

文章编号: 1671-6612 (2021) 01-032-05

双效溴化锂吸收式 热泵余热回收系统数值模拟研究

王虹雅 周 勃 黄诗雯 朱里昂

(沈阳工业大学建筑与土木工程学院 沈阳 110870)

【摘 要】 溴化锂吸收式热泵机组可以有效回收利用工业和建筑中的各种形式低温余热, 提高余热资源回收率, 但设备参数对热泵性能影响很大。因此本文基于温度对口和梯级利用的原则, 对蒸汽型双效溴化锂吸收式热泵机组内传热部件进行热力及传热分析, 通过质量和能量守恒建立热泵机组数学模型, 分析热网供水温度、蒸发器进口低温余热热水温度和驱动热源温度这三个外部因素的变化对系统性能的影响。研究结果表明: 热网供水温度在 49℃左右, 热泵系统 COP 最佳为 2.67; 蒸发器进口低温余热热水温度在 47℃左右时, 热泵系统 COP 最佳为 2.67; 随着驱动热源温度的上升, 热泵系统的 COP 呈上升趋势。为吸收式热泵实际运行过程中, 合理设置设备参数提高热泵性能提供指导。

【关键词】 余热回收; 吸收式热泵; 数值模拟; 性能系数

中图分类号 TB611 文献标识码 A

Numerical Simulation Study on Waste Heat Recovery System of Double-effect LiBr Absorption Heat Pump

Wang Hongya Zhou Bo Huang Shiwen Zhu Li'ang

(School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870)

【Abstract】 Lithium bromide absorption heat pump units can effectively recover and utilize various forms of low-temperature waste heat in industry and construction, and improve the recovery rate of waste heat resources, but the equipment parameter has a great impact on the performance of the heat pump. Therefore, in this paper, based on the resources of temperature matching and cascade utilization, thermal and heat transfer analysis are carried out on the heat transfer components in the steam double-effect lithium bromide absorption heat pump units and analyze the influence of three external factors on system performance, such as the hot net water supply temperature and evaporator imported low temperature residual hot water temperature and the temperature of driving heat source through the establishment of mathematical model for heat pump unit mass and energy conservation. The results show that the COP of the heat pump system is 2.67 when the water supply temperature is about 49°C. The COP of the heat pump system is 2.67 when the temperature of the evaporator inlet low-temperature residual hot water is about 47°C. The COP of the heat pump system is on the rise with the increase of the driving heat source temperature. It provides guidance for reasonably setting equipment parameters to improve heat pump performance in the actual operation of absorption heat pump.

【Keywords】 waste heat recovery; absorption heat pump; numerical simulation; coefficient of performance

基金项目: 辽宁省重点研发项目 (2017229002); 沈阳市中青年科技创新人才项目 (RC190365)

作者简介: 王虹雅 (1996.10-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 821291088@qq.com

通讯作者: 周 勃 (1976.09-), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: liguodapple@sina.com

收稿日期: 2020-07-10

0 引言

工业和建筑业是我国最主要的热消耗领域。其中, 工业能耗较多。此外化工、制药、造纸、有色金属冶炼等工序中排除的工业余热占总能耗的 40%。在这些余热中有大量 30~80℃ 的低品位余热^[1]。目前, 国内工业余热资源回收率大约为 33%, 还约有 67% 的余热资源未被利用^[2], 因此余热利用率有很大的提升空间。溴化锂吸收式热泵可有效回收利用各种工序中的各种形式低温余热, 从而提高余热资源回收率。

近年来, 国内外学者对于溴化锂吸收式热泵的研究主要集中在不同工况对溴化锂吸收式热泵的性能影响。邱中举分析出溴化锂吸收式热泵系统可以利用电厂 30℃~45℃ 冷却水作为低温余热热源, 制热系数在 2.2 以上^[3]。成岭等分析出当热水入口温度、高温蒸汽入口温度和循环倍率增加时, 热泵系统性能均变差, 蒸发器入口低温热源水温度升高时, 系统性能变好^[4]。车德勇等人分析出当热热水出口温度升高时, 热泵性能变差^[5]。S Jeong^[6]等分析了热源温度对 COP 的影响, 但是对双效溴化锂吸收式热泵系统运行最佳工况分析较少。

本文通过质量和能量守恒方程建立了双效溴化锂吸收式热泵的数值模型, 并分析了热网供水温度、蒸发器进口低温余热水温度和驱动热源温度这三个外部因素的变化对系统性能的影响, 找到热泵性能最佳时的运行工况。为双效溴化锂吸收式热泵在实际运行过程中, 合理设置设备参数提高热泵性能提供指导。

1 模型建立

1.1 双效溴化锂吸收式热泵简介

热泵机组运行过程如图 1 所示, 系统主要由①蒸发器、②吸收器、③低温溶液热交换器、④高温溶液热交换器、⑤高压发生器、⑥低压发生器和⑦冷凝器组成。

制冷剂流程: 高压发生器中产生的制冷剂蒸汽 14 经由⑥变为制冷剂蒸汽 6, 与低压发生器中产生的制冷剂蒸汽 15 一起进入冷凝器被冷凝, 输出制冷剂水 3, 蒸发器中制冷剂水 3 吸收余热水的热量后, 输出制冷剂蒸汽 16。

溴化锂水溶液流程: 浓溶液 9 在吸收器喷淋过程中吸收水蒸汽, 变为稀溶液 2, 分别被输送至高、低

温热交换器, 经过热交换升温至 10 和 7 进入高、低压发生器输出制冷剂蒸汽 14 和 15 后输出稀溶液 12 和 4, 再进入高、低温热交换器中进行热交换, 降温输出浓溶液 13 和 8^[7]。

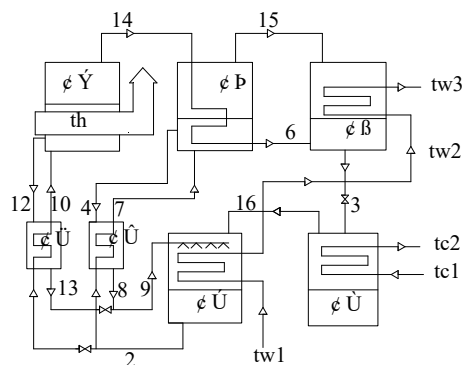


图 1 双效溴化锂吸收式热泵流程图

Fig.1 Flow diagram of operation of double-effect lithium bromide absorption heat pump

1.2 数值模型建立

数值法即根据水、水蒸气以及溴化锂水溶液的热物性建立数学关联式, 与双效溴化锂吸收式热泵中各部件的数值模型组成数学方程式, 计算热力系数^[8,9]。建立模型时为了使系统在保证一定精度的条件下, 需要对系统做如下假设^[10]:

- (1) 假设系统为稳定运行状态;
- (2) 忽略部件与外界环境之间的传热损失;
- (3) 系统中存在气液两相的部件处于平衡状态;
- (4) 吸收器和发生器出口溴化锂水溶液均处于饱和状态;
- (5) 出发生器的制冷剂蒸汽为对应发生器压力下的过热蒸汽, 温度为该发生器进口与出口温度的平均值;
- (6) 忽略泵功。

根据上述假设, 考虑双效溴化锂吸收式热泵机组各部件在工作中满足质量和能量守恒, 因此其各部件数值模型如下:

(1) 蒸发器

能量守恒方程:

$$Q_0 = D(h_{16} - h_3) \quad (1)$$

式中, D 为工质制冷剂流量 kg/s。

蒸发器传热温差方程为:

$$t_{16} = t_{c2} - \Delta t_e \quad (2)$$

式中, Δt_e 为蒸发器传热温差。

(2) 低压发生器

质量守恒方程:

$$G_{A2}\xi_l = (G_{A2} - D_2)\xi_h \quad (3)$$

式中, G_{A2} 为溴化锂稀溶液低压循环流量, kg/s。

能量守恒方程:

$$D_1(h_{14} - h_6) = (G_{A2} - D_2)h_4 - G_{A2}h_7 + D_2h_{15} \quad (4)$$

(3) 吸收器

能量守恒方程:

$$Q_a = (G_{A2} - D_2)h_8 + (G_{A1} - D_1)h_{13} + Dh_6 - (G_{A1} + G_{A2})h_2 \quad (5)$$

式中, Q_a 为吸收器的放热量, kW。

将 $G_{A1} = D_1a_1$, $G_{A2} = D_2a_2$ 带入式 (5) 可得:

$$Q_a = D_2(a_2 - 1)h_8 + D_1(a_1 - 1)h_{13} + Dh_6 - a_1D_1h_2 - a_2D_2h_2 \quad (6)$$

式中, G_{A1} 为溴化锂稀溶液高压循环流量, kg/s;

a_1 、 a_2 分别为溴化锂水溶液高、低压循环倍率。

传热温差方程为:

$$t_2 = t_{w2} + \Delta t_2 \quad (7)$$

式中, Δt_2 为吸收器传热温差。

(4) 高压发生器

质量守恒方程:

$$G_{A1}\xi_l = (G_{A1} - D_1)\xi_m \quad (8)$$

能量守恒方程:

$$Q_{gh} + G_{A1}h_{10} = (G_{A1} - D_1)h_{12} + D_1h_{14} \quad (9)$$

式中, Q_{gh} 为高压发生器的放热量。

(5) 冷凝器

质量守恒方程:

$$D = D_1 + D_2 \quad (10)$$

能量守恒方程:

$$Q_k = D_1(h_{14} - h_3) - Q_{gl} + D_2(h_{15} - h_3) \quad (11)$$

式中, Q_k 为冷凝器的放热量。

传热温差方程可表示为:

$$t_3 = t_{w3} + \Delta t_3 \quad (12)$$

式中, Δt_3 为冷凝器传热温差。

(6) 低温热交换器

能量守恒方程为:

$$h_7G_{A2} - h_2G_{A1} = (G_{A2} - D_2)(h_4 - h_8) \quad (13)$$

传热温差方程为:

$$t_8 = t_2 + \Delta t_8 \quad (14)$$

(7) 高温热交换器

能量守恒方程为:

$$h_{10}G_{A1} - h_2G_{A1} = (G_{A1} - D_1)(h_{12} - h_{13}) \quad (15)$$

传热温差方程为:

$$t_{13} = t_2 + \Delta t_{13} \quad (16)$$

(8) 系统制热系数 COP

$$COP = \frac{Q_a + Q_k}{Q_{gh}} \quad (17)$$

2 模型求解

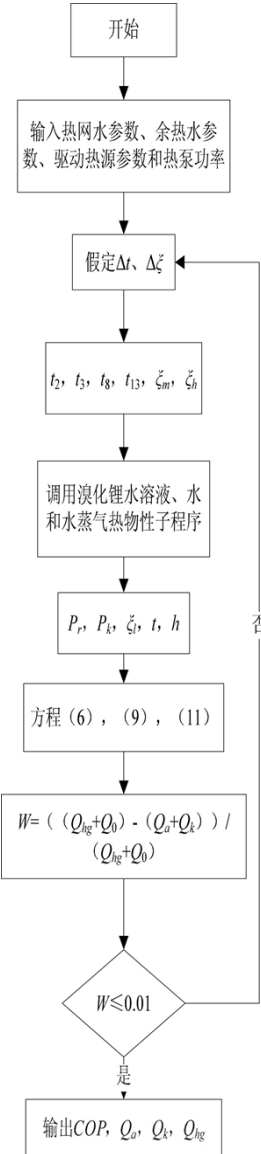


图2 热泵机组数值模型求解流程

Fig.2 Solution process of heat pump unit numerical model

根据双效溴化锂吸收式热泵数值模型可知,其主要为7个部件的热力、传热耦合过程,因此本文采用牛顿法进行迭代求解,模型求解流程如图2所示。输入热泵机组的已知参数定义如下:

(1) 从低温余热热源吸收的热量50kW;

- (2) 低温余热热源水进口温度 t_{c1} 为30℃;
- (3) 低温余热热源水出口温度 t_{c2} 为20℃;
- (4) 热网回水温度 t_{w1} 为35℃;
- (5) 热网供水温度 t_{w2} 为55℃;
- (6) 加热蒸汽压力0.7MPa;
- (7) 加热蒸汽温度165℃;
- (8) 稀溶液浓度54%。

根据上述参数, 使用 Matlab 对热泵机组数值

模型进行计算, 得到各状态点求解结果如表 1 所示。为验证本文数值模型的正确性, 将运行程序后计算出的结果与文献[3]中的过程法结果进行对比, 如表 2 所示。从比较结果可知, 本文数值模型的热泵设备负荷平均误差率为 0.001, 性能系数误差率为 0.004, 表明本文热泵机组数值模型的合理性和正确性。

表 1 热泵机组典型状态点参数对比

Table 1 Comparison of typical state point parameters of heat pump units

状态点	工质	温度 t (°C)		压力 P (kPa)		质量分数 ξ (%)		比焓 h (kJ/kg)	
		过程	数值	过程	数值	过程	数值	过程	数值
2	稀溶液	45.5	45.6	2.07	2.1	54	54	293	293.08
3	冷剂水	47.5	47.5	10.88	10.9	--	--	198	198.89
4	浓溶液	90	89.9	10.88	10.9	58	58	373	373.20
7	稀溶液	70.5	72.2	--	--	54	54	344.3	347.63
8	浓溶液	60	60	--	--	58	58	315	314.62
10	稀溶液	95.8	95.4	--	--	54	54	396.4	395.67
12	浓溶液	153	152.6	97	97	59	59	494	493.42
13	浓溶液	95	95	--	--	59	59	381	381.33
14	冷剂蒸汽	146	146.12	97	97	--	--	2742	2748.3
15	冷剂蒸汽	80.25	81.05	10.88	10.9	--	--	2645	2673.1
16	冷剂蒸气	18	18	2.07	2.1	--	--	2534	2531.2

表 2 过程法与数值计算法热泵各设备负荷和性能系数对比

Table 2 Comparison of process method and numerical calculation method for heat pump equipment load and performance coefficient

	过程	数值	误差率
冷凝器 (kW)	26.87	27.20	0.012
吸收器 (kW)	61.83	61.79	0.001
低压发生器 (kW)	26.61	26.70	0.003
高压发生器 (kW)	39.10	38.99	0.003
COP	2.27	2.28	0.004

3 双效溴化锂吸收式热泵性能分析

吸收式热泵机组运行性能主要受热网供回水温度、低温余热进出口水温和驱动热源温度等外部因素影响。因此, 本文通过分别计算各因素变化时的双效溴化锂吸收式热泵系统的性能系数, 从而明确不同工况对双效溴化锂吸收式热泵系统性能系

数的影响。

图 3 为系统在热网回水 30℃, 蒸发器进口低温余热水温度为 45℃, 低温余热水温差为 5℃, 驱动热源温度分别为 160℃、170℃和 180℃的情况下, 热网供水温度在 45℃至 60℃时对系统 COP 的影响。

从图3可以看出在, 其他条件不变时, 随着热网供水温度上升, 系统COP有所降低, 在49℃左右达到峰值。由方程(12)可知, 热网供水温度影响冷凝温度的大小, 出水温度降低间接使发生器热负荷减少, 系统COP增大。

图 4 为系统在热网供水 50℃, 蒸发器进出口低温余热水温差为 5℃, 驱动热源温度分别为 160℃、170℃和 180℃的情况下, 蒸发器进口低温余热水温度对系统 COP 的影响。

从图 4 可以看出, 热泵系统的 COP 都是随着蒸发器进口低温余热水的温度升高而增大的, 47℃左右达到峰值。从该图中也可以发现, 系统 COP

会随驱动热源饱和蒸汽温度的上升而增大。

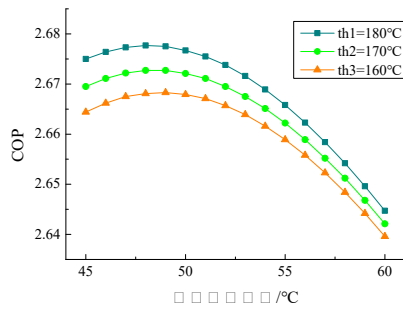


图3 热网供水温度-COP

Fig.3 Heating network water supply temperature-COP

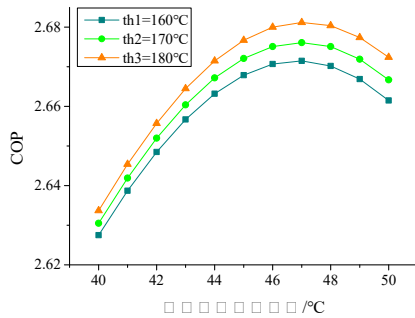


图4 低温余热进口温度-COP

Fig.4 Low temperature waste heat inlet temperature-COP

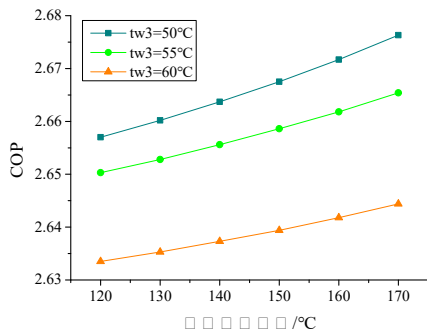


图5 驱动热源温度-COP

Fig.5 Drive heat source temperature-COP

图5为系统在热网回水温度为30℃，蒸发器进口低温余热水温度为45℃，蒸发器进出口低温余热水温差为5℃，热网供水温度50℃、55℃和60℃的情况下，驱动热源温度对系统COP的影响。

从图5可以看出，当驱动热源温度逐渐升高时，系统COP增大。这是因为升高驱动热源温度，使机组内压力升高，产生的高温蒸汽变多，再经由冷凝器成为制冷剂水，这样吸收低温余热的热量也增加了，使系统COP增大。

本文通过能量和质量守恒建立了双效溴化锂吸收式热泵系统数值模型，计算结果表明本文数值模型的热泵机组设备负荷平均误差率为0.001，性能系数误差率为0.004，表明本文热泵机组数值模型的合理性和正确性。

通过热泵机组数值模型对机组性能系数与热网供水温度、蒸发器进口低温余热水温度等进行分析。随着热网供水温度的升高，在49℃左右热泵性能COP达到最佳约为2.67；随着蒸发器进口低温余热水的温度升高，在47℃左右时热泵性能COP达到最佳约为2.67。模拟结果与文献[3]的系统COP实测值比较，发现结果较为准确。此外，随驱动热源温度的升高，系统COP增大。在双效溴化锂吸收式热泵实际的运行过程中，合理设置热网供水温度、蒸发器进口低温余热水温度可有效改善热泵性能。

参考文献:

- [1] 张立国,张红岩.新型溴化锂吸收式制冷机的设计研究[J].流体机械,2005,(8):67-68,27.
- [2] 吴永飞,沈致和.烟气型双效溴化锂制冷机的可视化设计[J].低温与超导,2012,40(3):73-77.
- [3] 邱中举.溴化锂吸收式热泵系统的研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [4] 成岭,张婧,金璐,等.LiBr-H₂O吸收式热泵的热力学分析[J].制冷学报,2019,40(1):128-134.
- [5] 车德勇,吕婧,高龙,等.溴化锂吸收式热泵回收循环水余热的模拟研究[J].热力发电,2014,43(12):38-43.
- [6] S Jeong, B H Kang. Dynamic simulation of an absorption heat pump for recovering low grade waste heat[J]. Applied Thermal Engineering, 1998,18(1):197-205.
- [7] 周振起,崔春晖,袁猛,等.吸收式热泵回收火电厂冷凝热供暖的技术经济性[J].制冷与空调,2017,31(1):77-80.
- [8] 贾明生.溴化锂水溶液的几个主要物性参数计算方程[J].湛江海洋大学学报,2002,(3):52-58.
- [9] The International Association for the Properties of Water and Steam. Revised release on the IAPWS international formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam[R]. Erlangen, Germany, 1997.
- [10] 田泽辉,解国珍,张凡.溴化锂吸收式热泵循环理论分析与计算机模拟[J].制冷与空调,2014,28(2):116-121.

4 结论