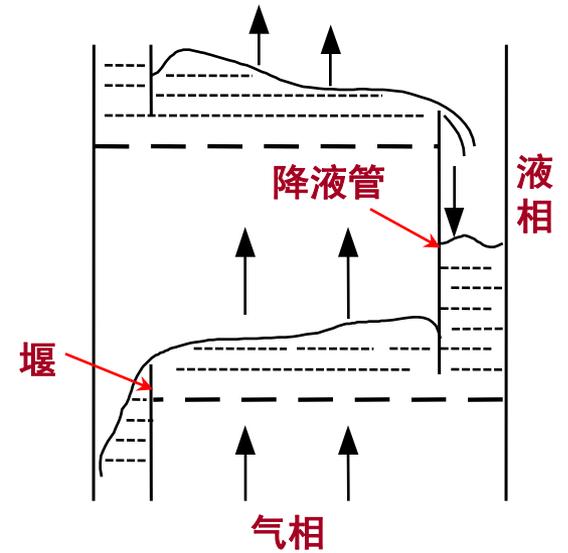


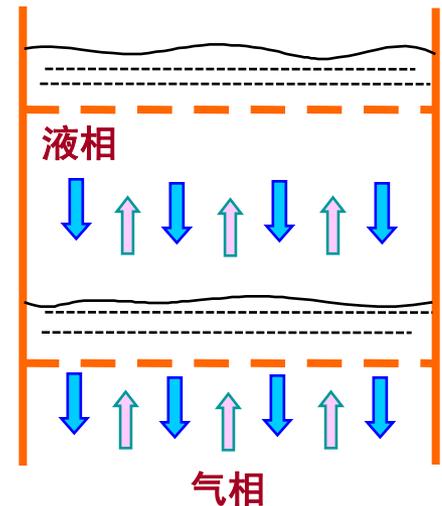
板式塔

溢流塔板（错流式塔板）：塔板间有专供液体溢流的降液管（溢流管），横向流过塔板的液体与由下而上穿过塔板的气体呈错流或并流流动。



泡罩塔、筛孔塔、浮阀塔、网孔塔、舌形塔等。

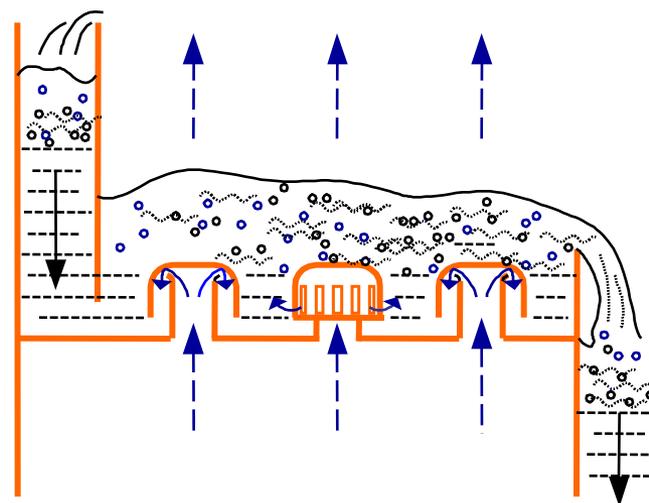
逆流塔板（穿流式塔板）：塔板间没有降液管，气、液两相同时由塔板上的孔道或缝隙逆向穿流而过，板上液层高度靠气体速度维持。



筛孔式、栅板式、波纹板式等。

筛孔塔板：结构最简单(1830年)。

泡罩塔板：工业上应用最早(1813年),主要元件为升气管和泡罩。



优点：操作稳定，升气管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。

缺点：结构复杂，造价高，塔板压降大，生产强度低。

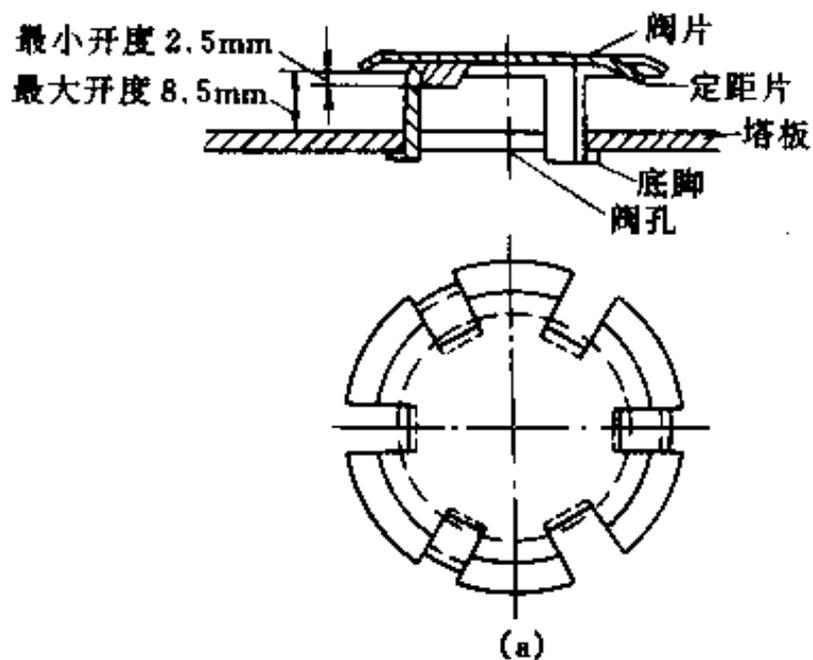
浮阀塔板 (Valve Tray) 应用最广的塔板

是泡罩塔板和筛孔塔板的优势互补。

优点：结构简单，生产能力和操作弹性大，板效率高。综合性能较优异。

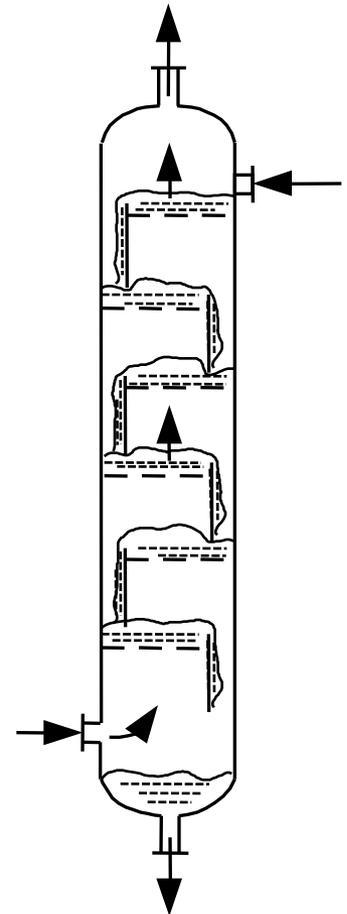
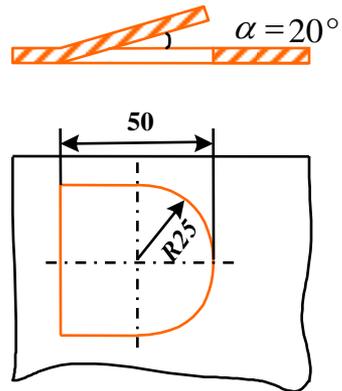
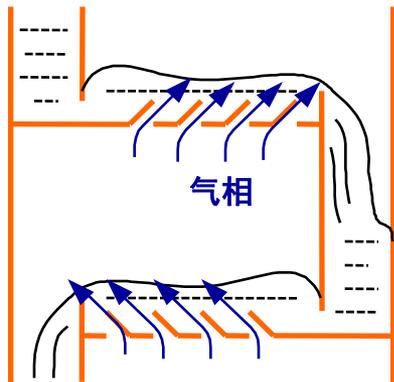


A型浮阀

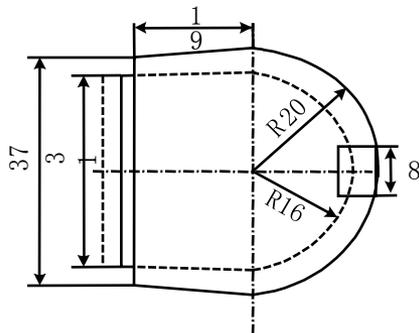
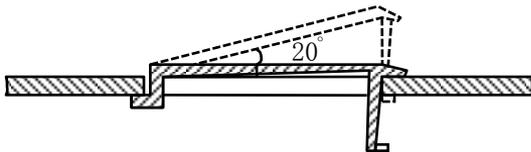


F1型浮阀

舌形塔板：一种斜喷射型塔板



浮舌塔板



板式塔

板式塔设计选型时，可根据给定的气、液相负荷等操作条件及物性条件进行塔板水力学性能的设计与核算。

设计计算：塔径，板间距、流程数、降液管大小、开孔率、每层塔板上的传质元件数或开孔数等结构参数，核算塔板压降、塔板上和降液管内清液层高度、降液管停留时间、液沫夹带量、以及其它一些反映液泛、淹塔和漏液等状况的性能参数。

根据结果绘制塔板适宜操作区性能图，以便直观地分析塔板的操作状况。

板上气液接触状态

鼓泡状态

板上液气比较大时的气液接触状态，气体为分散相，液体为连续相，气泡在液相中自由浮升，气液接触表面积不大。

喷射状态

板上液气比相对较小的气液接触状态，液相为分散相，充满塔板之间，气相为连续相。

过渡状态（泡沫状态）

介于鼓泡状态和喷射状态的气液接触流动状态。

塔板吹干

在极低的液气比和较高的空塔气速条件下，若进入塔板的全部液体被夹带至上一层塔板，该塔板即被吹干。

溢流强度

塔盘单位长度溢流堰上液体的体积流率，单位为 $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ 。

默弗里 (Murphree) 单板效率

$$E_{mG} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

分子：经过一块板后组成的实际变化

$$E_{mL} = \frac{x_{n-1} - x_n}{x_{n-1} - x_n^*}$$

分母：将该板视为理论板时的组成变化

x_n, y_n —— 离开第 n 板的液相与汽相的实际组成；

y_n^*, x_n^* —— 与离开第 n 板的液(汽)相组成 x_n (y_n) 成平衡的
汽(液)相组成；

单板效率通常由实验测定。

全塔效率（总板效率）： E_T

E_T 是板式塔分离性能的综合度量。

全塔效率的可靠数据只能通过实验测定获得。

注意：

E_T 是以所需理论板数为基准定义的，板效率是以单板理论增浓度为基准定义的，两者基准不同。因此即使塔内各板效率相等， E_T 也不等于板效率。

全塔效率的估算

$$\mu_L = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i$$

液泛率及其控制

液泛率通常是指设计或操作工况下的处理能力与恒液气比条件下达到液泛时的极限处理能力之百分比，其倒数也称为安全系数。

液泛：塔内液体不能顺畅逐板流下，持液量增多，气相空间变小，大量液体随气体从塔顶溢出。

a. 喷射液泛（夹带液泛）

板间距过小，操作液量过大，上升气速过高时，过量液沫夹带量使板间充满气、液混合物而引发的液泛。液体将充满全塔，并随气体从塔顶溢出，这种现象称为喷射液泛。塔板上开始出现恶性循环的气速称为液泛气速。液体流量越大，液泛气速越低。

设计中以液沫夹带不超过10%来确定允许的液泛率上限。

b. 降液管液泛 (溢流液泛)

液体在降液管内受阻不能及时往下流动而在板上积累所致。

为使液体能由上层塔板稳定地流入下层塔板，降液管内必须维持一定的液柱高度

$$H_D = h_w + h_{ow} + \Delta + h_f + h_{DC}$$

H_D —降液管内的液面高度

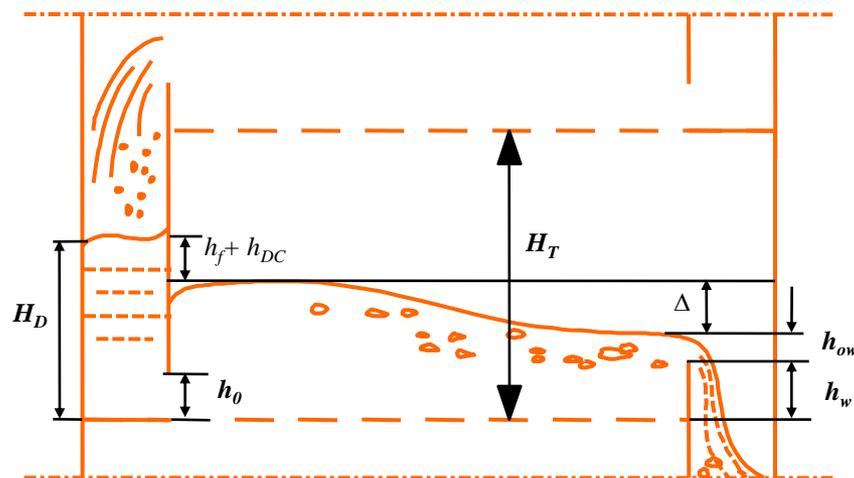
h_w —溢流堰高

h_{ow} —溢流堰上的清液层厚度

Δ —液面落差

h_f —板压降

h_{DC} —液体经过降液管的阻力损失



实际上，降液管内的液体并非清液，其上部是含气量很大的泡沫层。降液管内泡沫层高度 H_F 与清液高度 H_D 的关系为：

$$H_F = \frac{\rho_L}{\rho_F} H_D$$

- 气速一定，液体流量 \uparrow 时， Δ 、 h_{ow} 、 h_f 及 h_{DC} \uparrow ， H_D \uparrow ，即塔板具有自动调节功能。
- 上层塔板溢流堰上缘为 H_D 极限。若再加大液体流量， H_D 与板上液面同时升高，降液管调节功能消失，板上累积液量增加，最终引起溢流液泛。
- 若气速过高，液体中的气泡夹带加重，降液管内的泡沫层随之增高，也易造成溢流液泛。
- h_f 过大必导致 H_D 大，易发生液泛。如降液管设计过小或发生部分堵塞， h_{DC} 急剧增大，也会导致溢流液泛。
- 喷射液泛与溢流液泛互为诱因，交互影响。过量液沫夹带阻塞气体通道，板阻急增，降液管中泡沫层堆积，从而引发溢流液泛。而溢流液泛发生时，塔板上鼓泡层增高，分离空间降低，夹带液泛也将随之发生。
- 在操作时，气体流量不变而板压降持续增长，将预示液泛的发生。

水力学计算

喷射液泛率与塔径的确定

溢流式塔板的塔截面分为两个部分：

气体流通截面和降液管所占截面（液体下流截面）。

求 A_F 的关键在于确定流通截面积上的适宜气速 u' 。

$$u' = (0.6 \sim 0.85)u_f$$

液泛气速 u_f ：在重力场中悬浮于气流中的液滴所受的合力为零时的气速。

板间距的确定与液沫夹带核算

确定塔板间距主要考虑工艺和安装两方面的因素

工艺因素：液沫夹带、起泡性、操作弹性和降液管停留时间

安装因素：便于拆卸检修

板间距的确定与液沫夹带核算

液沫夹带：气体鼓泡通过板上液层时，将**部分液体**分散成液滴，而**部分液滴**被上升气流带入上层塔板。由两部分组成：

- 小液滴的沉降速度小于液层上方空间上升气流的速度。**夹带量与板间距无关。**
- 较大液滴的沉降速度虽大于气流速度，但它们在气流的冲击或气泡破裂时获得了足够的向上初速度而被弹溅到上层塔板。**夹带量与板间距有关。**

液沫夹带 e 定义：单位干气体所夹带到上层塔盘的液体量。

为保持稳定操作和良好的效率， $e \leq 0.1 \text{kg液体} / \text{kg干气体}$ 。
如核算出的 e 超过允许数值，就需要增加板间距或塔径，一直到 e 降到允许值以下。

降液管的设计

降液管的设计主要考虑停留时间、清液层高度、发泡系数及其气泡夹带的影响，同时满足主要约束条件：

气泡夹带：液体在降液管中停留时间太短，大量气泡被液体卷入下层塔板。严重时可能诱发液泛，完全破坏塔的正常操作。

面积约束：一般约占塔截面积的8%~20%左右。

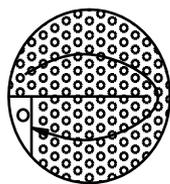
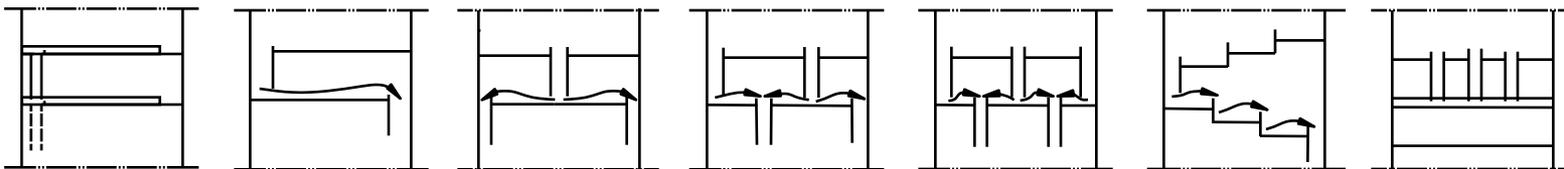
体积约束：降液管内停留时间一般应大于5s。

堰上溢流强度与流程的选择

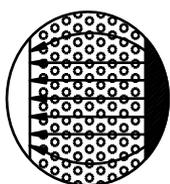
溢流强度大，则塔板上的液面落差大，堰上和塔板上的液层高度大，塔板压降也大。

液面落差：塔板入口侧的液层厚于塔板出口侧，使气流偏向出口侧，入口侧的阀孔则因气量小而发生漏液。

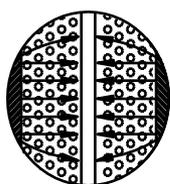
由于流道长度较长的塔板具有相对较高的效率，因此只要塔板压降、降液管内清液层高度、流速、停留时间等满足要求，应尽量采用较少的流程数。



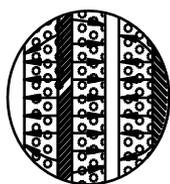
U形流



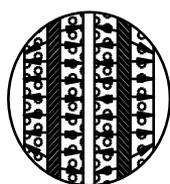
单溢流



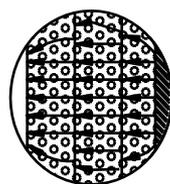
双溢流



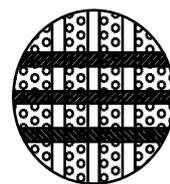
三溢流



四溢流



阶梯流



MD塔盘

流程数越多，有效传质区域越小。一般采用流程数较少的塔盘结构。

总板压降 ΔP

总板压降（湿板压降），其变化可以反应塔板操作状态的改变，压降大小对于液泛的出现有直接影响。

压降的变化与操作状态

- 气体通过干板时，压降与气速的平方成正比。
- 气速较小时，气体通过阀孔的速度压头小，不足以抵消塔板上液层的重力而发生漏液，部分孔鼓泡，部分孔漏液。
- 随着气速增加漏液的孔数逐渐减少直至停止漏液，此时全部孔开始通气，此点为漏液点；
- 漏液点以前，塔板处于**鼓泡状态**，压降随气速变化小
- 当塔板处于过渡操作状态，压降随气速增加逐渐上升，由鼓泡接触变为**泡沫接触**，塔板上液体存留量下降，压降上升的斜率不大；
- 在塔板处于**喷射状态**，压降几乎随气速的平方增加；
- 泛点以后发生液泛，压降垂直上升，塔的操作被破坏。

气体通过一层塔板的总压降 ΔP 是由气体通过板上各部件的局部阻力和通过泡沫液层时的阻力之和。

孔动能因子与漏液点的控制

塔盘上的液体没有通过降液管而进入下层塔盘的现象称为漏液。严重的漏液将使塔板上失去液层而无法操作。

气体均布是降低漏液量的主要措施，而气体是否均布决定于造成流动阻力的结构是否均匀。

气流穿过塔板的阻力由两部分组成，即干板阻力和液层阻力。

若总阻力以干板阻力为主，则总阻力结构的不均匀性相对减小，气流分布就比较均匀。反之，若总阻力以液层阻力为主，则总阻力结构的不均匀性严重，气流分布就很不均匀。

液层波动：波峰处液层厚，润孔气量小、易漏液。由此引起的漏液是随机的。可在设计时适当增大干板阻力。

干板阻力是靠开孔率来控制的。较小的开孔率控制干板阻力足够大，使总阻力即总板压降高于波峰处当量清液层高度，则塔板不会漏液。反之，若开孔率过高，干板阻力较小，总阻力低于波峰处当量清液层高度，有可能造成波峰下的气孔停止通气而漏液。

液面落差：塔板入口侧的液层厚于塔板出口侧。

当干板阻力很小时，液面落差会使气流偏向出口侧，而塔板入口侧的气孔将无气体通过而持续漏液，为**倾向性漏液**。

在塔板入口处设置安定区，以释放液体较高的位能和动能。

低气速时，总阻力以液层阻力为主，塔板将出现漏液。

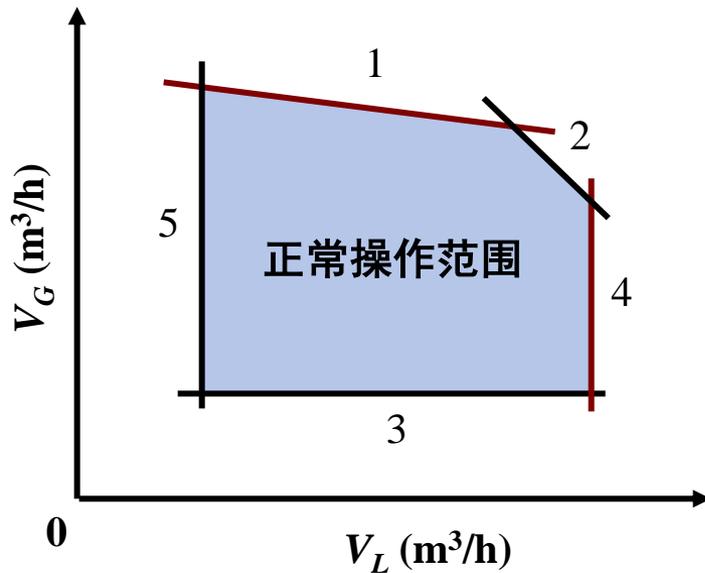
高气速时，干板阻力成为主要阻力，漏液将被遏制。

漏液点气速：气速由高逐渐降低至某值时，将发生明显漏液。

负荷性能图及操作弹性

负荷性能图

- 塔板的负荷性能图可清楚地表示塔板的允许的气、液相负荷范围及塔板操作弹性的大小，对塔板的改造和设计以及塔的操作均有一定的指导意义；
- 当气、液相负荷超出此范围，不仅塔板的分离效率大大降低，甚至塔的稳定操作也将难以维持。
- 有必要对所设计的塔确定出其气、液相操作范围。



1. 过量液沫夹带线 (气相负荷上限线、喷射液泛线)
2. 降液管 (溢流) 液泛线
3. 漏液线 (气相负荷下限线)
4. 液相负荷上限线
5. 液相负荷下限线

1. 过量液沫夹带线（气相负荷上限线）

控制液沫夹带量 e_v 不大于最大允许值的气体负荷上限。此线与横轴并不完全平行，可见发生液沫夹带现象与液相负荷 V_L 也有一定关系，但主要取决于气体负荷。

2. 溢流液泛线（淹塔线）

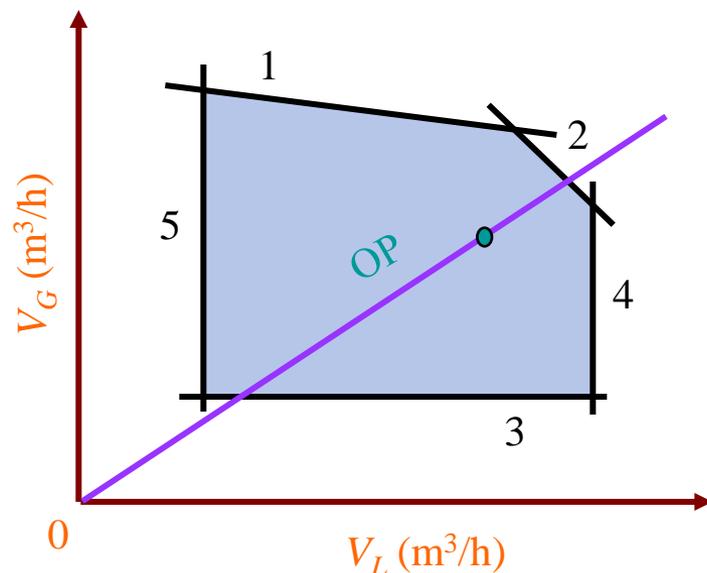
降液管中泡沫层高度达最大允许值时的气量与液量的关系

3. 漏液线（气相负荷下限线）

操作时防止塔板发生严重漏液现象所允许的最小气体负荷。塔板漏液与阀孔气速直接相关，故可用其大小作为判据。

4. 液相负荷上限线（气泡夹带线）

由液体在降液管中所需的最小停留时间决定



5. 液相负荷下限线

此线为保证塔板上液体流动时能均匀分布所需的最小液量。

由上述 5 条线所包围的区域即为一定物系在一定的结构尺寸的塔板上的**正常操作区**。在此区域内，气、液两相流率的变化对塔板效率的影响不大。

塔板的**设计点**及**操作点**都必须在此正常操作区内，才能获得较高的塔板效率。

op. 操作线

对于一定气液比的操作过程：**op**通过原点，斜率为 V_G/V_L

塔板的操作弹性：上、下操作极限点的气体流量之比。

