

全国高等农业院校教材

农业物料学

周祖铎 主编

农产品贮藏加工专业用

ND 12/21

农业出版社

3.00

主编 周祖铎 (北京农业工程大学)
编者 张和远 (沈阳农业大学)
主审 马小愿 (东北农学院)

前 言

本书是根据全国高等农业院校教材指导委员会农业工程学科组审定，列入农业工程学科组基本教材，为农产品贮藏加工专业而编写的。本书同样适合于农业机械专业以及农业工程学科的其他相关专业使用。本书也可供从事农产品加工的有关技术人员参考。

本书主要内容是从农产品贮藏和加工的实际需要出发，介绍与农业加工工程有关的农业物料物理特性的基本理论，物理特性的表示和测定方法以及在农业工程领域中的应用。书中介绍了目前国内外研究最新成果，用较大篇幅介绍了各种农业物料的物理特性数据和测试装置，可供读者参考引用。

本书第四、五、八章由张和远编写，其余章节由周祖镔编写。

全书由周祖镔统稿，马小愚主审。

本书在编写过程中得到各兄弟院校有关老师大力支持，并对书稿内容提出了不少宝贵意见，在此表示感谢。

由于编者水平有限，难免有不当和错误之处，恳切希望读者批评指正。

作 者

1990.6

目 录

| | |
|---------------------|----|
| 绪论 | 1 |
| 第一章 基本物理参数 | 4 |
| 第一节 形状和尺寸 | 4 |
| 一、图形比较法 | 4 |
| 二、用类似的几何体表示 | 5 |
| 三、形状指数 | 6 |
| 四、形状系数 | 7 |
| 五、轴向尺寸 | 8 |
| 六、粒径 | 9 |
| 七、曲率半径 | 11 |
| 第二节 农业物料的密度及测量 | 12 |
| 一、密度的定义 | 12 |
| 二、农业物料密度测量 | 12 |
| 三、农业物料的密度 | 17 |
| 第三节 孔隙率 | 19 |
| 第四节 表面积和比表面积 | 20 |
| 一、农业物料表面积及测量 | 20 |
| 二、松散物料比表面积及测量 | 21 |
| 第五节 水分和活性 | 22 |
| 一、农业物料的含水量 | 22 |
| 二、水的活性 | 23 |
| 第二章 固体农业物料的流变特性 | 25 |
| 第一节 理想物体的流变特性 | 26 |
| 一、理想弹性体的流变特性 | 26 |
| 二、理想粘性体的流变特性 | 28 |
| 三、理想塑性体的流变特性 | 29 |
| 第二节 粘弹性 | 29 |
| 第三节 流变模型和流变方程式 | 30 |
| 一、流变模型的基本元件和流变方程式 | 31 |
| 二、麦克斯韦模型和流变方程式 | 31 |
| 三、开尔文模型和流变方程式 | 34 |
| 四、伯格斯模型和流变方程式 | 36 |
| 五、广义麦克斯韦模型和流变方程式 | 38 |
| 六、广义开尔文模型和流变方程式 | 39 |
| 第四节 固体农业物料的流变性质及其测定 | 40 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| 一、力和变形关系 | 40 |
| 二、弹性参数及测定 | 42 |
| 三、弹塑性参数及测定 | 49 |
| 四、粘弹性参数及测定 | 51 |
| 五、模拟试验 | 62 |
| 第三章 液体农业物料的流动特性 | 65 |
| 第一节 液体农业物料的流动特性 | 65 |
| 一、牛顿流体及其粘度 | 66 |
| 二、准粘性流体和表观粘度 | 67 |
| 三、塑性流体和准塑性流体 | 69 |
| 四、触变性和胶变性流体 | 70 |
| 五、粘弹性流体 | 71 |
| 第二节 液体农业物料流动性质的测定 | 72 |
| 一、细管法流动特性测定原理 | 73 |
| 二、旋转法流动特性测定原理 | 79 |
| 三、振动法确定粘弹性液体的流动特性 | 84 |
| 第四章 农业物料的流体动力学特性 | 85 |
| 第一节 阻力和阻力系数 | 85 |
| 一、球体的阻力系数 | 85 |
| 二、平板的阻力系数 | 87 |
| 三、其它形状物体的阻力系数 | 87 |
| 第二节 临界速度 | 88 |
| 一、计算法确定物料的临界速度 | 89 |
| 二、查表法确定物料的临界速度 | 91 |
| 三、实验法确定物料的临界速度 | 93 |
| 第三节 在农业工程中的应用 | 95 |
| 一、农业物料的清洗和分离 | 95 |
| 二、气力输送 | 97 |
| 三、水力输送 | 99 |
| 第五章 散粒物料的力学特性 | 101 |
| 第一节 摩擦特性 | 101 |
| 一、基本概念 | 101 |
| 二、滑动摩擦角 | 101 |
| 三、滚动稳定角 | 104 |
| 四、休止角 | 105 |
| 五、内摩擦角 | 106 |
| 第二节 流动特性 | 110 |
| 一、散粒物料在料仓和料斗内的重力流动形式 | 110 |
| 二、散粒物料的流动特性 | 110 |
| 三、料斗最小开孔尺寸 | 112 |
| 第三节 散粒物料对容器的压力 | 114 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 一、浅仓和深仓的定义 | 114 |
| 二、浅仓内压力分布 | 114 |
| 三、深仓内压力分布 | 115 |
| 第六章 农业物料的热学特性 | 118 |
| 第一节 传热的基本形式 | 118 |
| 一、导热 | 118 |
| 二、对流换热 | 122 |
| 三、辐射换热 | 123 |
| 第二节 农业物料热学特性的测定 | 124 |
| 一、比热测定 | 124 |
| 二、导热率测定 | 127 |
| 三、导温系数测定 | 132 |
| 第三节 农业物料的热学特性 | 134 |
| 一、农业物料的比热 | 134 |
| 二、农业物料的导热率 | 137 |
| 三、农业物料的导温系数 | 139 |
| 四、对流换热系数 | 140 |
| 第四节 在农业物料和食品加工中的应用 | 142 |
| 一、农业物料和食品的冷却 | 142 |
| 二、农业物料和食品的热处理 | 145 |
| 第七章 农业物料的光学特性 | 146 |
| 第一节 光在农业物料中的传播及其相互作用 | 146 |
| 第二节 农业物料的光学特性 | 147 |
| 一、光的反射特性 | 147 |
| 二、光的透过特性 | 150 |
| 三、延迟发光特性 | 153 |
| 第三节 在农业工程上的应用 | 156 |
| 一、颜色和成熟度分析 | 158 |
| 二、成分分析 | 159 |
| 三、内部缺陷检测 | 160 |
| 四、自动分选和分级 | 160 |
| 第八章 农业物料的电学特性 | 163 |
| 第一节 基本概念 | 163 |
| 一、电阻和电导 | 163 |
| 二、介电特性 | 164 |
| 三、静电特性 | 166 |
| 四、生物电 | 167 |
| 第二节 农业物料电学特性及其测定 | 167 |
| 一、农业物料介电特性及测定 | 167 |
| 二、农业物料其它电学特性及测定 | 174 |
| 第三节 在农业工程中应用 | 176 |
| 一、含水率的测定 | 176 |

| | |
|--------------------|-----|
| 二、介质加热和干燥..... | 176 |
| 三、农产品质量评定和控制 | 177 |
| 四、种子的电处理 | 178 |
| 参考文献 | 179 |

绪 论

现代农业中已日益普遍地采用机械学、热学、电学、光学、甚至声学等各种技术和方法来处理和加工农产品（包括植物和动物物料）。为使这些新技术能在生产中得到较好的应用，必须充分地掌握农业物料的各种重要的物理参数和物理性质。直到目前为止，对农业物料物理性质的了解还是很不够的。农业物料学或农业物料物理特性 (Physical Properties of Agricultural Materials)，即是由农业工程发展的需要在这几十年形成的一门新学科。它是运用近代物理学理论、技术和方法，研究农业物料物理性质以及各个物理因子和生物物料相互作用的一门边缘学科。它是物理学、工程学科和生物学各学科之间的桥梁，也是农业工程学科的基础。

农业物料是指农业生产和加工的对象。它包括植物和动物物料，以及以它们为原料加工的半成品和成品。例如，谷物、种子、水果、蔬菜、烟叶、茶叶、饲料、鸡蛋、各种家禽及其它肉制品、植物油、奶油、番茄酱等等。

农业物料学主要研究农业物料的基本物理参数、固体农业物料的流变特性、液体农业物料的流动特性、流体动力学特性以及热学、光学和电学特性等。由于农业物料种类繁多、形态差异极大，因此本书主要研究农业物料各种带有共性的物理特性。它为各种机械和系统，如生产、处理、贮藏、加工、包装、运输和质量检验等提供合理和可靠的设计依据。

农业物料基本物理参数包括物料的形状、尺寸、体积、密度、孔隙率、表面积、比表面积和含水量等，它们在机械设计及产品分析中是不可缺少的最基本的原始数据和重要的工程参数。例如，在分析水果冷却曲线；用气力法从种子或谷粒中分离夹杂物；用气流或水流输送农业物料时都必须首先了解物料的形状和尺寸。在干草的干燥和贮存；青贮的机械压缩；颗粒饲料和草饼的稳定性研究以及物料成熟度和质量分析中均需要测定物料的密度。在气流和热流研究中常常要用到孔隙率、比表面积等数据。在研究植物—土壤—水的相互关系；确定农药和杀菌剂应用次数及残留物消除等都要了解物料的表面积。

农业物料的流变特性是研究物料在外力作用下产生的变形和流动。由于农业物料大多是粘弹性体，所以往往要研究外力、形变和时间三者之间的关系。谷物和种子在仓中的强度；水果和蔬菜在长距离运输时受静态和动态的作用力而可能造成的破坏等都是与物料流变特性有关。通过对物料流变特性的研究，可为各种机械和设备的设计提供有用的设计依据、并可大大地减少物料的机械损伤和提高最后产品的质量。农业物料流变特性又为农产品的质地优劣评定提供了科学的方法，克服了主观评定中不可避免的片面性和主观性。

农产品的装运和加工过程中经常将空气或水作为一种运载体，用以输送产品或分离夹杂物。用水流输送水果和蔬菜等一类农产品在生产中已得到日益广泛的应用，这是一种比较经济、对物料损伤较小的方法。农业物料流体动力学特性是研究物料和流体的相互作用，物料在流体中运动时的阻力和速度以及提供农产品流体动力学特性的基本数据。

在农业机械、加工机械和其它设备中经常需要处理各种散粒物料。所谓散粒物料是指由大量的尺寸大致相同的颗粒所组成的群体，如谷粒、颗粒饲料等。它们的力学性质如休止角、内摩擦角、最大稳定角以及在各种材料表面上的动、静摩擦系数等将直接影响这些设备的设计参数。因此，为了保证这些设备（如谷仓）有足够的强度并能使物料在这些设备中畅快地流动，必须了解物料的这些基本的力学性质。

以植物和动物为原料的许多农产品，在销售到消费者之前将经受到各种类型的热加工。热加工可以包括加热、冷却、干燥和冷冻等。产品温度改变在很大程度上是与它本身的热特性有关。

对苜蓿和红三叶草等硬种子可应用适当的热处理使其变得容易渗透水分。将这些种子在温度为 104°C 下加热4分钟，可使硬种子数量大约减少了80%。在对种子进行热处理时，它的比热是一个重要的物理特性。如果热处理时超出了种子允许的极限温度和加热时间，则它的发芽率和生长力将会受到影响。

对小麦、玉米和豆类作物种子进行热处理是促进其发芽的一种很有效的方法。采用非传导加热可使棉籽中的酶完全地失去活性，防止了种子在贮藏期间的损坏。葱头在 40°C 到 60°C 温度范围内贮藏时可使引起腐烂的霉菌消失。桃子的热处理可延迟其腐烂时间和延长其保质期。

引起水果和蔬菜变质的酶和微生物的作用可以采用低温办法加以控制。例如，新鲜产品在 32°C 时如果只要1小时就产生变质的话，则产生同样变质在 10°C 时需要1天，在 0°C 时需要1星期。

农产品加热或冷却可采用对流、传导和辐射的方法进行。象比热、导热率、热扩散率、表面传导性和热辐射系数一类热特性以及如密度、形状、尺寸一类物理参数在设计加热和冷却设备以及预测传热过程是必不可少的资料。没有物料的热容量数据，则无法着手解决加热和冷却系统的热平衡问题。为了确定物料在加热或冷却过程中任意时刻和任意位置的温度，必须了解物料的热特性知识。在钢的热处理中采用控制加热时间和温度得到所需的微观结构。在生物物料的热处理中，如果要保持物料的生长力、营养和质量的话，则时间和温度是同样重要的。

近年来，农产品的光的透过和反射特性已用于电子分选和分级、成熟度和表面颜色测定以及研究水果和蔬菜的内部特性。以物料的光透过特性和光吸收为基础的方法已用于测定番茄内部颜色、小麦黑穗含量、水果成熟度、马铃薯内部变色、鸡蛋内的血点、苹果的水核、种子含水量、樱桃的烫伤和玉米损伤等。光的反射特性可用于分级和分离夹杂物。例如，马铃薯和土块的反射能力差异较大，因此可根据光反射率的不同将两种物料分开。对柠檬的光反射率曲线研究表明，在水果成熟的各个时期其反射率有不同的变化。已根据这个特性探索颜色分选机的设计。

农产品的一些电特性如电导性、电阻、电容和介电常数等在加工过程中是重要的物理特性。电阻和电导已被广泛地用于表征生物组织的导电性，也反映了生物体生命力的大小。电导和电容已用于谷物含水量测定。电阻法已用于精确地测定棉花纤维长度分布以及羊毛的细密度。生物物料的电阻值可用来检验诸如果实成熟度，选用抗寒性嫁接材料等。桃子的阻抗随成熟度提高而增大，在完全成熟时果肉阻抗达最大值，随之又逐渐下降。利用该

特性研制的桃子成熟度检测仪要比用果实大小和色泽方法检验不仅更可靠，而且可为果实的收获和贮藏设备直接提供成熟度的定量指标。

静电分离原理已用于分离和精选种子，特别是对于小粒种子有明显效果。静电分离可选出高电阻、高电容的种子，而这样的种子一般都是成熟度高、生命力强的种子。试验表明，静电分离基本上是与种子尺寸、形状、质量和表面状况等无关。如果用尺寸、形状、表面状况等特性无法将种子和夹杂物分离时，则可考虑采用静电方法来分离。

电抗技术可用来测定由于霜冻、喷雾毒害或其它损伤手段对植物组织造成损伤的程度。这个技术的基本原理是根据植物细胞死亡时它没有电容，植物细胞没有受损或健康的时候有包括电阻和电容在内的电抗。因此，用宽量程的交流电桥测量的低频电抗和高频电抗之比即可表示植物细胞组织损伤的程度。

非传导加热可使物料加热均匀和温升快。这些优点使非传导加热用于农产品的热处理和干燥方面引起了很大注意。用非传导加热可使棉花种子中酶失去活力和控制种子中的昆虫和霉菌。对棉花种子使用高频电场处理可使种子中酶在6分钟后完全失去活力。此外，用高频电场处理后可使棉子干燥，进一步提高了贮藏质量。非传导加热已用于种子的热处理中，将种子暴露在射频电场中照射一定量，促进了种子发芽和早期生长，使一些休眠和硬的种子及时地发芽。

综上所述，农业物料物理特性在农业工程的各个领域中有广阔的应用前景。它可为各类机器、设备的设计和改进行提供原始数据，为发展以植物和动物为原料的新消费品提供依据，为评定和控制产品的最后质量提供新的方法。

近20年来，各国对农业物料物理特性开展了大量的研究工作，并有多种专著及大量论文发表。研究重点为农业物料物理特性基本理论和基本数据；农业物料物理特性测试方法与理论以及农业物料的物理特性在农业生产和加工工程中的应用。到目前为止，已召开了多次农业物料物理特性的国际学术会议。研究成果在实际生产中的应用，促进了农业现代化的进一步发展。

第一章 基本物理参数

谷粒、种子、蔬菜、水果、鸡蛋、饲料以及纤维等农业物料的基本物理参数,如形状、尺寸、体积、密度、孔隙率、表面积和含水量等在许多设计和研究中有重要意义。在设计收获、输送、分级、清洗、干燥、冷却、贮藏、加工等机械和设备时,都必须首先了解这些最基本的物理参数。

第一节 形状和尺寸

在许多应用中,如机械分选和分级、气流输送和分离以及产品的热处理等都必须精确地确定物料的形状和尺寸。物料的形状和尺寸是不可分割的两个参数。如果要充分地描述一个物料的形状,则同时需要这两个参数。

农业物料的形状大多是不规则的。按其形态来说,有块体(如水果、块根等)、粒体(如种子和谷粒等)、粉体(如面粉和饲料等)以及茎叶体等。由于农业物料形态差异很大,所以难以用统一的方法定义物体的形状和尺寸。目前采用的方法大部分是根据研究者的实际需要而自行定义的。因此,用不同测定方法和表示方法所得数值之间难以进行分析比较。此外,由于栽培和饲养条件、气象条件、含水量等不同,即使同一个品种或同一棵植株上的果实或谷粒,它们的形状也是各不相同的。因此,在研究农业物料形状和尺寸时,除了提供一些统计数据外,还需研究适合农业物料的测定和表示方法,并逐渐使其达到标准化。下面介绍一些常用的农业物料形状和尺寸的代表和测定方法。

一、图形比较法

图形比较法是将物料的纵剖面和横剖面的形状绘制成图并和标准图形上列举的形状进行比较,以确定物料的形状。图1—1是苹果和桃子的标准图形。物料实际形状可以用标准图形上的号码或形状术语加以定义。这种方法主要适用于较大的物料,如水果和蔬菜等。下面是一些用于描述水果和蔬菜形状的术语。

| 形状 | 定义 |
|-----|-------------------|
| 圆形 | ——接近于球体; |
| 扁圆形 | ——柄端和顶端是扁平的; |
| 长椭圆 | ——垂直直径大于水平直径; |
| 圆锥形 | ——朝顶端方向其尺寸逐渐变小; |
| 卵形 | ——鸡蛋形且柄端处较宽; |
| 歪斜形 | ——连接柄端和顶端的轴线是倾斜的; |
| 倒卵形 | ——倒转的卵形; |

- 椭圆形——接近于椭球体；
- 平头形——顶端和柄端两处是方形或扁平的；
- 不对称——两半大小不相等；
- 肋形——在横剖面内其边是角形的；
- 规则——在横剖面内形状类似于圆；
- 不规则——在横剖面内形状是不规则的，与圆相比其差异较大。

物体实际形状和标准图形进行直观比较是一种非常简单的办法。但由于这是一种主观的评定，所以不同观察者往往会得出不同的结果。另外，这种方法不能用具体的数值加以表示，使用起来很不方便。

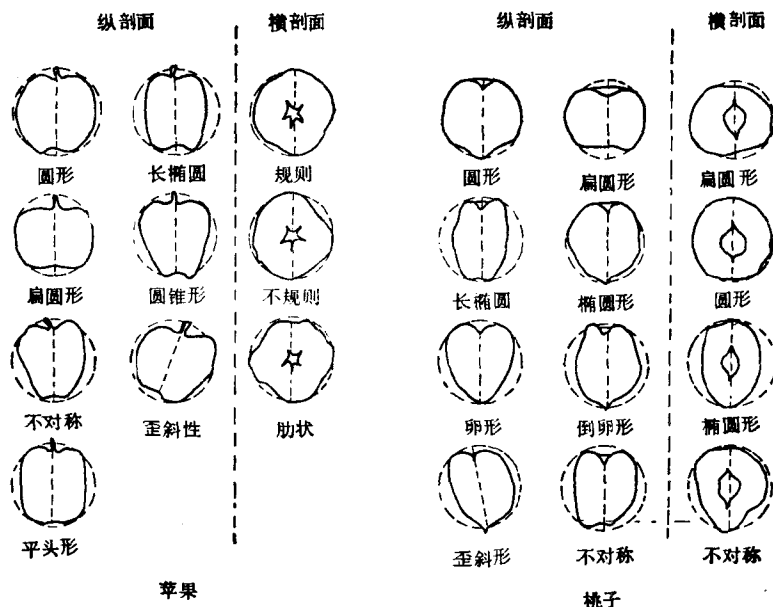


图 1-1 水果和蔬菜形状的标准图形
(Mohsenin, 1965)

二、用类似的几何体表示

如物料的形状和球体、立方体、圆柱体等一类规则几何体相类似时，则可用相类似几何体来表示物料的形状和尺寸。例如，

1. 长球体，它是由椭圆绕其长轴旋转时形成的，如柠檬、哈密瓜等；
2. 扁球体，它是由椭圆绕其短轴旋转时形成的，如葡萄柚等；
3. 截头正圆锥体或圆柱体，如胡萝卜和黄瓜等。

判别物体的形状以后，它的体积和表面积可以用相应的公式计算。

长球体的体积 V 和表面积 S 用下式计算

$$V = \frac{4}{3} (\pi ab^2)$$

$$S = 2\pi b^2 + 2\pi \frac{ab}{e} \sin^{-1} e$$

式中 a 和 b 分别表示回转椭圆的长半轴和短半轴, e 是偏心距由公式 $e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ 求出。

扁球体的体积 V 和表面积 S 用下式计算

$$V = \frac{4}{3} (\pi a^2 b)$$

$$S = 2\pi a^2 + \pi \frac{b^2}{e} \ln \frac{1+e}{1-e}$$

截头正圆锥体的体积 V 和表面积 S 用下式计算

$$V = \frac{\pi h}{3} (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)$$

$$S = \pi (r_1 + r_2) \sqrt{h^2 + (r_2 - r_1)^2}$$

式中 r_1 和 r_2 分别为正圆锥体的底和顶的半径, h 为高。

体积和表面积按上述公式估算后, 用实验方法确定物体的实际体积和表面积。求出计算值和实测值之间的比例系数, 从而确定各种农产品典型形状的校正系数。

三、形状指数

形状指数是把物体的实际形状与基准形状, 如球体和圆等, 进行比较的一个物理量。

(一) 圆度 (roundness) 圆度是表示物体角棱的锐度。它表明物体在投影面内的实际形状和圆形之间的差异程度。已提出了一些方法用以确定圆度的大小, 下面是一些常用的圆度定义 (图1-2)。

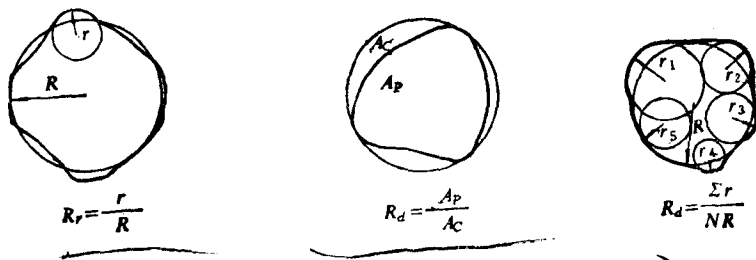


图1-2 各种圆度定义方法
(Curry, 1951)

$$R_d = A_p / A_o \quad (1-1)$$

式中 R_d ——圆度 (%)

A_p ——物体在自然静止位置时的最大投影面积

A_o —— A_p 的最小外接圆面积

$$R_d = \frac{\sum r}{NR} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n}{NR} \quad (1-2)$$

式中 r —— 物体各棱角处的曲率半径

R —— 最大内切圆半径

N —— 相加的棱角总数

有时, 圆度也可用圆度比(roundness ratio)表示, 圆度比定义为

$$R_r = r/R \quad (1-3)$$

式中 R_r —— 圆度比

R —— 与物体投影面积相等的圆的半径

r —— 物体投影面中最小锐角处的曲率半径

(二) 球度 (sphericity) 球度是表示物体实际形状和球体之间的差异程度, 定义如下

$$S_p = d_e/d_o \quad (1-4)$$

式中 S_p —— 球度 (%)

d_e —— 与实际物体体积相等的球体的直径

d_o —— 实际物体最小外接球直径或物体的最大直径

这个球度表达式表示了以相同体积球体为基准的物体形状特征。

假定物体的形状为三维椭球, 它们和三个座标轴的截距分别为 a 、 b 和 c , 外接球的直径是椭球的最大截距 a , 则根据上述定义球度 S_p 为

$$S_p = \frac{(abc)^{1/3}}{a}$$

式中 a 为最大截距, b 为垂直于 a 的最大截距, c 为垂直于 a 和 b 的最大截距, 这些截距不需要彼此相交于一点。由上式可知, 三维椭球的球度为三个轴向尺寸的几何平均值与最大轴向尺寸之比值。经测定表明, 苹果、桃子和梨等水果的球度为 89—97%。球度数值愈大, 说明物体形状愈接近于球体。

四、形状系数

设物体在三个相互垂直平面内投影面积的算术平均值为该物体的平均投影面积, 记作 A_o 。(见图 1-3)。

$$A_o = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} \quad (1-5)$$

式中 A_1 、 A_2 和 A_3 分别为物体在三个垂直平面内的投影面积。根据凸状物体理论, 已建立了如下关系式

$$\frac{V^2}{S^3} \leq \frac{1}{36\pi} \quad (1-6)$$

式中 V 和 S 分别为凸状物体的体积和表面积。同时已查明, 凸状物体的平均投影面积是表面积的 $1/4$ 。用 $S = 4A_o$ 代入上式, 得

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

$$A_o = KV^{2/3} \quad (1-7)$$

或

$A_o \approx 7.12 V^{2/3}$

式中 K 是常数，它是随物体特征尺寸而变的。对于球体来说， $K = (9\pi/16)^{1/3} = 1.21$ 。其它物料的 K 值如图1-4所示。

在测定投影面积时，由于三轴配置方向不同从而得出不同的测定值。为了满意地测量体积，可使物体限制在自然静止位置并且与水平面有相等角度的三轴投影形式(图1-3)。

物料的 K 值愈接近于1.21，则物料的形状愈接近于球体。若定义形状系数 $\varphi = 1.21/K$ ，则 φ 值愈大其形状愈接近于球体。从而根据物料的形状系数 φ 即可判别物料的形状和球体之间差异程度。这实际上是估算凸状物体球度的另一种方法。由图1-4中曲线可知，柠檬 φ 值为0.975，接近于球形。胡萝卜 φ 值为0.687，是细长形。像马铃薯、番茄、苹果和梨等一类物料的形状系数 φ 均界于这两种形状之间。当物料特征尺寸变化较大或物体尺寸较小时，其测定误差将会增大。因此，这种判别物体形状的方法只适合于形状规则的较大物料。

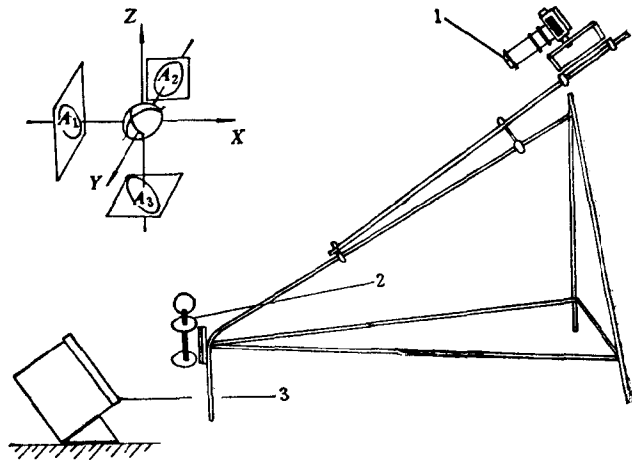


图1-3 利用照相机记录水果和蔬菜的平均投影面积 (Houston, 1957)

1. 照相机 2. 试件固定及角度转换装置 3. 反光镜

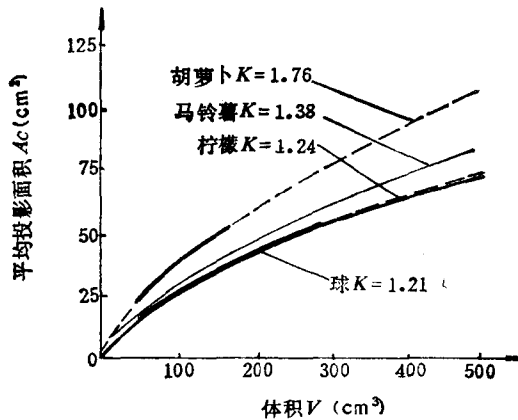


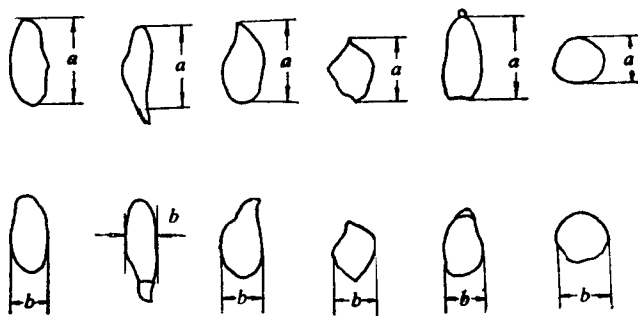
图1-4 物料的平均投影面积和体积之间关系 (Houston, 1957)

五、轴向尺寸

谷粒和种子一类较小的物料，可采用照片放大器或投影仪描绘其外形轮廓，并用三轴尺寸 a 、 b 、 c 表示物料的形状和大小。种子放置在安放底片的平台上，转动种子以使它覆盖的阴影面积最大。然后，照片放大器对焦点即可得到一个清楚的外形轮廓。一把毫米标尺与种子同时放大和描绘。再将种子转到最小投影面积，这时长轴尺寸等于最大投影面积时长轴尺寸。从最大投影面积和最小投影面积图中即可测量 a 、 b 和 c 的数值。图1-5为一些种子的轮廓形状及三轴尺寸。

根据三个轴向尺寸不同，物料有不同的形状。当 $a > b > c$ ，三个轴向尺寸不等时，谷

粒呈扁长形，如小麦等；当 $a > b = c$ ，宽度和厚度相等但小于长度，谷粒呈圆柱形，如小豆等；当 $a = b > c$ ，长度和宽度相等但大于厚度，谷粒呈扁圆形，如野豌豆等；当 $a = b = c$ ，三个轴向尺寸相等，谷粒呈球形，如大豆和豌豆等。



六、粒 径

粒径是用来表示粒状或粉状物料的形状和尺寸的一种方法。粒径可分为表示单个粒子的单一粒径和表示许多不同尺寸粒子组成的粒子群的平均粒径。

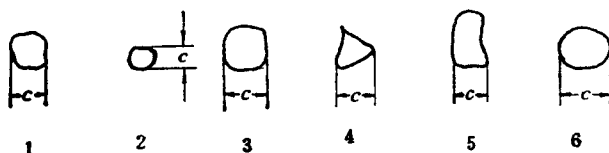


图 1—5 种子和谷粒的三轴尺寸和外形
1.小麦 2.燕麦 3.棉花 4.荞麦 5.玉米 6.大豆

(一) 单一粒径 单一粒径有各种表示法，如表 1—1 所示。常用的则为长轴径、二轴算术平均径、圆等值径和定向径等。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。

(二) 粒子群平均粒径 要确定由不同尺寸粒子组成的粉粒状物料的平均粒径，需要先测定各个粒子的单一粒径，然后再加以平均即可。平均方法如表 1—2 所示。

表 1—1 单一粒径表示方法

| 名 称 | 计算公式 | 名 称 | 计算公式 |
|---------|--|---------|---|
| 长轴径 | a | 圆等值径 | $(4f/\pi)^{1/2}$ |
| 短轴径 | b | 几何平均径 | $(abc)^{1/3}$ |
| 二轴算术平均径 | $\frac{1}{2}(a+b)$ | 圆柱体等值径 | $(fa)^{1/3}$ |
| 三轴算术平均径 | $\frac{1}{3}(a+b+c)$ | 立方体等值径 | $V^{1/3}$ |
| 调和平均径 | $3\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}\right)^{-1}$ | 球等值径 | $(6V/\pi)^{1/3}$ |
| 表面积平均径 | $\frac{1}{6}(2ab+2bc+2ac)^{1/2}$ | 定向径 | d_g |
| 体积平均径 | $3abc(ab+bc+ac)^{-1}$ | 定向面积等分径 | d_m |
| 外接矩形等值径 | $(ab)^{1/2}$ | 斯托克斯径 | $\left(\frac{18\eta v_s}{\rho_s - \rho_l}\right)^{1/2}$ |
| 正方形等值径 | $f^{1/2}$ | | |

注： f ——投影面积 V ——粒子体积 η ——流体粘性系数 v_s ——粒子沉降速度 ρ_s ——粒子密度 ρ_l ——流体密度

若将同一种试样按表 1—2 所示的各种方法计算其平均粒径，所构成的顺序为 $d_3 < d_2 < d_1 < d_7 < d_6 < d_4 < d_5 < d_8$ ，其所得结果差别较大。

表 1—2 平均粒径计算公式

| 名 称 | 计 算 公 式 | 物 理 意 义 |
|---------|---|------------------------|
| 算术平均径 | $d_1 = \sum nd / \sum n$ | 单一粒径的算术平均径 |
| 几何平均径 | $d_2 = (\dot{d}_1' \cdot \dot{d}_2' \cdots \dot{d}_n')^{1/n}$ | n 个粒径的 n 次方根 |
| 调和平均径 | $d_3 = \sum n / \sum (n_i' / d)$ | 各粒径的调和平均值 |
| 面积长度平均径 | $d_4 = \sum nd^2 / \sum nd$ | 表面积总和除以直径的总和 |
| 体面积平均径 | $d_5 = \sum nd^3 / \sum nd^2$ | 全部粒子的体积除以总表面积 |
| 重量平均径 | $d_n = \sum nd^4 / \sum nd^3$ | 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 | $d_7 = (\sum nd^2 / \sum n)^{1/2}$ | 将总表面积除以总个数, 取其平方根 |
| 平均体积径 | $d_8 = (\sum nd^3 / \sum n)^{1/3}$ | 将总体积除以总个数, 取其立方根 |
| 比表面积径 | $d = 6 / (\gamma_s \cdot S)$ | 由比表面积 S 计算的粒径 |
| 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 |

(三) 粒径实用计算方法 测定粒径可用不同方法, 但很多方法是很费时的, 并需使用昂贵仪器和一定的测定技术。因此, 实际上往往采用简易的测定计算方法确定其平均粒径。

1. 粗颗粒的平均粒径计算 若粒子大到可以一粒一粒拣集的程度时, 例如大豆、小麦等物料可采用这种方法。

首先从试样中任意地广泛采集 n 个粒子 (一般取 200 粒以上, 越多越好), 用普通天平测其总质量为 m 。设粒子密度为 ρ_s , 则平均粒径 d_s 可按式计算

$$m = \frac{\pi}{6} d_s^3 \rho_s n$$

$$\text{得} \quad d_s = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi \rho_s n}} \quad (1-8)$$

由上式计算出的粒径相当于把所有粒子均看作等体积的球形粒子时的平均粒径。

2. 细粉平均粒径计算 对于粒子细到无法一粒一粒拣集的粉料如面粉等, 可采用筛分法求出平均粒径。

首先用筛分法测定全部粒子的粒径分布。将一定量的粉料 (大约 50—100g 左右), 用筛孔尺寸分别为 d'_1 、 d'_2 、……、 d'_{m+1} 的 $m+1$ 个筛子进行分级。设

d'_1 至 d'_2 粒级的粒子其平均粒径为 $d_1 = \sqrt{d'_1 \cdot d'_2}$, 其质量占总质量的百分数为 x_1 ;

d'_2 至 d'_3 粒级的粒子其平均粒径为 $d_2 = \sqrt{d'_2 \cdot d'_3}$, 其质量占总质量的百分数为 x_2 ;

……

d'_m 至 d'_{m+1} 粒级的粒子其平均粒径为 $d_m = \sqrt{d'_m \cdot d'_{m+1}}$, 其质量占总质量的百分数为 x_m , 则全部粒子的平均粒径可用调和平均径或算术平均径计算。

调和平均径为

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{x_i}{d_i} \right)} \quad (1-9)$$

算术平均径为