

## 第四章 食品的物理检测法

根据食品的相对密度、折射率、旋光度等物理常数与食品的组分含量之间的关系进行检测的方法称为食品的物理检测法。物理检测法是食品分析及食品工业生产中常用的检测方法之一。

### 第一节 概述

#### 一 物理检测的意义

相对密度、折射率和比旋光度与物质的熔点和沸点一样，也是物理特性。由于这些物理特性的测定比较便捷，故它们是食品生产中常用的工艺控制指标，也是防止假冒伪劣食品进入市场的监控手段。通过测定液态食品的这些特性，可以指导生产过程、保证产品质量以及鉴别食品组成、确定食品浓度、判断食品的纯净程度及品质，是生产管理和市场管理不可缺少的方便而快捷的监测手段。

#### 二 物理检验的内容与方法

##### 1 相对密度

蔗糖溶液的相对密度随糖液浓度的增加而增大，原麦汁的相对密度随浸出物浓度的增加而增大，而酒中酒精的相对密度却随酒精度的提高而减小，这些规律已通过实验制定出了它们的对照表，只要测得了它们的相对密度就可以从附表中查出其对应的浓度（参看《制糖分析》附表1和《工业发酵分析》附表4-3，4-4）。

对于果汁、番茄汁等这样的液态食品，测定了相对密度便可通过换算或查专用的经验表确定其可溶性固形物或总固形物的含量。

正常的液态食品的相对密度都在一定的范围之内，例如：全脂牛乳为 1.028—1.032（20/20℃）；芝麻油为 0.9126~0.9287（20/4℃）。当由于掺杂、变质等原因引起其组织成分发生异常变化时，均可导致其相对密度发生变化。不可忽视的是，即使液态食品的相对密度在正常范围以内，也不能确保食品无质量问题，必须配合其它理化分析，才能保证食品的质量。

##### 2 折射率

蔗糖溶液的折射率随蔗糖浓度的增大而升高，所以所有含糖饮料、糖水罐头、果汁和蜂蜜等食品都可利用此关系测定糖度或可溶性固形物含量。还可通过测定生长期果蔬的折射率，判断果蔬的成熟度，以进行田间管理。

每种脂肪酸均有其特定的折射率。含碳原子数目相同时，不饱和脂肪酸的折射率比饱和脂肪酸的折射率大得多；不饱和脂肪酸相对分子质量越大，折射率越大；油脂酸度越高，折射率越小。因此，测定折射率可以用来鉴别油脂的组成和品质。

正常情况下，某些液态食品的折射率有一定的范围，如芝麻油的折射率在 1.4692~1.4791（20℃）之间，蜂蜡的折射率在 1.4410~1.4430（75℃）之间。当这些液态食品由于掺杂或品种改变等原因引起食品的品质发生改变时，折射率常常会发生变化，故测定折射率可以初步对食品进行定性，以判断食品是否正常。

番茄酱、果酱等食品可通过折光法测定其可溶性固形物含量后，再查特制的经验表得到总固形物含量。

##### 3 旋光度

某些食品的比旋光度值在一定的范围内，如谷氨酸钠的比旋光度 $[\alpha]_D^{20}$ 在+24.8~+25.3°之间，通过测定它的比旋光度，可以控制产品质量。蔗糖的糖度、味精的纯度、淀粉和某些氨基酸的含量与其旋光度成正比，故测定了它们的旋光度便可知道它们的结果。

### 第二节 物理检验的几种方法

#### 一 相对密度法

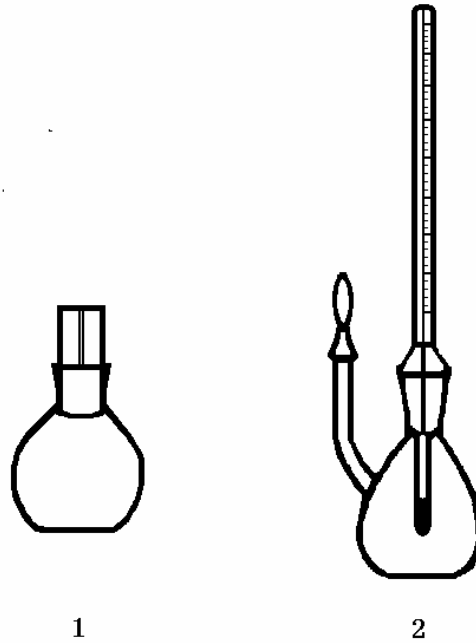
测定液态食品相对密度的方法有密度瓶法、密度计法和密度天平（即韦氏天平 Westphal balance）法等，前两种方法较常用。其中密度瓶法测定结果准确，但耗时；密度计法则简易迅速，但测定结果准确

度较差。

## 1 密度瓶法

### (1) 仪器

密度瓶是测定液体相对密度的专用精密仪器，其种类和规格有多种，常用的有带温度计的精密密度瓶和带毛细管的普通密度瓶，见图 4-1。常用的密度瓶规格是 25 和 50ml 两种。



1—带毛细管的普通密度瓶 2—带温度计的精密密度瓶

图 4-1

### (2) 测定原理

由于密度瓶的容积一定，故在一定温度下，用同一密度瓶分别称量样品溶液和蒸馏水的质量，两者之比即为该样品溶液的相对密度。

### (3) 测定方法

将带有温度计的精密密度瓶依次用洗液、自来水、蒸馏水、乙醇洗涤后，烘干并冷却，精密称重。装满温度小于 20℃ 的样液，插入温度计后，置入 20℃ 的恒温水浴中，待样液温度达到 20℃ 时保持 20min，用滤纸条吸去毛细管溢出的多余样液，盖上毛细管上的小帽后取出。用滤纸把瓶外液体擦干，置感量 1/10000g 分析天平上称重，即可测出 20℃ 时一定容积样液的质量。将样液倾出，洗净密度瓶后，装入煮沸 30min 并冷却至 20℃ 以下的蒸馏水，按测定样液的方法同样操作，测出同体积 20℃ 蒸馏水的质量。

### (4) 计算

$$d_{20}^{20} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0}$$

式中： $m_0$ ——密度瓶的质量，g；

$m_1$ ——密度瓶和蒸馏水的质量，g；

$m_2$ ——密度瓶和样液的质量，g。

### (5) 说明

① 本法适用于测定各种液体食品的相对密度，测定结果准确，但操作较烦琐。

② 测定挥发性的样液时，宜使用带温度计的精密密度瓶；测定较粘稠的样液时，宜使用带毛细管的普通密度瓶。

③ 液体必须装满密度瓶，并使液体充满毛细管，瓶内不得有气泡。

④ 拿取恒温后带毛细管的普通密度瓶时，不得用手直接接触其球部，应带隔热手套或用工具拿取；天平室温度不得高于 20℃，避免液体受热膨胀流出。

⑤ 水浴中的水必须清洁无油污，防止污染瓶外壁。

## 2 密度计法

### (1) 仪器

密度计法是最便捷适用的测定液体相对密度的方法，但准确度不如密度瓶法。密度计是根据阿基米德原理制成的，其种类很多，结构形式也基本相同：一个封口的玻璃管，中间部分略粗，内有空气，故能浮在液体中；下部有小铅球重垂，使密度计能直立于液体中；上部是一细长有刻度的玻璃管，如图 4-2 所示。刻度是利用各种不同密度的液体标度的。食品工业中常用的密度计按其标度的方法不同，分为普通密度计、锤度计、乳稠计、波美计和酒精计等。



图 4-2 普通密度计

#### ① 普通密度计

普通密度计是直接以 20℃ 时的密度值为刻度，由几支刻度范围不同的密度计组成一套。密度值小于 1 的 (0.700~1.000) 称为轻表，用于测定比水轻的液体；密度值大于 1 的 (1.000~2.000) 称为重表，用于测定比水重的液体。

#### ② 锤度计

锤度计是专用于测定糖液浓度的密度计，是以蔗糖溶液的重量百分含量为刻度，以 °Bx 表示。标度方法：20℃ 时，1% 纯蔗糖溶液为 1° Bx，2% 纯蔗糖溶液为 2° Bx，以此类推。对于不纯糖液来说，其读数则是溶液中视固形物的重量百分含量。若实测温度不是 20℃，则应进行温度校正，见附表 4-1。

#### ③ 乳稠计

乳稠计是专用于测定牛乳相对密度的密度计，测量相对密度的范围为 1.015~1.045。刻度是将相对密度值减去 1.000 后再乘以 1000，以度来表示，符号为 °，刻度范围即为 15~45°。若实测温度不是 20℃，则应进行温度校正，见附表 4-2。

#### ④ 波美计

波美计是以波美度 (°Bé) 来表示液体浓度大小的。按标度方法的不同分为多种类型，常用的波美计刻度刻制的方法是以 20℃ 为标准，以在蒸馏水中为 0°Bé，在 15% NaCl 溶液中为 15°Bé，在纯 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (相对密度为 1.8427) 中为 66°Bé，其余刻度等距离划分。波美计亦有轻表和重表之分，分别用于测定相对密度小于 1 和大于 1 的液体。波美度与相对密度之间存在着下列关系：

$$\text{轻表: } ^\circ\text{Bé} = \frac{145}{d_{20}^{20}} - 145, \quad \text{重表: } ^\circ\text{Bé} = 145 - \frac{145}{d_{20}^{20}}$$

### (2) 测定方法

将混合均匀的被测样液沿壁徐徐倒入适当容积的清洁量筒中，避免起泡沫。将密度计洗净擦干，缓缓放入样液中，待其静止后，再轻轻按下少许，然后待其自然上升，静止并无气泡冒出后，从水平位置读取与液面相交处的刻度值。同时测量样液的温度，如不是 20℃，应加以校正。

### (3) 说明

- ① 该法操作简便迅速，但准确性较差，需要样液量多，且不适用于极易挥发的样液。
- ② 操作时应注意不要将密度计接触量筒的壁及底部，待测液中不得有气泡。
- ③ 读数时应以密度计与液体形成的弯月面的下缘为准。若液体颜色较深，不易看清弯月面下缘时，则以弯月面上缘为准。

## 二 折光法

通过测量物质的折射率来鉴别物质的组成，确定物质的纯度、浓度及判断物质的品质的分析方法称为折光法。

### 1 折射率与样液浓度的关系

折光仪是利用进光棱晶和折射棱晶夹着薄薄的一层样液，经过光的折射后，测出样液的折射率而得

到样液浓度的。

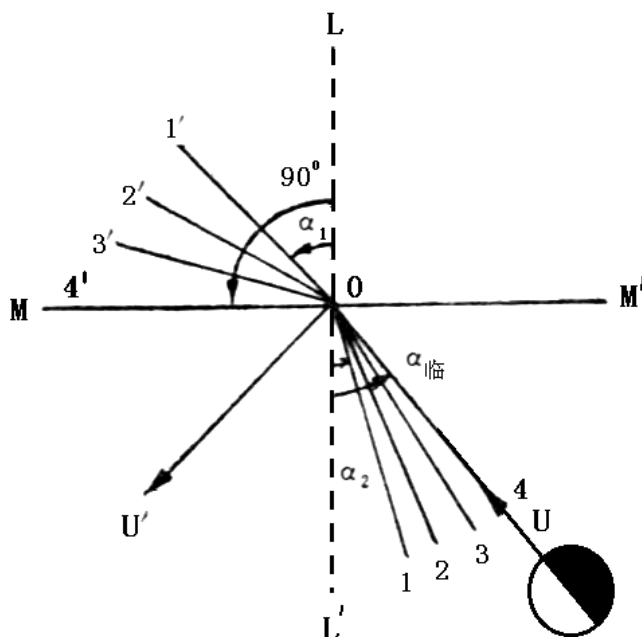


图 4-3 光的全反射

图 4-3 中  $MM'$  线的上部为光疏介质，下部为光密介质。根据光的折射定律，当光线从光疏介质进入光密介质（如从样液射入棱晶中）时，因  $n_1(\text{样液}) < n_2(\text{棱晶})$ ，折射角恒小于入射角 ( $\alpha_2 < \alpha_1$ )，即折射线比入射线靠近法线；反之，当光线从光密介质进入光疏介质（如从棱晶射入样液）时，因  $n_1(\text{棱晶}) > n_2(\text{样液})$ ，折射角恒大于入射角 ( $\alpha_1 > \alpha_2$ )，即折射线比入射线偏离法线。在后一种情况下，如逐渐增大入射角  $\alpha_2$ ，折射线会进一步偏离法线，当入射角增大到某一角度时，其折射线会沿两介质的交界面平行射出 ( $4'$  线)，不再进入光疏介质，这种现象称为光的全反射，此时的入射角称为临界角，以  $\alpha_{\text{临}}$  表示，入射线为临界线。发生全反射时，若光线从光疏介质射向光密介质，则所有的入射光 ( $1'$   $2'$   $3'$  线) 全部折射在临界角以内 ( $1$ 、 $2$ 、 $3$  线)，临界角以外无光线，结果临界线 ( $4$  线) 左边明亮，右边完全黑暗，形成明显的黑白分界。利用这一原理，通过实验可测出临界角  $\alpha_{\text{临}}$ 。因为发生全反射时折射角等于  $90^\circ$ ，所以：

$$\frac{n_{\text{棱晶}}}{n_{\text{样液}}} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \alpha_{\text{临}}}, \text{ 即 } n_{\text{样液}} = n_{\text{棱晶}} \sin \alpha_{\text{临}}$$

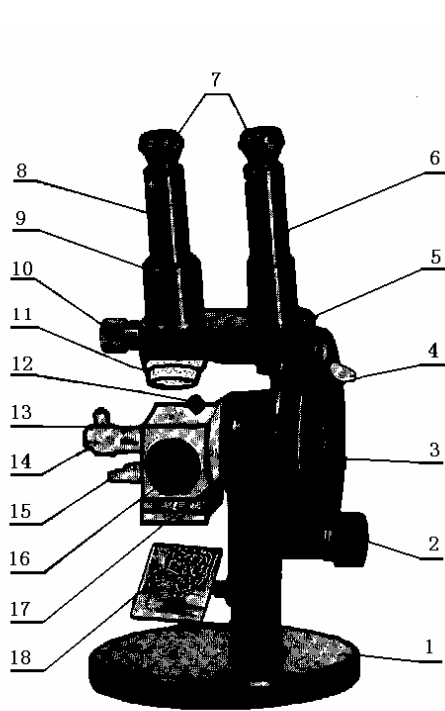
式中的  $n_{\text{棱晶}}$  是折光仪棱晶的折射率，是已知的，而临界角  $\alpha_{\text{临}}$  则随样液浓度的大小而改变，可从棱晶的旋转角度读出，因此，只要测得了  $\alpha_{\text{临}}$ ，就可求出  $n_{\text{样液}}$ 。

溶液的折射率与相对密度一样，随着浓度的增大而递增。折射率的大小取决于物质的性质，即不同的物质有不同的折射率；对于同一种物质，其折射率的大小取决于该物质溶液的浓度的大小。

## 2 折光仪的结构及原理

折光仪是利用光的全反射原理测出临界角而得到物质折射率的仪器。比较先进的是数字折光仪和自动温度补偿型手提折光仪。数字折光仪是采用光传感器进行自动浓度测量，并通过内置的微信息处理器对温度误差进行自动校正，测量准确度高达  $\pm 0.2\%$ ；自动温度补偿型手提折光仪则是通过内置的机构进行温度补偿。我国食品工业中最常用的是阿贝折光仪和手提式折光计，测定结果须进行温度校正。

阿贝折光仪的结构如图 4-4 所示。其光学系统由观测系统和读数系统两部分组成，见图 4-5。



1—底座 2—棱晶调节旋钮 3—圆盘组(内有刻度板)  
 4—小反光镜 5—支架 6—读数镜筒 7—目镜  
 8—观测镜筒 9—分界线调节旋钮 10—消色调节旋钮  
 11—色散刻度尺 12—棱晶锁紧扳手 13—棱晶组  
 14—温度计插座 15—恒温器接头 16—金属保护罩  
 17—主轴 18—反光镜

图 4-4 阿贝折光仪

观测系统：光线由反光镜（1）反射，经进光棱晶（2）、折射棱晶（3）及其间的被测样液薄层折射后射出。再经色散补偿器（4）消除由折射棱晶及被测样液所产生的色散，然后由物镜（5）将明暗分界线成像于分划板（6）上，经目镜（7）、（8）放大后成像于观测者眼中。

读数系统：光线由小反光镜（14）反射，经毛玻璃（13）射到刻度盘（12）上，经转向棱晶（11）及物镜（10）将刻度成像于分划板（9）上，通过目镜（7）、（8）放大后成像于观测者眼中。

光线在阿贝折光仪内进行的情况如图 4-6 所示。ABC 和 EFD 是进光棱晶和折射棱晶的纵剖面图， $\angle C$ 、 $\angle D$  为  $90^\circ$ ， $\angle B$ 、 $\angle E$  为  $60^\circ$ ，其间是厚约 0.15mm 的样液薄层。当光线 L 由进光棱晶 I 点射入到达 AB 液面时，由于被测样液的折射率不同，将有一部分光反射或全反射。若旋转棱晶使 ION' 等于临界角  $\alpha_{\text{临}}$ ，即产生全反射，则所有入射角小于临界角的光线（即图 4-6 中临界线 IO 临界线左方的光线及与它们平行的光线）可折射进入样液层，然后通过折光棱晶投影到物镜 K 上，物镜把一组组平行光束（S, S', S'' 及 U, U', U'' 等）汇集于视野 XY，呈现光亮；所有入射角大于临界角的光线（即图 4-6 中临界线 IO 右方的光线及与它们平行的光线）发生全反射不能进入样液层，因而也不能达到视野 XY，故呈现黑暗。由此在视野中便出现了明暗两部分。

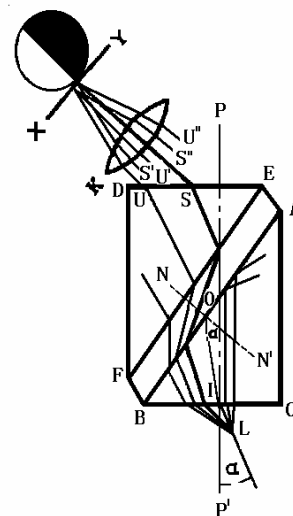
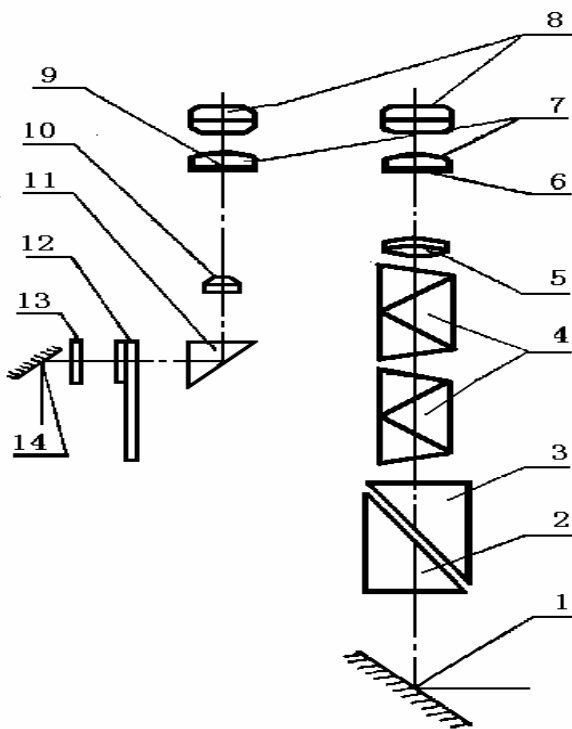


图 4-6 阿贝折光仪的光路图



1—反光镜 2—进光棱晶 3—折射棱晶 4—色散补偿器  
 5, 10—物镜 6, 9—分划板 7, 8—目镜 11—转向棱晶  
 12—刻度盘 13—毛玻璃 14—小反光镜

图 4-5 阿贝折光仪的光学系统

由于样液的浓度不同，折射率不同，故临界角的大小也不同。又因折射率与临界角成正比，故在刻度尺上直接刻上折射率或锤度（° Bx）值。当旋动棱晶调节旋钮，图 4-4 中（2）使视野内明暗分界线恰好通过十字线交点时，表示光线从棱晶射入样液的入射角达到了临界角，此时即可从读数镜筒中读取样液的折射率或锤度值。

阿贝折光仪也可在反射光中使用。使用时调整反光镜，图 4-4 中（18），不让光线进入进光棱晶，同时揭开折射棱晶的旁盖，图 4-4 中（16），使光线从折射棱晶的侧孔进入，此时只用折射棱晶，进光棱晶只作盖用，其光学原理如图 4-7 所示。当棱晶旋至光线入射角  $\text{ION}$  达到临界角时， $\text{IO}$  成为临界线，所有入射角大于  $\text{ION}$  的光线（即图 4-7 中  $\text{IO}$  线上方的光线及与它们平行的光线）发生全反射，产生明亮视野；所有入射角小于  $\text{ION}$  的光线（即图 4-7 中  $\text{IO}$  线下方的光线及与它们平行的光线）折射进入样液层，只有一小部分反射，故视野比较暗。这样，在视野中便产生明暗分界。此方法适用于深色样液的测定，可以减少色散程度，使视野分界清晰。

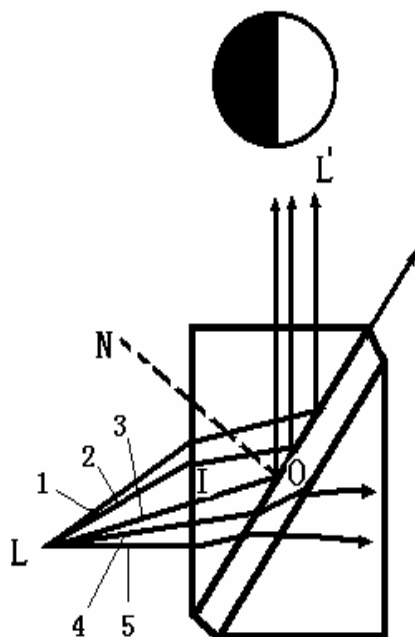


图 4-7 阿贝折光仪在反射光中使用时的光路图

### 3 影响折射率测定的因素

#### (1) 光波波长的影响

物质的折射率因光波波长而异。波长较长时物质的折射率较小，波长较短时物质的折射率较大。测定时光源通常为白光。当白光经过棱晶和样液发生折射时，因各色光的波长不同，折射程度也不同，折射后分解成为多种色光，这种现象称为色散。光的色散会使视野明暗分界线不清，产生测定误差。

为了消除色散，在阿贝折光仪观测筒的下端安装了色散补偿器。它是由两块相同的阿米西棱晶组成。每个阿米西棱晶又由两块冕玻璃棱晶及其中间的一块成直角的燧石玻璃棱晶组成，其截面如图 4-8 所示。当调节消色旋钮，图 4-4 中（10）时，两个阿米西棱晶可同时反向转动。当两者处于图 4-8（a）的位置时，补偿色散的能力最大，从  $L'$  方向进入的色散光可复合成白光。当处于图 4-8（b）的位置时，两棱晶的作用相互抵消，整个补偿器不起作用。测定时根据白光通过折光棱晶和液层时产生的色散程度，调节消色旋钮，使两个阿米西棱晶处于图 4-8（a）、（b）之间的适当位置，即可消除色散。

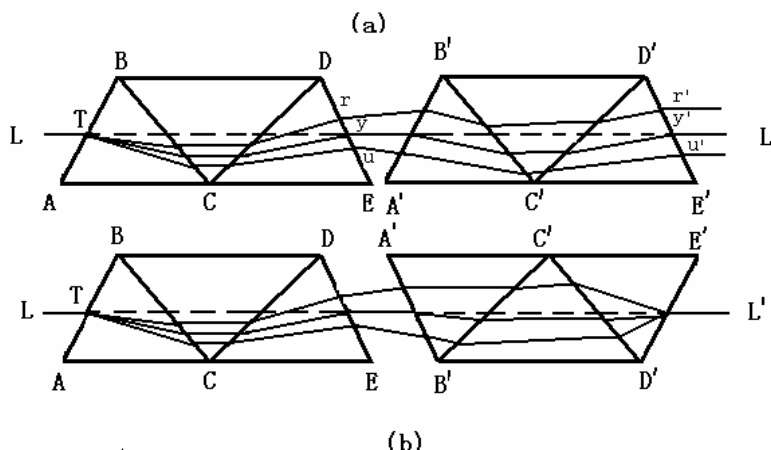


图 4-8 色散补偿器

#### (2) 温度的影响

溶液的折射率随温度的变化而变化。温度升高折射率减小；温度降低折射率增大。折光仪上的刻度是在标准温度 20°C 时刻制的。若测定温度不是 20°C，则应将测定结果进行温度校正（见附表 4-3）。

### 4 阿贝折光仪的使用方法

- (1) 分开两棱晶，以脱脂棉球蘸取乙醇擦净，挥干乙醇。滴 1~2 滴样液于下面棱晶的平面中央，迅速闭合两棱晶，调节反光镜，使两镜筒内视野最亮。
- (2) 由目镜观察，转动棱晶旋钮，使视野出现明暗两部分。
- (3) 转动色散补偿器旋钮，使视野中只有黑白两色。
- (4) 转动棱晶旋钮，使明暗分界线在十字线交叉点上。
- (5) 从读数镜筒中读取折射率或锤度值。
- (6) 测定样液的温度。
- (7) 打开棱晶，用蒸馏水、乙醇或乙醚擦净棱晶表面及其它各机件。

### 三 旋光法

应用旋光仪测量旋光性物质的旋光度以确定其浓度、含量及纯度的分析方法称为旋光法。

#### 1 旋光法的基本原理

##### (1) 自然光与偏振光

光是一种电磁波，是横波，即光波的振动方向与其前进方向互相垂直。自然光有无数个与光线前进方向互相垂直的光波振动面。若光线前进的方向指向我们，则与之互相垂直的光波振动平面可表示为图 4-9 中的 (a)，图中箭头表示光波振动方向。若使自然光通过尼克尔棱晶，由于尼克尔棱晶只能让振动面与尼克尔棱晶光轴平行的光波通过，所以通过尼克尔棱晶的光只有一个与光线前进方向垂直的光波振动面，如图 4-9 中的 (b)。这种只在一个平面上振动的光叫偏振光。

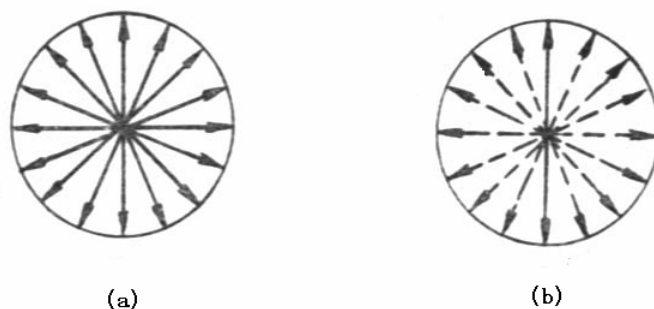


图 4-9 自然光与偏振光

##### (2) 偏振光的产生

产生偏振光的方法很多，通常是用尼克尔棱晶或偏振片。

把一块方解石的菱形六面体末端的表面磨光，使镜角等于  $68^\circ$ ，然后将其对角切成两半，把切面磨成光学平面后，再用加拿大树胶粘在一起，便成为一个尼科尔棱晶（见图 4-10）。由于方解石的光学特性，当自然光通过尼科尔棱晶时，发生双折射，产生两道振动面互相垂直的平面偏振光。其中 O 称为寻常光线，E 称为非常光线。方解石对它们的折射率不同，对寻常光线的折射率是 1.658；对非常光线的折射率是 1.486。加拿大树胶对两种光线的折射率都是 1.55。寻常光线 O 由方解石到加拿大树胶是由光密介质到光疏介质，因其入射角 ( $76^\circ 25'$ ) 大于临界角 ( $69^\circ 12'$ ) 而被加拿大树胶层全反射，并被涂黑的侧面吸收。非常光线 E 由方解石到加拿大树胶是由光疏介质到光密介质，必将发生折射而通过加拿大树胶，由棱晶的另一端射出，从而产生了平面偏振光。

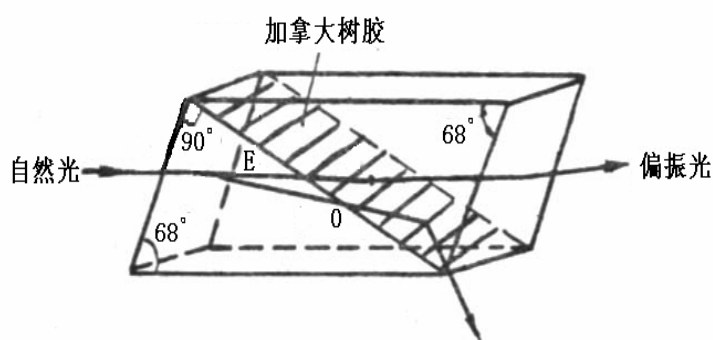


图 4-10 尼科尔棱晶

用偏振片产生偏振光的原理是利用某些双折射晶体（如电气石）的二色性，即可选择性吸收寻常光线，而让非常光线通过的特性，把自然光变成偏振光。

### (3) 光学活性物质、旋光度与比旋光度

分子结构中凡有不对称碳原子，能把偏振光的偏振面旋转一定角度的物质称为光学活性物质。许多食品成分都具有光学活性，如单糖、低聚糖、淀粉以及大多数氨基酸等。其中能把偏振光的振动面向右旋转的，称为“具有右旋性”，以(+)号表示；反之，称为“具有左旋性”，以(-)号表示。

偏振光通过光学活性物质的溶液时，其振动平面所旋转的角度叫做该物质溶液的旋光度，以 $\alpha^\circ$ 表示。旋光度的大小与光源的波长、测定温度、光学活性物质的种类、溶液的浓度及液层的厚度有关。对于特定的光学活性物质，在光波长和测定温度一定的情况下，其旋光度 $\alpha$ 与溶液的浓度 $c$ 和液层的 $L$ 成正比。即：

$$\alpha = KcL$$

当光学活性物质的浓度为 100g/100ml，液层厚度为 1dm 时所测得的旋光度称为比旋光度，以 $[\alpha]_\lambda^t$ 表示。由上式可知：

$$[\alpha]_\lambda^t = K \times 100 \times 1, \text{ 即 } K = \frac{[\alpha]_\lambda^t}{100}$$

$$\text{故 } \alpha = [\alpha]_\lambda^t \frac{cL}{100}$$

式中： $[\alpha]_\lambda^t$ ——比旋光度， $^\circ$ ；

$t$ ——测定温度， $^\circ\text{C}$ ；

$\lambda$ ——光源波长， $\text{nm}$ ；

$\alpha$ ——旋光度， $^\circ$ ；

$L$ ——液层厚度或旋光管长度， $\text{dm}$ ；

$c$ ——样液浓度， $\text{g/ml}$ 。

比旋光度与光波波长及测定温度有关。通常规定用钠光 D 线（ $\lambda = 589.3\text{nm}$ ）在  $20^\circ\text{C}$  时测定，此时，比旋光度用 $[\alpha]_D^{20}$ 表示。主要糖类的比旋光度见表 4-1。

表 4-1 糖类的比旋光度

糖类	$[\alpha]_D^{20}$	糖类	$[\alpha]_D^{20}$
葡萄糖	+52.5	乳糖	+53.3
果糖	-92.5	麦芽糖	+138.5
转化糖	-20.0	糊精	+194.8
蔗糖	+66.5	淀粉	+196.4

因在一定条件下比旋光度 $[\alpha]_\lambda^t$ 是已知的， $L$ 为一定，故测得了旋光度 $\alpha$ 就可以计算出旋光质溶液的浓度 $c$ 。

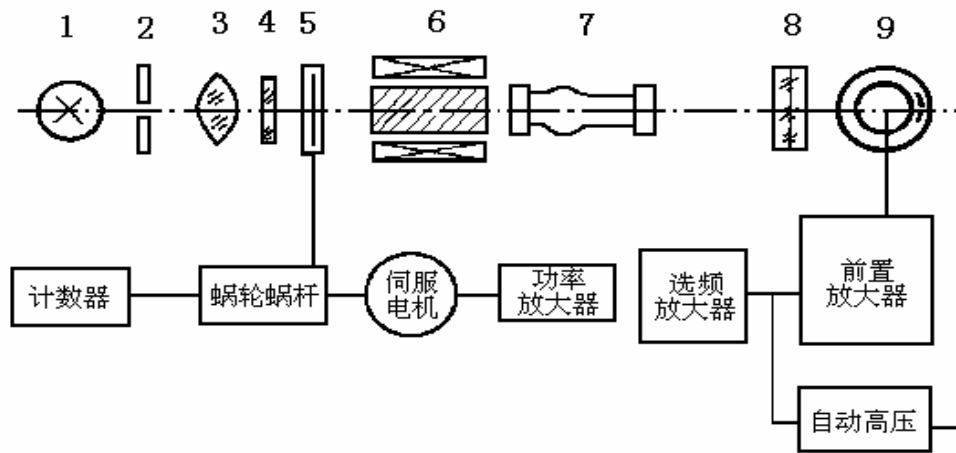
### (4) 变旋光作用

具有光学活性的还原糖类（如葡萄糖、果糖、乳糖、麦芽糖等）溶解后，其旋光度起初迅速变化，然后渐渐变化缓慢，最后达到恒定值，这种现象称为变旋光作用。这是由于这些还原性糖类存在两种异构体，即 $\alpha$ 型和 $\beta$ 型，它们的比旋光度不同。因此，在用旋光法测定蜂蜜或商品葡萄糖等含有还原糖的样品时，宜将配成溶液后的样品放置过夜再测定。

### (5) WZZ-2 型自动旋光仪的结构及原理



WZZ-2 型自动旋光仪采用光电检测自动平衡原理进行自动测量，测量结果由数字显示。它既保持了 WZZ-1 型自动指示旋光仪稳定可靠的优点，又弥补了它读数不方便的缺点，具有体积小，灵敏度高，没有人为误差，测定迅速及读数方便等特点。目前在食品分析中应用十分广泛。



1—光源 2—小孔光栏 3—物镜 4—滤色片 5—起偏镜 6—磁旋线圈 7—试样 8—检偏镜 9—光电倍增管

图 4-11 WZZ-2 型自动旋光仪工作原理

仪器采用 20W 钠光灯作光源，由小孔光栅和物镜组成一个简单的点光源平行光束（图 4-11）。平行光源经起偏镜变为平面偏振光，其振动平面为  $OO$ （图 4-12a），当偏振光经过有法拉弟效应的磁旋线圈时，其振动平面产生 50Hz 的  $\beta$  角往复摆动（图 4-12b），光线经过检偏镜投射到光电倍增管上，产生交变的电讯号。

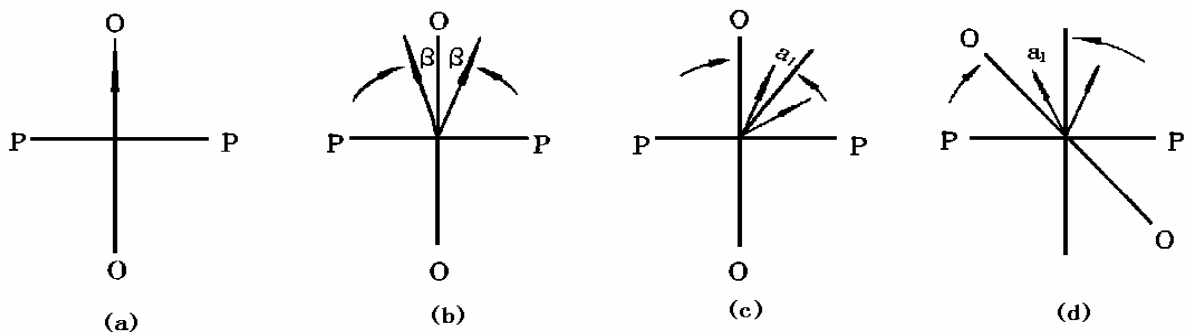


图 4-12 光电自动旋光仪中光的变化

以两偏振镜光轴正交时 ( $OO \perp PP$ ) 作为仪器零点，此时， $\alpha = 0^\circ$ 。偏振光的振动平面因磁旋光效应产生的  $\beta$  角摆动，经过检偏镜后，光波振幅不等于零，因而在光电倍增管上产生微弱的光电流。在此情况下，若在光路中放入光学活性物质，它能将偏振光的振动平面旋转  $\alpha^\circ$ ，经检偏镜后的光波振幅较大，在光电倍增管上产生的光电讯号也较强（图 4-12c），光电讯号经前置选频功率放大器放大后，使工作频率为 50Hz 的伺服马达转动，通过蜗轮蜗杆把起偏镜反向转动  $\alpha^\circ$ ，使仪器又回到零点状态，见（图 4-12d）。起偏镜旋转的角度即为光学活性物质的旋光度，可在计数器中直接显示出来。

### 第三节 食品的物性测定

#### 一 色度测定

##### 1 饮料用水色度的测定

纯洁的水是无色透明的。但一般的天然水中存在有各种溶解物质或不溶于水的粘土类细小悬浮物，使水呈现各种颜色。如含腐殖质或高铁较多的水，常呈黄色；含低铁化合物较高的水呈淡绿蓝色；硫化氢被氧化所析出的硫，能使水呈浅蓝色。水的颜色深浅反映了水质的好坏。有色的水，往往是受污染的水，测定结果是以色度来表示的。色度是指被测水样与特别制备的一组有色标准溶液的颜色比较值。洁

净的天然水的色度一般在 15~25° 之间，自来水的色度多在 5~10° 左右。

水的色度有“真色”与“表色”之分。“真色”是指用澄清或离心等法出去悬浮物后的色度；“表色”是指溶于水样中物质的颜色和悬浮物颜色的总称。在分析报告中必须注明测定的是水样的真色还是表色。

测定水的色度有铂钴比色法和铬钴比色法。两种方法的精密度和准确度相同。前者为测定水的色度的标准方法，此法操作简便，色度稳定，标准比色系列保存适宜，可长时间使用，但其中所用的氯铂酸钾太贵，大量使用时不经济。后者是以重铬酸钾代替氯铂酸钾，便宜而且宜保存，只是标准比色系列保存时间较短。

### (1) 铂钴比色法

#### ① 原理

将水样与已知浓度的标准比色系列进行目视比色以确定水的色度。标准比色系列是用氯铂酸钾和氯化钴试剂配制而成，规定每升水中含 1mg 铂 [以  $(PtCl_6)^{2-}$  形式存在] 时所具有的颜色作为一个色度单位，以 1° 表示。

#### ② 仪器

感量 1/10000g 分析天平，比色管架，50ml 具塞无色比色管，5ml 吸管。

#### ③ 试剂

i 浓盐酸（密度 1.19）。

ii 铂—钴标准贮备液：准确称取 1.2456g  $K_2PtCl_6$ ，再用具盖称量瓶称取 1.0000g 干燥的  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ，溶于含 100ml 浓盐酸的蒸馏水中，用蒸馏水定容至 1000ml。此标准溶液的色度为 500°（Hasen 值）。

iii 铂—钴标准比色系列：精确吸取 0.00、0.50、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00、3.50、4.00、4.50 和 5.00ml 铂—钴标准贮备液于 11 支 50ml 具塞比色管中，用蒸馏水稀释至刻度，摇匀，则各管色度依次为 0°、5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45° 和 50°。此标准系列的有效期为 6 个月。

#### ④ 操作

取 50ml 透明的水样于比色管中，在白色背景下沿轴线方向用目视比色法与标准系列进行比较。如水样色度过高，可取少量水样，用蒸馏水稀释后再比色，然后将测定结果乘以稀释倍数。如水样与标准系列的色调不一致，即为异色，可用文字描述。

#### ⑤ 计算

$$C = \frac{M}{V} \times 500$$

式中：C——水样的色度，°；

M——铂—钴标准溶液的用量，ml；

V——水样的体积，ml。

### (2) 铬钴比色法

#### ① 原理

重铬酸钾和硫酸钴配制成与天然水黄色色调相同的标准比色系列，用目视比色法测定，单位与铂钴比色法相同。

#### ② 仪器

同（1）法。

#### ③ 试剂

i 浓硫酸（密度 1.84）。

ii 铬—钴标准液：准确称取 0.0437g  $K_2Cr_2O_7$  及 1.0000g  $CoSO_4 \cdot 7H_2O$  溶于少量蒸馏水中，加入浓  $H_2SO_4$  0.50ml，然后定容至 500ml，摇匀。此溶液色度为 500°。

iii 稀盐酸溶液：吸取 1ml 浓盐酸用蒸馏水定容至 1000ml。

iv 铬—钴标准比色系列：准确吸取 0.00、0.50、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00、3.50、4.00、4.50 和 5.00ml 铬—钴标准液于 11 支 50ml 具塞比色管中，用稀盐酸溶液稀释至刻度，摇匀，则各管色度依次为 0

°、5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°和50°。

④ 操作

同(1)法，只是水样管与铬—钴标准比色系列进行比色。

⑤ 计算

同(1)法。

(3) 说明

- ① 铂钴和铬钴比色法适用于测定生活饮用水及其水源水的色度测定。浑浊的水样需先离心，然后取上清液测定。
- ② 水样要用清洁的玻璃瓶采集，并尽快进行测定。避免水样在贮存过程中发生生物变化或物理变化而影响水样的颜色。
- ③ 水样的颜色通常随 pH 值的升高而增加，因此，在测定水样色度的同时测定水样的 pH 值，并在分析报告中注明。
- ④ 液态物质色度的测定也可以采用分光光度法。该方法保留了原标准以“铂—钴标准溶液”Hasen 值为色度计量单位的基本原则，参照国际照明委员会关于色觉三激值的科学观念，对原色度测定方法做了新的定量化的改进。

2 啤酒色度的测定

(1) 原理

将除气后的啤酒注入 EBC 比色计的比色皿中，与标准 EBC 色盘比较，目视读数或自动数字显示出啤酒的色度，以 EBC 色度单位表示。

(2) 仪器

EBC 比色计（或使用同等分析效果的仪器）：具有 2.0EBC~27.0EBC 单位的目视色度盘或自动数据处理与显示装置。

(3) 试剂

哈同（Hartong）基准溶液：称取重铬酸钾（ $K_2Cr_2O_7$ ）0.100g 和亚硝酰铁氰化钠（ $Na_2[Fe(CN)_5NO] \cdot 2H_2O$ ）3.500g，用蒸馏水溶解并定容至 1000mL，贮于棕色瓶中，于暗处放置 24h 后再使用。

(4) 操作

- ① 仪器校正：将哈同溶液注入 40mm 比色皿中，用 EBC 比色计测定。其标准色度应为 15.0EBC 单位；若使用 25mm 比色皿，其标准色度应为 9.4EBC。仪器应每个月校正一次。
- ② 样品测定：将除气啤酒注入 25mm 比色皿中，再放入 EBC 比色计的比色盒中，与标准色盘进行比较，当两者色调一致时，直接读数；或使用自动数字显示色度计，自动显示结果。

(5) 计算

$$X=S \times 25 \times n/H$$

式中：X——啤酒的色度，EBC；

S——实测色度，EBC；

H——所使用比色皿的厚度，mm；

25——换算成标准比色皿的厚度，mm；

n——稀释倍数。

(6) 说明

- ① 同一样品的两次测定值之差，色度为 2EBC~10EBC 时，不得大于 0.5EBC；色度大于 10EBC 时，稀释样品的平行测定值之差不得大于 1.0EBC。
- ② 测定浓色或黑色啤酒时，需要将啤酒稀释至合适的色度范围（即 2.0EBC~27.0EBC 范围内），然后将实验结果乘以稀释倍数。
- ③ 一般淡色啤酒的色度在 5.0EBC~14.0EBC 范围内；浓色啤酒的色度在 15.0EBC~40.0EBC 范围内。

## 二 粘度测定

粘度，即液体的粘稠程度，它是液体在外力作用下发生流动时，分子间所产生的内摩擦力。粘度的大小是判断液态食品品质的一项重要物理常数。

粘度有绝对粘度、运动粘度、条件粘度和相对粘度之分。绝对粘度，也叫动力粘度，它是液体以 1cm/s 的流速流动时，在每  $\text{cm}^2$  液面上所需切向力的大小，单位为“ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ （帕·秒）”。

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}$$

运动粘度，也叫动态粘度，它是在相同温度下液体的绝对粘度与其密度的比值，单位为“ $\text{m}^2/\text{s}$ ”。

$$1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{cm}^2/\text{s} = 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s} \times \text{m}^3/\text{g} = 10^3\text{Pa} \cdot \text{s} \times \text{cm}^3/\text{g}$$

条件粘度是在规定温度下，在指定的粘度计中，一定量液体流出的时间（s）或将此时间与规定温度下同体积水流出时间之比。相对粘度是在  $t^\circ\text{C}$  时液体的绝对粘度与另一液体的绝对粘度之比，用以比较的液体通常是水或适当的液体。

粘度的大小随温度的变化而变化。温度愈高，粘度愈小。纯水在  $20^\circ\text{C}$  时的绝对粘度为  $10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。测定液体粘度可以了解样品的稳定性，亦可揭示干物质的量与其相应的浓度。粘度的数值有助于解释生产、科研的结果。

粘度的测定方法按测试手段分为毛细管粘度计法、旋转粘度计法和滑球粘度计法等。毛细管粘度计法设备简单、操作方便、精度高。后两种需要贵重的特殊仪器，适用于研究部门。

### 1 毛细管粘度计法

#### (1) 原理

毛细管粘度计测定的是运动粘度。由样液通过一定规格的毛细管所需的时间求得样液的粘度。

#### (2) 仪器

① 毛细管粘度计：如图 4-13 所示。常用的毛细管粘度计的毛细管内径有 0.8、1.0、1.2 和 1.5mm 四种。不同的毛细管粘度计有其不同的粘度常数，可根据被测样液的粘度情况选用。若无粘度常数时，可用已知粘度的纯净的 20 号或 30 号机器润滑油标定。

② 水银温度计：分度  $0.1^\circ\text{C}$ 。

③ 秒表。

#### (3) 试剂

石油醚（ $60\sim 90^\circ$ ）或汽油，乙醚、铬酸洗液。

#### (4) 操作

① 将选用的粘度计用石油醚或汽油洗净。若粘度计沾有污垢，就用铬酸洗液、自来水、蒸馏水和乙醇依次洗涤，然后放入烘箱中烘干，或用通过棉花滤过的热空气吹干，备用。

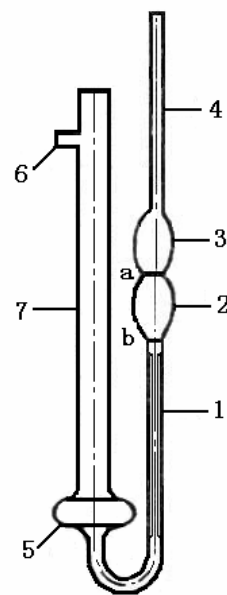
② 在毛细管粘度计支管（6）上套上橡皮管，并用手指堵住管身（7）的管口，同时倒置粘度计，将管身插入样液中，用吸耳球从支管的橡皮管中将样液吸到标线 a 处，注意不要使管身扩张部分（3）中的样液出现气泡或裂隙（如出现气泡或裂隙需重新吸入样液），迅速提起粘度计并使其恢复至正常状态，同时擦掉管身的管端外壁所粘附的多余样液，并从支管（6）上取下橡皮管套在管身（4）的管端上。

③ 把盛有样液的粘度计浸入预先准备好的  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$  恒温水浴中，使其扩张部分（2）和（3）完全浸没在水浴中，将其垂直固定在支架上。

④ 恒温 10min 后，用吸耳球从管身（4）的橡皮管中将样液吸起吹下搅拌样液，然后吸起样液使充满扩张部分（3），使下液面稍高于标线 a。

⑤ 取下吸耳球，观察样液的流动情况。当液面正好到达上标线 a 时，立即按下秒表计时，待样液继续流下至下标线 b 时，再按下秒表停止计时。

⑥ 重复操作 4~6 次，记录每次样液流经上、下标线所需的时间（s）。



1—毛细管 2, 2, 5—扩张部分  
4, 7—管身 6—支架 a, b—标线

图 4-13 毛细管粘度计

(5) 计算

$$v_{20} = K \tau_{20}$$

式中： $v_{20}$ ——20℃时样液的运动粘度， $\text{cm}^2/\text{s}$ ；

$K$ ——粘度计常数， $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ；

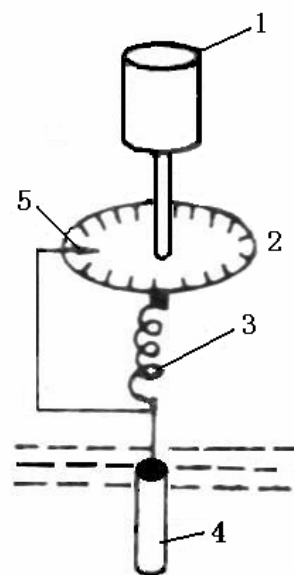
$\tau_{20}$ ——样液平均流出时间， $\text{s}$ 。

(6) 粮食粘度的测定也多采用毛细管粘度计法。方法是将粉碎的试样在微沸状态下充分糊化，过滤后在 50℃ 条件下测定糊化液的粘度。

2 旋转粘度计法

(1) 原理

旋转粘度计（图 4-14）上的同步电机（1）以一定的速度带动刻度圆盘（2）旋转，又通过游丝（3）和转轴带动转子（4）旋转。若转子未受到阻力，则游丝与刻度圆盘同速旋转；当样液存在时，转子受到粘滞阻力的作用使游丝产生力矩。当两力达到平衡时，与游丝相连的指针（5）在刻度圆盘上指示出一数值，根据这一数值，结合转子号数及转速即可算出被测样液的绝对粘度。



1—同步电机 2—刻度圆盘  
3—游丝 4—转子 5—指针

图 4—14 旋转粘度计作用原理图

(2) 仪器

旋转粘度计：测量范围 0.01~100Pa·s。

(3) 操作

- ① 将旋转粘度计安装于固定支架上，校准水平。
- ② 用直径不小于 70mm 的直筒式烧杯盛装样液，并保持样液恒温。
- ③ 根据估计的被测样液的最大粘度值按表 4-2 选择适当的转子及转子转速，装好转子，调整仪器高度，使转子浸入样液直至液面标志为止。
- ④ 接通电源，使转子在样液中旋转。
- ⑤ 经多次旋转后指针趋于稳定时或按规定的旋转时间指针达到恒定值时，压下操纵杆，同时中断电源，读取指针所指示的数值。如读数值过高或过低，应改变转速或转子，务使读数在 20~90 之间。

(4) 计算

$$\eta = ks$$

式中： $\eta$ ——绝对粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

$k$ ——换算系数，见表 4-3；

$s$ ——刻度圆盘指针读数。

表 4-2 不同转子在不同的转速下可测的最大粘度值 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )

转速 (r/min)	60	30	12	6
转子号				
0	0.01	0.02	0.05	0.1
1	0.1	0.2	0.5	1
2	0.5	1	2.5	5
3	2	4	10	20
4	10	20	50	100

表 4-3 不同转子在不同转速时的换算系数 ( $k$ )

转速 (r/min)	60	30	12	6
转子号				
0	0.1	0.2	0.5	1.0
1	1	2	5	10

2	5	10	25	50
3	20	40	100	200
4	100	200	500	1000

### 3 滑球粘度计法

#### (1) 原理

滑球粘度计（即赫普勒尔粘度计），如图 4-15，适于测定粘度较高的样液。它基于落体原理而设计的。测定方法是在一充满样液的玻璃管（有玻璃夹套）中，将一适宜比重的球体从玻璃管上线落至下线，根据落球时间，再结合被测样液的相对密度、球体的相对密度和球体系数，可以计算出样液的粘度。

#### (2) 仪器

滑球粘度计：附有 9 个不同直径（从 11.005~15.968mm）的小玻璃球或钢球，粘度的测定范围为 0.0005~100Pa·s；超级恒温水浴；秒表。

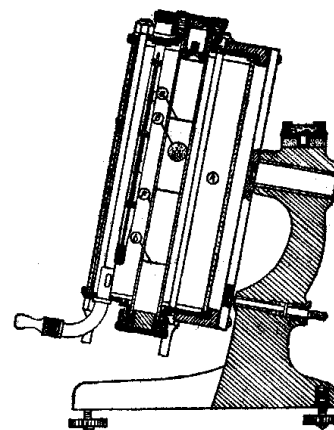


图 4—15 滑球粘度计

#### (3) 操作

- ① 将滑球粘度计与超级恒温水浴连接，调节水浴温度，使粘度计玻璃夹套流出的水温准确控制在  $20 \pm 0.01^\circ\text{C}$ 。
- ② 用吸管将预先调温至  $20^\circ\text{C}$  的样液从管壁注入玻璃管中，勿使管内有气泡。
- ③ 当样液充满玻璃管后，调整仪器在水平位置上。
- ④ 将适当的小球放入玻璃管的被测样液中，随即将玻璃管顶端的塞子塞上，旋紧金属盖。
- ⑤ 20min 后，将玻璃管旋转  $180^\circ$ 。
- ⑥ 待小球落到底部，停留约 10min 使管内样液平静下来后，再迅速将玻璃管恢复至原位，此时小球缓缓地沿管壁滑下，用秒表测定小球从上标线下降至下标线的时间。
- ⑦ 重复上述操作数次，将相差很小的结果取平均值。

#### (4) 计算

$$\eta = K (\rho_1 - \rho_2) t$$

式中： $\eta$ ——粘度，Pa·s；

$K$ ——球体系数（适用于特定的球与特定的管）；

$\rho_1$ ——小球的相对密度；

$\rho_2$ ——被测样液的相对密度；

$t$ ——小球降落时间，s。

#### (5) 说明

- ① 小球下降速度以 1~3min 下降 5cm 为宜，并具此选择球的大小。
- ② 必须准确地测定粘度计所附小球的  $K$  值。如将小球用于另一粘度计，则  $K$  值要另行测定。测定  $K$  值的方法是将已知粘度的纯甘油或  $60\sim 70^\circ\text{Bx}$  的纯蔗糖溶液装入粘度计的玻璃管中，按测定样液粘度的方法进行测定，然后再计算  $K$  值：

$$K = \frac{\eta}{(\rho_1 - \rho_2)t}$$

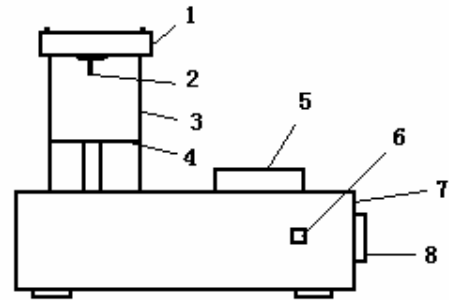
### 三 质构测定

食品除了它的营养价值外，它的物理性能也很重要。在食品生产过程中，存在着大量与物性量化相关的问题。例如，为节省成本厂家需寻找合适且经济的原料及进货来源；为提高市场竞争力须开发出能合乎消费者口味的产品；为确保不同的厂家产品质量的一致性，需要制定企业可行的统一质量与规格标准；对于大型的集团企业，则要避免各个子公司间因执行者主观标准的差异而造成的巨大物流损失和管理缺陷等。物理性能是食品重要的品质因素，主要包括硬度、脆性、胶黏性、回复性、弹性、凝胶强度、

耐压性、可延伸性及剪切性等，他们在某种程度上可以反映出食品的感官质量。质构仪(Texture Analyzer)是使这些食品的感官指标量化的新型仪器。

### 1 质构仪的结构及工作原理

质构仪包括主机、专用软件、备用探头及附件。测量部分由操作台、转速控制器、横梁、底座、直流电机和探头组成，结构如图 4-16 所示。横梁(1)固定在立柱(3)上，可以上下移动，用以调节操作台(4)与横梁的初始间距。固定在横梁上的压力传感器可准确测量受力的大小。转速控制器(5)控制操作台的移动速度，正反开关(6)负责改变操作台的上下移动方向。



1—横梁 2—探头 3—立柱 4—操作台  
5—转速控制器 6—正反开关 7—底座 8—直流电机

图 4-16 食品质构仪结构简图

食品的物理性能都与力的作用有关，故质构仪提供压力、拉力和剪切力作用于样品，配上不同的样品探头(2)，来测试样品的物理性能。根据不同的食品形态和测试要求，选择不同的测样探头。如柱形探头(直径 2~50mm)常用于测试果蔬的硬度、脆性、弹性等；锥形探头可对黄油及其它粘性食品的粘度和稠度进行测量；模拟牙齿咀嚼食物动作的检测夹钳可以测量肉制品的韧性和嫩度；利用球形探头则可以测量休闲食品(如薯片)的酥脆性；挂钩形的探头可测面条的拉伸性等。测试原理是操作台表面的待测物随操作台一起等速的进行上升或下降运动，在与支架上的探头接触以后，把力传给压力传感器，压力传感器再把力信号转换成电信号输出，由放大器进一步把这种微弱的电信号放大成±5V 范围的标准电压信号，然后输出给 A/D 板，A/D 板再把标准电压信号转换成数字信号，输入计算机进行实时监控，并储存起来用于数据的分析处理。

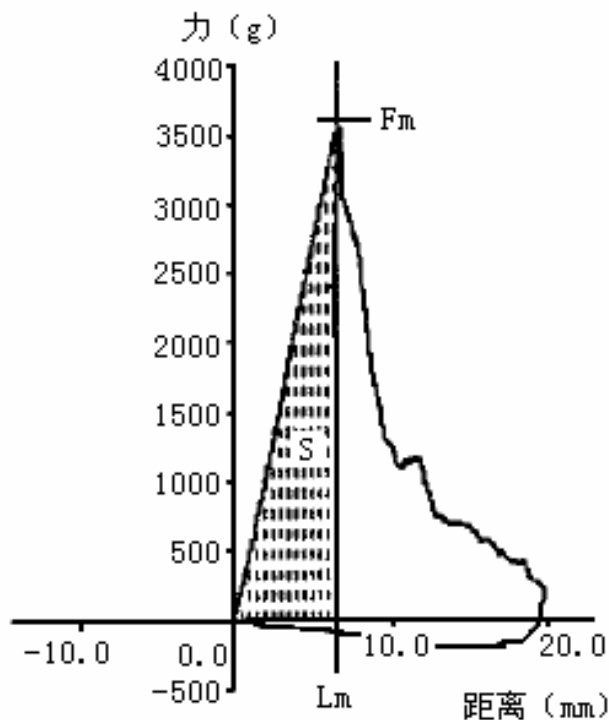


图 4-17 绿熟番茄质地特性曲线

### 2 测试方法

仪器主要围绕着距离、时间和作用力对试验对象的物性和质构进行测定，并通过对它们相互关系的处理、研究，获得试验对象的物性测试结果。测试前，首先按试验对象的测试要求，选用合适的探头，并根据待测物的形状大小，调整横梁与操作台的间距，然后选择电机转速及操作台的运动方向，当操作台及待测物运动以后，启动计算机程序进行数据采集。以绿熟番茄果实为研究对象，测试的典型物理性

能曲线如图 4-17 所示。标准的 TA (Texture Analyzer) 参数有  $F_m$  (突破力)、 $L_m$  (形变距离)、 $F_m/L_m$  (硬度)、 $1/2F_m \cdot L_m$  (第一压力能) 及  $L_m/F_m$  (柔性) 等。图中反映了番茄组织的多个结构特性, 组织抗穿透的能力表现为第一个峰值, 即突破力; 从探头接触试验对象表面开始到与突破点对应的穿透距离称为形变距离; 穿透曲线线性部分的斜率从数值上表示的是穿透力积累的速率, 但反映了果实组织的硬度特性; 面积  $S$  表示果实的第一压力能, 是果实表皮被穿透时所做的功, 反映了果皮的坚韧程度; 以及硬度的倒数反映了果实的柔性。其中突破力、形变距离、刚性和压力能都可以作为果蔬的物性指标。

#### 思考题

1. 密度瓶法测定样液相对密度的基本原理? 试说明密度瓶上的小帽起什么作用?
2. 密度计的表面如果有油污会给密度的测定带来怎样的影响? 试用液体的表面张力作用原理进行分析。
3. 阿贝折光仪利用反射光测定样液浓度的基本原理, 试用其光路图表示之。
4. 简述旋光法测定样液浓度的基本原理。
5. 测定水及样液色度的意义。
6. 粘度的测定方法有几种? 各有什么特点?
7. 食品的物理性能主要包括哪些方面? 举例说明食品物性的量化与食品分析的关系。