



普通高等教育“十二五”部委级规划教材

食品工程原理

SHIPIN GONGCHENG YUANLI

赵黎明 黄阿根 主编



中国纺织出版社

普通高等教育“十二五”部委级规划教材

食品工程原理

赵黎明 黄阿根 主编



中国纺织出版社

内 容 提 要

本书重点介绍了食品工程的基本概念、原理及其应用。全书共分十一章,以“三传理论”为主线,简明扼要地介绍了能量衡算和物料平衡、热力学、食品流动、非均相分离、传质和传热等的基本概念、工程原理和应用。书中弱化了基本公式的推导,增加了大量数学模型和经验公式的应用,并通过工程案例来分析、讲解,特别强调了工程原理在食品工业过程中的应用,把握基础,侧重应用,易学易懂。

本书可作为普通高等学校食品及相关专业本科生教材及研究生的参考书,也可作为各类食品从业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理 / 赵黎明, 黄阿根主编. — 北京 :
中国纺织出版社, 2013. 9

普通高等教育“十二五”部委级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5064 - 9850 - 0

I. 食… II. ①赵… ②黄… III. ①食品工程学—
高等学校—教材 IV. ①TS201. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 137908 号

责任编辑:彭振雪 责任设计:品欣排版 责任印制:何艳

中国纺织出版社出版发行

地址:北京朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码:100124

邮购电话:010—67004461 传真:010—87155801

<http://www.c-textilep.com>

E-mail:faxing@c-textilep.com

三河市华丰印刷厂印刷 各地新华书店经销

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

开本:710×1000 1/16 印张:30

字数:468 千字 定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

本书编委会成员

主 编 赵黎明 黄阿根

副主编 孙兰萍 杜传来

参 编(按姓氏笔画排序)

朱定和 孙兰萍 杜传来

花旭斌 吴恩奇 赵大庆

赵黎明 徐环昕 黄阿根

廖彩虎

目 录

绪论	1
第一章 物料衡算和能量衡算	9
第一节 概述	9
第二节 质量平衡和物料衡算	9
一、质量守恒定律	9
二、过程流程图	10
三、总质量平衡	11
四、组分质量衡算	13
五、开放系统的质量守恒	14
六、封闭系统的质量守恒	15
第三节 能量衡算	16
一、热力学	16
二、总能量	17
三、显热与潜热	17
四、热量和焓	17
五、比热	18
六、食物冻结过程中的焓变	20
七、能量衡算	24
习题	26
第二章 流体流动和输送	27
第一节 流体静力学基本方程	27
一、流体的物理性质	27
二、牛顿黏性定律及牛顿型流体与非牛顿型流体	29
三、静力学基本方程式及其应用	32
第二节 流体流动的基本方程	34
一、流量与流速	34
二、稳定流动热力体系的概念	37
三、稳定流动体系的物料衡算——连续性方程	38

绪 论

一、课程概述

食品工程 (Food engineering) 涵盖了所有的典型工程原理, 包括热力学 (Thermodynamic)、流体力学 (Hydrodynamic)、传热 (Heat transfer) 和传质 (Mass transfer), 同时也与物理化学、生物过程和材料科学密切相关。了解并掌握食品加工过程中存在的各类工程原理和方法对于食品工业的成长以及食品科学的教学是极其重要的。食品工程原理 (Principle of food engineering) 是一门以力学、热力学、动力学、传热和传质为理论基础的课程, 是化工单元操作和化工原理在食品工业的具体应用。该课程主要阐述食品加工过程中各加工单元系统的相互关系, 如质量平衡和能量平衡关系, 以及影响这些相互关系的因素。

食品工程原理是在化工原理基础上提炼和发展出来的一个具体领域, 二者有相同的理论基础和相似的单元操作, 如干燥、过滤、蒸发、精馏、萃取、搅拌和吸收等主要单元操作完全一致。由于食品原料和化学原料不同, 且食品加工有食品安全、卫生等特殊的学科要求, 因此像制冷低温原理、真空技术原理、均质乳化、粉碎筛分等在食品加工中应用较多, 而在化学工程中则少见甚至完全没有。食品工程原理强调食品材料加工过程中的品质保护问题, 更加强调低温技术、冷冻干燥技术。在食品工程原理课程中始终贯穿着各种技术原理与食品色、香、味的关系问题。

食品工程原理还含有食品机械设计制造、选型配套以及维修操作等基础, 是保证食品工艺准确实施的必备知识, 是食品工程专业的主干课程。将先进的工业技术应用于食品加工业, 使食品工业从以手工操作为主发展到以机械操作为主。各道工艺从零散发展到连续化、自动化或半自动化。随着生物技术与电子信息技术的发展, 一些生物技术和光电技术在食品工程中的应用不断出现。食品工程原理强调工程观点、定量运算、实验技能和设计能力的训练, 要求做到理论与实际的结合, 以提高分析、解决实际工程问题的能力。

国外有关这方面的教科书和参考书较多, 如 *Food Engineering Operations*、*Elements of Food Engineering*、*Food Process Engineering*、*Fundamentals of Food Engineering*、*Process Engineering in the Food Industries*、*Unit Operations in Food Processing* 等。本书取名为“食品工程原理”, 以基本原理的应用、基本原理在食品工业中的

应用案例介绍为主要内容。全书减少了与《化工原理》重复的基本理论和理论推导内容,增加了数学模型和经验公式和工程案例分析比重,侧重于基本单元操作的应用。

食物由于物理、化学、酶或微生物的作用而产生变化,了解整个化学变化中的动力学非常必要。本课程要求在学习食品工程原理之前首先应学习数学、化学和物理这些基础课程。

二、三传理论

不同食品的生产过程使用各种物理加工过程,根据操作原理可归结为多个应用广泛的基本操作过程,如流体输送、搅拌、沉降、过滤、热交换、制冷、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、粉碎、乳化萃取、吸附、干燥等。这些基本的物理过程称为单元操作(Unit operation)。这些单元操作均为物理性操作,只改变物料的状态或其物理性质,不改变其化学性质。将若干个单元操作串联起来可组成一个工艺过程。同一食品加工过程中一般包含多个不同的单元操作。同一单元操作在不同的生产过程应用时,其基本原理相同,相关设备也可以通用。

所有的单元操作按其基本原理可以分为三大类:①流体流动过程(Fluid flow process),以动量传递为基础,包括流体输送、搅拌、沉降、过滤等;②传热过程(Heat transfer process),包括热交换、蒸发等;③传质过程(Mass transfer process),包括吸收、蒸馏、萃取、吸附、干燥等。以上三个过程包括了三种理论,统称为“三传理论”。

动量传递(Momentum transfer):流体流动时,其内部发生动量传递,故流体流动过程也称为动量传递过程。凡是遵循流体流动基本规律的单元操作,都可以用动量传递的理论去研究。

热量传递(Heat transfer):物体被加热或冷却的过程也称为物体的传热过程。凡是遵循传热基本规律的单元操作,均适用于热量传递的理论。

质量传递(Mass transfer):两相间物质的传递过程即为质量传递。

“三传理论”是单元操作的理论基础,单元操作是“三传理论”的具体应用。同时,“三传理论”和单元操作也是食品工程技术的理论和实践基础。表 1 中列举了奶粉加工过程中的单元操作及其对应的传递理论。

表 1 奶粉加工过程中的单元操作及对应的传递理论

名称	作用	单元操作	涉及的传递理论
冷冻盐水管道	提供冷却介质	流体输送	动量传递
自来水管道	提供流动介质	流体输送	动量传递
蒸汽管道	提供加热介质	流体输送	动量传递

续表

名称	作用	单元操作	涉及的传递理论
离心泵	输送牛奶	流体输送	动量传递
板式换热器	冷却牛奶与加热空气	传热	热量传递
配料槽	配料、混合与标准化	搅拌	动量传递
均质机	均质牛奶	均质	动量传递与质量传递
两段板式换热器	巴氏灭菌	传热	热量传递
升膜式蒸发器	浓缩牛奶	浓缩	热量传递、动量传递与质量传递
旋液分离器	分离水中的牛奶	非均相物系分离	动量传递与质量传递
喷射泵	提供负压	流体输送	动量传递
高压泵	产生较大压力	流体输送	动量传递
空气过滤器	过滤空气,使其清洁	过滤	动量传递
喷雾干燥器	干燥牛奶使其成为奶粉	干燥	热量传递、动量传递与质量传递
旋风分离器	分离空气中奶粉颗粒	非均相物系分离	动量传递与质量传递
风机	排出废气	流体输送	动量传递
筛分机	筛出大的奶粉颗粒	筛分	
流化床冷却	冷却干燥后的牛奶	传热	热量传递

学习食品工程原理课程的核心就是掌握“三传理论”,并能够使用其解决食品加工过程中的问题、设计食品加工生产线等。

三、量纲或因次

可以被观察或测量的物理实体可以用量纲(Dimension)或因次定性表征。例如,时间、长度、面积、体积、质量、力、温度和能量,都是不同的量纲。量纲定量尺度用单位表示,如长度可以用测量单位米、厘米、毫米表示。

基本量纲,像长度 $[L]$ 、时间 $[t]$ 、温度 $[\theta]$ 和质量 $[m]$,表示一个物理实体。导出量纲是基本量纲组合导出的(例如,体积是长度的立方,速度是距离除以时间)。

$$[Q] = [L]^x [m]^y [t]^z \cdots$$

式中: Q ——物理量;

$[Q]$ ——物理量 Q 的量纲;

$x, y, z, \cdots$ ——任意的有理数。

方程式中量纲必须一致,即物理方程量纲一致原则。也就是说,如果方程式中左侧的量纲是长度,那么右侧量纲也必须是长度;否则,方程式就是错误的。这是一个很好的检测方程式是否正确的方法。在解决数值问题时,把方程式中的每个单位都写准确也是非常有用的。这个方法可以有效地避免计算错误。

四、工程单位

物理量的测量会应用到大量的单位,包括英制单位,厘米-克-秒单位制(CGS制)单位,米-千克-秒单位制(MKS制)单位。然而,同时使用这些单位,会比较乱。为规范单位系统的符号和数量,1960年第十一届国际计量大会通过国际单位制(SI)。目前,SI单位制是由七个基本单位、两个辅助单位和一系列的导出单位组成的。

(一) 基本单位

SI系统是以七个独立量纲的基本单位为基础的。这七个单位是:长度单位(米,m)、质量单位(千克,kg)、时间单位(秒,s)、电流单位(安培,A)、热力学单位(开尔文,K)、物质的量(摩尔,mol)和发光强度单位(坎德拉,cd)。

(二) 导出单位

导出单位是基本单位经过乘法或者除法运算后的代数集合。简言之,导出单位通常采用特殊的名字和符号,并用来获得其他导出单位。一些常用的导出单位如:牛顿(N)、焦耳(J)、瓦特(W)、伏特(V)、欧姆(Ω)、库伦(C)、法拉(F)、亨利(H)、韦伯(Wb)、流明(lm)等。

(三) 辅助单位

辅助单位包含两种纯几何单位,既可视作基本单位,又可作为导出单位。
①平面角单位弧度(rad):两条半径所夹圆弧的长度与半径长度相等时所夹角的弧度为1弧度;
②立体角单位(球面度,sr):以球心为顶点在球的表面切割等于球半径平方的面积所对应的的立体角为1球面弧度。

(四) 单位换算

在本学科范围内,主要涉及力学、热学领域,故常用的单位是长度 m、质量 kg、时间 s、温度 $^{\circ}\text{C}$ 。目前国际上各科学领域采用的单位制虽向 SI 过渡,但要全面实施尚需经历一定时间,而且文献资料中的数据又是多种单位制并存,使用时要进行换算,所以掌握物理量在不同单位制中的换算方法,是学好食品工程原理的基础。

1. 常用物理量的单位换算

同一物理量,若单位不同其数值就不同,例如,重力加速度在 SI 中的单位为 m/s^2 ,其值为 9.81;在 CGS 制中的单位为 cm/s^2 ,其值为 981,即

$$\text{重力加速度 } g = 9.81 \text{ m/s}^2 = 981 \text{ cm/s}^2$$

上式为重力加速度在 SI 与 CGS 制中的换算关系。这里将一些常见物理量的单位换算列举如表 2 所示,希望熟记。

表2 常见物理量的单位换算

单位符号	单位名称	使用范围	单位换算
lb	磅	停用	1 lb $\approx$ 0.453 6 kg
in	英寸	停用	1 in $\approx$ 0.025 4 m
ft	英尺	停用	1 ft $\approx$ 12 in $\approx$ 0.304 8 m
yd	码	停用	1 yd $\approx$ 0.914 4 m
kgf	千克力	停用	1 kgf $\approx$ 9.81 N
dyn	达因	停用	1 dyn = 10^{-5} N
atm	标准气压	停用	1 atm = 101.325 kPa
mmHg	毫米汞柱	停用	1 mmHg $\approx$ 133.3 Pa
mmH ₂ O	毫米水柱	停用	1 mmH ₂ O $\approx$ 9.81 Pa
kgf/cm ²	千克力每平方厘米	停用	1 kgf/cm ² $\approx$ 98.1 kPa
at	工程大气压	停用	1 at = 98.1 kPa
bar, b	巴	停用	1 bar = 10^5 Pa = 100 kPa
Torr	托	停用	1 Torr $\approx$ 133.3 Pa
Pa $\cdot$ s	帕秒	导出	1 Pa $\cdot$ S = 1 kg/(m $\cdot$ s)
P	泊	停用	1 P = 0.1 Pa $\cdot$ s
cP	厘泊	停用	1 cp = 1 mPa $\cdot$ s = 10^{-3} Pa $\cdot$ s
cal	热力学卡	停用	1 cal = 4.184 J
erg	尔格	停用	1 erg = 10^{-7} J
BTU	英热单位	停用	1 BTU $\approx$ 1.055 kJ
HP	马力	停用	1 HP $\approx$ 735.5 W
W	瓦	导出	1 W = 1 J/s
	度	停用	1 度 = 1 kW $\cdot$ h
°C	摄氏度	导出	表示温度差和温度间隔时: 1 °C = 1 K
°F	华氏度	停用	表示温度数值时: 1 °F = 1.8 °C
K	开	基本	$t\text{ }^{\circ}\text{C} = T(\text{K}) - 273.15$ $t\text{ }^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32)/1.8$

【例1】 从已有资料中查出常温下苯的导热系数 λ 为 0.091 9 BTU/(ft $\cdot$ h $\cdot$ °F), 试从基本单位换算开始, 将苯的导热系数单位换算为 W/(m $\cdot$ °C)。

解: 单位换算时, 一般应先写出原单位与要换算的新单位之间的关系, 再采用单位间的换算因数与各基本单位相乘或相除的方法, 以消去原单位而引入新单位。新单位 W/(m $\cdot$ °C) 也可写为 J/(m $\cdot$ s $\cdot$ °C)。

长度 1 m = 3.280 8 ft 热量 1 J = 9.486×10^{-4} BTU 温度差 1 °C = 1.8 °F
时间 1 h = 3 600 s

苯的导热系数为:

$$\begin{aligned}\lambda &= 0.0919 \text{ BTU}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) \\ &= \left(\frac{0.0919 \text{ BTU}}{\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) \left(\frac{1 \text{ J}}{9.486 \times 10^{-4} \text{ BTU}} \right) \left(\frac{3.2808 \text{ ft}}{\text{m}} \right) \left(\frac{1.8 ^\circ\text{F}}{1 ^\circ\text{C}} \right) \\ &= 0.159 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}) = 0.159 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})\end{aligned}$$

2. 经验公式(或数学公式)的换算

工程中遇到的公式有两大类。一类是反映物理量之间关系的物理方程。它是根据物理规律建立起来的,要求公式中各物理量的单位可以任选一种单位制,但同一式中绝不允许同时采用两种单位制,因此物理方程又称单位一致性或因次一致性方程。

另一类是根据实验数据整理而成的经验公式,式中各符号只代表物理量数字部分,而它们的单位必须采用指定的单位,故经验公式又称数字公式。若已知物理量的单位与公式中规定的不相符,则应先将已知数据换算成经验公式中指定的单位后才能进行运算。若经验公式要经常使用,则应将公式加以变换,使式中各符号都采用计算者所希望的单位。这就是经验公式的换算,换算方法见例2。

【例2】 经验公式 $S = 295.7u \cdot t$, 其中 S :ft; u :in/s; t :h

请将经验公式中各符号用 SI 制单位表示(即 S' :m; u' :m/s; t' :s)

解:将各参数用单位为 SI 制单位取代后的关系列出。

$$S'(\text{m}) = S(\text{ft}) \times \left(\frac{3.2803 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right) = 3.2803 S'(\text{ft})$$

$$u'(\text{m/s}) = u(\text{in/s}) \times \left(\frac{39.37 \text{ in}}{1 \text{ m}} \right) = 39.37 u'(\text{in/s})$$

$$t'(\text{s}) = t(\text{h}) \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = \frac{t'}{3600}(\text{h})$$

分别将 S' 、 u' 、 t' 表示的 s 、 u 、 t 代入原经验公式得:

$$3.2803 S' = 295.7 \times 39.37 u' \times \frac{t'}{3600}$$

$$S' = u' \cdot t'$$

去除上标得经验公式为: $S = u \cdot t$,

式中: S ——m;

u ——m/s;

t ——s

五、系统

系统(System)是指任何可以用真实或假想的边界包围起来的规定的空间或物质限定的数量。边界不仅可以是固定的,还可以是移动的。例如图1,是由水槽、管道和阀门组成的封闭系统。假如我们仅分析阀门,我们在分析系统边界的时候仅划环绕阀门的部分。

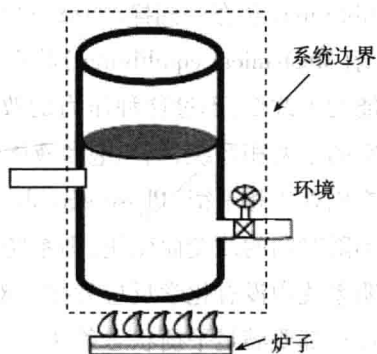


图1 包含输送管道和阀门的系统示意图

系统是由系统边界以内的组件组成的。一旦划定了系统边界,那么所有边界以外的都称为环境(Surroundings)。因此,合理选择系统和边界非常重要,可以简化问题的分析。

系统既可以是开放的,也可以是封闭的。对于封闭系统,系统边界对于流动性物质是不可透过的。换言之,封闭系统不允许系统内的物质与环境进行物质交换。封闭系统可以与环境进行热和功的交换,从而导致系统内的能量、体积或系统的其他性能发生改变,但是质量守恒。例如,一个边界包围着部分罐壁的系统,物质流是不能透过的,在这种情况下,我们可以将其视为封闭系统来处理。而在开放系统中,热和物质都可以穿过边界进出系统。结果如图1所示,热和液体会沿着系统边界流动。

如果一个系统与环境没有物质、热或功的交换,我们称之为隔绝系统(Isolated system)。隔绝系统对环境没有任何影响。例如,我们在一个绝热容器内进行化学反应,这样系统和环境没有热交换,如果容器体积同时保持不变,我们则可认为该化学反应是在隔绝系统内进行的。

如果在一个隔绝或开放系统内,系统与外界无热交换,我们称这个系统为绝热(Adiabatic)系统。尽管我们不可能实现绝对的绝热,但在一定条件下可以做到接近绝热条件。当一个过程在恒定温度下进行,同时与外界也进行热交换,我们则称该系统为等温(Isothermal)系统。对系统边界的定义没有严格限制,事实上,我们可以在过程中灵活的界定。我们可以以活塞和气缸为例来说明系统边界的可变性。

系统的状态与系统的平衡条件相关。在平衡状态下,系统的所有性质都是固定值;如果任何一个性质的数值发生改变,系统的状态也随之发生改变。例

如,一个苹果的内部温度都统一是 10°C ,则该苹果处于热平衡 (Thermal equilibrium) 状态。同样,如果一个物体各个方向压力都相同,则此物体处于机械平衡 (Mechanical equilibrium) 状态。尽管系统中的压力由于重力引进的提升而可能发生改变,不过这种压力的改变在热力学系统里通常忽略不计。如果我们研究的是两相系统,例如饱和液体中含有析出的晶体并且它们的质量保持不变,则它们处于相平衡 (Phase equilibrium) 状态。此外,如果系统中一物质的化学组成不随时间的改变而变化,则系统处于化学平衡 (Chemical equilibrium) 状态,这说明系统中没有化学反应发生。对于一个被认为处于平衡状态的系统,必须所有过程都要满足平衡状态条件。

当系统经历状态改变,则过程 (Process) 发生了。过程的途径可能包含不同的状态。一个完整过程的描述包括初始状态、中间状态、结束状态以及与环境的作用。例如,当将上述的 10°C 状态的苹果转移到 5°C 的环境中,苹果温度将会逐渐趋近于 5°C ,并达到平衡状态。苹果的温度变化是一个冷却过程。在这种情况下

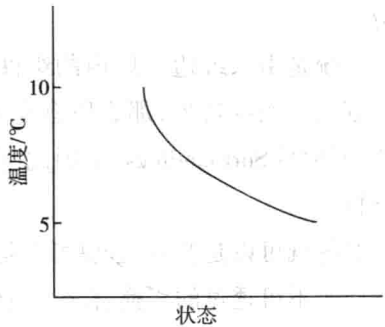


图2 苹果从 10°C 降温到 5°C 的状态变化路径

下,温度变化从初始的 10°C 降到 5°C ,变化路径如图2所示。

上述例子表明,对于任何系统,我们可以用其性质来描述系统的状态。如果要固定一个系统的状态,则要指定其各种性质的数值,例如,压力、温度和体积,可以定义热力学系统的平衡状态。这些性质不依赖于系统的状态是如何获得的,它们只是系统状态的函数。因此,性质是不依赖于系统状态变化路径的。我们可以将性质分类为广泛性和内含性。

广泛性的数值依赖于系统的范围和尺寸。例如,质量、长度、体积和能量都依赖于给定系统的大小。这些性质是附加的,因此,一个系统的广泛性性质是系统各组成部分性质的总和。我们可以简单地通过对系统的尺寸的考量来确定性质是否是外延的。如果是与系统尺寸有关的,则是广泛性性质。

内含性不依赖于系统的尺寸。例如,温度、压力和密度。对于一个均相系统,我们通常是通过两个广泛性性质相除来获得的。例如,质量除以体积,质量和体积都是广泛性质,但是它们相除得到的是密度是内含性质。

同时还有系统的比性质,一般用每单位质量表示。这样,比体积就是“体积/单位质量”,比能量就是“能量/单位质量”。

第一章 物料衡算和能量衡算

本章学习要求:通过本章的学习,学生需要掌握物料平衡的基本方法和能量衡算的原则和方法;掌握食物比热的计算方法、数学模型和焓的计算方法,了解冷冻状态下食物的焓变计算方法,并能熟练运用。

第一节 概述

物料衡算(Material balance)用于核定加工过程中物料的进料流和出料流,从而定量确定整个流程的物料量或组分的物料量,基于在一个设定的系统内质量守恒。在从原料中获得指定组分、估算经混合加工后的产品最终组成、计算加工收率以及评价机械分离设备的分离效率等方面,物料衡算是非常重要的手段。在食品加工领域,为了明确生产过程中原料、成品以及损失的物料量,必须要进行物料衡算。

能量衡算(Energy balance)可以用来计算系统中包含的不同形式的能量,对于判断节能方法的效率或确定节能区间非常重要。在设计含加热或冷却工艺的加工过程时,通过能量衡算,确保设计产能下用于热交换的流体量和装备尺寸满足实现加工目标的要求。

第二节 质量平衡和物料衡算

一、质量守恒定律

质量守恒定律(Law of conservation of mass):物质既不可能创造,也不可能毁灭。但物质的组成可以从一种形式变为另一种形式,即使在发生化学反应的情况下,反应前后反应物和产物的组成可能不一样,但是系统内物质的总量不变。可以把参与化学反应的物质视为一个封闭系统中的物质。

进入系统的质量流量 - 离开系统的质量流量 = 系统质量流量累积量 (1-1)

如果系统对于某物质的积累量为零,那么物质进出系统的量必须相等。如果累积量 = 0,则说明过程处于静态;如果累积量 $\neq 0$,则说明体系中组分的质量或浓度随时间变化,该过程处于非静态。例如,如图 1-1 所示,如果容器中水的

质量保持不变,且水以 1kg/s 的速度流入,则水流出的速度也必须是 1kg/s。

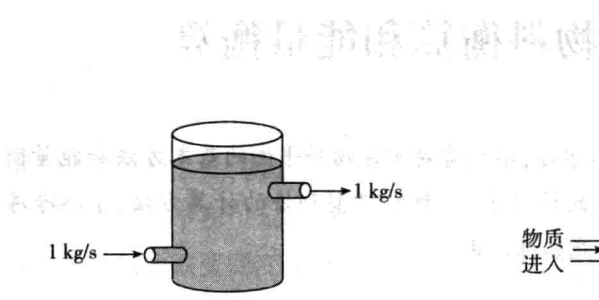


图 1-1 进出容器的液体流

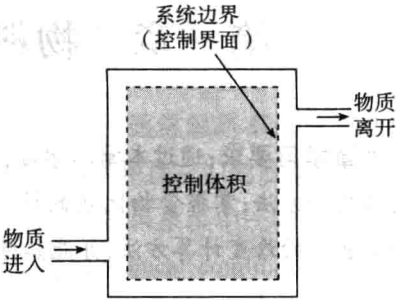


图 1-2 定容系统示意图

把上述情形用数学模型来表达。为了更直观,可以参照图 1-2。图 1-2 中显示了容器有一个入口和一个出口,在体积恒定的容器中也可以有多个的入口和出口。因此,一般情况下,流入系统的质量流量为:

$$q_{m, \text{inlet}} = \sum_{i=1}^n q_{m, i} \tag{1-2}$$

式中: i ——流入口;
 n ——系统中流入口的数量。

输出系统的质量流量是:

$$q_{m, \text{exit}} = \sum_{e=1}^p q_{m, e} \tag{1-3}$$

式中: e ——流出口;
 p ——系统中流出口的数量。

系统内的质量流量积累量是时间的函数,可以表示为:

$$q_{m, \text{accumulation}} = \frac{dm_{\text{system}}}{dt} \tag{1-4}$$

将上式代入式(1-1),得:

$$q_{m, \text{inlet}} - q_{m, \text{exit}} = \frac{dm_{\text{system}}}{dt} \tag{1-5}$$

通常,质量流量要比其他流动特性,如流速,更容易测量。

二、过程流程图

在列物料平衡方程前,先画出过程流程图并确定系统范围。

例如,考察葡萄糖结晶工艺过程,求从 100 kg 含糖 20% (重量比) 和水溶性杂质 1% 的糖浆中生产的结晶葡萄糖(干基)量。首先将糖浆浓缩到 75% 糖浓

度,输送至结晶器中到 20 ℃ 结晶,经离心分离后,湿晶体进入干燥器干燥得到结晶葡萄糖产品。葡萄糖结晶工艺的过程流程图如图 1-3 所示。

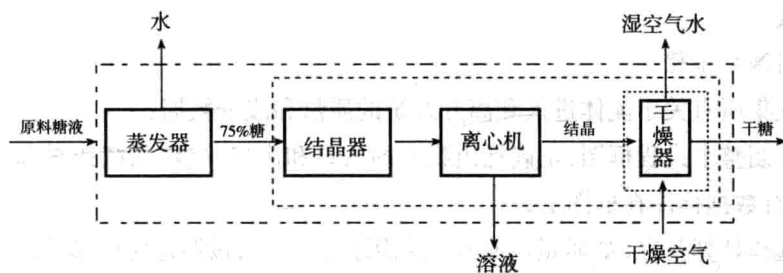


图 1-3 葡萄糖结晶工艺的过程流程图

三、总质量平衡

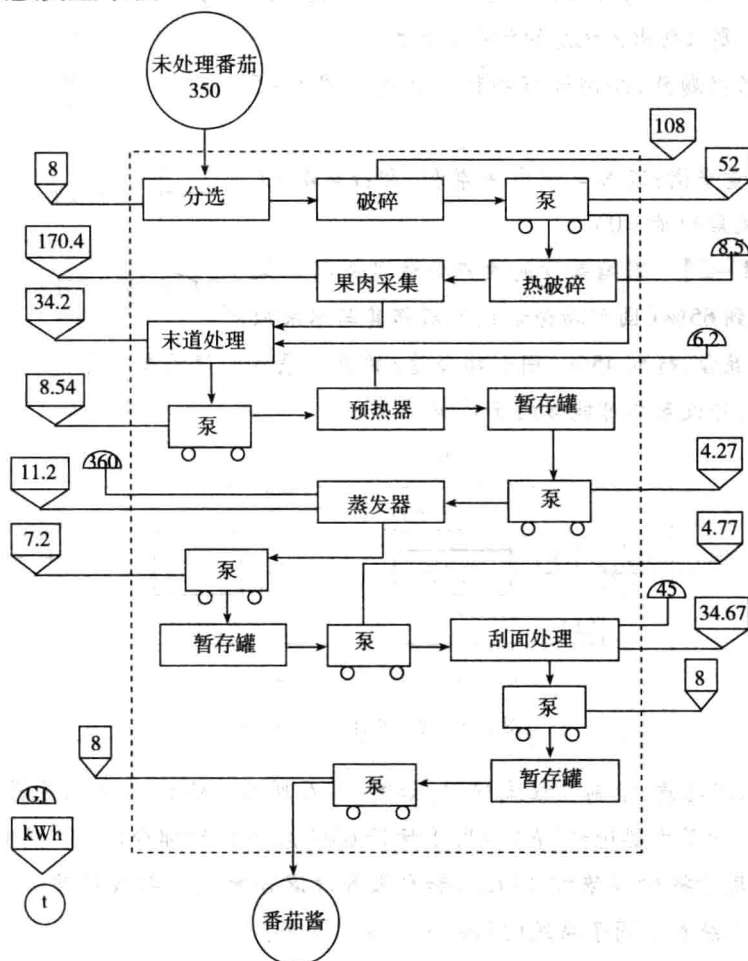


图 1-4 番茄酱生产工艺流程及过程物料衡算图

物料衡算在工厂设计和生产实践方面非常重要。图 1-4 所示的一条番茄酱生产线,通过物料衡算,可以准确计算出原料的组成、产品生产路线和副产品生产路线。

物料衡算步骤:

- ①收集所有关于流体进入和离开系统的质量和成分数据;
- ②绘制整个过程框图,正确标出物料的入口和出口;确定系统边界和衡算范围;将所有数据标注在框图上;
- ③选择计算基准(如质量或时间),利用式(1-5),按照选定的基准建立物料平衡方程来计算未知量。每个未知量对应一个平衡方程。

【例 1-1】 在蒸发器中,稀物料进入系统,浓缩物料离开蒸发器,水分蒸发。设 I 代表进入系统的稀物料重量, W 是水的蒸发量, C 代表浓缩物重量,假设过程是稳定状态,要求列出系统总的物料平衡式。

解:根据题意,绘制过程物料平衡图如图 1-5 所示。

总质量平衡:流入 = 流出 + 累积,即: $I = W + C$ (稳态系统累积量 = 0)

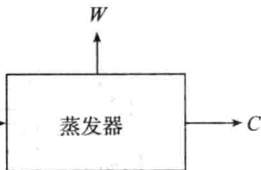


图 1-5 蒸发器进出物料平衡图

【例 1-2】 浓缩果汁的生产方法是先将水果原汁浓缩到 65% (固形物含量),然后将其与水果原汁按比例混合,得到 45% (固形物含量)的浓缩果汁。试绘制整个工艺系统的物料平衡图,并设置尽可能多的子系统。

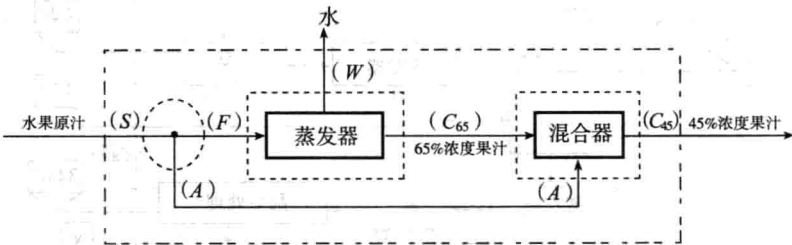


图 1-6 浓缩果汁工艺流程图

解:根据题意,绘制过程流程图,如图 1-6 所示。假设一个配置器,将水果原汁(S)分为蒸发器进料(F)和用于稀释 65% 浓缩汁的部分(A)。同时引入一个混合器用于将 65% 浓缩汁(C_{65})和水果原汁混合配制成 45% 的浓缩汁(C_{45})。对于整个系统和不同子系统的物料平衡方程如下: