

# 有固相析出的多效两段蒸发系统模型与过程模拟

李玲, 阮奇

(福州大学化学化工学院, 福州 350002)

**[摘要]** 建立了带有冷凝水闪蒸的有固相析出的多效两段蒸发系统的常规设计数学模型, 模型将系统的平衡关系用回归式表达, 使模型可以用计算机编程求解, 避免了手工计算结合查相图的烦琐的计算过程; 利用矩阵方程具有结构清晰和高度模块化的特点, 将系统的物料衡算和热量衡算方程组写成矩阵方程的形式, 只要保留或舍弃矩阵方程中的相关块矩阵, 模型就能代表没有冷凝水闪蒸或没有固相析出的多效两段蒸发系统常规设计模型; 采用迭代法结合矩阵法来求解模型, 算例表明, 冷凝水闪蒸对多效两段蒸发系统是有效的节能措施, 算法收敛速度快、收敛稳定性好。

**[关键词]** 固相析出; 多效两段蒸发数学模型; 冷凝水闪蒸

**[中图分类号]** TQ018 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)10-0054-07

多效蒸发在化工、制药等行业中广泛应用, 许多人对多效蒸发系统模拟计算进行了研究, 国内外已发表的文献<sup>[1-4]</sup>均是对多效并流、多效逆流、多效平流流程进行模拟计算, 未对多效两段蒸发系统进行设计研究。苗春枝<sup>[5]</sup>等人建立了有固相析出的多效两段蒸发过程的物热衡算模型, 并提出结合相图采用逐步逼近方法求解模型。该模型及算法将系统中的气液相平衡关系、固液相平衡关系用相图表示, 利用手工查相图计算各效蒸发水分量及固相析出量, 故无法用计算机编程求解, 计算步骤烦琐、效率低。文献[6,7]分别建立了有固相析出的并流、逆流多效蒸发系统常规设计的数学模型, 将系统的固液相平衡关系用回归式表达, 使得模型可以用计算机编程求解。该模型只适用于有固相析出的并流、逆流多效蒸发系统, 笔者在文献[5]的基础上, 加入冷凝水闪蒸的节能措施, 建立了带有冷凝水闪蒸且有固相析出的多效两段蒸发系统常规设计的数学模型, 探讨求解模型的算法, 利用 Visual Basic 6.0 语言编写计算程序。

## 1 数学模型

### 1.1 工艺流程

带有冷凝水闪蒸的有固相析出的多效两段蒸发系统的流程如图 1 所示。多效部分为  $n$  效, 最后一效  $c(c = n + 1)$  效为浓效。从每一效出来的带有固相的溶液引到旋液分离器进行分离, 分离后的溶液引至后一效蒸发器中继续蒸发。为了进一步利用冷凝水的显热, 图 1 的流程将从前一效冷凝水闪蒸器中流出的温度较高的冷凝水引到后一效温度较低的冷凝水闪蒸器中继续闪蒸。对于溶液的黏度随浓度与温度变化很大的物料, 并流多效蒸发系统越往后效溶液温度越低、浓度越大, 从而导致黏度下降越快, 并由此引起传热系数下降很快, 所以为了提高效率, 末效采用第一效引出的额外蒸汽加热。系统总效数为  $n + 1$  效。

### 1.2 系统物料衡算

假定溶质不挥发, 对图 1 所示流程中任一效 (第  $i$  效) 蒸发液中的溶质  $j$  进行衡算<sup>[6]</sup>, 有

**[收稿日期]** 2007-08-14

**[基金资助]** 福建省教育厅科技基金资助项目 (JB07002)

**[作者简介]** 李玲 (1974-), 女, 福建闽清县人, 福州大学化学化工学院讲师



当  $3 \leq i \leq n$  时,对第  $i-1$  个冷凝水闪蒸器进行热量衡算,可得

$$\left[ \sum_{i=1}^{i-1} D_i - \sum_{i=1}^{i-2} G_i \right] c^* T_{i-2} = G_{i-1} H_{i-1} + \left[ \sum_{i=1}^{i-1} (D_i - G_i) \right] c^* T_{i-1} \\ = G_{i-1} (H_{i-1} - c^* T_{i-1}) + \left[ \sum_{i=1}^{i-1} D_i - \sum_{i=1}^{i-2} G_i \right] c^* T_{i-1}$$

将上式移项整理并改写成

$$G_{i-1} = (D_i + \sum_{i=1}^{i-2} W_i - E) c^* \omega_{i-1} \quad (7)$$

式中

$$\omega_{i-1} = (T_{i-2} - T_{i-1}) / (H_{i-1} - c^* T_{i-1}) \quad (8)$$

#### 1.4 各效传热面积的计算

根据传热速率方程,可得各效蒸发器传热面积的计算式为

$$A_i = Q_i / (K_i \Delta t_i) = D_i r_i / (K_i \Delta t_i) \quad (9)$$

式中,各效的温度差  $\Delta t_i$  按等面积原则进行分配; $A_i$  为第  $i$  效传热面积,  $m^2$ 。

不同于文献[1~3]的是,由于两段蒸发系统中第 1 效到第  $n$  效、第 1 效到第  $c$  效各有总的有效传热温度差  $c_1, c_2$ 。由等面积原则和式(9),可得两段蒸发系统的各效有效传热温度差  $\Delta t_i$  的计算式为

$$\Delta t_1 = \frac{D_1 r_1 / K_1}{\sum_{i=1}^{n+1} D_i r_i / K_i} (c_1 + c_2) \left/ \left( \frac{D_1 r_1 / K_1}{\sum_{i=1}^{n+1} D_i r_i / K_i} + 1 \right) \right. \quad (10)$$

$$\Delta t_i = \frac{D_i r_i / K_i}{\sum_{i=1}^{n+1} D_i r_i / K_i} (c_1 + c_2 - \Delta t_1) \\ (i = 2, 3, \dots, n, c) \quad (11)$$

式中,  $K_i$  为第  $i$  效蒸发器总传热系数,  $W \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$ ;  $r_i$  第  $i$  效加热蒸汽的汽化潜热,  $J \cdot kg^{-1}$ ;

$$c_1 = \sum_{i=1}^n \Delta t_i = T_0 - T_{k1} - \sum_{i=1}^n \Delta_i =$$

$$T_0 - T_{k1} - \sum_{i=1}^n (\Delta'_i + \Delta''_i + \Delta'''_i)$$

$$c_2 = \Delta t_1 + \Delta t_c = T_0 - T_{k2} - \Delta_1 - \Delta_c = \\ T_0 - T_{k2} - (\Delta'_1 + \Delta''_1 + \Delta'''_1) - \\ (\Delta'_c + \Delta''_c + \Delta'''_c)$$

其中,  $T_0$  为加热生蒸汽的饱和温度,  $^\circ C$ ;  $T_{k1}, T_{k2}$  为与第  $n$  效、第  $c$  效相连的冷凝器中二次蒸汽温度,  $^\circ C$ ;  $\Delta'_i$  为第  $i$  效溶液蒸汽压下降引起的温度差损失,  $^\circ C$ ;  $\Delta''_i$  为第  $i$  效液柱静压头引起的温度差损失,  $^\circ C$ ;  $\Delta'''_i$  为第  $i$  效蒸汽在效间流动造成的温度差损失,  $^\circ C$ 。

以上各式中  $\Delta'''_i$  值可取  $1^\circ C$ 。对有固相析出的物系如 NaOH(A) - NaCl(B) 水溶液蒸发,  $\Delta'_i$  及  $\Delta''_i$  用文献[6]的方法可实现编程计算。

#### 1.5 系统相平衡关系

计算  $\alpha_i, \beta_i, \zeta_{ji}, \Delta t_i$  时均需各效溶液的沸点  $t_i$ , 其值可按气液相平衡方程<sup>[6]</sup>计算,即

$$t_i = T_i + \Delta'_i + \Delta''_i \quad (12)$$

此外,  $\alpha_i, \beta_i, \zeta_{ji}$  及  $\omega_{i-1}$  的定义式均与饱和水蒸气的焓  $H_i$  有关,计算  $A_i$  时需知道饱和水蒸气的汽化潜热  $r_i$ 。 $H_i$  与  $T_i$  有关,  $r_i$  与  $T_{i-1}$  有关,为编程计算方便,采用文献[2]的回归式计算  $H_i$  和  $r_i$ ,即

$$H_i = 2474771.0 + 2410.2T_i - 3.8T_i^2,$$

$$r_i = 2466904.9 - 1584.3T_i - 4.9T_i^2$$

蒸发 NaOH(A) - NaCl(B) 水溶液时仅 B 组分 NaCl 会析出,各效中析出的固相量与析出组分 B 在该效的浓度有关<sup>[5]</sup>,笔者用文献[6]的方程计算析出组分 NaCl(B) 的浓度,可用计算机编程计算各效的固相析出量,克服了文献[5]只能靠手工查相图计算的困难,即

$$x_{Bi}^* = (26.277 - 79.724x_{Ai} - 83.482x_{Ai}^2 + \\ 466.46x_{Ai}^3 - 376.22x_{Ai}^4 + \\ 0.10063x_{Ai}t_i - 0.13269x_{Ai}^2t_i + \\ 0.000139t_i^2 - 0.002923t_i) / 1008 \quad (13)$$

式中,  $x_{Bi}^*$  为 NaCl 在 NaOH 溶液中的溶解度(质量分数);  $x_{Ai}, x_{Bi}$  分别为第  $i$  效完成液组分 A, B 的浓度(质量分数)。

## 2 模型求解

多效蒸发系统常规设计是按各效传热面积相等的原则进行的,其计算就是联立求解各效物料衡算式、热量衡算式、相平衡方程式和传热速率方程式等,从而求出  $D_i, W_i, G_{i-1}, N_{ji}, x_{ji}$  和  $A_i$  等参数。上述计算式实质是一个非线性方程组,当效数和组分比较多时,求解比较困难。文献[6,7]中提出的迭代法结合矩阵是求解有固相析出的并流、逆流多效蒸发系统的常规设计模型的高效的算法,故笔者采用迭代法结合矩阵法来求解,即将系统的物料衡算式和能量衡算式写成矩阵方程的形式。有多组分固相析出时矩阵方程变得非常庞大,表达不方便,故笔者只讨论单组分固相析出的情况。

### 2.1 单组分固相析出时系统的物料衡算及热量衡算方程组

因为待蒸发的水溶液中有 A, B 两个溶质组分,





$x_{B0} = 0.165$  的含 NaCl(B) 的 NaOH(A) 水溶液蒸发至  $x_{Ac} = 0.35$  (均为质量分数,其中  $x_{B0}$  为原料液中组分 B 的浓度)。蒸发器为不锈钢制作的循环型蒸发器,液面高度  $l = 1.5 \text{ m}$ 。已知进料量  $F_0 = 6.67 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,进料温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,料液比热  $c_0 = 3.77 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,各效传热系数分别为  $K_1 = 1\,500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $K_2 = 1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $K_3 = 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $K_4 = 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,生蒸汽的温度为  $168.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。系统每年运行  $7\,200 \text{ h}$ ,其余已知设计参数如前面所述。假设各效传热面积相

等,计算下面 2 种情况的加热蒸汽消耗量及各效传热面积等参数:1)与第 3 效蒸发器相连冷凝器中温度为  $49 \text{ }^\circ\text{C}$ ,与第 4 效蒸发器相连冷凝器中温度为  $59.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,没有冷凝水闪蒸;2)与第 3 效蒸发器相连冷凝器中温度为  $49 \text{ }^\circ\text{C}$ ,与第 4 效蒸发器相连冷凝器中温度为  $59.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,有冷凝水闪蒸。

用迭代法结合矩阵法求解,将已知设计参数输入程序并运行,得到模拟计算结果如表 1 所示。表 1 序号栏中 1,2 分别代表算例中的 2 种情况。

表 1 常规设计结果

Table 1 Results of conventional design

序号	$A_i/\text{m}^2$	$D_1/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$W_1/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$W_2/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$W_3/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$W_4/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$N_1/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$N_2/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$N_3/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$N_4/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$E/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	节省蒸汽消耗/%
1	107.9	2.922	1.171	1.055	1.211	0.213	0.300	0.444	0.236	0.001 7	0.286	
2	107.1	2.786	1.024	1.027	1.378	0.256	0.228	0.490	0.261	0.002 4	0.291	4.65

由表 1 的结果可知,对本例四效两段蒸发系统,采用冷凝水闪蒸(序号 2)比无冷凝水闪蒸(序号 1)可节省加热蒸汽消耗量  $4.65\%$ ,而传热面积基本不变。由于多效蒸发系统中加热蒸汽费用占年总费用的主要部分(对于蒸发器材质为不锈钢或碳钢时约占  $88\% \sim 96\%$ <sup>[9]</sup>),故采用冷凝水闪蒸对于多效两段蒸发系统是节省年总费用的有效措施。

本文的常规设计模型是在给定生蒸汽温度  $T_0$  与冷凝器中二次蒸汽的温度  $T_{k1}, T_{k2}$  为定值的条件下,按等面积原则进行设计的,由文献[10~12]可知对于多效蒸发系统,存在最佳的  $T_0$  和  $T_k$  值使系统的总费用最低,所以为了更大程度的降低费用,应该对生蒸汽温度  $T_0$  与冷凝器中二次蒸汽的温度  $T_{k1}, T_{k2}$  进行优化。

## 4 结语

1)建立了带有冷凝水闪蒸的、有固相析出的多效两段蒸发系统的数学模型,通过令矩阵方程中的相关块矩阵为零,矩阵模型可以简化为无固相析出的或无冷凝水闪蒸的多效两段蒸发系统。

2)迭代法结合矩阵法是求解有固相析出的多效两段蒸发系统数学模型的一种新的有效算法,算法收敛速度快、收敛稳定性好。

3)算例表明在多效两段蒸发时采用冷凝水闪蒸措施可节省加热生蒸汽消耗量  $4.6\%$  左右,因此,在多效两段蒸发系统中,应考虑冷凝水闪蒸。

## 参考文献

- [1] 阮奇,黄诗煌,叶长桑,等.多效蒸发系统优化设计目标函数的建立与求解[J].计算机与应用化学,2001,18(1):69-75
- [2] 阮奇,黄诗煌,叶长桑,等.复杂逆流多效蒸发系统常规设计的模型与算法[J].化工学报,2001,52(7):616-621
- [3] 阮奇,陈文波,黄诗煌,等.复杂多效蒸发系统的数学模型与矩阵解法[J].中国工程科学,2001,3(4):36-41
- [4] Hisham T El-Dessouky, Hisham M. Ettouney, Faisal Mandani. Performance of parallel feed multiple evaporation system for seawater desalination[J]. Applied Thermal Engineering, 2000(20):1679-1706
- [5] 苗春枝,任光平,王红旺.有固相析出的多效两段蒸发过程的物热衡算方法[J].内蒙古石油化工,1998,24(4):86-89
- [6] 方佳林,阮奇,李微,等.有固相析出的并流多效蒸发常规模型与算法[J].四川大学学报,2002,34(5):106-110
- [7] 李玲,阮奇.有固相析出的逆流多效蒸发系统的新设计方法[J].福州大学学报,2004,32(2):235-241
- [8] 阮奇,叶长桑,黄诗煌.化工原理优化设计与解题指南[M].北京:化学工业出版社,2001.69
- [9] 梁虎,王黎,朱平.多效蒸发系统优化设计研究[J].化学工程,1997,25(6):48-51
- [10] 阮奇,叶长桑,陈文波,等.复杂逆流多效蒸发系统优化设计的模型与算法[J].化工学报,2001,52(8):715-720
- [11] 阮奇,李玲,王勇,等.并流多效蒸发淡碱浓缩工艺优化设计研究[J].纺织学报,2004,25(6):49-52
- [12] 李玲,阮奇,方佳林,等.有固相析出的并流多效蒸发系统优化设计研究[J].四川大学学报(工程科学版),2002,34(6):61-66

# The model and process simulation of multi-effect two stage evaporation system with solid separation

Li Ling, Ruan Qi

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

[**Abstract**] A mathematical model of conventional design for the multi-effect two stage evaporation system with condensed water flash and solid separation was established. The equilibrium was correlated to equation and the model could be solved with computer easily. Then the complex manual calculating was avoided. Mass balance and energy balance equations of the system were expressed in matrix equation that has the advantage of clear structure and high modularization. By holding or omitting correlative block-matrix in matrix equation, matrix equation could be used to describe the multi-effect two stage evaporation system without condensed water flash or solid separation. The model was solved by combining matrix method with iteration method. The practical example indicated that condensed water flash is an effective method to save energy. And the algorithm increases the convergence speed and stability.

[**Key words**] solid separation; mathematical model of multi-effect two stage evaporation; condensed water flash