

高等学校试用教材

# 农 业 物 料 学

赵学笃 陈元生 张守勤 编



机械工业出版社

## 前 言

1983年机械部在长春召开的高等院校教材会议上，农业机械专业教材编审委员会将“农业物料学”定为农机类专业的必修课，但缺乏教材。这本书是为适应这个要求而编写的。

本书的主要内容是，从农业工程的需要出发，讨论农业物料的物理属性，介绍各种特性的基本理论、测定方法及其在农业工程上应用等方面的知识。农业物料学的内容很广，并且涉及到生物学、化学等其他领域。由于受篇幅的限制，本书只介绍了有关专著和科研成果的最基本内容，有些数学推导过程也未列出。

本书的第五章由吉林工业大学赵学笃同志编写，第一、二、四、七、八章由江苏工学院陈元生同志编写，第三、六章由吉林工业大学张守勤同志编写。全书由赵学笃同志负责汇总和整理。

全书由东北农学院的蒋亦元教授和马小愚同志主审，参加审稿会的有东北农学院、沈阳农学院、吉林农业大学等单位，各位代表对书稿提出了不少宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于水平所限，书中难免存在缺点或错误，望读者批评指正。

作者 1986年9月

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
第一节 农业物料和农业物科学 .....	1
第二节 农业物料的物理特性 .....	1
第三节 生物材料的结构特点 .....	2
第四节 农业物料物理特性的应用举例 .....	2
第五节 农业物料物理特性的研究方向 .....	4
第二章 农业物料的基本物理特征 .....	5
第一节 形状、大小和分布 .....	5
第二节 密度 .....	13
第三节 孔隙率 .....	16
第四节 基本物理特征在农业工程中的应用 .....	17
第三章 流变特性 .....	19
第一节 理想材料的力学性质 .....	19
第二节 粘弹性材料的流变特性 .....	20
第三节 流变模型及流变方程 .....	22
第四节 固体生物材料的流变特性及其测定 .....	32
第五节 机械损伤 .....	50
第六节 非牛顿流体的特性及粘度测量 .....	54
第四章 散粒体力学特性 .....	60
第一节 摩擦性 .....	60
第二节 粘附性与粘聚性 .....	64
第三节 散粒体的变形与抗剪强度 .....	65
第四节 散粒体的流动特性 .....	67
第五节 离析 .....	72
第六节 物料对容器的压力 .....	73
第七节 粉尘爆炸性 .....	75
第五章 流体动力特性 .....	76
第一节 流体对物料的作用力和阻力系数 .....	76
第二节 颗粒的临界速度及其应用 .....	78
第三节 两相流的基本概念及其在农业工程上的应用 .....	84
第六章 热特性 .....	89
第一节 比热、导热系数、热扩散系数及其测定 .....	89
第二节 平衡含水率及其测定 .....	98
第三节 农业物料的热特性在农业工程中的应用 .....	100
第七章 农业物料的光特性 .....	104
第一节 农产品的光透过特性 .....	104
第二节 农产品的光反射特性 .....	109

## IV

第三节 农产品的延迟发光 (DLE) 特性.....	112
第八章 农产品的电特性及其它 .....	114
第一节 生物电 .....	114
第二节 农产品的阻抗 .....	116
第三节 电场中的离子作用 .....	117
第四节 核磁共振 .....	119
第五节 电离辐射 .....	121
第六节 果品的声波特性 .....	122
参考文献 .....	123

# 第一章 绪 论

## 第一节 农业物料和农业物料学

与农业工程直接有关的物料，属于农业物料，除农产品等有机物质外，尚包括土壤、化肥、农药等无机物质。它们都是农业工程中的生产加工和处理的对象。

大多数农业物料的性质由其组织结构、活体的生理活动和材料的组成成分所决定，分为生物生理特性、物料的化学特性、物料的物理特性等。农业物料学是农业工程学的基础学科，主要研究农业物料的各种带有共性的物理特性，研究内容完全属于物理学范畴。因此，确切地讲，它是一门农业物料物理学。

我国的农产品十分丰富，但目前农产品加工技术比较落后。随着国民经济的发展，人民生活水平的提高，对农产品、畜产品和水产品的加工、贮藏、保鲜及废弃物的处理和利用等都提出了更高的要求。这是一个相当广阔的研究领域。在我国，这方面的工作刚开始，需要去开创、完善和深化。农业物料的种类繁多，研究内容极其广泛，而且各具特色，所以，研究的难度也较大。

以果品生产为例，由于缺少对果品基本特性的研究和有效的贮藏、保鲜方法，据80年代初期统计，一般情况下，果品在贮运过程中造成的损失达20%左右。红蕉苹果用柳条筐包装并用汽车运输550km，包括轻微损伤在内的机械损伤高达34.2%。要解决这些问题，不仅要研究果品的贮藏和保鲜方法，而且要研究果品本身的性质。

在农业工程中，节约能源、提高工作质量、减少损失和开发新领域等，是重要的任务。要完成这些任务，须对加工对象，即农业物料的性质有较深入的了解。水稻适合用梳刷法脱粒是由其力学性质决定的，而小麦的力学性质适合用揉搓法脱粒；用大豆制油时，如果用压榨法，则因其热变性大，增加了从豆饼中提取蛋白质的困难程度，出油率也低。较先进的制油方法是浸出法，这是由大豆蛋白的热特性所决定的。因此，农业物料的性质是正确选择和研究农业物料加工工艺的基础。农业物料学，是农业机械专业和农产品加工工程专业的技术基础课。本课程的目的是使学生了解农业物料学的基本理论，掌握基本的测试方法，熟悉农业物料的主要物理特性及其在农业工程中的应用，拓宽视野，为农业资源的开发和利用奠定基础。

## 第二节 农业物料的物理特性

农业物料的物理特性，主要包括农业物料的基本物理特征、力学性质、散粒体力学性质、流体力学性质、热特性、光特性、电特性等，这些物理特性还可相互影响。

农业物料的基本物理特征，包括形状、尺寸、粒径，粒度分布、体积、孔隙率、形状系数；重心、重量、密度；投影面积、表面积、表面特征；宏观结构、微观结构等。

力学性质是物理性质研究中极其重要而复杂的内容，它包括物料的各种应力—应变规律；

跌落、冲击、振动、屈服强度；蠕变、松弛、流变模型等。

散粒体力学性质有摩擦、粘附、变形、流动、结拱、离析、料仓力学等。

流体动力学特性包括流体阻力特性、悬浮性、两相流等。

热特性主要研究传热特性、呼吸热等。

光特性主要研究农业物料对光的吸收、反射、光密度、延迟发光等。

电特性研究各种生物电现象及其应用、电场作用和电离辐射等。

以上虽然仅列出了部分研究内容，但已可见其涉及的领域十分宽广。因此，农业物料学是一门跨学科的科学。学习农业物料学，可拓宽知识面，开阔思路，启发创新，能使设计者有正确的设计思想。

### 第三节 生物材料的结构特点

农产品的生物物料，是由细胞构成的。以叶肉细胞的结构为例，在原生质体的外围主要是由纤维素及其它多糖类组成的细胞壁，这些多聚物使单个细胞，甚至整个植物体具有坚硬性。由于细胞壁含有许多大型孔隙，因而它对水分及溶质向植物细胞的渗透起很大作用。水的渗透速率取决于溶液浓度和绝对温度。在细胞壁的内部和细胞质的外围，是一层细胞膜，称为原生质膜，简称质膜。质膜对进出细胞的物质，如水、非电解质和电解质，具有控制调节的功能。细胞质内含有叶绿体及线粒体等细胞器，使细胞器中的能量能从一种形式转换为另一种形式。细胞质内还具有核和特殊的微体，如过氧化物酶体、数量很多的核糖体、蛋白质以及影响水的热特性的许多其它结构和其它大分子。在高等植物的成熟细胞中，有一大型的中央液相部分，称为液泡。液泡的外围有一液泡膜。液泡的体积可占细胞体积的90%，在细胞生长中发生着水分进入液泡的过程。

在多细胞的生物体中，许多生理功能的完成，不是仅仅依靠单个细胞，而是由许多细胞组成的组织、器官来实现的。这些细胞不是简单地堆积在一起，而是按一定的结构形式连接的。这种细胞连接结构，可以是凹凸镶嵌的方式，也可以是特殊的连接结构。

生物细胞的结构很复杂，所以可完成生物的物理化学过程。例如离子和水通过细胞膜的移动，光合作用中的能量转变，气体在生物体内的流动等。因此，与金属材料截然不同，生物材料的物理学特性不仅受其结构特点的直接影响，而且还受到生物组织所处的周围环境的影响。具体地说，受到细胞结构和温度、水分、氧气、微生物等多种因素的影响。因此，也就增加了研究其物理特性的复杂程度。

### 第四节 农业物料物理特性的应用举例

现代农产品的生产和加工都需要农业物料学的知识，以便应用它的基本原理研制出具有性能良好、结构简单和节能的农机具或农产品加工设备。但目前有关这方面的内容研究得不多。然而，当设计机器装备的作业程序、机器结构以及控制系统时，当进行机器效率分析和测定时，当开发新的动植物资源和评定农产品品质时，农业物料的物理特性资料和数据是必须具备的。因此，它的研究成果是研究和设计具有先进性能的作业机器和设备的原始依据，并且能启发和引导工程技术人员去探索和发现新的加工原理，为产品设计提供最佳参数。

从以下的例子，可以看出农业物料学在农产品加工工程、农机工程以及食品工程中的地位和作用。例如，根据胡萝卜个体的重心位置，发明了胡萝卜自动定向排料装置；利用谷物种子的长度特征发明了窝眼选粮筒；利用桃子的外形特征，确定了桃子加工中的定向方法。精确测定农产品的形状和尺寸，可以解决自然状态下的热传导问题。在气力或水力输送时，物料的形状、尺寸、密度等起着重要的作用。有时，当不可能用直接的方法测定农产品的品质时，可以利用其一个或多个具有精确定义的物理参数来间接测量。例如，往往将密度作为马铃薯淀粉含量和总干物质含量的系数。此外，外貌和内部颜色也是农产品品质评价中的两个重要因素。

农产品的力学性质得到了广泛的应用。例如，在研究水果振动特性的基础上，发明了用振动原理设计的水果收获机械。根据马铃薯或洋葱与土块所具有的不同回弹特性，设计出了马铃薯（洋葱）土块分离装置。根据已压伤的桔子弹性小的特点，发明了剔除已伤桔子的分选器。按照好浆果和坏浆果具有不同的固有频率，发明了用振动方法自动分选浆果的设备。根据力学性质，可以分选不同成熟度的农产品。设计粉碎机械时，必须研究被加工对象的破碎能量，以便确定粉碎的最佳方案。农产品对于各种材料的静摩擦系数和动摩擦系数，是计算和预测物料在加工机械中运动情况所必需的资料。在确定谷粒和青饲料对仓壁和青贮塔的压力时，摩擦系数同样是重要的数据。饲料或青饲料的可压缩性、膨胀性、内摩擦系数、粘附性和流变特性等，都是研究其贮藏或打捆方法的重要资料。作物的切割阻力和弯曲强度，可用于分析切割过程的本质和能量消耗。水果的机械强度，可用于评判果肉组织的构造。种子的力学特性很重要，如果在脱粒、输送过程中造成种子的机械损伤，将严重影响其发芽率、幼苗的成活率和生长活力，同时容易受昆虫和真菌的侵袭。水果、蔬菜的收获机械、装运机械和贮存设备的设计使用，都需要以其力学特性作为基本资料。农产品的流变特性，在食品加工工艺中起着重要的作用。

物料的气力输送和清选设备是根据物料的空气动力特性进行设计的。水选桔子装置是根据桔子的密度进行设计的。

水果、蔬菜进行贮运、加工和保鲜时，首先必须掌握其以时间和温度为主要参数的热特性资料。将农产品加热、冷却、干燥和冷冻时，其热特性将直接影响机器的工作性能。在生物物料的加热过程中，加热速度和温度的高低是重要因素。在设计乳品的冷冻设备、肉制品的加热和脱水设备、果蔬的制冷设备、罐头生产和食品加工设备时，物料的热导率是重要参数。

根据蕃茄的光特性，设计出了蕃茄成熟度自动分选设备。利用鱼的光特性，可以自动区分某些鱼的雌雄。由电脑控制的光电筛选机，可以分选各种蔬菜、水果或谷粒。研究农产品的光特性，可对农产品的无损检验作出巨大贡献。根据物料的光透过特性，已能分别测出蕃茄的内部变色、小麦黑穗病的发展期、马铃薯内部病态、苹果的水核和烂心、水果的叶绿素含量、谷物的病虫害、种子的水分以及樱桃、玉米等的损伤。用红外线的反射和传导方法，能够测出肉制品、豆浆、种子等材料的含水率、蛋白质含量和油脂含量。利用农产品的光特性，已经研制出了一系列光学检测仪器，其中光导纤维和电脑数据处理系统已得到广泛应用。

利用种子的电特性差异，已生产了各种方案的静电选种机。电抗技术，可用于测定由于霜冻、喷药毒害或其他作用方式对植物组织造成的损伤程度。其基本原理是，细胞死亡后没有电容，细胞没有受损时具有包括电阻和电容在内的电抗。由于物料的电特性与几何尺寸有

关，由此设计出了棉花纤维长度分布和羊毛细密度的测量仪器。

物料的声能吸收量，与材料的浓度和粘性有关。当谷粒含水率增加时，谷粒冲击固体表面的声压强度将减小。自古以来用叩音方法判断西瓜的成熟程度，是利用声波特性的最常见的例子。

## 第五节 农业物料物理特性的研究方向

我国农业物料物理特性的研究工作始于 50 年代，以后曾停止了相当一段时期，直到 80 年代初期才恢复起来。因此，我国对农业物料物理特性的研究尚处于初期阶段。有些领域的课题还没有研究，大量的数据还没有测定。目前，我国的农业物料研究工作，急需从以下几方面扩展和提高：

(1) 从国民经济需要出发，结合经济效益和社会效益，加强农业物料物理特性的应用性研究，为开发新技术提供依据；

(2) 合理规划，加强系统性研究；

(3) 在应用性研究的基础上，提高研究的深度，加强实质的研究和开发新的研究领域；

(4) 采用先进的科学技术，改善测试方法，提高测试精度。

近 20 多年来，美国、日本、苏联等国对农业物料物理特性的研究给予了高度的重视，开展了大量的研究工作，采用了微电脑、有限元等先进技术。国外的农业物料学正在形成一门独立完整的学科体系。在一些院校，农业物料学已列为攻读农业工程和农机学科的本科生和研究生的必修课。



## 第二章 农业物料的基本物理特征

农业物料的基本物理特征，主要包括物料的单元素尺寸、综合尺寸、外观形状、表面积、体积、密度、孔隙比等。这些物理特征在农业工程中应用甚广。例如，水果涂腊处理前，须知水果的表面积大小；确定筛孔直径以区分种子级别时，须知种子的粒度分布；从花生或马铃薯中去除土块时，应该知道它们的密度差别，枣子或桃子自动去核时，须了解其外形特征等。

### 第一节 形状、大小和分布

物料的形状、大小及其分布数据，须要经过大量的测量才能获得。历史上最早采用的方法是筛分法，如米、面的筛分。此外，农食品加工中的风选，选矿中的水力分选等在古代也早有应用，一直延续至今。自显微镜于18世纪出现后，开始将显微镜应用于测定一些微小物料的大小、形状及其分布。

在物料的物理特征测量中，首先遇到的是粒度测量。粒度测量不只是测量单个颗粒的尺寸，而且包括测量粒子群的粒度分布。

#### 一、尺寸和形状

物体的大小常以尺寸来描述，而各方向的尺寸可表示该物体的形状。因而，同一物体的尺寸和形状是不可分割的两个参量。

在农业物料中，例如各种水果和谷物种子，它们的大小形状是十分复杂的。有的是规则体形，但大多数是不规则的，无法用单独一个尺寸确切地表达。形状规则的物体如球，立方体，圆锥体等可用相应的尺寸来表示。一般情况下，物体可用三个相互垂直的轴向尺寸来表示，即由长( $l$ )、宽( $b$ )、厚( $t$ )来度量。长指平面投影图中的最大尺寸，宽指垂直于长度方向的最大尺寸，厚指垂直于长、宽方向的直线尺寸。

严格地说，世界上不存在两个绝对相同的物体。由于作物生长条件的不同，即使是同一品种，其大

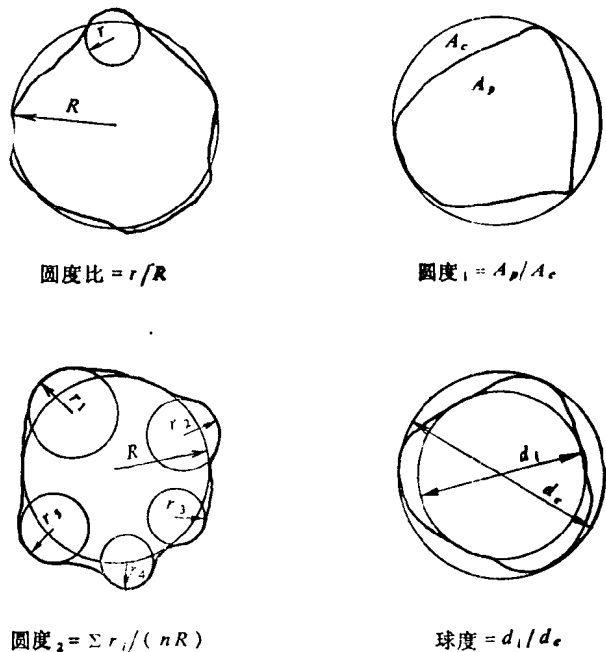


图2-1 类球体的圆度和球度

小和形状也不尽相同。为了表示某个品种全部颗粒的尺寸，可随机取 1000 粒样品，分别测量其各向尺寸，并绘制其分布曲线。

物体的计算直径简称粒径，是表示物体各向尺寸的综合指标。它是利用已测定的物体的某些尺寸或参数推导出来的直径，用得最多的是当量球径，因为圆球的直径能表征其大小、体积和表面积。对于不同形状的物体粒子，必须按一定的方法确定其粒径。边长为 1 的正立方体，其体积等于直径为 1.24 的圆球体积。所以 1.24 就是推导出来的等体积球直径。

因为粒径是物体各向尺寸的综合指标，所以并不体现其具体形状。对于不规则形状的物体，一般用查表的方法来定义其标准形状。将物体的纵剖面 and 横剖面的外形轮廓绘在图面上，然后用实物图形与标准图形相对照，利用标准图表定义该物体的形状。

物体的很多性能与物体的形状有关；定性的形状术语，可用来表明某些形状的物体的性质。

大多数水果的形状是近于球状的，称为类球体。在类球体中，又有各种形状定义，如扁球形、椭球形、卵形等。类球体常用圆度或球度来定量描述(图 2-1)。

类球体的圆度表示其棱角的锐利程度，用下式计算

$$\text{圆度}_1 = A_p / A_e \quad (2-1)$$

式中  $A_p$ ——类球体在自然放置稳定状态下的最大投影面积，该面积可用投影法或描图法取得；

$A_e$ —— $A_p$  面积的最小外接圆面积。

圆度还可以用以下另外两种方法表示

$$\text{圆度}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{nR} \quad (2-2)$$

$$\text{圆度比} = \frac{r_{\min}}{R_p} \quad (2-3)$$

式中  $r_i$ ——类球体最大投影面积图形上棱角的曲率半径；

$R$ ——类球体最大投影面积图形的最大内接圆半径；

$n$ ——棱角的总数；

$r_{\min}$ ——最大投影面积图上类球体的最小曲率半径(最大锐角的曲率半径)；

$R_p$ ——最大投影面积图上类球体的平均半径。

类球体的球度表示物体的球形程度，定义为等体积球体投影圆的周长，与物体最小外接球体投影圆的周长之比。

$$\text{球度}_1 = \frac{\pi d_e}{\pi d_i} = \frac{d_e}{d_i} \quad (2-4)$$

式中  $d_e$ ——与类球体体积相同的球体的直径；

$d_i$ ——类球体的最小外接球体直径或者物体的最大直径。

球度的另一种表达式为

$$\text{球度}_2 = \frac{d_i}{d_e} \quad (2-5)$$

式中  $d_i$ ——类球体的最大投影面积图形的最大内接圆直径；

$d_c$ ——类球体的最大投影面积图形的最小外接圆直径。

除了以上所列的圆度和球度的表示方法外，尚有其它几种表示法。

## 二、面积和体积

物体各向尺寸之间的数字关系取决于物体的形状。物体各向尺寸之间的无量纲组合，称为形状因素，如长宽度  $l/b$ ，扁平度  $b/t$ 。物体各种尺寸与其面积或体积之间的关系称为形状系数，是表示物体实际形状与球形不一致程度的尺度，如面积形状系数、体积形状系数等。

物体的表面积和体积分别与某特性尺寸的两次方和三次方成正比，比例常数取决于特性尺寸的选择。

因为测定不规则形状的物体表面积十分困难，所以采用投影方法求出。

物体的表面积和体积可分别表示为：

$$S = \alpha_{s,a} d_a^2 = x^2 \quad (2-6)$$

$$V = \alpha_{v,a} d_a^3 = x^3 \quad (2-7)$$

式中  $S$ 、 $V$ ——分别表示物体的表面积和体积；

$\alpha_s$ 、 $\alpha_v$ ——分别为物体的面积形状系数和体积形状系数；

$a$ ——投影面积；

$d_a$ ——所测得的直径是投影面积直径；

$x$ ——物体粒子的尺寸，它不同于直径，而是包括形状系数在内的人为的数值。

单位体积的表面积  $S_v$  是  $S$  和  $V$  之比，由以上两式得

$$S_v = \frac{\alpha_{sv,a}}{d_a} = \frac{1}{x_{sv}} \quad (2-8)$$

式中  $\alpha_{sv,a}$ ——物体的体面积形状系数，又称比表面积形状系数；

$x_{sv}$ ——物体的体面积尺寸。

由式(2-8)得  $\alpha_{sv,a} = \alpha_{sv} / \alpha_{va} = S d_a / V \quad (2-9)$

对于球体，面积形状系数等于  $\pi$ ，体积形状系数等于  $\pi/6$ ，所以体面积形状系数  $\alpha_{sv,a} = 6$ 。

因为凸状物体的投影面积随投影方向的变化而变化，所以采用平均投影面积。平均投影面积是指物体在三个互相垂直的投影面上投影面积的平均值，即

$$A_c = (A_1 + A_2 + A_3) / 3 \quad (2-10)$$

式中  $A_c$ ——平均投影面积；

$A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ——分别为在  $H$ 、 $V$ 、 $W$  三个相互垂直视图上的投影面积。

凸状物体存在下列关系：

$$V^2 / S^3 \leq 1 / 36 \pi \quad (2-11)$$

当物体为球体时，取等号。

式中  $V$ ——凸状物体的体积；

$S$ ——凸状物体的表面积。

根据统计资料，凸状物体的表面积一般为平均投影面积的 4 倍，即

$$S = 4 A_c$$

因此

$$A_c \geq \left( \frac{9\pi}{16} \right)^{1/3} V^{2/3}$$

或者

$$A_c \geq kV^{2/3}$$

(2-12)

式中  $k$ ——无因次常数, 当物体为球体时取等号, 且  $k = 1.21$ 。

有关农产品形状的研究成果, 在不少场合得到了应用, 例如干燥过程中谷粒形状的变化, 成熟过程中种子粒形的变化, 米粒形状与品质的关系, 用计算机解析方法进行形状清选, 果蔬的形状规格分级等。

植物材料的表面积是农艺师和农业工程师需掌握的基本资料。植物生长是否茂盛, 是以茎秆的粗细和叶面的大小为依据的。叶面积是植物材料进行光合作用能力和生长速度的基数。研究植物对光和营养的吸收时, 研究植物—水—土壤间的关系时, 确定农药或杀虫剂的用量及施用次数时, 测量植物体的叶面积有着重要的意义。烟叶等产叶作物的叶面积, 标志着产量的多少。在果品加工、涂蜡处理和喷雾距离的确定中, 水果的表面积是重要数据。果蔬的热传导、呼吸强度、光吸收、光反射等性质均与其表面积有关。

下面举几个农业物料表面面积的测定方法。

### 1. 基叶表面面积的测量

基叶表面面积的测量方法有多种: (1) 把被测物体放在感光纸上接触晒印, 用求积仪求出; (2) 将被测物体放在方格纸上, 画出外形轮廓, 计算方格数; (3) 投影照相测量; (4) 光遮断法, 用光电管测量; (5) 按叶面轮廓图形剪纸, 并将所剪纸片称重计算; (6) 用气流求积仪测出气体压力的大小, 换算成阻挡气流的叶面积(图2-2); (7) 统计某尺寸与面积的相互关系, 测量尺寸后推算出面积。

### 2. 水果表面面积的测量

水果的表面积较难精确地测出。一般将果皮削成窄条, 然后将全部窄条铺平, 画出图形, 按图形求面积; 或者统计水果的表面积与某一尺寸或重量的相互关系, 用该法可快速求得水果表面积的大小。在有些情况下, 可按旋转体图形计算表面积。如图2-3所示, 水果的体积为

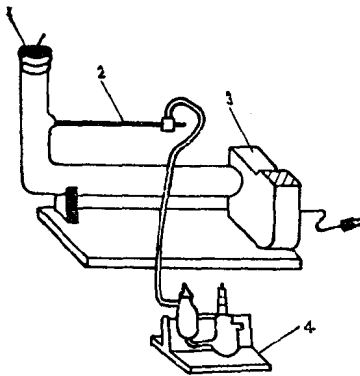


图2-2 气流求积仪

1—支承试样的筛网 2—串接管 3—风扇 4—微压计

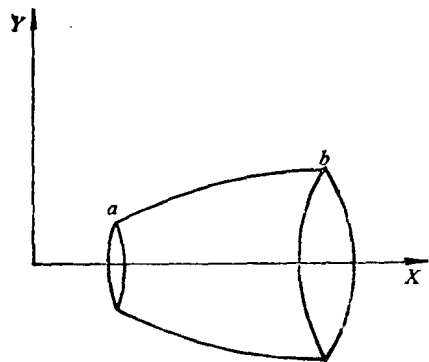


图2-3 旋转体图例

$$V = \int_a^b \pi y^2 dx$$

(2-13)

表面积为

$$S = \int_a^b 2\pi y \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (2-14)$$

### 3. 鸡蛋表面积测量

新鲜鸡蛋的表面积可用称重法算出，其经验公式为

$$S = KW^m \quad (2-15)$$

式中  $K$ 、 $m$ ——常数，一般取  $K = 4.56 \sim 5.07$ ； $m = 0.66$ ；

$S$ ——鸡蛋表面积( $\text{cm}^2$ )；

$W$ ——称出的鸡蛋重量( $\text{g}$ )。

另一种方法是用投影或光遮断法先画出鸡蛋的轮廓外形，然后微分计算其表面积总和。或用纸带覆盖鸡蛋的表面，再用上述纸片称重法求出。

### 三、粒径

如前所述，粒径是表示物体各向尺寸的综合指标。因为球体的表面积与体积之比最小，理论分析容易，并且球形粒子无方向性，实验结果容易再现，所以常用当量球径表示粒径。实际上，农业物料颗粒体几乎都不是球形，而是不规则形，所以理论计算与实际现象常常不符合，需将理论计算结果加以修正。

物料的粒径分为代表单个粒子的单粒体粒径，和代表系统内不同尺寸的粒子群的平均粒径。

对于不规则形状的物体，物体的尺寸取决于测定的方法。因此，选用的方法应尽可能地反映物料的加工工艺。

对于每一个单个物体，有无数多的不同方向的直线长度，只有将这些长度加以平均，才能得到有意义的数值。对于系统内的粒子群，也是如此。因此，只有测定了足够多的粒子数，得出其统计规律才有意义。

粒径的定义方法有很多种，用不同的方法求出的粒径不同。具有相同粒径的物体，可能具有非常不同的形状。表 2-1 所示为单粒体的粒径定义。

表 2-1 单粒体粒径的定义

名称	计算公式	名称	计算公式
长轴径	$l$	圆等值径	$(4f/\pi)^{1/2}$
短轴径	$b$	几何平均径	$(lb)^{1/2}$
二轴算术平均径	$(l+b)/2$	圆柱体等值径	$(fl)^{1/3}$
三轴算术平均径	$(l+b+l)/3$	立方体等值径	$V^{1/3}$
调和平均径	$3\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{l}\right)^{-1}$	球体积等值径	$(6V/\pi)^{1/3}$
表面积平均径	$(2lb + 2bt + 2lt)^{1/2}/6$	定向径	$d_g$
体积平均径	$3lbt/(lb + bt + lt)^{-1}$	定向面积等分径	$d_m$
外接矩形等值径	$(lb)^{1/2}$	斯托克斯径	$\left(\frac{18\mu u_t}{\gamma_s - \gamma_a}\right)^{1/2}$
正方形等值径	$f^{1/2}$		

注： $f$ ——投影面积， $V$ ——粒子体积； $\mu$ ——流体粘度； $u_t$ ——粒子沉降速度； $\gamma_s$ ——粒子重度； $\gamma_a$ ——流体重度。

表 2-1 所列的粒径定义中，实际上经常采用的是算术平均径、圆等值径和定向径。对于微小粒子，也可用重力沉降法测定，通过理论计算，得出斯托克斯径。定向径是指粒子投影图上任意方向的最大距离。定向面积等分径，是指按一定方向将投影面积分割成二等分时的直

线长度。

粒子群的平均直径是指试样系统中单粒体粒径的平均值。根据不同的用途，采用不同的计算方法。平均粒径的计算方法如表 2-2 所示。若将同一种物料试样进行计算，各种粒径的

表2-2 平均粒径的计算方法

名称	计算公式	说明
算术平均径	$d_1 = \Sigma(nd) / \Sigma n$	粒径的算术平均值
几何平均径	$d_2 = (d_1' d_2' \dots d_n')^{\frac{1}{n}}$	$n$ 个粒径的乘积的 $n$ 次方根
调和平均径	$d_3 = \Sigma n / \Sigma (n/d)$	各粒径的调和平均值
面积长度平均径	$d_4 = \Sigma(nd^2) / \Sigma(nd)$	表面积总和除以直径总和
体面积平均径	$d_5 = \Sigma(nd^3) / \Sigma(nd^2)$	全部粒子的体积除以总面积
重量平均径	$d_6 = \Sigma(nd^4) / \Sigma(nd^3)$	重量等于总重量、数目等于总个数的等粒子粒径
平均表面积径	$d_7 = [\Sigma(nd^2) / \Sigma n]^{1/2}$	将总表面积除以总个数，取其平方根
平均体积径	$d_8 = [\Sigma(nd^3) / \Sigma n]^{1/3}$	将总体积除以总个数，取其立方根
比表面积径	$d = 6 / (\gamma_s S)$	由比表面积 $S$ (单位体积料层具有的总表面积) 计算的粒径， $\gamma_s$ 是重度
中径	$d_{50}$	以粒径分布的累积值为 50% 时的粒径表示
多数径	$d_{mod}$	以粒径分布中频率最高的粒径表示

差值较大，其排列规律为  $d_3 < d_2 < d_1 < d_7 < d_8 < d_4 < d_5 < d_6$ 。

实际应用中，应根据物料的用途选择合适的粒径计算方法。表 2-3 给出了主要的物理化学现象与相应的最为合适的平均粒径计算方法。

表2-3 不同的物理化学现象所采用的平均粒径

符号	名称	物理化学现象
$d_1$	算术平均径	蒸发，各种尺寸的比较
$d_4$	面积长度平均径	吸附
$d_5$	体面积平均径	传质、反应、粒子充填层的流体阻力、充填材料的强度
$d_6$	重量平均径	气力输送、重量效率、燃烧、平衡
$d_7$	平均表面积径	吸收
$d_8$	平均体积径	光的散射、喷雾的质量分布比较
$d$	比表面积径	蒸发、分子扩散
$d_{50}$	中径	分离、分级装置性能表示

粒径的测量有很多方法，如筛分法、光学显微镜法、电子显微镜法、液相沉降法、风选法、光线散射法等，应当根据物料的种类、粒径的大小、颗粒的形状及其物理性质的不同，采用相应的测量方法。在生产实践中，常常不是用昂贵的仪器化费很多时间来测定，而是采用简易的方法确定粒径，以提高设计速度。

### 1. 粗粒子平均粒径计算

粒子大到可以一粒一粒地拣出的程度时，可以采用这种方法。首先从试样中随机地采集 200 个以上（越多越好）粒子。用普通天平测定其总重量  $W_{..}$ 。设粒子的真实重度为  $\gamma_s$ ，则平均粒径可用下式计算

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6W_{..}}{\pi\gamma_s n}} \quad (2-16)$$

由式 (2-16) 计算出的粒径  $d_s$ ，相当于把所有粒子均看作等体积球形粒子时的平均直径。

## 2. 细粉的平均粒径计算

对于粒子细到无法一粒一粒数的粉状物料，例如面粉，常采用调和平均径的计算方法。设在一定量粉料中各成分的比例如下：

直径为 $d_1$ 的粒子占总重量的百分数为 $x_1$ ；

直径为 $d_2$ 的粒子占总重量的百分数为 $x_2$ ；

……

直径为 $d_m$ 的粒子占总重量的百分数为 $x_m$ ；全部粒子的调和平均粒径 $d_s$ 为

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{x_i}{d_i} \right)} \quad (2-17)$$

如果简单地用算术平均值计算，则

$$d_s = \sum_{i=1}^m (x_i d_i) \quad (2-18)$$

各成分百分数的测定可用筛分法。将一定数量的粉料（约50~100g），用筛孔分别为 $d'_1, d'_2, \dots, d'_{m+1}$ 的 $m+1$ 个筛子进行分级。设

$d'_1$ 至 $d'_2$ 的平均粒径为 $d_1$ ，占总重量的百分比为 $x_1$

$d'_2$ 至 $d'_3$ 的平均粒径为 $d_2$ ，占总重量的百分比为 $x_2$ ；

……

$d'_m$ 至 $d'_{m+1}$ 的平均粒径为 $d_m$ ，占总重量的百分比为 $x_m$ ，则

$$d_1 = \sqrt{d'_1 d'_2}$$

$$d_2 = \sqrt{d'_2 d'_3}$$

……

$$d_m = \sqrt{d'_m d'_{m+1}}$$

由此求得 $d_1, d_2, \dots, d_m$ 和由筛分出的各部分粒子群的重量百分比（又称个别产率） $x_1, x_2, \dots, x_m$ 后，可按式（2-17）或（2-18）计算调和平均粒径或算术平均粒径。

筛分法化费的时间较短，人为误差也较小，得到的平均粒径接近于个别产率最大时的粒子尺寸。所以，筛分法是粒径测量中最简单快速的方法，应用很广，但手工劳动居多。

用筛分法将物料按粒度分级时，通常使用普通的金属丝网筛子。对于1吋以上的开孔，直接以开孔的尺寸表示孔的大小；对于1吋以下的孔，用1吋长度上的孔数表示孔的大小，称为目，有时称为网目。联邦德国是将每平方厘米中的孔数编为筛号。金属网的材料和金属丝的粗细，各国有不同的规格。

通常以筛子孔隙率，即开孔部分面积占筛网总面积的百分数来表示筛子的性能。

我国常用泰勒标准筛，它与日本、美国、英国的标准规格大致相同。泰勒标准筛有两个序列。一个是基本序列，筛比是 $\sqrt{2} = 1.414$ ，即每两个相邻筛号的筛子，其筛孔尺寸相差 $\sqrt{2}$ 倍，因此，筛孔面积相差两倍。另一个是附加序列，筛比是 $\sqrt[3]{2} = 1.189$ 。基筛是200目的筛子，筛孔尺寸为0.074mm。其它的筛孔尺寸，均按筛比的倍率决定。一般采用基本序列，在要求具有更窄的粒级时，可插入附加序列的筛序。目前我国已使用国际标准（ISO）

筛，它基本上沿用泰勒筛系。

常用的标准筛直径为 200 mm，高度为 50mm。

四、粒度分布

粒度分布，是以粒子群的重量或粒子数百分率计算的粒径频率分布曲线或累积分布曲线表示的，是农业物料分级的原始资料。频率分布曲线通常符合正态分布规律。频率分布最高点的粒径，称为多数径  $d_{m..}$ 。在累积分布曲线 50% 处的粒径，称为中径  $d_{50}$ 。以重量百分率为基准的粒度分布曲线如图 2-4 和图 2-5。图 2-6 是马铃薯淀粉的粒度分布情况。

如果粒度分布是正态分布，可用概率密度函数表示。检验粒度分布是否正态分布，可利用正态概率纸，看各点是否具有直线性。

利用粒度分布曲线，可以求出谷物精选的精确程度。在饲料加工中，根据禽畜的种类和生长期，要求有较严格的粒度控制范围。

有时，将累积分布曲线分为筛上分布曲线和筛下分布曲线。设大于任意粒径的粒子重量占总重量的百分数为  $R\%$ ，小于该粒径的粒子重量占总重量的百分数为  $D = 100 - R\%$ ，则  $R$  曲线称为物料的筛上分布曲线， $D$  曲线称为筛下分布曲线。

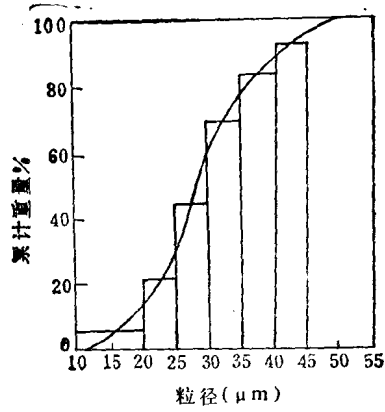


图2-4 粒度累积分布曲线

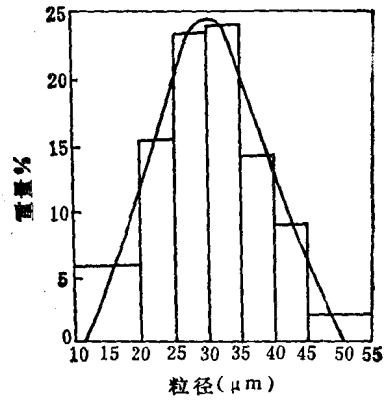


图2-5 粒度频率分布曲线

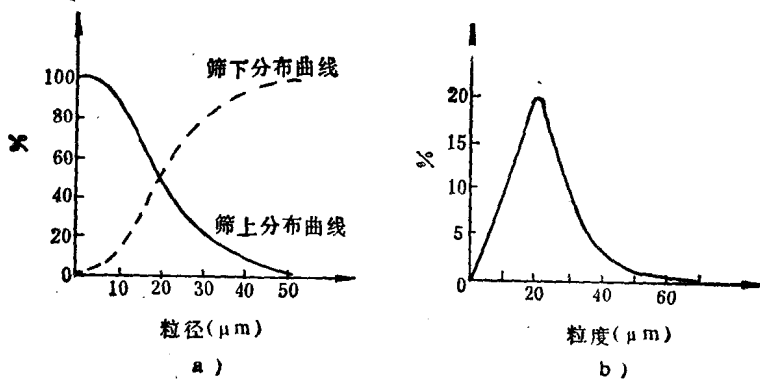


图2-6 马铃薯淀粉的粒度分布

a) 累积分布曲线 b) 频率分布曲线



## 第二节 密 度

农业物料的密度、重度在许多场合都有应用。例如，料仓计算、气流输送、贮运箱计算等，都需要这方面的资料。

由于绝大多数农业物料的形状不规则，且多为多孔性，尺寸不易测量，计算体积存在一定的困难。

物料的密度可分为真实密度和容积密度两种。

### 一、真实密度

真实密度是物料的质量与其实际体积之比值。所谓实际体积，是指不包括粒子间空隙体积的体积。真实密度的测定方法有以下几种。

#### 1. 浮力法（又称比重天平法）

对于较小的物料，可用比重天平（图 2-7）测定物料的体积。测定时，将物料分别置于空气中和液体中称重。设称得的重量分别为  $m_s$  和  $m'_s$ ，则粒子在液体中受到的浮力  $F_s$  为

$$F_s = m_s g - m'_s g$$

设液体的密度为  $\rho_1$ ，则

$$F_s = V_s \rho_1 g \quad (2-19)$$

所以物料的体积  $V_s$  为

$$V_s = (m_s - m'_s) / \rho_1 \quad (2-20)$$

物料的密度为

$$\rho_s = m_s \rho_1 / (m_s - m'_s) \quad (2-21)$$

再根据气体的密度  $\rho_g$  对浮力进行修正，得

$$\rho_s = m_s (\rho_1 - \rho_g) / (m_s - m'_s) + \rho_g \quad (2-22)$$

当物料的密度比液体密度小时，可用附加砝码使物体沉入液体中进行测量，并按下式计算密度：

$$\rho_s = m_s (\rho_1 - \rho_g) / (m_s - m'_s + \Delta m_s) + \rho_g$$

式中  $\Delta m_s$  —— 附加砝码质量。

若在  $500\text{cm}^3$  的蒸馏水中加入  $3\text{cm}^3$  的湿润剂溶液，将可减少由于表面张力和在水中浸没造成的误差。

对于水果等比较大些的物料，可用台秤称重法测定其密度（图 2-8）。先将待测物料放在台秤上称重，设称得的重量为  $m_0$ 。再将充满一定容量水的杯子放在台秤上称重，称得水和量杯的重量为  $m_1$ 。然后将物料沉没于水中（若物料密度比水小，须用玻璃棒将物料强制浸没于水中），将浸沉物料的容器在台秤上称重，得  $m_2$ ，则物料的体积  $V_s$  为

$$V_s = \frac{m_2 - m_1}{\rho}$$

式中  $\rho$  —— 水的密度。

物料的密度  $\rho_s$  为

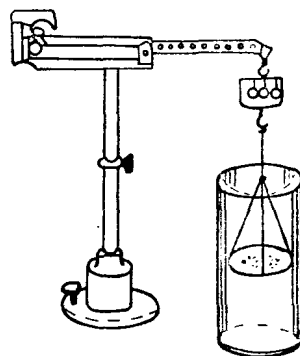


图 2-7 比重天平