

DOI: 10.7652/xjtuxb201311006

采用蚁群算法的中温余热有机朗肯循环 性能参数优化

赵英淳, 何雅玲, 席奂, 梁兴壮

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 鉴于当前针对有机朗肯循环(ORC)和工质的研究大都选取特定循环和工质作为研究对象, 缺乏对变工况下工质与系统匹配问题的系统研究, 使用蚁群优化算法, 以基本有机朗肯循环(BORC)、内回热有机朗肯循环(IHORC)为研究对象, 计算比较了不同 ORC 系统在最佳工况下的系统性能, 总结了不同临界温度的工质与不同热源工况的相互匹配关系。结果表明: 在相同热源温度下, 与 BORC 系统相比, IHORC 系统具有较高的炯效率; 根据 BORC 系统性能参数随热源温度的变化规律, 总结出了所考查的工质各自对应的原则可用温度区间; 当热源温度接近该区间上限值时, 系统获取的热量炯增加, 净输出功增加, 工质的热力学性能得到了充分发挥; 采用临界温度较高的工质时, 冷凝器可能真空运行引起运行不稳定, 系统经济性下降; 按照工质可用温度上限与热源温度尽量相近的标准, 可确定与不同热源温度区间相匹配的最佳工质。

关键词: 有机朗肯循环; 中温余热; 匹配关系; 蚁群算法; 炯效率

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0029-06

Parametric Optimization of Organic Rankine Cycle for Middle-Grade Waste Heat Recovery by Ant Colony Algorithm

ZHAO Yingchun, HE Yaling, XI Huan, LIANG Xingzhuang

(Key Laboratory of Thermal-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The investigation was conducted on the matching criterion between working fluids and cycles under variable working conditions for the organic Rankine cycle (ORC). The ant colony algorithm was applied to examine the performance of the basic ORC (BORC) and the ORC with an internal heat exchanger (IHORC) under the different operating conditions (i. e., working fluid and heat source temperature). On the basis of the results calculated, a matching criterion between the working fluids having different critical temperatures and the heat source temperatures was achieved. The results show that the IHORC displays higher exergy efficiency than the BORC. The BORC system has a higher thermal efficiency and output net power when the heat source temperature reaches the upper limit of the region; when a working fluid with high critical temperature is adopted, the condenser runs at negative pressure, reducing the stability and economy of the system. At a given heat source temperature, the working fluid can be selected according to its optimum temperature region.

Keywords: organic Rankine cycle; middle-grade waste heat; matching relation; ant colony algorithm; exergy efficiency

能源利用率低是导致中国工业总能耗逐年增加、单位 GDP 能耗长期以来高居不下的重要原因之一。工业过程所排出的废热往往被直接排放到环境中,不仅造成了环境污染,而且造成了能源的浪费。有机朗肯循环(ORC)作为一种低品位热能的有效回收途径,逐渐成为很多领域关注的热点。

目前对 ORC 系统的研究主要集中在循环系统改进、工质选择、参数优化等方面^[1-7]。Wei 等以 R245fa 为循环工质,实验研究了 ORC 系统的性能,认为充分利用热源余热并对冷凝器中工质进行合理的过冷,有助于提高系统效率,系统设计时应根据各地气候特点因地制宜,且机组工作时应尽量保持在额定工况点附近,以利于系统高效运行^[8]。Dai 等引入遗传优化算法,以焓效率为目标函数,在特定工况下对 10 种工质的循环参数进行了优化,认为 R236ea 的性能最优,系统增加内回热器并不一定能够提高循环性能^[9]。上述研究均以特定工质作为研究对象来讨论循环的热力学性能,在给定的工况下确定不同工质的最佳运行状态,未对变工况下工质的匹配问题进行研究。

本文针对中温余热热源($100\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[10],选取了 6 种有机工质,使用蚁群优化算法对 ORC 系统进行了参数优化,比较了不同 ORC 系统在最佳工况下的系统性能,研究了工质在变余热热源工况条件下所对应的系统性能,以及不同临界温度的工质与不同热源工况的相互匹配关系。

1 ORC 系统热力学分析

图 1、2 分别是基本有机朗肯循环(BORC)系统的示意图和理想状态下的 T - s 图。循环主要由膨胀机、冷凝器、工质泵和蒸发器 4 部件组成,整个循环过程为:工质在蒸发器内等压气化变成高温高压蒸气(4-1 过程);随后进入膨胀机等熵膨胀做功(1-2 过程);做功后的乏气进入冷凝器等压冷凝成液体(2-3 过程);经冷凝的工质进入工质泵,将低压工质加压后进入蒸发器,开始下一个循环(3-4 过程)。

当朗肯循环膨胀机出口温度明显高于蒸发器入口温度时,可通过在循环流程中增加一个内回热器来实现膨胀机出口工质的热量回收,改进后的循环为内回热有机朗肯循环(IHORC)。内回热器同时作为工质进入冷凝器之前的预冷设备和进入蒸发器之前的预热设备,提高了系统内部能量的利用效率^[11]。图 3、4 中所示的 2-2i 过程,即为膨胀机出口工质在回热器中的放热过程,4-4i 过程为即将进入

蒸发器的工质在回热器中的预热过程。

根据有机工质在 T - s 图中饱和蒸气线斜率的差

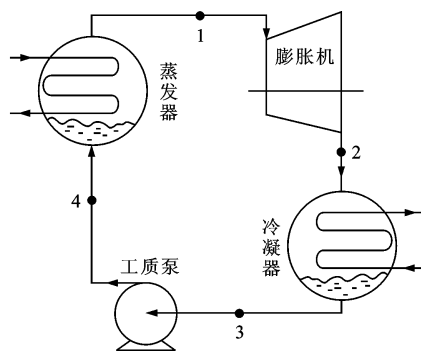


图 1 BORC 系统示意图

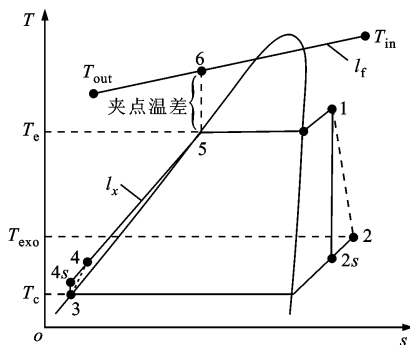


图 2 BORC 过程 T - s 图

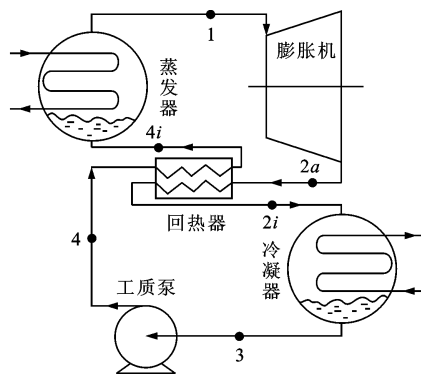


图 3 IHORC 系统示意图

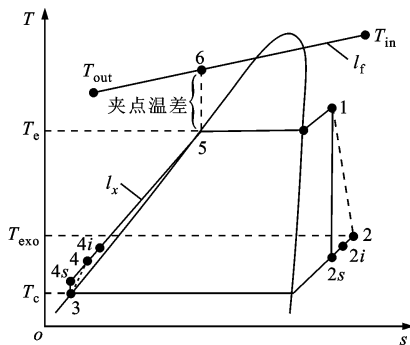


图 4 IHORC 过程 T - s 图

异,将其分为 3 类:湿工质(T - s 图饱和蒸气线斜率为负),例如 R134a、R22 等;等熵工质(T - s 图饱和蒸气线斜率趋于无穷大),例如 R11;干工质(T - s 图饱和蒸气线的斜率为正),例如丁烷、R123、R245fa 等。采用等熵工质和干工质时,可防止膨胀机出口状态点进入两相区,避免了液击现象的发生和过高回热度的出现。

1.1 膨胀机模型

理想状态下,工质在膨胀机中绝热膨胀(过程 1-2s),对外做功

$$W = m(h_1 - h_{2s}) \quad (1)$$

实际膨胀过程中,膨胀机的绝热效率 $\eta_{T,\exp} < 1$,工质经历的是一个熵增过程(过程 1-2)。膨胀机实际输出技术功

$$W_t = \eta_{T,\exp} W = \eta_{T,\exp} m(h_1 - h_{2s}) = m(h_1 - h_2) \quad (2)$$

工质在膨胀过程的焓损失为

$$I_{\exp} = E_{x,1} - E_{x,2} - W_t \quad (3)$$

膨胀机的焓效率为

$$\eta_{E_x,\exp} = \frac{W_t}{E_{x,1} - E_{x,2}} = \frac{h_1 - h_2}{(h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2)} \quad (4)$$

1.2 冷凝器模型

工质在冷凝器中等压放热(过程 2-3)的放热量为

$$Q_{\text{con}} = m(h_2 - h_3) \quad (5)$$

冷凝器中工质未对外输出功,仅向冷却水放热,故热量焓为 0,焓损失为

$$I_{\text{con}} = E_{x,W,\text{in}} + E_{x,2} - E_{x,W,\text{out}} - E_{x,3} \quad (6)$$

焓效率为

$$\eta_{E_x,\text{con}} = \frac{E_{x,3}}{E_{x,2}} = \frac{(h_3 - h_0) - T(s_3 - s_0)}{(h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0)} \quad (7)$$

1.3 工质泵模型

理想情况下,泵将工质等熵升压地泵取(过程 3-4),泵功为

$$W_{P,\text{ide}} = m(h_{4s} - h_3) \quad (8)$$

实际过程中,制冷剂在被泵取的过程是一个不可逆过程(过程 3-4),同时工质泵存在一定机械效率 $\eta_{T,P}$,因此实际消耗功要大于理论消耗功。实际消耗功为

$$W_P = m(h_4 - h_3) = \frac{W_{P,\text{ide}}}{\eta_{T,P}} \quad (9)$$

焓损失为

$$I_P = W_P + E_{x,3} - E_{x,4} \quad (10)$$

焓效率为

$$\eta_{E_x,P} = \frac{E_{x,4} - E_{x,3}}{W_P} = \frac{(h_4 - h_3) - T_0(s_4 - s_3)}{(h_4 - h_3)} \quad (11)$$

1.4 蒸发器模型

工质在蒸发器中等压吸热(过程 4-1)的吸热量为

$$Q_{\text{eva}} = m(h_4 - h_1) \quad (12)$$

焓损失为

$$I_{\text{eva}} = E_{x,O,\text{in}} + E_{x,4} - E_{x,O,\text{out}} - E_{x,1} \quad (13)$$

焓效率为

$$\eta_{E_x,\text{eva}} = \frac{E_{x,1} - E_{x,4}}{E_{x,H,\text{in}} - E_{x,H,\text{out}}} = \frac{(h_1 - h_4) - T_0(s_1 - s_4)}{(h_{H,\text{in}} - h_{H,\text{out}}) - T_0(s_{H,\text{out}} - s_{H,\text{in}})} \quad (14)$$

1.5 内回热器模型

当系统中有内回热器时,设内回热度为^[12]

$$\sigma_{\text{IHE}} = \frac{T_2 - T_{2i}}{T_2 - T_4} \quad (15)$$

内回热器焓损失为

$$I_{\text{IHE}} = E_2 + E_4 - E_{4i} - E_{2i} \quad (16)$$

1.6 系统性能参数计算方法

循环热效率即第一定律效率定义为循环输出净功与蒸发器内工质吸热量之比

$$\eta_{T,\text{cyc}} = \frac{W_t - W_P}{Q_{\text{eva}}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{Q_{\text{eva}}} \quad (17)$$

循环的焓损失为各个部件的焓损失之和

$$I_{B,\text{loss}} = \sum I \quad (18)$$

循环的第二定律效率为

$$\eta_{E_x,\text{cyc}} = \frac{W_t}{E_{x,\text{in}}} = \frac{E_{x,\text{in}} - \sum I - E_{x,\text{out}}}{E_{x,\text{in}}} \quad (19)$$

文中计算焓效率时,选取的基准状态点为环境温度 T_0 和环境压力 P_0 。

2 ORC 系统参数优化计算

2.1 计算条件与假设

ORC 运行参数之间存在非线性关系,传统系统优化所采用的针对压力或温度等单一运行参数的优化计算,无法顾及参数之间的相互影响。本文采用一种新型智能优化算法——蚁群算法对 ORC 的运行参数进行多维优化,计算循环在最佳运行工况下所对应的性能参数。

本文选择了适用于中温余热热源的 6 种不同临

界温度的有机工质作为研究对象,以系统焓效率为优化目标,以膨胀机入口压力和温度为优化变量进行优化计算。表 1 给出了 6 种工质的基本热力学性质,计算过程中做如下常规假设:

- (1)高温热源载热体比热容为 $1.099\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (按氮气计算),质量流量为 14.01 kg/s ;
- (2)环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力为 0.1 MPa ;
- (3)蒸发器夹点温差为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (4)冷凝温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统内工质无过冷;
- (5)膨胀机和工质泵的等熵效率均为 80% ;
- (6)内回热循环中, $\sigma_{\text{IHE}}=0.8$ 。

表 1 6 种有机工质的基本热力学性质				
工质	$M/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	T_c/K	P_c/MPa	ODP
甲苯	92.14	591.75	4.13	0
庚烷	100.20	540.13	2.74	0
丙酮	58.08	508.10	4.70	0
R141b	116.95	477.50	4.21	0.090
R123	152.93	456.83	3.66	0.017
R236ea	152.04	412.44	3.50	0

注:ODP 为有机工质臭氧破坏指数。

2.2 蚁群算法简介

20 世纪 90 年代初,意大利学者 Dorigo 等受到人们对自然界中蚁群集体行为的研究成果的启发,提出了一种新的模拟进化算法——蚁群算法^[13]。该算法真实地模拟了自然界蚂蚁群体的觅食行为,通过信息素的更新,能够有效地考虑到单个蚂蚁与环境及蚁群的互相影响,具有群体合作、正反馈选择、并行计算等特点,收敛速度快,既被用于选择最优路径,亦可用于解决函数快速寻优问题^[14]。

本文以 ORC 系统焓效率为目标函数,对膨胀机入口状态点参数(压力、温度)进行优化,图 5 所示为蚁群算法优化流程图,原理依据文献^[13]中应用蚁群算法求解连续函数极值问题的思想,自编程实现了蚁群算法优化程序。

3 结果与讨论

图 6 为优化后 6 种工质在 BORC 和 IHORC 系统中的焓效率随热源温度的变化趋势。从图 6 可以看出:在相同工况下,IHORC 系统焓效率高于 BORC 系统,最优点温度值更靠近热源温度,与热源温度匹配性更好,能更为有效地利用热源热量。

亚临界循环中工质除了由于自身临界温度所限而存在的适用温度上限外,还存在一个可用温度的最小值,即每种工质均存在一个各自的原则可用区

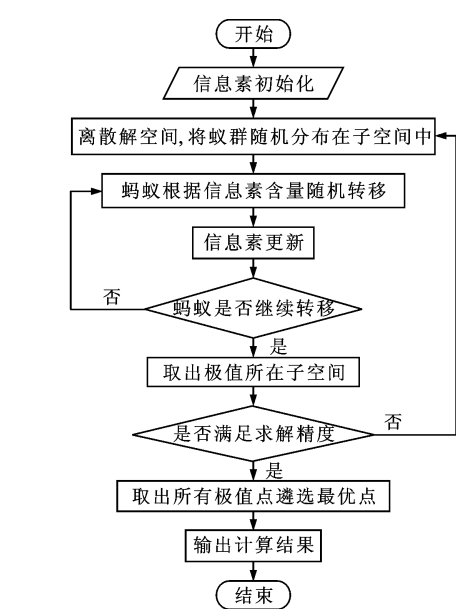


图 5 蚁群算法计算流程图

间。图 7 给出了 6 种有机工质各自的原则可用区间。由于热源温度降低到一定程度时,优化所得膨胀机进口温度下降,其与高温热源温度间差距缩小,最优状态点在 $T-s$ 图上位置下移,蒸发压力降低,工质蒸发换热过程中两相换热区加长;工质进出口焓差虽有减小,但仍维持在同一数量级;考虑到蒸发器工作时存在夹点温差,蒸发器热源进出口温差不断减小,高温热源向系统输入的热量焓下降。由此形成了工质的可用温度区间的下限,可用温度的上下限之间的温度区域形成了工质的可用温度区间。

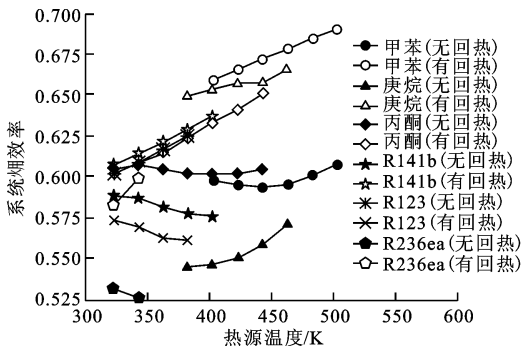


图 6 热源温度对系统焓效率的影响

图 8~10 分别为采用 6 种工质时系统热效率、系统净输出功和最佳工质流量随热源温度的变化情况。由相同工质不同热源温度工况下系统性能参数的纵向对比可知:当余热热源温度下降时,系统热效率、系统净输出功、最佳工质流量均随之下降,最佳工质流量在靠近可用温度下限时剧烈下降,系统运行不稳定;反之,工质在各自原则可用温度区间内,

热源温度越靠近区间上限值,系统的性能参数越好。

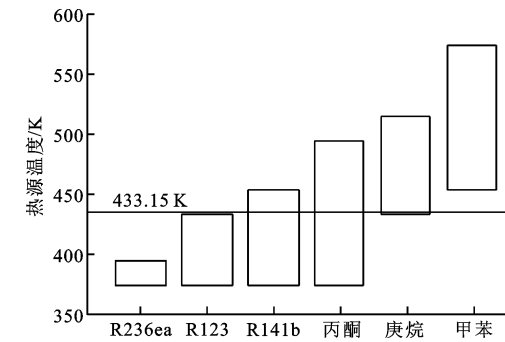


图 7 6 种工质各自原则可用温度区间示意图

相同热源温度下使用不同工质时系统性能参数的横向对比结果如下。以热源温度为 433 K 时的工况为例,由图 7 可知,有庚烷、丙酮、R141b 和 R123 等 4 种工质的原则可用区间包含此热源工况。4 种工质的优化结果如表 2 所示。4 种工质中,R123 的系统热效率和焓效率在 4 种工质中都不是最高的,但净输出功却远高于使用其他工质时的净功值。这是因为拥有较低临界温度的 R123 的原则可用温度区间上限值最接近热源温度 433 K,这时 R123 的系统参数均达到了自身的最优值;反之,临界温度较高的工质,如庚烷,433 K 的热源温度已靠近其原则可用温度区间的下限值,系统工质流量下降,工作不稳定,输出的净功较低。

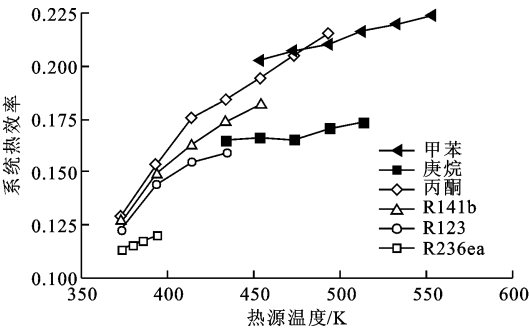


图 8 热源温度对系统热效率的影响

定义图 2 中由 1、5 和 4 三点组成的工作线为工质在蒸发器内的吸热线 l_x ,由 T_{in} 、6 和 T_{out} 三点组成的工作线为热源载热体的放热线 l_f 。由于蒸发器换热过程存在夹点温差, l_f 与 l_x 同趋势移动;当热源温度 T_{in} 下降或循环使用临界温度 T_c 较高的工质时,最优状态点的温度与热源温度温差缩小, l_f 和 l_x 相互靠近;工质在蒸发器内两相换热区增长,工质出入口焓差虽有所减小,但仍维持在同一数量级;蒸发器内热源侧载热体出入口温差减小, l_f 斜率下降,热源向系统输入的焓下降。因此,若系统工质流量下

降,则净输出功随之降低,当热源温度靠近使用工质原则可用温度区间下限时,工质流量迅速下降,系统严重不稳定,净输出功减小。

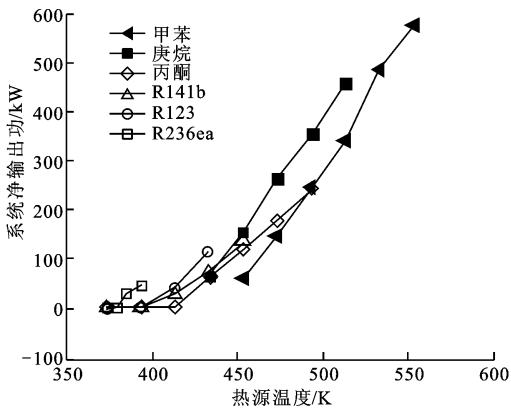


图 9 热源温度对系统净输出功的影响

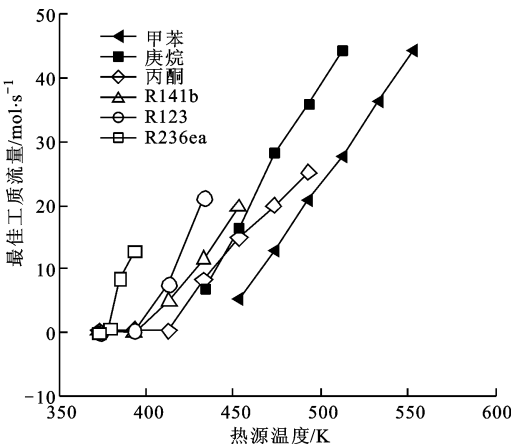


图 10 热源温度对工质质量流量的影响

表 2 $T_{in}=433\text{ K}$ 时 4 种工质优化工况下系统性能参数

工质	$\eta_T/\%$	$\eta_{E_x}/\%$	W_{net}/kW	$m_{mol}/\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta T/\text{K}$
庚烷	16.5	54.4	63.7	6.79	25.1
丙酮	18.4	60.2	60.9	8.22	32.7
R141b	17.4	73.3	75.1	11.48	27.4
R123	15.9	56.1	116.5	21.09	47.7

注: W_{net} 指系统净输出功; m_{mol} 为工质摩尔流量; ΔT 为蒸发器载热体出入口温差。

综合上述分析,设计有机朗肯系统时,首先应保证 l_x 在工质临界点下方,即在保证系统亚临界运行的前提下,按照热源温度 T_{in} 与工质原则可用温度区间上限相匹配的原则,选择具有合适临界温度 T_c 的工质,增大 l_f 与 l_x 间的距离,提高 l_f 的斜率,在充分利用热源热能的同时,发挥工质的热力学性能,避免系统不稳定现象的出现。

对于绝大多数物质,其临界温度与标准蒸发温度存在以下关系

$$T_s/T_c \approx 0.6 \quad (20)$$

即临界温度与工质的标准沸点成正比^[15]。对于临界温度较高的工质,如烷烃类工质,环境温度对应下的饱和压力也很低。以甲苯为例,其临界温度为318.6℃,标准沸点为110.6℃。当BORC系统采用甲苯为有机工质,热源温度为180℃时,优化所得的冷凝压力仅为3.8 kPa,环境中的空气会渗入负压运行的冷凝器和管路,引起系统运行不稳定。同时,管道内外巨大的压差也对管路的材料和承压提出了更高的要求。对一般规模较小的余热ORC系统,这些措施会增加制造成本,导致经济性下降。

由上述分析可知,在考虑换热温差的前提下,应在临界温度高于热源温度的工质中,选择可用温度上限靠近热源温度的工质,以保证更好的循环热力学性能。

4 结 论

(1)在相同工况下,IHORC系统在最优工况下运行时具有较高的烟效率,与热源匹配性更好;随着热源温度提高,IHORC系统的优势更加显著。

(2)每种有机工质存在各自原则可用的工作温度区间,相同热源温度下,使用原则可用温度上限与热源温度相近的工质,系统从热源获取的输入烟和系统净输出功与热效率增加,工质能充分发挥自身的热力学特性;反之,使用原则可用温度上限与热源温度相差较远的工质的系统,热效率较低,甚至会出现系统严重不稳定、无实际净输出功的现象。

(3)采用临界温度较高的工质时,环境温度下冷凝压力可能低于大气压,冷凝器真空运行会导致空气渗入系统引起系统运行不稳定,而增加密封和提高设备抗压设计标准等措施会导致成本增加,ORC系统经济性下降。

(4)设计系统时应在保证循环亚临界运行的前提下,按照工质可用温度上限与热源温度尽量相近的标准,选取可用温度上限与热源温度匹配性更好的工质。

参考文献:

[1] WANG J L, ZHAO L, WANG X D. A comparative study of pure zeotropic mixtures in low-temperature solar Rankine cycle [J]. *Applied Energy*, 2010, 87 (11): 3366-3373.

[2] DRESCHER U, BRÜGGEMANN D. Fluid selection for the organic Rankine cycle (ORC) in biomass power and heat plants [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(1): 223-228. .

[3] LI J, PEI G, JI J. Optimization of low temperature solar thermal electric generation with organic Rankine cycle in different areas [J]. *Applied Energy*, 2010, 87 (11): 3355-3365.

[4] SUN J, LI W H. Operation optimization of an organic Rankine cycle (ORC) heat recovery power plant [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31 (11/12): 2032-2041.

[5] XU R J, HE Y L. A vapor injector-based novel regenerative organic Rankine cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(6/7): 1238-1243.

[6] HE Y L, MEI D H, TAO W Q, et al. Simulation of the parabolic trough solar energy generation system with organic Rankine cycle [J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 630-641.

[7] 徐荣吉, 席旻, 何雅玲. 内回热/无回热 ORC 的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(2): 235-240.
XU Rongji, XI Huan, HE Yaling. Experimental study on the performance of the organic Rankine cycles with and without internal heat regeneration [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(2): 235-240.

[8] WEI D H, LU X S, LU Z, et al. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(4): 1113-1119.

[9] DAI Y P, WANG J F, GAO L. Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(3): 576-582.

[10] 王华, 王辉. 低温余热发电 ORC 技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 13-14.

[11] 徐荣吉. 太阳能小型 ORC 理论及实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2011.

[12] WANG E H, ZHANG H G, FAN B Y, et al. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery [J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3406-3418.

[13] 刘卉. 应用蚁群算法求解函数所有极值 [D]. 成都: 四川师范大学, 2010.

[14] 马良, 朱刚, 宁爱兵. 蚁群优化算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 15-23.

[15] 吴业正. 制冷原理及设备 [M]. 2 版. 西安: 西安交大出版社, 2006: 62-67.

(编辑 荆树蓉)