

SEPU JISHU CONGSHU

色谱技术丛书

色谱仪器维护与故障排除

第二版

吴方迪 张庆合 编著



化学工业出版社

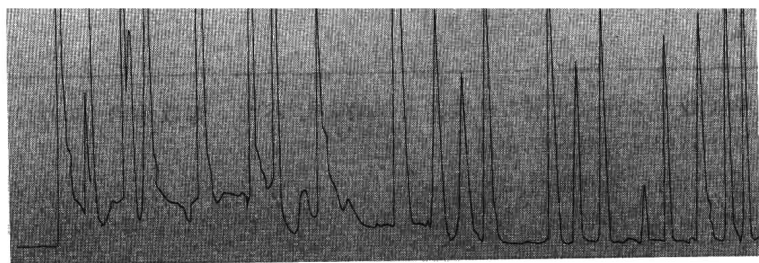
SEP U J I S H U C O N G S H U

色 谱 技 术 丛 书

色谱仪器维护与故障排除

第二版

吴方迪 张庆合 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在综合介绍色谱仪器维护与故障排除的基本原则与思路的基础上,结合色谱仪器的结构与工作原理,从仪器各组成部分与部件产生各类故障的可能原因以及判断和处理故障的基本思路与方法学出发,系统地介绍了液相和气相色谱的输液系统、气路系统、流动相、温度控制系统、色谱柱、进样系统、检测器等各部分的基本原理、常见故障的判断与排除方法,并分别对液相和气相色谱分析方法建立中的问题进行了剖析,最后介绍了色谱定量分析中常见问题及其解决方法。书末附了《液相色谱仪检定规程》、《气相色谱仪检定规程》和《台式气相色谱-质谱联用仪校准规范》。具有较强的实用性和可操作性。

本书可供从事生命科学、环境科学、医药、食品、农业、化学和化工等行业从事色谱分析的科学研究人员、教师、学生、技术人员、实验员和仪器开发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

色谱仪器维护与故障排除/吴方迪,张庆合编著.
2版. —北京:化学工业出版社,2008.7
(色谱技术丛书)
ISBN 978-7-122-03306-2

I. 色… II. ①吴…②张… III. 色谱仪-维修
IV. TH833.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 097394 号

责任编辑:任惠敏
责任校对:王素芹

装帧设计:于兵

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张22 字数425千字 2008年9月北京第2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:45.00元

版权所有 违者必究

序

《色谱技术丛书》第一版是从2000年初开始出版的。由于这是一套较全面地介绍当代色谱技术的丛书，取材新颖，内容丰富，所以从一出版就受到了读者的普遍欢迎和肯定，同时也被众多的技术培训班选作教材，致使每一分册的发行量都突破了万册。但是，随着科学技术的突飞猛进和国家经济建设的快速发展，色谱作为主要的分离分析技术，需求与应用越来越广泛，从事色谱分析工作的人员也越来越多，年轻的和刚刚从事色谱分析的人员急需普及和提高色谱分析的理论和技术。再者，色谱技术本身也在不断的发展，新技术不断出现，有必要向广大读者尽早介绍这些知识。此次，化学工业出版社与丛书主编、作者合作，适时地将这套丛书重新修订，再版面世，是对普及并推动色谱技术发展的又一贡献。

在经历了近五个年头的实践检验后，这套丛书的第二版除了对第一版原有的13个分册分别进行了修改和充实，增加了新的内容，包括新近发展的仪器、技术、方法与应用等的介绍，提高了丛书的质量；同时还进一步完善了整个丛书体系，增加了一些新的书目，特别是有关应用的书目，形成一套更完整的色谱技术丛书，以进一步满足广大读者的需求。增加的10本新的书目为：邓玉林等的《色谱手性分离技术及应用》，江桂斌、牟世芬等的《色谱在环境分析中的应用》，金熹高的《裂解气相色谱方法及应用》，廖杰、钱小红等的《色谱在生命科学中的应用》，田颂九等的《色谱在药物分析中的应用》，王绪卿、吴永宁等的《色谱在食品安全分析中的应用》，杨海鹰的《气相色谱在石油化工中的应用》，袁黎明的《制备色谱技术及应用》，于世林的《亲和色谱方法及应用》及胡净宇的《色谱在无机材料分析中的应用》。同第一版一样，这些分册的作者也都是长期在各自工作中

具有丰富经验的色谱专家。还应提出的是，此书也再次得到安捷伦科技有限公司的热情赞助。相信第二版《色谱技术丛书》会同第一版一样受到读者们的欢迎，特再为此序。

周同惠

2004年10月22日

第一版序

色谱作为一种分离技术与方法，自本世纪初发表第一篇论文算起，已有 100 年的历史，虽然在前 30 多年间这种方法未受到应有的重视，但自 40 年代以后，逐渐得到发展，而且其势头越来越猛，从技术到理论，到各种分离模式，以及在各个科学领域内的应用，得到了突飞猛进的发展，现在已经成为分析化学学科中的一个重要分支。同时为许多重要学科的发展作出了极大的贡献。在人类进入 21 世纪之际，人们面临着在信息科学、生命科学、材料科学、环境科学等领域的快速发展的挑战，在这些领域人才的需求成为国家高度发展的至关重要的因素。而色谱技术是生命科学、材料科学、环境科学必不可少的手段和工具。根据最近的统计在全世界各类分析仪器中气相色谱仪和液相色谱仪的营销总额占 25%~30%。2000 年对各类分析仪器的需求量也以液相色谱仪最多。可以毫不夸张地说，如果没有色谱技术的应用，自然科学和生命科学能发展到今天的这个样子是很难想象的。

有关色谱的各种专著国内外已经出版了许多种，其中多是针对色谱专业人员而写的专著，而缺少一套系统的比较全面的介绍当代色谱技术的丛书，供广大的工厂企业中从事色谱分析的初中级技术人员和科研院所的科技人员，大专院校的研究生，甚至管理人员及有关领导学习参考的书籍。为此化学工业出版社提议，由北京理化分析测试学会组织编写了这套‘简明扼要，深入浅出，通俗易懂，新颖实用’的色谱技术丛书。这套书以傅若农教授为主编，汪正范教授和刘虎威副教授作副主编。为联系方便，主要请在京的专家来编写，并自 1998 年初开始运作。从方便读者学习角度出发，将色谱技术的主要内容分为 13 册。分别为：傅若农之《色谱分析概论》，刘国詮、余兆楼等之《色谱柱技术》，陈义之《毛细管电泳技术及应用》，于世林之《高效液相色谱方法及应用》，刘虎威之《气相色谱

方法及应用》，云自厚、张晓彤之《液相色谱检测方法》，吴烈钧之《气相色谱检测方法》，汪正范之《色谱定性与定量》，汪正范等之《色谱联用技术》，牟世芬、刘克纳之《离子色谱方法及应用》，何丽一之《平面色谱方法及应用》，王立之《色谱分析样品处理》，吴方迪之《色谱仪器维护与故障排除》。这些编著者多是我国目前在教学与科研第一线为色谱科学努力奋进的中青年专家，在书中都反映了色谱领域的基本知识、基本方法和他们自己的宝贵经验以及有关领域的最新成果。这套丛书将给初学色谱的年轻科技工作者提供较完整的学习参考书，也为大中专学生提供一套有用的教学参考书。还应该提出的是，由于得到了安捷伦科技有限（原中国惠普）公司的赞助，这套书的出版才能顺利进行。值此书即将付梓之际，特书此以为序。

周同惠

1999年9月9日

前 言

作为高效分离分析技术与方法，色谱法已经成为环境科学、材料科学、生命科学、食品安全、药物研发等领域必不可少的分析检测技术。随着近年来国内色谱仪器的快速普及，色谱工作的从业人数也在迅速增加。鉴于目前国内高效液相色谱和气相色谱仪器的实际使用情况，紧密结合色谱分析的理论 and 实际，傅若农教授主编了《色谱技术丛书》。《色谱仪器维护与故障排除》一书作为丛书的一个分册，目的在于为广大色谱工作者提供实际操作中的启示与参考。

本书此次修订在基本保持第一版编写体系与特色的基础上，结合近几年色谱分析新技术与新方法以及读者建议，较大幅度地补充完善了内容、重新调整了结构。在编排上，首先适当地介绍了仪器部件的基本工作原理与基本结构，然后以仪器部件的日常维护与使用为重点，以故障检查与排除为主线进行系统介绍，以期更加方便读者。与第一版相比，本版中增加（或较大篇幅补充）了液相色谱流动相、手动进样阀、蒸发光散射检测器，气相色谱进样口、色谱柱选择、氮磷与质谱检测器的维护与故障排除等内容。并将第一版中故障预防、液相色谱分离基础、记录器和数据处理系统、梯度洗脱与样品预处理等章节内容重新进行了编排整理。实际工作中涉及的有关色谱技术理论、仪器结构图及常用数据等更详细资料，可参阅相关本丛书相关分册和其他有关专著。

本书共 15 章：第一章简单介绍了色谱分析的发展过程，比较了气相色谱法和液相色谱法的特点，并对色谱分析常用术语进行了介绍；第二章概括了色谱仪器维护与故障排除的基本思路与原则；第三章到第八章是液相色谱系统维护部分，在分别介绍液相色谱输液系统、流动相、进样系统、色谱柱、检测器等各部分原理与故障排除的基础上，对液相色谱分析中常见问题进行了汇总与分析；第九章到第十四章是气相色谱系统维护部分，其中第九章至第十三章分别介绍了气相色谱气路系统、温度控制系统、进样系统、色谱柱、检测器，第十四

章系统介绍了气相色谱分析中常见问题及其解决方法。最后的第十五章对色谱定量分析中常见的问题进行了分析。书末附了《液相色谱仪检定规程》、《气相色谱仪检定规程》和《台式气相色谱-质谱联用仪校准规范》，希望能够帮助读者了解仪器的基本指标及其测试方法和手段，对仪器的日常维护起到积极的作用。

由于不同厂商与型号的色谱仪器的构造差异较大，本书只能给出仪器维护的要点和对常见故障产生原因的整体思考、逻辑推理及解决思路，实际操作中还需参阅相关的仪器操作维护手册进行处理。

本书编写过程中，得到了中国计量科学研究院副院长于亚东研究员的大力支持，李红梅研究员、陈大舟研究员提供了诸多帮助，孟凡敏、陶红、张英等参加了部分内容的编写和文献整理工作。傅若农教授仔细审阅了书稿，并给予热情帮助与指导。Agilent、Waters、Shimadzu 和 Thermo 等公司提供了许多资料。在此表示诚挚的谢意。特别感谢本书责任编辑的宝贵建议与不辞劳苦的编辑工作。感谢国家科技部（2006BAF07B03）和国家自然科学基金委员会（20775075）对书中所涉及项目的经费支持。

鉴于作者知识水平所限，书中不妥和错误之处在所难免，敬请广大专家和读者批评指正，作者表示衷心感谢！

作者
2008 年 4 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 色谱法的出现与发展	1
第二节 气相色谱与液相色谱法	1
第三节 色谱分离理论与术语	3
参考文献	6
第二章 色谱仪器维护与故障排除概述	7
第一节 日常维护与故障排除的思路	7
第二节 仪器维护的基本规则	9
第三节 逻辑推理（故障的确定）	11
第四节 故障的预防	12
第五节 备件和工具箱	17
参考文献	18
第三章 液相色谱输液系统	19
第一节 输液泵简介	19
第二节 泵故障的排除	24
第三节 管路的种类与规格	29
第四节 液相色谱接头	35
参考文献	41
第四章 液相色谱流动相	42
第一节 液相色谱流动相基础	42
第二节 梯度洗脱	48
第三节 流动相脱气	53
第四节 流动相贮存与过滤	57
第五节 缓冲溶液	62
参考文献	68
第五章 液相色谱进样系统	69
第一节 手动进样器简介	69
第二节 手动进样器故障排除	75
第三节 自动进样器原理	89
第四节 自动进样器故障预防	91
第五节 自动进样器故障和解决方法	94
参考文献	97

第六章 液相色谱柱	98
第一节 液相色谱柱介绍	98
第二节 柱的评价	102
第三节 色谱柱预防性保护与柱寿命的延长	105
第四节 故障与解决的办法	108
参考文献	113
第七章 液相色谱检测器	114
第一节 检测器原理与特性	114
第二节 检测器故障和解决方法	122
参考文献	133
第八章 液相色谱分析故障排除	135
第一节 液相色谱故障排除综述	135
第二节 峰形问题	156
第三节 坏柱	158
第四节 样品超载	159
第五节 溶剂与样品不相配	160
第六节 柱外效应与强保留基质	162
第七节 次级保留效应	164
第八节 不合适的缓冲液	169
第九节 其它效应	170
第十节 保留时间改变	175
第十一节 液相色谱方法的建立	181
参考文献	183
第九章 气相色谱气路系统	184
第一节 气路系统简介	184
第二节 气体	188
第三节 流量的调节	191
第四节 气路泄漏的检查与排除	195
参考文献	197
第十章 温度控制系统	198
第一节 风扇电机系统	198
第二节 温度控制系统	200
第三节 温度测量示值误差大	206
参考文献	207
第十一章 气相色谱进样系统	208
第一节 进样口	208
第二节 进样组件	212
第三节 进样装置的故障排除汇总	219

参考文献	223
第十二章 气相色谱柱	224
第一节 色谱柱的种类	224
第二节 色谱柱的选择	228
第三节 色谱柱故障与维护	235
参考文献	238
第十三章 气相色谱检测器	239
第一节 热导检测器	239
第二节 氢火焰离子化检测器	255
第三节 电子捕获检测器	265
第四节 火焰光度检测器	270
第五节 氮磷检测器	276
第六节 质谱检测器	279
第七节 气相色谱检测器的维护	285
参考文献	287
第十四章 气相色谱分析问题	288
第一节 不出峰与灵敏度降低	288
第二节 基线问题	290
第三节 色谱峰问题	293
第四节 分辨率降低	297
第五节 保留时间不重复	298
参考文献	300
第十五章 定量问题	301
第一节 定量分析简介	301
第二节 精密度问题	303
第三节 准确度问题	309
第四节 误差问题的解决	313
第五节 色谱方法建立与验证	314
参考文献	316
附录	317
I 气相色谱仪检定规程 (JJG 700—1999)	317
II 液相色谱仪检定规程 (JJG 705—2002)	325
III 台式气相色谱-质谱联用仪校准规范 (JJF 1164—2006)	333

第一章 绪 论

第一节 色谱法的出现与发展

色谱法是由俄国植物学家茨维特 (Tswett) 于 1903 年首先提出的^[1~3], 经过一百多年的发展与完善, 无论是色谱理论、仪器, 还是技术、方法与应用等方面都取得了巨大进展, 已经成为分析科学领域最重要组成部分, 在生命科学、生物工程、环境科学、制药、食品安全等几乎所有领域发挥了举足轻重的作用, 对现代科学技术的发展起了很大的推进作用。

纵观色谱分析方法的发展过程, 20 世纪 50 年代创立气相色谱法, 把色谱法由经典的分离技术提升到分离与“在线”分析检测的新水平, 为色谱法成为现代分离分析方法奠定了基础^[4]; 1957 年诞生的毛细管色谱法、20 世纪 60 年代推出的色谱-质谱联用技术^[5], 有效地弥补了色谱法定性分析特征性差的弱点; 20 世纪 70 年代高效液相色谱法崛起, 克服了气相色谱法不能直接用于分析难挥发、热不稳定及高分子化合物的不足, 将色谱法的应用范围扩大到生命科学、生物工程、制药等新兴领域, 使得色谱法在现代科学研究中占据一席之地^[6~8]; 20 世纪 80 年代出现的超临界流体色谱法, 兼有气相色谱法与高效液相色谱法的优点, 在天然产物的分离与纯化等方面显示了极大的潜力; 20 世纪 80 年代飞速发展起来的毛细管电泳法已成为生命科学领域最重要的分析方法之一; 20 世纪 90 年代崛起的毛细管电色谱法兼有毛细管电泳的高效与微填充柱 HPLC 色谱法选择性好的优点, 成为人们研究的热点领域^[9]。近年来, 针对复杂样品的分离分析, 发展起来的二维气相色谱与二维液相色谱技术与装置在天然产物、蛋白质组、代谢组学等领域显示了强大的优势^[10]。

关于色谱法的进展有诸多文献可供参考, 关于色谱仪器、色谱专家系统、色谱-光谱联用、色谱-质谱联用、二维色谱、毛细管电色谱法等方面的详细论述, 可参考本丛书相关分册。

第二节 气相色谱与液相色谱法

色谱法作为一种分离方法, 是利用物质在两相中吸附或分配系数的微小差异

达到分离的目的。色谱过程中，不同组分在相对运动、不相混溶的两相间交换，其中相对静止的一相称固定相，而相对运动的相称流动相。当两相作相对移动时，被测物质在两相之间进行反复多次的质量交换，这样使原来微小的性质差异（吸附、分配、离子交换、亲和力或分子尺寸等）产生很大的效果，达到分离、分析及测定一些物理化学常数的目的。作为一种分析方法，色谱法最大的特点在于能将复杂混合物分离为各组分后加以检测。

色谱法具有高效、快速、灵敏的特点，液相色谱和气相色谱法是目前应用最广泛的、最有代表性的色谱分离分析方法，表 1-1 将这两种方法的特点进行了综合比较。

表 1-1 高效液相色谱法与气相色谱法的比较

方法	高效液相色谱法	气相色谱法
进样方式	样品需制成溶液	样品需加热汽化或裂解
流动相	1. 离子型、极性、弱极性或非极性溶液，可与被分析样品产生相互作用，并能改善分离的选择性 2. 液体流动相动力黏度为 $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，输送压力可达 45MPa 甚至更高	1. 惰性气体，不与被分离的样品发生相互作用 2. 气体流动相动力黏度为 $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，输送压力仅为 0.1MPa~1MPa
固定相	1. 分离机理：可依据吸附、分配、筛析、离子交换、亲和、手性作用等多种原理进行样品分离，可供选择的固定相种类繁多 2. 色谱柱：填充粒径小（ $5\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ ），柱内径 3mm~6mm，柱长 10cm~25cm，柱效 10^4 塔板数；毛细管柱内径 0.01mm~0.03mm，柱长 5m~10m，柱效（ $10^4 \sim 10^5$ ）塔板数；柱温为常温	1. 分离机理：依据吸附、分配、络合、手性作用等原理进行样品分离，可供选择的固定相种类较多 2. 色谱柱：填充粒径大（0.1mm~0.5mm），柱内径 1mm~4mm，柱长 1m~4m，柱效（ $10^2 \sim 10^3$ ）塔板数；毛细管柱内径 0.1mm~0.5mm，柱长 10m~100m，柱效（ $10^3 \sim 10^4$ ）塔板数；柱温为常温~420℃
检测器 ^①	选择性：UVD，PAD（DAD），FD，ECD 通用型：ELSD，RID，CAD，MS	选择性：ECD*，FPD，NPD 通用型：TCD，FID，MS
应用范围	可分析低分子量、低沸点样品及高沸点、中分子量、高分子量有机化合物（极性、非极性）；离子型无机化合物；热不稳定，具有生物活性的生物分子	可分析低分子量、低沸点有机化合物、永久性气体；配合程序升温可分析高沸点有机化合物；配合裂解技术可分析高聚物
仪器组成	溶质在液相的扩散系数小（ $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ），因此在色谱柱以外的死空间应尽量小，以减少柱外效应对分离效果的影响	溶质在气相的扩散系数大（ $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ ），柱外效应的影响较小，对毛细管气相色谱应尽量减小柱外效应对分离效果的影响

① UVD——紫外吸收检测器；PAD（DAD）——二极管阵列检测器；FD——荧光检测器；ECD——电化学检测器；RID——示差折光检测器；ELSD——蒸发激光散射检测器；CAD——电雾式检测器；TCD——热导池检测器；FID——氢火焰离子化检测器；ECD*——电子捕获检测器；FPD——火焰光度检测器；NPD——氮磷检测器；MS——质谱检测器。

第三节 色谱分离理论与术语

色谱分离的基本理论已经在本丛书的其它分册中有详细的阐述,本章仅对有关液相色谱系统仪器维护与故障排除有关的一些概念与术语作简要介绍^[11]。

一、保留值

色谱峰的保留值是被测组分重要的定性指标之一。保留时间 (t_R) 为从进样开始到柱后出现组分浓度最大值所需的时间。溶质的流出时间与流动相流速成反比。在色谱柱内不保留组分的流出时间为死时间 (t_0), 死时间不仅与柱结构有关, 而且也与进样系统和检测系统有关。

分离条件相对恒定时某组分的保留时间应是恒定的, 假设标准物质葱的保留时间为 10min, 在相同的色谱条件下进样, 如色谱图中有 $t_R = 10\text{min}$ 的峰存在, 可初步确定该峰与葱相关。也可能有其它组分与此相关, 但在特定色谱条件下并不多见。在用 t_R 鉴别样品中组分时, 为改善分离或在不同条件下做比较鉴别, 可以改变 t_R 。

死时间 t_0 可以用从进样到色谱图中第一个畸形尖峰或第一次基线波动的时间表示, 也可以用下式估算:

$$t_0 \approx 0.5 L d_c^2 \quad (1-1)$$

在基线上看不出 t_0 时用此式估算往往差别不大。求得 t_0 后就可计算柱死体积 V_0 :

$$V_0 = t_0 F \quad (1-2)$$

在色谱图上直接测量到 t_0 对检修液相色谱系统是很有帮助的。流速 F 的变化应不影响到 k' 值, 在实际操作中 k' 值对控制分离十分重要。色谱系统故障维护与排除时也可以作为重要的指标参数。

调整保留时间 (t'_R) 为溶质的保留时间中扣除死时间得到的结果, 能更确切地反映溶质被保留的特征。

$$t'_R = t_R - t_0 \quad (1-3)$$

容量因子也是色谱法中广泛采用的保留值参数。

$$k' = \frac{t_R - t_0}{t_0} = \frac{t'_R}{t_0} \quad \text{或} \quad t_R = t_0 (1 + k') \quad (1-4)$$

二、柱效

色谱峰的峰宽是重要的色谱参数之一, 色谱图中如果所有的峰都很窄, 表示柱效高。峰变宽则表示柱效降低。色谱法的最终目的是要得到被分析物的比较窄

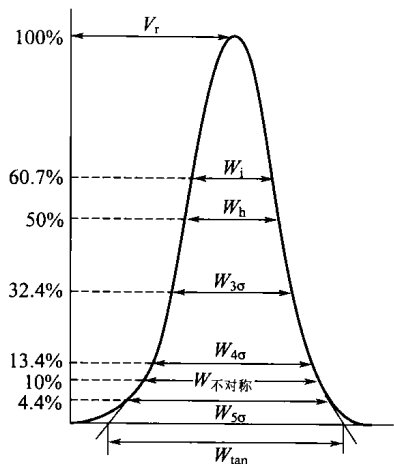


图 1-1 用色谱峰测量色谱柱塔板数

的色谱峰，而进行仪器系统维护和故障排除的意图也包括了恢复原来的色谱峰的宽度。

色谱柱塔板数（ N 值）是色谱方法中评价柱效的主要指标。以色谱图中一个或多个色谱峰计算理论塔板数的表示见图 1-1。好的色谱柱对所有的组分都出窄峰；在一组色谱图中，用不同的峰计算 N 值的结果基本相同。通过某个峰测得的 N 值，就可以推断其它峰的 N 值与其大致相等。 N 值为一个常数，是因为所有的 t_R/W 值大致相等。

计算 N 值最常用的是半峰宽或者峰宽法：

$$N = 5.54 \left(\frac{t_R}{W_h} \right)^2 \text{ 或 } N = 16 \left(\frac{t_R}{W_{\text{tan}}} \right)^2 \tag{1-5}$$

利用该式计算 N 值要注意的是单位的换算。 t_R 是时间单位， W_h 和 W_{tan} 是长度单位，可以通过记录纸走纸速度来换算，或者在色谱数据处理工作站上以时间标尺表示峰宽度。

N 值受试验条件的影响，长柱、低流速、小颗粒填料有助于提高 N 值：通过计算色谱柱的 N 值，可以精确预测分离效果。如果一根性能良好的色谱柱分离不出好的结果来，那可能就是系统出现了问题。实际上为色谱系统的维修提供了很具参考价值的信息。现在市售的液相色谱柱的 N 值一般在每米 50000~100000 塔板以上，气相色谱柱的 N 值一般在每米 1500~10000 塔板的范围。

三、分离度

相邻两峰的分离程度用分离度 R 来表示，两组分保留值之差与其平均峰宽之比被定义为分离度：

$$R = \frac{2(t_{R_2} - t_{R_1})}{t_{w_2} + t_{w_1}} \tag{1-6}$$

由于两峰相邻， $t_{w_2} \approx t_{w_1}$ ，因此

$$R = \frac{t_{R_2} - t_{R_1}}{t_w} \tag{1-7}$$

R 随着两峰之间的距离增加而增加，随着平均峰宽增加而减少。不同的 R 值和两峰相对大小对分离度的影响用图 1-2 来表示。可以看出，比较大的 R 值和两峰大小相当（相同的 R 值），可以改善分离度。 R 受到 t_R 和 N 值的

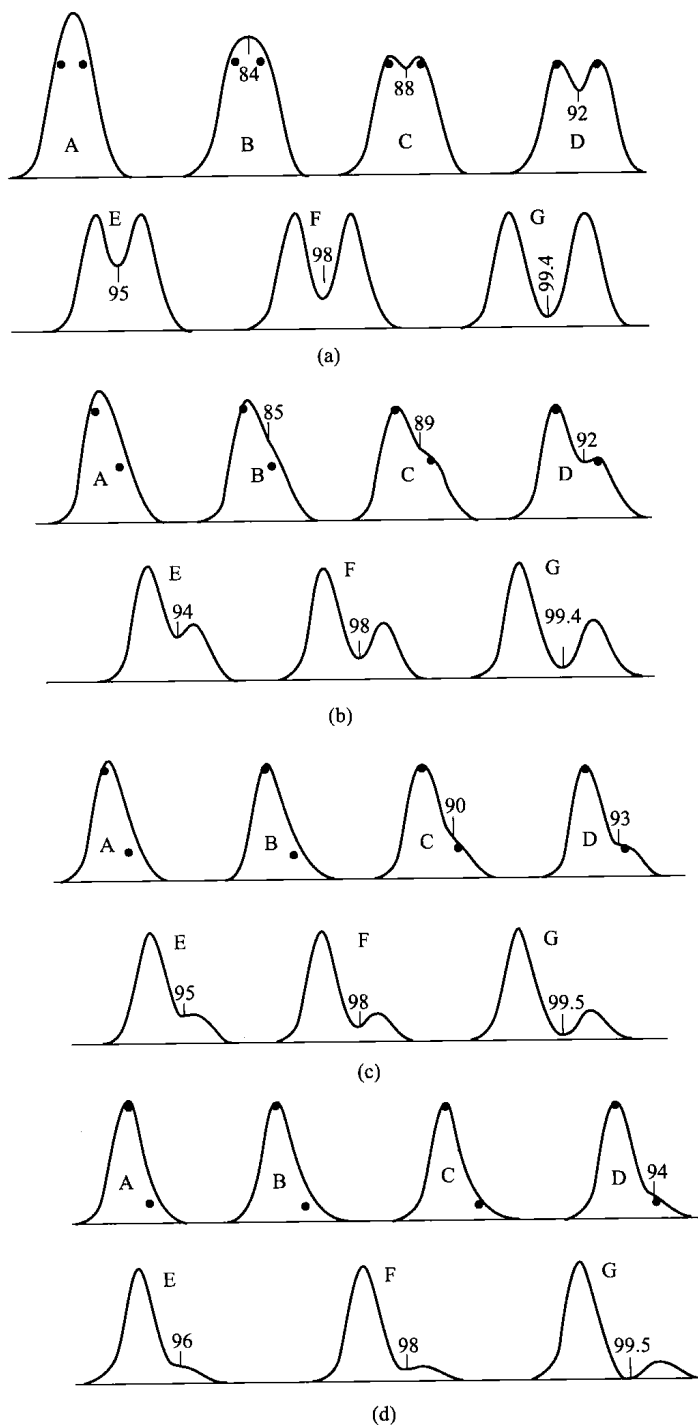


图 1-2 两峰相对高度不同时分离状态与 R_s 的关系

峰高比: (a) 1:1; (b) 2:1; (c) 4:1; (d) 8:1;

R_s : A—0.4; B—0.5; C—0.6; D—0.7; E—0.8; F—1.0; G—1.25