**文章编号:** 0253-4339 (2012) 01-0018-04 **doi:** 10.3969/j.issn. 0253-4339. 2012. 01. 018

# 有机朗肯循环的发电系统的实验研究

江龙<sup>1</sup> Ecichard A. Groll<sup>2</sup>

### (1 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2 Purdue University, Westlafayette India, 47906)

摘要 以低温热蒸汽来模拟废热作为有机朗肯循环(ORC)的热源,建立了以R134a为制冷剂的有机朗肯循环发电系统。通过EES(engineering equation solver)软件对ORC系统进行了数学建模,并将实验与模拟结果进行了比较。结果表明:系统以R134a为工质运行,可以达到8%的发电效率;当膨胀机进口的状态为饱和或者过热时,系统的热效率与发电量都会随着进口压力的增加而增加;系统压力较低的时候,系统的不可逆程度较大,系统效率会有较大损失。

关键词 热工学;有机朗肯循环;热力学分析;废热发电;低品位能源

**中图分类号:** TK249; TB61<sup>+</sup>5

**文献标识码**: A

# Study on Organic Rankine Cycle and Experiment of Geothermal Power Generation

Jiang Long<sup>1</sup> Ecichard A. Groll<sup>2</sup>

(1.Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2.Purdue University, Westlafayette India, 47906, U.S.A)

Abstract Low-temperature heat steam, as heat source of organic Rankine cycle (ORC), is used to simulate waste heat, and Organic Rankine Cycle (ORC)power generation system is established. Software of Engineering Equation Solver (EES) is utilized to solve the mathematical modeling of ORC system with refrigerant R134a. Predicted result is compared with experimental result. It is shown that the electricity generation efficiency is 8% with R134a working substance. The thermal efficiency and power rate can increase along with the increase of inlet pressure when inlet condition of expansion machine is saturated or overheated. Moreover, the system's irreversible loss is high and system efficiency will reduce greatly when the pressure of system is low.

Keywords Pyrology; Organic Rankine Cycle(ORC); Thermal analysis; Waste heat power generation; Low-Grade Energy

有机朗肯循环地热发电是地热能利用的一种 有效形式。它采用低沸点有机工质实现朗肯循环 发电。由于采用低沸点工质,可以充分利用较低 温度的地热流体实现发电,不需要消耗其他的化 石燃料,减小对环境的污染,因而受到人们的关 注。 很多研究人员通过理论分析与EES软件模 拟,对于中低温地热有机朗肯循环发电系统进行了 研究。根据工程热力学和传热学基本原理,分析了 发电系统的基本运行原理,并且提出了确定基本 有机朗肯循环系统循环参数(包括蒸发温度,冷凝 温度; 地热流体的质量流量, 温度; 外界环境温 度)的方法。在基本有机朗肯循环的发电系统方式 下,采用最佳循环参数,根据不同的地热流体温 度(60~150℃),选择出最佳且环保的循环有机工 质,为实际电站的设计提供了依据。 从烟分析和 能分析角度对亚临界饱和蒸气循环和亚临界过热蒸 汽循环做详细的对比分析,最终确定亚临界饱和蒸

# 1 有机朗肯循环及理论分析



图1给出了基于原始的朗肯循环所设计的有机 朗肯循环的原理图。系统主要包括两个换热器和一

气循环要优于亚临界过热蒸汽循环,并且在此基础 上分析了双级双工质有机朗肯循环。根据一级,二 级系统不同的地热流体入口温度选择合适的工质, 并且考察系统的适用性,给出合理的设计方案。

收稿日期: 2011年2月28日

个压缩机,一个膨胀机,其中位于加热循环侧的换 热器用作加热锅炉,为膨胀机提供蒸汽。热蒸汽在 膨胀机中膨胀并将热能转化为功,提供电量输出, 然后在冷凝器中冷凝成液体。最后经水泵压缩后再 进入到加热锅炉,完成一个循环。

图2是图1中循环系统的热工图,系统的工作 过程包括以下几个部分:1)1-2:降焓降温的过程,与等熵过程1-2s相比,存在做功能力损失;2) 2-3:降温降焓过程;3)3-4:升温焓升过程;4) 4-1:升温增焓过程。



图2 有机朗肯循环T-s 图 Fig.2 Organic Rankine cycle T-s diagram



### 图3 实验系统设计图 Fig.3 Experimental system design

有机朗肯循环系统实际工作的原理如图3所 示。循环回路由液体泵、膨胀机、加热锅炉、冷凝 器、回收器,温度压力和流量传感器组成。通过各 个部件的管路连接形成内循环系统。在这个系统 中,最重要的部件是涡旋式压缩机。在此系统中, 涡旋式压缩机实际上被逆向用作一个膨胀机。当高 压的工质进入膨胀机后,会推动轮轴从而发电。涡 旋式压缩机是一种在空调系统中广泛使用的压缩 机。换热器的作用是将来自地热循环的热量传递给 工质进行相变换热。地热循环将通过换热器的高温 侧高压蒸汽加热到200℃左右,而低温侧水温处于 4.5~15℃。为了使工质以一定的流速通过,系统采 用液压隔离泵来实现这一过程。此泵有60%左右的 效率并且拥有广泛的应用。一个收集器与泵相连接 用来确保进入膨胀机的只有汽相而非两相混合物。

# 2 数学建模

ı

### 2.1 数学模型以及输入条件

为了评价该实验系统的工作性能,采用表1的参数值对图1所示系统进行了仿真,其中a、b、h、 c分别代表了图1中各个点所测的温度和压力值,水 循环的温度和压力如表2所示。制冷剂R134a的流 量及冷热水流量分别为 0.0907kg/s、 0.1169kg/s、 0.3982kg/s。

表1 R134a循环的各个点的温度和压力值 Tab.1 Temperature and pressure of each point in R134a cycle

felo la cycle						
	$1_{a}$	1 <sub>b</sub>	2 <sub>a</sub>	2 <sub>b</sub>		
温度/℃	59.94	56.39	14.56	14.33		
压力/kPa	1413.43	1344.48	358.53	330.95		
	3 <sub>a</sub>	3 <sub>b</sub>	4 <sub>a</sub>	4 <sub>b</sub>		
温度/℃	4.5	4.39	5.97	6.25		
压力/kPa	365.42	324.05	1385.85	1372.06		

#### 表2 水循环的理论温度输入值

Tab.2 Theoretical temperature input value of water cycle

	1 <sub>h</sub>	$2_{h}$	1 <sub>c</sub>	2 <sub>c</sub>
温度/℃	56.67	15.56	4.44	15.56
压力/kPa	172.37	172.37	103.42	103.42

针对图2的热力过程,仿真中的各个过程的数 学模型分别为:

$$\eta_{\rm l} = 1 - T/T_{\rm h} \tag{1}$$

$$\eta_2 = (h_2 - h_1) / (h_{2s} - h_1)$$
(2)

$$w = m(h_2 - h_1) \tag{3}$$

$$\eta_3 = W_{\rm net} / q_{\rm in} \tag{4}$$

$$\eta_4 = (h_{4s} - h_3) / (h_4 - h_3) \tag{5}$$

$$m = AV/v \tag{6}$$

式中: η1是系统卡诺效率; η2是膨胀机效率;

w是流动功;  $\eta_3$ 是理论效率;  $\eta_4$ 是泵效率; *m*是质量流量。

### 2.2 模拟仿真结果

采用EES软件对上述模型进行计算,结果如表 3及表4所示。

$\eta_{_{ m max}}$	$\eta_{ m cycle}$	$\eta_{ m expander}$	$\eta_{ m pump}$
16.21	8.51	0.745	0.328
净功率	输出功率	输入功率	输入热量
1 73kW	1 95kW	0.22kW	20.27kW

表3 理论效率以及理论功和热

Tab.3 Theoretical efficiency and theoretical power and heat

Tab.4 Theoretical thermodynamic parameters								
体积流量/(m³/h)	管径/cm	焓/(kJ/kg)	压力/kPa	熵/(kJ/kg)	温度/℃	特殊容积/m <sup>3</sup>	速度/(m/s)	流体状态
4.786	1.90	121.2	1378.96	0.2219	56.66	0.0283	4.754	SH
20.28	1.90	112.6	344.8	0.2292	14.12	0.0281	19.77	SH
0.255	1.90	24.87	344.8	0.05398	4.44	0.0054	0.248	SL
0.277	1.90	25.86	1379.2	0.05527	5.994	0.0381	0.268	SL
2.518	1.90	28.12	172.4	0.05547	15.55	0.0271	2.453	L
0.635	1.90	102.1	172.4	0.1186	56.7	0.0068	0.619	L
0.543	1.90	102	103.44	0.1185	56.7	0.0005	0.529	L
10.43	1.90	8.078	103.44	0.01621	4.44	0.0033	10.17	L
5.687	1.90	28.09	103.44	0.05548	15.55	0.00017	5.544	L
7.127	1.90	28.13	137.92	0.05553	15.55	0.00225	6.946	L

表4 理论热力学参数值

注: SH表示过热蒸汽, SL表示饱和液体, L表示液体

# 3 实验系统的建立与性能测试



图4 实际的实验系统图 Fig.4 Actual experimental system

建立的实验系统如图4所示。实验结果见图 5~7。通过图5可以看出,大约500s后,系统开始 进入稳定的发电状态,在运行3min时产生较大压 差,约425kPa。在稳定的实验区域之外,计算的 实际的净发电量是不准确的,然而一旦实验的状 态完全稳定以后,通过图6可以看出,可以得到大 概1kW的电能输出量。图7为实际实验的系统循环 图,与理想的循环过程曲线对比可以看出,为了有 效的提高实验系统的整体表现,在热蒸汽端的温度 应该要降低,这样才可以在*T-s*图上的曲线过热部 分的差值增大,这样经过膨胀机压降变大,提高系 统的效率。

经过实验测试,第一实验净功为1.2kW,相应

的循环效率为8%。第二次实验的净功值为1kW, 相应的循环效率为5%。卡诺效率为23%。



将实验结果与表3的仿真结果进行对比,可以 知道,实验结果的理论效率为仿真中所得到的理论 效率的一半。主要是因为仿真过程中,忽略了换热 损失,所以得到较高的理论值。实验系统中由于系 统设计尺寸较小,金属热容相对于功的转换量来说 较大,所以热量损失所占的比重也较大。如果系统 在实际应用中扩大尺寸,热量损失相对于功的转换 来说将会有效地减小,效率会得到有效地提升并接 近理论效率的最大值。



# 4 总结

1)通过理论计算结果和实验数据的比较,系 统在工质R134a的运行下,可以达到8%的发电效 率,实验的初始有一些波动,然后发电过程趋向平 稳,系统的过热度还需要调整,使系统效率有所提 高。

 2)当膨胀机进口的状态为饱和或者过热时, 系统的热效率与发电量都会随着进口压力的增加而 增加。

3) 系统压力较低的时候,系统的不可逆程度 较大,系统效率会有较大损失。

#### 参考文献

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M].第四版.北京:高等教育出版 社, 2007.
- [2] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M].第四版.北京:高等教育 出版社, 2007.
- [3] Guo T, Wang H, Zhang S. Fluid selection for a lowtemperature geothermal organic Rankine cycle by energy and exergy[C] // 2010Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010.
- [4] Li J, Pei G, Li Y, et al. An experimental study of a micro high-speed turbine that applied in Organic Rankine Cycle [C] // 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference,2010.
- [5] Sylvain Quoilin, Vincent Lemort, Jean Lebrun. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander[J]. Applied Energy, 2010, 87 (4): 1260-1268.
- [6] Noboru Yamada, Md Nor Anuar Mohamad.Efficiency of hydrogen internal combustion engine combined with open steam Rankine cycle recovering water and waste heat[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2010, 35 (3): 1430-1442.
- [7] Mortaza Yari. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants[J].Renewable Energy, 2010, 35 (1): 112-121.

### 通讯作者简介

江龙,男(1988-),硕士研究生,上海市东川路800号上海 交通大学制冷与低温工程研究所,200240,13641741003, E-mail: maomaojianglong@126.com。研究方向:吸附式制 冷及其应用。

#### About the corresponding author

Jiang Long (1988–), male, graduate student. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, 800 Dongchuan Road, Shanghai, China, 200240, 13641741003, E-mail: maomaojianglong@126.com. Research fields: adsorption refrigeration and its application.