

文章编号:0253 – 4339(2014) 01 – 0001 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2014. 01. 005

一种根据热源温度品位自动调节效能的溴化锂吸收式制冷循环

徐震原 王如竹 夏再忠

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 针对一种提出的根据热源温度品位自动调节效能的新型溴化锂-水吸收式制冷循环进行了理论分析,该循环可以平滑调节系统 COP 和工作范围。循环在单效循环基础上加入一对中压蒸发/吸收器,中压蒸发器的冷量用于冷却进入系统的冷却水。这样降低了吸收器出口稀溶液的浓度,升高了被结晶特性限制的发生温度上限,也降低了循环截止发生温度。通过建立模型直观说明了循环的效率变化以及对循环工作范围的扩大。计算结果表明在 32℃ 和 40℃ 的冷却水温下,新的循环(0. n 效循环)可以分别将单效循环发生温度范围扩大 2 倍和 6 倍,同时保持 0.3 ~ 0.75 的 COP。

关键词 吸收式制冷;溴化锂/水;单效;多效;发生温度

中图分类号:TB651;TB61 + 6

文献标识码:A

Analysis of a 0. n-effect LiBr/Water Absorption Refrigeration Cycle

Xu Zhenyuan Wang Ruzhu Xia Zaizhong

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract A novel type of LiBr/water absorption refrigeration cycle with the self-adjustable effect between 0.5 and 1.0 (0. n) have been proposed and analyzed. A pair of medium pressure evaporator/absorber is added into the single effect cycle to form this novel cycle. Cooling water into the cycle is precooled by this evaporator. Precooling makes the solution concentration out of the absorber weaker, which lifts the highest generation temperature limited by crystallization and drops the generation starting temperature. Calculation is given based on several assumptions. Results show that 0. n-effect cycle has generation temperature ranges twice and six times larger than single effect cycle under cooling water temperature of 32℃ and 40℃ respectively. Meanwhile a COP of 0.3 ~ 0.75 is obtained.

Keywords absorption refrigeration; LiBr/water; single effect; multi effect; generation temperature

单效循环是最简单而且应用最广泛的吸收式制冷循环。采用溴化锂-水为工质对的吸收式制冷循环,可以在发生温度为 90℃ ~ 110℃ 之间运行并达到 0.75 的 COP。由于本身特性限制,其使用范围并不广泛,受驱动热源温度、冷却温度等条件限制。当采用风冷或冷却水温度过高时,为保证循环运行必须提高驱动温度,这时吸收器进口容易出现结晶现象;当热源温度过低时(如热源温度为 75℃ 时),热能品位又不足以使进入发生器的溶液发生,此时,一般考虑采用两级吸收循环来解决,有时也称为半效吸收制冷循环。常规两级吸收循环同样被结晶性能和循环结构限制,所能适应的工作温度范围较窄,系统 COP 也不随发生温度上升而上升,导致热力学完善度随发生温度升高而降低。因此,为了增强溴化锂吸收循环的适应性,提高循环对不同温度区间热源的利用效率,

研究者们相继提出了多种非常规循环。

在单效和两级之间,W J Biermann^[1]对一种在单效系统的高压低压之间添加一对吸收/解吸部件从而达到可变效能数的循环进行了研究并申请专利。D S Kim 等^[2]对一种在较低浓度下运行的溴化锂半效吸收循环进行研究,得出循环可在高环境温度如 50℃ 下运行而不结晶的结果,该种吸收循环更适应于风冷工况。陈莹等^[3]提出一种低温热源驱动的 SE/DL 吸收循环,通过两级系统和单效系统的结合,提高对低温热源的利用率。万忠民等^[4]提出了一种高效太阳能混合吸收系统,通过添加高压发生器提高两级吸收循环在热源温度较高时的系统效率。陈亚平等^[5]则提出了一种 1. x 级溴化锂吸收式循环,扩大了传统单效循环的可运行范围。

在单效和双效之间,Jianzhao Wang 等^[6]对可以

基金项目:国家自然科学基金国际合作重点项目(51020105010)。
(The project was supported by the State Key Program for International Cooperation of the National Natural Science Foundation of China (No. 51020105010).)

收稿日期:2013 年 2 月 6 日

利用 110℃ 到 140℃ 间发生温度的 1.5 效循环进行了建模分析,得出六种不同结构的 1. n 效循环的性能曲线。D L Hong 等^[7]提出了一种新型的 EAX 循环,并进行模拟分析,该种循环从实质上也是一种单效循环和半效循环并联的循环。

考虑到在半效吸收循环中,部件的热量耦合或流量耦合将锁死循环的运行范围,本文提出了一种可以有效扩大吸收循环工作范围的方法:在发生器出口到吸收器进口之间添加一对中压吸收器和蒸发器,中压蒸发器用来预冷进入系统的冷却水,从而解除中压蒸发器和低压吸收器之间的耦合。通过调整中压吸收器的冷却程度来控制系统,在扩大循环工作范围的同时保留可观的系统效率。

1 冷却水预冷 0. n 效溴化锂吸收循环

如图 1 所示,在蒸发温度 5℃,吸收温度 35℃,冷凝温度 40℃ 的工况下,单效循环和两级循环分别可在 60℃ ~ 75℃ 和大于 80℃ 的发生温度范围内运行,并分别达到 0.4 和 0.75 的 COP。可以看出二者对于发生温度的适应范围都比较窄,并且两者之间有一个 COP 跳跃过程。也就是说对 65℃ ~ 80℃ 的发生温度,单效系统不能利用,两级系统则效率较低。

在较为理想的情况下,应该有一种循环可以针对不同热源品位实现不同程度的利用,如在 65℃ ~ 90℃ 之间能够达到半效和单效吸收循环的连续过渡。并且在获得相同的蒸发温度时,系统 COP 可随着发生温度上升而上升。这里将这种根据热能品位调节自身系统的新型吸收式制冷循环命名为 0. n 效循环。这里的 $n = 5 \sim 10$,其中 $n = 5$ 对应半效循环而 $n = 10$ 代表了单效循环。

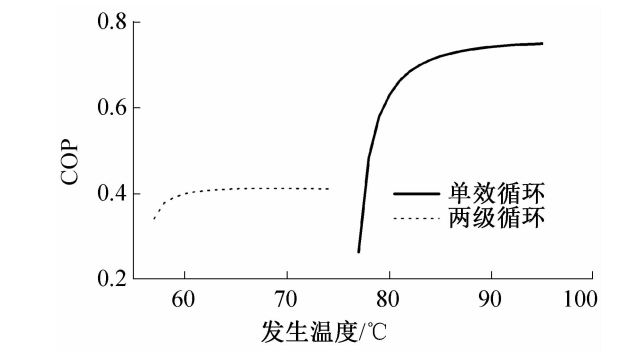


图 1 两种溴化锂吸收式循环的 COP 曲线
Fig.1 COP of two LiBr/water absorption cycles

本文所研究的冷却水预冷 0. n 效溴化锂吸收循环如下文所描述。图 2 是该循环的系统构成图,图 3 则是 p-T-x 图上的热力循环。循环关键部分在于冷却水的流动布置顺序,图中系统图和循环图的数字点

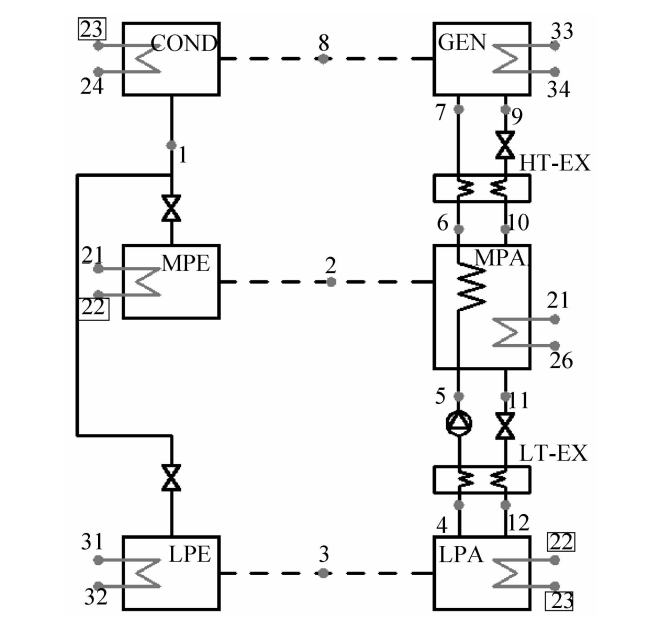


图 2 冷却水预冷型 0. n 效吸收循环的系统构成图
Fig.2 System components of 0. n-effect absorption cycle

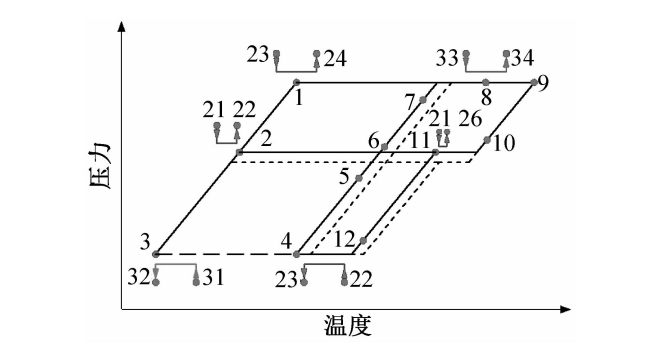


图 3 冷却水预冷 0. n 效吸收循环的热力循环
Fig.3 0. n-effect absorption cycle in p-T-x diagram

具有一一对应关系。

该系统有三个压力等级:发生器 GEN 和冷凝器 COND 处于高压状态,中压吸收器 MPA 和中压蒸发器 MPE 处于中压状态,而低压吸收器 LPA 和低压蒸发器 LPE 处于低压状态。

溶液循环如下:LPA 出口稀溶液 4 经过低温溶液热交换器 LT-EX 对中间浓度溶液进行回热变为状态 5,进入 MPA 中进行冷却,变为点 6,再经过高温溶液热交换器 HT-EX 对浓溶液进行回热变为状态点 7,进入 GEN 进行加热,沸腾并进行发生过程,发生产生过热蒸汽 8,经过发生的溶液在 GEN 出口变为浓溶液 9,再经过回热变为 10,在 MPA 中先后被稀溶液和冷却水冷却完成吸收过程,稀释为中间浓度溶液 11,然后再经过回热器冷却为 12,进入吸收器,进行吸收重新变为稀溶液 4,完成一个循环。

制冷剂循环如下:GEN 出口的过热蒸汽 8 在 COND 中被冷却水冷却,变为饱和水 1,分别进入

MPE 和 LPE。MPE 中产生蒸汽 2, 进入 MPA 被吸收。LPE 中产生蒸汽 3, 进入 LPA 中被吸收。

冷却水循环如下: 冷却水 21 先进入 MPE 中被冷却为 22, 再串联依次进入 LPA 和 COND, 从而可以发挥 MPE 降低 LPA 出口温度以及提供中压吸收所需的制冷剂蒸汽。另一回路是冷却水 21 进入 MPA 进行冷却变成 26, 通过调整这部分冷却水量控制 MPA 出口温度, 从而一方面可以调整中压压力以及中压蒸发温度, 另一方面可以调整循环的中压吸收器出口浓度。前者影响低压吸收器 LPA 的出口浓度从而影响循环的截止发生温度, 后者影响 LPA 的入口浓度即循环的结晶风险。

如图 3 所示, 实线部分为一个完整的热力循环。当 MPA 冷却水流量减少, MPA 出口温度升高, MPE 中制冷剂流量变少之后, 进行中压制冷的冷量减少, LPA 出口温度上升, 而 MPA 中吸收的制冷剂变少, 中间浓度变高, 使中间压力变低, 即变成虚线所示的循环图。循环的运行状态正是通过这样的过程改变的。

该循环可连续控制蒸发器制冷剂流量占冷凝器制冷剂流量的比例, 实现效能数的平滑变化, 与上文对 0. n 效循环所做设想吻合, 又因为中压吸收为实现 0. n 效的必要途径, 故命名该循环为中压吸收 0. n 效循环。此外 0. n 效循环可以通过流量控制, 满足不同驱动温度下抗结晶要求。

显然这种循环方式可以根据热源温度品位自动调节效能, 当然需要实际系统具有很好的自动调节性能。下面通过模拟计算来评价系统效能的变化和性能的变化。

2 数学模型

为研究循环特性, 需依据系统的质量守恒、能量守恒和组分守恒以及物性参数方程等编写程序, 对循环进行热力学分析模拟计算, 这些内容在其他文献中都有介绍, 此处不再赘述。模拟计算均在以下假设下进行: 1) 循环在稳态下运行; 2) 忽略发生器和冷凝器的压差以及吸收器和蒸发器中的压差; 3) 除发生器出口蒸汽外, 各个容器出口的溶液或制冷剂都处在饱和状态; 4) 设定 MPA 入口点 10 与稀溶液状态点 6 有 5℃ 温差; 5) 热交换器效率 HT-EX 为 0.5 (为防止 MPA 入口结晶); LT-EX 为 0.75; 6) 设定 MPE 蒸发温度比冷却水进口温度低 3℃; 7) 设定 LPA 和 COND 的冷端温差为 5℃; 8) 设定冷却水总温升为 8℃; 9) 忽略泵功耗损失。

对溴化锂溶液的物性计算采用了来自文献[8]中的数据。为使溴化锂的结晶曲线方程有更广的适

用范围, 本文综合使用了文献[9]和文献[10]中的结晶曲线方程。饱和水、饱和蒸汽和过热蒸汽的物性采用文献[9]中的公式, 该公式与 IAPWS-IF97 的数据之间误差小, 可以较好保障计算准确度。最后使用 MATLAB 编程, 对系统进行模拟计算。

计算系统参数时, 定义 0. n 效系统中的效能数为实际产生制冷作用的制冷剂流量占发生器产生制冷剂总流量的比例, 如下:

$$0. n = \frac{\dot{m}_{LPE}}{\dot{m}_{LPE} + \dot{m}_{MPE}} \quad (1)$$

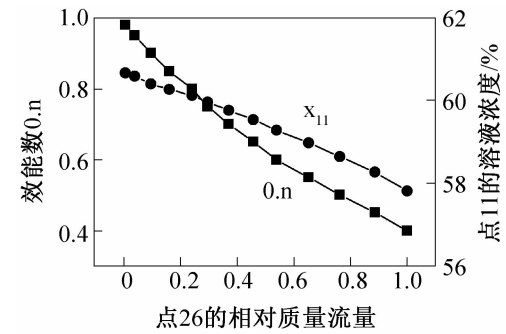
而 COP 则定义为 LPE 产生的制冷量与 GEN 输入热量的比值, 如下:

$$COP = \frac{Q_{LPE}}{Q_{GEN}} \quad (2)$$

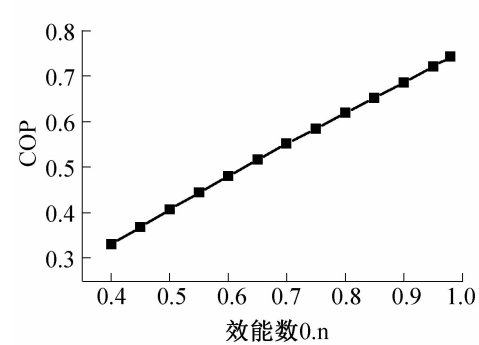
3 计算结果与讨论

3.1 循环基本参数

在冷却水温度 30℃, 发生温度为 90℃ 时候, 不同效能数 0. n 对系统的 COP 影响如图 4 所示, 此时低压吸收器出口温度为 40℃ 左右。



(a) 中压吸收器冷却水流量与0.n的关系



(b) 效能数0.n与COP的关系

图 4 0. n 效循环的基本特性

Fig.4 Basic features of 0. n-effect cycle

图 4(a) 为通过控制 MPA 处冷却水量, 从而控制其出口温度, 使循环效能数 0. n 变化的情况。随着冷却水流量的增加, MPA 出口点 11 温度向冷却水温度靠近, 从而使 MPA 吸收能力变强, 系统效能数 0. n 随之下降。MPA 出口溶液浓度降低, LPA 进口的结晶

可能也降低。图中 MPA 出口浓度和效能数的下降与冷却水水量增加成简单线性关系,有利于控制。

图 4(b) 为系统 COP 随着效能数 $0.n$ 的变化。当效能数在 0.4 到 1 之间变化时, COP 从 0.33 到 0.74 之间变化。效能数越低,能够产生有效冷量的制冷剂越少,导致其 COP 越低。同时这个变化过程也是连续线性的,这就提供了我们依据循环运行边界条件去优化系统 COP 的可能。

3.2 抗结晶性能

该循环的一大特性就是可以通过降低效能数 $0.n$, 使循环能够在更高的发生温度下工作而不结晶。如图 5 为不同效能数下,以循环至少远离结晶 5°C 为边界条件,结晶极限发生温度随冷却水温度变化的曲线。

从图 5 中可以明显看出,随着效能数的减少,同等冷却水温度下,系统可以在更高的温度下工作而不出现结晶。对于 35°C 的冷却水温度,基本单效循环仅能在最高 108.3°C 的发生温度下工作,而 $0.9 \sim 0.5$ 效的循环则分别可以在 109.4°C 、 111.5°C 、 114.8°C 、 115°C 和 114.2°C 的发生温度下工作,有效工作温度上限提升了 6°C 。对于 45°C 的冷却水温度,单效系统已经由于结晶不能运行,而采用这种系统则能使系统在 0.8 以下的效能数运行。

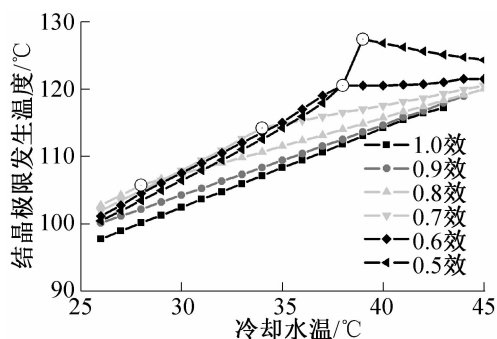


图 5 抗结晶特性

Fig. 5 Anti-crystallization property

从 0.7 效到 0.5 效,其最高发生温度曲线都有一个明显的斜率变化点(每条线上的圈点),即在低冷却温度下,过低的效能数反而不能提供更高的结晶极限温度。这是因为:为了产生冷却作用,MPE 蒸发温度必须比冷却水入口温度更低,当冷却水入口温度低的时候,MPE 中蒸发温度必须保持更低,导致 MPA 中压力过低,MPA 入口更容易结晶。

3.3 循环截止发生温度

当发生温度过低时,会发生稀溶液进入发生器后不能发生,循环无法运行的情况。一个循环从正常运行到发生温度过低不能运行的过程中,发生器溶液浓

度变化越来越小,循环倍率越来越高,这时泵功耗也会显著增长。当循环倍率高到一定程度时,发生器中溶液基本没有发生过程,即循环不能运行。此处以循环倍率 40 作为循环能进行的边界条件,即如果循环倍率大于 40,就可以认为吸收式制冷循环停止运行,对应的发生温度定义为循环截止发生温度。

如图 6 所示,以冷却水进口温度作为变量,得出了不同效能数 $0.n$ 下的截止发生温度。在不同冷却水进口温度情况下, $0.n$ 效循环总能提供 6°C 左右的截止发生温度变化。降低截止发生温度的原因是 MPE 对冷却水进行了预冷,相应使 LPA 出口稀溶液浓度降低;同时由于冷却水是采用串联流程,COND 温度变低,发生压力变小,同样有利于增加 GEN 出口溶液浓度。

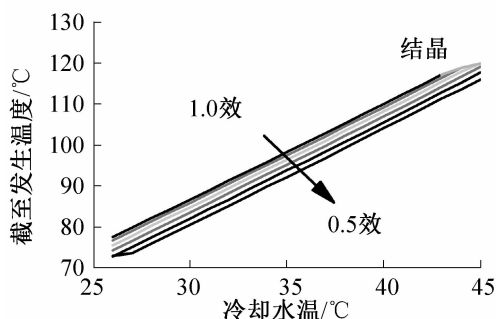


图 6 截止发生温度

Fig. 6 Cutting-off generation temperature

该循环的冷却水流量也需注意。如果冷却水流量大,冷却水总温升小,则 COND 温度低,但 MPE 的制冷效果就很不明显,不能对循环截止温度产生影响;反之,冷却水流量较小时,虽然 MPE 制冷效果明显,可以降低 LPA 出口温度,但同时 GEN 中压力较高也不利于降低截止发生温度,因此,冷却水流量需要控制适中。

如图 6 中直线在达到 $115^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 时不能继续上升,是因为循环在此温度点达到了结晶。这说明在冷却水温度过高的时候,即使能够满足循环倍率小于 40,也会因为结晶问题,导致循环不能运行。因此溶液避免结晶和合适倍率构成了循环能够正常运行的两个条件。综合上述计算数据,得出不同效能数 $0.n$ 下,循环的工作温度范围如图 7 所示。

从图 7 中可以明显看出,方形点线内部区域为单效循环可以工作的范围,仅仅限制在一个较小的区域里,而其余的区域则要比黑色区域大很多。区域的上下边界随着冷却水温 and 发生温度的上升而汇合,汇合点代表了该种效能循环的最高可工作冷却水温 and 发生温度。

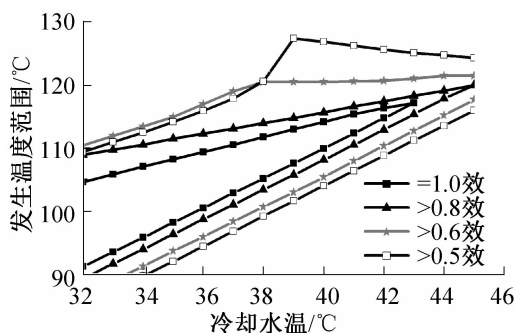


图 7 可工作温度区域

Fig. 7 Working range of 0. n-effect cycle

其中三角点线、五星点线和圆形点线分别代表 0.8 效、0.6 效和 0.5 效循环以距离结晶 5℃ 和循环倍率为 40 的边界，三者的 COP 分别近似于 0.62、0.48 和 0.4，而在区域内，由于可采用更高效能数和合适的循环倍率，COP 会比边界值更高。综上，当环境条件不满足循环运行条件时，即可降低效能数 0. n 增加循环运行范围，使循环牺牲部分效率而能继续运行。

3.4 效能数 0. n 与循环倍率对 COP 的影响

效能数减少会使 COP 变低，但系统倍率减小却能在一定程度上提升 COP，因此在选择合适的效能数时，同时需要一个合适的循环倍率，得到优化的系统 COP。为比较循环倍率和效能数对系统性能的影响，按照系统模拟的假设，在冷却水进口温度为 32℃，蒸发温度为 5℃ 的循环工况下，分别对不同循环倍率和效能数的 COP 进行计算，结果如图 8 所示。

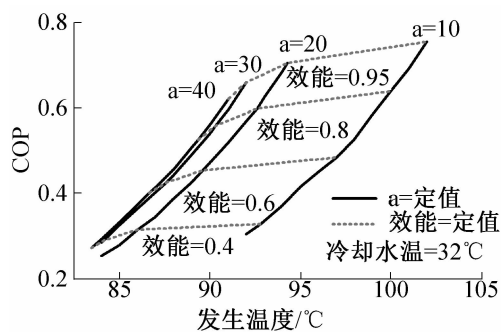


图 8 效能数与循环倍率对 COP 的影响

Fig. 8 Impact of effect number& circulating ratio on COP

从图 8 中可以看出，效能数 0. n 对于 COP 的影响很大，随着效能数的增加，COP 上升较快，在整个工作温度范围内都是如此。而倍率对 COP 影响则不大，效能数相同时，倍率增加使 COP 降低，但最大的变化只在 0.1 以内。因此在选择合适的循环倍率和效能数时，应该以循环的效能数为优先考虑对象，在最高循环倍率之内，尽可能选择较高的效能数。如以

循环倍率 $a = 40$ 为最高倍率，则 $a = 40$ 的等倍率线即为最优 COP 曲线。

依据上述优化原则，对冷却水进口温度 32℃ 和 42℃ 的工况进行计算，得出在该冷却水温下的最优 COP 曲线。仍然以距离结晶至少 5℃ 为发生温度边界条件，结果如图 9 所示。

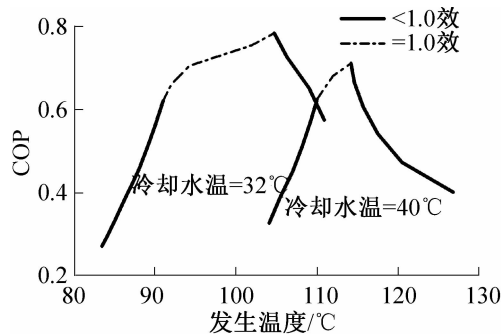


图 9 不同发生温度下的 COP

Fig. 9 COP vs. generation temperature

图 9 中的虚线条代表循环以单效状态运行，有最高的 COP，对冷却水温 32℃ 和 40℃ 的情况，可运行发生温度范围在 91℃ ~ 105℃ 和 110℃ ~ 114℃。而在使用了冷却水预冷之后，其运行范围可以分别扩大到 83.5℃ ~ 110℃ 和 104℃ ~ 127℃，可行温度范围分别扩大了 2 倍和 6 倍。并且 COP 可以保持在 0.3 以上，这使机组对热源温度变化的适应有很大的提升。

其中，冷却水温在 32℃ 时，结晶极限发生温度提升程度不如冷却水温 40℃ 的原因是此时 MPA 比 LPA 更易结晶，在冷却水温 40℃ 的时候，则不会出现此种问题。因此该循环在冷却水温度较高时对系统的提升会比较显著。

3.5 系统性能对比

系统 COP 低于 0.4 时，可调节冷却水回路，将 MPE 和 LPA 之间的冷却水变成内部回路，只在二者之间传递热量，而 COND 和 MPA 的冷却则仍用外部冷却水冷却，这样就变成半效循环。综合此半效循环的性能曲线和上一节中得到的变效能情况下系统的性能曲线，即得到了使用该循环可以得到的整体性能曲线。

为对比该循环和单效循环、两级循环的性能，将单效循环和两级循环在同样的假设（即冷却水总温升为 8℃ 和冷端温差为 5℃ 等条件）下进行计算。对比结果如图 10 所示。图中该循环在部分区域比单效循环效率高的原因是该循环中有两个溶液热交换器，使回热效率更高所导致。

图 10(a) 为冷却水入口温度为 32℃ 下单效、两级系统与该循环的对比，而图 10(b) 则为冷却水入口温

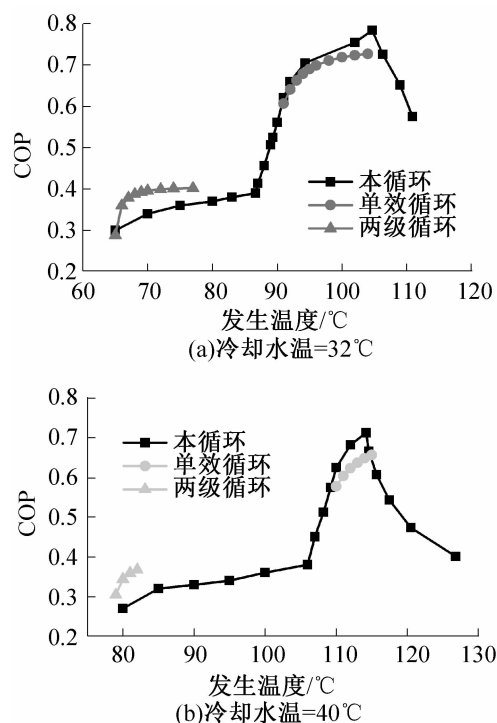


图 10 系统 COP 对比

Fig. 10 COP comparison between different cycles

度 40℃ 的对比情况。该循环可以经过控制, 拥有很大的工作范围适应能力。特别当冷却水温为 40℃ 时, 根据系统假设单效和两级系统吸收温度为 48℃, 冷凝温度为 53℃, 已经基本无法运行。但采用这种循环, 则仍然可以有一个很大的运行范围。

4 总结

本文给出了一种根据热源温度品位自动调节效能的 0. n 效循环的结构, 这类循环在单效循环的基础上多出一个中压蒸发吸收的过程。通过中压蒸发对冷却水的预冷, 可以在一定程度上扩大循环的工作范围, 但这种工作范围的扩大是以降低 COP 为代价的。通过建立数学模型, 对冷却水预冷的 0. n 效循环进行了计算验证。得出以下结论:

1) 对于单效循环, 冷却水温高于 43℃ 时, 循环已经不能运行, 但采用本文所述循环则可继续运行, 并保留一定的系统效率。

2) 该循环可以分别在 32℃ 和 40℃ 的冷却水温下将单效循环运行范围扩大 2 倍和 6 倍, 并可以通过控制冷却水布置将系统转化为半效吸收循环。

3) 通过计算得出优化循环 COP 的原则, 并据此得出循环 COP 随发生温度变化的曲线, 曲线显示该循环相对单效循环和两级循环的性能曲线都有一个更宽的定义域。

综上所述, 本文提出的吸收循环所拥有的运行范

围以及系统效率均能够较好达到预期, 即增加循环运行范围并尽可能保留系统效率, 是在变热源以及变冷却条件下提高溴化锂吸收循环适应性的较好选择。

符号说明

- a ——循环倍率
- 0. n——蒸发器中蒸发的制冷剂量与发生器产生制冷剂量之比;
- $\dot{m}$ ——质量流量, kg/s
- x ——溶液浓度, %
- COP——系统效率
- Q ——部件功率, kW
- GEN——发生器
- COND——冷凝器
- MPA——中压吸收器
- MPE——中压蒸发器
- LPA——低压吸收器
- LPE——低压蒸发器
- HT-EX——高温溶液热交换器
- LT-EX——低温溶液热交换器

参考文献

- [1] Wendell J Biermann. Variable effect desorber-resorber absorption cycle; U. S. , 4,542,629 [P]. 1985-9-24.
- [2] D S Kim, C A Infante Ferreira. Air-cooled LiBr-water absorption chillers for solar air conditioning in extremely hot weathers [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(4): 10180-1025.
- [3] 陈滢, 朱玉群, 耿玮, 等. 低温热源驱动的单效/双级 (SE/ DL) 吸收式制冷循环 [J]. 太阳能学报, 2002, 23(1): 102-107. (Chen Ying, Zhu Yuqun, Geng Wei, et al. SE/DL Absorption Refrigeration cycle driven by low temperature heat resources [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(1): 102-107.)
- [4] 万忠民, 舒水明. 一种高效太阳能混合吸收式制冷循环系统 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2003, 31(1): 100-102. (Wan Zhongmin, Shu Shuiming. Refrigeration cycle of solar mixed absorption [J]. Journal of Huazhong University of science and technology (nature science), 2003, 31(1): 100-102.)
- [5] 陈亚平, 王克勇, 施明恒. 1. x 级溴化锂吸收式制冷循环性能分析 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 193-195. (Chen Yaping, Wang Keyong, Shi Mingheng. Analysis on performance of 1. x-lift LiBr absorption refrigeration cycle [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(2): 193-195.)
- [6] Jianzhao Wang, Danxing Zheng. Performance of one and a half-effect absorption cooling cycle of H₂O-LiBr system [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50

(12): 3087-3095.

[7] D L Hong, G M Chen, L M Tang, et al. Simulation research on an EAX (Evaporator-Absorber-Exchange) absorption refrigeration cycle [J]. Energy, 2011, 36(1): 94-98.

[8] J Pátek, J Klomfar. A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr-H₂O solutions from 273 to 500 K over full composition range [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(4): 566-578.

[9] 王林. 小型吸收式制冷机原理与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 26-38.

[10] 戴永庆. 溴化锂吸收式制冷空调技术实用手册 [M]. 北

京: 机械工业出版社, 1999: 25-37.

通信作者简介

王如竹, 男(1964 -), 博士, 教授, 上海交通大学制冷与低温工程研究所, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn。研究方向: 吸附制冷、吸收制冷、太阳能制冷、热泵、冷热电联供。

About the corresponding author

Wang Ruzhu (1964 -), male, Ph. D., professor, School of Refrigeration & Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn. Research fields: adsorption refrigeration, absorption refrigeration, solar refrigeration, heat pump, CCHP.