

# 第9篇 蒸发及结晶

编写人 岳德隆 沃德邦 邱宣振

王 楚

审校人 郑 焮 陈树功

## 9.1 蒸 发

### 9.1.1 蒸发概述

蒸发是重要的化工单元操作之一，蒸发操作是用加热的方法，在沸腾状态下，使溶液中的水份或其它具有挥发性的溶剂、部分汽化移除，其溶液中的溶质数量不变，从而使溶液被浓缩。因此，蒸发过程是一个热量传递过程，其传热速率是蒸发过程的控制因素。蒸发设备属于热交换设备。

工业生产中蒸发操作的目的主要有三个：

(1) 为了提高水溶液中溶质的浓度。例如：电解烧碱液的浓缩，稀硫酸的浓缩，尿素溶液的浓缩等。

(2) 为了浓缩溶液和回收溶剂。例如：有机磷农药苯溶液的浓缩脱苯，中药渗漉液的浓缩回收酒精等。

(3) 通过蒸发制备纯净的溶剂。例如：海水淡化、丙烷脱沥青，双乙烯酮脱除高沸物等。

除此而外，还用于溶剂脱臭（例如从润滑油馏分脱除糠醛），放射性废液的处理等。随着膜式蒸发技术的发展，已成功地用于气-液相反应。例如：有机磷农药生产中，将立式刮板蒸发器作为氯化物连续反应器。还有将逆流降膜式蒸发器用于气-液相反应。这主要是由于膜式蒸发器的传热效果好，气液两相接触均匀、充分，时间短，防止了副反应，达到提高收率实现连续化生产的目的。

蒸发操作可在加压、常压、真空下进行。为了保持产品生产过程的系统压力（例如丙烷脱沥青），则蒸发需在加压状态下操作。对于热敏性物料（例如抗生素溶液、果汁）为了保证产品质量，在较低温度下蒸发浓缩，则需采用真空操作以降低溶液的沸点。若利用低压或负压的蒸汽以及热水加热时，采用真空操作也是有利的。因为在真空下加热介质与沸腾液体间的温度差，比常压下增大，从而加速了热量传递过程。但由于沸点降低，溶液的粘度亦相应增大，而且造成真空需增加设备和动力。因此，一般无特殊要求的溶液，则采用常压蒸发为宜。

目前我国使用的蒸发设备达三十余种，而且部分型式已定型化、系列化。值得指出的是我国在蒸发机理和蒸发传热等基础理论工作，取得了十分可喜的成果。我国技术人员研制的施液式薄膜蒸发器，具有传热效果好，结构简单的特点<sup>[1]</sup>。我国成功地将自然循环型（管外沸腾）长管蒸发器用于芒硝的生产<sup>[2]</sup>。先进的多效多级闪急蒸发器亦成功地用于工业生产<sup>[3]</sup>。在防止蒸发结垢上，采用电磁防垢器有效地防止了硫酸钙、草酸钙等钙盐的结垢<sup>[4]</sup>。在蒸发装置中还创制了自排不凝性气体的大气冷凝器，这样可省去真空泵，节约了投资和动力<sup>[5]</sup>。此外将多级闪发式蒸发器用于烧碱液的浓缩，大量节约蒸汽<sup>[6]</sup>；将双面纵槽管用于蒸发，显著提高了传热效果，减少了加热面积<sup>[7]</sup>；将列文式蒸发器进行了改进，降低了设备高度，并校正了列文关系式的误差<sup>[8]</sup>等等。

国内外对蒸发操作的研究，十分活跃，主要有以下几个倾向：

(1) 大型化<sup>[9~10]</sup> 现代工业规模日益扩大, 而设备数量不能成倍增加, 从金属耗量、安装空间, 能量消耗定额、管理控制等方面分析, 装置的大型化已被认为是有效办法之一。蒸发装置为适应大型化的需要, 不但从操作方式、壳体与调节机构进行改进, 为了使设备紧凑, 更多地进行了提高传热性能的研究。即增大传热管的传热系数和确定传热面积都能有效发挥作用的配管排列。其中最有成效的是通过管子形状的改变, 或在管内放置辅件, 以达到强化传热过程的目的。例如在竖式长管蒸发器 (LTV型) 采用双面纵槽管后, 其蒸发传热系数显著增加 (600~1200%)。

(2) 最佳化 蒸发器是一个大的热能消耗装置, 特别是由于能源价格不断地提高。因此, 在系统工程中以及蒸发装置本身, 如何降低和合理分配热能, 有效地利用各种余热是十分重要的。多效蒸发依然是研究的重点, 其最佳化参数有: 效数、温度差、浓度比、年经营费用和总传热面积等<sup>[11]</sup>。通过采用动态规划<sup>[12]</sup>、经济参数的相对值<sup>[13]</sup>、年经营费 (包括固定费和蒸汽费) 最小值<sup>[14]</sup>等的研究, 提出了一些最佳化设计计算方法和程序。

(3) 改进和创制新结构 改进原有装置的重要目的之一是将蒸发器改进后, 可作为蒸发干燥<sup>[15]</sup>, 蒸发分馏<sup>[16]</sup>, 蒸发造粒<sup>[17]</sup>等双重目的操作设备。为了使设备紧凑, 增加液膜的流动, 防止结垢, 缩短接触时间等目的, 研究和创制各种不同的新结构。

(4) 减少蒸发器的结垢<sup>[18~22]</sup> 这方面虽作了大量的研究工作, 但至今关于结垢过程的机理, 还没有统一的观点。控制结垢的研究, 过去重点是防止或延缓结垢过程的本身, 今后所面临的课题将是, 如何合理组织蒸发器的运行, 使沉积在加热面上的污垢热阻的增长为最小, 并且较容易从加热面上脱除。当然无传热面的闪急蒸发器以及浸没式蒸发器, 将会得到更大的发展。

## 9.1.2 蒸发设备的结构及选型

### (1) 蒸发设备的分类

随着工业技术的迅猛发展, 蒸发设备亦不断地改进和创新, 种类繁多, 结构各异。其分类方法也有不同: 按使用目的分类, 则可分为浓缩用蒸发器和海水淡化蒸发器等; 按操作分类, 则可分为单效、多效、二次蒸汽压缩式和多级闪发式、多效多级闪发式等; 按流程分类, 则可分为间歇式、连续式或单流型, 自然循环型, 强制循环型; 按加热部分的结构分类, 又可分为管式和非管式; 按沸腾区分类, 则可分为管内沸腾和管外沸腾等等。编者认为由于薄膜蒸发 (即液膜式蒸发器) 具有传热效果好, 蒸发速度快, 无静压头而产生的沸点升高等优点, 使薄膜蒸发技术得到很大的发展, 成为目前蒸发设备的主要型式。因此蒸发设备的型式, 按膜式蒸发器和非膜式蒸发器来分类是适宜的。

工业上实用的蒸发设备约有六十多种, 其中最主要的型式也仅十余种, 下面仅将常见的三十余种蒸发设备作以分类。

### (2) 蒸发设备的结构与特性

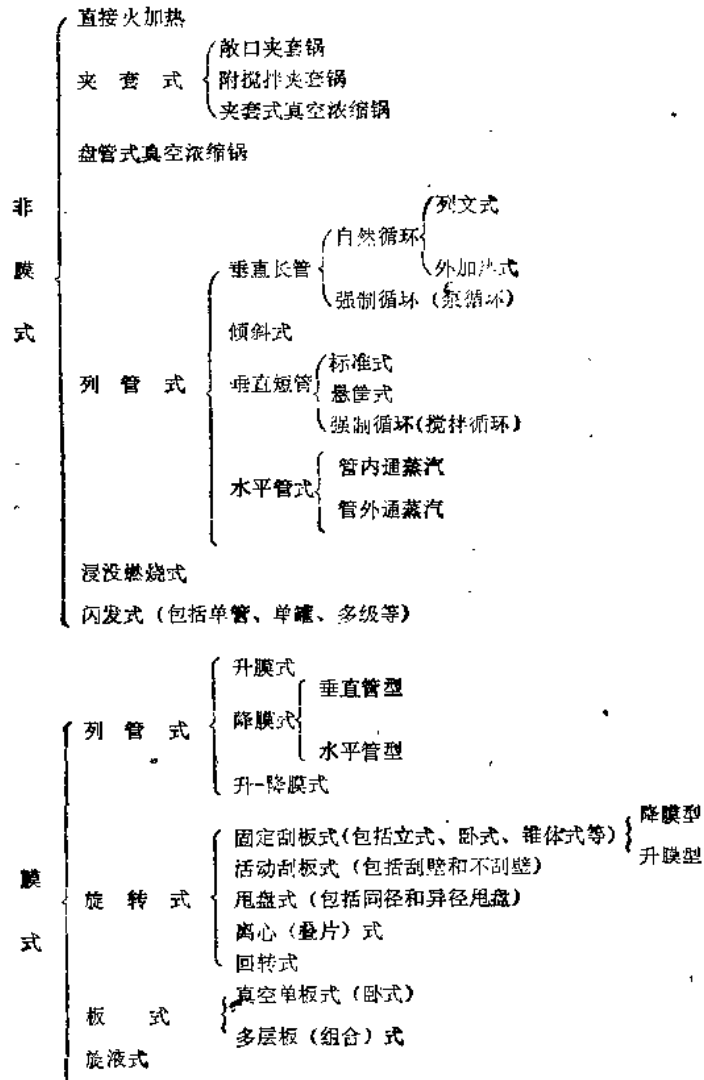
为了便于读者选型或设计参考, 兹将各种蒸发设备的结构及特性, 介绍如下。

#### (2.1) 直接火蒸发设备

在化学工业中, 大多在制盐、制糖或浓的氢氧化钠熬干制固碱等小规模工厂中使用。由于热效率低, 影响操作环境, 因此应用范围有限。

#### (2.2) 敞口夹套蒸发锅

主要在制糖、制中药等用以蒸发及熬浓用。它的底是夹层, 内通蒸汽给热, 使料液在常



压煮沸浓缩。夹层外侧两端附有耳轴，耳轴一端进蒸汽，另一端排除冷凝水。锅的全重用轴承支持，轴经过蜗轮装置用人工可使锅反转，以将锅中浓缩的料液或清洗水倾倒入出。此蒸发锅对料液的粘度范围适应很广，清洗简便，但传热面有限，排气影响环境卫生。

### (2.3) 附有搅拌的夹套蒸发锅

其结构示意见图9.1.1，主要用于制糖等工厂中浓厚的料液蒸发用。它是密闭间歇式蒸发器，底部是夹层，内通蒸汽给热，锅内有搅拌以翻动料液促进蒸发。此设备可在常压或真空下操作。适用于浓料液和粘度大的料液增浓，但传热面积有限，受热时间较长。传热系数在浓厚料液中为 $300\sim 1000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ，在水和牛乳中为 $1000\sim 2000$ 左右。

### (2.4) 夹套式真空浓缩锅

主要在小型化工、制药等生产中使用。设备底部是夹层，内通蒸汽加热，操作是在真空下进行，以降低料液沸点。常常为防腐蚀面采用搪玻璃反应釜改制成真真空浓缩锅。此设备结构最简单，操作方便，但处理量小，料液受热时间较长，其用途有限。

### (2.5) 盘管式真空浓缩锅

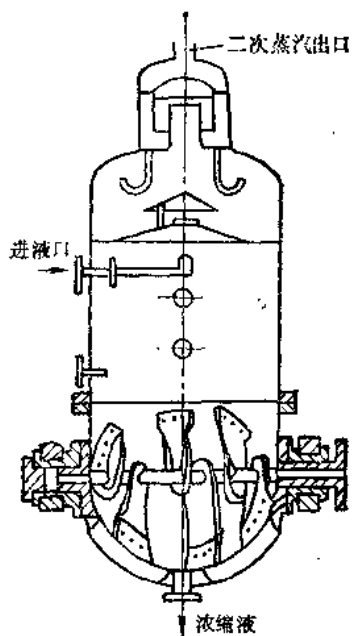


图 9.1.1 附有搅拌的夹套蒸发锅

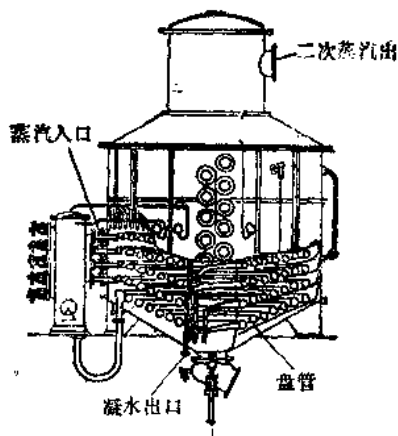


图 9.1.2 盘管式浓缩锅

其结构示意图见图9.1.2, 此设备在我国主要用于乳制品厂, 在制糖中被用作蒸发结晶器。

锅内有中央降液管, 并设有3~5层重叠的加热盘管, 根据锅内液面的高低, 可启闭其中任意层数。这种浓缩锅用在粘度高可产生结晶的液体中时, 也有很好的效率。设备密闭, 并附有喷射式真空泵使锅内成负压, 以降低溶液的沸点, 从而使料液保持在较低温度下蒸发, 其蒸发强度对牛乳和水约为 $100\text{kg水}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 左右。其操作维修简易, 产品浓度可控制, 浓缩比大。缺点是不能连续出料、冷却水耗量大, 洗刷不方便。

上海前卫机械厂生产的盘管式真空浓缩锅(亦称牛奶浓缩锅)的系列及性能见表9.1.1。

表 9.1.1

指标名称	单位	指 标		
蒸发能力	$\text{kgH}_2\text{O}/\text{h}$	300	700	1000
真空度	$\text{mmHg}$	650	660	660
蒸汽压力	$\text{kg}/\text{cm}^2$	0.5~1.5	0.5~1.5	0.5~1.5
蒸发温度	$^{\circ}\text{C}$	54	54	54
盘管面积	$\text{m}^2$	3.17	6.7	9.5
蒸汽耗量	$\text{kg}/\text{h}$	355	800	~1350
冷却水耗量	$\text{m}^3/\text{h}$	18	38	42
水泵型号		50TSW-4	70TSW-4	75TSW-V
锅内径	$\text{mm}$	$\phi 900$	$\phi 1000$	$\phi 1100$

### (2.6) 自然循环型—外加热式蒸发器

其结构示意图, 见图9.1.3。由列管式加热器, 沸腾管, 蒸发室(附汽液分离结构), 循环管四个部件组成。若将它用于有结晶的溶液蒸发时, 在循环管下口与加热器进口之间, 加置液固分离器。

料液在蒸发器内的循环速度小于 $1\text{m}/\text{s}$ 。这是由于溶液中的溶剂受热至沸点后, 部分

溶剂汽化，而使热能转换为向上运动的动能；同时由于沸腾管的汽液混合物和循环管中未沸腾的料液间产生了重度差，在膨胀动能和重度差的诱导下，从而产生了溶液的循环。溶液得到的热量愈多，沸腾愈好，其循环速度亦就愈大。这种蒸发器的加热面不受限制可达数百平方米甚至上千平方米。一个蒸发室还可挂载2~4个加热器。缺点是设备较高，有效温度差要求比较大，因而限制了多效使用，一般不宜大于三效。加热管长径比  $L/d=60\sim 110$ ，总传热系数为  $1200\sim 3000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 。

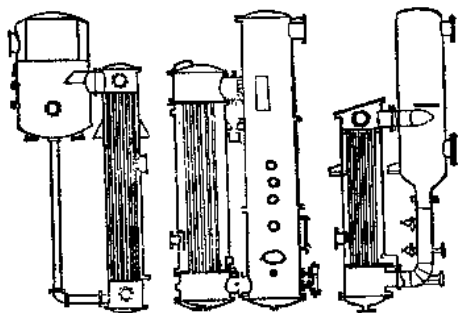


图 9.1.3 自然循环式长管型蒸发器

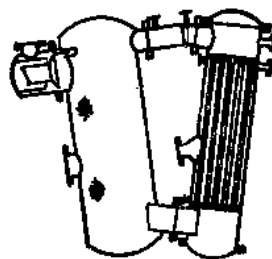


图 9.1.4 倾斜型蒸发器

还有一种称为 Buflovak 式蒸发器，其结构示意图，见图9.1.4，也是属于自然循环型，其加热管是倾斜的，这样不但降低了设备高度，而且便于清洗加热管。

#### (2.7) 列文式蒸发器<sup>[24]</sup>

其结构示意图见图 9.1.5，它属于加热管外沸腾的自然循环型蒸发器。是五十年代苏联 P. E. Левин 提出来的。其特点是在加热室1的上部，加一段2.7~5米高的沸腾室2，使加热室中的溶液承受较大的液柱静压，则加热室中被加热的溶液温度，虽然略高于蒸发室中的平衡温度，由于所受的压力较高，却不能在加热管中沸腾，只有在到达静压较低的沸腾室2中时，才开始沸腾汽化。在加热管中没有沸腾汽化，就可以减轻或避免溶质在加热管内结晶析出，减轻加热管的结垢与堵塞。溶液在蒸发器内的循环，全靠沸腾室中沸腾着的汽液混合物与循环管（返回管）中未沸腾液间的重度差所形成的动力压头。为了减少循环系统阻力，要求循环管的截面积  $F_1$  要大于加热管的总截面积  $F_2$ （一般  $F_1:F_2=1.3\sim 2.5$ ），还要求循环管路中尽量减小局部阻力。这种蒸发器的循环速度可达到  $1.5\sim 2.0\text{m/s}$ ，总传热系数为  $1100\sim 2000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ，加热管的长径比一般为  $L/d=100\sim 120$ 。

列文蒸发器应保持在较大温差下操作，否则由于温差小，循环速度显著减小，传热效率也相应减小。

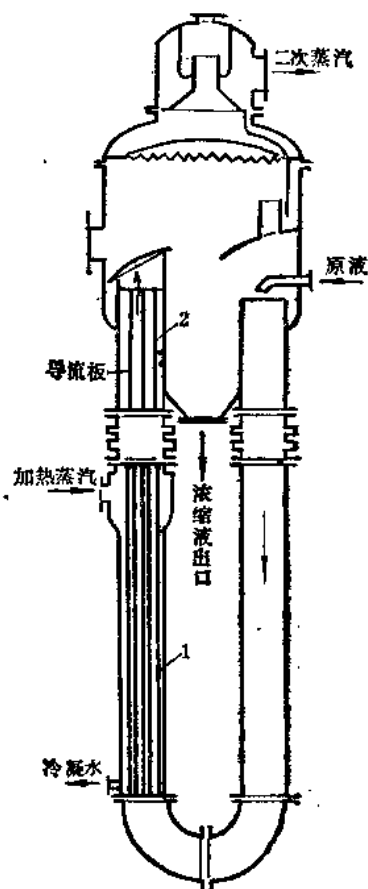


图 9.1.5 列文式蒸发器

此型设备的缺点是设备高大，耗材多，厂房高度要求高。我国主要用于烧碱工业，为了降低设备高度，河北工学院提出了一种在加热区的一侧沸腾的逆向自然循环蒸发器，称为侧沸式蒸发器<sup>(9)</sup>。

我国工程技术人员还成功地把这种蒸发器应用于硫酸钠溶液蒸发的工业生产上，并使溶液的循环速度超过 $2\text{m/s}$ 。

### (2.8) 强制循环型（长管）蒸发器

其结构示意图，见图9.1.6，它是由列管式加热器（立式或卧式），蒸发罐（附有汽液分离结构），料液循环泵组成。料液经泵加压后以 $2\sim 5\text{m/s}$ 的速度，通过加热管加热至沸点，然后在蒸发罐内闪蒸，并在罐内进行汽液分离，二次蒸汽自罐顶排出，被浓缩的溶液由罐底部进入循环泵的进口，使溶液继续进行强制循环蒸发。若溶液在浓缩过程有结晶析出，则需在蒸发罐底部加置集盐器。

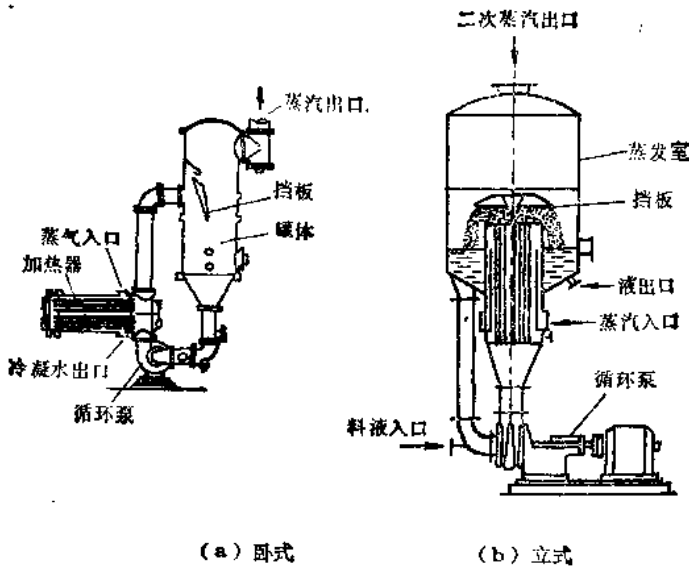


图 9.1.6 强制循环型蒸发器

由于此型设备属于管外浓缩，同时溶液在管内流速大，因此它适用于有结晶析出和易结垢的溶液蒸发。传热效果好，其总传热系数为 $800\sim 5000\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 。它的另一优点是：当加热蒸汽与溶液之间的温度差较小时（ $3\sim 5^\circ\text{C}$ ），仍可进行操作。

此型设备的缺点是动力消耗大：每 $\text{m}^2$ 加热面的动力为 $0.4\sim 0.8\text{kw}$ ，因此使这种蒸发器的加热面积受到限制。

### (2.9) 标准式蒸发器

其结构示意图，见图9.1.7，它是大型工业生产中使用广泛且历史长久的一种蒸发器。至今在化工、轻工等行业中广泛被采用。它属于自然循环蒸发器的一种。

它的加热室是由管径为 $1\sim 3\text{英寸}$ ，长度为 $0.5\sim 2\text{m}$ （长径比 $L/d$ 一般取 $20\sim 40$ ）的直立管束组成。在管束中间有一个直径较大的中央降液管（也称中央循环管）。此管的截面积为加热管束截面积的 $40\sim 100\%$ ，由于中央降液管和加热管（也称沸腾管）内料液的重度差和蒸汽上升时的抽吸作用，而使料液不断循环，也从而提高了蒸发器的传热效果。其总传热系数范围为 $500\sim 2500\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 。

这种设备适用于结垢不严重，有少量结晶析出和腐蚀性较小的溶液。设备传热面积通常达数百米<sup>2</sup>，由于蒸发量大，为了降低蒸汽耗量，工业生产中常将标准式组成3~6效蒸发器组。

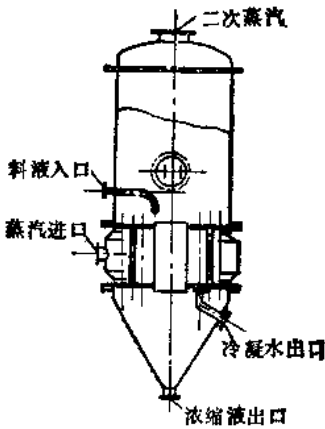


图 9.1.7 标准式蒸发器

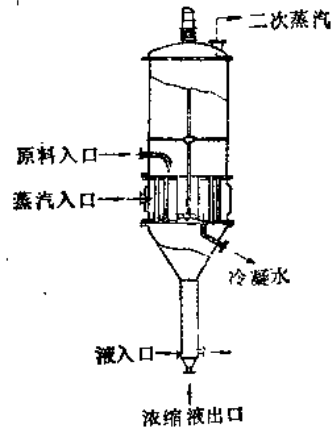


图 9.1.8 标准式强制循环蒸发器

(2.10) 标准式强制循环型蒸发器

其结构示意图，见图 9.1.8，它是标准式的改良型，多用于制盐工业作结晶器用。为防止料液在加热管内结垢，提高管内侧的给热系数，实践证明加快料液的循环速度，是很有效的方法。因此在标准式的中央循环管内加一螺旋桨，以增强料液循环，从而使料液的循环流速，从小于 0.5m/s，提高到 1~1.5m/s，显著地改善了料液在加热管内壁上的给热，晶析和结垢，因而可以用做有结晶生成的溶液蒸发，总传热系数在 1000~5000kcal/m<sup>2</sup>·h·°C。

但是耗费动力，搅拌器马力在 0.05~0.1(Hp/m<sup>2</sup> 传热面积) 左右。另外结构复杂，使造价提高很多。

(2.11) 悬筐式蒸发器

其结构示意图，见图 9.1.9，它亦是标准式的一种改良，其加热管束可以取出，用备用的替换以节约清扫时间。加热蒸汽由中央一很多孔管进入，均匀地吹入各加热管间，加热管束四周与罐内壁形成环隙通道，作为循环料液流下的通道，由于通道截面积及周边长均比标准式的中央循环管大，改善和加速了料液的循环，从而改善了在加热管内的结垢现象，提高了传热效果。这种蒸发器的传热面积一般限于100m<sup>2</sup>以下，其总传热系数在 500~3000kcal/m<sup>2</sup>·h·°C。

其它还有将加热管束设计成斜锥形等型式，均是为了改善和加速料液的自然循环。

悬筐式蒸发器适用于有晶析或结垢不严重的溶液蒸发。缺点是设备重量大，占地面积大，溶液滞留量大。

(2.12) 水平列管式蒸发器

这类蒸发器有三种型式

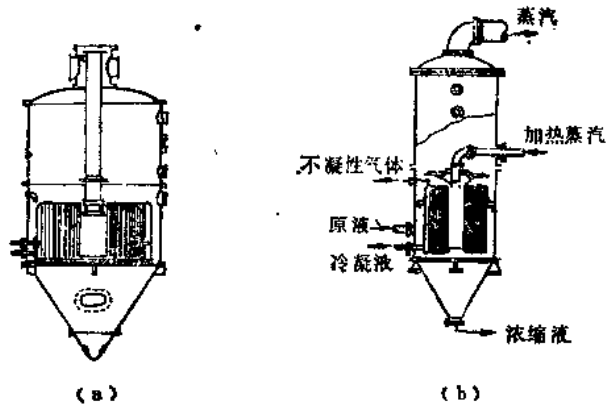


图 9.1.9 悬筐式蒸发器



(2.12.1) 薄膜式 有Foster-Wheeler, Lillie等型式, 其结构示意, 见图9.1.10 a, 列管一端在管板中胀管固定, 另一端封闭, 并任其自由搁置, 传热管的长径比L/d为20, 例如采用管径为3 1/2", 其长度约72", 管板厚为3"。加热蒸汽走管内, 料液用循环泵由上部喷淋至管的外壁, 成薄膜状流下, 故而传热良好, 且没有因料液的静压头而产生的沸点升高, 因此宜作真空蒸发用。

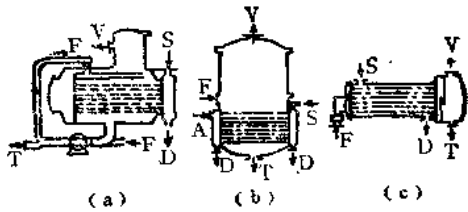


图 9.1.10 水平列管式蒸发器

A—不凝性气体; F—给料液; T—浓缩液; D—冷凝水; S—加热蒸汽; V—二次蒸汽

管易于拆卸, 同样的蒸发能力, 它比标准式罐内液而低, 因此对降低溶液沸点升高有利。但对于易起泡沫或易结垢的溶液蒸发是不适宜的。

(2.12.3) 管外通蒸汽的浸液式 现在使用的只有 yaryan 型式, 其结构示意, 见图9.1.10 c 料液在管内只通过一次即被浓缩 (即单流型蒸发器), 由于汽液混合相高速通过管内, 因此传热良好, 其总传热系数为 1000~4000kg/m<sup>2</sup>·h·°C。料液受热时间短, 沸点升高小, 因而适宜于热敏性物料的浓缩。此外, 由于汽液分离室的分离效果良好, 因此亦适宜于发泡性溶液的蒸发。

(2.13) 浸没燃烧蒸发器<sup>[20,21]</sup>

浸没燃烧蒸发器是一种无传热面的新型蒸发设备。其结构示意, 见图9.1.11, 它是将燃料 (例如煤气或油) 与空气在燃烧室顶部混合后燃烧, 所产生的高温烟气直接经燃烧室下部的喷嘴, 喷入蒸发室的溶液内。由于气液两相间温差极大, 而且产生很强烈的鼓泡搅动, 使溶液迅速达到沸点而汽化。二次蒸汽与废烟气一并由蒸发器顶部出口管排出。燃烧室内有耐火材料衬里, 外面有良好的绝热层保温, 燃烧室内混度一般在1200~1800°C。燃烧室在溶液中的浸没深度, 以液体吸热的快慢及燃烧室容量大小等条件来确定。一般浸没深度为200~600mm。其喷嘴因处于高温和腐蚀条件下, 因此喷嘴应选择适宜的耐混耐腐蚀材料, 其结构上还应考虑可以更换。这种蒸发器目前多用于腐蚀性的介质。

这种蒸发器的特点是高混载热体与被蒸发溶液直接接触, 没有间壁传热面, 因而结构简单, 可用陶瓷等非金属材料制造特别适用于处理强腐蚀

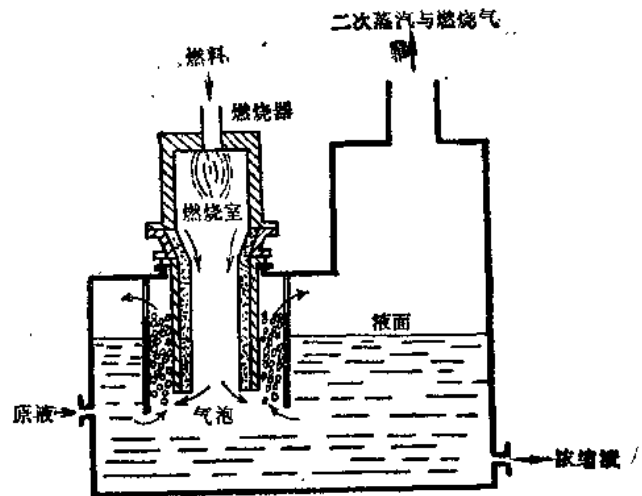


图 9.1.11 浸膜燃烧蒸发器

(2.12.2) 管内通蒸汽的浸液式 有Buffalo, BBC等型式, 其结构示意, 见图9.1.10 b, 在制糖工业中将 它制成五效蒸发罐使用。在罐底配有 3/4"~1 1/2" 铜制传热列管, 管子系借橡皮垫圈密封插入管板中, 便于管子检修时, 容易从管板上移出清洗和检查。二次蒸汽由顶部排出, 浓缩液由罐底排出。

此设备总传热系数为 500~2000kg/m<sup>2</sup>·h·°C, 它的优点是罐体小而传热面积大, 加热

性和易于结晶、结垢的物料。由于是直接接触传热，传热效果很好，热利用率高。目前在废酸处理和硫酸溶液的蒸发中已广为应用。但它不适用于不可被烟气污染物料的处理，而且它的二次蒸汽也很难利用。

(2.14) 多级闪急蒸发器 参阅9.1.3节第(1)段

#### (2.15) 升膜式蒸发器

其结构示意图见图9.1.12，这种蒸发器亦称LTV（竖式长管蒸发器），Kestner型，热虹吸式蒸发器。其结构和管板式换热器一样，不同的是它的加热管的长径比，有一定要求， $L/d$ 的范围为100~300，由于管内的静液面较低，因此以静压头而产生的沸点升高很小。蒸发时间很短（仅几秒至十余秒），适用于热敏性溶液的浓缩。由于二次蒸汽在管内流速很大，常压时为20~30m/s，减压下为80~200m/s，高速的二次蒸汽具有良好的破沫作用，因此适用于易产生泡沫的溶液蒸发。二次蒸汽在管内高速螺旋式上升（其流速一般不得小于10m/s），将料液贴管内壁拉曳成薄膜状，薄膜料液的上升，必须克服其重力、与壁的摩擦阻力，因此不适用于粘度较大的溶液，一般溶液粘度小于50cP时，采用升膜式为佳。另外，由于温度差较大（一般为20~30℃），液膜给热系数大，而单位传热面上料液量很小，容易在管内造成晶析、结垢。在温差过大而 $L/d$ 又很大时，甚至会发生炭化现象。因此对有结晶或易结垢的溶液的蒸发，升膜式是不适用的。

升膜式一般为单流型（即一次通过完成浓缩目的）。对非热敏性溶液，浓缩比要求大时，亦可设计成循环型，使料液循环蒸发达到要求浓度时再放出。升膜式的 $K$ 值为500~5000 kcal/m<sup>2</sup>·h·℃。

升膜式蒸发装置中的汽液分离室有两种安装方式，一种是直接安装于蒸发器顶部，这样可防止二次蒸汽在分离室内冷凝而冲淡浓缩液，但带来加工、安装、检修的困难，同时厂房高度要求高等缺点，主要用于结垢少的料液。通常采用的另一种方式是：蒸发器顶部汽液混合物通过保温导管和蒸发器外的汽液分离器相连接。这样便于安装和检修，但有材料耗量加大，占地面积加大的缺点，主要用于结垢较大的料液。

#### (2.16) 降膜式蒸发器

其结构示意，见图9.1.13，它的结构与升膜式蒸发器大致相同，只是料液自蒸发器顶部加入，在顶部有液体分布结构，以使每根加热管都能不断地、均匀地受液。二次蒸汽与浓缩液一般呈并流而下，料液沿管内壁因二次蒸汽的作用使之呈膜状流动，液膜流下不必克服重力，反而利用重力作用，使粘度较大（50~400cP）的溶液蒸发，成为有利因素。其加热管的长径比( $L/d$ )范围为100~250。总传热系数随粘度和温度差的大小而变化，一般为1000~3000左右。它亦是单流型蒸发器，若用泵也是成为循环式蒸发器。它的浓缩比可达 $\frac{1}{5}$ ~

$\frac{1}{10}$ 。

我国乳品行业有两效定型产品型号ASJ-12型。蒸发量为1250kg水/h，用5kg/cm<sup>2</sup>（表压）蒸汽通过喷射式热压泵，将二次蒸汽重复利用，蒸发1kg水耗用蒸汽量仅0.41kg，而且还包括杀菌用蒸汽量。冷却水（20~40℃）耗量为12T/h。两效传热系数分别为1425和728kcal/m<sup>2</sup>·h·℃。

多效降膜式蒸发器，由于具有浓缩比大，粘度范围大，传热效果好，蒸汽和水的耗量小，处理量大等优点，因此成为目前蒸发操作以及海水淡化的主要发展型式之一。

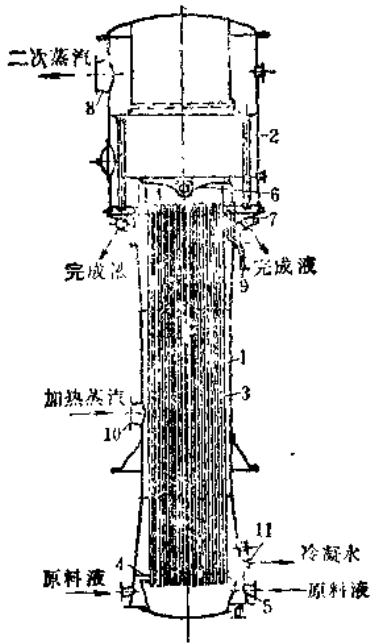


图 9.1.12 升膜式蒸发器

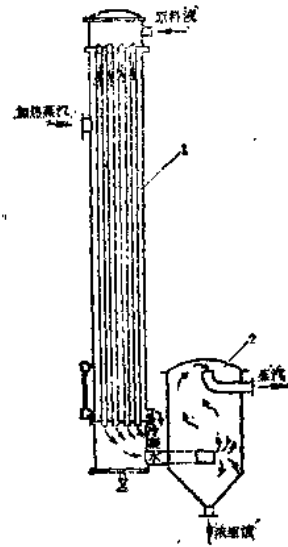


图 9.1.13 降膜式蒸发器

1—加热室；2—分离器

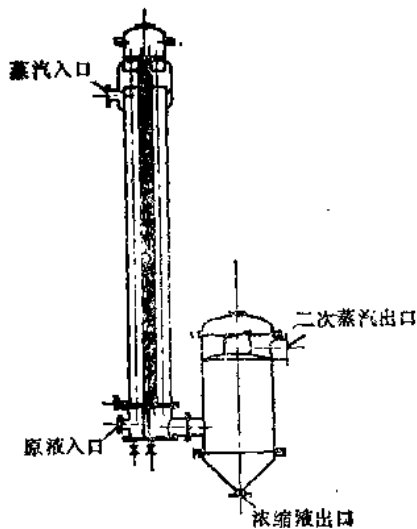


图 9.1.14 升降膜式蒸发器

## (2.17) 升降膜式蒸发器

其结构示意图，见图9.1.14，它亦是一种单流型膜式蒸发器，具有升膜式和降膜式的操作原理，亦可认为是降膜式的一种改良型。在蒸发器底部封头内有一固定隔板，将加热管束分为两部分，隔板与加热管的花板用垫料密封。料液由底部封头内隔板的一侧，进入半数加热管（升膜管）内进行加热沸腾蒸发，汽液混合物在顶部封头内重新分配后，进入另一半数加热管（降膜管）内继续蒸发，下降管的汽液混合物经底部封头内隔板的另一侧出口出来，进入外设的汽液分离室中，将浓缩液与二次蒸汽分离。

这种蒸发器一般用在浓缩过程中粘度变化大的溶液，或厂房高度有一定限制的场所。因为长径比比升膜式要小20~50。

如果料液粘度变化大，则采用常压蒸发为宜，以便防止在真空蒸发时所产生的粘度相应增加之弊，从而相应提高其料液的流动性。

(2.18) 固定刮板式<sup>[55]</sup>

分立式和卧式两种，而立式又分降膜式和升膜式两种，其结构示意图，见图9.1.15和图9.1.16它是有机械搅动的蒸发器，其外壳有夹套，内通蒸汽加热。壳筒内有马达带动的立式或卧式旋转轴，轴上有3~8片固定的刮板，刮板外沿与筒内壁的间隙约为0.8~2.5mm。料

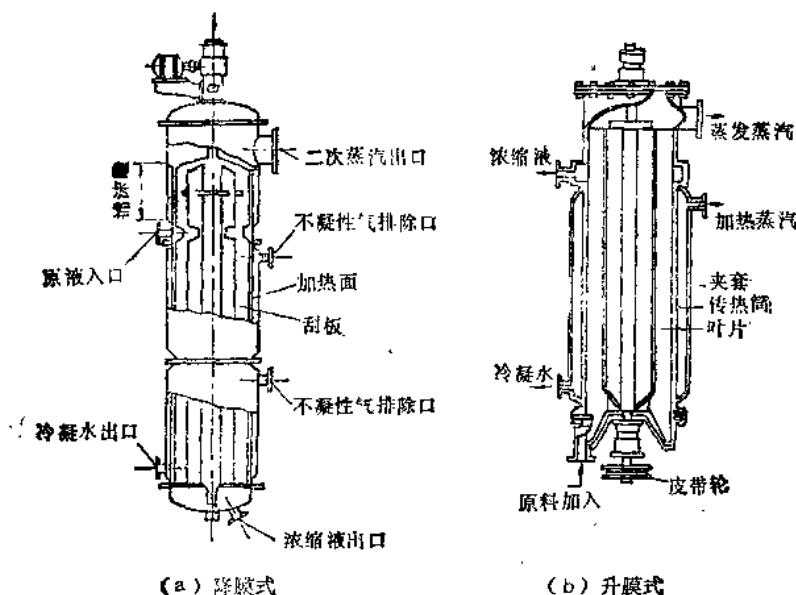


图 9.1.15 立式固定刮板蒸发器

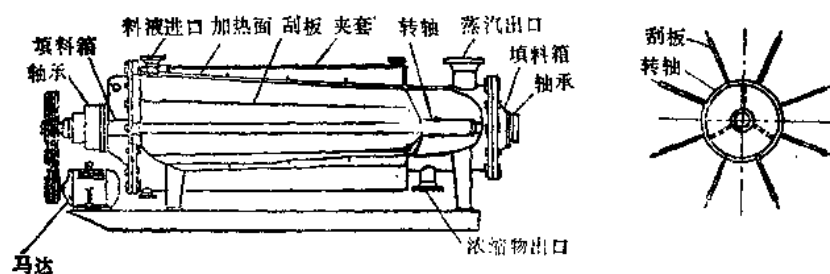


图 9.1.16 卧式固定刮板蒸发器

液由蒸发器进料口沿切线方向进入器内，或经器内固定在旋转轴上的料液分配盘，将料液均匀布在内壁四周。由于重力和刮板离心力的作用，料液在内壁形成螺旋下降或上升的薄膜（立式），或螺旋向前的薄膜（卧式）。二次蒸汽经顶部（立式）或浓缩液出口端的汽液分离后至冷凝器中冷凝排出。

这种蒸发器特别适用于高精度的热敏性物料的蒸发，它能浓缩到1000P左右的制品。同时也适用于易结晶、结垢和含悬浮物的料液蒸发。料液在蒸发器内停留时间为数秒至数十秒。立式的可在内壁下部，加置滞液环以调节料液在蒸发器内的停留时间。刮板的转速在100~600rpm的范围内，动力消耗定额为1.5~3kw/m<sup>2</sup>传热面积，刮板与器壁间隙越大，料液粘度越小则动力消耗越小，其刮板转速也越大。由于这种蒸发器单位体积内传热面积小，因而限制了传热面积，一般为10m<sup>2</sup>以下，最大不超过40m<sup>2</sup>。

由于这种蒸发器的内壁与刮板间隙有一定要求，因此在加工上对筒体的椭圆度和在安装上对旋转轴的垂直度（或水平度）上都相应地有严格要求，因而给施工、安装、检修都带来一定的难度。

### (2.19) 活动刮板式<sup>(58)</sup>

这种蒸发器又包括刮壁和不刮壁两种。其结构示意图，见图9.1.17，它的结构及操作原理

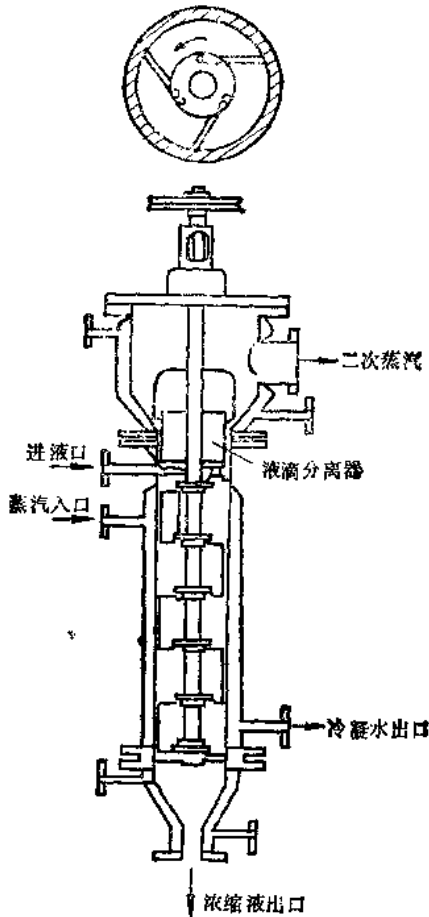


图 9.1.17 活动刮板蒸发器

与固定刮板式相仿，不同的是刮板为多段式而且不直接固定在轴上。刮板是通过旋转轴的离心力经枢轴带动而旋转，将刮板紧压在传热面上，所以薄膜的厚度极薄，可达到 $0.03\text{mm}$ ，有利于高粘度物料的蒸发。固定刮板式的刮板是固定的，因此液膜的厚度是不变的，它与所处理的料液性质无关。而活动刮板式则可根据料液的粘度或转速不同，使液膜的厚度相应变化。如果活动刮板边缘镶上耐温耐磨的材料，例如树脂与棉布制成的层压板，聚四氟乙烯板、石墨、木材等，则可使刮板直接接触筒内壁，成为刮壁型，这样不但更好防止结垢和晶析，而且可降低对筒体的椭圆度和轴安装的垂直度的要求。这种刮壁型的蒸发器，其轴的转速不能过高，以防止对筒壁的磨损，刮板周边速度一般取 $3.0\sim 5\text{m/s}$ 左右，最大不宜超过 $6.5\text{m/s}$ <sup>[66]</sup>。

#### (2.20) 甩盘式薄膜蒸发器

这种蒸发器又可分为同径和异径两种，其结构示意图，见图9.1.18a, b。这是一种改良的降膜蒸发器，通常的降膜式蒸发器中，传热管上部液膜分布均匀，而到长管中部以后，随着料液量因浓缩面减少，粘度加大，容易产生偏流、紊流而使管壁上有产生干壁、局部过热之

虑。而甩盘式蒸发器系利用旋转轴上几个圆形甩盘，使料液在蒸发过程中多次重新分配成膜。另外出于考虑料液在蒸发过程中，不断被浓缩料液量逐步减少，容易在蒸发器下半部因料液不足不能润湿全部壁面，而产生干壁现象，因此制成异径甩盘式见图9.1.18(b)。

甩盘式蒸发器不适用于高粘度或有晶析、易结垢料液的浓缩，同时由于单位体积传热面小，而使这种蒸发器的处理量受到限制。

#### (2.21) 离心（叠片）式薄膜蒸发器

其结构示意图，见图9.1.19这种蒸发器最初是由 De Laval Separator 公司制造的，目前已广泛在食品、制药等工业上采用。我国采用此设备也有十多年历史。工业生产上常用的三种规格为CT6, CT9, CT12，其传热面积分别为 $2.4, 7.1, 14\text{m}^2$ ，其锥形叠片数分别为6, 9, 12。

这种蒸发器是在一根空心旋转轴上，等间距地安装数个叠起来的加热片，加热片是夹层的锥形体，夹层内通蒸汽加热其片，加热蒸汽及蒸汽冷凝水分别由单独管子进出，管子并置于空心旋转轴内。料液经泵加压计量后，通一根主管和几根装有喷嘴的短支管，循着叠片旋转的方向喷入旋转的加热面上。由于料液的流速与加热面旋转的速度相等，因此可防止产生水滴和飞溅。由于叠片离心力的作用，料液迅速呈膜状穿过叠片表面而排入叠片边缘轴向孔，流至上面的汇集槽内，然后由槽内出料管排至蒸发器外。二次蒸汽由叠片中央引出，在片式

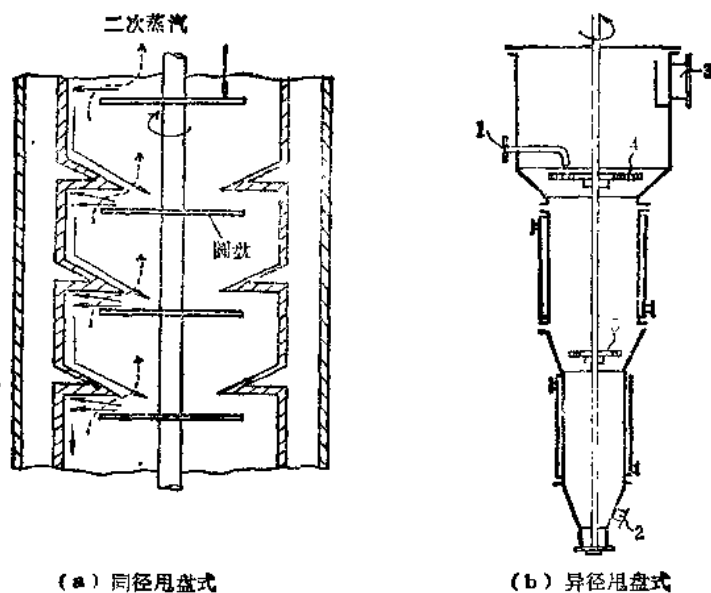


图 9.1.18 甩盘式薄膜蒸发器  
1—料液进口；2—浓缩液出口；3—二次蒸汽出口；4—第一级甩盘；5—第二级甩盘

热交换器内冷凝，另附设有蒸汽喷射泵使整个系统成真空。

由于在高速情况下（叠片周边速度达20m/s以上），其离心力为重力的100倍以上，在传热面上的料液薄膜很薄（约为0.1mm），并且停留时间极短，约一秒钟，加之在真空下浓缩，料温仅50℃左右。因此这种蒸发器特别适用于热敏性物料的浓缩，其蒸发强度亦高于其它常用的蒸发器，例如CT6型最大蒸发强度竟达330kg水/m<sup>2</sup>·h以上。

#### (2.22) 回转式薄膜蒸发器

其结构示意图，见图9.1.20，它的工作原理是：由转动的供料器，将料液抛给转动着的传热面，传热面是压成波纹形的，内部为加热蒸汽，料液在传热面外表面蒸发，冷凝水则在传热面轴线附近收集，并由空心轴排出。

由于是真空低温蒸发，加之传热面的特殊结构，使得传热温差较小，因此很适用于生化制品等热敏性物料的浓缩。由于二次蒸汽的再增压循环使用，因此耗汽量较小。凡用泵送的料液均可处理，而且处理量较大。目前该设备由丹麦NIRO ATOMIZER公司生产。其设备特性如下：

传热系数：水蒸发时为2000kcal/m<sup>2</sup>·h·℃，其它物料蒸发为1000~1500kcal/m<sup>2</sup>·h·℃

动力消耗：电0.015kw/kg水，汽0.3~0.5kg/kg水

水10~30kg/kg水

设备规格：

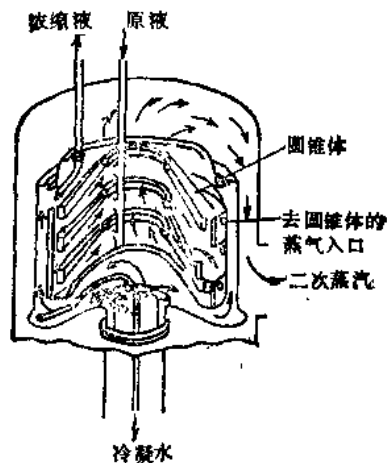
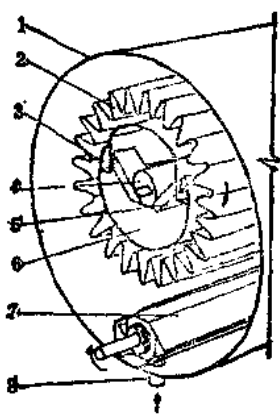
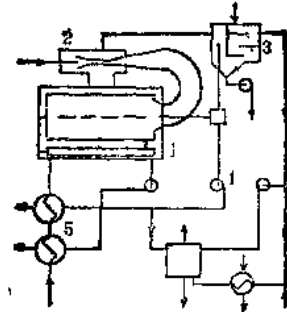


图 9.1.19 离心式薄膜蒸发器



(a)

1—蒸发器；2—传热面（转子）；3—热介质冷凝液收集器（定子）；4—排冷凝液的空心轴；5—联接管；6—内管柱；7—供料器（旋转）；8—进料口



(b)

1—旋转式薄膜浓缩器；2—热泵；3—分离器；4—泵；5—换热器

图 9.1.20 旋转式薄膜浓缩器

传热面积, m <sup>2</sup>	12	56	112
温差为5~20℃时的蒸发能力, kg/h	200~800	900~3600	1800~7200
设备占地 长×宽×高, m	3.5×2.6×3	5×4×5	6×4.5×6

### (2.23) 板式蒸发器

其结构示意图及流体流路, 见图 9.1.21(a,b), 其结构类似于板式热交换器, 它是由端面板、随动板, 支架顶部载杆和一排竖立排列的扁平板组成, 板与板之间靠橡皮垫料密封。料液与加热蒸汽分别在板的两侧, 料液自第 2、6、10 块板由下向上走 (升膜部分) 再自第 4、8、12 块板由上向下走 (降膜部分), 加热蒸汽自第 1、3、5、7、9、11、13 块板上部进入, 冷凝水由底部引出, 板间距很小, 料液在板内成膜状。这种蒸发器可认为是升降膜蒸发器的一种。二次蒸汽经表面冷凝器冷凝后, 不凝性气体经真空泵排出, 使整个系统成真空。

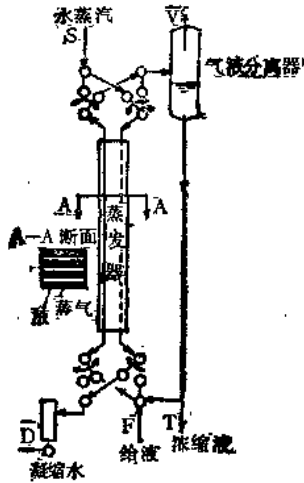
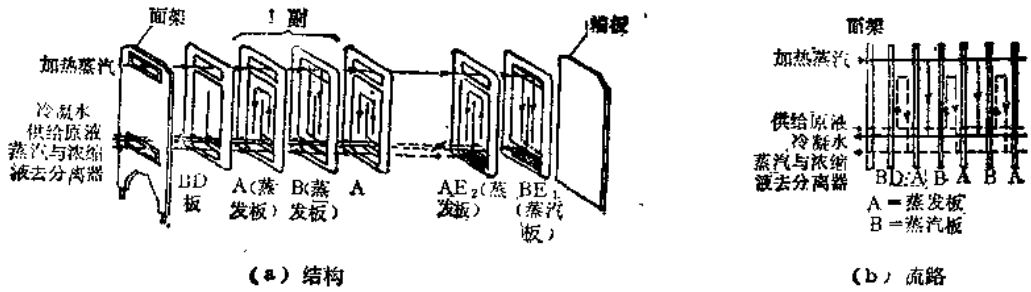
这种蒸发器的优点是体积小、停留时间短 (仅数秒), 传热系数高, 可达 2500~4000 kcal/h·m<sup>2</sup>·℃; 加热面积可随意调整, 拆卸清洗方便, 因此适用于热敏性料液的蒸发。缺点是密封边过长, 拆卸时容易损坏密封垫圈, 因此使用压力有限。

它是一种单程蒸发器, 因此操作条件的稳定很重要, 真空波动, 进料不足及分配孔板阻塞等原因, 容易造成结垢。

另外还有 Rosenblad 板式蒸发器, 其结构示意图见图 9.1.21 c 它是为防止在纸浆废液浓缩时析出 CaSO<sub>4</sub> 垢层而提出的一种替换式方案。传热面做成板状并平行配置, 再按次序作成料液—蒸汽—料液—蒸汽的通路, 经过一段时间浓缩后, 垢层附着于液侧传热面上, 此时切换料液和蒸汽的通路, 这样冷凝水就能溶解除去附着的垢层。以后重复此循环, 传热系数能达到相当于管式蒸发器的程度。

### (2.24) 旋液式蒸发器

其结构示意图, 见图 9.1.22, 其原理与旋风分离器类似。料液由泵加压自顶部四个切向长方形口进入, 进料口内侧加焊挡板使进料口成一条 3~5mm 宽细长的缝条, 筒体上部内有圆



(c) Rosenblad切換式蒸发器  
图 9.1.21 板式蒸发器

筒形档板，使直筒部分的内侧成环形通道，这样不但防止排出的二次蒸汽将飞溅的料液夹带而走，而且可加大料液的流速，使之更好成膜。壳体外有夹套通蒸汽给热，浓缩液由底部出料口排出。二次蒸汽由顶部移出，出口处并附有捕沫档板。此蒸发器为强制循环型蒸发器，结构简单，传热系数较高，可达  $1000 \sim 2000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ，并适用于蒸发结晶。用于保险粉溶液的真空蒸发结晶时其蒸发强度高达  $257 \text{ kg水/m}^2 \cdot \text{h}$ 。缺点是单位体积传热面积小，因而限制了此种蒸发器的处理量。

(3) 蒸发设备的选型

蒸发设备的选型是蒸发装置设计的首要问题。选型时应先考虑传热系数高的型式，但料液的物理、化学性质常常使一些传热系数高的型式，在使用上受到限制。另外在使用蒸发设备的各部门，有时分别采用多种不同型式，均能得到相同的效果。因此在选型时，应把技术要求，现场条件、投资限额，甚至传统习惯等统一考虑。

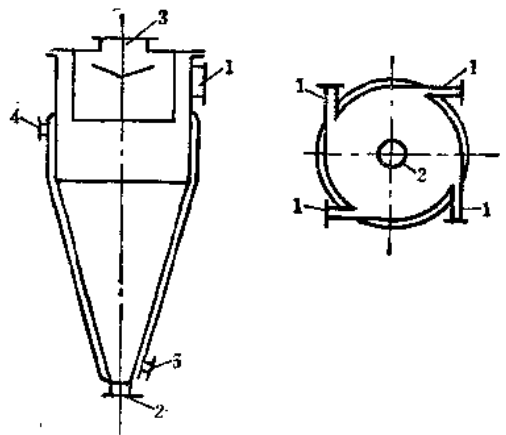


图 9.1.22 旋液式蒸发器  
1—进液口；2—浓缩液出口；3—二次蒸汽出口；4—加热蒸汽进口；5—冷凝水出口



### (3.1) 选型时应考虑的因素

(3.1.1) 料液的性质 包括成份组成, 粘度变化范围, 热稳定性, 发泡性, 腐蚀性, 是否易结垢、结晶, 是否含有固体悬浮物等。

(3.1.2) 工程技术要求 包括处理量, 蒸发量, 料液进出口的浓度和温度, 安装现场的面积和高度, 设备投资限额, 要求连续或间歇生产等。

(3.1.3) 公用系统的情况 包括可以利用的热源, 蒸汽供应量及压力, 能利用的冷却水之水量、水质和温度等。

### (3.2) 蒸发设备选型的基准表

由于蒸发设备应用范围很广, 难以都作说明, 这里仅就一般的选型基准编制成表格, (表9.1.2) 供选型时参考。

表 9.1.2 蒸发设备选型的基准表

蒸发器型式	制 造 价 格	总传热系数		停 留 时 间	料 液 循 环 与 否	浓 缩 液 浓 度 是 否 能 恒 定	浓 缩 比	设 备 处 理 量	料 液 的 性 质				是 否 适 合		
		稀 薄 溶 液 1~50cP	高 粘 度 溶 液 100cP 左右						稀 薄 溶 液	高 粘 度 溶 液	易 产 生 泡 沫	易 结 垢	有 结 晶 析 出	属 热 敏 性	有 腐 蚀 性
水平管式	廉	较高	较低	长	不循环	可	高	大	适	可	尚适	较差	较差	不适	尚适
标准式	廉	较高	较低	长	循环	可	高	大	适	可	适	适	尚适	较差	尚适
盘管式	廉	较高	较低	长	循环	可	高	不大	适	可	适	尚适	较差	较差	不适
外加热式	廉	高	低	较长	循环	可	良好	大	适	差	尚适	尚适	适	不适	尚适
列文式	高	高	低	较长	循环	可	良好	大	适	差	尚适	尚适	适	不适	尚适
强制循环式	高	高	高	较短	循环	可	高	大	适	可	适	好	好	尚适	不适
升膜式	廉	高	低	短	不循环	尚可	良好	大	适	差	好	较差	不适	适	适
降膜式	廉	高	较高	短	不循环	尚可	良好	大	较适	可	适	较差	不适	适	适
刮板式	高	高	高	短	不循环	尚可	良好	不大	较适	好	适	适	适	适	不适
甩盘式	较高	较高	低	短	不循环	尚可	不高	不大	适	差	适	较差	不适	适	不适
旋液式	廉	高	较高	较短	循环	可	良好	不大	适	可	适	尚适	适	适	不适
板式	高	高	低	较短	不循环	尚可	良好	较大	适	差	尚适	尚适	不适	适	不适
离心碟片式	很高	高	较高	很短	不循环	尚可	良好	不大	适	可	好	尚适	不适	好	不适
浸没燃烧式	廉	一	一	较长	不循环	较难	良好	较大	适	可	尚适	好	适	不适	好
闪急蒸发式	高	一	一	较长	循环	尚可	不高	大	适	差	尚适	适	尚适	适	不适

### (3.3) 选型的基本原则说明

(3.3.1) 物料的粘度 物料在蒸发过程中粘度的增加程度, 是选型的关键因素之一, 各蒸发设备适用的粘度范围可参看表9.1.3。

(3.3.2) 物料的热稳定性 对热敏性的物料 (即在较长时间受热或在较高温度时, 物料容易发生分解、异构, 缩聚或将需保留的低沸点成份蒸出等), 一般应选取储液量少, 停留时间短的膜式蒸发设备例如列管薄膜式、离心式、旋转式等而且常采用真空操作以降低料液的沸点和受热温度。对于像果汁、乳品、茶汁等需保持色、香、味的蒸发, 则采用离心 (叠片) 式、板式、降膜式为宜, 因其蒸发温度仅50~60℃, 受热时间停1到数秒钟。非膜式蒸发设备一般最好不用于热敏性物料, 如果物料仅对温度敏感, 而允许在较低温度下较长时间受热, 或者物料浓度很低而浓缩倍数又不高的情况, 非膜式蒸发设备采用真空操作也是可行的。例如乳品采用真空盘管式, 果汁采用倾斜管式, 中药提取液采用真空浓缩锅等等。像外加加热式、列文式等自然循环型蒸发器, 由于需要较大的温度差才能保证设备的正常运转, 因