

SEPARATION ENGINEERING



分离工程

袁惠新 主 编
冯 磊 副主编

中国石化出版社

责任编辑 廖林林
封面设计 曾晓爱
责任校对 蔡 敏

ISBN 7-80164-159-0



9 787801 641595 >

ISBN 7-80164-159-0/TQ-033

定价: 70.00 元

分离工程

袁惠新 主编
冯 焜 副主编



A0960078

中国石化出版社

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了分离工程的原理、设备及分离过程的设计。全书共分：总论、机械分离过程、传质分离过程和分离过程的分析与设计四篇。

总论篇介绍了分离过程的组成、种类、特性、用途及评价等，以及混合物的种类及特性；机械分离过程篇介绍了颗粒动力学、絮凝与絮凝、重力沉降、离心分离、旋流分离、浮选、过滤及其他机械分离过程；传质分离过程篇介绍了蒸发、结晶、蒸馏和精馏、干燥、吸收、吸附、萃取、浸取、离子交换和膜分离；分离过程的分析与设计篇介绍了分离过程的特性分析与比较、分离过程的节能和分离过程的设计。

本书既有理论又有应用实例，是一本具有实用价值的教材及技术参考书。适用于石油、化工、生物、食品、机械等专业三、四年级学生及研究生。同时对工程技术人员、研究设计人员也会有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

分离工程/袁惠新主编.
—北京:中国石化出版社,2001
ISBN 7-80164-159-0

I.分… II.袁… III.化工过程-分离 IV.TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第075476号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84289972

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 39.75 印张 1016 千字 印 1—3000

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

定价:70.00 元

编 者 的 话

分离技术是一类过程单元操作，而分离工程是一门交叉学科，它从系统工程的角度，根据混合物的特性及分离要求，选择和组合分离单元操作，形成一个技术上可靠、经济上可行的分离过程。分离技术包括分离工艺和分离设备。就一些产品生产或处理过程而言，分离工艺就是生产或处理工艺，分离设备就是生产或处理设备。

工程科学，如生物、食品、石油、化工、采矿选矿、水和气的净化(包括三废处理)等方面的发展使得工程设计在整个工厂设计中的需求日益突出，而分离过程在工业生产中是最普遍、最重要的过程之一。本书的编写是为了适应工程科学对分离技术发展的要求，帮助人们全面了解各种分离技术及分离工程原理，为设计高效、节能的分离过程提供指导。

分离技术包括传质分离和非传质分离两大类。传质分离包括相变分离(如浸取、蒸发、结晶等)和非相变分离。其中相变分离只是完成了组分的相变——微观上的分离，使均相混合物转变为非均相混合物，最终组分(相)的分离——宏观分离必须经过机械分离才能完成。实际上，对于均相混合物的分离，机械分离的好坏直接影响到传质分离的速度和效果。因此，对于一个分离工程师来讲，只了解传质分离过程是不够的，只有同时掌握了传质分离和机械分离的方法，组合运用各种分离技术，才能设计出高效的分离过程。

另外，对于某一混合物的分离任务，有时用一种分离方法就能完成，但绝大多数情况下，要用到两种或两种以上的分离方法。有时用一种分离方法虽然能完成任务，达到分离要求，但投资或运行费用可能很高，即技术上可行，经济上不一定可行；有时用几种分离方法有机地组合起来，取长补短，往往能达到更加高效的状态，包括既达到分离要求，又可降低分离过程的投资和运行费用。如何根据混合物的特性选择和组合各种分离过程，以组成高效的分离过程或生产、处理过程，这就是一个工程问题，即计划、优化问题。

为设计高效的分离过程，首先应对混合物的特性和各种分离技术有一个

透彻、全面的了解，然后运用工程原理，进行分离技术的选择与优化组合。为此，本书分四篇论述：第一篇总论，介绍分离过程的组成、种类、特性、用途及评价等，以及混合物的种类及特性；第二篇和第三篇分别介绍非传质分离(即机械分离)过程和传质分离过程，包括各种分离单元操作的原理、功能、特点及应用场合等；第四篇介绍分离过程的分析与设计，包括分离过程的分析与比较、分离过程的节能和分离过程的设计。

与已有的同类书相比，本书力求内容的系统性和全面性，它包含了所有主要的分离过程包括扩散分离和非扩散分离过程，特别是对混合物特性的分析、分离过程的评价、选择及设计方面内容的全面论述，避免了传统编写的不足。

本书既反映了编著者们自己多年从事分离技术或分离工程方面研究和设计的经验，也反映了当今国内外分离工程发展的最新成果。

参加本书编写的人员有：袁惠新(第一章、第二章、第三章、第四章、第七章、第八章、第十六章(部分)、第二十三章、第二十四章(部分)、第二十五章、附录)；冯焜(第十四章、第十九章、第二十章、第二十二章)；胡筱敏(第五章)；王跃进(第六章、第十一章、第十二章)；许林妹(第十五章)；苗青(第十六章部分)；崔政伟(第二十一章)；朱海清(第十七章、第十八章)；刘卫华(第二十四章部分)；蔡小华(第十章)；俞建峰(第九章)；戴军(第十三章)。

本书的编著工作主要由江南大学(原无锡轻工大学)分离工程研究所和过程装备与控制工程系承担，也得到了余国琮院士、金涌院士、陆振曦教授、朱企新教授、罗茜教授、卓震教授、张志炳教授、徐南平教授和杨汉文高级工程师等的指导，得到了无锡袁博分离工程有限公司、中国船舶工业集团公司上海申舟环保工程设备有限公司和无锡通用机械厂等单位的大力支持。在此，谨向他们表示衷心的感谢。

由于分离过程的种类繁多，又有新的过程或技术不断出现，内容中难免挂一漏万。限于编著者的水平，错误不足之处在所难免，敬请读者提出宝贵意见。

编著者

2001年10月

目 录

第一篇 总 论

第一章 导论	(3)
1.1 分离过程的概念	(3)
1.2 分离过程的分类	(4)
1.3 分离因子	(10)
1.4 分离过程的功能及用途	(13)
1.5 分离过程的一般特性及经济意义	(14)
1.6 分离过程实例——蔗糖生产	(15)
参考文献	(17)
第二章 混合物的种类及特性分析	(19)
2.1 混合物的分类	(19)
2.2 混合物的一般性质	(20)
2.3 非均相混合物的种类	(20)
2.4 非均相混合物的特性	(21)
2.5 非均相混合物的取样方法	(46)
第三章 分离过程的评价	(48)
3.1 评价的意义及分类	(48)
3.2 分离过程的评价指标	(49)
3.3 分离过程的效率	(51)

第二篇 机械分离过程

第四章 颗粒动力学	(65)
4.1 流体绕过球形颗粒的流动	(65)
4.2 颗粒的扩散运动	(66)
4.3 颗粒的布朗运动	(68)
4.4 颗粒的沉降运动	(69)
第五章 凝聚与絮凝	(75)
5.1 悬浮液的电学性质	(75)
5.2 凝聚	(78)
5.3 絮凝	(84)
参考文献	(90)
第六章 重力沉降	(91)
6.1 非均相混合物中颗粒的实际沉降过程	(91)

6.2	影响沉降分离的因素	(93)
6.3	重力沉降设备	(94)
6.4	连续沉降槽的参数计算	(105)
第七章	离心分离	(108)
7.1	离心机及分离因数	(108)
7.2	流体及颗粒在离心力场中的运动	(108)
7.3	离心沉降分离的极限	(113)
7.4	离心机的结构及类型	(113)
7.5	离心机选型	(130)
7.6	离心机主轴所需功率	(132)
7.7	离心机的强度计算	(135)
7.8	离心机的振动与隔振	(139)
第八章	旋流分离	(143)
8.1	旋流器的基本结构、工作原理及操作特点	(144)
8.2	旋流器的功能及应用	(145)
8.3	旋流器内的流场	(148)
8.4	旋流器的能量(压力降)需要	(150)
8.5	旋流器的分流比	(153)
8.6	旋流器的分离性能及其影响因素	(154)
8.7	旋流器的设计与开发	(161)
8.8	旋风分离器	(165)
8.9	旋流器的结构、材料及成形	(170)
8.10	旋流分离系统的设计	(171)
	参考文献	(174)
第九章	浮选	(175)
9.1	疏水性与浮选	(175)
9.2	浮选系统中气泡的产生	(176)
9.3	固体颗粒粒度与浮选能力	(177)
9.4	气泡 - 颗粒的聚集	(177)
9.5	浮选的宏观动力学模型	(178)
9.6	浮选设备及其设计	(179)
第十章	过滤	(187)
10.1	流体通过颗粒床层的流动	(187)
10.2	过滤的基本概念和理论	(190)
10.3	过滤设备	(203)
10.4	过滤计算	(207)
第十一章	筛分、压榨、超声分离	(212)
11.1	筛分	(212)
11.2	压榨	(221)
11.3	超声分离	(225)

第十二章 磁、电分离	(232)
12.1 磁力分离	(232)
12.2 静电分离	(261)

第三篇 传质分离过程

第十三章 蒸发	(281)
13.1 蒸发过程	(281)
13.2 蒸发器类型及其选择	(284)
13.3 单效蒸发的计算	(290)
13.4 多效蒸发器及其计算	(298)
13.5 蒸发的应用	(305)
13.6 蒸发过程的设计	(307)
参考文献	(309)
第十四章 结晶	(310)
14.1 结晶的基本概念	(310)
14.2 结晶动力学	(313)
14.3 结晶操作的基本计算	(318)
14.4 结晶方法与设备	(322)
第十五章 蒸馏和精馏	(330)
15.1 溶液的气液平衡	(330)
15.2 精馏	(338)
15.3 多组分精馏	(358)
15.4 特殊精馏	(363)
15.5 塔设备	(369)
第十六章 干燥	(383)
16.1 湿空气的性质及湿焓图	(383)
16.2 干燥器的物料衡算和热量衡算	(388)
16.3 干燥速率和干燥时间	(392)
16.4 干燥设备	(398)
第十七章 吸收	(416)
17.1 吸收过程	(416)
17.2 吸收器	(416)
17.3 吸收过程工艺计算	(435)
第十八章 吸附	(446)
18.1 吸附的基本原理与吸附剂	(446)
18.2 吸附速率与吸附特性	(448)
18.3 吸附分离工艺	(450)
第十九章 萃取	(457)
19.1 萃取的基本概念和理论	(457)
19.2 萃取过程的计算	(462)

19.3	液液萃取设备	(469)
第二十章	浸取	(473)
20.1	浸取理论	(473)
20.2	浸取操作的计算	(477)
20.3	浸取设备	(481)
20.4	超临界萃取	(484)
第二十一章	离子交换	(492)
21.1	离子交换的基本概念与离子交换树脂	(492)
21.2	离子交换过程的理论基础	(495)
21.3	离子交换过程的选择性	(501)
21.4	大网格离子交换树脂	(505)
21.5	树脂和操作条件的选择	(506)
21.6	离子交换的应用	(506)
	参考文献	(507)
第二十二章	膜分离过程	(508)
22.1	微滤和超滤	(508)
22.2	反渗透	(519)
22.3	电渗析	(524)
22.4	渗透气化	(534)

第四篇 分离过程的分析与设计

第二十三章	分离过程的分析与比较	(543)
23.1	分离过程的不完全性	(543)
23.2	传质分离过程的分析与比较	(546)
23.3	机械分离过程的分析与比较	(548)
第二十四章	分离过程的节能	(550)
24.1	分离的最小功和热力学效率	(550)
24.2	节能的途径	(552)
第二十五章	分离过程的设计	(574)
25.1	影响分离过程选择的因素	(574)
25.2	分离过程选择的一般规则及步骤	(582)
25.3	新过程的产生	(584)
25.4	分离过程的组合	(584)
25.5	分离过程的合成——典型分离过程举例	(586)
	参考文献	(603)
附录	(604)
附录 A	常用单位换算	(604)
附录 B	常用工程数据	(608)

第一篇 总论



第一章 导 论

人们生活在混合物的世界中。自然资源(如水、空气、矿物、动物体、植物体等)、人们吃的、用的和周围环境都是混合物。“垃圾只是有用的东西放错了地方”。

自然资源的加工或处理过程如采油、炼油、选矿、冶炼,食品加工和生物制品生产等的主要过程为分离过程。在上述过程中,人们往往只提取其中容易分出的部分(从短暂的经济利益考虑),剩下的(有时可能是大部分)物料作为渣、下脚料或废水、废气排放。这样,一方面造成资源的浪费,另一方面造成环境的污染。因此,人们在生产、生活的同时,又在产生“三废”——混合物。从环境角度讲,人们在试图提高生活水平的时候,又在降低生活质量。“混在一起是垃圾,分捡出来是宝贝”。随着环境的恶化,资源的枯竭,这句话从废物回收再利用的角度来看是很容易理解的,分离过程对节省资源、保护环境的重要性也就显而易见。因此,分离过程对提高产品质量、降耗节能、提高社会经济效益具有重大的意义。

1.1 分离过程的概念

1.1.1 分离过程的组成

混合是一个自发的过程。来自于自然界的原料绝大部分是混合物。这些混合物有的可以直接利用,但大部分往往先要加入能量或物质,经过分离提纯才能被人们所利用。

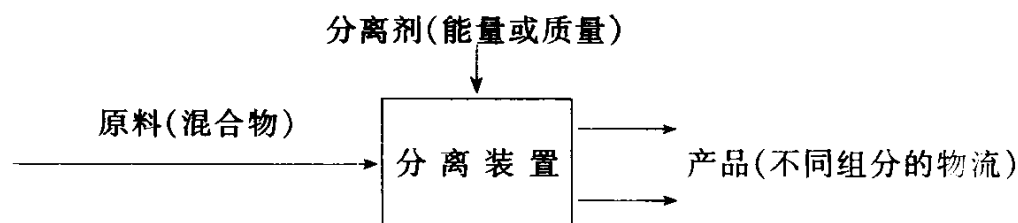


图 1-1 分离过程简图

图 1-1 所示为一个基本的分离过程。其中,进料为混合物,产品为不同组分或相的物流。分离剂为能量或另一股物流(质量)。广义地讲,质量也是能量的一种形式。分离装置的主要部分是分离场或分离介质。混合物的分离是在其内因和外因的作用下发生的。内因是混合物分离的内在推动力,即混合物内组分或相在物理、化学、生物等方面的性质差异;外因是相应形式(物理、化学、生物)分离剂的加入。混合物的分离过程就是在混合物内、外因的作用下,在分离场或分离介质内发生组分物质选择性的反应、相变、传递、迁移或截留而相互分开,得到组成互不相同的两种或几种产品的操作,以达到产品的提取、提纯、净化、浓缩、干燥或三废(废水、废气或废渣)处理等要求。

1.1.2 分离剂(separating agent)

分离剂是分离过程的辅助物质或推动力。分离剂包括能量分离剂和质量分离剂。常见的分离剂如表 1-1 所示。

广义地说,不管采用哪种形式的分离剂,都是在利用某种形式的能量,都会增加过程的费用,即操作费用。

表 1-1 常见的分离剂

能量分离剂	机械能(重力、离心力、压力等)、光能、电能、磁能、热量、冷量等
质量分离剂	溶剂、吸收液、吸附剂、交换树脂、表面活性剂、酸、碱、化学反应物、过滤介质、助滤剂、膜、微生物等

能量分离剂,不管是机械能、热能还是冷能,大都是电能、光能或燃料能量的转化形式。这些能量真正被用于分离过程的往往只有其中的一部分,即有效利用部分。如蒸发过程中使溶剂吸热气化所需的能量;沉降过程中加速颗粒或使颗粒具有一定的初始位能所需的能量。这部分能量与总能耗之比为能量的有效利用率,反映了过程或设备的性能之一。其余的能量被耗在热冷泄漏、加热设备、摩擦损失(包括机械摩擦和流体摩擦损失)、加速辅助材料的运动(如离心机)等方面,有的甚至浪费在破坏作用上,如磨损等。但有些能量可以考虑回收,如溶剂蒸气的热能(可用来预热物料或采用多效蒸发)、流体流动的能量(如旋流器出口流的能量)、物料的余热等。有些能量有时是难于回收的,如机械运动件的动能。有时反而还需能量停止机件的运动。

质量分离剂,有时其使用可减少能量分离剂的用量,如助滤剂。但质量分离剂的使用除消耗材料(物质、能量)外,还可能产生污染。这个污染包括对产品的污染和对环境的污染两个方面。

对产品的污染:①污染产品,但不影响产品的质量,如洗矿等;②质量分离剂经过分离过程后,与产品不在同一物流内,如生物制品生产过程中通过助滤剂提取滤液;③质量分离剂与产品在同一物流内,经过进一步分离可以将分离剂与产品分离,如萃取过程中蒸发回收溶剂;④有时由于污染性,不能用质量分离剂,如产品是过滤上游物,如麸酸颗粒的过滤、纳米材料的过滤脱水等。

对环境的污染:有些质量分离剂不构成对产品的污染,但其排放会对环境产生污染,如吸附剂、表面活性剂、过滤啤酒用的助滤剂、电场、磁场、微波等。

1.2 分离过程的分类

分离过程的分类方法有多种,主要有:

- ① 扩散式分离与非扩散式分离过程,传质分离与机械分离;
- ② 平衡分离过程与速率控制分离过程;
- ③ 能量分离剂过程与质量分离剂过程;
- ④ 相平衡分离、速度差分离与反应分离过程;
- ⑤ 相变分离与非相变分离过程;
- ⑥ 按分离过程的功能要求分,有提取、净化(澄清、提纯或精制)、浓缩、干燥、洗涤、分级等;
- ⑦ 按分离过程的程度或精度分,有粗分离(如压榨、筛分、旋流分离等)、细分离(如重力沉降、细过滤)、和精分离(如精过滤、离心分离、蒸发、蒸馏、膜分离等)三个级别。对于非均相混合物的分离,除了根据分离的程度或精度外,这种分类法还包含有颗粒大小的区别在内。颗粒越小,分离的级别越细。

当然,这只是一个粗略的指导性分类。因为对于同一种分离技术,不同的型号、不同的应用场合往往有不同的分离精度。但一般情况下,如蒸发、蒸馏等要比重力沉降、过滤等分离精度高;膜分离一般要比过滤的精度高。这里只是提出一种概念,以利于为具体的分离任务选择技术上和经济上都可行的分离方法。

将分离过程分为扩散式分离和非扩散式分离过程或传质分离(如表 1-2)和机械分离(如

表 1-2 传质分离过程的种类

	名称	进料	分离剂	产品	分离原理	实例
应用能量分离剂的普通平衡过程	蒸发	液体	热量	液体, 蒸气	挥发度(蒸气压)	果汁浓缩 ^[2,3]
	闪急膨胀	液体	减压(能量)	液体, 蒸气	挥发度(蒸气压)	闪蒸法淡化海水 ⁴
	精馏	液体和或气体	热量	液体, 蒸气	挥发度(蒸气压)	
	结晶	液体	冷却或加热蒸发	液体, 固体	凝固点或溶解度	见图 1-6, 1-7
	固体干燥	湿固体	热量	干固体, 湿气体	挥发度	食品脱水 ^[5]
	冷冻干燥	冷冻的含水固体	热量	干固体, 水蒸气	升华点	食品脱水 ^[5]
	凝华	蒸气	冷量	固体, 蒸气	凝华点	苯酐的精制 ^[2]
	双温度交换反应	流体	热量和冷量	两种流体	在两个不同温度下的反应平衡常数	氢和氖的分离 ⁶
	区域熔融	固体	热量	组成不同的固体	凝固点或溶解度	金属的超提纯 ⁷
应用质量分离剂的普通平衡过程	气提	液体	不凝性气体	液体, 蒸气	挥发度	从原油馏分中除去轻烃 ^{1,2}
	吸收	气体	不挥发性液体	液体, 蒸气	溶解度	用乙醇胺类吸收以除去天然气中的 CO ₂ 和 H ₂ S ^{1,2,8}
	萃取	液体	不互溶液体	两种液体	溶解度	
	浸取	固体	溶剂	液体, 固体	溶解度	从烧结矿石中沥取 CaSO ₄ ²
	沉淀	液体	化学反应物	液体, 固体	生成不溶性沉淀	石灰-苏打水的处理 ⁹
	吸附	气体或液体	固体吸附剂	液体, 固体	吸附势	用固体干燥剂干燥气体 ²
	离子交换	液体	固体树脂	液体, 固体树脂	质量作用定律用于适当的阴离子或阳离子	水的软化 ^[2]
	离子排斥	液体	吸附性固体离子交换树脂	液体, 固体树脂	阻止与树脂电荷相同的物质吸附	核酸的分离 ^[10]
	纸上色层分离	液体	毛细作用; 纸或凝胶相	湿纸的若干区域	选择性溶解度和两相中的吸附势	蛋白质的分离 ^[11]
	配位比率色层分离	液体	固定的配位基体	液体, 配位支承固体	与配位基体的可逆化学反应	酶的分选 ^[12,13]
	气泡分馏, 泡沫分馏	液体	空气泡(有时还加表面活性剂)	两种液体	在气液界面上积聚的趋势	清除洗衣废水中的洗涤剂; 矿石浮选 ^[14,15]

	名称	进料	分离剂	产品	分离原理	实例
强加梯度的平衡过程	等电位聚焦	液体	电场;pH值	几种液体	等电点(pH值)	蛋白质的分离 ^[16,17]
	等容超速离心分离	液体	离心力;密度梯度	几种液体	压力扩散	生物物质的分离 ^[18]
使用几种分离剂的平衡过程	萃取蒸馏和恒沸蒸馏	液体和或气体	液体和热量	液体, 蒸气	挥发度	回收丁二烯 ^[21]
	包合	液体	包合分子和冷量	液体, 固体	选择性地进入晶体结构中	用于海水淡化的水合过程
	加合结晶	液体	加合物和冷量	液体, 固体	选择性地进入晶体结构中	二甲苯异构体的分离 ^[19]
速率控制过程	气体扩散	气体	压力梯度	几种气体	Knudsen 速率或通过多孔隔离层的扩散速率	从天然 UF ₆ 中浓缩 U ²³⁵ F ₆
	分离扩散	气体	可凝蒸气	几种气体	对于错流蒸气吹扫运动的扩散系数	同位素的分离; 从甲烷中分离氮气等
	热扩散	气体或液体	温度梯度	几种气体或液体	热扩散速率	同位素分离 ^[20]
	质谱分离	气体	磁场	几种气体	单位质量的电荷量	同位素分离 ^[21,22]
	渗析	液体	选择性膜; 溶剂	几种液体	通过膜时的扩散传递速率	制造人造丝时回收 NaOH; 人工肾
	电渗析	液体	阴离子和阳离子膜; 电场	几种液体	阴离子膜只通过阴离子的趋势	微咸水淡化 ^[2]
	气体渗透	气体	选择性膜; 压力梯度	几种气体	溶解度和通过膜的传递速率	利用钯隔离层精制氢气 ^[23]
	电泳	含胶体的液体	电场	几种液体	胶体粒子的迁移率	蛋白质分离 ^[24]
	电解加反应	液体	电能	几种液体	离子在电极处的放电速率	浓缩水中的 H ₂ O
	沉降式超速离心机	液体	离心力	两种液体	压力扩散	按分子量分离大聚合分子 ^[25]
	反渗透	液体溶液	压力梯度+膜	两种液体溶液	物质在膜中的溶解度和扩散速率	海水淡化
	超滤	含大分子或胶体的液体溶液	压力梯度+膜	几种液体	通过膜(孔为分子大小)的渗透速率	废水处理; 蛋白质浓缩; 人工肾
	分子蒸馏	液体混合物	热量+真空	液体加蒸气	动力学理论上的最大气化速率	维生素 A 的酯类和中间体的分离 ^[2]
	凝胶过滤	液体	固体凝胶(例如交键合成血液)	凝胶相+液体	分子大小和透入膨胀凝胶的能力	药物精制; 蛋白质分离 ^[26]
	液膜	液体	溶剂液体薄膜	几种液体	透过液体薄膜的渗透速率	废水处理 ^[27,28]
喷嘴扩散	气体	压力梯度	几种气体	从喷嘴发出的射流中向外的传递速率	铀同位素的分离	

表 1-3) 过程两大类是目前最为普遍的分类方法。但这种分法有个问题, 有时机械分离过程中含有传质分离, 而传质分离如膜分离可看作是过滤(一种机械分离)的延伸。因此, 这种分类法是根据分离过程中物质扩散过程的强弱来分的。传质分离是以物质的扩散传递为主的分离过程, 而机械分离是不以扩散传递为主的分离过程。传质分离涉及物质从进料流向产品流的扩散传递, 而机械分离则主要是完成相的分离。

一般认为, 传质分离过程处理的是均相混合物, 机械分离过程处理的是非均相混合物。但是, 有时非均相混合物要用传质分离过程来处理, 如固体物料的干燥。

表 1-3 机械分离过程的种类

名称	进 料	分离剂	产 品	分离原理	实 例
沉降	固/液	重力;离心力	固,液	密度差	悬浮液的澄清
	液/液		液,液		油水分离
	气/液		气,液		原油脱气
	固/气		固,气		除尘,催化剂细粉的回收 ^[2,29]
	液/气		液,气		捕沫
	固/固		固,固	密度差;粒度差;形状差	小麦与麸皮的分离;灰粒的等密度面分离 ^[31]
过滤	固/气	过滤介质 + 正压,真空或离心力	固,气	固体颗粒粒度差引起的截留性差异	袋式除尘
	液/气		液,气		捕沫
	固/液		固,液		泥浆状催化剂回收 ^[2]
	液/液	由亲油或亲水材料制成的过滤介质 + 正压或真空	液,液	吸附性引起的截留性差异	含水油脱水
静电沉积	气体 + 固体尘粒	电场	气体, 固体尘粒	带电性	烟道气除尘 ^[2]
磁力分离	固体粉末混合物	磁场	两种固体	磁性	铁矿石的富集 ^[2,32]

实践中常使用不互溶的两个相的界面上的平衡关系来对气体或者液体的均相混合物进行分离。例如蒸馏过程就是利用加热所产生的蒸气与冷凝器冷凝所形成的液相两者之间的气液平衡关系, 使易挥发组分集于气相, 难挥发组分集于液相, 从而使均相混合物作为塔顶的馏出组分和塔底的釜残组分而分离。像这种通过输入能量, 使原混合物体系形成新的相, 并利用相间平衡关系进行分离的过程称为平衡分离过程。表 1-4 所列是具有代表性的平衡分离操作。

表 1-4 以从第一相移向第二相为主的平衡分离操作示例

第二相 \ 第一相	第一相			
	气 相	SCF 相	液 相	固 相
气 相	×	×	气提 蒸发 蒸馏	脱吸 升华 (冷冻干燥)
SCF 相	×	×	SCF 萃取	SCF 萃取
液 相	吸收 蒸馏	SCF 吸收	萃取	固体萃取 区域熔融 (zone melting)
固 相	吸附 凝华	SCF 吸附	结晶 吸附	×

注: SCF——超临界流体。