

气液传质设备

8.1 概 述

吸收和蒸馏过程,虽是基于不同原理的分离过程,但同属于气液间的传质过程,具有共同的特点,所用的设备皆应提供充分的气液接触,并在接触传质后能够迅速分离,因此可以在同样的设备中进行。本章所述的“气”泛指吸收中的气相和蒸馏中的蒸汽相。

1. 气液传质设备的类型

气液传质设备一般为塔器,主要有板式塔和填料塔两种。板式塔的主要特征为气、液两相在塔板上以气体鼓泡和液体喷射状态完成气液接触传热、传质,是明显的逐级接触过程;填料塔中气液接触主要发生在填料表面,并没有明显的分级,而是连续的微分接触过程。无论是板式塔还是填料塔都可以应用于蒸馏和吸收,至于具体的选用,需根据工艺本身的需求而定。传统上蒸馏多选用板式塔,吸收多选用填料塔;物料处理量大、塔径较大时采用板式塔,而直径在 0.8 m 以下时多采用填料塔。近些年随着技术的发展,直径在 3 m 以上的填料塔已很常见,直径在 10 m 以上的塔也已有工业应用。

2. 气液传质设备的使用要求

从工程目的出发,气液传质设备主要有以下使用要求。

(1) 分离效率 即单位压降设备的分离效果,对板式塔以板效率来表示,对填料塔以等板高度来表示。一般来讲,接触充分、适当湍动、提供尽可能大的相接触面积,都可以提高传质速率,从而提高分离效率。

(2) 操作弹性 表现为对物料的适应性及对负荷波动的适应性。当塔内气、液两相流量在操作中发生明显的变化时,还能正常操作以及体现出正常的流体力学性能和分离效率。

(3) 通量 单位截面积的生产能力,表征气液传质设备的处理能力和允许的空塔气速,决定了一定生产任务条件下塔设备的直径大小。

8.2 板 式 塔

8.2.1 板式塔的结构

如图 8.1 所示,板式塔由圆筒形壳体和塔内装有的多层水平塔板组成。按照塔板上气、

液两相流动通道设置的不同,塔板可分为有降液管式塔板(也称溢流式塔板或错流式塔板)及无降液管式塔板(也称穿流式塔板或逆流式塔板)两类,如图 8.2 所示。

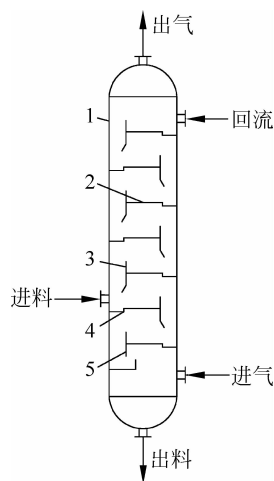


图 8.1 板式塔

1—塔壳体；2—塔板；3—溢流堰；

4—受液盘；5—降液管

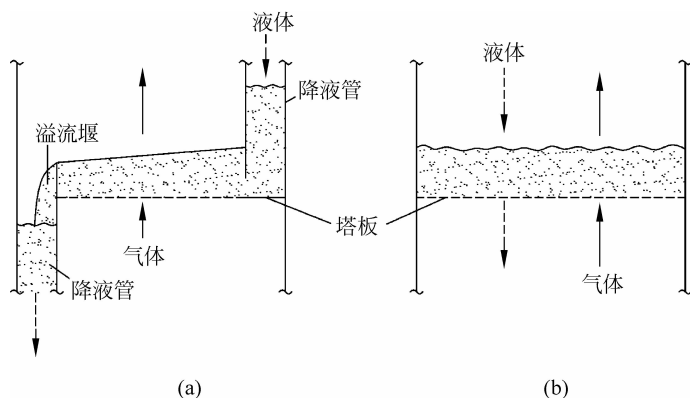


图 8.2 塔板的分类

(a) 有降液管式塔板；(b) 无降液管式塔板

对于有降液管的塔板,操作时,塔内液体依靠重力作用,从上层塔板经降液管流到下层塔板的受液盘,然后横向流过塔板,从另一侧的降液管流至下一层塔板。溢流堰的作用是使塔板上保持一定厚度的液层。气体则在压力差的推动下,自下而上穿过各层塔板的气体通道(泡罩、筛孔或浮阀等),分散成小股气流,鼓泡通过各层塔板的液层。在塔板上,气、液两相密切接触,进行热量和质量的交换。此种情形下,液相为连续相,气相为分散相。

无降液管的塔板也称穿流塔板,其结构特征是塔板上无降液管,气、液两相均通过分布在塔板上的通道穿过塔板,两相呈逆流流动。这种塔的结构简单,造价低廉,但其塔板效率较低,操作弹性很小,一般仅用于一些特殊场合。以下主要介绍有降液管的塔板。

为实现气、液两相间充分的传质,板式塔应保证每块塔板上气液充分接触,即有足够大且不断更新的相际接触表面,接触传质后又能迅速充分地分离。板式塔的结构设计以及塔板构造都是在体现这一思想。

(1) 筛孔 筛孔是塔板上的气体通道。气体通道的形式很多,对塔板的性能影响极大,各种塔板的主要区别就在于气体通道的形式不同。最简单的塔板形式是筛板塔,它是在塔板上均匀地冲出许多圆形小孔供气流穿过。上升的气体经筛孔分散后穿过板上液层,与液体接触传质。

(2) 溢流堰 为保证气、液两相有足够的接触表面,塔板上必须有一定厚度的液体,为此,在塔板液体的出口端设有溢流堰。塔板上的液层厚度很大程度上由堰高决定。

(3) 降液管 为液体自上层塔板流至下层塔板的通道,每块塔板通常附有一个降液管。正常工作时,液体从上层塔板的降液管流出,横向流过开有筛孔的塔板,翻越溢流堰,进入该板的降液管,流向下层塔板。降液管的下端必须保证液封,使液体能从降液管流出,而气体不能窜入降液管。为此,降液管下缘的缝隙(降液管底隙高度)必须小于堰高。

8.2.2 板式塔的流体力学性能

气、液两相的传热和传质与其在塔板上的流动状况密切相关,其中气速和液体流动速度有着非常大的影响。为了保证板式塔的正常操作,使其具有较高的分离效率,必须使塔内的各项流体力学指标满足一定的条件。

1. 塔板上气、液两相的接触状态

塔板上气、液两相的接触状态是决定板上两相流体力学及传质和传热规律的重要因素。如图 8.3 所示,当液体流量一定时,随着气速的增加,可以出现四种不同的接触状态。

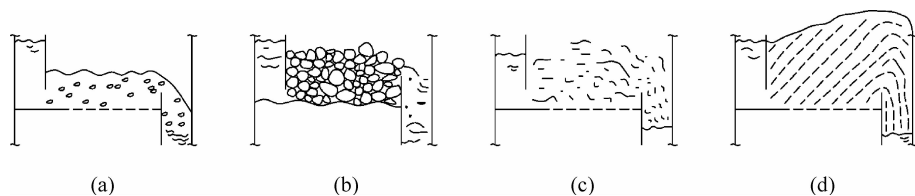


图 8.3 塔板上的气液接触状态

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

(1) 鼓泡接触状态 当气速较低时,气体以鼓泡形式通过液层。由于气泡的数量不多,形成的气液混合物基本上以液体为主,两相接触面积为气泡表面,由于气泡不密集,接触面积不大,表面得不到更新,传质效率很低。

(2) 蜂窝接触状态 随着气速的增加,气泡的数量不断增加。气泡互相碰撞,形成多面体结构,气泡间以液膜相隔,呈蜂窝状。板上为以气体为主的气液混合物。由于气泡不易破裂,表面得不到更新,所以此种状态传质效率仍然较低,不利于传热和传质。

(3) 泡沫接触状态 当气速继续增加,气泡数量急剧增加,气泡不断发生碰撞、破裂、再生,此时板上液体大部分以液膜的形式存在于气泡之间,形成一些直径较小、扰动十分剧烈的动态泡沫,塔板上清液层高度非常小。泡沫接触状态下的两相传质面积并不只是气泡表面,还包括了大量的液膜表面。泡沫接触状态的表面积大,并不断更新,为两相传热与传质提供了良好的条件。此时液体仍为连续相,气体为分散相。

(4) 喷射接触状态 当气速继续增加,由于气体动能很大,把板上的液体向上喷成大小不等的液滴,直径较大的液滴受重力作用又落回到板上,直径较小的液滴被气体带走,形成液沫夹带。此时塔板上的气体为连续相,液体为分散相,两相传质的面积是液滴的外表面。由于液滴回到塔板上又被分散,这种液滴的反复形成和聚集,使传质面积大大增加,而且表面不断更新,有利于传质与传热进行,也是一种较好的接触状态。

在喷射接触状态下,液体是分散相而气体是连续相,这是喷射接触状态和泡沫接触状态的根本区别。喷射接触状态气速高、液沫夹带较多,若控制不好,会破坏传质过程,但通量大,生产能力大。

2. 气体通过塔板的压降

气体通过塔板的总压降包括每块塔板的干板阻力(即板上各部件所造成的局部阻力)以

及板上充气液层的静压力及液体的表面张力。

一般来说塔板压降增大,会使塔板上气、液两相的接触时间延长,传质充分,塔板效率升高;但压降增大也会使塔釜压力升高,塔釜温度随之升高,能耗增加,操作费用增大;对减压操作的板式塔,过大的压降也会导致塔顶更高的真空度。因此,进行塔板设计时,应综合考虑,在保证较高效率的前提下,力求减小塔板压降,以降低能耗和改善塔的操作。

3. 塔板上的液面落差

当液体横向流过塔板时,要克服流动阻力,故塔板进口处的液面比出口处液面稍高,这个高度差即为液面落差,以 Δ 表示,如图 8.4 所示。液面落差与液相流动阻力有关,主要是板上的摩擦阻力和板上部件(如泡罩、浮阀等)的局部阻力。液面落差将导致板上液层厚度 h_{ow} 和气流分布的不均匀,从而造成漏液现象,使塔板的效率下降。因此,在塔板设计中应尽量减小液面落差。

液面落差的大小与塔板结构有关。泡罩塔板结构复杂,液体在板面上流动阻力大,故液面落差较大;筛板板面结构简单,液面落差较小。除此之外,液面落差还与塔径和液体流量有关,当塔径很大或液相流量很大时,也会造成较大的液面落差。为此,对于直径较大的塔,设计中常采用双溢流或阶梯溢流等溢流形式来减小液面落差。

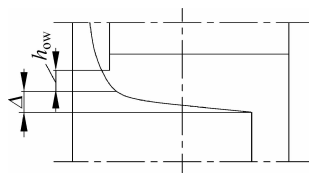


图 8.4 液面落差示意图

4. 塔板上的异常操作现象

塔板的异常操作现象包括漏液、液沫夹带和气泡夹带以及液泛等,是使塔板效率降低甚至使操作无法进行的重要因素。因此,需了解这些异常操作现象并在设计和操作中避免这些现象的出现。

1) 漏液

在正常操作的塔板上,液体横向流过塔板,然后经降液管流下。当气速较低时,气体通过筛孔的动压不足以阻止板上液体经筛孔流下,这种现象称为漏液。漏液现象的单孔实验表明,对于普通筛孔及界面张力不是很小的物系,只要筛孔中有气体通过,液体就不可能从筛孔落下,即同一个筛孔不可能有气体和液体同时通过。因此,要避免漏液,气体必须分布均匀,使每一个筛孔都有气体通过。

气体是否分布均匀与流动阻力有关。前已述及,气体穿过塔板的阻力主要有两部分,即干板阻力和液层阻力。干板阻力在结构上是均匀的,但是液面落差以及液层的起伏波动造成了液层阻力的不均匀,从而引起气流的不均匀分布。

当总阻力以干板阻力为主时,液层阻力可忽略,则气流分布均匀;反之,若液层阻力占比较大,则阻力分布不均匀就非常严重,气流分布就很不均匀,导致部分筛孔漏液。

除结构性因素以外,气速是决定是否漏液的主要因素,干板阻力随气速的增大而急剧增加,液层阻力则与气速关系较小。因此,当气速由高逐渐降低到某一值时,将发生明显漏液。若漏液量较少则属正常情况,一般不会影响传质效果,但严重的漏液将导致气、液两相在塔板上的接触时间减少,塔板效率下降,严重时会使塔板不能积液而无法正常工作。通常,为保证塔板的正常操作,漏液量应不大于液体流量的 10%。漏液量达到 10% 的气体速度称为

漏液速度,它是板式塔操作气速的下限。

在塔板液体入口处,液层较厚,往往出现漏液,为此常在塔板液体入口处留出一条不开孔的区域,称为安定区。

2) 液沫夹带和气泡夹带

气体穿过液层时,部分液体被分散成微小液滴,气体夹带着这些液滴在板间的空间上升,如液滴来不及沉降分离,则将随气体进入上层塔板,这种现象称为液沫夹带。同样,越过溢流堰进入降液管的液体夹带的气泡若来不及释放,将被带至下块塔板,称为气泡夹带。显然无论液沫夹带还是气泡夹带,都使得在板上已经分离的气相或液相与待分离的气、液相重新混合,造成返混,降低塔板效率。为维持正常操作,需将液沫夹带限制在一定范围,一般允许的液沫夹带量为 $e_v < 0.1 \text{ kg(液体)}/\text{kg(干气体)}$ 。

影响液沫夹带量的因素很多,最主要的是空塔气速和塔板间距。对于沉降速度小于板上气速的小液滴,则无论塔板间距多大,都将被气流带至上层塔板;沉降速度大于气流速度的大液滴,空塔气速减小及塔板间距增大,都会使其回落,减少夹带量。

与液沫夹带相比,气泡夹带所产生的气体夹带量与气体总量相比很小,一般不会给传质带来很大的危害。其主要危害在于降低了降液管内泡沫层的平均密度,使降液管的通过能力下降,严重时会造成液泛。为避免严重的气泡夹带,一般在靠近溢流堰的狭长区域不开孔,使液体在进入降液管前有一定的时间脱除气泡,这一区域称为出口安定区。除此之外,液体在降液管内还应有足够的停留时间以脱除气泡,这也是确定降液管面积或溢流堰长度的主要依据。

3) 液泛

塔板正常操作时,在板上维持一定厚度的液层,以和气体进行接触传质。如果由于某种原因,导致液体充满塔板之间的空间,使塔的正常操作受到破坏,这种现象称为液泛。

当液沫夹带比较严重时,液体被气体夹带到上一层塔板上的量剧增,超过了塔板的流通能力,使上层塔板液相流动不畅,液体难以流到下层塔板,在塔板上积累,最终充满两板之间的空间,这种由于液沫夹带量过大引起的液泛称为液沫夹带液泛。

当气速过大使液相流动阻力增加比较大时,降液管内液体不能顺利向下流动,管内液体必然积累,致使管内液位增高而越过溢流堰顶部,两板间液体相连,塔板产生积液,最终导致塔内充满液体,这种由于降液管内充满液体而引起的液泛称为降液管液泛。

上述两种形成液泛的现象是相互关联相互影响的,过量的液沫夹带,将导致板上液层增厚,引起塔板压降增大,促使降液管液面升高,引起降液管液泛;同样,当发生降液管液泛时,板上液层增厚,塔板空间减小,液滴来不及沉降,也会引起过量液沫夹带。液泛现象,无论是夹带液泛还是降液管液泛,都会导致塔内积液。在操作时,气体流量不变而塔板压降持续增大,将预示液泛的发生。

液泛的形成与气、液两相的流量相关。对一定的液体流量,气速过大会形成液泛;反之,对一定的气体流量,液量过大也可能发生液泛。液泛时的气速称为泛点气速,正常操作气速应控制在泛点气速之下。

5. 塔板的负荷性能

对一定的物系和一定的塔结构,必相应有一个适宜的气、液相流量范围。气体流量过

小,将产生严重的漏液,使塔板效率急剧下降进而无法正常工作;气体流量过大,会因严重的液沫夹带或发生液泛而使塔无法正常工作。液相流量变化也有类似的结果。液体流量过小,板上液流严重不均而使板效率急剧下降;液体流量过大,则板效率因液面落差过大而下降。

如图 8.5 所示,塔内气、液相流量正常的可操作范围一般用负荷性能图来表示,横坐标为液相负荷 L ,纵坐标为气相负荷 V 。

负荷性能图由以下 5 条线组成。

(1) 漏液线 线 1 为漏液线,又称气相负荷下限线。若操作的气相负荷低于此线,将发生严重的漏液现象。塔板的适宜操作区应在该线以上。

(2) 液沫夹带线 线 2 为液沫夹带线,又称气相负荷上限线。若操作的气相负荷超过此线,表明液沫夹带现象严重。塔板的适宜操作区应在该线以下。

(3) 液相负荷下限线 线 3 为液相负荷下限线。若操作的液相负荷低于此线,表明液体流量过低,板上液流不能均匀分布,使塔板效率下降。塔板的适宜操作区应在该线以右。

(4) 液相负荷上限线 线 4 为液相负荷上限线。若操作的液相负荷高于此线,表明液体流量过大,此时液体在降液管内停留时间过短,进入降液管内的气泡来不及与液相分离而被带入下层塔板,造成气泡夹带。塔板的适宜操作区应在该线以左。

(5) 液泛线 线 5 为液泛线。若操作的气液负荷超过此线,塔内将发生液泛现象,使塔不能正常工作。塔板的适宜操作区在该线以下。

在塔板的负荷性能图中,由五条线所包围的区域称为塔板的适宜操作区。操作时的气相负荷 V 与液相负荷 L 在负荷性能图上的坐标点称为操作点。在连续精馏塔中,回流比为定值,故操作的气液比 V/L 也为定值。因此,每层塔板上的操作点沿通过原点、斜率为 V/L 的直线而变化,该直线称为操作线。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。设计时,应使操作点尽可能位于适宜操作区的中央,若操作点紧靠某一条边界线,则负荷稍有波动时,塔的正常操作即被破坏。

应予指出,当分离物系和分离任务确定后,操作点的位置即固定,但负荷性能图中各条线的相应位置随着塔板的结构尺寸变化。因此,在设计塔板时,根据操作点在负荷性能图中的位置,适当调整塔板结构参数,可改进负荷性能图,以满足所需的操作弹性。例如:加大板间距可使液泛线上移,减小塔板开孔率可使漏液线下移,增加降液管面积可使液相负荷上限线右移等。

塔板负荷性能图在板式塔的设计及操作中具有重要的意义。通常,当塔板设计好后要作出塔板负荷性能图,以检验设计的合理性。对于操作中的板式塔,也需作出负荷性能图,以分析操作状况是否合理。当板式塔操作出现问题时,通过塔板负荷性能图可分析问题所在,为问题的解决提供依据。

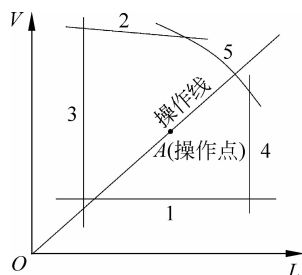


图 8.5 塔板负荷性能图

8.2.3 塔板类型

1. 泡罩塔板

泡罩塔板是工业上应用最早的塔板,其结构如图 8.6 所示,它主要由升气管及泡罩构成。泡罩安装在升气管的顶部,分圆形和条形两种,以圆形泡罩使用较广。泡罩的下部周边开有长条型或锯齿型齿缝。操作时,液体横向流过塔板,塔板上的液层高度高于泡罩缝隙形成液封。气体经升气管穿过塔板,在泡罩顶部回转并沿泡罩齿缝进入液层,由于齿缝的作用,气体被分散成许多细小的气泡或流股,促进传质;而升气管的使用使得泡罩塔板即便在较低的气速下也不至于发生严重漏液,因而具有很大的操作弹性。

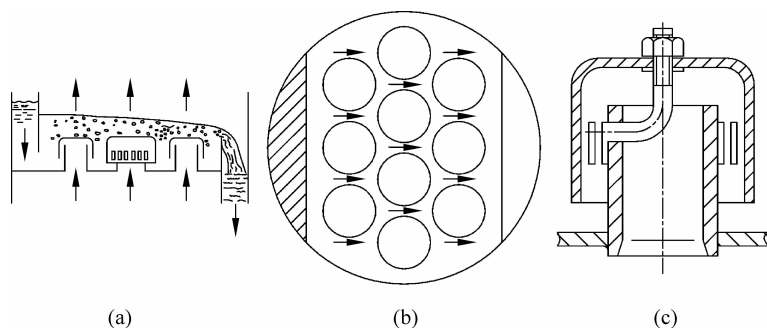


图 8.6 泡罩塔板

(a) 泡罩塔板操作示意图; (b) 泡罩塔板平面图; (c) 圆形泡罩

泡罩塔板由于操作弹性较大,对物料适应性强,历史上曾经被广泛应用。但由于其结构复杂、造价高、塔板压降大、板效率较低,目前已逐渐被其他类型的塔板所取代,应用逐渐减少。

2. 筛孔塔板

筛孔塔板简称筛板,其结构如图 8.7 所示。塔板的气相通道是在塔板上冲压出的均匀分布的小孔,称为筛孔,筛孔直径一般为 $3\sim 8\text{ mm}$,在塔板上呈正三角形排列。塔板上设置溢流堰,使板上能保持一定厚度的液层。

操作时,气体经筛孔分散成小股气流,鼓泡通过液层进行传热和传质。通过筛孔上升的气流速度,应该控制在能够阻止液体经筛孔向下泄漏的范围内。

筛板塔的突出优点是结构简单、造价低,塔板阻力小,传质效率高。以往因筛板塔的设计和操作精度要求较高,工业上应用较为谨慎,近年来,由于设计和控制水平的不断提高,筛板塔的操作变得非常精确,故应用日趋广泛。

3. 浮阀塔板

浮阀塔板的结构特点是在塔板上开有若干个阀孔,每个阀孔装有一个可上下浮动的阀片,称为浮阀,浮阀的开度可以根据气体通过阀孔的气速自动调整。浮阀的最大开度由插入阀孔的三条阀腿限定。最小开度由阀片周边冲出的几个略向下弯曲的定距片限定。

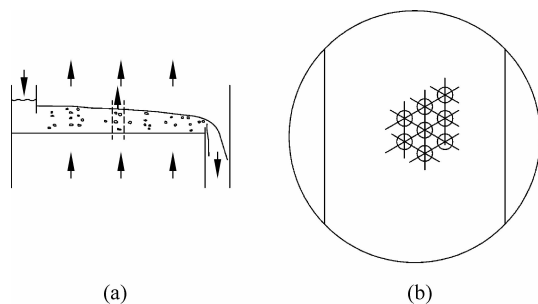


图 8.7 筛板示意图

(a) 筛板操作示意图; (b) 筛孔布置图

操作时,浮阀开度随气体负荷而变,在低气量时,开度较小,气体仍能以足够的气速通过缝隙,避免过多的漏液;在高气量时,阀片自动浮起,开度增大,使气速不致过大,因此浮阀塔板的操作弹性极大,生产能力大,塔板效率高,兼具了泡罩和筛板的优点而被广泛应用。

浮阀塔板的主要缺点是,长期使用后,浮阀由于频繁活动易脱落或出现卡死的现象,塔板效率和操作弹性将会下降。为避免腐蚀或浮阀与阀孔被粘住,浮阀和塔板一般采用不锈钢材料。阀的类型很多,国内常用的有如图 8.8 所示的 F1 型、V-4 型及 T 型等。

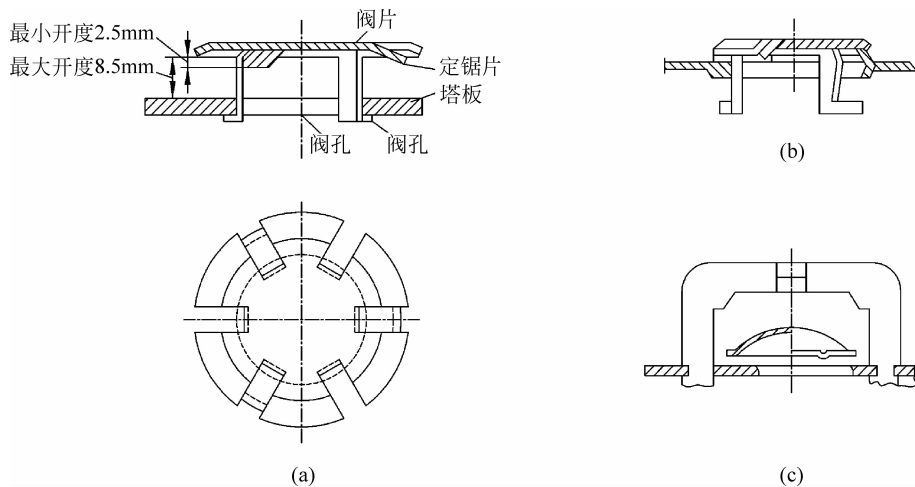


图 8.8 几种浮阀型式

(a) F1 型浮阀; (b) V-4 型浮阀; (c) T 型浮阀

4. 舌型塔板

上述几种塔板,气体以泡沫状态和液体接触,液相为连续相,气相为分散相,当气体垂直向上穿过液层时,将使分散形成的液滴或泡沫具有一定向上的初速度。若气速过高,会造成较为严重的液沫夹带,使塔板效率下降,从而使其生产能力受到一定的限制。针对这一缺点,近年来研究者开发出了舌型塔板,如图 8.9 所示。舌型塔板的主要特点是,气体通道中的气流方向和塔板倾斜一个较小的角度,并和液流方向一致。操作时,上升的气流沿舌片喷出,其喷出速度可达 $20 \sim 30 \text{ m/s}$,当液体流过每排舌孔时,被喷出的气流强烈扰动而形成液

沫,被斜向喷射到液层上方,喷射的液流冲至降液管上方的塔壁后流入降液管中,流到下一层塔板。板上气液接触处于喷射接触状态,效率和生产能力都有大幅提升。

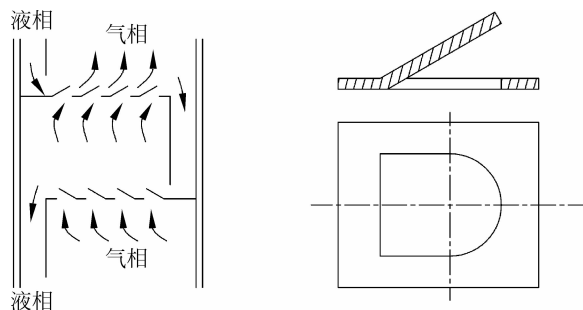


图 8.9 舌型塔板示意图

为提高舌型塔板的操作弹性,可采用浮动舌片,这种塔板称为浮舌塔板,如图 8.10 所示。浮舌塔板兼有浮阀塔板和固定舌型塔板的特点,具有处理能力大、压降低、操作弹性大等优点。

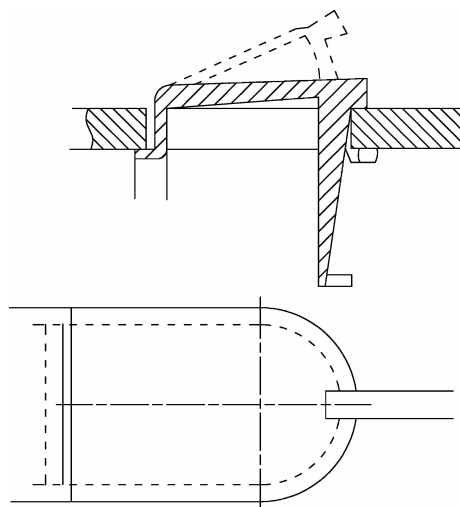


图 8.10 浮舌塔板的舌片

除以上介绍的几种比较常见的塔板类型外,已经使用或正在开发的还有很多其他类型的塔板,比如斜孔塔板、网孔塔板、垂直筛板、导向筛板等,可参阅有关文献。

8.2.4 板式塔工艺设计

无论采用筛孔塔板还是浮阀塔板,板式塔的设计原则与步骤均类似,现以筛板塔为例说明。设计内容包括计算塔高、塔径、溢流装置的结构与尺寸,确定塔板板面布置、塔板流体力学校核及绘制负荷性能图。

1. 塔高的设计计算

蒸馏一章中已指出,板式塔的高度包括所有塔板的有效段及塔顶和塔底的高度。气液接触的有效段高度为

$$Z = (N_p - 1)H_T \quad (8.1)$$

式中 Z ——塔的有效段高度, m;

N_p ——实际塔板数;

H_T ——板间距, m。

板间距多取经验值,在设计过程中可参照表 8.1 选取。

表 8.1 不同塔径的板间距参考值

塔径 D/mm	800~1 200	1 400~2 400	2 600~6 600
板间距 H_T/mm	300、350、400、450、500	400、450、500、550、600、 650、700	450、500、550、600、650、 700、750、800

因安装检修需要,在塔体人孔处板间距不应小于 600~700 mm; 进料板与其上一块塔板之间的距离应比一般板间距稍大一些。

2. 塔径的设计计算

塔径的设计常以避免塔内气、液两相的异常流动为原则,即使塔内气体的速度低于发生过量液沫夹带液泛的气速,然后根据该空塔气速确定塔径。因此须首先确定在给定的气、液流量条件下的液泛气速 $u_{\max}$ 。对于液泛气速的计算大都以苏德斯和布朗对液滴进行力平衡分析获得的方程为基础。对悬浮于气流中的液滴进行受力分析,显然液滴能够回落的最大气速即为液泛气速,则

$$u_{\max} = \sqrt{\frac{4d_p g (\rho_L - \rho_g)}{3\xi \rho_g}} \quad (8.2)$$

由于气、液两相在塔板上接触所形成的液滴直径以及阻力系数都未知,故将所有未知变量合并,使上式变为

$$u_{\max} = C \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g}} \quad (8.3)$$

式中 ρ_L, ρ_g ——塔内液体、气体的密度, kg/m^3 ;

C ——气体负荷因子, m/s 。

气体负荷因子与很多因素有关,不同的方法会关联出不同的方程,目前应用最为广泛的是史密斯关联图。如图 8.11 所示,图中横坐标 $(V_L/V_g) \sqrt{\rho_L/\rho_g}$ 称为气液动能参数,反映气液两相流量与密度的影响; V_L, V_g 分别为塔内气、液两相的体积流量, m^3/h ; H_T 为板间距, h_L 为塔板液层高度, $(H_T - h_L)$ 为板上的气相空间(分离空间)高度, $(H_T - h_L)$ 越大, C 值越大,从而 $u_{\max}$ 就越大,这是因为分离空间的增大使液沫夹带减少,允许的最大气速就可以提高。纵坐标 C_{20} 表示液相表面张力 $\sigma = 0.020 \text{ N}/\text{m}$ 时的气体负荷因子,当塔内液相表面张力不同时,应作如下校正:

$$\frac{C_{20}}{C} = \left(\frac{0.020}{\sigma} \right)^{0.2} \quad (8.4)$$