机组最大消耗冷量200 t/h,1 h的发电量约为3 000 kWh,预计碳减排14 987.48 t/a;用于集中供冷,则消耗34 t/h LNG所携带的冷能,为接收站部分建筑物空调和散热器提供冷量,预计碳减排3 249.57 t/a。现阶段其他典型的LNG冷能利用实际案例如表1所示。

2 LNG冷能利用技术瓶颈

LNG再气化过程中的冷㶲主要是指物理㶲,即当LNG从储存的液态气化后达到与环境平衡状态时所获得的最大功。LNG冷㶲可分为温度㶲和压力㶲,LNG冷㶲总值随LNG中甲烷浓度的增加而增加,随环境温度的升高而增加。随着系统压力的增加,LNG的温度㶲($E_{x,T}$)降低,压力㶲($E_{x,P}$)增加,冷㶲总值降低,当压力>2 MPa时,降低趋势减慢[19]。㶲能够分析系统内的不可逆损失和实际可用功的利用情况,是一种评估能源系统效率的先进方法。根据相关研究对各类LNG冷能利用方式的模

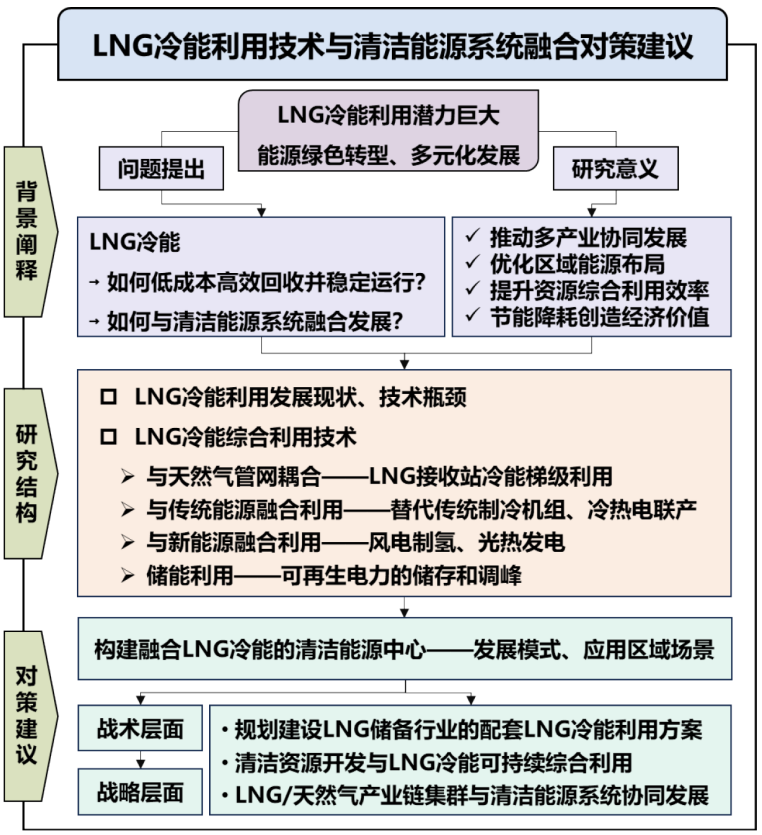


图1　全文总体构架框图

Fig.1　Overall Framework Diagram of the Paper

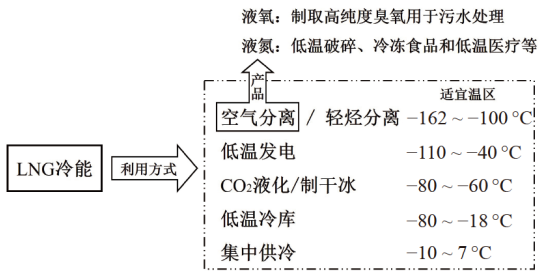


图2　LNG冷能的利用方法

Fig.2　Methods for Utilising LNG Cold Energy

拟结果显示[16]:用于冷却和冷凝过程(代替外部制冷循环)的㶲效率为40%以上;与乙烯生产厂换热站耦合能耗比降低95%;集成到空气分离装置㶲效率达38%,可降低41%能耗比;有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle,ORC)发电的㶲效率约为25%;与低温CO_2捕集耦合液化㶲效率达22%。因此,冷能被利用或冷热流匹配的初始温度越低、温位区间越广,节能效果和经济效益越好。换热器和循环工质类型的选择是LNG冷能利用系统的主要挑战。现阶段管壳式、板翅式、绕管式换热器应用广泛[20]。热力循环工质包括制冷剂和载冷剂,制冷剂通过相变(蒸发/冷凝)高效转移热量,包括碳氢化合物如丙烷、乙烯等,烷烃类化合物如R600、R1270等均属于易燃易爆物质且有毒,需要注意使用安全,可选择与LNG气化温度接近且无毒不会爆炸的制冷剂作为理想工质[10];载冷剂用于传递冷量实现间接冷却,自身不发生相变,一般采用乙二醇水溶液、冷冻水等[21]。

现阶段的LNG冷能利用主要存在以下问题:

(1)利用不充分。LNG冷能具有显著的温区异质性:深冷温区(−162 ℃~−100 ℃)多用于空气分离,中低温区(−100 ℃~−50 ℃)可驱动有机朗肯循环发电,中高温区(−50 ℃~20 ℃)则适宜区域供冷。在LNG气化过程中若只采用各单一温度段的冷能利用方式,将深冷温度段的冷能利用后,剩余温度相比环境温度还有巨大温差。

(2)技术不成熟。在冷能回收利用系统中增加独立热力循环、采用混合工质、提高热源温度等可以提高系统效率。但加入独立的循环子系统会增加系统的复杂性和投资,另外,共沸混合物的相变特性在变工况运行下不稳定。

(3)运行不稳定。LNG气化过程会根据下游管网用气波动而启停变化,LNG冷能存在着供应不连续性。蒸发天然气(Boil-off Gas,BOG)冷凝回收换热器会导致LNG冷能初始温度升高而降低冷量品质,对深冷温度段的冷能利用设备产生影响。

需综合考虑选址要求、原料来源、季节特性等规划冷能利用方式,可通过跨温区能量梯级匹配,补充其他

表1 融合LNG冷能的典型实际案例
Table 1 Typical Practical Examples of Integrating LNG Cold Energy

公司/工程项目名称	项目运营方式及规模	应用实图
美国克罗利海运集团公司	LNG罐车的小型管壳式换热器系统,利用水蒸发LNG,同时冷冻水抵消冷水机组制冷	
曼谷2MW微电网数据中心	曼谷商业区LNG冷热电联产,LNG冷能生产电力和冷冻水用于数据中心的区域冷却	
韩国天然气公司	联合天然气生产氢气,利用LNG冷能制液氢储存,并使用罐车送往大都市区的加氢站	
天津南港冷热能互换站	LNG气化过程与乙烯生产装置耦合换热,每年节气1.3×10^7 m³、节电3×10^6 kWh	
江苏青禾冻干科技有限公司	江苏滨海港产业园,绿电+LNG冷能为冻干食品工厂提供电力和冷量,每年可节电2.2×10^8 kWh,碳减排约20万吨	
广东大鹏海水养殖基地	LNG接收站利用与LNG换热后的低温、无菌的海水进入海产品养殖系统,能够降低30%左右的综合成本	
青海液态空气储能项目	中绿中科60 MW储能在建项目,1 m³液态空气可发电75 kWh,可实现新能源和LNG冷能综合利用	

温度段的冷能利用方案,按照相应的温度梯度以串联的方式连接,实现工质与LNG的温度对口和梯级利用(可分2~3级)[22]。国内外冷能梯级利用应用目前多以空气分离、中温位的发电、海水淡化、冷库、空调等的集成利用为主,梯级利用集成的多子系统提升了冷能利用率,但是换热系统更复杂,优化换热器设计和工作流体配置以降低㶲损失是LNG梯级利用高效运行的关键[23]。由于温度㶲和压力㶲的回收原理不同,最佳回收方式须通过优化热力循环、供应压力并结合经济性来确定。研究显示[19]:当$E_{x,T}>E_{x,P}$时,可采用朗肯循环(Rankine Cycle,RC),热源易于选择;当$E_{x,T}<E_{x,P}$时,可采用直接膨胀循环(Direct Expansion Cycle,DEC),下游为低压用户;当$E_{x,T}\approx E_{x,P}$时,可采用联合循环(DEC+RC)。另外,选择合适的循环以实现更好的冷㶲利用与循环的热源质量密切相关,研究显示[24]:当热源为低品位时适合使用朗肯循环,而当热源为中高品位时,布雷顿循环更为适宜。在工质的选择方面,乙烷和乙烯最适合配合低温朗肯循环使用,二氧化碳、氦气和氮气适合布雷顿循环。当热源温度较高时,结合布雷顿、朗肯和直接膨胀循环能获得高效率。

在集成LNG冷能利用的混合能源系统中,研究显示㶲损失主要来源于[25]:燃烧室(燃气轮机或锅炉)、换热器(LNG气化器)、蒸馏塔(空分、轻烃回收)、节流阀(调压/制冷)、膨胀机(回收压力能/制冷),减少㶲损失的途径有提高燃烧效率(改进燃气轮机装置)、优化换热网络设计(减小温差、匹配温焓曲线)、采用高效膨胀机代替节流阀、提高设备(泵、压缩机、膨胀机)效率、优化精馏操作、减少压降和散热损失,以及最重要的是通过系统集成优化实现冷热能的多级高效匹配利用等。可结合热力学分析和过程集成方法将LNG冷能利用系统中不同时空尺度原本离散的不同过程有机耦合与协同匹配,做好系统的配置和运行协同优化,提高冷能利用效率[26]。未来研究需聚焦于高效换热技术的创新改进,以提高LNG气化过程中的冷凝换热效率。LNG接收站应与天然气管网输送系统协同规划设备选型与工艺流程设计,构建与气化外输运行模式相匹配的冷能利用方

式,并建立与冷能利用项目密切协调的天然气管网调度机制,以构建高效安全、工程造价经济的LNG冷能综合利用系统。

3 LNG冷能综合利用技术

3.1 冷能梯级利用与天然气管网耦合

LNG接收站主要负责LNG的接收、储存、气化和外输,其外输管道与天然气管网互联互通,具有互操作性。LNG经换热设备气化至天然气状态,经调压、计量、加臭后流向天然气外输管网。LNG气化设备的高效安全性直接影响天然气管网供应的稳定性。为了充分利用LNG冷能并降低系统能耗,需构建基于冷能梯级利用的气化工艺体系,通过跨温区能量梯级匹配机制,实现冷能的高效回收和LNG向天然气(Natural Gas,NG)的再气化转换,最终确保天然气平稳进入外输管网。LNG接收站可通过改进工艺流程、优化生产线外输流量和保冷循环流量、规划外输管网的管存容量和管输配置以及合理调控耗电设备的启停策略等方式,实现LNG接收站的安全稳定与经济运行。综合现有研究总结得到LNG接收站中冷能梯级利用与天然气管网耦合的方案如图3所示。方案一:双ORC发电+区域供冷,采用并联式乙烯ORC—丙烷ORC双循环装置进行冷能发电和空调制冷(丙烷制冷剂),最大化内部热回收并减少热公用工程,相比单ORC装置的发电效率有所提高。LNG冷能发电灵活性高,每个发电循环中LNG发电量约为20 kWh/t,支持接收站内自发自用,亦可并网外输至其他用户,能较好地适应气化过程中LNG温度和流量波动工况。方案二:空分+蓄冷,通过蓄冷循环系统存储部分冷能,提高空分设备对LNG气化过程启停工况变化的适应性,LNG经氮气换热器后,与乙二醇水溶液换热(用于空压机级间冷却),最终升温至0 ℃左右。方案三:轻烃分离,目前国际LNG市场上存在相当比例的湿气[27](液相乙烷及以上轻烃物质(C_2^+)的质量分数≥10%),因此在对下游用户供气的过程中,通过集成LNG气化低温换热网络与轻烃分离过程,通过LNG预热、预分离、脱甲烷、脱乙烷等流程,实现天然气中C_2^+轻烃组分的高效回收,从而提高资源利用率和经济效益。

3.2 LNG冷能与传统能源融合利用

3.2.1 LNG冷能替代传统制冷机组

电力行业是我国化石能源消费最大的部门,提高电力系统效率、节能降耗和清洁生产至关重要。LNG冷能可以作为传统电力驱动的压缩式或吸收式制冷机组的有效替代方案,三种典型应用的系统流程如图4所示。方案一:对于数据中心和办公建筑等区域冷负荷需求侧,采用LNG—R410a—冷冻水的热力循环,通过间接换热对区域供冷,将冷量通过管道系统输送至用户侧,直

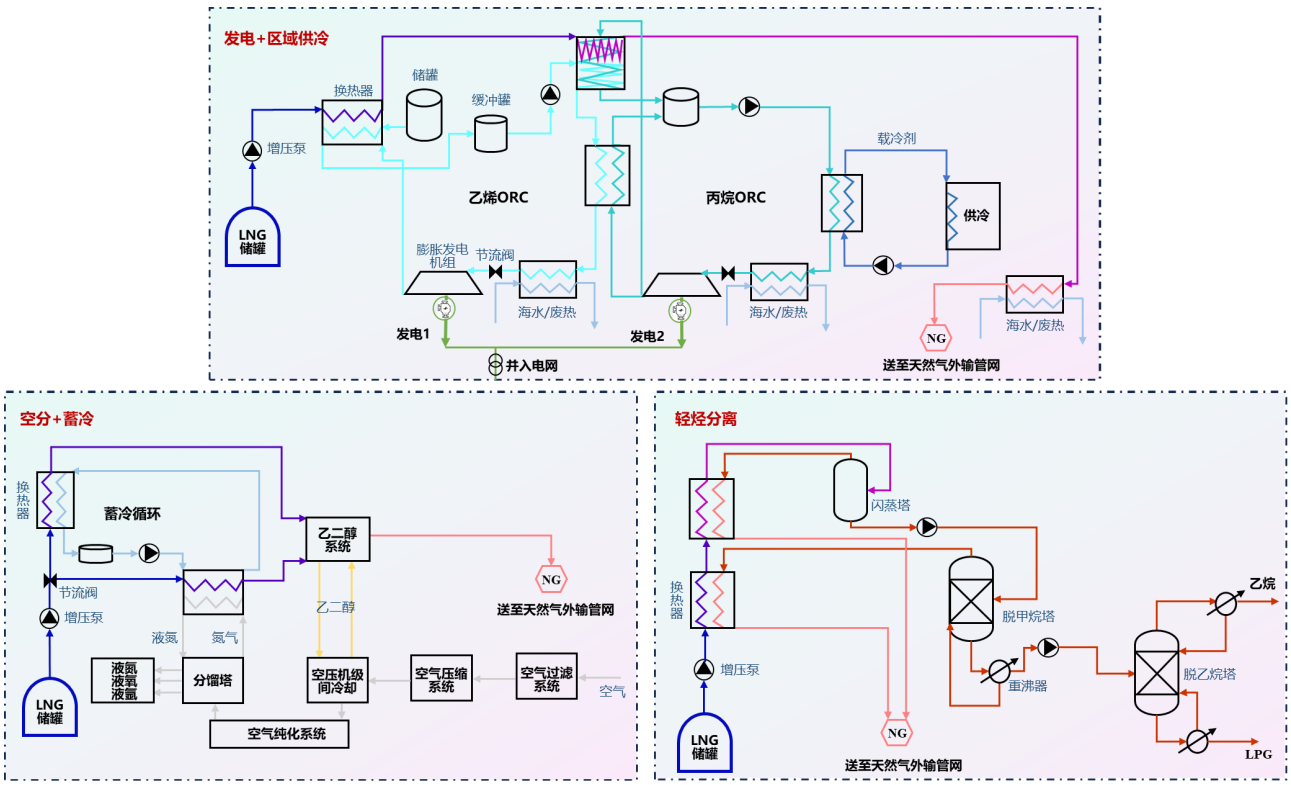


图3 LNG气化外输过程的冷能梯级利用

Fig.3 Cascade Utilisation of Cold Energy in LNG Regasification and Transmission Processes

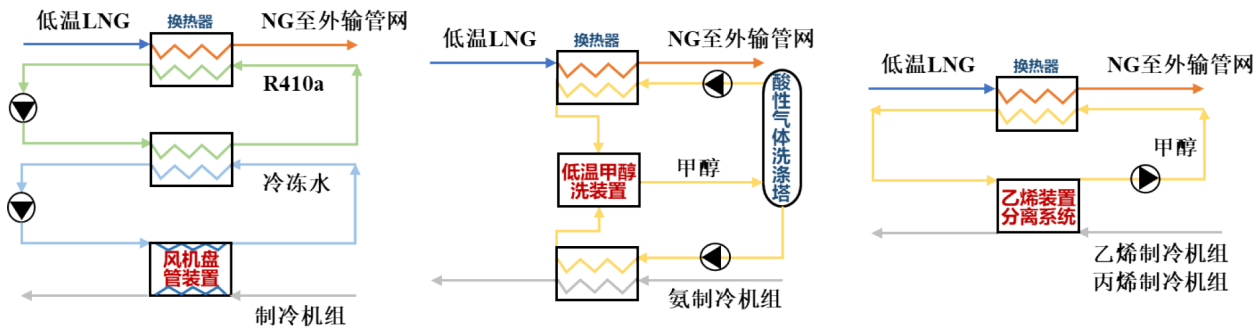


图4 LNG冷能替代传统制冷机组

Fig.4 LNG Cold Energy Replaces Traditional Refrigeration Units

接匹配冷负荷需求,但管道输送过程中存在冷量损耗。研究表明当输送距离在20 km以内时,采用LNG冷能供冷具有一定的经济和环境效益,可减少能耗和CO_2排放。由于数据中心供冷相对集中,其投资回收期小于办公建筑[28]。方案二:对于煤制气企业,如年产4×10^9 m^3煤制天然气项目需配套LNG储气量约6.6×10^5 m^3,调峰运行时煤制天然气装置存在稳定的用冷需求,通过工艺流程优化可以实现冷能综合利用。将LNG冷能用于冷却甲醇,可降低低温甲醇洗装置中氨压缩机功率。研究表明,当可回收冷量达6.2875×10^7 kWh时,年经济效益提升2 413.6万元[29]。方案三:传统石化行业可借鉴类似思路,将乙烯装置余热与LNG冷能耦合换热实现冷热互供。采用甲醇作为循环工质,与LNG换热冷却至−80 ℃,通过管道输送至乙烯装置分离系统,代替部分制冷机组完成5级梯级换热升温至35 ℃,再返回LNG接收站。该换热站在实现LNG气化的同时,可使丙烯和乙烯制冷压缩机的能耗分别降低30%、25%,乙烯装置年碳减排达100 kt[30]。

3.2.2 LNG冷热电联产

冷热电联产(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)作为分布式能源系统(Distributed Energy Systems, DES)的典型形式,在节能性、安装灵活性、环境友好性方面相较于传统的集中式能源供应具有显著优势。针对燃气管道未敷设到位的港口、园区或企业,LNG价格相对非居民用管道天然气价格更低,可构建以LNG为燃料的新型分布式能源系统,如图5所示,实现LNG冷能与天然气的高效综合利用。某轮胎企业采用LNG冷能空分以满足低能耗氮气和液氮生产的需求,气化后的天然气用于发电,并回收余热,尽管该系统投资较高,但可增加氮气和液氮收益[31]。在华南地区一家典型酒店案例中,建立了由直接膨胀+朗肯循环的联合方法与燃气轮机协同组成的CCHP系统,相比传统冷热电联产系统具有更高的功率/冷比和热/冷比,分别达到5.55和3.65[32]。

LNG作为国际船舶主要替代燃料之一,能满足国际航行船舶燃料油含硫量需低于0.5%的要求。相较于传统燃油,LNG燃烧基本不产生硫氧化物和可吸入颗粒

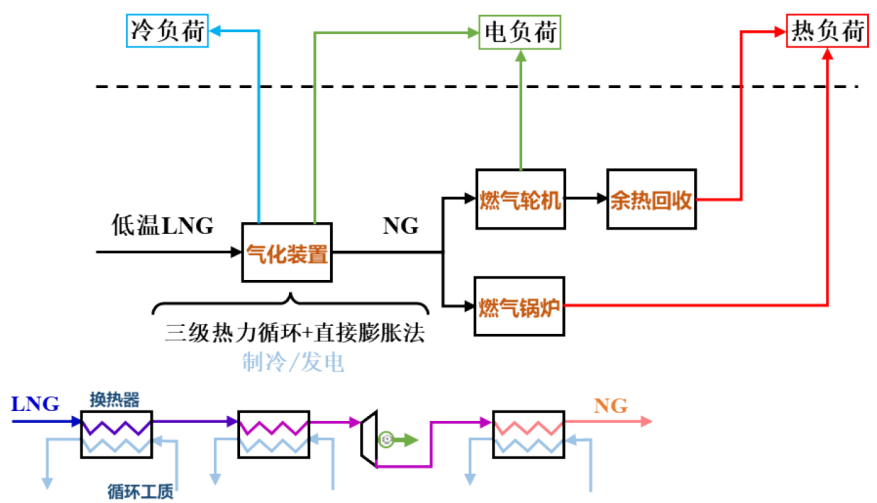


图5 LNG冷热电联产系统

Fig.5 LNG Combined Heat, Power and Cooling Systems

物,且可减少约25%的CO_2排放,但建造LNG动力船较普通燃油动力船增加约30%初始投资[33]。LNG动力船燃料舱会产生BOG,根据《使用气体或其他低闪点燃料船舶国际安全规则》要求,燃料舱设计需确保运行压力和温度在设计规范内。通过利用LNG外输过程的冷能对BOG再液化,如图6所示,可有效提升船舶安全性并实现节能效果[34]。构建LNG动力船的冷热电联产系统,利用LNG气化装置回收冷能,可为海运蓄冷式冷藏集装箱和船舶空调供冷,实现冷能、热能梯级利用并产生经济效益[35]。推广建造全年运行频率较高、运输里程或吨位更大的LNG动力船,可优化船舶动力装备资源配置及控制其燃烧产物排放以提高效益,促进水运和海洋工程行业快速发展,创造显著社会经济价值。

3.3　LNG冷能与新能源融合利用

新能源开发潜力显著,风电资源总体技术可开发量超过5.5×10^9 kW,太阳能总体技术可开发量达到1.56×10^{10} kW[36],两者资源储量主要分布区域如图7所示[37]。地热资源可分为浅层、水热型和干热岩型,水热型地热资源的主要沉积盆地包括华北平原、苏北盆地、松辽盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、江汉盆地等。地热发电平均利用效率可达73%,为太阳能光伏发电的5.2倍,风力发电的3.5倍[38]。但调查显示,截至2021年底,地热发电装机容量不到50 MW,主要开发中低温地热用于北方地区清洁供暖/制冷,浅层地热供暖能力达8.0×10^8 m^2,水热型地热供暖能力达5.3×10^8 m^2[39]。在LNG冷能与新能源多能互补利用方面,除替代可再生能源满足制冷需求外,本文基于资源分布特征总结了两种融合路径:LNG冷能+风电制氢和LNG冷能+光热发电。

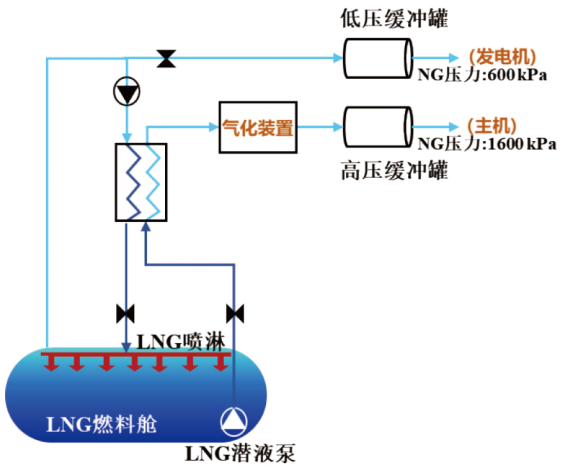


图6 LNG动力船BOG再液化系统

Fig.6 BOG Re-liquefaction System for LNG-powered Vessels

3.3.1　LNG冷能+风电制氢

自然资源部《关于进一步加强海上风电项目用海管理的通知》支持在已确权的海洋油气开发区、深远海养殖区等已开发利用海域建设海上风电,鼓励采用“风电+”综合开发利用模式实现“一海多用”。国际能源政策方面,挪威聚焦以风电驱动LNG生产设施减排,实现产业链脱碳;越南规划2030年前新建13座LNG电厂(2.24×10^4 MW),配套发展风电等可再生能源;欧美通过LNG贸易与可再生能源合作绑定,将LNG出口收益部分投入风电技术研发(如浮式海上风电),推动气电与绿电协同发展。

氢能是一种清洁高效的能源载体,目前绿氢在制备、储存、运输、应用环节面临着安全性和经济性挑战,包括绿电成本高昂、微电网结构适配性不足、电解海水能效偏低、材料氢脆等问题[40]。在海上风电大基地部署离网型风电制氢技术[41],利用周边地区大型LNG接收站的天

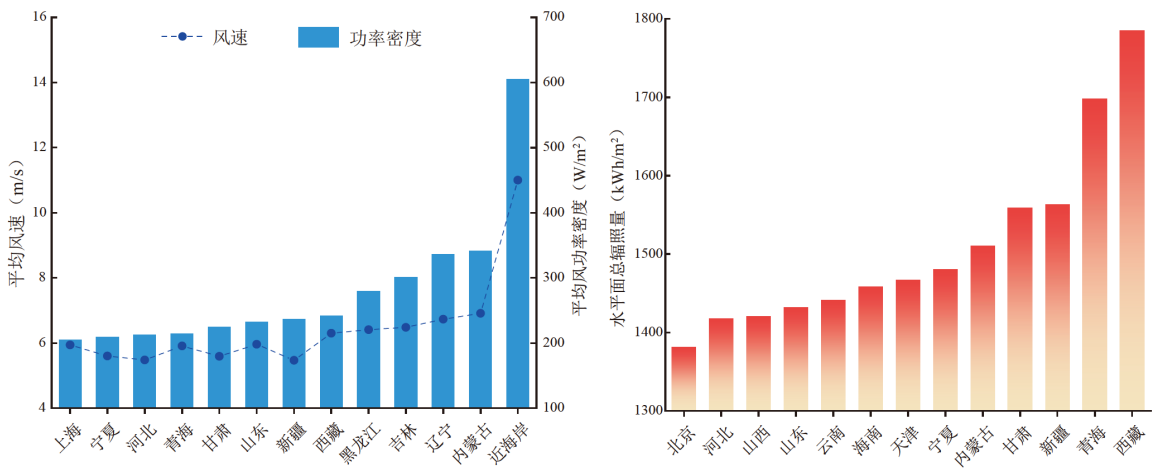


图7 2024年各区域的100米高度层风能资源和水平面太阳能资源分布

Fig.7 Distribution of Wind Energy Resources at 100-metre Height Level and Solar Energy Resources at Horizontal Surface Level for Each Region in 2024

然气资源和富余冷能,可实现氢气制取—液化—运输—应用链条与LNG能源单元的深度耦合,如图8所示。高压气氢储运成本高昂,而低温液氢(−252 ℃以下)的体积能量密度约为70 MPa高压气氢的1.8倍,当运输距离超过200 km时,液氢综合能耗和运输费用之和将低于高压气氢,且液氢冷能可灵活间接利用[42]。根据《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,2025年前要初步建立较为完整的氢能供应链和产业体系,并探索开展可再生能源制氢在合成氨中的应用[43]。液氨(−33.34 °C以下)是重要的化工原料和储氢载体,可通过LNG冷能空分装置生产氮气,耦合绿电/气电协同制氢,集成调控柔性合成氨。规模化布局绿氢合成氨产业将有效助力双碳目标的实现和清洁能源系统的构建[44]。未来可依托LNG接收站联合发展液氢/氨储运设施,并构建海上能源岛/深海平台,实现能源远程传输和多能协同供电,通过就地消纳解决海上风电不稳定性造成的弃风问题,提高风电供能质量。同时,LNG冷能综合利用在降低绿氢运输和存储成本方面具有突出优势。

3.3.2 LNG冷能+光热发电

基于LNG冷能的新型光热发电关键技术研究,包括集热阶段(耐高温的光热转换涂层/光谱选择性吸收膜、储热/导热材料)和动力循环发电系统(温度对口梯级利用、新型联合动力循环),可提高工艺循环传热能力和系统能源综合利用效率。太阳能集热装置相比传统产热装置在成本上竞争力不足,聚光太阳能需要与热能储存单元耦合实现可调度性,其中显热储存一般采用廉价且易得的储能材料如水、混凝土、岩石、土壤等,通过材料温度变化储热/导热,但储热密度和利用率较低,难以满足长期大容量储热需求;潜热储存是通过材料相变(如固—液、液—气)储热,包括无机相变材料(盐类及其水合物、共熔混合物等)与有机相变材料(石蜡、脂肪酸、醇类、酯类等)[45]。

采用太阳能或地热能作为中低品位热源与LNG冷能集成的闭式布雷顿和朗肯循环发电系统如图9所示,低沸点工质经过蒸发器的高效热源和LNG液化,驱动膨胀机发电,系统发电效率取决于循环工质选择、冷热源温差和设备配置集成度[46]。研究显示,将LNG气化装置的预冷器和太阳能抛物槽式集热器集成可减少冷焓损失,使系统净输出功率提高9.3%,热效率提高7.33%[47]。

目前的地热发电站大多为中深层高温地热水型,通过生产井将地热流体提取到地表逐级转换成电能,再将利用后的地热流体注回地下储层维持地热井的产出率。对水热闪蒸式地热循环发电进行分析,结果显示并联ORC的热力学性能最佳,能效和㶲效率可以达到29.56%和51.29%,单ORC最具经济性,平准化度电成本为0.028 $/kWh[48]。另有研究将地热水和LNG冷能通过高效热力循环集成,构建新型地热系统用于制冷、发电和制氢,㶲效率约43%,可产生冷负荷6.09 MW、10.69 MW净发电量和204.77 kg/h的电解槽制氢速率[49]。开式地热水系统受限于水热型资源分布及回灌要求,地热行业正拓展取热不取水的闭式中深层地埋管换热技术。未来还需深入开展光热发电技术的传热温度选择、热源供应研究,保障系统运行稳定性。

3.4 LNG冷能的储能利用

可再生能源对地理位置、气候和水文条件的依赖程度高,在现有技术发展水平下,实现绿色电力不间断、低成本且高效的供应仍然是一个重大的全球性挑战。储能技术作为消纳新能源的重要途径,一方面可采用风光发电制绿氢,实现能源储存和多种能源之间的转换,达成零碳排放目标;另一方面,探索LNG冷能综合利用与可再生电力储存、调峰的深度耦合,通过集成LNG冷能的储能技术实现削峰填谷,在保障可再生电力连续稳定

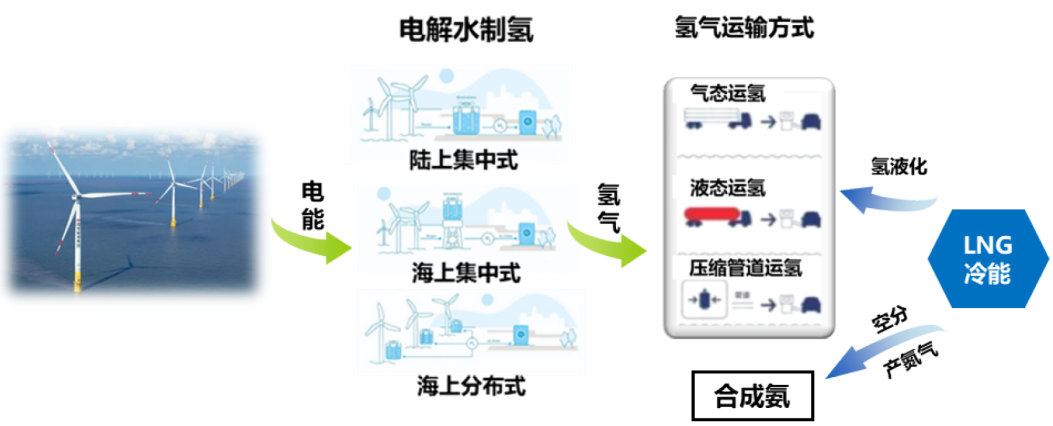


图8 LNG冷能在风电制氢中的应用

Fig.8 Application of LNG Cold Energy in Wind-powered Hydrogen Production

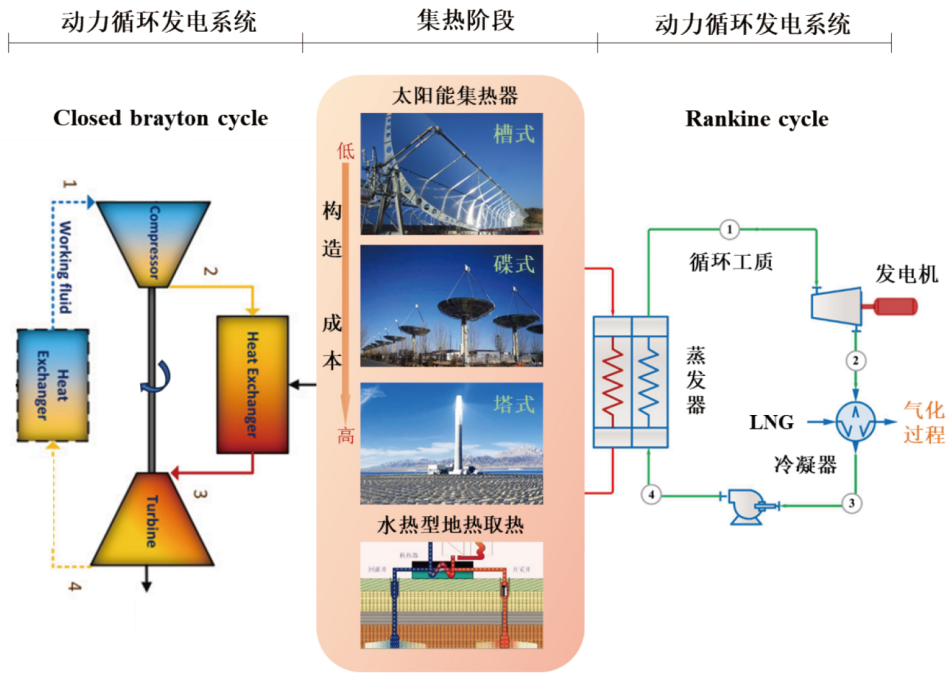


图9 LNG冷能的动力单循环发电系统示意图

Fig.9 Schematic Diagram of Single-cycle Power Generation Using LNG Cold Energy

输出的同时,降低系统运行成本、提高能源利用效率,为构建可持续、高弹性的创新型多能互补系统提供支撑。

短时冷能储能技术通常采用水、冰、共晶盐等蓄冷材料,在电力或冷量需求低谷时段(如夜间)制备并储存冷量,高峰时段(如白天)释放使用,既可满足建筑空调制冷节能需求,又能保障空分设备等特殊工艺冷却的需求[45]。当前,发电是LNG最主要的工业应用场景,天然气热能利用率达55%,高于燃油和煤。以日本为例,其LNG进口量的75%以上用于发电,20%~23%用作城市燃气;韩国用于发电所消费的LNG超过50%[50]。由于新型电力系统需具备灵活性电源,可在新能源基地配置LNG调峰储备站,并拓展天然气发电厂,如图10所示。此类设施可辅助大规模可再生能源并网调峰,推动进口LNG与清洁能源系统的融合发展,有效解决进口LNG成本高、可再生能源消纳难等问题,助力能源系统向高弹性、可持续方向升级。

液态空气储能(Liquid Air Energy Storage,LAES)[51]与液态二氧化碳储能(Liquid Carbon Dioxide Energy Storage,LCES)[52]系统凭借高能量密度和无地理位置限制的优点,是未来新型电力系统利用冷能实现长时、大规模储能的关键技术,空气和CO_2储存密度对比如表2所示[53]。在运行机制上,LNG储备站可在夜间谷电价时段实施LNG再气化,向外输管网储气增压,系统利用波动的可再生电力驱动压缩机压缩气体,利用LNG冷能液化气

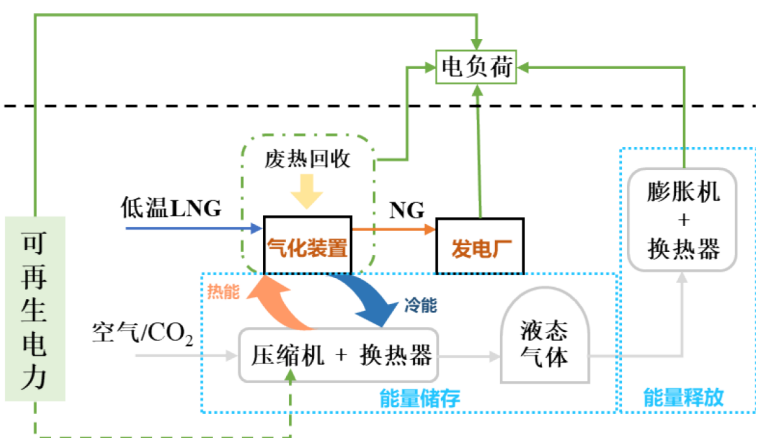


图10 LNG冷能的储能利用

Fig.10 Energy Storage Utilisation of LNG Cold Energy

表2 不同压力和对应温度下空气和CO_2的储存密度

Table 2 Storage Densities of Air and CO_2 at Different Pressures and Corresponding Temperatures

储能工质名称	压力/MPa	温度/℃	密度/(kg/m^3)	状态
空气	1	30	11.52	气态
	1	−196	887.49	液态
	10	30	113.15	超临界态
	20	30	226.27	超临界态
CO_2	1	30	18.35	气态
	1	−40	1117.20	液态
	10	40	628.61	超临界态
	20	40	839.81	超临界态

体实现储能,待高峰用电时段再通过膨胀机释放稳定电力[54]。研究表明,耦合LNG冷能和ORC的LAES系统在循环效率和经济性能上均有一定提升,相较于常规LAES系统效率约50%的效率水平,该系统提升了7%~12%[55]。另有研究将基于LAES的LNG冷能利用系统与水泥工业废热回收系统相结合,通过优化热力模型与系统设计,实现能量梯级高效利用,结果显示系统往返效率为176.27%,㶲效率达74.49%,具有较大的储能容量和经济效益[56]。CO_2的临界点(7.39 MPa,31.4 ℃)相对于空气(3.77 MPa,−140.5 ℃)更容易达到,且超临界CO_2具有黏度小、密度大、导热性能优异的特点,在电力储能市场具有较大发展空间,也是与碳捕集技术结合实现CO_2有效利用的方式之一[53]。研究显示耦合LNG冷能的LNG-LAES和LNG-LCES系统在16 MPa时的往返效率分别为76.38%和74.46%,㶲效率分别为64.2%和58.01%,投资回收期分别为14.02年和16.88年[57]。此外,还有研究将LNG再气化的冷能分别用于跨临界CO_2储能和低温碳捕获两个过程,气化后的常温天然气被输送至天然气电厂燃烧发电,其排出的高温高压烟气可为LCES系统释放电力时提供热源;烟气CO_2则在冷凝器中被LNG冷却,从超临界区穿过临界点冷却至CO_2凝固点,转化为固体CO_2进行捕集分离,最终以固体形式储存或运输[58]。

4 对策建议

LNG资源渠道主要分布于LNG接收站及天然气液化厂,是各地区县级及以上燃气公司和部分大、中型工业用户作为调峰和应急储备的重要资源。通过将LNG冷能与清洁能源系统深度融合构建清洁能源中心(如表3所示),可推动多产业协同发展,优化区域能源布局,提升资源综合利用效率,实现节能降耗并创造显著经济价值。具体政策建议如下:

战术层面,结合各区域人口、地理环境条件、LNG储备站实际需求与资源禀赋,科学确定LNG冷能利用新兴产业的适宜发展模式,因地制宜推进技术研发与工程应用落地。重点突破高效冷凝换热技术,加大换热器设计优化及耐低温高压相变稳定高效工质开发等领域的研发投入,强化技术专利布局和国际合作。同时,强化高校在低温能源工程等交叉学科的人才培养力度,系统开展从业人员技能提升培训,建立完善的职业资格认证体系,支持企业设立博士后工作站深化产学研合作。依托国家政府、企业、科研院所等协同创新平台,深化跨领域合作,集中攻关LNG产业链核心设备及关键技术,推动国产化装备研发与工程化应用。在长三角、京津冀等LNG枢纽区域开展试点示范,发展分布式冷能微电网,并规划冷能输送管网等基础设施建设。

战略层面,需强化LNG冷能梯级利用项目示范和多能融合技术创新,鼓励在气源稳定、气价可承受地区合理布局天然气调峰电站,提升电力系统安全运行与综合调节能力,科学规划融合LNG冷能的新型储能、光热发电等创新技术布局。推动各区域清洁资源多元化开发与LNG冷能可持续综合利用技术的协同发展,强化资源统筹与多能互补利用机制,减少能源转换损失以提高系统能效,实现我国LNG产业与现代清洁能源系统融合发

表3 融合LNG冷能的清洁能源中心具体应用

Table 3 Specific Applications of Clean Energy Centres Integrating LNG Cold Energy

清洁能源中心	发展模式	应用区域场景
LNG冷能梯级利用	发电+区域供冷;空分+蓄冷;轻烃分离	沿海大型LNG接收站
LNG冷能替代传统制冷机组	区域供冷;甲醇洗装置、乙烯装置耦合换热	数据中心、办公建筑;煤制气、炼化企业
LNG冷热电联产	分布式能源系统;BOG再液化,海运冷藏集装箱	港口、园区、工厂、酒店等;LNG动力船舶
LNG冷能+风电制氢	离网型风电制氢,联合LNG接收站生产液氢	沿海岸区域、东北地区
LNG冷能+光热发电	太阳能/地热能作为热源与LNG冷能组成动力循环发电	西藏、西北地区(太阳能);滇西、藏南(高温水热型地热)
LNG冷能储能+气电调峰	油气增产储备LNG;LNG冷能储存可再生电力,储能和气电辅助风光发电调峰	新疆、陕西、内蒙古等新能源大基地

展。建立健全的LNG冷能利用技术规范标准体系,制定储气行业冷能回收利用率标准要求,形成LNG冷能利用全流程的数据监测方案和减排量认证机制。实施税收优惠、碳信用额度奖励、绿色债券融资等多元化财税激励与资金支持政策,构建符合国际碳交易市场规则的冷能减排交易机制,设计开发专门的碳交易产品,推动LNG冷能项目在碳市场的有效流通。

贯彻国家“双碳”理念与高质量发展战略要求,围绕能源结构绿色转型、天然气储运设备制造/设施建设、清洁资源开发与可持续综合利用等核心领域创新驱动,推动LNG/天然气产业链集群与清洁能源系统协同发展,重点方向如图11所示。上游加强本土气田勘探开发力度,配套可再生电力驱动的LNG生产技术,实现绿色电能与天然气液化的深度耦合,推进液化产能升级。中游推进沿海LNG动力船舶发展和港口LNG清洁能源应用,推动航运业清洁低碳转型,短期以LNG为过渡燃料,同步发展绿色低碳燃料制备技术研发与集成应用;加快LNG接收站基础设施建设,完善油气管网互联互通,提升能源输配效率。下游深化清洁能源与LNG在规模适配、空间布局、建设时序等方面的协同衔接,加速推进微电网、虚拟电厂、源网荷储一体化项目建设。探索构建气—热—冷—电多能源网络互联互通系统,集成能源互联网供应链实现全流程综合调控优化;提升区域能源管理智能化水平,实现源网荷储一体化响应协同机制,精准匹配不同区域场景下的能源供需平衡。LNG/天然气产业链集群立足实现多方共赢与整体效益最大化目标,优化业务模式与资源获取策略,开展跨企业、跨板块、跨区域交流合作,推动产业链参与主体在分工明确的基础上实现相互渗透与融合,形成有效协同发展秩序,推进上下游企业一体化经营创效,构建可持续发展的产业生态体系。

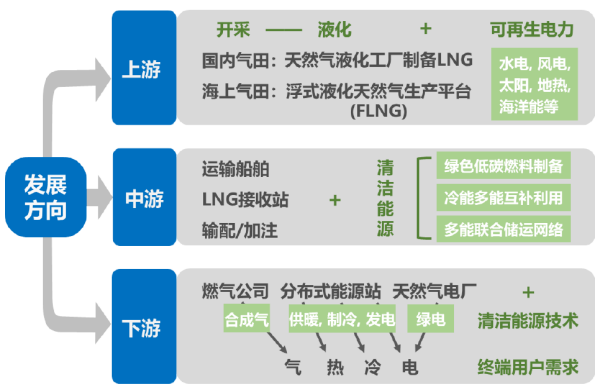


图11 LNG与清洁能源系统协同发展

Fig.11 Synergistic Development of LNG and Clean Energy Systems

参 考 文 献

[1] 周守为,朱军龙,单彤文,等. 中国天然气及LNG产业的发展现状及展望. 中国海上油气,2022,34(1):1—8.
Zhou SW,Zhu JL,Shan TW,et al. Development status and outlook of natural gas and LNG industry in China. China Offshore Oil and Gas,2022,34(1):1—8. (in Chinese)

[2] 黄维和,宫敬. 天然气管道与管网多能融合技术展望. 油气储运,2023,42(12):1321—1328.
Huang WH,Gong J. Prospect for the development of natural gas network and the multi-energy integration technology in pipeline networks. Oil & Gas Storage and Transportation,2023,42(12):1321—1328. (in Chinese)

[3] 华贲. 大型LNG接收站冷能的综合利用. 天然气工业,2008,28(3):10—15,133—134.
Hua B. Integrated utilization of cold energy from large-scale LNG receiving terminals. Natural Gas Industry,2008,28(3):10—15,133—134. (in Chinese)

[4] 武艺,李然,张丹迪. 中国LNG接收站发展趋势及利用效率提升思考. 油气储运,2024,43(7):721—729.
Wu Y,Li R,Zhang DD. Discussion on development trends and utilization efficiency enhancement of LNG terminals in China. Oil & Gas Storage and Transportation,2024,43(7):721—729. (in Chinese)

[5] He TB,Chong ZR,Zheng JJ,et al. LNG cold energy utilization: Prospects and challenges. Energy,2019,170:557—568.

[6] IGU,2024 World LNG Report. (2024-06-26)/[2025-03-15]. https://www.igu.org/resources/2024-world-lng-report/.

[7] 汪怀远,朱嘉君,王瑞涛,等. 面向冷能高效利用的管道关键技术与挑战. 前瞻科技,2024,3(2):110—120.
Wang HY,Zhu JJ,Wang RT,et al. Key technologies and challenges of pipeline for efficient cold energy utilization. Science and Technology Foresight,2024,3(2):110—120. (in Chinese)

[8] 金之钧,张川,王晓峰,等. 关于中国碳中和与能源转型实现路径的思考. 石油与天然气地质,2024,45(3):593—599.
Jin ZJ,Zhang C,Wang XF,et al. A pathway to China's energy transition in a carbon neutrality vision. Oil & Gas Geology,2024,45(3):593—599. (in Chinese)

[9] 谢旭光. 中国LNG进口产业与新型电力系统的融合发展. 油气储运,2024,43(8):869—876.
Xie XG. Integrated development of LNG import and new power systems in China. Oil & Gas Storage and Transportation,2024,43(8):869—876. (in Chinese)

[10] 李俊,陈煜. LNG冷能回收及梯级利用研究进展. 制冷学报,2022,43(2):1—12.
Li J,Chen Y. Research progress of cold energy recovery and cascade utilization of LNG. Journal of Refrigeration,2022,43(2):1—12. (in Chinese)

[11] 江蓉,赖勇杰,黄震宇,等. 我国LNG冷能空分技术的应用现状及展望. 低温与特气,2022,40(5):6—9.
Jiang R,Lai YJ,Huang ZY,et al. Application status and prospect of LNG cold energy air separation technology in China. Low Temperature and Specialty Gases,2022,40(5):6—9. (in Chinese)

[12] 杨经敏. LNG冷能发电梯级利用法的优化. 油气储运,2016,35(4):401—405.

Yang JM. Optimization of cascade utilization of LNG cold energy for power generation. Oil & Gas Storage and Transportation,2016,35(4):401—405. (in Chinese)

[13] 徐文东,彭曦,严万波. LNG冷能利用技术研究进展. 天然气与石油,2024,42(3):75—85.
Xu WD,Peng X,Yan WB. Research progress in LNG cold energy utilization technology. Natural Gas and Oil,2024,42(3):75—85. (in Chinese)

[14] 江蓉,向润清,赖勇杰,等. 用于冰雪世界的LNG冷能换冷站技术分析. 天然气化工—C1化学与化工,2022,47(5):120—124.
Jiang R,Xiang RQ,Lai YJ,et al. Technical analysis of LNG cold energy exchange station for Ice and Snow World. Low-carbon Chemistry and Chemical Engineering,2022,47(5):120—124. (in Chinese)

[15] 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. 化肥设计,2023,61(6):1—4.
Shi HL,Chen M,Zhang K,et al. Technical and economic analysis of coupled utilization of data centers and LNG cold energy-cold and heat sources. Chemical Fertilizer Design,2023,61(6):1—4. (in Chinese)

[16] Zonfrilli M,Facchino M,Serinelli R,et al. Thermodynamic analysis of cold energy recovery from LNG regasification. Journal of Cleaner Production,2023,420:138443.

[17] 龚硕锴,许海超. 我国LNG冷能利用发展现状及存在问题. 化学工业,2024,42(4):57—60,66.
Gong SK,Xu HC. The development situation and problems of cold energy utilization of LNG in China. Chemical Industry,2024,42(4):57—60,66. (in Chinese)

[18] 于靖雯. LNG接收站实现碳中和的路径分析. 中国资源综合利用,2024,42(7):262—264.
Yu JW. Analysis of the path to achieve carbon neutrality in LNG receiving stations. China Resources Comprehensive Utilization,2024,42(7):262—264. (in Chinese)

[19] Liu HT,You LX. Characteristics and applications of the cold heat exergy of liquefied natural gas. Energy Conversion and Management,1999,40(14):1515—1525.

[20] 张秀平,刘晓红,周到,等. 工商制冷空调用换热器技术现状与发展趋势. 流体机械,2024,52(6):67—75.
Zhang XP,Liu XH,Zhou D,et al. Technical status and development trend of heat exchanger for industrial and commercial refrigeration and air conditioning. Fluid Machinery,2024,52(6):67—75. (in Chinese)

[21] 贾豪杰,张国中,董伍强,等. 液化天然气冷能利用方案对比研究. 石化技术,2023,30(10):13—15.
Jia HJ,Zhang GZ,Dong WQ,et al. Comparative study on cold energy utilization schemes of liquefied natural gas (LNG). Petrochemical Industry Technology,2023,30(10):13—15. (in Chinese)

[22] 梁永图,张博,徐斌,等. 液化天然气长距离低温管网运输与冷能梯级利用. 前瞻科技,2024,3(2):50—58.
Liang YT,Zhang B,Xu B,et al. Liquefied natural gas long-distance cryogenic pipeline transportation and cold energy cascade utilization. Science and Technology Foresight,2024,3(2):50—58. (in Chinese)

[23] 宋长山,张杰,张春燕,等. LNG冷能梯级利用研究现状及展望. 中国石油和化工标准与质量,2023,43(13):141—143.
Song ZS,Zhang J,Zhang CY,et al. Research status and outlook on cascade utilisation of LNG cold energy. China Petroleum and Chemical Standard and Quality,2023,43(13):141—143. (in Chinese)

[24] Romero Gómez M,Ferreiro Garcia R,Romero Gómez J,et al. Review of thermal cycles exploiting the exergy of liquefied natural gas in the regasification process. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,38:781—795.

[25] Pan J,Cao QH,Li YY,et al. Energy,exergy,economic,exergoeconomic and exergoenvironmental (5E) analysis and optimization of a novel combined system integrating Allam cycle,air separation,ORC and carbon capture driven by LNG cold energy. Applied Thermal Engineering,2025,270:126225.

[26] Zhao W,Wang BH,Bei YZ,et al. Multi-period natural gas pipeline scheduling optimisation integrated with LNG cold energy cascade utilisation. Sustainable Energy Technologies and Assessments,2025,83:104577.

[27] 华贲,熊永强,李亚军,等. 液化天然气轻烃分离流程模拟与优化. 天然气工业,2006,26(5):127—129,3.
Hua B,Xiong YQ,Li YJ,et al. Simulation and optimization of the process of light hydrocarbons recovery from LNG. Natural Gas Industry,2006,26(5):127—129,3. (in Chinese)

[28] 杨晖,张皓兴,董冰艳,等. 某LNG接收站冷能用作区域供冷系统冷源探讨. 石油与天然气化工,2019,48(3):39—44,50.
Yang H,Zhang HX,Dong BY,et al. Feasibility study of LNG cold energy used as cold source of district cooling system. Chemical Engineering of Oil & Gas,2019,48(3):39—44,50. (in Chinese)

[29] 和有元. 大同SNG项目配套LNG调峰装置冷能利用及调峰成本研究. 煤化工,2020,48(3):14—17.
HE YY. Study on cold energy utilization and peak shaving cost of LNG peak shaving plant in Datong SNG Project. Coal Chemical Industry,2020,48(3):14—17. (in Chinese)

[30] 陈德明,董子伟,侯楠. 乙烯装置利用LNG冷能冷系统开车及故障分析. 乙烯工业,2023,35(4):23—31,65.
Chen DM,Dong ZW,Hou N. Start-up of cold separation system in ethylene plant based on LNG cold energy utilization and the failure analysis. Ethylene Industry,2023,35(4):23—31,65. (in Chinese)

[31] 赖秀文,李巡案,丁文刚,等. LNG冷能在分布式能源的应用. 煤气与热力,2018,38(8):19—21.
Lai XW,Li XA,Ding WG,et al. Application of LNG cold energy to distributed energy. Gas & Heat,2018,38(8):19—21. (in Chinese)

[32] Zhao L,Zhang JL,Wang X,et al. Dynamic exergy analysis of a novel LNG cold energy utilization system combined with cold,heat and power. Energy,2020,212:118649.

[33] 杨贤潮,刘月勤. 合同能源管理在能源央企推广LNG动力船上的应用研究. 交通节能与环保,2022,18(6):108—111.
Yang XC,Liu YQ. Research on the application of contract energy management in the promotion of LNG powered ships by energy central enterprises. Transport Energy Conservation & Environmental Protection,2022,18(6):108—111. (in Chinese)

[34] 马小勇,杨海建,范祥,等. LNG动力船NBOG管理系统方法的研究. 江苏船舶,2024,41(1):15—17,24.
Ma XY,Yang HJ,Fan X,et al. Research on the method of NBOG management system for LNG-powered ships. Jiangsu Ship,2024,41(1):15—17,24. (in Chinese)

[35] 方智聪,魏昕睿,邓开元,等. LNG动力船冷藏集装箱冷能系统设计. 煤气与热力,2022,42(9):25—29.

Fang ZC,Wei XR,Deng KY,et al. Design of cold energy system for refrigerated containers of LNG-powered ship. Gas & Heat,2022,42(9):25—29. (in Chinese)

[36] 程超,高丹,张衡,等. 煤炭与新能源融合发展场景与关键技术. 中国工程科学,2024,26(4):52—62.
Cheng C,Gao D,Zhang H,et al. Integrated development of coal and new energy sources:Scenarios and key technologies. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering,2024,26(4):52—62. (in Chinese)

[37] 中国气象局. 2024年中国风能太阳能资源年景公报. (2025-02-11)/[2025-03-15]. https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202502/t20250211_6847016.html.

[38] 汪集暘,孔彦龙,程远志. 中国地热资源分布与开发利用. 2019国际清洁能源论坛. 澳门,2019:68—75.
Wang JY,Kong YL,Cheng YZ. Geothermal resource,utilization and its development trend in China. The International Clean Energy Industry Development Report (2019). Macao,2019:68—75. (in Chinese)

[39] 王一冰. 地热产业进入快速发展阶段. 中国石化,2023(10):10—13.
Wang YB. The geothermal industry has entered a stage of rapid development. China Petroleum and Chemical Industry,2023(10):10—13. (in Chinese)

[40] Zhu CY,Guan B,Zhuang ZQ,et al. Research status and advances of ammonia and hydrogen in the field of energy:Combined utilization. Energy Conversion and Management,2025,327:119610.

[41] 申刘飞,翟雨佳,吴星徵,等. 海上超导风电制氢一体化研究进展与发展趋势. 电工技术学报,2025,40(11):3362—3380.
Shen LF,Zhai YJ,Wu XZ,et al. Progress and development trend of integrated research on hydrogen production from offshore superconducting wind power. Transactions of China Electrotechnical Society,2025,40(11):3362—3380. (in Chinese)

[42] 王玉龙,张志龙,倪建龙. 氢能与LNG冷能综合利用技术研究. 中国资源综合利用,2023,41(12):151—154.
Wang YL,Zhang ZL,Ni JL. Research on comprehensive utilization technology of hydrogen energy and LNG cold energy. China Resources Comprehensive Utilization,2023,41(12):151—154. (in Chinese)

[43] 李育磊,刘玮,董斌琦,等. 双碳目标下中国绿氢合成氨发展基础与路线. 储能科学与技术,2022,11(9):2891—2899.
Li YL,Liu W,Dong BQ,et al. Green hydrogen ammonia synthesis in China under double carbon target:Research on development basis and route. Energy Storage Science and Technology,2022,11(9):2891—2899. (in Chinese)

[44] 吉旭,林今,聂李红,等. 适用可再生能源不确定特性的合成氨多稳态柔性工艺技术. 洁净煤技术,2024,30(2):23—35.
Ji X,Lin J,Nie LH,et al. Multistable-flexible ammonia process adapted to renewable energy. Clean Coal Technology,2024,30(2):23—35. (in Chinese)

[45] 李俊,陈煜. 储能技术分类及液态空气储能系统概述. 制冷技术,2024,44(5):79—86.
Li J,Chen Y. Classification of energy storage technology and overview of liquid air energy storage system. Chinese Journal of Refrigeration Technology,2024,44(5):79—86. (in Chinese)

[46] 薛菲尔,陈煜,巨永林. 基于LNG冷能的低温动力循环研究进展. 制冷学报,2016,37(3):60—68,80.
Xue FR,Chen Y,Ju YL. Development of cryogenic power generation cycles with LNG cold energy utilization. Journal of Refrigeration,2016,37(3):60—68,80. (in Chinese)

[47] Li CH,Liu JW,Zheng SY,et al. Performance analysis of an improved power generation system utilizing the cold energy of LNG and solar energy. Applied Thermal Engineering,2019,159:113937.

[48] Pan J,Li MF,Zhu M,et al. Energy,exergy and economic analysis of different integrated systems for power generation using LNG cold energy and geothermal energy. Renewable Energy,2023,202:1054—1070.

[49] Ali Emadi M,Pourrahmani H,Moghimi M. Performance evaluation of an integrated hydrogen production system with LNG cold energy utilization. International Journal of Hydrogen Energy,2018,43(49):22075—22087.

[50] 张守淳. 欧美国家如何支撑LNG产业链发展? 珠江水运,2015(21):50—52.
Zhang SC. How do European and American countries support the development of LNG industry chain . Pearl River transport,2015(21):50—52. (in Chinese)

[51] O'Callaghan O,Donnellan P. Liquid air energy storage systems:A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021,146:111113.

[52] Shamsi SSM,Barberis S,Maccarini S,et al. Large scale energy storage systems based on carbon dioxide thermal cycles:A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2024,192:114245.

[53] 郝佳豪,越云凯,张家俊,等. 二氧化碳储能技术研究现状与发展前景. 储能科学与技术,2022,11(10):3285—3296.
Hao JH,Yue YK,Zhang JJ,et al. Research status and development prospect of carbon dioxide energy-storage technology. Energy Storage Science and Technology,2022,11(10):3285—3296. (in Chinese)

[54] 潘崇耀,蒋庆峰,冯国增,等. 利用LNG冷能的液化空气储能系统热力学分析. 低温与超导,2022,50(8):57—63.
Pan CY,Jiang QF,Feng GZ,et al. Thermodynamic analysis of liquefied air energy storage system by using LNG cold energy. Cryogenics & Superconductivity,2022,50(8):57—63. (in Chinese)

[55] 李俊先,刘延江,刘坤,等. 基于液态天然气冷能利用的液态空气储能系统优化与性能评估. 热力发电,2024,53(9):69—77.
Li JX,Liu YJ,Liu K,et al. Optimization and performance evaluation for liquid air energy storage based on liquid natural gas cold energy utilization. Thermal Power Generation,2024,53(9):69—77. (in Chinese)

[56] Li JX,Fan XY,Li YH,et al. A novel system of liquid air energy storage with LNG cold energy and industrial waste heat:Thermodynamic and economic analysis. Journal of Energy Storage,2024,86:111359.

[57] Zhang JY,Wang CC. Thermodynamic and economic analysis of LNG-LAES and LNG-LCES systems:A comparative study. Energy,2025,324:136047.

[58] Yin L,Ju YL,Lin QG. An integrated solution of energy storage and CO_2 reduction:Trans-critical CO_2 energy storage system combining carbon capture with LNG cold energy. Journal of Cleaner Production,2024,482:144228.

Strategic Recommendations for Integrating LNG Cold Energy Utilisation Technology with Clean Energy Systems

Qiang Fu[1†] Wen Zhao[2†] Junao Wang[1] Bohong Wang[2*] Shouwei Zhou[1]

1. *National Key Laboratory of Marine Natural Gas Hydrates, CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China*
2. *National-Local Joint Engineering Laboratory of Harbour Oil & Gas Storage and Transportation Technology/Zhejiang Key Laboratory of Petrochemical Environmental Pollution Control, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China*

Abstract Promoting LNG cold energy utilization technology and building a multi energy complementary, clean, low-carbon, safe and efficient energy system are an important direction for the development of modern energy systems. This paper investigates and analyses the development status and trend of LNG cold energy utilization at home and abroad, focusing on the high-quality development layout of LNG cold energy utilization technology and clean energy system integration. Through energy matching and integration methods combined with economic and technical feasibility evaluation, this paper summarizes typical cases of LNG cold energy cascade utilization and multi-energy integrated utilization. The complementarity of LNG cold energy with conventional energy sources and renewable energies such as wind, solar and geothermal power has been analysed, along with the integrated utilisation of LNG cold energy in the storage and peak shaving of renewable electricity. It provides a reference for the coordinated development of LNG/ natural gas industry chain cluster and clean energy system. The research suggests to promote the construction of clean energy centers integrating LNG cold energy according to the actual needs and resource endowments of each region, and to develop localized equipment and engineering applications based on innovation driven by key contents such as green transformation of energy structure, equipment manufacturing/facility construction of natural gas storage and transportation, clean resources development and sustainable comprehensive utilization.

Keywords LNG cold energy cascade utilization; multi-energy complementary; LNG cold energy storage; process integration; energy system planning

王博弘 博士, 浙江海洋大学石油化工与环境学院副教授。主要从事油气储运工程及能源系统工程方面的研究工作。担任*Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*(*JRNPSENG*)期刊副主编。

付 强 博士, 中海油研究总院有限责任公司正高级工程师。主要从事油气田开发及海洋资源发展战略研究工作。

赵 雯 浙江海洋大学石油化工与环境学院硕士研究生。主要研究方向为LNG冷能利用、过程集成、清洁能源系统优化。

(责任编辑 张 强)

† Contributed equally as co-first authors.

* Corresponding Author, Email: wangbh@zjou.edu.cn