



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403435

引用格式:何卫宏,张引弟,李颖楠,等. LNG冷能用于废气回流朗肯循环及CO₂液化新工艺[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(7): 2760-2766.

He Weihong, Zhang Yindi, Li Yingnan, et al. LNG cold energy used in exhaust gas reflux rankine cycle and CO₂ liquefaction technology[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(7): 2760-2766.

石油、天然气工业

LNG冷能用于废气回流朗肯循环及CO₂液化新工艺

何卫宏^{1,2}, 张引弟^{1,2*}, 李颖楠³, 黄孝红^{1,2}, 盛钰钦^{1,2}

(1. 长江大学石油工程学院, 武汉 430100; 2. 低碳催化与二氧化碳利用国家重点实验室, 兰州 730000;
3. 中海油江苏天然气有限责任公司, 盐城 224000)

摘要 为了有效利用液化天然气(liquefied natural gas, LNG)的冷能并对燃气轮机废气中的CO₂进行液化处理,提出了一种利用LNG冷能液化CO₂及CO₂动力循环的新工艺,该工艺在常规朗肯循环的基础上增加了再热循环和回热循环并且设置了多流股换热器。利用化工过程模拟软件对工艺流程进行模拟并且对回流温度、级间冷却温度和循环的最高温度和压力进行敏感性分析,得到最佳运行参数。采用焓分析的方法,对系统的焓效率、比功和CO₂的液化率等系统评价指标进行分析计算,并与现有工艺进行对比分析,得到新工艺的焓效率为54.16%,比功为335.9 kJ/kg LNG,CO₂的液化率为0.6217 kg/kg LNG,可知新工艺的评价指标均优于现有工艺。并且以焓效率最高为目标,液化后的CO₂温度作为约束条件,采用Original优化模式对工艺流程的参数进行优化,优化后的焓效率为54.28%,比功为337.5 kJ/kg LNG,系统性能进一步提升。

关键词 LNG冷能利用;液化CO₂;废气回流;朗肯循环;敏感性分析

中图分类号 TE08; **文献标志码** A

LNG Cold Energy Used in Exhaust Gas Reflux Rankine Cycle and CO₂ Liquefaction Technology

HE Wei-hong^{1,2}, ZHANG Yin-di^{1,2*}, LI Ying-nan³, HUANG Xiao-hong^{1,2}, SHENG Zheng-qin^{1,2}

(1. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. State Key Laboratory of Low-carbon Catalysis and Carbon Dioxide Utilization, Lanzhou 730000, China;

3. CNOOC Jiangsu Natural Gas Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

[Abstract] In order to effectively utilize LNG(liquefied natural gas) cold energy and liquefy CO₂ in gas turbine exhaust gas, a new process of LNG cold energy to liquefy CO₂ and CO₂ power cycle was proposed. In this process, Reheat cycle and regenerative cycle were added on the basis of conventional Rankine cycle, and multi-flow strand heat exchanger was set up. Chemical process simulation software was used to simulate the process flow and sensitivity analysis of reflux temperature, interstage cooling temperature and maximum circulating temperature and pressure was carried out to obtain the best operating parameters. Exergy efficiency, specific work and CO₂ liquefaction rate of the system were analyzed and calculated by exergy analysis. Exergy efficiency of exergy was 54.16%, specific work was 335.9 kJ/kg LNG, and CO₂ liquefaction rate was 0.6217 kg/kg LNG in a new process. The evaluation indexes of the new process were better than those of the existing process. As for the exergic efficiency, exergic efficiency of exergic was as the highest and the temperature of CO₂ after liquefied was as the constraint condition, exergic efficiency of exergic was 54.28% and specific power was 337.5 kJ/kg LNG, so the system performance was further improved.

[Keywords] LNG cold energy utilization; liquefied CO₂; exhaust gas reflux; rankine cycle; sensitivity analysis

收稿日期:2024-05-09 修订日期:2024-07-09

基金项目:国家自然科学基金(52274060,51974033);长江人才计划领军人才项目(Yz2021239)

第一作者:何卫宏(1999—),男,汉族,山东潍坊人,硕士研究生。研究方向:LNG冷能利用等。E-mail:2568110073@qq.com。

*通信作者:张引弟(1978—),女,汉族,甘肃平凉人,博士,教授。研究方向:油气储运热学与集输节能、CO₂捕集与管道输送(CCUS)、燃气技术、管网工艺仿真检测及智能化等。E-mail:zhangyindahust@foxmail.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

天然气作为化石能源,因其清洁性被广泛使用,为了方便运输会对其进行液化储存^[1]。截至2023年底,中国已投产接收站28座,总接卸能力达1.16亿t/年^[2],预计到2040年,全球液化天然气(liquefied natural gas, LNG)需求将达到6.25亿t/年^[3]。LNG气化过程中会释放大冷能,直接排放会造成环境污染和能源浪费^[4],所以要将这部分冷能加以利用。LNG冷能的利用方式包括冷能发电、制冷、碳捕获、空气分离、海水淡化等方式^[5],而近年来随着化石能源的大规模使用使得CO₂大量排放,2023年CO₂的排放量达到374亿t,减少CO₂排放刻不容缓^[6-7],通过利用LNG冷能来发电,在减少能源浪费的同时对CO₂进行捕集^[8],缓解环境问题。

学者对LNG冷能用于朗肯循环发电和液化CO₂进行了大量研究,Sum等^[9]提出了利用烃类混合物回收LNG冷能的新型朗肯循环,得出提高膨胀机的入口温度可以提高循环的发电量。薛菲尔等^[10]总结了LNG冷能用于朗肯循环结构改进类型,提出了参数研究和结构改进的多样性。黄美斌等^[11]提出了使用高温废气作为热源,以LNG作为低温冷源和CO₂作为循环工质的CO₂跨临界朗肯循环并对系统的参数进行了敏感性分析。刘梅梅等^[12]提出了CO₂跨临界朗肯循环发电和回收CO₂新工艺并且分析了烟气温度的影响。熊永强等^[13]提出了一种集成工艺,保证CO₂液化所需的冷能不变,将深冷部分的LNG冷焓转换为电能,提高系统的焓效率。曹兴起等^[14]提出了低品位热能与LNG综合利用的复合循环系统,实现不同温度区间的循环匹配及热能梯级利用。杨富斌等^[15]设计了两级有机朗肯循环尾气余热回收系统,对两级有机朗肯循环系统的热力学性质

进行分析。Choi等^[16]提出了梯级朗肯循环,并且提出的循环在焓效率、净功率和热效率指标要明显优于传统循环。

目前利用LNG冷能液化CO₂和朗肯循环发电方面已经有很多研究,但这些研究存在缺乏整体分析、工艺流程繁杂和只分析朗肯循环发电过程忽略了LNG冷能液化CO₂的工艺改进及CO₂的液化率低等问题,针对这些问题,提出一种LNG冷能用于废气回流朗肯循环及CO₂液化新工艺,该工艺在常规的朗肯循环基础上设置了再热循环和回热循环并且采用了多流股换热器,使热流回流,提高系统的焓效率和比功。

1 工艺流程模拟及焓效率分析

1.1 LNG冷能用于废气回流朗肯循环及CO₂液化的工艺流程

图1中L1~NG(蓝色流股)表示LNG气化的过程,LNG先经过泵P-1提高自身压力,与换热器HEX-1与CO₂进行换热,利用自身冷能将CO₂冷却为液体并且进一步冷却循环工质,再依次通过换热器HEX-6、HEX-5、HEX-7换热后逐渐升温至完全气化,使其达到外输要求。

图1中C1~LCO₂(红色流股)表示高温废气的余热利用和液化CO₂的过程。在废气分离水并液化CO₂的过程中,废气通过换热器HEX-3、HEX-4与循环工质换热后,考虑到进入空冷器的流股温度过高会导致空冷器的能量损失过大,导致整个系统的焓效率降低,故在高温流股进入空冷器之前使其回流至换热器HEX-3,与高温废气一起为CO₂循环工质提供热量,使得循环工质进入膨胀机时的温度升高,提升膨胀机的发电能力及系统的效率。高温流股在HEX-3通过回流换热之后进入空冷器进行降

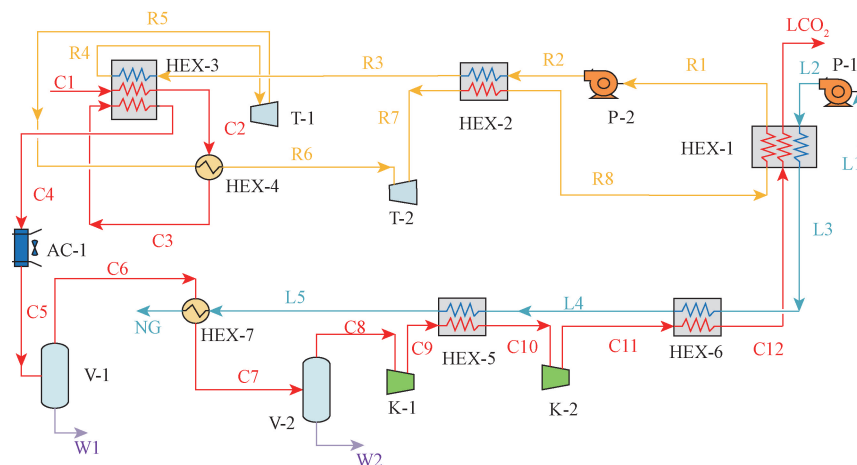


图1 LNG冷能用于CO₂的液化及CO₂动力循环工艺流程

Fig. 1 LNG cold energy for CO₂ liquefaction and CO₂ power cycle process flow

温,降温之后在分离器中分离出气体中夹杂的水组分,防止在 HEX-7 换热器中水组分与低温气体进行换热造成能量损耗,在分离器 V-1 中分离出大部分水之后,通过换热器 HEX-7 使其降温至 0 °C 并且再一次进行气液分离,防止液体进入压缩机造成压缩机损坏和效率降低,之后通过 K-1 压缩机加压升温后进入换热器 HEX-5 与低温气体换热后,进入压缩机 K-2 再次加压升温后进入换热器 HEX-6 进行换热,最终进入 HEX-1 换热器进行液化。

图 1 中 R1 ~ R8(黄色流股)表示朗肯循环利用膨胀机发电的过程,在常规朗肯循环的基础上添加了回热循环和再热循环以及多流股换热器,在换热器 HEX-3 中使高温废气与回流热流共同与 CO₂ 循环工质换热,使循环工质进入膨胀机的温度更高,在换热器 HEX-1 中使 LNG 与低温循环工质共同与 C12 流股换热,使其液化。循环工质 R1 增压后进入回热器 HEX-2 换热后,在 HEX-3 换热器中完全气化后进入膨胀机 T-1 膨胀做功,经膨胀降温后通过再热器 HEX-4 通过与高温气体换热后温度升高,之后再次进入膨胀机 T-2 进行膨胀做功,最后经换热器 HEX-2、HEX-1 连续降温使其液化,完成一个循环。

1.2 工艺系统能量及炯效率分析

在对系统进行能量分析过程中假定系统在稳定工况下运行,可以得到膨胀机的输出功、压缩机和泵的能耗。系统的输出净功作为系统的评价指标,故系统净功的定义为

$$W_{\text{net}} = W_T - W_P - W_K \quad (1)$$

式(1)中: W_{net} 为系统的净功; W_T 为膨胀机的输出功包括 T-1 和 T-2 的输出功; W_P 为泵的能耗包括 P-1 和 P-2 的能耗; W_K 为压缩机的能耗,包括 K-1 和 K-2 的能耗。

在分析整个系统的效率时引入了回收单位质量 LNG 所输出的净功,即比功也作为系统评价指标,系统比功表示为

$$w = \frac{W_{\text{net}}}{q_{\text{mLNG}}} \quad (2)$$

式(2)中: q_{mLNG} 为 LNG 的质量流量。

定义产品 CO₂ 的液化率也作为评价指标^[12],计算公式为

$$Y_C = \frac{q_{\text{mLCO}_2}}{q_{\text{mLNG}}} \quad (3)$$

式(3)中: q_{mLCO_2} 为液化 CO₂ 的质量流量。

系统的炯效率作为评价系统的关键指标,系统的炯效率表示为

$$\eta = \frac{\sum X_{\text{out}}}{\sum X_{\text{in}}} \quad (4)$$

式(4)中: $\sum X_{\text{in}}$ 为进入系统的炯流,包括泵和压缩机的输入炯、LNG 所含炯、废气所含炯; $\sum X_{\text{out}}$ 为输出系统的炯流,包括 LNG 气化之后的天然气所含炯、液化后的 CO₂ 所含炯以及膨胀机的输出炯。

2 模拟结果及分析

2.1 参数设定

使用化工过程模拟软件对工艺流程进行模拟,状态方程方面,考虑到各物流的热力学性质,由于 Peng-Robinson(P-R)状态方程对于天然气热物性的计算较为成熟,故状态方程选择 P-R 方程^[17]。为了简化模拟流程,假设整个系统稳定运行,设定泵的绝热效率为 80%,膨胀机和压缩机的绝热效率为 90%,换热器压降为 10 kPa,空冷器压降为 5 kPa,本文中假设燃气轮机为纯氧燃烧,废气中水蒸气与 CO₂ 摩尔比为 2:1,朗肯循环工质选取 CO₂,LNG 组分摩尔分数为甲烷 90.38%、乙烷 5.37%、丙烷 4.04%、氮气 0.21%。已知 CO₂ 的三相点压力为 0.518 MPa,温度为 -56.6 °C,本文中设定温度为 -56 °C,压力为 520 kPa。

2.2 模拟结果

经过模拟计算,得到表 1 ~ 表 3 所示工艺流程的关键参数。

通过模拟与公式计算可知,新工艺性能参数见表 4。

表 1 LNG 气化过程参数

流股	温度/°C	压力/kPa	流量/(kg·h ⁻¹)
L1	-162	150	3 100
L2	-161.6	1 040	3 100
L3	-45	1 030	3 100
L4	-31.93	1 020	3 100
L5	-18	1 010	3 100
NG	14.3	1 000	3 100

表 2 CO₂ 液化过程参数

流股	温度/°C	压力/kPa	流量/(kg·h ⁻¹)
C1	600	150	3 500
C2	238	140	3 500
C3	205	130	3 500
C4	93.5	120	3 500
C5	42	115	3 500
C6	42	115	1 984
C7	0	105	1 984
C8	0	105	1 927
C9	62	246	1 927
C10	9	236	1 927
C11	69.68	540	1 927
C12	21.13	530	1 927
LCO ₂	-55.49	520	1 927

表3 循环参数
Table 3 Cycle parameters

流股	温度/℃	压力/kPa	流量/(kg·h ⁻¹)
R1	-83.5	130	3 500
R2	-78.55	15 000	3 500
R3	-15.69	14 990	3 500
R4	4.15	14 980	3 500
R5	169.1	1 100	3 500
R6	216.3	1 090	3 500
R7	70.64	150	3 500
R8	-60.89	140	3 500

表4 工艺性能参数
Table 4 Process performance parameters

参数	性能
泵 P-1 功率/kW	2.078
泵 P-2 功率/kW	14.31
压缩机 K-1 功率/kW	28.66
压缩机 K-2 功率/kW	28.22
膨胀机 T-1 功率/kW	231.1
膨胀机 T-2 功率/kW	131.4
净功/kW	289.3
比功/[kJ·(kg LNG) ⁻¹]	335.9
液化率/[kg·(kg LNG) ⁻¹]	0.621 7
焓效率/%	54.16

2.3 性能参数对比

工艺 1^[11]、工艺 2^[12]各自介绍了一种利用 LNG 冷能液化 CO₂ 并且通过循环发电的工艺流程,本文中工艺基于上述的几种流程,增加了废气回流换热。由表 5 可知,本文工艺相较于已有的工艺流程,其焓效率、比功和 CO₂ 的液化率均有较大的提升。新工艺的液化率比工艺 1 提高 127.73%,比工艺 2 提高 3.62%;新工艺比功比工艺 1 提高 17.97%,比工艺 2 提高 41.31%;新工艺焓效率比工艺 1 提高 49.08%,比工艺 2 提高 8.97%。

表5 现有工艺对比
Table 5 Comparison of existing processes

参数	工艺 1	工艺 2	本文 新工艺
LNG 气化压力/MPa	3	1	1
LNG 出口温度/℃	37.17	15	14.3
废气最高温度/℃	630	600	600
工质最高压力/MPa	15	15	15
工质最高温度/℃	630	267	415
CO ₂ 液化率/[kg·(kg LNG) ⁻¹]	0.273	0.60	0.621 7
比功/[kJ·(kg LNG)]	284.74	237.7	335.9
焓效率/%	36.33	49.70	54.16

3 工艺参数影响规律分析

3.1 回流温度对系统的影响

本文中回流温度指的是高温废气经过第一次换热及循环工质换热后再次进入 HEX-3 换热器的物流温度即 C3 流股的温度,回流温度是影响整个流程性能的关键参数,由图 2 可以看出,随着温度的升高,系统的焓效率和比功都逐渐减小。呈现该规律的原因是:随着温度的升高,C2 流股和 C3 流股之间的温差逐渐减小,导致在换热器中传递给循环工质的热量减少,使得循环工质进入 T-2 膨胀机的温度降低,导致膨胀机的输出功率减小,导致系统的净功、比功和焓效率均减小。

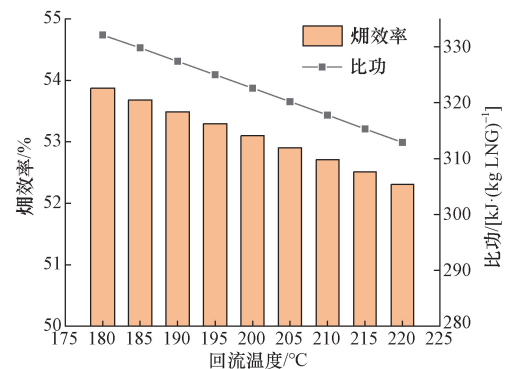


图2 回流温度对系统焓效率及比功的影响

Fig. 2 Influence of reflux temperature on exergic efficiency and specific power of the system

3.2 级间冷却温度对系统的影响

改变压缩级间冷却温度即换热器 HEX-7 和 HEX-5 换热器热流股的出口温度可知,对压缩机吸气冷却工艺优化设计^[18],利用 LNG 冷能将 CO₂ 压缩机进气、压缩机级间压缩气冷却至 -40 °C,以降低 CO₂ 压缩机的能耗。考虑到本文中的废气组分中含有水组分,防止水组分在低温条件下冷却结冰堵塞管道,故本文中换热器 HEX-7 热流出口温度最低为 0 °C,改变压缩机 K-1 和压缩机 K-2 的进口温度来分析级间冷却对系统的影响。

在不改变压缩机 K-2 的进口温度条件下,改变压缩机 K-1 的进口温度,焓效率和比功变化如图 3 所示,液化率随温度的变化如图 4 所示。

由图 3 可以看出,随着压缩机 K-1 进口温度的不断升高,系统的焓效率和比功都不断下降,焓效率由 52.87% 下降到 52.56%,比功由 319.6 kJ/kg LNG 下降到 317.2 kJ/kg LNG,而随着温度的增加,CO₂ 的液化率提高,由 0.611 7 kg/kg LNG 提升到 0.623 3 kg/kg LNG。对此分析可知,冷却温度增加,换热器 HEX-7 在进口热流股温度不变的情况下,出口温度增加,级间温度变化会影响含 CO₂ 流股的组

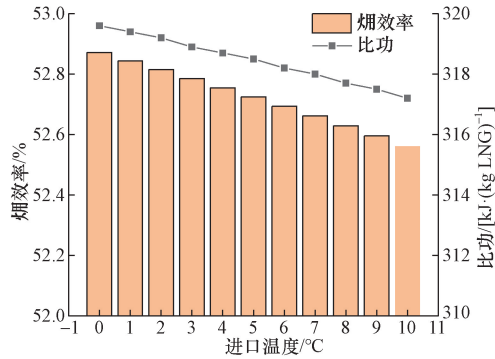


图3 压缩机 K-1 进口温度对系统焓效率及比功的影响
Fig. 3 Influence of compressor K-1 inlet temperature on system exergetic efficiency and specific power

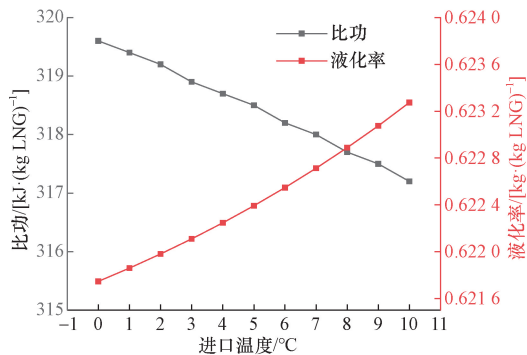


图4 压缩机 K-1 进口温度对系统比功及 CO₂ 液化率的影响

Fig. 4 Influence of compressor K-1 inlet temperature on system specific power and CO₂ liquefaction rate

分,会导致经过分离器时组分存在差异。此外,冷却温度增加会导致增压设备能耗增加,同时会导致加压后气体温度更高,影响压缩机 K-2。由此可知,压缩机 K-1 的进口温度选择 0 °C 时,系统的焓效率、比功和 CO₂ 液化率达到最佳值。

在压缩机 K-1 进口温度选择 0 °C 时,保持压缩机 K-1 进口温度不变,改变压缩机 K-2 的进口温度来分析级间冷却对系统的影响。其结果如图 5 所示。

由于压缩机进口温度在 8 °C 时,压缩机进口流股的气相分数为 0.998 9 会使一部分液体进入压缩机,对压缩机造成损害,故压缩机 K-2 的进口温度从 9 °C 开始。由图 5 可知,随着压缩机 K-2 进口温度的增加,系统的焓效率和比功均减小。焓效率从 52.95% 下降到 52.87%,比功由 321 kJ/kg LNG 下降到 319.5 kJ/kg LNG。造成这一现象的原因同样是级间温度变化会影响流股的组分而且冷却温度增加会导致压缩机的能耗增加,使得系统的净功减少,导致焓效率和比功减小。故压缩机 K-2 最佳的进口温度为 9 °C。

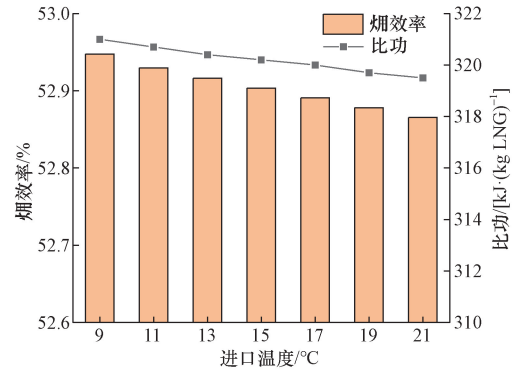


图5 压缩机 K-2 进口温度对系统焓效率及比功的影响
Fig. 5 Influence of compressor K-2 inlet temperature on system exergetic efficiency and specific power

3.3 最高温度和压力对循环的影响

对于循环的性能,循环的最高温度和压力及冷凝温度是形象循环的关键因素,由于本循环的介质为 CO₂,介质本身受其三相点的限制,因此只分析循环的最高温度和压力对系统的影响。图 6、图 7 所示为循环最高温度和循环最高压力对系统的影响。

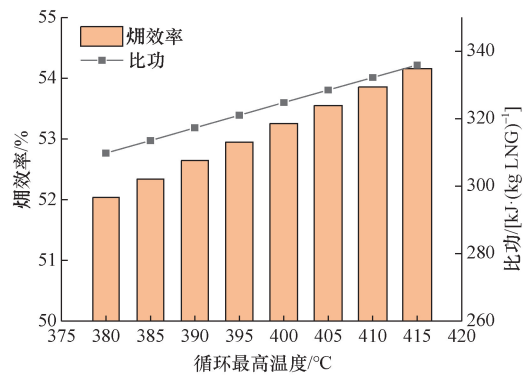


图6 循环最高温度对系统焓效率及比功的影响
Fig. 6 Influence of maximum cycle temperature on exergetic efficiency and specific power of the system

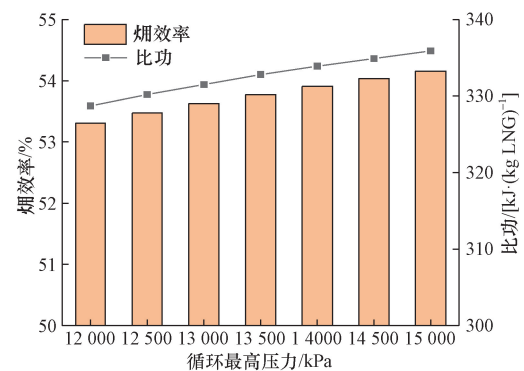


图7 循环最高压力对系统焓效率及比功的影响
Fig. 7 Influence of maximum cyclic pressure on exergetic efficiency and specific power of the system

由图6、图7可以看出,通过模拟可知,循环最高温度为420℃时,最终液化的CO₂温度为-57.83℃,要低于CO₂的三相点温度,包括循环压力超过15 000 kPa时,液化的CO₂温度要小于-56℃,同样低于三相点温度,故本文模拟中循环最高温度最高取为415℃,循环最高压力取15 000 kPa,此时的最高温度和最高压力取得最优值,此时的焓效率为54.16%,比功为335.9 kJ/kg LNG。由图6、图7可知,循环最高温度和最高压力与焓效率均有正相关关系,最高压力和最高温度的提高会使系统的焓效率和比功提高,其中最高温度每增加5℃,比功提高约3.75 kJ/kg LNG,最高压力每增加500 kPa,比功增加约1.3 kJ/kg LNG。

3.4 参数优化

采用优化器对参数进行优化,流程建立且收敛后,可以使用优化器寻找一个使目标函数最小化或最大化的操作条件,采用序贯二次规划算法采用牛顿迭代法约束优化问题^[19],序贯二次规划用于求解一连串近似于非线性规划的二次规划即以目标函数为二次函数,约束函数为线性函数的最优问题^[20]。采用Original优化模式对工艺流程的参数进行优化,以最大的焓效率为目标函数,最高循环温度和压缩机K-2进口温度作为决策变量,液化CO₂的温度不低于-56℃作为约束函数,最大迭代次数为100次,优化变量范围以及结果见表6,经过优化后使得最高循环温度增加2.1℃,压缩机K-2进口温度减少0.3℃,使得液化的CO₂温度变为-55.97℃,焓效率提高0.22%,比功增加了0.48%。

表6 优化结果

Table 6 Optimization results

变量	最高循环温度/℃	K-2出口温度/℃	液化CO ₂ 温度/℃	焓效率/%
上限	420.0	9	—	—
下限	410.0	8	-56.00	—
优化前	415.0	9	-55.49	54.16
优化后	417.1	8.7	-55.97	54.28

4 结论

(1)本文提出了LNG冷能用于液化CO₂和发电的新工艺,对工艺流程进行模拟分析,并与现有工艺进行对比,得到的新工艺的系统焓效率为54.16%,比功为335.9 kJ/kg LNG,CO₂的液化率为0.621 7 kg/kg LNG。

(2)基于焓分析方法,研究了回流温度、级间冷却温度、循环最高温度和最高压力对工艺流程焓效率和比功的影响。研究表明:焓效率和比功随着回

流温度升高而降低,随着压缩机进口温度的升高而降低,随着循环最高温度和最高压力升高而升高。

(3)采用序贯二次规划算法Original优化模式对工艺参数进行优化,经过优化后使得最高循环温度增加2.1℃,压缩机K-2进口温度减少0.3℃,使得液化的CO₂温度变为-55.97℃,焓效率提高0.22%,比功提高0.48%。

参 考 文 献

- [1] 罗若尹, 王博, 甘智华, 等. 真空完全丧失下LNG罐式集装箱的储存规律研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(8): 1930-1935.
Luo Ruoyin, Wang Bo, Gan Zhihua, et al. Research on storage law of LNG tank container with complete vacuum loss [J]. Chinese Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(8): 1930-1935.
- [2] 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[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 721-729.
Wu Yi, Li Ran, Zhang Dandi. The development trend of LNG receiving station and efficiency improve thinking [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2024, 43(7): 721-729.
- [3] 2040年全球LNG需求将猛增50%[J]. 中外能源, 2024, 29(6): 103.
Global LNG demand will increase by 50% by 2040 [J]. China & Foreign Energy, 2019, 29(6): 103.
- [4] 宁静红, 王宁霞, 王润霞. 基于LNG冷能与太阳能驱动的ORC系统性能分析[J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(2): 168-173.
Ning Jinghong, Wang Ningxia, Wang Runxia. Performance analysis of ORC system based on LNG cold energy and solar energy drive [J]. Low Carbon Science and Chemical Industry, 2023, 48(2): 168-173.
- [5] 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. Seawater desalination with LNG cold energy hydrate and cold-electricity co-generation system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(6): 1452-1458.
- [6] 薛振乾, 谢祥, 马浩铭, 等. CO₂捕集、利用和封存在能源行业的应用: 全球案例分析和启示[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(1): 14-21.
Xue Zhenqian, Xie Xiang, Ma Haoming, et al. CO₂ capture, utilization and storage in the energy industry: global case studies and implications [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2024, 43(1): 14-21.
- [7] 冉武平, 张永太, 艾贤臣, 等. 工业固体废弃物矿化封存CO₂研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6718-6727.
Ran Wuping, Zhang Yongtai, Ai Xianchen, et al. Research review on CO₂ storage by mineralization of industrial solid waste [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6718-6727.
- [8] 陈久弘, 王毅, 王恺华, 等. 二氧化碳捕集用吸附分离技术及其吸附材料研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(5): 62-70.
Chen Jiuhong, Wang Yi, Wang Kaihua, et al. Research progress of adsorption separation technology and adsorption materials for carbon dioxide capture [J]. Low Carbon Science and Chemistry, 2023, 48

- (5): 62-70.
- [9] Sun H, Zhu H, Liu F, et al. Simulation and optimization of a novel Rankine power cycle for recovering cold energy from liquefied natural gas using a mixed working fluid [J]. Energy, 2014, 70: 317-324.
- [10] 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 Fei'er, Chen Yu, Ju Yonglin. Research progress of low temperature power cycle based on LNG cold energy [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 60-68, 80.
- [11] 黄美斌, 林文胜, 贺红明, 等. LNG 冷能用于 CO₂ 跨临界朗肯循环和 CO₂ 液化回收[J]. 低温与超导, 2009, 37(4): 17-21.
Huang Meibin, Lin Wensheng, He Hongming, et al. Application of LNG cold energy in CO₂ transcritical Rankine cycle and CO₂ liquefaction recovery [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 37(4): 17-21.
- [12] 刘梅梅, 张引弟, 薛鹏, 等. LNG 冷能用于朗肯循环和 CO₂ 液化新工艺[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(4): 43-49.
Liu Meimei, Zhang Yindi, Xue Peng, et al. Application of LNG cold energy to rankine cycle and new CO₂ liquefaction process [J]. Oil & Gas Chemical Industry, 2019, 48(4): 43-49.
- [13] 熊永强, 华贲. 利用液化天然气冷能捕集 CO₂ 的动力系统集成[J]. 化工学报, 2010, 61(12): 3142-3148.
Xiong Yongqiang, Hua Ben. Integration of power system using cold energy of liquefied natural gas to capture CO₂[J]. Journal of Chemical Engineering, 2010, 61(12): 3142-3148.
- [14] 曹兴起, 赵晖, 杨卫卫, 等. 综合利用低品位余热与 LNG 冷能的复合循环系统[J]. 热力发电, 2014, 43(12): 49-55.
Cao Xingqi, Zhao Hui, Yang Weiwei, et al. Composite cycle system of comprehensive utilization of low grade waste heat and LNG cold energy [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(12): 49-55.
- [15] 杨富斌, 董小瑞, 王震, 等. 发动机两级有机朗肯循环尾气余热回收系统的研究[J]. 车用发动机, 2013(5): 27-32.
Yang Fubin, Dong Xiaorui, Wang Zhen, et al. Research on exhaust heat recovery system of engine two-stage organic rankine cycle [J]. Automotive Engine, 2013(5): 27-32.
- [16] Choi I, Lee S, Seo Y, et al. Analysis and optimization of cascade Rankine cycle for liquefied natural gas cold energy recovery[J]. Energy, 2013, 61: 179-195.
- [17] 杨帆, 陈保东, 姜文全, 等. P-R 方程在天然气热物性计算中的应用研究[J]. 当代化工, 2013, 42(5): 649-650, 656.
Yang Fan, Chen Baodong, Jiang Wenquan, et al. P-R equation in the application of gas thermal physical property calculation study [J]. Journal of Modern Chemical Industry, 2013, 42(5): 649-650, 656.
- [18] 汪静, 张习文, 杨林军. 基于焓分析的 CO₂ 压缩液化能耗分析及新工艺研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4213-4223.
Wang Jing, Zhang Xiwen, Yang Linjun. Energy consumption analysis and new process of CO₂ compression liquefaction based on exergic analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4213-4223.
- [19] 贾军纪, 苏培林, 韦少义, 等. 序贯二次规划算法应用于聚丙烯分子量分布的解析 [J]. 计算机与应用化学, 2008, 25(11): 1342-1346.
Jia Junji, Su Peilin, Wei Shaoyi, et al. Molecular weight distribution analysis of polypropylene by sequential quadratic programming algorithm [J]. Computer & Applied Chemistry, 2008, 25(11): 1342-1346.
- [20] 李颖楠, 张引弟, 管奥成, 等. 煤炭地下气化采出气的脱碳工艺优化及能效分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9231-9237.
Li Yingnan, Zhang Yindi, Guan Aocheng, et al. Optimization of decarbonization process and energy efficiency analysis of produced gas from underground coal gasification [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9231-9237.