

文章编号:1671-6833(2012)03-0072-04

# 有机工质低温余热发电的模拟与优化

魏新利, 尹树桂, 马新灵, 李 慧

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**以热力学第一定律和第二定律为基础,对有机朗肯循环低温余热发电系统进行了热力分析.用 Aspen plus 软件,对循环系统中的几个重要影响参数进行了模拟研究.研究表明:工质处于饱和状态时系统的性能最优;增大蒸发压力或减小冷凝压力都能提高系统的热效率和火用效率.在原有基本朗肯循环的基础上,采用乏气回热循环或中间抽气回热循环,二者均能改善系统的性能.

**关键词:**有机朗肯循环;分析;回热;效率;优化

**中图分类号:**TK11+5 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.03.018

## 0 引言

有机物朗肯循环(ORC)是以低沸点有机物为工质的闭式朗肯循环,由于其蒸发和冷凝温度较低、设备相对简单,被认为是一种切实可行的低品位余热发电技术<sup>[1]</sup>.这种技术既缓解了企业电力不足的矛盾,又减轻了余热对环境造成的热污染,从而实现能源和环境的可持续性发展.早在1966年就有学者指出可用有机朗肯循环回收低品位热能.以色列的ORMAT公司和日本曾经建造了废热ORC系统,取得了很好的经济和环保效益.美国MTI公司也曾建造了利用炼油厂余热(110℃)的ORC系统,以R113为工质,采用单级离心透平,输出功率约为1174kW. Andersen WC等通过实验研究揭示了有机物工质的化学稳定性及其对ORC经济性的影响.笔者在前人研究的基础上,以热力学第一定律和第二定律为基础,利用Aspen plus软件对有机朗肯循环进行模拟,对热力系统中的重要影响参数进行性能分析,并提出优化后的系统设计方案.

## 1 有机朗肯循环热力分析

### 1.1 有机朗肯循环的原理

ORC的热力过程,如图1所示.低沸点工质在蒸发器中被余热流预热、汽化后,有机蒸气推动膨胀机旋转做功,带动发电机发电.膨胀机排出的

乏气进入冷凝器被循环水冷却,液态有机物进入工质泵升压后被送回至蒸发器<sup>[2]</sup>.

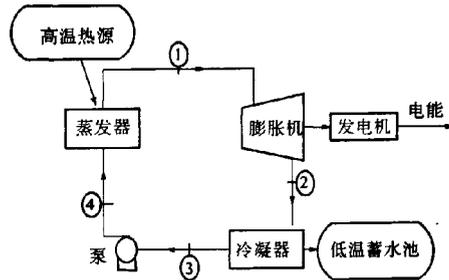


图1 有机朗肯循环的工作原理示意图

Fig.1 Simple schematic of Organic Rankine Cycle

### 1.2 有机朗肯循环的热力分析

作为一个动力循环系统,评价有机朗肯循环最直接的性能指标为第一定律效率.其次,为了解系统能量品位的变化与利用情况,也需要研究有机朗肯循环的第二定律效率.公式(1)和(2)分别为系统热效率和火用效率的表达式.

$$\eta_{\text{cycle}} = (W_p + W_t) / Q_c; \quad (1)$$

$$\eta_{\text{ex}} = (W_p + W_t) / Q_c (1 - T_L / T_H). \quad (2)$$

式中:  $W_p$ , 膨胀机输出功率, kW;  $W_t$ , 泵消耗电功率, kW;  $Q_c$ , 蒸发器换热量, kW. 在模拟过程中,输入相关参数,上述数值可直接得到.  $T_L$ , 低温热源的温度, °C;  $T_H$ , 高温热源的温度, °C.

收稿日期:2011-12-20; 修订日期:2012-03-20

基金项目:有机朗肯循环低温余热发电关键技术研究(122102210041)

作者简介:魏新利(1956-),男,河南辉县人,郑州大学教授,博士生导师,主要从事生物质能利用、低温余热制冷及发电等研究, E-mail: xlwei@zzu.edu.cn.

## 2 ORC 低温余热发电系统的建模

### 2.1 热力学模型的假设

在本次模拟中,对该流程作如下简化:

- (1) 稳定状态条件;
- (2) 蒸发器、冷凝器以及管道都忽略压降;
- (3) 膨胀机和泵的等熵效率为定值。

### 2.2 热力学模型的建立

(1) 设定全局信息:流体的热力学性质采用发电系统常用的 Peng-Robinson 方法计算.热力学模型中涉及的化学组分:(a)采用导热油代替余热源,其主要成分为联苯和联苯醚;(b)冷却剂,采用实验室条件下的水。(c)工质,根据前人的研究<sup>[3-4]</sup>使用干性有机物质 R245fa。

(2) 确定模拟条件:导热油 120 °C,冷却水 20 °C,两者的流量可以根据实际的换热要求进行调整;R245fa,质量流量为 0.06 kg/s;膨胀机的等熵效率为 0.78;泵的等熵效率为 0.9;实验室的环境温度为 20 °C.该信息是在现有实验设备的前提下选取的经验值。

(3) Aspen Plus 软件建立的热力学模型,如图 2 所示。

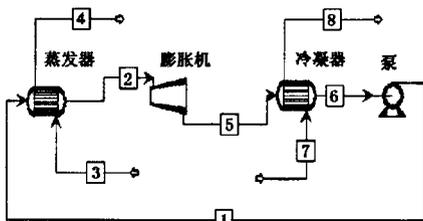


图2 有机朗肯循环的模型图

Fig.2 The model of Organic Rankine Cycle

## 3 系统的模拟研究

结合实际情况与前人的研究,笔者将蒸发器出口工质过热度、冷凝器出口工质过冷度、蒸发压力和冷凝压力作为影响系统循环效率的主要因素.通过简单模拟可得出如下结论:蒸发器和冷凝器的出口工质在饱和状态下,提高蒸发压力,或降低冷凝压力,都能提高系统的循环效率。

不仅如此,模拟结果显示,系统的循环效率并不是很高.为使有机朗肯循环能够高效运行,需要从操作参数和循环结构两方面对整个系统进行优化和改进。

### 3.1 基本循环的参数优化

若限定热源温度,工质处于饱和状态,通过最

大发电量来确定最佳蒸发温度和最佳凝结温度.当热源温度 120 °C,利用严家驷提出的最佳蒸发温度和最佳冷却水温升的公式<sup>[5]</sup>可算出:最佳蒸发温度为 69.37 °C,最佳冷却水温升为 5.456 °C.从而可知相应的蒸发器压力和冷凝压力分别为 0.6 MPa 和 0.15 MPa。

表 1 为此工况下各个状态点的参数.此时,蒸发器的换热量为 7.512 4 kW,膨胀机的输出功为 0.729 kW,泵消耗的电功率为 0.012 kW.系统的热效率和火用效率分别为 9.55%,73.69%。

表 1 基本循环中各个状态点的参数

Tab.1 State points parameters on basic cycle

状态点	温度 $\theta / ^\circ\text{C}$	压力 $p / \text{MPa}$	比焓值 $h / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
1	25.496	0.6	153.500
2	69.749	0.6	145.989
5	38.914	0.15	146.718
6	25.312	0.15	153.512

### 3.2 循环结构的改进

表 1 显示,冷凝器前后,工质温差较大,约为 13.6 °C,此时直接将工质冷凝,不但造成了能量的浪费,还将加大冷凝器内由于传热温差引起的不可逆损失.如果采用回热措施,降低不可逆损失,系统的循环效率将会有所提高.回热有两种形式:乏气回热循环和抽气回热循环。

#### 3.2.1 乏气回热有机朗肯循环

乏气回热循环是让膨胀机出口的蒸气在进入冷凝器之前流经回热器,预热进入蒸发器的工质.图 3 为乏气回热有机朗肯循环的模型图。

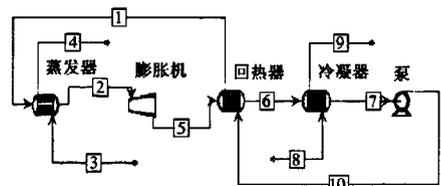


图3 乏气回热有机朗肯循环的模型图

Fig.3 The model of regenerative exhaust ORC

(1) 回热度对系统的影响.回热度的定义:回热器中工质的吸热量与膨胀机内乏气温度降至泵出口温度时所释放的理论热量之比.公式(3)为回热度  $\theta$  的表达式

$$\theta = (h_1 - h_{10}) / (h_5 - h_{10}). \quad (3)$$

式中: $h_1$ ,蒸发器入口工质的焓,kJ/kg; $h_5$ ,膨胀机出口工质的焓,kJ/kg; $h_{10}$ ,泵出口工质的焓,kJ/kg。

图 4 显示,系统热效率和火用效率都随回热度

的增大而升高.究其原因:乏气回热 ORC 并不改变膨胀机的输出功率和泵消耗的电功率,但提高了蒸发器入口的工质温度,相应蒸发器的吸热量减少,降低了蒸发器内的传热温差.

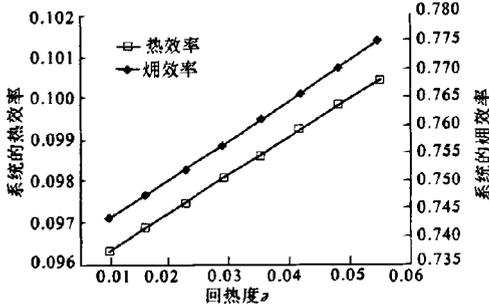


图4 系统热效率和炯效率与回热度  $\theta$  的变化关系  
Fig.4 Variation of the system thermal efficiency and the exergy efficiency with heat recover ratio

(2) 乏气回热的最佳操作条件. 对于 120 °C 的低温热源,乏气回热有机朗肯循环的最佳操作条件关键在于确定最佳回热比.

由于回热资源有限,从模拟结果可以看出,回热度的最大值为 0.055,此时系统的热效率和炯效率最高.表 2 为此工况下各个状态点的参数.

此时,蒸发器的换热量为 7.141 kW,膨胀机

表 2 乏气回热循环中各个状态点的参数

Tab.2 State points parameters on regenerative exhaust ORC

状态点	温度 $\theta / ^\circ\text{C}$	压力 $P/\text{MPa}$	比焓值 $h/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
1	34.000	0.6	153.129
2	69.749	0.6	145.989
5	38.914	0.15	146.718
6	26.507	0.15	147.089
7	25.313	0.15	153.512
10	25.497	0.6	153.500

的输出功为 0.730 kW,泵的消耗的电功率为 0.012 kW.系统的模拟结果为:热效率 10.05%;炯效率 77.52%.

### 3.2.2 抽气回热有机朗肯循环

抽气回热是指从膨胀机中抽出一部分没有充分做功的有机蒸气,用以加热泵出口温度较低的液态工质,吸热升温后再送入蒸发器<sup>[6]</sup>.

在 Aspen plus 中,膨胀机无法进行中间抽气,需将蒸发器出口的蒸气分成两路,一路在膨胀机 1 完全做功后,进入冷凝器冷凝;另一路在膨胀机 2 部分做功,然后将其送入回热器.图 5 为抽气回热有机朗肯循环的模型图.

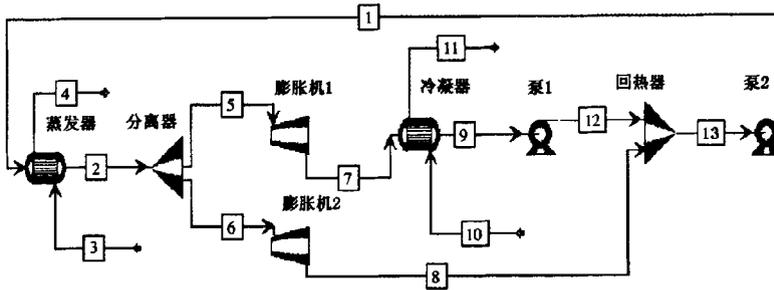


图 5 抽气回热有机朗肯循环的模型图  
Fig.5 The model of regenerative extraction ORC

(1) 抽气比和抽气压力对系统的影响. 抽气回热循环需要考虑抽气比和抽气压力. 抽气比是中间抽气占整个系统的工质流量的比值,抽气压力则为中间抽气的工质压力.

图 6 为抽气压力分别为 0.2、0.3 和 0.4 MPa 时不同抽气比对抽气回热式 ORC 系统热效率的影响.可以看出,抽气压力一定时,随着抽气比的增大,热效率呈上升趋势.但是在抽气比一定时,循环热效率随着抽气压力的升高而降低.因此,在实际循环中,应选择较低的抽气压力,同时增大抽

气比,以提高热效率.

(2) 抽气回热的最佳操作条件. 在回热有机朗肯循环中,抽气压力取决于膨胀机的最大膨胀比,抽气比是在确定抽气压力后通过模拟和实验得到的.表 3 为抽气压力为 0.2 MPa 且抽气比为 0.25 时系统的模拟结果.

此工况下,蒸发器的换热量为 5.776 kW,膨胀机的输出功率为 0.692 kW,泵消耗电功率为 0.013 kW.系统的模拟结果为:热效率 11.76%;炯效率 90.74%.

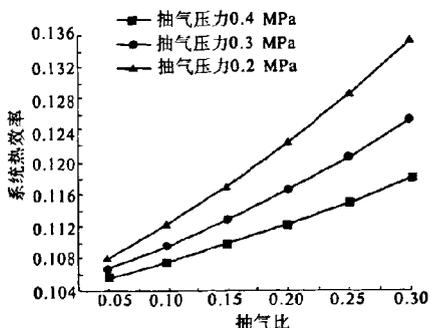


图6 抽气比与抽气压力对系统热效率的影响

Fig. 6 Variation of the system thermal efficiency with extraction ratio and extraction pressure

表3 抽气回热循环中各个状态点的参数

Tab. 3 State points parameters on extraction ORC

状态点	温度 $\theta/^\circ\text{C}$	压力 $p/\text{MPa}$	比焓值 $h/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
1	63.708	0.6	151.763
2	69.755	0.6	145.989
7	38.920	0.15	110.038
8	44.745	0.2	36.642
9	25.312	0.15	115.134
12	25.333	0.2	115.133
13	63.438	0.2	151.775

#### 4 结论

笔者以热力学第一定律和第二定律为基础,利用 Aspen plus 软件对基本有机朗肯循环、乏气回热循环和抽气回热循环进行了模拟、分析和优化,最终可以得到热源温度和环境温度一定的情况下3种循环系统的最佳操作条件,其结论如下。

(1) 在简单 ORC 中,工质处于饱和状态时,系统的性能最好;增大蒸发压力或降低冷凝压力都能达到提高循环效率的效果;在最优操作条件

下,热效率为 9.55%,炯效率为 73.69%。

(2) 乏气回热 ORC,回热度越大,系统性能越好;回热度为 0.055 时,系统的净输出功率不变,而热效率和炯效率分别为 10.05% 和 77.52%,与基本系统相比均有所提高。

(3) 抽气回热 ORC,降低抽气压力,增大抽气比,均可提高系统的性能;抽气压力 0.2 MPa,抽气比 0.25 时,系统的热效率和炯效率分别为 11.76% 和 90.74%,与简单循环相比虽有提高,但是系统的净输出比功降低了。

#### 参考文献:

- [1] 顾伟,翁一武,王艳杰. 低温热能有机物发电系统热力分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(5): 608-612.
- [2] 张红. 用低沸点工质的朗肯循环(ORE)方法回收低位工业余热[J]. 节能, 2004(11): 22-24.
- [3] WEI Dong-hong, LU Xue-sheng, GU Jian-ming. Dynamic modeling and simulation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system for waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28: 1216-1224.
- [4] KOSMADAKIS G, MANOLAKOS D, KYRITSIS S, et al. Comparative thermodynamic study of refrigerants to select the best for use in the high-temperature stage of a two-stage organic Rankine cycle for RO desalination[J]. Desalination, 2009, 243: 74-94.
- [5] 严家驊. 低温热能发电方案中选择工质和确定参数的热力学原则和计算式[J]. 工程热物理学报, 1982, 3(1): 1-6.
- [6] 罗琪,翁一武,顾伟. 抽汽回热式有机工质发电系统的热力特性分析. 现代电力[J]. 2009, 26(6): 39-44.

### Simulation and Optimization of Low-temperature Waste Heat Power Generation Based on Organic Rankine Cycles

WEI Xin-li, YIN Shu-gui, MA Xin-ling, LI Hui

(School of Chemical Engineering and Energy Zhenzhou University, Zhenzhou 450001, China)

**Abstract:** Thermal analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) driven by low-temperature waste heat was investigated based on the first and second laws of thermodynamics. The system was simulated with the software Aspen plus. The effects of superheat, subcooling, evaporation temperature and condensing temperature on the performance of the system were analysed respectively. The results show that the system with saturated working fluid gives the best performance, the thermal efficiency and exergy efficiency were improved by increasing evaporation pressure or reducing condensing pressure. The regenerative ORC gives better performance than basic Rankine cycle.

**Key words:** organic Rankine cycle; analysis; regeneration; efficiency; optimization