

低温工业余热利用 ORC 工质选择

谢攀 隆瑞 刘政 刘志春 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要 本文针对以 85~200°C 的低温工业余热作为热源的有机朗肯循环系统, 基于热力学第一定律分析方法, 以 R245fa、R600a、R601 等 19 种潜在工质作为研究对象, 计算各有机工质在不同工业余热温度、蒸发温度及蒸发器出口过热度条件下的系统热效率, 为低温工业余热资源不同温度范围匹配效率最优的有机工质。结果表明: 各温度段低温余热资源对应效率最优的有机工质分别为 R290、R600、CF₃I 和 R601, 而目前应用较多的 R134a 和 R245 fa 在对应温度段的热效率也仅次于上述工质。

关键词 低温余热; 有机朗肯循环; 热效率; 工质选择

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2016)09-1834-04

Working Fluid Selection of Organic Rankine Cycle for Low-Temperature Industrial Waste Heat Utilization

XIE Pan LONG Rui LIU Zheng LIU Zhi-Chun LIU Wei

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The present study calculates the thermal efficiency of Organic Rankine Cycle power generation system whose heat source are the industrial waste heat in the temperature range of 85~200°C in different industrial waste heat temperature, evaporating temperature and evaporator outlet superheat conditions on the base of using the first law of thermodynamics. Choosing the most suitable organic working medium from 19 pure potential working fluid such as R245fa, R600a, R601 etc. for low-temperature industrial waste heat. The results show that the optimum working fluid of low-temperature waste heat in different temperature ranges are R290, R600, CF₃I and R601. R245fa and R134a have got wide application nowadays whose thermal efficiency after above-mentioned working mediums.

Key words low-temperature waste heat; organic rankine cycle; thermal efficiency; working fluid selection

0 前 言

2014 年中国统计年鉴数据表明, 能源消耗总量不断攀升, 2013 年已达 37.5 亿吨标准煤, 其中煤炭和石油占 84.4%, 总量依然庞大且仍以石化能源为主。由此引起的不可再生能源过度消耗及环境污染要求决策者必须调整能源消费结构, 才能实现可持续发展。具体措施包括: 开发利用新能源, 从根本上减少石化能源的利用; 在经济可接受范围内, 从能源生产到消费各环节, 提高现有能源的综合利用效率, 工业余热回收利用就是其中一种方式。据不完全统计, 工业余热中的低温余热 (200°C 以下) 所占比例约 50%^[1], 由于其品位较低, 传统的以水为工质的朗肯循环因为“工作压力低”、“膨胀机出口工质处

于两相区”难以转化利用^[2], 有机朗肯循环 (ORC) 的出现, 正好解决这一问题。计算表明, 低温有机朗肯循环热效率虽然低于低温水蒸气朗肯循环, 但大部分潜在有机工质临界温度相对较低, 以它们作为低温朗肯循环工质, 能够在 0.5~3 MPa 压力范围内蒸发, 是膨胀机比较理想的工作压力区间, 同时有机工质冷凝压力高于 0.1 MPa, 冷凝器不需要在负压下工作; 另一方面, 即使有机工质为湿工质, 也能在较低过热度 (10°C) 条件下保证膨胀机出口干度。

低沸点有机工质的选择对低温有机朗肯循环系统的性能具有重要影响, 随着环境问题日益严重, 对有机工质的要求也更加苛刻^[3-5]。文中选择 ODP 值

收稿日期: 2015-12-25; **修订日期:** 2016-08-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No.2013CB228302)

作者简介: 谢攀 (1991-), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事低温工业余热回收发电技术研究。 **通信作者:** 刘伟, 教授, 博士生导师, w_liu@hust.edu.cn

为 0 的 19 种有机物^[6]作为 ORC (Organic Rankine Cycle) 系统工质, 以定热负荷的低温工业余热 (85~200°C) 为热源, 计算系统热效率并匹配效率最优工质。

1 有机朗肯循环计算模型

有机朗肯循环是以低沸点有机物代替水作为工质的朗肯循环。考虑实际过程后, 以 R245 fa 为例, 其基本原理如图 1 所示。有机工质经泵加压后进入蒸发器吸热, 热源温度从 T_{HI} 降到 T_{HO} , 工质温度从 T_4 升高到 T_1 ; 蒸发器出口过热的高温高压蒸汽进入膨胀机做功后, 变为温度为 T_2 的低压过热乏汽; 乏汽进入冷凝器内放热降温至 T_3 , 冷却液体温度从 T_{CI} 升高至 T_{CO} 。如此循环, 完成热与功转换过程。

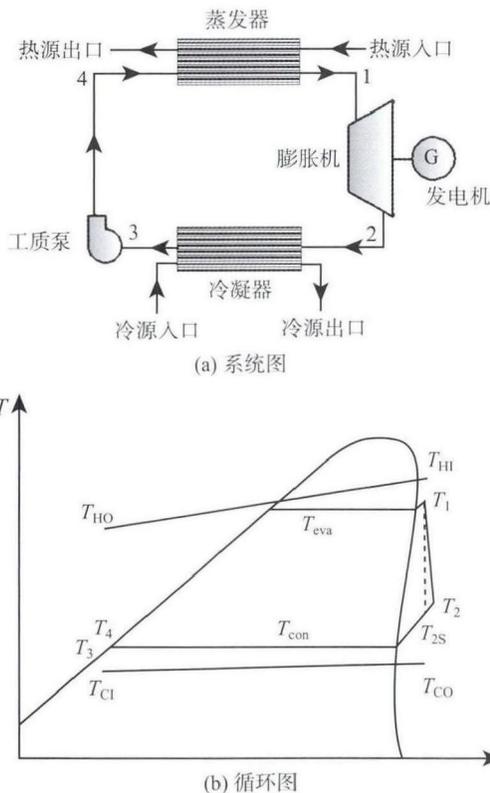


图 1 实际有机朗肯循环基本原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Organic Rankine Cycle

1.1 初始化参数

热源: 85~200°C 工业余热, 如常压废水 (温度低于 100°C)、带压废水 (温度高于 100°C)、烟气等。假设不同温度余热热负荷为 1000 kW, 不考虑蒸发器内具体换热过程, 针对不同余热资源类型, 在实际系统中采用匹配性能较好的蒸发器。

工质: 保证夹点温差大于 0°C^[7]并结合实验中工质在蒸发器内温度提升经验值, 假设蒸发器出口

温度 T_1 比低温工业余热进口温度 T_{HI} 低 10°C, 工质蒸发器内过热度为 5~120°C (间隔 5°C 计算一次), 膨胀机内效率为 0.85, 冷凝器出口温度 T_3 比冷源进口温度 T_{CI} 高 5°C, 冷凝器内工质过冷度 5°C。

冷源: 为常温冷水 (由冷却塔产生, 循环使用), 进口温度 T_{CI} 为 20°C。

物性参数: 工质物性参数从 NIST 提供的 REFPROP8.0 读取。

1.2 有机朗肯循环基本热力性能分析

假设系统处于稳定流动状态, 不考虑蒸发器、冷凝器内的热损失。因目前 ORC 应用中, 用户更多考虑输出功大小, 而对于给定余热资源, 热负荷一定, 其输出功大小由系统热效率决定, 因此以热效率直接选择工质。基本有机朗肯循环热力过程:

过程 4-1: 蒸发器内定压吸热

$$Q_H = m_{wf} (h_1 - h_4) \quad (1)$$

式中, $Q_H = 1000$ kW, 为低温工业余热热负荷; m_{wf} 为工质流量;

过程 1-2: 膨胀机内非等熵膨胀做功

$$W = m_{wf} (h_1 - h_2) \quad (2)$$

式中, W 为系统输出功率。

系统热效率:

$$\eta = \frac{W - W_{\text{Pump}}}{Q_H} = \frac{\eta_e (h_1 - h_{2s}) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \quad (3)$$

式中, h_{2s} 为等熵膨胀过程工质出口焓, η_e 为膨胀机绝热内效率。

2 有机工质选择

本文基于实际系统考虑, 以 R245 fa、R600a、R601 和 R134a 等 19 种 ODP 值为 0 的有机工质作为选择对象。由初始化参数可知有机工质蒸发温度 T_{eva} 在 70~185°C 之间。在计算时, 工质蒸发压力低于 3 MPa (太高对容器设备要求太高), 高于 0.3 MPa (太低不利于膨胀机运转); 冷凝温度 $T_{con} = 30^\circ\text{C}$, 除正戊烷和正己烷的冷凝压力稍低于大气压, 其余 17 种有机工质均可保证冷凝器正压下工作; 若某一工质受临界温度或蒸发压力限制蒸发温度不能太高时, 对于温度相对较高的余热只能增加其过热度计算热效率。

2.1 有机工质热效率计算

对每一种有机工质, 在定热负荷条件下, 计算不同的过热度、蒸发压力和低温余热资源温度条件下对应的热效率, 针对余热资源温度匹配效率最优的有机工质。

图 2 为 R218、R245 fa、正己烷及 R601 的计算结果。图中 η 为低温有机朗肯循环系统热效率, T_{eo} 为工质蒸发器出口温度 (与图 1(b) 中 T_1 对应), sup 为工质蒸发器出口过热度。

如图所示, R218 因临界温度很低, 在计算所选蒸发温度范围内只能在 70°C 一种蒸发温度下蒸发, 此时其热效率即为该种工质最优效率; R245 fa 的最高蒸发温度为 140°C, 同时 REFPROP 里该工质温度上限为 166.85°C, 因此该类有机工质并不能在 85~200°C 整个低温段工作; 正己烷 (n-hexane) 因临界温度相对较高, 在蒸发温度低于 115°C 时, 蒸发

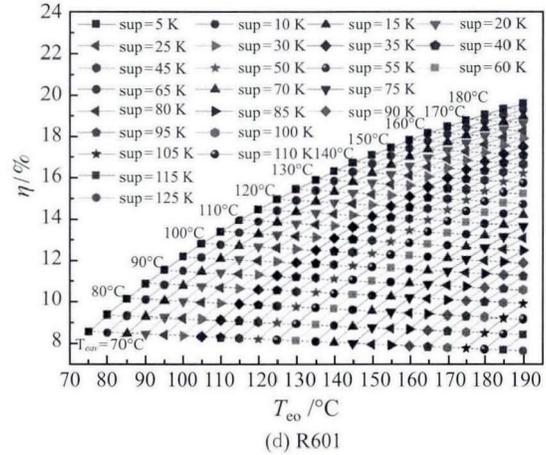
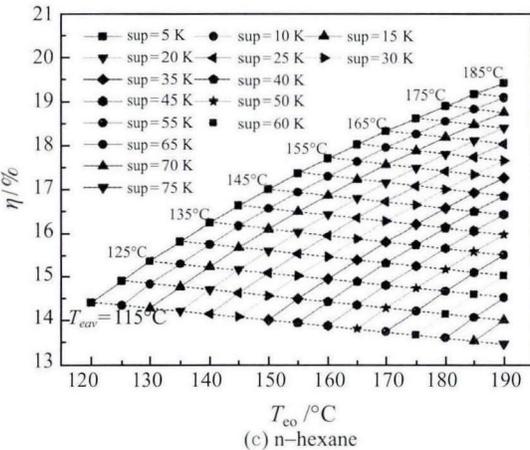
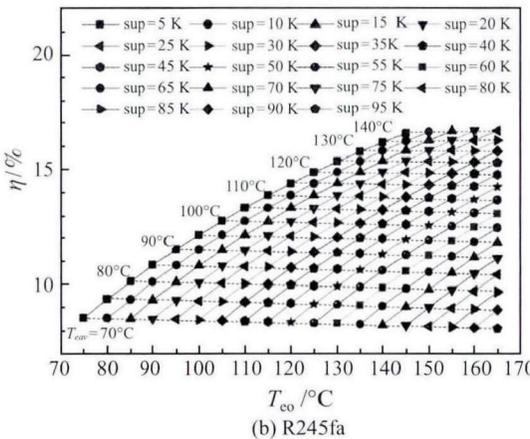
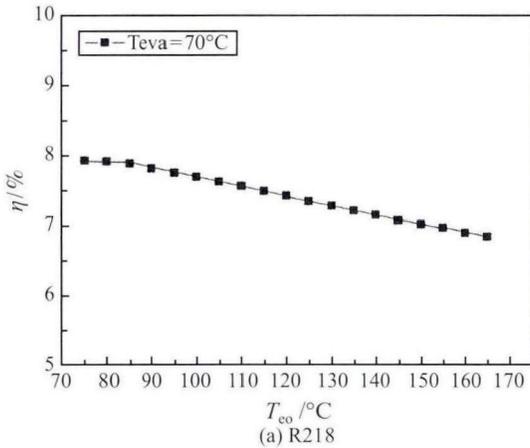


图 2 不同工质低温工业余热利用有机朗肯循环热效率
Fig. 2 Thermal efficiency of Organic Rankine Cycle for low-temperature industrial waste heat utilization



压力低于 0.3 MPa, 因此这类工质不能在资源温度较低段工作; R601 在整个低温工业余热段临界温度刚好适中, 其效率计算也最完整。

对这四种工质, 均有一个共同规律: 蒸发温度一定时, 热效率伴随资源温度增加变化很小, 从热力学第二定律来考虑, 蒸发温度一定, 资源温度越高, 蒸发器内换热温差越大, 不可逆损失越大, 是不经济的, 所以同一蒸发温度所需资源温度为可满足其循环条件的最低资源温度; 过热度一定时, 热效率伴随资源温度增加而增加, 这是由资源品味决定的; 资源温度 (图 2、3 中以 T_{eo} 代表) 一定时, 蒸发压力越高、过热度越小系统热效率越高。

2.2 有机工质热效率比较

基于 2.1 节中分析内容, 19 种有机工质在低温工业余热利用有机朗肯循环系统中的热效率如图 3 所示。整个低温工业余热不同温度对应效率最优工质见表 1。

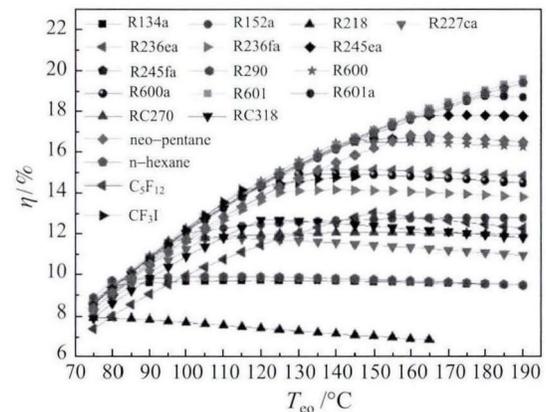


图 3 19 种工质热效率比较
Fig. 3 Thermal efficiency of Organic Rankine Cycle of 19 pure working medium

表 1 低温工业余热利用有机朗肯循环工质匹配
Table 1 Match between heat source temperature and Organic working fluid

资源温度/ $^{\circ}\text{C}$	有机工质	蒸发温度/ $^{\circ}\text{C}$	蒸发压力/ MPa	热效率	输出功率/ kW
85	R290	70	2.59	0.089	88.8
90		75	2.85	0.097	97.1
95	R600	80	1.01	0.102	102.3
100		85	1.13	0.110	109.6
105		90	1.25	0.117	116.5
110		95	1.38	0.123	123.1
115	CF ₃ I	95	2.40	0.129	129.3
120		100	2.63	0.136	135.9
125		105	2.88	0.142	142.0
130	R600	115	2.02	0.146	146.1
135		120	2.21	0.151	151.1
140		125	2.42	0.156	155.8
145		130	2.63	0.160	160.3
150		135	2.87	0.165	164.6
155		140	1.33	0.167	167.2
160		145	1.45	0.171	171.1
165	R601	150	1.59	0.175	174.7
170		155	1.73	0.178	178.2
175		160	1.89	0.182	181.5
180		165	2.05	0.185	184.7
185		170	2.22	0.188	187.7
190		175	2.41	0.191	190.5
195	180	2.61	0.193	193.2	
200	185	2.82	0.196	195.8	

不难发现, 对于整个低温工业余热温度段, 效率较好的依次为 R290、R600、CF₃I、R601。这些工质不仅环境友好, 而且性能优越, 目前之所以未得到广泛应用是它们都易燃, 且易与空气混合形成爆炸性混合物。但随着科技发展, 安全措施越加完善, 这些性能优越的工质必将得到广泛应用。

从图 3 还可以发现, 在资源温度小于 90 $^{\circ}\text{C}$ 时, R134a 性能也比较好, 推荐使用; 而资源温度在 90~

200 $^{\circ}\text{C}$ 时, R245ca、R245 fa 性能仅次于 R600、R601, 同时安全环保, 推荐使用。

3 结 论

本文基于热力学第一定律, 对热负荷一定的低温工业余热资源, 以热效率为目标, 进行资源和有机工质间的匹配。结果表明, 对于低温工业余热 (85~200 $^{\circ}\text{C}$), 各温度段对应效率最优的有机工质分别为 R290($\leq 90^{\circ}\text{C}$)、R600(90~110 $^{\circ}\text{C}$)、125~150 $^{\circ}\text{C}$)、CF₃I(110~125 $^{\circ}\text{C}$)、R601($\geq 150^{\circ}\text{C}$)。

参 考 文 献

- [1] Hung T C, Shai T Y, Wang S K. A Review of Organic Rankine Cycles (ORCs) for the Recovery of Low-Grade Waste Heat [J]. Energy, 1997, 22(7): 661-667
- [2] Maizza V, Maizza A. Unconventional Working Fluids in Organic Rankine-Cycles for Waste Energy Recovery Systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(3): 381-390
- [3] Oyewunmi O A, Taleb A I, Haslam A J, et al. An Assessment of Working-Fluid Mixtures Using SAFT-VR Mie for Use in Organic Rankine Cycle Systems for Waste-Heat Recovery [J]. Computational Thermal Sciences, 2014, 6(4)
- [4] Liu B T, Chien K H, Wang C C. Effect of Working Fluids on Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery. Energy [J]. Energy, 2004, 29(8): 1207-1217
- [5] Calero S, Wendland M, Fischer J. Description of Alternative Refrigerants with BACKONE Equations [J]. Fluid Phase Equilibria, 1998, 152(1): 1-22
- [6] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, et al. Working Fluids for Low-Temperature Organic Rankine Cycles [J]. Energy, 2007, 32(7): 1210-1221
- [7] 王辉涛, 王华, 龙恩深, 等. 低温废气余热驱动有机朗肯循环的优化 [J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1183-1189
WANG Huitao, WANG Hua, LONG Enshen, et al. Parameter Optimization of the Low-Temperature Exhaust Gas Waste Heat Powered Organic Rankine Cycle [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(7): 1183-1189