

文章编号:1671-6833(2026)05-0050-08

# 液化天然气冷能与地热能耦合梯级利用系统分析

屈会格<sup>1</sup>, 安春国<sup>1</sup>, 翟煤源<sup>1</sup>, 张井志<sup>2</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东大学 核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**为提升液化天然气(LNG)接收站冷能综合利用效率,以海南洋浦 LNG 接收站为研究对象,提出一种 LNG 冷能与地热能耦合梯级利用系统,旨在实现不同品位能量的阶梯式转化与利用。系统将 LNG 气化过程划分为 4 个温度阶段,分别匹配相应工况的朗肯循环进行余热回收发电。同时,引入地热蒸汽作为高温热源驱动朗肯循环,并在放热后回注地热储层,实现地热资源的可持续开发。在发电基础上,系统耦合蒸馏法海水淡化单元,利用朗肯循环后的余热进行海水淡化,实现冷热电联供。采用 HYSYS 软件对系统开展流程模拟,设定 LNG 进口温度为  $-162^{\circ}\text{C}$ 、气化压力为  $0.1\text{ MPa}$ ,地热蒸汽温度为  $115^{\circ}\text{C}$ 、压力为  $0.1\text{ MPa}$ ,冷却水温度为  $25^{\circ}\text{C}$ 。在模拟基础上,对各朗肯循环子系统及整体系统进行焓分析,评估能量利用效率与焓损分布。结果表明:系统净输出电功率为  $25\,372.1\text{ kW}$ ,淡水产量为  $2\,781.5\text{ kg/h}$ ,整体焓效率为  $47\%$ 。4 个温度阶段的朗肯循环发电量分别占总发电量的  $60.9\%$ 、 $23.2\%$ 、 $4.6\%$  及  $11.3\%$ 。焓损失分析显示,换热器为系统中主要的焓损源,其焓损失远高于压力设备,是能量损失最集中的环节。该系统通过朗肯循环实现地热与 LNG 冷能的高效耦合发电,不仅提升了能源综合利用效率,还有效缓解了 LNG 冷能直接排放对海洋环境造成的低温污染问题。

**关键词:** LNG 冷能; 地热能; 朗肯循环发电; HYSYS; 焓分析

中图分类号: TE09

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.05.004

随着经济的持续增长和对清洁能源的需求不断增加,液化天然气(liquefied natural gas, LNG)作为清洁、高效的能源在中国的地位愈发重要。在常压下, LNG 处于约  $-162^{\circ}\text{C}$  的低温液态,储存着大量冷能<sup>[1-3]</sup>。有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)能够高效利用 LNG 气化过程中释放的冷能,并将其转化为电能。

中国的地热能资源较丰富,尤其是水热型地热能资源,可采资源量折合  $1.25$  亿吨标准煤<sup>[4-5]</sup>。目前, LNG 冷能的主要应用方向包括发电、空气液化、海水淡化、食品冷冻、碳捕集以及与其他能源系统的集成<sup>[6]</sup>。例如,有研究提出将 LNG 冷能与低温能量储存系统(CES)集成,利用空气作为工作流体来储存冷能,这种系统可以有效回收 LNG 气化过程中的冷能,并将其储存为低温能量<sup>[7-8]</sup>。

此外, LNG 冷能也被用于船舶的综合能量利用系统,通过有机朗肯循环(ORC)等技术,与烟气余热回收相结合,实现能源高效利用并减少碳排放<sup>[9-11]</sup>。

现有研究鲜有将 LNG 冷能与地热进行综合利用,本文基于 HYSYS 软件设计了 LNG 冷能与地热能耦合梯级利用系统,主要包括单级朗肯循环模块、两级朗肯循环模块以及海水淡化模块,各模块经换热器串联构成整个系统。系统通过朗肯循环将地热能与冷能结合发电,梯级分配、合理利用不同品位的冷能,减少能量损失,创造经济价值。地热能采用回水型,即地热流股完成供热任务后会被重新注入地下,全部补充到地热储层中,这样能够减少地下水资源的浪费和地面沉降的风险,使得地热能的开采可以长期稳定进行。

收稿日期: 2026-05-13; 修订日期: 2026-07-04

基金项目: 山东省重点研发计划(2024TSGC0952)

作者简介: 屈会格(1988—),男,山东枣庄人,山东电力工程咨询院有限公司高级工程师,主要从事化石能源清洁高效发电、高效换热技术、冷能综合利用研究, E-mail: quhuige@sdepci.com。

通信作者: 张井志(1989—),男,山东枣庄人,山东大学教授,博士,博士生导师,主要从事能源与动力工程研究, E-mail: zhangjz@sdu.edu.cn。

引用本文: 屈会格, 安春国, 翟煤源, 等. 液化天然气冷能与地热能耦合梯级利用系统分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2026, 47(5): 50-57. [Qu Huige, An Chunguo, Zhai Meiyuan, et al. Analysis of the cascade utilization system of LNG cold energy and geothermal energy[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(5): 50-57.]

1 方案设计

1.1 系统设计

本文通过 Aspen HYSYS 进行建模,组分列表源自 HYSYS 数据库,物性分析选用 Peng-Robinson 状态方程,采用迭代法求解<sup>[12]</sup>。

搭建 LNG 冷能与地热能耦合梯级利用系统流程如图 1 所示。LNG 冷能依次应用于第一级、第二级、第三级和第四级朗肯循环进行发电,LNG 在换热器 H2 中发生液态向气态的转变并且温度变化大,直接与地热换热,并伴随较高温差,导致显著的烟损失,故第二级换热采用两级朗肯循环过渡。地热流股依次进入第四级、第二级朗肯循环,为循环工质提供热量,接着流向蒸发器 E,为海水淡化供热,然后通向第三级、第一级朗肯循环,为循环工质提供热量,最后再流回地下,补充地下水资源。

本研究参照海南洋浦 LNG 接收站,参考其接收能力为 300 万 t/a,所以模拟中流量设置约为 342.5 t/h。设定 LNG 进口温度为 -162 ℃、气化压力为 0.1 MPa,此流量下 LNG 释放出的冷量约  $2.8 \times 10^8$  kJ/h。本文参考范艳霞等<sup>[13]</sup>研究,其结果表明,放喷实验井口的井壁温度达到 118 ℃,又考虑到环境温度等因素的影响,本模拟将设地热流股进入换

热器的最初温度为 115 ℃,压力为 0.1 MPa,冷却水温度为 25 ℃。

1.2 朗肯循环

有机朗肯循是以乙烷、丙烷、乙烯、异戊烷等单一或混合的有机工质为媒介进行定压冷却、绝热压缩、定压加热、绝热膨胀 4 个基本过程的循环系统<sup>[14]</sup>。LNG 气化过程中的冷量传递给朗肯循环的工质,中介介质吸收海水热量后气化,通入膨胀机发电,利用原本流入海水中的冷能生产电能,符合绿色发展的要求,有效实现节能减排<sup>[15-16]</sup>。以图 1 第一级单级朗肯循环为例,LNG 在换热器 H1 中吸收循环工质的热能,部分天然气由液态转化成气态,吸收 LNG 冷量的液态循环工质 a1 经泵 P1 加压后进入换热器 H1-1 与热流股换热,吸收热量后气化,通入膨胀机 K1 做功后流向换热器 H1,以此构成一个循环。

在两级朗肯循环系统中,以图 1 第二级朗肯循环为例,低温 LNG 在换热器 H2 中吸收循环工质的热能转化为 LNG,两级朗肯循环的第一级朗肯循环的工质吸收 LNG 冷量成为液态,经泵 P2-1 加压后进入换热器 H2-1 与两级朗肯循环的第二级朗肯循环工作介质换热,吸收其热量后气化,通入膨胀机 K2-1 做功后流向换热器 H2,以此构成一个循环。

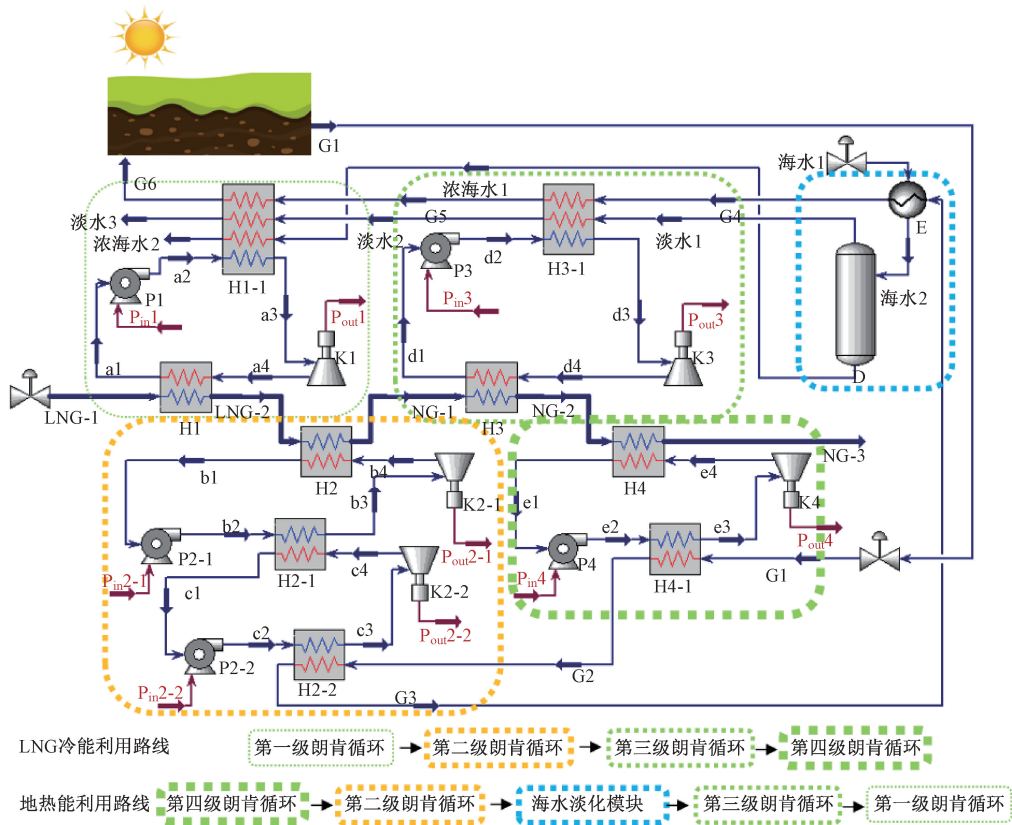


图 1 LNG 冷能与地热能耦合梯级利用系统流程图

Figure 1 Flowchart of LNG cold energy and geothermal energy step utilization system

换热器 H2-1 在两级朗肯循环的第一级朗肯循环中为蒸发器,在两级朗肯循环的第二级朗肯循环中为冷凝器。两级朗肯循环的第二级朗肯循环系统中,第二级混合工质在换热器 H2-1 中吸收两级朗肯循环的第一级循环工质的冷量转化为液态,经泵 P2-2 加压后进入换热器 H2-2 与热流股换热,吸收热量后气化,通入膨胀机 K2-2 做功后流向换热器 H2-1,以此构成一个循环。

工质在有机朗肯循环中发挥着关键作用,它直接决定着朗肯循环的换热性能和经济效益,除此之外,各流股在系统运行时的压力、温度等参数也受工质影响<sup>[17-18]</sup>。循环工质的选择应考虑环保性、稳定性和安全性,在此前提下对比换热性能及经济性等。朗肯循环往往采用非共沸混合物作为循环工质来提高系统的能源利用率,因为非共沸混合物的沸点范围宽,可以扩大热、冷源之间的温度差,并且不均匀的成分浓度能够使其在蒸发和凝结过程具有更好的换热效果<sup>[19-21]</sup>。以利用高品位冷能的第一级朗肯循环和第二级朗肯循环为例,对朗肯循环工质进行优化,混合循环工质的冷凝曲线与 LNG 吸热曲线匹配情况如图 2 所示。由图 2(a)对比可得,与 -162℃ ~ -150℃ 温度段 LNG 的换热效果由优到劣依次为混合工质  $n(\text{甲烷}):n(\text{异丁烷}):n(\text{乙烯})=0.2:0.2:0.6$ ,  $n(\text{甲烷}):n(\text{丙烷})=0.5:0.5$ ,  $n(\text{甲烷}):n(\text{异丁烷}):n(\text{乙烯})=0.2:0.4:0.4$ ,  $n(\text{甲烷}):n(\text{乙烷}):n(\text{异丁烷})=0.2:0.4:0.4$ ,  $n(\text{甲烷}):n(\text{丙烷}):n(\text{异丁烷})=0.2:0.4:0.4$ 。图 2(b)对比可得,与 -150℃ ~ -85℃ 温度段 LNG 的换热效果由优到劣依次为混合工质  $n(\text{甲烷}):n(\text{异丁烷}):n(\text{乙烯})=0.2:0.2:0.6$ ,  $n(\text{甲烷}):n(\text{异丁烷}):n(\text{乙烯})=0.3:0.3:0.4$ ,  $n(\text{甲烷}):n(\text{丙烷})=0.5:0.5$ ,  $n(\text{甲烷}):n(\text{异丁烷}):n(\text{丙烷})=0.2:0.2:0.6$ ,  $n(\text{甲烷}):n(\text{异丁烷})=0.5:0.5$ 。

### 1.3 海水淡化

海水淡化方法主要分为两类,一类是通过电化学去除杂质获得淡水,常见方式包括电渗析、反渗透等;另一类是通过加热蒸发实现水与盐的分离,如蒸馏法、多效蒸发法等,该类方法可充分利用系统余热,将地热应用于该方法,能够降低淡水生产的能源消耗,降低成本<sup>[5]</sup>。海水含盐量在 3.5% 左右,假设淡水不含盐,对海水淡化过程含盐量计算为

$$q_{\text{海, in}} \cdot S_1 = q_{\text{海, out}} \cdot S_2; \quad (1)$$

$$q_{\text{海, in}} = q_{\text{海, out}} + q_{\text{蒸发}} \quad (2)$$

式中:  $q_{\text{海, in}}$  表示进蒸发器的海水流量, kg/s;  $q_{\text{海, out}}$  表示出蒸发器的海水流量, kg/s;  $q_{\text{蒸发}}$  表示单位时间内

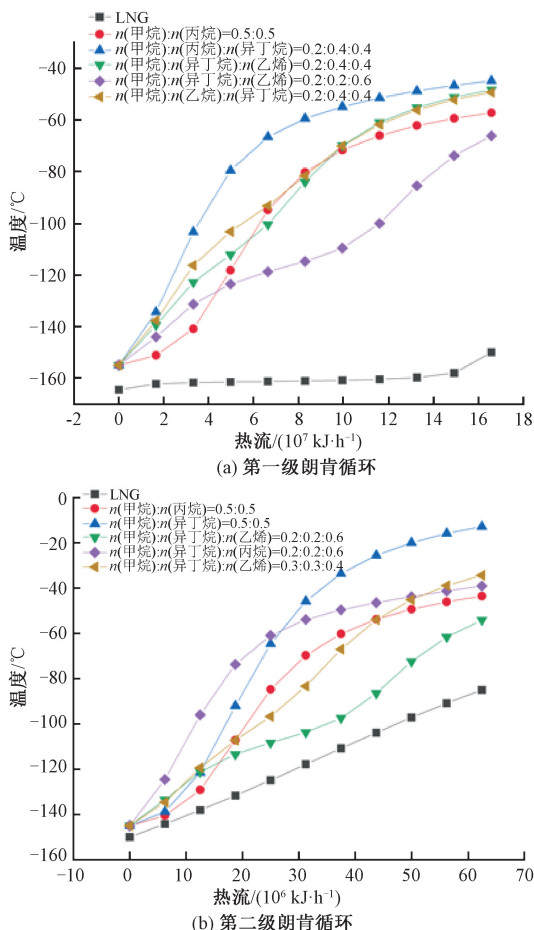


图 2 LNG 与循环工质对比图

Figure 2 Comparison of LNG and circulating working medium

海水蒸发量, kg/s;  $S_1$  为海水初始盐度;  $S_2$  为蒸馏后的海水盐度。

## 2 计算模型

本系统里面的核心 ORC 循环,与马新灵等<sup>[22]</sup>的模拟结果进行了对比验证,最大误差小于 3%。本研究采用焓分析法研究 LNG 冷能利用系统的热力性能。焓分析法是一种基于热力学第一定律和第二定律的能量分析方法,能够精确衡量能量的实际价值。在焓分析法中,能量品位的降低意味着焓值的减少。单位质量工质在稳定流动过程中由任意状态变化到与环境相平衡的状态时所能做出的最大有用功是单位质量稳定流动工质的焓,即比焓<sup>[23]</sup>,可用式(3)计算:

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

式中:  $e$  为单位质量稳定流动工质的焓, kJ/kg;  $h$ 、 $h_0$  分别为单位质量工质的进、出口焓, kJ/kg;  $T_0$  为工质入口温度, K;  $s$ 、 $s_0$  分别为单位质量工质的进、出口熵, kJ/(kg·K)。

对于系统中任一设备 X 的焓损失  $E_{D,X}$  可计算为

$$E_{D,X}=E_{F,X}-E_{P,X}\circ$$

(4)

式中: $E_{F,X}$ 、 $E_{P,X}$  分别为付出焓、收益焓,kW。

具体针对泵的焓损失  $E_{D,P}$  可计算为

$$E_{D,P}=W_p-E_{in}-E_{out}\circ$$

(5)

式中: $W_p$  为泵的功耗,kW; $E_{in}$  为泵进口物料焓,kW;  
 $E_{out}$  为泵出口物料焓,kW。

具体针对膨胀机的焓损失  $E_{D,K}$  可计算为

$$E_{D,K}=E_{in}-E_{out}-W_K\circ$$

(6)

式中: $E_{in}$  为膨胀机进口物料焓,kW; $E_{out}$  为膨胀机出口物料焓,kW; $W_K$  为膨胀发电功,kW。

具体针对换热器的焓损失  $E_{D,H}$  可计算为

$$E_{D,H}=(E_{in1}-E_{out1})-(E_{out2}-E_{in2})\circ$$

(7)

式中: $E_{in1}$  为热流股进口物料焓,kW; $E_{out1}$  为热流股出口物料焓,kW; $E_{in2}$  为冷流股进口物料焓,kW; $E_{out2}$  为冷流股出口物料焓,kW。

以本系统第一级 ORC 为例,对于一级朗肯循环的焓损失  $E_{D,1}$  及烟效率  $\eta_1$  可计算为

$$E_{D,1}=E_{D,H1}+E_{D,H1-1}+E_{D,P1}+E_{D,K1};$$

(8)

$$\eta_1=(W_{K1}-W_{P1})/(E_{LNG-1}-E_{LNG-2})\times 100\%。$$

(9)

式中: $E_{LNG-1}$  为流股 LNG-1 物料焓,kW; $E_{LNG-2}$  为流股 LNG-2 物料焓,kW。

以本系统第二级 ORC 为例,对于两级朗肯循环的焓损失  $E_{D,2}$  及烟效率  $\eta_2$  可计算为

$$E_{D,2}=E_{D,H2}+E_{D,H2-1}+E_{D,H2-2}+E_{D,P2-1}+E_{D,P2-2}+E_{D,K2-1}+E_{D,K2-2};$$

(10)

$$\eta_2=[(W_{K2-1}-W_{P2-1}+W_{K2-2}-W_{P2-2})/(E_{LNG-2}-E_{NG-1})]\times 100\%。$$

(11)

式中: $E_{LNG-2}$  为流股 LNG-2 物料焓,kW; $E_{NG-1}$  为流股 NG-1 物料焓,kW。

对于系统中任一设备 X 的烟效率  $\eta_X$  可计算为

$$\eta_X=(E_{P,X}/E_{F,X})\times 100\%。$$

(12)

对于系统总烟效率  $\eta$  可计算为

$$\eta=(E_p/E_F)\times 100\%。$$

(13)

系统净产电量  $P_{\text{净}}$  可表示为

$$P_{\text{净}}=P_{\text{out,总}}-P_{\text{in,总}}\circ$$

(14)

式中: $P_{\text{out,总}}$  为系统总输出电量,kW; $P_{\text{in,总}}$  为系统总输入电量,kW。

3 结果讨论

本文采用 HYSYS 软件模拟系统运行,对 LNG 冷能进行梯级分配,具体温度阶段为第一级-162 ℃ ~ -150 ℃、第二级-150 ℃ ~ -85 ℃、第三级-85 ℃ ~ -65 ℃、第四级-65 ℃ ~ 15 ℃。选择优化工质运行系统,得到表 1 中各物料流股和能量流股参数。

第一级 ORC 为 LNG 大量气化阶段,该过程会释放高品位冷能,仅依靠地热流股余热不足以高效利用此冷能,故而将蒸馏法所得高温废水和淡水引入换热器 H1-1 热流进口,提高能量利用率,产电量可达 16 328.72 kW。第二级 ORC 换热器 H2 中残留的 LNG 气化,并且此阶段温差较大,所以设计

表 1 物料流股参数

Table 1 Logistics flow stock parameter

| 物料及编号 | 温度/℃   | 流量/(kg·h <sup>-1</sup> ) | 物料及编号 | 温度/℃            | 流量/(kg·h <sup>-1</sup> ) |
|-------|--------|--------------------------|-------|-----------------|--------------------------|
| LNG-1 | -162.0 | 342 500.0                | G1    | 115.0           | 150 000.0                |
| LNG-2 | -150.0 | 342 500.0                | G2    | 99.6(汽相分率 0.82) | 150 000.0                |
| NG-1  | -85.0  | 342 500.0                | G3    | 99.6(汽相分率 0.58) | 150 000.0                |
| NG-2  | -65.0  | 342 500.0                | G4    | 99.6(汽相分率 0.53) | 150 000.0                |
| NG-3  | 15.0   | 342 500.0                | G5    | 99.6(汽相分率 0.49) | 150 000.0                |
| a1    | -155.0 | 304 816.9                | G6    | 31.1            | 150 000.0                |
| a2    | -152.8 | 304 816.9                | d1    | -65.0           | 29 695.8                 |
| a3    | 70.0   | 304 816.9                | d2    | -63.2           | 29 695.8                 |
| a4    | -66.3  | 304 816.9                | d3    | 89.0            | 29 695.8                 |
| b1    | -145.0 | 113 193.8                | d4    | -46.2           | 29 695.8                 |
| b2    | -144.0 | 113 193.8                | e1    | -4.3            | 197 835.0                |
| b3    | 30.0   | 113 193.8                | e2    | -3.8            | 197 835.0                |
| b4    | -54.1  | 113 193.8                | e3    | 92.7            | 197 835.0                |
| c1    | 31.0   | 237 376.7                | e4    | 25.0            | 197 835.0                |
| c2    | 33.0   | 237 376.7                | 浓海水 1 | 97.8            | 27 218.5                 |
| c3    | 72.9   | 237 376.7                | 浓海水 2 | 32.0            | 27 218.5                 |
| c4    | 31.0   | 237 376.7                | 淡水 1  | 97.8            | 2 781.5                  |
| 海水 1  | 25.0   | 30 000.0                 | 淡水 2  | 96.7            | 2 781.5                  |
| 海水 2  | 97.8   | 30 000.0                 | 淡水 3  | 32.0            | 2 781.5                  |

为两级朗肯循环。两级朗肯循环能够通过两个换热器使得热量的传递更为渐进和细致,降低了能量损失,提高了系统的炯效率。

-162 ℃ 的 LNG 在第一级换热器 H1 中与循环工质 a(组分为  $n(\text{甲烷}):n(\text{异丁烷}):n(\text{乙烯})=0.2:0.2:0.6$ ) 进行换热,然后流向第二级换热器 H2 与循环工质 b(组分为  $n(\text{甲烷}):n(\text{异丁烷}):n(\text{乙烯})=0.2:0.2:0.6$ ) 进行换热,在第三级换热器 H3 中与循环工质 d(组分为丙烷)进行换热,接着进入第四级换热器 H4 与循环工质 e(组分为  $n(\text{丙烷}):n(\text{正丁烷}):n(\text{Refrig-11})=0.2:0.3:0.5$ ,其中 Refrig-11,简称 R11,是一种早期广泛使用的高温制冷剂,化学名称为一氟三氯甲烷)进行换热,最终出口温度 15 ℃。参与 LNG 第二级换热(两级朗肯循环系统)的第二级循环工质 c(组分为丙烷)在换热器 H2-1 中吸收循环工质 b 的冷量发生液化,经泵 P2-2 加压后通入换热器 H2-2 中吸收来自地热流股的热能发生气化,再通入膨胀机 K2-2 发电。

地热流股 G1 首先进入第四级朗肯循环为循环工质 e 提供热量,接着流向第二级朗肯循环为循环工质 c 提供热量,然后进入蒸发器 E 为海水淡化供热,继而依次通向第三级、第一级朗肯循环为循环工质 d、a 提供热量,最终回灌地下。利用地热能进行蒸馏法海水淡化,可得淡水 2 781.5 kg/h,出口温度为 32 ℃。除此之外,蒸馏法所得高温水蒸气依次流向换热器 H3-1 和 H1-1 放热液化,浓海水直接流向换热器 H1-1 参与第一级朗肯循环发电。为衡量系统能量可用性,本文计算了朗肯循环中关键设备的炯损和功率,其净产电量 25 372.1 kW,如表 2 所示,从而更好地掌握系统能量损失分布情况。

从表 2 中数据可以看出,加压泵的炯损普遍较低,因为泵中流股温差较小,加压前后变化不大。膨

表 2 各设备炯损及功率

| Table 2 Exergy destruction and power of each device |         |          |      |          |
|-----------------------------------------------------|---------|----------|------|----------|
| 设备                                                  | 烟损/kW   | 功率/kW    | 设备   | 烟损/kW    |
| P1                                                  | 39.4    | 878.2    | H1   | 32 878.7 |
| P2-1                                                | 2.4     | 139.5    | H1-1 | 24 155.8 |
| P2-2                                                | 1.8     | 291.3    | H2   | 3 331.4  |
| P3                                                  | 0.6     | 54.3     | H2-1 | 8 323.0  |
| P4                                                  | 0.1     | 65.5     | H2-2 | 2 563.0  |
| K1                                                  | 9 040.2 | 16 328.7 | H3   | 502.2    |
| K2-1                                                | 1 578.2 | 4 322.0  | H3-1 | 1 182.8  |
| K2-2                                                | 216.9   | 1 890.6  | H4   | 2 288.0  |
| K3                                                  | 583.3   | 1 229.7  | H4-1 | 2 638.8  |
| K4                                                  | 364.1   | 3 029.9  | E    | 41 521.1 |

胀机 K1 炯损相对较高,这是因为第一级朗肯循环利用的冷能是 LNG 最低温的阶段,循环所利用的地热能虽已在前面的循环中消耗了一部分,但与换热器 H1-1 进行热交换时仍处于高温,并有极小部分气态在此处液化,膨胀机前后温差较大,导致炯损较高;第一级朗肯循环中换热器 H1 和 H1-1 的炯损也高。除此之外,海水淡化涉及的换热器 E 炯损最高,这是因为该换热器中部分液态水蒸发为气态存在相变过程,吸热曲线与对应地热流股的放热曲线不贴合,运行时存在大量热能损失,如图 3 所示。各级朗肯循环中设备炯损情况如表 3 所示。

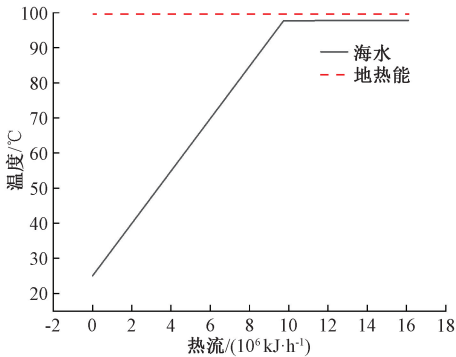


图 3 换热器 E 中冷热流体传热曲线

Figure 3 Heat transfer curve of cold and hot fluids in heat exchange E

表 3 各级朗肯循环中设备炯损情况

| Table 3 Exergy destruction of equipment in Rankine cycle |            |            |            |            |           |
|----------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 设备                                                       | 冷凝器        | 膨胀机        | 蒸发器        | 加压泵        | 炯损/<br>kW |
|                                                          | 炯损<br>占比/% | 炯损<br>占比/% | 炯损<br>占比/% | 炯损<br>占比/% |           |
| 第一级                                                      | 50         | 14         | 37         | 0          | 66 114.1  |
| 第二级-1                                                    | 25         | 12         | 63         | 0          | 13 235.0  |
| 第二级-2                                                    | 75         | 2          | 23         | 0          | 11 104.7  |
| 第三级                                                      | 22         | 26         | 52         | 0          | 2 268.9   |
| 第四级                                                      | 43         | 7          | 50         | 0          | 5 291.0   |

本研究对比了各级朗肯循环中设备炯损及其占比,换热器炯损在所有设备中尤为突出,主要原因包括:传热过程中冷热流体间温差较大,导致不可逆损失增加;工质相变与传热速率不匹配,部分工质未完成相变便离开;流体在通道内流动阻力较大,引发流动炯损。后续可通过优化换热器结构、匹配工质、减小传热温差等方式降低炯损。朗肯循环中加压泵炯损占比最小,因其对液态工质加压时温度变化小且液体可压缩性低。对比膨胀机炯损发现,第三级朗肯循环中膨胀机占比最高,一方面因其接收 LNG 冷能较少(分别为第一、二、四级的 8%、22% 和 24%),换热器炯损较小,整体循环炯损降低;另一方面因其膨胀机进出口温差大,膨胀机炯损及占比均升高。

两级朗肯循环中的第二级膨胀机焓损占比远低于其他 ORC,因其工质 b2 高压蒸汽进出膨胀机前后压力变化小,能量损失少;同时该级工质选择受第一级工质和地热流股组成限制,混合工质配比有限,换热器冷热源匹配较差,换热器焓损更高、占比显著提升。两级朗肯循环中的第二级膨胀机焓损占比最低。

表 4 展示了各模块换热器焓损占系统所有换热器焓损总和的比例及各模块焓损占系统总焓损的比例。结果显示,无论是换热器焓损占比还是模块焓损占比,第一级 ORC 均居首位,其后依次为海水淡化模块、第二级 ORC、第四级 ORC 和第三级 ORC。换热器焓损失远超膨胀机和加压泵等设备,是能量回收过程的核心,对循环焓损影响最大,为主要能量损失源,主要因换热过程中冷热流股温差导致不可逆损失,温差越大能量损失占比越高。各级朗肯循环中换热设备占循环总焓损的比例依次为 87%、88%、98%、74%及 93%。

表 4 各模块中焓损情况

| Table 4 Exergy destruction in each module % |         |       |
|---------------------------------------------|---------|-------|
| 流程                                          | 换热器焓损占比 | 总焓损占比 |
| 第一级 ORC                                     | 47.8    | 14    |
| 第二级 ORC                                     | 11.9    | 12    |
| 第三级 ORC                                     | 75.0    | 2     |
| 第四级 ORC                                     | 22.0    | 26    |
| 海水淡化                                        | 43.0    | 7     |

图 4 为系统总焓流示意图,LNG 冷能与地热能耦合梯级利用系统的总付出焓包括 LNG 冷能、用电设备输入电能和地热能,收益焓以朗肯循环产电和海水淡化产水的形式输出,损失焓包括换热过程产生的热损失和电力使用过程中产生的电损失,二者均不可避免。

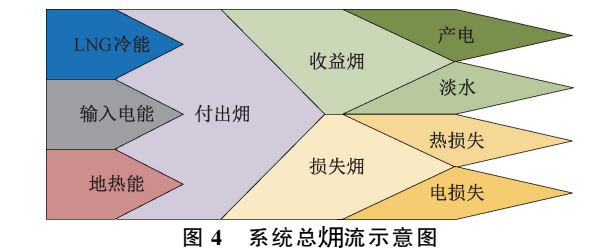


Figure 4 Exergy flow diagram of the system

LNG 冷能在系统中被分为 4 个阶段进行梯级利用,第一级 ORC、第二级 ORC、第三级 ORC 及第四级 ORC 所产电能分别占系统总输出电能的 60.9%、23.2%、4.6%及 11.3%。第一级 ORC 和第二级 ORC 产电量较高,是因为二者处于 LNG 高品位冷能利用阶段,涉及 LNG 气化过程,并且第一级

ORC 中 LNG 气化率达到 94.2%。第四级 ORC 作为地热利用的第一阶段,直接接触井口钻取的地热蒸汽,此阶段有 18.2%的蒸汽液化释放热量,因此产电量高于第三级 ORC。利用地热进行海水淡化可产出淡水 2 781.5 kg/h,将蒸气通向第三级 ORC 换热器 H3-1 中放热液化,之后为第一级 ORC 供热,出口温度为 32 ℃。计算可得,系统焓效率达到 47%,能量回收利用效果良好。

4 结论

(1)通过朗肯循环将地热能与冷能结合发电,合理利用不同品位的冷能,削弱了对海洋环境造成的低温污染,并且创造了一定的经济价值。地热蒸汽在系统中分段利用,完成供热任务后全部返回地热储层,大大降低了地下水资源的浪费和地面沉降风险,能维持地下热储层的稳定,确保地热能可持续利用。

(2)对系统进行分析可得,系统净产电量 25 372.1 kW,生产淡水 2 781.5 kg/h,焓效率达到 47%。第一级 ORC、第二级 ORC、第三级 ORC 及第四级 ORC 所产电能分别占系统总输出电能的 60.9%、23.2%、4.6%及 11.3%。

(3)换热器在所有种类设备中焓损失最大,并且远远超过压力设备,是系统中最主要的焓损源。第一级 ORC、第二级 ORC 的第一级朗肯循环、第二级 ORC 的第二级朗肯循环、第三级 ORC 及第四级 ORC 中,换热设备占循环总焓损失的比例依次为 87%、88%、98%、74%及 93%。因此,提高朗肯循环焓效率可着眼于降低换热器焓损。

(4)各级朗肯循环中加压泵焓损最小,因为泵对加压前后工质的温度变化小且液体的可压缩性很低。对比膨胀机焓损在循环总焓损占比,第三级朗肯循环的膨胀机焓损占比最高,第二级 ORC (两级朗肯循环)的第二级朗肯循环的膨胀机焓损占比最低,这与膨胀机释放能量前后压差及所在循环换热器焓损有关。

本研究虽实现了 LNG 冷能与地热能的高效耦合梯级利用,但仍存在一定局限,如换热器焓损较高。未来可针对换热器的结构设计、工质匹配及换热工艺开展深入研究,降低其焓损。

参考文献:

[1] Xie Xuguang. Integrated development of LNG import and new power systems in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(8): 869-876. [谢旭光. 中

- 国 LNG 进口产业与新型电力系统的融合发展[J]. 油气储运, 2024, 43(8): 869-876. ]
- [2] Gong Chengzhu, Jia Weidong, Wu Desheng, et al. Optimization of the development prospect of gas power industry under the goal of carbon neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 144-151. [龚承柱, 贾维东, 吴德胜, 等. 碳中和目标下天然气发电产业发展前景优化[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 144-151. ]
- [3] Xu Hongyu, Li Ruifan, Xu Cheng, et al. Thermodynamic analysis and optimization of semi-closed CO<sub>2</sub> cycle power generation system integrated with LNG cold energy for air separation process[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(8): 1307-1316. [许宏宇, 李瑞凡, 许诚, 等. 集成 LNG 冷能空分的半闭式 CO<sub>2</sub> 循环发电系统热力学分析与优化[J]. 动力工程学报, 2024, 44(8): 1307-1316. ]
- [4] Li Nana, Tao Cheng, Kong Yanlong, et al. Status and research progress of geothermal power generation development and utilization[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 1-11. [李娜娜, 陶诚, 孔彦龙, 等. 全球地热发电现状与研究进展[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 1-11. ]
- [5] Xu Tianfu, Jiang Zhenjiao, Yuan Yilong. Research status and prospects of middle and deep geothermal resources exploitation and utilization[J]. China Basic Science, 2023, 25(3): 11-22. [许天福, 姜振蛟, 袁益龙. 中深部地热资源开发利用研究现状与展望[J]. 中国基础科学, 2023, 25(3): 11-22. ]
- [6] Fan Yi, Wang Jiajie, Li Yesai, et al. The utilization of LNG cold energy: current status, challenges, and future prospects[J]. Frontiers in Sustainable Development, 2025, 5(2): 7-12.
- [7] Lee I, Park J, You Fengqi, et al. A novel cryogenic energy storage system with LNG direct expansion regasification: design, energy optimization, and exergy analysis[J]. Energy, 2019, 173: 691-705.
- [8] Lee I, Park J, Moon I. Conceptual design and exergy analysis of combined cryogenic energy storage and LNG regasification processes: cold and power integration[J]. Energy, 2017, 140: 106-115.
- [9] Xia Minjie, Yao Shouguang, Li Chen, et al. Exergy, energy, economy analysis and multi-objective optimization of a comprehensive energy utilization system for LNG-powered ships based on zero-carbon emissions[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 53: 103783.
- [10] Xiao Xiu, Xu Xiaoping, Wang Zhe, et al. Research on a novel combined cooling and power scheme for LNG-powered ship[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(3): 592.
- [11] Dong Kangyin, Li Jiaman, Zhang Haoran. LNG point supply of villages and towns in China: challenges and countermeasures[J]. Applied Energy, 2023, 334: 120741.
- [12] Wang Shunxue, Ding Huan, Bi Haisheng. Performance comparison and analysis of ORVs in the LNG receiving station[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2023, 50(2): 273-277. [王顺学, 丁欢, 毕海胜. LNG 接收站内不同类型的 ORV 性能对比与分析[J]. 化工机械, 2023, 50(2): 273-277. ]
- [13] Fan Yanxia, Li Hailong, Zhang Junlong, et al. Research on the *in-situ* stress state and the geothermal-controlling structure of the Huangshadong Geothermal Field in the Southeast Coast of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(10): 3944-3961. [范艳霞, 李海龙, 张军龙, 等. 东南沿海黄沙洞地热田地应力与控热构造研究[J]. 地球物理学报, 2022, 65(10): 3944-3961. ]
- [14] Yang Hui, Zhang Haoxing, Dong Bingyan, et al. Feasibility study of LNG cold energy used as cold source of district cooling system[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48(3): 39-44. [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[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(3): 39-44. ]
- [15] Liu Yang. Improvement and application of trial operation technology for LNG receiving terminal[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1383-1389. [刘洋. LNG 接收站试运投产工艺改进及应用[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1383-1389. ]
- [16] Peng Chao. Modification and application of liquid nitrogen system in LNG terminal[J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(3): 69-74. [彭超. LNG 接收站液氮系统改造及应用[J]. 天然气与石油, 2024, 42(3): 69-74. ]
- [17] Wu Yi, Li Ran, Zhang Dandi. Discussion on development trends and utilization efficiency enhancement of LNG terminals in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(7): 721-729. [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. ]
- [18] Hu Suyang, Qin Feng, Liu Tong, et al. Research on ORC mixed working mediums based on LNG cold energy power generation[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2022, 50(9): 101-106. [胡苏阳, 秦锋, 刘同, 等. 基于 LNG 冷能发电的 ORC 混合工质研究[J]. 低温与超导, 2022, 50(9): 101-106. ]
- [19] Xu Wendong, Peng Xi, Yan Wanbo. Research progress in LNG cold energy utilization technology[J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(3): 75-85. [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. ]
- [20] Guo Yinglun, Xi Fuqiang, Su Ruizhi, et al. TRCC series

system based on LNG cold energy and fuel cell waste heat utilization[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2019, 49(5): 52–57. [郭英伦, 郗富强, 苏瑞智, 等. 基于 LNG 冷焔与燃料电池余热利用的 TRCC 串联系统[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(5): 52–57.]

[21] Wang Hanbing, Liu Xiaohui, Tian Minli, et al. Thermodynamic characteristic analysis of power and cooling system driven by SOFC[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2019, 49(5): 64–71. [王寒冰, 刘晓辉, 田民丽, 等. 基于 SOFC 的功冷联供系统热力学特性分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(5): 64–71.]

[22] Ma Xinling, Meng Xiangrui, Wei Xinli, et al. Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2011, 32(4): 94–98. [马新灵, 孟祥睿, 魏新利, 等. 有机朗肯循环的热力学分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(4): 94–98.]

[23] 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]. CIESC Journal, 2024, 75(9): 3297–3309. [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.]

## Analysis of the Cascade Utilization System of LNG Cold Energy and Geothermal Energy

QU Huige<sup>1</sup>, AN Chunguo<sup>1</sup>, ZHAI Meiyuan<sup>1</sup>, ZHANG Jingzhi<sup>2</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., Jinan 250013, China; 2. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** To enhance the comprehensive utilization efficiency of cold energy at liquefied natural gas (LNG) receiving terminals, this study focuses on the Hainan Yangpu LNG receiving station and a cascade utilization system that integrates LNG cold energy with geothermal energy was proposed. The system aimed to achieve stepwise conversion and utilization of energy at different quality levels. The LNG gasification process was divided into four temperature stages, each matched with a Rankine cycle operating under corresponding conditions to recover waste heat for power generation. Meanwhile, geothermal steam was introduced as a high-temperature heat source to drive the Rankine cycles, and after heat release, it was reinjected into the geothermal reservoir to ensure sustainable geothermal resource development. In addition to power generation, the system integrated a distillation-based seawater desalination unit, utilizing waste heat from the Rankine cycles for seawater desalination, thereby enabling combined cooling, heating, and power generation. Process simulation of the system was conducted using HYSYS software, with an LNG inlet temperature of  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a gasification pressure of  $0.1\text{ MPa}$ , a geothermal steam temperature of  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a pressure of  $0.1\text{ MPa}$ , and a cooling water temperature of  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Based on the simulation, exergy analysis was performed for each Rankine cycle subsystem and the overall system to evaluate energy utilization efficiency and exergy loss distribution. The results indicated that the system achieved a net power output of  $25\,372.1\text{ kW}$ , a freshwater production rate of  $2\,781.5\text{ kg/h}$ , and an overall exergy efficiency of  $47\%$ . The power generation contributions of the four temperature-stage Rankine cycles accounted for  $60.9\%$ ,  $23.2\%$ ,  $4.6\%$ , and  $11.3\%$  of the total power output, respectively. Exergy loss analysis revealed that heat exchangers were the primary source of exergy loss in the system, with exergy losses significantly higher than those of pressure equipment, making them the most concentrated points of energy loss. By coupling geothermal energy with LNG cold energy through Rankine cycles for efficient power generation, the system not only improved overall energy utilization efficiency but also effectively mitigated the low-temperature marine environmental pollution caused by the direct discharge of LNG cold energy.

**Keywords:** LNG cold energy; geothermal energy; Rankine cycle power generation; HYSYS; exergy analysis