



现代分离科学

Modern Separation Science

刘震 主编



化学工业出版社



现代分离科学

Modern Separation Science

刘震 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书注重系统性、科学性、实用性和前沿性的统一。涵盖了现代分离科学的基础知识、常用方法、代表性应用和最新进展,比较全面地反映了分离科学的现状与最新发展方向。在内容编排上,打破了传统的学科划分,在介绍现代分离方法与技术的基础上,融入了样品制备技术、分离科学中的先进材料和蛋白质组学中的分离技术等内容,体现了材料科学、分离科学、生命科学学科之间的交叉,可以起到开拓思维与培养创新能力的作用。

主要读者对象为在读研究生、高校教师及科研人员,同时满足学科交叉带来的各专业各学科之间的相互借鉴和学习的需要。

图书在版编目(CIP)数据

现代分离科学 / 刘震主编. —北京: 化学工业出版社,
2017.8

ISBN 978-7-122-30157-4

I. ①现… II. ①刘… III. ①分离-高等学校-教材
IV. ①TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 164165 号

责任编辑: 李晓红
责任校对: 王 静

装帧设计: 王晓宇

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 刷: 三河市航远印刷有限公司
装 订: 三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 26½ 字数 475 千字 2017 年 9 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: 98.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

分离科学是一门具有重要实际应用价值的科学。分离技术不仅和我们的日常生活密切相关,而且是石油化工、有机合成、医药卫生、环境保护、食品安全、生命科学研究乃至空间探索等领域中的重要工具。在目前的学科体系中,分离科学的很多内容常常分散到分析化学、有机合成、药物化学、仪器分析等教材中进行讲授,专门以分离科学为主题的教材和参考书比较少。因此,一本比较详细和全面地介绍分离科学的基础知识、核心方法和最新进展的教材和参考书是很重要和必要的。

本书的定位为化学、生物及相关专业的本科高年级以上水平读者易读懂、用得上的参考书,主要读者对象为在读研究生、高校教师及科研人员,同时满足学科交叉带来的各专业、各学科之间相互借鉴和学习的需要。为此,本书力求达到系统性、科学性、实用性和前沿性的统一。在内容上力求涵盖现代分离科学的基础知识、常用方法、代表性应用和最新进展,比较全面地反映分离科学的现状与最新发展方向。在内容编排上,在介绍现代分离方法与技术的基础上,融入了样品制备技术、分离科学中的先进材料和蛋白质组学中的分离技术等内容,体现了材料科学、分离科学、生命科学学科之间的交叉,可以起到开拓思维与培养创新能力的作用。

第1章为绪论,主要介绍分离科学的发展简史,并从动力学和热力学的角度阐述如何理解分离科学和进行分离科学研究。

第2章为气相色谱,主要介绍气相色谱的基本原理和基本理论,色谱柱系统、仪器构造、定性定量分析和典型应用。

第3章为液相色谱,主要介绍液相色谱的分离原理、基本理论、常见分离模式、仪器构成、方法发展、多维高效液相色谱、联用技术、典型应用和最新的发展。

第4章为凝胶电泳,主要介绍电泳绪论、凝胶电泳支持介质、各种模式的原理与特点、制备电泳、印迹技术和其他常用电泳技术。

第5章为毛细管电泳,主要介绍毛细管电泳的基本理论、分离模式与条件选择、检测方法、进样方式、在线样品浓缩技术、典型应用和最新进展。

第6章为微流控芯片，主要介绍微流控芯片的发展历史和基本特征、微流控芯片加工技术、微流控芯片中的分离技术以及典型应用。

第7章为现代样品制备技术，主要介绍样品前处理方法与技术、新型样品前处理介质、在线样品前处理/分离分析联用技术和对样品制备技术的展望。

第8章为分离科学中的先进材料，主要介绍在分离科学中常用的和具有应用潜力的先进材料的特点和典型应用，这些材料包括介孔整体材料、膜材料、磁性材料和分子印迹聚合物等。

第9章为蛋白质组学研究中的分离技术，介绍主要分离技术在蛋白质组学研究中的作用和常用的分离技术。

本书是在所有编写人员的辛勤付出和通力协作下完成的，尤其是本书因诸多原因成书过程较长，所有编写专家一直不离不弃，对本书的编写予以大力支持。本书在写作过程中得到了中国科学院大连化学物理研究所张丽华研究员及梁玉副研究员的大力支持。本书在立项过程中得到了南京大学朱俊杰教授和中国科学院上海有机化学研究所康经武研究员的支持。责任编辑李晓红在本书的立项和写作过程中提供了诸多有益的建议和帮助。在此，谨向以上专家致以衷心的感谢！

由于水平有限，书中难免有疏漏或不妥之处，敬请读者批评指正。

刘 震

2017年8月

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001
1.1 分离科学的重要性	001
1.2 分离科学的发展历史	001
1.3 从基本理论讨论分离科学的发展	003
1.4 展望	008
参考文献	009
第 2 章 气相色谱	010
2.1 色谱理论基础	010
2.1.1 塔板理论	010
2.1.2 速率理论	011
2.1.3 色谱基本关系式	014
2.2 色谱柱系统	017
2.2.1 气固填充色谱柱	018
2.2.2 气液填充色谱柱	018
2.2.3 填充柱的制备	020
2.2.4 毛细管柱气相色谱法	022
2.3 气相色谱仪器系统	023
2.3.1 气相色谱仪器结构	023
2.3.2 气相色谱检测器	023
2.3.3 气相色谱仪器进展	030
2.3.4 专用气相色谱仪	033
2.4 色谱定性和定量分析	034
2.4.1 色谱定性分析	034
2.4.2 定量分析	036
2.4.3 气相色谱-质谱联用中相关定性定量分析方法及应用	039
2.5 气相色谱应用	042

2.5.1	石油气体分析	042
2.5.2	环境样品分析	043
2.5.3	食品样品分析	046
2.5.4	药物分析	048
2.5.5	中药分析	049
	参考文献	053
第 3 章	高效液相色谱	054
3.1	高效液相色谱法简介	054
3.1.1	液相色谱法的发展	054
3.1.2	高效液相色谱与经典液相色谱的比较	056
3.1.3	高效液相色谱 (HPLC) 与气相色谱 (GC) 的比较	056
3.2	高效液相色谱法的基本理论	058
3.3	液相色谱的塔板理论和速率理论	059
3.3.1	塔板理论	059
3.3.2	速率理论	060
3.4	高效液相色谱分离模式	062
3.4.1	分配色谱	063
3.4.2	离子交换色谱	065
3.4.3	离子对色谱法	065
3.4.4	体积排阻色谱	066
3.4.5	疏水作用色谱	067
3.4.6	亲水作用色谱	067
3.4.7	亲和色谱	068
3.5	高效液相色谱仪	069
3.5.1	高压输液泵及梯度洗脱装置	070
3.5.2	进样装置	072
3.5.3	色谱柱	073
3.5.4	液相色谱检测器	075
3.6	高效液相色谱梯度洗脱	081
3.6.1	梯度洗脱的原理	081
3.6.2	梯度范围	082
3.6.3	最佳梯度方法	082

3.6.4	最佳梯度范围	082
3.6.5	最佳峰分布	082
3.6.6	梯度洗脱装置	083
3.6.7	梯度洗脱形式及选择	084
3.7	多维高效液相色谱	084
3.7.1	离子交换色谱/反相色谱(IEC/RPLC)联用	085
3.7.2	亲和色谱/反相色谱(affinity LC/RPLC)联用	086
3.7.3	分子排阻色谱/离子交换色谱(SEC/IEC)联用	086
3.7.4	其他多维联用技术	086
3.8	高效液相色谱法的进展	087
3.8.1	超高效液相色谱(UPLC或UHPLC)	087
3.8.2	纳流液相色谱(或纳升级液相色谱)	088
3.8.3	芯片色谱	089
3.8.4	整体柱技术	090
3.9	高效液相色谱技术在核酸损伤分析中的应用	094
3.9.1	高效液相色谱法用于BPDE-DNA加合物立体异构体的检测	094
3.9.2	高效液相色谱串联质谱法(HPLC-MS)用于DNA加合物的分析	096
	参考文献	099

第4章 凝胶电泳 101

4.1	电泳概述	101
4.1.1	基本原理	101
4.1.2	发展历史	102
4.1.3	主要应用	103
4.2	凝胶电泳的支持介质	103
4.2.1	聚丙烯酰胺凝胶	103
4.2.2	琼脂糖凝胶	105
4.3	各种凝胶电泳的原理、特点与应用	106
4.3.1	常规聚丙烯酰胺凝胶电泳	106
4.3.2	十二烷基磺酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳	108
4.3.3	琼脂糖凝胶电泳	109
4.3.4	等点聚焦	111
4.3.5	双向电泳	114

4.4	制备电泳	115
4.5	印迹技术	116
4.5.1	基本原理	116
4.5.2	DNA 印迹法	116
4.5.3	RNA 印迹法	118
4.5.4	蛋白质印迹法	119
4.6	其他常用电泳技术	120
4.6.1	脉冲场凝胶电泳	120
4.6.2	单细胞凝胶电泳	121
4.6.3	变性梯度凝胶电泳	121
4.6.4	差异凝胶电泳	122
	参考文献	122

第5章 毛细管电泳

5.1	简介	124
5.2	基本理论	125
5.2.1	毛细管电泳仪器基本结构	125
5.2.2	基本概念	126
5.2.3	分离效率和分离度	130
5.2.4	峰展宽因素	132
5.3	分离模式与分离条件选择	139
5.3.1	毛细管区带电泳	139
5.3.2	胶束电动色谱	156
5.3.3	毛细管凝胶电泳	169
5.3.4	毛细管等电聚焦	179
5.3.5	毛细管等速电泳	183
5.3.6	毛细管电色谱	186
5.4	检测方法	197
5.4.1	紫外-可见吸收检测法	198
5.4.2	激光诱导荧光检测	199
5.4.3	电化学检测	200
5.4.4	质谱检测	202
5.4.5	间接检测	204

5.5	进样技术	205
5.5.1	常规进样	205
5.5.2	预浓缩进样	206
5.5.3	在线样品浓缩	207
5.6	应用	209
5.6.1	无机及有机化合物	210
5.6.2	手性分离	210
5.6.3	氨基酸和多肽	213
5.6.4	蛋白质及蛋白质组分析	214
5.6.5	糖的分析	220
5.6.6	核酸分析	221
5.6.7	单细胞分析	226
	参考文献	227
第 6 章	微流控芯片	229
6.1	简介	229
6.1.1	发展历史	229
6.1.2	微流控芯片的基本特征	231
6.1.3	应用前景	232
6.2	微流控芯片加工技术	234
6.2.1	基本实验条件与共性技术	234
6.2.2	三类芯片材料及加工方法	237
6.2.3	其他新型芯片材料和加工方法	242
6.3	微流控芯片分离技术	245
6.3.1	芯片电泳	245
6.3.2	芯片色谱	253
6.4	微流控芯片与细胞分离	262
6.4.1	分离机理	263
6.4.2	应用领域	268
	参考文献	271
第 7 章	现代样品制备技术	273
7.1	样品前处理概述	273

7.2	样品前处理技术分类	275
7.2.1	固体样品前处理技术	275
7.2.2	液体样品前处理技术	276
7.2.3	气体样品前处理技术	277
7.3	常用样品前处理方法	278
7.3.1	相分配样品前处理方法	279
7.3.2	相吸附样品前处理方法	289
7.3.3	场辅助样品前处理方法	302
7.3.4	膜分离样品前处理方法	313
7.3.5	化学转换样品前处理方法	315
7.3.6	气体样品前处理方法	318
7.3.7	生物大分子样品前处理技术	322
7.4	新型样品前处理介质	331
7.4.1	绿色溶剂	332
7.4.2	高选择性吸附剂	332
7.4.3	纳米和多孔材料	335
7.4.4	整体柱材料	337
7.5	在线样品前处理/分离分析联用技术	338
7.5.1	样品前处理-色谱在线联用基本原则	339
7.5.2	样品前处理-色谱在线联用接口设计	340
7.5.3	样品前处理-色谱在线联用典型实例	342
7.6	样品前处理技术展望	346
	参考文献	346

第8章 分离科学中的先进材料 349

8.1	简介	349
8.2	分子印迹聚合物	349
8.2.1	分子印迹技术原理	349
8.2.2	分子印迹聚合物的制备方法及结构	351
8.2.3	分子印迹聚合物的分离应用	355
8.3	介孔材料	358
8.3.1	介孔材料的分类	359
8.3.2	介孔材料的制备及原理	360

8.3.3	介孔材料的分离应用	362
8.4	膜分离用分离材料及其性能	364
8.4.1	薄膜复合材料和纳米复合材料	364
8.4.2	仿生膜	365
8.4.3	无机膜	366
8.5	新型色谱分离材料	368
8.5.1	整体柱分离材料	368
8.5.2	新型 HPLC 填料	369
8.5.3	离子液体	370
8.6	其他	371
8.6.1	碳纤维	371
8.6.2	溶胶-凝胶	372
8.6.3	纳米分离材料	372
8.6.4	磁性分离材料	373
	参考文献	374

第 9 章 蛋白质组学研究中的分离技术 377

9.1	蛋白质组分析平台	377
9.1.1	蛋白质组学分析简介	377
9.1.2	液质联用分析平台	380
9.1.3	MALDI 质谱分析平台	384
9.1.4	分离技术在蛋白质组学分析中的应用	385
9.2	蛋白质样品预处理技术	386
9.2.1	蛋白质的分级技术	386
9.2.2	高丰度蛋白质的去除技术	387
9.2.3	低丰度蛋白质的富集技术	388
9.2.4	蛋白质均衡技术	389
9.3	多肽混合物的多维分离技术	390
9.3.1	离子交换-反相色谱	391
9.3.2	反相色谱-反相色谱	393
9.3.3	电泳-反相色谱	396
9.4	特征肽段的选择性富集技术	397
9.4.1	含稀有氨基酸残基肽段的富集技术	397

9.4.2	末端肽的富集技术	399
9.4.3	磷酸肽的富集技术	400
9.4.4	糖肽的富集技术	403
9.4.5	内源性多肽的富集技术	405
9.5	蛋白质组的集成化分析技术	405
9.5.1	蛋白质组的在线标记系统	406
9.5.2	磷酸化蛋白质组分析中样品预处理的集成化技术	407
9.5.3	糖基化蛋白质组分析中样品预处理的集成化技术	409
	参考文献	411

第1章 绪论

刘震

南京大学化学化工学院

1.1 分离科学的重要性

分离科学是一门具有重要实际应用价值的科学。分离科学与人们日常生活密切相关，日常生活中的饮用水处理涉及沉淀、过滤和膜分离等分离技术，食糖及低卡路里甜味剂需要利用色谱技术进行纯化，很多药品在生产过程中需要使用不同的分离技术进行纯化。更为重要的是，分离科学已成为石油化工、有机合成、生理生化、医药卫生、环境保护、食品安全、生命科学研究乃至空间探索等领域中的重要工具。以生命科学研究为例，2001年2月，美、日、德、法、英、中6国科学家和美国塞莱拉公司联合公布人类基因组图谱的初步框架，该计划的顺利实施，得益于高通量的阵列毛细管电泳仪的发明；2012年，美国科学家莱夫科维茨（Robert J. Lefkowitz）和克比尔卡（Brian K. Kobilka）因“G蛋白偶联受体研究”获诺贝尔化学奖，在G蛋白偶联受体的发现过程中，亲和色谱发挥了关键作用。再以医药卫生为例，2015年，中国科学家屠呦呦因青蒿素等抗疟药的卓越贡献，与坎贝尔（William C. Campbell）和大村智（Satoshi Ōmura）共同获得诺贝尔生理学或医学奖。屠呦呦是首位接受本土高等教育且在中国大陆进行科研工作的自然科学类诺贝尔奖得主。青蒿素的发现过程中，分离纯化技术发挥了关键作用。

除了支撑相关行业的发展外，分离科学还是一个重要的技术市场。例如，色谱仪及耗材已经是一个重要的产业。据美国 Transparency Market Research 公司2012年的统计和预测，全球色谱市场将从2011年的66亿美元增加到2017年的89亿美元。另据美国 BCC Research 公司2012年统计和预测，全球色谱试剂市场2011年为43亿美元，2012年为52亿美元，2017年将增加到119亿美元。

1.2 分离科学的发展历史

分离科学包含了众多的相关技术，如液-液萃取和离心分离等，但主要的系统

性的分支学科主要包括色谱、电泳和微流控芯片等，其中色谱分离最具代表性，色谱中的经典理论和原理已经被应用于指导新型分离技术的发展。下面将以色谱、电泳和微流控芯片的发展为主要代表阐述分离科学的重要发展历史。

1903 年，俄国植物学家茨维特（Mikhail Semenovich Tswett）用石油醚洗脱被碳酸钙吸附的植物色素时，观察到在管内的碳酸钙上形成绿、黄等三种颜色的 6 个色带，从而分离了叶绿素、叶黄素和胡萝卜素。当时茨维特把这种色带叫作“色谱”，茨维特把他开创的方法叫色谱法。茨维特因此被提名为 1917 年诺贝尔化学奖的候选人。

1931 年，德国科学家库恩（Richard Kuhn）等人重复了茨维特的某些实验，用氧化铝和碳酸钙分离了 α -、 β -和 γ -胡萝卜素，此后用这种方法分离了 60 多种这类色素，并从维生素 B 中分离出维生素 B₆。库恩发展的色谱技术对于这些物质的分离和纯化发挥了重要作用。由于在胡萝卜素和维生素上的出色研究，库恩获得了 1938 年的诺贝尔化学奖。

1937 年瑞典科学家蒂塞利乌斯（Arne Wilhelm Kaurin Tiselius）创立了电泳技术，并利用该技术揭示了血清中蛋白的复杂性质，并因为电泳技术和吸附分析的贡献荣获 1948 年度诺贝尔化学奖。

1941 年，英国生物化学家马丁（Archer John Porter Martin）和辛格（Richard Laurence Millington Synge）建立了液-液分配色谱法。1944 年，康斯登（R. Consden）、乔丹（A.H. Gordon）和马丁发明了纸色谱。1951 年，詹姆斯（A. T. James）和马丁建立了气-液分配色谱法。马丁和辛格因为分配色谱的发明获得了 1952 年的诺贝尔化学奖。

1958 年，美国生物化学家斯特恩（William H. Stein）和摩尔（Stanford Moore）研制出基于离子交换色谱的氨基酸分析仪，用它确定了核糖核酸酶的分子结构，后来氨基酸分析仪成为研究蛋白质和酶结构的重要工具，斯特恩和摩尔因此而获得了 1972 年的诺贝尔化学奖。

1963 年，吉丁斯（J. Calvin Giddings）基于理论推导指出了要实现跟气相色谱相同分离效率的液相色谱需要的条件。之后的 60 年代末，经过荷瓦斯（C. G. Horvath）、哈伯（J. F. K. Huber）、科克兰（J. J. Kirkland）、施耐德（L. Snyder）和斯科特（R. P. W. Scott）等的奠基性工作，开启了高效液相色谱（HPLC）的时代。高效液相色谱使用粒径更细的固定相填充色谱柱，提高色谱柱的塔板数，以高压驱动流动相，使得经典液相色谱需要数日乃至数月完成的分离工作得以在几个小时甚至几十分钟内完成。

1981 年，美国学者 Jorgenson 在 Hjerten 等的基础上发明了毛细管电泳（CE）

[1]。1984 年,日本学者寺部茂教授(Shigeru Terabe)^[2]创立了胶束电动色谱(MEKC),将毛细管电泳的适用对象从离子和带电化合物扩展到中性分子。之后,Kambara 和 Dovichi 独立地发展出毛细管阵列电泳,为人类基因组计划的顺利推进提供了重要的技术支撑^[3]。

1990 年,加拿大学者 Pawliszyn^[4]提出了固相微萃取(SPME)技术,为样品制备(尤其是气体样品)提供了高效便捷的解决方案。

1992 年,Manz, Widmer 和 Harrison 等^[5]开创了微型化和集成化的分离技术,即微流控芯片或芯片实验室(lab-on-a-chip)。

1.3 从基本理论讨论分离科学的发展

分离度是描述分析型分离中的分离效果的最重要的参数。以下我们以色谱分离为例,通过对分离度进行理论剖析,阐述如何获得良好的分离和进行分离科学研究需要考虑的基本问题。

在色谱分离中,分离度与其他色谱参数间的关系用以下公式描述:

$$R_s = \frac{\sqrt{N}}{4} \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \left(\frac{k_B}{1 + k_B} \right) \quad (1-1)$$

式中, R_s 为分离度; N 为描述色谱系统分离效率的理论塔板数; k 为被分离物在色谱柱上的保留因子; α 为选择因子,为被分离的物质对 A 和 B 的保留因子之比 ($\alpha = k_B/k_A$)。以上公式中,决定分离度大小的因素可分为两个:动力学因素和热力学因素。等式右边的第一项为动力学因素,主要与速度有关,其决定了分离柱效的高低。等式右边的后两项为热力学因素,主要与温度有关,其决定了被分离物在色谱系统中的保留和选择性。动力学因素决定了被分离物在色谱系统中的传质过程,而热力学因素决定了分离物在色谱系统中的相互作用。因此,简单地从本质上讲,色谱就是一个涉及相互作用的传质过程。

为了获得良好的分离,色谱系统必须达到一定的分离效能。色谱科学近六七十年发展就是在不断追求高分离效能的历史。塔板理论虽然不能反映色谱分离的真实过程,但它能有效地描述色谱分离过程中影响分离效能的各种因素,为色谱的发展提供重要的理论指导。分离效能可用理论塔板数(N)和理论塔板高度(H)描述,其相互关系为:

$$H = L / N \quad (1-2)$$

式中, L 为色谱柱长度。理论塔板高度可以用经典的范第姆特(Van Deemter)方程进行描述:

$$H = A + B/u + Cu \quad (1-3)$$

式中, u 为流动相流速; 等式右边由参数 A 、 B 、 C 相关的三项构成, 分别为涡流扩散项、纵向扩散项和传质阻力项。

涡流扩散项反映被分离物在填充柱中可能采取的不同路径, 因而经过的路程也不一样长, 引起色谱峰的展宽, 也称为“多路径效应”。在毛细管开管柱中不存在多路径效应, 这一项为零。涡流扩散项用下式描述:

$$A = 2\lambda d_p \quad (1-4)$$

式中, λ 为一个与柱内填料粒度均一性与填充状态有关的常数; d_p 为色谱填料粒径。

纵向扩散项表示的是由于色谱柱各部分存在浓度差而引起的纵向扩散带来的峰展宽。纵向扩散项用下式描述:

$$B/u = 2\gamma D_m / u \quad (1-5)$$

式中, γ 为色谱填料填充均一性相关的常数; D_m 为被分离物在流动相中的扩散系数。

传质阻力项表示达到固定相与流动相的平衡后由于在固定相与流动相传质存在着阻力引起的峰展宽, 由固定相传质阻力项 ($C_s u$) 和流动相传质阻力项 ($C_m u$) 构成, 分别为:

$$C_s u = \omega d_f^2 u / D_s \quad (1-6)$$

$$C_m u = R d_p^2 u / D_m \quad (1-7)$$

式中, D_s 为被分离物在固定相中的扩散系数; d_f 为固定相的膜厚度; d_p 在填充柱色谱中为填料粒径, 在毛细管柱中为毛细管内径 (常常用 d_c 表示); ω 和 R 为与保留因子相关的常数。

将范第姆特方程在填充柱液相色谱中涉及各个参数和常数的典型数值代入后, 绘制得到的曲线示于图 1-1。对于已选定的色谱系统, A 项为一个与流速无关的常数, B 项随流速的升高按倒数关系逐渐降低, 而 C 项则随流速的升高线性升高。这三项叠加所产生的曲线为理论塔板高度随流速升高而降低, 在达到一定值后随流速升高而升高的“弯钩”型曲线。为了获得更高的分离效率, 应设法降低各参数对理论塔板高度的影响, 使得范第姆特曲线上的最低点更低。另一方面, 为了使得色谱系统适合于快速分析, 还应设法使范第姆特曲线的底部更加平坦, 从而可以在更宽的流速范围内得到低的理论塔板高度。