



食品流变学及其 测量

陈克复 卢晓江 金醇哲 王幼良 编译

陈克复 校

轻工业出版社

食品流变学及其测量

陈克复 卢晓江 金醇哲 王幼良 编译

陈克复 校

轻工业出版社

内 容 简 介

本书以乳制品、果汁、果酱、可可脂、动物油、起酥油、人造奶油、面团、冷饮等多种食品及其配料为对象，简明介绍了流变学特性测定的原理和方法。食品结构、食品加工操作和产品质量控制都与食品流变特性密切相关。目前，食品流变学在国外已发展为一门不可缺少的边缘学科，而在我国还处于空白状态。

本书可供从事食品专业工作的科技人员及有关院校的师生阅读参考。

食 品 流 变 学 及 其 测 量

陈克复 卢晓江 金醇哲 王幼良 编译
陈克复 校

轻工业出版社出版
(北京广安门南滨河路25号)
牛栏山一中印刷厂印刷
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：10 字数：224千字
1989年12月 第一版第一次印刷
印数：1—2,500 定价：6.50元
ISBN7-5019-0621-1/TS·0413

编译者的话

在食品工业中经常遇到流变学的问题，加工操作、实验检测和质量控制都用到流变学的基本原理，因此食品流变学与食品科学和技术密切相关。

随着食品工业的发展，人们对食品流变学的兴趣也日益增长，从事食品流变学研究和应用的科技工作者越来越多，目前食品流变学已发展成为一门食品工业不可缺少的边缘学科。

本书在论述食品流变学基本原理的基础上，着重对食品流变特性的测量，食品物质结构与流变特性的关系，食品流变学在加工过程和输送中的应用等方面进行了详细的论述，在最后一章还对食品流变学的发展方向进行了探讨。书中所论述的问题及所举的实例，在食品工业中都具有重要的实际意义。本书可供从事食品、轻工、化工、应用流体力学及机械工作的工程技术人员及高等院校有关专业师生参考，也可作为有关专业大学生和研究生的教学参考书。

本书主要参考穆勒（Muller）著《食品流变学入门》和普伦提斯（Prentice）著《食品流变学测量》两本书，同时还参考了谢曼（Sherman）著《工业流变学》及果律尔（Govier）著《混合介质的流动》等书的有关内容编译而成。其中陈克复编译第一、二、三、十三章，卢晓江编译第六、七、八章，金醇哲编译第九、十章，王幼良编译第四、五、十一、十二章。全书由陈克复副教授校订。

在此，我们深切地感谢隆言泉教授，是他启发我们对非牛顿流体力学和流变学的兴趣，并引导我们进入这学科的研究领域。同时感谢天津轻工业学院院长姚国雄教授，他一直支持我们的编译工作。

最后，若本书存在错误和不足之处，都应由我们负责，与原著者无关。如果读者能将所发现的错误和不足之处转告我们，我们将非常感激。

编译者

目 录

第一章 基本概念	1
第一节 引言	1
一、食品流变学	1
二、食品流变学与食品工业的关系	2
三、食品流变学的研究现状和发展	3
第二节 根据流变特性来区分食品物质	4
一、固体类食品物质	5
二、牛顿液体类食品物质	6
三、非牛顿液体类食品物质	7
四、塑性流体类食品物质	8
五、粘弹性体类食品物质	9
第三节 力和变形	9
一、作用力和应力	9
二、变形和应变	11
三、流动和剪切速率	12
第四节 食品物质中典型的流变特性	12
一、回弹现象	13
二、湍流阻力减小现象	15
三、存在屈服应力	15
四、流变特性转化	16
第二章 流变学实验模型	17
第一节 虎克实验模型	17
一、虎克实验模型	17
二、弹性模量	18
三、剪切模量	18

四、泊松比	20
五、体积模量	21
第二节 阻尼实验模型	22
一、阻尼实验模型	22
二、牛顿液体的粘度	25
第三节 幂定律模型	26
一、幂定律	26
二、表观粘度 η_a	28
第四节 宾汉实验模型	29
一、文思特滑片	29
二、宾汉实验模型	29
第五节 粘弹性体实验模型	32
一、麦克斯韦实验模型	32
二、开尔芬-沃格特实验模型	34
三、伯格斯实验模型	36
第三章 牛顿液体：特性和实例	38
第一节 简介	38
第二节 牛顿液体的结构	40
第三节 牛顿液体的层流和湍流两种流动类型	40
第四节 粘度和温度的关系	44
第五节 牛顿液体类食品物质的实例	45
一、糖水溶液	45
二、低浓度牛乳	47
三、食用油	51
第四章 非牛顿液体和塑性流体食品物质的流动	53
第一节 非牛顿液体的假塑性和胀塑性	53
一、假塑性液体	53
二、胀塑性液体	56

第二节 非牛顿液体的层流流动	58
一、在管道中的流速分布	58
二、摩擦系数及压头损失	61
第三节 塑性流体的层流流动	64
一、屈服应力	64
二、描述塑性流体层流流动的关系式	65
三、摩擦系数	67
四、总压力损失计算方程式	69
第四节 非牛顿液体的湍流流动	71
一、层流向湍流的过渡	71
二、非牛顿液体的湍流流动	72
第五节 塑性流体的湍流流动	74
一、层流向湍流的过渡	74
二、描述湍流流动的方程	75
第六节 输送计算过程	76
一、输送计算	76
二、计算举例	81
第五章 非均质体食品物质的流动特性	84
第一节 非均质流体	84
一、分散系统	84
二、两种处理方法	86
第二节 非均质流体的流变特性	87
一、爱因斯坦公式	87
二、悬浮液	39
第三节 悬浮液中各种力的影响	93
第四节 气泡与液滴的运动	98
一、气泡与液滴的形成	98
二、气泡与液滴的运动	102
第六章 食品物质的流变特性测量	106

第一节 引言	106
一、流变测量的目的	106
二、流变测量的基本方法和分类	107
第二节 固体食品物质的流变测量	108
一、固体食品物质各模量之间的关系	108
二、静态测量法	109
三、动态测量法	112
第三节 粘性液体的流变测量	114
一、毛细管测量法	114
二、回转测量法	125
第四节 粘弹性食品物质的流变测量	139
一、蠕变实验和应力松弛实验	139
二、振动测量法	147
第七章 流变测量的误差分析	156
第一节 流变测量的误差和精度	156
一、误差的基本概念	156
二、测量误差的主要来源	157
三、误差的性质及其分类	158
四、精度的概念	160
第二节 流变测量中的误差分析	160
一、毛细管测量法的误差因素及消除方法	160
二、回转法的误差因素及消除方法	162
三、应力松弛和蠕变实验的误差分析	174
四、粘弹性物质振动测量法的误差分析	176
五、试样特性引起的误差	177
第八章 食品物质流变测量实例	178
第一节 牛乳流变特性的测量	178
一、牛乳试样的配制和处理	178
二、测量方法的选择	179

三、测量操作及应注意的问题	181
第二节 面粉团的流变特性测量	190
一、面粉团的实验测定法	190
二、面粉团常用检测法	194
三、面粉团流变测量的结果分析	196
第九章 食品物质流变特性与微观结构的关系	199
第一节 关于测量方法的适应性	199
第二节 稀奶油流变特性的测量及分析	201
一、振荡粘度计测量结果及分析	201
二、蠕变法测量结果分析	205
第三节 分析流变特性测量结果时的注意事项	206
第四节 牛乳、奶油的微观结构	207
第五节 稀奶油的微观结构对流变特性的影响	209
一、概述	209
二、免疫球蛋白与粘度	210
三、稀奶油分离温度与结构、粘度的关系	211
四、微量组分对稀奶油流变特性的影响	214
五、均质化处理引起的牛乳结构与粘度的变化	215
第六节 非牛顿液体食品物质的流变特性与微观 结构的关系	216
一、结构	216
二、蜂蜜的流变特性	217
三、汤类的流变特性	219
第七节 粘弹性体食品物质的流变特性与结构的关系	221
一、结构	221
二、粘弹性液体的流变特性	222
三、粘弹性固体的流变特性	224
第八节 食品物质的胶粘性及其测量	226
第十章 塑性流体食品物质的结构与流变特性	229

第一节 塑性流体食品物质的结构	229
第二节 塑性流体食品物质屈服值的经验测量法	232
一、用穿透度计测量	232
二、挤压测量法	233
三、切割测量法	233
四、弯曲梁测量法	233
第三节 果汁的微观结构	234
第四节 果汁的流变特性	236
第五节 果泥的流变特性	238
第六节 融化巧克力的屈服应力	241
一、巧克力的特性	241
二、巧克力的结构	241
三、卡森方程式	242
第七节 巧克力的屈服特性与卡森方程式的应用	244
一、巧克力的两个表观屈服应力值	244
二、巧克力表观粘度的温度表面激发能	248
三、卡森方程式的应用	248
第八节 巧克力屈服应力的影响因素	250
第九节 软化脂的结构与流变特性	252
一、结构	252
二、软化脂屈服应力与涂抹性	254
第十节 软化脂流变特性测量结果及分析	256
一、回转粘度计测量结果	256
二、振荡粘度计测量结果	257
三、蠕变法测量结果	258
四、测量结果分析	260
第十一节 泡沫的屈服值及其测量方法	264
第十一章 食品流变学在乳制品生产中的应用	266
第一节 概述	266

第二节	炼乳生产中的流变学问题	267
一、	控制乳制品 表观粘度的重要性	267
二、	炼乳生产过程中表观粘度的 控制	269
第三节	干酪形成过程中的流变 学问题	278
一、	干酪的 生产 工艺	278
二、	干酪生产中的流变学问 题	280
第四节	干酪生产过程中流变特性的有关测量	284
一、	凝固时间的 测量	284
二、	蠕变实验	286
三、	强制压力实验	288
第十二章	食品添加剂的流变学问题	292
第一节	概 述	292
第二节	汉生胶 (Xanthan gum) 的应用	293
第三节	瓜尔豆胶的 应 用	298
第四节	亲水性 胶体 (Hydrocolloid) 的应用	302
第五节	凝胶的 形成	306
第十三章	结论及进一步探讨	311
第一节	本书 的研究重点	311
第二节	食品流变学测量的用途	312
第三节	计 算 机 在流变测量中的应用	315
第四节	展 望	316

第一章 基本概念

第一节 引言

一、食品流变学

物理学把物质分为两类：一类是不经任何外部因素的作用就能保持自身的形状；另一类只有在容器里才能取得自身的形状。前者称为固体，后者称为流体。流体又分为液体和气体。液体没有固有的形状，但在结构元素之间具有足够的内聚力而保持一定的容积，气体能够随意扩散而占据任何容器的体积。

食品物质种类繁多，从物理特性来看，可以有硬质型或柔软型的，脆性型或韧性型的，光滑型或粘性型的，流动型或固形型的。因此，虽然一些食品物质能明显地表现出固体或流体的特性，但大多数食品物质在外力作用下所表现出的物理特性使人很难区分它属于固体或流体，往往是既具有固体的特性又具有液体的特性。

因此，根据其物理特性可以把食品物质简单地分为下列几大类：主要具有固体特性的食品物质，归属于固体；主要具有液体特性的食品物质，归属于液体；同时表现出固体特性和液体特性的食品物质，归属于粘弹性体；同时具有固体特性和液体特性，但主要是表现液体特性的食品物质，归属于塑性流体。

液体又可分为两类：凡符合牛顿粘性定律的液体食品物

质，归属于牛顿液体；凡不符合牛顿粘性定律的液体食品物质，归属于非牛顿液体。

食品优劣的评价方法，可以通过对颜色的观察，气味和滋味的品尝，用接触、挤捏、咀嚼等手段来了解食品物质的物理特性，即通过人们的心理感觉来鉴别食品物质。这是一种心理感觉处理方法，虽然现在已发展为用仪器代替感觉器官，由灵敏仪器按照人们喜爱的标准划分食品物质的等级，但尽管如此，这还是属于心理感觉的处理方法。

评价食品物质优劣的另一种方法就是通过测定其流变特性的方法，或叫食品流变学方法，即由食品物质本身所具有的流变特性来鉴定它的质量，评价它的优劣。

流变学是力学的一个分支，是研究物质在力作用下变形的科学。主要是研究和处理外观上连贯的粘性物质的变形问题，同时也研究和处理生产工艺过程中物质的流动和物质物理性质变化的问题。通过对物质流变特性的测定，可以控制产品的质量，鉴别成品的优劣，并且可以为工艺及设备的设计提供有关的数据。可以认为，流变特性检测是目前生产过程中必不可少的检测手段之一。不管食品物质是属于固体、牛顿液体、非牛顿液体、塑性流体还是粘弹性体，都具有一定的流变特性，都可以通过检测流变特性来评价食品物质。

食品物质中具备哪些流变特性，如何测定其流变特性，在实际生产中如何应用食品流变学，是本书所要讨论的内容。

流变学既可以应用于食品工业，同样也可以应用于化工、塑料、橡胶、石油、机械等工业。

二、食品流变学和食品工业的关系

从下列四个方面可看出流变学和食品工业的密切关

系：

1. 食品流变学的实验，可以用于鉴别食品原材料、中间产品，可以用于控制生产过程。因此，它对于提高食品的质量，调节生产工艺过程具有一定的作用。例如，在面包制作过程中面团的流变控制就是一个实际例子。

2. 流变学能够根据顾客的爱好的，鉴定或预测顾客对某种食品是否满意。例如，人造奶油的扩展能力（即扩展度）、牛乳的粘度、硬糖果的硬度、肉的韧度都是可以用来鉴定食品优劣的流变特性。

3. 流变学研究可深入到食品物质的组织结构中，它可以反映出组织的特性，这就可以在食品制作过程中通过调节中间产品的标准流变特性来达到调节组织结构的目。

4. 流变学已经应用于有关的工艺设计和设备设计，例如泵送管路系统，放料装置及搅拌装置的设计，乳化、雾化及浓缩工艺过程的设计，都要用到物质流变特性数据。

以上四个方面，也是为什么要研究食品流变学的原因。

三、食品流变学的研究现状和发展

60年代初期在国外，与食品工业有关的报刊中就常见有食品流变学方面的论文，当时着重于某一食品流变特性的测定，例如牛乳的流变特性测定，但对于如何利用食品流变特性来控制食品生产过程、评价食品的优劣，还是较少提及。60年代后期，才开始进行食品流变学应用的研究。

1973年，B. Muller在总结了自己和他人的科研成果的基础上，编著出版了《食品流变学入门》(Introduction to Food Rheology)一书，对推动食品流变科学的发展和应用，起了极为重要的作用。从此，食品流变学在食品工业中

得到了广泛的应用,食品流变学的研究又有了进一步的发展。

J. Prentice 在 1984 年编著出版的《食品流变学测量》(Measurement in the Rheology of Foodstuffs),不但解决了食品物质流变特性的一系列测量问题,而且从微观结构的角度解决了流变特性的变化问题,为食品流变学控制生产工艺过程,提供了理论依据。

但是,目前用测定食品物质的流变特性来鉴别食品还存在两方面的困难。一是食品物质的品种繁多,分布范围广,有液态的、固态的、气态的、高流变特性系数的、低流变特性系数的;二是原有食品不断更新,新产品不断出现。这样,对流变仪器的灵敏度和适应范围就提出了更高的要求,使得如何用流变特性来评价新的食品物质的课题永远存在。

第二方面的困难就是不同条件下食品物质往往具有不同的流变特性。例如,食品物质的表现形式随温度不同而异,结构形式对流变特性影响也很大。另外,压力、流速对流变特性都有影响。因此,如给出某一食品物质的流变特性,一般是指在一定条件下及一定结构形式下的数值。

食品流变学家在今后的研究中,将设法寻找同一种类食品物质所具有的流变特性的规律性,寻找浓度、温度、压力、流速等操作条件与流变特性的关系,解决用流变特性控制产品和调节工艺流程的准确性等一系列的问题。

第二节 根据流变特性来区分食品物质

在处理大范围的物质中,流变学家首先规定了两类理想的基本物质;一类叫虎克固体,是用R. 虎克(R. Hooke)

的名字来命名的；一类叫牛顿流体，是用S. 牛顿(S. Newton)的名字命名的。虎克固体是理想固体，不存在任何流体的性质；牛顿流体是理想的流体，不存在任何固体的性质。这两种物质都是各向同性的，各自遵循各自的定律，但都是理想化了的物质，事实上在自然界中是不存在的。

根据这两种极端状态的物质，按流变特性就可把食品分为第一节中所提到的几大类：

一、固体类食品物质

虎克固体是固体物质的理想概念，它具有变形与作用力大小成正比例的特性。虎克固体所遵循的虎克定律为：

$$\text{应力} = \text{应变} \times \text{比例系数} \quad (1-1)$$

变形与作用力的作用时间的关系曲线，表示了虎克固体一旦受力作用就立即出现变形，作用力一旦消失，变形也就完全恢复，如图1-1所示。因此虎克固体也称为理想弹性体。

事实上，有许多物质在力作用下其变形不超过1%时，能基本上满足理想弹性体的特性定义，呈现出虎克固体的性质，流变学家就把这些物质不确切地称为固体。

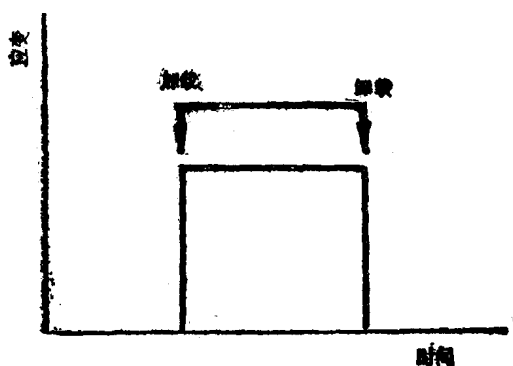


图 1-1 虎克固体的特性曲线