

化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 13 篇

气液传质设备

化学工业出版社

81.1/07E
15-2
13:1

化学工程手册

第 13 篇

气液传质设备

《化学工程手册》编辑委员会

化学工业出版社

内 容 说 明

本册是《化学工程手册》第13篇，主要对各类气液传质设备的性能、流体力学特性、传质性能及设计计算方法作系统的介绍。所介绍的塔型主要是工业上比较成熟或在国内具有一定使用价值的。对于某些有发展前途的塔型也作了适当的介绍。全篇共分16章，第1章为概述，第2~6章介绍各种填料塔，7~16章介绍各种板式塔，其中第16章综合讨论了板式塔的传质效率问题。本篇内容特点是有关塔板类型的资料丰富，设计步骤与计算方法详细、实用。

本书可供化学工业及有关工业部门的设计、研究人员，工厂技术人员及有关院校师生参考。

化 学 工 程 手 册

第13篇 气液传质设备

编写人 萧成基 化学工业部第六设计院
于鸿寿 化学工业部第六设计院
审校人 余国琮 天津大学
沈复华 华东石油学院

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787×1092¹/₁₆印张16¹/₄字数399千字印数1—14,150

1979年12月北京第1版1979年12月北京第1次印刷

书号15063·3158定价1.70元

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

《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

目 录

13.1 气液传质设备概述	1	(5) 传质计算	43
13.1.1 气液传质设备的 主要类型	1	(5.1) 传质总系数及 传质单元高度	45
13.1.2 塔型的选用原则	2	(5.2) 等板高度H. E. T. P.	47
参考文献	2	(5.3) 鲍尔环传质效率的 稳定范围	50
13.2 填料塔(一)——拉西环及其 衍生型	3	(6) 设计问题	50
13.2.1 概述	3	13.3.2 阶梯环	51
13.2.2 拉西环及填料塔的一般 特性和设计	4	(1) 概述	51
(1) 基本特性数据	4	(2) 特性数据	52
(2) 泛点	5	(3) 流体力学性能	52
(3) 填料层阻力	8	(4) 传质性能	53
(4) 持液量	13	13.3.3 矩鞍形填料	54
(5) 传质及塔高计算	13	(1) 概述	54
(5.1) 填料塔的传质	13	(2) 标准规格	54
(5.2) 蒸馏过程的填料高度	21	(3) 特性数据	54
(5.3) 吸收过程的填料高度	22	(4) 流体力学性能	54
(6) 填料塔的附属结构	29	(5) 传质性能	56
(7) 填料塔的设计	35	(6) 设计问题	56
(7.1) 设计程序	35	13.3.4 弧鞍形填料	58
(7.2) 经济气速的求取	37	参考文献	59
13.2.3 拉西环的衍生型	38	13.4 填料塔(三)——丝网填料	60
(1) θ 环	38	13.4.1 概述	60
(2) 十字环	38	13.4.2 波纹网填料	60
(3) 螺旋环	38	(1) 波纹网填料特点	60
参考文献	39	(2) 特性参数	62
13.3 填料塔(二)——鲍尔环 及鞍形填料	41	(3) 流体力学特性	63
13.3.1 鲍尔环	41	(3.1) 泛点速度	63
(1) 概述	41	(3.2) 压降与持液量	64
(2) 标准规格	42	(4) 传质性能	65
(3) 基本特性数据	43	(5) 液体喷淋及液体再分布器、 支承栅板	67
(4) 液泛点及阻力	43	(6) 设计问题	67
(4.1) 计算方法	43	(6.1) 塔径及压降计算	67
(4.2) 一些测定的数据	43	(6.2) 塔高计算	68
		(6.3) 其它结构	68
		13.4.3 θ 网环	68

(1) 特性	68	13.6 填料塔(五)——特种塔型	87
(2) θ 网环的流体力学特性	69	13.6.1 湍球塔	87
(2.1) 压降	69	(1) 填料参数和流体力学计算	87
(2.2) 泛点速度	69	(1.1) 填料球	87
(2.3) 持液量	70	(1.2) 静止床层高度, 空隙率及球数	88
(3) 填料效率	71	(1.3) 空塔速度及膨胀高度, 板间距(接触区高度)	88
13.4.4 双层 θ 网环	72	(1.4) 喷淋量	90
(1) 概述	72	(1.5) 压降	90
(2) 压降	72	(1.6) 持液量	92
(3) 等板高度	72	(2) 辅助结构	92
13.4.5 压延孔环	73	(3) 湍球塔的传质	93
(1) 概述	73	13.6.2 多管塔	96
(2) 流体力学特性	74	(1) 多管塔结构	96
(2.1) 泛点速度	74	(2) 多管塔的应用	102
(2.2) 压降	74	(2.1) 塔底为主要产品的流程	102
(2.3) 等板高度	75	(2.2) 塔顶为主要产品的流程	102
13.4.6 鞍型网	76	13.6.3 乳化塔	103
(1) 概述	76	(1) 乳化塔的特点	103
(2) 流体力学特性	77	(2) 乳化塔的流体力学性能	104
(2.1) 泛点速度	77	(3) 乳化塔的主要结构参数	104
(2.2) 压降	77	参考文献	105
(2.3) 持液量	77	13.7 板式塔	106
(3) 传质性能	77	13.7.1 综述	106
参考文献	78	13.7.2 板型	106
13.5 填料塔(四)——栅条填料及 实体波纹填料	79	(1) 有降液管式塔板	106
13.5.1 栅条填料	79	(2) 穿流式塔板	107
(1) 栅条填料的特性数据	79	(3) 其它型式塔板	107
(2) 流体力学计算	79	13.7.3 有降液管板式塔的结构	108
(2.1) 泛点计算	79	(1) 流动型式	108
(2.2) 阻力计算	80	(2) 降液管及溢流堰	108
(3) 传质计算	80	(2.1) 降液管	108
13.5.2 波纹板填料	80	(2.2) 溢流堰	110
(1) 概述	80	(2.3) 塔板上的其他区域	111
(1.1) 波纹板操作性能	80	(3) 塔板结构参数的系列化	113
(1.2) 波纹填料的材料	80	(3.1) 塔板参数系列	113
(2) 特性参数	81	(3.2) 小直径塔板系列参数	116
(3) 流体力学特性	81	13.7.4 有降液管板式塔的流程力学计算	117
(3.1) 干填料压降 ΔP_D	83	(1) 堰上的液流高度	117
(3.2) 喷淋填料的压降 ΔP_S	83		
(3.3) 液泛点	83		
(4) 传质效率	84		
参考文献	86		

(1.1) 平堰.....	117	13.9.5 负荷性能图	148
(1.2) 齿形堰.....	119	13.9.6 计算示例	148
(1.3) 圆形溢流管.....	119	参考文献	151
(2) 液体抛出距离	120	13.10 泡罩塔	152
(3) 降液管内液面高度	120	13.10.1 概述	152
13.7.5 负荷性能图	121	13.10.2 主要结构参数	152
参考文献	123	(1) 泡罩	152
13.8 筛板塔	124	(1.1) 常用泡罩.....	152
13.8.1 概述	124	(1.2) 泡罩结构参数及泡罩标准.....	152
13.8.2 主要结构参数	124	(1.3) 泡罩排列.....	153
(1) 筛孔	124	(2) 溢流堰及降液管等板面布置	153
(2) 塔板布置	126	(2.1) 溢流堰.....	153
13.8.3 流体力学计算	127	(2.2) 降液管、受液盘、内堰及	
(1) 压降	127	安定区、边缘区	155
(1.1) 气相压降.....	127	(3) 排液孔	155
(1.2) 平板压降.....	127	13.10.3 流体力学计算	156
(1.3) 液层有效阻力 h_l	128	(1) 齿缝开度	156
(2) 漏液点	129	(2) 塔板压降 h_p	157
(3) 液面梯度	130	(3) 液面梯度	158
(4) 雾沫夹带	130	(4) 雾沫夹带	159
13.8.4 设计程序	133	13.10.4 设计程序	160
(1) 塔径初选	133	(1) 已知工艺条件	160
(2) 塔径核算	133	(2) 塔径初估	160
(3) 计算步骤	134	(3) 板面布置	161
(4) 筛板的水平度要求	135	(4) 塔板压降 h_p	161
13.8.5 负荷性能图	135	(5) 校核液泛情况	161
13.8.6 计算示例	136	(6) 雾沫夹带量校核	161
参考文献	141	(7) 确定操作负荷的允许上、下限	161
13.9 浮阀塔板	142	(8) 确定泪孔数	161
13.9.1 概述	142	13.10.5 负荷性能图	162
13.9.2 主要结构参数	142	13.10.6 计算示例.....	162
(1) 浮阀型式	142	参考文献	167
(2) 阀的配置	144	13.11 导向筛板及多降液	
(3) 溢流堰及降液管	145	管塔板	168
13.9.3 流体力学计算	145	13.11.1 导向筛板	168
(1) 气相压降	145	(1) 概述	168
(1.1) 干板压降.....	145	(2) 结构参数	168
(1.2) 液层阻力 h_l	145	(2.1) 导向孔.....	168
(2) 泄漏	145	(2.2) 鼓泡促进区.....	168
(3) 液面梯度	146	(3) 流体力学特性	169
(4) 负荷上限计算	146	(3.1) 压降.....	169
13.9.4 设计程序	147	(3.2) 漏液点.....	170

(3.3) 雾沫夹带.....	170	(1) 概述	185
(4) 传质性能	170	(2) 结构尺寸	185
13.11.2 多降液管塔板	171	(3) 流体力学性能	187
(1) 概述	171	(3.1) 塔板压降.....	189
(2) 结构参数	172	(3.2) 泄漏量.....	189
(2.1) 降液管的自封.....	172	(3.3) 雾沫夹带.....	189
(2.2) 降液管的宽度与堰负荷.....	173	(4) 设计计算	189
(2.3) 堰上液流高度.....	173	参考文献	191
(3) 流体力学特性	174	13.13 穿流栅孔板塔	192
(4) 负荷性能图	174	13.13.1 概述	192
(5) 传质性能	174	13.13.2 塔板结构.....	192
参考文献	174	(1) 塔板	192
13.12 几种斜喷型塔板	175	(2) 栅缝及筛孔	193
13.12.1 斜孔板	175	(3) 自由截面率	193
(1) 概述	175	(4) 塔板间距	193
(2) 结构	175	13.13.3 流体力学计算	194
(3) 流体力学特性	176	(1) 塔径的确定	194
(4) 传质性能	176	(1.1) 孔(或栅缝)速度 w_0 的确定.....	194
13.12.2 舌形板	177	(1.2) 计算塔径.....	196
(1) 概述	177	(2) 塔板的压降计算	196
(2) 结构及流体力学特性	177	(2.1) 薄板的栅孔局部	
(2.1) 舌孔.....	177	阻力系数 ζ	196
(2.2) 气相压降.....	178	(2.2) 厚板的干板阻力系数 ζ	197
(2.3) 降液管及板上液流进口		(2.3) 塔板的压降 ΔP	197
阻力 h_d	178	(2.4) 塔板上的持液量 Γ	197
(2.4) 板上溢流层高度 h_{ow}	179	(3) 塔板间距 H_T	198
(2.5) 降液管内液层高度 H_d	179	(3.1) 板上泡沫层高度 h_f	198
(2.6) 漏液.....	179	(3.2) 塔板间距.....	198
(2.7) 雾沫夹带量 e_v	180	(4) 雾沫夹带量 e_v	199
(3) 塔板设计及		13.13.4 不均匀分布开孔及	
负荷性能图的分析	180	双孔径穿流板	199
(3.1) 塔径估算.....	180	(1) 双孔径问题	199
(3.2) 流体力学计算.....	181	(2) 非均匀分布开孔问题	199
(3.3) 负荷性能图.....	181	13.13.5 波楞穿流板	202
13.12.3 浮舌塔板	182	13.13.6 均匀开孔穿流筛板塔	
(1) 概述	182	计算示例.....	202
(2) 结构及流体力学特性	182	参考文献	205
(2.1) 塔板结构.....	182	13.14 旋流板塔	206
(2.2) 流体力学特性.....	183	13.14.1 概述	206
(3) 浮舌塔的设计	184	13.14.2 结构参数	206
(3.1) 塔径估算.....	184	(1) 叶片的外端直径	206
(3.2) 负荷范围核算.....	185	(2) 盲板区直径	206
13.12.4 浮动喷射塔	185		

(3) 仰角 α	207	(2.2) 雾沫夹带	225
(4) 径向角 β	207	参考文献	226
(5) 开孔率	207	13.16 塔板效率计算	227
(6) 罩筒	208	13.16.1 概述	227
(7) 塔径	208	13.16.2 板式塔的效率	227
13.14.3 设计计算	208	(1) 几种效率的定义	227
(1) 降液装置	208	(1.1) 全塔效率 E_T	227
(2) 塔板间距	209	(1.2) 板效率 E_{MV} (或 E_{ML})	227
(3) 压降	209	(1.3) 点效率	228
(4) 顶段	210	(2) 点效率与传质单元数的关系	229
(5) 底段	210	(3) 点效率与板效率的关系	230
13.14.4 效率	210	(4) 板效率与雾沫夹带的关系	231
13.14.5 在除雾及除尘上的应用	210	(4.1) 计算式	231
13.14.6 计算示例	210	(4.2) 雾沫夹带量及其效应	232
参考文献	211	(5) 板效率与全塔效率的关系	232
13.15 其他塔型	212	(6) 塔板效率的计算	234
13.15.1 并流喷射塔	212	13.16.3 简化经验式	234
(1) 概述	212	(1) O'Connell法及其衍生型	234
(2) 喷杯	212	(1.1) O'Connell关系	234
(3) 流体力学特性	212	(1.2) 朱汝瑾公式	235
(3.1) 喷射塔的干塔压降	212	(2) Winkle法估计板效率	236
(3.2) 喷射塔的湿塔阻力	214	13.16.4 A. I. Ch. E. 法	
(4) 喷射塔的传质传热过程	215	预测板效率	236
(4.1) 传质性能	215	(1) 塔板上传质单元数及	
(4.2) 传热性能	215	点效率的计算	237
13.15.2 角钢板	217	(1.1) 板上气相传质单元数 N_G	237
(1) 概述	217	(1.2) 板上液相传质单元数 N_L	237
(2) 流体力学特性	217	(1.3) 点效率的计算	238
(2.1) 压降	217	(2) 干板效率的计算	239
(2.2) 漏液和液沫夹带	220	(2.1) 返混效率的计算	239
(3) 效率	220	(2.2) 影响返混效率的因素	240
13.15.3 钢板网塔板	220	(2.3) 液膜控制时的计算	240
(1) 概述	220	(3) 表观板效率及实际板数	241
(2) 流体力学特性	223	13.16.5 各种塔板的	
(2.1) 压降	223	效率比较	241
(2.2) 漏液	224	(1) 塔板效率的比较	241
(2.3) 雾沫夹带	224	(2) 负荷性能图和板效率	243
13.15.4 浮动筛板	224	13.16.6 换热塔板	244
(1) 结构	224	参考文献	246
(2) 流体力学特性	225	基本单位符号表	248
(2.1) 压降	225	MKfS制换算成SI简表	248

13.1 气液传质设备概述

气液传质设备是化工类型生产过程中用以进行蒸馏、吸收、洗涤、增减湿（气液间的同时传热传质过程）、以及气液的直接接触换热等过程的单元设备。这些过程大部分受相平衡关系的控制，因此要求设备中气液两相能得到良好的接触。在工业应用时应根据具体情况，选用合适的设备。此外，还有许多工程上的问题需要考虑：如压降，操作弹性，耐腐蚀材料，耐污垢及堵阻，安装及检修情况等等。

13.1.1 气液传质设备的主要类型

(1) 类型

气液传质设备的类型很多，特别是近三十年以来，发展尤快。这里按气液接触基本构件特点分类，其中有工业使用价值的大致可分为三类。

(1.1) 填料塔

填料塔属于微分接触逆流操作，塔内以填料作为气液接触的基本构件。填料又可分为通用型填料及精密填料两大类。拉西环、鲍尔环、矩鞍填料等属于通用型填料。 θ 网环、波纹网填料等属于精密填料。通用型填料效率较低，但适应性较好。精密填料效率较高，但要求也苛刻，在很多场合下其适应性就受到许多限制。

(1.2) 板式塔

板式塔属于逐级接触逆流操作，塔内以塔板作为气液接触的基本构件。塔板又可分为有降液管和无降液管两种，在有降液管的塔板上气相与液相流向相互垂直，属于错流型。无降液管的塔板（穿流型）则属于逆流型。这两类里又包括了许多不同型式的板上气液接触部件，如筛孔、栅条、浮阀、泡罩、浮板等。

(1.3) 特种接触塔型

此外，还有一些不属于填料或塔板型的特种气液接触设备，例如并流喷射塔，文氏管，卧式塔，喷雾塔等，在工业生产上较有用的是并流喷射塔，将在本篇第13.15.1节中介绍，文氏管及喷雾塔将分别在第21及第15篇中介绍，卧式塔可参阅有关资料^[2,3]。

表 1-1 板式塔与填料塔对比

序号	填 料 塔	板 式 塔
1	$\phi 800\text{mm}$ 以下造价一般比板式塔便宜，直径大则价昂	$\phi 600\text{mm}$ 以下时，安装较为困难
2	用小填料时小塔效率高，塔的高度低。但直径增大，效率下降，所需填料高度急增	效率稳定，大塔板效率比小塔有所提高
3	空塔速度（生产能力）低	空塔速度高
4	大塔检修清理费用大、劳动量大	检修清理比填料塔易
5	压降小，对阻力要求小的场合较适用（例如真空操作）	压降比填料塔大
6	对液相喷淋量有一定要求	液气比的适应范围较大
7	内部结构简单，便于用非金属材料制作，可用于腐蚀较严重场合	多数不便于用非金属材料制作
8	持液量小	持液量大

(2) 板式塔与填料塔的对比如

板式塔与填料塔的使用场合，可参见表1-1。

13.1.2 塔型的选用原则

塔型的选用，涉及因素甚多，必须结合具体情况作具体考虑。在同时存在几种矛盾因素时，应该用辩证法的观点进行分析，根据矛盾的主次情况，确定取舍，以最大限度地适应生产的需要为原则。表1-2中列出一些工程中常遇到的因素及选择塔型的优先考虑顺序，这些仅能作为初步考虑时的参考，对于每一种特定情况，均要作具体分析。

表 1-2 塔型选用顺序

因 素	选 择 顺 序	因 素	选 择 顺 序
1. 塔径 小于800mm ≥800mm	填料塔 有降液管板式塔	5. 真空塔	(1) 填料塔 (2) 浮阀板塔 (3) 筛板塔 (4) 泡罩板塔 (5) 其他斜喷式板塔 (斜孔板塔、钢板网塔等) 等
2. 有强腐蚀性物料	(1) 填料塔 (2) 穿流板塔 (3) 筛板塔 (4) 固舌板塔等	6. 大液气比	(1) 导向筛板塔 (2) 多降液管板式塔 (3) 填料塔 (4) 浮阀板塔 (5) 筛板塔 (6) 条形泡罩板塔
3. 污垢物料	(1) 大孔筛板塔 (2) 穿流板塔 (3) 固舌板塔 (4) 浮阀板塔 (5) 泡罩板塔等	7. 液相分层	(1) 穿流板塔 (2) 填料塔
4. 高弹性比	(1) 浮阀板塔 (2) 泡罩板塔 (3) 筛板塔		

参 考 文 献

- [1] 化工部第六设计院化学工程组，气液传质设备设计 (1973)。
- [2] 兰州化工机械研究所，化学工程，No. 4, 57 (1972)。
- [3] 化工设备设计专业技术中心站，塔设备调查 (1971)。

13.2 填料塔（一）——拉西环及其衍生型

13.2.1 概 述

填料塔是化工类型工业中最常用的气液传质设备之一（图 2-1 a），在塔体内设置填料使气液两相能够达到良好传质所需的接触状况。填料塔具有结构简单、便于用耐腐蚀材料制造、适于小直径塔的场所以及压降小等优点，但用于大直径的塔时则有效率低、重量大、造价高以及清理检修麻烦且填料损耗大等缺点。在五十年至六十年代时，多用各种高效的板式塔来取代老式的填料塔。但近年来又倾向于认为在一定塔径范围内（例如1.5米以下时），采用新型高效填料（如鲍尔环或鞍形填料）可以得到很好的经济效果。总之，根据不同的具体情况（特别是在小直径塔，或压降有一定限制，或有腐蚀情况时），填料塔还是具有很多适用性的。

工业填料塔所用的填料，大致可分为实体填料和网体填料两大类。在实体填料中包括拉西环及其衍生型、鲍尔环、鞍形填料、波纹填料等。网体填料则包括由丝网体制成的各种填料，如鞍形网、 θ 网环填料等。

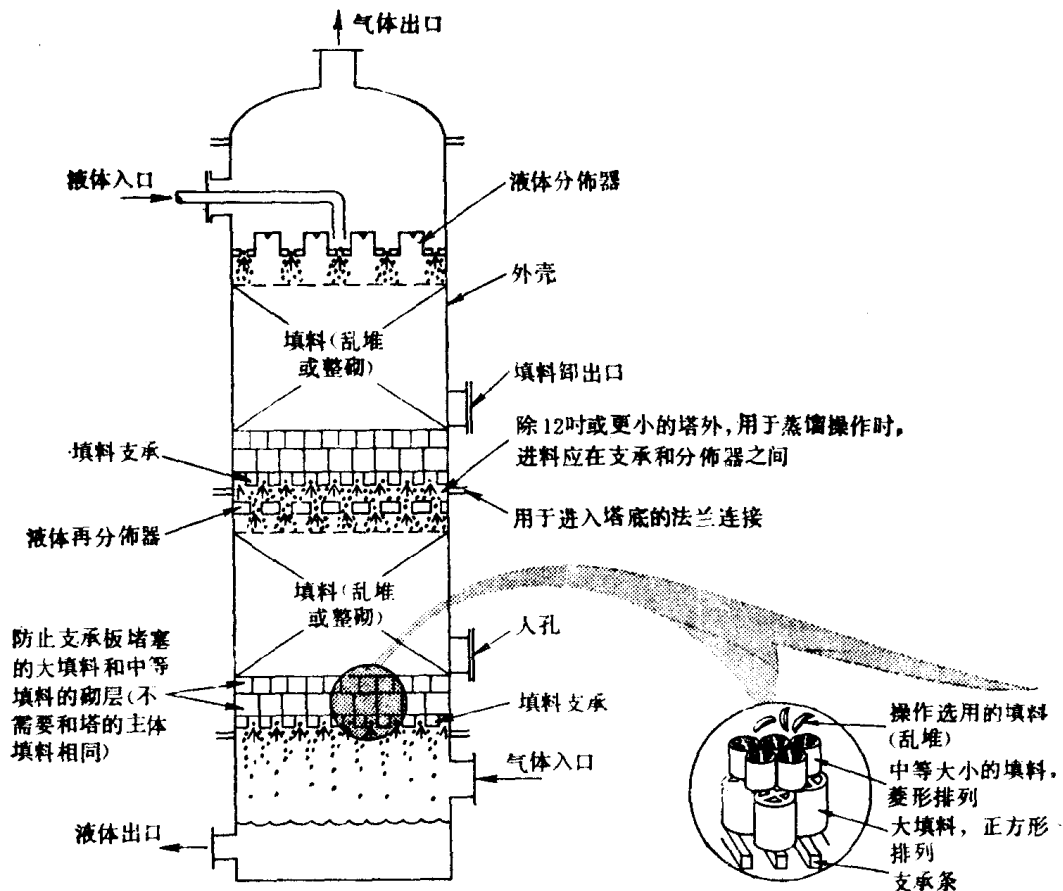


图 2-1(a) 填料塔结构示意图

另一种分类方法是分为乱堆填料及整砌填料。属于乱堆者是各种颗粒型填料，如拉西环、鞍形填料、鲍尔环、 θ 网环等；属于整砌者是各种组合型填料，如实体波纹板、波纹网、平行板等。两类均有各自的流体力学（压降、气液分布情况等）及传质规律。

此外还有一些结构特殊的塔，如多管塔、湍球塔、乳化塔，也属于填料塔的范围。

本章将以拉西环填料为典型，介绍常用工业填料塔的一般特性和一般设计计算方法。拉西环虽是最老的一种工业填料，但其基本数据及流体力学和传质规律研究得比较完善，这些规律在填料塔中具有代表性，故予以较详细的介绍。鲍尔（Pall）环与矩鞍形（Intalox）填料阻力小，效率高，是性能较好的工业填料。如果用它们来替换现有生产装置中旧的拉西环，则生产能力及效率均可提高许多。根据其性能特点，鲍尔环可以用金属或塑料制作（陶瓷鲍尔环的性能不如陶瓷矩鞍形，故不宜发展推广）；矩鞍填料可以用塑料或陶瓷制作。此外还有一些正在发展中的通用填料，如阶梯环等。

关于填料塔的计算方法和数据，过去较为紊乱，有的直接套用国外的规格数据，有的将所谓“转折点、乳化点”公式套用于正常的湍流操作状态中，等等。现根据工业使用的实际情况，整理成可供设计及生产部门使用的系统资料。

13.2.2 拉西环及填料塔的一般特性和设计

拉西环是最老最典型的一种填料。本身形状简单。常用的拉西环为外径与高相等的空心圆柱体（图2-1b）。其壁厚在机械强度允许的情况下，宜尽量薄。此外，国外还曾研究过所谓“短拉西环”，即高为直径的一半左右的圆柱环。国内曾对其性能作过测定，结果不如鲍尔环和矩鞍，而强度差易碎，故不作为推广使用的品种。

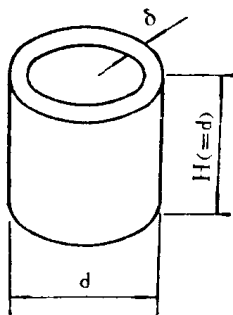


图 2-1(b) 拉西环

拉西环在塔内有两种填充方式：乱堆及整砌。乱堆填料装卸较便，但压力降大，一般直径50mm以下的填料用乱堆。整砌法适用于直径50mm以上的填料，压力降小。

拉西环的材质，最常用的为陶瓷。在处理碱液及高温操作等对陶瓷不适宜的情况下，亦可用金属拉西环。最近更有用塑料制作填料的。

(1) 基本特性数据

拉西环填料的特性数据主要有下列几项。

(1.1) 单位体积中的填料个数 n

对于乱堆填料来说， n 是一个统计数字，它与塔径、装填方法（干装填、充水装填等）、使用时间长短等均有关系。因此各种资料上的填料特性数据往往都有出入（一般在10~15%间）。表2-1至2-3中列出瓷环及钢环的一些推荐数据。当某些填料缺乏数据时， n 可用下式作近似估计^[1~3]：

对于乱堆拉西环，

$$n = 0.77/d^3 \quad (2-1)$$

对于整砌拉西环，

$$n = 0.98/d^3 \quad (2-2)$$

式中 n ——每立方米中的填料个数；

d ——填料外径，m。

式(2-1)及(2-2)只适用于塔径 $D > 10d$ 的情况。

(1.2) 比表面 a

单位体积的填料中的填料表面积称为比表面。

$$a = na_0 \quad (2-3)$$

式中 a ——比表面, m^2/m^3 ;

a_0 ——一个填料的表面积, $m^2/个$;

n ——填料个数, $个/m^3$ 。

对于外径及高相等 ($H = d$)、壁厚为 δ 的拉西环(图2-1),

$$a_0 = \pi dH + \pi(d - 2\delta)H + 2\left[\frac{\pi}{4}d^2 - \frac{\pi}{4}(d - 2\delta)^2\right] = 2\pi(d^2 - \delta^2)$$

$$\text{故} \quad a = 2\pi n(d^2 - \delta^2) \quad (2-4)$$

表2-1至2-3中列有各种拉西环的比表面数据。

对于薄壁拉西环 ($\delta \ll d$), 缺乏实际数据时, 比表面可用下式近似估计^[2]:

乱堆拉西环,

$$a = 4.8/d \quad (2-5)$$

整砌拉西环,

$$a = 6.2/d \quad (2-6)$$

(1.3) 空隙率 ε

空隙率系指干塔状态时, 塔的填料床层内净空间所占的分率。

$$\varepsilon = 1 - nv_0 \quad (2-7)$$

式中 v_0 ——一个拉西环的环体体积, m^3 。

在操作时, 由于填料壁上附有液体层, 故实际空隙率将小于上述的干空隙率。

ε 的数据列于表2-1至2-3中。

(1.4) 干填料因子 a/ε^3 及填料因子 ϕ

干填料因子 a/ε^3 (m^{-1}) 为表示填料流体力学特性的数群。

关于实测的填料因子 ϕ 值将在以后(13.2.2.(3)节中)另予讨论。

(1.5) 拉西环的特性数据表

目前一般资料上所列的瓷环特性数据多系转引自英美^[4,5]或苏联^[3]的书本上的, 其中有些规格不符合我国情况。在表2-1及2-2中凡直径16mm以上的瓷环一律按照国产规格^[6]重行推算其特性数据, 15mm以下的瓷环, 国内尚未有定型规格, 故仍参照一般常用资料^[3,4]提供一些设计参考数据。前已提及, 乱堆填料的特性数据本身是一个与很多因素有关的统计数字, 因此表中数值亦只能视为供设计计算采用的平均值。

除了常用的瓷环和钢环外, 有时还有用其他材质的, 例如石墨、塑料或有色金属, 石墨环的特性数据可大致参照表2-1及2-2, 金属环及塑料环(除堆积重度一项外)可大致参照表2-3。

(2) 泛点

(2.1) 填料塔内的流体力学特性

在逆流操作的填料塔内, 如果在对数坐标上标绘压降 ΔP 对气体速度 w 的关系, 并以不同的液体喷淋量 L ($L_1 = 0, L_2 < L_3$) 作为第三参数, 则可得如图2-2所示的流体力学关系。当干塔时 ($L_1 = 0$), 所得关系为一直线, 其斜率为 $1.8 \sim 2$, 即 $\Delta P \propto w^{1.8 \sim 2}$ 。当有液体喷淋

表 2-1 瓷拉西环的特性(乱堆)

外径 (d) mm	高×厚 (H×δ) mm	比表面 (a) m ² /m ³	空隙率 (ε) m ³ /m ³	个数 (n) m ⁻³	堆积重度 (γ _p) kg/m ³	干填料因子 (a/ε ³) m ⁻¹	填料因子 ^c (φ) m ⁻¹	备注
6.4	6.4×0.8	789	0.73	3,110,000	737	2,030	2,400	
8	8×1.5	570	0.64	1,465,000	600 ^a	2,170	2,500	
10	10×1.5	440	0.70	720,000	700	1,280	1,500	
15	15×2	330	0.70	250,000	690	960	1,020	
16	16×2	305	0.73	192,500	730	784	900	
25	25×2.5	190	0.78	49,000 ^b	505	400	400	
40	40×4.5	126	0.75	12,700	577	305	350	
50	50×4.5	93	0.81	6,000	457	177	220	
80	80×9.5	76	0.68	1,910	714	243	280	不常用

注: a 此数值偏小, 疑应为750~800kg/m³。

b 国内产品样本⁽⁶⁾中的数字为43,000, 似偏小, 现暂改作49,000, 以使所推算的其他数据比较合理。

c 根据国产瓷环的参数推测的数值。

表 2-2 瓷拉西环的特性(整砌)

外径 ^b (d) mm	高×厚 ^b (H×δ) mm	比表面 (a) m ² /m ³	空隙率 (ε) m ³ /m ³	个数 (n) m ⁻³	堆积重度 (γ _p) kg/m ³	干填料因子 (a/ε ³) m ⁻¹	备注
25	25×2.5	241	0.73	62,000	720	629	不常用
40	40×4.5	197	0.60	19,800	898	891	不常用
50	50×4.5	124	0.72	8,830	673	339	
80	80×9.5	102	0.57	2,580 ^a	962	564	
100	100×13	65	0.72	1,060	930	172	
125	125×14	51	0.68	530	825	165	
150	150×16	44	0.68	318	802	142	

注: a 2,580之数值系根据宜兴陶瓷厂样本所标数字⁽⁶⁾, 此值似偏大(应为2,000左右), 因而推算出来的比表面可能偏大, 空隙率可能偏小。

b 本表的瓷环尺寸, n及γ_p均系根据样本⁽⁶⁾, 各厂稍有不同。

表 2-3 钢拉西环的特性(乱堆)^{(3-5)b}

外径 (d) mm	高×厚 (H×δ) mm	比表面 (a) m ² /m ³	空隙率 (ε) m ³ /m ³	个数 (n) m ⁻³	堆积重度 (γ _p) kg/m ³	干填料因子 (a/ε ³) m ⁻¹	填料因子 ^a (φ) m ⁻¹
6.4	6.4×0.8	789	0.73	3,110,000	2,100	2,030	2,500
8	8×0.3	630	0.91	1,550,000	750	1,140	1,580
10	10×0.5	500	0.88	800,000	960	740	1,000
15	15×0.5	350	0.92	248,000	660	460	600
25	25×0.8	220	0.92	55,000	640	290	390
35	35×1	150	0.93	19,000	570	190	260
50	50×1	110	0.95	7,000	430	130	175
76	76×1.6	68	0.95	1,870	400	80	105

注: a 推测值。

b 钢拉西环国内尚未有统一的规格, 本表系参照常用薄钢板的规格编制的。

时, 则所得关系为一折线, 如ABCD及A'B'C'D'。在AB及A'B'段仍为直线, 且斜率为2 (对整砌填料则略小于2)。超过B (或B') 点则斜率显著上升, 表示塔内持液量不断增大。到达C点 (或C') 时, 则压降直线上升, 表示塔内已发生液泛现象。B及B'点称为载点, C及C'点称为泛点。

到泛点后的流体力学性能与填料特点有关。对于网体填料, 则一般首先在塔顶形成液体的连续相, 且压降急剧上升^[14]。对于一般的实体填料, 则塔内由下而上形成液体的连续相, 液面到达塔顶后, 事实上已变成气相为分散相的充液鼓泡塔的操作了 (CD及C'D'线的虚线部分)^[14, 22, 24]。有人曾对 $\phi 20\sim 38\text{mm}$ 的拉西环及弧鞍形填料进行测定^[23, 72], 并认为在虚线部分 $\Delta P \propto w^{0.8\sim 1.0}$ 。

目前一般认为填料塔的正常操作状态只到泛点以下为止。至于像以液相为连续相, 气相为分散相的充液填充塔, 则是属于另一类情况, 并采取其他结构措施来维持其稳定操作。

一般的填料塔设计均应在泛点以下操作 (对于一般的乱堆填料, 当每米高的填料层压降达到 $200\sim 250\text{mmH}_2\text{O}$ 左右时, 即产生液泛, 参见图2-4)。如果要求压降很稳定, 则宜在载点以下。但关于载点的规律性目前尚未充分阐明, 在很多场合下 (特别是在液量大时) AB与BC之间往往是渐变关系, 没有明显的转折点, 难以精确地计算确定之。而泛点则已有较准确的关联式, 因此在塔的设计中一般均先计算泛点速度 w_F 然后乘以负荷系数 (一般在 $0.6\sim 0.8$ 之间) 作为实际操作速度。

(2.2) 泛点速度的计算

关于填料塔的泛点速度, 过去研究者很多^[3~5, 8~12], 其数据基本上能用统一的方式加以关联, 可以作为设计计算之用:

$$\log \left[\frac{w_F^2}{g} \left(\frac{a}{\varepsilon^3} \right) \cdot \frac{\gamma_G}{\gamma_L} \cdot \mu_L^{0.2} \right] = 0.022 - 1.75 \left(\frac{L}{G} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\gamma_G}{\gamma_L} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (2-8)$$

式中 w_F ——泛点空塔气速, m/s ;
 g ——重力加速度, 9.81m/s^2 ;
 a/ε^3 ——干填料因子 (见表2-1~2-3), m^{-1} ;
 γ_G, γ_L ——气相及液相重度, kg/m^3 ;
 μ_L ——液相的粘度, cP ;
 L, G ——液相及气相的流量, kg/h 。

此关联形式最早为Sherwood及Holloway^[26]等所提出, 式2-8为Bain及Hougen^[9]的最后整理形式。其后苏联Илановский及Кафаров在1946年曾提出“可容许速度” w_0 的概念^[11], 在该最大速度下操作时, 开始拦液上涨, 但还未到液泛点。 w_0 按下式计算:

$$\log \left[\frac{w_0^2}{g} \left(\frac{a}{\varepsilon^3} \right) \frac{\gamma_G}{\gamma_L} \cdot \mu_L^{0.16} \right] = A - 1.75 \left(\frac{L}{G} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\gamma_G}{\gamma_L} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (2-9)$$

① 有的书上按原文直译为《最适宜速度》, 似欠妥, 今按资料[11]第14章的命名。

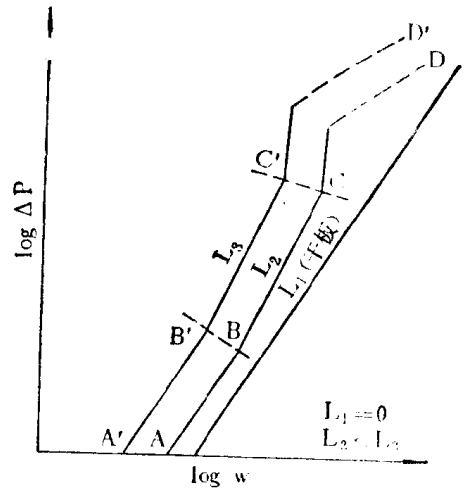


图 2-2 填料塔的流体力学特性