

根据蒸发时压力的不同,蒸发操作可分为常压蒸发、加压蒸发和减压蒸发。常压蒸发可利用敞口设备,二次蒸汽直接排到大气中。加压蒸发,主要是为了提高二次蒸汽的温度,以提高热能的利用率,同时提高溶液沸点,加大溶液的流动性,以改善传热的效果。工业上的蒸发操作多数采用减压蒸发,这是因为减压蒸发具有以下优点。

① 使溶液的沸点降低。在加热蒸汽压力相同的情况下,可使蒸发器的传热推动力加大,在热负荷一定时,蒸发器的传热面积可以相应减小。

② 可以采用低压蒸汽,或利用废蒸汽做加热蒸汽。

③ 可以蒸发热敏性溶液,即在高温下容易分解、聚合、变质的溶液。

④ 由于操作温度低,热量损失也相应要小。

但采用减压蒸发就要增加真空泵、缓冲罐等辅助设备,并存在着由于沸点降低,溶液黏度增加,导致总的传热系数下降等缺点。尽管如此,工业上的蒸发操作大部分仍是在减压下进行的。

## 第二节 单效蒸发

### 一、单效蒸发的基本原理和流程

单效蒸发的基本原理是通过蒸发器的间壁传热,用饱和水蒸气加热料液,使料液经常保持沸腾状态,将溶剂连续不断地蒸出,料液浓度逐渐提高,从而实现溶液增浓。蒸发器实质上是一种列管换热器,由加热室和分离室组成,加热室内排列着许多加热管,饱和水蒸气进入加热管的管隙,料液进入管内,饱和水蒸气便通过管壁将热量传给料液,同时自身被冷凝。料液受热后,一部分溶剂汽化成为二次蒸汽,从蒸发器顶部移出,余下的则成为浓缩的溶液,称为完成液,从底部引入完成液储槽。

单效蒸发有常压、加压和减压(即真空)等流程。图 5-1 是一个典型单效真空蒸发流程。在加热室 1 中,加热蒸汽在加热室的管隙中冷凝,料液从蒸发室 2 进入管内,一部分受热汽化,成为二次蒸汽,从器顶逸出,进入汽液分离器 3 分离,料液返回到蒸发室内,蒸汽

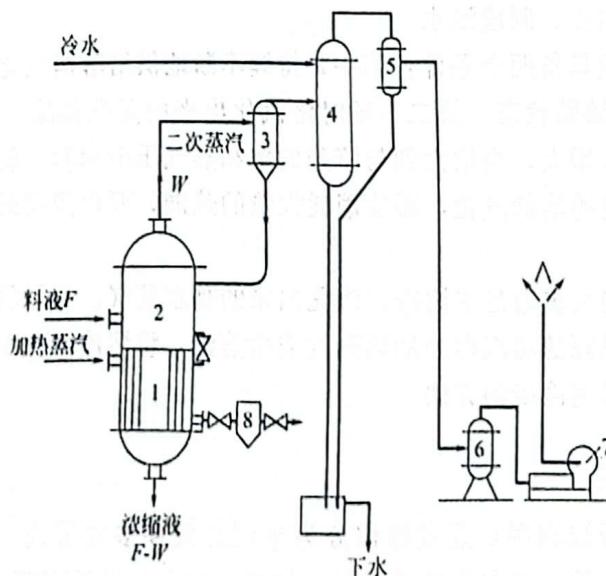


图 5-1 单效真空蒸发流程

1—加热室; 2—蒸发室; 3—二次分离器; 4—混合冷凝器; 5—分离器; 6—缓冲罐; 7—真空泵; 8—冷凝水排除器



进入冷凝器 4 与冷却水混合冷凝排掉。余下的完成液从蒸发器底部排出。真空泵 7 对缓冲罐 6 抽气, 使系统内形成负压, 并将冷凝器内未被冷凝的气体抽出, 经汽水分离器 5 进一步分离后排入大气。

蒸发操作可以间歇进行, 也可连续进行。工业上大多数蒸发操作是连续进行的。

## 二、单效蒸发的计算

日常生产中常用的蒸发计算主要有溶剂的蒸发量计算、加热蒸汽消耗量计算和蒸发所需传热面积计算。这三项计算, 可以依据物料衡算、热量衡算和传热速率方程式来解决。由于工业上蒸发的溶液绝大多数是水溶液, 所以下述讨论都按水溶液计算。

### 1. 水的蒸发量——物料计算

图 5-2 是单效蒸发时物料计算和热量计算的示意图。由于在蒸发过程中, 仅溶剂汽化, 溶质在蒸发前后的质量不变。因此, 以溶质为基准对蒸发器进行物料计算。

设  $F$ ——单位时间内进入蒸发器的原料液量,  $\text{kg/h}$ ;

$W$ ——单位时间内所蒸发的水量,  $\text{kg/h}$ ;

$w_1$ ——原料液溶质的质量分数;

$w_2$ ——完成液溶质的质量分数。

由于原料液中溶质含量等于完成液中溶质含量,

$$\text{则: } Fw_1 = (F - W)w_2 \quad (5-1)$$

将式(5-1)变换, 即可得出单位时间内蒸发水量的计算公式,

$$W = F \left( 1 - \frac{w_1}{w_2} \right) \quad (5-2)$$

并可变形得出完成液浓度的计算公式:

$$w_2 = \frac{F}{F - W} w_1 \quad (5-3)$$

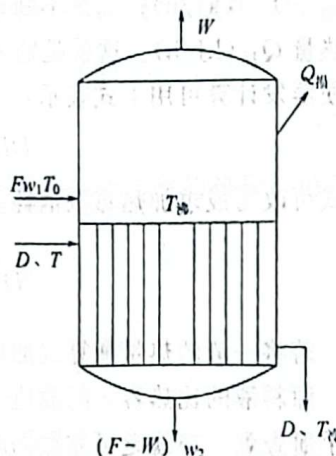


图 5-2 单效蒸发的计算

【例题 5-1】某车间用一单效蒸发器将质量分数为 12% 的 NaOH 溶液浓缩至 30%，已知每小时的处理量为 2t，问所需要蒸发的水量  $W$  和完成液的质量各为多少？

解 将已知的  $F = 2000 \text{ kg/h}$ 、 $w_1 = 0.12$ 、 $w_2 = 0.30$  数值代入式(5-2)得

$$W = F \left( 1 - \frac{w_1}{w_2} \right) = 2000 \times \left( 1 - \frac{0.12}{0.30} \right) = 1200 \text{ kg/h}$$

完成液的质量  $F - W = 2000 - 1200 = 800 \text{ kg/h}$

答：蒸发的水量为 1200kg/h；完成液的流量为 800kg/h。

### 2. 加热蒸汽的消耗量——热量计算

(1) 加热蒸汽消耗量的计算方法 通过对蒸发器的热量衡算可求得加热蒸汽消耗量。依据能量衡算通式, 蒸发器的热量衡算。可用下式表述:

输入蒸发器热量 = 输出蒸发器的热量 + 热量损失

一般地说, 热量衡算应列出进出蒸发器热量的所有因素, 进行平衡计算。

设  $D$ ——加热蒸汽消耗量,  $\text{kg/h}$ ;

$T_0$ ——原料液初温,  $\text{K}$ ;

$T_{\text{沸}}$ ——溶液蒸发时的沸点,  $\text{K}$ ;

$T_{\text{冷}}$ ——冷凝水温度,  $\text{K}$ ;





$c$ ——原料液比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$Q_{\text{损}}$ ——损失于周围的热量,  $\text{kJ}/\text{h}$ ;

$R$ ——加热蒸汽的汽化潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;

$r$ ——二次蒸汽汽化潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

具体分析, 输入蒸发器的热量有原料液带进的热量  $FcT_0$  和加热蒸汽带进的热量  $DR + D \cdot c_{\text{水}} \cdot T_{\text{冷}}$ ; 输出的热量有二次蒸汽带出的热量  $W \cdot r + W \cdot c_{\text{水}} \cdot T_{\text{沸}}$ , 完成液带出的热量  $(F \cdot c - W \cdot c_{\text{水}})T_{\text{沸}}$ , 加热蒸汽的冷凝水带出的热量  $D \cdot c_{\text{水}} \cdot T_{\text{冷}}$  和热损失  $Q_{\text{损}}$ 。若不考虑溶液的浓缩热, 可列出以下热量衡算式:

$$F \cdot c \cdot T_0 + DR + D \cdot c_{\text{水}} \cdot T_{\text{冷}} = W \cdot r + W \cdot c_{\text{水}} \cdot T_{\text{沸}} + (F \cdot c - W \cdot c_{\text{水}})T_{\text{沸}} + D \cdot c_{\text{水}} \cdot T_{\text{冷}} + Q_{\text{损}}$$

但日常生产中的计算, 常用较简便的算法, 本书主要介绍简便的热量计算方法。从蒸发操作的实际情况看, 输入蒸发器的热量主要来源于加热蒸汽冷凝放出的潜热  $D \cdot R$  ( $\text{kJ}/\text{h}$ ), 这部分热量输送到以下三个方面: 一是加热原料, 使原料液由初温  $T_0$  升至沸点  $T_{\text{沸}}$ , 即  $Fc(T_{\text{沸}} - T_0)$  ( $\text{kJ}/\text{h}$ ); 二是不断地供给溶剂汽化所需的潜热  $Wr$  ( $\text{kJ}/\text{h}$ ); 三是补偿散失于周围的热量  $Q_{\text{损}}$  ( $\text{kJ}/\text{h}$ )。这就是输入和输出蒸发器的主要热量, 也是简便热量计算的分析依据。简便蒸发计算可用下式表示:

$$DR = W \cdot r + F \cdot c(T_{\text{沸}} - T_0) + Q_{\text{损}} \quad (5-4)$$

上式可改写成求加热蒸汽消耗量公式:

$$D = \frac{W \cdot r + F \cdot c(T_{\text{沸}} - T_0) + Q_{\text{损}}}{R} \quad (5-5)$$

若将一般的热量衡算式加以推导、整理, 也可简化成式(5-4)和式(5-5)的形式。

原料液的比热容  $c$  的数值, 随溶液性质和浓度的变化而不同。部分液体的比热容可从有关手册查到。在缺乏可靠数据时, 可用下式估算:

$$c = c_{\text{质}} \cdot w_1 + c_{\text{剂}}(1 - w_1) \quad (5-6)$$

式中  $c_{\text{质}}$ ——纯溶质的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$c_{\text{剂}}$ ——纯溶剂的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$w_1$ ——原料液的浓度, 以溶质的质量分数表示。

某些溶质的比热容见表 5-1。若原料液以水为溶剂, 在一般温度范围内, 水的比热容可近似地看做一个定值  $c_{\text{水}} = 4.187 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

表 5-1 某些溶质的比热容

物 质	$\text{CaCl}_2$	$\text{KCl}$	$\text{NH}_4\text{Cl}$	$\text{NaCl}$	$\text{KNO}_3$	$\text{NaNO}_3$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	糖	甘油
比热容/ $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	0.687	0.679	1.52	0.838	0.926	1.09	1.09	1.42	1.295	2.42

(2) 不同加料温度下加热蒸汽消耗的比较 式(5-5)可变换成以下形式:

$$\frac{D}{W} = \frac{r}{R} + \frac{F \cdot c(T_{\text{沸}} - T_0)}{RW} + \frac{Q_{\text{损}}}{RW} \quad (5-7)$$

式中,  $\frac{D}{W}$  称为单位蒸汽消耗量, 其物理意义是: 每蒸发  $1 \text{kg}$  溶剂 (一般为水) 需要消耗加热蒸汽的千克数。

对以下三种加料温度, 随进料状况不同, 其单位蒸汽消耗量也有所不同。



① 沸点进料。溶液预热到沸点再加入蒸发器, 此时  $T_0 = T_{\text{沸}}$ , 代入式(5-7), 忽略热损失, 则该式可写成:

$$\frac{D}{W} = \frac{r}{R} \quad (5-8)$$

由于蒸汽的汽化潜热受压力变化的影响较小, 二次蒸汽与加热蒸汽的汽化潜热相差不大, 故  $\frac{D}{W} \approx 1$ 。

例如, 某水溶液在 373K 时沸腾, 查得在该温度下的汽化潜热  $r = 2258 \text{ kJ/kg}$ , 所用加热蒸汽温度为 406K, 其汽化潜热  $R = 2168 \text{ kJ/kg}$ 。若沸点进料, 则此蒸发器的单位蒸汽消耗量

$$\frac{D}{W} = \frac{r}{R} = \frac{2258}{2168} = 1.04。$$

但实际生产中由于存在热损失等原因, 实际的单位蒸汽消耗量约为 1.1 或更多一些。这就是说: 在沸点进料的情况下, 要蒸发 1kg 的水, 就必须消耗略大于 1kg 的加热蒸汽。

② 低于沸点进料。溶液在低于沸点温度时加入蒸发器,  $T_0 < T_{\text{沸}}$ , 代入式(5-7), 仍不计热损失, 则式(5-7)可写成:

$$\frac{D}{W} = \frac{r}{R} + \frac{F \cdot c(T_{\text{沸}} - T_0)}{RW} \quad (5-9)$$

等式右边第二项即是预热原料液温度由  $T_0$  升至  $T_{\text{沸}}$  所需消耗加热蒸汽的热量。由于加上这部分热量, 致使其单位蒸汽消耗量比沸点进料的高,  $\frac{D}{W} > \frac{r}{R}$ 。

如 [例题 5-2] 中的单位蒸汽消耗量为

$$\frac{D}{W} = \frac{r}{R} = \frac{4638}{3660} = 1.27$$

③ 高于沸点进料。溶液温度高于沸点时加入蒸发器,  $T_0 > T_{\text{沸}}$ 。这种情况主要发生在减压蒸发(真空蒸发)操作中。当溶液进入蒸发器后, 温度迅速降到沸点, 放出多余热量, 使一部分溶剂汽化。由于这一部分溶剂蒸发不消耗加热蒸汽, 所以单位蒸汽消耗量将减少,  $\frac{D}{W} < \frac{r}{R}$ 。这种由于溶液的初温高于蒸发器压力下溶液沸点而放出的热量, 使部分溶剂自动汽化的现象称为自蒸发。

综上所述, 高于沸点进料可以引起溶液自蒸发, 节省加热蒸汽, 所以工业上的蒸发操作普遍使用减压蒸发(真空蒸发)。

**【例题 5-2】** 若 [例题 5-1] 中, 溶液的沸点是 353K, 加热蒸汽压力 200kPa, 原料液的比热容  $3.77 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。不计热损失, 试求在以下三种情况下加热蒸汽消耗量及单位蒸汽消耗量:

- ① 原料液在 293K 时加入蒸发器;
- ② 原料液在沸点时加入蒸发器;
- ③ 原料液在 393K 时加入蒸发器。

已知:  $c = 3.77 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$   $T_{\text{沸}} = 353 \text{ K}$   $W = 1200 \text{ kg/h}$   $Q_{\text{损}} = 0$

从附录中查得, 加热蒸汽压力为 199.95kPa 时的汽化潜热  $R = 2202.7 \text{ kJ/kg}$ , 温度为 353K 时二次蒸汽的汽化潜热  $r = 2308.3 \text{ kJ/kg}$ 。

求:  $D$  及  $\frac{D}{W}$ 。





解 ①  $T_0 = 293 \text{ K}$

$$D = \frac{W_r + Fc(T_{\text{沸}} - T_0) + Q_{\text{再}}}{R}$$

$$= \frac{1200 \times 2308.3 + 2000 \times 3.77 \times (353 - 293)}{2202.7}$$

$$= 1463 \text{ kg/h}$$

$$\frac{D}{W} = \frac{1463}{1200} = 1.22$$

②  $T_0 = 353 \text{ K}$

$$D = \frac{W_r}{R}$$

$$= \frac{1200 \times 2308.3}{2202.7} = 1258 \text{ (kg/h)}$$

$$\frac{D}{W} = \frac{1258}{1200} = 1.05$$

③  $T_0 = 393 \text{ K}$

$$D = \frac{1200 \times 2308.3 + 2000 \times 3.77 \times (353 - 393)}{2202.7}$$

$$= 1121 \text{ (kg/h)}$$

$$\frac{D}{W} = \frac{1121}{1200} = 0.93$$

### ※3. 蒸发器传热面积的计算

蒸发器的传热面积可以用传热速率方程式计算。

即: 
$$A = \frac{Q}{K \cdot \Delta T} \quad (5-10)$$

式中  $A$ ——蒸发器的传热面积,  $\text{m}^2$ ;

$Q$ ——单位时间通过传热面的热量,  $\text{W}$  或  $\text{J/s}$ ;

$K$ ——蒸发器的传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  或  $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$\Delta T$ ——蒸发器传热温度差,  $\text{K}$ 。

几个数据的求法如下。

(1) 传热量  $Q$  在蒸发过程中, 冷凝水一般是在饱和温度下排出。也就是说, 蒸发过程是利用了加热蒸汽的冷凝潜热, 即  $Q = D \cdot R$ 。

(2) 传热系数  $K$  蒸发器的传热系数  $K$  一般由实验确定。表 5-2 列出了几种常用蒸发器  $K$  值的大致范围, 可查阅。

表 5-2 蒸发器传热系数的经验数据范围

蒸发器的形式				传热系数 $K$ / $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	蒸发器的形式				传热系数 $K$ / $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
管状	直	外部加热式 (长管式)	自然循环	1160~5800	管状	直	内部加热式	标准	580~3500
加热	管		强制循环	2300~7000	加热	管		强制循环	1160~5800
方式	式		无循环模式	580~5800	方式	式		悬筐式	580~3500

(3) 温度差  $\Delta T$  蒸发器内的传热一般属于恒温传热, 加热室内间壁两侧的流体均发生相变, 两种流体在传热过程中的温差不变。

