

7.1概述

7.1.1蒸发操作的目的是方法

蒸发：含有不挥发性溶质的溶液，在沸腾条件下受热，使部分溶剂汽化为蒸汽的操作。

过程的实质是热量传递。

$$Q = KA\Delta t = KA(T - t)$$

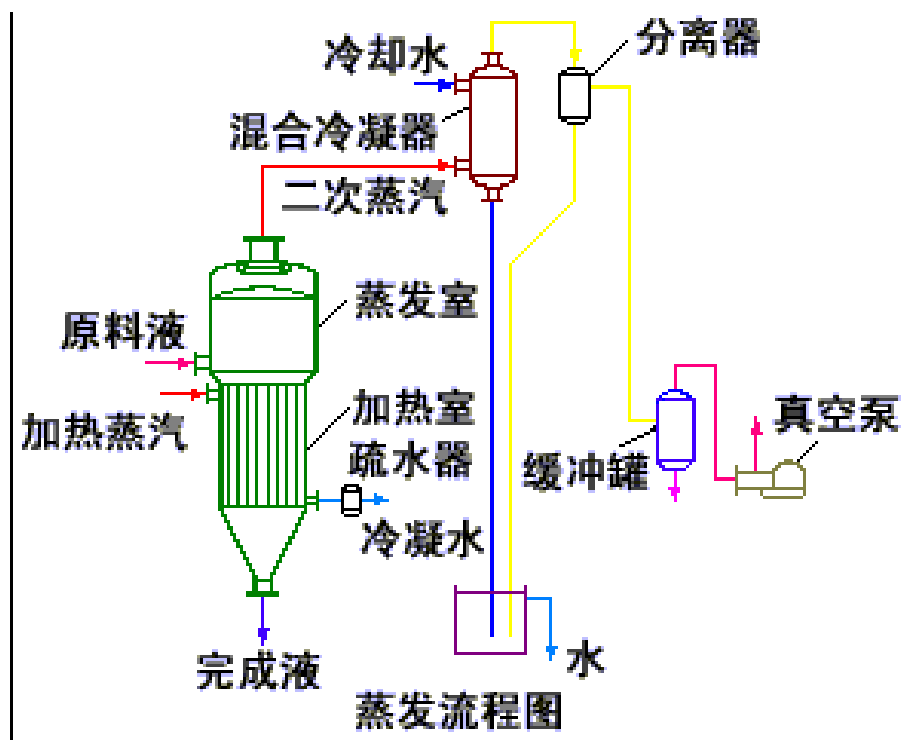
其中： T —加热蒸汽的温度；

t —溶剂沸点的温度

从加热蒸汽到二次蒸汽，是高温位蒸汽向低温位蒸汽的转化，温位的降低用于两部分：

- (1) 传热必须的推动力；
- (2) 溶液的温升。

$T=133^{\circ}\text{C}$, $t^0=100^{\circ}\text{C}$,
 $t=120^{\circ}\text{C}$,
则 $\Delta t=133-120=13^{\circ}\text{C}$
传热推动力，称有效温差；而 $\Delta=20^{\circ}\text{C}$ ，称为温差损失。



7.1.2蒸发的目的

- (1)获得浓缩的溶液，直接作为化工产品或半成品；
- (2)与结晶联合操作以获得固体溶质；
- (3)脱除杂质,制取纯净的溶剂。

7.1.3蒸发操作的特点

(1)**经济方面** 蒸发操作是大量耗热的过程，节能是蒸发操作应予考虑的重要问题。

(2)**过程方面** 沸腾传热应控制在核状沸腾。

(3)**物料方面** 浓溶液在加热面上析出溶质而形成垢层，使传热过程恶化；溶液的某些性质，如热敏性，黏度的上升等，对蒸发器的结构设计提出了特殊的要求。

7.2 蒸发设备

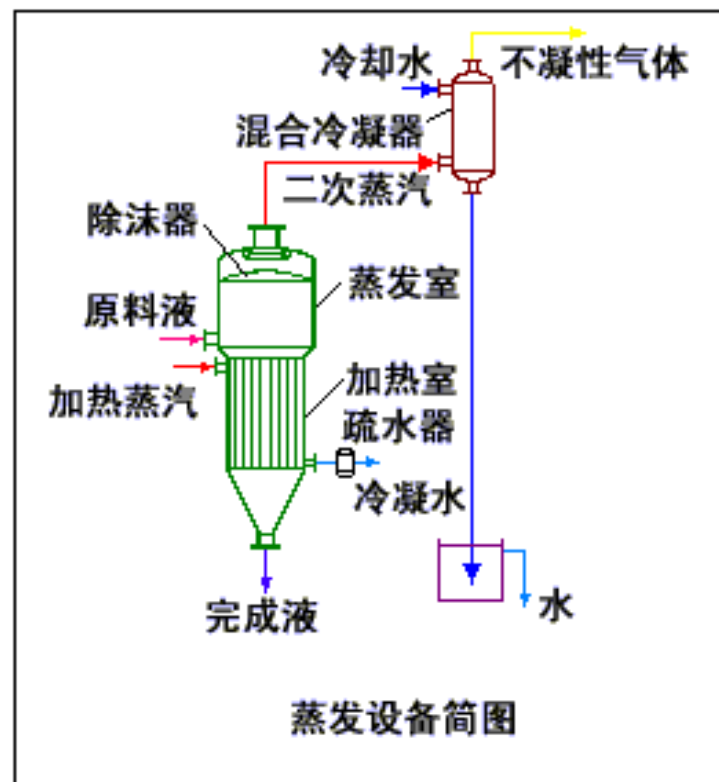
7.2.1 各种蒸发器

蒸发器的主要构件:

- (1) 加热室;
- (2) 流动（循环）通道;
- (3) 汽液分离空间（蒸发室）。

蒸发辅助设备:

- (1) 除沫器;
- (2) 冷凝器;
- (3) 疏水器。



中央循环管式

优点：结构紧凑，制造方便，操作可靠，投资少，循环速度较低，但尚可处理黏性及生垢溶液。

缺点：清洗维修不方便，蒸发器内溶液浓度接近于完成液浓度，溶液黏度总是较大，影响传热。



外加热式蒸发器

优点：适应性较大，加热面积不受限制（可达数百平方米），溶液循环速度较大，便于维修和清洗。

缺点：结构不够紧密，设备较高。



强制循环蒸发器

优点：溶液循环速度大，
传热系数很大，在相同的
生产任务下，蒸发器的传
热面积较小，减小了加热
面上的结垢现象。

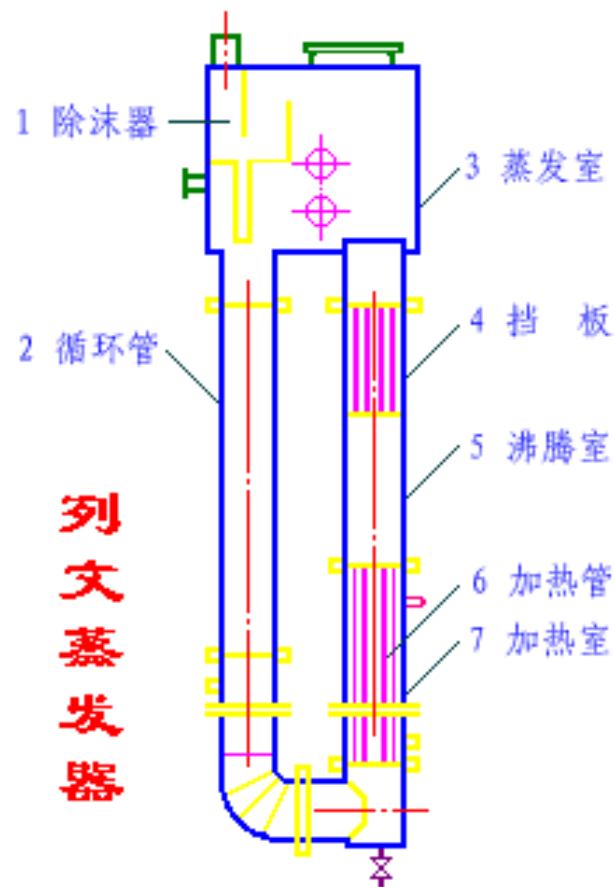
缺点：动力消耗大。



列文蒸发器

优点：加热室上方增设了一段沸腾室，避免结晶在加热管内析出，不易结垢，循环速度较大，传热系数大，传热效果好。

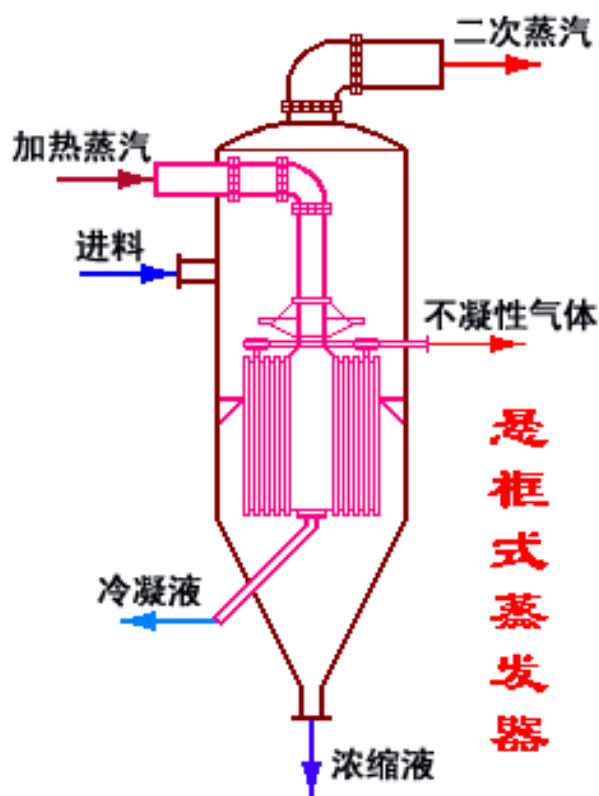
缺点：设备庞大，金属消耗量大，厂房必须高，要求温位较高的蒸汽。



悬框式蒸发器

优点：传热效果好，
热损失少，清洗维修
方便，减少了结垢。

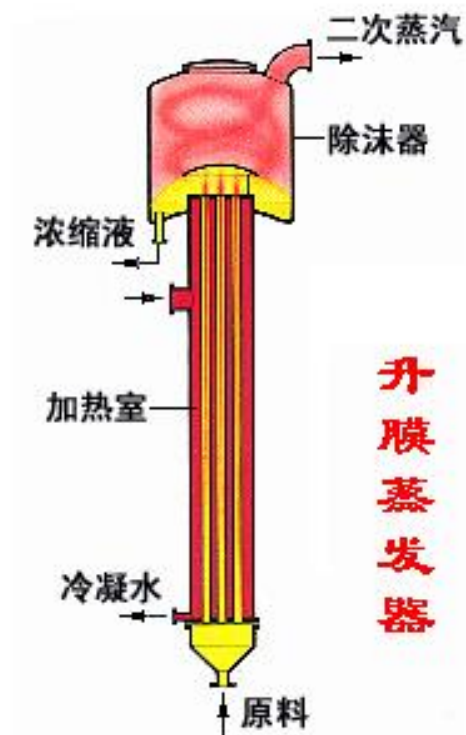
缺点：单位传热面的
金属耗量大，结构复
杂，溶液滞留量大，
需要高大厂房。



升膜蒸发器

优点：蒸发时间短（仅几秒至几十秒），适用于热敏性及易起泡的溶液。

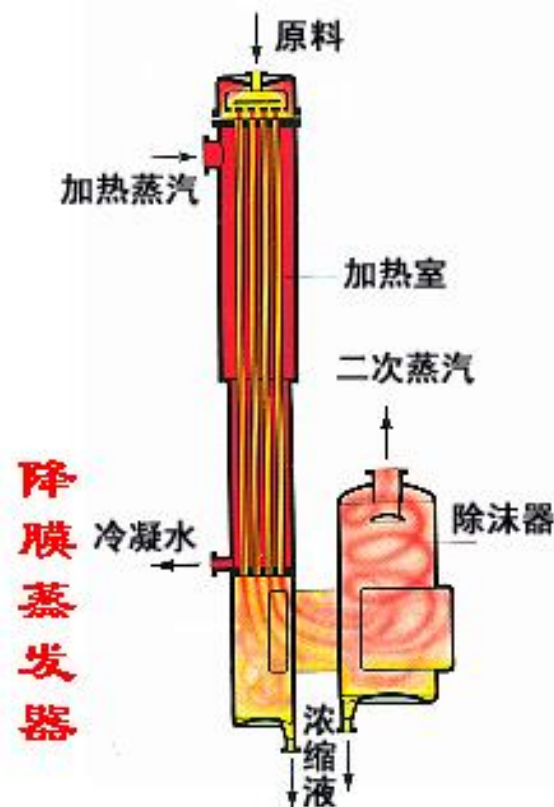
缺点：不适用于浓溶液，对易结晶、易结垢的溶液也不适用。



降膜蒸发器

优点：适用于热敏性溶液和浓度较高的溶液。

缺点：对于易结垢和黏度很大的溶液不适用。

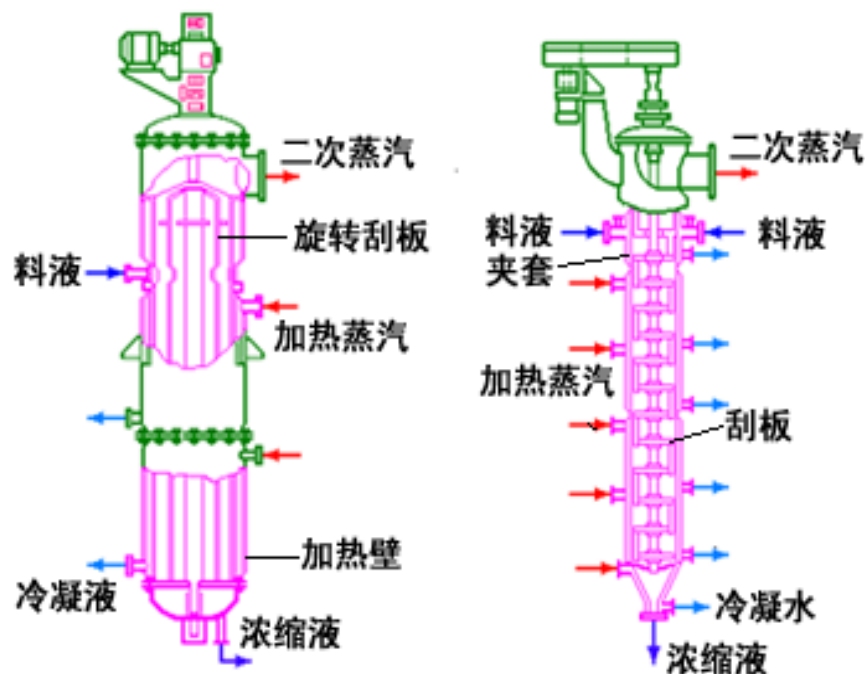


旋转刮片式蒸发器

根据刮板的不同分为固定间隙的刮板蒸发器和转子式刮板蒸发器。

优点：可适用于高黏度、易结晶、结垢的溶液的蒸发，可将溶液蒸干而直接获得粉末状固体。

缺点：结构复杂，制造要求高，加热面小，且需消耗一定动力。



7.2.2 蒸发器的传热系数

蒸发器的热阻分析：

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{\delta}{\lambda} + R_i + \frac{1}{\alpha_i}$$

其中：

$1/\alpha_o$ — 管外蒸汽冷凝的热阻；

δ/λ — 加热管壁的热阻；

R_i — 管内壁液体一侧的热阻；

$1/\alpha_i$ — 管内沸腾给热的热阻

7.3单效蒸发

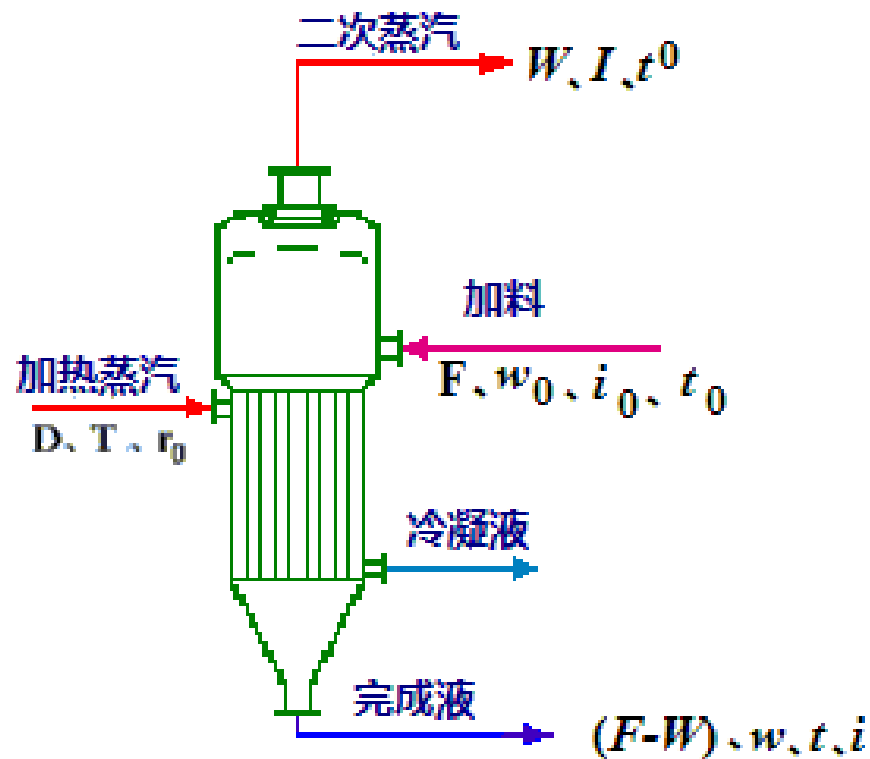
7.3.1物料衡算

$$Fw_0 = (F - W)w$$

其中：

F—溶液的加料量(kg/s)

W—水分的蒸发量 (kg/s)



单效蒸发计算

7.3.2 热量衡算

$$Dr_0 + Fi_0 = (F - W)i + WI + Q_{\text{损}}$$

其中：

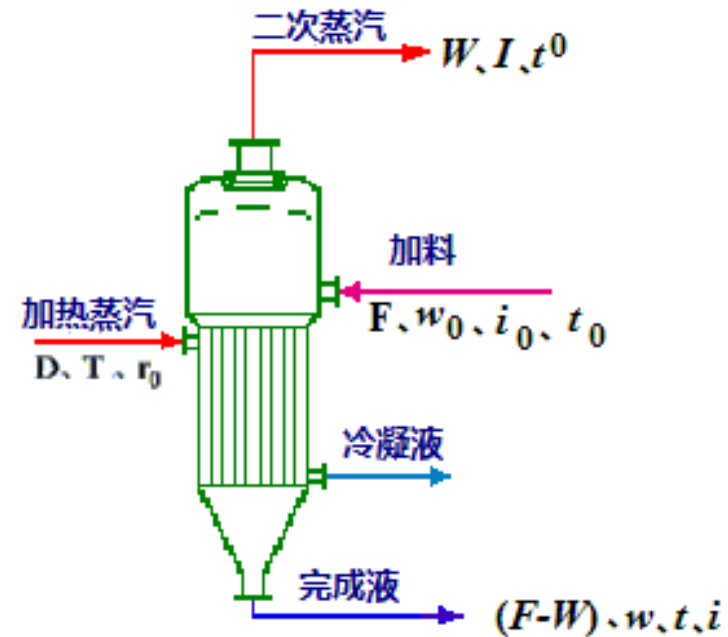
i_0, i — 加料液与完成液的热焓

r_0 — 加热蒸汽的汽化热

I — 二次蒸汽的热焓

D — 加热蒸汽的消耗量

式中 $Q_{\text{损}}$ 可视实际情况取 Dr_0 的某一百分数。



单效蒸发计算

$$Dr_0 = F(i - i_0) + W(I - i) + Q_{\text{损}}$$

对溶液浓度变化不大、浓缩热不大的溶液，其热焓可由比热容近似计算

$$Dr_0 = Fc_0(t - t_0) + Wr + Q_{\text{损}}$$

蒸发器的热负荷为

$$Q = Dr_0$$

7.3.3 传热速率与传热温差

1、蒸发速率

$$Q = KA(T - t)$$

蒸发器的热阻分析：

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta}{\lambda} + R_i + \frac{1}{\alpha_i}$$

其中： δ/λ — 加热管壁的热阻；

$1/\alpha_0$ — 管外蒸汽冷凝的热阻；

R_i — 管内壁液体一侧的热阻；

$1/\alpha_i$ — 管内沸腾给热的热阻

2、溶液沸点

(1) 溶液沸点升高 Δ'

—溶质的存在

相同压力下，溶液的沸点较纯水的沸点高。

(2) 液柱静压头 Δ''

当蒸发器维持一定的液位操作，下部溶液所受的
压力，故下部溶液的沸点就高于液面处的沸点。

$$p_m = p + \frac{1}{5}\rho gL$$

p : 液面上方二次蒸汽的压强。

在加热蒸汽（ T ）与二次蒸汽（ t^0 ）之间的温位差中，有一部分（ Δ ）并不作为传热的有效推动力，而是由于各种原因损失掉了， Δ 称为温度差损失。

已知: $w_0=2\%, t_0=28^\circ\text{C}, w=3\%, A=69.7\text{m}^2, T=110^\circ\text{C},$

$F=4500\text{kg/h}, c_p=4100\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}, \Delta$ 不计, $p=0.1\text{MPa}$

求: (1) W, K ; (2) $F'=6800\text{kg/h}$, 其它操作条件不变, w'

解: (1)
$$W = F \left(1 - \frac{w_0}{w}\right) = 4500 \times \left(1 - \frac{0.02}{0.03}\right) = 1500\text{kg/h} = 0.417\text{kg/s}$$

水在 0.1MPa 下, $t^\circ = 100^\circ\text{C}, r=2258\text{kJ/kg}$

$\because \Delta$ 不计, $\therefore \Delta t = T - t^\circ = 110 - 100 = 10^\circ\text{C}$

$$Q = D \cdot r = F c_p (t - t_0) + W \cdot r$$

$$= [4500 \times 4100 \times (100 - 28) + 1500 \times 2258 \times 10^3] \times \frac{1}{3600} = 1.31 \times 10^6 \text{W}$$

$$\therefore K = \frac{Q}{A \Delta t} = \frac{1.31 \times 10^6}{69.7 \times 10} = 1.88 \times 10^3 \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

(2) 假定 K 值不变

$$W' = F' \left(1 - \frac{w_0}{w'}\right)$$

$$\therefore Q = KA\Delta t = F'c_p(t - t_0) + W'r = F'c_p(t - t_0) + F' \left(1 - \frac{w_0}{w'}\right)r$$

$\because K, A, \Delta t$ 均不变 $\therefore Q$ 不变,得

$$\begin{aligned}\frac{w_0}{w'} &= 1 - \frac{Q}{F'r} + \frac{c_p(t - t_0)}{r} \\ &= 1 - \frac{1.31 \times 10^6 \times 3600}{6800 \times 2258 \times 10^3} + \frac{4100 \times (100 - 28)}{2258 \times 10^3} = 0.824\end{aligned}$$

$$w' = \frac{w_0}{0.824} = \frac{0.02}{0.824} = 0.024 = 2.4\%$$

7.4 蒸发操作的经济性

7.4.1 蒸发操作的经济性

——生蒸汽的利用率(操作费用)

$\frac{W}{D}$: 每kg生蒸汽所能蒸发的水量。

提高生蒸汽的利用率的措施:

- 多效蒸发
- 额外蒸汽的引出
- 二次蒸汽的再压缩

7.4.2 蒸发设备的生产强度

—设备费用

$U = \frac{W}{A}$: 单位传热面的蒸发量

多效蒸发是以牺牲设备生产强度（设备费用）来提高生蒸汽的经济性（操作费用），必须权衡以决定最合理的效数。

提高生产强度的途径：

- 增大传热温差 Δt —真空蒸发（降低溶液沸点）
- 提高蒸发器的传热系数
 - 溶液循环流动，排不凝性气体，除垢。

习题： 2,3