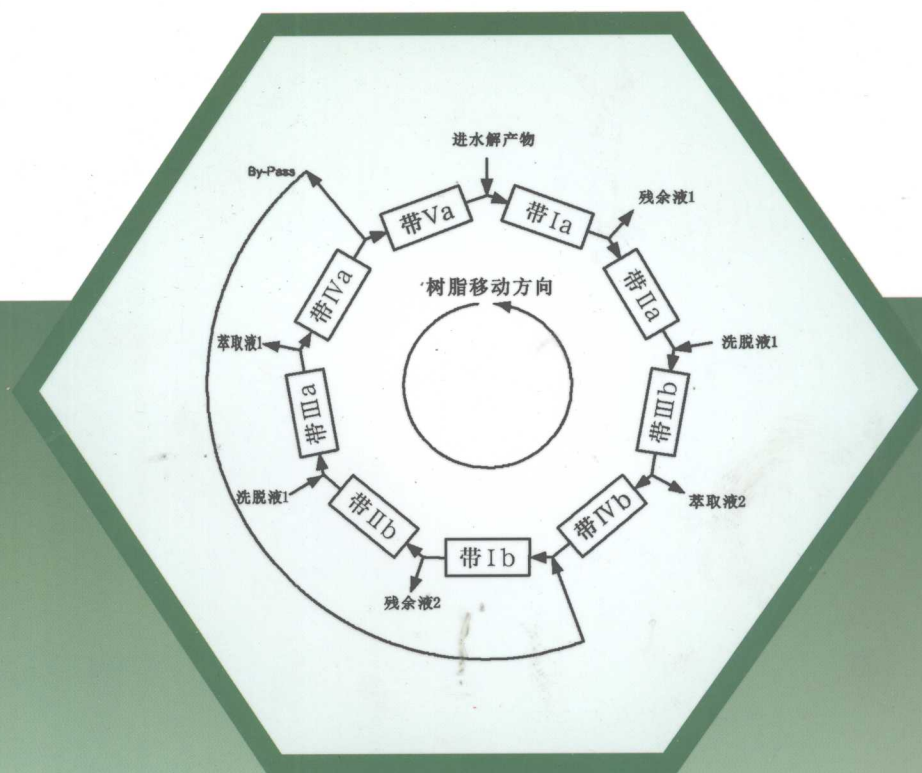


现代分离科学与技术丛书

模拟移动床色谱技术

林炳昌 编著

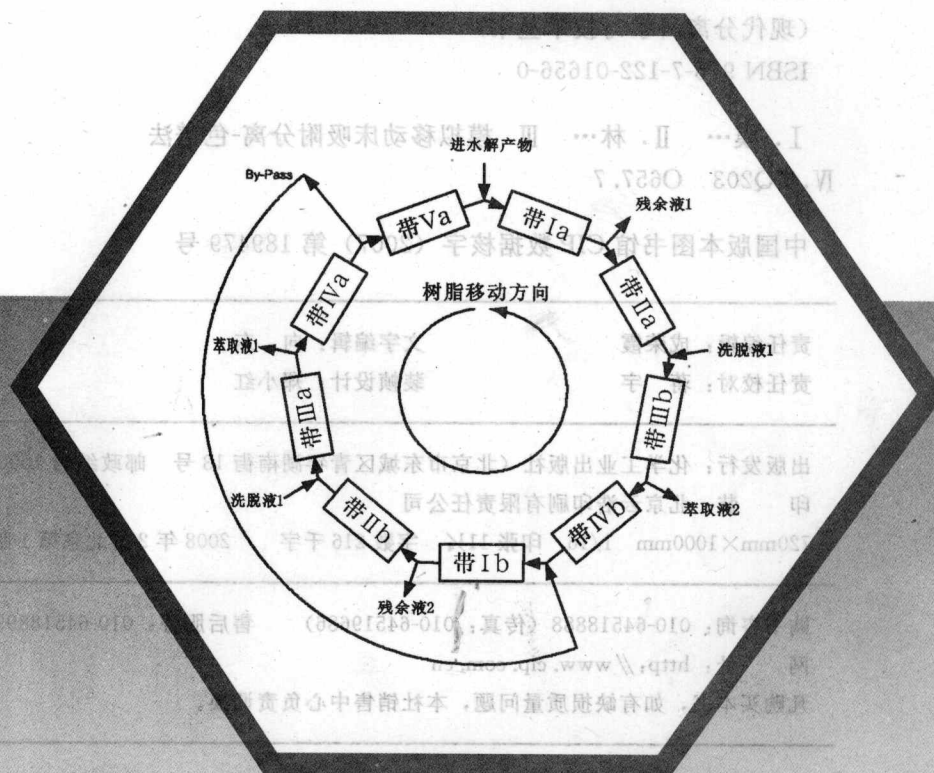


化学工业出版社

现代分离科学与技术丛书

模拟移动床色谱技术

◎ 林炳昌 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面、系统地介绍了模拟移动床色谱 (SMB) 技术的产生、发展、原理及应用。从色谱的规模化与连续化角度出发, 分析了 SMB 技术的产生及工程特征, 介绍了色谱从循环、错流到逆流的连续化发展过程。重点讨论了 SMB 的技术基础, 包括模拟移动床色谱条件下的单柱特征及柱模型, SMB 系统的分离原理与操作条件的选择, SMB 新的技术模式。此外书中还介绍了 SMB 在石化、食品、药物 (尤其是手性药物) 分离中的应用, 以及模拟移动床色谱反应器 (SMBR) 的技术发展和应用。

本书可供从事化工分离、药物分离、天然产品及精细化工产品分离的科技工作者、教师、研究生及本科生阅读与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟移动床色谱技术/林炳昌编著. —北京: 化学工业出版社, 2007. 12

(现代分离科学与技术丛书)

ISBN 978-7-122-01656-0

I. 模… II. 林… III. 模拟移动床吸附分离-色谱法
IV. TQ203 O657.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 189479 号

责任编辑: 成荣霞
责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 向 东
装帧设计: 郑小红

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 11¼ 字数 216 千字 2008 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

序

随着科技的进步和产业的发展，在学科之间的交融越来越紧密的同时，学科分支的专业化也越来越明确。分离科学技术，是人类剖析认识自然、充分利用自然、深层开发自然的手段；是获取真实和准确的分析鉴定信息的前提条件和技术保证。2000年，英国科学出版社邀请全世界500多位在不同的领域从事分离科技工作的专家撰写并出版了一部巨著——《分离科学百科全书》（10册），本人参与了有关天然产物分离纯化方面的工作，深感其内容的丰富与广阔。2002年，美国出版了《分离科学一百年》，着重从色谱科技的进步说明分离科学技术的发展。

在我国科技界资深学者的倡导下，由化学工业出版社选题立项，经过十多位专家教授的分工合作，《现代分离科学与技术丛书》第一批（10个分册）将陆续出版。这是我国第一部关于分离科学技术的丛书，它的问世是我国科技界和产业界的一件喜事。

分离科学技术的门类很多，我们已经选定了《分离科学概论》、《溶剂萃取》、《超临界流体萃取》、《膜分离》、《离心分离》、《柱色谱技术》、《高速逆流色谱技术》、《模拟移动床色谱技术》、《结晶与沉淀》、《超声提取分离》等分册。随着分离科技的应用和发展，丛书的选题和内涵必将有新的拓展。《现代分离科学与技术丛书》的出版，顺应于国际分离科学技术的发展潮流，又突出了我国在天然产物、生物医药、化工材料等优势科研与产业领域的特点和需要。

分离科学技术的门类很多，每一项分离技术都有它不同的理论、机理以及应用范围，各项分离技术之间是互补的和不可取代的。因此，我们希望广大的读者充分理解每项技术的基本原理，分析认识每项技术的实用领域，以期实现对于本丛书这一科技资源的有效利用和合理挖掘。

张天佑

2007年11月

前 言

模拟移动床色谱 (Simulated Moving Bed Chromatography, 简称 SMB) 作为一种新型的规模化精细分离技术已受到多方关注, 包括我国当前正在进行的“中药现代化”及生物制药与食品工业的深层发展都已开始引入模拟移动床技术。由于模拟移动床技术应用领域不断扩大, 对技术的要求不断提高, 该技术的研究与开发也正在进一步受到重视。

SMB 设备操作参数多, 连续运转, 因此其工作条件的优化与控制都较复杂, 其参数分析都必定要涉及模型理论。又因为 SMB 技术主要服务于生产, 必须保证一定的产量, 这使得其中的色谱过程经常处在高浓度状态, 由此, SMB 技术也必然联系非线性色谱理论。

SMB 技术的发展从石油化工领域开始, 其后是食品中的制糖工业, 在 20 世纪末进入药物领域。由于药物种类繁多, 要求分离精度高, 因此, SMB 技术在药物领域的应用无论是软件还是硬件都有许多问题亟待解决。

本书内容主要包括非线性色谱理论、模拟移动床技术及其在药物分离中的应用三个方面, 这正是笔者及笔者所在中心长期从事的研究方向。笔者从以上三个方面出发, 力求对该项技术的发展作出系统的介绍。

本书从介绍色谱的规模化与连续化入手, 分析模拟移动床技术的产生与发展。将模拟移动床的谱带运动与单柱的谱带运动相结合介绍模拟移动床的原理与应用。书中尽可能地反映国内外专家在这方面的贡献, 尤其是国内专家的成果。内容力求深入浅出, 叙述力求简洁明晰, 希望能够对从事规模化精细分离研究与开发的读者有所助益。限于笔者水平, 疏漏之处在所难免, 希望读者批评指正。

在本书成稿过程中, 周卫红、周丹、张伟、高红、丛景香、冯文强做了大量工作, 邢艳平、胡斯文帮助搜集资料和打印, 张志强、赵雪飞、高丽娟、赖仕全等从各自专业对本书有关章节提出了不少宝贵意见, 在此一并致谢。笔者同时感谢化学工业出版社相关编辑的策划和支持。

编 者

2008 年 1 月

目 录

第 1 章 从批处理色谱到模拟移动床色谱	1
1.1 色谱的规模化与连续化	1
1.1.1 批处理色谱的规模化	2
1.1.2 色谱的连续化	4
1.1.3 各种分离技术比较	12
1.2 模拟移动床的工业特征	12
1.3 模拟移动床色谱技术与色谱的模型化	14
参考文献	15
第 2 章 作为模拟移动床分离单元的色谱柱	17
2.1 孔隙率	17
2.2 轴向扩散	19
2.2.1 分子扩散	19
2.2.2 涡流扩散	20
2.3 相间传质阻力	20
2.4 扩散系数与相间传质系数的确定	23
2.4.1 板高曲线法	23
2.4.2 矩分析法	24
2.4.3 参数关联法	25
2.5 吸附等温线	25
2.5.1 吸附等温线的类型	26
2.5.2 吸附等温线的测定方法	27
2.5.3 吸附等温线的调节	32
2.6 压力与流速	33
2.7 压力曲线与板高曲线的斜率积	34
2.8 负载因子	35
参考文献	35
第 3 章 模拟移动床中的柱模型	37
3.1 线性模型及基本结果	37
3.1.1 色谱模型及各种初边条件	38
3.1.2 线性理想色谱	38
3.1.3 线性非理想色谱	40

3.1.4 线性非理想与非平衡色谱	41
3.2 非线性色谱模型及基本结果	44
3.2.1 理想平衡单组分非线性色谱的数学模型及基本结果	44
3.2.2 理想平衡双组分非线性色谱的数学模型及基本结果	48
3.2.3 理想平衡多组分非线性色谱的数学模型及基本结果	53
3.2.4 扩散与相间传质阻力对非线性色谱的影响——激波层	55
3.3 孔内过程的影响——GR 模型	57
3.4 逆流模型	58
3.5 数值方法	60
3.5.1 基本概念	60
3.5.2 理想色谱方程的特征格式	61
3.5.3 理想色谱方程的守恒型差分格式	62
3.5.4 理想色谱方程的 TVD 格式	64
3.5.5 Galerkin 方法	66
3.5.6 正交配置法	71
3.5.7 格式比较及误差分析	74
参考文献	78
第 4 章 模拟移动床技术基础	81
4.1 SMB 分离原理及区带结构	81
4.1.1 SMB 分离原理	81
4.1.2 SMB 的区带结构	83
4.2 SMB 的过程分析	85
4.2.1 SMB 的数学模型	86
4.2.2 TMB 的数学模型	86
4.2.3 SMB 稳态过程的解	87
4.2.4 SMB 的暂态过程	92
4.2.5 SMB 过程的周期性	95
4.2.6 SMB 过程的数值解	96
4.3 SMB 分离条件的选择	96
4.3.1 线性情形	97
4.3.2 非线性情形	99
4.3.3 分离条件的修正	100
4.4 SMB 技术新发展	103
4.4.1 超临界流体 SMB (SF-SMB)	103
4.4.2 溶剂梯度 SMB (SG-SMB)	104
4.4.3 温度梯度 SMB	106
4.4.4 Varicol 工艺	106

4.4.5 Powerfeed 工艺	107
4.4.6 Modicon 工艺	108
4.4.7 用于多组分分离的 SMB	108
4.5 配套技术	109
参考文献	111
第 5 章 模拟移动床的应用	113
5.1 模拟移动床在石化领域的应用	113
5.2 模拟移动床在食品工业中的应用	115
5.2.1 糖的分离	115
5.2.2 氨基酸的分离	117
5.3 模拟移动床在制药领域中的应用	118
5.3.1 模拟移动床在手性药物分离中的应用	118
5.3.2 模拟移动床在生物药物分离中的应用	125
5.3.3 模拟移动床在天然药物分离中的应用	125
5.4 SMB 在化工中的其他应用	134
5.5 中小型 SMB 使用方法简介	134
5.5.1 概述	134
5.5.2 色谱柱的选择与填充	135
5.5.3 模拟移动床系统操作参数的确定与调节	137
参考文献	139
第 6 章 色谱反应器与模拟移动床色谱反应器	144
6.1 色谱反应器及其连续化	144
6.1.1 连续环流色谱反应器	145
6.1.2 逆流色谱反应器	145
6.1.3 SMBR 的结构	145
6.1.4 色谱反应器中的转化率与分离度	146
6.2 色谱反应器的过程分析	148
6.2.1 反应色谱方程的构成	148
6.2.2 线性反应色谱方程的解	150
6.2.3 非线性理想反应色谱方程的解	151
6.2.4 非线性非理想反应色谱过程分析	157
6.2.5 SMBR 的数学模型	159
6.3 色谱反应器与 SMBR 的应用	160
参考文献	163
符号表	166

第1章 从批处理色谱到模拟移动床色谱

模拟移动床色谱 (Simulated moving bed chromatography, SMB) 是连续色谱的一种, 它是由色谱柱或类似色谱柱的固定床层串联起来的分离系统。工业用模拟移动床中的色谱柱或固定床都有相当大的尺寸。因此, 工业用模拟移动床是规模化与连续化的色谱分离系统。

色谱从实验室走向工业应用经历了巨大而复杂的变革。工业用模拟移动床综合了色谱规模化与连续化过程中许多重要技术思想与成果。本章从色谱的工业化历程来分析模拟移动床技术的产生及模拟移动床技术的工业特点。

1.1 色谱的规模化与连续化

色谱作为工业应用的分离工具与作为实验应用的分析仪器不同，作为工业化手段，需要满足产量与效益，需要考虑环保与成本。为了增大产量，必须要实现规模化，而为了提高效益就必须实现连续化。

有关色谱的规模化与连续化的记述很多,比较全面的是 P. E. Barker 与 G. Ganetsos 在文献 [1] 和 [2] 中的总结。本节介绍的基本内容来自上述文献。

从他们的介绍及其他文献表述^[3~5], 色谱的规模化最初是从石油化工中二甲苯异构体的分离和食品工业中果糖与葡萄糖的分离开始的。值得寻味的是这两个方面至今仍是规模化色谱与模拟移动床色谱的基本应用领域。

由于这两个领域在规模化色谱与模拟移动床色谱分离中的特殊重要性, 这里简单介绍工业二甲苯异构体分离与果糖和葡萄糖分离的基本情况。

工业二甲苯混合物是石油加工和煤焦化过程的中间产品，如表 1-1 所示工业二甲苯混合物包含多种异构体，它们的相对分子质量均为 106.17，分子式均为 C_8H_{10} 。

这些异构体中对二甲苯是最重要的，可合成聚对苯二甲酸酯。聚对苯二甲酸

表 1-1 工业二甲苯混合物各组分的性质

名 称	沸点/℃	结 构 式	含量/%	名 称	沸点/℃	结 构 式	含量/%
乙 苯	136.2	$C_6H_5C_2H_5$	10~20	间二甲苯	139.0	$C_6H_4(CH_3)_2$	40~50
邻二甲苯	144.2	$C_6H_4(CH_3)_2$	15~25	对二甲苯	138.0	$C_6H_4(CH_3)_2$	20~30

酯是生产涤纶的原料。最初分离对二甲苯用的是冷冻法，能耗极大。此外，邻二甲苯也有重要开发价值。

蔗糖中果糖与葡萄糖的分子式均为 $C_6H_{12}O_6$ ，相对分子质量均为 180.16。果糖与葡萄糖是旋光度不同的同分异构体，但果糖的甜度比葡萄糖大（前者是后者的 1.4 倍）。因此在现代食品工业中，将蔗糖中果糖与葡萄糖分离，提高果糖含量，减少食品中的含糖量，既保障了食用者的健康，也提高了经济效益。

在 20 世纪 60 年代，规模化色谱进入工业领域，然后是模拟移动床进入工业领域，二甲苯异构体的分离与果葡的分离立即成为它们重要的应用目标，这一方面是社会的需求，另一方面是两者均涉及异构体分离，都需要具有高效分离能力的工具。正是由于这两个原因，二甲苯分离与果葡分离很自然地成了工业色谱与模拟移动床色谱这两个规模化精细分离技术的应用方向。

1.1.1 批处理色谱的规模化

色谱的规模化最初是从批处理色谱开始的，批处理色谱的规模化主要是尺寸放大。20 世纪中叶，因规模化分离的需要，人们先是直接将普通的色谱柱进行尺寸放大，其操作方法还是间歇的批处理方式。图 1-1 是这种工业用色谱柱（NOVESEP）的实物照片。

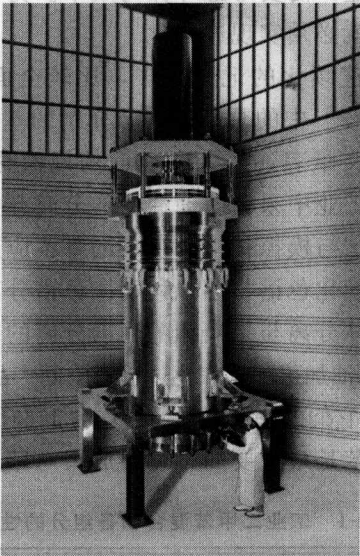


图 1-1 NOVESEP 制备色谱柱^[6]
I.D 1.6m×4m；最大操作压力为 4.5MPa；
装填固定相 3500kg；总重量为 36000kg

温度/℃	10~20	20~30
组分	$C_6H_4(CH_3)_2$	$C_6H_4(CH_3)_2$
流量/L·h ⁻¹	100	100
压力/MPa	4.5	4.5
装填量/kg	3500	3500
总重量/kg	36000	36000

从20世纪60年代起,批处理的规模化色谱在世界各国都有所发展。P. E. Barker与G. Ganetsos着重介绍了其在美国与欧洲的应用。

批处理色谱装置在20世纪应用情况见表1-2,主要应用于石油化工和制糖工业。

表1-2 20世纪60~70年代批处理色谱的应用

时 间	地 域	公司名称	设备尺寸	分离对象	产量或纯度
20世纪60年代	美国马萨诸塞州	ABCOR	2根 I.D 4.6m × 4.6m(GC)和2根 I.D 4.6m × 8.6m(LC)	间二甲苯和对二甲苯	5万吨/年
1975年	美国	Finnish	I.D 2.7m × 6m	高果糖糖浆	92% 6万吨/年
1983年	联邦德国	Amino GmbH	I.D 3.6m × 12m	甜菜糖浆	21%蔗糖,9%不含糖物质,5%甜菜碱

在20世纪60~70年代,人们通常采用批处理模式来放大色谱系统,这主要是由于它操作简单,而且相对容易实现。在这个时期,除了表1-2中所列应用外,还有其他一些应用。1979年,Elf提供了用于纯化芳香族化合物及其衍生物的全自动色谱装置^[7]。在70年代中期,德国的Munir of Sud-deutsche zucker AG报道了一种分离甜菜中蔗糖糖浆的新装置^[8]。Asahi化学公司也开发了一套分离二甲苯和乙苯的设备^[9]。

柱尺寸放大带来一系列技术问题,在尺寸放大中柱径增大是关键,因为只有增大柱径,才能增大进样量。但柱径增大也造成流速的径向滞后,以及出现流速分布的不均匀,从而造成谱带展宽。

为克服柱径放大引起的柱效下降的后果,一般需要增加柱长。因为当填充均匀时,柱效与柱长成正比,但柱长增大也带来柱压降增大。因为柱压降也与柱长成正比,因此柱长增加将增加泵的负载。另一方面,柱长增大也会引起填充的困难,因此实际上的柱效并不与柱长成正比,在填充达不到理想效果时,柱效增大比柱长增加要慢,适当优化径长比在尺寸放大中具有重要意义。

减小填料粒径是提高柱效的途径之一。对液相色谱来说,板高与粒径平方成正比,但压降与粒径平方成反比,这使得泵的负载将因为粒径变小而急剧上升。

分配器的使用是克服流速径向滞后的重要手段,使用什么形状的分配器更为合理有许多理论与实验研究。

色谱柱的填充方法近年来一直引起关注,对于大柱径的长柱来说,不断改进填充技术是保证柱效的重要途径。

1.1.2 色谱的连续化

对色谱连续化的追求包括许多方面。在 P. E. Barker 与 G. Ganetsos 的概括性总结中：连续化过程主要包括错流与逆流，在这两大类连续色谱模式中，又有许多具体的类型，它们所包含的技术思想对连续色谱技术的发展至今仍有重要影响。除了模拟移动床色谱以外，在实现连续化的操作中许多技术（包括环流色谱、逆流移动床等）至今仍有应用。

1.1.2.1 周期性进样与循环色谱

周期性进样是在批处理单柱的基础上实现连续运作的最简单方法之一。其本质还是批处理，只是通过进样的周期变化，实现周期性的连续。

P. E. Barker 与 G. Ganetsos 曾介绍过几个周期进样的例子。

当柱中输入组分的浓度都按正弦函数变化，浓度波在柱中流过时，各组分因为与固定相相互作用不同而产生不同的延迟。通过调整进样速率以及频率，柱中依次出现各个组分的浓度波，所以恰当地选择阀转换装置以及产品接收装置，可以依次获得不同的组分。

在单柱基础上实现连续化还有其他的尝试，如循环色谱。循环色谱的基本原理如图 1-2 所示。只要不断切换环路中的四通阀，就可以在出完分离产品之后使洗脱溶液循环使用。在制备分离中，尤其是工业化分离中洗脱溶液的消耗是成本的重要组成部分，循环使用可以降低成本。

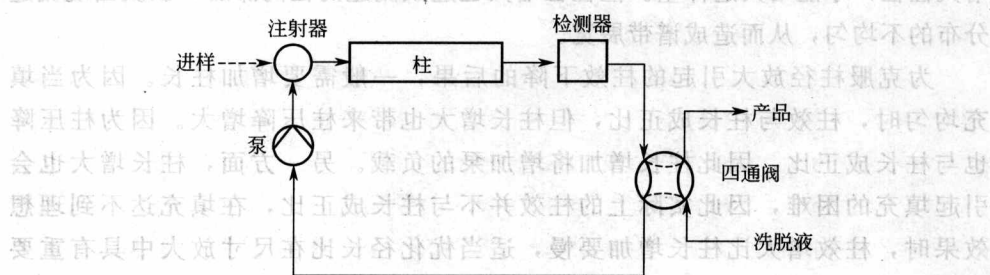


图 1-2 循环色谱示意图^[10]

1.1.2.2 错流 (Cross-current)

错流如其命名，在错流装置中，洗脱液方向与固定相运动方向垂直交错，最典型的错流装置是连续环流色谱 (Continuous annular chromatography, 也称 CAC)，最早讨论 CAC 的是 Martin^[11]，其分离原理如图 1-3 所示。其进样口固定在环端的一点，洗脱液从环上各点顺着轴的方向流下，环内填有介质（固定相）。不同组分吸附强弱不同，在洗脱过程中保留值不同。当样品注入后，由于

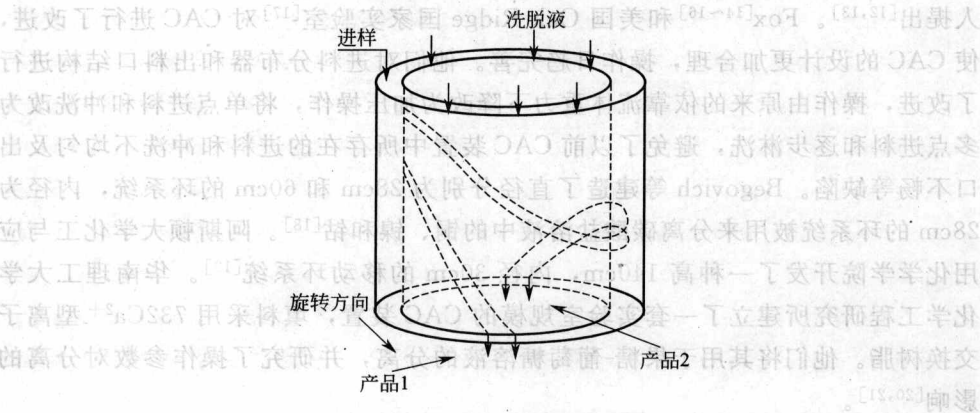


图 1-3 CAC 的分离原理图^[11]

固定相旋转，每一组分在环体上沿螺旋线运动；又由于不同组分保留值不同，向下移动速度也不同。其综合结果是不同组分螺旋线的螺距不同，从而与底部相交的位置也不同，最终实现了不同组分的分离。因为可以连续进样，也就可以连续分离。当然，若是间歇进样，相应的螺旋线就不能连续，只能是一系列分段的螺旋线。组分在固定相和流动相中的扩散也会影响不同组分对应的谱带展宽，从而影响分离。当然，由于固定相运动速度与流动相运动速度垂直，谱带展宽机制与普通色谱有所不同。图 1-4 为 CAC 设备剖面图。

CAC 有许多应用实例，也有不少文献报道。在 Martin 提出 CAC 概念之后，人们提出了各种 CAC 装置的设计。实验室级的旋转环流装置最先由 Svensson 等

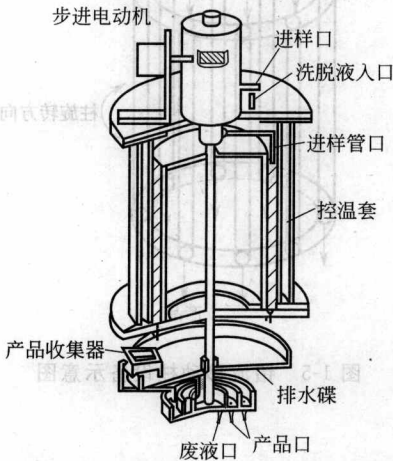


图 1-4 CAC 设备剖面图^[2]

人提出^[12,13]。Fox^[14~16]和美国 Oak Ridge 国家实验室^[17]对 CAC 进行了改进,使 CAC 的设计更加合理,操作日趋完善。他们对进料分布器和出料口结构进行了改进,操作由原来的依靠流体重力下降改为加压操作,将单点进料和冲洗改为多点进料和逐步淋洗,避免了以前 CAC 装置中所存在的进料和冲洗不均匀及出口不畅等缺陷。Begovich 等建造了直径分别为 28cm 和 60cm 的环系统,内径为 28cm 的环系统被用来分离碳酸盐溶液中的铜、镍和钴^[18]。阿斯顿大学化工与应用化学学院开发了一种高 140cm,内径 30cm 的移动环系统^[19]。华南理工大学化学工程研究所建立了一套实验室规模的 CAC 装置,填料采用 732Ca²⁺ 型离子交换树脂。他们将其用于果糖-葡萄糖溶液的分离,并研究了操作参数对分离的影响^[20,21]。

错流装置除了 CAC,还有移动柱模式,与图 1-3 中 CAC 相比,它只是用平行排列的柱代替环进行旋转,其示意图见图 1-5。它是一个并联系统,流动相从各柱的顶端同时不断地注入。在移动柱系统中,床层被柱壁分割,因此与 CAC 有所差别。与 CAC 相比,移动柱系统比 CAC 有许多改进之处,因为柱比环易于填充。Dinelii 等研制了移动柱系统,并用来分离挥发性混合物^[22~24]。这种装置用 100 根内径为 6mm,长 1.2m 的管子平行排列成环状,并能以每小时 1~50 弧度的速度转动。

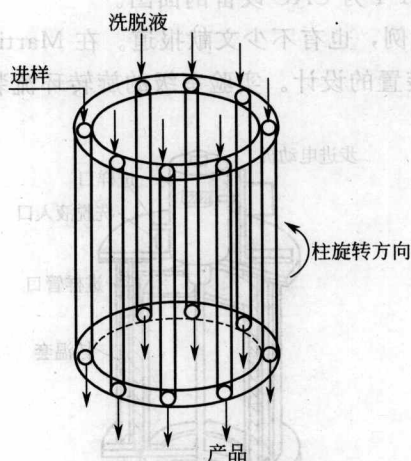


图 1-5 错流移动柱设备示意图

1.1.2.3 逆流系统

逆流操作可以实现连续分离。逆流与无逆流系统的比较见图 1-6。

从图 1-6 可见在无逆流系统中不能实现连续分离,但是在逆流系统中可以实

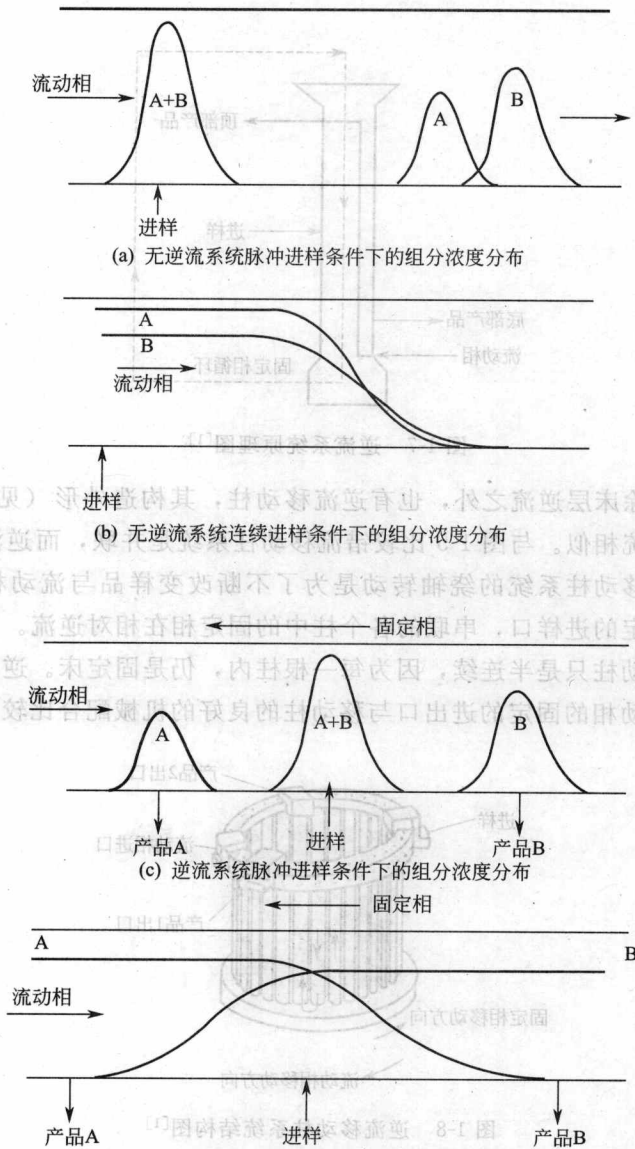


图 1-6 逆流与无逆流系统的比较

(上面所示的逆流过程的具体分析见 4.1 节)

现连续分离。

逆流的优点是既能实现连续，又可以充分利用固定相，提高固定相的利用率，逆流移动床缺点是床层的磨损与逆流移动的能耗。逆流系统实现连续分离的

原理见图 1-7。

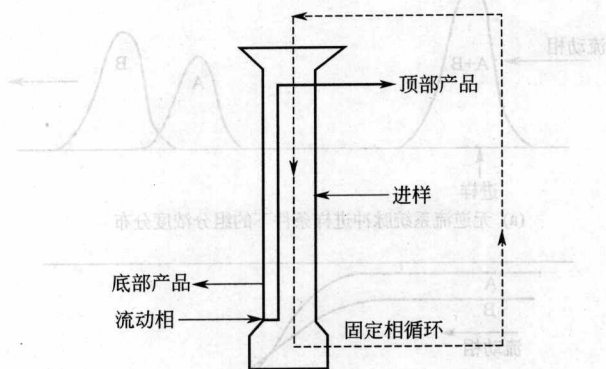


图 1-7 逆流系统原理图^[1]

逆流系统除床层逆流之外，也有逆流移动柱，其构造外形（见图 1-8）与错流中移动柱系统相似。与图 1-5 比较错流移动柱系统是并联，而逆流移动柱系统是串联。逆流移动柱系统的绕轴转动是为了不断改变样品与流动相进出口的位置，相对于固定的进样口，串联的各个柱中的固定相在相对逆流。比起逆流移动床来，逆流移动柱只是半连续，因为每一根柱内，仍是固定床。逆流移动柱的缺点是样品与流动相的固定的进出口与移动柱的良好的机械配合比较困难。

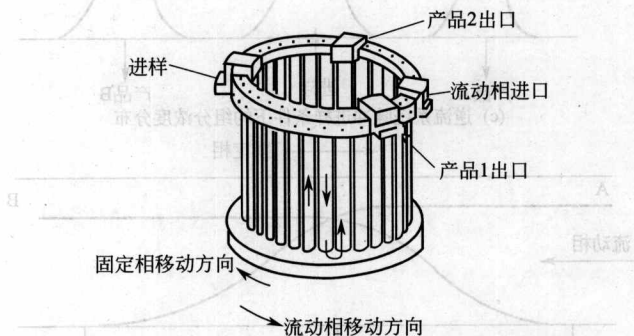


图 1-8 逆流移动柱系统结构图^[1]

关于逆流移动床系统与逆流移动柱系统的应用也有一些报道。美国加利福尼亚州联邦石油公司开发的超吸附装置是最早的大尺寸移动床设备^[25,26]。设备中活性炭从柱顶端连续输入，而包含甲烷、氢气以及乙烯和其他挥发性气体的流动相从底部向上流入。Schultz 采用二丁基酞酸酯包裹粒子为填料的色谱柱来分离丁烷混合物^[27]。Philips 石油专利中使用内径 15cm、柱高 254cm 色谱柱，以二辛基酞酸酯包裹粒子作为下落逆流吸附剂，氢气为流动相，在 85℃ 下实现了苯-环己烷混合物的分

离^[28]。Fitch 及合作者采用邻苯二甲酸二壬酯渗入钙铁石作为下落逆流吸附剂来分离二乙醚、二甲氧基甲烷和二氯甲烷的混合物^[29]。Pritchard 和 Tiley 使用类似的装置以氮气为流动相成功分离了等摩尔的二甲氧基甲烷和二氯甲烷混合物^[30]。P. E. Barker 与 G. Ganetsos 使用内径为 2.5cm、柱高 2.79m 的竖直柱成功地分离了苯-环己烷混合物,该柱内填充非挥发性液相渗入填料^[31~34]。

逆流移动床过程还被应用于废水的处理中。利用逆流移动床处理废水能降低树脂的消耗。SMB 在废水处理中的应用包括核工业中放射性废水处理,矿物废水处理,浓缩金属表面精整废水处理,冶炼厂废水处理^[35],城市废水处理^[36],水果厂废水处理^[37],稀有金属废水处理等。

为了在液相系统条件下应用移动柱系统,P. E. Barker 和国际渔业工程有限公司共同建造了一个液相移动柱色谱系统。它由 44 个内径 8cm,柱长 28cm 的不锈钢柱首尾相连构成。这些不锈钢管竖直放在两个不锈钢“O”形圆环之间。Barker 等使用该种设备分离葡萄糖-淀粉混合物,并用多孔硅胶珠作固定相分离了平均分子量为 96000 的右旋糖酐高分子^[38]。

1.1.2.4 模拟移动床系统

模拟移动床技术综合了固定床与移动床的优点,避免了两者的缺点。模拟移动床实质是模拟逆流,模拟移动床系统在结构上有几种不同类型:一类是由美国 UOP 公司开发的 Sorbax 系统^[39~41]。在典型的 Sorbax 过程中,固定相通常是分子筛,吸附床层被分为若干塔层,每个塔节都与专门设计的旋转阀相连,不断改变进样与出样的位置。利用精心设计的阀来协调进样液、洗脱液入口以及两个产品出口的位置,从而模拟固定相与流动相的逆流流动。Sorbax 系统用于液相分离,其操作原理见图 1-9。

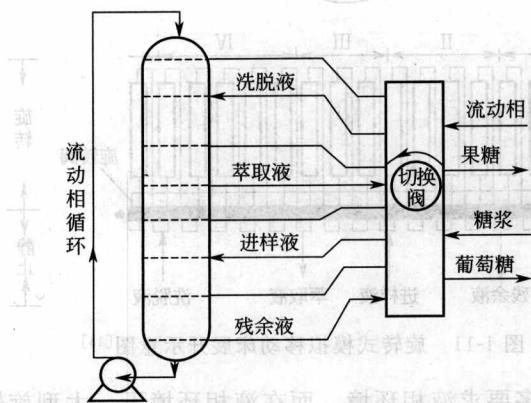


图 1-9 UOP Sorbax 系统