

# 利用吸收式热泵系统回收啤酒生产中的废热

黄 辉 莉

(化工与生化工程系)

## 摘 要

本文设想利用吸收式热泵系统回收啤酒厂酿造中产生的废热,用于加热投料用水.这对年产  $4 \times 10^4$  t 啤酒的工厂,年均可节约原煤  $> 500$  t.

## 一、前 言

目前,一些啤酒厂对酿造中产生的大量二次蒸汽未加以利用,造成了能源浪费.

现以  $4 \times 10^4$  t/年啤酒厂工艺设计为依据进行讨论.该厂糖化车间的热量消耗和可利用的低温热源,如表 1 所示.

表 1

耗热量与 总量比	总加热蒸汽					低温热源 (二次蒸汽)
	加热糖化用水	加热洗槽用水	糊化过程	糖化过程	麦汁煮沸时	
耗热量	19.98	39.79	22.32	10.00	114.03	84.85
占总量 百分比(%)	9.67	19.27	10.80	4.80	55.20	41.10

从表 1 可知,煮沸时二次蒸汽带走的热量占总加热蒸汽热量的 41.1%,这是一个相当大的数字,为变废为宝、节约能源,笔者认为可采用热泵系统回收废热,将回收的热量用于加热投料用水.

## 二、热泵系统工作原理及工艺流程

**1. 工作原理** 图 1 所示低温吸收式热泵系统是利用具有一定温度的外热源(二次蒸汽余热)来加热而工作的.系统中使用的工质是吸收剂(溴化锂)和制热剂(水),制热剂和吸收剂组成一定浓度的溶液,当这些溶液在装置中所处的压力和温度变化时,将使其中制热剂(又称热剂水)循环,从而获得制热效应.

本文1987年6月12日收到.

**2. 工艺流程** 如图1所示, 热泵系统利用二次蒸汽同时加热再生器 $R$ 和蒸发器 $E$ 。在蒸发器中的热剂水吸收导入的二次蒸汽余热热量而汽化, 蒸汽进入吸收器 $A$ 被 $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ 浓溶液吸收变为稀溶液, 利用吸收过程中放出的溶解热和凝结热加热冷水, 冷水汽化, 蒸汽从吸收器顶部导出用于生产。浓溶液吸收了蒸汽所变成的稀溶液通过回收器进入再生器, 被二次蒸汽加热。由于在相同压力下, 水的沸点低于溴化锂的沸点, 溶液中的热剂水沸腾汽化, 蒸汽进入冷凝器 $C$ , 在冷凝器中冷凝成热剂水, 经泵加压至蒸发器。在再生器中放出水蒸汽的稀溶液变成浓溶液, 经泵升压后, 导入吸收器。这样完成了一个循环过程。溶液和热剂水不断循环, 吸收器就不断提供热量, 加热冷水产生蒸汽, 用于生产。

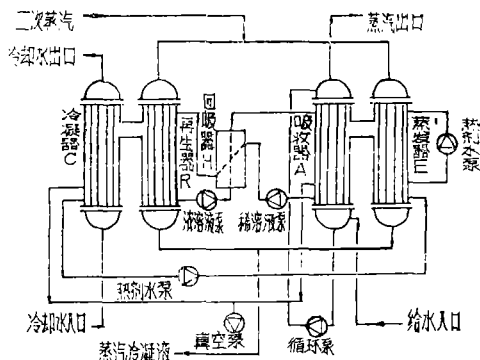


图1 低温吸收式热泵系统流程

### 三、吸收式热泵循环在 $p$ - $t$ 图上的表示

设所回收的二次蒸汽的凝结温度为 $100^\circ\text{C}$ , 吸收其潜热, 用以产生 $110^\circ\text{C}$ 水蒸汽。

首先, 确定吸收剂在每个设备的状态参数。(1) 冷凝器内冷凝温度 $t_c$ 与冷凝压力 $P_c$ : 取冷却水进口温度 $t_{w1}=15^\circ\text{C}$ , 出口温度 $t_{w2}=32^\circ\text{C}$ , 为保证较好的传热过程, 设冷凝温度 $t_c$ 与冷却水出口温度 $t_{w2}$ 之差 $\Delta t_c=3^\circ\text{C}$ , 则 $t_c=35^\circ\text{C}$ 。查 $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ 平衡状态图, 冷凝温度 $t_c=35^\circ\text{C}$ 下的冷凝压力 $P_c=5290\text{Pa}^{[1]}$ 。(2) 蒸发器内蒸发温度 $t_E$ 与蒸发压力 $P_E$ : 为保证正常传热, 蒸发温度应低于二次蒸汽的冷凝温度 $3-5^\circ\text{C}$ , 取温差 $\Delta t_E=5^\circ\text{C}$ 。则蒸发温度 $t_E=100-5=95^\circ\text{C}$ 。查 $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ 平衡状态图, 该温度下的蒸汽压力 $P_E=77418\text{Pa}^{[1]}$ 。(3) 再生器内出口溶液浓度 $x_1$ 及温度 $t_1$ : 同理, 再生器出口温度与二次蒸汽冷凝温度之差 $\Delta t_R$ , 取 $\Delta t_R=6^\circ\text{C}$ 。再生器出口温度 $t_1=100-6=94^\circ\text{C}$ , 查 $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ 平衡状态图, 得浓溶液出口浓度 $x_1=68\%^{[1]}$ 。(4) 吸收器内出口稀溶液浓度 $x_2$ 及温度 $t_2$ : 同理, 稀溶液温度应高于产生的蒸汽温度, 取温差 $\Delta t_A=5^\circ\text{C}$ 。则出口稀溶液温度 $t_2=110+5=115^\circ\text{C}$ 。查 $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ 平衡状态图, 得稀溶液浓度 $x_2=45\%^{[1]}$ 。

依上述状态参数, 在 $P$ - $t$ 图上绘出吸收式热泵循环过程, 如图2所示。

### 四、设计计算(主要设备的热交换量的计算)

设 $W$  ( $\text{kg/h}$ ) 为蒸发器蒸发时的热剂水蒸汽量;  $W_1$  ( $\text{kg/h}$ ) 为浓溶液的循环量;  $W_2$  ( $\text{kg/h}$ ) 为稀溶液的循环量。则

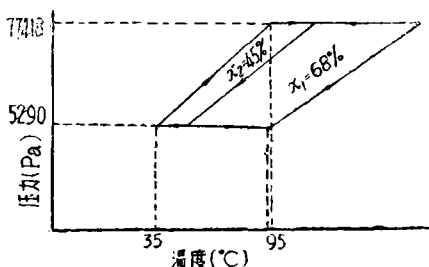


图2  $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ 平衡状态图

$$W_1 = \frac{x_2}{x_1 - x_2} \cdot W = \frac{45\%}{68\% - 45\%} \cdot W = 1.96W \quad (1)$$

$$W_2 = \frac{x_1}{x_1 - x_2} \cdot W = \frac{68\%}{68\% - 45\%} \cdot W = 2.96W \quad (2)$$

1. 溶液回吸器的热交换量  $Q_H$  (kJ/h): 取浓溶液温度效率  $\phi = 0.8$ , 回吸器出口浓溶液的温度  $t_{2R}$ , 焓  $i_{2R}$ ; 回吸器进口浓溶液的焓  $i_1$ , 其出口稀溶液温度  $t_{4R}$ ; 回吸器出口稀溶液的焓  $i_{4R}$ , 其进口稀溶液的焓  $i_2$ , 如图 3 所示。

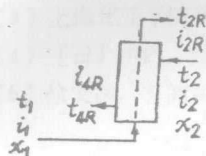


图 3

$t_{2R} = t_1 + \phi(t_2 - t_1) = 94 + 0.8(115 - 94) = 110.8^\circ\text{C}$ , 查 LiBr 的  $i-x$  图,  $i_{2R} = 32958 \text{ kJ/kmol}$ ,  $i_2 = 38255 \text{ kJ/kmol}$ ,  $i_1 = 30899 \text{ kJ/kmol}^{[2]}$ , 所以

$$Q_H = W_1(i_{2R} - i_1) = 1.96W(32958 - 30899) = 4037W, \quad (3)$$

$$i_{4R} = i_2 - \frac{Q_H}{W_2} = 38255 - \frac{4037W}{2.96W} = 36891 \text{ kJ/kmol}.$$

故  $t_{4R} = 107^\circ\text{C}^{[2]}$ .

2. 蒸发器的热交换量  $Q_E$  (kJ/h): 如图 4 所示, 进入的热量为  $Q_E + W \cdot i_{wc}$ , 移出的热量为  $W \cdot i_{SE}$ . 其中,  $i_{SE}$  为相当于蒸发压力的饱和蒸汽之焓,  $i_{SE} = 234535 \text{ kJ/kmol}^{[3]}$ ;  $i_{wc}$  为相当于凝结压力的饱和蒸汽之焓,  $i_{wc} = 12507 \text{ kJ/kmol}^{[3]}$ . 根据热量平衡

$$Q_E = W(i_{SE} - i_{wc}) = (234535 - 12507)W = 222028W \quad (4)$$

3. 吸收器的热交换量  $Q_A$  (kJ/h): 如图 5 所示, 输入的热量为  $W \cdot i_{SE} + W_1 \cdot i_{2R}$ , 输出的热量为  $Q_A + W_2 \cdot i_2$ . 根据热量平衡

$$\begin{aligned} Q_A &= W \cdot i_{SE} + W_1 \cdot i_{2R} - W_2 \cdot i_2 \\ &= (234535 + 1.96 \times 32958 - 2.96 \times 38255)W = 185898W \end{aligned} \quad (5)$$

4. 再生器的热交换量  $Q_R$  (kJ/h): 如图 6 所示, 输入的热量为  $Q_R + W_2 \cdot i_{4R}$ , 输出的热量为  $W \cdot i_{sc} + W_1 \cdot i_1$ . 其中,  $i_{sc}$  为过热蒸汽热焓,  $i_{sc} = 272202 \text{ kJ/kmol}^{[2]}$ . 根据热量平衡

$$\begin{aligned} Q_R &= W \cdot i_{sc} + W_1 \cdot i_1 - W_2 \cdot i_{4R} \\ &= (272202 + 1.96 \times 30899 - 2.96 \times 36891)W = 223567W \end{aligned} \quad (6)$$

5. 冷凝器的热交换量  $Q_C$  (kJ/h): 如图 7 所示, 输入的热量为  $W \cdot i_{sc}$ , 输出的热量为  $Q_C + W \cdot i_{wc}$ . 根据热量平衡

$$Q_C = W(i_{sc} - i_{wc}) = (272202 - 12507)W = 259695W \quad (7)$$

热剂水蒸汽  $W$  的计算. 由表 1 可知, 向系统提供的二次蒸汽热量  $Q = 84.85 \times 10^5 \text{ kJ/次}$ . 吸收式热泵系统输入的热量为  $(Q_E + Q_R)$ , 输出热量为  $(Q_A + Q_C)$ . 忽略泵的动力损失和系统的热损失, 根据热量平衡:  $Q = Q_E + Q_R = Q_A + Q_C = (185898 + 259695)W = 445593W$ ,  $W = (84.85 \times 10^5) / 445593 = 19.00 \text{ kmol/次} = (19.00 / 1.5) \text{ kmol/h} =$

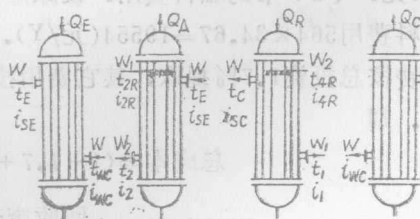


图 4

图 5

图 6

图 7

12.67 kmol/h  $\approx$  1115 kg/h. 将热剂水蒸汽量  $W = 1115$  kg/h 代入式(1)~(7), 结果列于表 2.

表 2

热剂水循环量 $W$ (kg/h)	1115
浓溶液循环量 $W_1$ (kg/h)	2185
稀溶液循环量 $W_2$ (kg/h)	3300
回热器热交换量 $Q_H$ (kJ/h)	51149
蒸发器热交换量 $Q_E$ (kJ/h)	2817535
吸收器热交换量 $Q_A$ (kJ/h)	2355328
再生器热交换量 $Q_R$ (kJ/h)	2837065
冷凝器热交换量 $Q_C$ (kJ/h)	3365647

根据表 2 数据, 可得废热回收效率<sup>[4]</sup>为  $\eta = 1 / \{ 1 + (i_{sc} - i_{wc}) / [i_{se} - i_{2R} + \frac{x_1}{x_1 - x_2} (i_{2R} - i_2)] \} = 1 / \{ 1 + (272202 - 12507) \div [234535 - 32958 + 68 \div (68 - 45) \times (22958 - 38255)] \} = 41.7\%$ .

## 五、讨 论

1. 该热泵系统用于二次蒸汽废热的回收, 减少了加热蒸汽的用量: 由以上计算可知, 系统回收废热产生的热量约为  $23.6 \times 10^5$  (kJ/h), 即  $35.3 \times 10^5$  (kJ/次). 而糖化过程, 加热投料用水耗热量约为  $19.98 \times 10^5$  (kJ/次), 考虑热交换过程的热损失为 20%, 则加热投料用水耗热量为  $23.98 \times 10^5$  (kJ/次). 可见, 系统回收废热产生的热量大于加热投料用水的耗热量. 因此, 采用热泵系统产生的蒸汽可以满足加热投料用水的要求, 从而节省了加热蒸汽用量.

2. 回收废热, 节省原煤用量: 由上计算可知, 废热回收效率为 41.7%, 实际回收废热为  $35.3 \times 10^5$  kJ/次. 设锅炉效率为 0.68, 每公斤原煤低位发热量为 22154 kJ, 回收的废热折合原煤用量为:  $(35.3 \times 10^5) / (0.68 \times 22154) = 235$  (kg/次).  $4 \times 10^4$  t/Y 啤酒生产, 每天按糖化八次计, 年工作日为 300d, 则每年节约原煤用量为 564 t.

3. 热泵系统设备投资回收年限:<sup>[5]</sup> (1) 设备总投资. 设系统包括 4 台换热器, 7 台液泵, 约 43000 元, 设备安装费按设备投资的 10% 计为 4300 元, 总投资共计约  $43000 + 4300 = 47300$  元. (2) 节约燃料费用. 设原煤单价为 34.67 元/t, 每年节约原煤用量为 564 t, 则节约燃料费用  $564 \times 34.67 \approx 19554$  (元/Y). (3) 总成本. 按设备折旧率按总投资的 6% 提取, 检修费按总投资 1.7% 提取, 其它费用按总投资 1% 提取, 动力费约为 1890 元/Y, 工资忽略不计, 则

$$\text{总成本} = (1 + 1.7 + 6)\% \times 47300 + 1890 \approx 6005 \text{ 元/Y}$$

$$\text{回收年限} = \frac{\text{回收废热总投资}}{\text{回收废热的经济效益}} = \frac{47300}{19554 - 6005} \approx 3.49 \text{ (Y)}$$

所以回收年限约为 3.5 年.

## 参 考 文 献

- [1] 田官靖功著, 王元凯译, 吸收式热泵, 新能源, 7(1982).
- [2] [日] 中内、健二、加藤、征彦著, 吸收式ヒートポンプ, 设计手顺, 化学装置, 25, 10(1983).
- [3] 上海化工学院等院校, 化学工程, 化学工业出版社, (1980).
- [4] [日] 中内、健二、加藤、征彦著, 邹盛欧译, 吸收式热泵设计程序, 化工设备设计, 5(1984).
- [5] 徐文彦, 重油制城市煤气——低温余热能回收利用, 节能, 4(1986).

## Recovery of Waste Heat in Brewage by Use of Absorption Heat Pump

Huang Huili

### Abstract

This paper suggests to recover waste heat in brewage by making use of absorption heat pump system. A considerable amount of waste heat can be thus recovered and utilized for heating of input water. An annual savings of raw coal over 500 tons would be achieved for a brewery of 40000 tons annual output.

### 单 菜 疑 难

#### 单 菜 导 读

#### 单 菜 摘 要