

Comparison and Analysis of the Performance of Two New Working Fluids and Conventional Refrigerants in ORC System

Zheng Liu, Zhichun Liu, Wei Liu

School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei
Email: 378010740@qq.com

Received: Mar. 30th, 2017; accepted: Apr. 23rd, 2017; published: Apr. 26th, 2017

Abstract

The present study focuses on Organic Rankine Cycle power generation system whose heat source is the industrial waste heat in the temperature range of 90°C~200°C, including SES36, R1233zd-E two kinds of new refrigerants and R245fa, R123 two kinds of conventional refrigerants at different ambient temperatures based on thermodynamic efficiency, system net work, irreversible loss and the outlet of the evaporator refrigerant thermodynamic properties of available potential to make comparison. The results of analysis show that the refrigerant has the best evaporation temperature under different thermodynamic performance parameters. Under the critical temperature, the order is R123, R1233zd-E, R245fa and SES36. Considering the safety, environmental friendliness and equipment cost, R1233zd-E is a good substitute for R123 and R245fa, and SES36 ranks the second.

Keywords

Organic Rankine Cycle, Working Fluid Selection, Evaporation Temperature, Thermodynamics Available Potential

两种新型工质与传统工质在有机朗肯循环系统中性能对比分析

刘 政, 刘志春, 刘 伟

华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉
Email: 378010740@qq.com

收稿日期: 2017年3月30日; 录用日期: 2017年4月23日; 发布日期: 2017年4月26日

摘要

针对90℃~200℃的低温余热有机朗肯循环系统,选取SES36、R1233zd-E两种新工质与R245fa、R123两种传统工质在不同的环境温度下基于热力学效率、净功量、系统不可逆损失以及蒸发器出口工质的可用势热力学性能进行了对比分析,分析结果表明工质在不同的热力学性能参数下都有其最佳蒸发温度。而在各自临界温度以下热力性能优劣程度依次为R123, R1233zd-E, R245fa, SES36。综合考虑安全性、环境友好性、设备成本方面, R1233zd-E是良好的R123和R245fa的替代品, SES36次之。

关键词

有机朗肯循环, 工质选择, 蒸发温度, 热力学可用势

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国当前的能源形势相当严峻,节能减排、降低能耗、提高能源综合利用效率是解决我国能源问题的必然选择。工业作为主要耗能领域,提高工业部门的能源利用效率和余热回收利用水平,遵循“温度对口,梯级利用”的科学用能原则,合理评价和充分利用余热余压资源,尤其是中低温余热资源,对于实现我国节能减排的战略目标具有非常重要的意义。工业余热中的低温余热(200℃以下)所占比例约50%,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,有机朗肯循环(ORC)的出现,正好解决这一问题,而在有机朗肯循环系统中,工质的选择则是至关重要的环节。

有机朗肯循环的工质是一种低沸点有机物,其物理性能决定其正好适合低品位热能转化利用。有学者于1966年第一次提出将有机物质应用于朗肯循环,也是此刻才有了有机朗肯循环这一概念。有机物质在有机朗肯循环中扮演了不可替代的角色,其性能直接决定循环的性能,国内外学者针对有机朗肯循环工质选择做了大量研究,王建永等[1]针对有机朗肯循环地热发电系统,在地热水90-150℃范围内,选取R245fa、R141b等五种有机工质,以最大净发电功率作为热力性目标对系统进行参数优化,优化结果表明,工质R245fa可选为最佳适用工质。刘健等[2]在回收热量一定的条件下,运用热力学第一定律建立了有机朗肯循环热力分析模型,基于蒸发参数法展开了工质R123和R245fa的优选研究,计算结果表明从工质的环保性和热力性能来综合考虑,认为工质R123优于工质R245fa。韩中合等[3]基于热源温度为100℃~200℃低温热源,选取了R123、R141b等6种工质进行了对比分析。谢攀等[4]针对85℃~200℃低温工业余热,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。刘棉涛,李越伟,刘燕妮等[5]选取R113、R114、R141b、R123、R245fa、R245ca、R600、R600a作为回收120℃~200℃低温余热的有机朗肯循环工质,从净功量、热效率、不可逆损失等方面对有机朗肯循环系统性能进行分析和优化,得出系统最佳运行工况。LI Xinguo等人[6]研究了R134a、R245fa等17种工质在整个蒸发温度到接近工质的临界温度

附近的范围内，系统热力学性能随着工质的变化和蒸发温度的变化情况，净输出功率与工质临界的温度的关联。

虽然 R123、R245fa 是广泛应用的低温工质，但是由于制冷剂不可避免的泄漏，因此安全性被放在关键的位置，R123 的毒性使得其一直为人所诟病。目前欧洲已全面禁止 R123 的使用，发展中国家要求 2020 年废止。虽然 R245fa 可以作为 R123 的替代品但是由于其临界温度与压力的限制，使得其热力性能没有那么出色，因此国内外对于新型工质的研究势在必行。近两年来 R1233zd-E 和 SES36 成为了新型工质的代表，程启康等[7]对 R1233zd-E 和 R123 的换热性能进行对比研究。管束测试台用于测试管外制冷剂侧换热系数，套管式换热台用来测试管内水侧换热系数。试验结果表明，应用在上述 2 种管型时，R1233zd-E 的换热系数在测试的热流密度范围内均稍高于 R123。认为 R1233zd-E 是一种能够满足环境要求的、具有很好的换热性能的 R123 的替代物。Adriano Desideri 等[8]搭建了实验台对传统工质 R245fa 与新兴工质 SES36 进行了对比研究，着重于膨胀机在用上述两种有机工质的性能变化，实验结果表明在同样膨胀机转速的情况下应用 SES36 为工质时的膨胀机等熵效率高于 R245fa，相反的对于给定的压力比下的膨胀机的输出功率 R245fa 要大于 SES36。Sebastian Eyerer 等[9]采用实验方法对于有潜力的新工质 R1233zd-E 对于传统工质 R245fa 的取代可能性进行了探究，结论表明 R1233zd-E 除了具有低于 R245fa 的全球变暖潜力值(GWP)外，在热力学性能方面，实验可获得的最大热力学效率 R1233zd-E 高于 R245fa，而最大净功率则相反。

2. 有机朗肯循环发电系统

有机朗肯循环是由蒸发器、膨胀机、冷凝器和工质泵四个基本部件，其工作原理如图 1 所示：有机工质先经工质泵绝热加压送入蒸发器，在蒸发器中工质吸收高温热源的热量定压汽化、产生高温高压的蒸汽，蒸汽进入膨胀机绝热膨胀做功，膨胀机通过联轴器带动发电机发电，将高温高压的有机工质气体携带的机械能转化为电能输出，而经过膨胀机做功后的工质变为低温低压的乏汽，最后排入冷凝器内与冷源定压换热，然后重新经工质泵送入蒸发器进行新的循环。

在本文的热力学分析过程中，做出如下假定：系统处于稳定流动状态；传热过程中的压降忽略不计；蒸发器冷凝器中的换热过程为定压过程；系统与外界没有热量交换；蒸发器出口工质为饱和状态；平均传热温差为 10℃；膨胀机的等熵效率为 0.85；工质泵的等熵效率为 0.8；夏季环境温度假定 25℃，冬季环境温度为 5℃。

热力系统计算分析如下：

系统循环过程如图 2 所示

工质在蒸发器内等压吸热过程 4-1

$$Q_e = m_f (h_1 - h_4) \quad (1)$$

工质在膨胀机内做功 1-2

$$W_t = m_f (h_1 - h_2) \quad (2)$$

工质在冷凝器内定压冷却过程 2-3

$$Q_c = m_f (h_2 - h_3) \quad (3)$$

工质在增压泵内加压过程 3-4

$$W_p = m_f (h_4 - h_3) \quad (4)$$

评价指标：

(1) 系统热效率

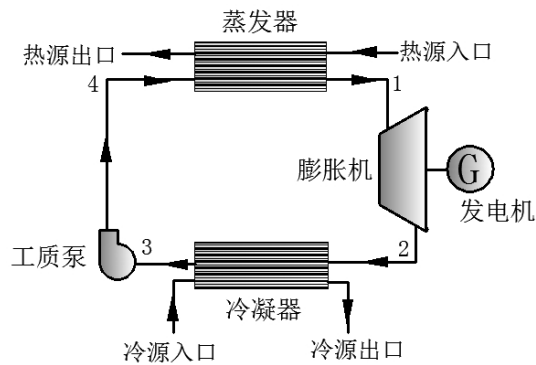


Figure 1. Schematic diagram of the organic Rankine cycle system

图 1. 有机朗肯循环系统简图

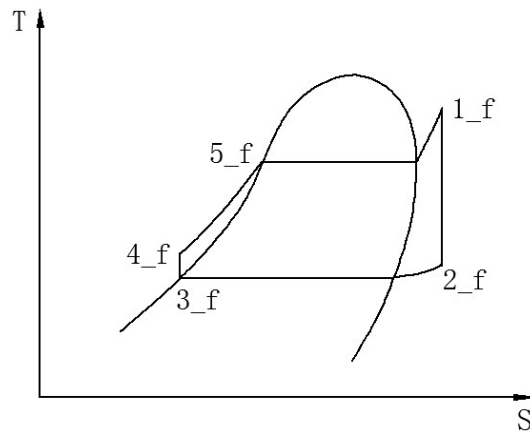


Figure 2. Diagrammatic sketch of system cycle

图 2. 系统循环过程示意图

$$\eta_{cyc} = (W_t - W_p) / Q_e \quad (5)$$

(2) 净功量

$$W_{net} = W_t - W_p \quad (6)$$

(3) 循环不可逆损失

$$I = T_0 \left(\frac{h_2 - h_3}{T_c} - \frac{h_1 - h_4}{T_h} \right) \quad (7)$$

(4) 热力学可用势:

热力学中定义: 在环境条件下, 能量中可转化为有用功的最高份额称为该能量的焒。焒可用于表征热力系统与环境相互作用时, 从任意状态可逆地变化到与环境相平衡的状态时所作出的最大有用功。但焒是一个过程量, 不能表征循环过程中某一时刻工质流体的热力状态。文献[10]提出了一个新的热力学参数: 热力学可用势。在 T_0 一定时, 可用势是一个状态量, 可用于表征工质在某一状态下做有用功的最大能力, 其具体表达式如下:

$$e = h - T_0 s$$

蒸发器出口热力学可用势(以 0°C 为计算基准)

$$e_1 = h_1 - T_0 s_1 \quad (8)$$

3. 有机工质的选择

有机朗肯循环系统的工质选择对系统的运行具有重大的影响，因此也是十分重要的环节。理想的有机工质应具有如下特征

- (1) 具有良好的物理性质，无毒或者低毒性，不易燃，不易爆炸。
- (2) 对环境破坏性小，即臭氧衰减指数(ODP)为零，和具有较低的温室效应指数(GWP)。

(3) 热力学性质方面，要求其临界温度应略高于循环过程中热源的最高温度，以保证蒸发过程处于两相状态。循环的最高蒸发压力不宜过高，避免出现设备承压能力方面的问题，工质为干工质，即 $T-s$ 图中饱和蒸汽曲线的斜率为正，这是因为干流体的高温高压蒸汽在涡轮机中膨胀后呈过热蒸汽状态，不会存在液滴的情况，因此更适宜作为有机朗肯循环的工质。

而在实际选择的过程中，很少有工质能同时满足上述要求，因此在选择过程中会根据不同的需要选择最佳工质。由于这四种工质的 ODP (Ozone Depletion Potential)为零或近似为零，而它们又具有相似的物理性质，临界温度和临界压力相差不大，因此具备了相互替代的可能性，对比四种工质而言，R123 的临界温高于另外三种工质，这就使得在利用较高温度热源时，R123 与高温热源的传热温差更小，匹配性能更好。如图 3 所示在同样的蒸发温度下，R245fa 的蒸发压力最高，SES36 最小，而较高的压力将会提高机械承压能力，进而增加不必要的费用，因此在考虑系统机组制造成本方面，SES36 是优于其它三种工质的。从表 1 中可以看到 R1233zd-E 的 GWP (Global Warming Potential)是四种工质里最小的，SES36 和 R1233zd-E 在安全性方面是优于 R123 与 R245fa 的。

应用 matlab&refprop 9.1 软件进行模拟，从系统的热效率、净功量、不可逆损失、可用势这些热力性能方面对四种工质进行对比分析。

3.1. 热效率

图 4 表示了四种工质循环热效率随蒸发温度的变化情况，当环境温度为 25℃时，传热温差不变的情

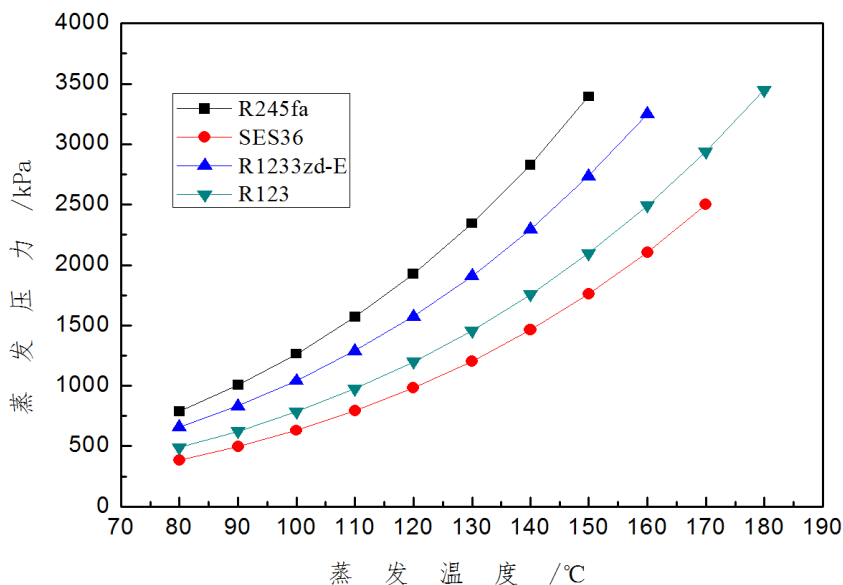
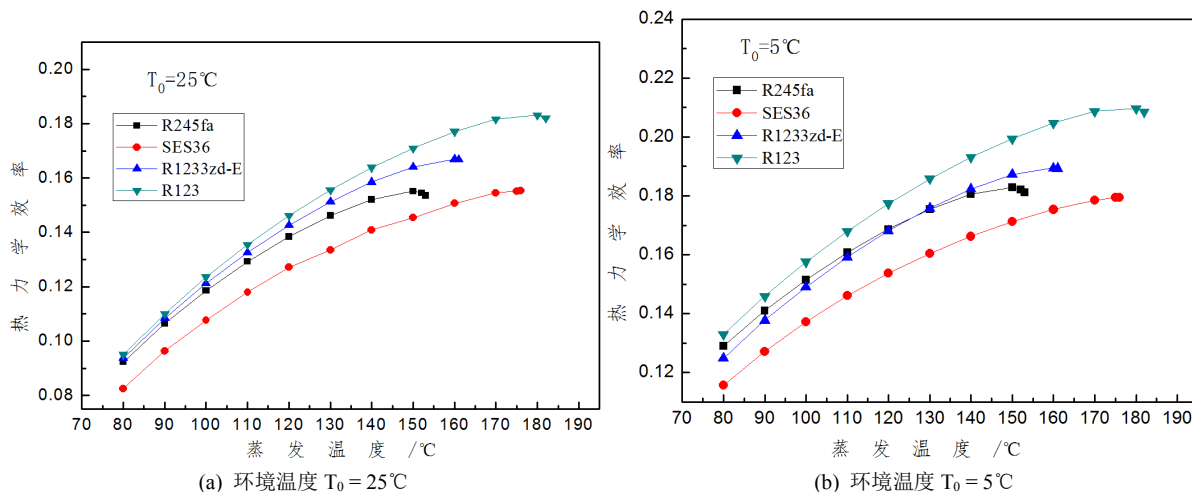


Figure 3. Evaporation pressure of working fluid at different evaporation temperature

图 3. 工质在不同蒸发温度下的蒸发压力

Table 1. Physical parameters of working fluid.**表 1.** 工质物性参数

工质	分子量	标准沸点/ °C	临界温度/°C	临界压力/MPa	ODP	GWP	安全性
R245fa	134.05	15.14	154.01	3.651	0	950	低毒不可燃
SES36	184.85	35.34	177.55	2.849	0	3710	无毒不可燃
R1233zd-E	130.5	18.32	165.6	3.571	0.00034	7	无毒不可燃
R123	152.93	27.823	183.68	3.6618	0.012	120	低毒不可燃

**Figure 4.** Relationship between thermodynamic efficiency and evaporation temperature at different ambient temperatures**图 4.** 不同环境温度下系统热力学效率与蒸发温度的关系

况下，系统冷凝温度近似不变，系统的热效率由蒸发温度决定。从图中可以看到，四种工质的循环热效率都随着蒸发温度的升高而增大，同样的蒸发温度下，R123 的循环热效率是最高的。但是在接近临界温度的蒸发压力下，除了 SES36 外，其它三种工质系统热效率都会有小幅度的下降，这也意味着这三种工质都有各自最佳蒸发温度对应的最高热力学效率。R245fa 在蒸发温度为 150°C 时，热效率为 15.51%；R1233zd-E 在蒸发温度为 160°C 时，热效率为 16.69%；R123 在蒸发温度为 180°C 时，热效率为 18.32%，而 SES36 则没有出现这样的情况可能是由于 SES36 是由两种共沸工质组成的混合物原因。

当环境温度为 5°C 时，系统的冷凝温度下降，理论上系统的热效率是增大的，从图中也可以明显看出在同样的蒸发温度下，四种工质的热效率都上升了 3% 左右，当蒸发温度上升 20°C 系统热效率的上升幅度是不如冷凝温度下降 20°C，因此同等情况下，冷凝温度的改变对系统热效率的影响是大于蒸发温度的。系统热效率随工质蒸发温度的增加趋势和环境温度为 25°C 时是一致的，但在环境温度为低于 120°C 时，R245fa 热效率大于 R1233zd-E。而最佳蒸发温度对应的热力学效率也有小幅度的上升，R245fa 在蒸发温度为 150°C 时，热效率为 18.28%；R1233zd-E 在蒸发温度为 160°C 时，热效率为 18.94%；R123 在蒸发温度为 180°C 时，热效率为 20.96%。

3.2. 净功量

净功量是评价工质做功能力的重要指标。图 5 表示了不同工质在不同蒸发温度下的循环净功量，可以看出，不同工质的循环净功量有所差，但都随着蒸发温度的增加而有一个先增大后减小的趋势，因此都有各自最佳蒸发温度对应的所对应的最大净功量，R245fa 在蒸发温度为 140°C 时，净功量最大，环境

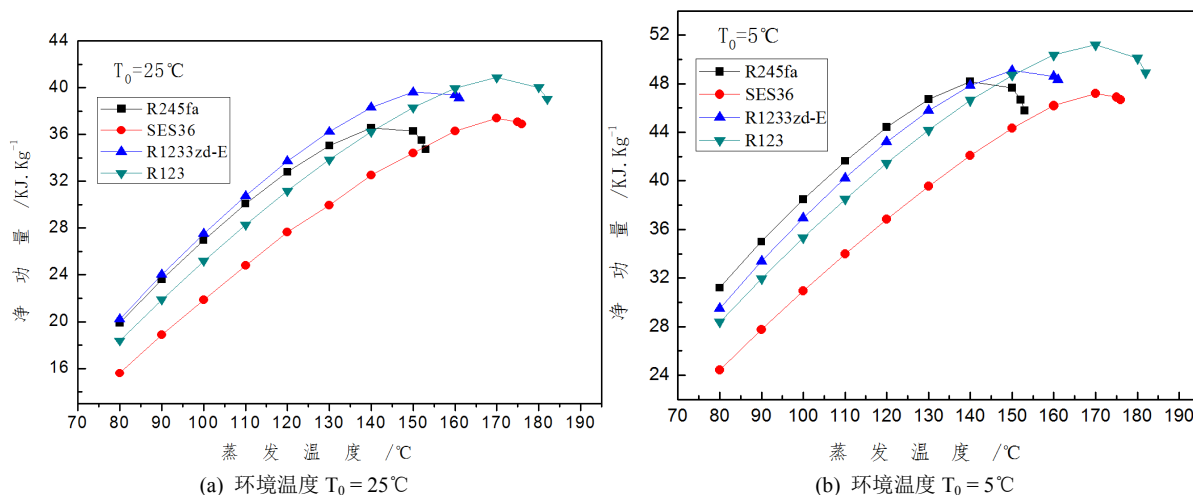


Figure 5. Relationship between network and evaporation temperature at different ambient temperatures

图 5. 不同环境温度下净功量与蒸发温度的关系

温度为 25°C 时, 最大净功量为 36.55 kJ/kg , 环境温度为 5°C 时, 最大净功量为 48.16 kJ/kg ; R1233zd-E 在蒸发温度为 150°C 时, 净功量最大, 环境温度为 25°C 时, 最大净功量为 39.64 kJ/kg , 环境温度为 5°C 时, 最大净功量为 49.10 kJ/kg ; 而 R123 和 SES36 在环境温度在 170°C 达到最大净功量, SES36 在环境温度为 25°C 时, 最大净功量为 37.39 kJ/kg ; 环境温度为 5°C 时, 最大净功量为 47.21 kJ/kg ; R123 在环境温度为 25°C 时, 最大净功量为 40.88 kJ/kg ; 在环境温度为 5°C 时, 最大净功量为 51.22 kJ/kg 。从图中可以看到在环境温度不同时四种工质的净功量的大小关系略有不同, 在环境温度为 25°C 时, 在同样蒸发温度下对应的净功量 R1233zd-E 是大于 R245fa, 而在环境温度为 5°C 时, 同样蒸发温度下对应的净功量 R245fa 是大于 R1233zd-E 的。

3.3. 循环不可逆损失

如图 6 所示在环境温度不同情况下, 四种工质的循环不可逆损失随蒸发温度变化情况一致, 都随着蒸发温度的升高而增大, 这是由于当环境温度不变时, 在传热温差不变的情况下, 蒸发温度增大, 高温热源温度上升, 也就是工质平均吸热温度上升, 而环境温度不变则低温热源平均温度基本不变, 由公式可以看出循环不可逆损失会增大。在同样的蒸发温度下, 不可逆损失的 $\text{SES36} > \text{R245fa} > \text{R1233zd-E} > \text{R123}$, 由此可以看出在考虑系统不可逆损失方面 R123 为最优工质。

而环境温度的变化对系统不可逆损失的影响从图中可以看出在蒸发温度不变时, 环境温度越低, 系统不可逆损失越大, 这是由于当环境温度下降时, 循环平均温度与环境间温差增大, 系统总不可逆损失随之增大, 而且随着蒸发温度的增加, 不同环境温度下的不可逆损失差也在增大。

3.4. 可用势

因为热力学可用势是反映工质在某一状态下的可逆做功能力, 而蒸发器出口单位质量工质的可用势越高, 在膨胀机中工质的做功能力就越强, 从图 7 中可以看到在环境温度不变的情况下, 随着蒸发温度的上升, 蒸发器出口单位工质的可用势都会先增大后减小, 有一个最佳蒸发温度使得蒸发器出口单位工质的可用势最大, 在不同的环境温度下的最佳蒸发温度都相同。R245fa 对应的蒸发器出口工质可用势最大的蒸发温度为 140°C ; R1233zd-E 对应的最优蒸发温度为 150°C ; SES36 与 R123 对应的最优蒸发温度都为 170°C 。可以看到工质最大可用势对应的最优蒸发温度和最大净功量对应的最优蒸发温度是一致的。

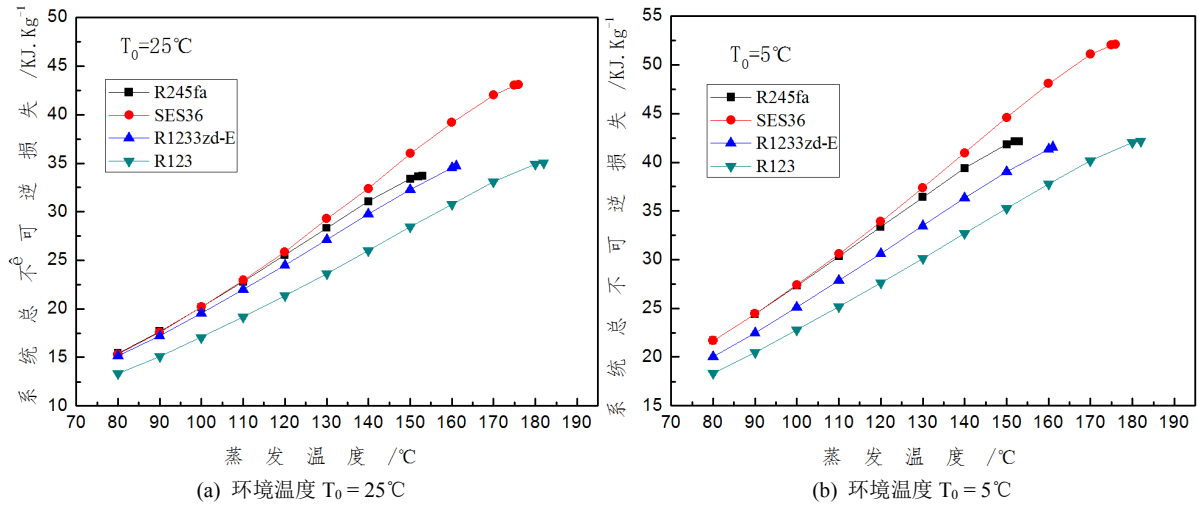


Figure 6. Relationship between irreversible loss and evaporation temperature at different ambient temperatures
图 6. 不同环境温度下系统总不可逆损失与蒸发温度的关系

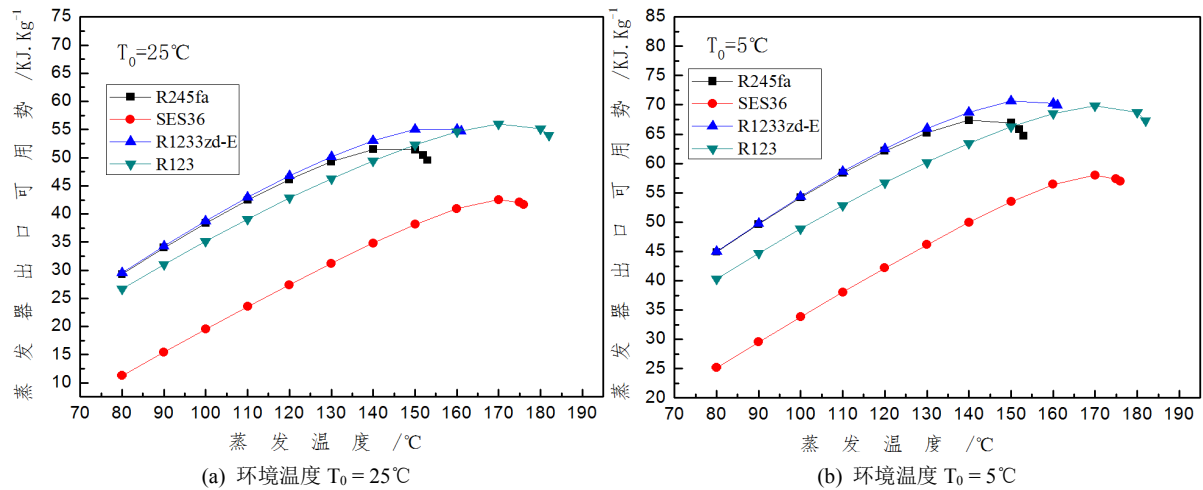


Figure 7. Relationship between the available potential at evaporator outlet and evaporation temperature at different ambient temperatures
图 7. 不同环境温度下蒸发器出口可用势与蒸发温度的关系

4. 结论

本文基于循环热效率、净功量、系统不可逆损失、蒸发器出口工质可用势四个方面对 R123、R245fa 两种传统工质与 R1233zd-E、SES36 两种新型工质进行了对比分析，得出了如下结论：

(1) 不同的工质在热源温度在 $100^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ 时都有其对应最高热效率的最佳蒸发温度，接近于工质的临界温度，在环境温度不同时，最佳蒸发温度相同，R245fa 的最佳蒸发温度为 150°C ；R1233zd-E 为 160°C ；R123 为 180°C ；SES36 由于是两个共沸工质组成的混合物没有出现最佳蒸发温度。在同样蒸发温度下，热效率 $\text{R123} > \text{R1233zd-E} > \text{R245fa} > \text{SES36}$ 。

(2) 循环的不可逆损失，即从热力学第二定律能量的品质方面考虑其结果与第一定律效率一致。

(3) 蒸发器出口可用势即蒸发器出口工质的做功能力与系统的净功量变化趋势一致，且对应工质的最佳蒸发温度一样。

(4) 在环境温度不同时，工质对应的最佳蒸发温度是一致的，随着热源温度的变化工质热力学参数的

变化也一致,除了净功量 R245fa 和 R1233zd-E 在热源温度为 90~150 时有不同的变化。而环境温度越低,同样蒸发温度下系统的热效率、净功量、蒸发器出口的可用势都会增大,但系统的不可逆损失增大。

(5) 综合考虑系统的热效率、净功量、不可逆损失、蒸发器出口工质可用势,在各自的临界温度以下,R123 为最优工质,选用其他工质的顺序为 R1233zd-E > R245fa > ses36。考虑到安全性方面和环境保护方面 R1233zd-E 的性能最优,设备造价方面 SES36 最优。综合考虑,R1233zd-E 是取代 R245fa 和 R123 的首选,SES36 次之。

参考文献 (References)

- [1] 王建永, 王江峰, 王红阳, 等. 有机朗肯循环地热发电系统工质选择[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(1): 11-17.
- [2] 刘健, 王辉涛, 张淞源, 葛众. 工质 R123 和 R245fa 的有机朗肯循环热力性能[J]. 可再生能源, 2016, 34(1): 112-117.
- [3] 韩中合, 于一达, 等. 低温有机朗肯循环的工质选择及系统性能分析[J]. 汽轮机技术, 2013, 55(4): 261-264.
- [4] 谢攀, 隆瑞, 刘政, 等. 低温工业余热利用 ORC 工质选择[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(3): 1834-1837.
- [5] 刘棉涛, 李跃伟, 刘燕妮, 等. 回收低温余热的有机朗肯循环性能分析及优化[J]. 能源工程, 2016, 38(5): 65-68.
- [6] Lin, X.G. (2015) Working Fluid Selection Based on Critical Temperature and Water Temperature in Organic Rankine cycle. *Science China*, **58**, 138-146. <https://doi.org/10.1007/s11431-014-5698-7>
- [7] 程启康, 耿飞. R1233zd(E)与 R123 的管内外换热性能的对比研究[J]. 制冷与空调, 2016, 16(7): 44-48.
- [8] Desideri, A., Gusev, S., van den Broek, M. and Lemort, V. (2016) Experimental Comparison of Organic Fluids for Low Temperature ORC (Organic Rankine Cycle) Systems for Waste Heat Recovery Applications. *Energy*, **97**, 460-469. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.012>
- [9] Eyerera, S., Wieland, C., Vandersickel, A. and Spliethoff, H. (2016) Experimental Study of an ORC (Organic Rankine Cycle) and Analysis of R1233zd-E as a Drop-in Replacement for R245fa for Low Temperature Heat Utilization. *Energy*, **103**, 660-671. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.034>
- [10] Liu, W., Jia, H., Liu, Z.C., et al. (2013) The Approach of Minimum Heat Consumption and Its Applications in Convective Heat Transfer Optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **57**, 389-396. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.046>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aepe@hanspub.org