

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-854-05

# 小型烟气-热水型 溴化锂吸收式制冷机组试验研究

范峻铭<sup>1,2</sup> 蒋鹏<sup>1,2</sup> 余健亭<sup>1,2</sup> 杨光<sup>1,2</sup> 孟伟<sup>1,2</sup> 李璐伶<sup>1,2</sup>

(1. 深圳市燃气输配及高效利用工程技术研究中心 深圳 518049;

2. 深圳市燃气集团股份有限公司 深圳 518049)

**【摘要】** 探究适合于匹配小型分布式能源的烟气-热水型溴化锂吸收式制冷机组可降低设备初投资及拓展应用场景, 选取某国产 130kW 烟气-热水型吸收式溴化锂制冷机组为研究对象, 通过搭建与之匹配的试验台, 测试了该机组冷冻水出口温度和冷却水进口温度对制冷量的影响, 并测试了余热烟气进出口温度和热水温度、冷冻水进出口温度、吸收机制冷量、高低发温度随时间的变化规律。研究表明, 冷冻水出口温度每升高 1℃, 制冷量提升 3-4%, 冷却水进口温度每增加 2℃, 制冷量降低 2-6%。烟气进吸收机温度在 280-440℃ 之间变化, 出口烟气温度维持在 65℃。冷剂泵开启后 (约吸收机启动 20min), 高压和低发溶液出口温度随时间逐步升高, 分别稳定在 108℃ 和 57℃, 冷冻水进出口温度维持在 15/10℃ 左右。吸收机制冷量维持在 100-115kW。误差分析得到制冷量和冷冻水出口温度误差分别为 8.6% 和 0.5%, 显示了较高的准确度。

**【关键词】** 小型分布式能源系统; 双效余热吸收式; 溴化锂制冷机组; 性能测试

中图分类号 TK29 文献标识码 A

## Performance Assessment of an Exhaust-gas-and-hot-water-driven Absorption Chiller

Fan Junming<sup>1,2</sup> Jiang Peng<sup>1,2</sup> Yu Jianting<sup>1,2</sup> Yang Guang<sup>1,2</sup> Meng Wei<sup>1,2</sup> Li Luling<sup>1,2</sup>

(1. Shenzhen Engineering Research Centre for Gas Distribution and Efficient Utilization, Shenzhen, 518049;

2. Shenzhen Gas Co., Ltd, Shenzhen, 518049)

**【Abstract】** To explore the exhaust-gas-and-hot-water-driven absorption chiller suitable for matching small distributed energy sources, it can reduce the initial investment of equipment and expand the application scenarios. This paper selects a domestic 130kW double-effect waste heat absorption type lithium bromide refrigeration unit as the research object. By building a matching test bench, the effects of the chilled water outlet temperature and cooling water inlet temperature of the unit on the cooling capacity of the chiller was conducted. Besides, the inlet and outlet temperatures of the flue gas, the temperature of the hot water, the inlet and outlet temperatures of the chilled water, and the cooling of the absorption machine were tested as time changes. Moreover, temperatures of solution from high pressure generator and low pressure generator were recorded with time, respectively. Results showed that for every 1℃ increase in the chilled water outlet temperature, the cooling capacity increased by 3-4%, and for every 2℃ increase in the cooling water inlet temperature, the cooling capacity decreased by 2-6%. The temperature of the flue gas entering the chiller varied between 280-440℃, and the temperature of the flue gas at the outlet was maintained at 65℃. After the refrigerant pump was turned on (about 20 minutes after the chiller was started), the outlet temperatures of the high-pressure and low

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB4001605); 中国博士后科学基金资助项目 (2021M692220, 2021M702289)

作者简介: 范峻铭 (1989.05-), 男, 博士, E-mail: junmingfan@hotmail.com

通讯作者: 蒋鹏 (1991.01-), 男, 博士, 高级工程师, E-mail: jiangpeng02@sngas.com.cn

收稿日期: 2022-04-20

pressure solutions gradually increase with time, and were stable at 108 °C and 57 °C, respectively, and the inlet and outlet temperatures of the chilled water were maintained at about 15/10 °C. The cooling capacity of the absorption machine remained at 100-115kW. Based on the error analysis, the errors of  $Q$  and  $T_{out}$  were 8.6% and 0.5%, respectively, indicating the testing results have a good accuracy.

**【Keywords】** Small distributed energy system; Double-effect waste heat absorption; Lithium bromide refrigeration unit; Performance test

### 0 引言

吸收式制冷是以热能为驱动能量来推动制冷循环产生冷量。H<sub>2</sub>O/LiBr 是吸收式制冷工质对中最为广泛的, 其利用蒸发热较高的水做制冷剂, 具有良好的系统性能和环境友好性<sup>[1]</sup>。与传统的蒸汽压缩式制冷系统相比, 溴化锂吸收式制冷具有耗电量少、热动力要求低、环境效益好、运行安静、制造工艺简单、经济性能好和变负荷性能优越等特点。烟气热水型溴化锂机组指回收燃气内燃机或燃机轮机排出的烟气和缸套热水的余热进行制冷的装置, 以实现能量的梯级利用, 在分布式能源项目中应用较多<sup>[2,3]</sup>。

国内外对溴化锂机组的研究主要集中在系统仿真及优化<sup>[1-4]</sup>、单效或复合溴化锂机组的关键部件、实验及参数分析<sup>[5,6]</sup>、以及溴化锂机组与其他能源如太阳能、合成气等系统的耦合过程<sup>[7,8]</sup>。一般而言, 适用于匹配大型燃气冷热电三联产系统的余热吸收式溴化锂制冷机组均在 MW 级以上。然而大型天然气冷热电分布式能源系统具有初次投资大经济效益较差、使用场景受限等原因<sup>[9]</sup>。因此开发小型的天然气冷热电分布式能源系统具有重要意义, 然而国内外文献对于小型溴化锂制冷机组的性能及其性能提升潜力报道较少。本文旨在探究及测试适配于匹配小型分布式能源系统的烟气-热水型溴化锂吸收式制冷机组性能。

### 1 测试机组描述

本文所采用的是国内某厂家生产的烟气热水型吸收式制冷机组, 其制冷工艺流程如图 1 所示, 与之对应的制冷循环焓-溴化锂浓度图如图 2 所示。余热制冷循环包括溴化锂溶液循环回路和冷剂蒸汽循环回路。溴化锂溶液循环回路由溶液泵 1 将溴化锂溶液抽出开始, 依次经历状态点 2→7→14→15→10→12→13→4→8, 状态点 8 的溴化锂浓溶液在吸收器内吸收冷剂蒸汽后, 变成状态点 2 的稀溶

液, 完成循环。在冷剂循环回路中, 高压发生器产生的蒸汽 3'''', 在低压发生器内冷却至 3'', 然后进入冷凝器中冷却至 3。同时, 低压发生器产生的蒸汽 3'''' 和 3', 经过冷凝器冷却至 3。状态点 3 的制冷剂经 U 型节流后进入蒸发器换热后至状态点 1', 完成循环。

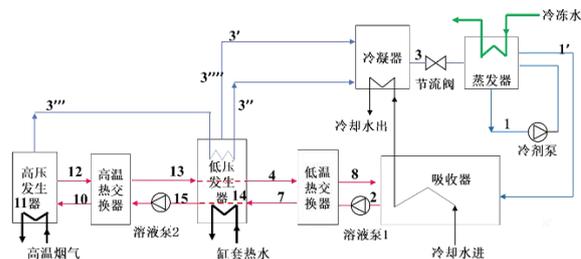


图 1 烟气热水型吸收式制冷机组工艺流程

Fig.1 Process diagram of exhaust-gas-and-hot-water-driven absorption chiller

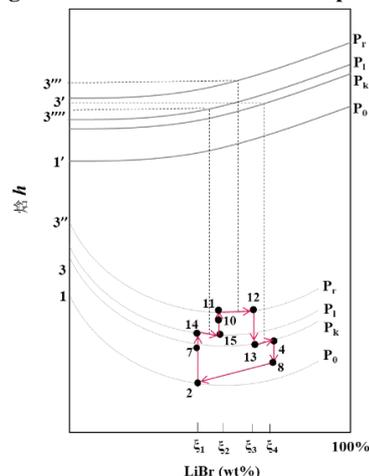


图 2 烟气热水型制冷循环焓-溴化锂浓度图

Fig.2 H-LiBr(wt%) diagram of exhaust-gas-and-hot-water-driven absorption chiller

试验所采用的国产小型烟气-热水型吸收式制冷机组, 其三维模型图如图 3 所示, 机组的基本参数见表 1。由表 1 可知, 机组长宽高分别为 3.09m×2.02m×2.83m, 机组设计制冷量为 130kW, 蒸发压力为 0.9kPa, 由水的气液平衡可知, 在该温度下,

水的饱和温度仅为 5.5℃。溴化锂稀溶液浓度为 56%，其放气范围为 4-5%。溴化锂溶液中加入钼酸锂可有效防止对管道的腐蚀。机组冷冻水的进出口温度为 12℃ 和 7℃，冷却水进出口温度设计值为 32℃ 和 37℃。高压发生器所需的烟气进出口温度为 543℃ 和 100℃，低压发生器所需的缸套热水进出口温度分别为 85℃ 和 80℃。

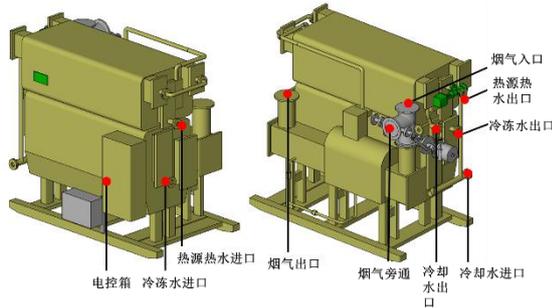


图 3 烟气热水型吸收式制冷机组三维建模图

Fig.3 3D diagram of exhaust-gas-and-hot-water-driven absorption chiller

表 1 制冷机组设计参数

Table 1 Design parameter of the chiller

项目	单位	数值	
制冷量	kW	130	
	10 <sup>4</sup> kcal/h	12	
溴化锂稀浓度	%	56	
放气范围	%	4-5	
蒸发温度	℃	5	
蒸发压力	kPa	0.9	
冷水	进出口温度	℃	12/7
	流量	m <sup>3</sup> /h	20
	冷水温度范围	℃	5-10
	接管直径	mm	65
冷却水	进出口温度	℃	32/37
	流量	m <sup>3</sup> /h	47
	冷却水进口温度	℃	18-34
余热烟气	接管直径	mm	80
	进出口温度	℃	543/100
	流量	m <sup>3</sup> /h	550.27
缸套热水	烟气进出口尺寸	mm	250
	进出口温度	℃	85/80
	流量	m <sup>3</sup> /h	10.3
	压力降	mH <sub>2</sub> O	10
外形	接管直径	mm	40
	功率容量	kW	5.8
	长度	mm	3290
外形	宽度	mm	2020
	高度	mm	2830

吸收式制冷机组 COP 的定义式为<sup>[10]</sup>:

$$COP = \frac{Q}{Q_{Flue} + Q_{Jacket}} \quad (1)$$

$$Q = mC_p(T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

式中： $Q$  为总制冷量，kW； $Q_{Flue}$  和  $Q_{Jacket}$  分别为烟气和缸套热水所提供的热量，kW。 $m$  为质量流量，kg/h； $C_p$  为定压比热容，kJ/kg·K； $T_{in}$  和  $T_{out}$  分别为冷冻水进口和出口温度，℃。

依据上述性能参数 COP 的定义式，该烟气热水型制冷机组的 COP 设计值为 1.06。

## 2 机组性能测试

为了测试该机组的性能表现，搭建的试验台如图 4 所示。试验的冷却水通过冷塔进行换热降温，冷冻水的循环经过冷量消耗换热器进行升温。该机组出口的冷却水先后经过温度传感器（T4）、球阀（V2）进入冷塔，冷塔出口的冷却水经过变频水泵（P2）、流量计（F2）进入机组进行换热。同时，出口的冷冻水先后经过温度传感器（T2）、球阀（V1）进入冷量消耗换热器进行升温，经由变频水泵（P1）、流量计（F1）返回机组。制冷机组所需的高温烟气和缸套热水由一台 90kW 的燃气内燃机提供。每隔 1min 记录该机组冷却水温度、冷冻水温度、制冷量、高低发温度、烟气和热水温度等参数。

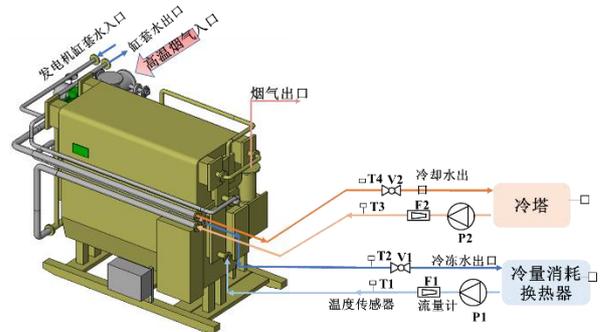


图 4 烟气吸收式制冷测试示意图

Fig.4 Testing diagram of exhaust-gas-and-hot-water-driven absorption chiller

## 3 结果与分析

考察改变外部条件，包括冷冻水出口温度和冷

却水进水温度, 测试机组的制冷量的相对变化情况, 如图 5 所示。测试条件的基准条件为: 冷冻水出口温度 7℃, 冷却水进口温度在 32℃。如图可知, 在其他参数不变的情况下, 随着冷冻水出口温度增加, 制冷量呈现上升趋势, 冷冻水出口温度每升高 1℃, 制冷量提升 3-4%。冷冻水温度升高, 蒸发温度升高, 则蒸发压力升高, 吸收机吸收能力提高, 放气范围增加, 故制冷量提高。在同一冷冻温度下, 随着冷却水进口温度的增加, 制冷量降低。如图所示, 当冷却水进口温度每增加 2℃, 制冷量降低 2-6%。冷却水温度增加, 稀溶液的冷却温度增加, 则溴化锂稀溶液的质量分数升高, 吸收能力降低, 故制冷量下降。综上所述, 为获得较高制冷量, 可提高冷冻水出口温度和降低冷却水进水温度。然而, 冷却水温度过低会使溴化锂浓溶液质量过高, 引起结晶风险或冷却水污染等温度。可设置机组冷却水最低进口温度, 以防止结晶。

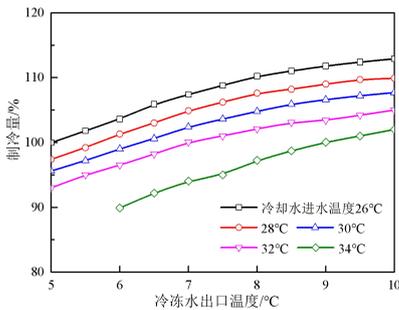


图 5 制冷量与冷冻水出口温度、冷却水进口温度关系  
Fig.5 Effect of chilled water temperature and cooling water temperature on cooling capacity

图 6 显示了测试过程中吸收机进出口烟气温度、热水出口温度和热水三通阀开度随时间的变化。烟气和热水由燃气发动机提供。在测试区间范围内, 烟气进吸收机温度在 280-440℃之间变化, 经过高压发生器换热后, 出口烟气温度维持在 65℃。此外, 热水进水温度在 71-80℃之间, 在 20min 左右出现波动。热水三通阀初始开度在 100%, 即表示热水完全进入吸收机低压发生器换热。在 20min 前, 由于吸收机处于预热状态, 无制冷功能, 因此热水三通阀全开的情况下, 热水进口温度变化不大。当 20min 后, 吸收机开启制冷剂循环泵, 由于在低温发生器内, 热水与溴化锂稀溶液换热后, 引起热水出口温度降低, 在发电机缸套中加热后, 温度亦降低为了维持热水进入吸收机的温

度, 此时逐步关闭热水三通阀, 使进入吸收机的热水流量降低, 由图可知, 最终热水三通阀开度由 100%逐步降低维持在 30%, 热水进口温度维持在 75℃, 可保持系统的稳定运行。

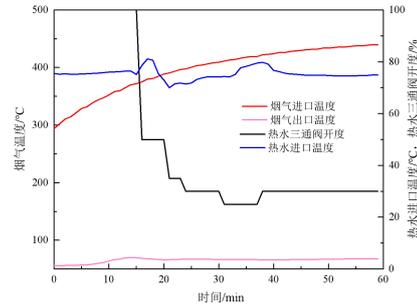


图 6 烟气温度、热水进口温度和三通阀开度变化  
Fig.6 Variation of flue gas temperature, hot water temperature and triple value opening

图 7 显示了吸收机冷冻水进出口温度、吸收机制冷量与测试时间的变化。在测试前 20min 左右, 吸收机未开启制冷剂循环泵, 无制冷功能, 此时冷冻水进出口温度维持在 15℃。当冷剂泵开启后, 冷冻水出口温度迅速降低至 10℃左右, 经过出口冷量消耗换热器后, 冷水回水温度控制在 15℃。同时, 吸收机制冷量在 2min 内由 0 急速升高至 100kW, 并维持在 100-115kW。测试所得吸收机的制冷量小于设计制冷量的主要原因在于: (1) 吸收机热源烟气温度未达设计值 (543℃); (2) 吸收机热源热水进口温度仅为 75℃, 低于设计值 (85℃), 并且热水流量仅为设计值的 30%。因此, 虽然冷冻水出口温度高于设计值, 有利于制冷量的提升, 但由于吸收机整体供热不足, 因此总体实际制冷量与设计制冷量存在差距。

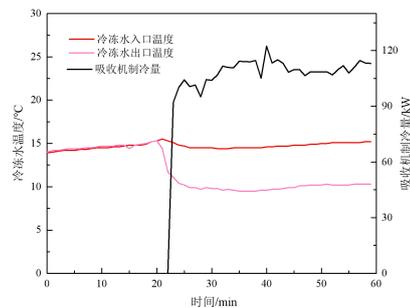


图 7 吸收机冷冻水进出口温度、制冷量变化  
Fig.7 Variation of chilled water temperature and cooling capacity

吸收机高发温度和低发温度随测试时间的变

化如图 8 所示。在前 20min 内, 高压发生器出口溶液温度随时间逐步升高, 由 72℃ 逐步上升至 108℃, 吸收机低温发生器出口溶液温度基本不变, 维持在 30℃ 左右。这主要是因为高压发生器中高温烟气加热溴化锂溶液, 使溶液出口温度升高。由于吸收机未开启冷剂泵, 因此流经低压发生器的出口溶液无蒸汽换热, 故低发温度温度不变。当超过 20min 后, 由于烟气温度不变, 故高压发生器内的溴化锂溶液处于气液平衡状态, 故温度基本不变。冷剂泵开启后, 低压发生器内溶液与高发产生的蒸汽及燃气机缸套热水换热后, 温度升高, 最终稳定维持在 57℃。

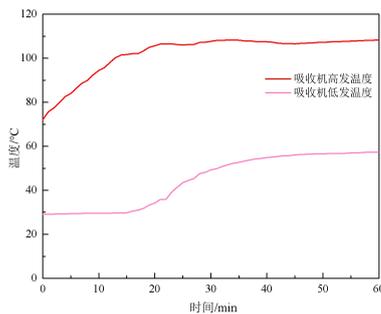


图 8 吸收机冷冻水高低发温度随时间变化

Fig.8 Variation of high and low temperatures of solution from HP and LP generators

#### 4 误差分析

在小型烟气热水型吸收式制冷机组测试中, 反映性能特征的参数主要有制冷量 ( $Q$ ) 和冷冻水出口温度 ( $T_{out}$ )。其中,  $T_{out}$  为直接测量量,  $Q_c$  为间接测量量, 其误差可由相关直接测量量通过误差传播定律获得。由式 (2) 可知, 制冷量  $Q$  为  $m$  和  $\Delta T$  的函数 ( $\Delta T = T_{in} - T_{out}$ ), 故满足:

$$Q = f(m, \Delta T) \quad (3)$$

制冷量  $Q$  的误差计算表达式为:

$$e_Q = \sqrt{e_m^2 + e_{\Delta T}^2} \quad (4)$$

在式 (4) 中,  $e_m$  为冷冻水流量计的测量误差, 选用的流量计误差为  $\pm 0.5\%$ , 即  $e_m = 0.5\%$ ;  $e_{\Delta T}$  为吸收机进口温度和出口温度的差值, 选用的铂电阻温度计 PT100 的精度为  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , 由图 7 可知,  $\Delta T$  最小值为  $4.6^\circ\text{C}$ , 由误差传递理论可知,  $e_{\Delta T}$  最大值为  $e_{\Delta T} = 0.4/4.6 = 8.6\%$ 。因此,  $e_Q$  为  $8.6\%$ , 小于  $10\%$ 。综合可知, 测试所得指标参数误差均小于  $10\%$ , 准

确度较高。

#### 5 结论

选取适合于匹配小型分布式能源系统的烟气热水型吸收式制冷机组为研究对象, 通过搭建与之匹配的试验台, 测试了各个参数随时间的变化规律, 结果表明:

(1) 随着冷冻水出口温度增加, 制冷量呈现上升趋势, 冷冻水出口温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , 制冷量提升  $3\sim 4\%$ 。在同一冷冻温度下, 随着冷却水进口温度的增加, 制冷量降低, 当冷却水进口温度每增加  $2^\circ\text{C}$ , 制冷量降低  $2\sim 6\%$ 。

(2) 余热烟气进吸收机温度在  $280\sim 440^\circ\text{C}$  之间变化, 经过高压发生器换热后, 出口烟气温度维持在  $65^\circ\text{C}$ 。在 20min 前, 由于吸收机处于预热状态, 无制冷功能。热水三通阀开度维持在  $30\%$ , 可保持系统的稳定运行。

(3) 当冷剂泵开启后, 高压和低发溶液出口温度随时间逐步升高, 分别稳定在  $108^\circ\text{C}$  和  $57^\circ\text{C}$ 。当冷剂泵开启后 (20min 后), 冷冻水进出口温度维持在  $15/10^\circ\text{C}$  左右。同时, 吸收机制冷量急速升高至  $100\text{kW}$ , 并维持在  $100\sim 115\text{kW}$ 。

(4) 机组性能参数  $Q$  和  $T_{out}$  的测量误差分别为  $8.6\%$  和  $0.5\%$ , 显示了测试结果较高的准确度。

#### 参考文献:

- [1] 谢娜, 韩高岩, 吕洪坤, 等. 烟气热水型溴化锂吸收式制冷机组的仿真及性能分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(4):40-45.
- [2] 张庆福, 毕连文. 浅谈天然气分布式能源站设备的选择[J]. 中国设备工程, 2018, (14):149-151.
- [3] 王虹雅, 周勃, 黄诗雯, 等. 双效溴化锂吸收式热泵余热回收系统数值模拟研究[J]. 制冷与空调, 2021, 35(1):32-36.
- [4] T Halon, E Pelinska-Olko, M Szyc, et al. Predicting performance of a district heat powered adsorption chiller by means of an artificial neural network[J]. Energies (Basel), 2019, 12(17):3328.
- [5] 杨磊, 李华山, 陆振能, 等. 溴化锂吸收式制冷技术研究进展[J]. 新能源进展, 2019, 7(6):532-541.
- [6] M Puig-Arnau, J López-Villada, JC Bruno, et al. Analysis and parameter identification for characteristic equations of single- and double-effect absorption chillers by means of multivariable regression[J]. Int. J. Refrig.,

2010,33(1):70-78.

(下转第 923 页)