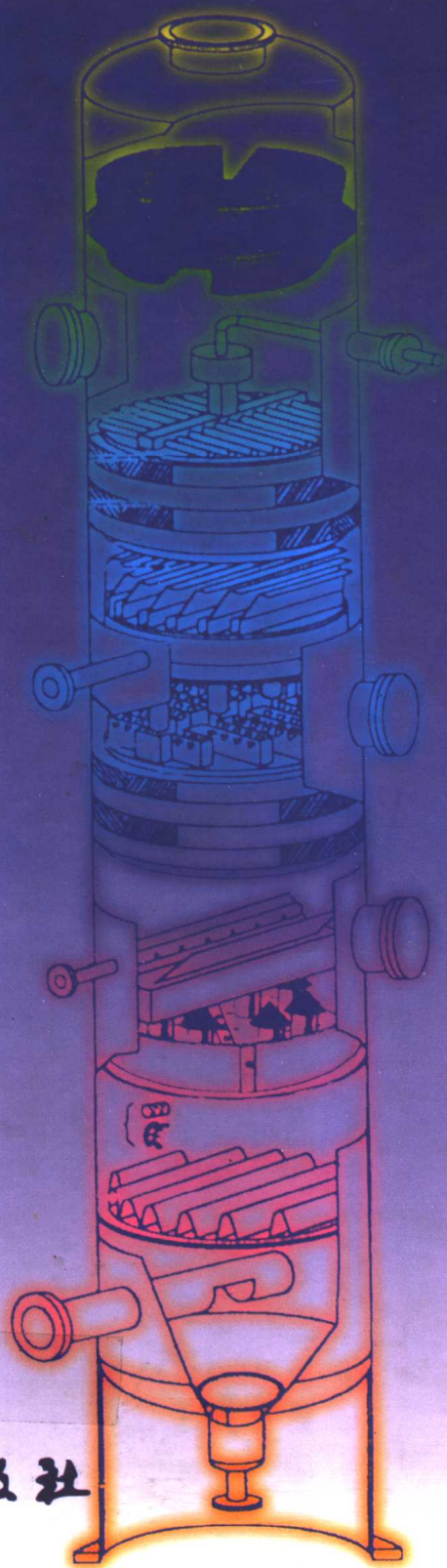


现代填料塔技术指南

王树楹 主 编



中国石化出版社

现代填料塔技术指南

王树楹 主编

中国石化出版社



内 容 提 要

本书总结了近年来蓬勃发展的填料塔技术,包括散装填料、规整填料、塔内件以及填料塔综合性能等内容。全书共分14章,涉及填料塔的基础理论、填料及塔内件的性能、填料塔的分析、设计及应用、塔的制造、安装及操作控制等内容。

本书内容力求全面、系统、新颖、实用。可供从事化工分离工程方面的广大工程技术人员、大专院校师生及填料生产厂家参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代填料塔技术指南/王树楹主编. -北京:中国石化出版社,1998
ISBN 7-80043-692-6

I. 现… II. 王… III. 填料塔-指南 IV. TQ053.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 14137 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)64241850

金剑照排厂排版

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

787×1092 毫米 16 开本 25.25 印张 646 千字印 1—2000

1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷

定价:55.00 元(精)

开发填料塔新技术
提高化工生产水平

李勇武

一九九二年三月

石油和化学工业局局长李勇武题词

040104

《现代填料塔技术指南》编写委员会

顾 问：余国琮 卢焕章

主 任：汤洪良

副主任：徐静安 萧成基

委 员：(以姓氏笔划为序)

于鸿寿	王树楹	卢焕章	申同贺
刘乃鸿	李锡源	李 鑫	余国琮
陈大昌	费维扬	袁孝竞	徐静安
魏建华			

主 编：王树楹

副主编：魏建华 刘乃鸿

策 划：申同贺

《现代填料塔技术指南》编写人员

王树楹(天津大学)	第 1、6、7 章
李锡源(天津大学)	第 2、3 章
魏建华(原化工部上海化工研究院)	第 4、5 章
张丽雅(原化工部上海化工研究院)	第 4、5 章
蓝仁水(天津市新天进科技开发公司)	第 6、7、12 章
袁孝竞(天津大学)	第 8、13 章
于鸿寿(原化工部第六设计院)	第 9、10 章
费维扬(清华大学)	第 11 章
刘乃鸿(原化工部上海化工研究院)	第 14 章

序

在化工分离过程中,塔设备的采用一直是主要的和首选的。虽然塔设备的体积较大,对某些过程(如蒸馏)能耗比较高,但由于它在技术上已相当成熟和能连续处理大量物料,因而长期以来在化工生产中被广泛采用。一些新兴的分离技术,如膜分离等,有着广泛的发展前途,但普遍认为在今后一段相当长的时期内,仍然不能代替塔设备的主导地位。因此,高效能塔设备的推广应用仍然是当务之急。

填料塔早已广泛应用于蒸馏、吸收、解吸、萃取、洗涤、冷却等过程。70年代后,随着人们对填料塔研究的不断深入,蒸馏技术与相关学科的发展及工业生产的推动,特别是规整填料的成功推广和填料塔放大问题的适当解决,极大地促进了填料塔的工业应用,并在低压操作、对热敏物系的分离及节能等方面显示了其特有的优越性。

目前,填料塔技术在基础研究与应用方面有了很大进展。如气液相平衡、填料塔内流体流动的模拟计算、非平衡级概念的应用、气液两相传质机理的研究、填料塔动态特性和生产控制都已取得了较大的进步。对填料塔的性能、结构等也同时进行了较为系统的实验研究,获得了丰富的数据和研究成果,为推动填料塔的工业应用打下了坚实的基础。在国内,填料的推广应用及对旧塔的改造等方面也已取得了良好效果和显著的经济效益。因而可以说,填料塔技术现正处在蓬勃发展的时期。

尽管随着填料塔的推广应用,人们对填料塔的认识也越来越深刻,但由于填料塔内部流体流动及传质过程的复杂性,致使填料塔的设计仍停留在经验与半经验的水平,如传质系数或等板高度的确定、一些流体力学性能的估算等,都有待于进一步加强基础研究,尽可能地摆脱经验的束缚。同时,随着生产的不断发展,仍会有许多新的问题出现,如生产大型化所引起的问题、进一步优化节能、填料塔的新操作方法、高效填料与复合型的开发以及填料塔应用范围的扩展等仍需探索。因此,有关填料塔技术的进一步研究不但不能削弱,而是需要加强,以迎接新的挑战。

本书由国内许多填料塔专家编写,具有很高的权威性。本书不同于已出版的类似手册及书刊,它汇集了当前众多类型的规整填料、散装填料及塔内件的最新资料,并提供了一些应用实例,集中地代表了填料塔在国内外各方面的现代技术水平,因而无论是在生产、设计、科研和教学等方面本书都有极高的参考价值,并会大大方便填料塔的设计与使用。相信本书将对我国填料塔技术的推广应用,促进国民经济发展发挥重大作用和作出贡献。

中国科学院院士
天津大学化学工程研究所教授
余国琮

1997年12月

前 言

填料塔是一种重要的气液传质设备,自本世纪 50 年代开始,国外先后出现了许多新型填料,到了 70 年代后,又有了新的飞跃,形成当前不仅在小塔,而且在大塔上也能与板式塔分庭抗礼的局面。在我国,过去化工分离装置中的填料塔一般均用传统的拉西环,到了 70 年代中,国内开始组织有关单位进行现代新型填料的研究开发及应用工作。多年来,在基础研究和工业应用方面,均有很大的进展,为新型填料塔的设计、放大、研究及创新,奠定了基础。为了专业人员的参与及应用的需要,原化工部科技局及化工科技研究总院先后组织编写了《新型工业塔填料应用手册(散装填料部分)》(1988 年)及《工业塔新型规整填料应用手册》(1993 年)。两书搜集并汇总了新型填料的许多有用数据及资料,受到读者的欢迎。鉴于近年在填料塔技术方面又有了不少新的进展,科技人员迫切需要有一本更加系统全面的现代填料塔技术方面的专著,并多次在有关会议上提出了要求。为此,原化工部科技研究总院着手组织编撰了本书。

本书的内容,覆盖了前已出版的两部应用手册,增加了许多新的数据、图表及资料。全书特别注意从基本原理到工业应用的系统性和完整性,还包括了许多新的内容,如液液萃取系统的填料塔、综合性能评价、安装操作及控制等,特别是填料塔的塔内件,对于塔的性能、效率及有效放大,至关重要,本书对此设专章详述,其中包括了编者的多年研究成果和实践经验,都是很有特色的。

填料塔的选型设计及应用,涉及许多复杂的具体因素。同一种填料,其适用的场合因条件而异;同一物系,在不同条件下,可能宜用不同的选型。因此本书编写中尽可能阐明基本原理,又列出较多的实例,俾读者能针对具体情况作具体分析,避免照套,这也是本书的一个特点。

本书组织了国内许多有经验的专家编撰、审阅和讨论。特别是主编王树楹教授,将全书 14 章初稿汇总、修裁、整编成书,工作极为繁重艰巨,贡献至钜。此外,申同贺等同志以及上海化工研究院、天津大学、清华大学、原化工部第六设计院和中国石化出版社的有关同志们,大家出于对发展我国填料事业的热诚愿望,在繁忙的工作中克服困难、团结合作、大力支持,终于完成了本书,为化工界的科技人员做了一件有益的事。作为一个热心的读者,在此,我谨向他们表示衷心感谢。

萧成基

1997. 12

编 者 的 话

填料塔技术近二十年发展迅速,应用广泛。为适应这种新的形势,原化工部科学技术研究总院曾两次组织编写有关塔填料方面的手册,并先后出版了由李锡源教授主编的《新型工业塔填料应用手册(散装填料部分)》及由刘乃鸿高级工程师主编的《工业塔新型规整填料应用手册》。这两本书全面地总结了散装填料及规整填料国内外的的发展及应用,对我国工业生产及技术进步起到了积极的作用。为了全面、系统地总结填料塔技术,原化工部科学技术研究总院组织编写了这本《现代填料塔技术指南》。顾名思义,其内容既包括填料塔的基础知识,又包括填料塔的设计与应用,是一本集散装填料、规整填料、塔内件及由它们所构成的填料塔综合技术于一书的系统性读物。在编写过程中,编者力求使本书内容全面、系统、新颖、实用,尽可能地将有关填料、塔内件及填料塔方面的资料及最新成果,包括编者多年来的研究成果及实践经验汇编进去。但由于多方面的原因,仍有很多不足之处。例如资料来自各处,各自整理方法不同,一时难以统一;各章密切相关,虽尽力避免重复,但难舍之处也会存在;有关应用成果实例,因资料来源所限,难以详细归类整理;此外填料及塔内件的标准化问题,本书也未涉及。所有这些问题,有待再版时改进。

原化工部科学技术研究总院非常重视这本书的编写,特别组成了《现代填料塔技术指南》编写委员会,由该院院长汤洪良高级工程师任编委会主任,原化工部上海化工研究院院长徐静安高级工程师、原化工部北京化工研究院副总工程师萧成基高级工程师任副主任。还特请中科院院士天津大学余国琮教授、原化工部寰球化学工程公司卢焕章教授任顾问。先后召开了三次编委会会议,为本书的编写与出版,起了决定性的作用。原化工部科学技术研究总院申同贺高级工程师出色的组织工作为本书的问世做出了贡献。原化工部科学技术研究总院李鑫高级工程师、原化工部上海化工研究院陈大昌高级工程师为本书的编写提出了很多宝贵意见。余国琮教授、萧成基高级工程师自始至终都在关心本书的编写工作并分别为本书写了序及前言。天津大学化学工程研究所讲师曾爱武博士、博士生张红彦同学参加了全部书稿的整理及校对工作。在编写过程中,还特别得到了有关高等院校、科研院所、设计单位以及生产厂家的大力支持与鼓励。特在此一并致谢。

鉴于编者水平所限,书中错误、不妥之处及遗漏在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第一章 填料塔综述	1
第一节 填料塔发展概况.....	1
第二节 填料与塔内件.....	4
第三节 填料塔的研究与应用.....	6
参考文献.....	8
第二章 填料塔的流体力学与传质	10
第一节 填料塔内的气液流动过程分析	10
第二节 填料塔内传质过程	17
参考文献	32
第三章 散装填料	33
第一节 环形填料	33
第二节 鞍形填料	53
第三节 环鞍形填料	57
第四节 其他散装填料	71
参考文献	81
附录一 瓷质与塑料填物理化性能指标	82
第四章 规整填料	84
第一节 概述	84
第二节 金属板波纹填料	86
第三节 非金属型板波纹填料.....	108
第四节 网波纹填料.....	115
第五节 其他规整填料.....	140
参考文献.....	157
第五章 填料表面处理	160
参考文献.....	162
第六章 塔内件	163
第一节 液体分布装置.....	163
第二节 填料压紧器与床层定位器.....	180
第三节 填料支承装置.....	183
第四节 液体收集再分布装置及液体进料装置.....	186
第五节 气相入塔装置及分布装置.....	193
第六节 除雾沫装置.....	195
第七节 特殊塔内件——填料塔板.....	198
参考文献.....	201
第七章 填料塔综合性能评价	203
第一节 板式塔与填料塔的性能比较.....	203
第二节 填料的选择与评价.....	211

参考文献	213
第八章 填料蒸馏塔的设计	215
第一节 蒸馏过程的模拟	215
第二节 常规蒸馏过程概述	216
第三节 不同操作压力下填料蒸馏塔的性能特点	218
第四节 填料蒸馏塔的结构设计	220
第五节 散装填料塔的设计计算	223
第六节 规整填料塔的设计计算	228
参考文献	235
第九章 填料吸收塔的设计	236
第一节 吸收过程概述	236
第二节 填料吸收塔的设计	239
第三节 设计举例	246
参考文献	252
第十章 填料冷却塔与增湿塔的设计	253
第一节 冷却塔与增湿塔概述	253
第二节 填料冷却塔与增湿塔的设计	256
第三节 冷却塔的设计及计算示例	260
参考文献	270
第十一章 填料萃取塔的设计计算	271
第一节 设计原理	271
第二节 设计计算步骤	278
第三节 设计举例	289
参考文献	291
第十二章 填料塔的制造、安装、操作及故障处理	292
第一节 填料塔的制造与安装	292
第二节 填料塔的开工和停工	299
第三节 填料塔的操作	300
第四节 填料塔常见故障诊断与处理	317
参考文献	320
第十三章 填料测试技术	321
第一节 填料几何特性参数的测定	321
第二节 填料流体力学性能测试	324
第三节 填料传质性能测试	328
第四节 非金属填物理化性能测试	339
参考文献	340
第十四章 填料塔工业应用实例	341
第一节 散装填料塔工业应用实例	341
第二节 规整填料塔工业应用实例	353
第三节 国外应用概况	382

第一章 填料塔综述

在炼油、石油化工、精细化工、食品、医药及环保等部门，塔器均属量大面广的重要单元设备，其投资一般占投资总额的 20% 左右，有些甚至高达 50%。塔器广泛应用于蒸馏、吸收、萃取、洗涤、传热等单元操作中。因此塔器的研究一直是国内外学者普遍关注的重要议题^[1]。

塔器按其结构可分为两大类：板式塔和填料塔。板式塔的研究起步较早，其流体力学和传质模型比较成熟，数据可靠。尽管与填料塔相比效率较低、通量较小、压降较高、持液量较大，但由于结构简单、造价较低、适应性强、易于放大等特点，因而在 70 年代以前的很长一段时间里，塔板的开发研究一直处于领先地位。然而 70 年代初期出现的世界性能源危机迫使填料塔技术在近 20 年来取得了长足的进展。由于性能优良的新型填料相继问世，特别是规整填料及新型塔内件的不断开发应用和基础理论研究的不断深入，使填料塔的放大技术有了新的突破，改变了以板式塔为主的局面。美国著名学者 Fair 教授认为最近十年蒸馏装置的最新动态是气液接触的填料塔逐步取代板式塔；规整填料作为低压降下具有高传质效率的装置倍受青睐^[2]。国际著名蒸馏专家、英国阿斯顿(Aston)大学的 K. E. Porter 教授 1989 年在天津大学讲学时指出：“近十五年来，在蒸馏和吸收领域最突出的变化是新型填料，特别是规整填料在大直径塔中开始广泛应用，这标志着塔填料、塔内件及填料塔的综合技术进入了一个新的阶段”^[3]。在我国，随着石油化工的不断发展，传质分离工程学的研究日益深入，使填料塔技术及其应用进入了一个崭新的时期，其工业应用已与发展中国家并驾齐驱，进入世界先进行列。

第一节 填料塔发展概况

填料塔由填料、塔内件及筒体构成，如图 1-1 所示。

填料分规整填料和散装填料两大类。塔内件则有不同形式的液体分布装置、填料固定装置或填料压紧装置、填料支承装置、液体收集再分布装置与进料装置及气体分布装置等。筒体有整体式结构及法兰连接分段式结构。对于 $\phi 800\text{mm}$ 以上的大塔一般采用整体式结构，填料及所有塔内件从人孔送入塔内组装。对于 $\phi 800\text{mm}$ 以下的小塔，筒体为分段式结构，各段用法兰连接成为一体，填料及所有塔内件均从筒体法兰口装入塔内。

填料塔经过了一个曲折的发展过程。它作为气液传质设备虽然有 100 多年的历史，但直到 1914 年拉西环(Rashing Ring)填料的出现才使填料塔进入了科学发展的轨道^[4]。在这以前，人们只着眼于填料塔的应用，没有定型的填料，更谈不上科学的规律。早期的填料塔理论研究开始于 1920~1930 年间，它为以后的设计及应用打下了基础。至本世纪 50 年代，填料塔一直是散装填料的一统天下，填料从拉西环开始，继而迅速出现了鲍尔环等许多新型填料，但由于填料塔的“放大效应”，使填料塔的应用仅限于 $\phi 500\text{mm}$ 以下的小塔。1950 年以后，填料塔进入了缓慢发展时期，在这个时期内，人们注意了对塔内件的研究，力图解决填料塔的放大问题，但由于各种板式塔的出现及其成功应用，使填料塔受到了冷落。到本世纪

70年代世界性的能源危机后,为了节能的目的,才使填料塔得到蓬勃发展。这个期间虽然出现了性能优良的金属环矩鞍(IMTP)散装填料塔,但发展较快的却是以板波纹填料塔为主的规整填料塔。同时,塔内件的研究与应用也得到了相应的发展,从而使填料塔的“放大效应”问题得以基本解决。

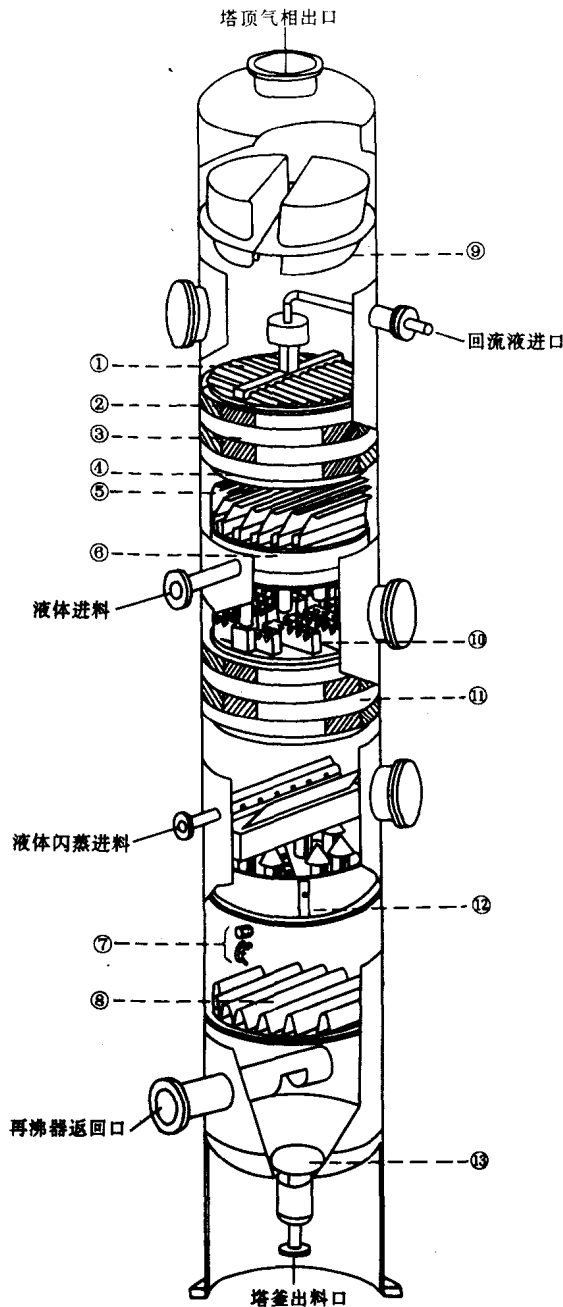


图 1-1 填料塔示意图

- 1—排管式液体分布器; 2—床层定位器; 3—规整填料;
4—填料支承栅板; 5—液体收集器; 6—集液槽;
7—散装填料; 8—填料支承装置; 9—除雾器;
10—槽式液体分布器; 11—规整填料;
12—盘式液体分布器; 13—防涡流器

在我国虽然早已开始了填料塔的研究工作,但过去进展缓慢,至60年代初期,由于我国重水生产,急需蒸馏法浓缩重水,国家科委及化工部组织了有关院、所及高等学校进行了填料塔的研究。多管式高效填料精馏塔浓缩重水的开发成功,标志着我国对填料塔的研究与应用登上了一个新台阶。随后,由于我国石油化工的发展及节能的需要,规整填料、新型塔内件及高效规整填料塔的研究与应用得到了迅猛的发展。与此同时,散装填料也得到了相应的发展。到目前为止,填料塔及塔内件的研究、各种类型填料的生产遍及全国各地。各种填料的总产量每年超过 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$,居世界各国之首。

二十多年来,填料塔以其优良的综合性能不断推广应用于工业生产中,改变了板式塔长期占据统治地位的局面。与板式塔相比,新型的填料塔性能具有如下特点:

● 生产能力大

板式塔与填料塔的流体流动和传质机理不同。板式塔的传质是通过上升的蒸气穿过板上的液池来实现。塔板的开孔率一般占塔截面积的 $8\% \sim 15\%$,其优化设计要考虑塔板面积与降液管面积的平衡,否则即使开孔率加大也不会使生产能力提高。填料塔的传质是通过上升的蒸气和靠重力沿填料表面下降的液体逆流接触实现。填料塔的开孔率均在 50% 以上,其空隙率则超过 90% ,一般液泛点都较高,其优化设计主要考虑与塔内件的匹配,若塔内件设计合理,填料塔的生产能力一般均高于板式塔。

● 分离效率高

塔的分离效率决定于被分离物系的性质、操作状态(压力、温度、流量等)以及塔的类型及性能。一般情况下,填料塔具有较高的分离效率,但其效率会随着操作状态的变

化而变化。操作状态可用流动参数表示^[5]，其定义为：

$$FP = \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (1-1)$$

式中 L ——塔内液相流率，kg/h；

G ——塔内气相流率，kg/h；

ρ_L ——塔内液相密度，kg/m³；

ρ_G ——塔内气相密度，kg/m³。

当 $FP < 0.03$ 时，塔的操作处于真空或低液量下，这时填料塔的分效率明显高于板式塔；当 $FP > 0.3$ 时，塔的操作处于高压或高液量下，这时板式塔占有一定的优势，分效率较高。这就是说，真空或常压操作，填料塔具有较高的分效率，而在高压下操作，板式塔具有较高的分效率。但大多数的分操作还是处于真空及常压下，况且以 FP 的大小作为判据并不是绝对的。如果按高压操作的特殊性设计填料塔亦可获得较高的分效率，在这方面有不少成功的例子。

应当指出，现有的各种板式塔包括最常用的筛板塔及浮阀塔，每米理论级数最多不超过 2 级，而工业填料塔每米理论级数最多可达 10 级以上，因而对于需要很多理论级数的分操作而言，填料塔无疑是最佳的选择。

● 压力降小

填料塔由于空隙率较高，故其压降远远小于板式塔。一般情况下，塔的每个理论级压降，板式塔为 0.4~1.1kPa (3~8mmHg)；散装填料为 0.13~0.27kPa (1~2mmHg)；规整填料为 0.01~1.07kPa (0.01~0.08mmHg)^[21]。一般情况下，板式塔压降高出填料塔 5 倍左右。压力降的减小意味着操作压力的降低，在大多数分物系中，操作压力下降会使相对挥发度上升。这对于真空操作尤为重要。例如某塔当操作压力(塔顶绝压)为 2.7kPa (20mmHg)、理论级数为 20 时，使用每个理论级为 0.7kPa (5mmHg) 的板式塔，塔的平均压力为 9.3kPa (70mmHg)。当改用每个理论级压降为 0.1kPa (1mmHg) 的填料塔时，则塔的平均压力只有 4kPa (30mmHg)，与平均压力相差 2 倍，这将使相对挥发度大幅度提高，对分十分有利。对于新塔可以大幅度降低塔高，减小塔径；对于老塔可以减小回流比以求节能或提高产量与产品质量。低压降的塔对于实现热泵精馏和双效蒸馏等节能操作更为有利。

● 操作弹性大

操作弹性是指塔对负荷的适应性。塔正常操作负荷的变动范围越宽，则操作弹性越大。由于填料本身对负荷变化的适应性很大，故填料塔的操作弹性决定于塔内件的设计，特别是液体分布器的设计，因而可以根据实际需要确定填料塔的操作弹性。而板式塔的操作弹性则受到塔板液泛、雾沫夹带及降液管能力的限制，一般操作弹性较小。

● 持液量小

持液量是指塔在正常操作时填料表面、内件或塔板上所持有的液量，它随操作负荷的变化而有增减。对于填料塔，持液量一般小于 6%，而板式塔则高达 8%~12%。持液量可起到缓冲作用，使塔的操作平稳，不易引起产品的迅速变化。但对于开工时间则较大的影响，这对于难分物系的分、间歇蒸馏及经常处于开停工状态的分离操作是一个重要的问题。持液量大，对于难分物系的分，由于相对挥发度很小，达到塔的各部稳定组成的时间就更长，故开工时间很长。对于间歇蒸馏或经常处于开停工状态的分离操作，即便相对挥发度不小，持液量大也会使开工时间加长，会大大增加操作周期及操作费用。对于热敏物系的分

操作,持液量大意味着停留时间的加长,这对于防止热敏物料的分解或聚合也是不利的。

但填料塔也有一些不足之处,如填料造价高;当液体负荷较小时不能有效地润湿填料表面;不能直接用于有悬浮物或容易聚合的物料;对需要安装中间再沸器或多级出料等复杂精馏不太适合等。此外,填料塔用于高压精馏,由于轴向返混大而导致效率低,因此若遇到上述情况,需要设计特殊的填料塔。

第二节 填料与塔内件

填料是填料塔的核心构件,它提供了气液两相接触传质与换热的表面,与塔内件一起决定了填料塔的性能。目前,填料的开发与应用仍是沿着散装填料与规整填料两个方向进行。

一、散装填料

最初的填料可以追溯到焦炭、石块之类不定形物的原始阶段。1914年拉西环(Rashing Ring)填料的出现是填料塔的一个重大突破。拉西环是具有内外表面的环状实壁填料,与原始填料相比,它较大的表面积,但当横放时,内表面不易被液体润湿。1948年德国出现了被称为第二代产品的鲍尔环(Pall Ring)填料,开始了壁上开孔、环内带有舌片的环形填料的新纪元。此后又出现了改进型鲍尔环(Hy-Pak)和阶梯环填料(CMR)。阶梯环的高径比仅为0.3,重心低,在随机乱堆过程中具有一定程度规则排列的特点,因而阻力小,通量大,性能优良。开孔环状填料的环形表面开有窗口,环内带有舌片,这样增加了气相的湍动和液相的润湿。人们在对拉西环的研究中观察到液体沿拉西环表面流下时的再分布性能很差,于是在30年代中期出现了贝尔鞍形填料(Bell Saddles)及后来的Intalox Saddles鞍形填料,它们的液体分布性能优于环状填料,但通量稍小些。1978年美国Norton公司推出了金属环矩鞍填料(IMTP),巧妙地将环形结构和鞍形结构结合在一起,集中了开槽填料鲍尔环、鞍型填料、低高径比填料阶梯环三者的优点于一身,具有低压降、高通量、液体分布性能好、传质效率高、操作弹性大等优良的综合性能,在现有的工业散装填料中占有明显的优势,它的出现被认为是散装填料的一个突破,被称为是第三代产品的标志^[6]。

近年来在散装填料领域特别是塑料材质的散装填料,其选型趋向格子结构设计,这主要由塑料诺派克环(Nor-Pak Ring)带了头。通过系统的研究,这种填料的形式被认为是一种优化结构。紧随其后的是塑料、金属和陶瓷哈弗罗环(Hiflow Ring)。通过精馏、吸收和解吸的大量实验研究,表明格子结构填料是高性能的填料;同时也表明它们可以成功地用于热敏物系分离以及那些需要很多理论级及能耗较多的场合^[7]。

值得一提的还有高效散装填料。在工业生产或实验室研究中,常常需要对沸点非常接近的难分离物系进行分离。有时有些系统的分离难度并不高,但也希望用较短的填料将其分开。这都要求分离效率极高的高效散装填料。高效散装填料的尺寸相当小,一般只有1.5~10mm,比表面积一般在1000m²/m³以上。高效散装填料一般采用丝网、细金属丝刺孔金属片等制造。由于毛细管作用填料表面润湿性能相当好。常用的高效散装填料有θ网环、鞍型网、压延孔环、螺线圈、网带卷等^[8]。高效散装填料的每米理论级数从数块到上百块不等^[9]。高效散装填料的分离效率虽然非常高,但其放大效应非常明显,处理量也非常小,加上价格昂贵,一般不在工业中应用。

近年来,由于精密精馏应用的范围扩大,采用此项技术的生产过程日益增多,促使高效精密填料塔向大型化发展。塔的设计思想也由主要追求高分离效率到追求高综合效益,即分

离效率和处理能力都要同等重视。基于这一思想,发展了新型多管式高效填料塔^[10]。我国在工业用散装填料方面也作出了很大的贡献,共轭环及扁环的开发扩大了散装填料的应用范围。

二、规整填料

在散装填料发展的同时出现了规整填料。60年代以后,生产规模大型化要求具有大流量,能改善液体均匀分布,以提高分离效率及克服放大效应,降低填料层阻力及持液量,以起到节能效果。规整填料在这方面有独特的优点,因此各类规整填料应运而生。规整填料在整个塔截面上,几何形状规则、对称、均匀。它规定了气液流路,改善了沟流和壁流现象,压降可以很小。在相同的能量和压降下,与散装填料相比,可以安排更大表面积,因此效率高。由于其结构的规整性,合理的设计可以做到几乎无放大效应。经过短短的二十几年已经形成了比较完整的规整填料系列。

1937年出现的第一种规整填料是斯特曼(Stedman)填料和随后出现的司帕雷派克(Spraypak)填料都属于单元接触类型填料。以后,相继开发了卷带型填料如古德洛(Goodloe)填料、麦特派克(Metpak)填料、栅格型填料如格里奇(Gritsch)填料、金属薄片型填料派如纳派克(Panapak)填料、颗粒型规则排列填料、苏尔寿金属丝网波纹填料(Sulzer Gause Packing)等。

现代规整填料的奠基者应首推瑞士苏尔寿公司(Sulzer Brother LTD)^[11]。60年代该公司开发出了金属丝网波纹填料,该填料具有较高的每米理论级数和较低的压降,但其缺点是造价较高,不宜用于含固体杂质的物系中。1977年苏尔寿公司又推出了板片波纹型的 Mellapak 填料,因其造价较低、效率较高、压降较小、不易堵塞的优点而获得了大范围的推广应用。此后规整填料的研究十分活跃,新品种层出不穷。Kuhni 公司的 Rombopak、Montz 公司的 Montz、Glitsch 公司的 Gempak、Norton 公司的 ISP(Intalox Structured Packing)、Jaeger 公司的 Maxpak、Germania 公司的 Pyrapak、Rasching 公司的 Ralu-pak 等先后出现,Koch 公司则将 Sulzer 公司转让的 Mellapak 技术更名为 Flexipac,新近日本三菱商社推出了 Mc-pak。这些填料彼此类似,多以 Mellapak 为雏形。Sulzer 公司前几年推出了可用于化学反应器的 KATAPAK 填料,是以双层丝网制成的波纹填料,在丝网夹层内装有催化剂。最近 Sulzer 公司又开发了优流(Optiflow)填料(多通道规整填料)。规整填料中还有一种格栅填料,适用于物料较脏的场合,如减压塔脏洗段等。应用较广的有 Koch 公司的 Flexigrid、Glitsch 公司的 Glitsch-grid、Nutter 公司的 Snap-grid 等。这些填料的特点是具有较低的压降、较高的通量和较高的效率。

国内在规整填料方面的工作也取得了很大的成绩。除对原有的金属丝网波纹填料及板波纹填料进行实验及推广应用外,还相继开发了多种不同类型的规整填料。以 Unapak 命名的脉冲规整填料、碳钢渗铝板波纹填料、压延板波纹填料、板花规整填料、LH 型规整填料等^[12]都在工业上得到了成功的应用。

三、塔内件

塔内件包括液体分布装置、床层固定装置或床层压紧装置、填料支承装置、液体收集再分布和进料装置以及气体分布装置等。一座性能良好的大型填料塔,填料本身的高性能固然重要,但与之匹配的塔内件,尤其是液体分布器和气体分布器也是至关重要的。否则填料的高性能就不能得以充分发挥,特别是对于大直径、多侧线、浅床层塔器,气液分布往往是成败的关键。不良的液体分布可能使填料的性能下降 50%~70%^[13]。

与板式塔相比,填料塔对液体的不均匀分布更为敏感。液体在填料塔内的分布性能以及

最终的填料性能在很大程度上依赖于液体的初始分布。不均匀分布可导致填料效率的降低,特别是对规整填料等低压降填料。而且,当塔具有很高的填料层高度、很高的填料比表面积及很高的填料效率时,液体不均匀分布的负面效应更大。

每种填料都具有一种液体自然流分布的能力。当初始分布比自然流分布好时,液体沿填料下降时会逐渐变为自然流分布;当初始分布较差时,也会慢慢转变为自然流分布。Albright证明液体由优于自然流分布转变为自然流分布要比由劣于自然流分布向自然流分布的转变快得多^[14]。

填料塔液体分布器设计的好坏,直接影响液体的均匀分布。良好的液体分布器应当具备均匀分布液体、气体通过的自由截面积大、阻力小、操作弹性大、不易堵塞、不易造成雾沫夹带和发泡、易于制作等优点。目前,对液体的初始分布器和再分布器的研究,相对来说较多^[15~18],也较为充分、成熟。现在已发展有多种形式,有排管式、槽式、盘式、喷射式等。液体从分布器中流出的形式有孔流型、溢流型、喷洒型等。可以根据工程实际需要进行选择。

填料塔内气体分布的研究远不如液体分布的研究来得透彻。气体流动性能远较液体为大,气相的横向混合速率至少3倍于液相^[19],在填料层内气体流道的曲折性以及其形状的多变性给研究增加了困难。气体入塔的分布装置,对于小塔并不重要,因为小塔气体易分布均匀。随着大空隙率、低压降填料的开发,以及大直径、浅床层填料塔的推广应用,气体分布问题已日益受到重视。气体分布不均匀会造成填料层内气液相分流,使分离效率严重下降^[20]。对直径大于3m的塔,必须考虑气体分布装置,气体在塔内一旦均匀分布,就能一直维持均匀分布,无须设置气体再分布器。

除了气体和液体的分布装置外,其他塔内件的设计也不可忽视。如填料紧固装置设计安装不当,会使床层发生变化甚至使填料流失;填料支承装置不合理,会降低塔的生产能力;液体收集再分布及进料装置有问题时,不但直接影响气液分布,还会影响浓度分布。总之,所有塔内件都是为了使气液更好地接触,以发挥填料塔的最大效率和最大生产能力。

第三节 填料塔的研究与应用

一、填料塔的研究

近几十年来,国内外学者对填料塔进行了大量的研究。主要集中在下列几个方面:

1. 优化填料结构,开发多种规格和材质的高效率、低压降、大通量的填料

散装填料包括金属、塑料、陶瓷阶梯环填料(CMR)和金属环矩鞍填料(IMTP)等,规整填料包括网波纹填料、板波纹填料等。其中苏尔寿(Sulzer)公司在ACHEMA'94上推出的规整填料Optiflow引起了人们广泛的关注^[21]。另外,国内外还有部分学者试图把板式塔与填料塔两者结合起来,构成了复合塔^[22,31]。

2. 对塔内件进行优化匹配

一方面根据塔内各段的不同分离要求和两相负荷沿塔高的分布来选择最合适的填料并优选其结构参数;另一方面是合理地设计气体、液体分布器等塔内构件。一个优化匹配良好的填料塔对于顺利开车和运行是绝对必要的。

3. 对填料层内液体的流动与分布进行研究

众多学者对这个问题进行了大量的研究,其中包括:Tour和Lerman用随机游动机理解释的填料层中的液体滴流流动^[23];Cihla和Schmidt推导出的著名的径向扩散模型^[24];Gunn