

石油化工设备设计参考资料

化工、炼油设备部分技术革新成果设计资料选编

化工炼油设备技术革新成果调查组

上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组



# 斜孔板塔的研究

清华大学化学工程专业塔设备科研组

## 第一章 板式塔的基本知识

### § 1.1 塔板的作用

塔板是板式塔的核心部件。塔板的结构性能对一个塔的生产能力大小和产品质量的好坏有较大的影响。

以精馏为例简单说明塔板的作用，图 1-1 是精馏塔中的一段。由图上可知，一个塔，液体由塔上部下来，沿溢流管到塔盘上，然后流过塔盘再经溢流管到下一个塔盘，这样一直到塔底；而气体则由塔釜上升，经过每块塔板上的小孔与液层充分接触后，再到上一块塔盘，与液层接触，一直到塔顶。这样，当上升蒸汽和塔板上的液层接触时，由于存在着浓度差和温度差，因而就产生了传质和传热，由下而上易挥发组分不断地汽化而向气相浓缩，难挥发组分由上而下不断地冷凝而向液相浓缩，于是在塔顶及塔底就得到符合质量要求的产品。塔板性能的好坏，一般包括两个方面：一是塔板的效率；二是气液两相的

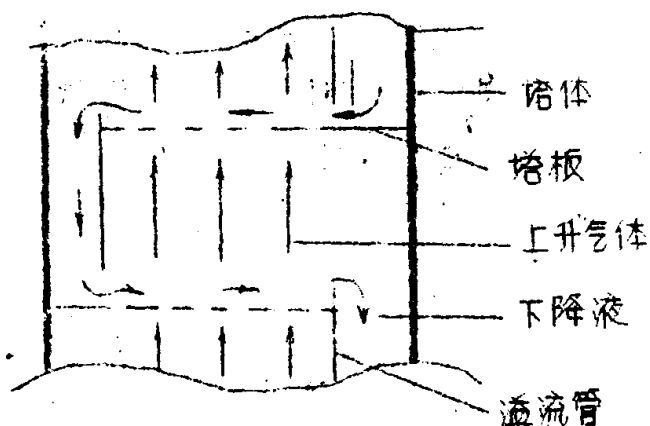


图 1-1

荷的大小。塔板效率高，传质效果好，塔顶和塔底的产品质量高或者所用的塔板数少，塔高小。气液两相的流量都很大，塔的生产能力就大。这是我们所希望的。那么哪些因素限制了塔的生产能力和传质效果呢？下面介绍影响塔板性能的几个重要因素。

## § 1. 2 几种不正常操作

### 1. 液沫夹带

当上升的气体经过板上小孔与液层接触后再进到上一层塔板时，总会有些液滴被上升的气流带走。上升气流速度越高，塔板上液体被分散成液滴的机会越多，而随气流带到上层塔板的可能性就越大。如果下层塔盘的液体被气体带到上层塔盘去，就造成了液体浓度的返混，影响了塔板效率。这种被带到上层塔板的液沫越多，塔板效率降低就越厉害，使产品质量降低，这在塔操作上是不允许的，因而限制了上升蒸汽的速度，限制了生产能力。我们希望性能好的塔盘，是当气速较高时，液沫夹带量相对的小。

### 2. 液泛

液泛一般由两个原因造成：一是由于气速较高，塔板压降增加，溢流管内液柱高度增加，以致高到上一层塔板，造成液泛；另一个原因是由于液体流量增加，受溢流管阻力的限制来不及流下去，造成液泛，实际上这二种情况是互相联系的。在液泛时，破坏了塔的正常操作，是操作过程所不允许的。为了使塔不产生液泛，就要对操作的气速和液体量进行限制，这也就影响了塔的生产能力的提高。

3. 降液管过小，液量大，液体在降液管中的停留时间太短，液体中夹带的气泡不能很好的分离出来，而被液体带到下一层塔板，使塔板效率降低。

### 4. 泄漏

当塔的操作气速较小时，气体从塔板上小孔流出的速度很低，不足以顶住液层，液体受重力作用而由小孔大量泄漏下来。这样气液不能充分接触，塔板效率很低，分离效果很差。因此，要保证塔的分

效果，操作气速就不能太小。

### 5. 干吹

在塔板上液层很薄或者没有液层时，在塔板上气液两相不能良好接触，因而就谈不上分离效果了。或者由于塔板安装的不好，使板上液层厚薄不均，薄的地方就很容易造成干吹现象。

以上几种情况，都是影响塔的操作及分离效果的现象，它们决定了塔板操作时气液负荷的上限与下限，因此考虑塔板结构时，应使其不易产生上述各种现象，有较高的气流负荷的上限和较低的下限，即有较高的生产能力，同时在负荷的一定变化范围内保持良好的分离效果。

## § 1. 3 塔板研究的方向

从目前国内外塔板的发展趋势来看，是以提高生产能力和塔板效率，简化塔板结构，和对大塔径塔板的研究为主要目标。从提高生产能力来看，改变气流方向，使通过塔板上的气流成水平喷射状态，这样可以减少雾沫夹带，降低板间距，提高气速上限，这就必须从改变气体通道入手，斜孔塔板的孔型设计主要是从这个角度考虑的。加大开孔率，使允许气速增大，也是提高生产能力的一种方法。从简化结构方面来看，减少板上构件增大孔形使加工制作方便，对于溢流装置应尽可能地简单化，或者将有溢流改为无溢流，象穿流板就是无溢流板型之例。从大塔径塔板研究的方面来看，主要解决气液均匀分布的问题，减小水力梯度液体反混和气体分布不均匀等现象采用多溢流或气液并流等方法，象浮动喷射塔板，林德筛板，斜孔塔设导向孔等。根据我国石油化工发展的情况，今后扩大生产的主要一个方面是老厂的改造，革新、挖潜，因此改造现有塔板，提高生产能力和塔板效率是塔板研究的主要方向。是我们研制新型塔板的主要出发点。

根据大中小结合的方针，我国石油化工，轻工业，医药工业等行业有一个显著的特点，就是有大量的中小型工厂，在这类工厂中其精馏吸收等气液两相传质设备大量使用直径小于 $\phi 600$ （毫米）的小塔，

而多数是陈旧的瓷环填料塔，因此改造强化这类小塔在我国有重大的政治与经济意义，针对这一情况我们研制了一种边缘气密封塔板，以满足于改造小塔的需要，本文对此种塔板也作了介绍。

## 第二章 斜孔塔板的实验研究

### § 2.1 斜孔塔板的结构思想

应该研究什么样的新型塔板？这是我们工作中遇到的第一个问题。通过调查研究，我们看到国内外各种新型塔板的研究方向，主要在于提高塔板的生产能力，简化塔板结构，降低设备成本，以适应生产日益发展和工厂大型化的需要。

怎样去进行新型塔板的研究？这是我们遇到的第二个问题。

我们遵照毛主席“理性认识依赖于感性认识，感性认识有待于发展到理性认识”的教导，首先从实践入手，观察塔板上气液接触和流动的状况，然后把实践和理论分析结合起来。通过实践认识到：目前限制塔板生产能力的主要因素，是塔板在高的气液负荷下产生大量的液沫夹带，使塔板效率迅速下降，或者出现液泛现象破坏塔的正常操作。

于是我们分析了液沫夹带形成的机理，从而找出提高塔板生产能力的途径。

液沫夹带的产生，有两个过程：

首先是液体被气体破碎成液滴，液滴的大小主要与上升气体的动能和液体的表面能有关，气体的动能愈大，液体表面能愈小，产生的液滴也愈细。

其次是液滴在气流中运动受重力与摩擦力的作用以一定的沉降速度沉降，若气流向上运动的速度大于液滴的沉降速度，则液滴将被气流带走，成为液沫夹带。

从液沫夹带的产生，可以清楚地看出：在一定体系中，气速愈大，

则液滴分散愈细，愈容易被气流带走，因而造成大量的液沫夹带。可是从增强传质和提高塔的生产能力来说，希望通过塔的气流速度越大越好。这二者是矛盾的。

在目前应用的板式塔中，实际操作的最大空塔速度，远远低于产生过量液沫夹带的理论允许速度。主要原因在于实际塔板具有一定的板间距，而每块塔板上不同高度与不同位置的气体分布是不均匀的，因而真正影响液滴分散和悬浮的（它决定液沫夹带量）是不同高度和不同位置上气流的局部速度，而不是空塔速度。因此，要提高塔板的生产能力，必须从分析塔板上气液流动的状况着手。如何使其气体分布更为合理，是改进塔板的关键。

我们分析了目前应用较多的几种塔板的气体流动情况。

(1) 筛板，在筛板塔中，气体通过筛孔垂直向上，把液滴喷得很高，在较低的塔板间距下，就会产生大量的液沫夹带。从气流分布来看：在筛板之上，气体分布是不均匀的，其流动截面如图 2-1 A 表示。气体主要集中于筛孔上的锥形空间，孔间区域很少有气流通过。在塔板上的不同高度，气速变化如图 2-1 B 所示，在筛孔处速度最大，然后逐渐降低到空塔速度。所以在一定塔板间距下，空间的局部速度要高于真正的空塔速度，这是造成大量液沫夹带的重要原因。

(2) 浮阀塔板。在浮阀塔中，气流从阀片下喷出后，阀与阀之间

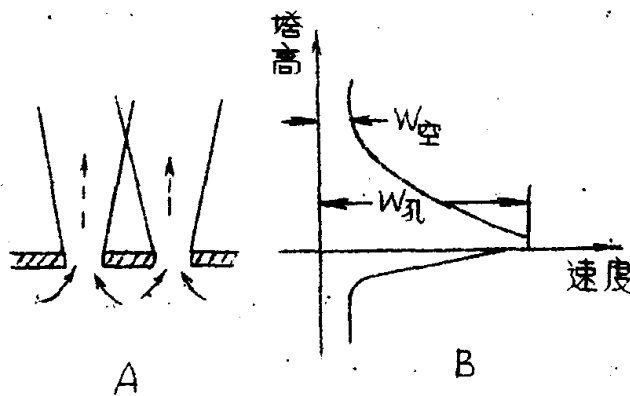


图 2-1 筛板上体流通截面与速度分布

的气流互相干扰，又汇成较大的向上局部速度，产生大量的液沫夹带。如果把阀孔间距加大以减少阀间干扰，又会使开孔率减少，而增大了阀孔气速，同样加大了某些区域的局部速度而不利于提高生产能力。

(3) 其他塔板。其他如舌形、浮舌、浮动喷射等并流塔板，气流水平喷出，又无相互对冲，气流喷出的方向与整个塔中上升气流的方向不是一致的，因此，由于惯性的作用，液滴与气流容易分离，同时沿垂直方向局部速度较快地变成空塔速度或向上的局部分速度较小，所以液沫夹带量比较小，生产能力比较大。

根据以上分析，可以得出结论：凡是气体垂直向上喷射，或是互相对喷，都会造成较高的液沫夹带，不利于生产能力的提高。水平喷出则有利于消除夹带，有利于生产能力的提高。生产实践也证明，舌形和浮动喷射塔板的生产能力一般要比筛板和浮阀等塔板高些。

可是舌形、浮舌、浮动喷射塔等并流塔板由于气液并流，气体均向一个方向喷射，这样就有将液体不断加速的作用，因而出现了以下几个缺点：

1) 由于气流不断加速的作用，液体被气流很快带过塔板，气液接触不充分。

2) 液体不断被气流加速，被分散的液滴从塔板上飞驰而过，不易重新汇聚，容易造成干吹现象，后部的气流容易短路，或接触的液体是一些表面已经“老化”的液滴，传质效果很差，因此，塔板效率较低。这种情况在液流强度较低，气体负荷较高时更为突出，因为这种喷射型的塔板没有一定的液层，气体分散不良，对某些气膜控制传质的体系，塔板效率往往较低。

3) 由于气体向一个方向喷射，在高速时容易形成三角形喷射，在靠近溢流管一侧的塔板上，液体喷得很高，塔内空间利用不好，塔板间距并不能降低。

可以采用加档液板等措施，部份的克服上述缺点，提高塔板效率，但是这种措施都增加了塔板结构的复杂性。

根据以上分析，从气体流动来看，水平喷出（即斜孔）是比较合理的气体通道结构，但要避免气液并流所造成的气流不断加速作用，

同时，为了保证气液的良好接触，塔板上维持适当的液层，使气体和液体充分接触，不断分散、汇聚和表面更新，促进物质传递。

按照这种结构思想，我们设计了斜孔塔板，气体从斜孔喷出，气体喷出方向与液流方向垂直，同一排斜孔的孔口方向相同，相邻二排斜孔方向相反，交错排列，使气流不致对喷又互相牵制，消除气体的不断加速现象。使气液接触良好，液层低而均匀，既有高的生产能力，又有好的塔板效率。

对于一些液体负荷较高的塔，往往由于溢流强度太大，造成高的液层和液面落差，出现严重的塔板阻力降，以致塔板上产生液泛现象，限制了塔的生产能力。

液泛主要取决于塔板阻力，液体的流动和溢流管的结构。为了提高液泛点，过去曾采用S型泡罩塔板，舌形和浮动喷射等并流式塔板，以及林德筛板、网孔筛板等部分并流式的塔板，同时还采用了不同的溢流结构，但均有一定缺点或结构比较复杂。我们根据“洋为中用”的教导，分析了国外最新出现的多溢流管塔板，认为这样一种结构，在液体负荷较大时，塔板上液体的流动和溢流结构较为合理。这种塔板由于溢流管周边加大，使液流强度大大降低，可以减少塔板上液层高度，使塔板不易液泛。加上这种塔板液体流动路程较短，没有液面落差，气体分布均匀，有利于在一些大直径塔上采用。我们又考虑到国外多溢流塔板的结构和塔板效率存在着某些缺点，认为不能原封不动地照搬照抄，而是吸取其合理的部份，将其应用于某些直径较大、液流强度较高的常压、加压精馏或吸收塔，以便加大气液处理量并降低塔板间距。这就是本文所要介绍的斜孔多溢流塔板。

## § 2. 2 斜孔塔板的几种型式

目前根据生产情况的不同，已应用的斜孔塔板有三种类型。

1. 斜孔单溢流塔板：这种斜孔塔板为单流程塔板，适用于液流强度较小的塔。液流强度在5-25之间可选用此种型式。液流强度



$$i = \frac{L}{l} \quad (\text{米}^3/\text{米} \cdot \text{时})$$

式中  $L$  —— 液量 [米<sup>3</sup>/时]

$l$  —— 堰长 [米]

2. 斜孔多溢流塔板：液体负荷较大的塔，往往由于溢流强度太大，而造成液泛，破坏正常操作，为了使塔板能在较大的气液负荷下操作，吸取了多溢流管塔板的优点，研制成斜孔多溢流塔板。图 4-3 (b) 所示为斜孔双溢流塔板，这种塔板溢流管位于塔板的中间，底部一块底板封住，只在两端开液体流出口。相临两层塔板的安装位置要使得溢流管交夹成 90°，使上层塔板流下的液体流到下层塔板离溢流管最远的地方，保证液体均匀的流经整个塔板（液体流程约等于半径）。这种塔板可允许较大的液量，液流强度在 40 以上可选用此种塔板。

3. 边缘气密封斜孔塔板：在一些直径较小的塔中安装塔板很困难，而且有效面积小，为了使斜孔塔板在小塔中得到应用，根据塔板上液体受气体作用而不漏液的原理，设计了这种塔板。塔板四周冲有与板面相同的斜孔，为了按装方便用成串的方法装入塔内（详细情况请阅第五章）。这种塔板适用于直径 800 毫米以下的小塔。

三种塔板的孔型分为 K 型（开型）与 B 型（闭型）。目前应用的有二种，在大塔使用的是孔宽 20 [毫米]，孔口高 5 [毫米] 左右，在小塔使用的为孔宽 7~10 [毫米]，高 2.5~4 [毫米]，斜孔尺寸可根据具体情况变化。斜孔塔板已初步用于生产。为了摸清、和验证斜孔塔板性能，在实验室进行了实验研究工作。

### § 2.3 斜孔塔板的实验研究

我们遵照毛主席《实践论》的教导，在各种冷模和热模实验装置上对斜孔塔板进行了反复的实验研究。有关实验装置的情况见表 2-1。实验的第一步是先在小型冷模装置上观察斜孔塔板上气液两相的

流动情况，对孔形和排列等进行了多次改进，使气液接触良好，初步确定了斜孔塔板的结构。第二步是小型热模实验，用酒精-水体系的精馏测定塔板效率。第三步是冷模放大实验，证明塔放大后气液接触

表 2 - 1 斜孔塔板实验装置一览表

装置名称	塔径(毫米)	体 系	实 验 内 容	研究目的	
小型冷模	φ150	空气-水	流体力学现象	确定孔型结构	
小型热模	φ150	酒精-水	分离效率	传质效果	
冷模放大	φ600	空气-水	流体力学	放大状况	
大型热模	φ800	回收酒精 苯-甲苯 苯-乙苯	精馏效率	工业体系的板效率	
对比实验	冷模	φ600	空气-水-氧	流体力学 氧解吸	与浮阀对比
	热模	φ800	苯-甲苯 乙苯-苯乙烯	常压精馏 减压精馏	与浮阀对比

情况没有明显的改变。第四步是大型热模试验，我们和兰化合成橡胶厂合作，用工业物料进行精馏试验，结果说明斜孔塔板不仅生产能力大，而且塔板效率高。为了证明实验结果的可靠，又在同一装置上进行了斜孔塔板和浮阀塔板的冷模和热模的对比实验。初步完成了斜孔塔板的实验研究工作。

本文重点介绍斜孔多溢流塔板大型热模和浮阀塔板对比实验的结果。

### 1. 流体力学现象

通过大型热模实验，观察到斜孔塔板在气速较低时（空塔动能因子  $F = 0.5 \sim 0.8$ ），液体从部分孔口泄漏，但板上已建立液层，

如同穿流筛板的操作。当气速提高 ( $Fr = 1 \sim 1.2$ )，液体泄漏基本停止，气液呈鼓泡操作，泡沫高度在100〔毫米〕左右，当气速加大 ( $Fr = 1.5$ 左右)，气液开始呈鼓泡和喷射相混合的状态，液滴层低而均匀，没有浮阀塔板那种局部喷溅的现象，气液接触十分良好，这时塔板效率最高。当气速再增大 ( $Fr = 2$ 以上)时，鼓泡层减少，液滴层高度增加，基本处于喷射状态。但是，由于气体分布比较均匀，没有气体局部集中以及液体摆动上冲等现象，所以液沫夹带量仍然不大，这些现象说明斜孔塔板有较大的操作弹性，和较高的生产能力。

### ① 阻力降

斜孔塔板总的阻力降：

$$\Delta P_{\text{总}} = \Delta P_{\text{干}} + \Delta P_{\text{液层}} \quad (\text{米液柱})$$

其中干板阻力  $\Delta P_{\text{干}}$  与气体通过板孔的速度平方成正比：

$$\Delta P_{\text{干}} = \zeta \frac{w_0^2}{2g} \cdot \frac{\gamma_g}{\gamma_L} \quad (\text{米液柱})$$

其中： $w_0$  —— 气体的孔速〔米/秒〕

$\gamma_g$  —— 气体重度〔公斤/米<sup>3</sup>〕

$\gamma_L$  —— 液体重度〔公斤/米<sup>3</sup>〕

$g$  —— 重力加速度9.81〔米/秒<sup>2</sup>〕

$\zeta$  —— 阻力系数，实验得出  $\zeta = 2.1$  左右。

液层阻力与塔板上清液层高度有关：

$$\Delta P_{\text{液层}} = C (h_{10} + h_{ow}) \quad (\text{米液柱})$$

其中： $h_{10}$  —— 堰高〔米〕

$$h_{ow} \text{ —— 堰上清液层高 } h_{ow} = \frac{2.84}{1000} \left( \frac{L}{l_{10}} \right)^{2/3} \quad (\text{米})$$

$L$  —— 流量 (米<sup>3</sup>/时)

$l_{70}$  —— 堰长 (米)

$C$  —— 充气系数, 实验得  $C = 0.4 \sim 0.6$

斜孔塔板的干板阻力降比浮阀塔板低40%左右, 这是斜孔通道比浮阀简单, 动能损失较小的原因。斜孔多溢流塔板有较低的堰上清液层, 所以液层阻力比浮阀和筛板等塔板低。

### ② 液沫夹带量

由于斜孔塔板气流从斜孔水平喷出, 避免相互对冲, 因此液沫夹带量比浮阀塔板低。例如: 当塔板间距  $H_T = 40$  (毫米), 空塔气速  $W_{空} = 2$  (米/秒) 时, 浮阀塔板的液沫夹带量为6%, 而斜孔塔板在相同条件下只有1.5%。如果按液沫夹带量  $c = 10\%$  来确定上限空塔气速, 则斜孔塔板的上限空塔气速比浮阀塔板高40%左右。

### 2. 氧解吸的塔板效率

将氧气溶于水并用空气进行解吸, 来测定氧解吸时的塔板效率, 以比较各种塔板的冷模传质效果。

各种塔板氧解吸的塔板效率见图2-3。

从图2-3可以看出: 在各种塔板中, 以斜孔塔板效率最高。总的来说, 斜孔塔板, 浮阀塔板与大孔筛板等错流塔板, 有出口堰, 塔板上始终能保持一定液层, 保证了气液的良好接触, 因此塔板效率均比并流喷射型塔板(舌形和浮舌)要高。在斜孔、浮阀和筛孔塔板中, 由于斜孔塔板具有交错排列的斜孔, 造成气液的高度湍流, 有利于传质, 因此塔板效率较高。

### 3. 常减压精馏实验的结果

热模对比实验在 $\phi 800$ 毫米的试验塔中进行, 共装四层塔板, 板间距  $H_T = 300$  (毫米), 采用全回流操作, 进行了常压和减压精馏的对比实验。

#### ① 减压精馏的比较:

用乙苯-苯乙烯体系进行减压精馏, 塔内压力按塔顶釜底平均计算, 余压为50~80 (毫米汞柱), 浓度用折光法分析, 相对挥发度



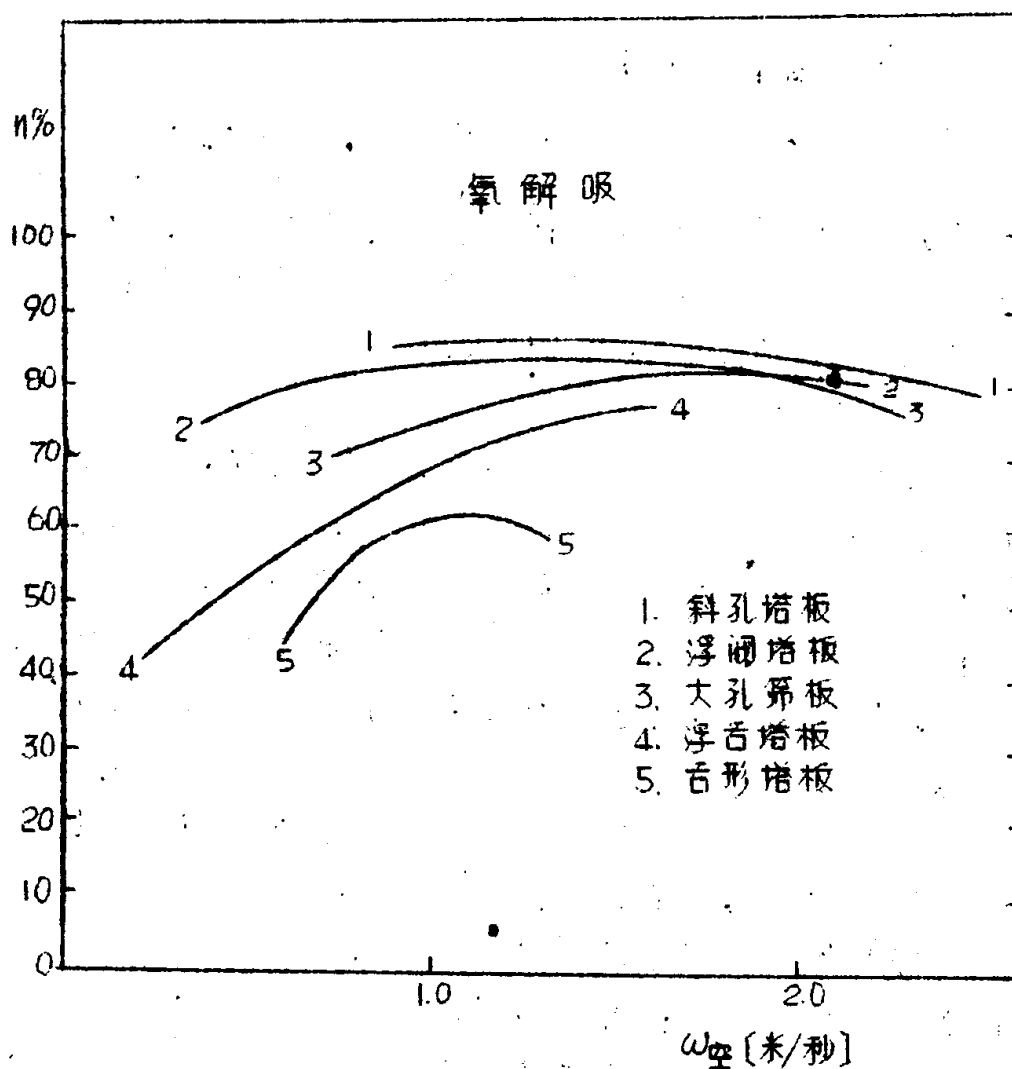


图 2 - 3 各种塔板氧解吸塔板效率的比较

按文献所测蒸汽压计算，用 Fenske 方程计算平均板效率。

各种气体负荷下的塔板效率见图 2 - 4。

根据实验结果：

斜孔塔板  $F = 0.6 \sim 1.9$  时， $\eta = 70 \sim 80\%$ 。

浮阀塔板  $F = 0.3 \sim 1.2$  时， $\eta = 60 \sim 75\%$ 。

因此，在乙苯-苯乙烯的减压精馏中，斜孔塔板效率比浮阀塔板高 5~10%。气速上限高 50~60%。

② 常压精馏的比较

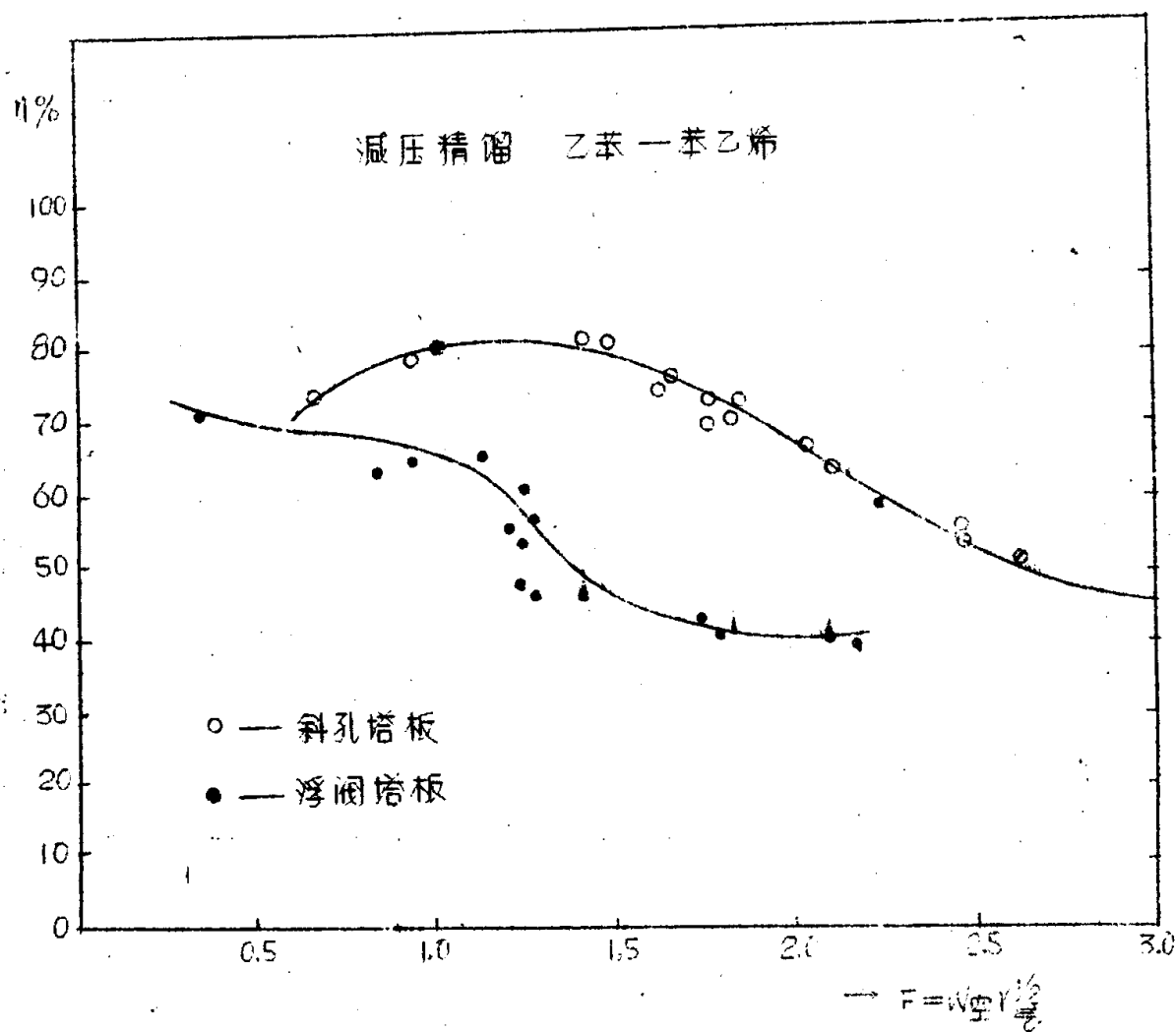


图 2-4 减压精馏塔板效率与动能因子  $F$  的关系

常压精馏以苯—甲苯体系为例，组成用色谱法分析，实验结果均按二组分计算。

各种不同气体负荷的塔板效率见图 2-5。

常压精馏的操作情况与冷模和减压基本上相同，差别是在常压精馏下，由于液体负荷增大，塔板上液层增高，在相同的板间距下，塔板允许的气体负荷稍有下降，特别是在高负荷下，塔板上液层有波动现象，增加了液沫夹带量，使效率有所下降。

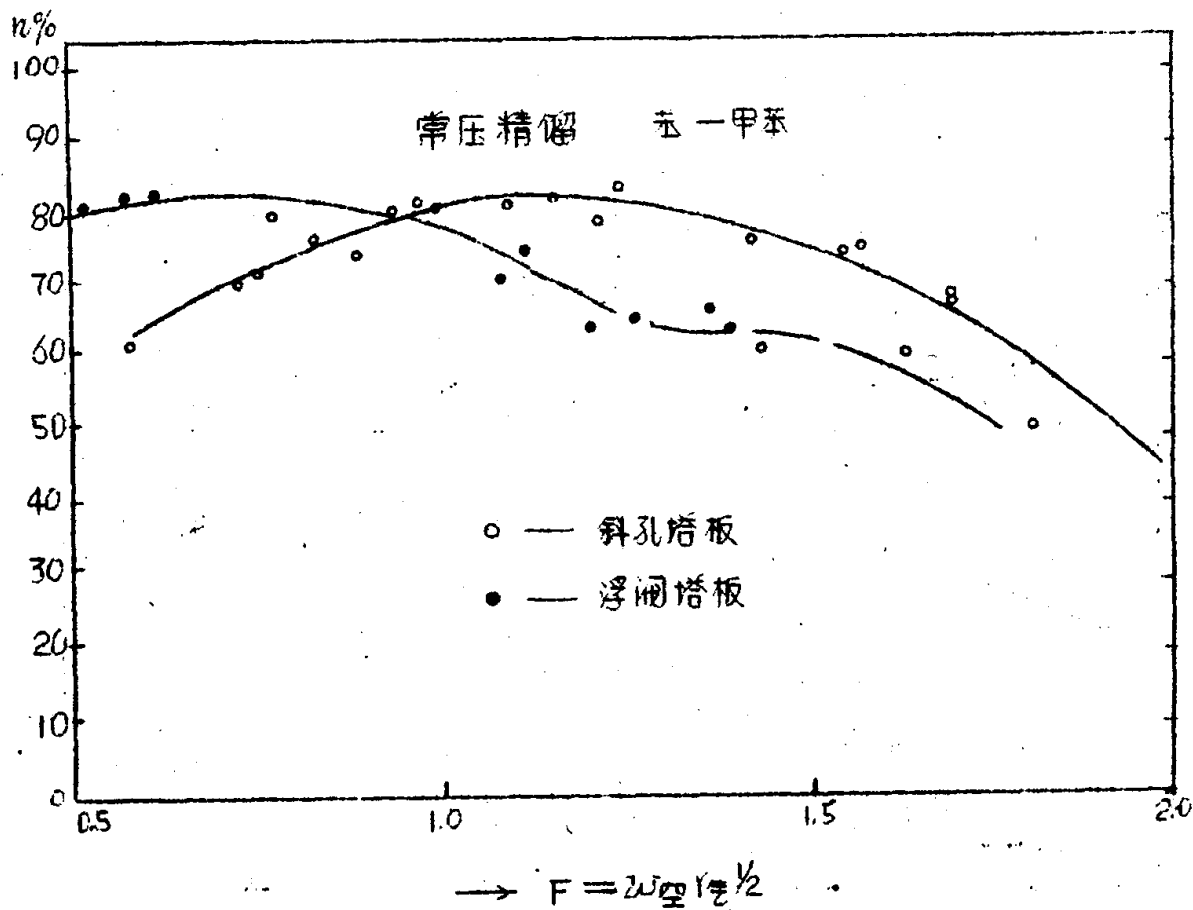


图 2 - 5 常压精馏塔板效率与动能因子  $F$  的关系

实验结果:

斜孔塔板  $F = 0.7 \sim 1.70$  时,  $\eta = 70 \sim 82\%$ 。

浮阀塔板  $F = 0.5 \sim 1.15$  时,  $\eta = 70 \sim 82\%$ 。

在低负荷时 ( $F = 0.5 \sim 0.9$ ), 浮阀塔板的板效率比斜孔塔板高。但在中等负荷 ( $F = 1.0 \sim 1.5$ ) 下, 斜孔塔板比浮阀塔板高 5 ~ 10%, 二者最高板效率都在 80% 左右时, 但斜孔塔板允许负荷大。

#### 4. 斜孔多溢流塔板的热模实验

斜孔多溢流塔板的热模实验也在  $\phi 800$  (毫米) 的塔中进行, 共装四层塔板, 板间距  $H_T = 200$  (毫米)。用苯—甲苯体系进行常压精馏实验。实验结果如图 2 - 6 所示。

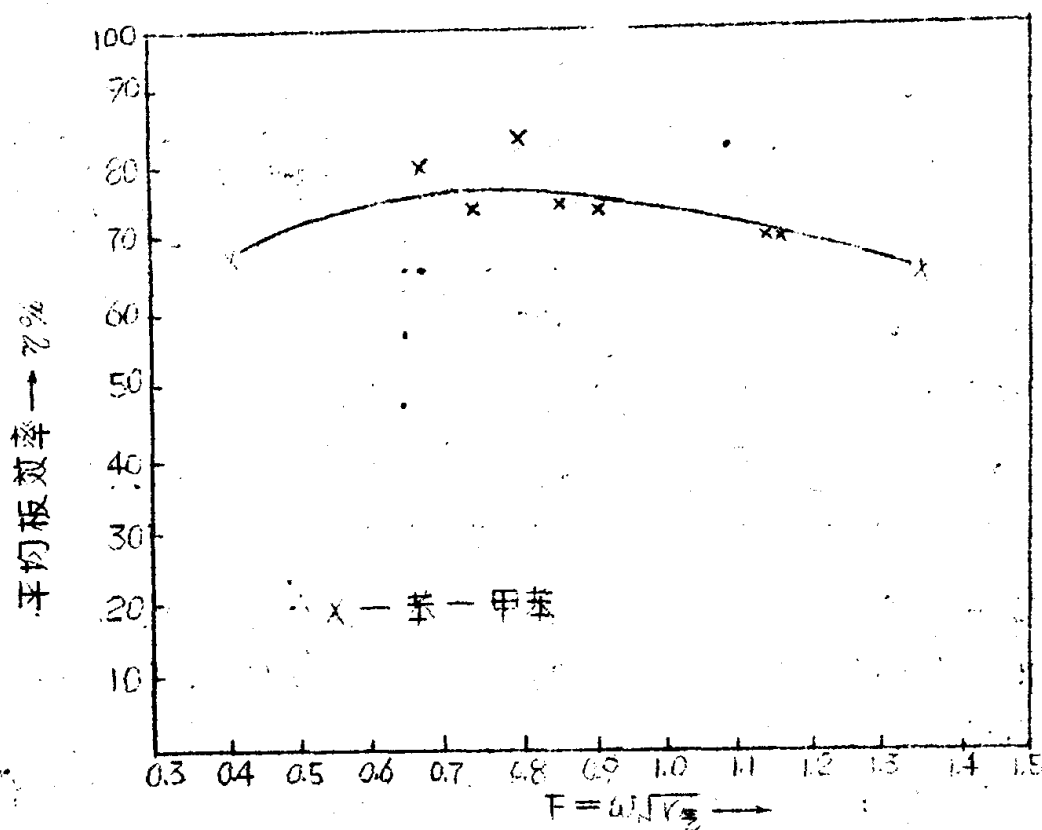


图 2 - 6 斜孔多溢流塔板的精馏实验结果

由于斜孔多溢流塔板采用了多溢流管的溢流结构，加大了溢流周边，降低了溢流强度，减少了塔板上的液层高度，因而在板间距很低的情况下，液沫夹带量较小，所以，气速上限高板效率也较高，平均板效率在 70~80%。如果按 Smith 计算塔的生产能力的方法，考虑板间距对负荷的影响，对不同板间距下的允许负荷加以修正，折算成相同板间距下的允许负荷，与浮阀塔板、斜孔单溢流塔板的能力进行比较的结果见表 2 - 2。



表 2 - 2 几种塔板生产能力的比较

塔板型式	塔板间距 (毫米)	塔板效率 $\eta$ (%)	最大负荷因子 ( $F_{最大}$ )	按 Smith 法折算 成相同板间距的最大 负荷因子 ( $F_{最大}$ )
V - 1 型浮阀塔板	300	70~83	1.15	1.15
斜孔单溢流塔板	300	70~83	1.70	1.70
斜孔多溢流塔板	200	70~84	~1.90	~1.90

从表 2 - 2 可以看出, 斜孔多溢流塔板的生产能力最大, 特别是在常压或加压精馏等液体负荷较大的情况下, 采用斜孔多溢流塔板有明显的优越性。

通过实验研究, 初步掌握了斜孔塔板的基本性能, 为斜孔塔板的工业试验做好了准备。

### 第三章 斜孔塔板的工业试验情况

#### § 3.1 斜孔塔板在东炼脱戊烷塔工业试验情况

遵照毛主席“独立自主, 自力更生”的伟大教导为了使我国自行创造的新型斜孔塔板迅速运用到石油, 化工生产中, 使无产阶级科研为社会主义经济基础服务, 走自己工业发展的道路。一九七三年八月在北京石油化工总厂东方红炼油厂催化裂化车间, 在工人师傅和技术人员大力支持下, 将原脱戊烷塔进行了改装, 第一次进行了斜孔塔板的工业试验, 并取得了成功。

脱戊烷塔原为加压浮阀塔。塔径 1 [米], 浮阀板 45 块, 板间距  $H_T = 450$  [毫米], 溢流堰出口高  $h_w$  为 50 [毫米], 堰长