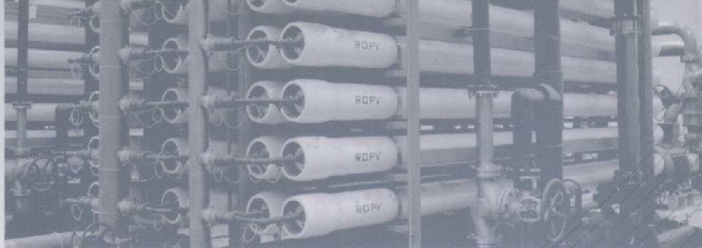
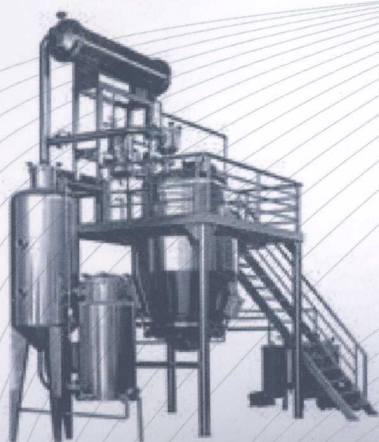


HUAGONG
FENLI



YUANLI JISHU SHEBEI YU SHILI



化工分离

——原理、技术、设备与实例

罗运柏 编



化学工业出版社

C14009117

TQ028

44

章代系科固-产麻科产, 新-固, 新-产, 新-新, 以特离代品
 除改章1章; 章2代共并全。网定用定野工关味工举既, 备对已
 除个限代, 朱姓离代新-新改章3章; 点特已跟代味封紫夏, 类代前木姓离代工并除个, 舒
 色味离代期新, 邓萃味木双, 邓萃科离界御趾, 斗户蛋蛋, 离代期, 离替聚替, 离替代除
 位心离并离代新长, 离代封册, 离代期而代重除个限代, 朱姓离代新-产改章3章; 离代部
 固-产, 离代科产改章3章; 新长心离味期新, 新长除个限代, 朱姓离代新-固改章1章; 离
 。离代风离固-产麻离代新, 离代科产新, 期期丑变, 邓迎除个限代, 朱姓离代
 主衣福士离类工并如学斗用定麻并步参半姓除主半离平高业寺类工并学斗并出合重并本

化工分离

——原理、技术、设备与实例

编 罗运柏 (PI) 编



邓家豪, 薛继平文
 主编王, 叶良利等

董荣烈, 薛继平责
 董素王, 杨效升责

(110001) 国邮通邮 号 81 路南顺平青习城凉市京北) 址址出业工学学; 计发期出

同公升责期育期印鑫木京北: 编 印

711 市市市市市市三: 711 蔡

110mm×1000mm 1/16 印 14 字 234 字 2013 年 11 月北京 11 月 11 日

(88891240-010 (传真) 88881240-010 商咨计编



化学工业出版社

010-64188880 800-010-64188880

www.cip.com.cn

京 北 京 本, 版问量理地地育版, 计本类国凡

宋山香数 高利珠编



北航

C1697983

元 00.04, 价 44 宝

711200312

本书根据化工原料与产品分离特点,按液-液、气-液、固-液、气体和气-固体系分章,阐述化工分离的原理、技术与设备,列举了相关工程应用实例。全书共分5章:第1章为绪论,介绍化工分离技术的分类、复杂性和发展与特点;第2章为液-液分离技术,分别介绍多组分精馏、特殊精馏、膜分离、渗透气化、超临界流体萃取、双水相萃取、液膜分离和色谱分离;第3章为气-液分离技术,分别介绍重力沉降分离、惯性分离、过滤分离和离心分离;第4章为固-液分离技术,分别介绍过滤、沉降和离心过滤;第5章为气体分离与气-固分离技术,分别介绍吸收、变压吸附、膜法气体分离、深冷分离和气-固旋风分离。

本书适合作作化学化工类专业高年级学生的教学参考书和应用化学或化工类硕士研究生分离工程课程的教材,也可作为化工企业专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工分离——原理、技术、设备与实例/罗运柏编.

北京:化学工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-122-17853-4

I. ①化… II. ①罗… III. ①化工过程-分离
IV. ①TQ028

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第150089号

责任编辑:成荣霞

文字编辑:糜家铃

责任校对:王素芹

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$ 字数294千字 2013年11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:49.00元

版权所有 违者必究

前 言

化工分离是利用化工设备的特有作用对混合物根据其物理和化学性质差异进行分离的过程。化学工业与分离技术密切相关,任何化工生产过程都离不开分离技术,从原料的预处理、中间产物的分离、产品的精制纯化到废水、废气和废渣的处理都有赖于化工分离技术,它往往是获得合格产品、充分利用资源和控制环境污染的关键步骤。

化工分离技术的应用领域广泛,发展迅速,是化学工程学科领域最活跃的领域之一。一方面,传统分离技术的研究和应用不断进步,分离效率提高,处理能力加大,工程放大问题逐步得到解决,新型分离装置不断出现。另一方面,为了适应技术进步所提出的新的分离要求,新分离方法的开发、研究和应用非常活跃。分离过程的强化、分离技术的耦合和分离科学与技术的多学科交叉成为当今分离工程领域的主要发展方向。

本书从被分离对象的体系特点出发,分别对液-液、气-液、固-液和气体与气-固体系的分离技术原理、工艺、设备进行了论述,列举了一些工程应用实例,尽可能系统全面地介绍化工分离领域成熟的技术及发展动态。这种按体系分章阐述化工分离的教材编写方式,是编者的一次尝试,意在方便读者特别是从事实际应用的工程技术人员根据被分离的对象使用。

多年来,编者一直为本校化学工艺和应用化学专业的硕士研究生主讲化工分离过程的课程,也从事膜分离、萃取和吸收方面的科学研究和指导研究生工作。教学与科研工作中得到同事和同学们很多有益的建议,他们为本书的编写提供了很好的思路和素材,丰富了本书的内容。

向所有为本书编写提供支持的同行、同事和同学们致谢!

交稿之际,心怀忐忑。不当之处,恳请读者多提意见。

编 者

2013年5月于珞珈山

2.3.4	电渗析	105
2.4	渗透气化	115
2.4.1	渗透气化膜分离技术基本原理和特点	116
2.4.2	膜传递过程理论及影响膜分离性能的因素	117
2.4.3	渗透气化膜与组件	117
2.4.4	渗透气化膜的工业应用	119
2.5	超临界流体萃取	122
2.5.1	基本原理	122
2.5.2	超临界流体性质	124
2.5.3	超临界流体萃取工艺	126
2.5.4	超临界流体萃取技术的应用	127
2.6	双水相萃取	129
2.6.1	双水相萃取技术的原理及特点	130
2.6.2	双水相萃取的工艺流程	131
2.6.3	双水相萃取技术的应用	132
2.6.4	双水相萃取技术的发展方向	133
2.7	液膜分离技术	133
2.7.1	液膜分离技术的特征	134
2.7.2	液膜分离技术的原理	134
2.7.3	液膜分离技术的类型	136
2.7.4	液膜分离技术的应用	137
2.8	色谱分离	138
2.8.1	工业高效制备色谱原理	139
2.8.2	工业高效制备色谱工艺	139
2.8.3	制备色谱装置	142
2.8.4	色谱分离技术的应用	146
	参考文献	147

3 Page

气-液分离技术

3.1	重力沉降分离	149
3.2	惯性分离	150
3.3	过滤分离	151
3.4	离心分离	152
3.4.1	管柱式旋流气-液分离器 (GLCC)	152
3.4.2	螺旋片导流式气-液分离器 (CS)	153

3.4.3	旋流板式气-液分离器	153
3.4.4	轴流式气-液旋流分离器	153
3.4.5	应用实例	154
	参考文献	155

4 Page

固-液分离技术 156

4.1	过滤	156
4.1.1	盘式真空过滤机	157
4.1.2	陶瓷过滤机	159
4.1.3	带式压榨过滤机	162
4.2	沉降	165
4.2.1	沉降分离原理及方法	165
4.2.2	重力沉降设备	171
4.2.3	离心沉降	177
4.2.4	旋液分离	179
4.3	离心过滤	180
4.3.1	离心过滤分离原理	180
4.3.2	离心过滤设备	180
	参考文献	184

5 Page

气体分离与气-固分离技术 185

5.1	吸收	185
5.1.1	吸收过程的相平衡原理	185
5.1.2	吸收设备	188
5.1.3	吸收操作流程	189
5.1.4	吸收操作分类	191
5.1.5	吸收在化学工业中的应用	192
5.2	变压吸附	193
5.2.1	变压吸附原理	193
5.2.2	变压吸附特点	193
5.2.3	变压吸附工艺流程与设备	194
5.2.4	变压吸附技术的工业应用	196
5.3	膜法气体分离	199

5.3.1	气体膜分离原理	199
5.3.2	气体膜分离流程	201
5.3.3	气体分离膜材料的分类	201
5.3.4	膜气体分离的工业应用	202
5.4	深冷分离	205
5.4.1	深冷分离原理	205
5.4.2	深冷分离工艺流程	205
5.4.3	深冷分离主要设备	206
5.4.4	深冷分离的工业应用	211
5.5	气-固旋风分离	219
5.5.1	旋风分离器的结构与操作原理	219
5.5.2	旋风分离器的性能	219
5.5.3	旋风分离设备	223
	参考文献	227

5.6	重力沉降分离	227
5.6.1	重力沉降原理	227
5.6.2	重力沉降设备	227
5.6.3	重力沉降的工业应用	227
5.7	离心分离	227
5.7.1	离心分离原理	227
5.7.2	离心分离设备	227
5.7.3	离心分离的工业应用	227
5.8	吸附分离	227
5.8.1	吸附分离原理	227
5.8.2	吸附分离设备	227
5.8.3	吸附分离的工业应用	227
5.9	萃取分离	227
5.9.1	萃取分离原理	227
5.9.2	萃取分离设备	227
5.9.3	萃取分离的工业应用	227
5.10	结晶分离	227
5.10.1	结晶分离原理	227
5.10.2	结晶分离设备	227
5.10.3	结晶分离的工业应用	227
5.11	膜分离	227
5.11.1	膜分离原理	227
5.11.2	膜分离设备	227
5.11.3	膜分离的工业应用	227
5.12	其他分离方法	227
5.12.1	其他分离原理	227
5.12.2	其他分离设备	227
5.12.3	其他分离的工业应用	227

1 绪论

1 绪论

绪论

化工分离技术是研究过程工业中，物质分离与纯化的工程技术学科，是化学工程的一个重要分支，任何化工生产过程都离不开这种技术。从原料的精制、中间产物的分离和产品的提纯到废水、废气的处理都有赖于化工分离技术。绝大多数反应过程的原料和反应所得到的产物都是混合物，需要利用体系中各组分物性的差别或借助于分离剂使混合物得到分离提纯。无论是石油炼制、塑料化纤、湿法冶金、同位素分离，还是生物制品的精制、纳米材料的制备、烟道气的脱硫脱硝、化肥农药的生产和天然产物的提取等都离不开化工分离技术。它往往是获得合格产品、充分利用资源和控制环境污染的关键步骤。

分离技术早期用于从矿石中提取金属和从植物中提取药物。化学工业与分离技术密切相关，石油炼制和石油化工的发展促进了分离技术的进步。合成氨的原料气需经分离操作才能制得，原油通过精馏制得各种燃料油，为石油化工提供了原料。同样，通过分离操作制得高纯度的乙烯、丙烯、丁二烯等单体才能合成各种树脂、纤维和橡胶。现在几乎所有化工产品的生产过程，都需要对原料和产品进行分离操作，分离操作高耸的塔群已成为化工厂最明显的标志。

分离过程是耗能过程，设备数量多，规模大，在化工厂的设备投资和操作费用中占着很高的比例，对过程的技术经济指标起着重要的作用。因此，设计时要求选择高效、低耗的分离技术。随着现代工业大型化的趋势，分离设备往往变得十分庞大。随着环保要求的不断提高，三废处理和综合利用对分离技术提出了很多特殊的要求。伴随着新产品的不断出现，对分离技术的要求也越来越高。这样，分离技术的重要性就更为突出。

1.1 化工分离技术的分类

化工分离技术的应用领域十分广泛，原料、产品和对分离操作的要求多种多样，这就决定了分离技术的多样性。工业上常用的分离方法不下四十种，装置的结构和形式也五花八门。按机理来分，可大致分成五类，这些分离技术的特点和设计方法有所不同。

即：生成新相以进行分离，如蒸馏和结晶等；加入新相进行分离，如萃取和吸收等；用隔离物进行分离，如膜分离等；用固体试剂进行分离，如吸附和离子交换等；用外力场或梯度进行分离，如离心萃取分离和电泳等。

按分离过程原理来分，可分为机械分离和传质分离两大类。利用机械力简单地将两相混合物相互分离的过程称为机械分离过程，两相混合物被分离时相间无物质传递发生，如过滤、沉降、离心分离、旋风分离和电除尘等。

传质分离过程可以在均相或非均相混合物中进行，在均相中有梯度引起的传质现象发生。按物理化学原理，传质分离过程可分为平衡分离过程和速率分离过程两大类。这两类传质分离过程均建立了比较完整的理论。

(1) 平衡分离过程

依据被分离组分在两相平衡分配组成不等的原理进行分离的过程，借助于热能、溶剂和吸附剂等媒介，使均相混合物变成两相，常采用平衡级概念作为设计基础，包括气-液传质过程，如蒸馏和吸收等；液-液传质过程，如萃取等；气-固传质过程，如吸附等；液-固传质过程，如离子交换和浸取等。

(2) 速率分离过程

依据被分离组分在均相中的传质速率差异而进行分离，在浓度差、压力差、电位差等的推动力作用下，利用各组分的扩散速率差异进行分离，包括膜分离，如超滤和反渗透等；场分离，如电泳和热扩散等。

几种常见的分离过程及机理如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 常见分离过程及机理与介质

分离过程	分离机理	分离介质
蒸馏	蒸气压	热
萃取	相间分配系数	不互溶液体
吸附	相间分配系数	固体吸附剂
吸收	相间分配系数	难挥发液体
过滤	分子大小和形状	滤网/膜
离子交换	化学反应平衡	固体离子交换柱
气体分离	扩散和相间分配系数	膜
电渗析	电负荷和离子迁移	荷电膜/电场

1.2 化工分离技术的复杂性

化工分离技术的重要性和多样性决定了它的复杂性，即使对于精馏、萃取这些比较成熟的技术，多组分体系大型设备的设计仍是一项困难的工作，问题在于缺乏基础物性数据和大型塔器的可靠设计方法。

从原则上讲，可以从手册中查找或用多种模型推算各种物性，但是对于很多高温、高压、多组分和非理想体系，不仅平衡数据和分子扩散系数难以准确计算，就

连界面张力和黏度等物性数据也难以求得。对于诸如催化剂和反应萃取之类的耦合分离技术,基础物性数据更为缺乏。大型塔器设计、放大的主要困难在于塔内两相流动和传质特性十分复杂,数学模型尚不完善。沿用了百余年的平衡级模型虽然简单、直观,但用于多组分分离过程的缺点已显而易见。非平衡级模型被称为是“可能开创板式分离设备设计和模拟新纪元”,优越性显著,但缺乏传质系数实验数据和模型参数过多,使得这种先进模型的工程应用存在困难。许多商用软件功能强大,已在工程设计中得到广泛运用,但是工程经验和中试实验往往仍是不可缺少的。

1.3 化工分离技术的发展与新特点

我国分离技术的研究和应用从 20 世纪 50 年代发展至今已取得了重大的进展。石油工业的崛起大大推动了精馏技术的发展,核燃料后处理和湿法冶金的发展推动了溶剂萃取技术水平的提高等。但是,相对于发达国家,我国的分离技术水平还有差距。例如,我国的单位产值能源消耗量是世界先进水平的数倍,原因之一是我国的分离过程的能耗强度要比发达国家高得多。因此,提高分离技术的水平显得尤为重要。由于分离科学和技术具有多学科交叉的特点,只有化学、化工、机械和信息技术等各学科的协同努力,加强基础研究,致力创新,开发具有自主知识产权的新过程、新设备和新软件,才能保证我国的化工分离技术水平的持续提高,满足我国现代化建设的迫切需求。

随着化学工业的发展,分离技术也处于不断发展之中。一方面,对传统分离技术研究和应用不断进步,分离效率提高,处理能力加大,工程放大问题逐步得到解决,新型分离装置不断出现;另一方面,为了适应技术进步所提出的新的分离要求,对新分离方法的开发、研究和应用非常活跃,成为化学工程研究前沿之一。近年来,分离技术的发展呈现了新的特点。

1.3.1 分离过程的强化

随着科技的发展,新设备和新分离剂的应用大大提高了分离效率。膜分离、超临界萃取等新分离技术也在迅速推广。剧烈的竞争加速了分离技术的发展,促进了分离过程的强化。以精馏、吸收和萃取等化工塔器的内件为例,高效塔板、规整填料和散装填料的发明层出不穷。塔内件的优化匹配也引起重视。新型塔板的种类更是数不胜数,显著减小了设备的尺寸,大大降低了能耗。大量的研究和工程实践还表明,各类塔内构件都有其特定的优势和适用范围。

从广义上说,分离过程的强化包括新装置和新工艺方法两方面,任何能使设备小型化、能量高效化和有利于可持续发展的化工分离新技术均属于分离过程的强化之列,这是化工分离技术发展的重要趋势之一。

1.3.2 分离技术的耦合

近年来,诸如催化剂精馏、膜精馏、吸附精馏、反应萃取、络合吸附、反胶团、膜萃取、发酵萃取、化学吸收和电泳萃取等新型耦合分离技术得到了长足的发展,并成功地应用于生产。它们综合了两种分离技术的优点,具有独到之处。如催化精馏在 MTBE (甲基叔丁基醚) 生产等工艺中的成功应用和反应萃取在己内酰胺工艺中的成功应用充分说明了这类新方法具有简化流程、提高收率和降低消耗的特殊优点。耦合分离技术还可以解决许多传统的分离技术难以完成的任务,因而在生物工程、制药和新材料等高新技术领域有着广阔的应用前景。如发酵萃取和电泳萃取在生物制品分离方面得到了成功的应用,采用吸附树脂和有机络合剂的络合吸附具有分离效率高和解析再生容易的特点;电耦合色谱可高效地分离维生素; CO_2 超临界萃取和纳米过滤耦合可提取贵重的天然产品等。由于耦合分离技术往往比较复杂,设计放大比较困难,因此,也推动了化工数学模型和设计方法的研究。

1.3.3 分离技术的发展

分离科学和技术具有多学科交叉的特点,信息技术和传统化工方法的结合显得十分重要。信息技术在分离过程中的运用涉及热力学和传递性质、多相流、多组分传质、分离过程和设备的强化和优化设计等,对分离技术的发展具有深远的影响。

例如,分子模拟大大提高了预测热力学平衡和传递性质的水平;分子设计加速了高效分离剂的研究开发;化工模拟软件的商品化和 CAD (计算机辅助设计) 和 AI (人工智能) 在化工中的广泛应用大大推动了分离过程和设备的优化设计和优化控制。信息技术和先进测试技术的高速发展为化工多层次、多尺度的研究提供了条件。分离过程的研究已从宏观传递现象的研究深入到气泡、液滴群、微乳和界面现象等,加深了对分离过程中复杂传递现象的理解。LDV (激光多普勒测速仪) 和 PIV (激光成像测速仪) 等的应用使研究深度从宏观平均向微观、局部瞬时发展。局部瞬时速度、浓度、扩散系数和传质速率的测量,液滴群生成、运动和聚并过程中界面的动态瞬时变化的研究等引起了人们的重视。功能齐全的 CFD (计算流体力学) 软件可以对分离设备内的流场进行精确的计算和描述,加深了人们对分离设备内相际传递过程机理的认识并对设备强化和放大提供了重要信息。高新技术和分离技术的联系变得越来越紧密,信息技术带动了化工分离技术的迅猛发展。

还应指出,由于工业体系和化工塔器内部两相传递现象极为复杂,在很多情况下理论计算仍有局限性。因此,实验研究和计算机模拟相结合仍是分离技术研究开发和设计放大的主要途径。国外各大工程公司都建立了规模宏大、设备精良的实验基地,对新工艺、新设备和新材料进行深入的研究。

2 液-液分离技术

2.1 多组分精馏

在化工生产实际中,遇到更多的是含有较多组分或复杂物系的分离与提纯问题。在设计多组分多级分离问题时,必须用联立或迭代法严格地解数目较多的方程,这就是说必须规定足够多的设计变量,使得未知变量的数目正好等于独立方程数。因此,在各种设计的分离过程中,首先就涉及过程条件或独立变量的规定问题。

多组分多级分离问题,由于组分数增多而增加了过程的复杂性。解这类问题,应该严格用精确的计算机算法,但简捷计算常用于过程设计的初始阶段,是对操作进行粗略分析的常用算法。

2.1.1 多组分精馏装置的设计变量

设计分离装置就是要求确定各个物理量的数值,如进料流率、浓度、压力、温度、热负荷、机械功的输入输出量、传热面积大小及理论塔板数等。这些物理量互相关联、互相制约。因此,设计者只能规定其中若干个变量的数值,即设计变量。

如果给定的物理量数目少于设计变量的数目,则无法进行设计;反之,给定的物理量数目多于设计变量的数目,设计也无法进行。

设计的第一步还不是选择变量的具体数值,而是要知道在设计时所需要指定的独立变量的数目,即设计变量。对于简单的分离过程,如只有一处进料的二组分精馏塔,一般很容易按经验给出设计变量。但若过程复杂,如多组分精馏塔,又有侧线出料或多处进料,就难确定,容易出错。所以,在讨论具体的多组分分离过程之前,先讨论确定设计变量数的方法。

如果 N_v 是描述系统的独立变量数, N_c 是这些变量之间的约束关系数,则设计变量数 N_i 为:

$$N_i = N_v - N_c \quad (2-1-1)$$

系统的独立变量数可由出入系统的各物流的独立变量数及系统与环境进行能量交换情况来定。根据相律,对于任一物流,描述它的自由度 f 满足 $f = c - \pi + 2$ 。

其中, c 为组分数, π 为相数。

相律所指的独立变量是指强度性质的变量, 即温度、压力和浓度, 与系统的量无关的性质, 而要描述流动系统, 必须加上物流的数量。对于任一单相物流, 其独立变量数 N_v 为 $f+1=(c-1+2)+1=c+2$; 对于相平衡物流, 由于要加上各相的流率, 则其独立变量数为 $N_v=f+2=(c-2+2)+2=c+2$ 。其余情况可以类推。如果所讨论的系统除物流外, 尚有热量和功的进出, 那么相应在 N_v 中加入说明热量和功的变量数。

约束关系式包括物料平衡式、能量平衡式、相平衡关系式、化学平衡关系式和内在关系式。根据物料平衡, 对有 c 个组分的系统, 一共可写出 c 个物料衡算式。但能量衡算式则不同, 每一系统只能写一个能量衡算式。相平衡关系是指处于平衡的各相温度相等、压力相等以及组分 i 在各相中的逸度相等。后者表达的是相平衡组成关系, 可写出 $c(\pi-1)$ 个方程式, 其中 π 为平衡相的数目。由于我们仅讨论无化学反应的分离系统, 故不考虑化学平衡约束数。内在关系通常是指约定的关系, 例如物流间的温差、压力降的关系式等。

2.1.1.1 单元的设计变量

一个化工流程由很多装置组成, 装置又可分解为多个进行简单过程的单元。因此, 首先分析在分离过程中碰到的主要单元, 确定其设计变量数, 进而确定装置的设计变量数。

对于无浓度变化的单元, 如分配器、泵、加热器、冷却器、换热器、全凝器和全蒸发器等, 这些单元中无浓度变化, 故每一物流均可看成单相物流。如加热器的独立变量数为: $N_v^e=2(c+2)+1=2c+5$ 。其中, 独立变量数 N_v 中的上标 e 指单元。

单元的约束关系数为:

物料平衡式 c 个

能量平衡式 1 个

所以 $N_c^e=c+1; N_i^e=N_v^e-N_c^e=c+4$

其中: $N_x^e=c+3$ (进料 $c+2$ 个, 压力 1 个)

$N_a^e=1$, 为系统换热量或出换热器的温度, 从而可计算。

对冷却器、泵的情况类似。

对于有浓度变化的单元, 如混合器、分相器、部分蒸发器、全凝器 (凝液为两相), 简单的平衡级等, 在这些单元中, 描述一个单相物料的独立变量数是 $c+2$, 一个互成平衡的两相物料的独立变量数也是 $c+2$ 。如果有两个物流是互成平衡的, 如离开分相器的两个物料, 也可以把它们看成是一个两相物流, 因为互成平衡的两个物流间可列出 $c+2$ 个等式 (压力相等, 温度相等, c 个组分的化学位相等)。因此, 和一个两相物流时的 N_i 值是一样的。计算 N_c 时, 物料平衡式对各种情况都是 c 个, 即对每一组分可写出一个衡算式。

其他情况，如绝热操作的简单平衡级与无浓度变化相同。 N_x^e 和 N_a^e 固定设计变量数是指描述进料物流的那些变量，如进料组成、流量及系统压力等；可调设计变量数则是由设计者来决定的。

如图 2-1-1 所示，系统共有四个物流，但因 V_n 与 L_{n-1} 互为平衡的物流，所以可以把它看成是一个两相物流，故 $N_v^e = 3(c+2)$ 个，因为可列出 c 个物料衡算式和一个热量衡算式。

故 $N_v^e = c+1$ ， $N_i^e = 3(c+2) - (c+1) = 2c+5$ 。其中， $N_x^e = 2c+5$ ，因为有两股进料，且进料之间以及进料与 n 板上的压力不相等，所以 $N_a^e = 0$ 。

无论是有浓度变化或无浓度变化的单元，可调设计变量均与组分的数目 c 无关，组分数只在固定设计变量中出现，而且， N_a^e 都是一个很小的整数，即 0、1，因此，计算整个装置的 N_a^e 是比较方便的。

图 2-1-1 四个物流的系统示意图

2.1.1.2 装置的设计变量

一个分离装置由若干单元所组成，如单个平衡级、换热器和其他与分离装置有关的单元综合而得，装置的设计变量总数即装置的 N_i^u 应等于各个单元的独立变量数之和 $\sum N_i^e$ 。

若在装置中某一单元以串联的形式被重复使用（如精馏塔），则用重复变量 N_r 来区别于一个这种单元与其他种单元的连接情况，每一个重复单元增加一个变量。 N_i^u 中的上标 u 表示装置。

各个单元是依靠单元之间的物流而连接成一个装置的。因此，必须从总变量中减去那些多余的相互关联的物流变量数，或者是每一单元间物流附加 $c+2$ 个等式。

装置的设计变量为：

$$N_i^u = \sum N_v^e - \sum N_c^e + N_r - n(c+2) \quad (2-1-2)$$

式中， n 为单元间物流的数目。

$$N_i^u = \sum N_i^e + N_r - n(c+2) = \sum N_x^e + \sum N_a^e + N_r - n(c+2)$$

因为装置的 N_x^e 固定，是指进入该装置的各进料物流（而不是装置内各单元的进料物流）的变量数以及装置中不同压力的等级数。因此，它应比 $\sum N_x^e$ 少 $n(c+2)$ 。

$$N_x^u = \sum N_x^e - n(c+2)$$

$$N_i^u = N_x^u + N_a^u = N_x^u + N_r + \sum N_a^e$$

故 $N_a^u = N_r + \sum N_a^e$

如进料板单元可以看成是一个分相器和两个混合器的组合，此时 $N_r = 0$ ，且分

相器和混合器的 N_a^c 均为零，故进料板单元的 $N_a^u=0$ ，侧线采出板是理论板与分配器的组合。由于 $N_r=0$ ，分配器中 $N_a^c=1$ ，理论板的 $N_a^c=0$ ，所以 $N_a^u=1$ 。

由若干 (N) 理论板串级而成的串级单元是最重要的一种组合单元，所以 $N_r=1$ ，而理论板的 $N_a^c=0$ ，故 $N_a^u=1$ 。

对于由 N 个绝热操作的简单平衡级串联构成的简单吸收塔，可得出：

$$N_a^u=1, N_i^u=2c+N+5, N_x^u=2c+N+4$$

对于求精馏塔的设计变量，应先将塔划分为各种不同的单元，求出 N_i^c ，再求出 $\sum N_i^c$ ，由于进出各单元（连接各单元）共有 9 股物流，所以 $n=9$ ，而整个精馏装置的 $N_r=0$ 。

所以

$$N_i^u=\sum N_i^c+N_r-n(c+2)$$
 其中， $N_a^u=5$ ，因为除进料级的 $N_a^c=0$ 外，其余均为 1，则 $N_x^u=N_i^u-N_a^u$ 很容易求出。

2.1.2 多组分精馏原理与简单精馏塔的计算

精馏是分离液体混合物的单元操作，是多次单级分离的串联。利用混合物中各组分的挥发度不同，采用液体多次部分气化，蒸气多次部分冷凝等气-液间的传质过程，使气-液相间浓度发生变化，并结合应用回流手段，使各组分分离。

2.1.2.1 多组分精馏过程分析

如图 2-1-2 所示的模型塔为仅有一股进料且无侧线出料和中间换热设备，有 n 块理论板，塔顶为分凝器（或全凝器，即馏出物 D 以液体状态采出），塔釜有再沸

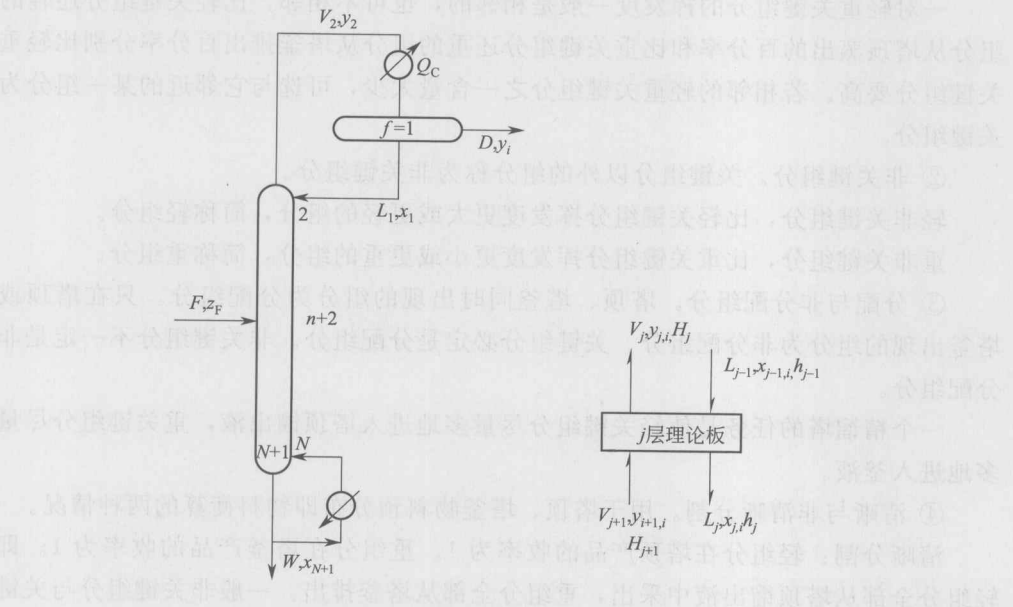


图 2-1-2 多组分精馏过程分析模型塔