∦

化学化工、动力工程 &

文章编号:1000-8608(2012)06-0794-05

高温双再生器型吸收式热变换器热力循环分析

马学虎*, 李 达, 郝兆龙, 兰 忠, 王群昌, 薄守石

(大连理工大学化学工程研究所,辽宁大连 116024)

摘要:提出一种新型以溴化锂溶液为工质的高温双再生器型吸收式热变换器(HDAHT)循 环系统,该系统在高温单级吸收式热变换器循环中再生器和冷凝器之间增加了第二级再生器.HDAHT系统可以将高温废热源的温度进一步提高至有用温位.对HDAHT内各参数对系统性能系数 COP的影响进行了模拟计算.计算结果表明,系统性能系数 COP随着蒸发温度、低压再生器温度和溴化锂溶液中间浓度的升高而增大,随着吸收温度、高压再生器温度和 溴化锂稀溶液浓度的升高而减小.在适合的操作条件下,本循环的系统性能系数 COP 达到了 0.61,是高温单级吸收式热变换器的 1.2 倍.所得到的这些规律将为高温吸收式热变换器设 计系统优化提供必要的理论依据.

关键词: 双再生器; 吸收式热变换器; 溴化锂溶液; 性能系数 中图分类号: TQ028.8 文献标志码: A

0 引 言

近年来,大量工业废热被排放到环境中,既浪费能源又污染环境.吸收式热变换器能有效地回收工业过程中排放的低温废热,将其转变为较高温位的可用热能加以重新利用,从而实现节能减排的目的.

吸收式热变换器的概念于 1913 年首次被提 出,但其工业应用仅有 30 多年的历史.随着能源价 格不断上涨和供应日趋紧张,回收工业废热和利用 太阳能的 AHT 技术在国外已成为有效利用能源 的研究热点^[1].很多专家学者对蒸发温度、吸收温 度、冷凝温度及再生温度等操作条件与系统性能 系数 COP、温升和溶液换热效率等性能参数之间 的关系进行了大量研究^[1],分别从理论和实际的 角度出发,认为只有改善热力循环过程,使其接近 可逆过程,才能获得较好的系统性能.Tierney 等^[2-4]对双再生器型吸收式制冷机的结构和性能 进行了研究,发现与单级吸收式制冷机相比其性 能得到了很大的提高.Gomri等^[5-8]研究双再生器 型吸收式制冷机的同时,将其应用于低温海水淡 化的吸收式热变换器中,分别采用热力学第一定 律和第二定律对其与单级吸收式热变换器进行了 分析比较,发现双再生器型吸收式热变换器系统 COP 得到了较大幅度的提高,证明双再生器型结 构在吸收式热变换器中具有很大的应用前景.

为了有效利用高温吸收式热变换器冷凝器放 出的大量冷凝热,提高热变换器系统 COP,本文 对高温双再生器型吸收式热变换器的热力循环过 程进行数值模拟计算,分析研究蒸发温度、吸收温 度、高低温再生器温度、溴化锂稀溶液浓度等参数 对热变换器系统 COP 的影响规律.

1 原理与方法

1.1 双再生器型高温吸收式热变换器的工作原理

如图 1 所示为高温单级吸收式热变换器 (high temperature single effect absorption heat transformer,简称 HSAHT).再生器内的溴化锂 稀溶液经工业废热加热后浓缩生成溴化锂浓溶液 和水蒸气,水蒸气在冷凝器内冷凝后经泵输送到 蒸发器,同样被工业废热加热蒸发,产生的高压蒸 汽在吸收器内被来自再生器的溴化锂浓溶液吸 收,放出有用热能;溴化锂浓溶液吸收水蒸气后变

收稿日期: 2011-02-23; 修回日期: 2012-09-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51176018).

作者简介: 马学虎*(1965-),男,教授,博士生导师,E-mail:xuehuma@dlut.edu.cn.

成稀溶液,稀溶液依次经热交换器和节流阀后重 新返回到再生器中再次汽化浓缩,如此反复循环.

高温双再生器型吸收式热变换器(high temperature double effect absorption heat transformer, 简称 HDAHT) 是在单级吸收式热 变换器的基础上外加一个低压再生器,如图2所 示,高压再生器内的溴化锂溶液经热源加热后,产 生浓溴化锂溶液 7 和蒸汽 9;浓溴化锂溶液 7 经 热交换器1后进入吸收器,吸收来自蒸发器的高 压蒸汽1,放出有用热:吸收后的稀溴化锂溶液经 热交换器1、2和节流阀后进入低压再生器,被高 压再生器放出的蒸汽 9 加热,此时,稀溴化锂溶液 得到了初步浓缩,形成溶液 5,经热交换器 2 后回 到高压再生器;同时,蒸汽9在低压再生器放出汽 化热后经节流阀与低压再生器产生的蒸汽 11 一 起进入冷凝器冷凝,冷凝液经泵输送回蒸发器后 再次被热源加热,产生的高压蒸汽用于吸收器吸 收,如此反复循环,本循环的特点是用高压再生器 产生的蒸汽来加热低压再生器,实现了能量的梯 级利用,同时降低了冷凝器的压力,增大了放气范 围,从而在很大程度上提高了整个热变换器系统 的性能,这一特点使得高压再生器放出的蒸汽温 度要高于低压再生器内的溶液温度,在一定程度 上限制了 HDAHT 系统的操作和适用范围.



图 1 高温单级吸收式热变换器循环图 Fig. 1 The schematic illustration of HSAHT



图 2 高温双再生器型吸收式热变换器循环图 Fig. 2 The schematic illustration of HDAHT

1.2 数学模型

数学模型计算假设如下:

(1)整个系统处于平衡状态;

(2)高压再生器、低压再生器、蒸发器的出口 蒸汽都是饱和蒸汽;

(3)冷凝器的出口溶液为饱和溶液;

(4)各设备、管路的压降忽略不计;

(5)两热交换器的换热效率均为 0.8;

(6)忽略泵功率消耗及设备与环境之间的热 损失.

LiBr-H₂O 溶液的气液相平衡及焓值计算公式如下^[9]:

$$t_{\rm d}(t,x) = \sum_{i=0}^{2} \sum_{j=0}^{3} A_{ij} (x-40)^{j} t^{i} \qquad (1)$$

$$\log p = k_0 + \frac{k_1}{t_d + 273.15} + \frac{k_2}{(t_d + 273.15)^2}$$
(2)

 $H(t,x) = (3.462\ 023 - 0.026\ 798\ 95x)t + 0.5 \times$

 $(0. 001 349 9 + 0. 000 006 55x)t^{2} + (162. 81 - 6. 041 8x + 0. 004 535x^{2} + 0. 001 205x^{3})$ (3)

其中 t_d 为蒸汽露点温度. 式(1) ~ (3) 的适用范 围:20 ℃ ≪ t ≪ 210 ℃,40% ≪ x ≪ 65%. 其中 $k_0 = 7.05, k_1 = -1.603.54, k_2 = -104.095.5, A_{ij}$ 的值见文献[9].

水的气液相平衡公式为[10]

$$T(S) = A + \frac{B}{(\ln p(S)) + C}$$
(4)

式(4)的适用范围: 0.000 611 MPa $\leq p(S) \leq$ 12.33 MPa, 273.16 K $\leq T(S) <$ 600 K. 其中 A = 42.6776, B = 389.27, C = 9.48654.

$$\ln p(S) = \sum_{i=0}^{9} A(i) T(S)^{i} + \frac{A(10)}{T(S) - A(11)}$$
(5)

其中 A(i)、T(S) 的值见文献[10],饱和水及饱和 水蒸气的焓值亦可见文献[10].

质量守恒包括整个系统的质量守恒和各个设备物料的质量守恒.稳态条件下,质量守恒计算公式为

$$\sum m_i - \sum m_0 = 0 \tag{6}$$

$$\sum m_i x_i - \sum m_0 x_0 = 0 \tag{7}$$

其中 m 是质量流量, x 为溶液中溴化锂质量分数.

高温吸收式热变换器各设备的能量守恒计算 公式如下:

$$\left(\sum m_i h_i - \sum m_0 h_0\right) + \left(\sum Q_i - \sum Q_0\right) = 0$$
(8)

高温吸收式热变换器主要部件的能量守恒表 达式如下:

蒸发器

$$Q_{\rm e} = m_{12} h_{12} - m_1 h_1 \tag{9}$$

吸收器

$$Q_{s} = m_{1}h_{1} + m_{8}h_{8} - m_{2}h_{2}$$
 (10)
冷凝器

$$Q_{\rm c} = m_{10} h_{10} + m_{11} h_{11} - m_{12} h_{12} \tag{11}$$

高压再生器

$$Q_{\rm hpg} = m_6 h_6 - m_7 h_7 - m_9 h_9 \tag{12}$$

低压再生器

$$Q_{\text{lpg}} = m_4 h_4 + m_9 h_9 - m_{10} h_{10} - m_{11} h_{11}$$
 (13)
热交换器 1 换热系数

$$\epsilon_1 = \frac{m_2 c_2 (t_2 - t_3)}{m_7 c_7 (t_2 - t_7)} = 0.8$$
(14)

热交换器 2 换热系数

$$\varepsilon_2 = \frac{m_3 t_3 (t_3 - t_4)}{m_5 c_5 (t_3 - t_5)} = 0.8$$
(15)

系统总温升

$$t_{\rm t} = t_{\rm a} - t_{\rm e} \tag{16}$$

系统性能系数

$$COP = \frac{Q_{\rm a}}{Q_{\rm e} + Q_{\rm hpg}} \tag{17}$$

2 结果与讨论

2.1 各状态点的模拟计算结果

在 $t_e = 160$ °C, $t_a = 210$ °C, $t_{hpg} = 170$ °C, $t_{lpg} = 120$ °C, $x_2 = 48.5\%$, $x_5 = 51.5\%$ 的条件下,模拟 计算了双再生器型高温吸收式热变换器内各状态 点的物性参数,结果见表 1~3.

表1 HDAHT 的各物性参数

Tab. 1 The various physical parameters of HDAHT

状态点	温度/℃	压力/Pa	焓值/(kJ • kg ^{−1})
1	160.0	617 740	2 762.70
2	197.4	617 740	477.22
3	183.1	617 740	441.86
4	143.6	617 740	345.71
5	126.0	73 818	304.15
6	171.7	270 410	410.59
7	175.8	270 410	420.27
8	193.1	617 740	460.30
9	175.8	270 410	2 817.70
10	130.0	270 410	546.34
11	126.0	73 818	2 739.10
12	91.3	73 818	382.10

表 2	蒸发器内每产生1 kg 蒸汽时各个设
	备的换热量("一"表示吸热)

Tab. 2	The evaporator per one kilogram of steam					
	generated	heat	of	each	device	('' - ')
	indicates endothermic)					

设备	换热量/kJ	设备	换热量/kJ
蒸发器	-2 380.6	冷凝器	1 412.6
吸收器	2 144.3	热交换器1	332.1
高压再生器	-1 136.1	热交换器 2	919.7
低压再生器	974.2		

表 3 HDAHT 的各性能参数

Tab. 3 The various performance parameters of HDAHT

性能参数	数值
放气范围(x7-x2)	5.81%
循环倍率 R	9.348
总温升 <i>t</i> _t /℃	50
系统性能系数 COP	0.609 7

2.2 操作参数对热变换器系统性能的影响

影响热变换器系统性能的因素有很多,下面 主要对系统的蒸发温度、吸收温度、冷凝温度、高 压再生器温度、低压再生器温度及溴化锂溶液浓 度对系统 COP 的影响进行计算和分析;并与相同 条件下 HSAHT 系统的 COP 进行了对比.

图 3~5 给出了 HDAHT(D)和 HSAHT(S) 内各操作参数对系统 COP 的影响. 由图 3 可知, 在 HSAHT 系统中, COP 随着蒸发温度的升高 而减小,随着吸收温度的升高而增大,这是由于蒸 发温度升高,相应蒸发、吸收压力增大,在吸收温 度不变的情况下,吸收器内溴化锂浓溶液的质量 分数下降,放气范围减小,吸收器放出的可用热减 少,从而导致系统 COP 减小;而在蒸发温度不变, 吸收温度升高时,吸收器内溴化锂浓溶液质量分 数增大,放气范围增大,系统 COP 增大.然而在 HDAHT系统中,正好相反,COP 随着蒸发温度 的升高而增大,随着吸收温度的升高而减小.这是 由于蒸发温度的升高或吸收温度的降低,都将导 致吸收器内溴化锂浓溶液质量分数减小:这虽然 在一定程度上减小了系统 COP,但在低压再生器 温度压力不变即溴化锂稀溶液质量分数不变的情 况下,高压再生器放出的水蒸气量相应减少,所需 的热量减少,同时,在保证低压再生器所需热能的 基础上,高压再生器放出的蒸汽9在低压再生器 内冷凝的量增加,这在很大程度上提高了热变换 器的能量利用效率,从而导致系统 COP 随着蒸发

温度的升高而增大,随着吸收温度的升高而减小. 同时,在图 3 中还能发现,相对于 HSAHT 系统, HDAHT 系统的 COP 要增大 10%~20%.

由图 4 可知,在 HSAHT 系统内,随着再生 器温度升高,系统 COP 略微增大,这是由于在放 气范围不变的情况下,随着再生器温度升高,再生 压力增大,冷凝温度和压力随之增大,冷凝器向环 境排出的热量减少,系统能量利用率增大,COP 增大.但在 HDAHT 系统中,在放气范围和溴化 锂溶液中间质量分数不变的情况下,随着高压再 生器温度升高,其所需的工业废热增大,系统 COP 减小. 而在高压再生器温度和放气范围不变 的情况下,随着溴化锂溶液中间质量分数增大,高 压再生器所需的工业废热减少,同时低压再生器 从蒸汽9吸收的热量增加,提高了系统的能量利 用效率,从而在很大程度上提高了 HDAHT 系统 的 COP. 溴化锂溶液中间质量分数是 HDAHT 系统所特有的操作参数,相对于高压再生器温度, 其值的变化对系统 COP 的影响非常明显,由图 4 可发现,当溴化锂溶液中间质量分数为51.6% 时,HDAHT的COP为HSAHT的1.2倍.

由图 5 可知,在 HSAHT 和 HDAHT 系统 内,COP 都随着冷凝温度的升高而增大,随着溴 化锂稀溶液质量分数增大而减小.这是由于在放 气范围不变的情况下,冷凝器内温度升高,其向环 境排放的热量减少,COP 增大;而在冷凝温度不 变时,随着溴化锂稀溶液质量分数增大,系统放气 范围减小,从而导致系统 COP 减小.相对于 HSAHT 系统,溴化锂稀溶液质量分数对 HDAHT 系统性能的影响非常明显,COP 随着溴 化锂稀溶液质量分数增加而迅速减小.这是由





Fig. 3 The influence of the evaporator and absorption temperature on the system's COP





Fig. 4 The influence of the high pressure generator temperature and the middle mass fraction of lithium bromide solution on the system's COP



- 图 5 低压再生器温度和溴化锂稀溶液质量分数 对系统 COP 的影响
- Fig. 5 The influence of the low pressure generator temperature and the mass fraction of weak lithium bromide solution on the system's COP

于在溴化锂溶液中间质量分数不变的情况下,随着溴化锂稀溶液质量分数增加,低压再生器所需的热量迅速减少,其作用减弱,从而使得高压再生器获得的蒸汽9所放出的冷凝热没法得到有效利用,导致系统 COP 迅速减小.

3 结 论

本文以溴化锂溶液为工质,采用数值计算的 方法对双再生器型高温吸收式热变换器进行了模 拟计算,结果发现,系统性能系数 COP 随着蒸发 温度、低压再生器温度和溴化锂溶液中间质量分 数的升高而增大,随着吸收温度、高压再生器温度 和溴化锂稀溶液质量分数的升高而减小.在适合 的操作条件下,本循环的 COP 达到了 0.61,是单级高温吸收式热变换器的 1.2 倍.这些规律将为高温吸收式热变换器设计、系统优化与工业开发提供必要的理论依据.

参考文献:

- [1] MA Xue-hu, CHEN Jia-bin, LI Song-ping, et al. Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant
 [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(7): 797-806.
- [2] Tierney M J. Options for solar-assisted refrigeration-Trough collectors and double-effect chillers [J].
 Renewable Energy, 2007, 32(2):183-199.
- LIU Y L, WANG R Z. Performance prediction of a solar/gas driving double effect LiBr-H₂O absorption system [J]. Renewable Energy, 2004, 29 (10): 1677-1695.
- [4] JIANG Li-ben, GU Zhao-lin, FENG Xiao, et al. Thermo-economical analysis between new absorption-ejector hybrid refrigeration system and small double-effect absorption system [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(9):1027-1036.

- [5] Gomri R, Hakimi R. Second law analysis of double effect vapour absorption cooler system [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49 (11): 3343-3348.
- [6] 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.
- [7] Gomri R. Energy and exergy analyses of seawater desalination system integrated in a solar heat transformer [J]. Desalination, 2009, 249(1):188-196.
- [8] Gomri R. Thermal seawater desalination: Possibilities of using single effect and double effect absorption heat transformer systems [J]. Desalination, 2010, 253(1-3):112-118.
- [9] Kaita Y. Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures [J].
 International Journal of Refrigeration, 2001, 24(5): 374-390.
- [10] Irvine T F Jr, Liley P E. Steam and Gas Tables with Computer Equations [M]. New York: Academic Press, 1984.

Analyses of thermodynamic cycle for double effect absorption heat transformer with high temperature

 $\mathsf{MA} \quad \mathsf{Xue-hu}^* \ , \ \mathsf{LI} \quad \mathsf{Da} \ , \ \ \mathsf{HAO} \quad \mathsf{Zhao-long} \ , \ \ \mathsf{LAN} \quad \mathsf{Zhong} \ , \ \ \mathsf{WANG} \quad \mathsf{Qun-chang} \ , \ \ \mathsf{BO} \quad \mathsf{Shou-shi}$

(Institute of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new high temperature double effect lithium bromide solution absorption heat transformer (HDAHT) system is presented, which consists of a second effect generator between the generator and condenser of the high temperature single effect absorption heat transformer system (HSAHT). The HDAHT has the unique capability of raising the temperature of high temperature waste heat sources to more useful levels. The influence of the various operating parameters on the system's coefficient of performance (*COP*) for the HDAHT is simulated. It is found that the *COP* increases when the evaporator temperature, low pressure generator (LPG) temperature and the intermediate concentration of lithium bromide increase and decreases with increments of the absorption temperature, high pressure generator (HPG) temperature and the weak concentration of lithium bromide. In certain operating conditions, the *COP* of HDAHT system can be 20% more than that of the HSAHT, reaching to 0.61. The obtained results can be helpful to improving the HDAHT system performance and making the design of the system optimum.

Key words: double effect generator; absorption heat transformer; lithium bromide solution; coefficient of performance