

# 蒸发压力和冷凝温度对船用柴油机余热回收有机朗肯循环系统性能的影响

范峻豪,谭先琳\*,蓝琳生

广西大学 机械工程学院,广西 南宁 530004

**摘要:**以柴油机废气余热作为研究对象,利用 MATLAB 软件建立有机朗肯循环余热回收系统热力学模型,对比 6 种工质的物性参数,选择苯为工质,仿真研究系统净输出功率、热效率、功耗因子和焓效率等热力学性能参数随蒸发压力以及冷凝温度的变化规律。仿真结果表明:蒸发压力增大,净输出功率和焓效率先增大后减小,热效率和功耗因子增大;蒸发压力为 0.6 MPa 时净输出功率最大,为 4358 kW;蒸发压力为 1.6 MPa 时焓效率最大,为 54.5%;冷凝温度升高,系统净输出功率、热效率和焓效率减小,功耗因子增大。

**关键词:**有机朗肯循环;船用柴油机;余热回收;热力学分析

**中图分类号:**TK422

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2023)01-0009-06

**引用格式:**范峻豪,谭先琳,蓝琳生. 蒸发压力和冷凝温度对船用柴油机余热回收有机朗肯循环系统性能的影响[J]. 内燃机与动力装置,2023,40(1):9-14.

FAN Junhao, TAN Xianlin, LAN Linsheng. Influence of evaporation pressure and condensation temperature on organic Rankine cycle waste heat recovery system of marine diesel engine [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(1):9-14.

## 0 引言

随着石油资源紧缺以及环境污染问题加剧,降低发动机的燃油消耗、排放成为内燃机行业研究的重点,对发动机余热回收利用是当前研究的热点之一<sup>[1]</sup>。在众多用于回收中、低品位余热的技术中,有机朗肯循环被认为是最具有应用前景的方法之一<sup>[2]</sup>。朗肯循环一种高效的节能减排技术,结构简单、工质密度大、热效率较高<sup>[3]</sup>,能提高能源的总利用率,并能减少尾气排放,缓解环境污染问题。

我国 90% 以上的货物运输由航运来实现,船舶运行时消耗很多的化石能源<sup>[4]</sup>。全球 98% 的船舶动力采用柴油机<sup>[5]</sup>,现代大型船舶柴油机推进装置的最高热效率仅为 45%~50%<sup>[6-7]</sup>,大部分热量以排气废热和冷却液废热的形式散失到环境中<sup>[8]</sup>。船舶柴油机废气余热量大,可以用海水作为冷源,采用有机朗肯循环回收其废气余热具有很大前景。我国对有机朗肯循环的研究起步较晚,还没有得到大规模的研究和推广<sup>[9]</sup>。

本文中以柴油机废气余热作为研究对象,利用 MATLAB 软件建立有机朗肯循环余热回收系统的热力学模型,计算并分析蒸发压力和冷凝温度对朗肯循环余热回收系统热力学性能的影响,为系统的优化设计提供参考。

收稿日期:2022-09-27

基金项目:广西大学“大学生创新创业训练计划”资助项目(202110593212)

第一作者简介:范峻豪(2001—),男,江西宜春人,本科生,主要研究方向为发动机能量回收与利用,E-mail:2272978290@qq.com。

\*通信作者简介:谭先琳(2000—),男,广西宾阳人,硕士研究生,主要研究方向为发动机能量回收与利用,E-mail:t1714463748@163.com。

## 1 朗肯循环模型建立

朗肯循环系统如图 1 所示。朗肯循环系统主要由工质泵、蒸发器、膨胀机和冷凝器组成。朗肯循环系统温熵图如图 2 所示,图中  $T_{\text{gas}}$  为废气温度,  $T_{\text{gas,in}}$  为废气入口温度,  $T_{\text{gas,out}}$  为废气出口温度,  $T_{\Delta E}$  为废气与工质间的最小传热温差,  $T_{\Delta C}$  为工质与冷却水间的最小传热温差。

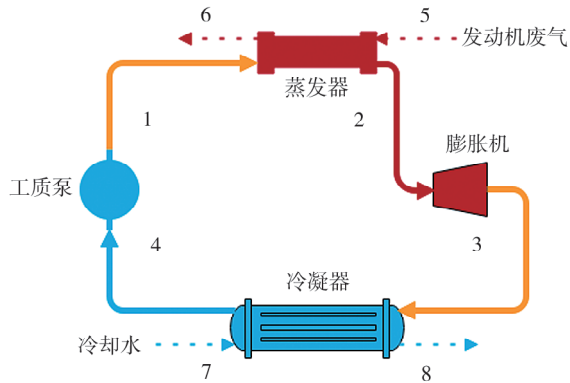


图 1 朗肯循环系统图

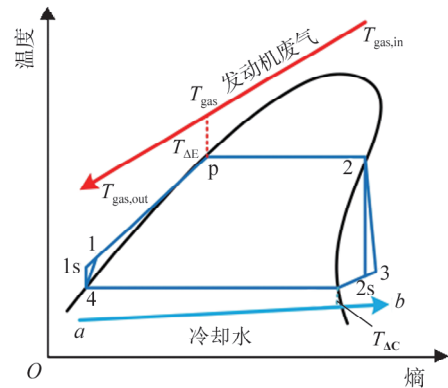


图 2 朗肯循环温熵图

由图 1 可知:从冷凝器中离开的液态工质在工质泵中被压缩为高压液体,在蒸发器中柴油机的高温烟气与高压液态工质换热并使工质气化,产生的高温工质蒸汽在膨胀机中膨胀做功后变成低压乏汽,最后进入冷凝器凝结成液态工质完成循环。

由图 2 可知:工质变化过程包围的面积即为系统的有用功;冷凝温度升高,气液两相区的冷凝线位置上移,工质变化过程包围的面积减小,系统净输出功率减小。

利用 MATLAB 对朗肯循环系统进行建模时作以下假设:1)工质在系统中稳定流动;2)不考虑系统各设备及管道中的换热损失;3)不考虑各管道中的压力损失<sup>[10]</sup>。

### 1.1 朗肯循环数学模型

#### 1.1.1 工质泵

工质在工质泵中消耗电能对其中的工质进行加压压缩,所消耗的功率

$$P_p = q_{m,f}(h_1 - h_4)/\eta_p, \quad (1)$$

式中:  $q_{m,f}$  为工质质量流量, kg/h;  $\eta_p$  为工质泵效率,  $\eta_p = 0.8$ ;  $h_4$  和  $h_1$  分别为工质泵进、出口的工质比焓, kJ/kg。

#### 1.1.2 工质泵蒸发器

液态工质在蒸发器中吸收柴油机废气的余热,等压加热为高温高压的工质蒸汽,该过程吸收的热量

$$Q_{\text{eva}} = q_{m,f}(h_2 - h_1), \quad (2)$$

式中:  $h_2$  为蒸发器工质出口比焓, kJ/kg。

#### 1.1.3 膨胀机

膨胀过程输出功率

$$P = q_{m,f}(h_3 - h_2)\eta_t\eta_g, \quad (3)$$

式中:  $\eta_t$  为膨胀机机械效率,  $\eta_t = 0.85$ ;  $\eta_g$  为发电机效率,  $\eta_g = 1$ ;  $h_3$  为膨胀机出口工质比焓, kJ/kg<sup>[11]</sup>。

系统净输出功率

$$P_{\text{net}} = P - P_p. \quad (4)$$

#### 1.1.4 冷凝器

冷凝过程工质释放的热量

$$Q_{\text{cond}} = q_{m,f}(h_4 - h_3) \circ \quad (5)$$

功耗因子  $\xi_{\text{PCF}}$  是评价泵能效的重要指标,指产生单位净输出功消耗的泵功,计算式为:

$$\xi_{\text{PCF}} = P_p / P_{\text{net}} \circ \quad (6)$$

系统中任一点  $i$  的焓

$$E_i = q_{m,f}[(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)] \circ \quad (7)$$

式中:  $T_0$  为环境热力学温度, K;  $h_i$  为工质在  $i$  点的比焓, kJ/kg;  $h_0$  为环境状态比焓, kJ/kg;  $s_i$  为工质在  $i$  点的比熵, kJ/(kg·K);  $s_0$  为环境状态比熵, kJ/(kg·K)。

系统焓效率

$$\eta_e = P_{\text{net}} / E_{\text{in}} \circ \quad (8)$$

式中:  $E_{\text{in}}$  为系统输入焓, kW。

系统热效率

$$\eta = P_{\text{net}} / Q_{\text{eva}} \circ \quad (9)$$

## 1.2 工质的选择

选用工质时,应在保证工质符合环保性、安全性要求的前提下,有尽可能高的效能和经济性。针对以上原则,本文中选择了 6 种工质,其物性参数如表 1 所示<sup>[12-15]</sup>。

表 1 工质物性参数

| 工质     | 相对分子质量 | 临界温度/°C | 临界压力/MPa | 类型   |
|--------|--------|---------|----------|------|
| 三氟二氯乙烷 | 152.93 | 183.68  | 3.66     | 等熵流体 |
| 二氯一氟乙烷 | 116.95 | 203.95  | 4.21     | 等熵流体 |
| 五氟丙烷   | 134.05 | 152.95  | 3.61     | 等熵流体 |
| 苯      | 78.11  | 288.90  | 4.89     | 等熵流体 |
| 甲苯     | 92.14  | 318.60  | 4.11     | 等熵流体 |
| 正庚烷    | 100.20 | 266.95  | 2.73     | 干流体  |

为了比较各工质对系统的能效,利用 MATLAB 软件在相同条件下用各工质模拟运行系统,得到各工质下系统的净输出功率、热效率、功耗因子、焓效率等性能参数。蒸发压力为 1 MPa、冷凝温度为 45 °C 时各工质系统的性能参数如表 2 所示;蒸发压力为 2 MPa、冷凝温度为 45 °C 时各工质系统的性能参数如表 3 所示。

由表 2 可知:蒸发压力为 1 MPa、冷凝温度为 45 °C 时,工质二氯一氟乙烷的净输出功率最大,但热效率只有 13.31%;工质甲苯的热效率最大,但净输出功率最小;工质苯的效能最好,净输出电量、热效率和焓效率均较大,且功耗因子较小。由表 3 可知:蒸发压力为 2 MPa、冷凝温度为 45 °C 时,工质苯的热效率和焓效率较大,但净输出功率较小;工质二氯一氟乙烷在该条件下的效能较好,净输出功率、热效率和焓效率都较大。

表 2 蒸发压力为 1 MPa、冷凝温度为 45 °C 时各工质下系统的性能参数

| 工质     | 净输出功率/kW | 热效率/% | 功耗因子/% <sub>cc</sub> | 焓效率/% |
|--------|----------|-------|----------------------|-------|
| 三氟二氯乙烷 | 4 164.2  | 12.04 | 30.23                | 40.55 |
| 二氯一氟乙烷 | 4 250.2  | 13.31 | 25.18                | 42.71 |
| 五氟丙烷   | 3 263.9  | 8.84  | 37.39                | 31.19 |
| 苯      | 4 072.0  | 20.03 | 12.30                | 54.45 |
| 甲苯     | 2 306.9  | 22.34 | 10.39                | 54.66 |
| 正庚烷    | 3 775.4  | 18.26 | 15.92                | 49.86 |

表3 蒸发压力为2 MPa、冷凝温度为45 °C时各工质下系统的性能参数

| 工质     | 净输出功率/kW | 热效率/% | 功耗因子/‰ | 烟效率/% |
|--------|----------|-------|--------|-------|
| 三氟二氯乙烷 | 5 464.1  | 15.51 | 48.71  | 52.88 |
| 二氯一氟乙烷 | 5 057.6  | 16.96 | 40.27  | 52.55 |
| 五氟丙烷   | 5 193.7  | 12.51 | 59.22  | 46.58 |
| 苯      | 2 077.2  | 22.78 | 20.23  | 55.13 |
| 甲苯     | -2 463.3 | 24.32 | 17.55  | 50.89 |
| 正庚烷    | -232.6   | 19.58 | 27.05  | 43.54 |

## 2 热力学性能分析

根据对各工质能效的分析,不同蒸发压力时苯作为工质的系统性能都较好,因此选用苯作为系统工质,但苯可燃且具有一定毒性,对人体健康造成危害<sup>[16]</sup>,如果发生泄漏会污染环境,在使用时应注意。苯是等熵工质,尽量减小其过热度可以有效增加系统的输出功,使用苯为工质时采用亚临界饱和循环。本文中选用苯为工质计算分析系统净输出功率、热效率、功耗因子和烟效率等随蒸发压力以及冷凝温度的变化规律。

### 2.1 蒸发压力的影响

蒸发压力是朗肯循环运行过程中的重要参数。设置循环冷凝温度为45 °C,蒸发压力的变化范围为0.1~2.5 MPa,模拟运行朗肯循环系统,系统热效率、净输出功率、烟效率、功耗因子随蒸发压力的变化曲线如图3所示。

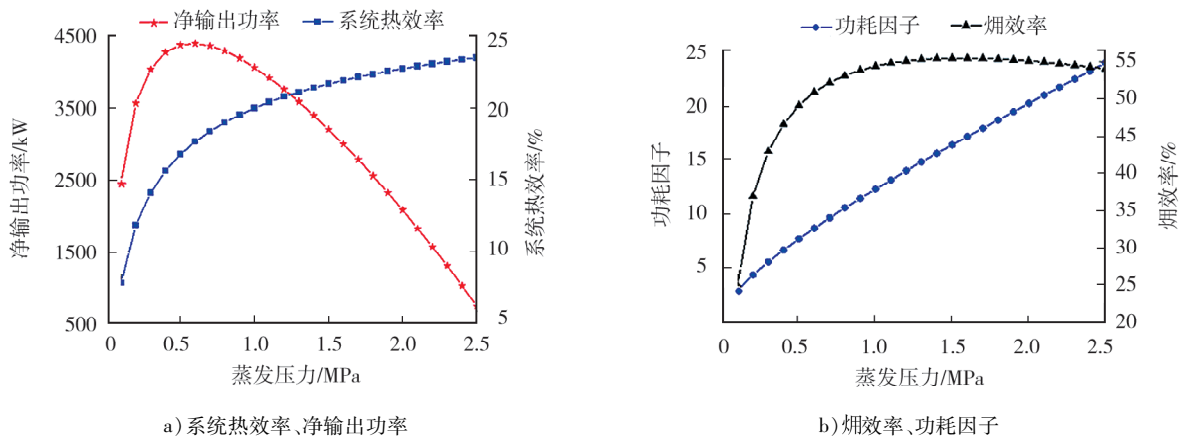


图3 系统热效率、净输出功率、烟效率、功耗因子随蒸发压力的变化曲线

由图3a)可知:当蒸发压力增加时,净输出功率先增大后减小,热效率一直增加;低于0.6 MPa时系统净输出功率增加,高于0.6 MPa时系统净输出功率减小;蒸发压力为0.6 MPa时,净输出功率最大,为4358 kW。系统所产生的功率与工质膨胀前、后的焓降以及工质的流量有关,当蒸发压力增加时,工质的蒸发温度升高,工质膨胀前、后的焓降增大,系统的输出功率增加。但为了使所有工质蒸发为蒸汽,工质流量需伴随蒸发压力增加而减少,系统的输出功率减少。由此可见对于工质苯,蒸发压力低于0.6 MPa时,工质膨胀前、后焓降变化的影响大于工质流量变化;蒸发压力高于0.6 MPa时,工质流量变化的影响较大。当蒸发压力增大时,蒸发温度升高,工质与柴油机废气的温差减小,导致换热量减少,虽然蒸发压力大于0.6 MPa后系统净输出功率呈递减趋势,但是系统吸热量下降更快,系统热效率增大。

由图3b)可知:当蒸发压力增大时,功耗因子增大,烟效率先增大后减小;蒸发压力为0.1~1.0 MPa时烟效率迅速增大,蒸发压力为1.6 MPa时烟效率最大,为54.5%;蒸发压力增大时,净输出功率刚开始

会增加,但增加幅度低于工质泵耗功,所以功耗因子增大。

## 2.2 冷凝温度的影响

冷凝温度也是朗肯循环运行过程中的重要参数。卡诺循环的效率

$$\eta_n = 1 - T_2/T_1, \quad (10)$$

式中: $T_1$ 、 $T_2$  分别为热源热力学温度和冷源热力学温度, K。

由式(10)可知:冷源温度越低,系统效率越高。但是采用海水作为冷源时,冷凝温度受到环境温度的限制。保持其他条件不变,循环蒸发压力为 1 MPa、冷凝温度为 35~60 °C 时,模拟运行朗肯循环系统,系统净输出功率、热效率、功耗因子、焓效率随冷凝温度的变化曲线如图 4 所示。

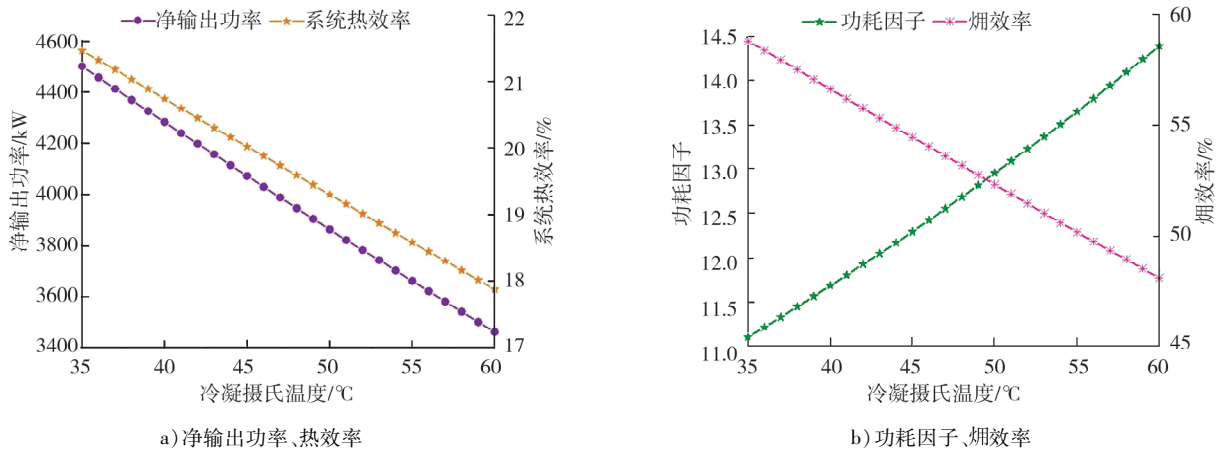


图 4 系统净输出功率、热效率、功耗因子、焓效率随冷凝温度的变化曲线

由图 4a) 可知:系统净输出功率和热效率均随冷凝温度的升高而减小,因受到环境温度的限制,本文中设置的最低冷凝温度为 35 °C,系统热效率在 35 °C 时最大,为 21.5%。根据图 2,随着冷凝温度升高,气液两相区的冷凝线位置上移,工质变化过程所包围的面积减小,系统净输出功率减小。

由图 4b) 可知:当冷凝温度升高时,功耗因子增大,焓效率减小。冷凝温度升高,冷凝压力增大,工质泵进、出口的压力差减小,工质泵耗功减少。但系统净输出功率的减小趋势更大,所以功耗因子增大。冷凝温度升高,工质泵、蒸发器、膨胀机中造成的不可逆损失减小。冷凝温度升高,工质与海水的冷、热端平均换热温差增大,冷凝器中产生的不可逆损失增大幅度大于其他设备中不可逆损失减小幅度的总和,所以系统焓效率降低。

## 3 结论

以船舶柴油机废气余热为热源,利用 MATLAB 软件对有机朗肯循环进行仿真建模,对比 6 种工质的物性参数,不同蒸发压力时苯的能效均较高,选择苯作为系统工质研究了蒸发压力以及冷凝温度对系统净输出功率、热效率、功耗因子和焓效率的影响,为有机朗肯循环系统的工质选择和参数优化提供参考。

- 1) 蒸发压力增大,系统净输出功率和焓效率先增大后减小,系统热效率和功耗因子增加。
- 2) 冷凝温度升高,系统净输出功率、热效率和焓效率减小,功耗因子增加。

### 参考文献:

- [1] 李广华,高文志,赵洋,等. 朗肯循环尾气余热回收系统试验及性能研究[J]. 装备制造技术,2022(5):55-57.
- [2] 罗文华,陈武,蒋爱国,等. 回收船舶柴油机余热的有机朗肯循环系统热力学性能比较分析[J]. 中国机械工程,2022,33(4):452-458.
- [3] 曾维武,王廷勇,赵超. 基于 ORC 的船舶主机余热回收方案选择[J]. 船舶工程,2021,43(3):12-17.
- [4] 陈旭立. 船舶余热有机朗肯循环的方案设计及性能研究[J]. 中国水运(下半月),2019,19(7):101-103.

- [5] 孙爱洲,王鹏,李子非,等. 车用柴油机有机朗肯循环余热回收系统性能计算研究[J]. 现代车用动力,2019(3):1-5.
- [6] 李晓宁,吕唐辉,王铭昊,等. 船舶柴油机余热利用系统性能优化[J]. 广东海洋大学学报,2021,41(2):123-130.
- [7] 刁安娜,杨小强,冯明志,等. 船用柴油机烟气余热 ORC 系统的热力性能分析[J]. 内燃机工程,2018,39(4):47-53.
- [8] 辛佳磊,邵澍晖,桂勇. 船用柴油机废气余热驱动 ORC 系统性能研究[J]. 船舶工程,2022,44(增刊1):312-319.
- [9] 郑雄,甘念重,徐立,等. 中型邮轮柴油机余热回收系统性能研究[J]. 中国修船,2021,34(4):8-11.
- [10] 罗文华,陈武,蒋爱国,等. 回收船舶柴油机余热的有机朗肯循环系统热力学性能比较分析[J]. 中国机械工程,2022,33(4):452-458.
- [11] 王宇,张诗典,卢迪. 有机工质余热发电系统热力性能分析[J]. 能源与节能,2016(9):89-90.
- [12] 梁友才. 船舶发动机余热回收热力循环的理论优化及试验研究[D]. 天津:天津大学,2014.
- [13] 李敏,陈火雷,孔祥花. 车用有机朗肯循环各参数影响规律研究[J]. 内燃机与动力装置,2019,36(1):20-28.
- [14] 陈旭立. 船舶余热有机朗肯循环的工质选择[J]. 中国水运(下半月),2019,19(7):99-100.
- [15] 周启顺,杨凯,张红光. 混合工质对车用内燃机余热回收系统的影响[J]. 车用发动机,2014(3):50-54.
- [16] 李丽芳. 苯的抽提蒸馏工艺及其应用[J]. 化工管理,2022(24):152-154.

## Influence of evaporation pressure and condensation temperature on organic Rankine cycle waste heat recovery system of marine diesel engine

FAN Junhao, TAN Xianlin<sup>\*</sup>, LAN Linsheng

School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

**Abstract:** The waste heat of marine diesel engine is taken as the research object, and the thermodynamic model of organic Rankine cycle (ORC) waste heat recovery system is established by MATLAB software. Compared with the physical property parameters of six working substances, benzene is selected as the working substance. The change rule of net output power, thermal efficiency, power dissipation factor and exergic efficiency of the system as the results of evaporation pressure and condensation temperature are simulated. The simulation results show that as evaporation pressure increased, net output power and exergic efficiency increased first and then decreased, while thermal efficiency and power consumption factor increased. The maximum net output power is 4358 kW when the evaporation pressure is 0.6 MPa. Exergy efficiency peaked at 54.5% when evaporation pressure is 1.6 MPa. As condensation temperature increased, net output power, thermal efficiency and exergic efficiency of the system decreased, while power consumption factor increased.

**Keywords:** organic Rankine cycle; marine diesel engine; waste heat recovery; thermodynamic analysis

(责任编辑:刘丽君)