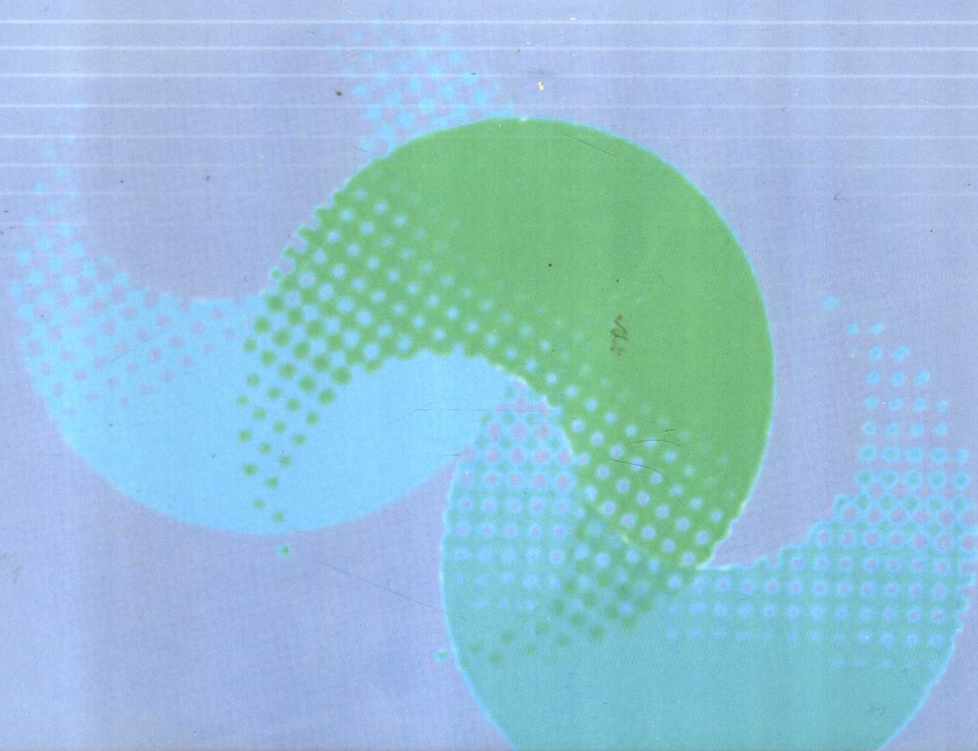


高等农业院校教材

现代食品分离技术

张海德 主编

XIANDAISHIPINFENLIJISHU



中国农业大学出版社

高等农业院校教材

现代食品分离技术

张海德 主编

中国农业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代食品分离技术/张海德主编. —北京:中国农业大学出版社,2007.6

ISBN 978-7-81117-222-5

I. 现… II. 张… III. 分离法(化学)-应用-食品工业 IV. TS201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 073733 号

书 名 现代食品分离技术

作 者 张海德 主编

策划编辑 潘晓丽 司建新

责任编辑 冯雪梅

封面设计 郑 川

责任校对 陈 莹 王晓凤

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路2号

邮政编码 100094

电 话 发行部 010-62731190,2620

读者服务部 010-62732336

编辑部 010-62732617,2618

出 版 部 010-62733440

网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup>

e-mail cbsszs @ cau.edu.cn

经 销 新华书店

印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司

版 次 2007年6月第1版 2007年6月第1次印刷

规 格 787×1 092 16开本 23印张 569千字

印 数 1~1 300

定 价 39.00元

图书如有质量问题本社发行部负责调换

前 言

尽管新兴产业不断涌现,食品工业仍然是世界制造业中的第一大产业。食品资源的深度开发和高效利用是维系 21 世纪经济与社会可持续发展的中心命题之一,世界各国都把农产品加工和食品工业作为关系到国计民生的战略大事来抓。深入研究食品资源的特性,食品原料的安全性评价,贮藏加工过程中有害因子的形成与转化规律,食品检测与安全控制技术等是现代食品工程学科领域的主要任务,而现代食品分离技术能促进食品工业的发展,并在这些研究领域起着举足轻重的作用。

自然界是一个混合物的世界。食品的原辅料也是多种成分组成的混合物,生产中也要按人们的需要,对食品原辅料进行取舍、产品分级、中间产物分离等,进行这种处理的过程,就是食品分离过程。食品分离技术与食品重组技术相对应,是现代食品工业的重要内容之一。食品工业需要分离技术,没有分离过程,我们不可能在市场上见到如此多种多样的食品。在食品工业中,从混合物中分离出一个组分或多个组分,需要经过许多单元操作过程,食品分离所涉及的内容包含从大的颗粒物质到小分子物质的所有范围,涉及到有机化合物和无机化合物,涉及到有生命的物质和没有生命的物质。

随着食品工业的发展,化工单元操作不断向食品工业渗透并在食品加工领域内实践和提高,形成了适应食品加工特殊要求的新型分离技术。现代食品分离技术是以化工分离技术为基础和依托,根据化学分离过程的原理与方法,开发符合食品卫生与营养要求的新型分离技术。

本教材的特色在于以教学为宗旨,精选食品工业中有重要地位的现代分离技术,强化了理论基础、过程与设备及应用等内容。知识点突出,知识面较广,反映了近 10 多年来食品分离技术的进展和相关技术的前沿知识。

本书共分 12 章,分别介绍了膜分离技术、毛细管电泳分离技术、分子蒸馏分离技术、亲和层析分离技术、结晶分离技术、离子交换分离技术、双水相萃取技术、超临界流体萃取技术、超声波辅助萃取技术、微波辅助萃取技术等,还介绍了各种分离方法的集成化过程与进展。另外,各章还附有思考题供学生复习巩固所学内容用。本书还附了 2 个实验,供教师参考。

本书可供从事食品科学、生物化工、制药及农产品贮藏加工等专业的高等学校教师、学生、科研机关及生产工厂的科技工作者、工程技术人员学习参考。

本书由张海德任主编,钟秋平、张宁、何金兰任副主编,参加编写的有:华南热带农业大学张海德(第一、三、四、六章),钟秋平(第二章),李国胜、杨劲松(第五、九章),何继芹(第八章),何金兰(第十章),杨劲松(第十二章),暨南大学张宁(第十一章),海南大学刘石生(第七章)。全书由华南理工大学张水华教授主审。

本书的编写和出版,得到了海南省重点学科及华南热带农业大学重点学科建设经费的资助,得到了中国农业出版社编辑部工作人员的热情关怀和帮助。在此致以衷心的感谢!

由于编者的水平所限,书中难免有错漏不当之处,敬请同行专家、读者批评指正。

编 者

2006 年 12 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 食品工业中的分离技术	(2)
第二节 食品分离过程的特点及选择原则	(12)
第三节 食品分离技术的重要性及其进展	(15)
参考文献	(19)
思考题	(20)
第二章 膜分离技术	(21)
第一节 概述	(21)
第二节 反渗透分离技术	(30)
第三节 超滤分离技术	(48)
第四节 液膜分离技术	(58)
第五节 电渗析分离技术	(67)
第六节 膜分离技术在食品工业中的应用前景及展望	(81)
参考文献	(82)
思考题	(83)
第三章 毛细管电泳分离技术	(84)
第一节 概述	(84)
第二节 毛细管电泳基本原理	(85)
第三节 毛细管电泳装置	(94)
第四节 毛细管电泳技术的应用研究进展	(98)
参考文献	(102)
思考题	(104)
第四章 分子蒸馏分离技术	(105)
第一节 概述	(105)
第二节 分子蒸馏的原理	(106)
第三节 分子蒸馏过程与设备	(113)
第四节 分子蒸馏技术在食品工业中的应用	(123)
第五节 分子蒸馏理论研究展望	(128)
参考文献	(129)
思考题	(131)
第五章 亲和层析分离技术	(132)
第一节 亲和层析概述	(132)
第二节 亲和层析基本原理及理论基础	(132)
第三节 亲和层析的操作过程	(138)

第四节 亲和层析的应用	(147)
参考文献	(150)
思考题	(151)
第六章 结晶分离技术	(152)
第一节 概述	(152)
第二节 结晶分离技术基本原理	(153)
第三节 工业结晶器	(169)
第四节 结晶分离技术进展	(176)
参考文献	(180)
思考题	(182)
第七章 离子交换分离技术	(183)
第一节 概述	(183)
第二节 离子交换剂	(184)
第三节 离子交换原理	(193)
第四节 离子交换过程与设备	(197)
第五节 在食品工业中的应用	(205)
第六节 展望	(208)
参考文献	(209)
思考题	(210)
第八章 双水相萃取技术	(211)
第一节 概述	(211)
第二节 双水相分配原理及其理论基础	(215)
第三节 双水相萃取操作及设备	(223)
第四节 双水相萃取技术在生物、食品工业中的应用	(229)
第五节 双水相萃取分离技术的发展方向	(230)
参考文献	(232)
思考题	(234)
第九章 超临界流体萃取技术	(235)
第一节 概述	(235)
第二节 超临界流体萃取技术原理	(238)
第三节 超临界 CO ₂ 流体萃取的工艺流程及设备	(250)
第四节 超临界 CO ₂ 流体技术在食品工业中的应用	(264)
第五节 超临界流体技术的展望	(268)
参考文献	(269)
思考题	(270)
第十章 超声波辅助萃取技术	(272)
第一节 概述	(272)
第二节 超声波辅助萃取技术的原理及特点	(275)
第三节 超声波辅助萃取工艺及设备	(278)

第四节 超声波辅助萃取技术在食品工业中的应用.....	(286)
第五节 超声波辅助萃取技术的应用前景.....	(290)
参考文献.....	(299)
思考题.....	(302)
第十一章 微波辅助萃取.....	(303)
第一节 概述.....	(303)
第二节 微波辅助萃取的基本原理.....	(303)
第三节 微波辅助萃取的工艺及设备.....	(305)
第四节 微波辅助萃取技术在食品工业中的应用.....	(310)
第五节 微波萃取分离技术展望.....	(314)
参考文献.....	(314)
思考题.....	(316)
第十二章 食品分离单元的集成技术.....	(317)
第一节 概述.....	(317)
第二节 食品分离技术的集成过程.....	(324)
第三节 食品分离过程集成的工艺.....	(334)
第四节 食品分离集成过程的应用.....	(342)
参考文献.....	(347)
思考题.....	(349)
附录 实验部分.....	(350)
实验一 双水相萃取法分离木瓜蛋白酶.....	(350)
实验二 亲和层析分离技术的应用实验.....	(351)
名词英汉对照和缩写.....	(354)

第一章 绪 论

尽管新兴产业不断涌现,食品工业仍然是世界制造业中的第一大产业。食品工业对国民经济发展的贡献重大,目前,从世界发达国家经济发展情况看,法国食品工业对国民生产总值的贡献是汽车产业的2倍;日本食品工业是日本主要产业之一,并且处于世界领先地位;美国的食品工业是各制造业中规模最大的行业,美国的加工食品市场占有率居世界之首。食品资源的深度开发和高效利用是维系21世纪经济与社会可持续发展的中心命题之一,世界各国都把农产品加工和食品工业作为关系到国计民生的战略大事来抓。

随着经济的发展,人民生活水平的提高,社会对农业的需求,由单纯对粮食的需求转变为对粮食、蔬菜、水果和肉、蛋、奶的多种需求,由单纯对原粮的需求转变为对经过精细加工的食品的需求,居民的消费需求以及市场的产品结构、规模和档次等都发生了深刻变化,人们不仅要吃饱,更要吃好,吃得营养,吃得健康、安全。这种消费结构与需求的变化,必然要求食品工业的产出结构也发生相应的变化,要求食品加工制成品的多样化和精细化,要求食品生产技术不断改进和发展。

我国农产品结构性过剩问题已经存在很久,食物质量和安全问题日趋突出,产后加工体系落后,法规法制不健全,危及我国农业的可持续发展和13多亿人口的食物安全与保障。因此,深入研究食品资源的特性,食品原料的安全性评价,贮藏加工过程中有害因子的形成与转化规律,食品检测与安全控制技术等是现代食品工程学科领域的主要任务,而现代食品分离技术能促进食品工业的发展,并在这些研究领域起着举足轻重的作用。

食品为什么要分离?

分离过程近年来得到了快速发展,新型分离技术不断被开发出来,分离过程的应用领域也在不断拓宽,从石油化工到生物、环境、医药工业、食品、能源等领域,分离技术都在发挥重要的作用。

自然界是一个混合物的世界。食品的原辅料也是多种成分组成的混合物,生产中也要按人们的需要,对食品原辅料进行取舍,进行这种处理的过程,就是食品分离过程。食品分离技术与食品重组技术相对应,是现代食品工业的重要内容之一。食品工业需要分离技术,没有分离过程,我们不可能在市场上见到如此多种多样的食品。在食品工业中,从混合物中分离出一个组分或多个组分,需要经过许多单元操作过程,食品分离所涉及的内容包含从大的颗粒物质到小分子物质的所有范围,涉及到有机化合物和无机化合物,涉及到有生命的物质和没有生命的物质。分离的目的是在于排除某种特殊的组分,获得较高纯度的某组分,以便提升产品的价值。产品可能是分离过程的残留物,也可能是提取物,也可能是两者。所有的分离操作要依靠于物质中各组分的物理或化学性质的差异来进行,一些常见的有助于分离的性质是物质颗粒或分子大小、形状、密度、溶解性和电荷特征等。食品分离,通常来说,是因为要达到下列两个目的:

1. 获得需要的产品

食品是种特殊的商品,它的使用价值就是给人们提供生长发育维持正常的新陈代谢所必

需的营养和能量,直接关系到人类的生存与发展。它的获得,也必须要经过一定的技术处理和分离过程。原因如下:一是从大田收获的农作物,往往含有泥沙、碎石、铁屑、编织物等非食用物质,把农作物制作成食品的过程中,需要对它们进行分离。二是随着人们生活水平的提高及现代生活节奏的加快,人们的生活习惯的改变,人们消费结构的升级要求食品生产要创造多层次、多样化的产品类型,比如饮用纯净水代替煮白开水,饮用无醇啤酒等,这些产品的开发需要现代食品分离技术。

2. 食品安全性的要求

在食品生产过程中,有许多不安全的因素。一是在农产品生产过程中,农药对保护农作物、防治病虫害和提高农作物的产量发挥了巨大作用,我国是农药生产和使用大国,农药使用量居世界第一,产量居世界第二。但在农业上作用农药后残留在生物体、食品和环境中的微量农药原体、有毒代谢产物、降解物和杂质会对环境和人体产生负面作用。二是工业“三废”也会对农作物生长的土壤、水及大气造成污染,有害物质进而在农牧渔林副产品中富集,并通过食物链而进入人体,危害人体健康。三是天然食品中因其在生长过程中次生代谢也会产生多种微量的有毒成分。上面提到的这些有害化学物会通过改变生物体内的生物化学过程甚至导致器官性病变而导致对机体的损伤。为了排除食品中含有的可能损害或威胁人体健康的有害物质,不产生危及消费者及其后代健康的隐患,在食品生产、加工过程中有必要采用现代分离技术,把食品中的有害组分分离出去,确保食品安全可靠。

第一节 食品工业中的分离技术

食品工业的生产实践是现代食品分离技术形成和发展的源泉,新型分离技术的出现又促进了食品工业的发展。

一、分离的概念

P. Fann 在《分离科学》中写到“分离是逆着大自然的”。根据宇宙大爆炸理论,这大千宇宙原只像芥子般一点。在大爆炸之前的宇宙已超出了我们的想象,暂且不论,在大爆炸之后,宇宙不断地膨胀,它的熵不断地增加,混乱度不断增加,自然界在无序地扩张,正是热力学第二定律(熵的原理),揭示了事物走向无序状态的自然倾向。

在自然界,系统和环境之间可以发生能量和物质的传递,据此,可将自然界的热力学系统分为 3 类:

- ①敞开系统:系统与环境之间既有能量传递,也有物质传递;
- ②封闭系统:系统与环境之间只有能量传递,没有物质传递;
- ③孤立系统(或称为隔离系统):系统与环境之间无能量、也没有物质传递。

自然界作为一个孤立系统,也是一个熵增过程,熵增过程是可自发进行的。一个孤立的系统,或一个在均匀环境里的系统,它的熵在增加,并且或快或慢地接近于最大值的熵的惰性状态。现在我们认识到,这个物理学的基本定律正是事物接近混乱状态的自然倾向。

(一)熵(dS)的概念

熵是一个状态函数,其值只决定于系统的状态,像温度、压力等一样,只与系统的状态有

关,而与系统的过程无关。Clausius 根据可逆过程的热温商值决定于始、终态而与可逆过程无关这一事实,定义了“熵”(entropy)这个函数,用符号“ S ”表示,单位为:J/K,它的定义式可表示为式[1-1]。

$$dS = \frac{\delta Q_r}{T} \quad [1-1]$$

式中, δQ_r ——系统在温度为 T 时的微小可逆过程中,系统吸收或放出的无限小量的热。若系统从状态 A 变到状态 B ,设其熵分别为 S_A 和 S_B ,则有式[1-2]。

$$S_B - S_A = \Delta S = \int_A^B \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_r \quad [1-2]$$

热与温度的比值称为热温商,即熵的变化值可用可逆过程的热温商值来衡量,可逆过程中熵的变化等于热温商的线积分式[1-2]。注意:这里 Q 不是状态函数,只能用 δQ 来表示其无限小量,不能写成微分 dQ 。

在温度处于绝对零度时(约为 -273.15°C),任何一种物体的熵等于零。当你以缓慢的、可逆的、微小的变化使物体进入另一种状态时,熵增加的总数是这样计算的:在那个步骤中你必须供给的每一小部分热量,除以供给热量时的绝对温度,然后把所有这些求得的商数加起来。

(二)克劳修斯(Clausius)不等式

热力学第二定律的数学表达式即克劳修斯不等式[1-3]。

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad [1-3]$$

式中,对不可逆过程采用“ $>$ ”不等号, T 指环境温度;对可逆过程采用“ $=$ ”等号, T 为系统温度。Clausius 不等式引进的不等号,在热力学上可以作为变化方向与限度的判据。Clausius 不等式可如式[1-4]所示。

$$dS - \delta Q/T \geq 0 \quad [1-4]$$

对于绝热过程, $Q=0$,由式[1-4]得到式[1-5]

$$dS \geq 0 \quad [1-5]$$

上式中,“ $>$ ”为不可逆过程,“ $=$ ”为可逆过程。

在隔离体系(孤立系统)的条件下,系统为绝热过程,其 $Q=0$,由式[1-4]得到式[1-6]。

$$dS_{\text{iso}} \geq 0 \quad [1-6]$$

上式中,“ $>$ ”号为自发过程,“ $=$ ”号为处于平衡状态。所以,隔离体系中一旦发生一个不可逆过程,则一定是自发过程。 $\Delta S > 0$ 时,不需要环境做功来推动过程的进行;如果要 $\Delta S < 0$,就需要环境做功来推动过程的进行,所以,在孤立系统条件下,任何过程自发进行的方向都是熵值增大($\Delta S > 0$)的方向。

有时把与体系密切相关的环境也包括在一起,用来判断过程的自发性,即:

$$\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S(\text{体系}) + \Delta S(\text{环境}) \geq 0 \quad [1-7]$$

式中，“>”号为自发过程，“=”号为可逆过程。

从系统观点看，熵为宏观系统内大量微观粒子混乱度（即无序程度）的量度。混乱度越大，系统的熵增越大。自发过程是系统从有序趋向无序的过程。

熵它所表示的无序，一部分是那种热运动的无序，另一部分是存在于随机混合的、不是清楚地分开的各种原子或分子中间的无序。例如，糖溶在水中，糖在水中逐渐地“分散”就增加了无序，从而增加了熵，这个过程可以自发进行。但要把糖从水中结晶出来，使糖分子在水中的无序状态变成结晶的有序的晶体状态，就必须要有某种外力作用下，才能达到这个目的。

(三)分离的概念

分离就是把具有不同性质的物质分开，这种不同的性质包括物理的、化学的及物理化学的性质。分离过程是一个从无序到有序的过程，是一个熵减过程，即 $\Delta S = S_2 - S_1 < 0$ ，需要环境做功来推动过程的进行。这个环境做功，主要就是靠分离剂（物质和能量）来实现。分离过程的功能包括提取、澄清或净化、浓缩、干燥和回收等，其目的就是提纯、去杂。分离的过程也是一个物质和能量的平衡的过程，与化学平衡的反应相似，它需要解决的问题是：

①在指定的外界条件下，某一分离过程是否能够进行？若能进行而达平衡时，目标物的纯度或最高产率究竟有多大？前者属过程的方向性问题，后者就是过程的最大可能限度的问题。

②如果在给定条件下，某个过程根本不能发生或者可能发生的方向适得其反，那么能否通过调节外界条件如压力、浓度、化学电位等因素使过程朝着既定的方向进行呢？对能按指定方向进行的过程，改变压力、浓度、化学电位等因素对过程限度又有什么影响呢？实践证明，这两大问题的解决无疑对如何选择新的分离技术、提高产量等工艺设计、技术革新提供了科学根据，从而减少盲目性，达到增产节约的目的。

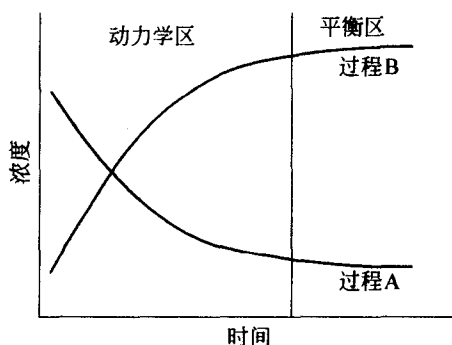
化学动力学和化学热力学都是物理化学两大重要分支学科，它们各有不同的研究内容。化学热力学的任务是讨论化学过程中能量转化的衡算，以及解决在一定条件下进行某一化学反应的方向和限度问题，它讨论体系的平衡性质，不考虑时间因素和过程细节。而化学动力学研究完成化学反应过程所需时间、影响条件以及实现这一过程的具体步骤（机理）。

对于过程的方向性，是热力学解决的问题，热力学能提供数据预示过程的自发方向并计算过程的最大平衡产量，但其最终答案仅仅指出：“有可能如此”，可能发生但未必真能付诸实现，因为，其中还有个速度问题。可见，热力学无法预示过程速度的快慢以及过程的历程，化学热力学只回答化学过程的可能性问题；而化学动力学才回答化学过程的现实性问题。

一般的化学反应过程包括动力学区和平衡区两个区间。动力学区间是反应体系趋向平衡的一个动态的区间，平衡区间是反应步骤已达到平衡的稳态区间。测定一个分离过程，也可同样地把过程分为动力学区和平衡区，如图 1-1 所示。对于一个分离过程，通过测定平衡区的量，可以反映分离过程的程度，但有时候测定其平衡区产物的量，可能无法定量地测定产物，这时，可采用动力学方法来评价此分离过程，通过测定过程的动力学数据来反映分离过程的有效性。

分离过程要实现，最基本的需要了解分离的基本原理、方法及其分离对象。

①分离过程的基本原则：分离过程的基本原则如图 1-2 所示。物质要分离，一般遵循下列



过程 A:代表分离去杂质过程过程 B:代表萃取浓缩等富集过程

图 1-1 分离过程中杂质(A)或产物(B)的浓度随时间的变化

原则:物质要通过分离设备,在分离剂(物质及能量)作用下,才能得到产物和残留物或者截留物和透过物。

对于混合物体系的分离,是一个熵减过程,外界必须对体系做功,而这种外界做功通常是以加入分离剂的形式来实现的。分离剂是分离过程的推动力或辅助物质,它包括能量分离剂和质量分离剂。能量分离剂包括机械能(重力、压力和离心力等)、热能、冷能、电能、磁能及超声波等;质量分离剂包括溶剂、吸附剂、表面活性剂、酸、碱、化学反应物、过滤介质、助滤剂和膜等。

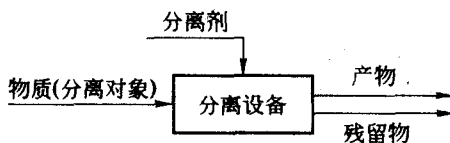


图 1-2 分离过程的基本原则

②分离方法:为达到把混合物中的物质分离的目的,通常采用的方法有物理方法、化学方法及物理化学方法。

③分离对象:食品分离的对象非常广泛,视生产的需要,食品生产过程中的原料、废弃物、中间产物、产物等,都可作为分离的对象。

二、分离技术的分类

随着社会的发展和技术的进步,工业上的分离技术的形式越来越多,但从本质上来说,所有的分离技术都可分为机械分离和传质分离两大类。

(一)机械分离

机械分离过程的分离对象是由两相或两相以上所组成的混合物,其目的是简单地将各相加以分离,过程中间不涉及传质过程。例如:过滤、沉降、离心分离、旋风分离和静电除尘等。常见的食品物理机械分离过程如表 1-1 所示。机械分离过程中有许多操作已经成为食品工程的单元操作,具体内容可参见《食品工程原理》,本书不作过多讨论。

表 1-1 食品的物理机械分离过程

机械分离名称	分离因子	分离原理	举 例
沉降	重力	密度差	水处理
离心	离心力	密度差	油精制、牛乳脱脂
旋风分离	惯性流动力	密度差	喷雾干燥
过滤	过滤介质	粒子大小	除菌、喷雾干燥/果汁澄清、颗粒分离
压榨	机械力	压力下液体流动	油脂生产

(二)传质分离

食品的传质分离过程是指在分离过程中,有物质传递过程的发生。传质分离的原料,可以是均相体系,也可以是非均相体系,在多数情况下是均相体系,第二相是由于分离剂的加入而产生的。传质分离的特点是相间有质量传递现象发生,按照所依据的物理化学原理不同,传质分离又可分为两大类:平衡分离过程和速率控制分离过程。在平衡分离过程中,相平衡是个重要的概念,系统与热力学平衡状态的差距是平衡分离过程的推动力。速率控制分离过程为不可逆过程,一般发生在均相状态下并存在物流量,可用耗散函数来表达其推动力,而耗散函数是不可逆热力学与平衡热力学的联结点,所以,速率控制分离过程的基础也是平衡热力学。分离过程中导致混合物分离的推动力是各种动力学梯度,例如:压力梯度、浓度梯度、温度梯度以及电位梯度等。这些动力学梯度引起物质分子传递速率产生差异,而完成物质的分离过程。

1. 平衡分离过程

平衡分离过程为借助分离媒介(如热能、溶剂、吸附剂等)使均相混合物系统变为两相系统,再以混合物中各组分在处于相平衡的两相中不等同的分配为依据而实现分离。

分离媒介可以是能量媒介或物质媒介,有时也可以两种同时应用。根据两相状态不同,平衡分离过程可分为如下几类,其分离单元名称如表 1-2 所示。

表 1-2 平衡分离过程的分离单元操作

名称	原料相态	分离因子	分离原理	工业应用举例
蒸发	液体	热量	蒸汽压差	液体浓缩
蒸馏	液体	热量	蒸汽压差	芳香物质回收
结晶	液体	冷却或蒸发	利用过饱和度/熔点	糖精制、冻结产品
干燥	含湿的固体	热量、气体	水分蒸发	食品脱水
冷冻干燥	液体	热量、减压	冻结/升华	食品干燥
萃取	固体、液体	萃取剂	溶解度不同	脂肪萃取、天然产物萃取
浸提	固体	溶剂	溶解度	油提取、蔗糖抽提
吸附	液体、气体	固体吸附剂	吸附势	油脂脱色、水分吸附
离子交换	液体	固体树脂	离子亲和力/质量作用	乳清脱盐、水的软化

气液传质过程:如吸收、气体的增湿和减湿等。

汽液传质过程:如液体的蒸馏和精馏。

液液传质过程:如萃取。

液固传质过程:如结晶、浸取、吸附、离子交换、色层分离、参数泵分离等。

气固传质过程:如固体干燥、吸附等。

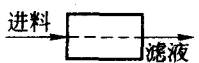
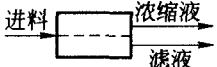
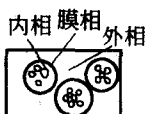
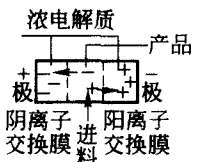
2. 速率控制分离过程

速率控制分离过程是指借助某种推动力,如浓度差、压力差、温度差、电位差等的作用,某些情况下在选择性透过膜的配合下,利用各组分扩散速度的差异而实现混合物的分离操作。这类过程的特点是所处理的物料和产品通常属于同一相态,仅仅是在组成上存在差异。速率控制分离过程可分为膜分离和场分离两大类。

(1)膜分离:膜分离是利用液体中各组分对膜的渗透速率的差别而实现组分分离的单元操作。膜可以是固态或液态,所处理的流体可以是气体或液体,过程的推动力可以是压力差、浓度差或电位差。

膜的分离机理并非一种简单的筛分,它有许多因素在起作用,例如:膜材料,分子形状,溶质、溶剂分子与膜的吸引和排斥,水和溶液对膜的优先吸附,一些特殊物质的负分离等等。膜分离一般指的是对溶液中不同溶质的分离,每一种溶质是由不同的分子构成的,因此,膜分离是一种分子级的分离。常用的膜分离过程有超滤、反渗透、电渗析、液膜、纳膜等分离过程,如表 1-3 所示。

表 1-3 食品工业上的膜分离过程基本特征表

过程	简图	分离目的	推动力	透过组分	截留组分	传递机理	膜类型	原料物态
微滤		溶液(气体)脱离子	压力差 100 kPa	溶液、 气体	0.02~ 10 μm 的粒子	筛分	均相膜	液体、 气体
超滤		溶液脱小 分子、大分 子溶液脱 小分子、大 分子分级	压力差 0.1~ 1.0 MPa	小分子 溶液	1~20 nm 的 大分子 溶质	筛分、 选择性 渗透	非对称 膜	液体
反渗透		溶剂脱溶 质、含小分 子溶质溶 液浓缩	压力差 1.0~ 10 MPa	溶剂、 水	0.1~ 1 nm 小 分子溶 质、盐	优先吸 附、毛 细管流 动溶解 扩散	非对称 膜或复 合膜	液体
乳化 液膜		溶液(气 体)混合 物分离、 富集、特 殊组分 脱除	浓 度 差、化 学反应	在液膜 中有高 溶解度 或能反 应的 组分	在液膜 中难溶 解组分	主动运 输传递 和溶解 扩散 传递	液膜	液体、 气体
电渗 析		溶液脱小 离子、小离 子溶质的 浓缩、分级	电化学 势、电 渗透	小离子 组分	同名离 子、大 离子 和水	反离子 经离子 交换膜 的迁移	离子交 换膜	液体

(2)场分离:场分离是利用电磁场、重力场、温度场等物理场作为推动力,对物质进行分离

的过程。

场分离包括电泳、热扩散、磁或静电分离、高压电场分离、高梯度磁力分离等。

热扩散也属场分离的一种,以温度梯度为推动力,在均匀的气体或液体混合物中出现分子量较小的分子(或离子)向热端漂移的现象,建立起浓度梯度,以达到组分分离的目的。该技术用于分离同位素、高黏度的润滑油,并预计在精细化工和药物生产中可得到应用。

速率控制分离过程在食品工业中占有重要的地位,食品工业中常用的速率控制分离技术如表 1-4 所示。

表 1-4 食品工业中的速率控制分离过程

名称	原料相态	分离因子	分离原理	举 例
反渗透	液体	压力/膜	膜渗透性	果汁浓缩、海水淡化
超滤	液体	压力/膜	膜渗透性	乳清粉生产、牛奶浓缩
液膜	液体、气体	浓度/膜	膜渗透与化学反应	污水处理、生化反应
电渗析	液体	电场/膜	电位差	氨基酸脱盐、葡萄糖精制
电泳	液体	电场力	带电离子扩散迁移	氨基酸、核酸、酶分离
色谱分离	气体、液体	固相载体	吸附浓度差	难分离物质的分离
分子蒸馏	液体	气体扩散	分子扩散	甘油单酯分离、从油中分离维生素 A、维生素 E

传质分离过程的能量消耗,常常是构成单位产品成本的主要因素之一,因此降低传质分离过程的能耗,受到全球性普遍重视。膜分离和场分离是一类新型的分离操作,由于其具有节约能耗,不破坏物料,不污染产品 and 环境等突出优点,在稀溶液、生化产品及其他热敏性物料分离方面,有着广阔的应用前景。

(三)其他物理场辅助分离技术

近年来,在食品分离技术领域新技术的应用越来越多,其中,在外加力场作用下,对食品原料进行有效物质的提取分离技术值得重视。例如,超声波萃取技术、微波萃取技术等。

1. 超声波萃取

超声波萃取是基于超声波的特殊物理性质。高于 20 kHz 声波频率的超声波在连续介质中传播时,根据惠更斯波动原理,在其传播的波阵面上将引起介质质点的运动,使介质质点运动获得巨大的加速度和动能。质点的加速度经计算一般可达重力加速度的二千倍以上。由于介质质点将超声波能量作用于物质成分质点上而使之获得巨大的加速度和动能,迅速逸出原料基体而游离于水中。其次,超声波在液体介质中传播产生特殊的“空化效应”,“空化效应”不断产生无数内部压力达到上千个大气压的微气穴并不断“爆破”产生微观上的强大冲击波作用在原料基体上,使其中的目标成分物质被“轰击”逸出,并使得原料基体被不断剥蚀,其中不属于植物结构的目标成分不断被分离出来。超声波萃取装置可分为萃取罐和超声波信号发生器二部分。超声波萃取具有如下突出特点。

①无需高温,不破坏食品原料中某些具有热不稳定,易水解或氧化特性的成分,超声波能促使植物细胞破壁,提高提取率;

②萃取充分,萃取量是传统工艺的 2 倍以上;

③萃取效率高,超声波强化萃取 20~40 min 即可获得最佳提取率,萃取时间仅为水煮、醇

沉方法的 1/3 或更少;

- ④具有广谱性,适用于绝大多数种类的原料提取;
- ⑤超声波具有一定的杀菌作用,保证萃取液不易变质;
- ⑥操作简单易行,设备维护、保养方便。

超声波萃取技术作为一项发展中的技术,在超声强化过程研究、超声频率跟踪技术、多频耦合超声提取技术、超声与超临界耦合技术以及相关工艺工程化研究及放大等方面还有待进一步研究。

2. 微波辅助萃取

微波萃取技术是食品和中药有效成分提取的一项新技术。世界上微波技术应用于有机化合物萃取的第一篇文章发表于 1986 年,国外有专家发现将样品放置于普通家用微波炉里只需短短的几分钟就可萃取传统加热需要几个小时甚至十几个小时的目标物质。通过十几年来的努力和发展,微波萃取技术现已应用到香料、调味品、天然色素、中草药、化妆品和土壤分析等领域。

微波萃取是高频电磁波穿透萃取媒质,到达被萃取物料的内部维管束和腺胞系统,微波能迅速转化为热能使细胞内部温度快速上升,当细胞内部压力超过细胞壁承受能力,细胞破裂,细胞内有效成分自由流出,在较低的温度下溶解于萃取媒质再通过进一步过滤和分离,便获得萃取物料。在微波辐射作用下,微波所产生的电磁场加速被萃取部分成分向萃取溶剂界面扩散速率,从而使萃取速率提高数倍,同时还降低了萃取温度,最大限度地保证萃取的质量。

传统热萃取是以热传导、热辐射等方式由外向里进行,而微波萃取是微波瞬间穿透物料,通过偶极子旋转、摩擦里外同时加热进行萃取。与传统热萃取相比,微波萃取的主要优点是:质量高,可有效地保护食品、药品以及其他化工物料中的功能成分;纯度高,萃取率高;对萃取物具有高选择性;速度快,省时,可节省 50%~90% 以上的时间;溶剂用量少,污染少,属于绿色工程;低耗能;生产设备较简单,节省投资。

用于微波萃取的设备大致分两类:一类为微波萃取罐,另一类为连续微波萃取线。两者主要区别一个是分批处理物料,类似多功能提取罐;另一个是以连续方式工作的萃取设备。具体参数一般由生产厂家根据用户要求设计。使用的微波频率有两种:2450 MHz、915 MHz。

3. 超声微波协同萃取

在样品制备过程中,微波能和超声波振动能在萃取方面已得到了极为广泛的应用。在美国环保局(USEPA)等一些标准方法中,这两种技术已成为样品前处理的重要手段。然而,现有微波和超声波处理技术方法也存在着一些不足之处:对超声波萃取而言,目前实验室广泛使用的超声波萃取仪是将超声波换能器产生的超声波通过介质(通常是水)传递并作用于样品,这是一种间接的作用方式,声振效率较低,必须通过增加超声波发生器功率(>300 W)来提高萃取效率。然而,较大超声波功率会发出令人感觉不适的噪声。

对于微波辅助萃取而言,也同样存在一些不足之外:

①当样品处理在密闭式萃取罐中进行时,高温高压条件对制作样品罐材料(如聚四氟乙烯)的强度、耐热性、耐腐蚀性及其密封性的要求很高,而且还需要高强度的聚砜外罐保护。溶剂易于外泄,难于清洗(聚四氟乙烯的孔隙会产生记忆效应),提取效率受溶剂特性(如极性)的影响较大,样品处理量小,分析成本高(高压罐的老化及损坏)。此外,高温高压条件可能造成样品中某些有机组分结构的改变或破坏,而且在取出提取液之前还需要较长的冷却降压时间,

这在一定程度上间接地抵消了其提取速度快、效率高的优点；

②当微波提取在低温常压条件下的开放式萃取釜中进行时，尽管可从一定程度上克服高压密闭式微波提取的不足，样品用量也可大大增加，但受到微波穿透能力的限制，使样品萃取不均匀，萃取效率下降，萃取时间增加。目前，尽管有报道将开放式微波处理技术与机械搅拌相结合的方法，试图克服常规开放式微波处理之不足，但效率仍较低且不易操作。将直接超声振动与开放式微波两种作用方式相结合，充分利用了超声波振动的空化作用(同时具有萃取和机械搅拌作用)以及微波的高能作用。

超声-微波协同萃取技术采用微波功率和辐照时间连续可调，超声振动、微波加热方式和程度可任意组合和设定的方法，以取得最大的协同效率。根据不同样品处理目的和方式，选择不同溶剂或溶剂组合优化样品或有机组分的萃取条件，取得最优效果。超声-微波协同萃取克服了超声波萃取和微波萃取方法之不足，保留了超声波萃取或微波萃取方法的优点，如振动匀化使样品介质内各点受到的作用一致、可供选择的萃取溶剂种类多、目标萃取物范围广泛、降低目标物与样品基体的结合力，加速目标物从固相进入溶剂相的过程、处理样品量大等优点。

(四)传质设备

应用于平衡分离过程的设备，其功能是提供两相密切接触的条件，进行相际传质，从而达到组分分离的目的。性能优良的传质设备，一般应满足以下要求：

- ①单位体积中，两相的接触面积应尽可能大，两相分布均匀，避免或抑制短路及返混；
- ②流体的通量大，单位设备体积的处理量大；
- ③流动阻力小，运转时动力消耗低；
- ④操作弹性大，对物料的适应性强；
- ⑤结构简单，造价低廉，操作调节方便，运行可靠安全。

传质设备种类繁多，而且不断有新型设备问世，可按照不同方法进行分类。

按所处理物系的状态可分为：气(汽)液传质设备(用于蒸馏及吸收等)，液液传质设备(用于萃取等)，气固传质设备(用于干燥、吸附)，液固传质设备(用于吸附、浸取、离子交换等)。

按两相的接触方式可分为：分级接触设备(如各种板式塔，多级流化床吸附等)和微分接触设备(如填料塔、膜式塔、喷淋塔、移动床吸附柱等)。在分级接触设备中，两相组成呈阶梯式变化；而在微分接触设备中，两相组成沿设备高度连续变化。

此外，对于气固和液固传质设备，还可按固体的运动状态分为固定床、移动床、流化床和搅拌槽等。其中流化床传质设备采用流态化技术，将固体颗粒悬浮在流体中，使两相均匀接触，以实现强化传质的目的。传质设备在石油、化工、轻工、冶金、食品、医药、环保等工业部门的整个生产设备中占很大比例。因此，合理选择设备，完善设备设计，优化设备操作，对于节省投资，减少能耗，降低成本，提高经济效益，有着十分重要的意义。

三、食品分离技术与分离科学的关系

食品分离技术指各种分离技术在食品科学与食品工程中的应用，它依据某些理化原理将食品物料中的不同组分进行分离，是食品加工中的一个主要操作过程，是食品工业单元操作的深化和归属。