

The Applications of Organic Rankine Cycle in Low-Grade Industrial Waste Heat Recovery

Kui Liu¹, Yanpin Chen¹, Feng Gao¹, Tianquan Li¹, Xingang Liu¹, Lixia Li¹, Xiangling Kong^{2*}, Xuefang Li³

¹Cisen Pharmaceutical Co., Ltd., Jining

²China Petroleum Technology & Development Co., Beijing

³Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing

Email: lixftu@yeah.net

Received: Feb. 7th, 2014; revised: Feb. 18th, 2014; accepted: Feb. 27th, 2014

Copyright © 2014 Kui Liu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Kui Liu et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Most of the waste heat has not been properly used word-widely. The Organic Rankine Cycle (ORC) is considered to be the most efficient way for mid-low grade thermal energy recoveries. Following a brief introduction of the operating principle and working fluid selection, a thermodynamic analysis is performed for the waste heat power generation using ORC for a pharmaceutical enterprise. The results show that the low-grade waste heat recovery using ORC will be helpful to save energy and to reduce the thermal emissions to the environment.

Keywords: Organic Rankine Cycle; Waste Heat Recovery; Thermodynamics Analysis

有机朗肯循环在工业低品味余热回收中的应用

刘奎¹, 陈延品¹, 高丰¹, 李天全¹, 刘新刚¹, 李丽霞¹, 孔祥领^{2*}, 李雪芳³

¹辰欣药业股份有限公司, 济宁

²中国石油技术开发公司, 北京

³清华大学热能工程系, 北京

Email: lixftu@yeah.net

收稿日期: 2014年2月7日; 修回日期: 2014年2月18日; 录用日期: 2014年2月27日

摘要: 目前世界范围内存在大量未被合理利用的余热资源。对这些温度较低的中低品位热能的回收利用, 有机朗肯循环(ORC)被认为是最有效的途径。在简要介绍有机朗肯循环原理和工质选择原则的基础上, 以一个大型制药企业为例, 对使用 ORC 余热发电进行了热力学分析。结果表明, 使用有机朗肯循环进行低品位余热回收可以节省大量的能量并减少对环境的排放。

关键词: 有机朗肯循环; 余热回收; 热力学分析

1. 引言

从上个世纪下半叶开始, 随着科学技术的不断进步, 人类利用和改造自然的能力不断提高, 同时随着人口数量的急剧膨胀和生活方式的转变, 对各种资源

*通讯作者。

特别是能源的需求也不断增加。与此同时, 人类活动对地球自然环境的影响也日益显著。目前全球都面临不断加剧的能源与环境问题, 如化石燃料的日渐枯竭, 使得能源价格不断攀升, 而使用化石燃料的同时又造成了严重的环境污染及温室效应。为了应对不断加剧的能源环

境危机,世界各国都投入大量的人力物力进行替代能源开发以及提高现有能源的利用效率,节能减排也是各国共同的努力方向。而工业生产中产生的余热以及地热、太阳能等低品位热源的利用也越来越受到人们的关注。在世界范围内,大约 90% 的电能产生都通过朗肯循环产生,其主要包括定压吸热、等熵膨胀、等压冷凝和等熵压缩等四个过程,以水和水蒸汽为循环工质。当热源温度低于 370℃ 时^[1],例如余热及地热等,以水为工质的传统朗肯循环已经不能对其进行有效的利用。统计数据表明,工业生产中的余热占总热量产生大约一半以上,由于缺乏合适的利用手段,这部分热量基本上都被直接排放到环境中去。余热资源按照温度来分可分为三种:高温余热(500℃ 以上)、中温余热(200℃~500℃ 之间)和低温余热(200℃ 以下)。在这种背景下,有机朗肯循环逐渐受到研究者的重视。有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)采用低沸点有机物为工质^[2-6](如 R113, R123 等),具有使用寿命长、维护费用低和自动化程度高等特点,使得朗肯循环能够从低品位的热源中吸热,因此特别适合中低温余热的利用。有机朗肯循环与其他热机循环相比有许多明显的优点。首先,与其他热机循环相比,ORC 对废热的利用率更高;其次,使用 ORC 可以很容易地缩小设备的尺寸和重量;此外,有机朗肯循环比其他热电循环的成本更低。

我国的余热资源丰富,而且当前的利用率很低,大量的低温余热资源没有得到有效利用,因此,研究有机朗肯循环具有重要的理论意义和应用价值。

2. 有机朗肯循环基本原理

图 1 为有机朗肯循环系统示意图。低压液态有机工质(1 点)经过泵增压后(2 点)进入蒸发器吸收热量转变为高温高压蒸气(3 点);之后,高温高压有机工质蒸气推动涡轮机做功,产生能量输出;轮机出口的低压过热蒸气(4 点)进入冷凝器,向低温热源放热而被冷凝为液态,如此往复循环。循环的热力过程包括:

- 2-3: 定压吸热;
- 3-4: 绝热膨胀;
- 4-1: 定压放热;
- 1-2: 绝热压缩。

3. 工质选择

ORC 工质在 T-s 图上饱和蒸汽线的斜率是工质的

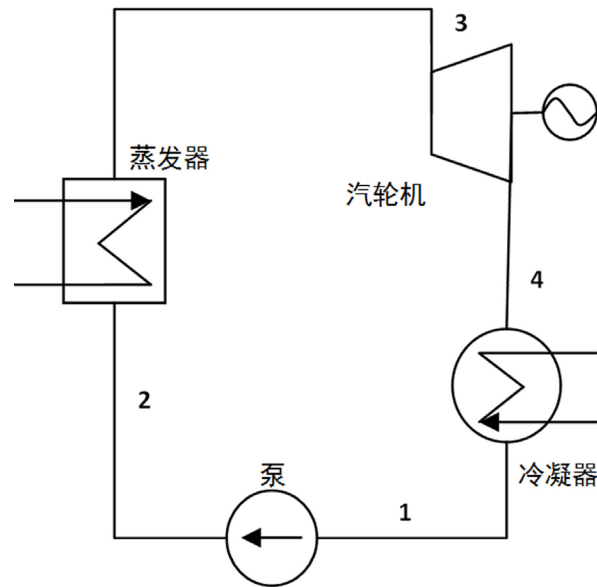


Figure 1. Schematic of the ORC
图 1. 有机朗肯循环原理图

重要特征,它将影响到工质的适用性、循环效率和系统中辅助设备的布置。

工质的选择是有机朗肯循环的关键性问题。由于有机朗肯循环使用的高温热源温度较低,其传热效率强烈依赖于工质的热物性和操作环境。为了能够利用低品位的热源,ORC 工质必须具有比水更低的沸点。此外,有机工质的选择还必须遵循一些重要的原则。

首先,有机工质的饱和蒸汽线必须具有大于或等于零的斜率。由于干流体和等熵流体在膨胀做功后仍然呈过热蒸汽状态,不会存在液滴,不需要再专门设置过热器。因此,这两种流体更适合作为 ORC 的工质。

其次,工质必须有较低的凝固点温度以及较高的稳定温度。与水不同的是,有机工质通常容易在高温下分解。因此,工质必须能在高温热源最高温度时还保持化学性质的稳定,同时工质的凝固点也必须低于低温热源的最低温度。

工质还应该具有较大的汽化潜热,可以在蒸发器中吸收更多的热量,从而降低额定的流量,减小设备的尺寸。此外,必须选择环境友好、容易获取和成本较低的工质。表 1 列出了部分 ORC 工质的临界参数以及在 1 bar 下的饱和温度和 20℃ 时的饱和压力。

4. 循环热效率分析

以亚临界的有机朗肯循环为例,假设系统达到稳

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 部分 ORC 工质热力学参数

工质	$T_c/^\circ\text{C}$	p_c/bar	$T_{s,1}/\text{bar}/^\circ\text{C}$	$p_{s,20^\circ\text{C}}/\text{bar}$
R134a	101.1	40.6	-26.4	5.7
R227ea	101.8	29.3	-16.6	3.9
R236fa	124.9	32	-1.8	2.3
R245fa	154	36.5	14.8	1.2
R141b	204.4	42.1	31.7	0.7
R365mfc	186.9	32.7	39.8	0.5
R113	214.1	33.9	49.19	0.037
环乙烷	280.5	40.8	80.3	0.1

态时管路中的压降可以忽略，由蒸发器、冷凝器、汽轮机和泵等部件向环境的散热量相对较小，也可以忽略。以干流体作为工质的典型有机朗肯循环的 T-s 图如图 2 所示。

2-3 过程：工质在蒸发器内定压吸热蒸发。余热热源向工质的传热量为

$$Q = m(h_3 - h_2) \quad (1)$$

3-4 过程：此过程为工质的不等熵膨胀过程，理想状态下这个过程应该如图 2 中的 3~4s 所示。然而实际过程中汽轮机的效率不可能达到 100%，因此实际过程只能到达 4 点。汽轮机的输出功为

$$W_{\text{汽轮机}} = m(h_3 - h_4) \quad (2)$$

汽轮机的效率可以表示为

$$\eta_{\text{汽轮机}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (3)$$

4-1 过程：此过程为工质在冷凝器中的定压放热过程。

1-2 过程：工质在泵中的等熵压缩过程，泵的等熵效率为

$$\eta_{\text{泵}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

加入泵的功为

$$W_{\text{泵}} = m(h_2 - h_1) \quad (5)$$

循环净功为

$$W_{\text{net}} = W_{\text{汽轮机}} - W_{\text{泵}} = m(h_1 + h_3 - h_2 - h_4) \quad (6)$$

基于热力学第一定律，ORC 的热效率可以表示为

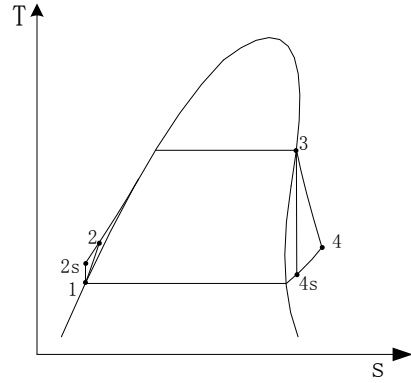


Figure 2. T-s diagram of ORC
图 2. 有机朗肯循环 T-s 图

循环净功和加入热量的比值，即

$$\eta_1 = \frac{W_{\text{汽轮机}} - W_{\text{泵}}}{Q} \quad (7)$$

式(1)~(6)中：

m —质量流量，t/h；

h_i — i 点处工质的焓，kJ/kg；

h_{is} —理想状态下等熵过程 i 点处工质的焓，kJ/kg。

5. 案例分析

以山东省某大型制药企业为例，该企业年使用蒸汽量约为 15 万吨，温度约为 160℃，使用后排放废水的温度约为 90℃，针对这些低温余热的利用，可以使用有机朗肯循环进行发电。假设采用有机朗肯循环将废水温度冷却到 30℃，则年可利用的热量约为 3.77×10^7 MJ，即相当于 1290 吨标煤的发热量。若采用 R245fa 作为工质，汽轮机入口温度和压力分别为 350 K 和 0.24 MPa，冷凝器出口温度为 298 K，压力为相应的饱和压力，泵和汽轮机的等熵效率分别为 0.9 和 0.85。循环各点处工质参数如表 2 所示，循环净功为 3.94×10^6 MJ，相当于 135 吨标煤热量，每年大约可以节省 33.75 万度电。

6. 结论

近年来，有机朗肯循环被证明是最有潜质和应用价值的低品位热能回收方式。本文简要介绍了有机朗肯循环的基本原理和有机工质的选择原则，以及循环热效率的计算方法，并结合某大型制药企业的实际余热情况进行了分析。结果表明，使用有机朗肯循环进行低品位余热回收可以节省大量的能量同时减少对

Table 2. State parameters of the working fluid in the cycle
表 2. 循环中各点处工质(R245fa)参数

状态点	T/K	p/MPa	h/kJ·kg ⁻¹	s/kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
1	298.00	0.147	232.26	1.1128
2	298.23	0.700	232.73	1.1129
2s	298.20	0.700	232.68	1.1128
3	350.00	0.700	460.44	1.7821
4	312.18	0.147	436.16	1.7959
4s	307.67	0.147	431.87	1.7821

环境的热污染。

参考文献 (References)

- [1] Hung, T.C., Shai, T.Y. and Wang, S.K. (1997) A Review of Organic Rankine Cycles (ORCs) for the Recovery of Low-Grade Waste Heat. *Energy*, **22**, 661-667.
- [2] Ray, S.K. and Moss, G. (1966) Fluorochemicals as Working Fluids for Small Rankine Cycle Power Units. *Advanced Energy Conversion*, **6**, 89-102.
- [3] Curran, H.M. (1981) Use of Organic Working Fluids in Rankine Engines. *Energy*, **5**, 218-223.
- [4] Badr, O., O'Callaghan, P.W. and Probert, S.D. (1985) Thermodynamic and Thermophysical Properties of Organic Working Fluids for Rankine-Cycle Engines. *Applied Energy*, **19**, 1-40.
- [5] Manfrida, G. and Kawambwa, S.J.M. (1991) Exergy Control for a Flat-Plate Collector/Rankine Cycle Solar Power System. *Journal of Solar Energy Engineering, (United States)*, **113**, 89-97.
- [6] 柯玄龄, 梁秀英 (1985) 有机工质朗肯循环(ORC)在中低温余热能量回收中的应用. *汽轮机技术*, **5**, 58-69.