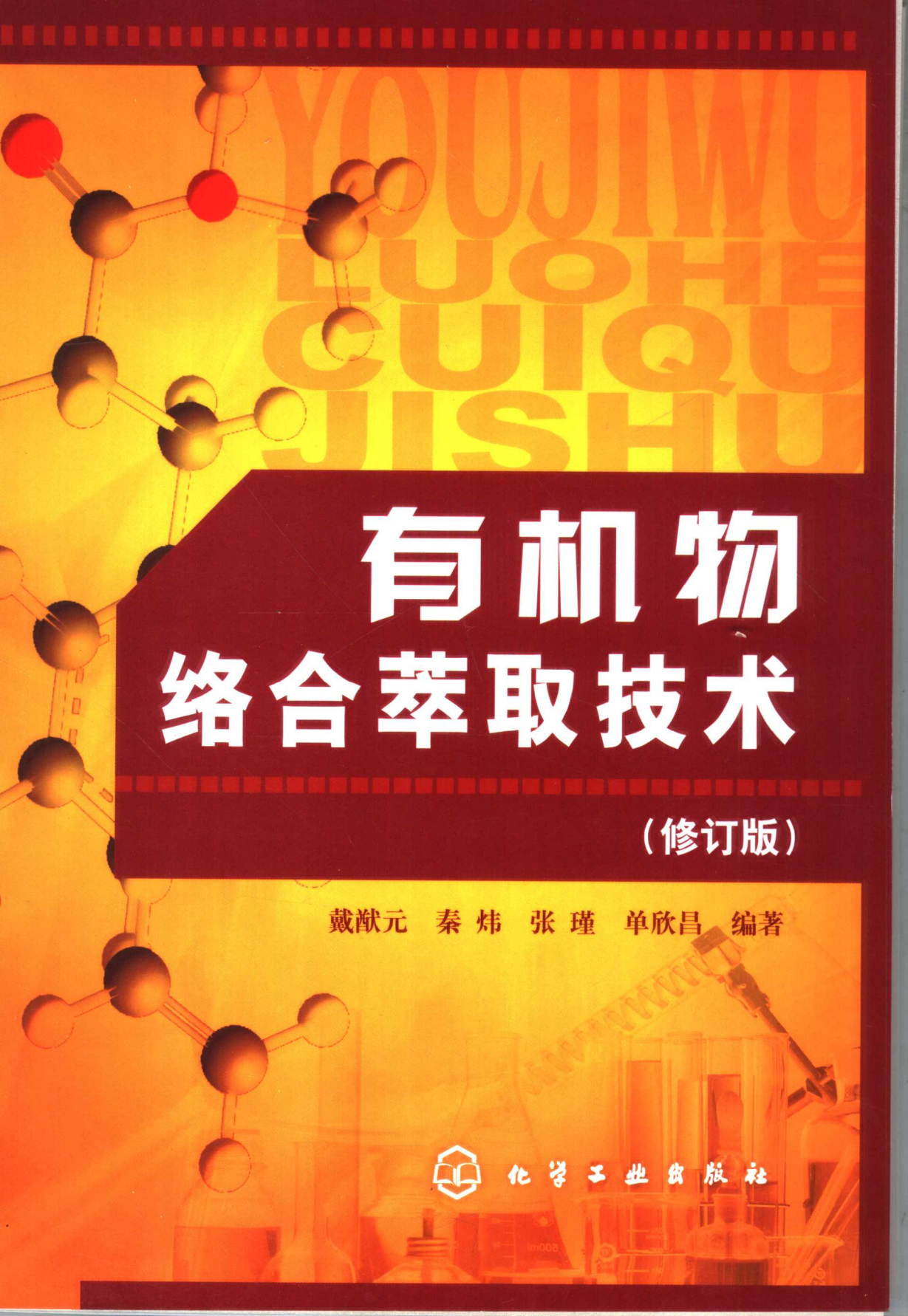




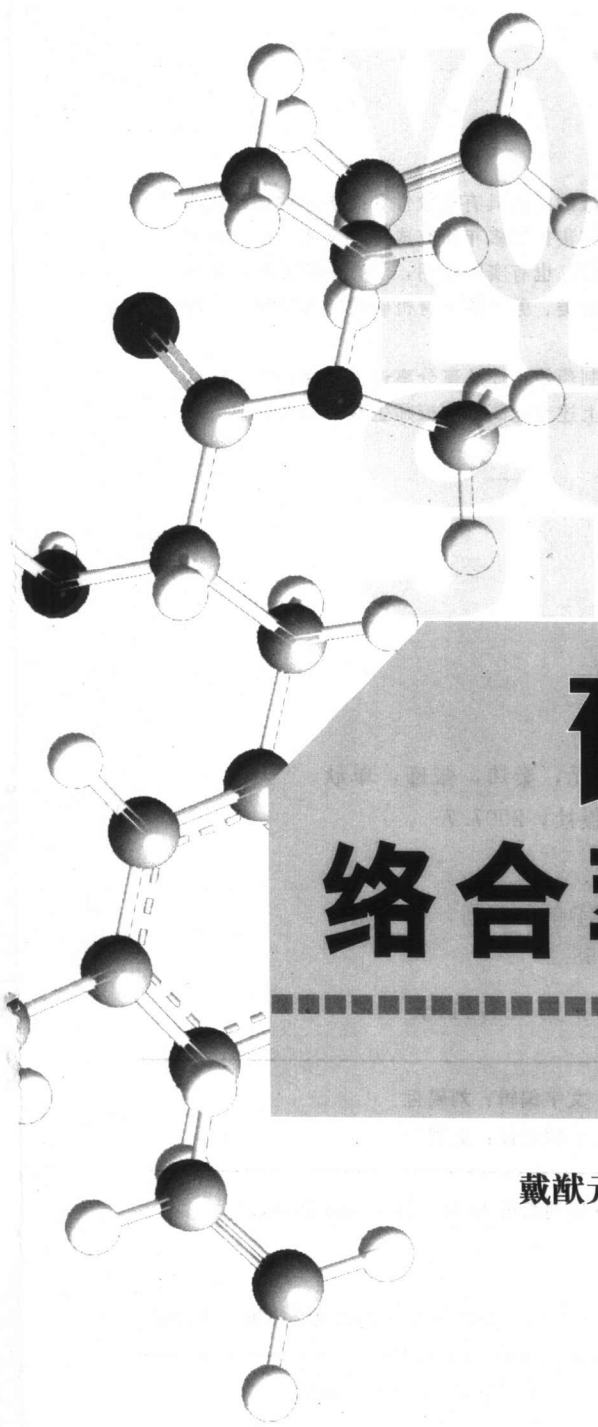
有机物 络合萃取技术

(修订版)

戴猷元 秦 炜 张 瑾 单欣昌 编著



化学工业出版社



有机物 络合萃取技术

(修订版)

戴猷元 秦炜 张瑾 单欣昌 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

络合萃取技术对于极性有机物稀溶液的分离具有高效性和高选择性,已成为化工分离过程研究开发的重要方向。本书集作者多年研究成果,全面、系统地介绍了有机物络合萃取技术,既有原理介绍,也有实际应用,既有一般方法,也有针对不同体系的运用,包括有机羧酸、酚类、芳香酸和有机磺酸、有机胺类、醇类、两性官能团有机物等等。

本书可供化工、生物化工、环境和制药等行业从事分离过程研究开发、设计和运行的科研技术人员参考,也可作为上述专业高等院校师生教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

有机物络合萃取技术(修订版)/戴猷元,秦炜,张瑾,单欣昌编著. —2版. —北京:化学工业出版社,2007.7

ISBN 978-7-122-00604-2

I. 有… II. ①戴…②秦…③张…④单… III. 有机化合物-络合物-溶剂萃取-化工过程 IV. 0658.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第081741号

责任编辑:陈丽

文字编辑:刘砚哲

责任校对:顾淑云

装帧设计:史利平

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张16 $\frac{1}{4}$ 字数277千字 2007年7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:36.00元

版权所有 违者必究

修订说明

2003年初,《有机物络合萃取技术》一书出版以来,得到许多读者的回馈,增进了读者与作者之间的交流,特别是对络合萃取技术的工业应用,起到了推动作用。最近,作者对全书进行了修订,特别对第三章、第五章、第六章、第八章的内容做了新的补充,形成《有机物络合萃取技术》(修订版),以期满足读者的需求。

作 者
2007年5月

第一版前言

分离科学与技术是化学工程学科的重要分支之一。它在化学工业、石油炼制、精细化工、生物化工、医药工业、食品工业、环境工程以及海洋资源利用等领域中得到了广泛的应用。随着现代工业的发展,人们对分离技术提出了越来越高的要求,大大地促进了分离过程和技术的发展。在多样化产品的分离、高纯物质的提取和环境污染的严格治理等技术中,有许多属于极性有机物稀溶液分离的范畴。因此,极性有机物稀溶液的分离是一个很有价值但难度很大的课题。

溶剂萃取方法具有分离效率高、能耗低、生产能力大、设备投资少、便于快速连续和安全操作、有丰富的工业运行经验等优点,一直受到工业界和研究者的重视。针对极性有机物稀溶液分离的任务,20世纪80年代初期出现了基于可逆络合反应的萃取分离方法并逐步形成了有机物络合萃取技术。络合萃取技术对于极性有机物稀溶液的分离具有高效性和高选择性。目前,它已经成为分离科学与技术领域研究开发的重要方向,展现了广阔的应用前景。

本书分概述、络合萃取基本原理、常用的络合萃取剂、络合萃取剂的再生方法、有机羧酸稀溶液的络合萃取、酚类稀溶液的络合萃取、芳香酸和有机磺酸稀溶液的络合萃取、有机胺类稀溶液的络合萃取、醇类稀溶液的络合萃取、两性官能团有机物稀溶液的络合萃取、络合萃取技术在分离纯化中的应用、络合萃取技术在有机废水处理中的应用等12章,系统阐述了络合萃取技术的基本原理、过程特征、实验数据,各类体系的分离工艺、应用实例和前景。本书可供化工、生物化工、环境、制药等专业从事分离过程研究开发、设计和运行的研究人员和工程技术人员,以及大专院校师生参考。

本书内容主要是在作者和作者指导的博士研究生及硕士研究生多年从事极性有机物稀溶液络合萃取研究的基础上完成的，书中的许多内容是作者公开发表的研究成果。这些研究工作一直受到国家自然科学基金重点项目和青年基金项目的支持，除此以外，本书还引用了大量文献资料，对于他们的工作成果，作者在此一并表示感谢。目前，有机物络合萃取技术的研究工作在不断深入，各种新观点、新技术仍在不断出现和完善。本书力求对有机物络合萃取技术进行较为系统的阐述，旨在进行更广泛、更深入的交流和切磋，并殷切希望得到同行专家和读者的赐教和斧正。

络合萃取工艺及方法多种多样，极性有机物络合萃取技术也在不断发展完善。由于作者自身的学术水平和研究实践的限制，书中难免疏漏乃至错误之处，希望专家、同行和广大读者指正。

作 者
2003 年 2 月

目 录

1 概述	1
1.1 有机物稀溶液分离体系	1
1.2 基于可逆络合反应的萃取分离方法	4
参考文献	5
2 络合萃取基本原理	7
2.1 络合萃取过程的描述	7
2.2 络合萃取体系的特征	8
2.2.1 分离对象的特性	8
2.2.2 络合剂的特性	9
2.2.3 稀释剂的选择	10
2.2.4 络合萃取的高效性和高选择性	10
2.3 络合萃取的相平衡	11
2.3.1 络合萃取相平衡的描述	11
2.3.2 萃合物化学组成的确定	16
2.4 络合萃取的机理分析	18
2.4.1 络合萃取的作用机制	18
2.4.2 络合萃取的萃合物结构	19
2.4.3 络合萃取的历程	20
2.4.4 络合萃取的红外光谱定量分析	24
符号说明	28
参考文献	29
3 络合萃取剂	31
3.1 络合萃取剂的构成及选择标准	31
3.2 中性含磷类萃取剂	36
3.3 酸性含磷类萃取剂	38
3.4 胺类萃取剂	39

3.5 络合萃取剂的表观碱(酸)度	40
3.5.1 络合萃取剂类型和组成对萃取能力的影响	40
3.5.2 络合萃取剂表观碱(酸)度的定义	42
3.5.3 络合萃取剂表观碱(酸)度的测定方法	44
3.5.4 络合萃取剂表观碱(酸)度的影响因素	45
3.5.5 络合萃取剂表观碱(酸)度的实验数据	46
3.6 络合萃取剂的相对碱(酸)度	48
3.6.1 络合萃取剂表观碱(酸)度的使用局限性	48
3.6.2 以被萃溶质为对象的络合萃取剂相对碱(酸)度的定义	49
3.6.3 络合萃取剂相对碱(酸)度的测定方法	50
3.6.4 络合萃取剂相对碱(酸)度与络合萃取平衡常数的关系	51
3.6.5 络合萃取剂相对碱度的实验数据	52
参考文献	55

4 络合萃取剂的再生方法 56

4.1 温度摆动效应	57
4.2 pH 值摆动效应	58
4.3 稀释剂组成摆动效应	63
4.4 挥发性有机碱的 pH 摆动效应	64
符号说明	67
参考文献	68

5 有机羧酸稀溶液的络合萃取 69

5.1 概述	69
5.2 磷氧类萃取剂对一元脂肪酸稀溶液的络合萃取	72
5.3 胺类萃取剂对一元脂肪酸稀溶液的络合萃取	76
5.3.1 一元羧酸的亲油性参数 $\lg P$ 对络合萃取的影响	78
5.3.2 一元羧酸的 pK_a 值对络合萃取的影响	79
5.3.3 一元羧酸的表观萃取平衡常数及其关联	82
5.4 表观碱度、相对碱度和一元羧酸的表观萃取平衡常数	88
5.4.1 表观碱度和一元羧酸的表观萃取平衡常数	88
5.4.2 相对碱度和一元羧酸的表观萃取平衡常数	88
5.5 磷氧类萃取剂对二元脂肪酸稀溶液的络合萃取	89
5.6 胺类萃取剂对多元脂肪酸稀溶液的络合萃取	91
5.6.1 TOA 对多元羧酸的络合萃取特性	92

5.6.2 多元羧酸的表现萃取平衡常数及其关联	95
符号说明	97
参考文献	98

6 酚类稀溶液的络合萃取 100

6.1 概述	100
6.2 一元酚稀溶液的络合萃取	105
6.2.1 中性磷氧类络合萃取剂萃取一元酚稀溶液	105
6.2.2 胺类络合萃取剂萃取一元酚稀溶液	109
6.3 多元酚稀溶液的络合萃取	115
6.3.1 中性磷氧类络合萃取剂萃取多元酚稀溶液	115
6.3.2 胺类络合萃取剂萃取多元酚稀溶液	117
6.4 影响酚类稀溶液络合萃取的重要因素	119
6.4.1 溶质的 pK_a 值和亲油性参数 lgP 的影响	119
6.4.2 表观碱度和酚类的表现萃取平衡常数	120
6.4.3 相对碱度和酚类的表现萃取平衡常数	121
符号说明	121
参考文献	122

7 芳香酸和有机磺酸稀溶液的络合萃取 124

7.1 概述	124
7.2 芳香酸稀溶液的络合萃取	124
7.3 有机磺酸稀溶液的络合萃取	129
符号说明	132
参考文献	133

8 有机胺类稀溶液的络合萃取 134

8.1 概述	134
8.2 苯胺类稀溶液的络合萃取	136
8.3 脂肪胺类稀溶液的络合萃取	141
8.4 络合萃取平衡常数的关联	144
8.5 络合剂负载有机胺的红外谱图分析	145
符号说明	146
参考文献	146

9 醇类稀溶液的络合萃取 ————— 147

9.1 概述	147
9.2 羧酸、磷酸酯对醇类稀溶液的络合萃取	152
9.2.1 羧酸、磷酸酯对乙醇稀溶液的络合萃取	152
9.2.2 羧酸、磷酸酯对丁醇稀溶液的络合萃取	155
9.3 酚类有机物对醇类稀溶液的络合萃取	157
9.3.1 酚类对乙醇稀溶液的络合萃取	158
9.3.2 酚类对丁醇稀溶液的络合萃取	160
9.4 金属有机盐对醇类稀溶液的络合萃取	161
9.5 醇类稀溶液络合萃取的盐效应	163
符号说明	166
参考文献	166

10 两性官能团有机物稀溶液的络合萃取 ————— 168

10.1 概述	168
10.2 氨基酸稀溶液的络合萃取	170
10.2.1 L-苯丙氨酸稀溶液的络合萃取	172
10.2.2 L-异亮氨酸稀溶液的络合萃取	174
10.2.3 L-色氨酸稀溶液的络合萃取	178
10.3 其他氨基取代有机物稀溶液的络合萃取	182
10.3.1 对氨基酚稀溶液的络合萃取	182
10.3.2 氨基苯甲酸稀溶液的络合萃取	186
10.3.3 氨基苯磺酸稀溶液的络合萃取	192
符号说明	195
参考文献	196

11 络合萃取技术在分离纯化中的应用 ————— 197

11.1 络合萃取分离双组分有机酸的基本原理	197
11.2 乳酸-乙酸双组分体系的络合萃取分离	200
11.3 丙酸-乙酸双组分体系的络合萃取分离	203
11.3.1 络合剂和稀释剂的种类及其组成对萃取平衡的影响	204
11.3.2 pH 值调节剂对萃取分离效果的影响	205
11.3.3 丙酸-乙酸双组分体系萃取平衡特性的预测	208
11.4 乙醛酸-草酸双组分体系的络合萃取分离	209

11.4.1	三辛胺萃取草酸时的第三相特性	210
11.4.2	三辛胺萃取分离乙醛酸-草酸的性能	214
11.4.3	络合剂化学计量不足对萃取效果的影响	215
11.5	乙醛酸-乙醇酸双组分体系的络合萃取分离	219
11.5.1	TRPO 络合萃取乙醛酸和乙醇酸的数学模型	220
11.5.2	单溶质体系的络合萃取平衡特性	221
11.5.3	双溶质体系的络合萃取平衡特性	222
11.5.4	不同萃取剂对双溶质的络合萃取结果	224
11.6	双组分体系的络合萃取分离工艺的选择	225
	符号说明	226
	参考文献	227

12 络合萃取技术在有机废水处理中的应用 ————— 229

12.1	乙酸废水的络合萃取处理	229
12.2	苯甲酸废水的络合萃取处理	233
12.3	H 酸、DSD 酸废水的络合萃取处理	234
12.4	含酚废水的络合萃取处理	237
12.4.1	N_{203} -碱法萃取脱酚工艺	240
12.4.2	QH-1 型溶剂络合萃取脱酚工艺	241
12.5	苯胺废水的络合萃取处理	243
12.6	硝基苯废水的络合萃取处理	245
12.7	两性官能团有机物废水的络合萃取处理	245
12.7.1	对氨基酚废水的络合萃取处理	245
12.7.2	对氨基苯磺酸的络合萃取处理	246
	参考文献	247

概 述

分离技术是化学工程学科的重要分支之一。它在化学工业、石油炼制、矿物资源的综合利用、核燃料的加工和后处理、海洋资源利用和医药工业、食品工业、生物化工以及环境工程中得到了广泛的应用。

随着现代工业的发展，人们对分离技术提出了越来越高的要求。高纯物质的制备、各类产品的深加工、资源的综合利用、环境治理严格标准的执行，大大地促进了分离过程和技术的发展。在传统的精馏、吸收、萃取、吸附等单元操作的基础上，近年来出现了许多新的及多种单元操作联合使用的过程，如泡沫吸附过程、膜分离过程、反应精馏、反应萃取（包括有机物络合萃取）、膜萃取、超临界萃取、双水相萃取等。

1.1 有机物稀溶液分离体系

多样化产品分离、高纯物质提取的任务是随着现代化学工业的精细化而带来的。在这些任务中有许多属于极性有机物（包括稀溶液体系、难分离体系和热敏性物质体系）分离的范畴。极性有机物稀溶液的分离是一个很有价值但难度很大的课题。

乙酸和酚类是重要的化工原料，有关产品生产过程中会放出含乙酸和酚类（质量分数小于5%）的废水，如果不加回收和处理任意排放，不但造成经济上的损失，还会对环境造成污染。由于极性物质易与水形成氢键，采用常规的方法来处理，不但能耗大，而且效果差。因此，寻找一种高效节能的方法处理极性有机物稀溶液的分离问题，成为一个既有理论研究

价值，又有实际应用背景的课题。

有机羧酸是重要的化工原料，在化工、染料、食品及医药等领域有着广泛的用途。有机羧酸的重要制法之一是发酵法，其特点是原料的利用及转化率较高，由于分离对象通常为稀溶液，分离费用一般占整个产品成本的 50%~60%。例如，乳酸发酵液中除乳酸和葡萄糖外，还有乙酸、丁二酸、酒石酸、柠檬酸等常见的有机羧酸，其中约含乳酸 3.5%，乙酸 1.0%。此外，发酵法制备乳酸存在着明显的产物抑制现象，发酵液中的乳酸浓度过高将直接影响过程速率。选择新的有机羧酸分离方法，保证在有利于发酵过程的条件下有效地分离发酵液中的有机羧酸，已经成为近年来稀溶液分离技术的热门课题。

两性官能团化合物由于分子中具有两种不同性质的官能团，因此，在水溶液巾存在着多个解离平衡。在不同的水相酸度下，溶液中的溶质分别以阳离子（如 A^+ ）、荷电中性分子（ $A^\pm$ ）或中性分子（ A ）以及阴离子（如 A^- ）形态存在。通常认为荷电中性分子极性很强，在水中的活度系数小，水溶液中荷电中性分子的存在大大增加了这类物质萃取分离的难度。例如对氨基苯酚、氨基苯磺酸以及氨基苯甲酸等都是重要的中间体，广泛应用于染料和医药工业。然而，这类有机物生产中排放的废水毒性很大，可生化性又很差，分离的难度也较大，亟待治理。又如，氨基酸是一类重要的两性官能团化合物，广泛地应用于食品和医药工业。氨基酸产物分离过程中，往往需要调节发酵母液的 pH 值，利用阳离子或阴离子交换方法分离氨基酸。这一过程的实现导致大量的物耗和对环境的污染，因此，寻求中等 pH 值条件下对两性官能团化合物的荷电中性分子型态的新分离方法，不仅是对分离过程基本原理的补充和完善，而且对开发高效、经济的分离工艺十分有益。

目前，国内外对极性有机物稀溶液的主要分离方法包括沉淀法、精馏法、吸附法、膜分离法、液体离子交换法、物理萃取法和化学萃取法等，其中各种方法的特点参见表 1-1。

沉淀法目前应用于工业上回收乳酸和柠檬酸等工业过程^[1]。发酵液中的酸产物回收是通过加入氢氧化钙或碳酸钙同酸作用生成不溶于水的钙盐，然后用硫酸处理还原来实现的。沉淀法的缺点在于需消耗大量的化学物质，结晶困难，排出物需要处理以及由于大量的可溶性钙盐而产生的酸产物的损失。

对于挥发性的有机羧酸，如乙酸^[2]，可以采用精馏法分离。但是，当乙酸浓度较低时，乙酸和水的相对挥发度接近于 1，传统精馏方法并非为好的选择。目前商业化的方法是采用恒沸精馏或恒沸精馏加溶剂萃取。对于非挥发性有机羧酸稀溶液，精馏方法则是不可行的。

表 1-1 极性有机物稀溶液的分离方法

方 法	特 点	不 足
沉淀法	可用于回收乳酸和柠檬酸	试剂消耗量大, 结晶困难, 存在酸损失和排出物处理等问题
精馏法	恒沸精馏和恒沸精馏加溶剂萃取	对非挥发性的酸不适用
吸附法	无污染, 对很稀物质有效	生产强度有限
膜分离法	效率高, 无返混, 可连续生产	膜的制备、寿命、污染等方面存在问题
液体离子交换法	季铵盐用于液体阴离子交换物质	消耗盐或酸
物理萃取法	利用溶质在两互不相溶的液相中不同的分配关系分离	相平衡分配系数 D 值低
化学萃取法	可逆络合反应萃取具有高效性、高选择性, 反萃及溶剂再生简单, 成本低等	萃取体系相对复杂, 一些络合萃取剂体系的生物相容性较差

吸附法利用活性炭、大孔树脂等具有大表面积的多孔固体吸附剂分离极性有机物, 包括离子交换法、可逆络合吸附法、非湿吸附法等。在许多场合下, 吸附法都是具有优势的分离方法。固体吸附剂由于不会影响产物的生物活性而比溶剂萃取法更具潜在的优势。吸附法对于分离极稀溶液更为有效^[3~6]。但是, 吸附法的使用也有一些不便之处, 如产液需预处理、生产强度有限等。

膜分离法^[7~11]是以物质之间迁移速度的差别为基础来实现物质间分离的。该方法效率高, 无返混, 可连续生产, 是一种很有前途的方法。目前, 膜的生产和应用存在一定的问题, 如膜的制备、寿命、污染、溶胀等, 使这一方法的应用和发展受到一定的限制。

液体离子交换法^[12~15]是利用季铵盐等化合物作为载体分子, 通过离子交换实现有机物各组分的分离。同离子交换吸附树脂一样, 液体离子交换剂在再生过程中会消耗盐或酸。

物理萃取法^[16]是不涉及化学反应的物质传递过程, 它利用溶质在两种互不相溶的液相中不同的分配关系达到分离目的。极性物质的物理萃取相平衡分配系数 D 值一般较低。若提高溶剂的极性以增大 D 值, 则溶剂在水中的溶解度增大, 造成较大的溶剂损失。因此, 对于有机物稀溶液分离体系, 此类方法的使用受到了限制。

化学萃取法^[17~25]是伴有溶质与络合剂之间的化学反应的传质过程。基于可逆络合化学反应的萃取分离方法对极性有机物稀溶液的分离具有高效性和高选择性, 日益受到国内外研究者的关注, 近年来, 它已成为化工分离工程研究

领域的一个重要的研究方向。

总之,对极性有机物稀溶液的分离、回收和利用是分离科学的重要研究方向之一。

1.2 基于可逆络合反应的萃取分离方法

萃取过程以其分离效率高,生产能力强,能耗低,便于快速、连续和安全操作等一系列优点获得了十分广泛的应用,也一直受到研究工作者的高度重视。萃取分离可分为物理萃取和化学萃取两大类。

选择物理萃取溶剂的首要原则是“相似相溶”规则,即在不形成化合物的条件下,两种物质的分子大小、组成、结构愈相似,它们之间的相互溶解度就越大。然而,对于极性有机物稀溶液分离体系,溶质和水都是极性物质。若选择极性大的溶剂,提高溶质的物理萃取分配系数 D ,则萃取溶剂在水中溶解度也就大,工艺过程中会出现较大的溶剂损失或加重萃残液脱溶剂的负荷。十分明显,物理萃取分离方法对于极性有机物稀溶液分离体系常常是不理想的。

与物理萃取不同,对于许多液液萃取体系,特别是若干金属的溶剂萃取过程,多伴有化学反应,即存在溶质与络合剂之间的化学作用,这类过程是伴有化学反应的传质过程,一般称作化学萃取。

为了解决极性有机物稀溶液的分离问题,King等^[17]提出了一种新的分离方法——基于可逆络合反应的萃取分离方法。可逆络合反应萃取分离(简称络合萃取法)的工艺过程是:溶液中的待分离溶质与含有络合剂的萃取溶剂(由络合剂、助溶剂、稀释剂组成)相接触,络合剂与待分离溶质反应形成络合物,使其转移到萃取溶剂相内达到分离的目的。第二步则是通过温度变化或pH值变化等方式(称为摆动效应^[26])使反应逆向进行,从而萃取溶剂再生循环使用,溶质得以回收。利用络合萃取分离方法可能为极性有机物稀溶液的分离提供一条新的分离途径。

络合萃取方法分离极性有机物稀溶液的研究工作首先是从工艺研究开始的。近年来,国内外的研究者主要针对有机酸稀溶液、酚类稀溶液、有机胺类稀溶液、醇类稀溶液和两性官能团化合物稀溶液等体系进行了研究。在这五类实验体系中,前两类属于典型的Lewis酸,胺类属于Lewis碱,而醇类、两性官能团化合物则介于Lewis酸与Lewis碱之间。研究工作主要围绕络合剂的选择、络合剂的含量对萃取分配系数的影响、稀释剂的选择、稀释剂的含量对萃取分配系数的影响、络合萃取过程的共萃水量、络合萃取溶剂的再生方法等

方面进行。研究工作提供了一批诸如萃取相平衡等温线、萃取平衡分配系数分布曲线等有益的实验数据,提出了针对乙酸、丙酸、丁酸、丁二酸、乙醛酸、苹果酸等有机羧酸稀溶液、酚类稀溶液、胺类稀溶液的具有较强萃取分离能力的工艺过程。但是,较多的研究工作仍仅停留在实验室工艺研究阶段。

值得注意的是,与络合萃取方法分离极性有机物稀溶液的工艺性研究相比,有关络合萃取法分离极性有机物稀溶液的机理性研究工作则处于初始阶段。对于无机酸、金属离子(或金属络离子)等的化学萃取曾经是十分活跃的领域,有关该类过程的化学萃取机理已形成了比较成熟的系列成果,并汇集于多种溶剂萃取化学的专著和数以千计的各类科学论文之中。然而,极性有机物这类待分离溶质的络合萃取过程机理则有其特定的复杂性。例如,由于络合剂之间、络合剂与稀释剂之间、络合剂与待分离溶质之间、络合剂与水分子之间都有出现氢键缔合的可能,这就使有机相内萃合物组成的确定十分复杂。又如,络合萃取法分离过程中的络合剂、稀释剂及待分离溶质都是有机化合物,这些有机化合物分子所拥有的特殊官能团带来的诱导效应、共轭效应以及空间位阻效应等都将影响萃合物的成键机理等。

总之,络合萃取分离有机物稀溶液的工艺性研究和机理性研究具有重要的意义。它们不仅对认识络合萃取分离过程本身有着促进作用,而且对于强化萃取分离工艺,实现其工程应用具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 金其荣. 有机酸发酵工艺学. 北京: 中国轻工业出版社, 1992. 212~247
- 2 赵承卜. 萃取精馏及恒沸精馏. 北京: 高等教育出版社, 1998
- 3 胡徐腾, 张瑾, 戴猷元. 化工学报, 2000, 51 (4): 555~559
- 4 Dai Y Y, King C J. Ind Eng Chem Res, 1996, 35 (4): 1215~1224
- 5 Tung L A, King C J. Ind Eng Chem Res, 1994, 33 (12): 3217~3223
- 6 Tung L A, King C J. Ind Eng Chem Res, 1994, 33 (12): 3224~3229
- 7 王湛. 膜分离技术基础. 北京: 化学工业出版社, 2000
- 8 张卫东. 中空纤维膜萃取过程的研究 [学位论文]. 北京: 清华大学, 1996
- 9 王玉军, 骆广生, 戴猷元. 现代化工, 2000, 20 (1): 13~18
- 10 骆广生, 夏芳, 戴猷元. 水处理技术, 1999, 25 (1): 9~13
- 11 陈翠仙, 余立新, 戴猷元. 水处理技术, 1996, 22 (6): 307~313
- 12 张瑞华, 徐志伟, 洪勇健等. 膜科学与技术, 2000, 20 (3): 44~49
- 13 Juang R S, Chen J D. Sep Sci & Tech, 1998, 33 (15): 2379~2395
- 14 Juang R S, Huang R H, Wu R D. J Membrane Sci, 1997, 136 (1~2): 89~99
- 15 Boyaval P, Corre C, Madec M N. Enzyme and Microbial Technology, 1994, 16 (10): 883~886

- 16 Kertes A S, King C J. *Biotech & Bioeng*, 1986, 28 (2): 269~282
- 17 King C J. Separation Process Based upon Reversible Chemical Complexation. In: Rousseau R W, Ed. *Handbook of Separation Process Technology*. New York: John Wiley & Sons, 1987. 760~774
- 18 汪家鼎, 费维扬. *化学进展*, 1995, 7 (3): 219~224
- 19 汪家鼎, 陈家镛. *溶剂萃取手册*. 北京: 化学工业出版社, 2001
- 20 Hartl I, Marr R. *Sep Sci & Tech*, 1993, 28 (1~3): 805~809
- 21 Hauer E, Marr R. *International Chem Eng*, 1994, 34 (2): 178~187
- 22 Starr J N, King C J. *Ind Eng Chem Res*, 1992, 31 (11): 2572~2579
- 23 费维扬, 戴猷元. *现代化工*, 1996, 16 (10): 26~29
- 24 刘阳生, 戴猷元, 汪家鼎. *现代化工*, 1998, 18 (8): 8~11
- 25 张瑾, 戴猷元. *现代化工*, 2000, 20 (2): 19~22
- 26 张瑾, 戴猷元. *现代化工*, 1999, 19 (3): 8~11