

# 朗肯循环耦合双效溴化锂吸收式制冷系统建模及性能分析

刘坚,谭先琳\*,毕成,梁梓原,付宇乐,曾杨,杨远志

广西大学机械工程学院,广西 南宁 530004

**摘要:**为提高船用柴油机余热回收效率,利用 MATLAB 对朗肯循环及双效溴化锂吸收式制冷系统进行建模及热力学分析,确定朗肯循环热效率的影响因素及双效溴化锂吸收式制冷阶段中废气温度、高压发生器温度、低压发生器温度对制冷量和性能系数的影响。结果表明:朗肯循环最佳工质为水;升高初温、初压和降低背压可提高朗肯循环热效率;随着废气温度增加,双效溴化锂吸收式制冷系统的制冷量增加,制冷性能因数降低;随着高压发生器温度升高,制冷量降低,制冷性能因数降低;随着低压发生器温度降低,制冷量增加,制冷性能因数降低;应根据不同环境及场合要求,调整双效溴化锂吸收式制冷系统相关参数。

**关键词:**朗肯循环;双效溴化锂吸收式制冷;余热回收;MATLAB 建模

**中图分类号:**TK421

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2023)06-0104-07

**引用格式:**刘坚,谭先琳,毕成,等.朗肯循环耦合双效溴化锂吸收式制冷系统建模及性能分析[J].内燃机与动力装置,2023,40(6):104-110.

LIU Jian, TAN Xianlin, BI Cheng, et al. Modeling and performance analysis of Rankine cycle coupled double-effect lithium bromide absorption refrigeration[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023, 40(6):104-110.

## 0 引言

船用柴油机动力性能与其热效率密切相关,柴油机运行过程中消耗大量燃料,然而仅有少部分热量转化为有用功驱动发动机工作,大量余热以烟气、缸套冷却水循环、空气冷却和润滑系统循环等形式排放到环境中,导致燃料产生的热能未被充分利用,造成船用柴油机热效率、经济性和动力性降低。因此,船用柴油机余热回收具有巨大潜力。

朗肯循环与双效溴化锂吸收式制冷系统组合可实现废气余热发电和制冷:朗肯循环将柴油机的废气余热转变为电能,使废气余热二次利用,提高柴油机热效率<sup>[1-2]</sup>;双效溴化锂吸收式制冷系统与朗肯循环耦合连接,利用能量密度相对较低和温度相对较低的低品位热能(已完成朗肯循环的部分废气余热)进行制冷<sup>[3]</sup>。朗肯循环与双效溴化锂吸收式制冷系统结合可降低排气压力、减少排烟与散热损失,提高柴油机能源利用率。柴油机动力系统设计时,应保证朗肯循环和双效溴化锂吸收式制冷系统性能良好,使用合理且优质的工质,使初始温度、初始压强、冷凝器内压力、高压和低压发生器内的温度等处于最佳循环过程,提高船用柴油机整体热效率。

本文中以朗肯循环为基础,耦合双效溴化锂吸收式制冷系统,利用 MATLAB 建模,进行热力学性能

收稿日期:2023-09-11

基金项目:广西大学大学生创新创业训练计划项目(202110593212)

第一作者简介:刘坚(2003—),男,湖南岳阳人,主要研究方向为能量回收与利用,E-mail:2646498852@qq.com。

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

分析,实现废气余热高效回收,提高船用柴油机热效率。

## 1 模型建立

### 1.1 朗肯循环模型

#### 1.1.1 朗肯循环

朗肯循环包括加热、膨胀、冷凝和泵送4个过程,液态工质通过朗肯循环将高温热能转化为机械功,朗肯循环流程示意如图1所示,以液态工质水为例,工质水的朗肯循环温熵图如图2所示。

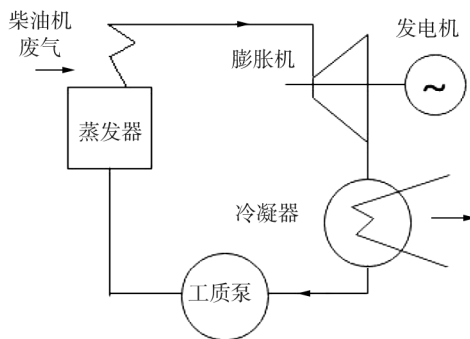


图1 朗肯循环流程示意图

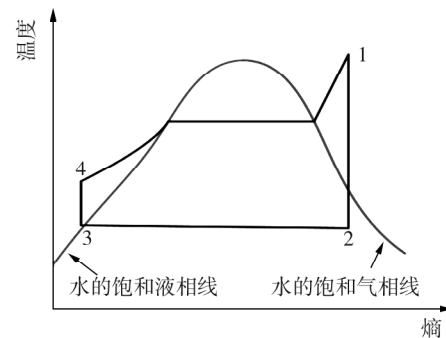


图2 工质水的朗肯循环温熵图

由图1可知:柴油机废气余热提供高温热能,使液态工质在蒸发器中受热,转化为气态;气态工质通过膨胀机,压力和温度下降,完成膨胀过程;气态工质进入冷凝器,在与冷却介质热交换中,冷凝成液态;工质泵将液态工质送回到蒸发器,重新开始下一个循环。

由图2可知:水的饱和液相线、饱和气相线分别表明了水从气态转变为液态、从液态转变为气态的过程;这2条线包围的区域为气液两相区,在这2条线上,水的温度和压力达到了饱和状态,饱和液相线为气液混合物放热全部成为液体的一瞬间,继续放热为过冷液体;饱和气相线为气液混合物吸热全部变成气体的一瞬间,继续吸热为过热气体;4—1为水在蒸发器中定压吸热汽化成饱和蒸汽,饱和蒸汽定压吸热成过热蒸汽的过程;1—2为高温高压蒸汽在膨胀机内不可逆绝热膨胀做功的过程;2—3为从膨胀机排出的作过功的乏汽在冷凝器中向冷却介质等压放热,冷凝为饱和水的过程;3—4为冷凝水在水泵内可逆的绝热压缩过程,压力升高后的未饱和水再次进入蒸发器,完成循环<sup>[4-5]</sup>。

#### 1.1.2 朗肯循环方程

工质在膨胀机做功

$$W_1 = H_1 - H_2, \quad (1)$$

式中: $H_1$ 为膨胀机入口处工质的焓, $H_2$ 为膨胀机出口处工质的焓。

工质在蒸发器中吸收热量

$$Q_1 = H_1 - H_4, \quad (2)$$

式中 $H_4$ 为工质泵出口处工质的焓。

工质在冷凝器中与冷却介质交换放出的热量

$$Q_2 = H_2 - H_3, \quad (3)$$

式中 $H_3$ 为冷凝器入口处工质的焓。

工质泵消耗功

$$W_p = H_4 - H_3. \quad (4)$$

循环净功

$$W_{\text{net}} = W_1 - W_p. \quad (5)$$

循环热效率

$$\eta_t = W_{\text{net}}/Q_1 \quad (6)$$

### 1.1.3 朗肯循环工质参数

不同工质的适用温度、热传导效率和可膨胀性等不同,对热力学模型产生不同影响,不同工质的物理热力学属性如表1所示。

表1 不同工质的物理热力学属性

名称	相对分子质量	临界温度/ ℃	最高温度/ ℃	临界压力/ MPa	沸点/ ℃	毒性	可燃性	类型
水	18.02	373.95	1 726.85	22.06	100.01	无毒	不燃	湿
乙醇	46.07	243.05	376.85	6.38	78.25	微毒	易燃	湿
氟利昂 123	152.93	183.68	326.85	3.66	27.82	低毒	不燃	等熵
甲醇	32.04	239.95	296.85	7.95	64.65	低毒	易燃	湿
苯	78.11	288.90	361.85	4.89	80.08	有毒	易燃	等熵
甲苯	92.14	318.60	426.85	500.00	110.60	有毒	易燃	等熵

## 1.2 双效溴化锂吸收式制冷模型

### 1.2.1 双效溴化锂吸收式制冷系统

双效溴化锂吸收式制冷系统利用废热或太阳能,基于溴化锂溶液(吸收剂)和水(制冷剂)之间的化学反应及热能的传递转化实现制冷,具有较高能效和环保性能,在降低能耗和碳排放方面发挥重要作用,可广泛应用空调及制冷领域<sup>[6]</sup>。

双效溴化锂吸收式制冷系统原理图如图3所示。制冷系统主要由高压发生器、低压发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器、溶液泵、2台热交换器等组成。低浓度溴化锂溶液在高压发生器中被废气余热加热沸腾出水蒸汽,成为中浓度溴化锂溶液;中浓度溴化锂溶液经热交换器II换热后进入低压发生器,沸腾出的水蒸汽直接进入低压发生器;中浓度溴化锂溶液在低压发生器被水蒸汽加热后沸腾出二次水蒸汽,成为高浓度溴化锂溶液;高浓度溴化锂溶液经热交换器I换热后进入吸收器,二次沸腾出的水蒸汽进入冷凝器被冷凝为液态水;从冷凝器出来的液态水经过节流阀减压后进入蒸发器,低压液态水在蒸发器中吸收热量变成水蒸汽,实现制冷;蒸发器产生的水蒸汽进入吸收器,使高浓度溴化锂溶液变为低浓度溴化锂溶液;低浓度溴化锂溶液被溶液泵送回高压发生器,热交换器I、II将回收的热量用于高压发生器加热环节,完成整个循环。通过以上循环,双效溴化锂吸收式制冷系统提高了热效率,实现热能的转化和回收利用<sup>[7-8]</sup>。

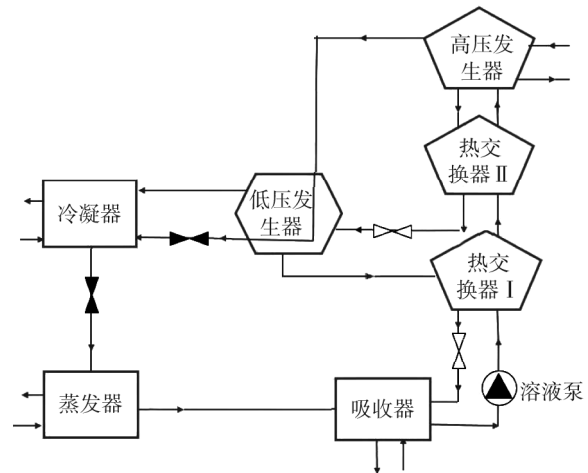


图3 双效溴化锂吸收式制冷系统原理图

通过以上循环,双效溴化锂吸收式制冷系统提高了热效率,实现热能的转化和回收利用<sup>[7-8]</sup>。

### 1.2.2 双效溴化锂吸收式制冷方程

低压发生器热传导率<sup>[9]</sup>

$$Q_{gl} = q_{m,11}H_{11} + q_{m,10}H_{10} - q_{m,12}H_{12} - q_{m,13}H_{13} - q_{m,14}H_{14}, \quad (7)$$

式中: $Q_{gl}=0$ 为低压发生器内的能量平衡状态, $q_{m,10}$ 、 $q_{m,11}$ 、 $q_{m,12}$ 、 $q_{m,13}$ 、 $q_{m,14}$ 分别为低压发生器出口、高压发生器出口、低压发生器入口、冷凝器入口、热交换器II入口处溴化锂溶液的质量流量; $H_{10}$ 、 $H_{11}$ 、 $H_{12}$ 、 $H_{13}$ 、 $H_{14}$ 分别为低压发生器出口、高压发生器出口、低压发生器入口、冷凝器入口、热交换器入口处溴化锂溶液的比焓。

溶液泵功率

$$P = q_{m,15}(p_{14} - p_{15})/(\eta_p \rho_{15}), \quad (8)$$

式中: $q_{m,15}$  为溶液泵入口溴化锂溶液的质量流量, $p_{14}$ 、 $p_{15}$  分别为溶液泵出口、入口溴化锂溶液的压力, $\eta_p$  为溶液泵工作效率, $\rho_{15}$  为溶液泵入口溴化锂溶液的质量密度。

热交换器效率为实际传热量与最大可能传热量之比。热交换器 I 的效率

$$\eta_I = (H_{14} - H_{15})/(H_{14} - H_{15*}), \quad (9)$$

式中: $H_{15}$  为热交换器 I 实际溴化锂溶液的焓, $H_{15*}$  为热交换器 I 理想状态下溴化锂溶液的焓。

热交换器 II 的效率

$$\eta_{II} = (H_5 - H_{16})/(H_5 - H_{16*}), \quad (10)$$

式中: $H_5$  为高压发生器出口水蒸气的焓, $H_{16}$  为热交换器 II 实际溴化锂溶液的焓, $H_{16*}$  为热交换器 II 理想状态下溴化锂溶液的焓。

忽略动能和势能,稳态下开放双效制冷系统的焓损失<sup>[10]</sup>

$$E_{sd} = \sum_j (1 - t_0/t_j) Q_j + (\sum_i m_i e_{xi})_{in} - (\sum_i m_i e_{xi})_{out} - P, \quad (11)$$

式中: $j$  为热源数, $i$  为化学种类序号, $t_0$  为冷凝器的摄氏初温, $t_j$  为第  $j$  个热源的摄氏温度, $Q_j$  为第  $j$  个热源的传热速率, $m_i$  为第  $i$  个化学种类序号的质量, $e_{xi}$  为第  $i$  个化学种类的比焓,  $(\sum_i m_i \cdot e_{xi})_{in}$ 、 $(\sum_i m_i \cdot e_{xi})_{out}$  分别为系统的输入焓、输出焓。

制冷性能因数

$$k_{cop} = \lambda_{ev}/(\lambda_{gh} + P), \quad (12)$$

式中: $\lambda_{ev}$  为蒸发器的传热速率, $\lambda_{gh}$  为高压发生器的传热速率。

### 1.2.3 双效溴化锂吸收式制冷参数选择

本文中双效溴化锂吸收式制冷循环阶段所用的循环工质为水,废气热源温度为 300~450 °C,高压发生器内的温度为 125~135 °C,低压发生器内的温度为 75~85 °C。

## 2 热效率性能分析

利用 MATLAB 建立朗肯循环耦合双效溴化锂吸收式制冷系统的热力学模型并进行仿真分析,确定最优循环性能参数。

### 2.1 朗肯模型热效率分析

#### 2.1.1 工质的影响

不同初温(循环介质在蒸发器内的热力学温度)、初压(循环介质在蒸发器内的压强)、背压(循环介质通过膨胀器后的压强)下不同工质的朗肯循环热效率如图 4 所示。

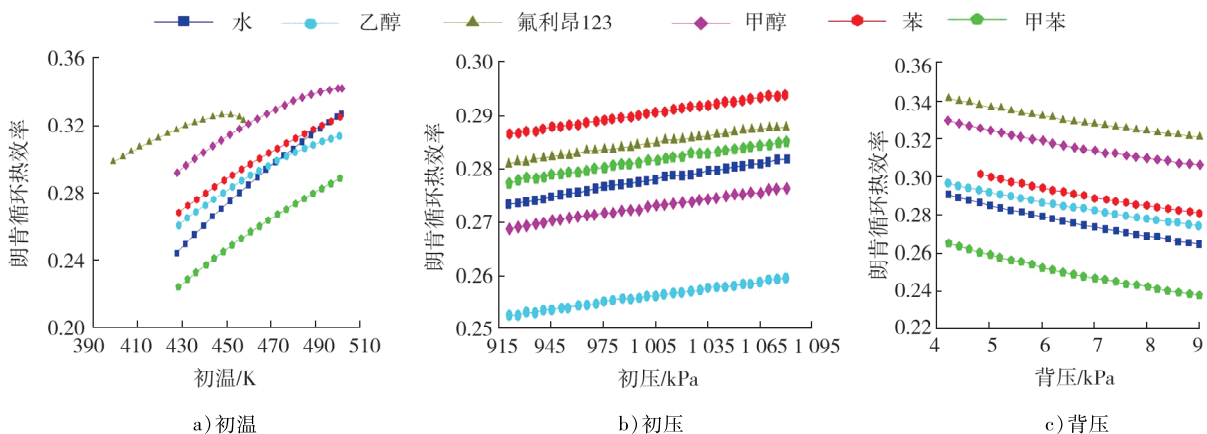


图4 不同初温、初压、背压下工质对应朗肯循环热效率曲线图

由图4可得:氟利昂123在不同初温、初压、背压下均能使系统朗肯循环达到较高的热效率,因为氟利昂123能承受的最高温度相对较高,在循环中可承受较高的温度和压力,提高系统循环热效率,但氟利昂类物质会产生较高的温室效应,破坏臭氧层,不宜使用;甲醇是可用于热机循环的有机液体,沸点低,但高温容易分解,甲醇分解后影响系统的稳定性和可靠性;与水相比,有机化合物苯需要更高的温度才能蒸发,废气温度较低时不宜使用,且苯具有易燃性,在应用中需考虑特殊处理和安全防护措施,对系统设计和性能造成一定限制。通过以上分析,水有较高的比热容和蒸发潜热,在转化为蒸汽的过程中能够吸收更多的热量,保证了系统的稳定性,提高了热效率,且经济环保,是较佳的循环工质,可广泛应用于朗肯循环。

### 2.1.2 参数的影响

以水为循环工质,针对建立的热力学模型,不同初温、初压、背压下的朗肯循环热效率如图5所示。

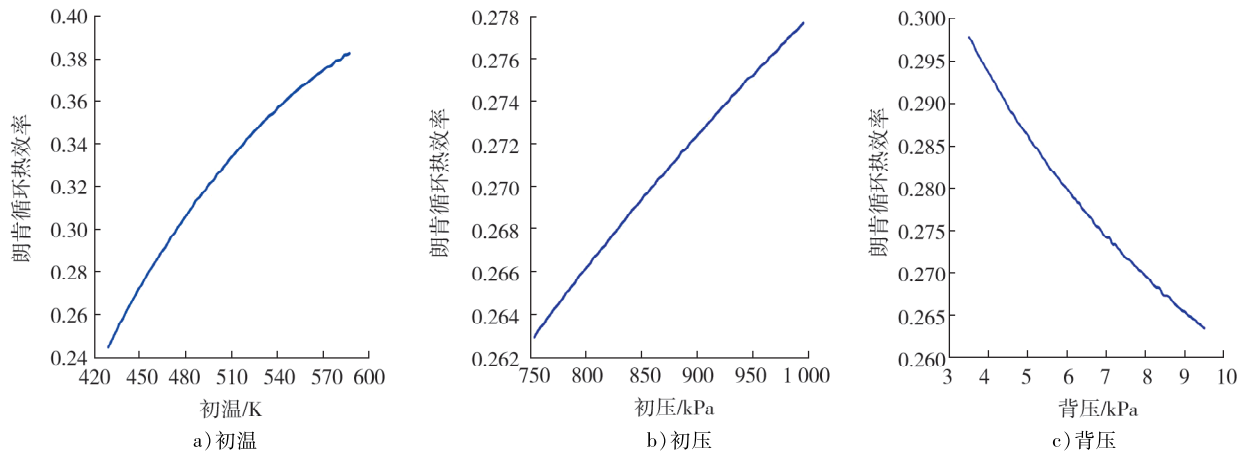


图5 不同初温、初压、背压下的朗肯循环热效率

由图5可知:初温高、初压高、背压低时,朗肯循环热效率较高。初温高时,高温热源向工质传递的热量更多,使工质在等温膨胀过程中吸收更多的热量;初压高时,提高等容压力升高阶段的效率;背压低使废气排放时的等容压缩过程更有效,机械功输出更高。

初温、初压、背压3者之间相互影响,初压、初温高,有利于系统更彻底地传热做功,背压低增大压强差,使膨胀做功更彻底。为提高系统热效率且保证排放系统稳定,调节蒸发器,使循环工质在蒸发器高温高压的环境中开始循环;选用合适的膨胀阀,控制制冷剂流动及膨胀机调速,保持低背压,使废气排放时最大程度地释放热能,提高朗肯循环热效率<sup>[11-12]</sup>。

## 2.2 双效溴化锂吸收式制冷系统性能分析

制冷量和制冷性能系数是双效溴化锂吸收式制冷系统的重要指标。本文中以水为制冷工质,分析双效溴化锂吸收式制冷系统在不同废气、高压发生器、低压发生器温度时的制冷性能系数和制冷量,结果如表2、3、4所示。

由表2可知:废气温度升高,制冷量增加, $k_{\text{cop}}$ 降低。由表3可知:高压发生器温度升高,制冷量降低, $k_{\text{cop}}$ 降低。由表4可知:低压发生器温度降低,制冷量增加, $k_{\text{cop}}$ 降低。原因为:废气温度较高,在冷凝器中释放更多的热量,提高系统制冷能力,但冷凝温度升高,系统对外界环境散热增加, $k_{\text{cop}}$ 降低;废气温度不变时,高压发生器温度升高,废气和高压发生器内部的温差降低,吸收废气热量降低,制冷量降低,增加过热损失, $k_{\text{cop}}$ 降低;低压发生器温度降低有利于制冷剂高效蒸发,制冷量增加,但低压发生器温度较低增加系统热量损失和热量泄漏, $k_{\text{cop}}$ 降低。

在实际应用时,应根据外界环境及应用场合,灵活选择。如在高温环境需要大量制冷的情况下,优先考虑高制冷量,可使废气温度升高,高压、低压发生器的初始温度降低;如节约能源和降低运行成本的情况下,倾向于高制冷性能系数,在提供足够制冷量的同时尽量减少能源消耗,可使废气温度、高压发生器

初始温度降低、低压发生器初始温度升高<sup>[13-15]</sup>。

表2 不同废气温度对应的  
制冷性能因数和制冷量

废气温度/ ℃	制冷性能 因数	制冷量/ kW
300	1.201 816	6.22
315	1.200 325	6.76
330	1.199 580	7.31
345	1.198 837	7.85
360	1.198 095	8.39
375	1.197 353	8.94
390	1.197 353	9.48
405	1.196 613	10.02
420	1.196 613	10.57
435	1.195 874	11.10
450	1.195 874	11.65

表3 不同高压发生器温度对应的  
制冷性能因数和制冷量

高压发生器 温度/℃	制冷性能 因数	制冷量/ kW
125	1.212 5	9.23
126	1.209 4	9.17
127	1.206 4	9.11
128	1.203 4	9.06
129	1.200 3	8.99
130	1.197 4	8.94
131	1.195 1	8.88
132	1.192 2	8.82
133	1.189 2	8.76
134	1.186 3	8.70
135	1.183 4	8.64

表4 不同低压发生器温度对应的  
制冷性能因数和制冷量

低压发生器 温度/℃	制冷性能 因数	制冷量/ kW
75	1.012 3	3.58
76	1.077 5	3.35
77	1.122 8	3.20
78	1.160 6	3.08
79	1.190 9	2.96
80	1.216 9	2.87
81	1.238 2	2.78
82	1.256 3	2.69
83	1.275 4	2.62
84	1.285 2	2.54
85	1.297 5	2.46

### 3 结论

1) 在朗肯循环中,高初温、高初压和低背压可有效提高系统热效率。

2) 双效溴化锂吸收式制冷系统在较高的废气温度、较低的低压发生器初始温度和高压发生器初始温度能实现较高的制冷量。

3) 双效溴化锂吸收式制冷系统的制冷量和制冷性能因数相互制约,在实际应用时,应根据外界环境及应用场合,灵活选择。

#### 参考文献:

- [1] 张一鸣. 活塞式膨胀机有机朗肯循环余热回收系统试验研究与参数耦合分析[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [2] 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.
- [3] 刘鹏. 重载柴油机余热回收有机朗肯循环匹配方法与实验研究[D]. 天津:天津大学,2022.
- [4] 支亮辉. 内燃机余热回收跨临界并行朗肯循环研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
- [5] 杨灿,谢辉,周奎,等. 柴油机朗肯循环余热回收系统的效率预测模型[J]. 工程热物理学报,2017,38(10):2092-2100.
- [6] 王培伦,孔祥花,李敏,等. 不同余热对有机朗肯循环余热回收效果的影响[J]. 内燃机与动力装置,2020,37(5):9-15.
- [7] 王鹏辉. 双效溴化锂吸收式制冷机的动态特性分析与性能优化[D]. 保定:华北电力大学,2022.
- [8] 黄闪,严良文,陈家健,等. 双效溴化锂制冷机组中央空调系统节能优化软件设计与开发[J]. 工业控制计算机,2022,35(9):45-47.
- [9] 李娜. 太阳能吸收式制冷循环新型工质对的热物性及其应用研究[D]. 北京:北京科技大学,2018.
- [10] 杨家兴,张延东. 溴化锂吸收式双效制冷机组[J]. 包钢科技,2015,41(5):59-61.
- [11] MUHAMMAD R, ADEEL J, AHMAD J, et al. Multiparametric optimization of a reheated organic rankine cycle for waste heat recovery based repowering of a degraded combined cycle gas turbine power plant [J]. Energy Conversion & Management, 2022, 254: 115237. 1-115237. 18.

- [12] ZHOU T, LIU J, REN J, et al. Conceptual design, modelling and optimization of an integrated system by combining organic rankine cycle and absorption refrigeration cycle for efficient energy recovery[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2022, 133:104276–104281.
- [13] VALENCIA G, FONTALVO A, FORERO J D. Optimization of waste heat recovery in internal combustion engine using a dual-loop organic rankine cycle;thermo-economic and environmental footprint analysis[J]. Applied Thermal Engineering: Design,Processes,Equipment,Economics, 2021, 182:109–116.
- [14] CEZAR K, CALDAS A, CALDAS A, et al. Development of a novel flow control system with arduino microcontroller embedded in double effect absorption chillers using the LiBr/H<sub>2</sub>O pair[J]. International Journal of Refrigeration,2020, 111:124–135.
- [15] PANDYA B,MODI N,UPADHYAI R, et al. Thermodynamic performance and comparison of solar assisted double effect absorption cooling system with LiCl-H<sub>2</sub>O and LiBr-H<sub>2</sub>O working fluid[J]. 建筑模拟(英文版),2019,12(6):1063–1075.

## Modeling and performance analysis of Rankine cycle coupled double-effect lithium bromide absorption refrigeration

LIU Jian, TAN Xianlin<sup>\*</sup>, BI Cheng, LIANG Ziyuan, FU Yule,  
ZENG Yang, YANG Yuanzhi

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

**Abstract:** In order to improve the efficiency of waste heat recovery in marine diesel engines, MATLAB is used to model and thermal dynamically analyze the Rankine cycle and dual effect lithium bromide absorption refrigeration system. The factors affecting the thermal efficiency of the Rankine cycle and the effects of exhaust gas temperature, high-pressure generator temperature, and low-pressure generator temperature on the refrigeration capacity and performance coefficient during the dual effect lithium bromide absorption refrigeration stage are determined. The results indicate that the optimal working fluid for the Rankine cycle is water. Raising the initial temperature, the initial pressure and reducing back pressure can improve the thermal efficiency of the Rankine cycle. As the exhaust gas temperature increases, the refrigeration capacity of the dual effect lithium bromide absorption refrigeration system increases, and the refrigeration performance coefficient decreases. As the temperature of the high-pressure generator increases, the cooling capacity decreases and the coefficient of refrigeration performance decreases. As the temperature of the low-pressure generator decreases, the cooling capacity increases and the refrigeration performance coefficient decreases. The relevant parameters of the dual effect lithium bromide absorption refrigeration system should be adjusted according to different environmental and occasion requirements.

**Keywords:** rankine cycle; double-effect lithium bromide absorption refrigeration; waste heat recovery; MATLAB modeling

(责任编辑:胡晓燕)