

文章编号:0253-4339(2022)04-0137-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2022.04.137

基于方差分析法对变效溴化锂吸收式制冷循环的参数评估

张柯 马海晶 孙红磊 王德昌 王肖禾 宋庆路

(青岛大学机电工程学院 青岛 266071)

摘 要 本文对一种新型吸收发生热交换式 (AGX) 的变效溴化锂吸收式制冷循环 (ARC) 进行了热力学分析,该循环在高压发生器温度为 93~140 ℃ 时,性能系数 (COP) 可达 0.75~1.08,较传统的单/双效 ARC 更具商业价值。但现有对 AGX 变效循环中运行参数的分析无法确定参数对循环 COP 影响程度的顺序,不利于系统的设计和运行控制。对此,利用 EES 软件建立 AGX 变效 ARC 的数学模型,分析了热力参数对循环 COP 的影响,并在统计学基础上使用方差分析法,评估了各参数对系统 COP 影响的显著性和贡献率,确定了参数对 COP 影响程度的顺序。结果表明:蒸发温度 (T_E) 增加 5 ℃,使 COP 由 1.035 增至 1.157,增幅 11.8%;吸收温度 (T_{LA}) 降低 5 ℃ 使 COP 增加 9.5%,达到 1.133;冷凝温度 (T_C) 降低 5 ℃ 使 COP 增加 6.7%,达到 1.104。其中 T_E 对循环 COP 影响最显著,显著性为 45.67%,其次是 T_{LA} 为 29.80%, T_C 为 17.93%,溶液分配比 R_1 的影响最小,显著性为 0.02%,因此,在系统设计和运行控制中应优先调整 T_E 和 T_{LA} 使 AGX 变效循环 COP 最大化。

关键词 变效;吸收制冷循环;参数评估;方差分析法

中图分类号:TB61⁺6; TK519

文献标识码: A

Parametric Evaluation of Variable Effect Lithium Bromide Absorption Refrigeration Cycles Based on Variance Analysis

Zhang Ke Ma Haijing Sun Honglei Wang Dechang Wang Xiaohe Song Qinglu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao, 266071, China)

Abstract A thermodynamic analysis of the variables of a novel absorption generation heat exchange (AGX) on the variable effect lithium-bromide absorption refrigeration cycle (ARC) is performed in this study. The coefficient of performance (COP) of the cycle is 0.75-1.08 when the temperature of the high-pressure generator is 93 ℃-140 ℃. The abovementioned cycle has more commercial value than the conventional single/double effect ARC. However, the thermodynamic analysis of the parameters in the AGX cycle is limited, and the order of significance of thermodynamic parameters on the COP has not been determined. In this study, a thermodynamic model of the AGX cycle is established using the EES software. The effects of the parameters on the system COP are analyzed. The effects of the operational parameters on the COP are investigated statistically via the analysis of variance to determine the order of significance of the parameters. The results show that when the evaporating temperature (T_E) increased by 5 ℃, the COP increased by 11.8% (from 1.035 to 1.157); the absorption temperature (T_{LA}) decreased by 5 ℃; the COP increased by 9.5% to 1.133; the condensing temperature (T_C) decreased by 5 ℃; the COP increased by 6.7% to 1.104. T_E contributes most significantly to the COP, with a contribution percentage of 45.67%, followed by T_{LA} (29.80%), T_C (17.93%), and R_1 (0.02%). Therefore, T_E should be prioritized in the system design and operation control to maximize the COP of the AGX cycle.

Keywords variable effect; absorption refrigeration cycle; parametric evaluation; analysis of variance

2020 年,制冷用电约占建筑行业总用电量的 16% (约 1 885 T·Wh)^[1]。太阳能作为热源的制冷系统是电压缩式制冷较好的替代品,可有效降低能耗,且最大优点是季节匹配性好,即夏季太阳能的供给与建筑物的制冷需求有较好的一致性,天气越热,系统制冷量越大。太阳能光热转换制冷将太阳能转换成热能,再利用热能驱动制冷机制冷,主要包括太阳能吸附式制冷、太阳能喷射式制冷以及太阳能吸收式制冷。由于吸收式制冷机相比其他太阳能制冷技术成本较低,COP (coefficient of performance) 较高,因此,吸收式冷水机组技术被认为是最理想的太阳能热制冷方法,并有望在可预见的未来与传统空调系统展开

大规模竞争^[2]。对溴化锂吸收式制冷循环(absorption refrigeration cycle, ARC)的热力学分析以及循环的性能特征的研究文献较多。赵心蕊等^[3]采用 1,3-二甲基咪唑磷酸二甲酯盐/水作为工质对,进行吸收发生换热式循环的性能计算,发现在发生温度较高的情况下 COP 可达约 1.02,比相同特定工况下的单效循环 COP 提升 27.5%。成岭等^[4]分析了不同操作参数对溴化锂吸收式热泵的 COP、炯效率、炯效率和熵产这 4 种性能评价指标的影响规律,发现 COP 和炯效率变化趋势的一致性。贺冬辰等^[5]建立了太阳能-第二类吸收式热泵联合供热模型,太阳能保证率可达 0.615,相比燃气锅炉供热燃料费用节省 45.7%。M. Kilic 等^[6]分析了循环中温度对 COP 的影响,结果表明,单效 ARC 的性能随发生器和蒸发温度的升高而提高,但随冷凝温度和吸收温度的升高而降低。H. T. Chua 等^[7-8]研究也得到相似的结论,其中 I. Atmaca 等^[8]研究发现吸收器的性能是影响 COP 和成本最重要的因素。R. Gomri^[9]对双效模型进行热力学特性计算,结果表明,循环 COP 随发生和蒸发温度的升高而增加,但随冷凝温度的升高而减少。同样在 O. Kaynakli 等^[10-11]研究中也得到相似结论。可见对双效系统的性能分析与单效系统分析得到的结果相近。但该结论能否适用于变效 ARC 需进一步研究。

对于溴化锂 ARC,由于其 COP 不会随热源温度的升高而无限增大,不同效数的循环需要在其合适的发生温度范围内工作。对于单效 ARC,驱动温度为 80~110℃,COP 为 0.6~0.8^[12-14]。双效 ARC 提供了更高的 COP,约为 1.0~1.4,所需生成温度为 130~160℃^[15-16]。110~130℃的生成温度对于单效应 ARC 而言过高,因为它易结晶^[16],对于双效应而言较低,因为热源温度在截止温度附近时,循环 COP 太低^[17]。单效循环的发生温度范围适用平板集热器,但循环 COP 较低;双效循环效率高,但所需集热器投资成本过高,这些问题始终限制着溴化锂 ARC 的商业化应用。

针对单效或双效系统驱动热源的实用性问题, Xu Z. Y. 等^[18]在 2013 年提出 AGX(吸收发生热交换式, absorption generation heat exchange)变效循环,该循环可在 85~150℃的较大发生温度范围内工作,在变效的工作模式下循环 COP 可以平稳地从 0.75 增至 1.08。研究结果表明, AGX 变效溴化锂吸收式制冷循环具有较低的截止驱动温度和较高的 COP,可在更大的发生温度范围内工作,比单效或双效吸收式循环更能适应热源温度的变化^[19]。 Xu Z. Y. 等^[20]

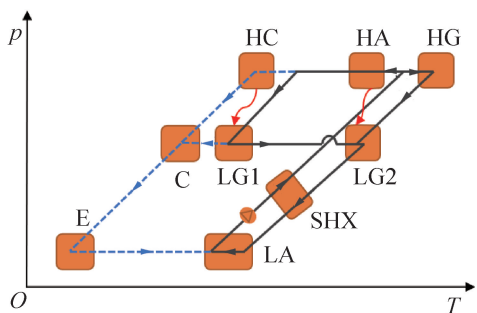
对 AGX 变效应吸收式制冷机组进行了实验测试,结果表明, COP 理论与实验值的平均误差为 7.3%,验证了 AGX 变效吸收式制冷循环的可行性。林立等^[21]对 AGX 变效吸收式制冷循环进行了数学建模研究,发现在给定高压发生器(high pressure generator, HG)和高压冷凝器(high pressure condenser, HC)出口温度的情况下,存在最佳的第一低压发生器进出口温差(ΔT_{LG1}),使循环 COP 取极大值;对于给定的高压发生器出口温度,存在最佳的高压冷凝器出口温度,其对应的最佳 COP 为循环在该高压发生器出口温度下的最大值。

但 ARC 中效率低下的问题在新型 AGX 变效循环中依旧存在,并且 AGX 变效循环中参数更多,控制循环高效运行的难度也大幅增加,制约了 AGX 变效吸收式循环的进一步发展。针对上述问题,对 AGX 变效循环中的参数进行热力学分析,研究参数相对于循环 COP 的重要性顺序,得到系统参数的控制和优化策略。不同于对单效和双效 ARC 的研究, AGX 变效循环提出较晚,当前针对 AGX 变效循环的研究较少。鲜有使用方差分析法(analysis of variance, ANOVA)对 AGX 变效循环的热力参数进行分析并确定其对系统 COP 影响程度的相关研究。本文以 AGX 变效吸收式制冷循环为研究对象,建立热力学模型,选取高压发生器出口浓度(x_{HG})和进入高压发生器的溶液占低压吸收器出口溶液流量的百分比(R_1)作为模型中的自变量,分析模型中参数对 COP 的影响,使用 ANOVA 确定这些参数对 COP 的显著性和贡献率,得到其对 COP 影响程度的顺序并进行热力参数的优化。参数对 COP 影响程度的顺序将为 AGX 变效吸收式系统的设计优化和运行控制提供理论指导,有利于适用于中温太阳能的 AGX 变效吸收式系统的发展和应用。

1 AGX 变效循环特性

图 1 所示为文献[18]提出的 AGX 变效溴化锂吸收式制冷循环的杜林线图,该循环共包含 9 个组件,如图所示。

与单效或双效循环相比,该循环通过改变进入 HC 和 HA 的水蒸气份额实现变效运行。进入 HA 的一部分水蒸气先被溶液吸收放出热量,该热量又使 LG2 中的溶液生成水蒸气,一份热量生成一份水蒸气,具有单效循环的特征;剩余部分进入 HC 冷凝放出热量,该热量使 LG1 产生水蒸气,一份热量生成两份水蒸气,具有双效循环的特征。 AGX 变效循环通过调整运行参数来控制进入 HC 和 HA 的水蒸气的



HG 高压发生器;HA 高压吸收器;LG1 第一低压发生器;
LG2 第二低压发生器;SHX 溶液热交换器;LA 低压吸收
器;HC 高压冷凝器;C 冷凝器;E 蒸发器。

图 1 AGX 变效溴化锂吸收式制冷循环杜林线图^[18]

Fig.1 Duhring's diagram of the AGX variable effect
absorption cycle^[18]

份额,以实现循环 COP 在单效和双效之间变化,因此
被称为 AGX 变效制冷循环。

2 数学模型与方法

2.1 AGX 变效循环热力模型

图 1 所示循环的条件假设与文献[18]相同。对
模型中每个部件建立能量守恒、质量守恒和组分守恒
方程^[18],如式(1)~式(3)所示。

$$\sum m_{in} + \sum m_{v, in} - \sum m_{out} - \sum m_{v, out} = 0 \quad (1)$$

$$\sum m_{in} x_{in} - \sum m_{out} x_{out} = 0 \quad (2)$$

$$\sum m_{in} h_{in} + \sum m_{v, in} h_{v, in} - \sum m_{out} h_{out} - \sum m_{v, out} h_{v, out} + Q = 0 \quad (3)$$

溶液分配比 R_1 :

$$R_1 = m_{s, HG} / m_{s, LA} \quad (4)$$

水蒸气分配比 R_2 :

$$R_2 = m_{v, HC} / m_{v, HG} \quad (5)$$

循环的制冷 COP:

$$COP = Q_E / Q_{HG} \quad (6)$$

式中: m 为溶液质量流量, kg/s; m_v 为水蒸气质
量流量, kg/s; m_s 为部件中的稀溶液质量流量, kg/s; x
为溶液中溴化锂质量分数, %; h 为溶液比焓, kJ/kg;
 h_v 为制冷剂比焓, kJ/kg; Q 为各部件的换热量, kW;
下标 in 和 out 表示各部件的进、出口。

上述方程组结合假设条件,在给定外部组件参
数, HG 出口温度、C 出口温度、E 出口温度和 LA 出
口温度的情况下,仍存在 2 个自由度。 x_{HG} 能直接影
响 HG 的放气范围,本文选择其作为参数之一。同时
为便于对系统进行控制,另一个参数选为 R_1 , R_1 直接

影响 HG 的水蒸气发生量,同时也对 HA-LG2 的热耦
合环节的放气范围与传热量产生影响。选定这一组
参数即可确定循环各个状态点。

模拟采用 EES 软件,可以自动识别并求解方程
组,并可调用内置的热物性函数。文中若无特别说
明,则低压吸收器出口溶液流量为 0.2 kg/s、温度为
35 ℃,高压发生器出口溶液温度为 130 ℃、质量分
数为 0.607,蒸发器出口水蒸气温度为 5 ℃,冷凝器出
口冷剂水温度为 40 ℃。

2.2 方差分析法(ANOVA)

ANOVA 是一种统计方法,可以分析影响因子对
响应的重要性顺序,进行参数优化。在 ANOVA 分析
中,以显著性水平为 0.05,对应 95%的置信度,得到
显著性值。为了结果的统计可靠性,同时进行了 F
检验,使用 ANOVA 确定 F 值(即回归均方值和均方
误差之间的比率),得到的 F 值和显著性值越大,则
相关参数在统计学上越具有显著性。同时用样本点
建立多元二次回归模型,以更加全面的得到各参数单
独以及其交互作用对 COP 的影响。以下方程可用于
计算每个因子的 F 值、多元二次回归模型、离均差平
方和(SS)、方差(V)和自由度(DOF):

$$F_{\text{Factor}} = V_{\text{Factor}} / V_{\text{Error}} \quad (7)$$

$$V = SS / DOF \quad (8)$$

$$DOF = k - 1 \quad (9)$$

$$SS_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (10)$$

$$SS_{\text{Factor}} = \sum_{i=1}^n (y_{xi} - \bar{y})^2 \quad (11)$$

$$SS_{\text{Error}} = SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Factor}} \quad (12)$$

$$y_{xi} = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_i x_i^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (13)$$

式中: F_{Factor} 表示某参数与循环性能系数的相关度,
值越大表示参数对循环性能系数的影响越大; k 为参
数的水平数; y_i 为试验中第 i 个样本点的值, $\bar{y}$ 为
试验中样本点对应的循环性能系数 y 的均值, y_{xi} 为
根据样本点建立的多元二次回归模型在第 i 个样本
点的响应值^[22];下标 Factor、Error、Total 分别表示单
个因子、残差、总体。

很多研究使用 ANOVA 从统计学上确定参数的
影响率大小,并由此进行性能评估和参数优化。A.
S. Canbolat 等^[23]使用 ANOVA 方法对氨水 ARC 的性
能进行优化,对模拟结果进行方差分析,确定了参数
的重要性顺序,得到系统的最佳运作条件,系统最佳
COP 为 0.697。V. Verma 等^[24]使用 ANOVA 对太阳
能辅助地源热泵的性能进行分析优化,优化了设计参

数,以最佳 COP 获得太阳能集热器面积和地面热交换器长度。在本研究中使用该方法对变效 AGX 溴化锂 ARC 的性能进行分析,确定参数 T_E 、 T_{LA} 、 T_C 、 T_{HG} 和 R_1 对循环 COP 的影响程度顺序。

2.3 模型验证

将本模型与文献[20]中的实验数据进行验证。在与实验相同的参数条件下对比模型和实验得到的循环 COP,结果如表 1 所示。由表 1 可知,本模型和实验数据的最大偏差为 3.85%,平均偏差为 2.24%,这是由于模型中循环 COP 是在理想假设条件下得出的。模型与文献的结果很接近,可以说明所构建数学模型的可靠性和准确性。

表 1 模型和文献中实验数据对比
Tab.1 Comparison of model and experimental data in literature

T_{HG}	T_E	T_{LA}	T_C	COP		偏差/ %
				本文	文献 ^[20]	
/℃						
95.0	7.4	39.2	37.9	0.75	0.78	3.85
100.2	5.5	40.5	38.9	0.77	0.76	0.83
104.4	11.2	37.8	37.2	0.99	1.00	1.00
110.9	8.7	40.4	40.2	0.89	0.92	3.26
115.8	8.5	38.9	38.1	0.98	1.00	2.00
118.8	5.2	36.2	35.0	1.02	1.01	0.99
120.0	7.0	35.6	34.9	1.03	1.07	3.74

3 结果与分析

3.1 发生温度对循环 COP 影响

图 2 所示为溶液分配比 R_1 分别为 0.76、0.78 和 0.80 时,循环 COP 和制冷量 Q_E 随 HG 出口温度 T_{HG} 的变化。其中 R_1 表示进入 HG 的溶液占 LA 出口溶液流量的百分比,如式(4)所示。由图 2 可知,循环 COP 和 Q_E 随 T_{HG} 的增大而增大,且增加趋势随温度的增加而变缓; T_{HG} 越高, R_1 对 COP 的影响越小。系统 COP 随发生温度变化的原因可以归结为:1) 发生温度越高,HG 工作压力越高,发生器的放气范围越大,循环 COP 越高;2) T_{HG} 增加,使 HA 吸收更少水蒸气,使更多的发生水蒸气份额进入 HC,双效效果份额增加,循环 COP 随之增大。

图 3 所示为 R_1 分别为 0.76、0.78 和 0.80 时,进入 HC 水蒸气质量流量 ($m_{v,HC}$) 以及制冷剂水蒸气流量分配比 R_2 随 HG 出口温度的变化。其中 R_2 表示进入 HC 制冷剂占 HG 出口制冷剂水蒸气流量的百

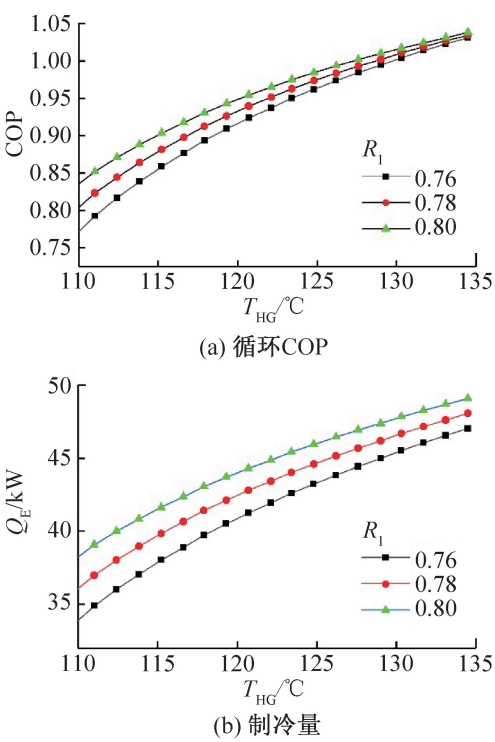


图 2 T_{HG} 对循环 COP 和制冷量的影响
Fig.2 Effect of T_{HG} on COP and Q_E

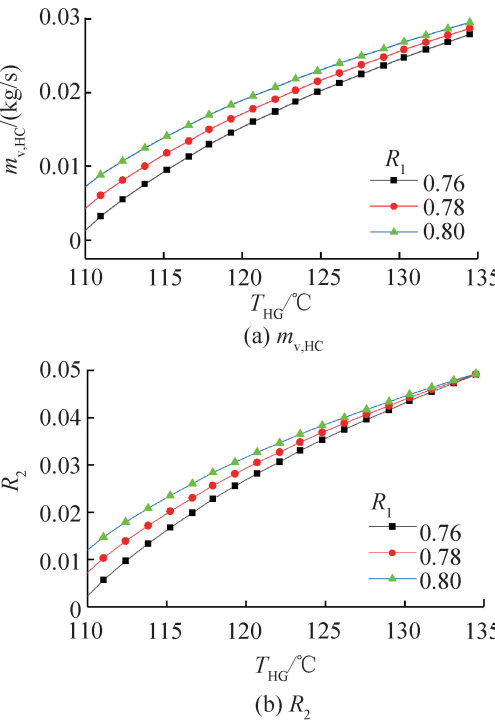


图 3 T_{HG} 对进入 HC 水蒸气质量流量和份额的影响
Fig.3 Effect of T_{HG} on $m_{v,HC}$ and R_2

分比,如式(5)所示。由图 3 可知, $m_{v,HC}$ 和 R_2 随 T_{HG} 的增大以及 R_1 的增大而增大。更多的热量从 HC 进入 LG1,进入 HC 的水蒸气的单位冷凝热变化较小,因此 $m_{v,HC}$ 增加。

HA 入口溶液饱和浓度随温度增加而增大,溶液更容易达到饱和,因此 HA 吸收水蒸气质量流量降低,HC 吸收水蒸气质量流量升高。由于进入 HC 的水蒸气具有双效循环效果,HC 的水蒸气份额越多,循环越接近双效循环,有利于提高循环 COP。

3.2 蒸发温度、冷凝温度和吸收温度对循环 COP 的影响

图 4 所示为不同的 T_E 、 T_C 和 T_{LA} 对循环 COP 的影响。由图 4 可知, T_E 等参数确定的情况下,系统 COP 均随发生温度的增加而增加;此外 COP 随 T_E 的增加而增大,随 T_{LA} 和 T_C 的减小而增大。还可知,不同参数对 COP 的影响程度不同, T_E 对 COP 的影响更大。 T_E 增加 5℃,使 COP 由 1.035 增至 1.157,增加 11.8%; T_{LA} 降低 5℃,使 COP 增加 9.5%,达到 1.133; T_C 降低 5℃,使 COP 增加 6.7%,达到 1.104。

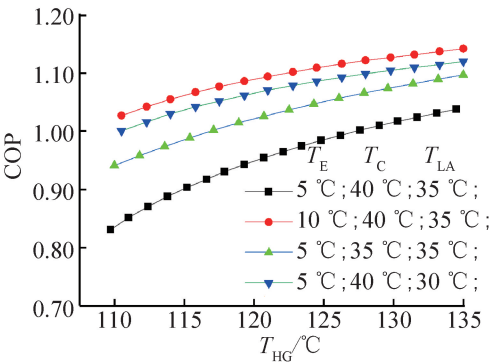
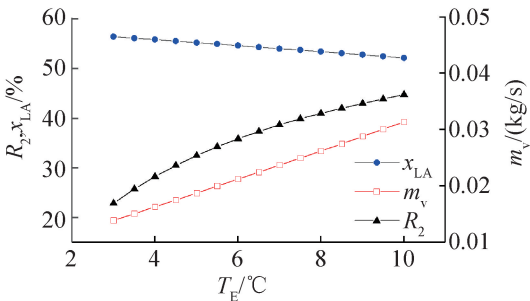


图 4 T_E 、 T_C 和 T_{LA} 对循环 COP 的影响
Fig.4 The effects of T_E 、 T_C and T_{LA} on COP

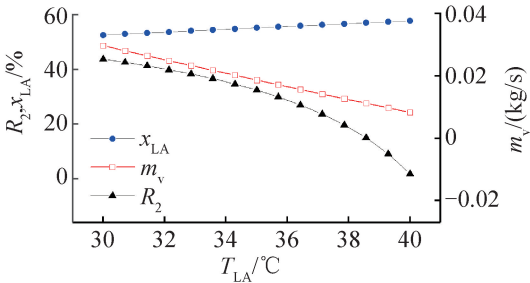
COP 随 T_E 升高而升高,这是因为 T_E 升高,同时蒸发压力升高,低压吸收器的压力升高,使吸收器出口稀溶液质量分数降低,导致高、低压发生器溶液质量分数差增大,产生的制冷剂水蒸气量(m_v)增大,制冷量升高,COP 升高。由图 5(a)可知,随着 T_E 的增大, x_{LA} 减小,同时 R_2 和 m_v 增加。

图 5(b)中,随着 T_{LA} 的增加, R_2 和 m_v 均降低, x_{LA} 增加。这是因为 T_{LA} 增大,使溶液饱和浓度 x_{LA} 增大,降低了吸收器与高低压发生器之间的浓度差,产生的制冷剂水蒸气量降低,制冷量降低,COP 因此降低。

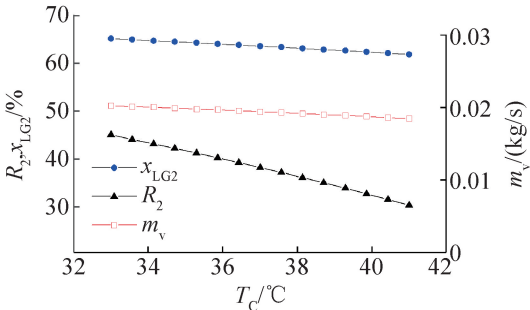
由图 5(c)可知,随着 T_C 的增加, x_{LG2} 增加, R_2 和 m_v 减小。 T_C 增大不会对吸收器产生直接影响,而低压发生器和冷凝器在相同的压力下。 T_C 增大会导致低压发生器的压力增大,因此低压发生器出口饱和溶液质量分数 x_{LG1} 和 x_{LG2} 变小,溶液的浓度差减小,产生的水蒸气量降低,同时 R_2 降低,COP 因此降低。



(a) x_{LA} , m_v 和 R_2 随 T_E 的变化



(b) x_{LA} , m_v 和 R_2 随 T_{LA} 的变化



(c) x_{LG2} , m_v 和 R_2 随 T_C 的变化

图 5 x , m_v 和 R_2 随 T_E 、 T_C 、 T_{LA} 的变化

Fig.5 Changes of x , m_v and R_2 with T_E 、 T_C and T_{LA}

3.3 热力参数对 COP 的影响显著性分析

对参数 T_E 、 T_{LA} 、 T_C 、 T_{HG} 和 R_1 使用 ANOVA 法分析。根据文献分别对参数选取 3 个工况,不同工况下的参数取值如表 2 所示。

表 2 不同工况下的参数取值
Tab.2 Parameters under different conditions

工况	$T_{HG}/^{\circ}\text{C}$	$T_C/^{\circ}\text{C}$	$T_{LA}/^{\circ}\text{C}$	$T_E/^{\circ}\text{C}$	R_1
1	117	30	30	5	0.75
2	119	32	32	7	0.77
3	121	36	36	9	0.79

将参数在 AGX 变效模型中进行全因子试验(full factorial design, FFD),模拟结果通过 ANOVA 方法进行分析,其中参数的影响大小由 F 统计量、显著性值和贡献率得到,分析结果如表 3 和表 4 所示。由表 3

可知,蒸发温度对循环 COP 影响最显著,显著性为 45.67%,而 R_1 的影响最小,显著性为 0.02%,温度参数中 T_{HG} 的显著率最小为 2.16%。参数对 AGX 变效循环性能影响的显著性顺序为: $T_{\text{E}} > T_{\text{LA}} > T_{\text{C}} > T_{\text{HG}} > R_1$ 。

表 3 ANOVA 分析结果和参数对 COP 的显著性
Tab.3 Impact ratio of ANOVA analysis results and parameters on COP

参数	$V \times 10^{-3}$	F 值	显著性/%
T_{E}	325.5	1251.8	45.67
T_{HG}	15.7	60.3	2.16
T_{LA}	212.5	817.2	29.80
T_{C}	128.0	492.3	17.93
R_1	0.1	0.3	0.02
总误差	0.3	—	4.42
总计	5.9	—	100.00

表 4 参数对 COP 的多元二次回归系数
Tab.4 Multivariate quadratic regression coefficient of parameters on COP

参数	归一化系数 $\times 10^{-3}$	贡献率/%
T_{E}	63.91	28.55
T_{LA}	-51.72	23.11
T_{C}	-38.94	17.39
$T_{\text{E}}-T_{\text{LA}}$	18.81	8.40
T_{HG}	14.07	6.29
$T_{\text{E}}-T_{\text{C}}$	7.46	3.33
$T_{\text{C}}-T_{\text{LA}}$	-6.86	3.06
$T_{\text{E}}-T_{\text{HG}}$	-4.01	1.79
$T_{\text{LA}}-T_{\text{HG}}$	3.66	1.64
$T_{\text{E}}-R_1$	-3.37	1.51
$T_{\text{C}}-R_1$	3.33	1.49
$T_{\text{LA}}-R_1$	3.01	1.34
$T_{\text{HG}}-R_1$	-1.63	0.73
R_1	1.60	0.71
$T_{\text{C}}-T_{\text{HG}}$	1.48	0.66
总计	—	100.00

表 4 所示为用样本点根据式(13)得到的回归系数,更全面的表示出各参数单独以及其交互作用对 COP 的影响。表中第一列反映了将参数归一化到 $[-1, +1]$ 后用最小二乘法拟合后的模型系数,能够更

公平地反映参数对 COP 的贡献。其中包括每个参数的主效应以及参数之间的交互作用对 COP 影响。第二列反映了将归一化后模型系数转化为贡献率百分比后的结果。表中参数主效应对 COP 的贡献率大小顺序与表 3 得到的结果相同,考虑参数的交互作用贡献率顺序为表中的前后顺序。其中 T_{E} 、 T_{LA} 、 T_{C} 的贡献率分别为 28.55%、23.11%、17.39%,除 T_{E} 、 T_{LA} 、 T_{C} 、 $T_{\text{E}}-T_{\text{LA}}$ 、 T_{HG} 外,其他贡献率均小于 5%, R_1 和其他参数的交互作用对 COP 的贡献率大于其主效应。

表 3 得到的显著性和 F 统计得到的顺序与表 4 的贡献率顺序结果一致,同样与 3.2 节中对 T_{E} 、 T_{LA} 、 T_{C} 分析得到的顺序相符,因此可从表 3 和表 4 中得到参数对 COP 的影响顺序为: $T_{\text{E}} > T_{\text{LA}} > T_{\text{C}} > T_{\text{HG}} > R_1$ 。 T_{E} 和 T_{LA} 对 COP 的显著性达到 75.47%,贡献率达到 60.06%。由前文分析可知, T_{E} 和 T_{LA} 均通过改变吸收器出口溶液浓度改变循环总的放气范围,进而改变循环整体的水蒸气发生量,影响循环 COP。而其他参数则是单独对 HG 或 LG 的水蒸气发生量产生影响,因此 T_{E} 和 T_{LA} 对 COP 的影响更大。在溴冷机的实际应用中有两种可能:1) 发生温度确定,此时根据以上分析,从增加 COP 的角度来看,应优先选择增加 T_{E} ,其次是减小 T_{LA} 和 T_{C} ,最后是增加 R_1 ;2) T_{E} 已经根据制冷需求确定,此时根据图 4,增加 T_{HG} 同样能够实现效率提升,但由于其显著性和贡献率较小,对 COP 的影响较小,所以优先减小 T_{LA} 和 T_{C} 来增加 COP 是更好的选择。因此在 AGX 变效循环的运行控制和系统设计中,应优先考虑增加 T_{E} ,其次是减小 T_{LA} 来增加循环 COP。

4 结论

对 AGX 变效吸收式制冷循环进行模拟研究,分析了高压发生温度、吸收温度、冷凝温度、蒸发温度、溶液分配比等热力参数对循环性能的影响,并通过方差分析得到热力参数对性能的影响大小,得到结论如下:

1) AGX 变效循环可以通过控制进入 HC 和 HA 的水蒸气的份额 R_2 来实现循环 COP 在单效和双效之间变化。 R_2 越大进 HC 的水蒸气质量流量占 HG 生成的水蒸气流量份额越大,循环中具有双效循环效果的水蒸气越多,循环越接近双效,COP 越大。因此,在系统运行过程中,可通过提高 R_2 来提高系统性能。

2) 参数 T_{E} 、 T_{LA} 、 T_{C} 、 T_{HG} 和 R_1 均通过改变制冷剂份额 R_2 来改变循环 COP。其中 T_{E} 增加 5℃使 COP 由 1.035 增至 1.157,提高 11.8%; T_{LA} 降低 5℃使

COP 增至 1.133, 提高 9.5%; T_c 降低 5 °C 使 COP 增至 1.104, 提高 6.7%。因此, 在系统设计中尽可能选取较高的发生温度和蒸发温度, 较低的冷凝温度和吸收温度来提高系统的性能。

3) 通过方差分析可知 T_E 对循环 COP 的影响最大, 方差分析得到的显著性为 45.67%, 贡献率为 28.55%; R_1 是影响最小的参数, 显著性为 0.02%, 贡献率为 0.71%。参数对 AGX 变效循环的 COP 影响顺序为: $T_E > T_{LA} > T_c > T_{HC} > R_1$ 。因此, 在系统的设计和控制中, 应优先考虑 T_E 和 T_{LA} 对系统性能的影响。

参考文献

- [1] IEA. Cooling[R]. Paris: IEA, 2021.
- [2] SHIRAZI A, TAYLOR R A, MORRISON G L, et al. Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 59–81.
- [3] 赵心蕊, 徐震原, 王如竹. 采用离子液体-水工质对的 GAX 吸收式制冷循环性能研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(4): 52–58. (ZHAO Xinrui, XU Zhenyuan, WANG Ruzhu. Performance analysis of a GAX absorption cycle with ionic liquid-water working pairs[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(4): 52–58.)
- [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. (CHENG Ling, ZHANG Jing, JIN Lu, et al. Thermodynamic analysis of LiBr-H₂O absorption heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(1): 128–134.)
- [5] 贺冬辰, 陈宗帅, 孙智冬, 等. 太阳能-第二类吸收式热泵联合供热系统性能的数值研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(5): 603–610. (HE Dongchen, CHEN Zongshuai, SUN Zhidong, et al. Numerical study on the performance of heating system with solar-assisted absorption heat transformer[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(5): 603–610.)
- [6] KILIC M, KAYNAKLI O. Second law-based thermodynamic analysis of water-lithium bromide absorption refrigeration system[J]. Energy, 2007, 32(8): 1505–1512.
- [7] CHUA H T, TOH H K, MALEK A, et al. Improved thermodynamic property fields of LiBr-H₂O solution[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(6): 412–429.
- [8] ATMACA I, YIGIT A, KILIC M. The effect of input temperatures on the absorber parameters [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2002, 29(8): 1177–1186.
- [9] GOMRI R. Second law comparison of single effect and double effect vapour absorption refrigeration systems [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1279–1287.
- [10] KAYNAKLI O, SAKA K, KAYNAKLI F. Energy and exergy analysis of a double effect absorption refrigeration system based on different heat sources[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 21–30.
- [11] FARSHI L G, MAHMOUDI S M S, ROSEN M A, et al. Exergoeconomic analysis of double effect absorption refrigeration systems [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65: 13–25.
- [12] KHAN M S A, BADAR A W, TALHA T, et al. Configuration based modeling and performance analysis of single effect solar absorption cooling system in TRNSYS [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 351–363.
- [13] ZHENG J, CASTRO J, OLIVA A, et al. Energy and exergy analysis of an absorption system with working pairs LiBr-H₂O and Carrol-H₂O at applications of cooling and heating [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 132: 156–171.
- [14] ALOBAID M, HUGHES B, CALAUTIT J K, et al. A review of solar driven absorption cooling with photovoltaic thermal systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 728–742.
- [15] ALAHMER A, AJIB S. Solar cooling technologies: State of art and perspectives [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 214: 112896.
- [16] BAGHERI B S, SHIRMOHAMMADI R, MAHMOUDI S M S, et al. Optimization and comprehensive exergy-based analyses of a parallel flow double-effect water-lithium bromide absorption refrigeration system [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 152: 643–653.
- [17] XU Z Y, WANG R Z. Absorption refrigeration cycles: Categorized based on the cycle construction [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 62: 114–136.
- [18] XU Z Y, WANG R Z, XIA Z Z. A novel variable effect LiBr-water absorption refrigeration cycle [J]. Energy, 2013, 60: 457–463.
- [19] XU Z Y, WANG R Z. Comparison of CPC driven solar absorption cooling systems with single, double and variable effect absorption chillers [J]. Solar Energy, 2017, 158: 511–519.
- [20] XU Z Y, WANG R Z. Experimental verification of the variable effect absorption refrigeration cycle [J]. Energy, 2014, 77: 703–709.
- [21] 林立, 熊锋, 郑文杰, 等. 低压发生器进出口温差对 AGX 变效循环性能的影响 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 167–175. (LIN Li, XIONG Feng, ZHENG Wenjie, et al. Effects of temperature difference between low pressure generator inlet and outlet on performance of agx variable effect absorption chiller [J]. Acta Energiae Solaris

Sinica, 2020, 41(11): 167–175.)

[22] CELIK N, TURGUT E. Design analysis of an experimental jet impingement study by using Taguchi method[J]. Heat and Mass Transfer, 2012, 48(8): 1407–1413.

[23] CANBOLAT A S, BADEMLIOGLU A H, ARSLANOGLU N, et al. Performance optimization of absorption refrigeration systems using Taguchi, ANOVA and Grey Relational Analysis methods [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 874–885.

[24] VERMA V, MURUGESAN K. Optimization of solar assisted ground source heat pump system for space heating application by Taguchi method and utility concept[J]. Ener-

gy and Buildings, 2014, 82: 296–309.

通信作者简介

王德昌,男,教授,青岛大学机电工程学院,0532 –85952229, E-mail: wdechang@163.com。研究方向:吸收式制冷技术,热泵干燥技术,换热器性能研究

About the corresponding author

Wang Dechang, male, professor, School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, +86 532-85952229, E-mail: wdechang@163.com. Research fields: absorption refrigeration technology, heat pump drying technology, performance of heat exchanger.

(上接第 136 页)

[20] COMSTOCK M C, BRAUN J E. Development of analysis tools for the evaluation of fault detection and diagnostics for chillers[J]. ASHRAE, 1999.

[21] FAN Yuqiang, CUI Xiaoyu, HAN Han, et al. Chiller fault diagnosis with field sensors using the technology of imbalanced data[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113933.

通信作者简介

韩华,女,副教授,上海理工大学能源与动力工程学院,

13611880360, E-mail: happier_han@126.com。研究方向:制冷空调新技术及故障诊断、能源利用及强化换热。

About the corresponding author

Han Hua, female, associate professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13611880360, E-mail: happier_han@126.com. Research fields: new technology and fault detection and diagnosis (FDD) for HVAC&R systems, energy utilization and heat transfer enhancement.