

回热型氨-水-溴化锂吸收式制冷机的实验研究

刘科伟, 吴裕远, 程玉龙, 吴铁晖, 吴红林
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了改进无回热器的氨-水-溴化锂吸收式制冷机实验样机的性能,对具有回热器的吸收式制冷机实验样机的性能进行了实验研究. 实验中对4组溶液进行了测试,其中 NH_3 的质量分数均为50%,LiBr的质量分数分别为0%、15%、30%和38%. 实验结果表明,加入LiBr之后,发生器压力明显降低,而且随着LiBr浓度的增大,相同温度下发生器压力也越来越小. 初步实验还表明,采用回热器后,实验样机系统的性能系数从无回热器的0.280提高到了0.457,说明该实验样机系统的原理可指导工业应用,但与现有的工业化产品的性能相比还有待于进一步改进.

关键词: 氨-水-溴化锂;回热器;发生器压力;性能系数

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0038-04

Experiment on an $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O-LiBr}$ Absorption Chiller with Heat-Regenerators

LIU Kewei, WU Yuyuan, CHENG Yulong, WU Tiehui, WU Honglin
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Experimental tests were carried out on the performance of a prototype $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O-LiBr}$ absorption chiller with two heat regenerators to improve that of the same type of the chiller without any regenerator. Four groups of solutions with different compositions were tested in the experiments, i. e., all 50% of NH_3 concentration, and 0%, 15%, 30% and 38% of LiBr concentration, respectively. The results show that the pressure in the generator decreased significantly after adding LiBr to the system. The pressure in the generator declined with the increase in LiBr concentration at the same temperature. Moreover, the coefficient of performance of the system with regenerators increased from 0.280 (for the system without regenerators) to 0.457. It seems that the principle of the prototype system could be applied in industrial products although it should be improved further.

Keywords: ammonia-water-lithium bromide; regenerator; pressure of generator; coefficient of performance

臭氧层的破坏和全球气温的上升,是当前全球环境面临的主要问题. 由于制冷、空调和热泵行业广泛采用的氯氟烃(CFC)和氢氯氟烃(HCFC)类物质对臭氧层有破坏作用并会产生温室效应,所以近年来制冷空调行业正寻找和研究替代制冷剂,同时大力发展具有节能环保功效的吸收式制冷机,其研究的热点集中在氨水吸收式制冷机和溴化锂水吸收式

制冷机. 对于氨水系统,优点是:氨具有优良的热力效率和较高的传热系数,运行环境和管理经验非常成熟,成本低廉,可以达到比较低的制冷温度. 缺点是:氨具有一定的毒性并且要求系统在高压下运行,因此对设备的密封性和强度要求比较高;在发生过程中氨蒸气中存在大量的水蒸气,这需要加设精馏设备. 国外有一些关于氨水吸收式制冷系统的报道,

即在制冷温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,制冷系数比在 $0.34\sim 0.55$ 之间^[1].对于溴化锂系统,优点是:制冷剂为水,对环境友好,无污染;系统在低压或者真空状态下运行,无爆炸危险.缺点是:溴化锂溶液对普通碳钢腐蚀性较强;对气密性要求较高;达不到较低的制冷温度.目前,直燃型溴化锂冷热水机组的制冷系数约为 0.75 ^[2].

本课题组陈燕等人的研究工作表明,在氨水系统中添加溴化锂可以大大减小溶液的气液平衡压力,三元溶液气液平衡压力可以降低 $30\%\sim 50\%$,气相中水蒸气的含量(质量分数)最低可降低到 2.5% .同时,应用溶剂化模型,从理论上分析了由于 $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 分子与电离出来的阴阳离子 Br^- 、 Li^+ 的结合,从而影响气相中各成分的含量,进而导致相平衡压力和水蒸气含量降低的问题^[3].何树青等人从理论上分析了无回热器和有回热器无溶液泵的氨水吸收式制冷空调系统的性能,指出了溶液存留系数和制冷剂含水率的变化对系统性能系数的影响因素^[4-5].禹志强等人搭建了无溶液泵的氨水吸收式制冷机实验台,通过实验对比了氨-水和氨-水-溴化锂吸收式制冷机的性能.结果表明,在相同温度条件下,氨水溶液中加入溴化锂可以大大降低发生器压力,提高系统的性能^[6].

本文实验是在上述研究的基础上,为了进一步改进无回热器的氨-水-溴化锂吸收式制冷机实验样机的性能,设计和建立了比较实用的回热型无泵吸收式制冷机样机,进一步验证了三元工质在吸收式制冷机中的应用前景.

1 实验系统的设计和实验过程

1.1 实验参数

因缺乏三元工质的物性参数,故本文实验的设计计算是应用浓度(质量分数)为 50% 的氨水混合物的物性参数,如表 1 所示.

1.2 实验装置

实验系统主要包括无溶液泵吸收式制冷机、模

表 1 回热型无泵吸收式制冷机的设计参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
制冷量/kW	1.50	加热量/kW	3.71
冷凝压力/MPa	1.51	蒸发压力/MPa	0.52
浓溶液氨浓度/%	50	稀溶液氨浓度/%	46
冷凝温度/ $^{\circ}\text{C}$	39	蒸发温度/ $^{\circ}\text{C}$	5
回热器终温/ $^{\circ}\text{C}$	45	制冷系数	0.40

拟热源系统、冷却水系统、数据采集系统以及抽真空设备、充氨设备.考虑到氨的毒性和可燃性,整个系统的换热管和主要部件均使用 304 不锈钢.考虑到泄露的问题,实验采用气体压差和阀门来控制溶液、冷剂的流动.实验系统的承压部件严格按照《压力容器设计手册》进行设计,并留有足量的设计余度,以保证设备安全、可靠.

(1)制冷机罐体.制冷机罐体包括发生器、冷凝器、吸收器和 2 个回热器.罐体换热均采用管壳式换热,内部换热管均采用不锈钢盘管.蒸发器采用套管式换热,即在一根大管径塑料管中套用一根小管径换热管,冷剂在换热管内流动,冷媒水在管间流动,蒸发方式为一次性干式蒸发.

(2)模拟热源系统.系统的热源温度为 $92\text{ }^{\circ}\text{C}$.采用 3 个电加热器模拟热源系统,其中的两个稳定运行并用来生产热水,另一个用来调节水温.

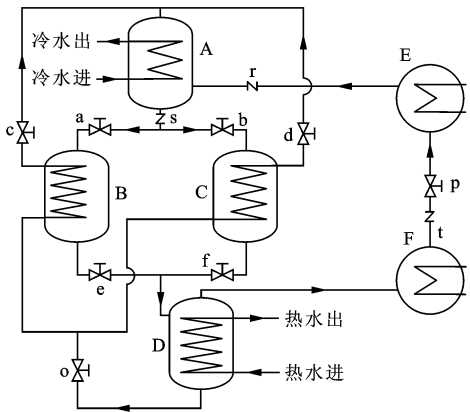
(3)数据采集系统.采用铜-康铜热电偶作为感温元件,并针对实验所达到的温度范围进行标定.压力测量采用 DBKY 系列扩散硅压力变送器,精度等级为量程的 $\pm 0.5\%$,测量范围为 $0\sim 2.5\text{ MPa}$.

1.3 实验过程

实验系统如图 1 所示.假定第 1 组三元溶液 I 已经存在于发生器 D 中,第 2 组三元溶液 II 存在于回热器 C 中.

(1)第一次发生和冷凝过程.关闭截止阀 $a\sim f$ 和节流阀 o,p ,加热 D 中的溶液 I,系统发生出来的氨气和水蒸气(少量)混合气体进入冷凝器 F 中,再经冷却水冷凝至过冷态,并暂存于 F 中.随着发生过程的不断进行,发生压力逐渐上升,直至达到稳定值,此时 D 中溶液浓度下降到设计浓度值.

(2)第一次蒸发和吸收过程.打开 o,d,a,p ,冷



$a\sim f$:截止阀; o,p :节流阀; $r\sim t$:止回阀;A:吸收器;B:回热器 1;C:回热器 2;D:发生器;E:蒸发器;F:冷凝器

图 1 无泵回热型吸收式制冷系统示意图

剂通过 p 节流后进入蒸发器 E 中,并与冷媒水换热实现制冷.稀溶液经过 o 与回热器 C 中溶液 II 进行换热,加热回热器中的溶液,但稀溶液自身温度降低;稀溶液再经过 d 流入吸收器 A,吸收来自蒸发器的制冷剂蒸气,当稀溶液浓度升高后流入回热器 B 中.

(3)溶液 II 回流过程.关闭 o、d、a、p,打开 f,使得回热过的溶液 II 流入 D 中.

(4)第二次发生和冷凝过程.关闭 f,加热 D 中的溶液 II,系统发生出来的制冷剂蒸气进入冷凝器 F 中,再经冷却水冷凝暂存于冷凝器中,直至冷凝结束.

(5)第二次蒸发和吸收过程.打开 o、c、b、p,制冷剂通过 p、E 后进入 A 中.稀溶液经过 o 与 B 中溶液 I 进行换热,再经过 c 流入 A,吸收来自蒸发器的制冷剂蒸气,当稀溶液浓度升高后流入 C 中.

(6)溶液 I 回流过程.关闭 o、c、b、p,打开 e,使得回热过的溶液 I 流入 D 中.如此周而复始,从而实现无泵系统的周期循环.

与常规的吸收式系统相比较,本系统采用双回热器结构,既省去了运转部件溶液泵,又增加了回热效果,从而大大提高了三元工质的制冷系数值.两组工质中的一组在循环制冷,另一组则在回热器里被向上流动的稀溶液加热.当第一组工质完全回流到回热器时,被加热过的第二组工质流入发生器,进行下一次循环.

2 实验方法

本文分别对 4 组溶液进行了实验,其中的参照溶液是质量分数为 50% 的氨水溶液,其他 3 组溶液氨的质量分数为 50%,溴化锂浓度以此追加.

首先配制两份所需浓度的实验溶液,待系统抽真空后靠负压将第一份溶液吸入发生器中,断开发生器与其他管路、容器的连接,通热水加热发生器.在发生过程中,随着溶液温度的上升,采集发生温度和压力,采集热水的进出口温度和热水流量,计算加热量,直到溶液温度达到设定值,然后打开发生器与冷凝器之间的阀门进行冷凝、蒸发和吸收.记录冷媒水的进出口温度、流量和蒸发温度,计算制冷量,直到发生压力和吸收压力平衡.它标志着蒸发制冷和吸收过程结束.

待吸收器里的溶液完全流入回热器,关闭回热器与吸收器之间的阀门,使得回热器与其他管路、容器断开.对系统进行抽真空处理,之后依靠负压将第二份同配比的溶液吸入发生器之中,就此类似地进行第二份溶液的实验.

待两份溶液实验完毕,再配制两份溶液进行第二组实验,实验步骤参照第一组实验进行.

根据测试所得的发生压力、加热量、制冷量计算系统的性能系数.

3 实验结果及讨论

在实验中, NH_3 和 LiBr 的质量分数均以 H_2O 的质量作参照,其定义如下

$$w(\text{NH}_3) = \frac{m(\text{NH}_3)}{m(\text{NH}_3) + m(\text{H}_2\text{O})} \quad (1)$$

$$w(\text{LiBr}) = \frac{m(\text{LiBr})}{m(\text{LiBr}) + m(\text{H}_2\text{O})} \quad (2)$$

3.1 发生过程的温度压力关系

本实验的主要目的是对照文献[7]中的数据,讨论氨水溴化锂溶液在吸收式制冷机中的发生特性和制冷系数.由图 2 可以看到,氨水溶液及氨-水-溴化锂溶液在发生过程中的发生压力随发生温度的升高而升高,几种溶液的温度压力关系的变化趋势基本一致,但三元溶液的压力明显低于相同氨含量的二元氨水溶液的压力.随着 LiBr 浓度的不断增大,同温度下系统的发生压力不断降低,在 LiBr 浓度(质量分数)为 15% 至 30% 之间下降得尤为迅速.对比氨水溶液和溴化锂质量分数为 38% 的氨-水-溴化锂三元溶液,发生压力的降幅最大可以达到 42.3%.这说明,溴化锂的加入可以明显降低氨水溶液的相平衡压力,这一作用随着溴化锂浓度的增加而加强.

3.2 溴化锂对氨水吸收式制冷系统性能系数的影响

如表 2 所示,对于氨的质量分数为 50% 的氨水吸收式制冷系统,实验所得制冷系数为 0.378,与设计值 0.40 接近.随着溴化锂的加入,制冷系统的性能系数值有了大幅度的提高,其中氨质量分数为 50%、溴化锂质量分数为 15% 的溶液的性能系数增幅最大,达到 17.3%.由此可以说明,并不是加入的溴化锂量越多,系统的性能就越好.原因是,加入溴

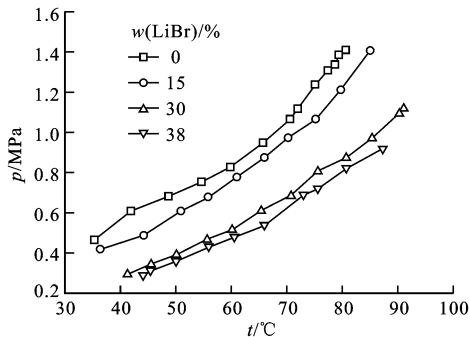


图 2 $w(\text{NH}_3)$ 为 50% 时系统发生过程温度压力关系随 LiBr 浓度变化的曲线

表 2 回热型吸收式制冷机性能系数

$w(\text{LiBr})/\%$	0	15	30	38
热水流量/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	72.0	72.0	72.0	72.0
冷媒水流量/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	50.5	50.5	50.5	50.5
总加热负荷/W	4 736.2	5 779.1	5 889.7	5 657.0
总制冷量/kW	1 789.8	2 639.9	2 673.4	2 542.3
制冷系数	0.378	0.457	0.454	0.449
制冷系数增幅/ $\%$	0.0	17.3	16.7	15.9

化锂之后,虽然对水蒸气有强烈的吸收作用,但是对于氨气也有一定的吸收作用.随着溴化锂浓度的增大,氨制冷剂越来越少,制冷效果也会越来越差.

3.3 回热与无回热型系统的比较

根据文献[7]数据,无回热无溶液泵吸收式制冷机的测试及计算数据如表 3 所示.

表 3 无回热吸收式制冷机测试及计算数据

$w(\text{LiBr})/\%$	0	15	30	38
热水流量/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	70.8	70.8	70.8	70.8
冷媒水流量/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	44.5	44.5	44.5	44.5
总加热负荷/kW	7 697.7	8 173.4	7 058.2	7 336.6
总制冷量/kW	2 035.0	2 258.0	1 978.5	1 873.8
制冷系数	0.264	0.276	0.280	0.255

比较表 2 和表 3 数据可知,对于同一种配比的二元及三元溶液,在制冷量差别不大的情况下有回热器系统的加热热量大幅减小,从而使得整个有回热器的系统性能大幅提高,最大可以提高 75.96%.两种系统的性能对比如图 3 所示.

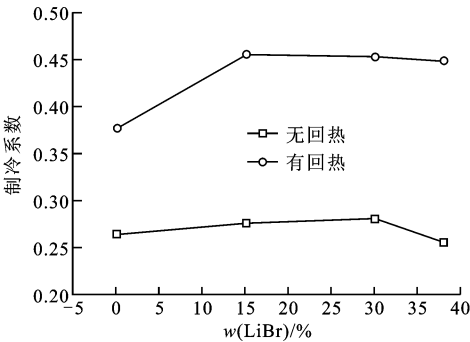


图 3 制冷系数随 LiBr 浓度的变化曲线

4 结 论

(1)实验研究表明,在回热型无泵吸收式制冷机中加入溴化锂之后,可以大大降低发生过程中的发生压力,有利于系统的安全运行,减少了设备耗材,

降低了投资.

(2)加入回热器之后,会使得系统的性能明显提高,有利于能量的回收和利用.

(3)由于溴化锂对水具有强烈的吸收作用,所以可以有效降低氨水工质对发生蒸气中水蒸气的含量,避免了实验系统中使用精馏设备.今后的工作,将是对回热型无泵吸收式制冷机的控制系统进行设计,以期尽早实用化.

参考文献:

[1] 郑宋平. 氨水吸收式制冷循环的理论与实验研究 [D]. 北京:北京化工大学化学工程系,2004.

[2] 戴永庆,耿惠彬,蔡小荣. 溴化锂吸收式制冷技术的回顾与展望 [J]. 制冷技术, 2001(1):21-24.

DAI Yongqing, GENG Huibin, CAI Xiaorong. Review and prospects of lithium bromide absorption refrigeration technology [J]. Refrigeration Technology, 2001(1):21-24.

[3] WU Yuyuan, CHEN Yan, WU Tiehui. Experimental researches on characteristics of vapor-liquid equilibrium of $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ system [J]. Int J Refrigeration, 2006,29(2):328-335.

[4] 何树青,吴铁辉,吴裕远,等. 新型无溶液泵氨水吸收式制冷空调系统及其性能分析 [J]. 西安交通大学学报, 2007,41(9):1062-1065.

HE Shuqing, WU Tiehui, WU Yuyuan, et al. Presentation and thermodynamic evaluation of a novel $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$ refrigeration system without distillation equipment and solution pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007,41(9):1062-1065.

[5] 王晶,吴裕远,吴铁辉,等. 回热无泵氨-水吸收式制冷系统的设计分析[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(2):314-317.

WANG Jing, WU Yuyuan, WU Tiehui, et al. Performance characteristics of heat-regenerative $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$ absorption refrigeration system without solution pump and distillation equipment [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009,43(2):314-317.

[6] 禹志强,吴铁辉,吴裕远,等. 氨-水和氨-水-溴化锂在吸收式制冷机中的对比实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009,43(3):46-49,69.

YU Zhiqiang, WU Tiehui, WU Yuyuan, et al. Experimental comparison between ammonia-water and ammonia-water-lithium bromide in absorption chiller [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009,43(3):46-49,69.

[7] 禹志强. 氨-水-溴化锂三元吸收式制冷系统运行性能实验研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2009.

(编辑 苗凌 王焕雪)