

# 第五章 蒸发

## § 1 概述

### 5-1 蒸发的用途和分类

在日常生活中，熬中药、煲猪骨汤，许多人都操作过。抓中药时，医生会嘱咐，三碗水煎成一碗水。熬中药的过程，既是一个中药有效成份的溶解过程，又是一个蒸发过程。广东人煲的“老火靚汤”这一过程，也包含了蒸发过程。

什么叫蒸发？**将溶液加热，使其中部分溶剂气化并不断去除，以提高溶液中的溶质浓度的过程即蒸发。**熬中药时，如果不是三碗水煎成一碗水，则三碗水中的药物浓度不高，药效就不够。如图 5-1 所示。

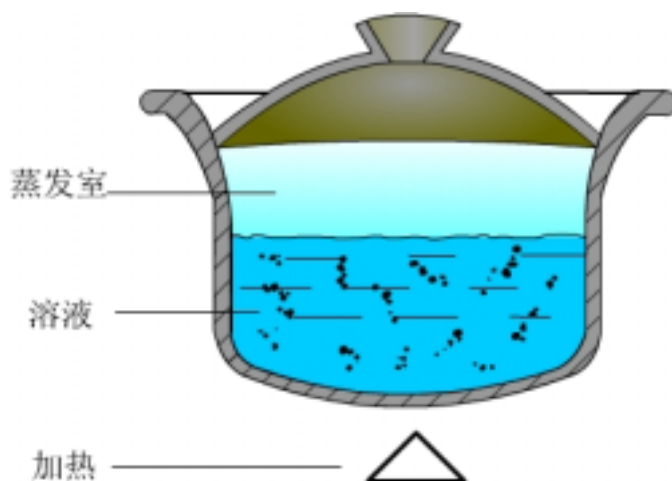


图 5-1 蒸发示意图

在化工生产中，NaOH 溶液增浓、稀糖液的浓缩、由海水蒸发并冷凝制备淡水等都是采用蒸发操作来实现的。

蒸发的方式有自然蒸发和沸腾蒸发。**自然蒸发是溶液中的溶剂在低于沸点下汽化，例如海盐的晒制。沸腾蒸发是使溶液中的溶剂在沸点时汽化，在溶液各个部分都同时发生汽化现象。**因此，沸腾蒸发的速率远超过自然蒸发速率。

蒸发可按蒸发器内的压力分为常压、加压和减压蒸发。减压蒸发又称为真空蒸发。按二次蒸汽利用的情况分为单效蒸发和多效蒸发。若将所产生的二次蒸汽不再利用或被利用于蒸发器以外这种操作，称为单效蒸发；如果将二次蒸汽引至另一压力较低的蒸发器加热室，作为加热蒸汽来使用，这种操作称为多效操作蒸发。

## § 2 单效蒸发

### 5-2 单效蒸发衡算方程

#### 一、蒸发器的物料衡算

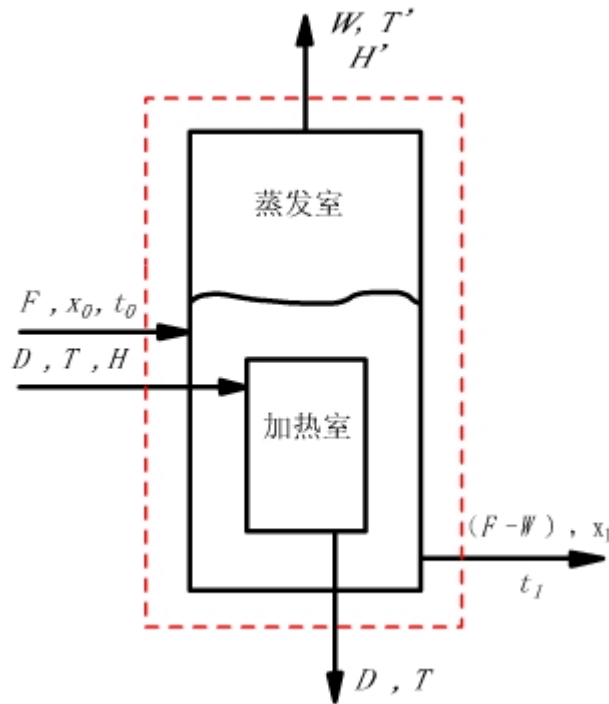


图 5-2 单效蒸发衡算示意图

在蒸发操作中，单位时间内从溶液蒸发出来的水量，可通过物料衡算确定。现对图 5-2 所示的单效蒸发器作溶质的物料衡算。在稳定连续操作中，单位时间进入和离开蒸发器的溶质数量应相等，即

$$\underline{Fx_0 = x(F - W)x_1} \quad \dots\dots\dots(1)$$

由此可求得水份蒸发量为：

$$\underline{W = F \left( 1 - \frac{x_0}{x_1} \right)} \quad \dots\dots\dots(1a)$$

完成液的浓度：

$$\underline{x_1 = \frac{Fx_0}{F - x}} \quad \dots\dots\dots(1b)$$

式中， $F$ ——溶液的进料量， $kg \cdot h^{-1}$ ； $W$ ——水份蒸发量， $kg \cdot h^{-1}$ ；

$x_0$ ——原料液中溶质的浓度，质量分率；

$x_1$ ——完成液中溶质的浓度，质量分率

## 二、蒸发器的热量衡算

对图 5-2 的虚线范围作热量衡算得：

$$DH + FC_F t_0 = WH' + (FC_F - WC_W)t_1 + DC_w T_1$$

$$\text{或 } \underline{D(H - C_w T_1) = W(H' - C_w t_1) + FC_F(t_1 - t_0) + Q_L} \dots\dots\dots (\text{II})$$

式中， $D$  ——加热蒸汽流率， $kg \cdot s^{-1}$ ；

$H, H'$  ——分别是加热蒸汽和二次蒸汽的焓， $J \cdot kg^{-1}$ ；

$C_F, C_W$  ——分别是原料液和水的比热， $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ；

$t_0, t_1$  ——分别是原料温度和溶液的沸点， $K$ ；

$T_1$  ——冷凝液的饱和温度， $K$ ；  $Q_L$  ——蒸发器的热损失， $J \cdot s^{-1}$ ；

$$H - C_w T_1 = \gamma, \quad H' - C_w T_1 = \gamma'$$

$$D\gamma = W\gamma' + FC_F(t_1 - t_0) + Q_L$$

$$\underline{D = \frac{W\gamma' + FC_F(t_1 - t_0) + Q_L}{\gamma}} \dots\dots\dots (\text{IIa})$$

式中， $\gamma, \gamma'$  ——分别为加热蒸汽与二次蒸汽的汽化潜热， $J \cdot kg^{-1}$ ；

若原料液在沸点下进入蒸发器，即  $t_0 = t_1$ ，再忽略热损失，即  $Q_L = 0$ ，则式 (IIa) 得：

$$\frac{D}{W} = \frac{\gamma'}{\gamma} \dots\dots\dots (\text{IIb})$$

$D/W$  称为单位蒸汽消耗量，即蒸发  $1kg$  水所需蒸汽量， $kg$  蒸汽  $\cdot kg^{-1}$  水

由于二次蒸汽  $\gamma'$  与加热蒸汽  $\gamma$ ，随压力变化不大，即  $\gamma' = \gamma$ ，

$\frac{D}{W} = 1$  即原料液为沸点进料并忽略热损失时，加热蒸汽消耗量与二次蒸汽生成量相等。

### 5-3 蒸发衡算计算举例

【例 5-1】在单效蒸发中，每小时将 2000 kg 的某种水溶液从 10% 连续浓缩到 30%，蒸发操作的平均压力为 39.3kPa，相应的溶液的沸点为 80。加热蒸汽绝压为 196kPa。原料液的比热为 3.77kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。蒸发器的热损失为 12000W。试求：

(1) 蒸发量

(2) 原料液温度分别为 30、80 和 120 时的加热蒸汽消耗量及单位蒸汽消耗量。

解：(1) 蒸发量 由 (1) 式知

$$W = F \left( 1 - \frac{\chi_0}{\chi_1} \right) = 2000 \left( 1 - \frac{0.1}{0.3} \right) = 1333 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

(2) 加热蒸汽消耗量 由 (IIa) 式知

$$D = \frac{W\gamma' + FC_F(t_1 - t_0) + Q_L}{\gamma_1}$$

由附录查得压力为 39.3和196kPa 时的饱和蒸汽的汽化潜热分别为 2320 和 2204 kJ·kg<sup>-1</sup>，原料液温度为 30 时的蒸汽消耗量为：

$$D = \frac{1333 \times 2320 + 2000 \times 3.77 \times (80 - 30) + \frac{12000}{1000} \times 3600}{2204} = 1590 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

单位蒸汽消耗量为：

$$\frac{D}{W} = \frac{1590}{1333} = 1.2$$

原料液温度为 80 时的蒸汽消耗量：

$$D = \frac{1333 \times 2320 + 12000 \times 3.6}{2204} = 1420 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

单位蒸汽消耗量为：

$$\frac{D}{W} = \frac{1420}{1333} = 1.1$$

原料液温度为 120 时的蒸汽消耗量为：

$$D = \frac{1333 \times 2320 + 2000 \times 3.77 \times (80 - 120) + 1200 \times 3.6}{2204} = 1280 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

单位蒸汽消耗量为：

$$\frac{D}{W} = \frac{1280}{1333} = 0.96$$

由以上计算结果得知，原料液的温度愈高，蒸发 1kg 水所消耗的加热蒸汽量愈少

## 5-4 蒸发器传热面积

蒸发器的传热面积可依传热基本方程式求得，即

$$A = \frac{Q}{K\Delta t_m} \quad \dots\dots\dots(III)$$

式中， $A$ ——蒸发器的传热面积， $m^2$ ； $K$ ——蒸发器的传热系数， $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ；

$\Delta T_m$ ——传热的平均温度差， $K$ ； $Q$ ——蒸发器的热负荷或传热速率， $W$ 。

式(III)中的热负荷依热量衡算求取，显然 $Q = D \cdot \gamma$ 。其中传热系数 $K$ 亦可按蒸汽冷凝和液体沸腾对流传热求出间壁两侧的对流传热系数，及按经验估计的垢层热阻进行计算。对于蒸发器的传热温度差，因为蒸发过程是间壁两侧的蒸汽冷凝和溶液沸腾之间的恒温传热，所以 $\Delta T_m = T_1 - t_1$ ，但是水溶液的沸点 $t_1$ 的确定方法还有待于5-6节中进行讨论。

## 5-5 传热面积计算举例

【例 5-2】在单效蒸发器中，将15%的 $CaCl_2$ 水溶液连续浓缩到25%，原料液流量为 $20000kg \cdot h^{-1}$ ，温度为 $75^\circ C$ 。蒸发操作的平均威力为 $49kPa$ ，溶液的沸点为 $87.5^\circ C$ 。加热蒸汽绝压为 $196kPa$ 。若蒸发器的总传热系数 $K$ 为 $1000W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ，热损失为蒸发器传热的5%，试求蒸发器的传热面积和加热蒸汽消耗量。

解：蒸发量为

$$W = F \left( 1 - \frac{x_0}{x_1} \right) = \frac{20000}{3600} \left( 1 - \frac{0.15}{0.25} \right) = 2.22kg \cdot s^{-1}$$

蒸发器的热负荷为：

$$Q = W \cdot \gamma' + FC_F (t_1 - t_0) \times (1 + 5\%)$$

而其中原料液比热为：

$$C_F = C_W (1 - x_0) = 4.187(1 - 0.15) = 3.56kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

由附录查得 $49kPa$ 下饱和蒸汽的汽化潜热 $\gamma'$ 为 $2305kJ \cdot kg^{-1}$ 。所以

$$Q = 1.05 \times \left[ 2.22 \times 2305 \times 10^3 + \frac{20000}{3600} \times 3.56 \times 10^3 \times (87.5 - 75) \right] = 5.63 \times 10^6 W$$

又由附录查得 $196kPa$ 下饱和蒸汽温度为 $119.6^\circ C$ ，汽化潜热为 $2203kJ \cdot kg^{-1}$

所以蒸发器的传热面积为：

$$A = \frac{Q}{K(T_1 - t_1)} = \frac{5.63 \times 10^6}{1000 \times (119.6 - 87.5)} = 175 \text{m}^2$$

加热蒸汽消耗量为：

$$D = \frac{Q}{\gamma} = \frac{5.63 \times 10^6}{2203 \times 10^3} = 2.56 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

## 5-6 因蒸汽压下降引起沸点升高

所谓传热温度差，即加热蒸汽温度  $T$  与溶液沸点温度  $t$  之差，即  $\Delta t_m = T - t$ 。而溶液的沸点由于有了溶质 A 的加入，使蒸气压下降，导致沸点升高，即高于纯水在相同压力下的沸点 ( $t_0$ )，即  $t > t_0$ 。这个沸点升高到起的温度差  $\Delta t_m$  下降，即温度差损失 ( $\Delta$ )。一般教材中讲有三种温度差损失，分别为 '、''、'''。如图 5-3 所示。

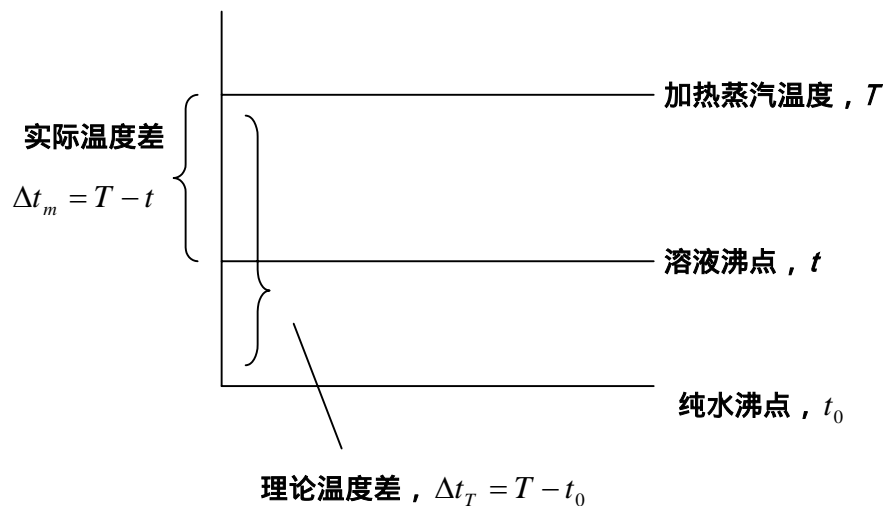


图 5-3 温度差损失示意图

$$\text{温度差损失 } \Delta = \Delta t_T - \Delta t_m = (T - t_0) - (T - t) = t - t_0$$

本教程换一个证法，重点研究溶液沸点升高值。某些无机物溶液在常压下的沸点可查有关化工手册。

非常压下计算无机物溶液的沸点，常采用杜林规则。杜林规则为：某溶液在两种不同压力下，两沸点之差 ( $t_A - t'_A$ ) 与另一标准液体在相应压力下两沸点之差 ( $t_w - t'_w$ )，其比值为常数，即：

$$\frac{t_A - t'_A}{t_w - t'_w} = K \quad \dots\dots\dots (IV)$$

$$\therefore t_A = K(t_w - t_w') + t_A' \quad \dots\dots\dots (IVa)$$

式中,  $t_A, t_A'$ ——在  $P_1$  和  $P_2$  压力下, 无机物溶液的沸点,  $K$  ;

$t_w, t_w'$ ——在  $P_1$  和  $P_2$  压力下, 标准溶液的沸点,  $K$  ;

$K$ ——杜林常数

杜林规则是经验规则, 图 5-4 是以水为标准液体时, 不同浓度 NaOH 水溶液的杜林线图。

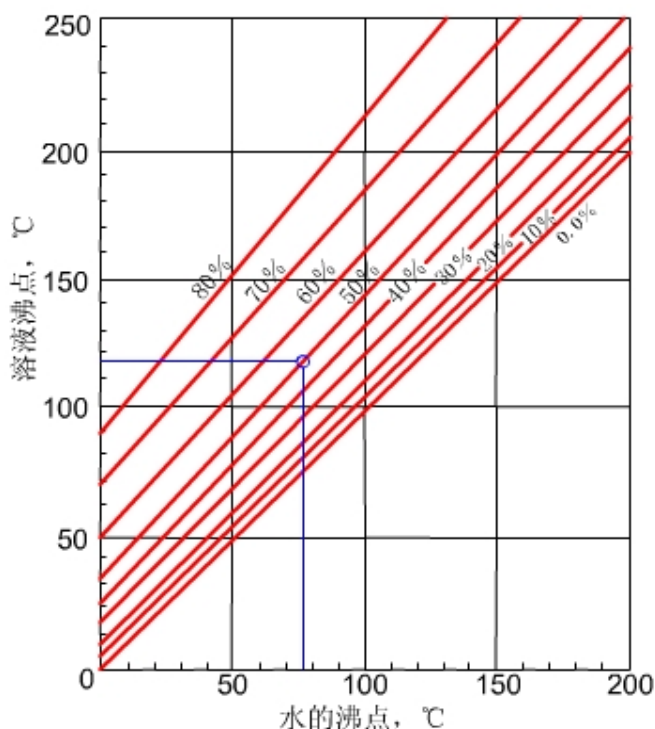


图 5-4 NaOH 水溶液杜林线图

【例 5-3】若浓度为 18.32% (质量) 的 NaOH 水溶液, 在压力为 29.4kPa 时的沸点为 74.4, 试用杜林规则求其在 49kPa 时, 该溶液的沸点  $t_A$  各种压力下水、NaOH 溶液的沸点如表

5-1 所列:

表 5-1 【例 5-3】附表

压力, kPa	NaOH 溶液的沸点,	水的沸点,
101.3	107	100
29.4	74.4	68.7
49		80.9

解: 先依式 (IV) 计算 NaOH 水溶液在浓度为 18.32% (质量) 时的  $K$  值, 即

$$K = \frac{t_A - t_A'}{t_w - t_w'} = \frac{107 - 74.4}{100 - 68.7} = 1.041$$

$$\text{又由 } \frac{t_A - t_A''}{t_w - t_w''} = 1.041, \quad \frac{t_A - 107}{80.9 - 100} = 1.041$$

$t_A = 87.1$

图 5-4 是以水为标准液体时，不同浓度 NaOH 水溶液的杜林线图。可以利用杜林线求取不同浓度的溶液在任一压力下的沸点  $t_A$ 。

## 5-7 溶液静压力引起沸点升高

蒸发器在操作时，器内需维持一定的液面高度 ( $L$ )，因而蒸发器内溶液的压力要高于表面的压力。致使溶液内部的沸点高于液面处的沸点。此沸点之差，即因静压力引起的沸点升高值。

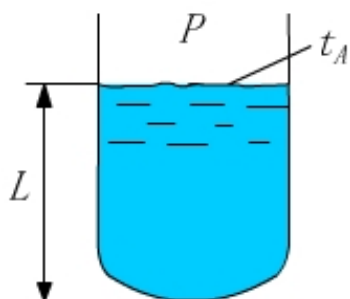


图 5-5 溶液内部压力推导图。

如图 5-5 所示，设溶液的平均压强为  $P_m$ ，操作压强（或二次蒸汽压强）为  $P$ ，溶液内部的压强按液面和底部间的平均压强计算，即

$$P_m = \frac{P + (P + \rho g L)}{2} = P + \frac{\rho g L}{2} \quad \dots\dots\dots (V)$$

式中， $\rho$  ——溶液平均密度， $kg \cdot m^{-3}$ ；

$p$  ——二次蒸汽压强， $Pa$ ；  $L$  ——液层高度， $m$ 。

这样，溶液平均压强对应的沸点，就比操作压强对应的沸点要高。

【例 5-4】蒸发浓度为 50%（质量百分率）的 NaOH 水溶液时，若蒸汽压为  $40kPa$ ，蒸发器内溶液高度为  $L = 2m$ ，溶液密度为  $\rho = 1450kg \cdot m^{-3}$ ，试求此时溶液的沸点。

解：查饱和水蒸气压表得，压力为  $40kPa$  的水蒸气，沸点为  $75^\circ C$ ，以水的沸点  $75^\circ C$ ，查图 5-4 的杜林线图，得  $117^\circ C$ （此为溶液表面的沸点温度）。

若考虑溶液高度  $L = 2m$ ，蒸发器内部压力为：

$$P_m = P + \frac{\rho g L}{2} = 40kPa + \frac{1450 \times 9.81 \times 2}{2} = 54.22kPa$$

压力为  $54.22kPa$  时，查得水蒸汽沸点为  $83.06^\circ C$ ，

因静压力的沸点升高为  $83.06 - 75 = 8.06$

此时溶液沸点为  $117 + 8.06 = 125^\circ C$ 。

因管路阻力，引起的溶液沸点升高值。根据经验，沸点升高值可取  $1 \sim 1.5$ 。此处不再详述。

综上所述，蒸发溶液温度的计算，影响着蒸发传热的温度差  $\Delta t_m$ ，进而影响传热的速率



$Q$ 。对于连续加料的稳定蒸发器而言，传热速率也是稳定的。如果是间歇加料蒸发器，如煎中药、煲汤，却是不稳定的，溶液温度随蒸发的进行而升高，传热温度差在变小。

## § 3 多效蒸发

### 5-8 多效蒸发概述

为了减少蒸汽消耗量，人们考虑利用前一个蒸发器生成的二次蒸汽，来作为后一个蒸发器的加热介质。后一个蒸发器的蒸发室是前一个蒸发器的冷凝器，此即多效蒸发。因为二次蒸汽的压力较前一个加热蒸汽的压力为低。所以后一个蒸发器应在更低的压力下操作，即需有抽真空的装置。

两个蒸发器串联操作，前一个称作一效，后一个称作二效。效数越多，单位蒸汽消耗量越小，如表 5-2 所示。

表 5-1 单位蒸汽消耗量

效数	单效	双效	三效	四效	五效
$(D/W)_{\text{最小}}$	1.1	0.57	0.4	0.3	0.27

### 5-9 多效蒸发流程

#### 一、并流法蒸发流程。

如图 5-6 所示。

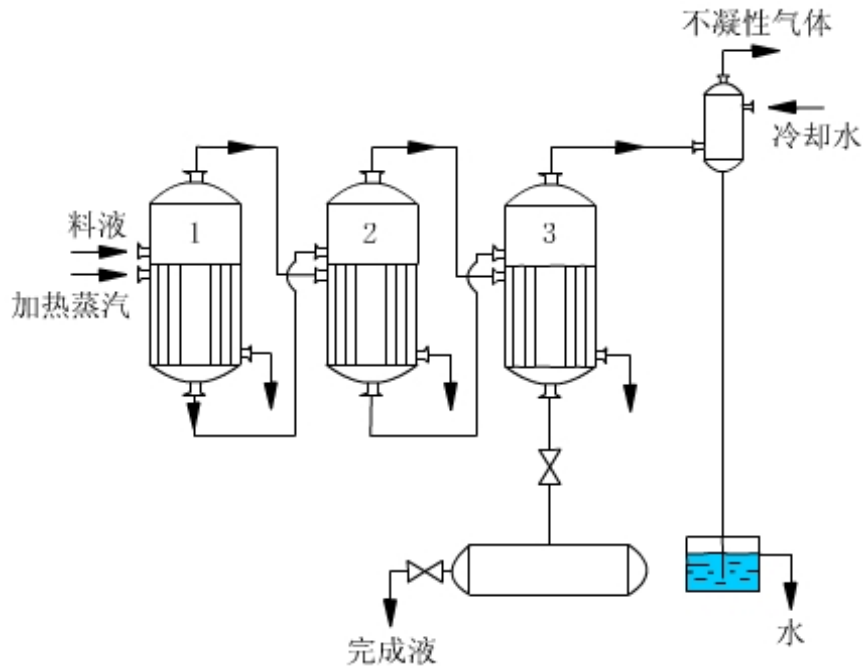


图 5-6 并流三效蒸发流程

加热蒸汽的温度  $T$ ，越来越低，即  $T_1 > T_2 > T_3$

蒸发室操作压力  $P$ ，越来越低，即  $P_1 > P_2 > P_3$

由于蒸发室压力越来越低，则待蒸发溶液的沸点温度  $t$ ，也会越来越低，即  $t_1 > t_2 > t_3$ 。

那么加热蒸发的温度差  $(T_i - t_i)$  才可以维持一定的差值。如果不是抽真空装置，这个加热推动力  $(T_i - t_i)$ ，不可以维持一定值。

待蒸发的溶液浓度  $C$ ，会越来越高，即  $C_1 < C_2 < C_3$ 。

待蒸发的溶液粘度  $\mu$ ，会越来越大，即  $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3$ 。

传热系数  $K$ ，会越来越小，即  $K_1 < K_2 < K_3$ 。传热系数降低是我们不希望的。

并流加料的优点是：

(1) 由于后一效蒸发室的压力较前一效为低，故溶液在效间的输送勿需用泵，就能自动从前效进入后效。

(2) 由于后一效溶液的沸点较前一效为低，故前一效的溶液进入后一效时，会因过热自行蒸发。因而可产生较多的二次蒸汽。

(3) 由末效引出完成液，因其沸点最低，故带走的热量最少，减少了热量损失。

并流加料的缺点是：

由于后一效溶液的浓度较前一效为大，且温度又较低，所以料液粘度沿流动方向逐效增大，致使后效的传热系数降低。

## 二、逆流法蒸发流程

如图 5-7 所示

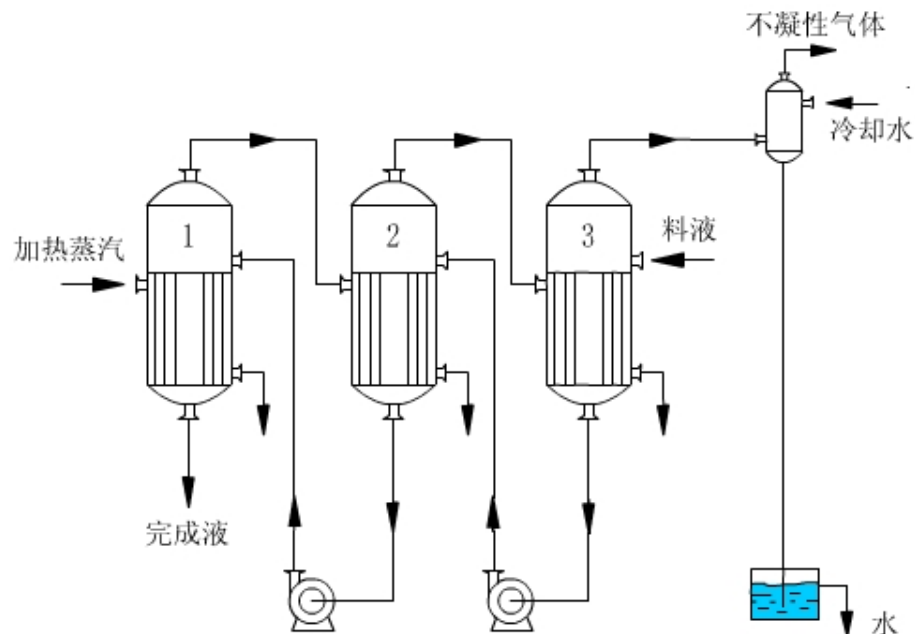


图 5-7 逆流三效蒸发流程

待蒸发的溶液浓度  $C$ ，是越来越低的，即  $C_1 > C_2 > C_3$ 。

待蒸发的溶液粘度  $\mu$ ，会越来越小，即  $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$ 。

粘度大的一效，加热蒸汽温度高，所以各效的粘度值较为接近，传热系数也大致相同，这样蒸发速率大致相同。这正是逆流的优点。当然，效与效之间需要有泵来输送，增加了动力消耗。

## 三、错流法蒸发流程

相当于错流萃取中的错流。各效分别加料和分别出料，蒸汽与二次蒸汽串联流过，如图 5-8 所示。有些教材叫平流法。

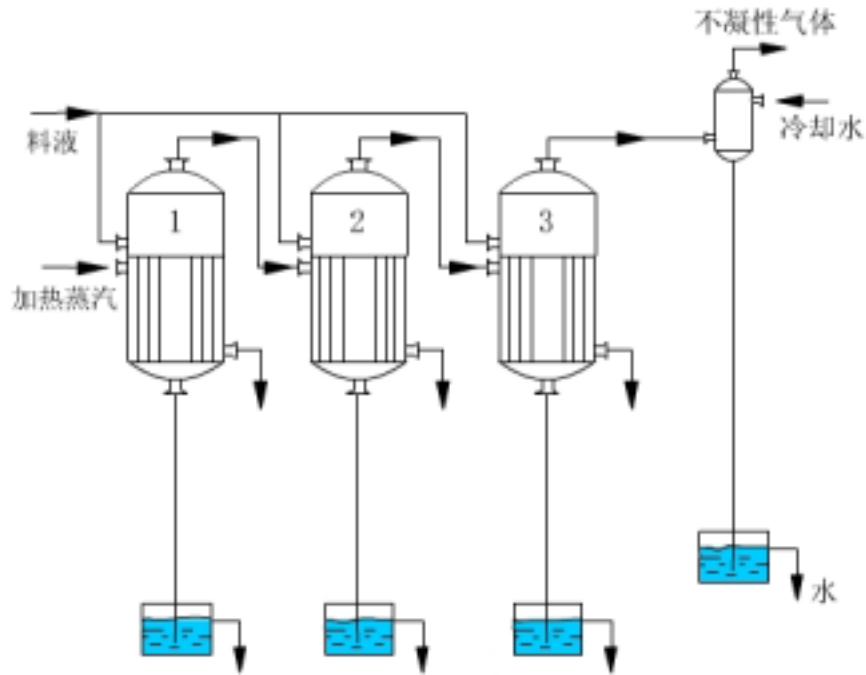


图 5-8 错流法三效蒸发流程

此法适用于在蒸发过程中同时有结晶析出的场合，因其可避开结晶在效间输送时堵塞管道。或用于对稀溶液稍加浓缩的场合。此法的缺点是每效皆处于最大浓度下进行蒸发，所以溶液粘度大，致使传热损失较大；同时各效的温度差损失较大，故降低了蒸发设备的生产能力。

#### 四、多效蒸发的效数

蒸发装置中效数越多，温度损失越大。若效数过多还可能发生总温度差损失等于或大于有效总温度差，而使蒸发操作无法进行。基于上述理由，工业上使用的多效蒸发装置，其效数并不是很多的。一般对于电解质溶液，如 NaOH 等水溶液的蒸发，由于其沸点升高较大，故采用 2~3 效；对于非电解质溶液，如糖的水溶液或其它有机溶液的蒸发，由于其沸点升高较小所用的效数可取 4~6 效；而在海水淡化的蒸发装置中，效数可多达 20~30 效