

# 第3章 蒸馏和吸收塔设备

## 3.1 概述

### 1.塔设备的基本功能和性能评价指标

塔设备应该满足的两条基本功能：

- ①使气、液两相充分接触，适当湍动，以提供尽可能大的传质面积和传质系数，接触后的两相又能及时分离；
- ②在塔内气、液两相具有最大限度的接近逆流，以提供最大的传质推动力。

从工程目的出发，塔设备的性能评价指标：

- ①**通量**——单位塔截面的生产能力，表征塔设备的处理能力和允许的空塔气速；
- ②**分离效率**——单位压降塔的分离效果，对板式塔以板效率表示，对填料塔以等板高度表示；
- ③**适应能力**——操作弹性，表现为对物料的适应性及对负荷波动的适应性；
- ④还应满足流动阻力低、结构简单、金属耗量少、造价低、易于操作控制等要求。

## 2.塔设备的类型

根据塔内气、液接触构件的结构形式

- 板式塔
- 填料塔

根据塔内气、液的接触方式

- 逐级（逐板）接触式
- 微分（连续）接触式

**板式塔：**逐级接触式，内装塔板，气液传质在板上液层空间内进行；

**填料塔：**连续接触式，内装填料，气液传质在填料润湿表面进行。

## 3.2 板式塔

板式塔为逐级接触式气液传质设备，它主要由圆柱形壳体、塔板、溢流堰、受液盘及降液管等部件构成。

板式塔的空塔速度较高，因而生产能力较大，塔板效率稳定，操作弹性大，且造价低，检修、清洗方便，故工业上应用较为广泛。

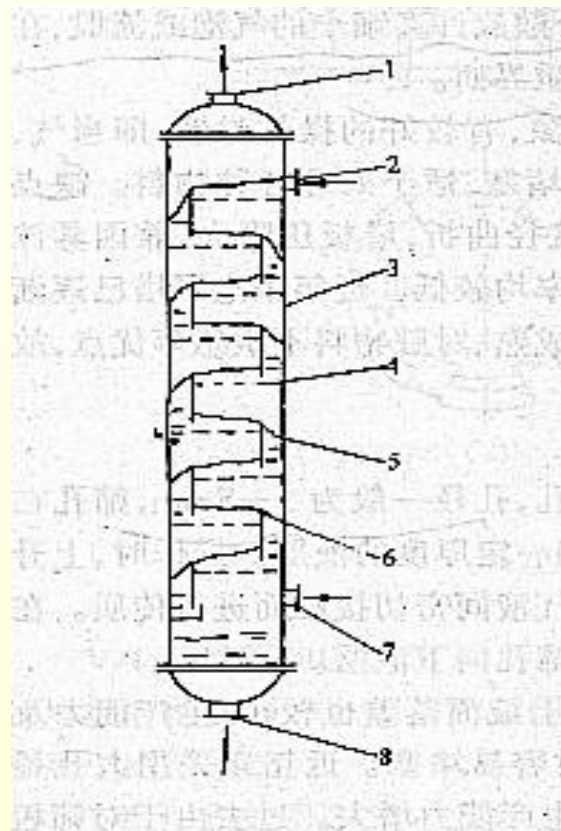


图 3-1 板式塔结构简图

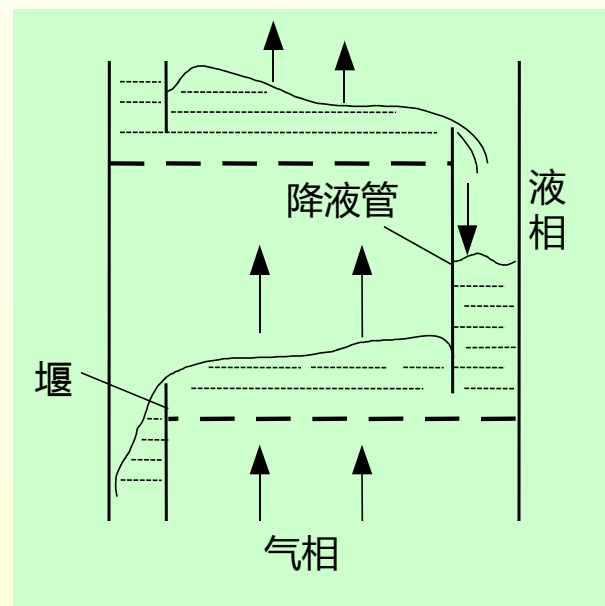
1—气体出口 2—液体入口 3—塔壳  
4—塔板 5—降液管 6—出口溢流堰  
7—气体入口 8—液体出口

### 3.2.1 塔板类型

按照塔内气、液流动的方式 { 错流塔板  
逆流塔板

错流塔板（溢流塔板）：

塔内气、液两相成错流流动，即液体溢流横向流过塔板，而气体垂直穿过液层，但对整个塔来说，两相基本上成逆流流动。



错流塔板应用很广，按塔板具体结构形式可分为：泡罩塔板、筛孔塔板、浮阀塔板、舌形塔板等。

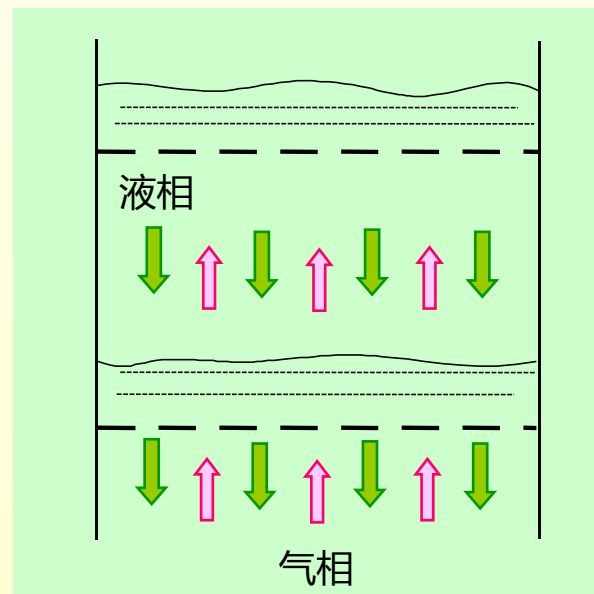
## 逆流塔板（穿流塔板）：

塔板上不设降液管，气、液两相同时由塔板上的孔道或缝隙逆向穿流而过，板上液层高度靠气体速度维持。

**优点：**塔板结构简单，板上无液面差，板面充分利用，生产能力较大；

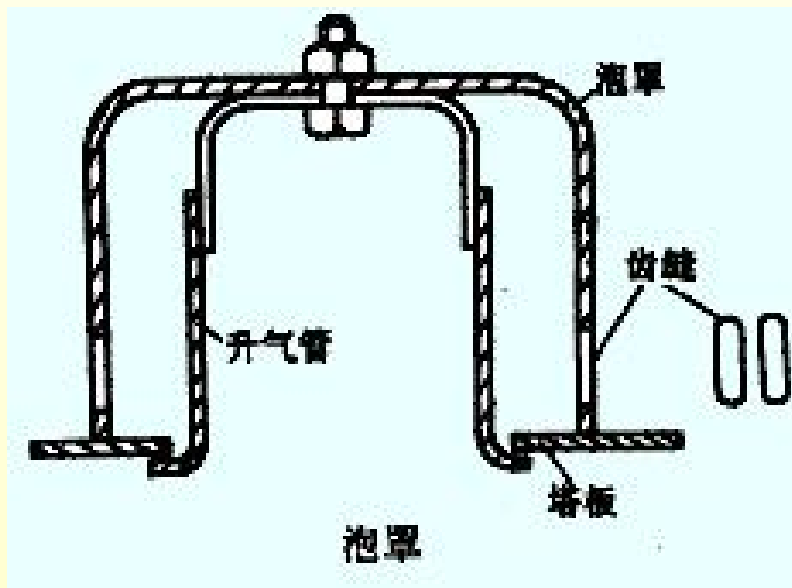
**缺点：**操作弹性及板效率不及错流塔板。

与错塔板相比，逆流塔板应用范围小得多，常见的有栅板、降淋筛板等。



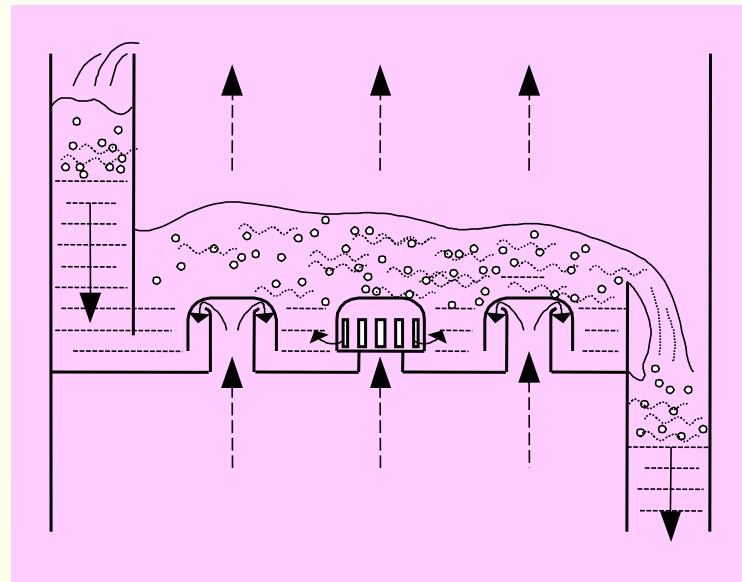
# 1.泡罩塔板

在工业上**最早**（1813年）应用的一种塔板，其主要元件由升气管和泡罩构成，泡罩安装在升气管顶部，泡罩底缘开有若干齿缝浸入在板上液层中，升气管顶部应高于泡罩齿缝的上沿，以防止液体从中漏下。





液体横向通过塔板经溢流堰流入降液管，气体沿升气管上升折流经**泡罩齿缝**分散进入液层，形成两相混合的鼓泡区。



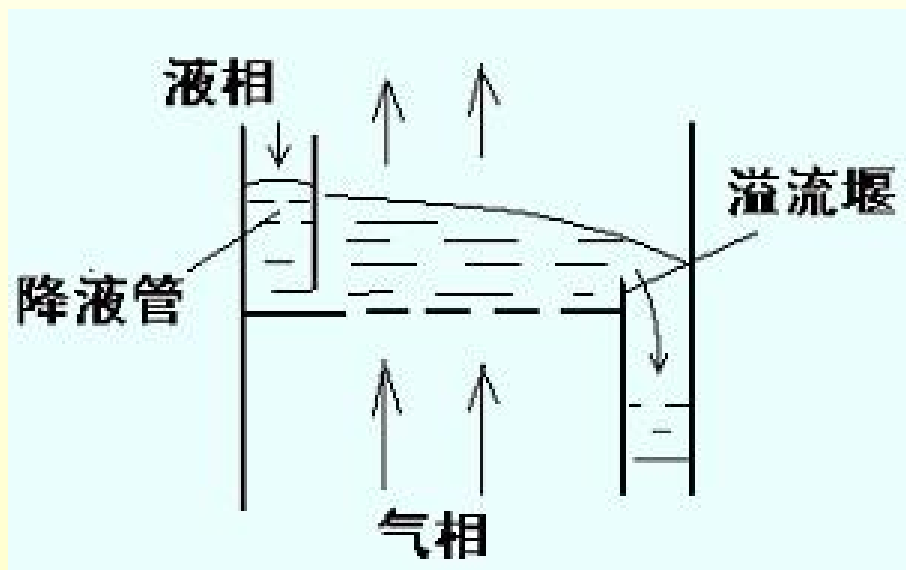
**优点：**操作稳定，因升气管高出液层，使泡罩塔板低气速下也不致产生严重的漏液现象，故弹性大；塔板不易堵塞，适用于处理各种物料。

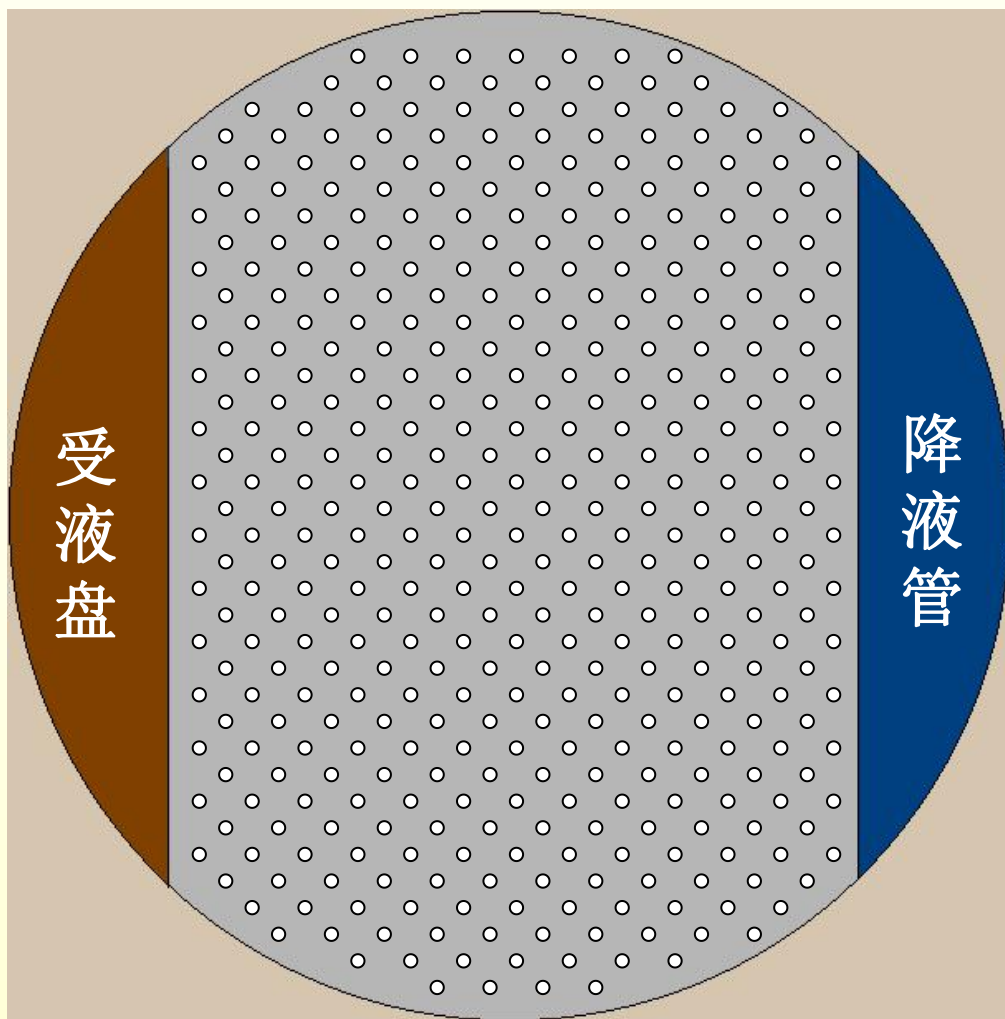
**缺点：**结构复杂，造价高，塔板压降大，生产能力及**板效率低**。

## 2.筛板

筛板塔的主要结构：

- ①筛孔——提供气体上升的通道；
- ②溢流堰——维持塔板上一定高度的液层，以保证在塔板上气液两相有足够的接触面积；
- ③降液管——作为液体从上层塔板流至下层塔板的通道。





筛板塔的优点是结构简单、造价低廉，气体压降低，板上液面落差小，生产能力及板效率高。其缺点是操作弹性小，筛孔小时易堵塞。

### 3.浮阀塔板

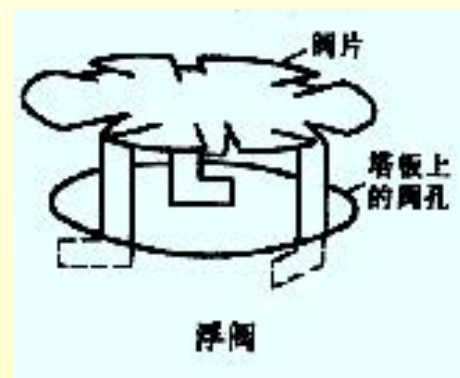
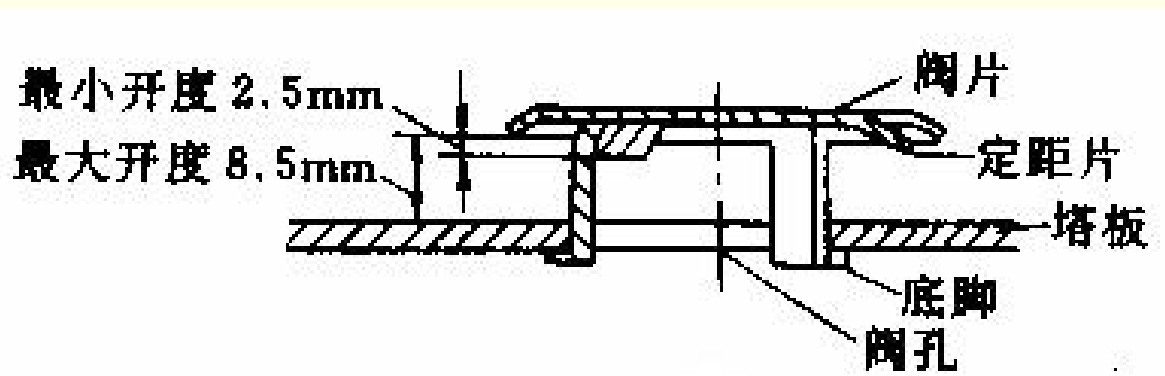
自20世纪50年代问世后，很快在石油、化工行业得到推广，至今仍为应用最广的一种塔板。

**结构：**以泡罩塔板和筛孔塔板为基础。有多种浮阀形式，但基本结构特点相似，即在塔板上按一定的排列**开若干大孔**，孔的上方安置可以在孔轴线方向**上下浮动的阀片**。阀片可随上升气量的变化而自动调节开启度。在低气量时，开度小；气量大时，阀片自动上升，开度增大。因此，气量变化时，通过阀片周边流道进入液体层的气速较稳定。同时，气体水平进入液层也强化了气液接触传质。

浮阀塔的**优点：**生产能力和操作弹性大，塔板效率高，气体压强降及液面落差小，造价低。其**缺点**是处理易结焦、高粘度的物料时，阀片易与塔板粘结；在操作过程中有时会发生阀片脱落或卡死等现象，使塔板效率和操作弹性下降。

F1型浮阀结构简单，易于制造，应用最普遍，为定型产品。阀片带有三条腿，插入阀孔后将各腿底脚扳转  $90^\circ$ ，用以限制操作时阀片在板上升起的最大高度；阀片周边有三块略向下弯的定距片，以保证阀片的最小开启高度。

F1型浮阀分轻阀和重阀。轻阀塔板漏液稍严重，一般均采用重阀。



## 三种塔板的比较：

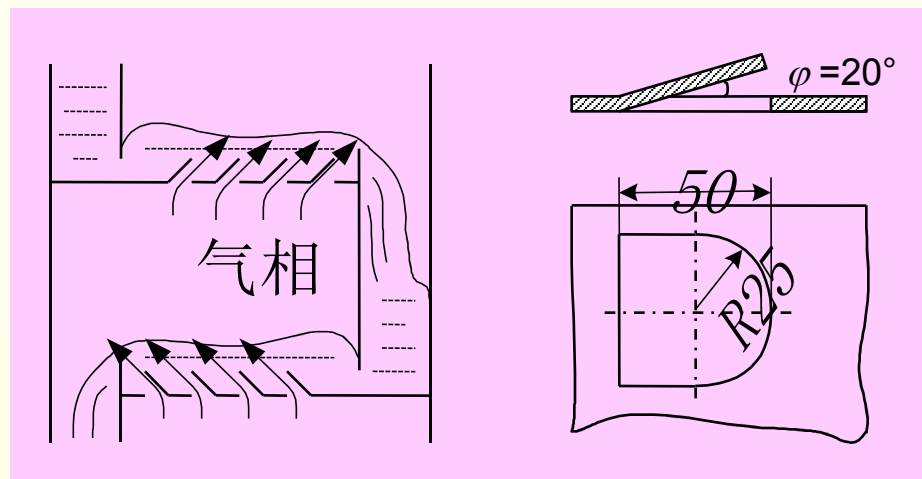
- ① 生产能力： 筛板>浮阀塔板>泡罩塔板；
- ② 压降： 泡罩塔板>浮阀塔板>筛板；
- ③ 操作弹性： 浮阀塔板>泡罩塔板>筛板；
- ④ 造价： 泡罩塔板>浮阀塔板>筛板；
- ⑤ 板效率： 浮阀塔板、筛板 > 泡罩塔板。

## 4.喷射型塔板

### 1) 舌形塔板与浮舌塔板

一种斜喷射型塔板。

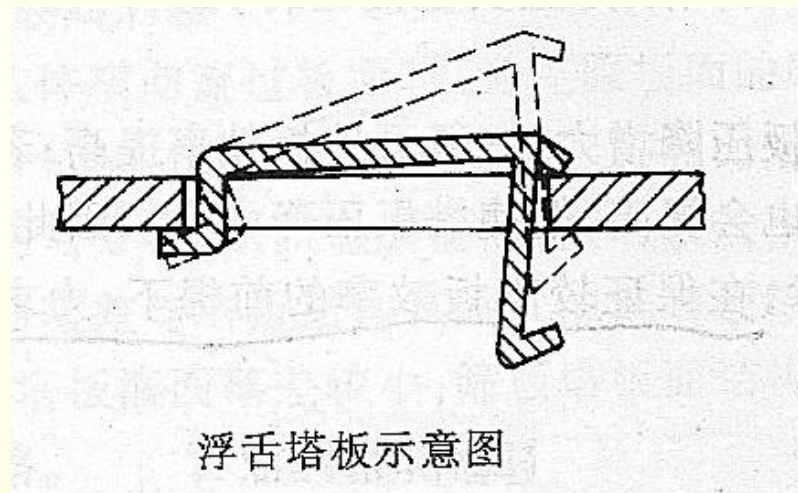
结构简单，在塔板上冲出若干按一定排列的舌形孔，舌片向上张角 $\varphi$ 以 $20^\circ$ 左右为宜。



**优点：**气流由舌片喷出并带动液体沿**同方向**流动。气液并流避免了返混和液面落差，塔板上液层较低，塔板压降较小。气流方向近于水平。相同的液气比下，舌形塔板的液沫夹带量较小，故可达较高的生产能力。

**缺点：**张角固定，在气量较小时，经舌孔喷射的气速低，塔板漏液严重，操作弹性小。

液体在同一方向上加速，有可能使液体在板上的停留时间太短、液层太薄，板效率降低。



浮舌塔板示意图

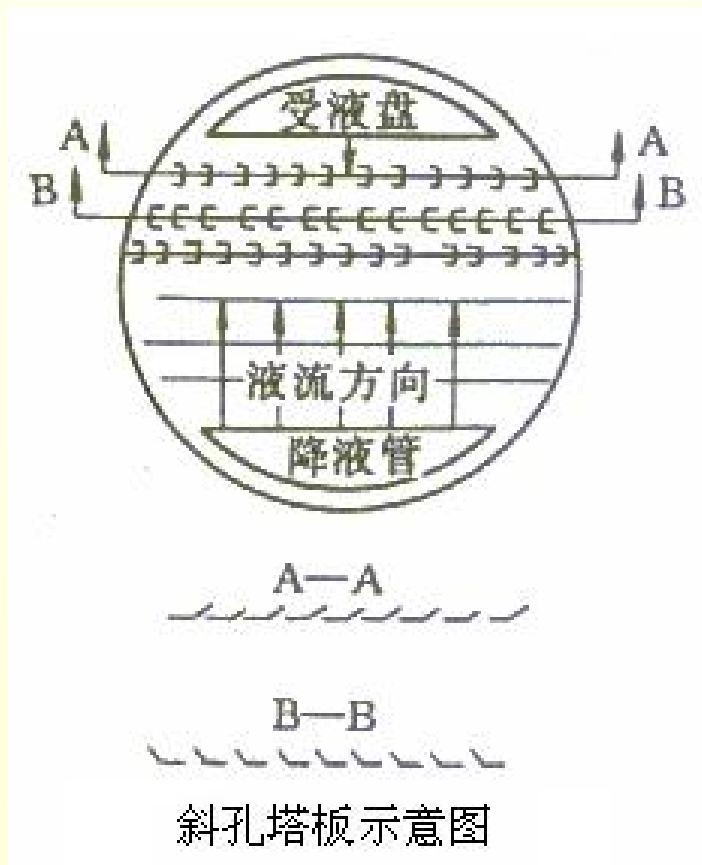
为使舌形塔板适应低负荷生产，提高操作弹性，研制出了可变气道截面（类似于浮阀塔板）的**浮舌塔板**。

**特点**为操作弹性大、压强降小、结构简单、效率高。



## 2) 斜孔塔板

斜孔的开口方向与液流垂直且相邻两排开孔方向相反，既保留了气体水平喷出、气液高度湍动的优点，又避免了液体连续加速，可维持板上均匀的低液面，从而既能获得大的生产能力，又能达到好的传质效果。

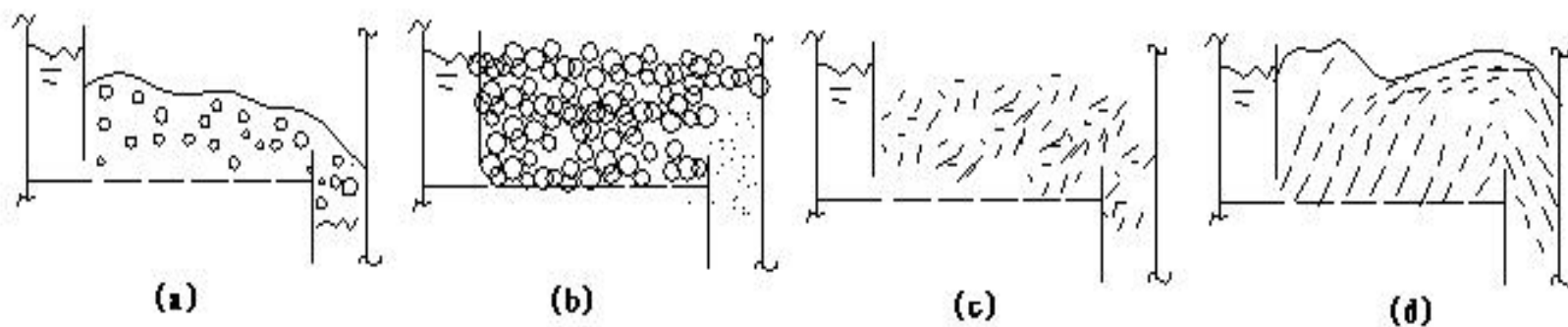


## 3.2.2 板式塔的流体力学性能

板式塔的流体性能包括：

塔板压降、液泛、雾沫夹带、漏液及液面落差等。

### 1. 塔板上气液两相的接触状态



塔板上的气液接触状态

(a) 鼓泡状态； (b) 蜂窝状态； (c) 泡沫状态； (d) 喷射状态；

## 2.塔板压降

总压降由三部分构成

- (1) 干板阻力
- (2) 充气液层的静压强
- (3) 液体的表面张力

影响因素 {

- 气量  $\uparrow \rightarrow$  塔板压降  $\uparrow$
- 液量  $\uparrow \rightarrow$  塔板压降  $\uparrow$
- 板结构: 开孔率  $\uparrow \rightarrow u_0 \downarrow \rightarrow$  塔板压降  $\downarrow$

### 3.液泛

定义：液体进塔量大于出塔量，结果使塔内不断积液，直至塔内充满液体，破坏塔内正常操作，称为液泛，亦称淹塔。

液泛时的气速 $u_F$ 是塔操作的上限气速。

液泛包括：夹带液泛、溢流液泛。

#### 1) 夹带液泛

原因：由液沫夹带引起——气速过大。

影响液泛气速  $u_F$  的因素：

- 与板间距  $H_T$  有关：  $H_T \uparrow \rightarrow u_F \uparrow$
- 与液量有关：  $V_L \uparrow \rightarrow u_F \downarrow$
- 与物系性质有关： 易发泡，  $u_F \downarrow$

适宜气速：  $u = (0.7-0.8) u_F$

$u/u_F$  —— 泛点率

## 2) 溢流液泛（降液管液泛）

原因： 由降液管通过液体能力不够而引起  
—— 液量过大。

综上所述，造成液泛的原因主要是液量过大、板压降过大（即气量过大）或降液管堵塞。

## 4. 雾沫夹带

定义：上升气流穿过塔板上液层时，将板上液体带入上层塔板的现象称为雾沫夹带。

返混是指雾沫夹带的液滴与液体主流作相反方向流动的现象。

控制雾沫夹带量  $e_V < 0.1 \text{kg(液)/kg(气)}$

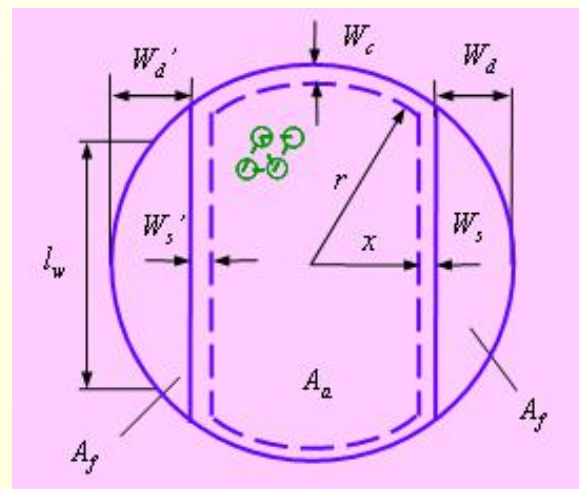
主要影响因素 {  $\begin{cases} \text{空塔气速} \uparrow \rightarrow \text{雾沫夹带量} \uparrow \\ \text{板间距} H_T \uparrow \rightarrow \text{雾沫夹带量} \downarrow \end{cases}$

## 5.漏液

定义：当气体孔速过小或气流分布不均匀时，使有的筛孔无气体通过，大量液体由筛孔漏下的现象，称为漏液。

控制漏液量<液体流量的10%

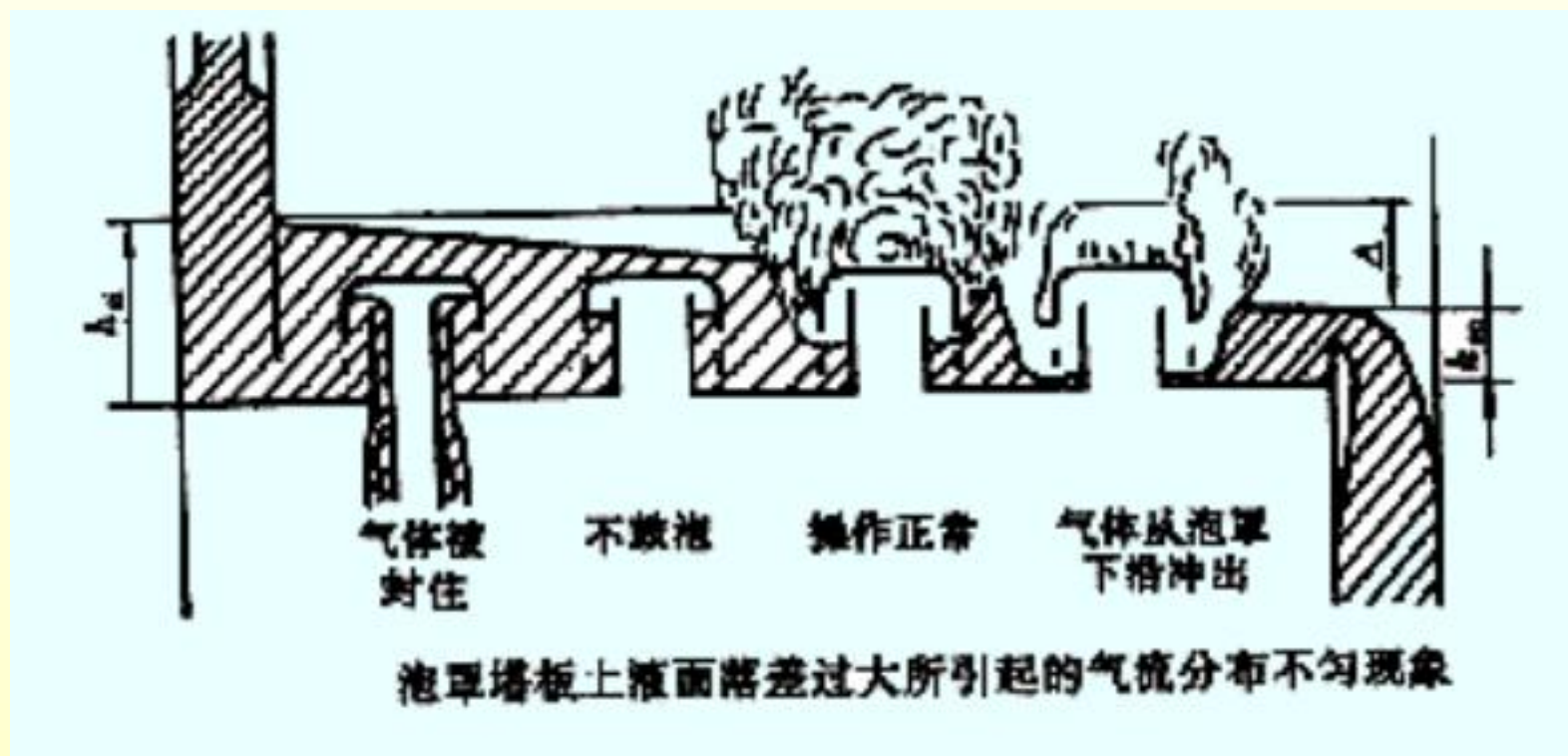
产生原因 { 气速太小 ；  
气流分布不均匀。



漏液量达10%的气流速度为漏液速度，这是塔操作的下限气速。

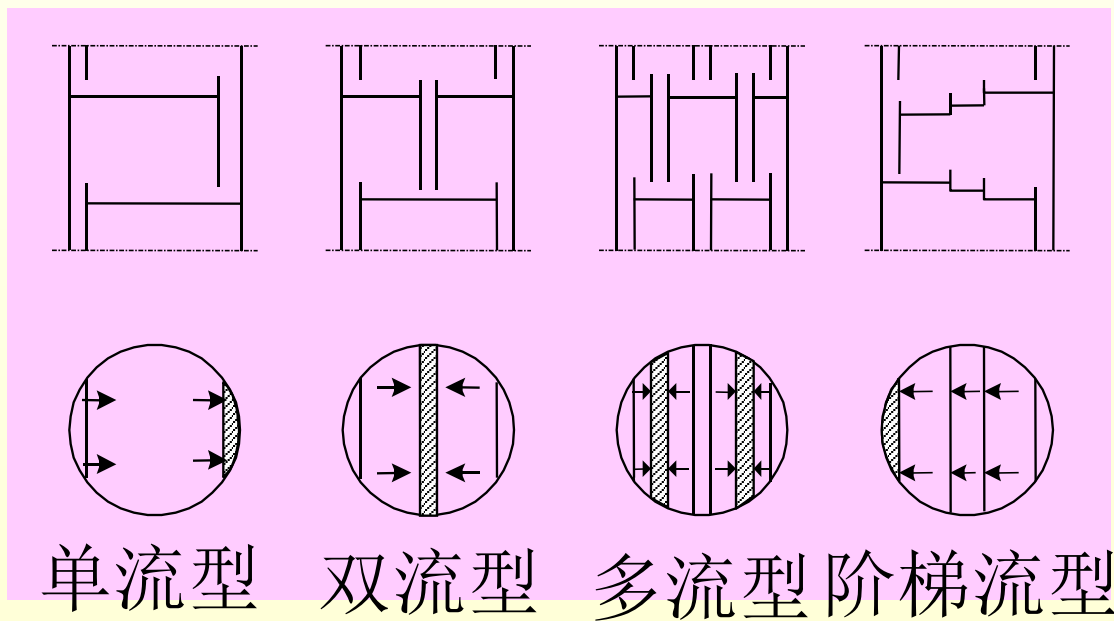
## 6.液面落差

当液体横向流过塔板时，为克服板上的摩擦阻力和板上部件（如泡罩、浮阀等）的局部阻力，需要一定的液位差，则在板上形成由液体进入板面到离开板面的液面落差，以  $\Delta$  表示。





在塔径或液体流量很大时采用双溢流或阶梯溢流等溢流形式可减少液面落差。



## 气泡夹带

原因：液体在降液管中停留时间过短，气泡来不及解脱，而被液体卷入下层塔板。

## 气体沿塔板的不均匀流动

1. 液面有落差和液层波动，引起气体分布不均匀。
2. 液层厚，阻力大，气速小；
3. 液层薄，阻力小，气速大。

## 7. 负荷性能图

线1为雾沫夹带线，又称气相负荷上限线；

线2为液泛线；

线3为液相负荷上限线，又称降液管超负荷线；

线4为漏液线，又称气相负荷下限线；

线5为液相负荷下限线。

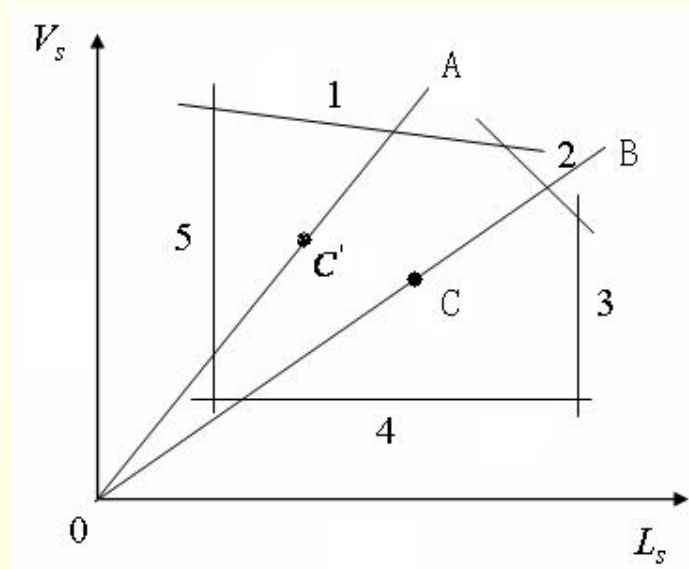


图3-4 塔板负荷性能图

**操作点：**操作时的气相流量 $V_s$ 与液相流量 $L_s$ 在负荷性能图上的坐标点。

**操作线：**通过原点、斜率为 $V_s/L_s$ 的直线。

操作线与负荷性能图上曲线的两个交点分别表示塔的上下操作极限，两极限的**气体**流量之比称为塔板的**操作弹性**。

**操作点C**优于点**C'**。

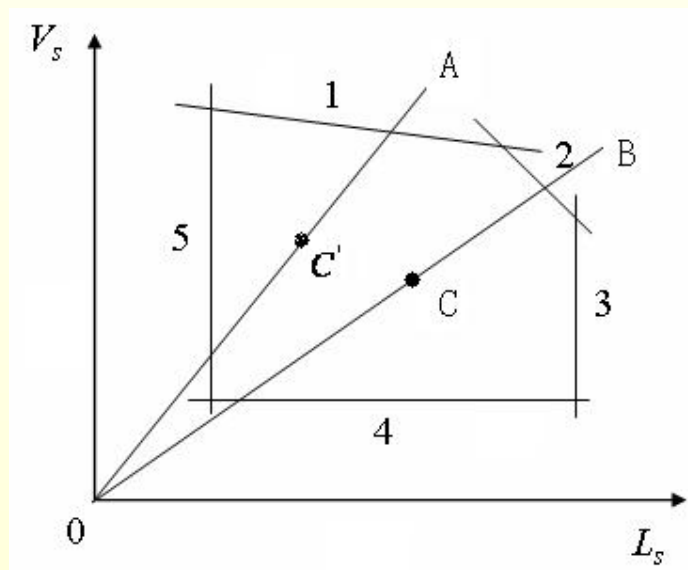


图3-4 塔板负荷性能图

### 3.2.3 板式塔的工艺设计

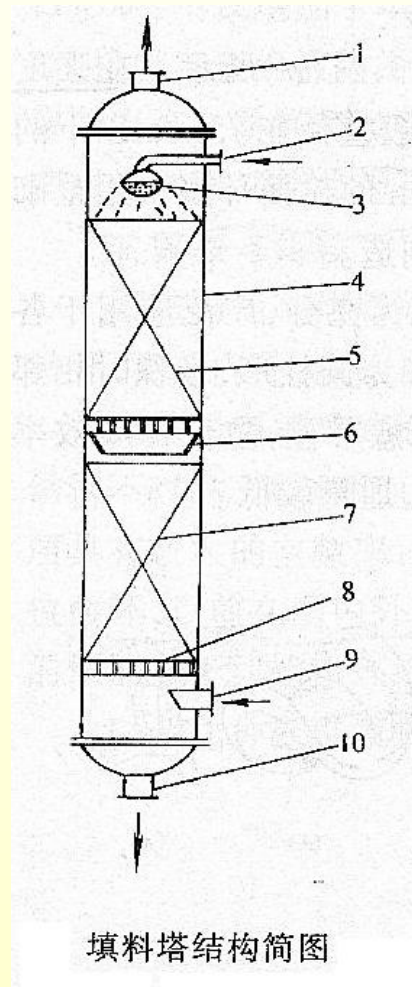
#### 板式塔的设计步骤:

- ①根据设计任务和工艺条件，确定设计方案；
- ②根据设计任务和工艺条件，选择塔板类型；
- ③确定塔径、塔高等工艺尺寸；
- ④进行塔板的结构设计；
- ⑤进行流体力学验算；
- ⑥绘制塔板的负荷性能图；
- ⑦根据负荷性能图，对设计进行分析，若设计不够理想，可对某些参数进行调整，重复上述设计过程，一直到满意为止。

## 3.3 填料塔

### 3.3.1 填料塔的结构与特点

填料塔为连续接触式的气液传质设备。主要由塔壳、填料、液体分布器、液体再分布器、填料压板、填料支承板、除沫器等组成。



①填料

——提供气液接触的场所。

②液体分布器

——均匀分布液体，以避免发生沟流现象。

③液体再分布器

——避免壁流现象发生。

④填料支撑板

——支撑填料层，使气体均匀分布。

⑤除沫器

——防止塔顶气体出口处夹带液体。

### 3.3.2 填料

#### 填料作用

- (1) 提供气液接触界面；
- (2) 强化气体湍动，降低气相传质阻力；
- (3) 更新液膜表面，降低液相传质阻力。

#### 1. 填料特性

##### (1) 比表面积 $\sigma$

定义：单位体积填料层的填料表面积， $[\text{m}^2/\text{m}^3]$ 。

填料的 $\sigma$ 愈大，所提供的气液传质面积愈大；对同种填料，填料尺寸愈小， $\sigma$ 愈大，但气体流动的阻力也要增加。



## (2) 空隙率 $\varepsilon$

定义：单位体积填料层的空隙体积， $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ 。

代表的是气液两相流动的通道， $\varepsilon$ 大，气、液通过的能力大，气体流动的阻力小。 $\varepsilon=0.45\sim 0.95$

## (3) 干填料因子 $\sigma / \varepsilon^3$ 与湿填料因子 $\Phi$

$\Phi$ 代表了实际操作时填料的流体力学特性， $\Phi$ 值小，表明流动阻力小，液泛速度可以提高，流体力学性能好。

#### (4) 堆积密度 $\rho_p$

定义：单位体积填料所具有的质量，  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 。

在机械强度允许的条件下，填料壁要尽量薄，以减小填料的堆积密度，从而既可降低成本又可增加空隙率。

在选择填料时，一般要求 $\sigma$ 、 $\varepsilon$ 大， $\rho_p$ 小，造价低，并有足够的机械强度。

## 2. 填料类型

形状 { 环形（拉西环、鲍尔环、阶梯环）  
鞍形（矩鞍形、弧鞍形）  
波纹形（波纹板、波纹网）

材质：陶瓷、金属、塑料

装填方法 { 乱堆填料  
整砌（规整）填料



拉西环



鲍尔环



阶梯环



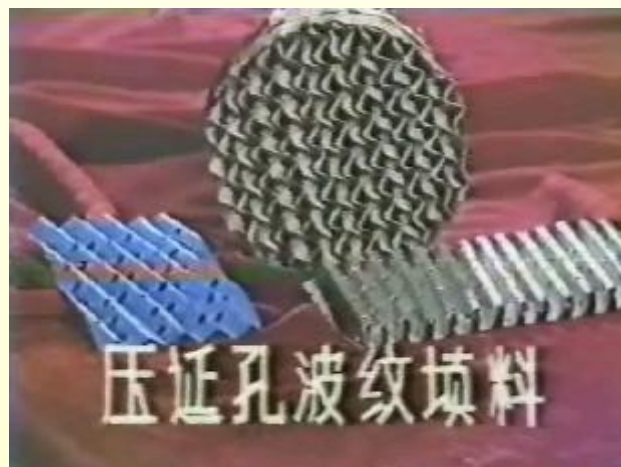
θ环



鞍形环



波纹板



波纹网

## 1) 散装填料

### (1) 拉西环

最早使用的一种填料，为高径比相等的陶瓷和金属等制成的空心圆环。



拉西环

**优点：**易于制造，价格低廉，且对它的研究较为充分，所以在过去较长的时间内得到了广泛的应用。

**缺点：**高径比大，堆积时填料间易形成**线接触**，故液体常存在严重的**沟流和壁流**现象，致使传质速率低；且拉西环填料层的液体滞留量大，气体流动阻力大高，气体通过能力低。

## (2) 鲍尔环

在环的侧壁上开一层或两层长方形小孔，小孔的母材并不脱离侧壁而是形成向内弯的叶片。上下两层长方形小孔位置交错。



鲍尔环

同尺寸的鲍尔环与拉西环虽有相同的比表面积和空隙率，但鲍尔环在其侧壁上的**小孔可供气液流通**，使环的内壁面得以充分利用。

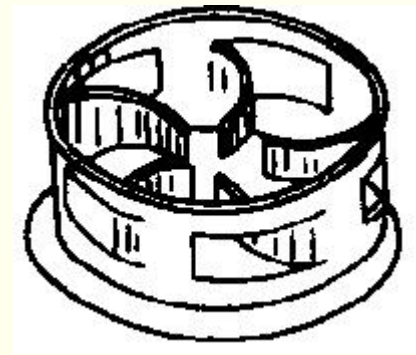
比之拉西环，鲍尔环不仅具有较大的生产能力和较低的压降，且传质效率高，操作弹性大，沟流现象也大大降低，但价格较高。

鲍尔环填料的优良性能使它一直为工业所重视，应用十分广泛。可由陶瓷、金属或塑料制成。



### (3) 阶梯环

阶梯环填料的结构与鲍尔环填料相似，环壁上开有长方形小孔，环内有两层交错  $45^\circ$  的十字形叶片，但阶梯环的高度为直径的一半，环的一端成喇叭口形状的翻边。



阶梯环

这样的结构使得阶梯环填料的性能在鲍尔环的基础上又有提高，其生产能力可提高约10%，压降则可降低25%，且由于填料间呈**多点接触**，床层均匀，较好地**避免了沟流**现象。

阶梯环一般由塑料和金属制成，由于其性能优于其它侧壁上开孔的填料，因此获得**广泛的应用**。



## （4）弧鞍和矩鞍

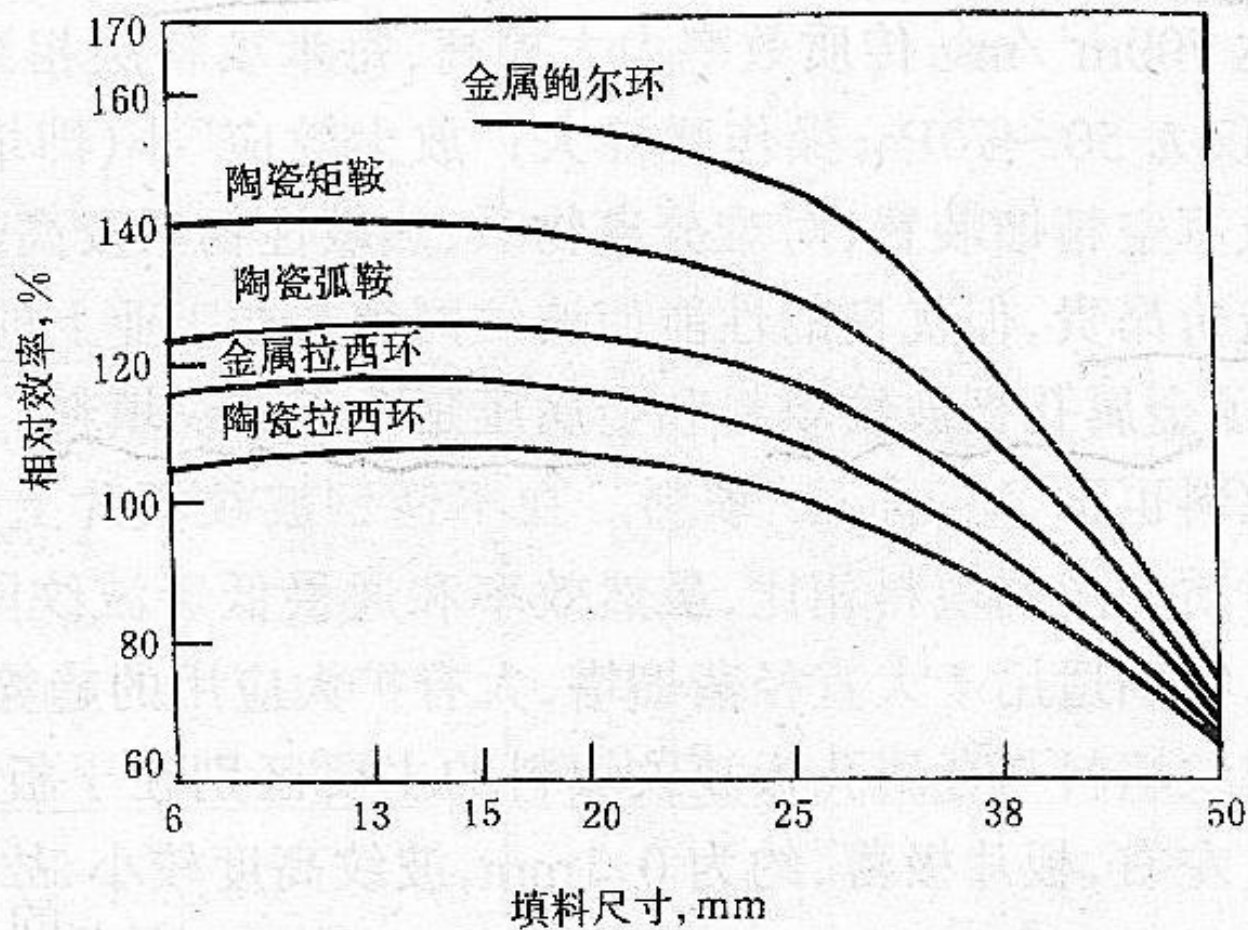
均属敞开型填料。**特点**是表面全部敞开，不分内外，液体在表面两侧均匀流动，表面利用率高，气体流动阻力小，制造方便。



弧鞍型填料是两面对称结构，相邻填料易发生套叠，致使一部分填料表面被重合，使传质效率降低。弧鞍填料强度较差，易破碎，工业生产中应用不多。

**矩鞍填料**的两端为矩形，结构不对称，且填料两面大小不等，堆积时不会重叠。液体分布均匀，气液传质速率得到提高。性能优于拉西环，瓷矩鞍填料是目前采用最多的一种瓷质填料。





几种乱堆填料的相对效率

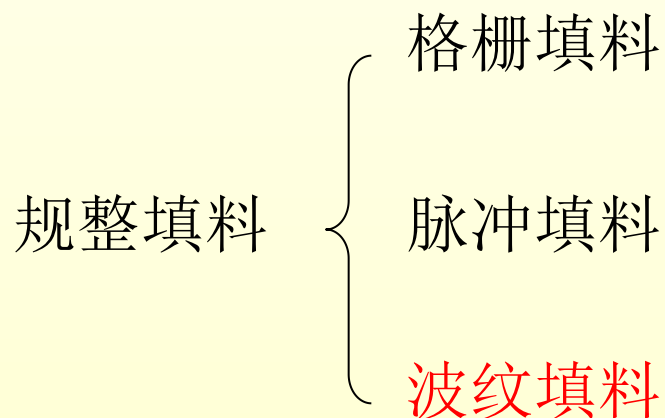
## (5) 金属鞍环

金属鞍环填料综合了环形填料通量大及鞍形填料的液体再分布性能好的优点，其性能优于环形填料和鞍形填料。



## 2) 规整填料

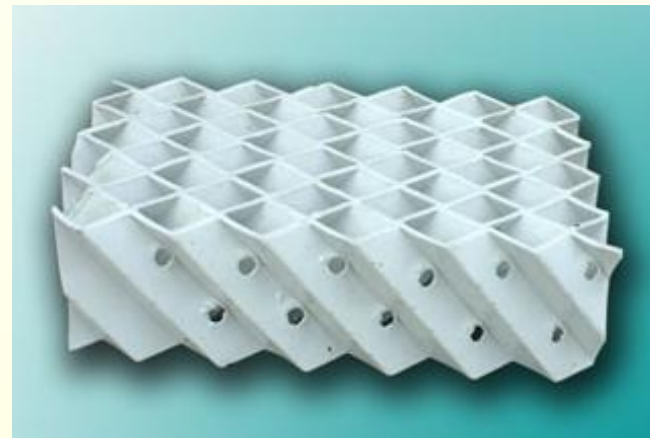
规整填料是一种在塔内按均匀几何图形排列、整齐堆砌的填料。其特点规定了气、液流径，改善了气、液分布状况，在低压降下，提供了很大的比表面积和高孔隙率，使塔的传质性能和生产能力得到大幅度提高。



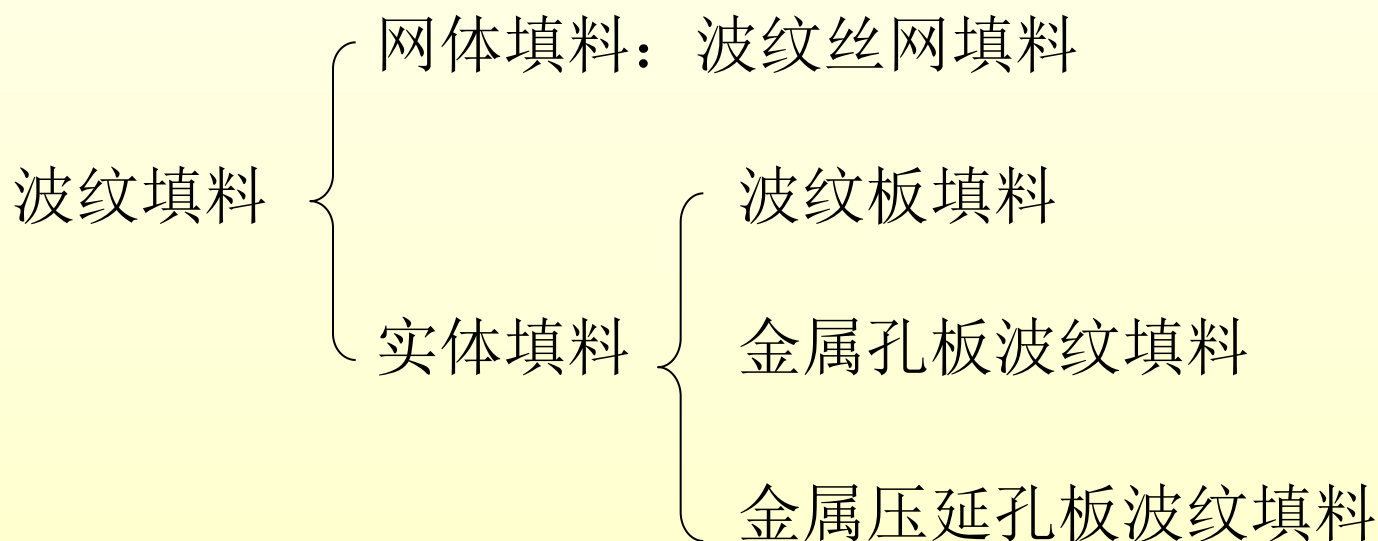
波纹填料是一种整砌结构的新型高效填料。

**优点：**结构紧凑，比表面积很大，传质速率高；流动阻力小，空塔气速高。

**缺点：**不适于处理粘度大、易聚合或有沉淀物的物料，而且，装卸、清洗困难，造价高。

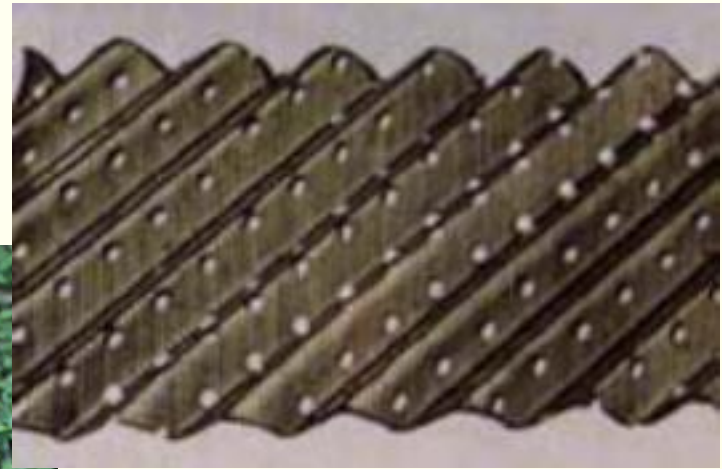


陶瓷孔板波纹填料





# 金属孔板波纹填料



### 3. 填料的选择

选择的**内容**包括填料的种类、规格（尺寸）和材质三个方面。

选择的**依据**是分离工艺的要求、被处理物料的性质、各种填料本身的特性。

选择的**标准**是使设备的投资费用和操作费用之和最低。

### 3.3.3 填料塔的流体力学性能

#### 1. 填料层的持液量

**持液量**是指在一定的操作条件下，单位体积填料层内在填料表面和填料空隙中所积存的液体体积。

$$H_t = H_s + H_c$$

**静持液量** $H_s$ 是指当塔停止气、液两相供料，经适当时间排液，直至**无滴液**时**积存**于填料层中的液体体积。

**动持液量** $H_c$ 是指填料塔停止气、液两相进料的瞬间起**流出**的液体体积。



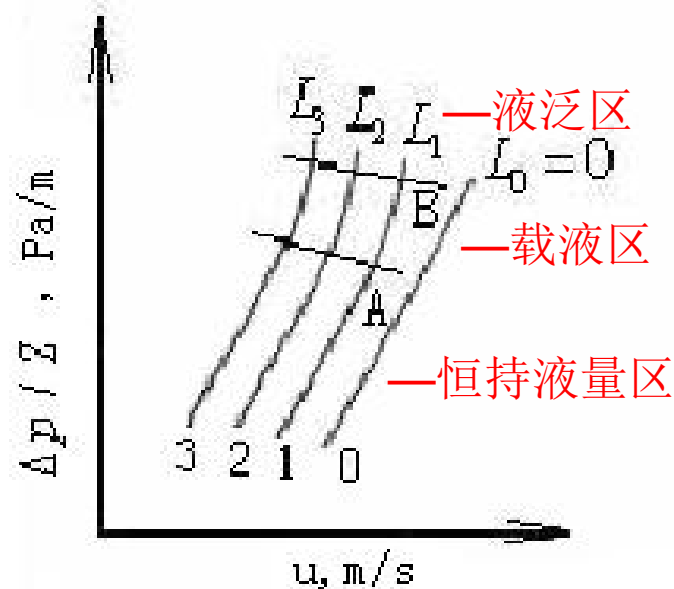
## 2. 气体通过填料层的压强降

$L=0$  干填料

$L_3 > L_2 > L_1 > 0$

$A$ ——载点

$B$ ——泛点

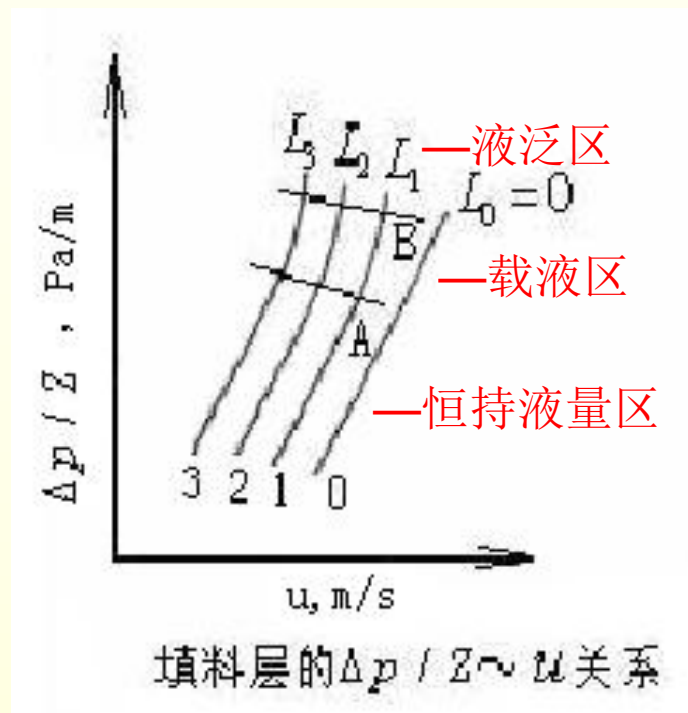


填料层的  $\Delta p / Z \sim u$  关系

同一气速下，喷淋量  $L \uparrow$ ，空隙率  $\varepsilon \downarrow$ ，气体流通通道减小，压降大。

## (1)恒持液量区

A点以下。 $u$ 小，液体流动几乎与气速无关。气体通过单位填料层的压降 $\Delta p$ 与空塔气速 $u$ 的关系为直线，斜率 $1.8\sim 2.0$ ，且基本与干填料平行。

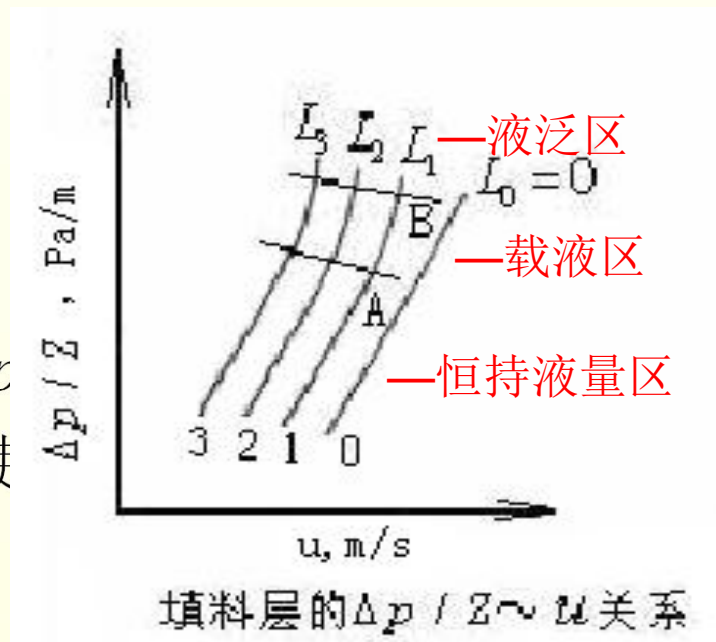


## (2)载液区

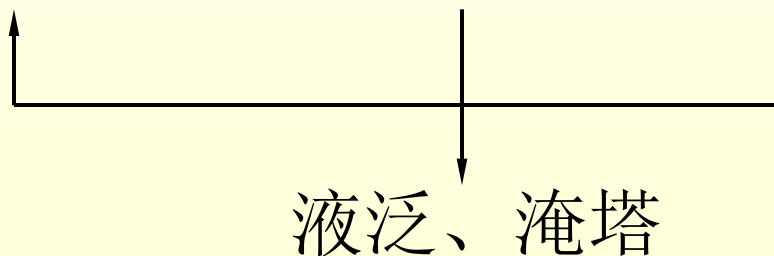
A点以上，B点以下。 $u$ 大，上升气流与下降液体间的摩擦力开始阻碍液体顺畅下流，持液量增加，此为拦液现象。开始发生拦液现象时的气速为**载点气速**，超过载点气速后， $\Delta P/Z - u$  的斜率大于2。

### (3)液泛区

B点以上。 $u \uparrow$ ，液体在塔内积累而发生液泛，此时的空塔气速称**泛点气速**。气体通过单位填料层的压降  $\Delta p$  随着空塔气速 $u$ 的增加而急剧增加，使填料塔不能正常操作。



空塔气速不变  $\rightarrow$  实际气速  $u \uparrow \rightarrow$  液膜厚度  $\uparrow \rightarrow \varepsilon \downarrow$

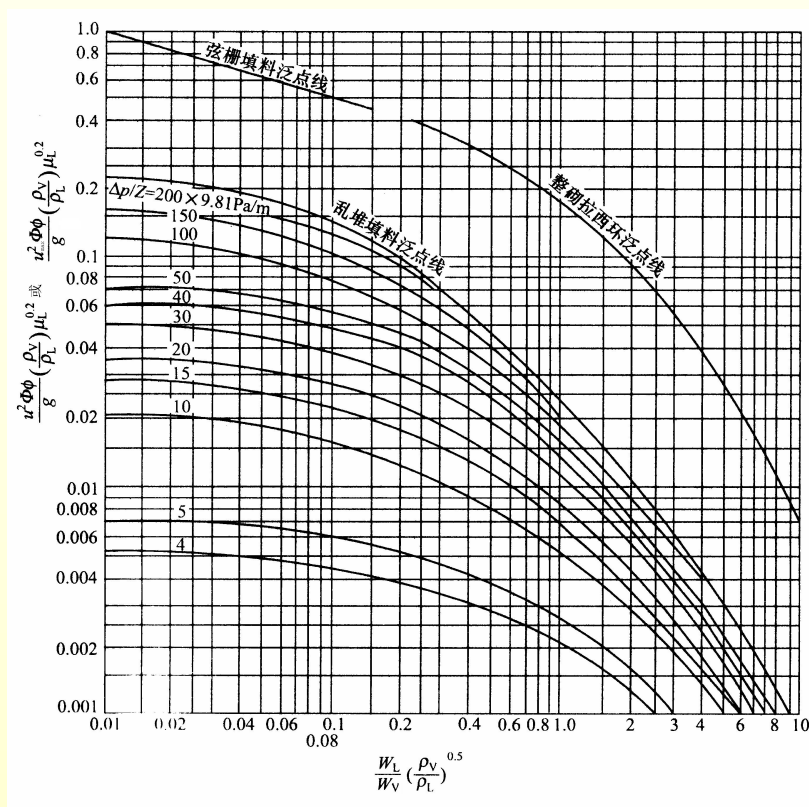


适宜的操作气速 $u$ 应在载点气速和泛点气速 $u_{max}$ 之间。

$$u = (0.6 \sim 0.8) u_{max}$$

### 3.液泛

湿填料因子 $\Phi$ 值越小，气体密度越小，液体的密度越大、粘度越小，液气比越小，则泛点气速越大。



此图显示出压降与泛点、填料因子、液汽比等参数的关系。

应用：

- 求泛点气速
- 根据允许压降值计算空塔气速或根据空塔气速计算压降。

图 3 -18 埃克特通用关联图

## 4.填料的润湿性能和液体喷淋密度

**喷淋密度**是指单位时间内单位塔截面积上喷淋的液体体积。

$$U_{\min} = (L_W)_{\min} \sigma$$

式中  $U_{\min}$  —— 最小喷淋密度,  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  ;  
 $(L_W)_{\min}$  —— 最小润湿速率,  $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  ;  
 $\sigma$  —— 填料的比表面积,  $\text{m}^2/\text{m}^3$ 。

**润湿速率**是指在塔的截面上, 单位长度的填料周边的液体体积流量。

对于直径不超过75mm的散装填料, 可取最小润湿速率 $(L_W)_{\min}$ 为 $0.08 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ ; 对于直径大于 75mm 的散装填料, 取 $(L_W)_{\min}$  为 $0.12 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 。

### 3.3.5 填料塔附件

#### 1. 填料支承装置

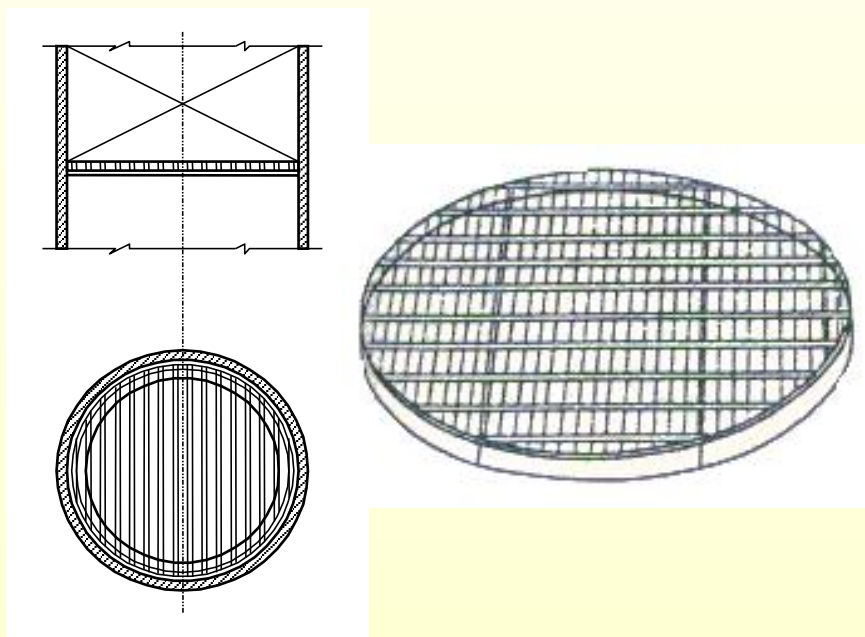
应具有：

- (1) 足够的机械强度以承受设计载荷量，支承板的设计载荷主要包括填料的重量和液泛状态下持液的重量。
- (2) 足够的自由截面积以确保气、液两相顺利通过。支承装置的自由截面积大于填料层的自由截面积。

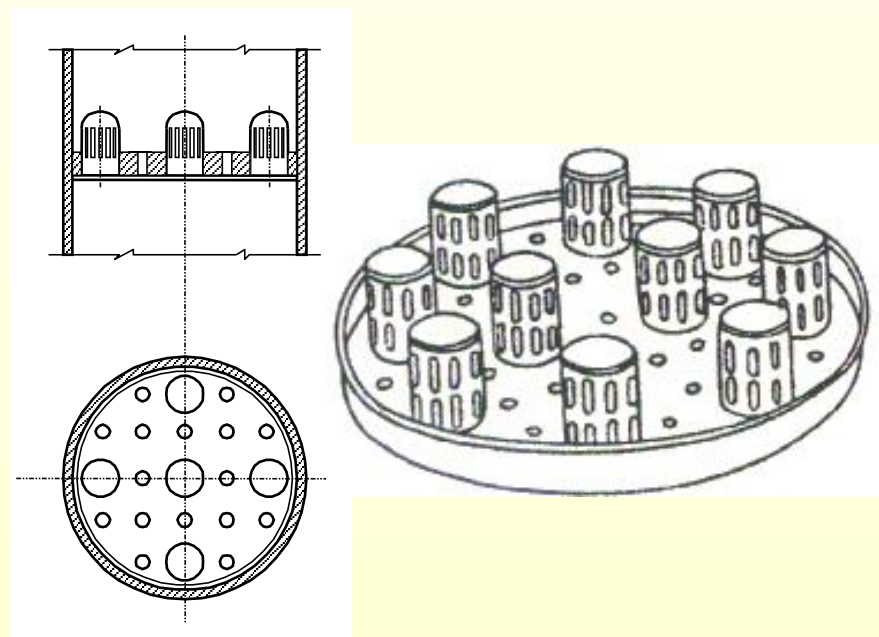
常用的有栅板式、升气管式等类型。

**栅板式：**优点是结构简单，造价低；缺点是栅板间的开孔容易被散装填料挡住，使有效开孔面积减小。

**升气管式：**具有气、液两相分道而行和开孔面积大的特点。气体由升气管侧面的狭缝进入填料层。

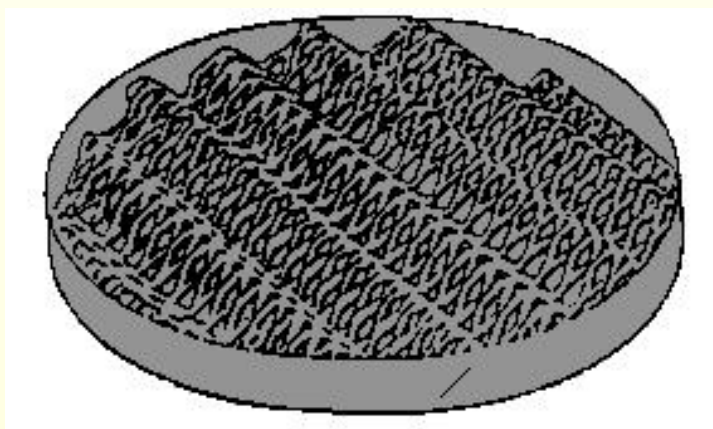


栅板式

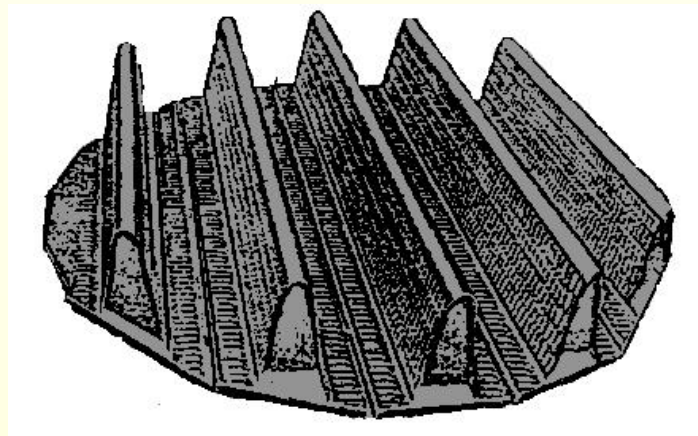


升气管式





波纹式

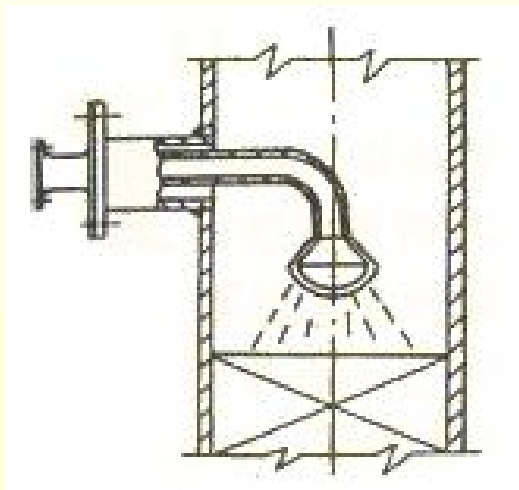


驼峰式

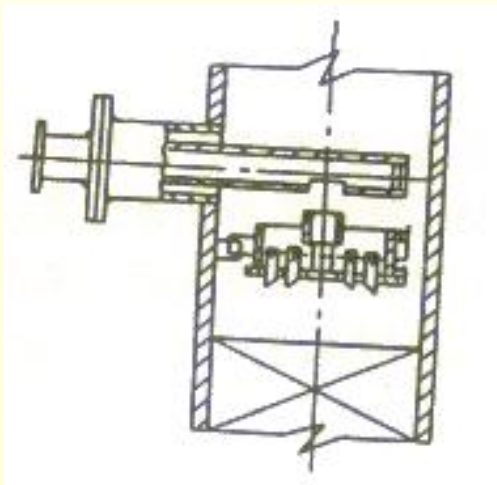


## 2.液体分布装置

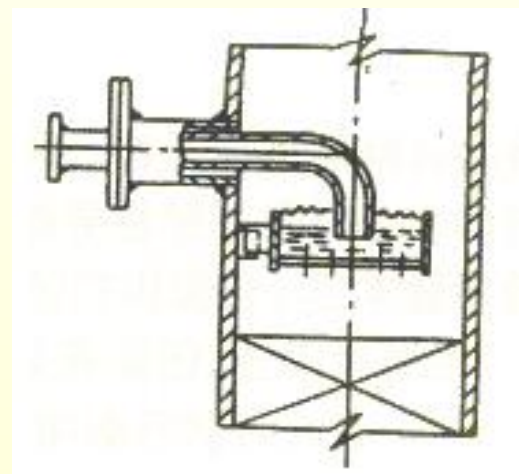
常用的液体分布装置有莲蓬式、盘式、齿槽式及多孔环管式分布器等。



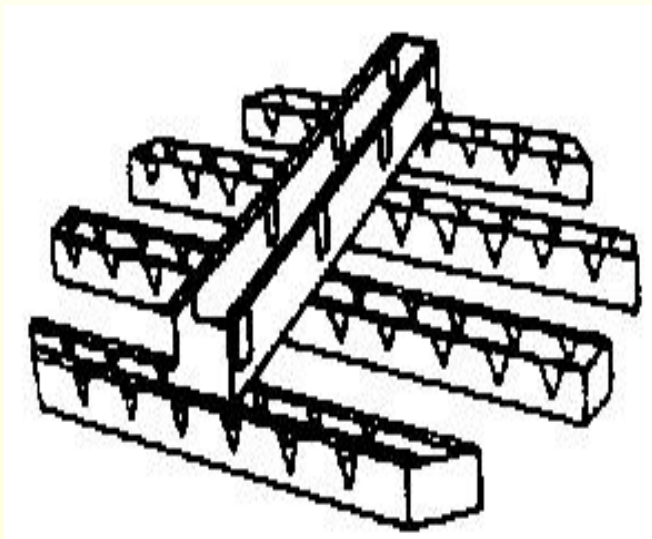
莲蓬式



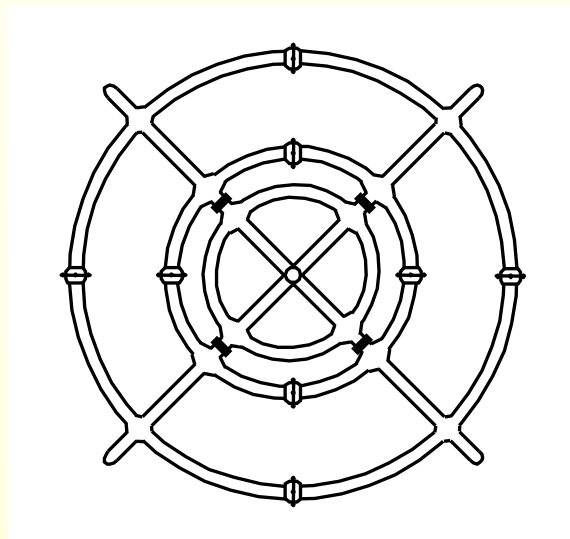
溢流管式



筛孔式



齿槽式



多孔环管式

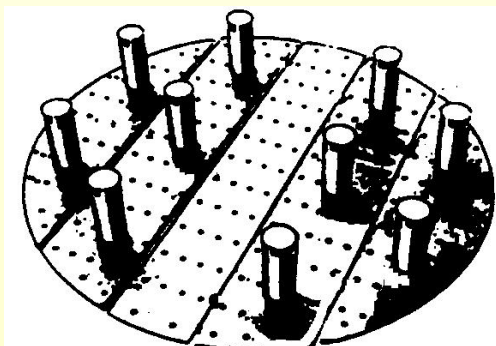
### 3.液体再分布装置

随液体流经的填料层厚度的增加，**偏流**程度增加，造成塔中心的填料不被润湿，降低表面利用率。

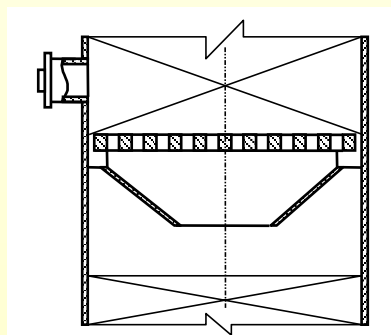
**解决方法：**每隔一定高度设置液体再分布器。

偏流效应越严重，设置液体再分布器的填料间隔应越小，如拉西环每段填料高度一般约为塔径的  $2.5\sim 3$  倍，而鲍尔环和鞍形填料可分为塔径的  $5\sim 10$  倍。

**再分布器的形式：**有盘式、槽式及截锥式等。

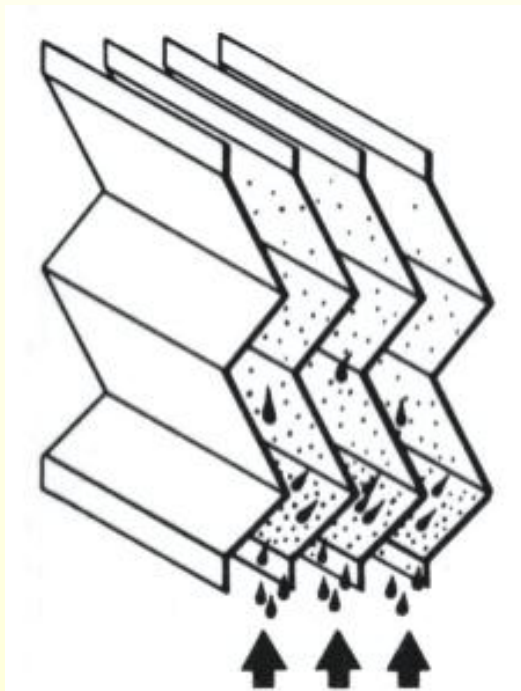


盘式液体再分布器

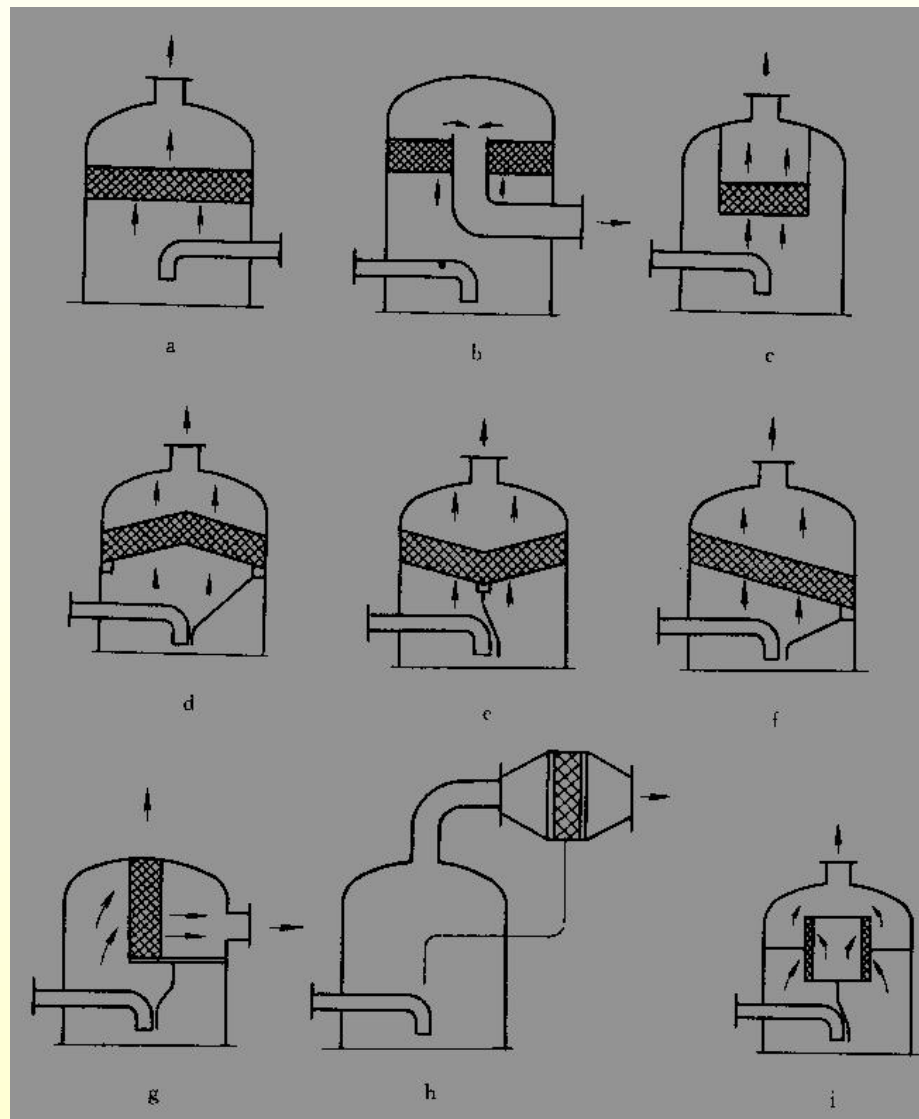


截锥式再分布器

## 4.除沫装置

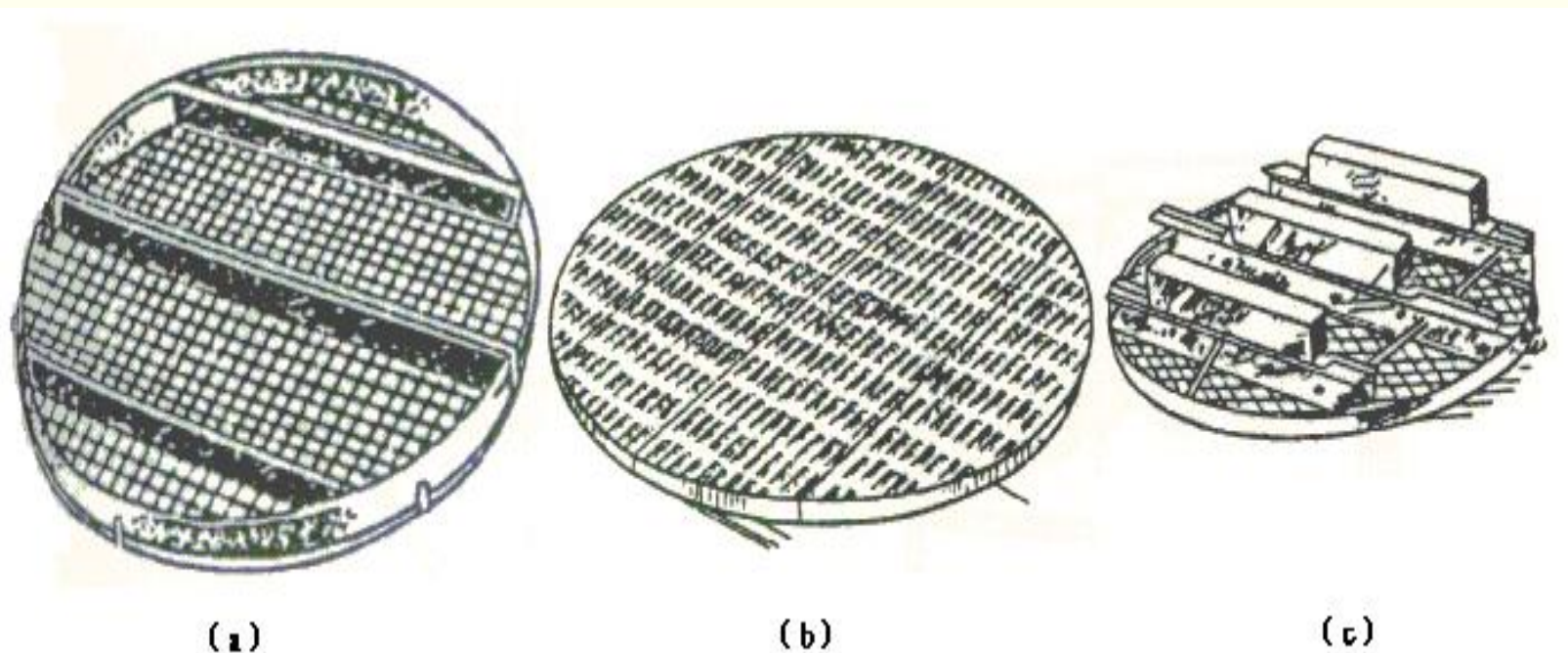


折流板除沫器



丝网除沫器的结构形式

## 5. 填料压紧装置



填料压紧装置

(a) 填料压紧栅板； (b) 填料压紧网板； (c) 905型金属压板

# 板式塔与填料塔比较

## 一、板式塔

- 1 .适用于塔径较大；
- 2 .所需传质单元数或理论板数较多；
- 3 .塔效率较稳定，效率较高；
- 4 .液气比适应范围较大；
- 5 .适于处理有悬浮物的液体；
- 6 .板式塔便于侧线采出；
- 7 .持液量较大；
- 8 .大直径时造价较低

## 二、填料塔

- 1.适用于处理有腐蚀性的物料；
- 2.填料塔压力降较小，适用于真空蒸馏；
- 3.适用于间歇蒸馏或热敏性物料的蒸馏；
- 4.适用于处理易发泡的液体；
- 5.对液量有一定要求；
- 6.持液量较小；
- 7.新型填料投资较大
- 8.塔效率传统填料低；新型乱堆及规整填料高。