

# 第一篇 食品工程基础

## 第一章 食品的物理性质

### 第一节 食品的流变特性

食品的流变特性在食品工业中有着极其广泛的应用，许多食品在加工制作的过程中，都要涉及到食品流变学的问题。例如脂肪、人造奶油、奶油的生产；糖果、巧克力、乳制品、冰淇淋的加工；以及各种面包、饼干、糕点的制作等等，都与食品流变学有着密切的关系。食品流变特性在食品工程中的应用可以概括为两个方面：一是食品物质的加工工艺方面；二是食品物质生产过程中的控制方面。前者主要是根据各种物料的不同流变改进加工工艺，或者通过改变物料的温度、浓度、改变剪切速率和受剪切的时间，添加各种过程中；后者用一些准确的流变学参数作为工艺过程的控制指标和判断依据，以代替人为的通过摸、尝、嗅等经验判断，使产品的质量保持稳定。

#### 一、食品根据其流变特性的分类

（一）固体类食品物质 固体食品物质很多，例如干面团、核桃等。马铃薯和苹果这类食品有时也可以归为固体食品。它们都具有变形与作用力的大小成正比例的特性。

（二）牛顿液体类食品物质 如果液体中的粘度与剪切速度无关，符合牛顿粘性定律，这种液体就称为牛顿液体。可以归属为牛顿液体的食品物质也很多，例如：糖水溶液、低浓度牛乳、油、水及其他透明稀质液体均可归为牛顿液体，都可以用牛顿液体的粘度  $\eta$  来表示其流变特性。

（三）非牛顿液体类食品物质 在牛顿液体中，液体的粘度是常数，特征曲线是一条直线并且通过坐标原点，直线的斜率是由粘度  $\eta$  来决定的。但是，更多的液体却不满足牛顿粘性定律，粘度不是常数，而是随着剪切速率而变化。这类液体虽然不具备牛顿粘性定律，但是还具备了液体的基本特性，故称为非牛顿液体。食品中的非牛顿液一般是固体乳液体，例如酱油、菜汤、番茄汁、浓糖水、淀粉浆、苹果浆等等，都属于这类物体。

（四）塑性流体类食品物质 在流变学范围内描述塑性流体物质就是：当作用在物质上的剪切应力大于极限值时，物体就流动，否则物质就保持即时形状并且停止流动。典型的塑性流体类食品物质有马铃薯浆、融化巧克力、脂肪、牛轧糖等等。它们在重力作用下，能保持它们的原有形状，然而，如果受到大于重力的作用力的作用，它们就能类似于液体一样的流动。

（五）粘弹性体食品物质 这类物质同时表现出液体的粘性和固体的弹性两种性质。例

如按适当的比例将水和面粉混合搅拌就形成了湿面团，采用挤压或剪切把面团变成片状。如果把这片面团放在水银上面，并且捏住一端轻轻地拉动，那么面团开始是伸长，紧接着会呈现出像粘性液体一样的流动状态，一旦放开面团的末端，它就会慢慢地收缩，但变形的恢复只能是局部的，不可能像完全弹性体。属于粘弹性体的食品物质有湿面团、米粉团、凝胶冻等等。

## 二、食品物质中的典型流变特性

食品物质中除了具有共同的一般流变特性以外，在各类食品物质中还具有典型的流变特性。

(一) 回弹现象 回弹现象是所有粘弹性体都存在的特性，但食品物质所具有的回弹现象就更为明显。如果用软面团做回弹实验，就可以用图 1-1-1 来表示。面团片由于拉力的作用而缓慢的拉长，从图 1-1-1 (a) 的第 6 格伸长到极点第 10 格 (b) 还不断裂，然后移去拉力，让其自由收缩 (回弹)，经过一段时间后，从第 10 格恢复到第 8 格左右 (c)，但难以恢复到原来位置。

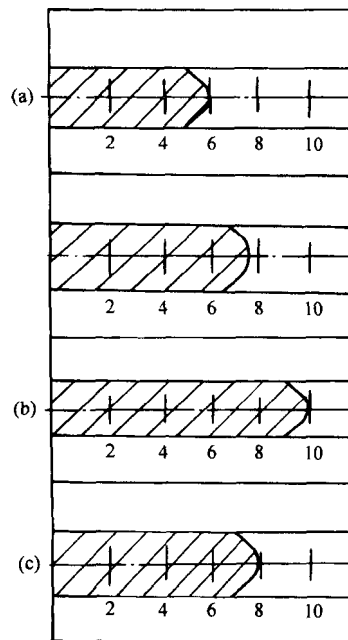


图 1-1-1 软面片的回弹现象

各类物质所具有的回弹能力，可以依次排列，如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 各类物质的回弹能力

回弹能力为零	具有轻微回弹能力	具有一定回弹能力	具有较大回弹能力	完全回弹
牛顿流体	非牛顿流体	塑性流体	粘弹性体	虎克固体

物质具有回弹能力的原因可以从物质微观结构上进行解释，非牛顿液体或塑性液体大多数是悬浮液或溶液，当浓度达到一定的数值后，液体就产生了连续的网状结构，施加于上面的应力具有两方面的作用，一方面是为网络在变形或流动转移中提供能量，另一方面是使网络自身变形。如图 1-1-2 所示，网络在应力作用下由原来方格网络平衡状态改变为菱形网络的平衡状态。变形后的网络结点之间处于紧张状态，结点之间有拉力存在。一旦应力消失，由于网络结点之间的拉力作用，又恢复到原来的方格网络，这就是一些物质中具有回弹现象的原因。但网络在应力作用下所引起的位移部分，就难以恢复。

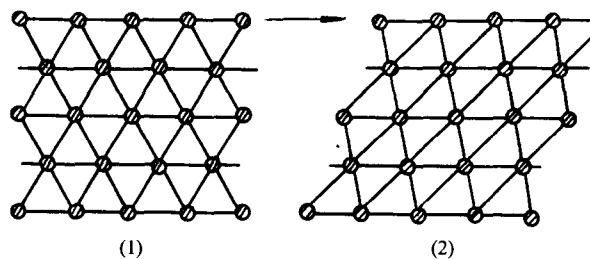


图 1-1-2 网络在应力作用下的变形

(1) 变形前 (2) 变形后

状态改变为菱形网络的平衡状态。变形后的网络结点之间处于紧张状态，结点之间有拉力存在。一旦应力消失，由于网络结点之间的拉力作用，又恢复到原来的方格网络，这就是一些物质中具有回弹现象的原因。但网络在应力作用下所引起的位移部分，就难以恢复。

(二) 湍流阻力减小现象 假塑性类的非牛顿液体，在湍流流动的状态下其摩擦阻力反而比同样流动条件下的牛顿液体水流的还小，出现湍流状态下“阻力减小”现象。同时，假塑性液体还能降低液体中传热的作用，出现“抑制传热”的现象。

高分子添加剂和纤维悬浮液的“阻力减小”现象是突出的例子。凡是属于假塑性流体的食品物质，例如浓度为 30% 以上的牛乳、酱油、番茄汁等，都具有“阻力减小”的特性。

必须注意“阻力减小”在层流状态下是不存在的。

(三) 流变特性转变 食品物质的流变特性明显地受到浓度的影响,同一种物质在不同的浓度范围内所表现出的流变特性是不一样的,甚至属性也发生了变化。有些物质在低浓度时,呈现出非牛顿液体的特性,但在中等浓度时,就呈现出塑性流体的。在所有能促使物质流变特性转化的因素如温度、剪切速度、剪切时间和浓度等中,以浓度的因素为最重要的。

例如,牛乳的流变特性明显的受到其浓度值的影响,浓度不同,不但使牛乳的表观粘度、液态特征和浓度系数发生变化,甚至使牛乳的物质类型也发生变化。对于 40 的牛乳,浓度在 30% 以下时,表现出牛顿液体态特征;浓度在 30% 以上时,表现出假塑性液的特征。而温度对牛乳的流变特性影响不大。

### 三、几种牛乳类食品的流变特性

(一) 糖水溶液 糖水溶液在同样的温度和压力下,其粘度要比水的粘度大。另外糖水溶液随着浓度的升高其粘度上升很快,表 1-1-2 给出了蔗糖溶液在 20 时的粘度随浓度变化的情况。图 1-1-3 表示出了蔗糖、葡萄糖、转化糖的混合液等的粘度与浓度的关系。由图中可以看出,所有的关系曲线都接近直线,而且相比之下,转化糖溶液具有较低的粘度,而葡萄糖具有较高的粘度。

表 1-1-2 蔗糖溶液的粘度系数 (20℃)

浓度 (%)	g/100g	$\eta$ (Pa·s)	浓度 (%)	g/100g	$\eta$ (Pa·s)
20	25	0.002 0	50	100.0	0.015 5
25	33.3	0.002 5	55	122.2	0.028 3
30	42.9	0.003 2	60	150.0	0.058 9
35	53.8	0.004 4	65	185.7	0.148 2
40	66.7	0.006 2	70	233.3	0.485 0
45	81.8	0.009 5	75	300.0	2.344 0

糖水溶液的粘度还随处理条件不同而改变。

例如,烧沸的糖水溶液一旦让其冷却到室温状态,其粘度就从烧沸时的约  $2\text{Pa}\cdot\text{s}$  升高到室温的  $1.4 \times 10^8\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,这是非常特殊的粘度转化特性。

#### (二) 低浓度牛乳

1. 牛乳的组成 牛乳基本上是乳脂肪球的含水乳胶液,乳脂肪球的直径  $0.0015 \sim 0.10\text{mm}$  之间。它包含大约 87% 的水、4% 的脂肪、5% 的糖、3% 的蛋白质和 1% 的其他成分。

在脱脂的淡牛乳中,当浓度增加时,牛乳就表现出非牛顿液态的特性。在甜炼乳中表现出非常复杂的粘弹性特性。然而在牛乳和乳制品中,随着水分含量的增加,脂肪含量的减少,流变特性总是趋向于接近牛顿液体,或最终成为牛顿液体。

2. 粘度与组成的关系 由于牛乳的粘度随脂肪含量的增加而提高,故全脂牛乳的粘度比脱脂牛乳的高。另外,粘度也随着非脂肪固体含量的增加而提高,但不存在把二者联系起

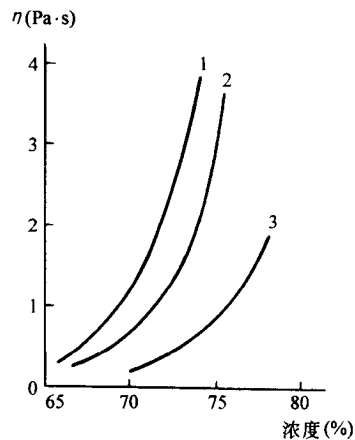


图 1-1-3 几种牛顿液体的粘度与浓度的关系  
1. 葡萄糖 2. 蔗糖 3. 葡萄糖与转化糖的混合液

来的简单关系式。影响牛乳粘度的更主要因素是水分的含量。表 1-1-3 表示了新鲜的格恩西乳牛乳用水稀释后粘度的变化。

表 1-1-3 新鲜格恩西乳牛乳的稀释程度与粘度的关系 (25℃)

稀 释 程 度	牛 乳 含 量	$\eta$ (Pa·s)
0% 水	100%	0.001 457
10% 水	90%	0.001 381
20% 水	80%	0.001 319
30% 水	70%	0.001 258
50% 水	50%	0.001 143
80% 水	20%	0.000 993
100% 水	0%	0.000 894

3. 粘度与温度的关系 和所有的液体一样，牛乳的粘度随温度的升高而降低，图 1-1-4 表示了全脂牛乳的粘度与温度的关系。另外，一些研究者已通过实验建立了温度与粘度的关系式，如下面实验公式：

$$\eta'_{\theta} = \eta'_{20} / [1 + \alpha(\theta - 20) + \beta(\theta - 20)^2] \quad (1-1-1)$$

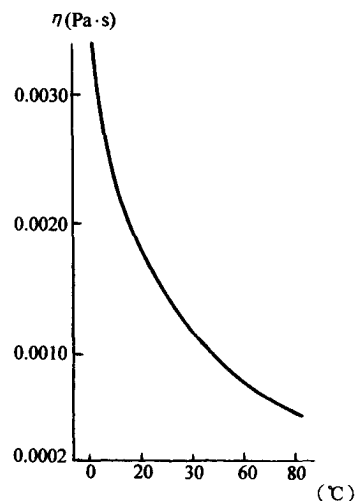
式中： $\eta'_{\theta}$ ——实验温度下的牛乳粘度 (Pa·s)；

$\eta'_{20}$ ——20 时牛乳的粘度 (Pa·s)；

$\alpha = 0.007 23$ ；

$\beta = -0.000 156$ ；

$\theta$ ——牛乳的实验温度 ( )。



4. 粘度与均质的关系 牛乳的粘度在均质过程中受到两种因素的影响，一是均质过程中的压力提高图 1-1-4 全脂牛乳的粘度和温度的关系了粘度值；二是由于大脂肪球被打碎，脂肪球数量增加，比表面积增大，故牛乳的粘度也相应提高。均质后的牛乳粘度的提高增加了输送阻力，相应增加了能量的消耗。

#### 四、幂定律及表观粘度

(一) 幂定律 非牛顿液体，剪切应力  $\tau$  与剪切速率  $S$  的关系曲线不是直线，对于流变特性与剪切时间无关的假塑性液体和胀塑性液体，剪切应力  $\tau$  与剪切速率  $S$  的关系可以用幂定律来表示

即

$$\tau = kS^n \quad (1-1-2)$$

这里  $k$  和  $n$  都是常数。

$n$  称为流态特征指数，它的大小表示液体偏离牛顿液体的程度，对于牛顿液体  $n$  等于 1 此时上式就变为

$$\tau = kS = \eta S \quad (1-1-3)$$

这就回到适用牛顿液体的粘性定律， $k$  就成为液体粘性系数  $\eta$ 。

如果  $n$  大于 1，表明这种液体比牛顿液体“稠密”，称其为胀塑性液体，此时  $n$  越大，说明胀塑性液体就越偏离牛顿液体。

如果  $n$  小于 1，表明这种液体比牛顿液体“稀薄”，称其为假塑性液体，此时  $n$  越小，同样说明假塑性液体越偏离牛顿液体。

图 1-1-5 表示了非牛顿液体的特征曲线。作为比较，图中还绘出了牛顿液体的特征曲线。

$k$  称为浓度系数，数值与液体的浓度或稠度有关，因此与牛顿液体的粘度具有同样的物理特性，量纲与粘度近似，国际单位为  $[NS^n/m^2]$ 。 $k$  和  $n$  可以用实验仪器即流变仪测出。通过实验测出了  $k$  和  $n$  以后，就可以利用幂定律来解决非牛顿液体输送计算中的有关问题。但是在应用幂定律时必须注意以下两点：

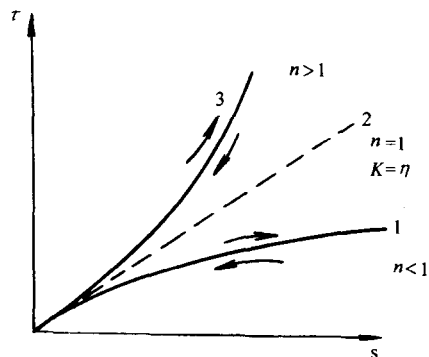


图 1-1-5 假塑性液体和胀塑性液体的特征曲线  
1. 假塑性 2. 牛顿型 3. 胀塑性

(1) 幂定律仅仅适用于测量范围之内。也就是说在应用幂定律时，不能应用在按照实验数据所标绘的特性曲线的外延部分。

(2) 如果  $\tau$  和  $S$  没有一一对应的关系，幂定律的实验模型也不能应用。也就是说，对于  $\tau$  的每一个值，只能有一个  $S$  值与之相对应，从而认为幂定律只适用于流变特性与时间无关的非牛顿液体。一些牛顿液体类食品的  $k$ 、 $n$  数值如表 1-1-4 所示。

表 1-1-4 一些牛顿液体类食品的  $k$  和  $n$

食品名称	浓度 (%)	温度 (°C)	$n$	$k$ ( $N \cdot s^n/m^2$ )
汤和酱油		12.8	0.51	3.6~5.6
苹果汁		24.0	0.65	0.5
番茄汁	5.8	32	0.59	0.22
(含固体量)	12.8	32	0.43	2.0
	16	32	0.45	3.16
	25	32	0.41	1.49
	30	32	0.40	18.9

(二) 表观粘度  $\eta_a$  把幂定律公式进行一下简单的变换，就有： $\tau = k \cdot S^n = k/S^{1-n} = \eta_a \cdot S$

这里：
$$\eta_a = k/S^{1-n}$$

表观粘度  $\eta_a$  具有下列特点：

(1)  $\eta_a$  与粘度  $\eta$  具有同样的量纲，同样的物理特性，故  $\eta_a$  可以称为表观粘度。

(2)  $\eta_a$  不但与浓度系数  $k$  和流态特性指数  $n$  有关，而且与剪切速率  $S$  有关，而  $S$  在测量范围内是变动的，故  $\eta_a$  在测量范围内其数值也随  $S$  而变化。因此，在表明某一  $\eta_a$  值时，就是指液体在具有某一  $S$  值状态下的表观粘度值，因此必须同时标明  $S$  值。

表观粘度  $\eta_a$  也是液体的流变特性指标之一，也能表明液体的物理特性。 $\eta_a$  测量是工厂常规检测之一。

### 五、非牛顿液体食品的流变特性与微观结构的关系

(一) 流变特性与结构的关系 单纯液体和真溶液一般都是牛顿液体，非牛顿液体通常

都是非常复杂的多相物质，不过聚合物溶液也可能被视为单相物质。非牛顿液体的流变特性及其结构之间的关系还是模糊不清。定性地讲，分散系统的流变特性取决于连续相、分散相以及这两相之间的相互可以是液体，也可以是固体，亦即相应地分别为乳浊液或悬浮液。对分散相来说，体积浓度（一种物质在另一种物质中的百分比）、微粒尺寸、微粒形状、尺寸分布以及化学成分等因素起作用。两相之间的相互作用可能还会受到稳定化处理用表面活性剂的影响，而稳定剂的各种特性都可能会改变液体的流变特性。

我们可以把稀化系统想象成这样一种液体，即其中的化学连接都已破裂，并且随着剪切速率的增加，微粒逐渐有规则的排列起来，从而粘性摩擦阻力就随着剪切速率的增加而下降。对增稠系统来说，人们认为应考虑电场力，当剪切速率增加时，这种力也随之增大。

（二）蜂蜜的流变特性 蜂蜜是蜜蜂从植物的汁液采制而成的含有许多微量组分的浓缩糖溶液。蜜蜂在采集花卉中渗出来的花蜜后，加上了转化酶，使花蜜中存在的蔗糖分解成葡萄糖和果糖，然后将其放入蜂巢中，使其脱水成为蜂蜜。花蜜与蜂蜜的成分比较如下：

花蜜			蜂蜜	
蔗糖	20%	→	葡萄糖	35%
			果糖	40%
水	80%		水	15%
			其他	10%

蜂蜜中的其他物质主要包含蛋白质、葡聚糖、有机酸、精油、维生素、矿物质、花粉颗粒、酵母菌以及 2%左右的蔗糖等等。虽然这物质的量相对来说较少，但它对蜂蜜的粘性具有很大的影响。像糖溶液一样，很多种蜂蜜都是牛顿液体，其浓度取决于含水量和温度。例如，苜蓿蜜在 20℃ 条件下，其粘度系数大约在 10~15Pa·s 之间。然而并不是所有的蜂蜜都是牛顿液体，如石南属植物蜜在蜂巢中凝结成凝胶状态，因而很难用通常的离心处理方法提取。搅拌时，这种蜜的粘度下降，一旦静置下来，粘度又重新增大。其粘度在一天之内能增大 200 倍。图 1-1-6 表示就是这种蜜的表观粘度与剪切速率的关系曲线。桉树蜜却具有相反的特性，当受到剪切作用时，其粘度增大，因而属于胀塑性流体。图 1-1-7 表示了这种物

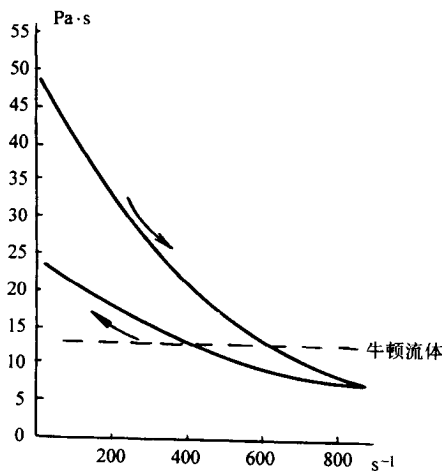


图 1-1-6 石南属植物蜜的表观粘度与剪切速率的关系曲线

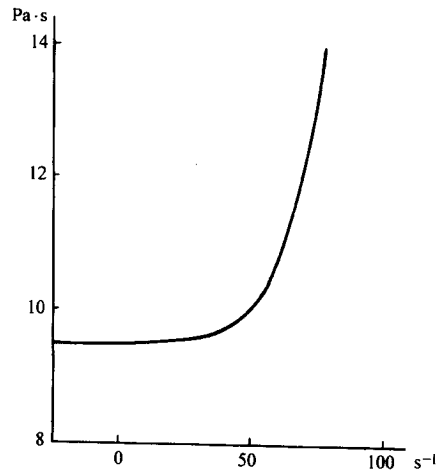


图 1-1-7 桉树蜜 (含 7.2% 葡聚糖) 的表观粘度与剪切速率的关系曲线

质的表观粘度与剪切速率的关系的曲线，从图中可以看出增稠现象非常明显。桉树蜜中含有7%左右的葡聚糖（ $C_6H_{10}O_5$ ） $_n$ ，这里  $n = 8\ 000$ 。当用丙酮除掉葡聚糖时，这种蜂蜜就变成了牛顿液体。当把葡聚糖提取出来再混合到另外的属于牛顿液体的蜂蜜中时，则这些蜂蜜出现了胀塑性。

## 第二节 食品的传热

### 一、食品的热传递

（一）热传递的基本概念 食品的热加工就是热量的传递过程。热量传递的推动力就是温度差，它总是从高温物体传递到低温物体。在一定的传热系统中，传热量与温度差成正比，温差越大在一定的时间内传递的热量越多。热传递也有阻力，称为热阻。当温差一定时，传热量与热阻成反比。在一定的传热系统中，系统的热阻是一定的；不同的传热系统，热阻是不一样的。

一般来说，食品原料都是热的不良导体，在加工过程中，各部位的温度不同，并且随着加热时间的变化而改变，这种现象在传热学中称为不稳定传热场。在某一时刻，把稳定场中温度相同的点连接起来，形成的面称为等温面。同一等温面上各点的温度都相同，不可能发生热量传递，热传递只能在不同的等温面上进行。

两个不同等温面的温度差与它们之间最短距离的比值称为温度梯度，常用符号  $\text{grad}t$  或  $\partial t/\partial n$  来表示。

在单位时间里，通过一定面积的热量称为热流量，用符号  $Q$  来表示，单位是瓦或千焦/小时；在单位时间内通过单位截面积的热量称为热流密度，用符号  $q$  表示，单位是瓦/平方米或千焦/（小时·平方米）。显然，热流密度与温度梯度有密切的关系，温度梯度越大，热量密度也就越大。

热量传递有三种基本方式，即热传导、热对流和热辐射。在食品加工中，热量传递通常并不只是以一种方式进行，而是以两种或三种基本方式同时进行，在几种传热方式中一般是以某种方式为热传递的主要方式。

### （二）热传导与加工的关系

1. 热传导的概念 热传导也称为导热，固体导热是指热量由高温区域转移到低温区域的过程，因此不同固体之间的导热只有在它们互相接触之后才能进行。液体与气体由于导热的过程中往往伴随着它们内部的质点相对运动，所以难以进行单纯的导热，而常常是与热对流同时进行。例如在果蔬脆片加工中，热源首先是将锅体加热，使热量传给油以后其热传递过程就比较复杂了，主要是因为油受热后热油上升冷油下降，热传递就不单纯是导热了，而是伴随着热对流，若油的运动剧烈，则后者就变成传递的主要方式了。

2. 热传导的影响因素 傅立叶定律指出，热传导所形成的热流密度与温度梯度成正比，其数学表达式为：

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t = -\lambda \cdot \partial t/\partial n$$

式中  $\lambda$  为导热系数，它表示物质的导热能力。由于热流密度与温度梯度的方向相反，前者指向温度降低的方向，后者指向温度升高的方向，所以上述公式出现负号。

热传导所传递的热量除了与温度差、导热系数有关外，还与物体的几何形状、导热面

积、厚度等多种因素有关。例如罐头杀菌锅的热接触面积为  $F$ 、厚度为  $\delta$ 、导热系数为  $\lambda$ 。锅内外的温度差为  $\Delta t$ ，则可以算出杀菌锅在单位时间内传递的热量（ $Q$ ）：

$$Q = \lambda / \delta \cdot F \cdot \Delta t$$

上式中即为导热公式，式中  $\delta / \lambda$  就是热阻，用  $K$  来表示。热阻大的容器当温差恒定时，单位时间的传热量较少，加热时食品原料温度升高的速度较慢，但停止加热后，食物温度下降的也慢，这点在进行工艺条件设计时要引起注意。例如在罐头加工时，对同样规格的食品原料，使用金属罐和玻璃罐这两种不同材料的包装容器，其杀菌工艺条件是不同的，原因是玻璃罐的热阻要比金属罐的大。

### （三）对流传热与加工的关系

1. 对流传热的概念 如果流体（包括液体和气体）不同部位的温度不同，则热流体质点向上运动，冷流体质点向下运动，这种由于流体质点发生相对位移而引起的热量传递现象称为热对流。显然，热对流除了依靠流体质点的位移传递热量外，流体内部还伴随着热传导的现象，这是由于温度不同的流体质点相互碰撞时发生的。

当流体流经与其温度不同的固体表面时，彼此之间产生的热交换过程称为对流换热。它包括两个方面的作用，一是流体位移时所产生的热对流作用；二是流体分子之间，流体与固体之间产生的热传导作用。因此对流换热是热对流和导热联合作用的结果。

食品加工中，如果加热以流体（如水、油、热空气或蒸气）为传热介质，则热传递的主要形式就是对流换热。

2. 影响对流换热的因素 根据牛顿提出的关于对流换热量的计算公式（即牛顿公式），流体与固体相接触整个受热面的对流热可用下面的公式计算：

$$Q = \alpha \cdot \Delta t \cdot F$$

式中： $Q$  ——单位时间内的换热量；

$F$  ——换热面积；

$\Delta t$  ——固体受热面的平均温度与流体的平均温度差；

$\alpha$  ——平均对流换热系数。

上式表明，从流体传给固体表面或从固体表面传给流体的热量  $Q$ ，与流体和固体之间的换热面积及流体和固体表面的温差成正比。因此，在加工过程中，如果要加速热量的传递，增大流体与固体（容器或食品原料等）的接触面积及增大两者之间的温度差是重要的途径。

由于对流换热包括热对流和热传导的双重作用，它除了受流动规律的支配外，还要受导热规律的制约，所以影响对流换热的因素很多。就食品的热加工而言，加热容器的形状、大小、光洁度，流体传热介质的比重、粘度、膨胀系数、温度、流速，食品原料的形状、性质等因素都影响对流换热量。但在上述计算公式中，这些影响因素并没有一一列出，而是将该函数进行简化后表示出了流体和固体表面之间热交换的强度。一般来说，流体的导热系数越大、运动粘度越小、运动速度越快、容积膨胀系数越大，固体受热面越粗糙、固体表面与流体的温差越大，则对流换热系数就越大。

3. 液体沸腾时的对流换热 物质由液态转变为气态的过程称为气化。气化既可在液体的表面进行，也可以在液体内部进行，前者称为蒸发，后者称为沸腾。蒸发在任何情况下都能进行，而沸腾必须在一定的条件下才能发生。实验证明，沸腾液表面的温度总是略高于蒸

气的温度，也就是说液体沸腾的温度要高于相应压力下饱和蒸气的温度，其在温度差与液体的物理性质与气化强度有关，约为  $0.4 \sim 0.8^\circ\text{C}$ 。这高出的温度称为过热度。在沸腾液层中，只有靠近加热面  $2 \sim 5\text{mm}$  的一薄层液体中，才有温度的急剧变化，其余部分的液体温度几乎是常数。

沸腾是液体内部气化的结果，气泡首先在加热面上形成，生成之后如果周围的液体具有足够的过热度，则气化的液体增多，气泡变大，当气泡达到一定的程度后，由于浮力的作用就向上运动，气泡在液体内部上升的结果导致液体受到强烈的搅动，特别是气泡离开加热面对液体的搅动，使得液体更容易从加热面上吸取热量，从而增强对流换热。显然，如果在相同的时间里，液体中所产生的气泡越多，对流换热系数就越大。由于液体沸腾时的对流换热系数取决于液体沸腾的程度，而液体沸腾的程度又取决于加热面升起的气泡数目，因此促使气泡的形成，并使其离开加热面就能够提高液体的对流换热系数。

影响液体沸腾时对流换热系数的因素，除了与液体的物理性质有关外，还与液体的过热度及压力有密切的关系。水是食品加工中常用的传热介质，沸腾时的对流换热系数可以用下列经验公式来计算：

$$\alpha = 14.5 \Delta t^{2.33} \cdot P^{0.5}$$

式中： $\alpha$  —— 对流换热系数 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )；

$\Delta t$  —— 过热度 ( )；

$P$  —— 液体压力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )。

由上式可见， $\Delta t$  和  $P$  越大， $\alpha$  就越大，对流换热量也就越大。

## 二、加工中的传热过程

食品加工时其热量的传递一般都要经过这样两个过程：一是热量从热源传至食品周围的传热介质，这称之为食物的外部传热；二是热量从传热介质传至食品的内部，称之为食品的内部传热。

### (一) 食品的外部传热与传热介质

1. 食品外部传热过程 食品外部传热包括下列三个环节：(容器的厚度为  $\delta$ ，换热面积为  $F$ ，导热系数为  $\lambda$ ，热源温度为  $t_1$ ，容器外部的温度为  $t_2$ ，容器内部的温度  $t_3$ ，容器内冷流体的温度为  $t_4$ ，热源与容器的换热系数是  $\alpha_1$ ，流体与容器的换热系数为  $\alpha_2$ )。

第一是热源把热量传递给加热容器外部，其传热量为：

$$Q_1 = \alpha_1 (t_1 - t_2) \cdot F$$

第二是加热容器由外部向内部传热，其传热量为：

$$Q_2 = \lambda / \delta \cdot (t_2 - t_3) \cdot F$$

第三是热量由容器内部传递给加热介质，其传热量为：

$$Q_3 = \alpha_2 (t_3 - t_4) \cdot F$$

如果热传递是处于稳态情况下，则有：

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

消去上述各式中的  $t_2$  和  $t_3$ ，可得：

$$Q = [(t_1 - t_4) \cdot F] / [1/\alpha_1 + \lambda/\delta + 1/\alpha_2]$$

上式即为热源在单位时间内向传热介质所传递的热量的计算公式。

2. 传热介质 从传热的角度看，传热介质在加工过程中的作用是：第一吸取热量使自身温度升高；第二把热量传递给温度较低的食品原料。根据传热介质的物态，可分为液态传热介质、固体传热介质和气态传热介质三类，每一类传热介质都各有特点。

(1) 液态传热介质。最重要的液态传热介质是水和油，但并不是纯的水和油，因为水中可能加有其他的调味料，食品中的可溶性物质也会溶于水；食用油本身就不是一种纯净的化合物，食品中的油性成分也会溶于油中。

(2) 气态传热介质。气态传热介质主要有两类：一类是热空气；另一类是热蒸气。

空气传热：热空气的导热系数比水和油低的多，200℃时仅为  $0.0393 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，虽然温度升高导热系数会增大，但500℃时也仅为  $0.0574 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。因此热空气通过热传导传递的热量很少，主要是利用热源产生的高温所引起的强烈热辐射和热空气流动所引起的对流换热。以热空气作为传热介质，物料所获得的热量既有对流换热量又有辐射换热量，两者加在一起，称为复合换热量，即：

$$Q = Q_K + Q_R$$

式中： $Q$  为复合换热量； $Q_K$  为对流换热量； $Q_R$  为辐射换热量。

设热空气和原料表面平均温度分别为  $t_1$  和  $t_2$ ，原料换热面积为  $F$ ，根据牛顿公式，对流换热量可写为：

$$Q_K = \alpha_K(t_1 - t_2) \cdot F$$

式中： $\alpha_K$  为对流换热系数。

辐射换热量可以由下式计算：

$$Q_R = \epsilon_n \cdot \sigma_a \cdot F(T_1^4 - T_2^4)$$

式中： $T_1$  和  $T_2$  为热空气和原料表面的绝对温度； $\sigma_a$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数； $\epsilon_n$  为当量黑度。

食品原料所获得的总热量为：

$$Q = (t_1 - t_2) \cdot F \cdot [\alpha_K + \epsilon_n \cdot \sigma_a (T_1^4 - T_2^4) / (t_1 - t_2)]$$

由上式可见：热空气的温度 ( $t_1$  或  $t_2$ ) 越高， $(t_1 - t_2)$  和  $T_1^4 - T_2^4 / (t_1 - t_2)$  这两项就越大，食品原料所获得的热量就越多；对流换热系数越大，复合换热量  $Q$  也越大，因此加快热空气的流动速度，可以使原料在单位时间内得到更多的热量；当量黑度越大，则复合换热量就越多，因此增大换热体系的当量黑度，有利于热量的传递；由于  $Q$  与换热面积  $F$  成正比，所有原料的受热面积越大所获得的热量就越多。

用热空气作传热介质，传热的速度很快，物料表面水分吸收足够的热量后迅速气化，其表面处于脱水或半脱水状态，结成一层硬膜，使物料内部的水分难以向外扩散，这一性质在加工时要根据具体的工艺要求来加以利用。例如在制作果脯、脱水蔬菜时，为使物料内部的水分也能充分的脱出，加工时就应该尽量避免其表面形成硬膜。

蒸气传热：蒸气是指水加热沸腾后产生的水蒸气，其温度的高低取决于压力，压力越大温度越高，水蒸气在表压一个大气压时约为  $121^\circ\text{C}$ ，用蒸气作为传热介质，热传递方式是导热对流联合进行，根据导热公式和牛顿公式，传热量与传热介质和物料的温度差成正比，所以蒸气的压力越大，其单位时间内传递的热量就越多。

## (二) 食品内部传热

1. 食品内部传热的特点 传热介质的作用是把热量从热源传递给原料的表面，然后热

量再从食品的表面向中心传递。食品原料必须达到一定的温度，才能杀死其中的微生物和使食品成熟并形成较好的色香味。食品内部传热时，其传热的速度不仅与食品原料和传热介质的温差有关，还取决于原料的导热系数、密度、比热等传热学因素。由于食品原料的导热系数都比较小，导温系数也比较小，所以热量在食品内部的传递速度就比较慢，对于块形较大的物料，其中心温度很难在短时间内升高到要求的温度。例如，实验表明一块 1.5~2kg 的牛肉，在沸水中煮 1.5 h，内部的温度才达到 62℃。所以在罐头加工中，对午餐肉等肉罐头，就需要进行高温长时间的加热才能达到杀菌和做熟的目的。

2. 食品内部温度的变化规律 大多数食品原料是固体，内部传热方式属于热传导。当原料表层从传热介质获得热量后，温度首先升高，导致外层温度高于内层，中心的温度最低（采用微波加热的情况例外）。因此食品物料中存在着温度梯度，根据傅立叶定律，热量就从外层向内部传导，使里层和中心的温度也逐渐升高。在加热过程中，由于原料各点的温度均随着时间而变化，因此所形成的温度场为不稳定温度场，其导热过程为非稳态导热，如何计算物料在加热过程中的温度变化，是一个十分复杂的问题。

以传热介质是水或油为例，因为传热主要是以对流换热的方式进行，所以介质向原料提供的热量可以用牛顿公式计算。设原料与传热介质的接触面积为  $F$ ；介质与原料的换热系数为  $\alpha$ ；传热介质的温度为  $t_f$ ；由于原料的温度随着时间的变化而变化，假定在  $\tau$  时刻原料表面的温度是  $t$ ，若加热时间增加  $d\tau$  则传热介质在  $d\tau$  时间内向原料表面传递的热量 ( $Q_1$ ) 为：

$$Q_1 = \alpha \cdot F \cdot (t_f - t) d\tau$$

为了计算方便，假定原料体积很小，这样就可以认为原料外部吸收的热量能够迅速传至内部各处，原料内部各处具有相同的温度和温度变化率。若原料的密度为  $\rho$ ，比热为  $C_p$ ，体积为  $V$ ，则原料的温度每升高 1℃ 所获得的热量为  $C_p \cdot \rho \cdot V$ 。设在  $d\tau$  时间内原料的温度升高  $dt$ ，则原料所获得的热量 ( $Q_2$ ) 为：

$$Q_2 = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot dt$$

由于  $Q_1$  等于  $Q_2$ ，所以将两式合并整理可得到温度变化率的计算公式：

$$dt/d\tau = [\alpha \cdot F \cdot (t_f - t)] / [C_p \cdot \rho \cdot V]$$

根据上式可以总结出原料在加热过程中温度的变化规律：

- (1) 传热介质的温度越高，原料温度升高的速度越快。
- (2) 传热介质与原料的换热系数越大原料升温越快。
- (3) 比热和密度大的原料，在加热时温度上升的比较慢。
- (4) 同一种原料，其比表面积越大，即表面积与体积的比值越大，加热时温度升高的速度越快。

由于原料的温度随着加热时间的延长而升高，传热介质与原料的温度差逐渐变小，所以原料温度升高的速度也随之减小。由上述积分公式，可求出当传热介质温度  $t_f$  恒定后的任以任一时刻  $\tau$  时原料的温度  $t$ ，即：

$$t = t_f - (t_f - t_0) e^{-\alpha \cdot F \cdot \tau / C_p \cdot \rho \cdot V}$$

式中的  $t_0$  为传热介质的温度为  $t_f$  时原料的初始温度。

3. 食品的传热系数与比热 食品的传热系数以冰点为界取，有明显的变化，在冰点以

下时传热系数明显增大。温度在冰点以上时，传热系数随温度的升高而增大，在冰点以下时与此相反，温度越低传热系数越大。肉类等食品其组织有方向性，由于热流的方向不同传热系数也不一样。在冰点以下，热流与纤维方向平行时，其传热系数比成直角时大 0.8% ~ 1%，但是在冰点以上时情况相反，与热流平行时的传热系数比成直角时小 0.8% ~ 1%。原料中有气泡或空气时，传热系数明显下降。另外，食品原料的传热系数及比热是随着其水分含量和所在的温度不同而变化的。Vagenas 等人在总结了大量前人研究的资料的基础上，给出了部分食品的传热系数及比热随水分含量和温度变化的关系式（ $\lambda$  为传热系数； $T$  为温度； $X$  为水分含量； $C$  为比热； $\rho$  为体积密度）。

(1) 冰点以上的传热系数

水果和蔬菜

$$0 < T < 80^{\circ}\text{C}, 0 < X < 0.96$$

$$\lambda = 0.057 + 0.566X \quad \text{回归系数 } 0.729$$

$$\lambda = -0.015 + 1.914 \times 0.001T + 0.590X \quad \text{回归系数 } 0.754$$

水果

$$0 < T < 80^{\circ}\text{C}, 0 < X < 0.96$$

$$\lambda = 0.050 + 0.566X \quad \text{回归系数 } 0.812$$

$$\lambda = -0.022 + 1.924 \times 0.001T + 0.587X \quad \text{回归系数 } 0.835$$

$$\lambda = 0.441 + 0.907 \times 0.001T - 0.634 \exp(-X) \quad \text{回归系数 } 0.885$$

梨

$$20 < T < 80^{\circ}\text{C}, 0.20 < X < 0.85$$

$$\lambda = 0.031 + 0.710X \quad \text{回归系数 } 0.927$$

$$\lambda = -0.011 + 1.193 \times 0.001T + 0.705X \quad \text{回归系数 } 0.936$$

$$\lambda = 0.521 + 0.189 \times 0.001T - 0.687 \exp(-X) \quad \text{回归系数 } 0.927$$

苹果

$$0 < T < 80^{\circ}\text{C}, 0.05 < X < 0.85$$

$$\lambda = 0.235 + 0.432X \quad \text{回归系数 } 0.692$$

$$\lambda = -0.026 + 1.880 \times 0.001T + 0.618X \quad \text{回归系数 } 0.869$$

$$\lambda = 0.482 + 0.240 \times 0.001T - 0.637 \exp(-X) \quad \text{回归系数 } 0.888$$

桃

$$25 < T < 35^{\circ}\text{C}, 0.05 < X < 0.90$$

$$\lambda = -0.145 + 4.090 \times 0.001T + 0.409X \quad \text{回归系数 } 0.994$$

葡萄汁

$$15 < T < 80^{\circ}\text{C}, 0.37 < X < 0.9$$

$$\lambda = 0.278 + 0.315X \quad \text{回归系数 } 0.503$$

$$\lambda = 0.241 + 1.70 \times 0.001T - 0.763X \quad \text{回归系数 } 0.817$$

胡萝卜

$$20 < T < 65^{\circ}\text{C}, 0.68 < X < 0.91$$

$$\lambda = -1.082 + 1.890X \quad \text{回归系数 } 0.712$$

$$\lambda = -0.092 - 1.654 \times 0.001T + 1.763X \quad \text{回归系数 } 0.742$$

番茄

$$15 < T < 70^{\circ}\text{C}, 0.50 < X < 0.96$$

$$\lambda = 0.302 + 8.50 \times 0.001 T - 6.542 \times 10^{-5} T^2 \quad \text{回归系数 } 0.303$$

$$\lambda = 0.318 + 2.50 \times 0.001 T + 0.150 X \quad \text{回归系数 } 0.318$$

$$\lambda = 0.123 + 1.070 \times 0.001 T - 9.25 \times 10^{-5} T^2 + 0.196 X \quad \text{回归系数 } 0.389$$

马铃薯

$$0 < T < 70^{\circ}\text{C}, 0 < X < 0.90$$

$$\lambda = 0.063 + 0.65 X \quad \text{回归系数 } 0.708$$

$$\lambda = 0.080 - 0.860 \times 0.001 T + 0.668 X \quad \text{回归系数 } 0.715$$

$$\lambda = 0.609 - 0.800 \times 0.001 T - 0.494 \exp(-X) \quad \text{回归系数 } 0.782$$

玉米

$$8 < T < 32^{\circ}\text{C}, 0 < X < 0.30$$

$$\lambda = 0.137 + 0.165 X \quad \text{回归系数 } 0.195$$

$$\lambda = 0.152 - 0.700 \times 0.001 T + 0.187 X \quad \text{回归系数 } 0.208$$

$$\lambda = 0.049 - 0.816 \times 0.001 T + 0.191 X + 0.149 \times 0.001 \rho \quad \text{回归系数 } 0.249$$

大米

$$26 < T < 40^{\circ}\text{C}, 0.09 < X < 0.30$$

$$\lambda = 0.069 + 0.368 X \quad \text{回归系数 } 0.292$$

$$\lambda = -0.146 - 3.585 \times 0.001 T + 0.383 X \quad \text{回归系数 } 0.483$$

$$\lambda = 0.035 - 0.568 \times 0.001 T + 0.369 X + 0.053 \times 0.001 \rho \quad \text{回归系数 } 0.658$$

(2) 冰点以上的比热

水果和蔬菜

$$0 < T < 90, 0.25 < X < 0.90$$

$$C = 1.2955 + 2.8801 X \quad \text{回归系数 } 0.657$$

$$C = 1.3249 - 0.688 \times 0.001 T + 2.8681 X \quad \text{回归系数 } 0.684$$

水果

$$0 < T < 90^{\circ}\text{C}, 0.25 < X < 0.90$$

$$C = 1.2605 + 2.9700 X \quad \text{回归系数 } 0.657$$

$$C = 1.3767 - 3.181 \times 0.001 T + 2.9293 X \quad \text{回归系数 } 0.669$$

苹果

$$0 < T < 90^{\circ}\text{C}, 0.50 < X < 0.90$$

$$C = 1.8166 + 2.4231 X \quad \text{回归系数 } 0.586$$

$$C = 1.8134 + 0.414 \times 0.001 T + 2.3900 X \quad \text{回归系数 } 0.586$$

结球甘蓝

$$0 < T < 90^{\circ}\text{C}, 0.80 < X < 0.9$$

$$C = -1.2820 + 5.6543 X \quad \text{回归系数 } 0.858$$

$$C = -1.2880 - 1.088 \times 0.001 T + 5.7020 X \quad \text{回归系数 } 0.875$$

蘑菇

$$0 < T < 90^{\circ}\text{C}, 0.30 < X < 0.95$$

$$C = 1.5534 + 2.6239X$$

回归系数 0.999

$$C = 1.5400 + 0.203 \times 0.001T + 2.6270X$$

回归系数 0.999

谷物

$$0 < T < 90^\circ\text{C}, 0 < X < 0.75$$

$$C = 1.4728 + 2.6311X$$

回归系数 0.682

$$C = 1.3564 + 3.555 \times 0.001T + 2.655X$$

回归系数 0.707

### 第三节 食品的扩散、渗透和吸附

#### 一、扩散及对流传质

(一) 扩散的概念及基本定律 物质的分子或微粒从高浓度区向低浓度区的传递过程就称为扩散。扩散的方向总是从高浓度的区域向低浓度的区域进行，而且扩散可以进行到整个体系的浓度处处相同为止。理论研究指出，扩散是分子或微粒在规则热力运动下浓度均匀化的过程。

扩散是由于组分在体系存在着浓度差引起的，为了更准确的描述浓度差，故引入了浓度梯度这一概念。在组分 A 扩散的方向上，距离增量为  $dZ$  时，若浓度变化为  $dC_A$ ，则  $dC_A/dZ$  就称为浓度梯度。显然，组分在扩散方向上的浓度差越大，其浓度梯度也就越大。

组分 A 在单位时间内通过与扩散方向相垂直的单位面积的量称为扩散能量。Fick 第一定律是描述由于浓度梯度所引起的扩散能量的基本定律，可用下式表示：

$$N_A = -D_{AB} \cdot dC_A/dZ$$

式中： $N_A$  为组分 A 扩散的摩尔通量 ( $\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )； $C_A$  为组分 A 的浓度 ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ )； $Z$  为扩散方向的距离 (m)； $D_{AB}$  为组分 A 在组分 B 中的扩散系数。

若组分 A 扩散时通过与扩散方向相垂直的面积为  $F$ ，在  $d\tau$  时间内，通过面积  $F$  的扩散量  $dQ$  由 Fick 第一定律可写为：

$$dQ = -D_{AB} \cdot F \cdot dC_A/dZ \cdot d\tau$$

以上两式等式右边的负号表示扩散的方向与浓度梯度的方向相反，因为浓度的方向是朝着浓度升高的方向，而扩散方向是朝着浓度降低的方向，两者恰恰相反。

(二) 影响扩散量的因素 根据扩散量计算公式，影响扩散量的主要因素是浓度差、扩散系数、扩散面积和扩散时间。讨论这些因素对扩散量的影响，在食品加工中具有重要的意义，现分述如下：

1. 浓度差 浓度差是扩散的动力，犹如电位差是电流的动力、温度差是热流的动力一样，如果体系内各点的浓度一样，即浓度梯度为零，则扩散就不会进行。

2. 扩散面积 物质的扩散量与其在扩散方向上的面积成正比，因此在食品加工中进行调色调香或腌制时，就应充分的混合均匀，以增加扩散面积提高扩散速度。

3. 物质的扩散是需要时间的 温度高时，由于分子运动的速度较快，完成一定的扩散量所需的时间较短；温度低时，分子运动的速度较慢，所需时间就比较长。

4. 扩散系数 由于物质的扩散量与扩散系数成正比，扩散系数大者，在相同的时间内物质的扩散量就多；反之扩散量就少。扩散系数的大小与体系的聚集状态（气态、液态或固态）、温度、压力以及物质的性质等因素有关。

(1) 溶质在气体中的扩散系数。对于双组分气体混合物，组分的扩散系数在低压下与浓度无关，根据气体分子运动学说，所导出的扩散系数  $D_{AB}$  的计算公式如下：

$$D_{AB} = [bT^{3/2}(1/M_A + 1/M_B)^{1/2}] / P \cdot S_w$$

式中： $D_{AB}$  为组分 A 在组分 B 的扩散系数 ( $m^2/S$ )； $T$  为绝对温度 (K)； $M_A$  和  $M_B$  为组分 A 和 B 的分子量 ( $kg/kmol$ )； $P$  为总压 (atm)； $S_w$  为物质 A、B 的分子平均截面积 ( $m^2$ )， $b$  为实验确定的常数。

(2) 溶质在液体中的扩散系数。与气体中分子的扩散速率相比，液体中分子的扩散速率要小的多，这是因为液体中分子之间的距离较近，扩散物质 A 的分子在运动中很容易与邻近液体 B 的分子碰撞，使 A 的运动速度减慢。爱因斯坦假设扩散物质的粒子为球形时，扩散系数  $D$  的表达式可以写为：

$$D = (R/6N\pi) T / \eta r$$

式中： $R$  为气体常数 ( $8.31/kmol$ )； $N$  为阿伏加德罗常数  $6.023 \times 10^{23}$ ； $\eta$  为液体的粘度 ( $Pa \cdot S$ )； $r$  为扩散物质微粒的直径 (m)； $T$  为绝对温度 (K)； $\pi$  为圆周率。

上式的  $R$ 、 $N$ 、 $\pi$  均为常数，令  $K_0 = R/6N\pi$ ，则上式可简写为： $D = K_0 \cdot (T/\eta r)$

扩散的计算公式表明，温度越高，粒子的直径越小、液体的粘度越低，则扩散系数就越大。在浓度梯度和扩散面积相同的情况下，扩散系数增大，物质的扩散速度和扩散量也就增大。

(三) 固体中的扩散 固体中的扩散在食品加工过程中也经常遇到。如肉制品在腌制时腌制剂向原料的扩散，面包焙烤时水分由里向表的扩散以及干燥食品对水蒸气的吸附等等，都是属于固体、液体或气体在固体中的扩散现象。

由于固体的种类、结构和性质相差很大，所以分子在固体内的扩散十分复杂，一般可分为两类，一类是与固体内部结构基本无关的扩散，另一类是与固体内部结构有关。后者的扩散是在固体颗粒之间空隙内的毛细孔道里进行的。

1. 与固体内部结构无关的扩散 如果扩散物质在固体内部能够溶解，形成均匀的溶液，则物质的分子扩散与固体内部结构无关。其扩散仍然遵循 Fick 定律：

$$N_A = -D_{AB} \cdot dC_A / dZ$$

如果所进行的扩散是属于稳态扩散 ( $C_A$  不是时间的函数)，在距离  $Z_1$  和  $Z_2$  处扩散组分 A 的浓度分别为  $C_{A1}$  和  $C_{A2}$ ，上式积分可得：

$$N_A = [D_{AB}(C_{A1} - C_{A2})] / (Z_1 - Z_2)$$

2. 与固体内部结构有关的扩散 有些食品原料属于多孔性固体，扩散物质在这些食品原料中的扩散，与食品的内部结构密切相关，扩散的速度随着原料内部毛细管的大小、形状及扩散物质的状态和密度不同而异。

理论研究指出，当原料内部孔道的直径大于水分子运动的平均自由程时，水分子通过孔道时，碰撞主要发生在水分子之间，而水分子与孔道壁面碰撞的机会较小，这种情况发生的扩散遵循 Fick 定律。

如果原料的质地紧密，内部的毛细孔道很小，当孔道的直径 ( $d$ ) 与水分子的平均自由程 ( $\lambda$ ) 的相对大小为  $d \leq \lambda / 10$  时，则水分子与孔道壁面之间的碰撞的机会就大于水分子之间的碰撞机会，水分子通过孔道进行扩散的阻力主要取决于分子与壁面的碰撞阻力，这种情况下所

发生的扩散不服从 Fick 定律，称为纽特逊扩散，其方程可用下式表示：

$$N_A = [-97.0r(T/M_A)^{1/2}] \cdot (dC_A/dZ)$$

式中： $r$  为孔道的平均半径（m）； $T$  为绝对温度（K）； $M_A$  为扩散物质的分子量（kg/kmol）； $dC_A/dZ$  为浓度梯度。

上式表明，水分子向食品中的扩散量与食品内部毛细管道的平均半径成正比，与温度的平方根成正比。公式的负号表示水分子的扩散方向是从原料的外部向内部进行的。

（四）对流传质 对流传质是质传递的另一种形式，它是发生在运动着的流体与界面之间的质量传递。当处于运动状态的流体流经固体表面时，固体表面的溶质首先溶解于相界面处的流体，然后再由相界面向流体的内部传递。而固体表面的溶质溶于相界面处的流体后，则导致固体表里溶质的浓度不同，形成浓度梯度，在浓度梯度的推动下，固体内部的溶质源地流入周围的流体。

对流传质现象与对流传热现象非常相似，对流传质速率不仅与扩散系数等传递的性质因素有关，而且与流动流体的动力学性质（如流速、粘度等）有密切关系。描述对流传质的基本方程，可用下式表示：

$$N_A = K_c \cdot \Delta C_A$$

式中： $N_A$  为对流传质的摩尔的通量  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ， $\Delta C_A$  为组分 A 在界面处的浓度与流体主体平均浓度之差  $\text{kmol}/\text{m}^3$ ， $K_c$  为对流传质系数  $\text{kmol}/[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\Delta C)]$ 。

对流传质系数类似于对流传热系数， $K_c$  的大小与界面的几何形状、流体的物理性质、流速以及浓度差等因素有关，其中流速的影响最为明显。在以水或油为传热介质的加工方法中介质的沸腾越剧烈，流速就越大，对流传质系数随之增大，从而使质传递的摩尔通量增大。

## 二、渗透

（一）渗透的概念 食品原料如肉类、水果和蔬菜等大都含有很高的水分，当把它们切开时，其中的水并不会流出来。但是在食品原料中放入糖或盐进行腌制时，则水分很快地从细胞内流出来，这种现象叫做渗透。

渗透现象之所以会发生，是因为细胞内外溶液的浓度不同而引起的。腌制时，食品原料细胞内溶液的浓度低于外界盐液的浓度，细胞内外是以细胞膜隔开的，由于细胞内外存在着浓度差，溶剂水就从细胞内低浓度溶液通过细胞膜向细胞外高浓度溶液渗透。这很象扩散现象，只不过在扩散现象里，扩散的物质是溶质的分子或微粒，而渗透现象进行渗透的物质是溶剂分子。这种渗透现象也可用这样理解：细胞内水在溶液中的浓度高于细胞外水在盐液中的浓度，因此细胞内外的水有着浓度差，在浓度梯度的推动下，水从浓度较高的细胞内流向水浓度较低的细胞外。动、植物体的细胞不仅能让水分子从细胞膜渗透过，而且还能让电解质和非离子化有机小分子通过，但是后者通过细胞膜的速度比较缓慢，尤其是活细胞，由于具有较高的电阻，离子进出就十分困难，在死亡的细胞中，由于细胞膜的渗透性增强，电解质的进出就比较容易。实验证明，像蛋白质这样的高分子有机物是无法通过细胞膜的。

像细胞膜那样只允许水和小分子物质通过，而不允许大分子物质通过的薄膜叫半渗透膜，它具有特殊的性质，膜上的微孔就像筛子的筛孔一样，对经过膜上微孔的物质有一定的选择。动植物的细胞膜就是典型的半渗透膜，在动植物体内存在着各种各样的渗透现象。植物的根、茎、叶为什么能顺利吸收水分，渗透作用就是其中的重要原因。

## (二) 渗透压

1. 渗透平衡与渗透压 渗透压是一个既重要又抽象的概念。为了更好地理解它，先看下面一个简单的实验，如图 1-1-8 所示，在玻璃容器中间用半透膜隔开，分为左右两边，容器的左边加入纯水，容器的右边加入糖水，并使左右两边的液面相平。过一段时间后可看到，容器的右边的液面会慢慢升高而且升至一定的高度（ $h$ ）后，就不再升高了。这种现象是由于水分子从容器左边通过半透膜向容器右边渗透的结果。

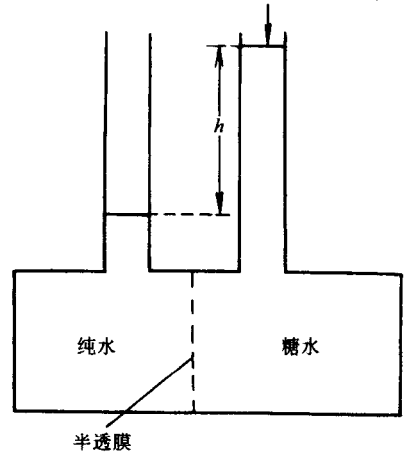


图 1-1-8 渗透压实验装置示意图

在上述实验装置中，以半透膜为界的容器左右两边水的浓度（即单位体积内水分子的数目）不同，糖水溶液中水的浓度相对地要比纯水小，所以在相同的时间里，半透膜左边容器内有许多水分子通过半透膜进入右边容器，而右边容器里水分子通过半透膜进入左边容器就相对地比较少。从总结果看，是左边容器里的水分子通过半透膜进入右边容器，发生渗透现象，使容器右边糖水溶液的液面上升，上升后左右两边液面的高度不同，产生了液位差；随着液位差的增加，糖水溶液受到水柱静压力的作用也越来越大，使得糖水内水分子的运动速度加快，水分子通过半透膜进入纯水的速度也就不断加快；当液柱的高度升至  $h$  时，在单位时间内水分子从纯水进入糖水的数目与糖水进入纯水的数目相等，因此糖水的液面也就不再增高了，这时进入了动态平衡，也叫渗透平衡。达到平衡时，溶液的液面比纯水高出一段，这段液面所产生的压力就称为溶液的渗透压。由上述的渗透现象，可给渗透压下这样的定义：维持渗透作用达到平衡时的压力。即阻止溶剂经半透膜进入所需要的压力叫渗透压。

根据渗透作用发生的原因，不难想象，只要半透膜两边溶液的浓度不同，渗透作用就会发生，即溶剂从低浓度一方通过半透膜向高浓度一方渗透。

2. 渗透压与扩散作用的关系 从分子传质的角度看，渗透就是溶剂从低浓度溶液经过半透膜向高浓度溶液扩散的过程。爱因斯坦首先提出，扩散作用与渗透压力之间有密切的关系，把浓度不同的溶液（ $C_1 > C_2$ ）用可以移动的半透膜分开，则溶剂分子竟通过半透膜从低浓度一方进入高浓度一方。溶剂分子从左向右移动的力是由于左右两方溶液浓度不同所产生的渗透压造成的。溶剂渗透的，膜也向左移动，一直到浓度均匀为止。如果上述装置开始时就不用半透膜分开，由于右边溶液浓度大于左边，溶质分子必然从右向左扩散，也直到左右两边浓度完全均匀才能停止。爱因斯坦指出，使溶质分子扩散的扩散力与使溶剂分子穿过半透膜的渗透力大小相等，但方向相反。上述现象与蔬菜腌制过程中所发生的现象十分类似，在腌制初期，蔬菜的细胞是有生命的，细胞膜就是半透膜，由于细胞液的浓度低于外界盐液的浓度，所以水分向外渗透，当蔬菜细胞死亡后，细胞膜失去阻止溶质通过的性质，这时食盐、糖等腌制剂就向蔬菜细胞内进行扩散，达到腌制的目的。

3. 渗透压的计算 在图 1-1-8 的装置中，糖水溶液因渗透作用所产生的液柱具有一定的压力，其数值为

$$P = 9.81\rho \cdot h$$

式中： $P$  为液柱产生的压力（ $\text{kN/m}^2$ ）， $\rho$  为溶液的密度（ $\text{kg/m}^3$ ）； $h$  为液柱的高度。