

回热式有机朗肯循环冷能发电系统 变热源温度实验研究

王峰, 高文忠, 张桂臣, 王晓中, 李根

(上海海事大学商船学院, 201306, 上海)

摘要: 针对当前开展液化天然气冷能发电的实验研究难度大且实验参考的数据少等问题, 提出一种以 R290 为循环工质、液氮为冷源的回热式有机朗肯循环(ORC)冷能发电实验系统。通过实验研究, 探索热源温度在 20~55℃ 范围内, 机械输出功、发电量、功电转换效率、热效率和冷能利用率等重要性能参数随热源温度变化的规律, 并与常规 ORC 冷能发电系统进行比较。结果表明: 在一定范围内, 热源温度的增加有利于提升 ORC 冷能发电系统的总体性能, 且系统存在一个与冷源匹配的最佳热源温度; 当冷热源处于最佳匹配时, 回热循环对 ORC 冷能发电系统的机械输出功、发电量、热效率和冷能利用率等参量有明显的提升, 分别增加了 26.2%、12.7%、16.4% 和 16.6%, 但功电转换效率出现降低, 下降了 10.7%。这些规律将对系统运行时关键参数的调整和控制以及优化设计提供一定的参考依据。

关键词: 冷能发电; 有机朗肯循环; 热源温度; 回热循环

中图分类号: TK01+9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202208005 **文章编号:** 0253-987X(2022)08-0043-08



OSID 码

Experimental Study on Cold Energy Power Generation System under Variable Heat Source Temperatures Based on Regenerative ORC

WANG Feng, GAO Wenzhong, ZHANG Guichen, WANG Xiaozhong, LI Gen

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Considering difficulties in conducting experiments on LNG cold energy power generation and lack of adequate experimental data for reference, this paper proposes a regenerative ORC experimental system with R290 as the working fluid and liquid nitrogen as the heat sink. Through experimental research, the variations of critical performance parameters such as system output power, energy output, power-electricity conversion efficiency, thermal efficiency, and cold energy utilization efficiency with the heat source temperature in the range of 20—55℃ were explored and compared with those in the conventional ORC system. The results show that the increase of the heat source temperature to a certain extent is beneficial to the overall performance of the ORC cold energy power generation system, and there exists an optimal heat source temperature for the heat sink; when the heat source and heat sink were in the optimal match, the regenerative cycle significantly increased the system output power, energy output, thermal efficiency and cold energy utilization efficiency of the ORC cold energy power generation system, by 26.2%, 12.7%, 16.4% and 16.6%, respectively, but reduced the power-electricity

收稿日期: 2022-02-24。 作者简介: 王峰(1984—),男,博士生;高文忠(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779136);上海市科学技术委员会资助项目(18040501800)。

网络出版时间: 2022-04-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220412.1253.002.html>

conversion efficiency by 10.7%. These rules will provide a reference basis for optimizing the design, and adjusting and controlling the key parameters during system operation.

Keywords: cold energy power generation; ORC; heat source temperature; regenerative cycle

在世界各国能源短缺和环境污染等问题日益严峻的背景下,开发清洁能源并提高能源利用效率已成为人类社会普遍关注的话题^[1]。液化天然气(LNG)作为清洁能源的一种,由于其较高的燃耗效率、温室气体和 NO_x 排放量低、且几乎不产生 SO_x 等特点近年来在一次能源消费中的比例正逐渐增大^[2]。LNG 由液态(-162°C)转化为常温气态时,将释放冷能约 830 kJ/kg,然而这部分冷能往往得不到有效利用^[3-4]。因此,如何回收利用这部分冷能,将对优化能源结构,提高能源利用率,并且为实现我国“双碳”目标的宏观愿景有着重要的社会和经济意义。

有机朗肯循环(ORC)不仅能有效实现高品位冷能到高品位电能的转化^[5-6],还具结构简单、操作成本低、环境友好、可靠性高、运行方便和发电效率高等优点^[7-9],近年来正逐渐成为研究的热点。而 ORC 发电系统热源的选择至关重要,它会对系统多个参数产生重要影响^[10-11],同时也是影响整个系统性能的重要外部变量之一^[12-13]。鲁广栋等^[14-16]研究了热源温度对 ORC 发电系统性能的影响,得出的结论一致,即系统热效率和净输出功随热源温度的升高而升高。Jang 等^[17]建立以 R245fa 为工质的 ORC 发电系统,结果表明热源温度和膨胀机进出口压差是影响发电系统电力输出的关键因素。韩江涛等^[12]以 R245fa 为工质,导热油为热源建立实验平台,研究表明在同一热源流量下,热源温度的增加有利于提升膨胀功、系统净功、热效率和效率,且对系统各主要设备的损率较小。Unamba 等^[18]以 $120\sim 140^\circ\text{C}$ 的导热油为热源,以 R245fa 为工作流体建立了 1 kW 的有机朗肯循环,通过分析法评估系统部件和性能,得出热源温度的升高有利于提高系统总体效率。Minea 等^[19]对以 $85\sim 116^\circ\text{C}$ 的工业废热为热源,以 HFC-245fa 为循环工质的 ORC 系统进行了研究,研究表明,系统的净输出功率和热电转换效率主要取决于废热入口温度及系统的控制策略。

上述研究大多以回收利用中低温余热为主要目标的 ORC 余热发电系统,并采用常温水作为系统冷源,且冷热源温差较小,其系统热效率不高。如若采用超低温物质(例如 LNG)为冷源,可显著提高冷热源温差,降低冷凝温度,提高系统效率。但由于 LNG 易燃易爆的属性,且气化后不易处理,导致开

展相关的实验研究具有较大难度,从一定程度上限制了 LNG 冷能发电技术在我国的应用。因此,在前人研究的基础上,搭建以低温水为热源、液氮为冷源(替代 LNG)、R290 为循环工质的小型回热式 ORC 冷能发电实验平台,研究热源温度的变化和回热循环对 ORC 冷能发电系统的机械输出功、发电量、功电转换效率、热效率和冷能利用率等性能参数的影响,从而为 ORC 冷能发电系统的设计、优化和工程应用提供一定的数据参考。

1 回热式低温 ORC 冷能发电系统

1.1 实验系统介绍

回热式 ORC 冷能发电实验装置的系统原理图如图 1 所示,它主要包括热源系统、回热式 ORC 冷能发电系统和冷源系统。实验装置实物图如图 2 所示。

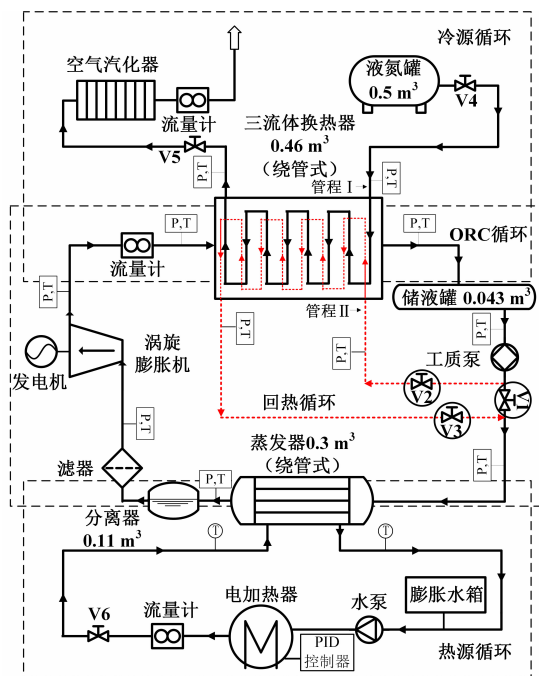


图 1 回热式低温 ORC 冷能发电系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the regenerative ORC cold energy power generation system

热源系统主要由 20 kW 电加热器、变频水泵、膨胀水箱和流量计组成,以水作为传热介质,通过 PID 控制器调节电加热器的功率进而改变进入到蒸发器内水的温度。回热式 ORC 冷能发电实验平台主要由绕管式蒸发器、气液分离器、Air Squared 无



1—涡旋膨胀机;2—三流体换热器;3—蒸发器;4—低温工质泵;
5—储液罐;6—空气汽化器;7—液氮罐;8—控制间。

图 2 实验装置实物图

Fig. 2 Picture of the experimental system layout

油润滑式涡旋膨胀机(1 kW)、储液罐、往复式低温变频工质泵和绕管式三流体换热器等设备组成。冷源系统主要包括液氮罐、空气汽化器和流量计。

液态有机工质经工质泵加压后进入到三流体换热器的管程Ⅱ,并吸收乏气工质的热量实现预热,进入蒸发器管程中与循环水进行热量交换,工质吸收热量后以高温、高压的气态工质进入气液分离器分离后,以过热状态进入到涡旋膨胀机内做功,做功后的乏气返回至三流体换热器壳程,并将热量分别传递给管程Ⅰ中的液氮和经工质泵加压后返回至三流体换热器管程Ⅱ的液态有机工质,并被冷却为液态工质重新进入到工质泵,完成一个循环。

1.2 工质选择

影响 ORC 冷能发电系统的因素众多,其中选择合适的循环工质能有效提高系统发电量和冷能利用效率^[20]。由于液氮的低温特性,冷能发电系统的冷凝温度远低于环境温度,导致系统内循环工质的选择与以回收中低温余热(70~350℃)为主的 ORC 余热发电系统完全不同。所选工质除了具有安全性、化学稳定性、经济性和环保特性外^[21],结合设计的实验系统本身特点还需具有 4 个特征^[22]:①足够低的冰点避免与液氮换热时出现结晶,导热系数大;②常温下饱和压力应高于环境压力并小于系统设计压力;③低比容积或高密度;④干式或等熵工质以避免膨胀机出口形成液滴。

针对上述原则,并结合相关文献[23-24]的研究成果,选取 R290 作为循环工质,其物性参数如表 1 所示。

1.3 实验数据采集和不确定度分析

实验系统所需采集的数据主要包括压力、温度、

流量和膨胀机带动发电机输出的电压、电流、频率和功率,并通过 NI 信号采集设备输入到数据采集软件中。测量仪器基本参数如表 2 所示。

表 1 R290 物性参数

Table 1 R290 physical parameters

参数	数值
临界温度/℃	96.7
临界压力/MPa	4.25
常温下饱和压力/MPa	0.636
沸点/℃	-42.2
冰点/℃	-188
臭氧衰减指数 ODP	0
全球变暖潜能值 GWP	3

表 2 各测量仪器基本参数

Table 2 Details of measurement devices

仪器	型号	量程	精度
压力传感器	MBS	0~2.0 MPa	±0.01%
T 型热电偶	OMEGA TT-T-24	-200~350℃	±0.1℃
涡街流量计	艾默生 8800DF	7.84~47.3 m³/h	±0.1%
电磁流量计	光华 LDY-S	1~10 m³/h	±0.5%
电参数测量仪	永鹏 PW		±0.4%

实验中间接测量物理量的不确定度可由误差传递公式计算所得^[12],即

$$\delta_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \frac{\delta X_i}{Y} \right)^2}$$

(1)

式中: $Y=Y(X_1, X_2, \dots, X_N)$ 为间接测量物理量; X_i 为直接测量的独立变量; x_i 为独立变量的不确定度。

综合考虑表 2 中各测量仪器的精度,经过计算,与实验相关的间接测量物理量的不确定度如表 3 所示。

表 3 间接测量物理量的不确定度

Table 3 Uncertainty of indirect measurement physical quantities

物理量	不确定度
膨胀机前后焓差	±4.68%
膨胀机等熵效率	±4.71%
膨胀机机械输出功率	±5.12%
工质泵功耗	±4.01%
膨胀机电功转换效率	±4.06%
系统热效率	±6.29%
冷能利用率	±6.5%

2 实验数据处理

区别于水蒸气朗肯循环, ORC 冷能发电系统采用有机工质代替水蒸气, 其热力过程的 $T-s$ 图如图 3 所示。通过数据采集软件将 1~9 点的温度和压力值输入到 NIST PEFPROP 9.1 软件中, 查出不同温度和压力条件下 R290 的热力学参数值, 依据热力学原理计算出 ORC 冷能发电系统的性能参数值。

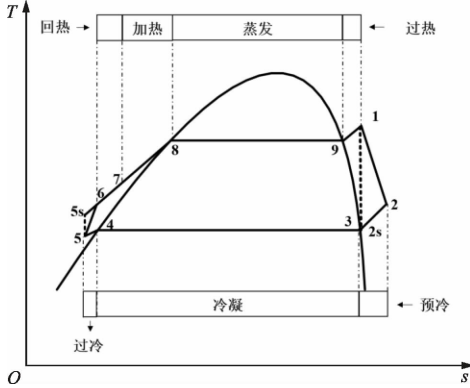


图 3 ORC 发电系统 $T-s$ 图

Fig. 3 $T-s$ plot of ORC system

考虑到实际情况, 在实验和数据处理的过程中做了如下假设: ①由于 LNG 易燃、易爆的属性, 从校园安全角度考虑, 系统冷源用液氮替代; ②选取的数据点为系统稳态工况的数点; ③忽略整个系统管路内的压降; ④用聚氨酯和玻璃棉材料对实验系统进行保温防护, 忽略系统与环境之间的散热损失。

工质在蒸发器内的吸热量 Q_{evap} 、膨胀机的等熵效率 $\eta_{\text{is, exp}}$ 、系统输出功 W_{exp} 、工质泵的功耗 W_{pump} 、膨胀机电功转换效率 η_{ele} 、系统热效率 η_{th} 、冷能利用率 η_c 分别表示为

$$Q_{\text{evap}} = m_{\text{wf}}(h_{\text{evap, out}} - h_{\text{evap, in}}) \quad (2)$$

$$\eta_{\text{is, exp}} = \frac{h_{\text{exp, in}} - h_{\text{exp, out}}}{h_{\text{exp, in}} - h_{\text{exp, out, is}}} \quad (3)$$

$$W_{\text{exp}} = m_{\text{wf}}(h_{\text{exp, in}} - h_{\text{exp, out}}) \quad (4)$$

$$W_{\text{pump}} = m_{\text{wf}}(h_{\text{pump, out}} - h_{\text{pump, in}}) \quad (5)$$

$$\eta_{\text{ele}} = \frac{W_{\text{ele}}}{W_{\text{exp}}} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{evap}}} = \frac{W_{\text{exp}} - W_{\text{pump}}}{Q_{\text{evap}}} \quad (7)$$

$$\eta_c = \frac{W_{\text{ele}}}{m_{\text{N}_2}(h_{\text{N}_2, \text{in}} - h_{\text{N}_2, \text{out}})} \quad (8)$$

式中: m_{wf} 为工质质量流量, kg/h; m_{N_2} 为液氮质量流量, kg/h; $h_{\text{exp, in}}$ 、 $h_{\text{exp, out}}$ 分别为工质在膨胀机进出口焓值, kJ/kg; $h_{\text{exp, out, is}}$ 为工质等熵膨胀后焓值, kJ/kg; $h_{\text{evap, in}}$ 、 $h_{\text{evap, out}}$ 分别为工质在蒸发器进出口焓值,

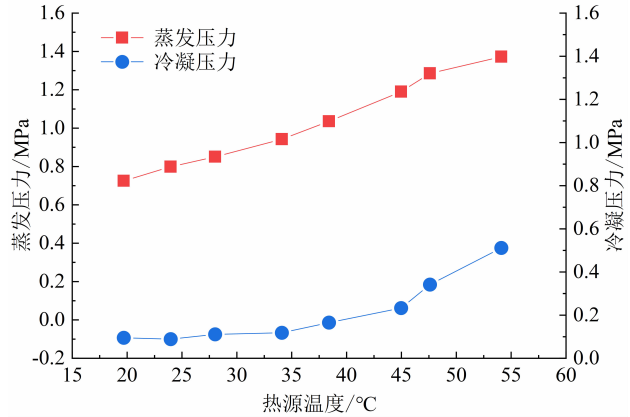
kJ/kg; $h_{\text{pump, in}}$ 、 $h_{\text{pump, out}}$ 分别为工质在低温工质泵进出口焓值, kJ/kg; $h_{\text{N}_2, \text{in}}$ 、 $h_{\text{N}_2, \text{out}}$ 分别为液氮在三流体换热器进出口焓值, kJ/kg; W_{ele} 为智能电参数测量仪测量的发电量。

3 实验结果讨论与分析

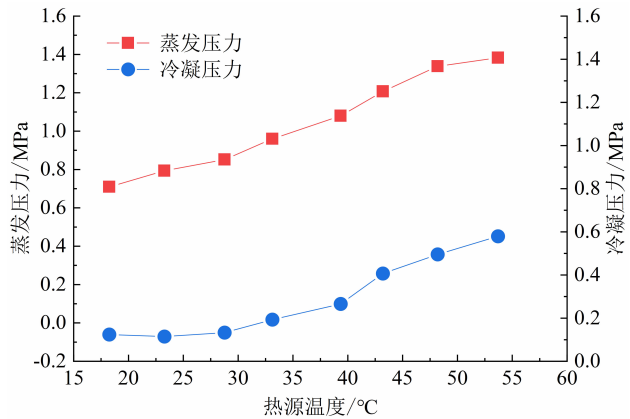
调节图 1 中低温截止阀 V1、V2、V3 的开关, 可实现回热式有机朗肯循环 (R-ORC) 和常规式有机朗肯循环 (B-ORC) 两种不同的循环架构。分别保持系统热源 (2 m³/h) 和冷源 (100 kg/h) 的流量不变, 比较分析不同循环架构下系统热源在 20~55 °C 范围内变化对 ORC 冷能发电系统性能的影响。

3.1 热源温度对蒸发压力和冷凝压力的影响

热源温度对系统蒸发、冷凝压力的影响如图 4 所示。随着热源温度的升高 (由于涡旋膨胀机最大进口压力为 1.38 MPa, 实验中热源温度最高为 55 °C), 蒸发器内部循环热水与工质间的平均换热温差



(a) R-ORC



(b) B-ORC

图 4 热源温度对蒸发压力和冷凝压力的影响

Fig. 4 Evaporation pressure and condensation pressure against different heat source temperature

逐渐增加,蒸发器换热量增大,工质在蒸发器出口处温度上升,导致蒸发压力近似呈线性增长。而冷凝压力前期基本保持不变或有小幅增加,后期增速则明显加快且增速大于蒸发压力。这是因为热源温度的增加使三流体换热器内的负荷逐渐增大,在冷源流量不变的情况下,工质在三流体换热器内与冷源的平均换热温差下降,导致冷凝压力逐渐上升,进一步使膨胀机背压升高和前后压差 ΔP 下降,进而影响膨胀机的工作性能。R-ORC 中工质在三流体换热器内除了将热量释放给冷源外,还有一部分用于工质的预热,故在 R-ORC 中冷凝压力快速增长所对应的热源温度相对于 B-ORC 要高。

3.2 热源温度对涡旋膨胀机性能的影响

图 5 为热源温度变化对膨胀机前后焓差(Δh)和工质流量(m_{wf})的影响。由图 5 可知,随着热源温度的升高, m_{wf} 总体呈上升趋势,且 R-ORC 高于 B-ORC,这是因为工质在蒸发器内吸收的热量随着热源温度的增加而增加,同时由于 R-ORC 中回热循环的作用,使得在同一热源温度下,工质的吸热量高于 B-ORC。而 Δh 的变化趋势基本与 m_{wf} 相同,但当热源温度超过 40 °C 后, Δh 开始下降,这是因为由图 4 可知,此时系统的冷凝压力开始快速增长,使膨胀机入口焓值的增加速率低于出口,导致 Δh 下降,而整个过程由于回热循环的作用,使得 R-ORC 的冷凝压力相对较低,导致 R-ORC 系统的 Δh 高于 B-ORC。实验中,两种 ORC 系统最大 m_{wf} 分别为 118.2、108.4 kg/h,最大 Δh 分别为 29.14、25.86 kJ/kg。

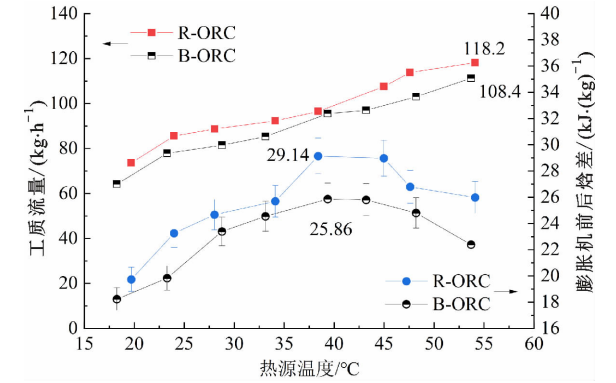


图 5 热源温度对膨胀机前后焓差和工质流量的影响
Fig. 5 Enthalpy difference and mass flow of working fluid against different heat source temperature

膨胀机作为 ORC 系统的关键部件,其工作性能的优劣将直接影响整个系统的性能。图 6 为膨胀机前后压比和等熵效率 $\eta_{is,exp}$ 与热源温度变化的关

系。由图 6 可知,热源温度在 20~55 °C 变化时,R-ORC 的压比从 6.7 降至 2.57,B-ORC 从 5.7 降至 2.41,且 R-ORC 略高于 B-ORC,这主要是 R-ORC 冷凝压力相对较低。而 $\eta_{is,exp}$ 随着热源温度升高,前期缓慢增加,当压比下降至 3.5 左右时快速增加,此时膨胀机内部工质从过膨胀状态接近理想状态。

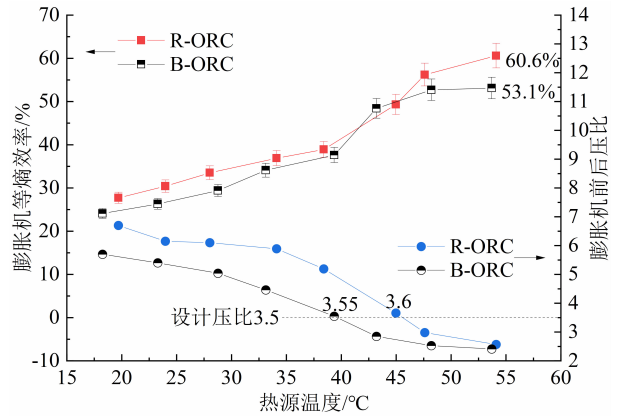


图 6 热源温度对膨胀机的等熵效率和压比的影响
Fig. 6 Isentropic efficiency and pressure ratio against different heat source temperature

随着压比继续下降,膨胀机转速下降,工质通过膨胀机后处于欠膨胀状态, $\eta_{is,exp}$ 增速趋于平缓。当热源温度为 55 °C 时,R-ORC 的 $\eta_{is,exp}$ 最大值为 60.6%,对应压比 2.57,高于 B-ORC 的 53.1% 和 2.41。实验中 $\eta_{is,exp}$ 最大时对应的压比均小于 3.5,说明此时工质并不是理想膨胀过程,可能原因是部分压比用于克服膨胀机的吸气阻力和动静涡盘间的摩擦力。

图 7 为膨胀机的机械输出功 W_{exp} 和发电量 W_{ele} 随热源温度变化的关系。随着热源温度的升高, W_{exp} 呈现先上升后下降的趋势,但 R-ORC 的输出功高于 B-ORC,因为三流体换热器内,工质泵出口循环工质因预热吸收部分乏气的热量,使 R-ORC 的冷凝压力低于 B-ORC。热源温度的增加,使两种 ORC 系统的蒸发压力上升,且增速高于冷凝压力,面积增加,导致膨胀机的 W_{exp} 增加。

当 W_{exp} 达到峰值后,由于冷源冷却能力的下降,使膨胀机背压快速上升,转速降低,做功能力开始下降。当 W_{exp} 最大时,系统内冷热源处于最佳匹配状态。实验中 R-ORC 和 B-ORC 系统对应的最大 W_{exp} 分别为 865.5、686.1 W,对应的最佳热源温度分别为 45、40 °C。而 W_{ele} 表示膨胀机电功转换的大小,且变化趋势与 W_{exp} 类似,R-ORC 的 W_{ele} 略高于 B-ORC。但热源温度在 25~40 °C 范围内,由于

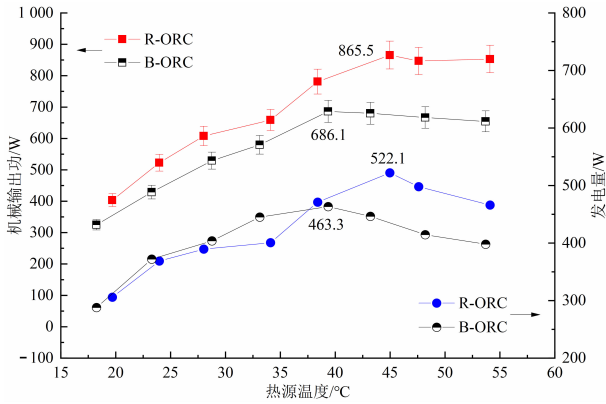


图7 热源温度对膨胀机机械输出功和发电量的影响
Fig.7 Scroll expander output power and electric power against different heat source temperature

两种 ORC 系统的压比均大于 3.5,工质处于过膨胀状态,且 R-ORC 的压比更高使得膨胀机内部的泄露和摩擦等不可逆损失更大,导致 B-ORC 的 W_{ele} 总体略高于 R-ORC。实验中 R-ORC 和 B-ORC 系统对应的最大 W_{ele} 分别为 522.1、463.3 W,对应的最佳热源温度分别为 45 °C、40 °C。

图 8 为热源温度对膨胀机电转换效率 η_{ele} 和前后压差 ΔP 的影响。随着热源温度的升高,膨胀机的机电转换效率呈下降趋势,当热源温度在 20~55 °C 变化时, R-ORC 的 η_{ele} 从 75.8% 下降至 54.6%,下降了 28%;B-ORC 的 η_{ele} 从 88.6% 下降至 59%,下降了 33.4%。这是因为 ΔP 增加使膨胀机转速上升,导致摩擦和泄漏的损失加大,而文献 [25-26] 指出,摩擦和泄漏是造成膨胀机不可逆损失的主要因素。但是 R-ORC 系统的 η_{ele} 总体低于 B-ORC,这是因为热源温度相同时, R-ORC 系统的

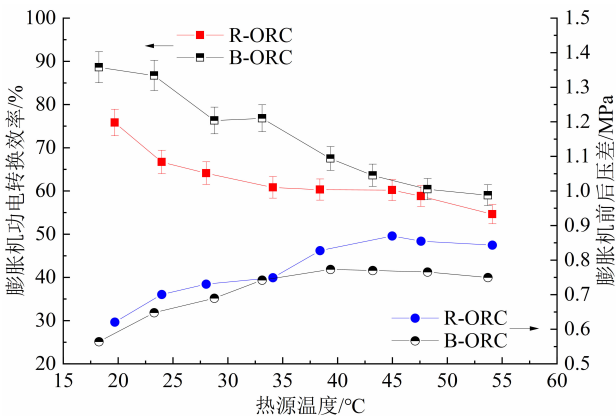


图8 热源温度对膨胀机电转换效率和压差的影响
Fig.8 Power-electricity conversion efficiency and differential pressure against different heat source temperature

ΔP 更高,不可逆损失更多。

3.3 热源温度对热效率和冷能利用率的影响

图 9 为热源温度对系统热效率(η_{th})和冷能利用率(η_c)的影响。随着热源温度的升高,系统热效率和冷能利用率均呈现出先上升后下降的趋势,且 R-ORC 的系统热效率和冷能利用率整体高于 B-ORC。当热源温度从 20 °C 增加到最佳热源温度时, R-ORC 的 η_{th} 从 1.87% 上升到 5.96%, η_c 从 7.3% 上升到 11.5%; B-ORC 的 η_{th} 从 1.79% 上升到 5.12%, η_c 从 6.42% 上升到 9.86%。因为这个过程中膨胀机做功能力增强,导致循环净功和发电量呈上升趋势,而热源温度的增加使蒸发器和三流体换热器内工质与热源和冷源的平均换热温差增大而使换热热量增加,但增速小于循环净功和发电量,从而使系统热效率和冷能利用率呈上升趋势。当热源温度继续增加到 55 °C 时,系统冷凝压力快速增加,使膨胀机背压增大,膨胀机做功能力下降,导致循环净功和发电量开始下降,使 R-ORC 的 η_{th} 从 5.96% 下降到 4.25%, η_c 从 11.5% 下降到 9.6%; B-ORC 的 η_{th} 从 5.12% 下降到 3.98%, η_c 从 9.86% 下降到 8.1%。

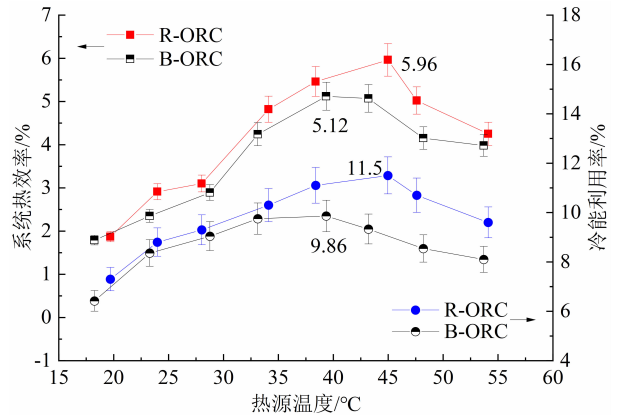


图9 热源温度对系统热效率和冷能利用率的影响
Fig.9 System thermal efficiency and cold energy utilization efficiency against different heat source temperature

回热循环的作用使得相同热源温度下蒸发器和三流体换热器内的平均换热温差低于 B-ORC,换热过程的不可逆损失相对较小;换言之,在相同循环净功和发电量的情况下,回热循环使得 R-ORC 投入的热量和冷量均低于 B-ORC。实验中, R-ORC、B-ORC 系统对应的最大 η_{th} 、 η_c 分别为 5.96%、11.5%, 5.12%、9.86%, 分别对应热源温度为 45 °C、40 °C。

3.4 发电系统整体性能对比

当冷源流量维持在 100 kg/h 左右、系统热源处于最佳温度时,R-ORC、B-ORC 系统的主要参数和性能指标如表 4 所示。由表 4 可知,R-ORC 在等熵效率、机械输出功、发电量、系统热效率和冷能利用率等方面优于 B-ORC,其中等熵效率提升了 31.1%,机械输出功提升了 26.2%,发电量提升最小为 12.7%,但是功电转换效率不如 B-ORC,下降了 10.2%。

表 4 B-ORC、R-ORC 系统主要参数和性能指标对比

Table 4 Comparison of main parameters and performance indexes between B-ORC and R-ORC			
参数	B-ORC	R-ORC	对比
最佳热源温度/℃	40	45	↑
蒸发压力/MPa	1.21	1.19	↓
冷凝压力/MPa	0.41	0.23	↓
等熵效率	37.6%	49.3%	31.1%↑
膨胀机前后压比	3.55	3.66	↑
机械输出功/W	686.1	865.5	26.2%↑
发电量/W	463.3	522.1	12.7%↑
功电转换效率	67.5%	60.3%	10.7%↓
系统热效率	5.12%	5.96%	16.4%↑
冷能利用率	9.86%	11.5%	16.6%↑

4 结 论

以 R290 为循环工质,液氮为系统冷源,采用低温回热式 ORC 循环对 LNG 冷能发电进行了实验研究。实验测试了热源温度的变化及回热循环对发电系统整体性能的影响,虽然以液氮替代 LNG 作为系统冷源与实际存在差距,但对系统的工程应用有一定的数据参考价值,获得的主要结论如下。

(1)在一定范围内,热源温度的升高使系统蒸发压力近似呈线性增长,冷凝压力基本维持不变或有小幅增长,但超过最佳热源温度后,冷凝压力的增长速度将超过蒸发压力,且 B-ORC 的冷凝压力大小和增速高于 R-ORC。

(2)当冷源条件不变时,系统存在一个最佳热源温度,对应最大的机械输出功、发电量、热效率和冷能利用率,且膨胀机前后压比更接近设计值。但当热源温度超过此数值后,系统的整体性能下降。实验工况下,当冷源流量维持在 100 kg/h 左右时,R-ORC 系统最佳热源温度为 45℃左右,高于 B-ORC

的 40℃。这说明 R-ORC 系统可选择的热源温度范围相对较宽,可针对不同季节、不同水域的水温变化特点合理设计系统架构和选择运行工况,使整个发电系统高效运行。

(3)当系统冷热源处于最佳匹配状态时,R-ORC 系统整体性能优于 B-ORC,特别是在等熵效率和机械输出功方面。但 R-ORC 在功-电转换效率方面不如 B-ORC,可通过对膨胀机、传动机构和发电机系统进行改进,提升功电转换效率。

参考文献:

[1] SMIL V. Natural gas: fuel for the 21st century [M]. Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons, Ltd., 2015.

[2] LIN Wensheng, ZHANG Na, GU Anzhong. LNG (liquefied natural gas): a necessary part in China's future energy infrastructure [J]. Energy, 2010, 35 (11): 4383-4391.

[3] HE Tianbiao, CHONG Zhengrong, ZHENG Junjie, et al. LNG cold energy utilization: prospects and challenges [J]. Energy, 2019, 170: 557-568.

[4] 王强, 厉彦忠. 基于液化天然气冷能的燃气轮机发电循环 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(5): 531-534. WANG Qiang, LI Yanzhong. Gas turbine power-generation cycle based on cold energy of liquefied natural gas [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(5): 531-534.

[5] KIM C W, CHANG S D, RO S T. Analysis of the power cycle utilizing the cold energy of LNG [J]. International Journal of Energy Research, 1995, 19(9): 741-749.

[6] KANBUR B B, XIANG Liming, DUBEY S, et al. Cold utilization systems of LNG: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 1171-1188.

[7] TIAN Zhen, ZENG Weijie, GU Bo, et al. Energy, exergy, and economic (3E) analysis of an organic Rankine cycle using zeotropic mixtures based on marine engine waste heat and LNG cold energy [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113657.

[8] 张天峰, 孙志新, 张涵, 等. 不同热源温度的低温热能-液化天然气联合发电系统经济性分析 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 532-538. ZHANG Tianfeng, SUN Zhixin, ZHANG Han, et al. Economic analysis of a low-temperature heat energy-LNG combined power generation system at different heat source temperatures [J]. Journal of Fuzhou Uni-

- versity(Natural Science Edition), 2020, 48(4): 532-538.
- [9] 刘广彬, 赵远扬, 李连生, 等. 低温余热回收用涡旋膨胀机性能模拟研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 88-91.
- LIU Guangbin, ZHAO Yuanyang, LI Liansheng, et al. Simulation of scroll expander used in low-temperature waste heat recovery system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 88-91.
- [10] LI Yi, WU Dawei, WETENHALL B. Pressure drop study on an organic Rankine system utilizing LNG cryogenic energy and waste heat recovery [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 718-725.
- [11] 钟绍庚, 王子龙, 孙义文, 等. ORC 发电系统变热源温度实验研究 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(8): 10-15, 24.
- ZHONG Shaogeng, WANG Zilong, SUN Yiwen, et al. Experimental study on variable heat source temperature for ORC power generation system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(8): 10-15, 24.
- [12] 韩江涛, 魏新利, 马新灵, 等. 热源温度对 ORC 低温余热发电系统性能的影响 [J]. 高校化学工程学报, 2020, 34(1): 53-61.
- HAN Jiangtao, WEI Xinli, MA Xinling, et al. Effects of heat source temperature on the performance of ORC power generation system with low-temperature waste heat [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2020, 34(1): 53-61.
- [13] YANG S C, HUNG T C, FENG Yongqiang, et al. Experimental investigation on a 3 kW organic Rankine cycle for low-grade waste heat under different operation parameters [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 756-764.
- [14] 鲁广栋. 基于地热热源的 ORC 发电系统最佳蒸发温度控制策略研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [15] 黄理浩, 陶乐仁, 郑志皋, 等. 有机朗肯循环发电系统设计及实验研究 [J]. 制冷学报, 2018, 39(2): 68-73.
- HUANG Lihao, TAO Leren, ZHENG Zhigao, et al. Design and experiment research on organic Rankine cycle (ORC) power generation system [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(2): 68-73.
- [16] 饶文姬, 赵良举, 刘朝, 等. 利用 LNG 冷能与工业余热的有机朗肯循环研究 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(2): 213-217.
- RAO Wenji, ZHAO Liangju, LIU Chao, et al. Research of organic Rankine cycle utilizing LNG cold energy and waste heat [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(2): 213-217.
- [17] JANG Y, LEE J. Comprehensive assessment of the impact of operating parameters on sub 1-kW compact ORC performance [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 369-382.
- [18] UNAMBA C K, WHITE M, SAPIN P, et al. Experimental investigation of the operating point of a 1-kW ORC system [J]. Energy Procedia, 2017, 129: 875-882.
- [19] MINEA V. Power generation with ORC machines using low-grade waste heat or renewable energy [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 69(1/2): 143-154.
- [20] HE Tianbiao, MA Huigang, MA Jie, et al. Effects of cooling and heating sources properties and working fluid selection on cryogenic organic Rankine cycle for LNG cold energy utilization [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 247: 114706.
- [21] RIJPKEMA J, MUNCH K, ANDERSSON S B. Thermodynamic potential of twelve working fluids in Rankine and flash cycles for waste heat recovery in heavy duty diesel engines [J]. Energy, 2018, 160: 996-1007.
- [22] BAO Junjiang, LIN Yan, ZHANG Ruixiang, et al. Performance enhancement of two-stage condensation combined cycle for LNG cold energy recovery using zeotropic mixtures [J]. Energy, 2018, 157: 588-598.
- [23] YU Haoshui, HELLAND H, YU Xingji, et al. Optimal design and operation of an organic Rankine cycle (ORC) system driven by solar energy with sensible thermal energy storage [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 244: 114494.
- [24] 张墨耕. 利用低品位热能与 LNG 冷能的新型发电系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [25] LEMORT V, DECLAYE S, QUOILIN S. Experimental characterization of a hermetic scroll expander for use in a micro-scale Rankine cycle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2012, 226(1): 126-136.
- [26] MUYE J, KUMAR G P, BRUNO J C, et al. Modeling of scroll expander for different working fluids for low capacity power generation [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113932.

(编辑 赵炜 杜秀杰)