

化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 9 篇

蒸发及结晶

化学工业出版社

化学工程手册

9

蒸发及结晶

7002-43

7002-43

社

化学工程手册

第 9 篇

蒸发及结晶

《化学工程手册》编辑委员会



化学工业出版社

内 容 提 要

本书是化学工程手册第9篇，主要对蒸发及结晶的各类型设备、计算、设计作了系统地介绍。

全书蒸发部分共6章，第1~3章较为全面地介绍蒸发器的类型及设计，第4,5章介绍蒸发装置热能的利用及其辅助设备，第6章为蒸发装置的自动控制。结晶部分共7章，第1,2章阐述结晶原理及数学模型，第4,5章介绍各种类型的结晶器及设计，第6,7章讲述结晶器的放大及细晶的取出。

本书可供化工、轻工、食品等有关工业部门的设计、研究、工厂的技术人员及有关院校师生参考。

化 学 工 程 手 册

第 9 篇

蒸 发 及 结 晶

2054/33 11

编写人	蒸发	岳德隆	沃联邦	邱宣振	上海医药工业设计院
	结晶	王 楚			化学工业部第八设计院
审校人	蒸发	郑 焜			上海医药工业设计院
	结晶	陈树功			华南工学院

责任编辑：苗延秀

封面设计：许 立

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092^{1/16} 印张13 字数320千字 印数1—12,000

1985年6月北京第1版 1985年6月北京第1次印刷

统一书号15053·3647 定价2.00元

《化学工程手册》总篇目

1. 化工基础数据
2. 化工应用数学
3. 化工热力学
4. 流体流动
5. 搅拌及混合
6. 流体输送机械及驱动装置
7. 传热
8. 传热设备及工业炉
9. 蒸发及结晶
10. 传质
11. 蒸馏
12. 气体吸收
13. 气液传质设备
14. 萃取及浸取
15. 增湿与减湿
16. 干燥
17. 吸附及离子交换
18. 薄膜过程
19. 颗粒及颗粒系统
20. 流态化
21. 气态非均一系分离
22. 液固分离
23. 粉碎、分级及团聚
24. 化学反应工程
25. 化工自动控制
26. 化工系统工程

《化学工程手册》编辑委员会成员

主任

冯伯华 化学工业部

副主任

陈自新 化学工业部橡胶司

苏元复 华东化工学院

汪家鼎 清华大学

委员

卢焕章 化学工业部化工设计公司

区灿棋 中国石油化工总公司

邓颂九 华南工学院

朱亚杰 华东石油学院

朱自强 浙江大学

余国琮 天津大学

时 钧 南京化工学院

沈 复 华东石油学院

吴锡军 南京化学工业公司化工研究院

李步年 陕西省化工设计院

蔡剑秋 化学工业出版社

林纪方 大连工学院

杨友麒 化学工业部计算中心筹备处

张洪沅 成都科技大学

张剑秋 北京燕山石油化学总公司研究院

郑 焜 上海医药设计院

郭慕孙 中国科学院化工冶金研究所

傅举孚 北京化工学院

萧成基 化学工业部第六设计院

第9篇 《蒸发及结晶》

编写人

蒸发：岳德隆 沃联邦 邱宣振 上海医药设计院

结晶：王 楚 化学工业部第八设计院

审校人

蒸发：郑 焜 上海医药设计院

结晶：陈树功 华南工学院

前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十年和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤（力）-秒”工程制（MKfS制）。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制（SI），除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

1979年7月

目 录

9.1 蒸发	1	(1.1) 传热量、蒸发量和蒸发强度的计算	18
9.1.1 蒸发概述	1	(1.2) 总传热系数的计算与概略值	19
9.1.2 蒸发设备的结构及选型	2	(1.3) 传热温度差损失和有效温度差的计算	19
(1) 蒸发设备的分类	2	(2) 单效蒸发器的计算	22
(2) 蒸发设备的结构与特性	2	(2.1) 蒸发量、蒸汽耗量及传热面积的计算	22
(2.1) 直接火蒸发设备	2	(2.2) 计算例题	23
(2.2) 敞口夹套蒸发锅	2	(3) 多效蒸发的流程和计算	24
(2.3) 附有搅拌的夹套蒸发锅	3	(3.1) 多效蒸发的经济性 & 效数限制	24
(2.4) 夹套式真空浓缩锅	3	(3.2) 多效蒸发的操作流程	24
(2.5) 盘管式真空浓缩锅	3	(3.3) 多效蒸发的计算	25
(2.6) 自然循环型—外加热式蒸发器	4	(3.4) 多效蒸发的计算例题	29
(2.7) 列文式蒸发器	5	(4) 多级闪蒸和多室蒸发	32
(2.8) 强制循环型(长管)蒸发器	6	(4.1) 多级闪急蒸发	32
(2.9) 标准式蒸发器	6	(4.1.1) 工作原理	33
(2.10) 标准式强制循环型蒸发器	7	(4.1.2) 多级闪蒸的计算	33
(2.11) 悬筐式蒸发器	7	(4.1.3) 多效多级闪急蒸发	35
(2.12) 水平列管式蒸发器	7	(4.2) 多室蒸发	36
(2.12.1) 薄膜式	8	(4.2.1) 多室蒸发装置的结构	36
(2.12.2) 管内通蒸汽的浸液式	8	(4.2.2) 多室蒸发的工作原理	36
(2.12.3) 管外通蒸汽的浸液式	8	(4.2.3) 多室蒸发装置的特点	37
(2.13) 浸没燃烧蒸发器	8	(5) 升膜式蒸发器的设计与计算	38
(2.14) 多级闪急蒸发器	9	(5.1) 升膜式蒸发器的传热特性	38
(2.15) 升膜式蒸发器	9	(5.2) 升膜式蒸发器的设计	39
(2.16) 降膜式蒸发器	9	(5.2.1) 液膜给热系数 h_f 的计算	39
(2.17) 升降膜式蒸发器	10	(5.2.2) 蒸发管长(L)、内径(d_i)及其比例	40
(2.18) 固定刮板式	10	(5.2.3) 二次蒸汽速度的选择	40
(2.19) 活动刮板式	11	(5.2.4) 临界温度差	41
(2.20) 甩盘式薄膜蒸发器	12	(5.2.5) 蒸发因数	41
(2.21) 离心(叠片)式薄膜蒸发器	12	(5.2.6) 进料温度的选择	41
(2.22) 回转式薄膜蒸发器	13	(6) 降膜式蒸发器的设计与计算	41
(2.23) 板式蒸发器	14	(6.1) 降膜式蒸发器的计算	41
(2.24) 旋液式蒸发器	14	(6.1.1) 降液密度 G_B	41
(3) 蒸发设备的选型	15	(6.1.2) 热负荷 q_m	42
(3.1) 选型时应考虑的因素	16	(6.1.3) 液膜侧的给热系数 h_f	42
(3.2) 蒸发设备选型的基准表	16		
(3.3) 选型的基本原则说明	16		
9.1.3 蒸发装置的设计	18		
(1) 蒸发操作的基本计算	18		

(6.1.4) 压力降	44	(3.4) 热力喷射压缩式的蒸发	74
(6.1.5) 液膜的表面温度	46	(3.5) 蒸汽喷射泵的热工过程	74
(6.2) 设计例题	46	(3.6) 热泵蒸发器设计的注意点	75
(6.3) 液体分布器的设计	50	(4) 蒸汽经济性的计算及例题	76
(7) 刮板式蒸发器的设计与计算	52	(5) 多效蒸发器的热能回收	80
(7.1) 刮板式蒸发器的传热	52	(6) 提高现有蒸发器热经济性的对策	82
(7.1.1) 刮板式蒸发器的传热特性	52	(7) 利用其它热源的蒸发装置	82
(7.1.2) 总传热系数的近似值	52	9.1.5 蒸发装置的辅助设备	83
(7.1.3) 各种因素对传热系数的影响	53	(1) 气液分离器	83
(7.2) 刮板式蒸发器的计算	54	(1.1) 蒸发过程雾沫夹带的产生	83
(7.2.1) 料液的滞留量 (W_L) 及停留时间 (τ)	54	(1.2) 气液分离器的型式与特性	83
(7.2.2) 液膜厚度 δ	54	(2) 蒸汽冷凝器	85
(7.2.3) 基本传热式	56	(2.1) 蒸汽冷凝器的型式与分类	85
(7.2.4) 筒体内侧料液的给热系数 h_i	56	(2.2) 蒸汽冷凝器的结构与特性	86
(7.2.5) 夹套内蒸汽冷凝的给热系数 h_o	57	(2.2.1) 多层多孔板式	86
(7.2.6) 刮板的驱动功率计算	57	(2.2.2) 水帘式	86
(7.2.7) 设计例题	58	(2.2.3) 填充塔式	87
(7.3) 刮板蒸发器各部件的设计	60	(2.2.4) 水喷射式冷凝器	87
(7.3.1) 刮板	60	(2.2.5) 自排不凝性气体的多层多孔板式	87
(7.3.2) 除沫器	61	(2.3) 多层多孔板式冷凝器的设计与计算	88
(7.3.3) 料液分布器	62	(2.4) 自排不凝性气体冷凝器的设计	90
(7.3.4) 出料口	63	(2.5) 水帘式冷凝器的设计	90
(7.3.5) 筒体	64	(2.6) 水喷射式冷凝器的设计	90
(7.4) 停留时间的控制	64	(2.7) 蒸汽冷凝器的安装	91
(7.4.1) 改变设计参数	64	(3) 真空系统	92
(7.4.2) 增设挡液圈	65	(3.1) 真空泵的类型	92
(7.4.3) 其它方法	65	(3.2) 真空泵排气量的计算	92
(8) 蒸发装置中的几个问题	65	9.1.6 蒸发装置的自动控制	96
(8.1) 蒸发器的结垢形成原因	65	(1) 加热蒸汽的流量和压力控制	96
(8.2) 垢层的防除措施	66	(2) 物料流量的控制	96
(8.3) 蒸发器的温差不宜过大	68	(3) 蒸发器内液位控制	96
(8.4) 蒸发装置的真空系统	68	(4) 浓缩液浓度控制	97
9.1.1 蒸发装置热能的利用	69	(4.1) 利用温差法测定浓度	97
(1) 料液预热	69	(4.2) 比重法测浓度	100
(2) 冷凝液的利用	70	(4.3) 采用光电浓度变送器测浓度	100
(3) 二次蒸汽的压缩	71	(5) 蒸发器内液温 (真空度) 控制	101
(3.1) 机械压缩式的蒸发	71	(6) 凝水排出控制	102
(3.2) 压缩机动力的计算	72	(7) 其他	102
(3.3) 机械压缩式蒸发器的探讨	73	参考文献	103
		9.2 结晶	106
		9.2.1 结晶操作与化学工业	106

9.2.2 结晶的原理	106	(3.1) 筒式真空结晶器	159
(1) 结晶的性状	106	(3.2) Krystal-Oslo真空结晶器	159
(2) 溶解度及溶液内的相平衡	109	(3.3) DTB真空结晶器	161
(2.1) 溶解度	109	(3.4) 双套管湍流式结晶器	162
(2.2) 溶解度图	111	(3.5) 倒圆锥型结晶器	164
(2.3) 饱和与过饱和溶液	112	(4) 联合制碱工业中的盐析结晶器	164
(2.4) 过饱和度	113	(5) 其它类型的结晶器	165
(2.5) 过饱和度的测定	118	(5.1) 冷剂直接接触式冷却结晶器	165
(2.6) 结晶有关的相律与相图	119	(5.2) 喷雾式结晶器	166
(3) 晶核的形成	121	9.2.5 结晶器的设计	167
(4) 溶液的焓-浓度图	124	(1) 有关物性数据	167
(5) 溶液的溶解热与结晶热	125	(2) Mullin 分级式结晶器的设计	
(6) 结晶过程的物料及热平衡	127	方法	168
(7) 结晶的生长	129	(2.1) 基本设计参数	168
(8) 晶体粒径的分布与 ΔL 定律	131	(2.2) 有效过饱和度 (S)	168
(9) 筛分粒径的评价与变化系数	134	(2.3) 粗粒晶浆的沉降速度	168
(10) 结晶的结块	138	(2.4) 晶床容积 (V)	170
9.2.3 Randolph和Larson的综合		(2.5) 产品结晶的生长时间 (τ)	171
结晶数学模型	140	(2.6) 晶浆密度 (ρ_c) 或晶床空隙率	
9.2.4 结晶装置	147	(ϵ)	171
(1) 冷却结晶器	147	(2.7) 理想分级床结晶器	172
(1.1) 空气冷却式结晶器	147	(2.8) 设计公式的应用	174
(1.2) 桶管式结晶器	148	(3) 成冢正与丰仓贤的设计方法	176
(1.3) 夹套螺旋带结晶器	149	(3.1) 混浆型结晶器的设计	176
(1.4) 锥形夹套式结晶器	150	(3.2) Krystal-Oslo分级型结晶器的	
(1.5) Krystal-Oslo分级结晶器	150	设计	182
(2) 蒸发结晶器	151	(3.3) 连续式D. T. B型结晶器的	
(2.1) Krystal-Oslo蒸发式生长型		设计	189
结晶器	153	9.2.6 结晶器的放大	194
(2.2) D. T. B. 型蒸发式结晶器	154	9.2.7 细晶的取出	195
(2.3) 蒸发式结晶器的其它类型	155	符号表	198
(3) 真空式结晶器	157	参考文献	199

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是主要有三个：

(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^[1]。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^[2]。先进的多效多级闪急蒸发器亦成功地用于工业生产^[19]。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^[4]。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^[5]。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^[6]；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^[7]；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^[8]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^[9~10] 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%)。^[5]

(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^[11]。通过采用动态规划^[12]、经济参数的相对值^[13]、年经营费 (包括固定费和蒸汽费) 最小值^[14]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^[15], 蒸发分馏^[16], 蒸发造粒^[17]等双重目的的操作设备。为了使设备紧凑, 增加液膜的湍动, 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^[18~22] 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

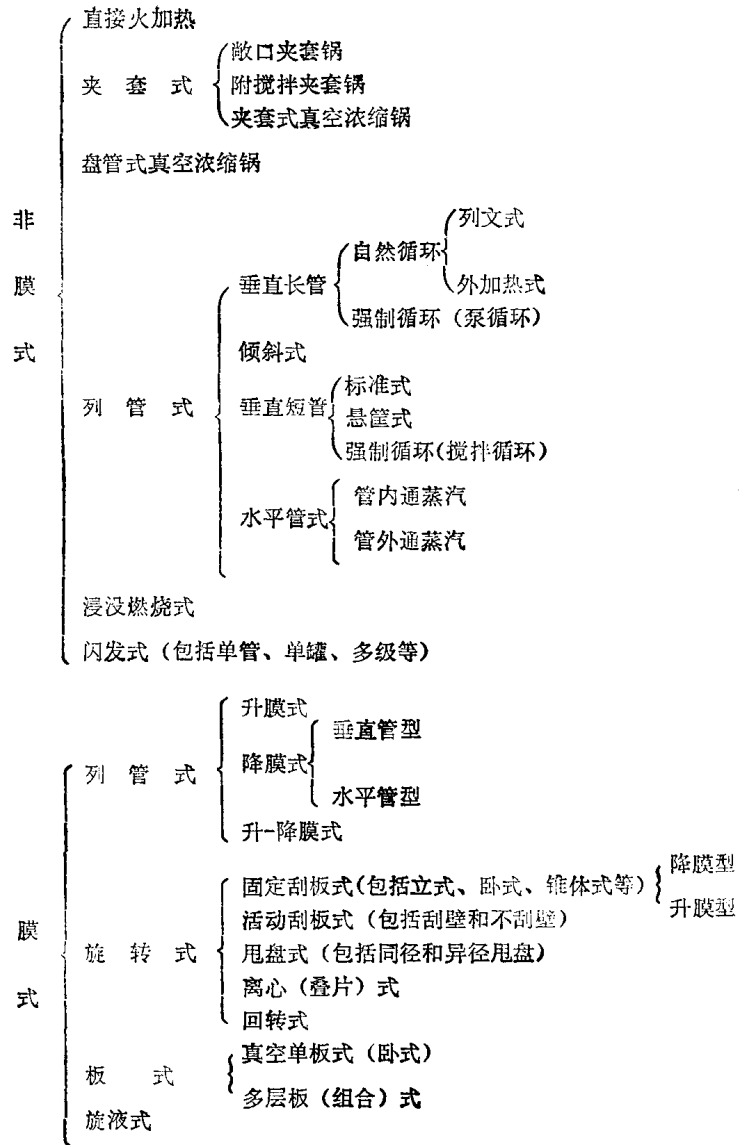
为了便于读者选型或设计参考, 兹将各种蒸发设备的结构及特性, 介绍如下。

(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300~1000kcal/m²·h·°C，在水和牛乳中为1000~2000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。常常为防腐蚀而采用搪玻璃反应釜改制成真空浓缩锅。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

M

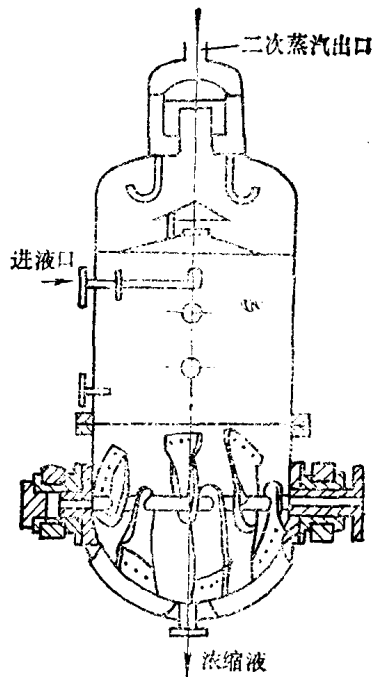


图 9.1.1 附有搅拌的夹套蒸发锅

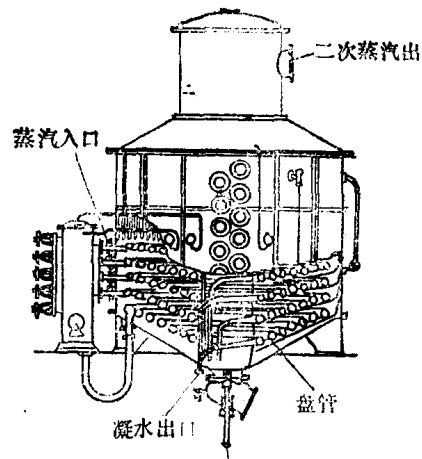


图 9.1.2 盘管式浓缩锅

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	mmHg	650	660	660
蒸汽压力	kg/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	m^2	3.17	6.7	9.5
蒸汽耗量	kg/h	355	800	~1350
冷却水耗量	m^3/h	18	38	42
水泵型号		50TSW-4	70TSW-4	75TSW-V
锅内径	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 $1200\sim 3000\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 。

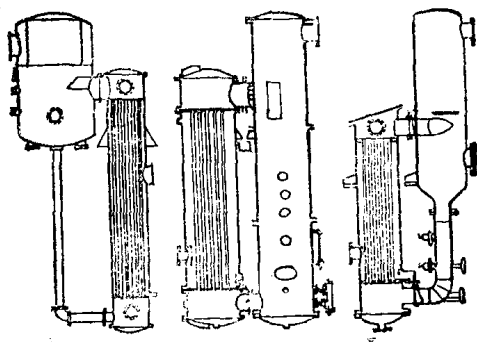


图 9.1.3 自然循环式长管型蒸发器

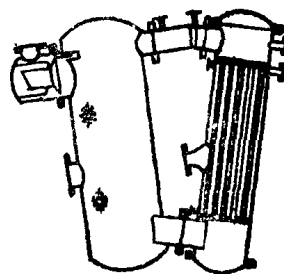


图 9.1.4 倾斜型蒸发器

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^[24]

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。

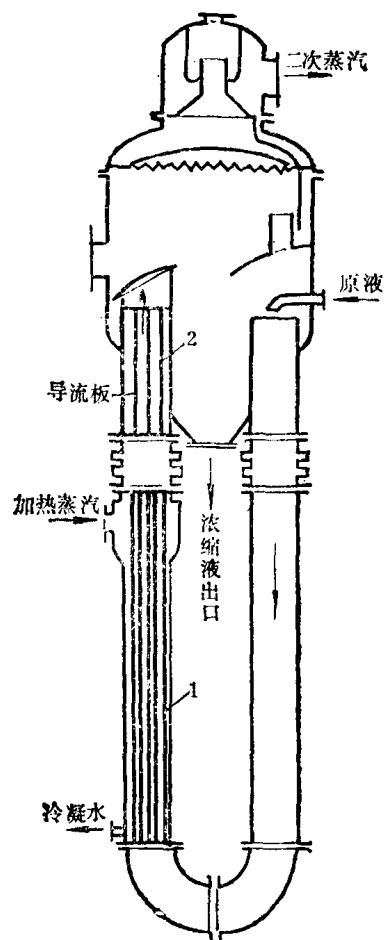


图 9.1.5 列文式蒸发器

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^[9]。

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 2m/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。

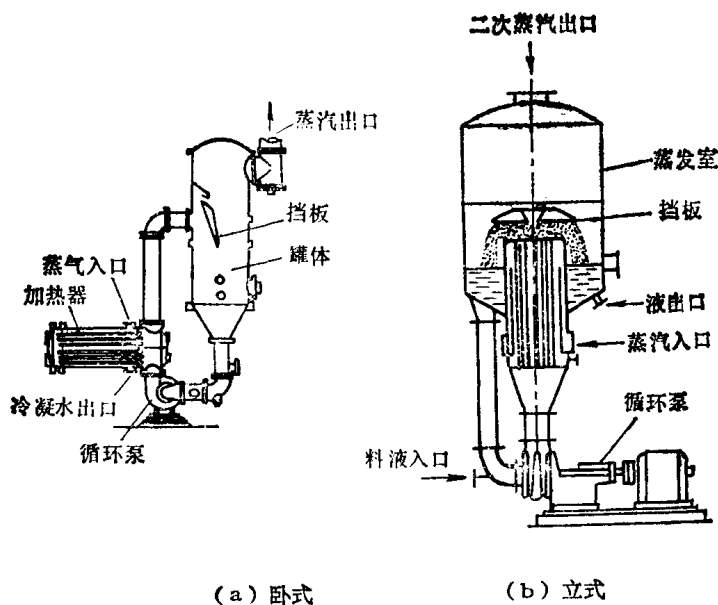


图 9.1.6 强制循环型蒸发器

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 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 $0.6\sim 2\text{m}$ （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²，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。

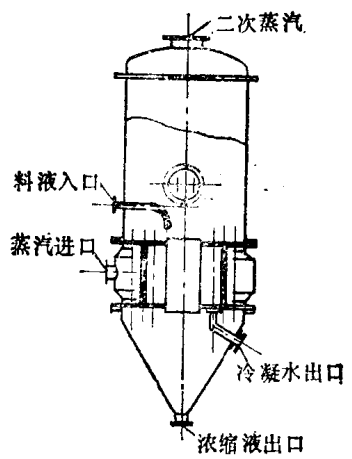


图 9.1.7 标准式蒸发器

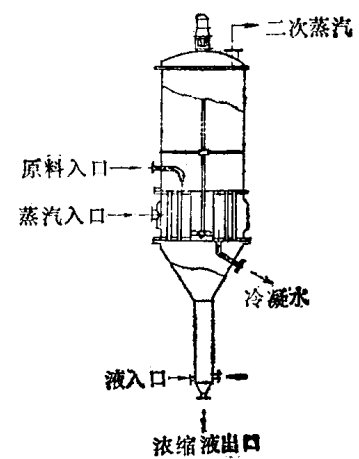


图 9.1.8 标准式强制循环蒸发器

(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/m²·h·°C。

但是耗费动力，搅拌器马力在 0.05~0.1(Hp/m² 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。加热蒸汽由中央一根多孔管进入，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100m²以下，其总传热系数在 500~3000kcal/m²·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

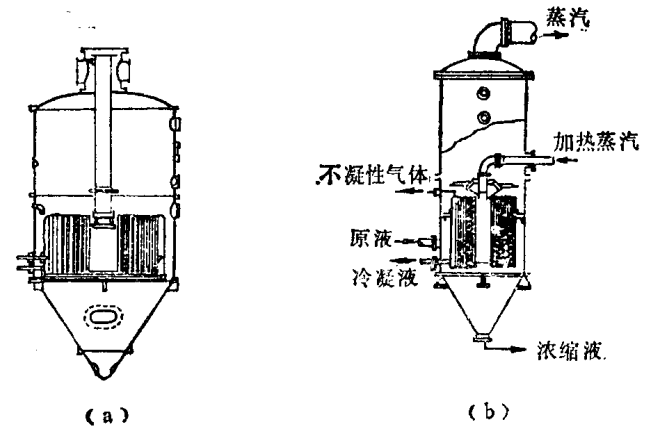


图 9.1.9 悬筐式蒸发器

(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 $3\frac{1}{2}$ " , 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。

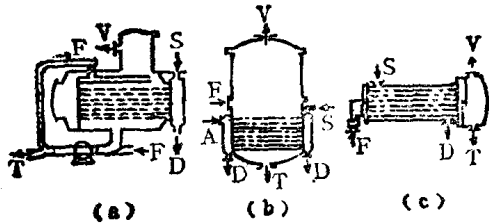


图 9.1.10 水平列管式蒸发器

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

此设备总传热系数为 $500\sim 2000\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$, 它的优点是罐体小而传热面积大, 加热管易于拆卸, 同样的蒸发能力, 它比标准式罐内液面低, 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 $1000\sim 4000\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 。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^[20, 21]

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, 燃烧室内温度一般在 $1200\sim 1800^\circ\text{C}$ 。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 $200\sim 600\text{mm}$ 。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温耐腐蚀材料, 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温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

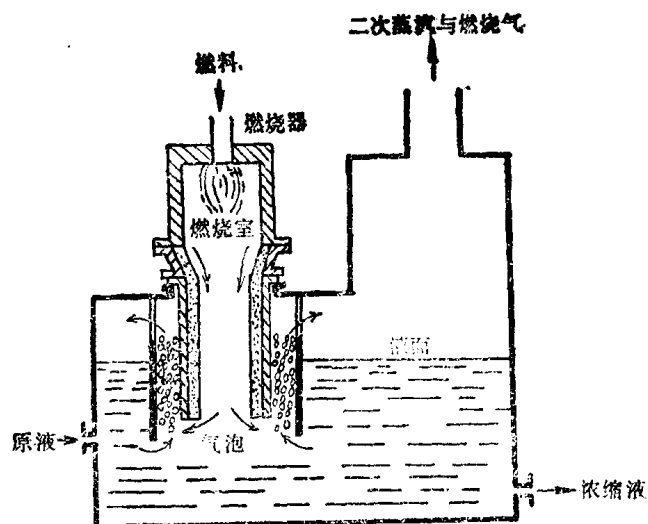


图 9.1.11 浸膜燃烧蒸发器