

# 氨水吸收式制冷循环的分析与改进<sup>\*</sup>

徐士鸣

袁 一

(大连理工大学动力工程系 116024)

(大连理工大学化工学院 116024)

**摘要** 通过对影响氨水吸收式制冷循环因素的定性和定量分析,了解这些因素变化如何影响制冷循环的  $COP$  值,以及如何控制这些因素的变化使制冷循环的  $COP$  值达到最大;并指出完全回收制冷循环的精馏热可使循环的  $COP$  值有较大幅度的提高.其分析结果可为今后制冷系统的优化设计提供帮助

**关键词:** 氨水;吸收制冷;循环

**分类号:** TB616

## 0 引 言

为了保护大气的臭氧层,目前一些常用的氟利昂系列制冷剂的使用已开始受到控制,并逐渐地被禁止使用,或由其他物质的制冷剂替代.因此,在当前的世界制冷业中,一方面正在积极研究 CFC 的替代物质;另一方面也把注意力转到其他方式的制冷循环上.节约能源保护环境已越来越受人们的重视,研究如何利用直接排放到大气环境中去的余热和废热,采用吸收式制冷循环进行制冷,提高吸收式制冷循环的性能系数 ( $COP$ ),减小制冷设备的体积,对加快 CFC 代用进程.节约能源具有重要的现实意义.

许多生产行业(如炼油、石油化工、化肥、食品加工、轻工纺织等)在其生产过程中,不仅需要一定的冷量,而且还有大量的低品位余热排出.如果能利用这部分排向环境中去的余热,采用吸收式制冷来满足这类企业生产时所需的冷量,就能节约大量的能源,降低生产成本.

目前最为常用的吸收式制冷系统为溴化锂吸收式制冷系统和氨水吸收式制冷系统.前者制冷温度由于受到制冷剂的限制,不能低于  $5^{\circ}\text{C}$ ,一般仅用于空调;后者的制冷温度范围非常大( $-10^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ ),不仅可用于空调,而且更重要的是可用于  $0^{\circ}\text{C}$  以下的普通制冷场合.因此,在工业余热制冷系统中,氨水吸收式制冷系统明显地优于溴化锂吸收式制冷系统.但传统的氨水吸收式制冷系统,因其系统中的设备多,体积大,钢材消耗量大,制冷循环的  $COP$  值较低,而在我国应用得不多.如何克服氨水吸收式制冷系统的缺点,提高氨水吸收式制冷系统的  $COP$  值,是在我国推广应用氨水吸收式制冷系统进行余热制冷的关键所在.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1995-10-31; 修订日期: 1996-05-10

徐士鸣:男,1957年生,副教授

# 1 影响氨水吸收式制冷系统 COP 值因素的定性分析<sup>[1]</sup>

传统的单级氨水吸收式制冷循环如图 1 所示. 制冷循环在单位时间内每制取 1 kg 冷剂在发生器中所消耗的热量

$$q = h''_5 - h'_2 + f(h'_2 - h_{1a}) + q_h \quad (1)$$

按吸收式制冷循环的性能系数 (COP) 的定义

$$COP = q_c / (q_c + 3\ 600\ W_p) \approx q_c / q_f \quad (2)$$

由于在制冷温度一定的情况下, 单位质量的冷剂制冷量  $q_c$  是一定值, 要提高氨水吸收式制冷循环的 COP, 就必须降低  $q_f$ . 而由式 (1) 可知,  $q_f$  的大小是取决于系统的循环倍率  $f$  及精馏热  $q_h$  的大小. 按循环倍率的定义

$$f = (Y'_5 - Y'_a) / (Y'_r - Y'_a) \quad (3)$$

由于经过精馏后的氨蒸汽浓度  $Y'_5$  是一定值 (一般取  $Y'_5 = 99.8\%$ ),  $f$  的大小取决于制冷循环中浓溶液浓度  $Y'_r$  与稀溶液浓度  $Y'_a$  之差  $\Delta Y$  (称放气范围). 增大  $\Delta Y$  可使循环倍率  $f$  降低,  $q_f$  随之减少, 制冷系统的 COP 值增大; 反之, 减小  $\Delta Y$ ,  $f$  和  $q_f$  都将增大, 使制冷循环的 COP 值减小; 当  $\Delta Y = 0$  时, 吸收制冷循环将无法进行. 因此,  $\Delta Y$  的变化对氨水吸收式制冷循环的 COP 值有很大的影响, 这样可通过对  $\Delta Y$  影响因素的定性分析和研究, 去寻找提高氨水吸收式制冷循环 COP 的途径和方法.

## 1.1 稀溶液温度 $t_2$

当制冷系统的蒸发温度  $t_2$  和冷却水温度  $t_w$  不变时, 如果出发生器的稀溶液温度  $t_2$  升高, 则  $Y'_a$  减小,  $\Delta Y$  增大; 其结果使制冷系统的循环倍率  $f$  减小, 制冷循环的 COP 值增加. 对于像蒸汽类的恒温热源,  $t_2$  的提高, 意味着加热热源温度的提高. 而对于像废气余热类的变温热源,  $t_2$  的提高, 不是意味着回收热量的减少, 就是意味着换热面积的增加.

## 1.2 制冷剂蒸发温度 $t_2$

当冷却水温  $t_w$  和  $t_2$  保持不变时,  $t_2$  降低, 蒸发器内的蒸发压力下降, 吸收器内的吸收压力也随之下降. 其结果使吸收终了的溶液浓度  $Y'_r$  降低,  $\Delta Y$  减小,  $f$  增大, 制冷系统的 COP 降低. 反之, 当  $t_2$  升高时, 则可改善制冷系统的 COP. 因此, 对于利用热源温度较低的余热氨水吸收式制冷系统, 在可能的情况下尽量采用直接致冷方式, 减小致冷温差, 以提高冷剂的蒸发温度和蒸发压力, 这不仅可改善制冷系统的 COP 值, 更重要的是蒸发压力提高后有利于氨的吸收过程, 吸收器的体积可以缩小.

## 1.3 冷却水温 $t_w$

当  $t_2$ ,  $t_2$  和冷凝器及吸收器传热温差恒定时,  $t_w$  的变化将对冷凝器和吸收器的工况产生

图 1 单级氨水吸收式制冷循环流程

影响. 当  $t_w$  降低时, 冷凝温度  $t_1$  和与之相应的冷凝压力  $p_1$  也随之降低, 从而使得发生器内的压力  $p_g$  也随之降低, 发生终了的稀溶液浓度  $Y_a$  降低,  $\Delta Y$  增大, 制冷系统的  $COP$  值提高. 对吸收器而言, 当  $t_w$  降低时, 吸收终了的溶液浓度  $Y_r$  提高,  $\Delta Y$  增大, 并使  $q_h$  减小, 制冷系统的性能得到改善. 因此冷却水温的变化对氨水吸收式制冷循环有较大的影响.

从上述对氨水吸收式制冷循环进行定性分析中可以发现, 影响氨水吸收式制冷系统  $COP$  值的主要因素有  $t_3$ 、 $t_w$ 、 $t_2$  和吸收压力  $p_x$ . 但在实际应用的制冷系统中,  $t_3$  和  $t_w$  是受外界条件所制约的. 在制冷系统的设计中可以改变的仅有  $p_x$  和  $t_2$ , 而提高  $p_x$  就必须设置前置式升压装置<sup>[2]</sup>, 在很多情况下不易做到. 因此, 一般只能通过改变  $t_2$  来改善氨水吸收式制冷系统的  $COP$ . 但提高  $t_2$  就必须提高加热热源的温度,  $t_2$  是否越高越好需进行定量计算才能分析.

## 2 影响氨水吸收式制冷系统 $COP$ 值因素的定量分析

为了深入了解上述对氨水吸收式制冷系统性能系数影响较大的因素综合变化时, 对制冷循环  $COP$  的影响, 就必须对制冷循环进行热力计算. 通过对这些因素的变化计算所得的制冷循环  $COP$  值变化曲线的定量分析, 可全面了解当  $t_3$ 、热源温度  $t_1$  (与之相对应的是  $t_2$ )、 $t_w$  同时发生变化时对氨水吸收式制冷循环  $COP$  值的影响及  $COP$  的变化范围, 并找出相应的解决方法.

制冷循环的热力计算程序按文献 [2] 所给出的氨水吸收式制冷循环热力计算方法编制, 调用文献 [3] 所述的氨水溶液热力参数计算程序进行计算. 计算中所用到的各参数取值为:  $Y_s = 99.8\%$ ; 计算蒸发温度  $t_e = t_w - \Delta t_{2e}$ ,  $\Delta t_{2e} = 2.5^\circ\text{C}$ ; 冷凝器冷端温差  $\Delta t_{1c} = 8^\circ\text{C}$ ; 发生器与冷凝器之间的压力降  $\Delta p_{1c} = 0.01 \text{ M Pa}$ ; 发生终了稀溶液与恒温热源的温差  $\Delta t_{2g} = t_1 - t_2 = 10^\circ\text{C}$ ; 蒸发器与吸收器之间的压力降  $\Delta p_{2a} = 0.03 \text{ M Pa}$ ; 吸收器冷端温差  $\Delta t_{3a} = 6^\circ\text{C}$ ; 溶液热交换器冷端温差  $\Delta t_{3s} = 10^\circ\text{C}$ ; 精馏效率  $Z = 0.7$ ;  $t_w$  分别为  $25^\circ\text{C}$  和  $32^\circ\text{C}$ ; 恒温热源温度变化范围  $t_1 = 80 \sim 140^\circ\text{C}$ ; 冷剂蒸发温度的变化范围  $t_e = +10 \sim -25^\circ\text{C}$ .

图 2  $t_3$ 、 $t_2$  变化对  $COP$  的影响

图 3  $t_3$ 、 $t_2$  变化对  $q_s$  的影响

图 2~5 分别为氨水吸收式制冷循环  $COP$ 、吸收热  $q_s$ 、放气范围  $\Delta Y$  及精馏热  $q_h$  随  $t_3$ 、 $t_w$  和

恒温热源温度  $t_1$  变化的计算汇总曲线. 从图 2 中可见, 当  $t_2$  和  $t_w$  不变时, 随着  $t_1$  的增加, 开始制冷循环的  $COP$  值迅速上升, 而后逐渐减缓并出现极值, 过该极值点后循环的  $COP$  值反而随  $t_1$  的增加而渐渐降低. 因此, 对于氨水吸收式制冷循环, 当制冷温度和冷却水温度一定时, 并不要求出发生器的稀溶液有过高的温度. 其原因是, 在氨水吸收式制冷循环中氨的冷凝热与蒸发热几乎相等, 热损失最大的是吸收热. 从图 3 中可见, 在上述条件下, 随着  $t_1$  的增加,  $q_0$  开始急剧下降, 而后逐渐减缓.  $q_0$  下降到低点后随  $t_1$  的增加有所上升, 因此反映在制冷循环的  $COP$  曲线上就出现如图 2 中的现象. 这一结论对利用余热制冷的系统尤为重要. 在系统的设计中过分强调提高出发生器的稀溶液温度, 会使传热温差减小, 可回收利用的余热减少或使发生器的换热面积增大, 对制冷系统的设计带来不利的影响.

图 4  $t_1, t_2$  变化对  $\Delta Y$  的影响图 5  $t_1, t_2$  变化对  $q_0$  的影响

将图 2 与图 4 对照, 在  $\Delta Y \leq 0.1$  范围内, 随  $\Delta Y$  的增加制冷循环的  $COP$  值迅速上升. 而在  $0.1 \leq \Delta Y \leq 0.2$  范围内, 随  $\Delta Y$  的增加  $COP$  值上升减缓, 并在该区域内出现极值, 然后渐渐下降. 因此, 过分强调增大制冷循环的  $\Delta Y$  是不必要的, 只要  $0.1 \leq \Delta Y \leq 0.15$  (制冷系统的循环倍率  $f$  约在 8~5.5 范围内), 制冷系统就能获得较为满意的  $COP$  值.

从图 2 中还可看到, 冷剂蒸发温度和冷却水温度对  $COP$  值的影响较大. 冷剂蒸发温度越低, 冷却水温度越高, 出发生器的稀溶液温度也要求高, 所需要的加热热源温度也相应提高, 但  $COP$  值却降低. 其主要原因是, 当冷剂蒸发温度降低、冷却水温度提高时,  $q_0$  大为增加 (见图 5), 使制得单位质量冷剂的耗热量  $q_0$  增大,  $COP$  值减少. 因此, 当要求的制冷温度较低及冷却水温度又较高的情况下, 就需要对传统的单级氨水吸收式制冷循环进行改进, 通过采用回收精馏热的方法来提高  $COP$  值.

### 3 回收精馏热对氨水吸收式制冷循环 $COP$ 的影响

如上所述, 当制冷温度较低而冷却水温度又较高时, 为了提高  $COP$  值就需要考虑回收精馏热. 其方法为将出吸收器的浓溶液经溶液泵加压后分出一部分作为回流冷凝器或分凝器

的冷却流体来回收精馏热. 此时, 单位质量冷剂所需的浓溶液分流量  $g$  必须满足条件:

$$g \geq q_h / (h'_1 - h_{4a}) \quad (5)$$

流经溶液热交换器的浓溶液吸热量为

$$q_r = (f - g)(h_{1a} - h_{4a}) = 0.97(f - 1)(h'_2 - h_{2a}) \quad (6)$$

这样, 经过对发生器能量平衡计算后, 得到回收精馏热后每制得 1 kg 冷剂在发生器内所消耗的热量为

$$q_f = h''_5 - h'_2 + f(h'_2 - h_{1a}) + g(h_{1a} - h_{4a}) \quad (7)$$

在上述条件下, 当循环倍率  $f$  较小时浓溶液在溶液热交换器内会发生汽化现象, 这时可将溶液热交换器看作是一台二级发生器, 在溶液热交换器的设计中必须考虑到浓溶液在热交换器内发生沸腾的情况.

当浓溶液在溶液热交换器内发生沸腾时, 出溶液热交换器的浓溶液处于汽液两相状态. 组成此汽液两相的液体和气体状态点  $h''_{1a}$ ,  $h'_{1a}$ ,  $d''_{1a}$ ,  $Y'_{1a}$  需要采用迭代计算才能确定. 而当汽液两相流体进入精馏塔时, 其回流冷凝器的回流比将发生变化.

$$R_0 = (Y'_5 - Y'_{1a}) / [(Y'_{1a} - Y'_{1a}) Z_1] \quad (8)$$

$$q_{p0} = h''_{1a} - h''_5 + R_0(h''_{1a} - h'_{1a}) \quad (9)$$

由上两式可知, 当浓溶液在溶液热交换器内发生沸腾时, 精馏热会发生变化, 随之浓溶液分流量  $g$  发生变化, 流经溶液热交换器的流量  $(f - g)$  改变, 出溶液热交换器的浓溶液状态发生变化, 反过来又影响精馏热. 因此, 当浓溶液在溶液热交换器内发生沸腾时, 在对精馏热进行迭代计算过程中, 还需对出溶液热交换器的浓溶液状态进行迭代计算, 使之收敛到某一定值. 因此, 当浓溶液在热交换器中发生沸腾时, 出热交换器的两相流体热力参数的计算过程是一双重迭代的计算过程.

图 6 为回收精馏热后, 制冷循环  $COP$  值随热源温度  $t_h$  (或出发生器的稀溶液温度  $t_2$ )、冷剂蒸发温度  $t_e$  和冷却水温度  $t_w$  变化的曲线. 从图中可见, 在同一热源温度下, 当其他条件不变时,  $COP$  值均比不回收精馏热时有所提高, 而且冷剂蒸发温度越低, 冷却水温度越高, 回收精馏热后  $COP$  值提高得越多. 这是因为制冷循环的精馏热  $q_h$  是随冷剂蒸发温度的降低, 冷却水温度和出发生器稀溶液温度的提高而迅速增长 (见图 5). 比较图 2 和图 6, 回收精馏热后  $COP$  曲线明显高于未回收精馏热时的  $COP$  曲线. 在所计算的范围内, 回收精馏热后  $COP$  值最大相对提高幅度为 23.79% ( $t_h = 140^\circ\text{C}$ ,  $t_w = 32^\circ\text{C}$ ,  $t_e = -15^\circ\text{C}$ ) 和 27.40% ( $t_h = 140^\circ\text{C}$ ,  $t_w = 25^\circ\text{C}$ ,  $t_e = -25^\circ\text{C}$ ). 由此可见, 当制冷温度较低而冷却水温度较高时, 回收制冷循环的精馏热对提高  $COP$  值是非常有利的.

图 6 回收精馏热后  $t_h$ ,  $t_e$  变化对  $COP$  的影响

## 4 结 论

(1) 对于传统的氨水吸收式制冷循环, 由于受到氨水这一制冷工质的限制, 无论怎样调整制冷循环的热力参数, 在正常的制冷温度和冷却水温度范围内其制冷循环的  $COP$  值不可能超过 0.7. 而且随着制冷温度的降低, 冷却水温度的提高,  $COP$  值还要进一步降低.

(2) 尽管氨水吸收式制冷系统的  $COP$  值不高, 但在一定的系统设计条件下还有提高其  $COP$  值的可能, 尤其是对于有限热量的余热制冷系统, 如何提高  $COP$  值, 使回收的单位热量能制得最多的冷量是至关重要的.

(3) 在氨水吸收式制冷系统的设计中应尽可能提高冷剂的蒸发温度, 降低冷却水温度和冷凝温度, 减少管道阻力损失, 提高吸收压力, 回收循环的精馏热; 在此基础上选择最佳的出发生器的稀溶液温度, 是氨水吸收式制冷系统最优设计的关键所在.

## 参 考 文 献

- 1 杨思文. 氨水吸收式制冷机的基础理论和设计之七——性能与流程. 流体工程, 1990, 18(3): 56~ 63
- 2 制冷工程设计手册编写组. 制冷工程设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1978. 584
- 3 徐士鸣, 袁 一.  $NH_3/H_2O$  溶液热力参数表达式的推导与程序编制. 流体机械, 1995, 23(2): 55~ 59

## Analysing and improving of ammonia-water absorption refrigeration cycle

Xu Shiming

Yuan Yi

( Dept. of Power Engineering, DUT ) ( School of Chemical Engineering, DUT )

**Abstract** By analysing the variation of factors which affect ammonia-water absorption refrigeration cycle's  $COP$ , how to affect the cycle's  $COP$  due to the variation of the factors and how to control these factors to make the cycle's  $COP$  higher are known. That the cycle's  $COP$  can be increased largely by retrieving the fractional distillation heat is pointed out. The results obtained can help to design the refrigeration system.

**Key Words** ammonia-water; absorption refrigeration; cycle