

下 册

液-液萃取过程和设备

YE-YE CUI QU GUO CHENG HE SHE BEI

李 洲 费 维 扬 杨 基 础

原 子 能 出 版 社

液-液萃取过程和设备

下 册

李 洲 费维扬 杨基础

原子能出版社

内 容 简 介

本书共分上下两册，系统地介绍了液-液萃取过程的基本原理和萃取设备的设计计算方法。本书在内容选编上力求反映出近代发展水平。上册共分六章，介绍了液-液萃取的发展和应用，萃取过程平衡和动力学，以及各种条件下多级逆流萃取过程的计算方法；下册共分四章，在一般介绍各类萃取设备的基础上依次重点介绍了混合澄清槽、液-液萃取柱和离心萃取器等主要萃取设备的结构、性能和计算。

本书可以作为高等工科院校湿法冶金、原子能化工、石油化工和环境保护等专业本科大学生和研究生的教学参考用书，也可供从事上述科学技术工作的技术人员参考。

液-液萃取过程和设备

下 册

李 洲 费维扬 杨基础

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

重庆印制一厂印刷

(重庆市枇杷山后街)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 14 · 字数 311 千字

1985年5月第一版 · 1985年5月第一次印刷

印数 1—3000 · 统一书号：15175·548

定价：1.75元

编 者 的 话

随着液-液萃取在各种分离提取过程中的广泛应用,人们对萃取化学、工艺和设备进行了越来越多的研究。液-液萃取过程的专业性国际会议已多次召开,并且出版了不少的专著和文集,其中在萃取设备方面有较大参考价值的专著主要有:

1. Treybal, R. E., Liquid Extraction, 2nd. ed., McGraw-Hill, New York, 1963;
2. Hanson, C., ed., Recent Advances in Liq.-Liq. Extn, Oxford, Pergamon Press, 1971;
3. Laddha, G. S., Degaleesan, T. E., Transport Phenomena in Liquid Extr., Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi, 1978.

展望未来,液-液萃取将会有更大的发展和日益广泛的应用。

目前,在国内液-液萃取也已应用于各个领域。为了给高等工院校的湿法冶金、原子能工业、石油化工和环境保护等专业本科大学生和研究生提供教学参考用书,并为上述各有关专业的广大科技人员提供相应的参考资料,我们编写了此书。

本书是在我校原有液-液萃取方面的讲义的基础上进行补充和更新而写成的。上册介绍了液-液萃取的发展和应用,萃取过程平衡和动力学,以及各种条件下多级逆流萃取过程的计算方法;下册介绍了各种主要萃取设备的结构、原理、

设计计算和发展趋势。本书在内容选编上力求反映出近代液-液萃取过程和设备的发展水平。

在本书的编写过程中，曾得到系领导和有关同志的支持和指导，在此特致以深切的谢意。

本书下册第七、九章由费维扬同志编写，沈忠耀同志审阅；第八章由李洲同志编写，李以圭同志审阅；第十章由杨基础同志编写，李慎文、周嘉贞同志审阅。由于我们的理论水平和实际经验有限，书中缺点和错误在所难免，衷心地希望读者提出宝贵意见。

编者 1982年3月于清华大学

科技新书目： 91-114

统一书号： 15175·548

定 价： 1.75 元

目 录

第七章 萃取设备的特点和分类	1
第一节 萃取设备的特点	1
第二节 影响萃取速率的因素	3
一、两相接触面积 F	3
二、传质系数 K	5
三、传质推动力	7
第三节 液滴的聚合	8
第四节 萃取设备的分类、比较和选择	11
一、萃取设备的分类	11
二、萃取设备的比较	12
三、萃取设备的选择	15
本章符号	17
参考文献	17
第八章 混合澄清槽	19
第一节 概述	19
一、箱式混合澄清槽	21
二、“核安全”的混合澄清槽	23
三、浅层澄清的混合澄清槽	25
四、Holmes 和 Narver 矮型混合澄清槽	26
五、Davy Powergas 混合澄清槽	27
六、I. M. I. 混合澄清槽	27
七、Kemira 混合澄清器	28
八、Denver 混合澄清槽	30
九、Krebs 型混合澄清器	30

十、“蜂窝”式 (Honeycomb) 脉冲混合澄清器	33
十一、塔型混合澄清萃取器	33
十二、CMS (The Combined Mixer-Settler) 萃取器	39
第二节 混合槽内的传质和混合槽的放大	42
一、混合槽的结构和混合搅拌方式	43
二、搅拌输入能量的计算	61
三、混合槽内的液流分散和传质	76
四、输入功率 (或能量) 和萃取传质速率的关系和混 合槽的放大	110
五、输入能量参数的选择	123
六、混合槽的改进和管线混合器的介绍	132
第三节 澄清槽内的澄清分相和澄清槽的放大	145
一、澄清的基本过程	145
二、澄清槽的放大原则——面积原则	152
三、影响澄清速率的诸因素	157
四、提高澄清速率的几个途径	166
五、其它澄清器的介绍	176
第四节 箱式混合澄清槽的工艺设计	178
一、混合室有效体积和结构尺寸的确定	181
二、澄清室有效体积和结构尺寸的确定	183
三、各相口及堰板位置和结构尺寸的确定	183
四、箱式混合澄清槽设计计算示例	212
第五节 混合澄清槽的操作运行	219
一、混合澄清槽的操作运行步骤	219
二、澄清槽内界面高度的计算和控制	222
三、连续相和分散相的控制和反相	235
四、混合相比的调节	239
五、夹带和液泛	240
本章符号	243

参考文献	248
第九章 液-液萃取柱	256
第一节 常用萃取柱简介	256
一、简单的重力作用萃取柱	256
二、机械搅拌萃取柱	260
三、脉冲萃取柱	273
四、振动筛板柱	276
第二节 脉冲筛板柱	282
一、脉冲筛板柱的结构和操作	282
二、脉冲筛板柱的液泛流速和存留分数	288
三、脉冲筛板柱的液滴平均直径	306
四、脉冲筛板柱的传质特性	308
五、脉冲筛板柱的纵向混合	324
六、脉冲筛板柱的发展	327
第三节 转盘柱 (RDC) 的性能和设计计算	333
一、概述	333
二、转盘柱的液泛流速和存留分数	340
三、转盘柱的液滴平均直径	347
四、转盘柱的纵向混合	350
五、转盘柱的传质特性	355
六、转盘柱的设计计算	360
本章符号	389
参考文献	392
第十章 离心萃取器	397
第一节 概述	397
一、离心萃取器的原理、特点和应用	397
二、离心萃取器的分类	398
第二节 各种类型离心萃取器的介绍	399
一、连续接触式离心萃取器	399

二、逐级接触式离心萃取器	405
第三节 离心萃取器的性能	414
一、波式离心萃取器的性能	414
二、SRL型离心萃取器的特性	423
本章符号	437
参考文献	438

第七章 萃取设备的特点和分类

液-液萃取作为一种分离过程，正在得到越来越广泛的应用。它为原子能的利用、彩色电视的普及和石油化工的发展等作出了贡献，也在资源的综合利用、环境保护和节约能源等方面发挥着越来越大的作用。

随着液-液萃取在原子能化工、湿法冶金和石油化工等方面的广泛应用，生产规模日益扩大，产品质量日益提高。因此，对萃取设备也提出了越来越高的要求。近三十年来，萃取设备在理论和实践方面都得到了迅速的发展。研制了多种新型、高效的萃取设备，取得了良好的效果。随着基础研究的深入，生产经验的积累和电子计算机的广泛应用，萃取设备的扩大设计方法也在迅速发展。但是，由于萃取过程的复杂性，进行一个新的工业萃取设备的设计，往往还离不开中间试验。

第一节 萃取设备的特点

萃取设备是多种多样的^[1]。在萃取柱中，两相在连续逆流过程中不断进行萃取。在混合澄清槽中两相在一些独立的接触级中进行萃取。而在离心萃取器中，两相则凭借离心力进行混合和分离。然而，它们都有一些共同的特点。为了更好地理解影响萃取设备性能的主要因素，不拘泥于所利用的设备型式，可以把液-液萃取过程看作是三个阶段的循环。

1. 将一相分散到另一相中，形成很大的相界面面积。
2. 在分散相液滴和连续相接触的一段时间内，使传质过程进行到接近平衡的程度。
3. 分散相液滴聚合，两相分离并分别进入下一级或作进一步的处理(如反萃、浓缩等)。

这种“分散—传质—聚合”，然后再“分散—传质—聚合”的循环，对设备性能具有重要的影响。

在液-液萃取过程中，两个液相密度差小，而粘度和界面张力比较大，因此，两相的混合和分离比气液传质过程(如吸收、精馏等)困难得多。为了使萃取过程进行得比较充分，就要使一相在另一相中分散成细小的液滴。液滴平均直径越小，相际传质表面面积越大，一般来说，越有利于传质。采用机械搅拌、空气脉冲等手段，可以使液滴得到良好的分散。但是，伴随而来的问题是液滴的聚合，即两相的分离就比较困难。因此，在液-液萃取过程中，液滴的分散和聚合这对矛盾显得比较突出。

从设备的性能方面来分析，需要正确处理一些重要的关系，如传质效率和处理量的关系，设备操作强度和溶剂损失的关系等。当前萃取设备发展的重要方向之一是输入能量以期获得更高的效率，而实质上不降低处理量。例如采用脉冲筛板柱可以使设备的传质效率和处理量比一般筛板柱有大幅度的提高。又如在核燃料后处理中采用离心萃取器，可以在几秒钟的两相接触时间内，达到很高的萃取效率，从而大大地减小溶剂的辐照降解。此外，随着环境保护的要求越来越严格以及一些昂贵的高效萃取剂的应用，在努力提高设备操作强度的同时，必须严格限制萃残液中的有机溶剂夹带量。这对萃取设备的研究和发展带来了一些新的课题。

第二节 影响萃取速率的因素

在第三章中，已经介绍过萃取速率可以用传质方程式表示

$$N = K_o F (y^* - y)$$

或

$$N = K_w F (x - x^*)$$

为了缩小完成指定分离任务所需要的设备尺寸，希望尽可能地提高萃取速率。从传质方程式可以看出，提高传质系数 K ，传质界面积 F 或传质推动力三者中的任一项，都能提高传质速率。但是三者之间存在一定的联系，都受体系物性、设备结构和操作条件的影响。因此重要的是使三者的乘积即萃取速率最大，而不能单纯追求其中某一项数值最大。为此，有必要对影响萃取速率的诸因素加以进一步的讨论。

一、两相接触面积 F

在工业溶剂萃取设备中，一相总是以液滴形式分散在另一相中。单位体积混合相内的界面面积 a (即比表面积) 取决于液滴平均直径 d_p 和分散相存留分数 ϕ_d 。而搅拌程度、两相物性和分散相存留分数等对液滴平均直径都有明显的影响。

用照相等实验方法测定萃取设备中分散相液滴直径的结果表明，存在着很宽的液滴直径分布范围。图 7-1 示出了在有四块挡板的圆形混合槽中，用六叶泵式搅拌桨混合时，两种体系的液滴直径分布规律。从图可以看出，对于界面张力比较小的异戊醇-水体系，在较低的搅拌桨转速下，液滴群已经得到良好的分散。分布密度最大的液滴直径比较小。而对于界面张力较大的正丁烷-水体系，即使在较高的搅拌转

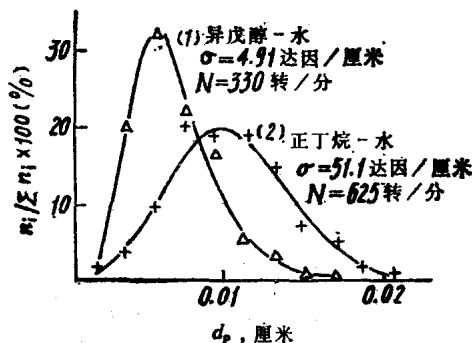


图 7-1 液滴直径的分布规律^[2]

直径分布更趋集中。

液滴平均直径通常用“体积-表面积”直径 $d_{3,2}$ 表示，其定义为：

$$d_{3,2} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i d_{pi}^3}{\sum_{i=1}^N n_i d_{pi}^2}$$

$d_{3,2}$ 称为沙特 (Sauter) 液滴平均直径。

对于一些常用的萃取设备，已经通过大量实验测定了液滴平均直径 $d_{3,2}$ 与体系物性及搅拌强度的定量关系，总结了一些半经验公式，可供设计时选用。

【例7-1】有一个实验搅拌槽，横截面积为100厘米²，注入有机相和水相各0.5升。搅拌时水相为分散相。试问：

1. 若水滴平均直径分别为2毫米和0.2毫米，两相接触面积各为多少平方米？比未搅拌前增加多少倍？
2. 如果水相存留分数 ϕ_d 改变为0.2和0.8，两相接触面积各为多少？

速下，液滴群的分散仍较差。分布密度最大的液滴直径比较大，而且液滴直径分布范围比较宽。同一体系的实验表明，随着搅拌强度的增加，分布密度最大的液滴直径减小，而且液滴

【解】 1. 未搅拌前，两相接触面积 $F=100$ 厘米²，搅拌后，当 $d_{3,2}=2$ 毫米时，

$$F_1 = \frac{V_d \pi d_{3,2}^2}{\frac{1}{6} \pi d_{3,2}^3} = \frac{500 \pi (0.2)^2}{\frac{1}{6} \pi (0.2)^3} = 1.5 \times 10^4 \text{ 厘米}^2$$

$$\therefore F_1/F = 150;$$

加剧搅拌后， $d_{3,2}=0.2$ 毫米，此时

$$F_2 = \frac{500}{\frac{1}{6} \pi (0.02)^3} \pi (0.02)^2 = 1.5 \times 10^5 \text{ 厘米}^2$$

$\therefore F_2/F = 1500$ 。因此，搅拌后，两相接触面积分别增加至未搅拌时两相接触面积的150倍和1500倍。

2. 当水相存留分数 ϕ_d 改变时，比表面 a 的一般计算公式为：

$$a = \frac{6\phi_d}{d_{3,2}}$$

即 a 与 ϕ_d 成正比，而与 $d_{3,2}$ 成反比。这样，不同条件下的比表面积如下表所示：

a , 厘米 ² /厘米 ³	ϕ_d	0.8	0.5	0.2
$d_{3,2}$ 厘米				
0.20		24	15	6
0.10		48	30	12
0.02		240	150	60

二、传质系数 K

机械搅拌能大大增加萃取过程的两相接触面积，那么是不是搅拌越剧烈越好呢？这还需要考虑搅拌对传质系数 K 的

影响。在液-液萃取中，存在分子扩散和涡流扩散两类扩散过程。前者是很慢的传递过程，而在湍流条件下，涡流扩散系数 ϵ_D 比分子扩散系数 D 要大好几个数量级。

在萃取设备中，如果提供足够的搅拌，使连续相处于高度湍流状态，涡流扩散占优势，则在该相内可以得到相当大的连续相分传质系数 k_c 。然而，搅拌只能间接地影响分散相。当液滴通过连续相运动时，界面的曳力使较大的液滴产生滴内液相的内循环，而一些更大的液滴在湍流状态下还会发生摆动现象。这两种现象都能促进液滴内各组分的混合，增加涡流扩散，从而强化分散相的传质。内循环的产生及大小取决于液滴对连续相的相对速度、液滴直径和两相的物理性质。液滴越小，曳力相对于惯性力越小，内循环越不明显；很小的液滴，其运动有如一个刚性的小球，没有液滴的内循环或摆动现象，此时，液滴内的传质是很慢的分子扩散，因此，分散相的分传质系数 k_D 值较小。

一般说来，增加搅拌强度一方面能减小液滴平均直径，增加传质面积；另一方面能增强连续相的湍流程度，从而促进传质。但是，超过了一定的限度，进一步增加搅拌强度可能使液滴分散得过细而呈现刚性球的特性，分散相的分传质系数反而下降。此时这两种矛盾因素的相对重要性，取决于传质阻力主要在哪一相。如果分散相是传质过程的控制步骤，

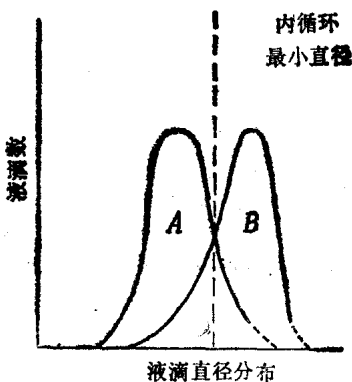


图7-2 液滴直径分布规律

那末，过度的搅拌可能引起总传质系数的下降。

应该指出，在讨论分散相传质性能时，除了考虑平均液滴直径外，还要注意液滴直径分布规律。图 7-2 表示了在内循环最小液滴直径附近的两种液滴直径分布规律。两个系统的液滴平均直径差别不大。但是系统 A 的绝大部分液滴表现出刚性球的特性，而系统 B 的绝大部分液滴却具有内循环。因此，两个系统的分散相传质系数将有较大的差别。

液滴的相互作用，特别是液滴的聚合和再分散，能促进界面更新，有利于提高分散相的分传质系数。但是过度的搅拌也会抑制这种现象。此外，考虑到两相的澄清分离，避免相互夹带，也应该选择适当的搅拌强度。

三、传质推动力

影响传质速率的另一重要因素是传质推动力。在第四章和第六章中已经指出过，当工艺条件一定时，与其它接触方式相比，两相逆流接触时的传质推动力最大。在混合澄清槽等逐级接触设备中，浓度是呈阶梯状变化的，浓度剖面 and 逐级逆流接触时的理想情况比较接近。但是对于连续接触的萃取柱设备，两相的流型与理想的逆流流动（即柱塞流流动）往往有较大的偏离。柱内的纵向混合会展平纵向的浓度分布，引起传质推动力的下降。因此，萃取柱的传质效率也随之下降。在图 7-3 中对柱塞流流动下理想传质推动力以及具有纵向混合时的真实传质推动力作了比较。从图上可以看出，由于萃取柱两端的浓度突跃 (Concentration Jump)，真实的传质推动力大大下降。

导致萃取柱内产生纵向混合的主要原因有：

1. 连续相局部速度过大，以致夹带分散相液滴，造成