

第八讲 食物质构与口感（中）



三、食品流变学概念



牙膏——一个最常见的流变问题



使用牙膏时挤出要容易，挤出后要求挺括，在牙刷上不能下陷，刷牙时又要轻松，这就要求牙膏遇到剪切时粘度迅速下降，静止时又具有一定的屈服应力，以保持坚挺。

1、什么是流变学？什么是食品流变学？

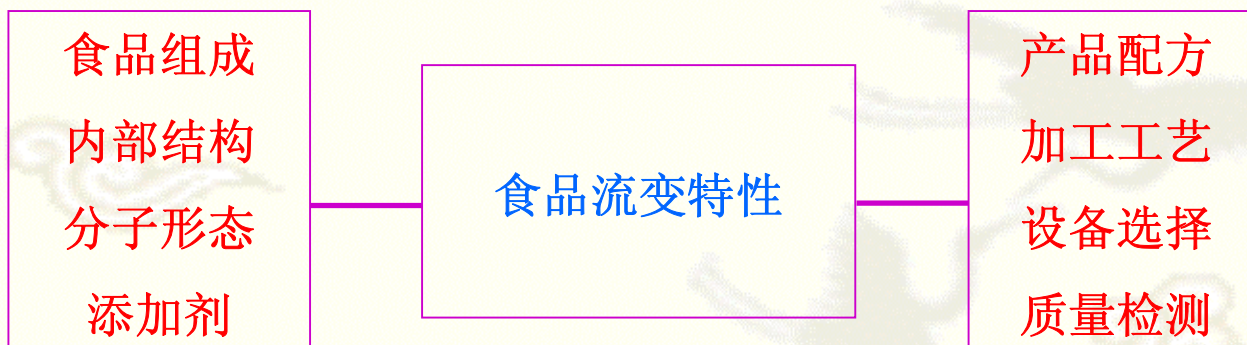
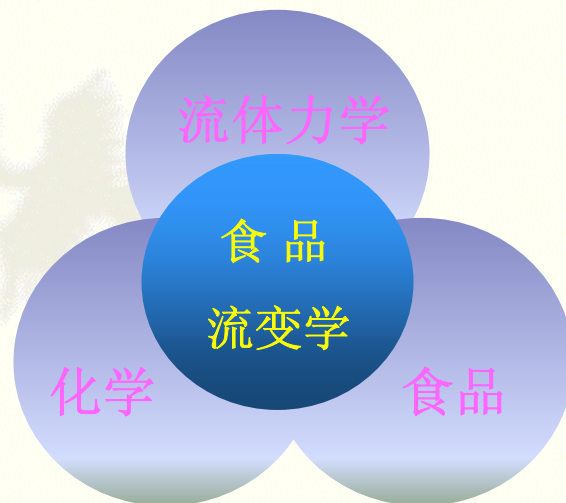
- **流变学**是研究物质的流动与变形的科学，是把**固体**和**液体**的性质结合为**整体**作为对象进行研究。
- 食品流变学
 - 研究内容——作用于物体上的应力和由此产生的应变规律，是**力、变形和时间的函数**
 - 研究对象——食品物质
 - **液态食品**、固态食品、半固态食品



流变学涉及的相关学科与对象



食品流变学



食品流变对改进食品加工的作用



食品流变学的研究意义

- **产品开发**：组分的功能性
- **原料组分**：质量保证
- **加工工艺**：在泵、管道、挤压机、混合设备、均质机、热交换器中的流动行为
- **包装设计**：输送能力
- **终产品**：质量控制，稳定性
- **消费特性**：连续性，涂抹性，口感，外观，质构等





流变学

- 不仅是一重要的学科领域
- 同时也是一重要的研究方法

流体的粘性

定义：粘性是流体具有的一个重要性质。是当液体微元发生相对运动时，产生的一种**抵抗变形、阻碍流动的性质**。

- 粘性的表示：**粘度 流体最基本的特性参数**
- 产生条件：流体流层发生相对运动

流变学在某种意义上就研究流体的粘度及影响因素，如温度、剪切力、微结构等。



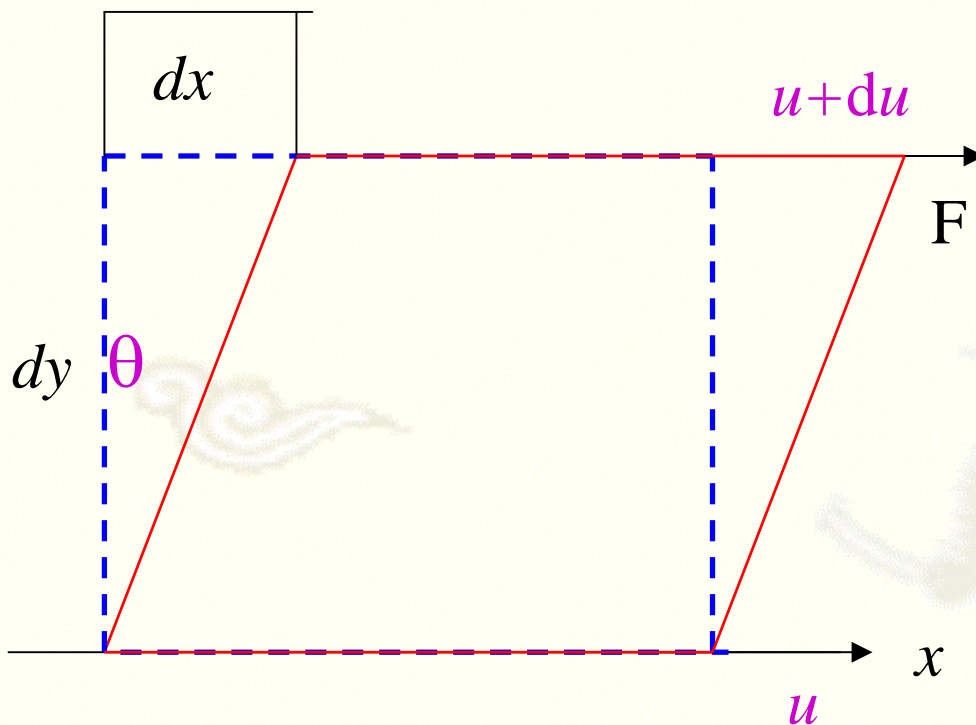
怎样理解粘度的概念:

应力: 单位面积的作用力

应变: 单位长度的变形

粘度 = 应力 / 应变

(物体对流动的内部抗力或阻力)



剪切速率 shear rate

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\theta}{dt} = \frac{dy}{du}$$

剪切应力 shear stress

$$\sigma = F/A$$

(单位时间的变形程度)

牛顿粘性定律

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$$

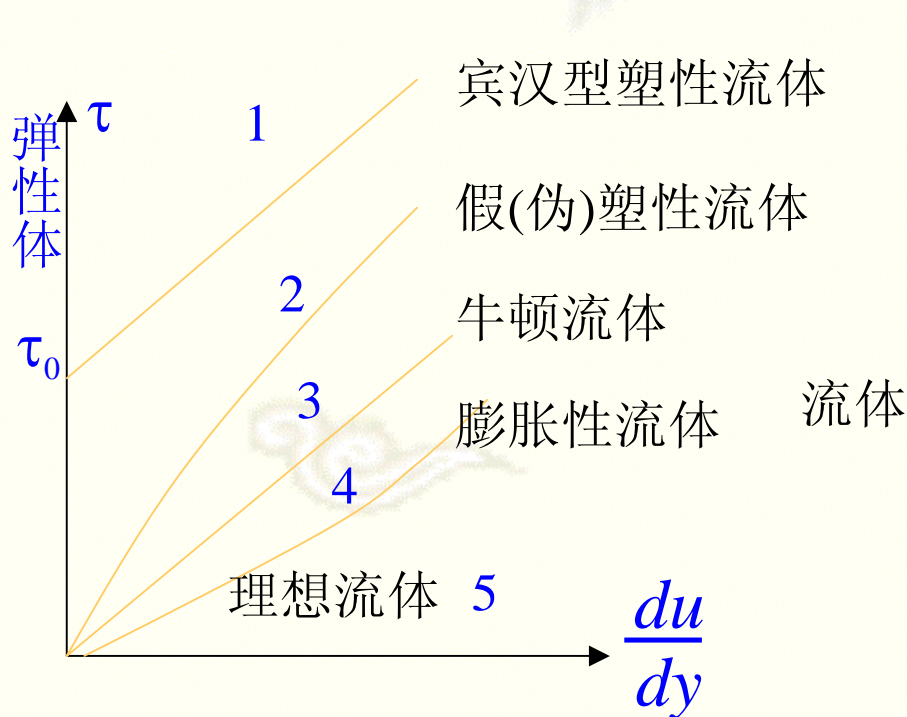
η : (剪切)粘度, 是促使液体产生单位速度梯度即剪切速率所需的剪切应力。



2、流体的类型

牛顿流体（Newtonian Fluids）：是指任一点上的剪应力都同剪切变形速率呈**线性函数**关系的流体，即遵循牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。

非牛顿流体：不符合上述条件的均称为非牛顿流体。



$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

- 1、宾汉型流体： $\tau_0 \neq 0, n=1, \mu = \text{Const}$
- 2、假(伪)塑性流体： $\tau_0 = 0, n < 1$
- 3、牛顿流体： $\tau_0 = 0, n=1, \mu = \text{Const}$
- 4、膨胀流体： $\tau_0 = 0, n > 1$
- 5、理想流体： $\tau_0 = 0, \mu = 0$

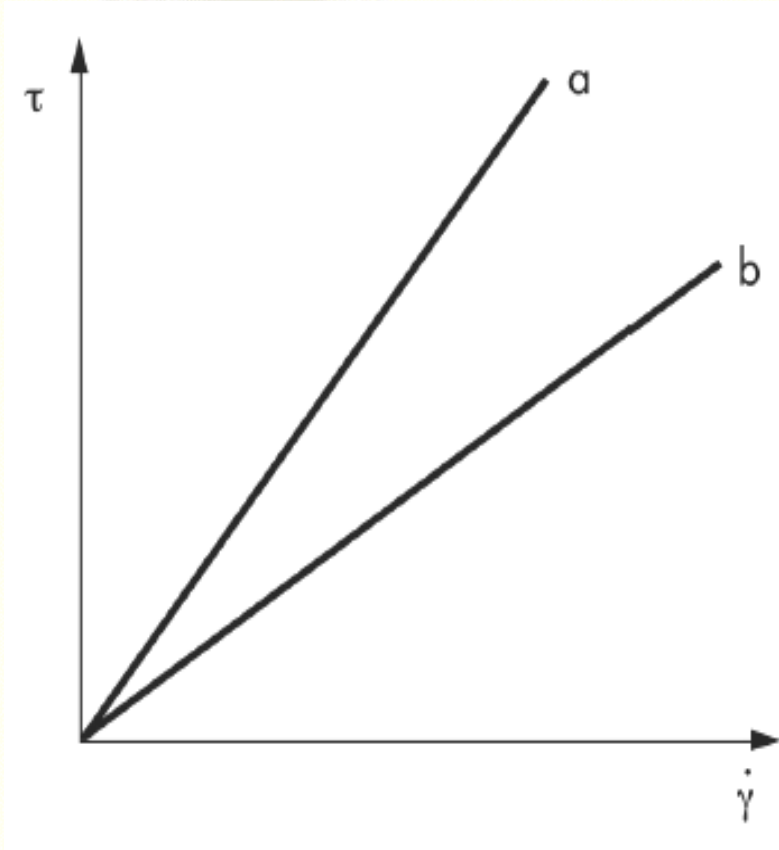


流 体 分 类

流体类别		定义	$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n$	实 例	
理想流体		无粘性及完全不可压缩的流体的一种假想流体	$\mu=0$ 、 $\tau_0=0$		
实际流体	牛顿流体	有粘性、可压缩的流体 $\mu \neq 0$	满足牛顿内摩擦定律 $\tau_0=0$ 、 $\mu \neq 0$ 、 $n=1$	水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等	
	非牛顿流体		$\tau_0 \neq 0$ 、 $\mu = Const$ 、 $n=1$	牙膏、泥浆、血浆等	
			宾汉型塑性流体	$\tau_0=0$ 、 $\mu \neq 0$ 、 $n < 1$	橡胶、油漆、尼龙等
			假塑性流体	$\tau_0=0$ 、 $\mu \neq 0$ 、 $n > 1$	生面团、浓淀粉糊
	膨胀性流体				



食品的流动曲线类型



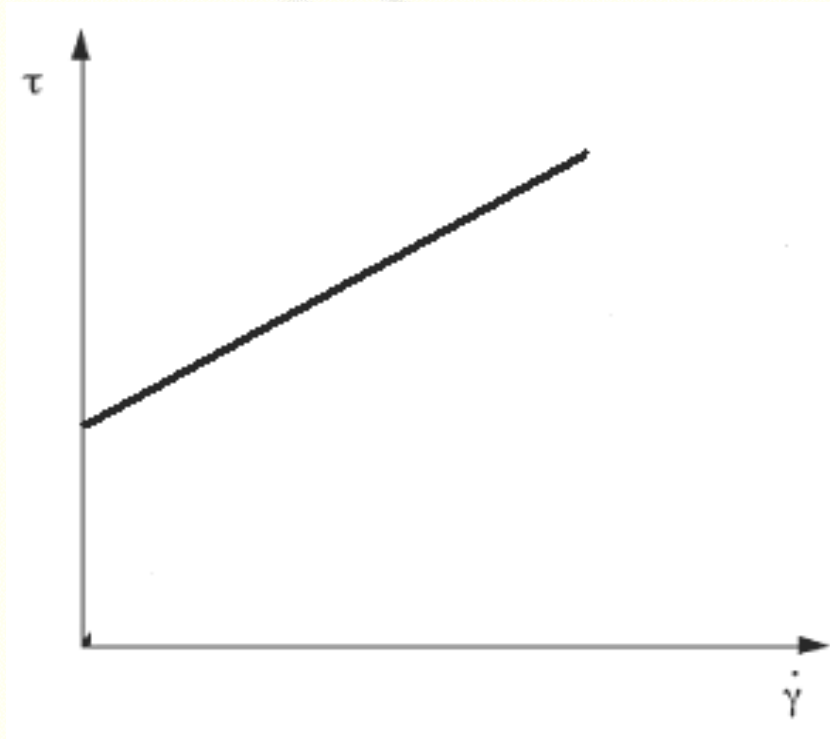
➤ 牛顿流动

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

水、酒、醋、油
不含果胶的果汁
澄清的胡萝卜汁
普通的蜂蜜

.....

食品的流动曲线类型—非牛顿流体



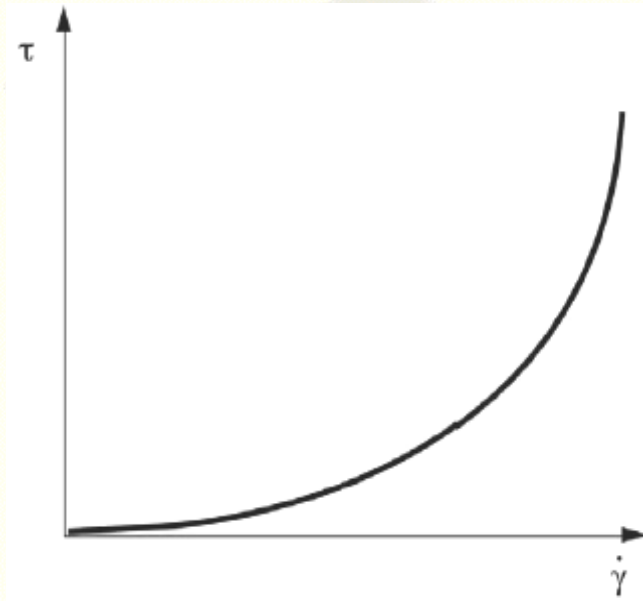
➤ 塑性流动

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma}$$

浓果酱
巧克力浆
干酪

.....

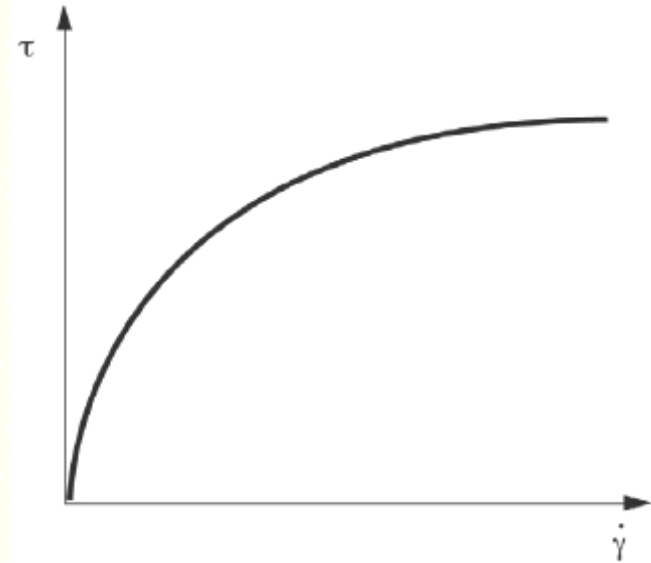
食品的流动曲线类型—非牛顿流体



膨胀流动

玉米淀粉浆料
低浓度的牛奶

.....



假塑性流动

含有果胶的果汁
高浓度的牛奶

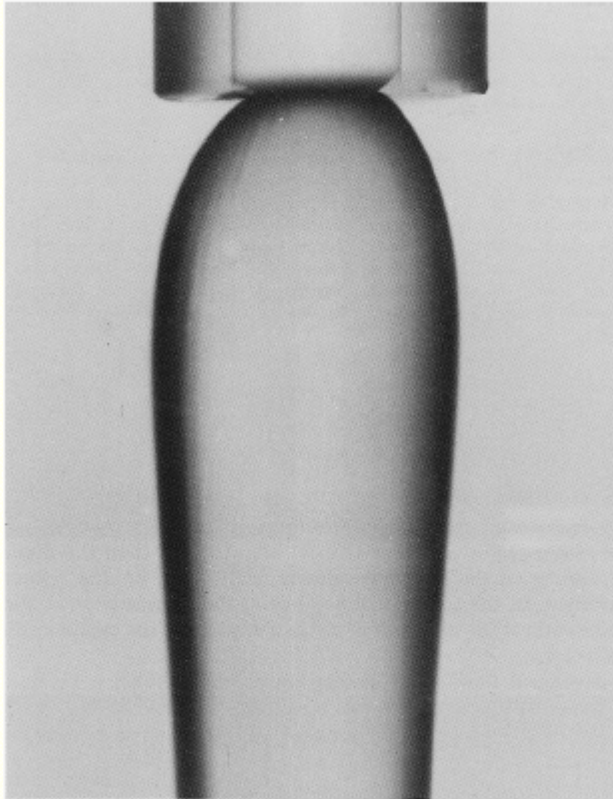
.....

$$n > 1$$

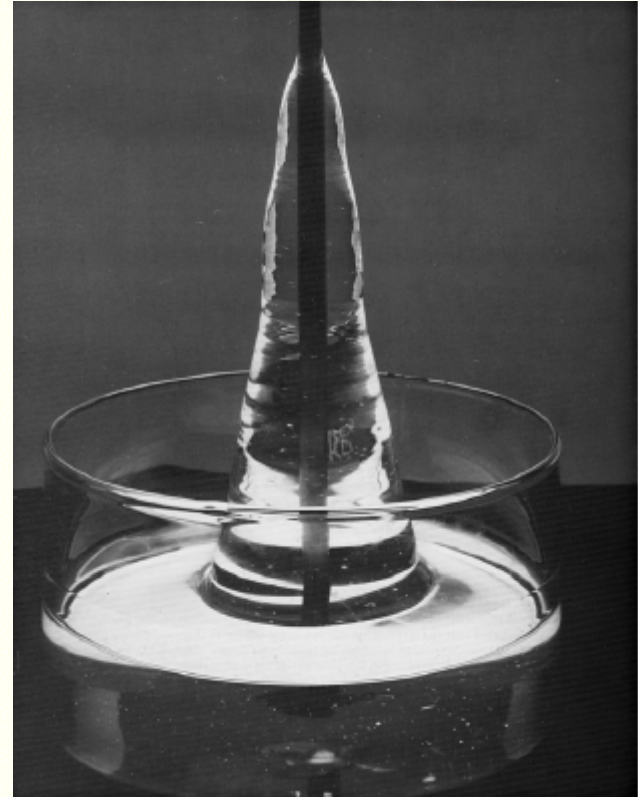
$$\tau = K \dot{\gamma}^n$$

$$n < 1$$

食品的弹性



挤出胀大



Weissenberg 效应

(爬杆现象)

3、液态食品的流变性质及测定

- 食品分散体系：
 - 分散相、分散介质
 - 泡沫、乳胶体、溶胶、悬浮液
- 液态食品分散体系的粘度
- 液态食品流变性的测量
 - 流变仪操作指南



(1) 液态食品分散体系的粘度

- 一般分散体系溶液的粘度比分散介质的粘度大
- η_0 : 分散介质粘度
- η : 分散体系溶液的粘度

粘度 η

相对粘度 $\eta_r = \eta/\eta_0$

比粘度 $\eta_s = (\eta - \eta_0)/\eta_0 = \eta_r - 1$

换算/还原粘度 $\eta_d = \eta_s/c$

特性粘度 $\{\eta\} = \ln(\eta/\eta_0)/c = (\ln \eta_r)/c$

极限/固有粘度 $[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{C} = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\ln \eta_r}{C}$



影响液态食品粘度的因素

- A. 温度
- B. 分散相：浓度、粘度、形状
- C. 分散介质
- D. 乳化剂



食品的粘弹性

粘弹性液体

白脱花生酱

冰淇淋

软化脂

粘弹性固体

面团

果冻

棉花糖

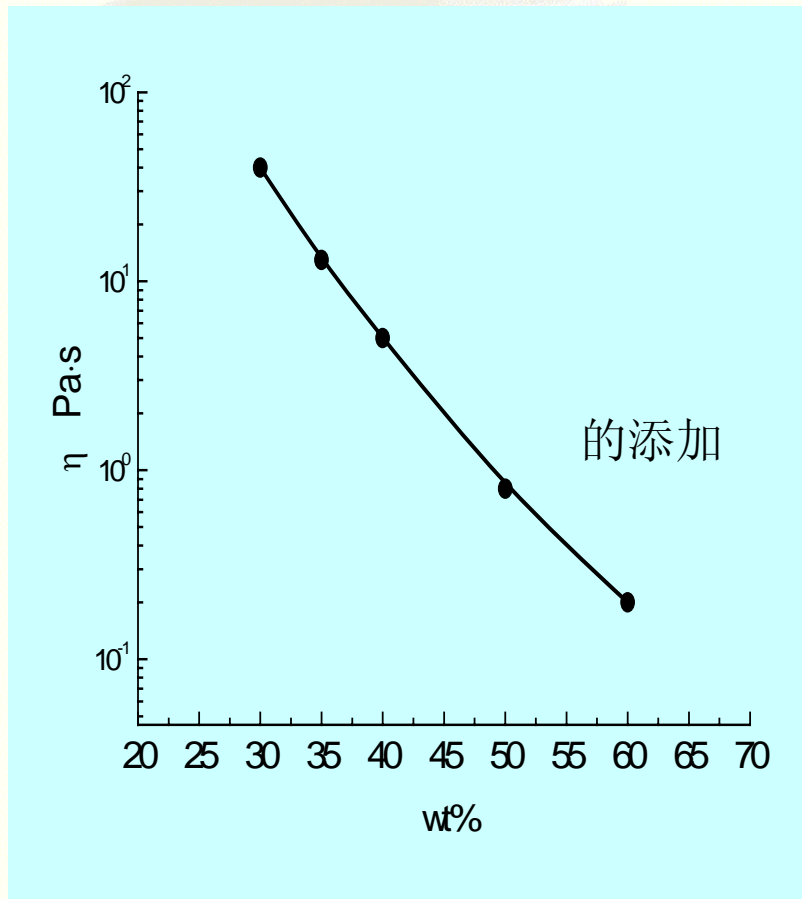


流变特性对搅拌过程的影响

在搅拌各种浆料之类的假塑性食品时，
应采用大浆叶低转速的搅拌器。

浆叶所在的区域的流体受力粘度迅速降低，
但在浆叶以外的区域却因粘度较大而不能流动。

巧克力浆



巧克力浆粘度和可可脂含量的关系

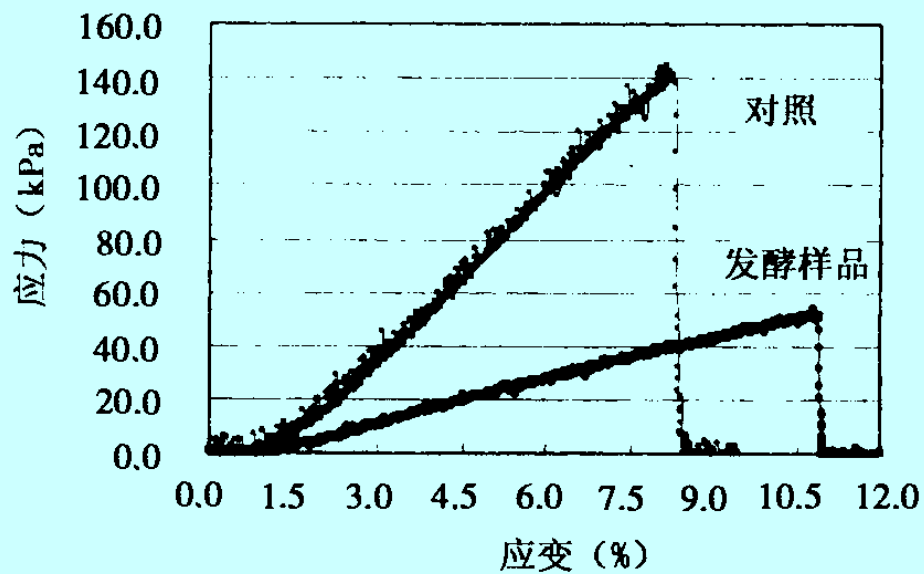
可可脂含量增加
粘度下降

5%可可脂

0.3% ~ 0.5%磷脂

代用脂的数量

自然发酵米粉



最大破裂应力减小
而最大拉伸应变增大



口感柔韧、劲道

发酵样品与对照样品的应力应变关系

(2) 液态食品流变性质的测定

A. 粘度的测定

- 毛细管粘度计— 测液体在毛细管里的流动速度
- 落球式粘度计— 圆球在液体中落下的速度
- 转动式粘度计— 液体在同轴圆柱间对转动的阻碍
 - 圆筒旋转粘度计
 - 锥板式粘度计

B. 非牛顿流体的浓度系数和流动特性指数测定

C. 塑性流体的屈服应力测量

测定原理：一旋转，二拉升，三落穿。



流变特性的测量仪器

粘度计



毛细管流变仪



旋转流变仪



转矩流变仪



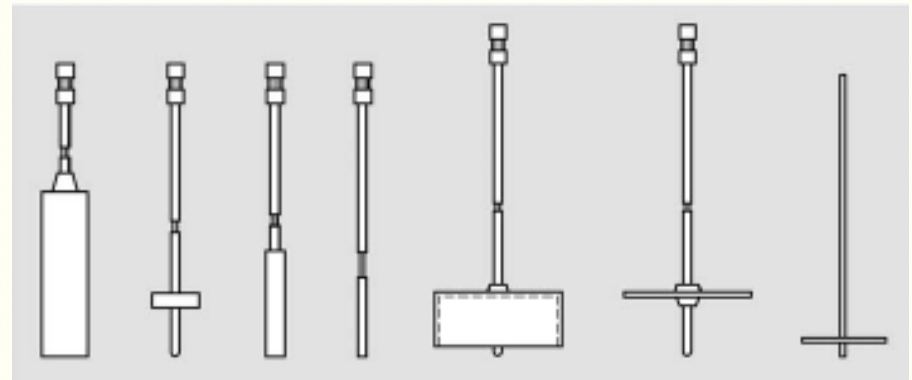
拉伸流变仪



流变特性的测量仪器



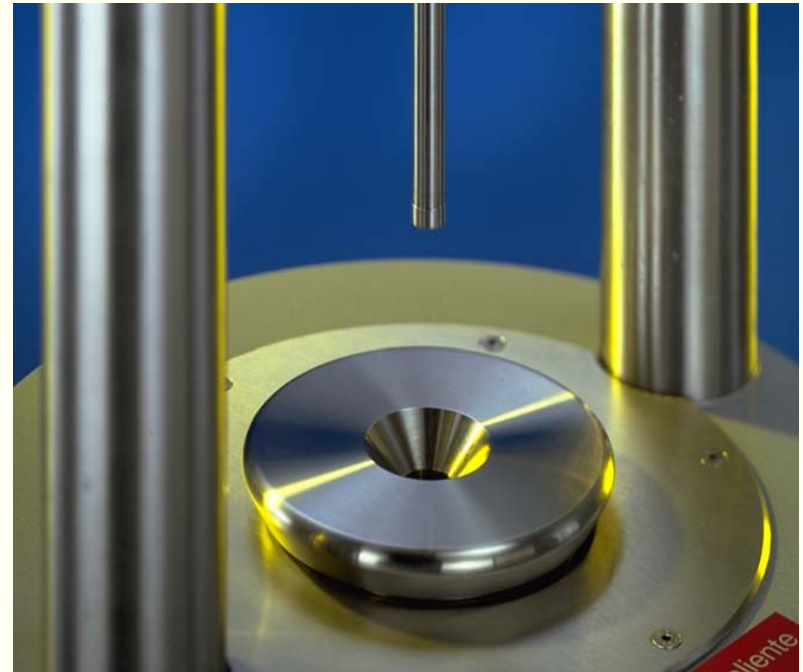
Brookfield 粘度计



流变特性的测量仪器



Rheoflizer



流变特性的测量仪器



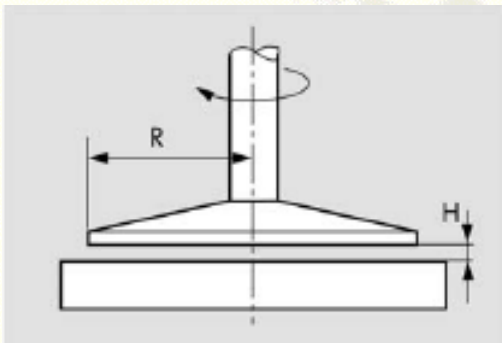
ARES

流变特性的测量仪器



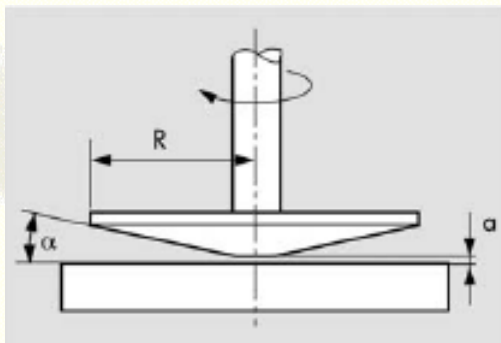
**AR-G2 Magnetic
Bearing Rheometer**

旋转流变仪的夹具



平行板

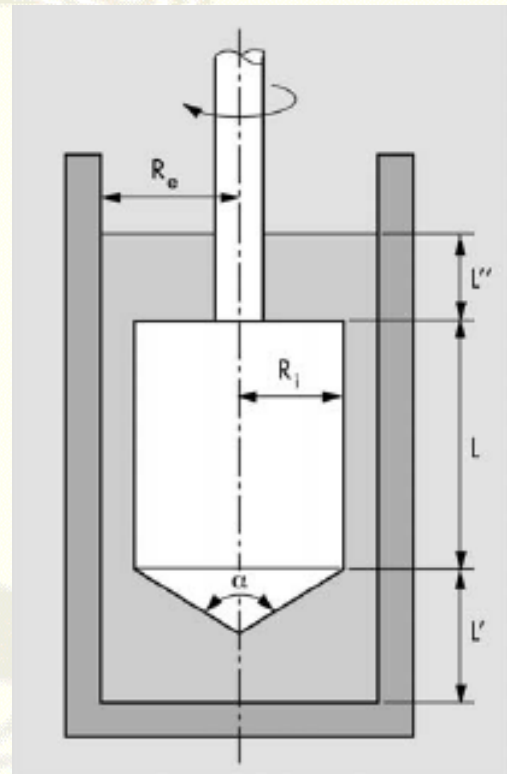
易加料、易清洗
间距可调
流场不均匀



锥板

剪切速率范围较小，
对加料的要求较高
间距不可调

流场均匀，不需要流变
学模型



同心圆桶





流变特性测量和分析研究进展

实验方法的
改善和完善

新型狭缝流变仪

带桨叶的同心圆桶

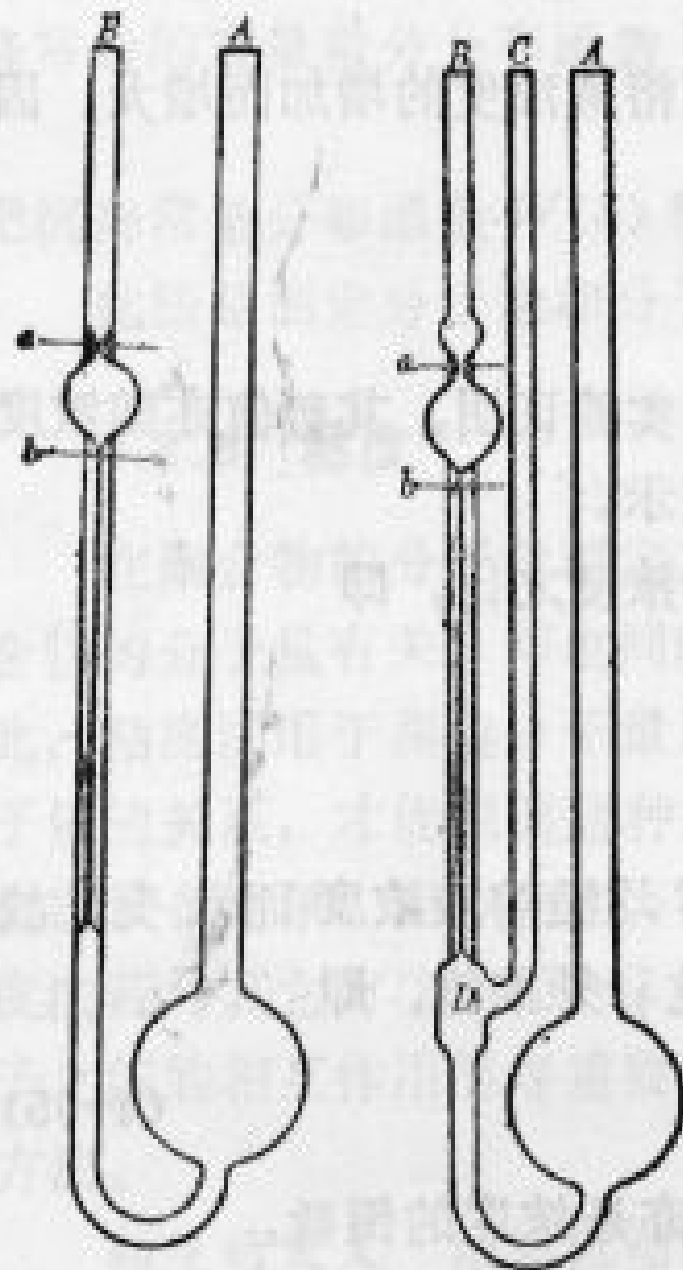
三平板测试蠕变模量

新方法、新仪器

超声波测量技术

影像云纹法

- **奥氏粘度计**：液柱与大球中液面高度有关，所以每次测定时液体的体积必须固定
- **乌氏粘度计**：不受此限制，当液体自A管的大球吸到B管时，C管关闭，然后打开C管，D球与大气相连，毛细管下端的液面下降，在毛细管内流下的液体，形成一个悬液柱，出毛细管时沿壁流下，液柱高度 h 与A管内液面的高度无关，仪器常数就不受A管液面的影响。



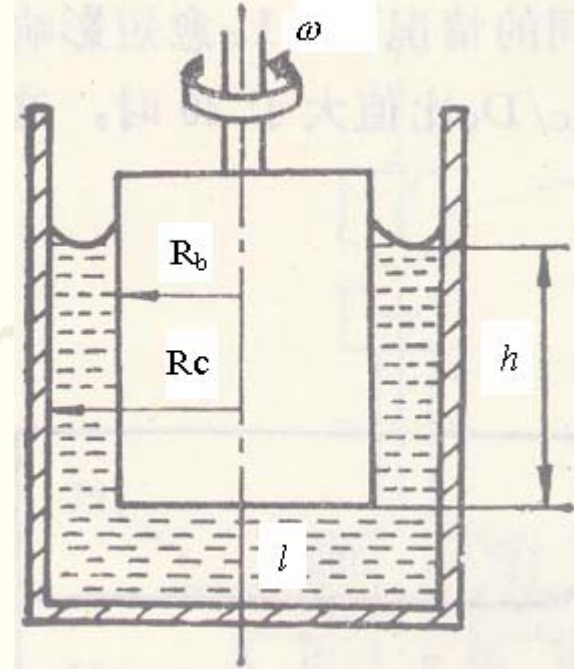
两支管（奥氏）

三支管（乌氏）

同轴圆筒旋转粘度计

一种外筒转，内筒不动；
一种内筒转，外筒不动。
以内筒浸入被测液体中，
内筒以角速度 ω 转动。

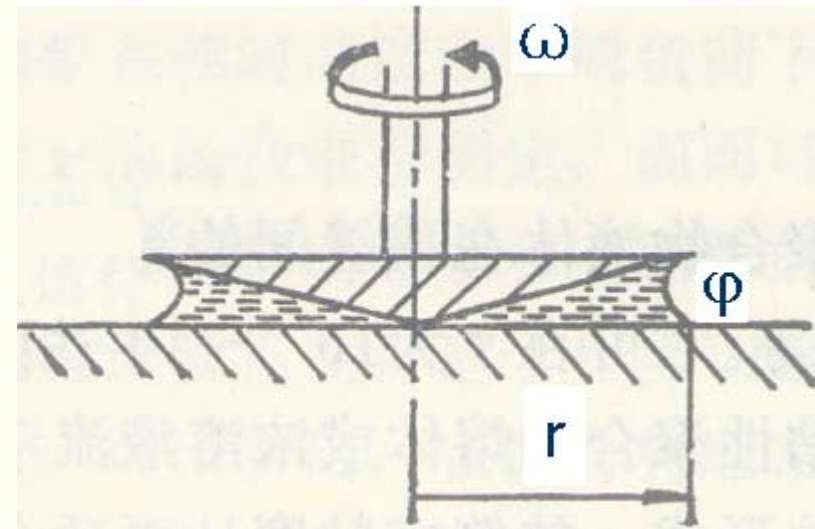
$$\eta = \frac{M}{4\pi h\omega} \cdot \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right)$$



$$\omega = 2\pi n / 60$$
$$\text{力矩 } M = K\theta$$

$$\eta = K_0 \cdot \theta / n = K_n \cdot \theta$$

锥板式粘度计



- 粘度计内各点的剪切速率是均匀的，这是它与圆筒型的主要区别，使之适于测定非牛顿液体的粘度

$$\eta = K_n \cdot \theta = K_0 \cdot \theta / n$$

$K_n = K_0 / n$: 换算系数

$$K_0 = \frac{3K\phi}{0.2094\pi R^3} : \text{仪器常数}$$

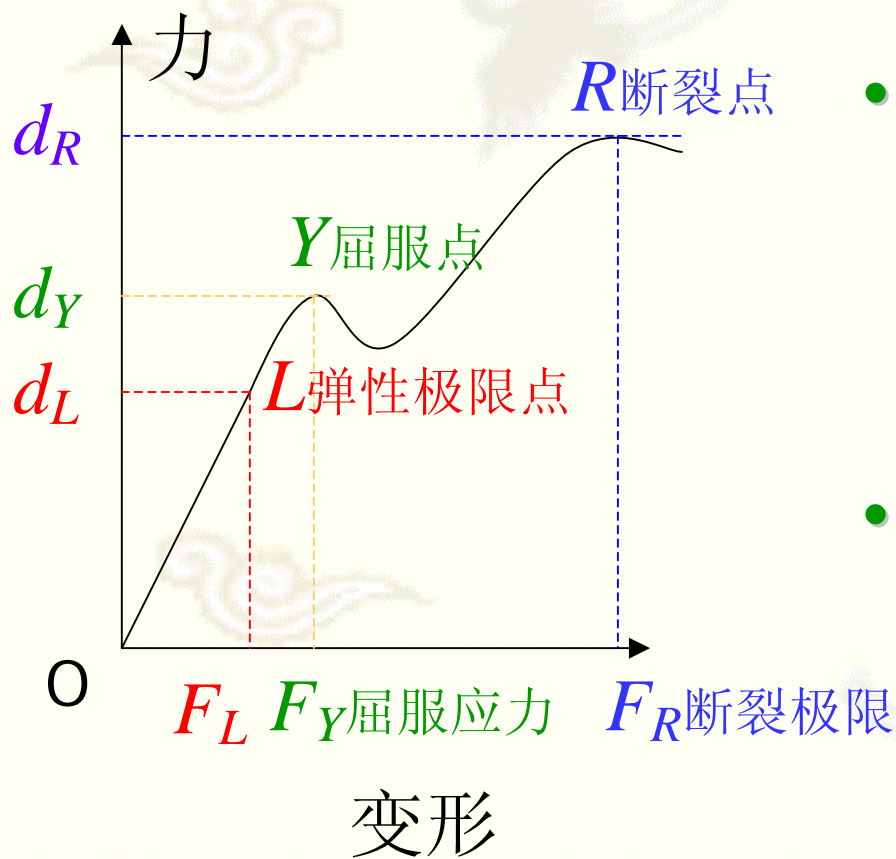
- 各种方法测定的粘度范围

粘度计	落球	毛细管	平行板	转动圆筒	转动锥板
测定粘度范围	$10^{-4} \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^6$	$10^4 \sim 10^9$	$10^0 \sim 10^{12}$	$10^3 \sim 10^{12}$

4、固态和半固态食品的流变特性

- 食品的变形
- 固态食品
- 半固态食品
- 食品的弹性
- 食品的粘弹性

食品的变形：脆性断裂和塑性断裂



- **脆性断裂**：屈服点与断裂点一致，如饼干、琼脂、巧克力、花生米、香蕉、香肠等
- **塑性断裂**：样品经塑性变形后断裂，如面包、面条、米饭、水果、蔬菜等

食品的弹性

• 食品的弹性

- 弹性：物体在外力作用下发生形变，撤去外力后恢复原来状态的性质。
- 完全弹性：撤去外力后形变立即完全消失的弹性。
- 弹性极限：形变超过某一限度时，物体不能完全恢复原来状态，该限度即为弹性限度。

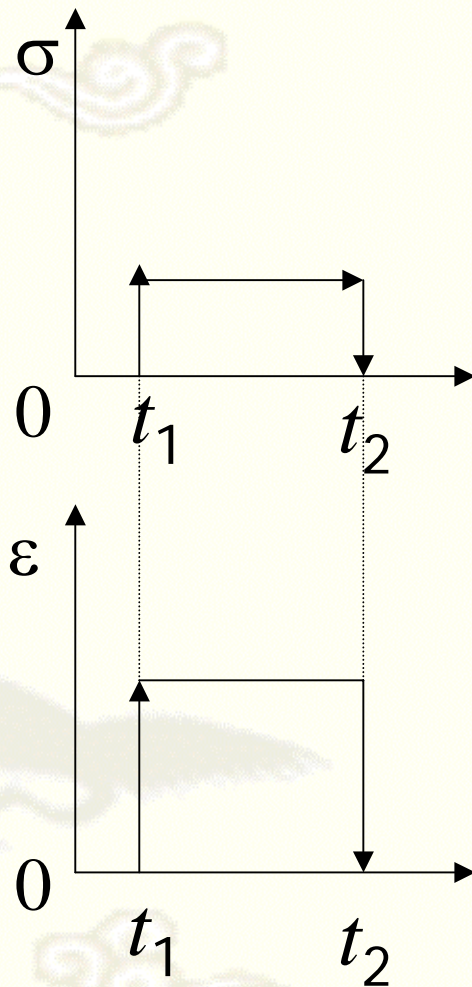
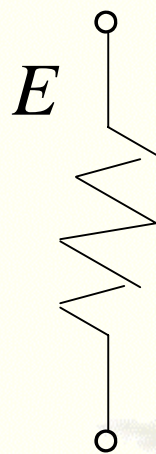
• 固态食品的概念

- 虎克固体是固体物质的理想概念，其变形与作用力大小成正比，一旦受力作用就发生变形，作用力一旦消失，变形也完全恢复，故也称理想弹性体。
- 许多物质在力作用下其变形不超过1%时，能基本满足理想弹性体的定义，呈现虎克固体的性质，即为固体。
- 例子：干面团、硬糖果、核桃、蛋壳等
- 流变特性参数：弹性膜量、剪切膜量、容积膜量、泊松比

虎克模型

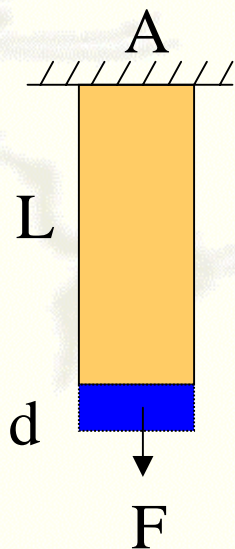
- 用受力作用而伸长的理想弹簧来表示完全弹性体的力学表现，即加上荷载的瞬间同时发生相应的变形，变形大小与受力大小成正比。
- 虎克定律：在弹性极限范围内，外力 F 和变形量 d 之间成正比关系

$$F = kd \quad k: \text{弹性系数}$$



弹性系数

弹性/杨氏模量



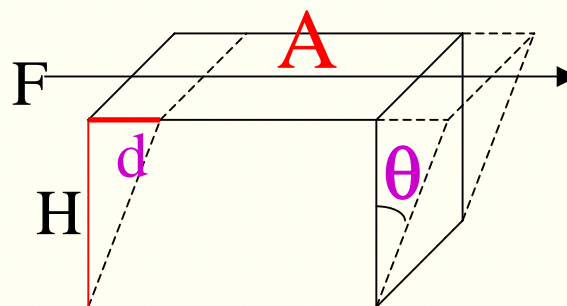
拉伸应力 $\sigma_n = F/A$

拉伸应变 $\varepsilon_n = d/L$

$$\sigma_n = E \cdot \varepsilon_n$$

$1/E=J$: 弹性柔量

剪切模量



剪切应力 $\sigma_\tau = F/A$

剪切应变 $\varepsilon_\tau = d/H = \tan\theta = \theta$

$$\sigma_\tau = G \cdot \varepsilon_\tau = G \cdot \theta$$

$1/G=J$: 剪切柔量

半固态食品

- 定义：兼具固体的弹性和流体的粘性，也称粘弹性体
- 例子：面粉团、米粉团、冻凝胶等
- 流变特性参数：蠕变、应力松弛
 - 应力松弛：试样瞬间变形后，在变形（应变）不变情况下，试样内部的应力随时间的延长而减少的过程，是以一定大小的应变为条件的。
 - 蠕变：把一定大小的应力施加于粘弹性体时，物体的变形（应变）随时间的变化而逐渐增加的现象，是以一定大小的应力为条件的。
- 特点：力及力的作用时间与变形的关系

固态和半固态食品的流变性质测定

- 基本力学试验
- 应力松弛试验
- 蠕变试验
- 动态粘度的测定
- 滞后曲线试验





国内、外食品流变学研究差距

- 缺乏系统的理论研究
- 与工程实际缺乏紧密联系，特别是有针对性地利用流变学方法解决工程问题的研究更为缺乏
- 对于结构与流变特性关系的研究较少
- 质构特性和流变特性的关系的研究基本处于空白

The background of the slide features a light beige color with faint, stylized illustrations of birds in flight and traditional Chinese clouds scattered across the space. The text is centered and rendered in a dark red, serif font with a subtle drop shadow.

流变学是一种非常有效的研究方法，但它同时也需要和其它的测试、分析方法共同使用。