

过程设备设计（下）



第五章 储存设备

第六章 换热设备

第七章 塔设备

第八章 反应设备

第七章 塔设备

第一节 概 述

第二节 ➡ 填料塔

第三节 板式塔

第四节 塔设备的附件

第五节 塔的强度设计

第六节 塔设备的振动

7.2 填料塔

教学重点：

填料塔内件的结构设计。

教学难点：

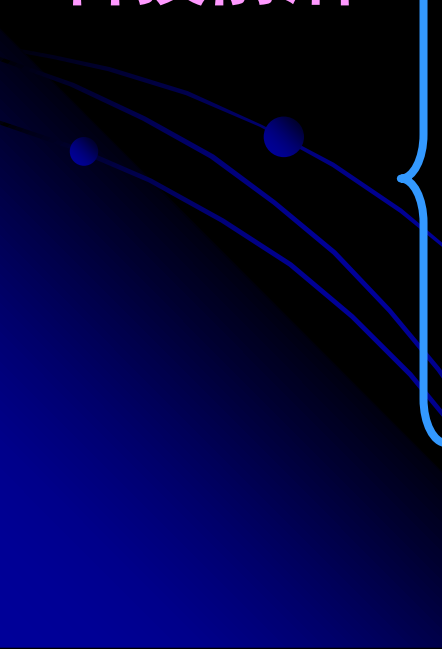
填料塔内件的结构。

7.2 填料塔

基本特点 结构简单，压力降小，传质效率高，便于采用耐腐蚀材料制造等。

对于热敏性及容易发泡的物料，更显出其优越性。

科技前沿

- 
- (1) 开发多种形式、规格和材质的高效，低压降，大流量的填料。
 - (2) 与不同填料相匹配的塔内件结构。
 - (3) 填料层中液体的流动及分布规律。
 - (4) 蒸馏过程的模拟。

7.2.1 填料

填料——塔的核心内件，提供气-液两相接触的传质和换热表面，与塔的其它内件共同决定塔的性能。

填料分类

- 散装填料
- 规整填料

7.2.1.1 散装填料

散装填料——安装时以乱堆为主，也可以整砌。具有一定外形结构的颗粒体，又称颗粒填料。

散装填料

- 环形
- 鞍形
- 环鞍形

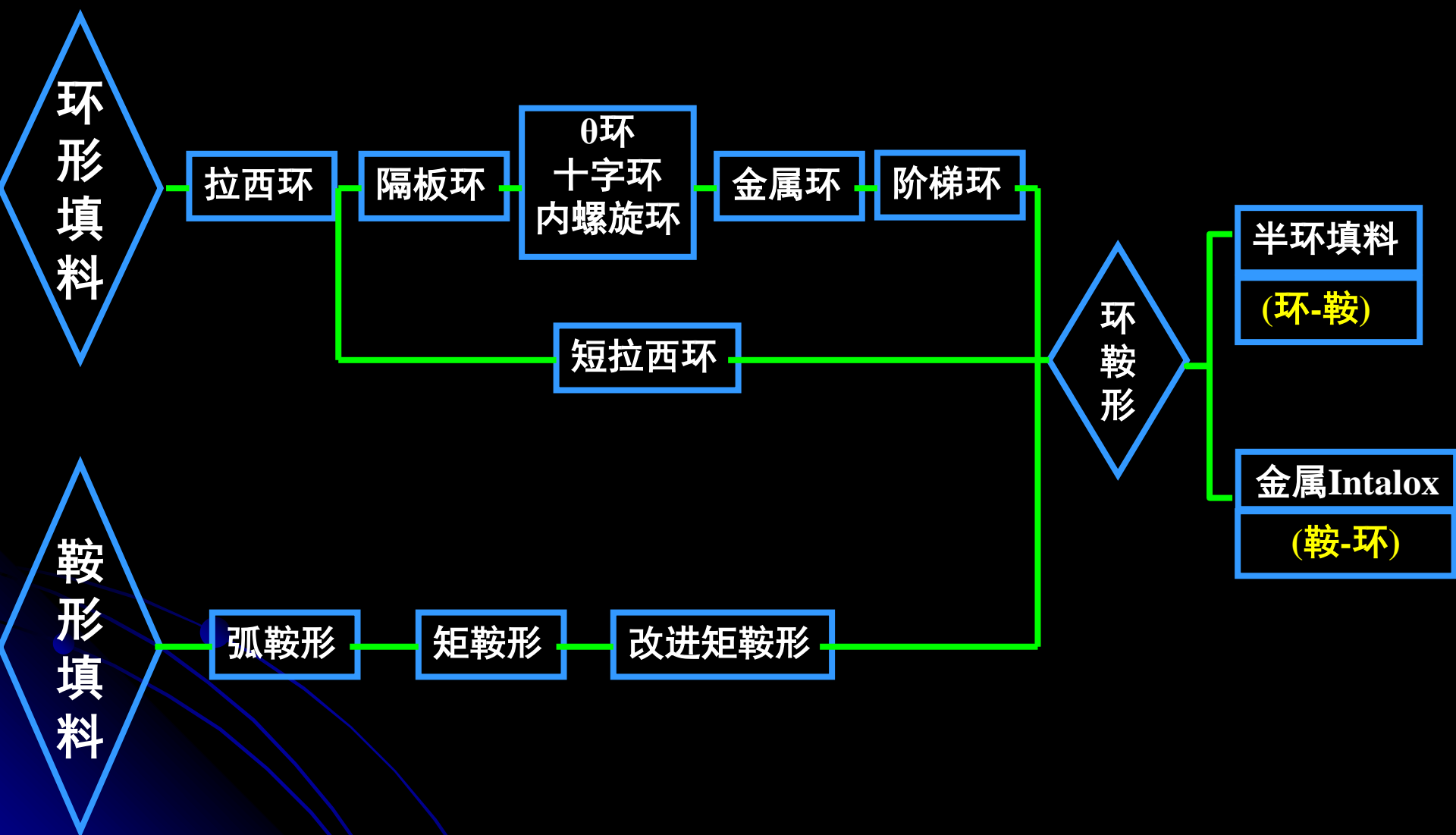


图7-3 散装填料的发展

一、环形填料

1. 拉西环

——高度与外径相等的圆柱体。由陶瓷、金属、塑料等制成。规格以外径为特征尺寸，大尺寸的拉西环(100mm以上)一般采用整砌方式装填，小尺寸的拉西环(75mm以下)多采用乱堆方式填充。

乱堆的缺点：

填料间易产生架桥，相邻填料外表面间形成线接触，填料层内形成积液、液体的偏流、沟流、股流，阻力较大，通量较小。

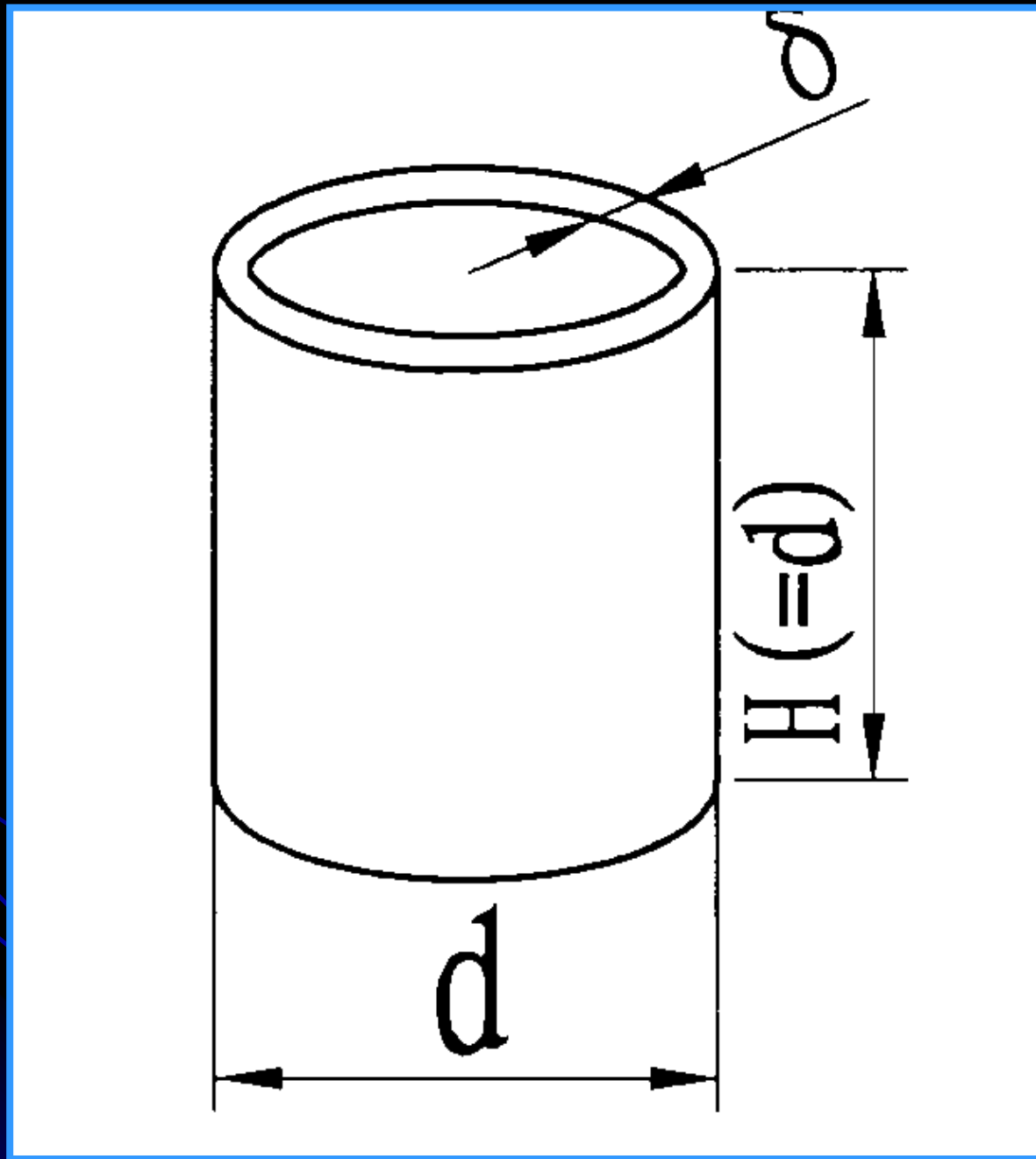


图7-4 拉西环

2. θ 环、十字环及内螺旋填料

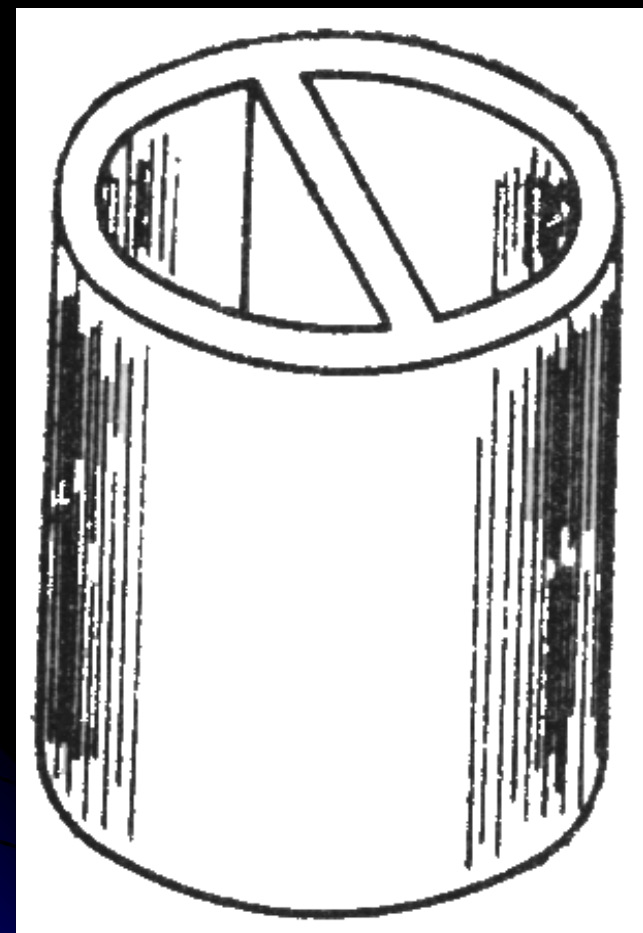
θ 环及十字环填料——在拉西环内分别增加一竖直隔板及十字隔板，见图7-5 (a)、(b)。

● 特点：表面积增加，分离效率有所提高，但总体而言，其传质效率并没有显著提高。

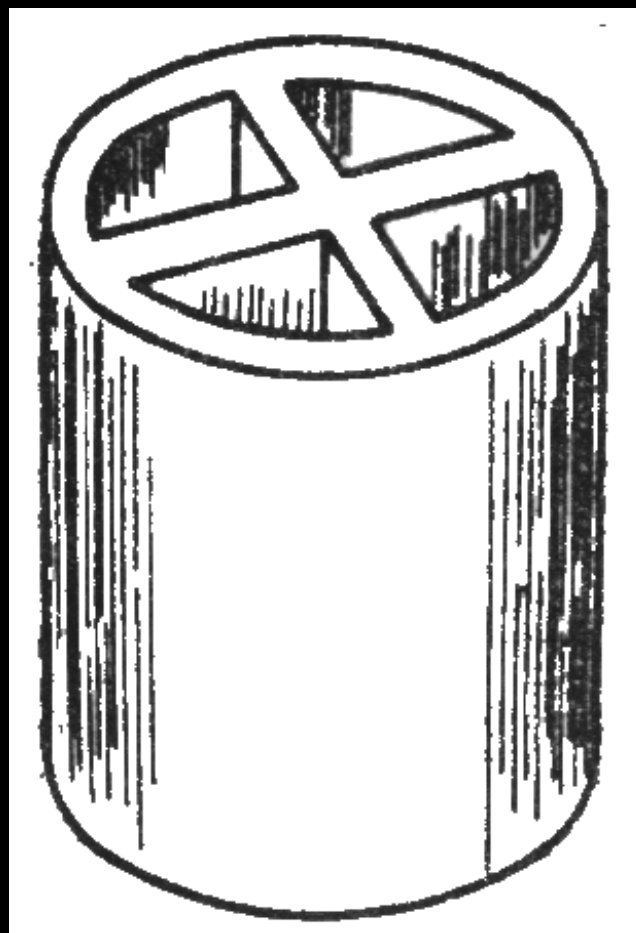
● 装填：大尺寸的十字环填料，多采用整砌装填于填料支承上，作为散装乱堆填料的过渡支承。

内螺旋环填料——在拉西环内增加螺旋形隔板，见图7-5(c)。

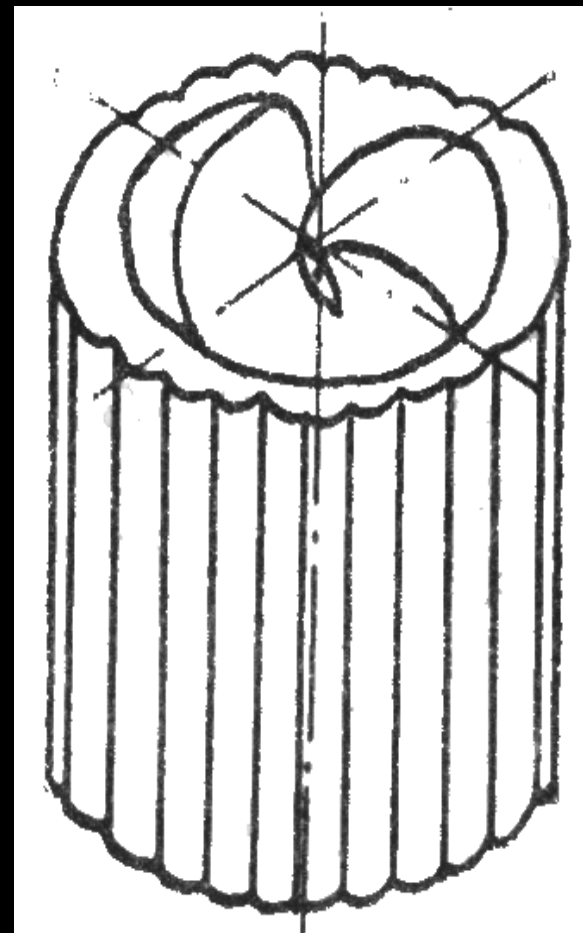
螺旋环填料尺寸较大，一般采用整砌方式装填。



(a)



(b)



(c)

图7-5 θ 环、十字环及内螺旋填料

二、开孔环形填料

结构：在环形填料的环壁上开孔，使断开窗口的孔壁形成一具有一定曲率指向环中心的内弯舌片。

特点：既充分利用了环形填料的表面又增加了许多窗孔，大大改善了气液两相物料通过填料层时的流动状况，增加了气体通量，减少了气相的阻力，增加了填料层的湿润表面，提高了填料层的传质效率。

1. 鲍尔环填料

结构：

高度与直径相等的开孔环形填料，在其侧面开有两层长方形的孔窗，每层有5个窗孔，每个孔的舌叶弯向环心，上下两层孔窗的位置交错。孔的面积占环壁总面积的35%左右。鲍尔环一般用金属或塑料制成。见图7-6。



图7-6 鲍尔环填料

特点:

- 与拉西环相比，效率高出30%左右，
- 在相同的压降下，处理能力增加50%以上，
- 在相同的处理能力下，压降仅为拉西环的一半。

2. 改进型鲍尔环填料

结构：

与鲍尔环相似，只是环壁上开孔的大小及内弯叶片的数量不同。每个窗孔改为上下两片叶片从两端分别弯向环内，叶片数比鲍尔环多出一倍，交错地分布在四个平面上，环壁上的开孔面积比鲍尔环填料有所增加，使填料内的气、液分布情况得到改善，处理能力较鲍尔环提高10%以上。

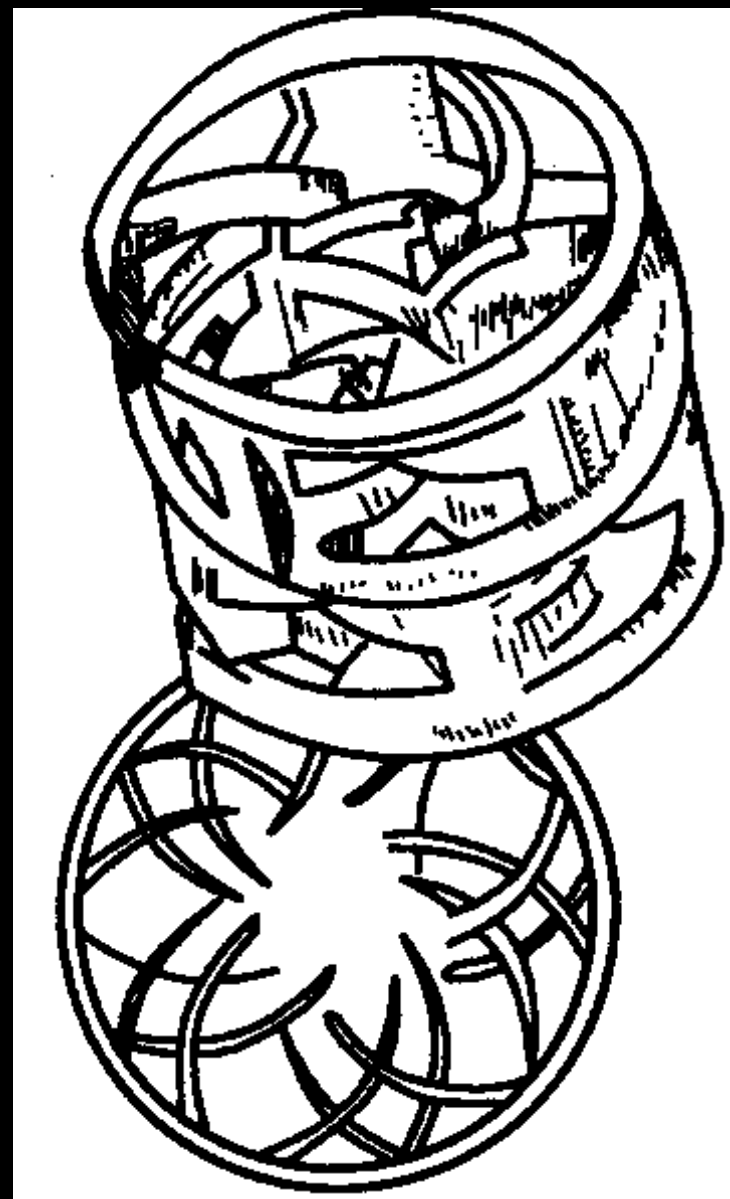


图7-7 改进型鲍尔环填料

3. 阶梯环填料

结构：

类似于鲍尔环，但高度减小一半，一端扩为喇叭形翻边，增加了填料环的强度，且使填料在堆积时相互的接触由线接触为主变成为以点接触为主，增加了填料颗粒的空隙，减少了气体通过填料层的阻力，改善了液体的分布，促进了液膜的更新，提高了传质效率。

由金属、陶瓷和塑料等材料制成。见图7-8。

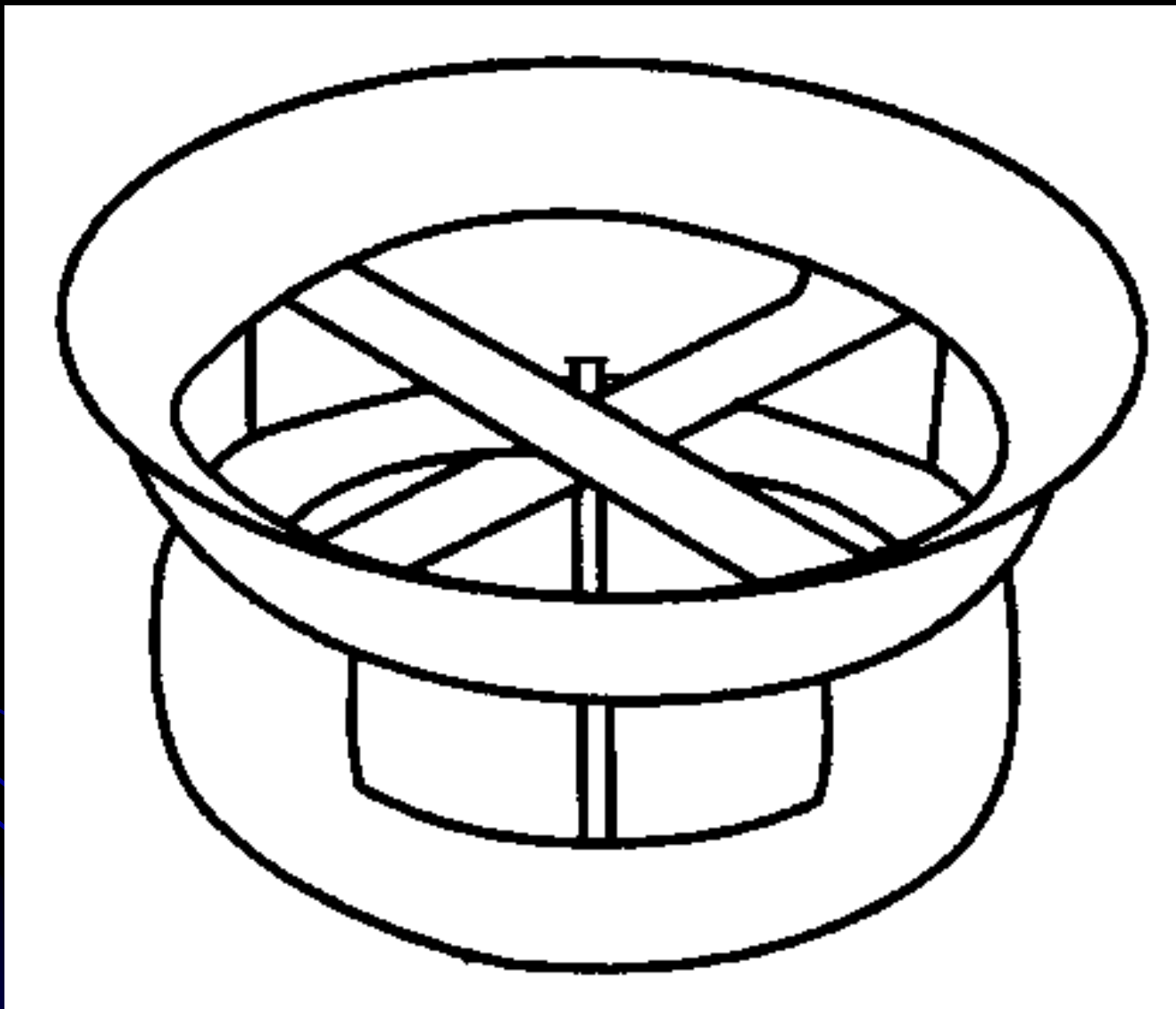


图 7-8 阶梯环填料

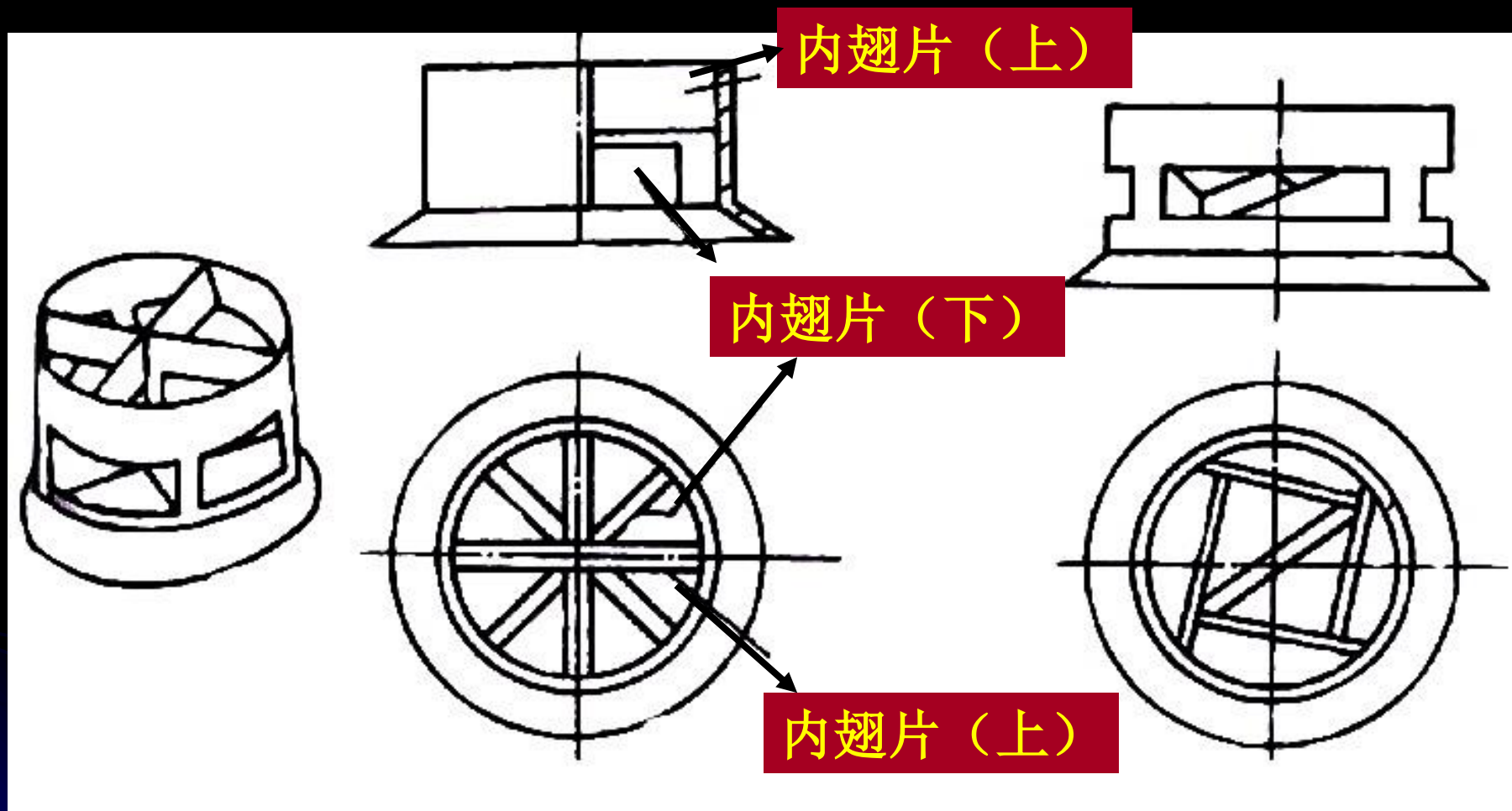


图 7-8 阶梯环填料

三、鞍形填料

结构： 类似马鞍形。

特点： 弧形的液体通道，空隙较环形填料连续，气体向上主要沿弧形通道流动，改善了气-液流动状况。

1. 弧鞍形填料

通常由陶瓷制成。
由于相邻填料容易产生套叠和架空的现象，使一部分填料表面不能被湿润，即不能成为有效的传质表面，目前基本被矩鞍形填料所取代。

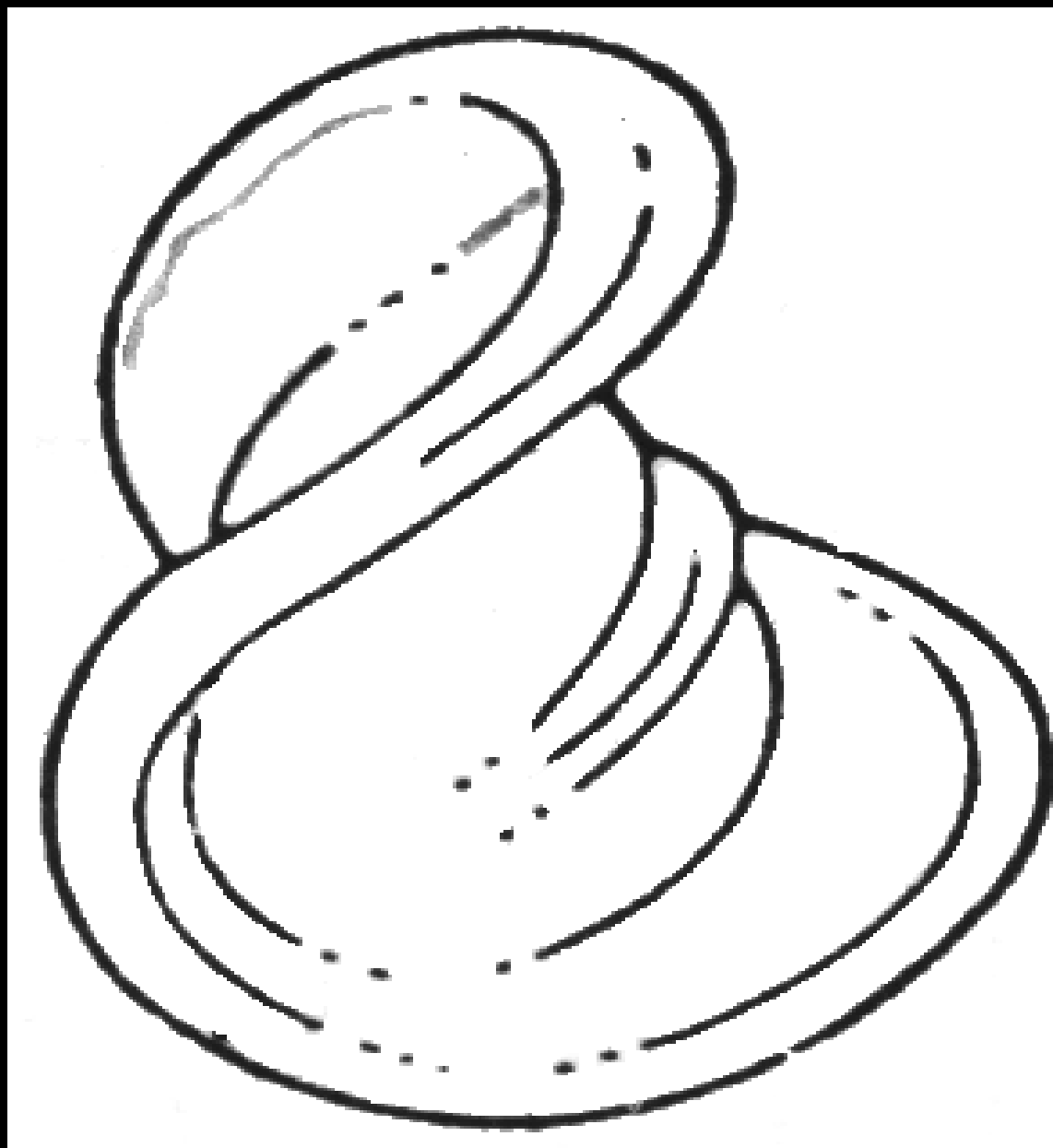


图7-9 弧鞍形填料

2. 矩鞍形填料

结构：

敞开式填料，由弧鞍型填料发展而来。它将弧鞍填料的两端由圆弧改为矩形，克服了弧鞍填料容易相互叠合的缺点。

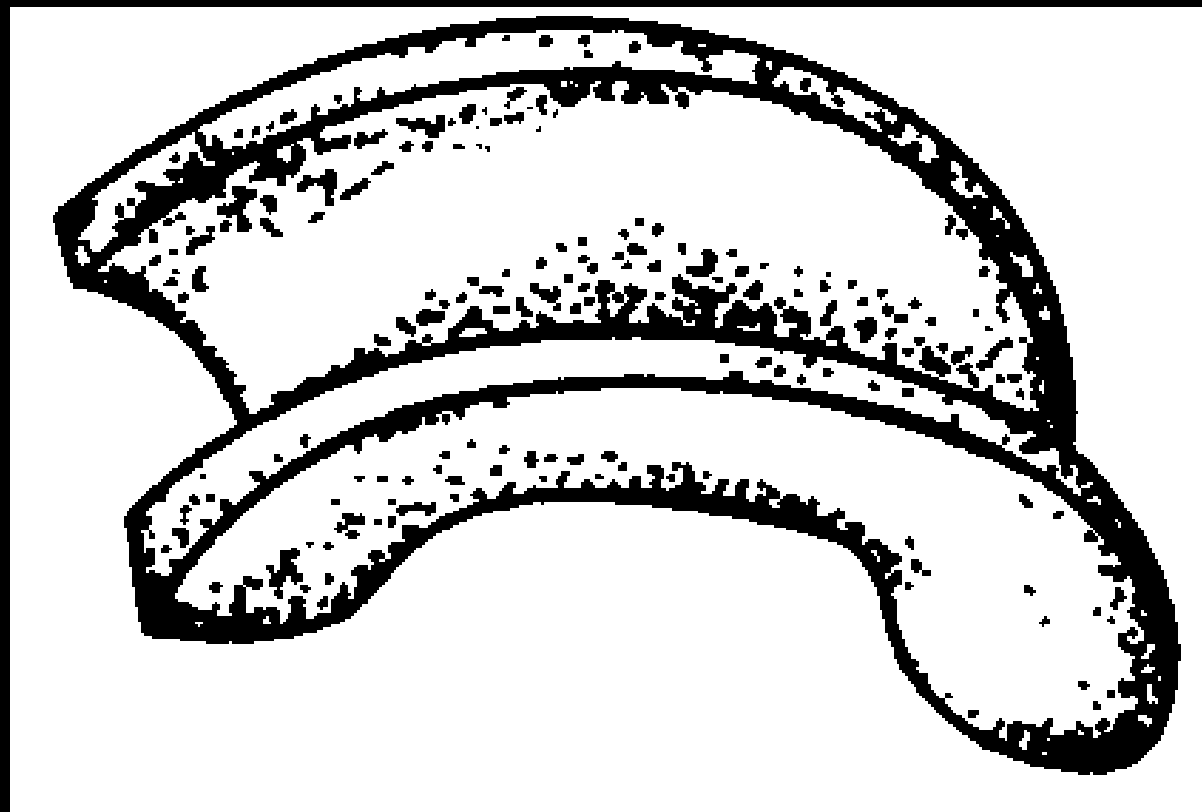


图7-10 矩鞍形填料

矩鞍形填料特点：

- 重叠较少，空隙率较大，填料表面利用率高；
- 压降低，传质效率比拉西环提高40%以上，不易被固体悬浮颗粒堵塞，装填时破碎量较少；
- 应用广泛。可用瓷质材料，塑料制成。

3. 改进矩鞍填料

结构 将原矩鞍填料的平滑弧形边缘改为锯齿状，见图7-11。
在填料的表面增加皱折，并开有圆孔。

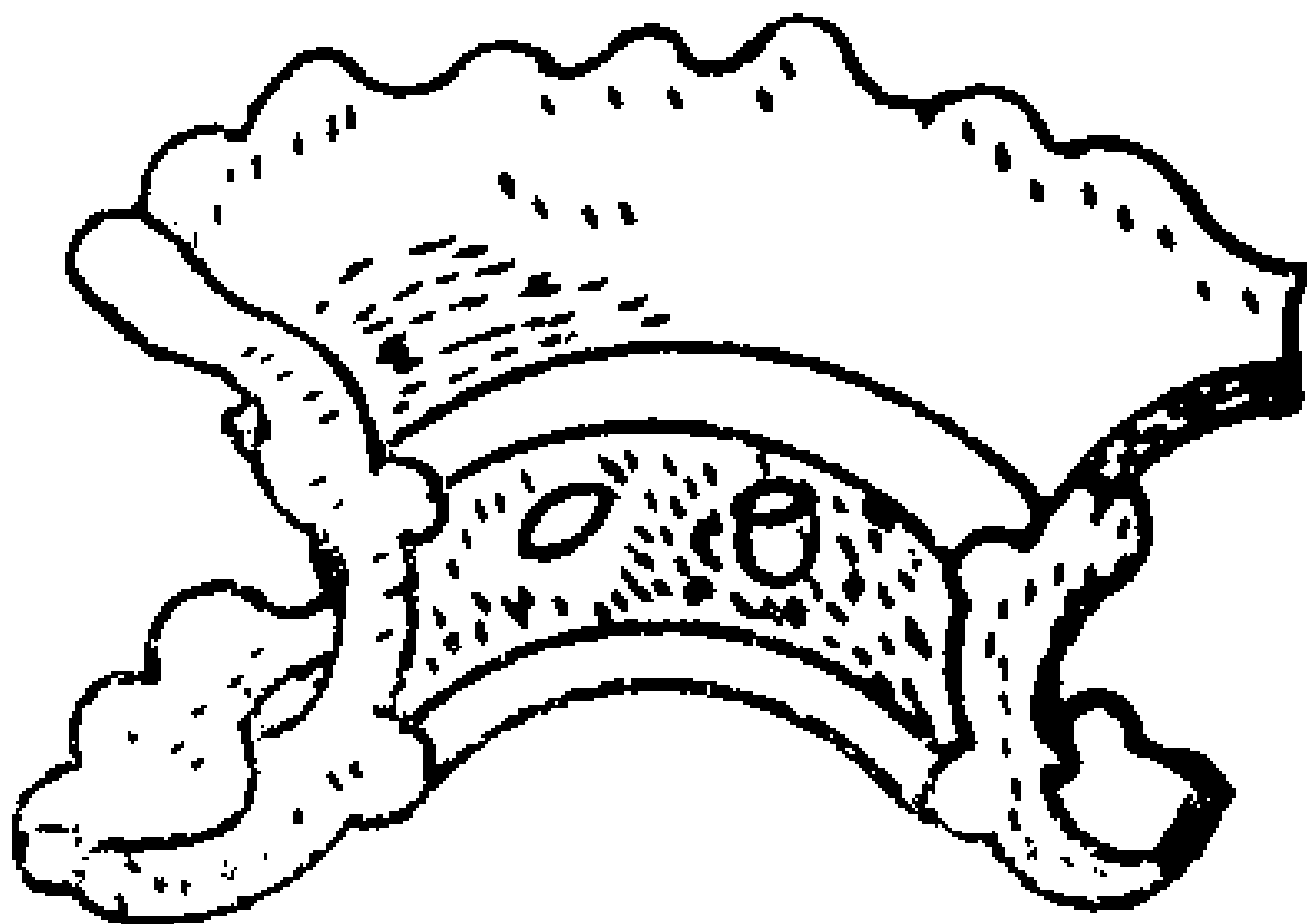


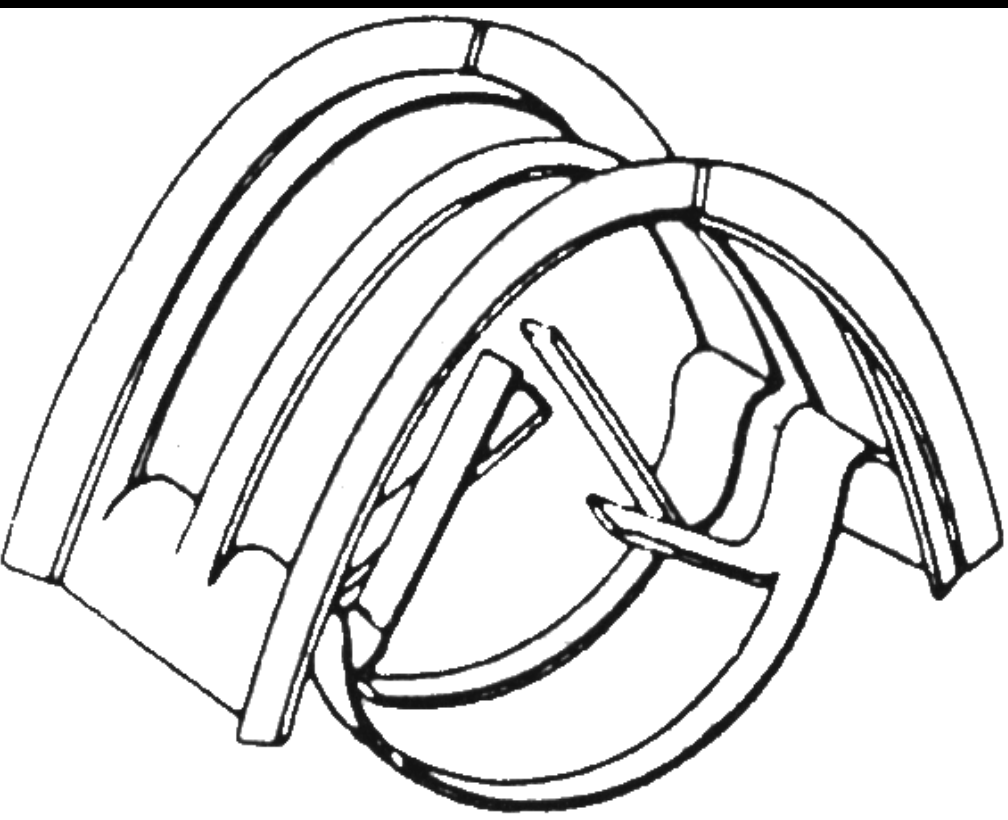
图 7-11
改进矩鞍填料

改进矩鞍填料特点：

- 改善流体分布，增大填料表面湿润率；
- 增强液膜湍动，降低气体阻力，提高处理能力和传质效率；
- 可用陶瓷或塑料制造。

四、金属环矩鞍填料 (Intalox)

1978年由美国Norton公司首先开发，不久国产金属环矩鞍填料即用于生产。



将开孔环形填料和矩鞍填料的特点相结合，既有类似于开孔环形填料的圆环、环壁开孔和内伸的舌片，又有类似于矩鞍填料的圆弧形通道，开敞的结构。用薄金属板冲制的整体环鞍结构，两侧的翻边增加了填料的强度和刚度。

图7-12 金属环矩鞍填料

特点:

- ◆ 流体的通量大、压降低、滞留量小，利于液体在填料表面的分布及液体表的更新，从而提高传质性能，与金属鲍尔环相比，通量提高15~30%，压降降低40~70%，效率提高10%左右。
- ◆ 应用广泛，特别在乙烯、苯乙烯等减压蒸馏中效果更为突出。

7.2.1.2 规整填料

散装填料——

填料乱堆在塔内，气液两相的流动路线是随机的，装填时各处不均，易产生沟流等不良分布，降低塔的效率。

规整填料——

填料在塔内按均匀的几何图形规则、整齐地堆砌，人为地规定了填料层中气、液的流路，改善了沟流和壁流的现象，大大降低了压降，提高了传热、传质的效果。

种类：丝网波纹填料及
板波纹填料

一、丝网波纹填料

用材——金属，如不锈钢，铜、铝、铁、镍及蒙乃尔等，塑料丝网波纹填料及碳纤维波纹填料。

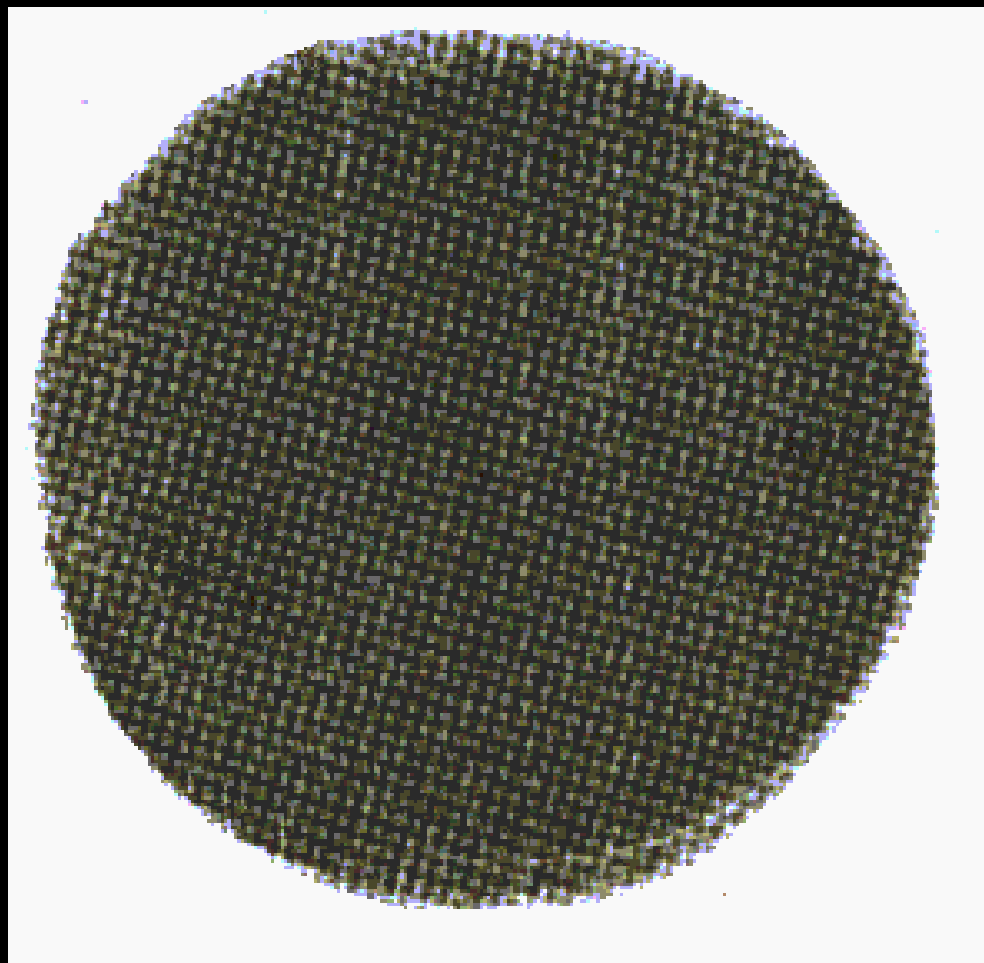


图7-13 丝网波纹填料

7.2 填料塔 结构

由厚度为 $0.1\sim 0.25\text{mm}$ ，相互垂直排列的不锈钢丝网波纹片叠合组成的盘状规整填料。

相邻两片波纹的方向相反，在波纹网片间形成一相互交叉又相互贯通的三角形截面的通道网。

叠合在一起的波纹片周围用带状丝网箍住，箍圈可以有向外的翻边以防壁流。波片的波纹方向与塔轴的倾角为 30° 或 45° 。每盘的填料高度为 $40\sim 300\text{mm}$ ，见图7-12。

通常填料盘的直径略小于塔体的内径。上下相邻两盘填料交错 90° 排列。

小塔径——填料整盘装填，

1.5米以上大塔或无法兰连接的不可拆塔体——
用分块形式从人孔吊入塔内再拼装。

工作原理

操作时，液体均匀分布于填料表面并沿丝网表面以曲折的路途向下流动，气体在网片间的交叉通道内流动，气、液两相在流动过程中不断地、有规则地转向，获得较好的横向混合。

又因上下两盘填料的板片方向交错 90° ，故每通过一层填料后，气液两相进行一次再分布，有时还在波纹填料片上按一定的规则开孔（孔径 $\Phi 5\text{mm}$ ，孔间距约为 10mm ），这样相邻丝网片间气、液分布更加均匀，几乎无放大效应。

应用——
大型塔器中

缺点——造价高，抗污能力差，难以清洗

二、板波纹填料

结构：

用表面具有沟纹及小孔的金属板波纹片代替金属网波纹片，即每个填料盘由若干金属板波纹片相互叠合而成。相邻两波纹片间形成通道且波纹流道成 90° 交错，上、下两盘填料中波纹片的叠合方向旋转 90° 。

分为：金属、塑料及陶瓷板波纹填料三大类。

造价比丝网波纹填料低的多

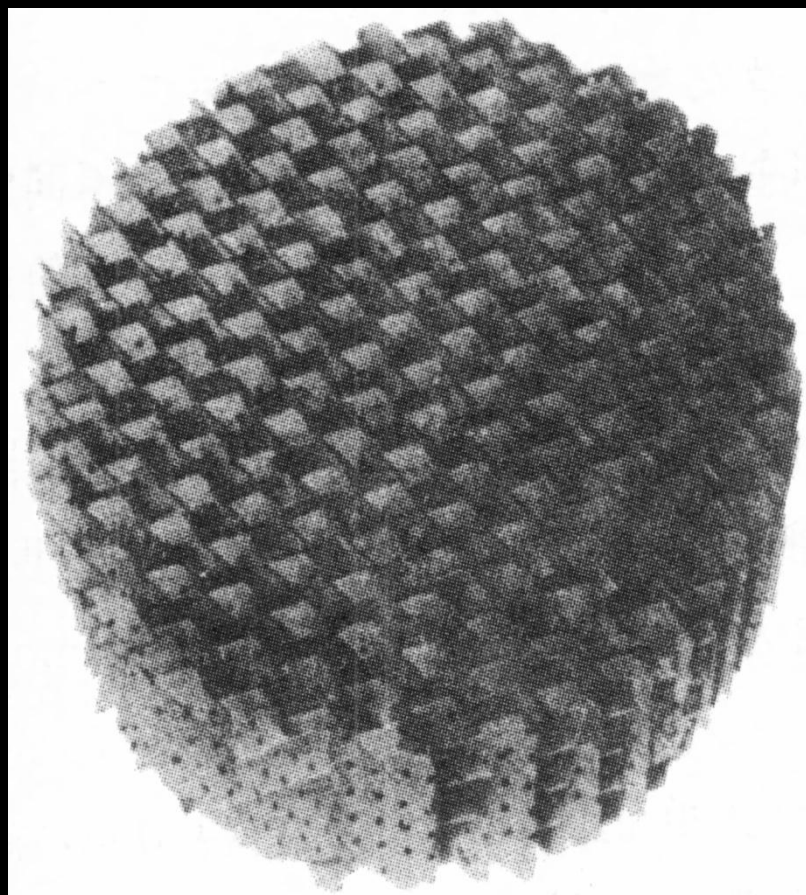


图7-14 金属板波纹填料

金属板波纹填料

金属板波纹填料保留了金属丝网波纹填料压降低、通量高、持液量小，气液分布均匀，几乎无**放大效应**等优点，传质效率也比较高。

指随塔径增加，塔板效率降低。主要原因是由于过去老式填料的沟流、壁流严重导致的。

7.2.1.3 填料的选用

依据——

主要是效率、通量和压降。它们决定塔能力的大小及操作费用。

实际应用中——

一般选用具有中等比表面积（单位体积填料中填料的表面积, m^2/m^3 ）的填料比较经济。

还应考虑系统的腐蚀性、成膜性和是否含有固体颗粒等因素来选择不同材料，不同种类的填料。

比表面积较小的填料——

空隙率大，用于流体高通量，大液量及物料较脏的场合。

7.2.2 填料塔内件的结构设计

7.2.2.1 填料的支承装置

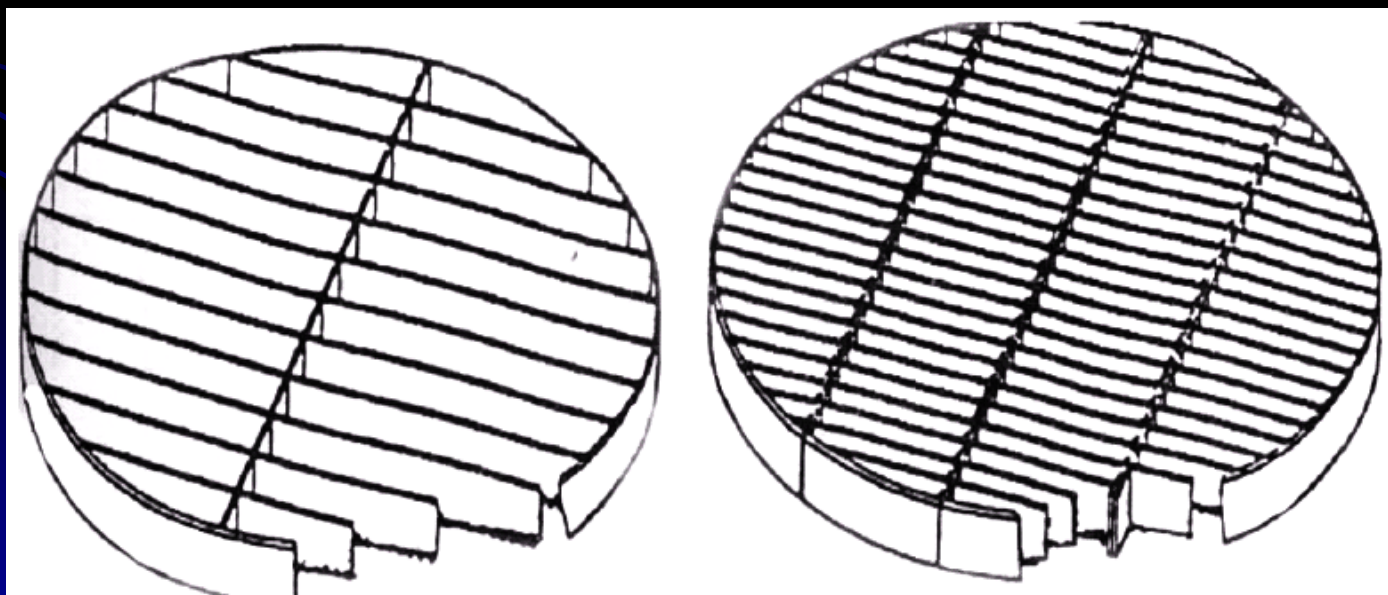
位置： 安装在填料层的底部。

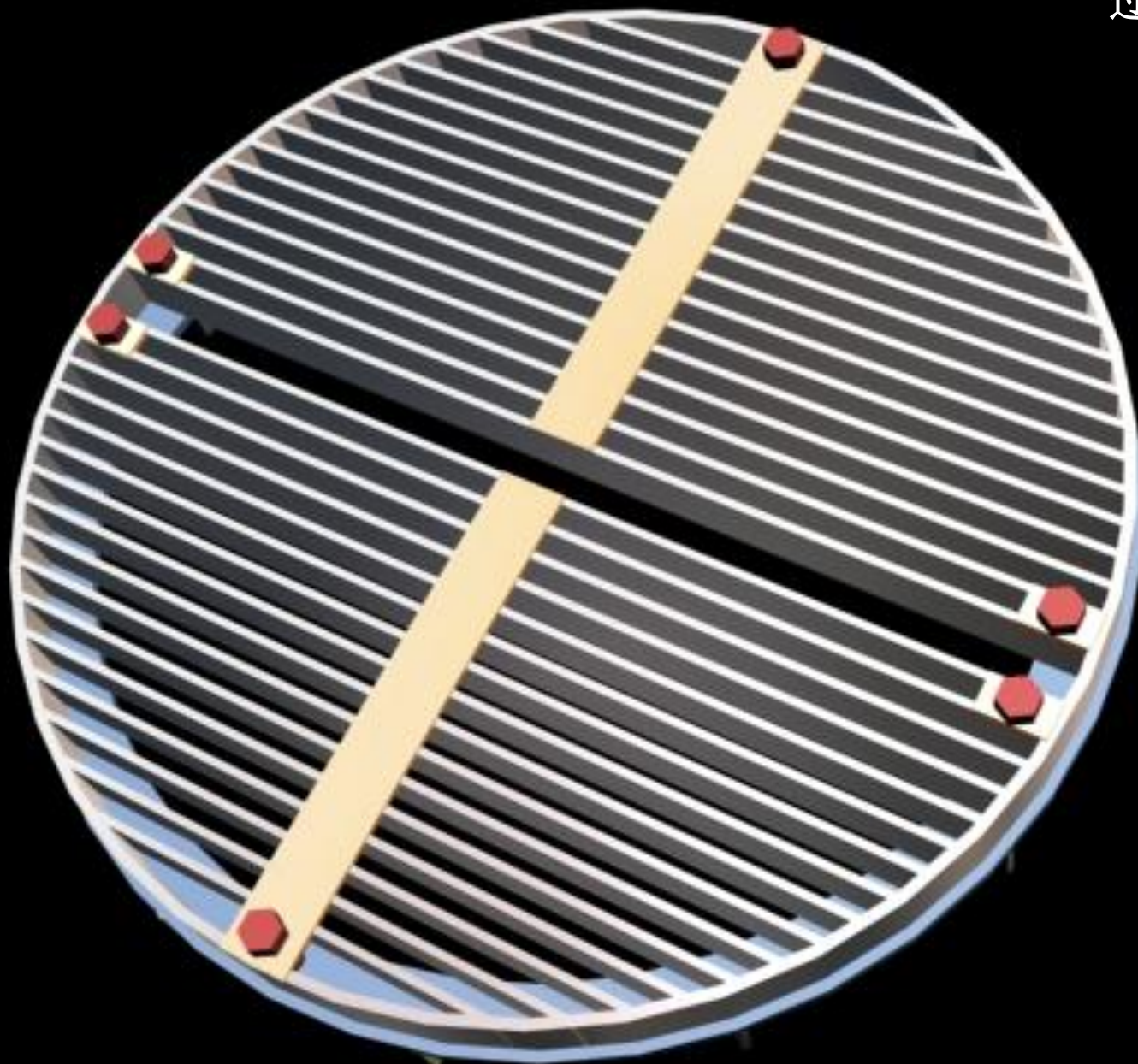
作用： 防止填料穿过支承装置而落下；
支承操作时填料层的重量；
保证足够的开孔率，使气液两相能自由通过。

要求： 具备足够的强度及刚度，结构简单，便于安装，耐腐蚀。

一、栅板型支承

- **特点：** 结构最简单，最常用。
- **结构：** 由相互垂直的栅条组成，放置于焊接在塔壁的支撑圈上。
小塔径——整块式栅板，
大塔径——分块式栅板。





栅板支承

● 缺点：散装填料直接乱堆在栅板上时，
将空隙堵塞而减少开孔率。

● 应用：广泛用于规整填料塔。
有时在栅板上先放置一盘板波纹填料，然后再装
填散装填料。

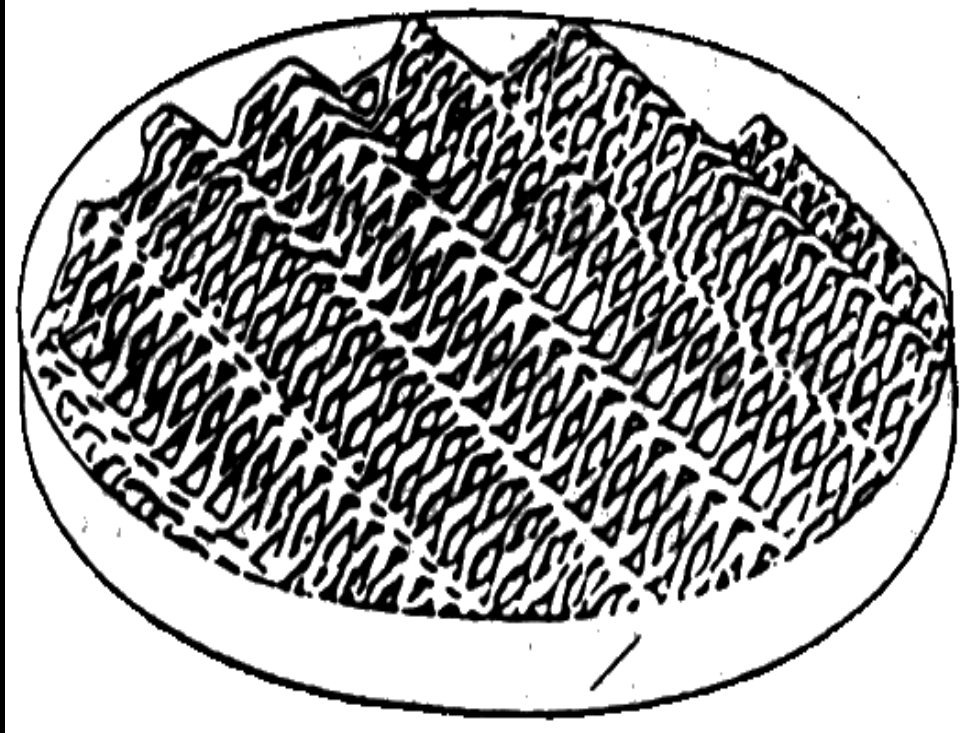
二、气液分流型支承

特点：

- 高通量低压降。
- 为气体及液体提供了不同的通道，避免了栅板式支承中气液从同一孔槽中逆流通过。
- 避免了液体在板上的积聚，利于液体的均匀再分配。

1. 波纹式

结构:

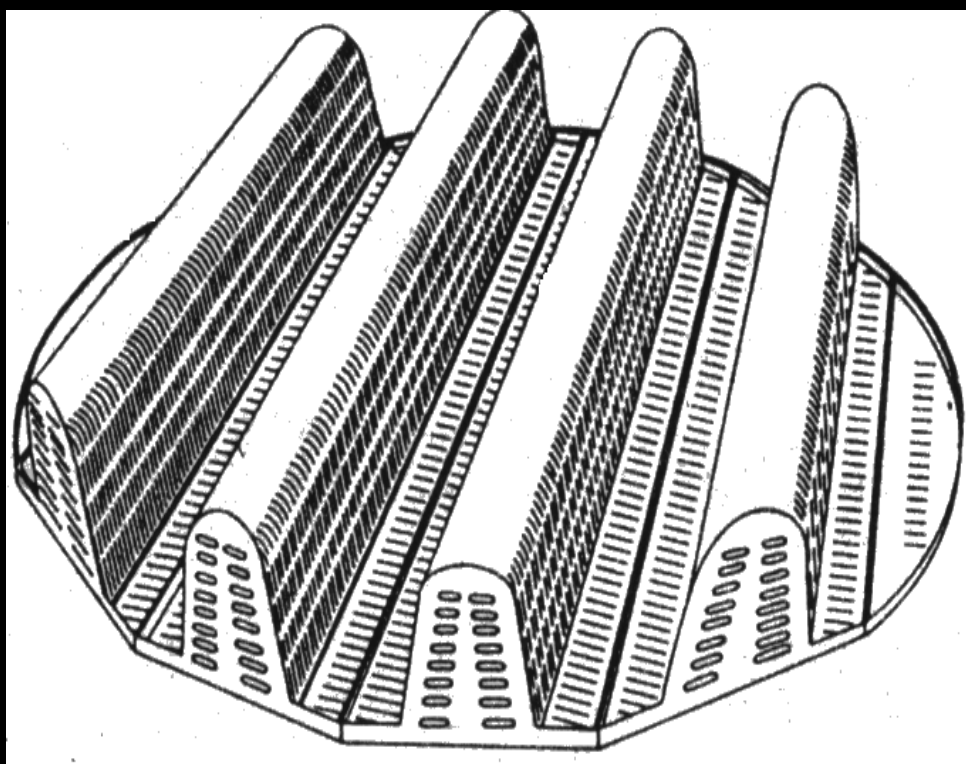


由金属板加工的网板冲压成波形，焊接在钢圈上。网孔呈菱形，波形沿菱形的长轴冲制。

网板最大厚度，碳钢为8mm，不锈钢6mm，菱形长轴150mm，短轴为60mm，波纹高度为25~50mm，波距一般大于50mm。

2. 驼峰式

结构：

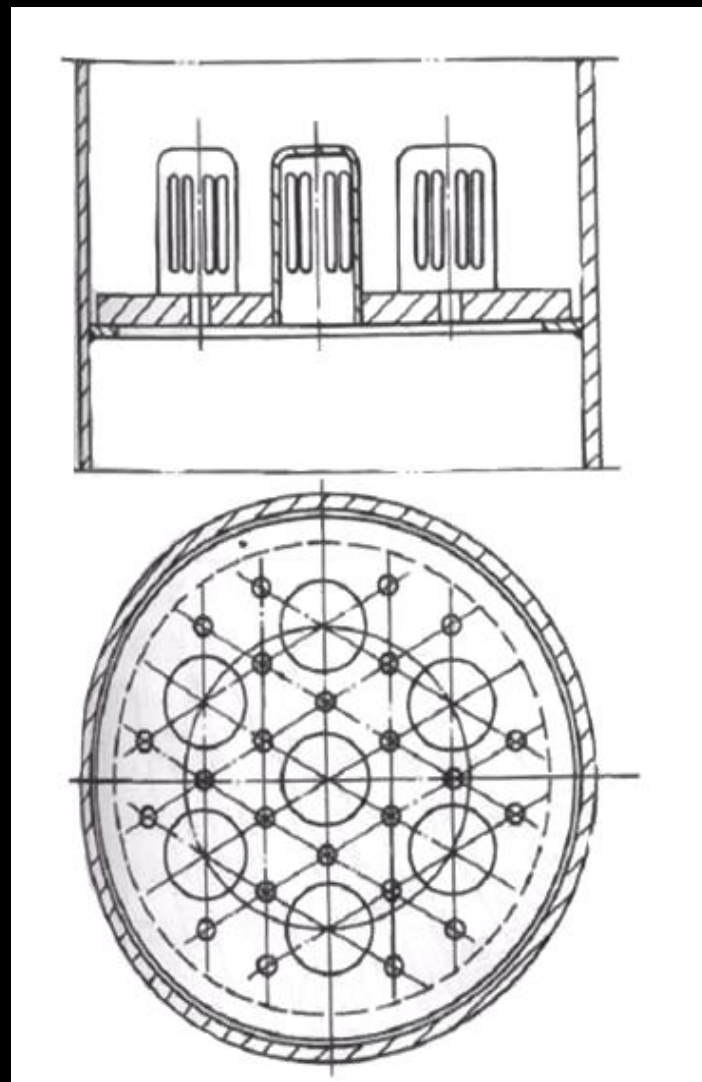
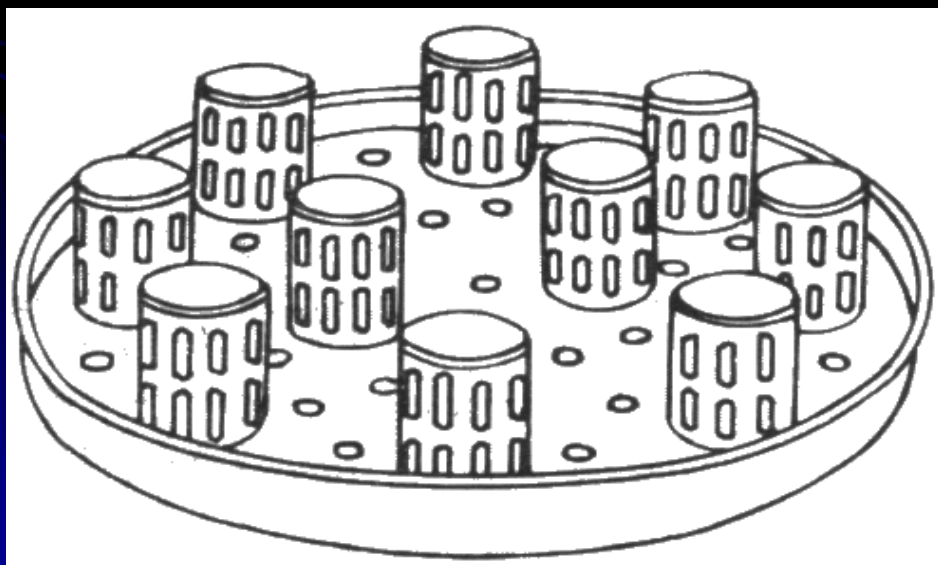


组合式结构，其梁式单元体，尺寸宽290mm，高300mm，各梁式单元体之间用定距凸台保持10mm 的间隙供排液用。各梁式单元体由钢板冲压成型。驼峰上具有条形侧孔。

板厚为：不锈钢4mm，碳钢为6mm。

3. 孔管式

将位于支承板上的升气管上口闭，管壁上开长孔，气体分布较好，液体从支承板上的孔中排出，特别适用于塔体用法兰连接的小型塔。



7.2.2.2 填料塔的液体分布器

作用——

液相加料及回流液均匀地分布到填料的表面上，形成液体的初始分布。

设计要点——

液体分布点密度，分布点布液方式，布液的均匀性等因素。

包括——分布器结构形式、几何尺寸确定、液位高度或压头大小、阻力等。

分布参数——

$D \leq 400\text{mm}$ 时，每 30cm^2 的塔截面设一个喷淋点

$D \leq 750\text{mm}$ 时，每 60cm^2 的塔截面设一个喷淋点

$D \leq 1200\text{mm}$ 时，每 240cm^2 的塔截面设一个喷淋点

规整填料——

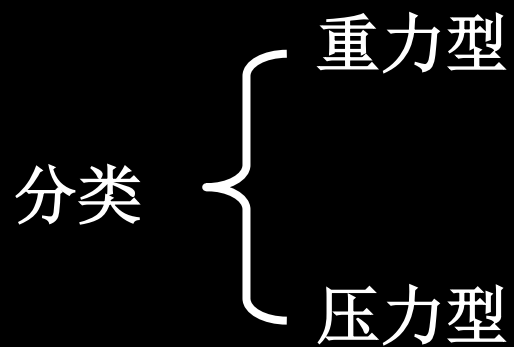
对液体分布均匀要求高，按每 $20 \sim 50\text{cm}^2$ 塔截面设置一个喷淋点。

位置——高于填料层表面 $150 \sim 300\text{mm}$ 。

结构分类——

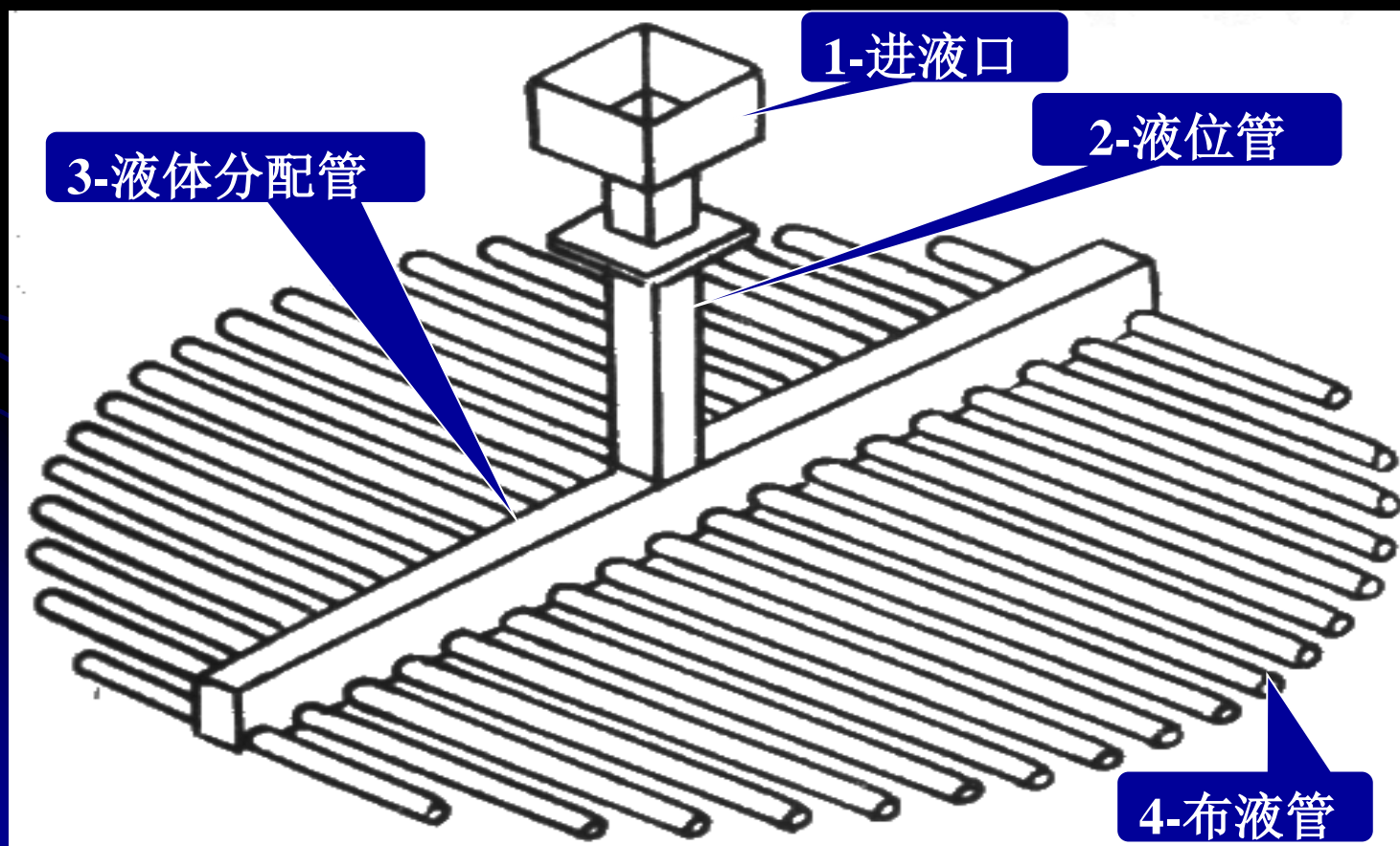
管式、槽式、喷洒式及盘式。

一、管式液体分布器



重力型排管式液体分布器

进液口为漏斗形，内置金属丝网过滤器，以防止固体杂质进入液体分布器内。液位管2及液体分配管3可用圆管或方管制成。布液管4一般由圆管制成，且底部打孔以将液体分布到填料层上部。



小塔——整体式，
大塔——可拆式。

优点

风载作用下液体不会溅出。

较高的分布质量。

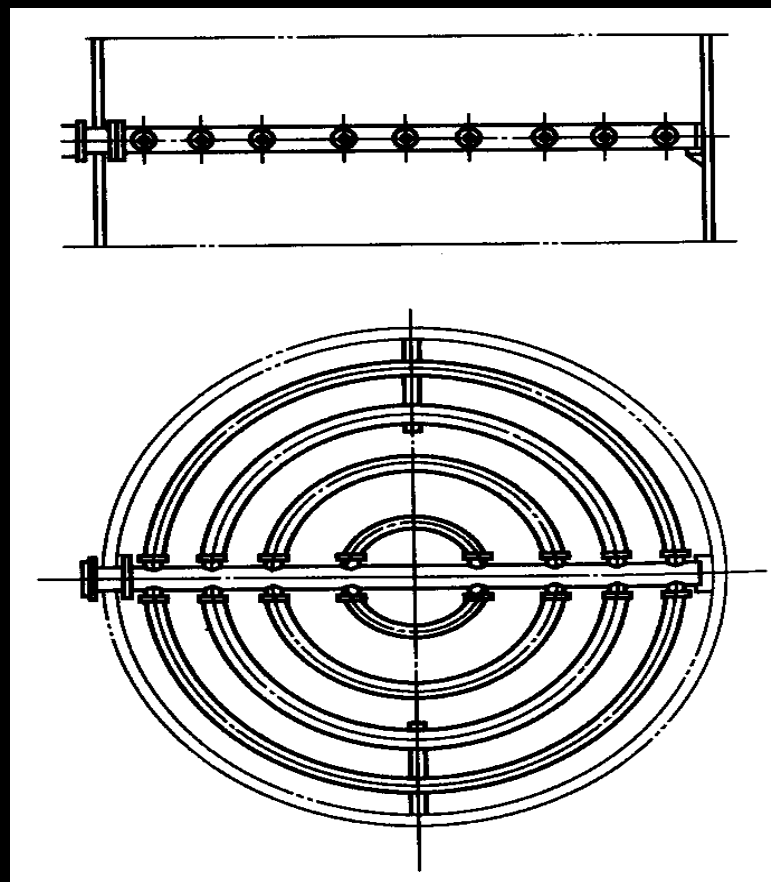
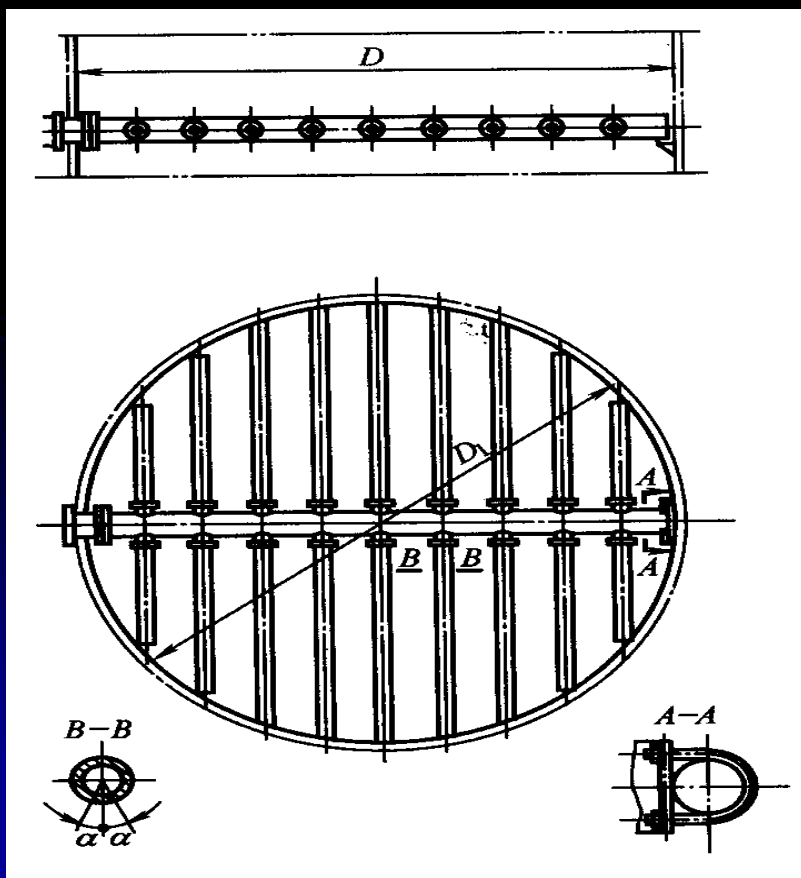
应用

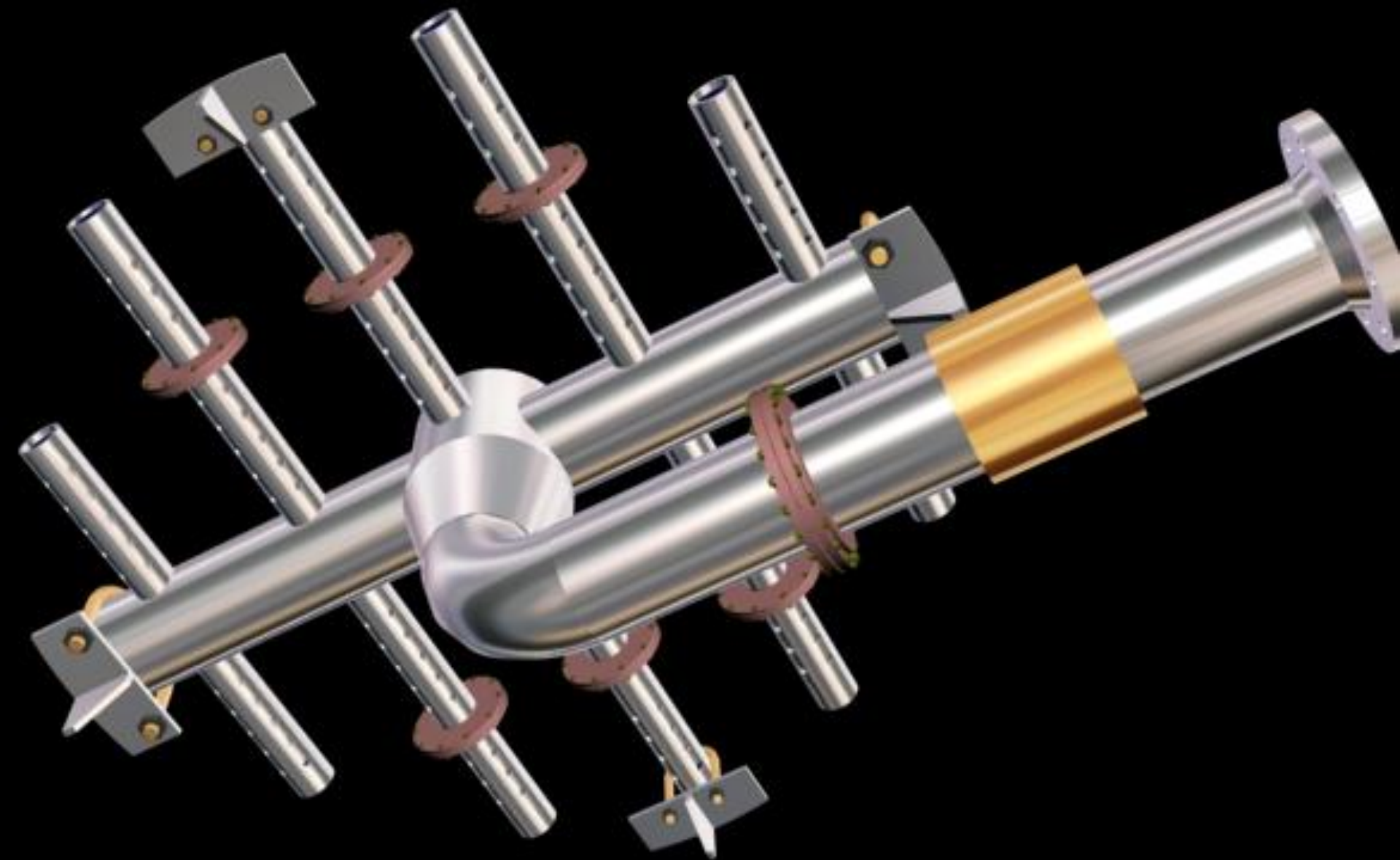
中等以下液体负荷及无污物的液料，
特别是丝网波纹填料塔。

压力型管式分布器

靠泵的压头或高液位通过管道与分布器相连，将液体分布到填料上。

分为：排管式和环管式。见下图。





压力型管式分布器

特点——

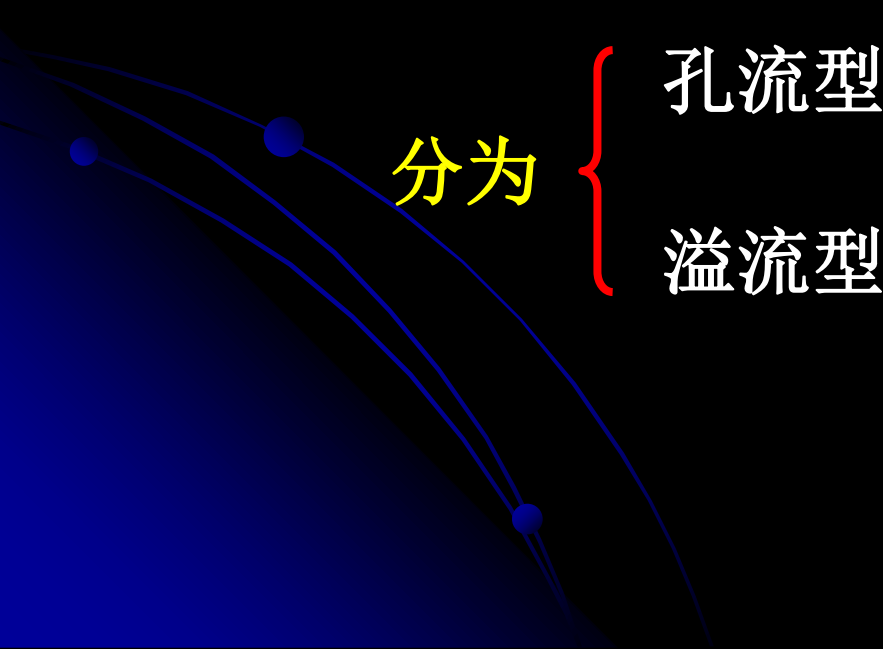
结构简单，易于安装，占用空间小，适用于带有压力的液体进料。

注意——

只能用于液体单相进料，操作时必须充满液体。

二、槽式液体分布器

——为重力型分布器，
它是靠液位(液体的重力)分布液体。



分为 { 孔流型
溢流型

The diagram illustrates the internal structure of a gravity liquid distributor. It shows a sloped channel with three blue dots representing liquid levels at different points. A red bracket on the right side of the channel groups the two types of flow: '孔流型' (orifice flow) for the upper part and '溢流型' (overflow flow) for the lower part. The text '分为' (divided into) is placed to the left of the bracket.

1. 槽式孔流分布器

主槽 1 为矩形截面敞开式的结构，主槽的作用是将液体通过其底部的布液孔均匀稳定地分配到各分槽中。

分槽 2 将主槽分配的液体，由槽底的布液孔均匀地分布到填料的表面上。

一般情况下，最低液位以50mm为宜，最高液位由操作弹性、塔内允许的高度及造价确定，一般200mm左右。

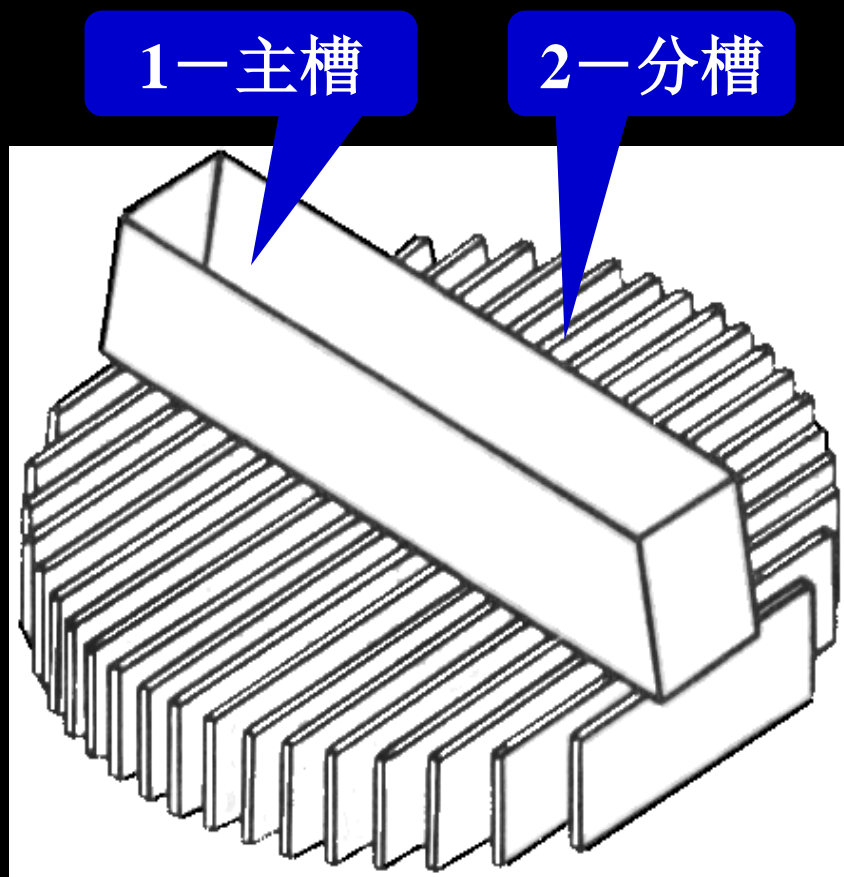
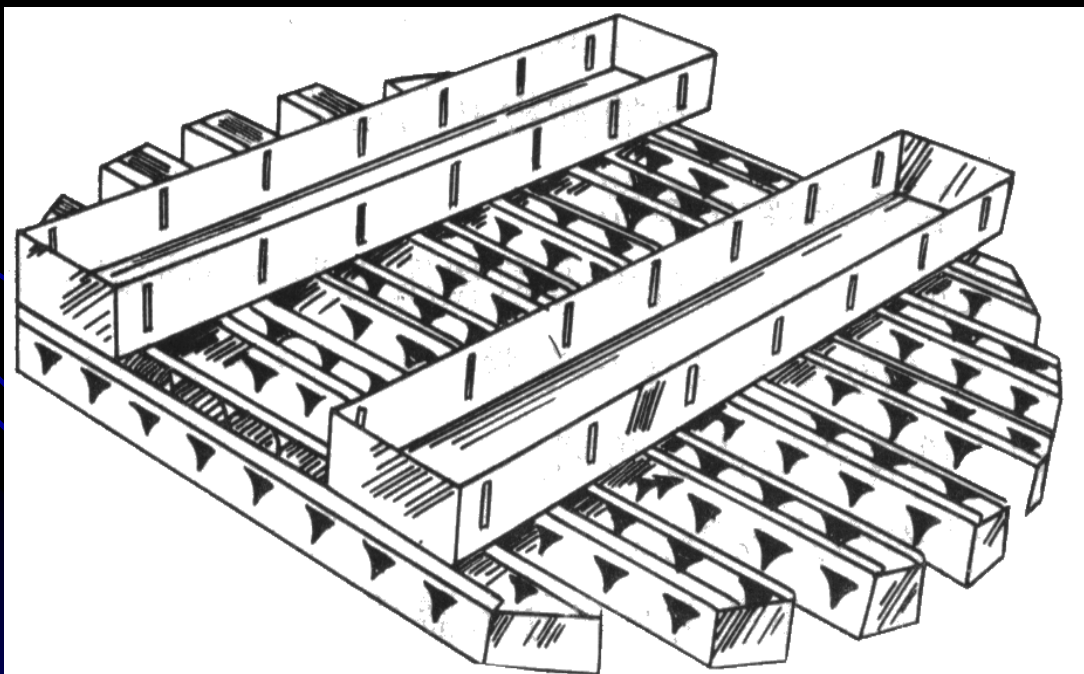


图7-21 槽式孔流型
液体分布器

2. 槽式溢流型液体分布器

结构——

- ◆ 将槽式孔流型分布器的底孔改成侧向溢流孔。溢流孔一般为倒三角形或矩形，它适用于高液量或物料内有脏物易被堵塞的场合。
- ◆ 主槽可设置一个或多个，视塔径而定，直径2m以下的塔可设置一个主槽，直径2m以上或液量很大的塔可设2个或多个主槽。



应用——常用于散装填料塔中
(其分布质量不如槽式孔流型分布器)。

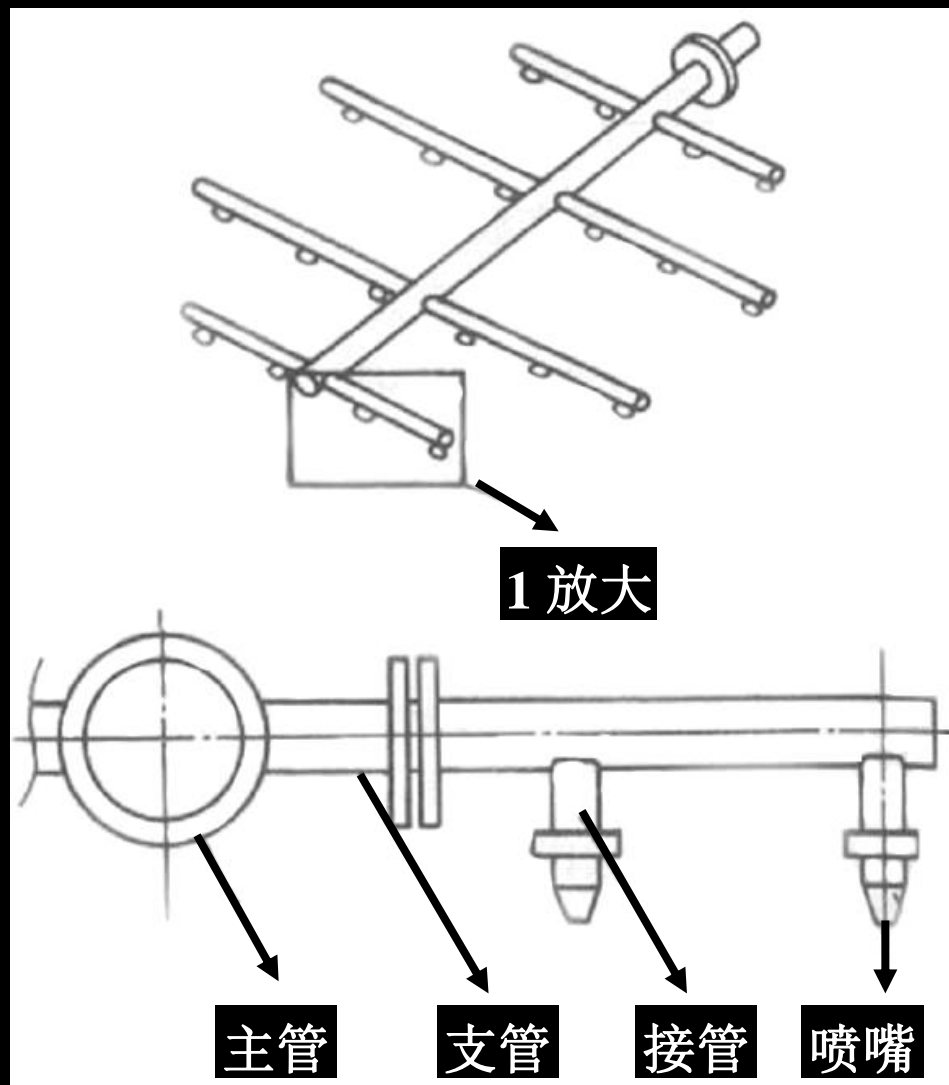
分槽宽度——	一般为100~120mm,
分槽高度——	一般为100~150mm,
分槽中心距——	一般为300mm左右。

三、喷洒式液体分布器

结构

与压力型管式分布器相似，在液体压力下，通过喷嘴（而不是管式分布器的喷淋孔）将液体分布在填料上。

早期使用莲蓬头，由于分布性能差，现已很少使用。现利用喷嘴代替莲蓬头，取得较好的分布效果。

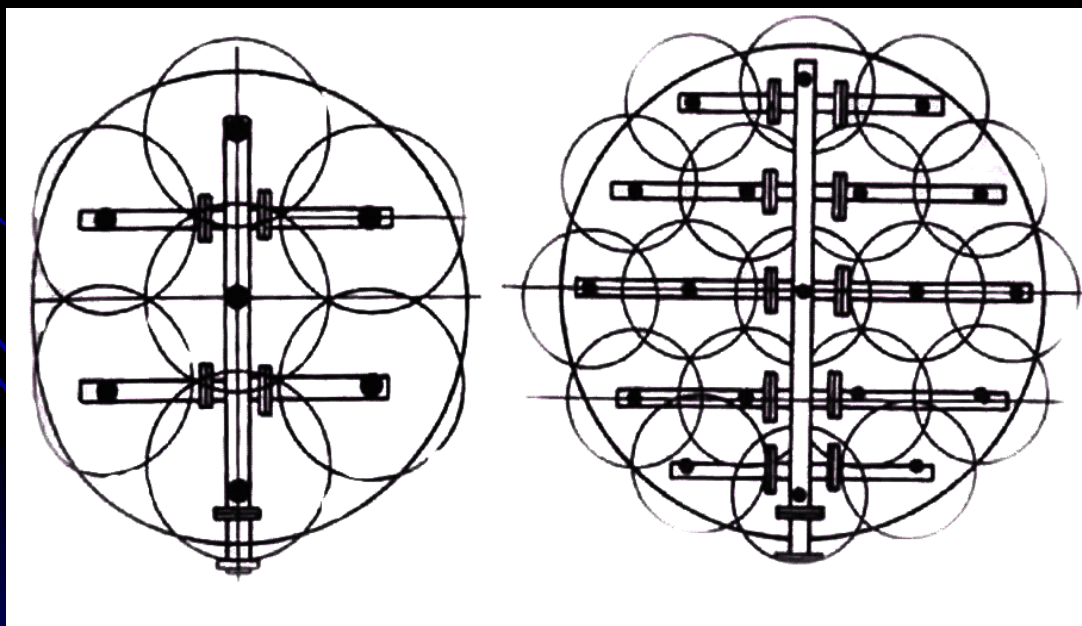


三、喷洒式液体分布器

设计
关键

——喷嘴，包括结构、布置、喷射角度，液体的流量及安装高度等。

喷嘴喷出的液体呈锥形，为了达到均匀分布，锥底需有部分重叠，重叠率为30~40%，喷嘴安装于填料上方约300~800mm处，喷射角度约 120° 。



优点——

结构简单、造价低、易于支承。气体处理量大，液体处理量的范围宽。

缺点——

雾沫夹带较严重，需安装除沫器，且压头损失大，要避免液体直接喷到塔壁上，产生过大的壁流。进料中不能含有气相及固相。

四、盘式液体分布器

分类 { 孔流式
溢流式

1. 盘式孔流型液体分布器

结构——在底盘上开有液体喷淋孔并装有升气管。气液的流道分开，气体从升气管上升，液体在底盘上保持一定的液位，并从喷淋孔流下。升气管截面可为圆形，也可为锥形，高度一般在200mm以下。

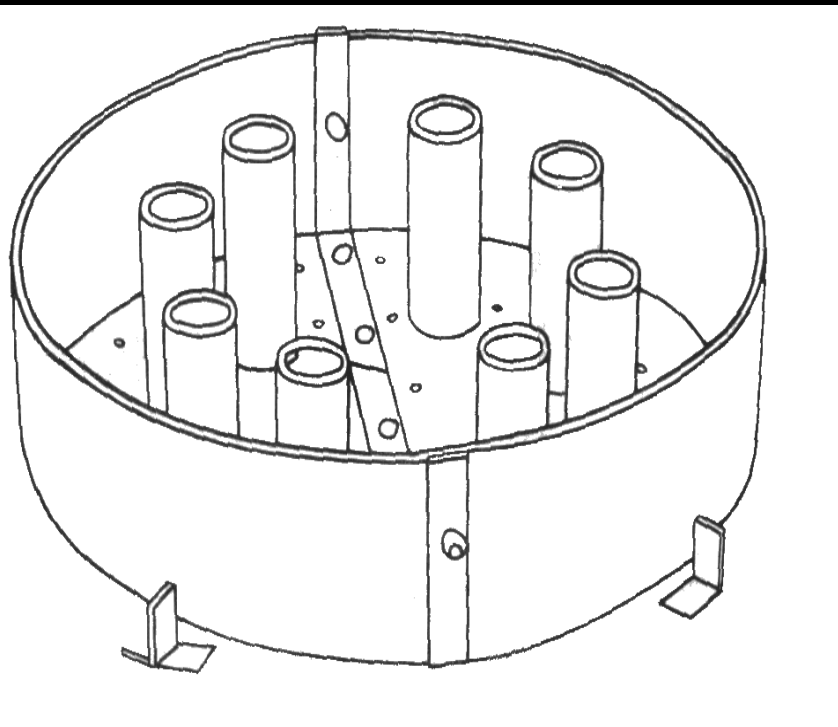
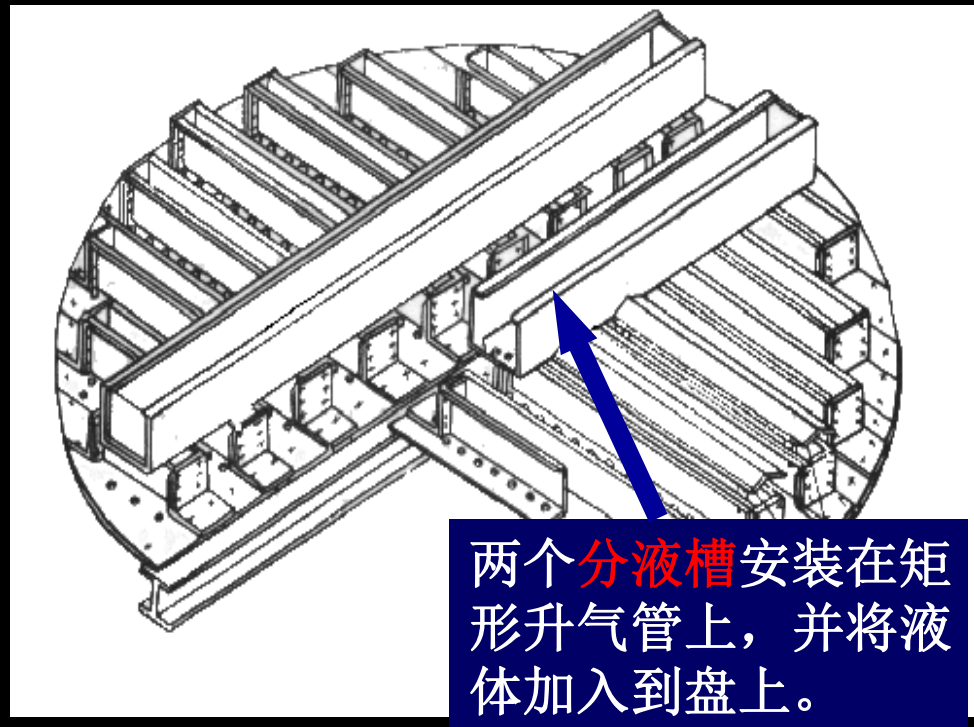
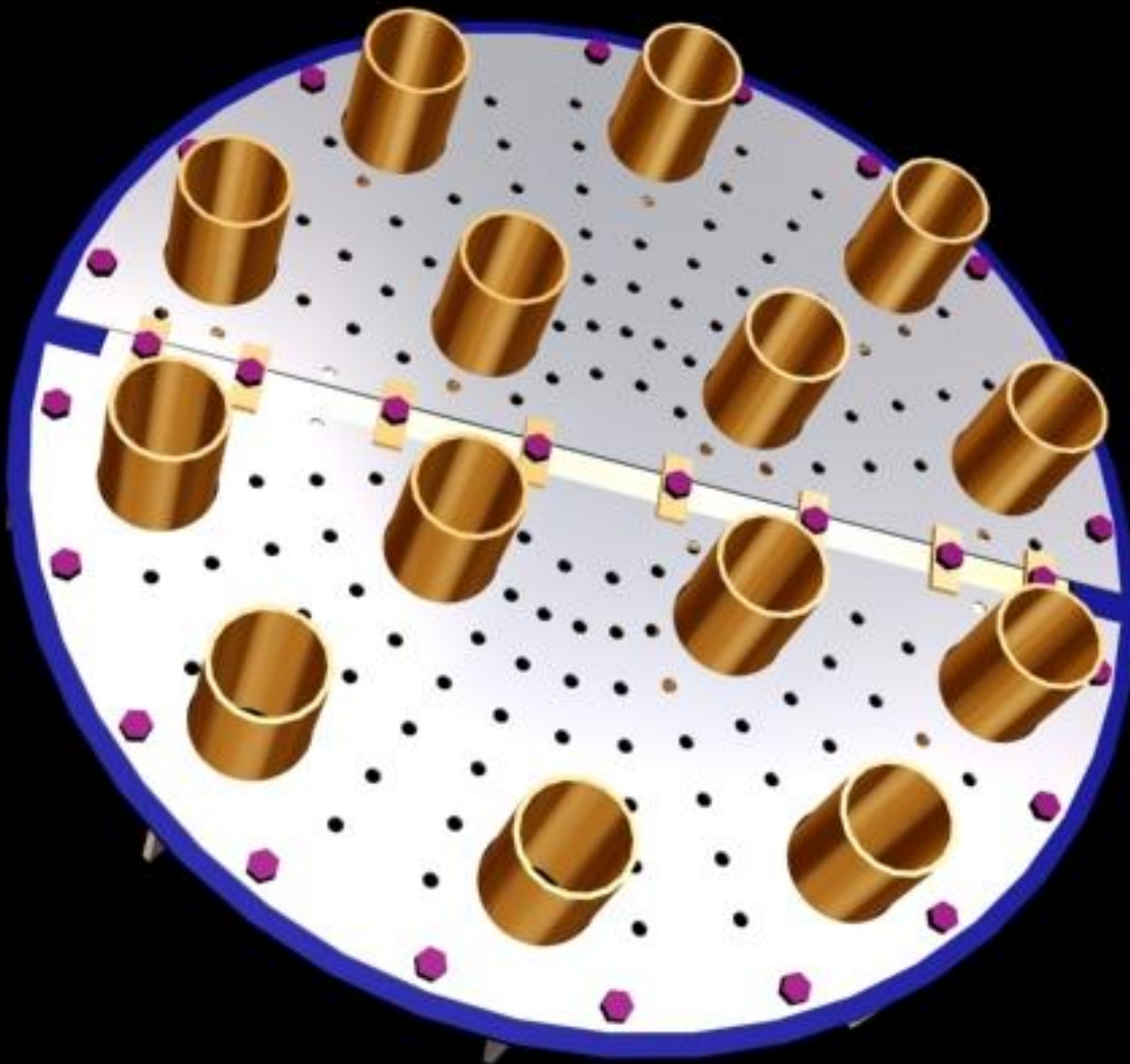


图7-24 小直径塔用盘式孔流分布器



两个**分液槽**安装在矩形升气管上，并将液体加入到盘上。

图7-25 大直径塔用盘式孔流分布器



盘式孔流型液体分布器

7.2 填料塔

2. 盘式溢流型分布器

结构——

将盘式孔流型分布器的布液孔改成溢流管。溢流管多采用 $\phi 20\text{mm}$ ，上端开 60° 斜口的小管制成，溢流管斜口高出盘底 20mm 以上，溢流管布管密度可为每平方米塔截面 100 个以上，适用于规整填料及散装填料塔，特别是中小流量的操作。

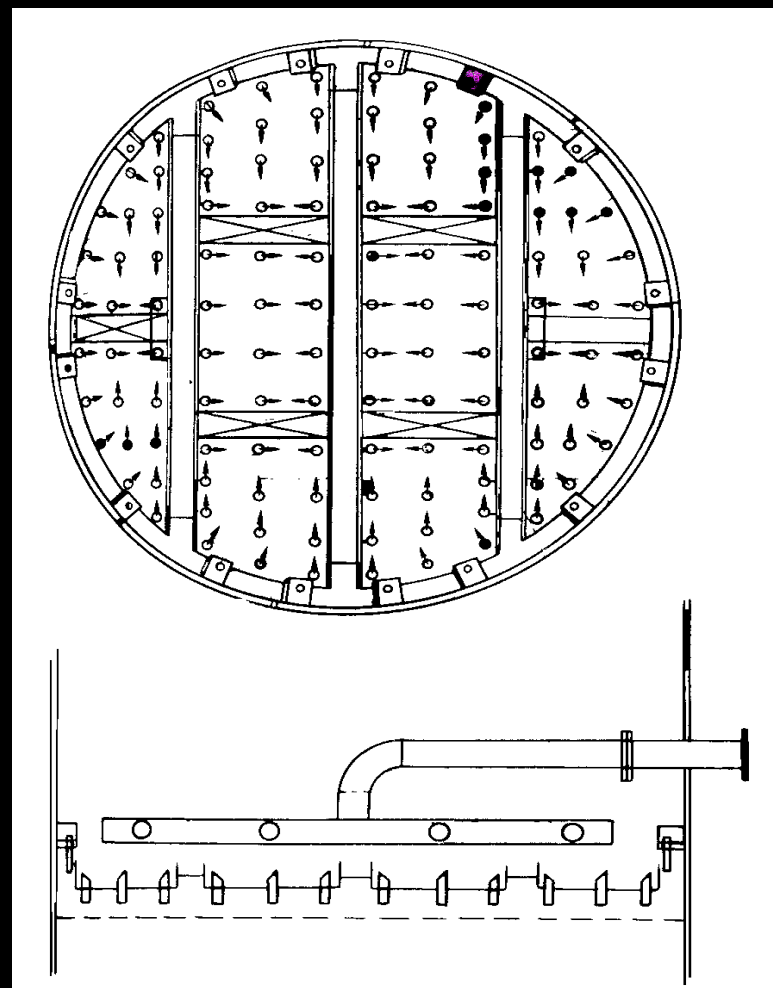


图7-26
盘式溢流型
液体分布器

选用——

- ◆ 对金属丝网填料及非金属丝网填料，应选用管式分布器；
- ◆ 对于比较脏的物料，应优先选用槽式分布器；
- ◆ 对于分批精馏的情况，应选用高弹性分布器。

表7-3 液体分布器的性能比较

	管式		喷洒式	槽式孔流	槽式溢流	盘式孔流	盘式溢流
	重力	压力	压力	重力	重力	重力	重力
液体分布质量	高	中	低-中	高	低-中	高	低-中
处理能力 (m³/m² h)	0.25~10	0.25~2.5	范围较宽	范围宽	范围宽	范围宽	范围宽
塔径(m)	任意	>0.4	任意	任意, 通常>0.6	任意, 通常>0.6	<1.2	<1.2

表7-3 液体分布器的性能比较(续)

留堵程度	高	高	中-高	中	低	中	低
气体阻力	低	低	低	低	低-高	高	高
对水平度的要求	低	无	无	低载荷时高	高	低载荷时高	高
腐蚀的影响	中	大	大	大	小	大	小
液相夹带重量	低	高	高	低	低	低	低
	低	低	低	中	中	高	高

7.2.2.3 液体收集再分布器

作用——消除“壁流”，避免“干锥”。
——消除气、液的径向浓度差。

做法——在各段填料之间加液体收集再分布器。

一、液体收集器

1. 斜板式液体收集器

上层填料下来的液体落到斜板上后沿斜板流入下方的导液槽中，然后进入底部的横向或环形集液槽。再由集液槽中心管流入再分布器中进行液体的混合和再分布。

斜板在塔截面上的投影必须覆盖个截面并稍有重叠。安装时将斜板点焊在收集器筒体及底部的横槽及环槽上。

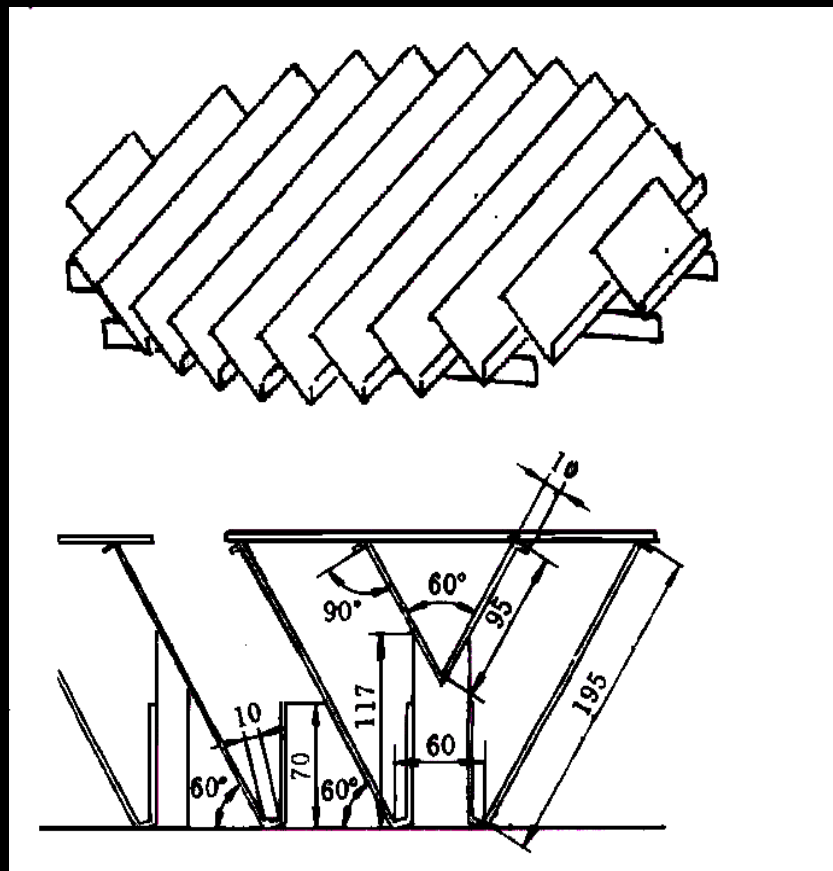


图7-27 斜板式液体收集器

斜板式液体收集器特点——

自由面积大，气体阻力小，一般不超过2.5mm水柱。
适用于真空操作。

2. 升气管式液体收集器

结构——与盘式液体分布器相同，只是升气管上端设置挡液板，以防止液体从升气管落下，见图7-28。

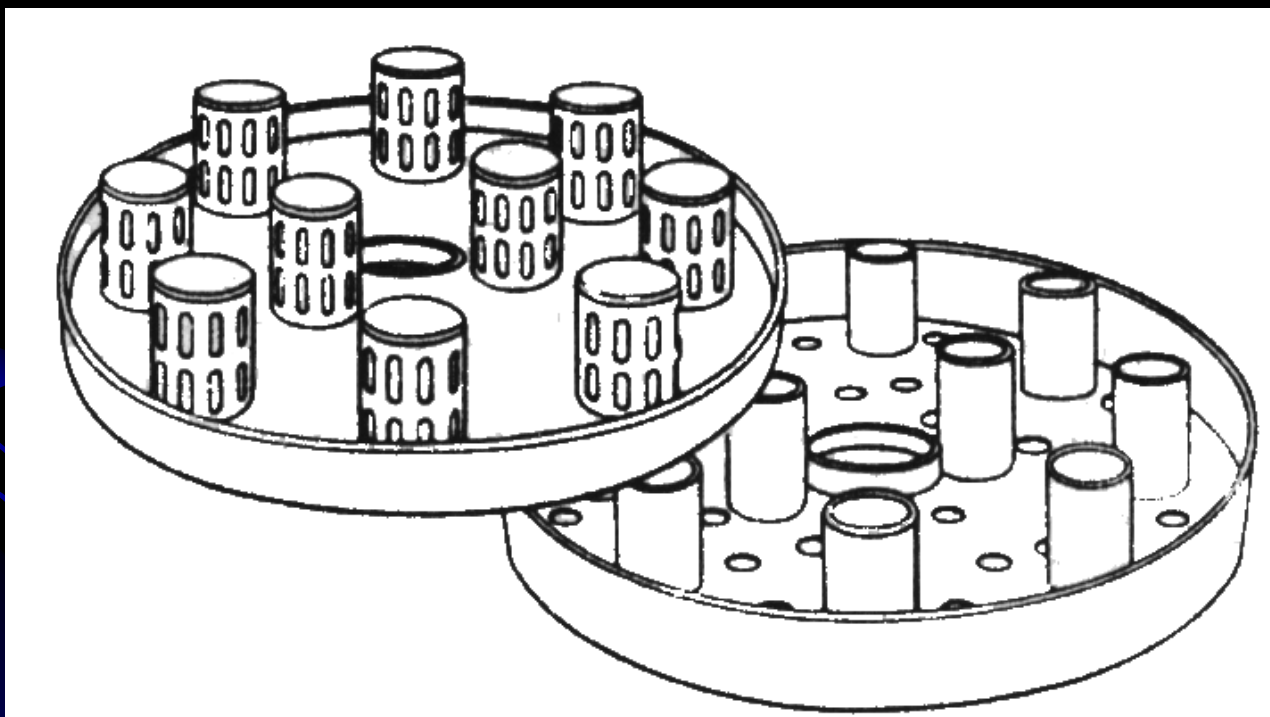


图7-28 升气管式液体收集器

升气管式液体收集器

优点——

将填料支承和液体收集器合二为一，占空间小，气体分布均匀性好，用于气体分布性能要求高的场合。

缺点——

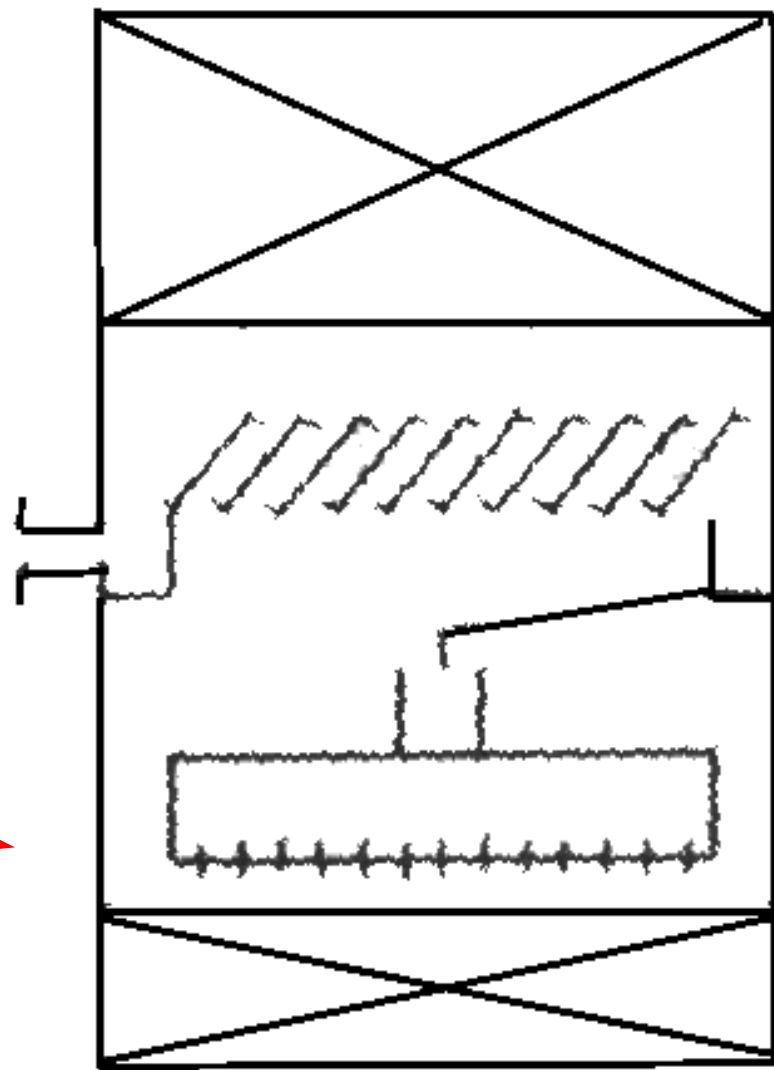
阻力较斜板式收集器大，填料容易挡住收集器的布液孔。

二、液体再分布器

1. 组合式液体再分布器

将液体收集器与液体分布器组合起来的分布器，且有多种形式。

图7-29 (a) ——
斜板式收集器与液体分布器的组合，用于规整填料及散装填料塔。



(a) 斜板式

图7-29 组合式液体再分布器⁶⁹

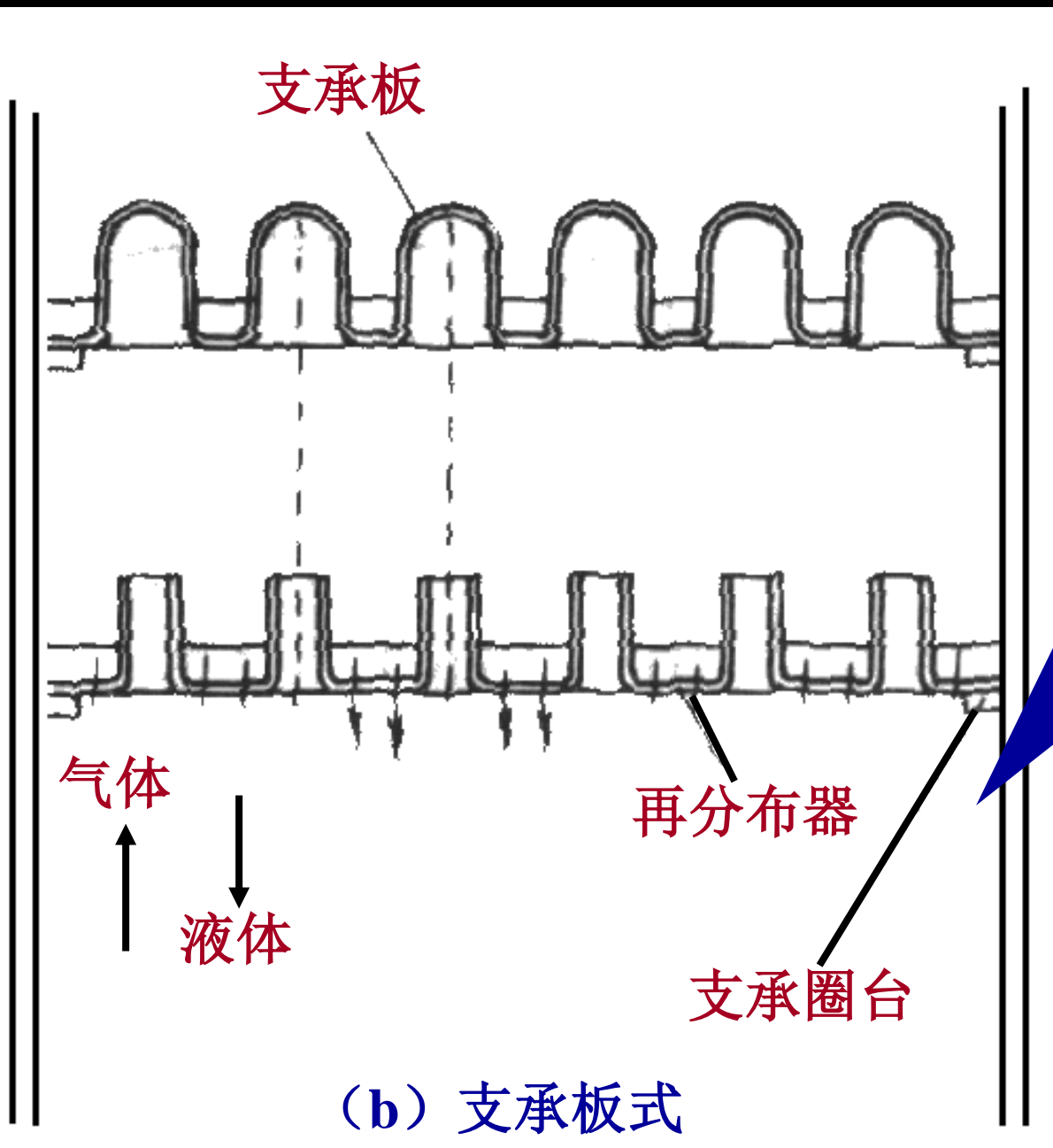


图7-29 (b) ——
气液分流式支承板
与盘式液体分布器
的组合。

(b) 混合性能不如
(a)，且容易漏液，
所占塔内空间小。

图7-29 组合式液体再分布器

2. 盘式液体再分布器

结构——

- 与升气管液体收集器相同（见图7-28），只是在盘上打孔以分布液体。
- 开孔的大小、数量及分布由填料种类及尺寸、液体流量及操作弹性等因素确定。

3. 壁流收集再分布器

图7-30(a)——分配锥。

- 将沿塔壁流下的液体用再分配锥导出至塔的中心。圆锥小端直径 $D_1 = 0.7 \sim 0.8 D_i$ 。

- 分配锥安装在填料层分段之间，以防气体流动面积减少、气体扰动、气体死角，安装困难。

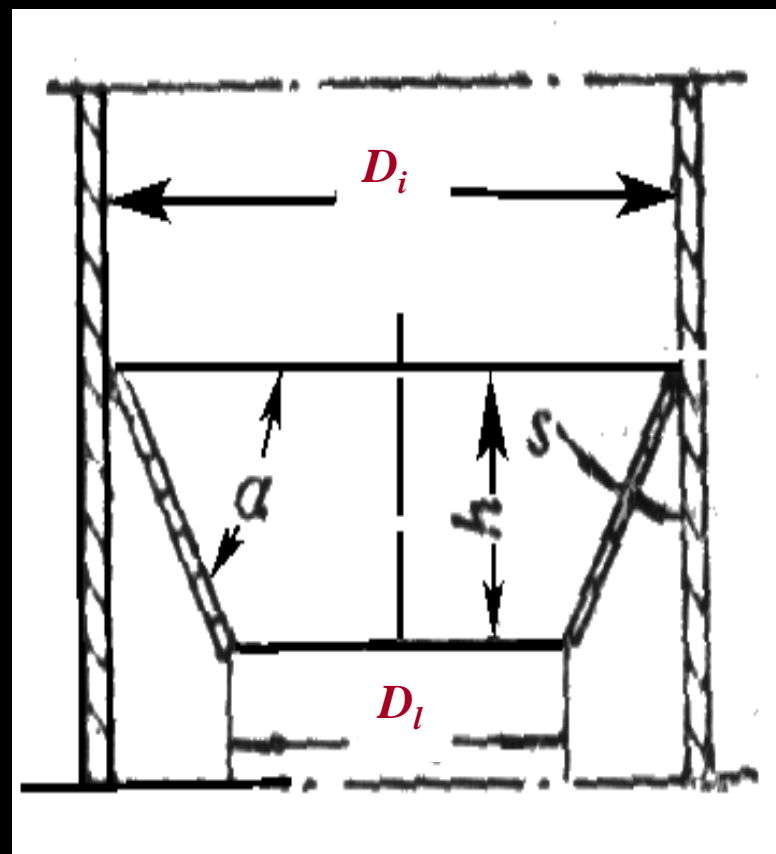


图7-30(a) 分配锥

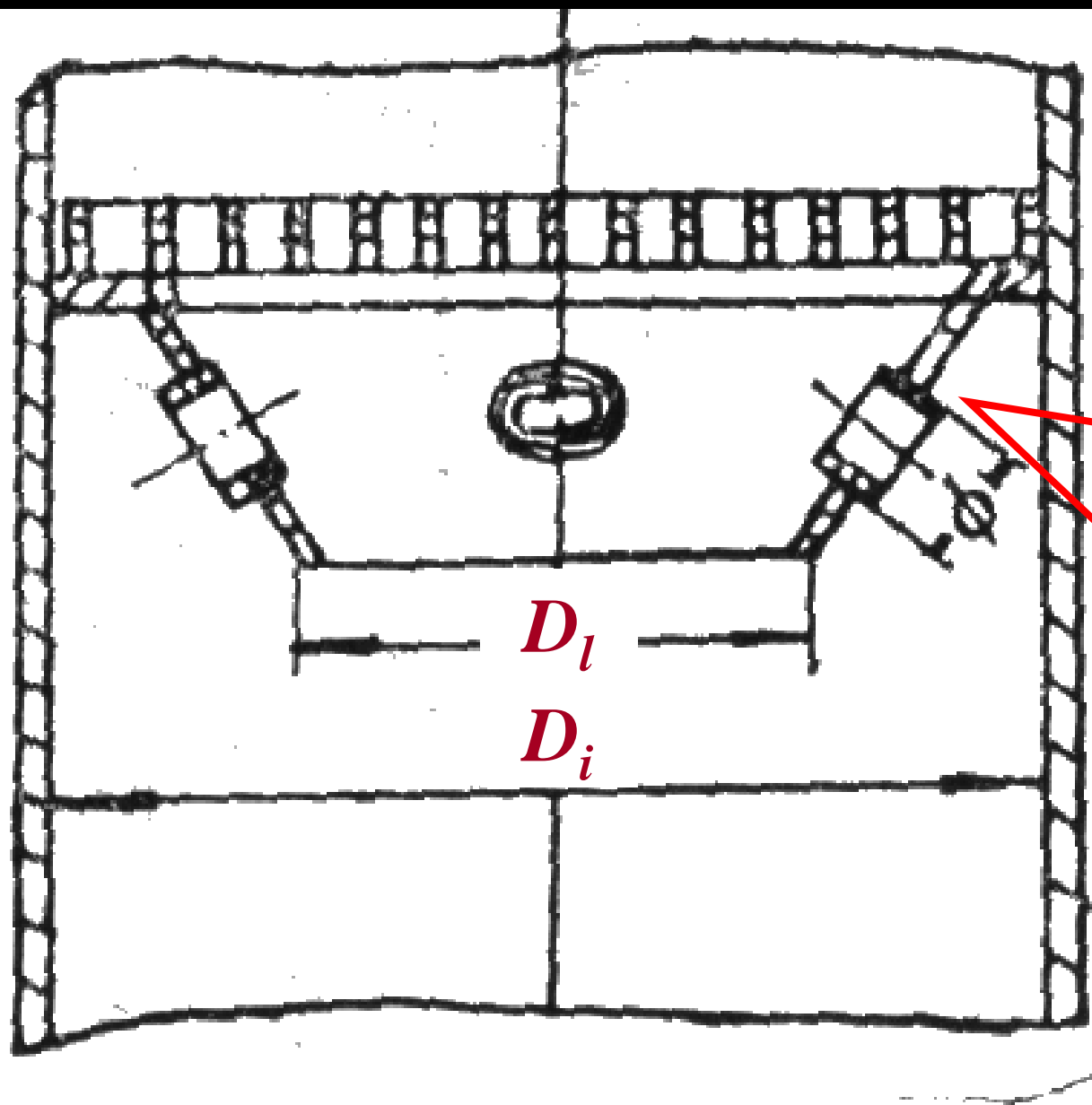


图7-30 (b) ——
分配锥上具有通
孔，改进结构。
通孔使通气面积
增加，气速变化
不大。

图7-30 分配锥 (b) 具有通孔的分配锥

玫瑰式再分布器——

具有较高的自由截面积，较大的液体处理能力，不易被堵塞；分布点多且均匀，不影响填料的操作及填料的装填，将液体收集并通过突出的尖端分布到填料中。

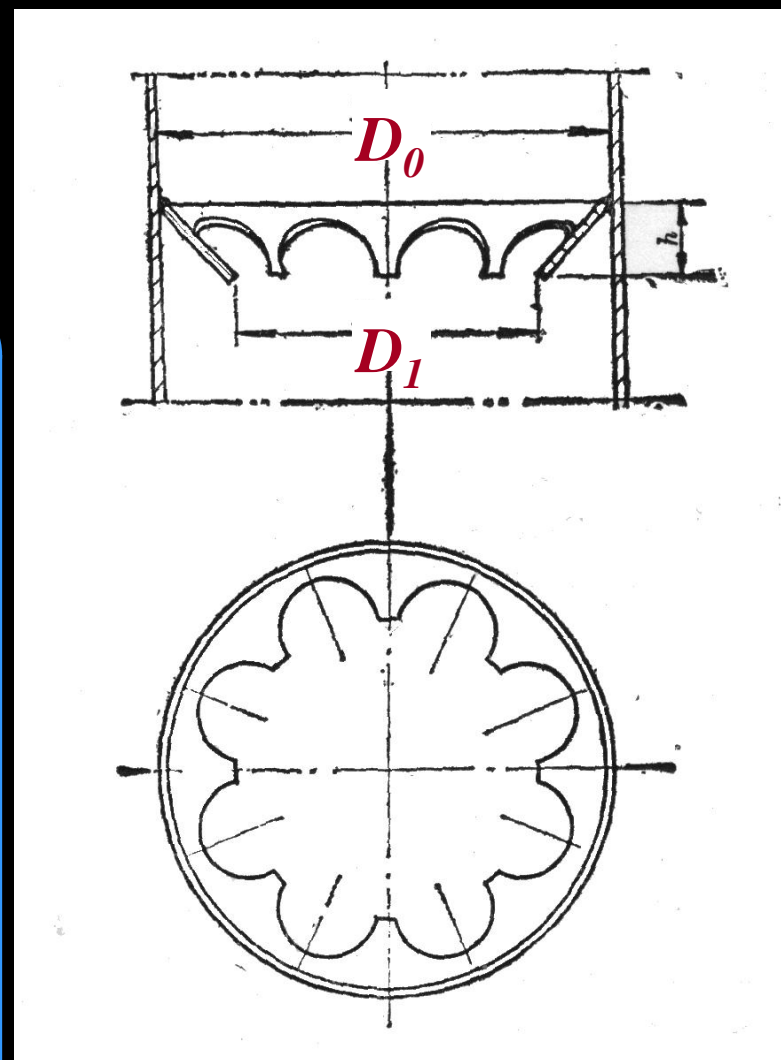


图7-31
玫瑰式壁流收集
再分布器

注意——

上述壁流收集再分布器，只能消除壁流，而不能消除塔中的径向浓度差。

适用于直径小于0.6~1m的小型散装填料塔。

7.2.2.4 填料的压紧和限位装置

目的——

避免气速较高或压力波动较大时，填料层松动所引起的气、液相的不良分布，及散装填料的流化。

填料压紧器——
用于陶瓷、石墨等
脆性散装填料。

填料层限位器——
用于金属、塑料制
散装填料及各种规
整填料。

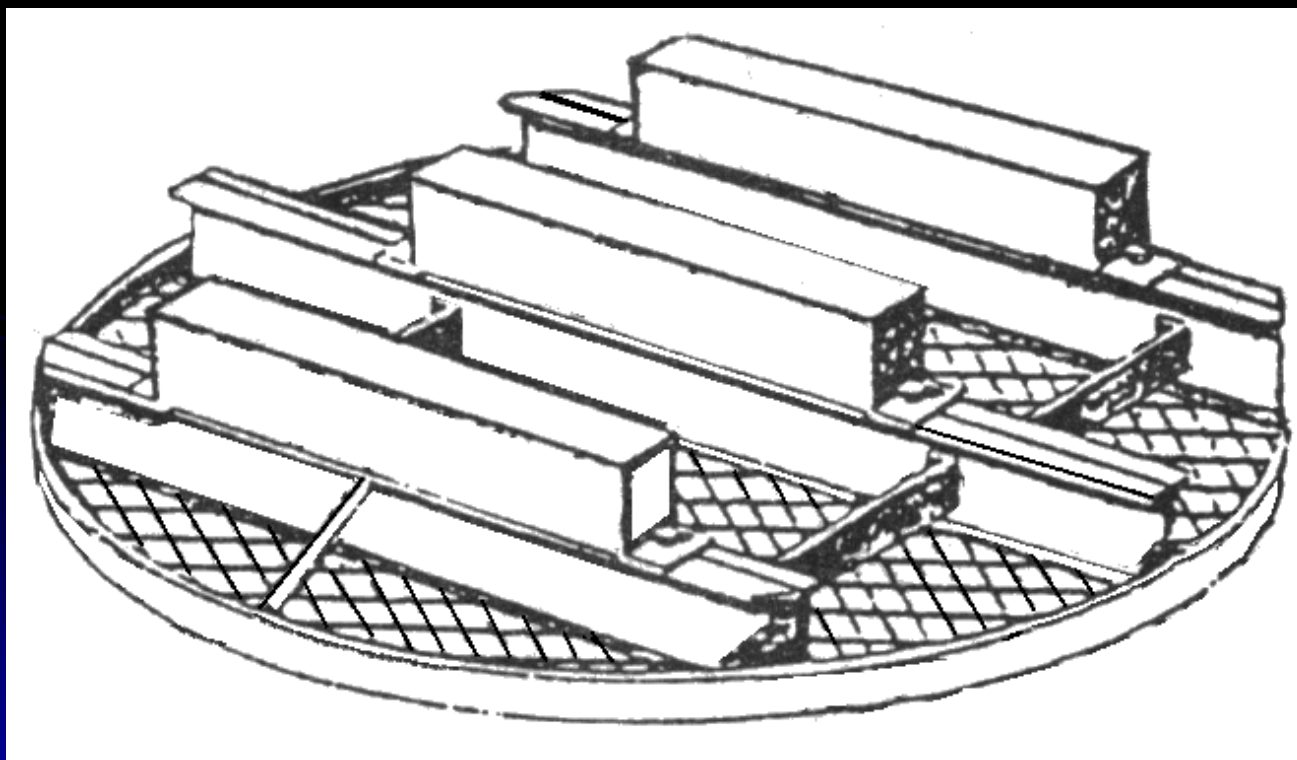
一、填料压紧器

原理——

- ▶ 又称填料压板。
- ▶ 自由放置于填料层上部，靠自身重量压紧填料。
- ▶ 当填料层移动并下沉时，它随之一起下落，故散装填料的压板须有一定的重量。
- ▶ 均可制成整体式或分块式结构。

栅条式——

与图7-15的栅板型支承板类似，只是空隙率大于70%。栅条间距约为填料直径的0.6~0.8倍，或是底面垫金属丝网以防止填料通过栅条间隙。



由钢圈、栅条及金属网制成，当塔径较大，可适当增强其重量。

图7-32 网板式填料压板

二、填料限位器

作用——

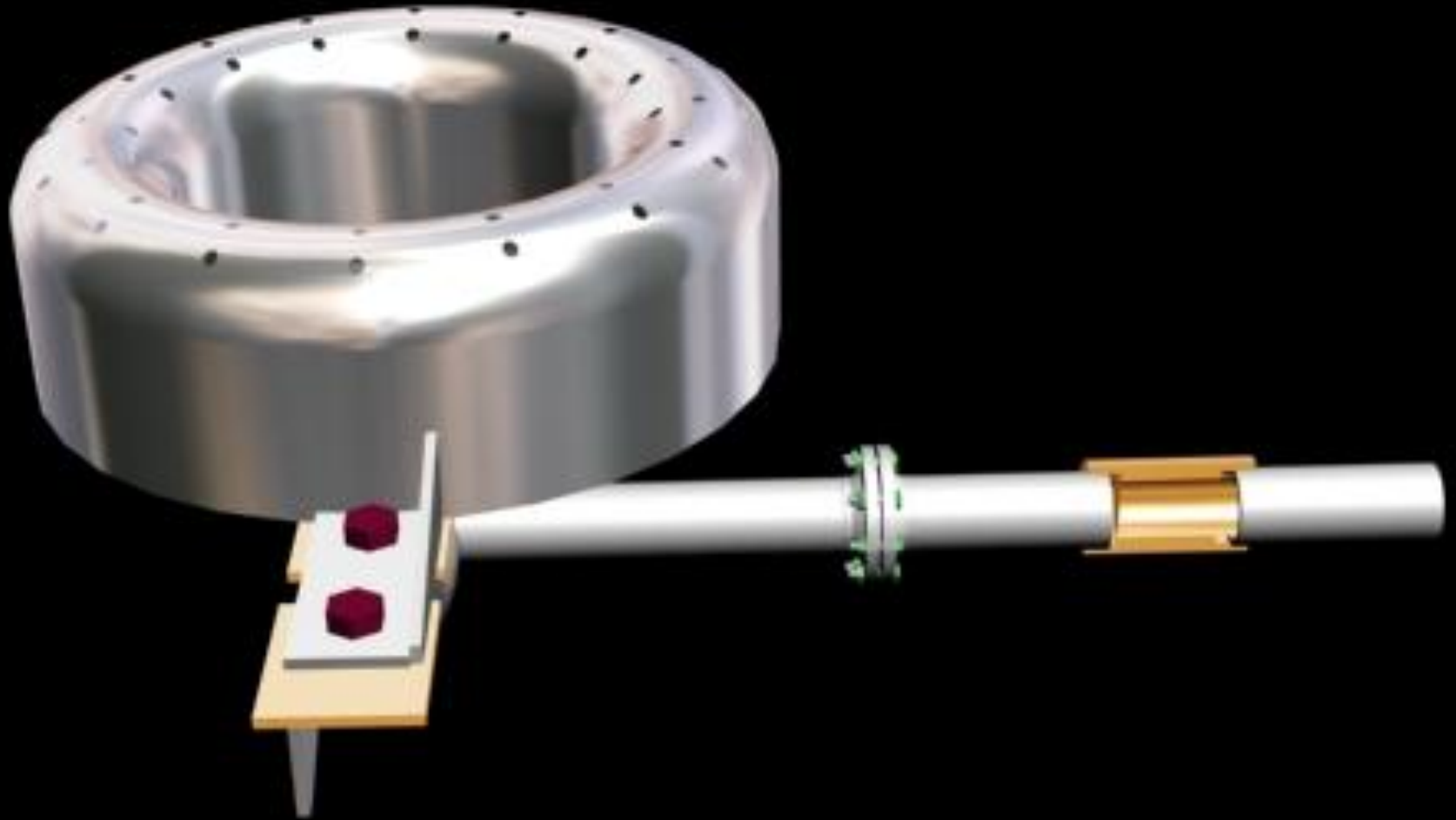
又称床层定位器，用于金属、塑料制散装填料，及所有规整填料。

防止高气速，高压降或塔的操作出现较大波动时，填料向上移动而造成填料层出现空隙，影响塔的传质效率。

金属及塑料制散装填料——

用图7-32的网板结构作为填料限位器。因为这种填料具有较好的弹性，且不会破碎，一般不下沉，填料限位器需要固定在塔壁上。小塔用螺钉将网板限位器的外圈顶于塔壁；大塔，用支耳固定。

规整填料——使用栅条间距为100~500mm的栅板。



气体分散装置