



无锡轻工业学院 合编
天津轻工业学院

食品工程原理

下册

轻工业出版社

食品工程原理

(下册)

无锡轻工业学院
天津轻工业学院^{合编}

轻工业出版社

内 容 简 介

《食品工程原理》一书分上、下两册，共十二章，比较完整而系统地论述了食品工业生产中各单元操作的基本原理和应用。

本书为下册，共五章，内容有：蒸发、结晶、冷冻浓缩、吸附、浸出、离子交换、膜分离、空气调节、物料干燥、吸收、蒸馏、液-液萃取。

本书可供从事食品、发酵、粮食加工、油脂、制糖及其他农产品加工工业的生产、科研、设计人员及有关院校师生参考。

食品工程原理

(下册)

无锡轻工业学院 合编
天津轻工业学院

轻工业出版社出版
(北京广安门外南滨河路25号)
轻工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

787×1092毫米 1/32 印张：19²⁰/32 字数：435千字

1985年12月 第一版第一次印刷

1987年2月第一版 第二次印刷

印数：14,801—39,800 定价：4.30元

统一书号：15042·1951

编者的话

本书原是无锡轻工业学院和天津轻工业学院两校合作编写、经食品专业教材编审委员会审定的食品专业基础课《食品工程原理》的试用教材。由于编者编写本书就国内来说还是第一次，且以往初稿的教学尝试遍数也不很多，故决定改为教学参考书出版。本书除作教学参考外，也可供从事食品生产、科学研究、工程设计人员参考。

全书除绪论外，共分十二章，分上、下两册出版，上册为绪论及一至七章，下册为八至十二章及附录。参加编写人员的执笔分工是：沈学源（第四章）；高福成（绪论，第一章，第三章第二、三节，第五章，第八章，第九章，第十章以及各章习题）；孙淑玉（第十一章，第十二章第二节）；孙燕平（第二章，第三章第一节）；刘澈（第六章，第十二章第四节）；刘佩茹（第十二章第一、三节）；李彦邦（第七章）；于秋生（附录）。

全书由高福成同志主编。

本书审稿人有：南京化工学院时钧教授、天津大学张远谋教授、福州大学陈肖柏教授、无锡轻工业学院刘树楷副教授。由时钧、张远谋两教授主审。

本书的编写工作是在无锡轻工业学院、天津轻工业学院两校组织下进行的。组织编审过程中，得到轻工业部食品工业局、轻工业部食品发酵科学研究所、上海市食品工业公司、南京化工学院、天津大学、福州大学、上海轻工业专科学校、上海市食品工业研究所、上海轻工业设计院、内蒙古

轻工业科学研究所、上海益民食品一厂、上海益民食品四厂、上海梅林罐头食品厂、上海前卫机械厂及其他有关单位的支持和帮助。谨此表示衷心感谢。

沈学源教授除亲自执笔写第四章之外，在提出和制定本书的编写方案中，起了极其有益的指导作用。在此也表示衷心感谢。

由于编者水平有限，缺点错误肯定难免，恳请读者批评指正。

编 者

一九八〇年八月

目 录

第八章 蒸发、结晶、冷冻浓缩	(1)
概述.....	(1)
第一节 蒸发.....	(2)
一、蒸发的基本概念.....	(3)
二、蒸发器类型及其选择.....	(6)
三、单效真空蒸发.....	(24)
四、多效蒸发.....	(41)
五、蒸汽再压缩蒸发.....	(56)
第二节 结晶.....	(70)
一、结晶的基本原理.....	(70)
二、结晶方法与设备.....	(83)
三、结晶操作的基本计算.....	(96)
第三节 冷冻浓缩.....	(111)
一、冷冻浓缩的理论和方法.....	(112)
二、冷冻浓缩装置系统.....	(120)
本章练习题.....	(129)
本章符号说明.....	(132)
第九章 吸附、浸出、离子交换	(136)
概述.....	(136)
第一节 液体吸附.....	(137)
一、吸附基本概念与吸附剂.....	(137)
二、吸附理论.....	(140)
三、吸附操作方式和装置系统.....	(147)

第二节 浸出	(159)
一、浸出理论	(160)
二、浸出装置	(172)
三、浸出操作的计算	(178)
第三节 离子交换	(189)
一、离子交换基本概念与离子交换树脂	(190)
二、离子交换理论	(196)
三、离子交换操作与设备	(208)
四、离子交换操作的计算	(219)
本章练习题	(226)
本章符号说明	(228)
第十章 膜分离	(231)
概述	(231)
第一节 超滤和反渗透	(232)
一、膜渗过程的原理和方法	(232)
二、超滤和反渗透的操作原理	(237)
三、超滤膜与反渗透膜	(246)
四、膜渗分离系统及其应用	(252)
第二节 电渗析	(259)
一、电渗析的基本原理和基本概念	(259)
二、电渗析的装置系统和电渗析器	(266)
本章练习题	(277)
本章符号说明	(279)
第十一章 空气调节、物料干燥	(281)
概述	(281)
第一节 湿空气的热力学基础	(282)
一、湿空气的性质	(282)

二、湿空气的基本状态变化过程.....	(295)
第二节 空气调节.....	(304)
一、空气调节系统及其原理.....	(304)
二、空气调节系统设备的计算.....	(314)
第三节 热风干燥、接触干燥、辐射干燥.....	(317)
一、有关湿物料的基本概念.....	(319)
二、干燥理论.....	(326)
三、干燥过程.....	(342)
四、干燥设备.....	(358)
第四节 喷雾干燥.....	(395)
一、雾化器和雾化理论.....	(397)
二、喷雾干燥室和液滴在干燥室中的干燥.....	(420)
三、喷雾干燥装置系统.....	(427)
四、喷雾干燥器计算示例.....	(435)
第五节 冷冻干燥.....	(438)
一、冷冻干燥的理论基础.....	(440)
二、冷冻干燥的装置系统.....	(451)
本章练习题.....	(463)
本章符号说明.....	(468)
第十二章 吸收、蒸馏、液—液萃取.....	(472)
概述.....	(472)
第一节 物质传递原理.....	(473)
一、单相中的扩散.....	(473)
二、相际间的传质.....	(479)
三、自由界面相际传质理论.....	(483)
第二节 吸收和脱吸.....	(491)
一、吸收的基本概念和理论.....	(492)

二、吸收设备和装置系统.....	(499)
第三节 蒸馏和精馏.....	(505)
一、蒸馏的基本概念和理论.....	(506)
二、蒸馏设备和装置系统.....	(523)
三、双组份连续精馏塔的计算.....	(534)
第四节 液-液萃取	(554)
一、液-液萃取的基本概念和理论	(555)
二、液-液萃取设备流程	(560)
三、液-液萃取操作的计算	(565)
本章练习题.....	(568)
本章符号说明.....	(571)
附录.....	(574)
一、单位换算.....	(574)
二、物理常数.....	(582)
三、物理性质数据.....	(584)
四、型号、规格、规范.....	(598)
五、设计参考资料.....	(609)

第八章 蒸发、结晶、冷冻浓缩

概 述

浓缩是从溶液中除去部分溶剂的单元操作，是溶质和溶剂均匀混合液的部分分离过程。浓缩和干燥的意义不同。浓缩过程中，水分在物料内部是借对流扩散作用从液相内部达液相表面而后除去，最低水分含量约30%(质量)，一般为稳定状态的过程。而干燥过程中，水分在物料内部最终必将借分子扩散作用从固相中除去，且一般为不稳定状态的过程。

浓缩方法从原理上说分平衡浓缩和非平衡浓缩两种物理方法。平衡浓缩是利用两相在分配上的某种差异而获得溶质和溶剂分离的方法。蒸发浓缩和冷冻浓缩即属此法。其中，蒸发是利用溶剂和溶质挥发度的差异，从而获得一个有利的汽液平衡条件，达到分离的目的。在实践上是利用加入热能使部分溶剂汽化，并将此汽化水分从余下的被浓缩溶液中分离出去。这种方法目前仍然是食品工业最广泛应用的一种浓缩方法。冷冻浓缩与蒸发浓缩不同，它是利用稀溶液与固态冰在凝固点下的平衡关系，即利用有利的液固平衡条件。冷冻浓缩时，部分水分因放热而结冰，而后用机械方法将浓缩液与冰晶分离。蒸发和冷冻浓缩，两相都是直接接触的，故称平衡浓缩。非平衡浓缩则不同，它是利用半透膜来分离溶质与溶剂的过程，两相用膜隔开，因此分离不是靠两相的直接接触，故称非平衡浓缩。利用半透膜的方法不仅可以分离溶质和溶剂，而且也可用以分离各种不同大小的溶质，因此

统称为膜（渗）分离。膜分离拟放在第十章中讨论。

结晶是使溶质呈结晶状从溶液中析出的单元操作，也是溶质和溶剂均匀混合物的部分分离过程。结晶操作与冷冻浓缩操作虽然都是利用固-液平衡条件的操作，但它们的不同点不只是在于分离的目的，而且在于它们的操作原理及其前提条件。在一定的条件下，实现的是溶质从溶液中析出，而在另一条件下实现的则是溶剂从溶液中成冰晶析出。

浓缩和结晶操作在食品工业中有着广泛的应用，是食品工程上极其重要的单元操作。这些操作的原理都涉及到溶液的热力学问题。本章为了理论上的连贯性，拟将冷冻浓缩放在结晶之后讨论。

第一节 蒸 发

蒸发目前仍是食品工业上应用最广泛的浓缩方法。食品工业浓缩的物料大多数为水溶液。在以后讨论中，如不另加说明，蒸发就指水溶液的蒸发。食品浓缩的物料，有的直接用原液，如牛奶、血液等，有些是榨出汁如水果、蔬菜、甘蔗的榨出汁，也有用萃取液如咖啡、茶、肉、甜菜等。

食品浓缩的目的是：

（1）除去食品中大量水分，减少包装、贮藏和运输费用。例如100吨含5%固形物的番茄榨出汁浓缩至含固形物28%的番茄酱，重量将减至18吨，为原重量的1/5左右，体积缩小大致与此相同。这样可大大降低包装、贮藏和运输的费用。

（2）提高制品浓度，增加制品的保藏性。用浓缩方法提高制品的糖分或盐分可使水分的活度降低。使制品达到微生物学上安全的程度，延长制品的有效保藏期。例如，将含

盐的肉类萃取液浓缩到不致产生细菌性的腐败。

(3) 浓缩经常用作干燥或更完全的脱水的预处理过程。这种情况特别适用于原液含大量水分，而用浓缩法排除这部分水分比用干燥法更为节约之时，如制造奶粉时，牛奶先经预浓缩至含固形物45~52%以后再进行干燥。

(4) 浓缩用作某些结晶操作的预处理过程。

一、蒸发的基本概念

(一) 蒸发的概念

当溶液中溶质的挥发性甚小，而溶剂具有明显挥发性时，工业上常用加热方法，使溶剂汽化达到使溶质增浓的目的，这就是蒸发操作。

按照分子运动学观点，溶液受热时，溶剂分子获得了动能，当某些溶剂分子的能量足以克服分子间的吸引力时，溶剂分子就会逸出液面进入上部空间，成为蒸汽分子，这就是汽化。如果不设法除去这些蒸汽分子，则汽相与液相之间，水分的化学势将渐趋平衡，汽化过程也相应逐渐减弱以至停止进行。故进行蒸发的必要条件就是热能的不断供给和生成的蒸汽的不断排除。

一般说来，溶液在任何温度下都会有水分的汽化。但这种汽化速度很慢，效率不高，所以工程上多采用在沸腾状态下的汽化过程。通常说的蒸发就是指的这种过程。为了维持溶液在沸腾条件下汽化，需要不断地供给热量，通常多采用饱和水蒸气为热源。饱和蒸汽在冷凝过程中放出的汽化潜热提供蒸发所需的热量。由此可见，从换热角度看，蒸发器中进行的蒸发一方是水蒸气的冷凝放热，另一方是溶液的沸腾放热。

蒸发可以在常压、真空或加压下进行。在食品工业上，大多采用真空蒸发。常压蒸发采用开放式设备，真空或加压蒸发采用密闭设备。

蒸发过程汽化所产生的水蒸气叫做二次蒸汽，以区别作为热源的生蒸汽。蒸发操作中，将二次蒸汽直接冷凝不再利用者，称为单效蒸发。如将二次蒸汽引入另一蒸发器作为热源进行串联蒸发操作，称为多效蒸发。对于单效或多效蒸发，最后一效的二次蒸汽通常用冷却水冷凝的方法来排除，所以冷凝器是蒸发设备的重要组成部分。

(二) 食品物料蒸发浓缩的特点

料液的性质对蒸发有很大影响。特别是食品多属生物系统的物料，比一般化工上遇到的物料更为复杂多变。在选择和设计蒸发器时，要充分认识这种影响。食品物料的蒸发浓缩具有如下几方面特点。

1. 热敏性 生物系统的物料多由蛋白质、脂肪、糖类、维生素以及其它许多色、香、味成分所组成。这些物质在高温下或长期受热时要受到破坏、变性、氧化等作用。所以许多食品的蒸发要严格考虑加热温度和加热时间。加热温度和加热时间是不可分割的。食品蒸发的安全性与此二因素同时相关。这就是“温时结合”的概念，即把温度与时间作为统一体来考虑。从食品蒸发的安全性看，力求“低温短时”，但还要考虑工艺上的经济性。在保证食品质量的前提下，为提高生产能力，常采用“高温短时”蒸发。由于料液的沸点与外压有关，低温相应就是低压，所以真空蒸发是食品工业蒸发应用的显著特点之一。为了缩短蒸发操作时的加热时间，一方面必须减小料液在蒸发器内的平均停留时间，另一方面还要解决局部性的停留时间问题。关于这一点，目前已发现

长管膜式蒸发器和搅拌膜式蒸发器在物料的停留时间问题上具有很大的优点，从而在食品工业上获得广泛的应用。

2. 腐蚀性 特别是酸性食品如果汁、蔬菜汁的浓缩，设计蒸发器时必须考虑腐蚀性问题。设计蒸发器和其它辅助设备时，必须选用适当的结构材料。对于食品，即使是轻度的腐蚀，其所引起的污染往往为产品规格所不允许。一般蒸发器接触液体部分多采用不锈钢结构，除非需要昂贵的材料才能满足要求时，通常设计成强制循环式以节约材料的用量。

3. 粘稠性 许多食品含有丰富的蛋白质、糖分、果胶等成分，其粘稠性较高。高粘性物料的蒸发，首先从流体动力学观点看，有一个层流倾向问题。即使物料受到强烈搅拌，在传热壁附近总存在不能忽视的层流内层，这就会严重影响传热的速率。同时，由于上述原因，也还会产生诸如结垢，局部停留时间等一系列问题。料液的粘稠性随浓度而增加，随着蒸发的进行，料液粘度也必然逐渐增加，所以蒸发过程中的传热速率预期也会逐渐降低。对于粘性制品的蒸发，一般采用由外力强制的循环或搅拌措施。

4. 结垢性 蛋白质、糖和果胶等受热过度会产生变性、结块、焦化等现象。通常在传热面附近，物料温度最高。发生这种现象就会在传热壁上形成污垢，严重影响传热速率。解决结垢问题的积极措施是提高液速。经验证明，在其他条件相同时，提高液速，可显著减轻污垢的形成，这是由于高液速的洗刷作用所致。因此在可能发生严重结垢现象的情况下，采用强制循环法是有效的。另外，对不可避免的结垢问题，必须有定期的严格清理措施。

5. 泡沫性 某些食品物料沸腾时要形成稳定的泡沫，特别是在真空蒸发和液层静压高的场合下更是如此。泡沫的

形成与界面张力有关。界面张力发生在蒸汽、过热液体和悬浮固体之间，固体在形成汽泡时起着核心的作用。一般，可使用表面活性剂以控制泡沫的形成。也可用各种机械装置以消灭泡沫。

6. 易挥发成分 不少液体食品含有芳香成分和风味成分，其挥发性比水大。料液蒸发时，这些成分将随同蒸汽一起逸出，影响浓缩制品的质量。低温浓缩虽然可减少香味成分的损失，但更完善的方法是采取回收措施，回收后再掺入制品中。

二、蒸发器类型及其选择

蒸发操作是古老的技术，但在低温、低压下蒸发的科学技术却到本世纪才发展起来，而且随着工业的发展和需要而逐步改进，近年来出现一些新型高效设备。

蒸发器主要由加热室(器)和分离室(器)两部分组成。加热室的作用是利用水蒸气为热源来加热被浓缩的料液。加热室的型式随着技术的改进而不断发展。最初采用的是夹套式和蛇管式，其后有卧式短管加热室和竖式短管加热室。为了强化传热过程，采用强制循环代替自然循环，也有采用带叶片的刮板薄膜蒸发器等。蒸发器分离室的作用是将二次蒸汽中夹带的雾沫分离出来。二次蒸汽之所以夹带雾沫，是因液体沸腾时，汽泡到达液面破裂后，产生许多小雾滴所造成。为使这些雾滴下落回到液体中，分离室须具有足够大的直径和高度以降低蒸汽流速，并有充分机会使其返回液体中。分离室的型式，最初是将其置于加热室之上并与后者并成一体。其后，出现了外加热型加热室(加热器)，分离室也就独立成为分离器。

以下简单介绍几种食品工业上常用的典型蒸发器。

(一) 标准式蒸发器及其变型

图8-1所示为标准式蒸发器。蒸发器由上、下两部分构成，下部为加热室，上部为分离室。加热室是由沸腾管、中央循环管与上、下管板所组成的加热管束。壳内的管外空间为蒸汽室，蒸汽在此进行冷凝。中央循环管是一根直径远大于沸腾管直径的粗管，其截面积不小于总加热管束截面积的35~40%。因此，一定量溶液在中央管内所占有的传热面积就相应较之在沸腾管中者为小，就产生溶液由中央管下降，而由沸腾管上升的不断循环，因而它是一种自然循环型蒸发器。这种蒸发器管子长度为0.5~2m，管径范围为25~75mm，管子的长径比约为20~40，故称为短管型蒸发器。使用短管除结构原因外，适于处理易结垢物料，因短管便于消除污垢。这种蒸发器管内料液流速约为0.3~1.0m/s。

蒸发器上部为分离室。分离室的圆筒体上有视镜、人孔、洗涤装置和照明装置等。筒体高度一般不小于1.8~2.5m，可保证液滴不被带出。分离器顶部有捕沫器，用以分离雾沫，保证二次蒸汽洁净，有利于下一效蒸发器的加热。分离器顶部连接二次蒸汽排出管。

标准式蒸发器的缺点是在增强循环方面有一定限制，因而沸腾液一侧的传热膜系数也受到限制。另外不便清洗和更换管子。

为了克服上述缺点，使之更适用于易结垢的物料，出现了标准式的一种变型，即所谓悬筐式蒸发器，见图8-2。为了从中取出加热室，只要把顶盖拿下，把管道拆除，从顶部把它抽出即可。这种设备的另一优点是改善了循环条件。液体回流是通过壳体与加热室间的环形间隙来进行，环形间隙

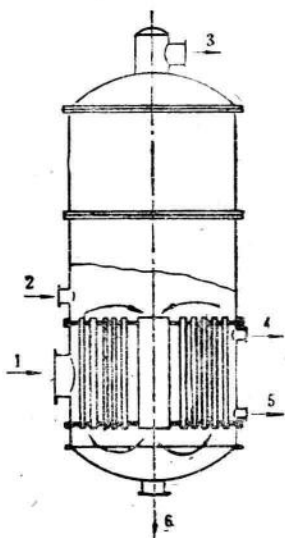


图 8-1 标准式蒸发器

1—加热蒸汽入口；2—进料口；3—二次蒸汽出口；4—不凝气出口；5—冷凝水出口；6—浓缩液出口

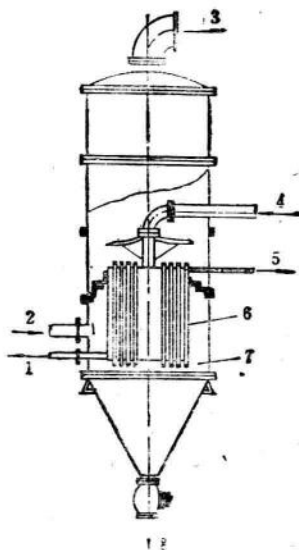


图 8-2 悬筐式蒸发器

1—冷凝水出口；2—进料口；3—二次蒸汽出口；4—加热蒸汽入口；5—不凝气出口；6—悬筐；7—循环环隙；8—浓缩液出口

的截面较易达到所要求的大小。

上述设备适用于中等粘度、轻度结垢的非腐蚀性料液，并且可以得到较好的蒸发速率。在食品工业上的典型应用例有果汁、麦芽浸出液、蔗糖、葡萄糖等溶液的浓缩。

(二) 加热室在外的蒸发器(自然循环型和强制循环型)

加热室在外的蒸发器是现代蒸发器发展的一个特点。图 8-3 和图 8-4 所示者即属此类。这类蒸发器是由加热器、分离器和循环管三部分组成。从多方面看，把加热室和分离室分开有不少优点。首先，可以改变两者之间的距离，并调节