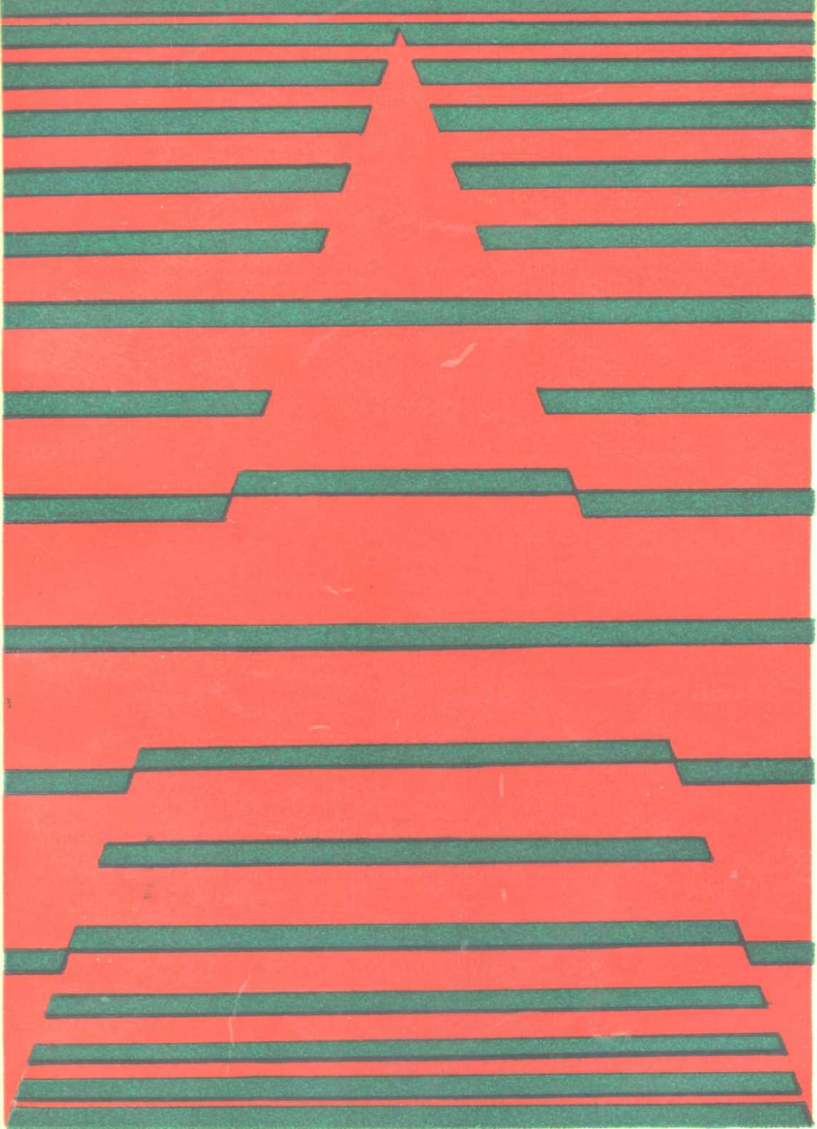




填料塔分析与设计

〔德〕莱恩哈特·毕力特 著

化学工业出版社

填料塔分析与设计

〔德〕莱恩哈特·毕力特 著
天津大学化工分离与新型填料开发中心 译
天津大学化学工程研究所

化学工业出版社

(京) 新登字 039 号

内 容 提 要

本著作扼要评估了不同几何结构填料的性能, 并提出了填料塔中流体力学与传质的新关联, 其可靠性、权威性已由同行业实践所证实。全书简明扼要, 具有很强的实用性和指导性, 愿从事化学工业或相关工业的工程师和研究者及教学人员从中获益。

Reinhard Bille:

Packed Column Analysis and Design

Ruhr University Bochum, 1989

填料塔分析与设计

天津大学化工分离与新型填料开发中心 译
天津大学化学工程研究所

责任编辑: 刘小蘋

封面设计: 季玉芳

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号)

化学工业出版社印刷厂印刷

东升装订厂装订

新华书店北京发行所经销

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $5\frac{1}{4}$ 字数 118 千字

1993 年 11 月第 1 版 1993 年 11 月北京第 1 次印刷

印数 1—2000

ISBN 7-5025-1144-X/TQ · 666

定 价 4.00 元

中 译 本 前 言

近来在化工及其类似工业的生产装置中,对各种填料的需求正在上升。它们主要应用于热分离过程,尤其是精馏、吸收和解吸等过程,也可应用于直接传热过程。另一个非常重要且日益广泛应用的场合,就是环保技术中的废气或污染水的处理。

目前市场上开发和提供的各种花样繁多的填料说明了这一形势,其中包括散装填料和规整填料。鉴于这一事实,负责实践的工程师们在实际应用时常常会遇到困难,在选择最佳填料时,特别感到缺乏足够的填料性能数据以进行设计计算。

本著作扼要评估了不同几何结构填料的性能,并提出了填料塔中流体力学与传质的新关联,其可靠性已由许多实验研究所证实。

作者非常感谢其同行天津大学化学工程研究所所长余国琮教授,他是一位化工分离技术领域的著名专家,他选择了这本小册子并推荐译成中文。特别还要感谢王树楹教授、袁孝竞教授等专家进行了翻译工作。作者同样也希望通过这些先生们的出色工作,进一步促进我们之间的科技联系。

毕力特 (R. Billet)

1992 年 1 月于波鸿 (Bochum)

中译本序言

1991年6月我在德国参加第四届世界化学工程大会,当时应毕力特教授的邀请到他的鲁尔大学和实验室进行学术访问。同年9月毕力特教授在北京出席1991年国际石油炼制和石油化工学术会议,会后我邀请他到天津大学进行了学术交流。此后,我们建立了密切的联系。

毕力特教授在精馏、吸收等传质分离工程领域内是国际上著名专家,他编写的《蒸馏工程》(Distillation Engineering)等著作是我国广大化学工程工作者所熟知的。这次出版的《填料塔分析与设计》是毕力特教授多年来科研成果的总结,读者可从中获得大量各种新型散装填料和规整填料的性能数据,为填料塔的设计提供了可靠的依据,这对我国化工分离技术的发展将是十分有益的。毕力特教授还为中译本专门写了前言,在此我向作者表示深切感谢。

在中译本中,毕力特教授还增补了计算实例。为了使读者能了解我国近年来在填料塔工业应用方面的成就,征得毕力特教授同意,本书后面附上部分天津大学填料厂提供的应用实例。

王树楹、袁孝竞两位教授以及兰仁水、何杰、陈宁、于爱华等同志为本书的出版作了大量具体工作。天津大学化工分离技术及新型填料开发中心,天津大学化学工程研究所为本书的出版给予了大力的支持,在此一并致谢。

余国琮

一九九一年三月

编写说明

“填料塔分析与设计”研讨会的讲义引起了工业界和学术界极大的兴趣。为此，作者决定将原稿补充修定后出版，以满足广泛的需求。

本书注重于实际知识，它将对从事化工及其相关专业（如环保）的工程师提供很大的帮助。化学工程专业的学生也可从中得到宝贵的资料，有助于他们的学习。

在附录中给出了由基础物理模型和大量实验研究得出的一系列方程式和表格。它们概括地描述了各种工业填料的流体力学和传质性能，特别着重于持液量、载点和极限负荷、传质和压力降等方面。某些填料特性数据处理是为了对该填料进行全面评价。

我的同事夏正祝女士、Holger Ginsel 先生和 Stephan Lorenz 先生帮助准备了图表，Michael Schultes 先生对模型方程求值给予了宝贵的帮助，在此对他们表示感谢。

莱恩哈特·毕力特

1989 年 11 月

我深信我能够代表所有从事填料精馏塔和填料吸收塔的作者以及从本专著中受益者说：我们对毕力特博士和格里奇公司及时地为我们提供这份资料表示衷心的感谢。

奥斯汀市德克萨斯大学

约翰·麦克凯塔百年纪念能源讲座主持教授

詹姆斯·R·费尔

1986年10月15日

序 言

1985年10月下旬，在格里奇（Glitsch）公司的倡议下，在德克萨斯州的达拉斯举办了填料塔现场会，约有75名工业界和学术界代表出席了会议。会议着重于填料精馏塔和填料吸收塔（包括散装填料和规整填料）的设计与分析诸多方面内容。现场会进行了一整天，由于格里奇公司要求每次现场会不超过25名代表，因此又重复进行了两次。

我被邀请主持会议，西德波鸿（Bochum）市鲁尔（Ruhr）大学热分离过程讲座的主办者国际著名的精馏和有关热分离过程权威毕力特（Reinhard Billet）教授主讲。我的任务主要是安排和主持会议。除了毕力特博士的讲座外，还有一篇文章介绍了英国帝国化学公司近些年开发的Higee旋转床精馏塔。

与会者们感到由格里奇公司所筹划的此现场会几乎无商业广告色彩，该公司既没要求毕力特博士也没要求我以任何方式强调他们的产品。我认为此会议具有较高的专业水平，并且公正客观地探讨问题，这也是我与格里奇公司交往中一贯明确遵守的职业态度。

现场会结束时，当时的格里奇公司总裁 Michael Acerra 先生许诺给每位代表一套印刷讲义。由毕力特博士编写并经我编辑过的那份讲义已包含在本专著中。读者会发现这些资料确实没有偏重任何填料厂家的产品，同时也会发现毕力特博士以大量实验工作为依据、对填料塔的全面报道不同于任何已发表的文献。

目 录

第 I 章 前言	1
第 II 章 填料	3
A. 散装填料	3
B. 规整填料	11
第 III 章 填料塔的流体力学	20
A. 持液量	20
B. 载液与液泛	27
C. 压降	35
第 IV 章 填料床内的传质	39
A. 效率关联式	51
B. 端效应	70
C. 放大效应	74
D. 中试数据的分析	81
E. 填料床层内的液体分布	87
第 V 章 流体力学和传质的模拟	99
A. 流体力学和通量	105
B. 分离效率	110
C. 压力降	117
第 VI 章 填料的全面工艺评价	122
第 VII 章 结论	127
参考文献	131
符号说明	134
表索引	136
图索引	138

附录 I 计算实例	143
附录 II 我国波纹填料在工业中的若干应用实例	152

第1章 前 言

当今的经济形势有利于在精馏、吸收和液-液萃取等过程中扩大填料塔的应用范围。在环保工程中，例如在空气、气体和水的净化过程中，填料塔技术正显得越来越重要。在大多数填料塔应用场合，传质是作为基本的单元操作，但直接接触式传热也是采用填料塔的目的。

在许多情况下，对热分离过程的填料塔的分析与设计会是困难的。这不仅是由于实验室和中试结果的放大造成的，而且也是由于不可靠的换算程序而导致失败。

填料塔的大多数流体力学性能计算一般并不复杂，其结果可以满足工业应用。但是，当传质计算表明比预料的塔高明显增加时，经常产生疑惑。只是近几年才有可能把从特定吸收实验取得的数据满意地换算到精馏应用中，尽管过去有少数研究者曾为解决此问题做出过宝贵的贡献。

用传质操作的物理定律可以说明各种热分离过程，它对所有汽/液和气/液物系都应有效，因为它们都有相同的基本法则。据此，我们对众多种类和尺寸的填料进行了测试，对采用不同物系、塔直径和塔高得到的大量实验结果进行了系统分析，并与以前在作者实验室中建立的模型进行了比较。结果表明此模型可用于计算填料塔的传质效率。如果需要借助总有效关系式来确定分离效率，在传质计算之前必须确定压降和持液量等水

力参数。此模型不但可用我们的测试结果，而且也可由其他研究者类似的测试结果所证实。它将允许所有实验（包括各种精馏物系）得到与吸收研究中所得数据相应的数。这对传质阻力存在于蒸汽相或气相的系统尤为适合。

第 II 章 填 料

高通量和低比压降的塔内件比常规的设备可大大降低能量费用，特别是当分离过程需要大量传质单元时。这类塔内件常常也可使投资费用降低。这些塔内件的另一优点是它们可使塔底温度降低，从而有利于热敏物系的精馏。热分离技术在化工及其类似的工业中特别重要，其发展趋势已明确要采用具有优越工艺性能的高效填料。因此，选择这些填料进行讨论，可以认为代表了西欧和美国在此领域中的进展情况。确定填料性能和取得可用于工业规模塔的数据的科学研究是在我们实验室及外部中试厂内进行的。表 1 扼要地列出了实验物系、实验塔和用于估值的函数。

A. 散装填料

从优化性能、减少材料消耗和降低产品成本等经济方面看，散装填料的近期发展值得特别注意。这些填料的特点是具有低的单位理论级的压降，这对节能和热分离过程操作中，防止产品热分解是极重要的。我们将主要讨论满足上述条件的较新型填料，且只限于介绍我们自己实验室研究中所获得的技术特性数据。

事实上，许多常规的散装填料在大直径塔中使用已引起了麻烦，因此，人们对其使用至今仍持保留态度。一个经常遇到

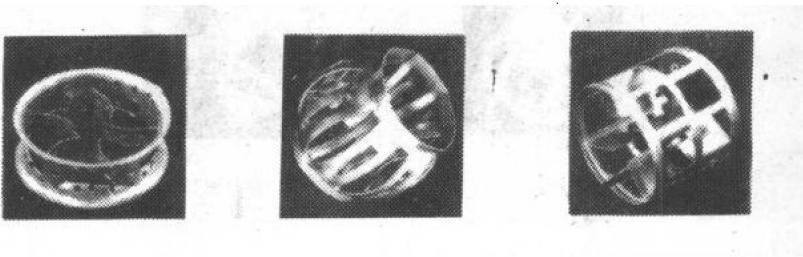
表 1 填料研究的试验条件

试验物系	氯苯/乙苯 33.67.133mbar	NH ₃ -空气/H ₂ O 1bar. 293K	空气/H ₂ O 1bar. 293K	CO ₂ -H ₂ O/空气 1bar. 293K
塔 径	0.22m	0.3—1.4m	1.3—2m	0.3m
填料高度	1.4—1.5m	1—2m	0.22—0.3m	1.3—1.4m
试验函数	$n_s/H, \Delta p/H, \Delta p/n_s$ = $f(F_v)_{L/N}$ =常数	$HTU_{ov}, \Delta p/H, \Delta p/NTU_{ov}$ = $f(F_v)_{u_L}$ =常数	$F_{v, H} = f\left(\frac{L}{V} \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_L}}\right)$ $h_L = f(u_L)_{F_v}$ =常数	$\beta_L \cdot a = f(u_L)_{F_v}$ =常数
技术特性和 操作参数	HTU_{ov} =传质单元数 F_v =负荷因子 $\dot{V}$ =蒸汽流量 n_s =理论级数 H =填料高度 $\dot{L}$ =液体流量 u_L =液体负荷 h_L =持液量			

的难题是保证填料表面的最大润湿，因为要做到这一点，液体必须在进料处或在塔顶均匀地分布在整個塔截面上。此外，由于填料的堆放，特别是靠塔壁处的堆放，液体会趋于不良分布。由于散装填料床内的流体力学性质的不可控和带有偶然性，其结果，在分离特定物性的混合物时，许多散装填料床中有沟流的危险。鉴于所有这些不良分布的可能性，在大直径的散装填料塔中可能出现低效率现象，因此，为了取得高通量和高效率，在某些情况下，特殊塔板和规整填料比散装填料更优越。最近，这种形势已有了很大变化。

近年来，散装填料领域内，特别是塑料材质的散装填料，其造型趋向采用格子结构设计。这主要是塑料诺派克环（Nor Pac ring）带了头；通过系统的研究，认为此型式填料为最优，并对它的使用提出了许多建议。排在第二位的是塑料、陶瓷和金属希弗罗环（Hiflow ring）以及塑料和金属阶梯短环（CMR）填料、新设计的鞍形填料有希弗罗鞍环和超级托鲁斯（Super-Torus）鞍环。最近西德公布了塑料鼎派克（Dinpak）填料。图 1 表示了这些填料。

金属填料

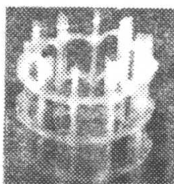


阶梯短环（CMR）

托帕派克（Top Pak）

希弗罗环（Hiflow Ring）

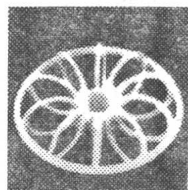
塑料填料



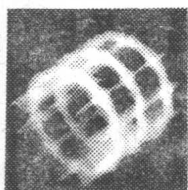
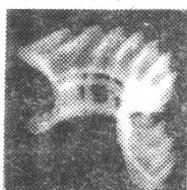
诺派克环 (Nor Pac Ring)



汉凯特 (Hackette)



鼎派克 (Dinpak)

希弗罗环
(Hiflow Ring)高级托鲁斯鞍环
(Super Torus Saddle)希弗罗鞍环
(Hiflow Saddle)

塑料填料

陶瓷填料

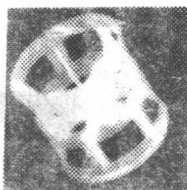
拉鲁环
(Ralu Ring)希弗罗环
(Hiflow Ring)

图 1 新近设计的高效散装填料

精馏、吸收和解吸的大量实验研究结果表明, 格子结构填料可认为是高通量、低压降的内件, 同时也表明, 它们可成功地应用于难分离的物系, 如分离热敏物系和分离要求低能耗且需要很多传质单元的物系, 这是由于它们的单位理论分离级的比压降较低。

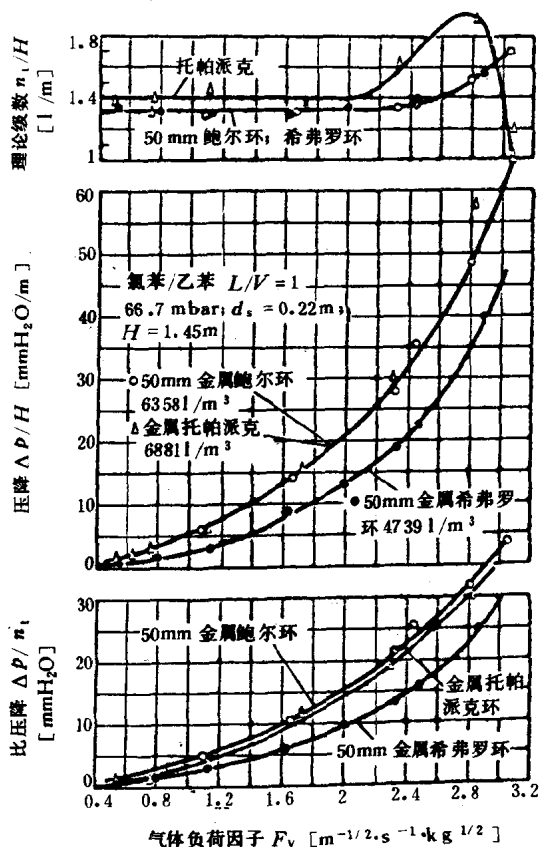


图 2 塑料希弗罗环和诺派克填料同塑料鲍尔环特性数据的比较