



NONGYEWULIAOXUE

# 农业物料学

马云海 主编

张金波

吴亚丽

副主编



化学工业出版社



NONGYEWULIAOXUE

# 农业物料学

马云海 主编

张金波

吴亚丽

副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

元 00.00, 价 宝

农业物料特性研究是农业机械设计、农产品检测、农业物料包装和储存保鲜技术的研究基础，在现代农业发展中具有重要的理论和实践意义。本书从近代物理学理论、技术和方法运用的角度出发，重点介绍了农业物料力学、热学、光学及电学特性，为物料特性参数的选取和确定提供了科学的研究方法和测试依据。

本书可作为农业机械化及其自动化、生物工程、食品科学与工程、包装工程、物流工程等专业本科生的学习用书，也可供科研人员、工程技术人员、相关专业研究生和教师学习工作时参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

农业物料学/马云海主编. —北京: 化学工业出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-122-25000-1

I. ①农… II. ①马… III. ①农业-物料 IV. ①S12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 200493 号

---

责任编辑: 周 红

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 王 静

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 10½ 字数 271 千字 2015 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

农业物料是指在种植、养殖及其产品加工中涉及的各种有机体，包括植物物料及产品——根、茎、叶、种子和果实，动物物料及产品——肉、骨、蛋和奶等。研究农业物料的物理参数、力学、热学、光学和电学特性，对于采用相关技术手段进行播种、收获、清选、输送、干燥、冷冻、储存和品质检测等农业装备设计、农产品加工和质量控制具有重要的意义。

农业物料的研究历史悠久，早在 1893 年，美国的科研工作者已开始对农作物、水果及食品的物理特性进行研究，但早期研究在当时的技术条件下没有得到很好的发展。到 20 世纪 60 年代初期，由于美国水果及蔬菜生产机械化的发展，亟需了解水果及蔬菜的物料特性作为农业机械装备的设计依据，农业物料的研究逐渐得到重视，美国农业工程协会将物料物理学性质列为一项研究分支，并且定期开展学术活动。近几十年来，随着科学技术的迅速发展，美、日、欧等对物料性质的研究更加重视，并开展了大量的工作，由于计算机及现代测试技术等的发展和应用，农业物料的测试精度和理论分析水平有了显著提高，逐步形成一门多学科交叉的新兴学科——农业物料学。

农业物料学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交叉学科。它是物理学、工程学科和生物学各学科之间的桥梁，也是生物系统工程、农业工程、食品科学工程等学科的基础。农业物料学因其涵盖了各研究领域所涉及的物料特性研究问题，重要性已经逐渐被我国各大院校所认识，在研究生招生目录中列有该考试科目。20 世纪 80 年代，吉林大学张守勤教授曾与东北农业大学马小愚教授合编一本《农业物料学》内部教材，该教材是当时全国农业工程类专业的重要教材之一。中国农业大学的周祖锬教授以此教材为蓝本，于 1994 年编写并正式出版了《农业物料学》，该书现在仍是国内高校硕、博研究生的参考授课教材。但由于该教材编撰年代久远，很长时间没有再版，在内容上已经跟不上现代物性检测新方法和新技术的发展，不能满足对学生培养的要求。因此，我们在原有参考书的基础上，根据近年来本科生和研究生课堂教学的经验和积累，收集并整理了现有资料和研究成果，组织编写了本书。在内容选取上，本书以农业物料的物理性质研究为线索，介绍了农业物料的基本物理参数及测定方法、力学、流变、热学、光学和电学等物理作用下所表现出的特性，综合考虑了读者理论基础和大学教学方式，以期将农业物料测试的新理论、新技术和新方法引入相关教学和科研之中。

本书由吉林大学马云海任主编，佳木斯大学张金波、太原理工大学吴亚丽任副主编，权龙哲、郭丽、庄健、张东光参与了本书的编写。全书由马云海统稿。本书被列入吉林大学本科“十二五”规划教材项目，并在编写过程中得到了许多专家的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。对于农业物料特性的研究正在深入开展，现代测试技术的发展也日新月异，本书涉及的研究内容具有较大的探索空间，仍需要在实践中不断完善。由于笔者知识有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，诚望读者提出批评和指正。

## 第一章 绪 论

一、研究对象与任务 .....	001
二、农业物料与工程材料的区别 .....	001
三、农业物料学的进展与应用 .....	001
四、本课程的主要内容 .....	001

## 第二章 农业物料的基本物理参数

### 第一节 形状和尺寸表示法..... 004

一、图形比较法 .....	004
二、类似几何体表示法 .....	005
三、轴向尺寸表示法 .....	006
四、粒径表示法 .....	006

### 第二节 密度测量法..... 009

一、密度的定义 .....	009
二、密度的测量 .....	010
三、农业物料的密度 .....	014

### 第三节 孔隙率和表面积测量法..... 015

一、松散物料的孔隙率及测量 .....	015
二、农业物料的表面积及测量 .....	016
三、松散物料的比表面积及测量 .....	017

### 第四节 含水率定义和表示法..... 018

一、农业物料的含水率 .....	018
二、水的活性 .....	019

## 第三章 固体农业物料的流变特性

### 第一节 理想物体的流变特性..... 021

一、理想弹性体的基本力学特性 .....	022
二、理想黏性体的流变特性 .....	023
三、理想塑性体的流变特性 .....	024

### 第二节 黏弹性..... 024

<b>第三节 流变模型和流变方程式</b> .....	<b>025</b>
一、单要素模型 .....	025
二、麦克斯韦模型 ( Maxwell model ) .....	026
三、开尔文模型 ( Kelvin model ) .....	028
四、多要素模型 .....	029
五、广义模型 .....	031
<b>第四节 固体农业物料的流变性质及其测定</b> .....	<b>035</b>
一、农业物料力-变形关系曲线 .....	035
二、农业物料的弹性参数测定 .....	036
三、农业物料的弹塑性参数及测定 .....	040
四、农业物料的黏弹性参数及测定 .....	041
五、农业物料的模拟试验 .....	047
<b>第四章 液体农业物料的流动特性</b>	
<b>第一节 液体农业物料的分类及其流动特性</b> .....	<b>050</b>
一、牛顿流体及其黏度 .....	051
二、准黏性流体和表观黏度 .....	052
三、塑性流体和准塑性流体 .....	054
四、触变性流体和胶变性流体 .....	055
五、黏弹性流体 .....	056
<b>第二节 液体农业物料流动性质测定</b> .....	<b>057</b>
一、细管法流动特性测定原理 .....	057
二、旋转法流动特性测定原理 .....	063
三、振动法确定黏弹性液体的流动特性 .....	068
<b>第五章 农业物料的流体动力学特性</b>	
<b>第一节 阻力和阻力系数</b> .....	<b>069</b>
一、球体的阻力系数 .....	070
二、平板的阻力系数 .....	071
三、其他形状物体的阻力系数 .....	071
<b>第二节 临界速度</b> .....	<b>072</b>
一、计算法确定物料的临界速度 .....	072
二、查表法确定物料的临界速度 .....	074
三、实验法确定物料的临界速度 .....	076
<b>第三节 物料动力学特性在农业工程中的应用</b> .....	<b>078</b>
一、农业物料的清选和分离 .....	078
二、气力输送 .....	080



三、水力输送 .....	082
--------------	-----

## 第六章 农业散粒物料的力学特性

第一节 概 论 .....	084
---------------	-----

第二节 散粒物料的摩擦学特性 .....	087
----------------------	-----

一、滑动摩擦角 .....	087
---------------	-----

二、滚动稳定角 .....	090
---------------	-----

三、休止角 .....	090
-------------	-----

四、内摩擦角 .....	092
--------------	-----

第三节 散粒物料的力学特性 .....	096
---------------------	-----

## 第七章 农业物料的热学特性

第一节 传热的基本形式 .....	102
-------------------	-----

一、热传导 .....	102
-------------	-----

二、热对流 .....	104
-------------	-----

三、热辐射 .....	106
-------------	-----

第二节 农业物料的热学特性参数 .....	107
-----------------------	-----

一、农业物料的比热 .....	108
-----------------	-----

二、农业物料的热导率 .....	110
------------------	-----

三、农业物料的导温系数 .....	113
-------------------	-----

第三节 在农业工程中的应用 .....	114
---------------------	-----

一、热学特性的测量 .....	114
-----------------	-----

二、农业物料的干燥 .....	118
-----------------	-----

三、农业物料的冷却 .....	120
-----------------	-----

## 第八章 农业物料的光学特性

第一节 农业物料与光的特性 .....	122
---------------------	-----

一、光的本性 .....	123
--------------	-----

二、光的透过与吸收 .....	123
-----------------	-----

三、光密度 .....	124
-------------	-----

四、光反射特性 .....	124
---------------	-----

五、荧光和延迟发光特性 .....	124
-------------------	-----

六、光的扩散现象 .....	124
----------------	-----

七、光的散射 .....	125
--------------	-----

八、光的色散 .....	126
--------------	-----

九、光传输模型 .....	126
---------------	-----

<b>第二节 农业物料的光学测定原理与方法</b> .....	<b>127</b>
一、透光特性的测定 .....	127
二、反射光特性的测定 .....	130
三、延迟发光特性的测定 .....	131
四、近红外测定 .....	132
<b>第三节 农业物料光学性质的工程应用</b> .....	<b>134</b>
一、颜色和成熟度分析 .....	134
二、物料化学成分的分析 .....	135
三、农产品损伤缺陷检测 .....	137
四、自动分级和分选 .....	138
五、水果和蔬菜品质无损检测 .....	141
<b>第九章 农业物料的电学特性</b>	
<b>第一节 基本概念</b> .....	<b>143</b>
一、电阻和电导 .....	143
二、介电特性 .....	144
三、静电特性 .....	146
四、生物电 .....	147
<b>第二节 农业物料电学特性的测定</b> .....	<b>147</b>
一、农业物料的介电特性 .....	147
二、农业物料介电特性的测定 .....	150
三、农业物料其他电学特性及测定 .....	152
<b>第三节 在农业工程中的应用</b> .....	<b>154</b>
一、含水率的测定 .....	154
二、介质的加热和干燥 .....	154
三、农产品质量评定的控制 .....	155
四、种子的电处理 .....	156
<b>参考文献</b> .....	<b>158</b>



# 第一章 绪论

## 一、研究对象与任务

农业物料学是农业工程的基础学科，是农业机械化设计、农产品检测及运输等方面研究的前提和基础，在农业发展中具有重要的理论意义和实践意义。农业物料学是一门研究农业物料物理性质的学科，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的相互作用，包括农业物料的基本物理参数以及农业物料的力学性质、热学性质、光学性质、电磁性质等，也是物理学、力学、生物学、农学、动物科学、食品科学等多学科之间的桥梁。它涵盖了各学科必要的、丰富的知识，可以为农业工程机械设备的设计、生产与产品加工工艺过程的选择、能量平衡计算、新产品开发等提供必要的基础。

## 二、农业物料与工程材料的区别

工程材料是用于制造各类机械零件、构件的材料和在机械制造过程中所应用的工艺材料，是人类在同自然界的斗争中，不断改进用以制造工具的材料，按属性可分为金属材料和非金属材料两大类。农业物料是指由农业生产（包括园艺、畜牧、水产）产生的与农（园、畜、水）产品加工和处理过程有关的各种植物、动物产品及其半成品和成品，以及土壤、化肥、农药等有生命物料和无生命物料。例如，谷物、种子、果蔬、禽、蛋、奶、油、烟、茶等。

## 三、农业物料学的进展与应用

现代农业工程日益普遍地应用机械学、电学、光学、声学等各种技术手段和方法，因此，对农业物料物理特性和相关技术的研究有重要的意义。在设计机器装备的作业程序、结构以及进行控制系统、机械效率分析测定时，都需要预先提供有关农业物料性质的资料和数据，作为研究和设计的原始依据，同时可以启发和引导工程技术人员去探索和发现新的农业物料加工原理和方法，不断提高和改善机械的性能和效益。积极开展该领域的研究与技术开发，对不断提高我国农业现代化装备水平有极大的推动作用。基于农业物料物理特性的研究及相关技术，在作物优良品种培育、作物生产过程的调节与控制、作物收获、果实采摘、农产品品质检测、分选分级、农业机械装备的设计制造等各领域有广阔的应用前景。

## 四、本课程的主要内容

一般认为，农业物料学的主要研究内容如下。

## 1. 农业物料的基本物理参数

包括物料的形状、大小、体积、密度、表面积等，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，选择对油菜籽的预处理方法和压榨工艺以提高油脂提取效率，设计包衣稻种排种器结构，给出不同物理性状农产品最佳切割加工工艺方法，研发农产品深加工切片工艺装备，根据农产品物料的大小、形状、色彩、文理、表面缺陷等基本物理特征，利用机器视觉技术实现农产品品质检测和分级等都需要根据物料的基本物理参数进行研究。

## 2. 农业物料的力学特性

包括固体物料的应力应变规律、冲击、振动、屈服强度、硬度、蠕变、松弛和流变等特性，散粒体物料的摩擦、黏附、变形、流动、离析等特性，液体物料的流体力学特性、流变、黏性、黏弹性等特性，可以为设计制造相关物料的采收、包装、运输、加工和质量检测等各种机械装备和系统提供依据，对预测同类水果和蔬菜的机械损伤和探索有效的储运与生产加工过程控制方法有很大的指导意义。例如，测量分析农作物茎秆的弹性模量、秆长、穗位、截面尺寸等物理量，利用力学理论和方法，建立农作物茎秆的力学模型，可用于对农作物抗倒伏能力的综合评价；利用茎秆的穿刺强度作为选择指标，选育出抗倒伏性强的玉米良种；通过玉米秸秆的径向剪切、轴向剪切试验测定分析玉米秸秆的破碎力学特性，为玉米茎秆切割装置的设计提供了依据；研究整体葡萄和番茄的力-位移、刚度与变形的关系，用葡萄皮与番茄皮的破裂强度作为其机械损伤的评价指标；采用流变学方法研究国产蜂蜜流水分、温度与黏度之间关系，可用蜂蜜的含水量和黏度指标，迅速准确地评价蜂蜜的品质。

## 3. 农业物料的热学特性

研究物料的比热、热扩散系数、热导率、呼吸热等，农业物料热容量和比热随物料组成成分、含水量和温度等的不同而变化，采用湿热蒸汽蒸烘处理新鲜的米糠，抑酶效果显著，提高米糠稳定性，利用物料热学特性，研究采用加热法提取叶蛋白的工艺。

## 4. 农业物料的电学特性

研究物料的电导特性、介电特性、电离辐射、生物电现象、电场作用等及其应用。农业物料的电学特性分为主动电特性和被动电特性两大类，主动电特性是农业物料中存在某些能量而产生的电特性，在生物系统中表现为生物电势；被动电特性是农业物料所占空间内的电场或电流（电荷）的分布特性，它是由农业物料的化学成分和组织结构所决定的固有特性。农业物料在受到外界电场作用时，产生抵抗，表现出电学特性的变化，研究发现水果电特性与其成熟度密切相关，提出基于电特性参数无损检测的水果品质自动分选系统分类阈值的确定方法；对水稻、小麦和油菜籽的电特性进行了研究，提出了C值法测量物料电特性参数，并对物料的频率特性与其含水率的函数关系进行分析和研究，结果表明物料各电特性之间及其与物料含水率之间有特定的函数关系，且与物料的品种有关；根据物料的含水率对其介电常数等电参量的影响关系，对水稻、玉米和大豆等物料的含水率进行了测试，提供了测定含水率更为简易的方法及测试系统，这些研究成果为谷物收获、干燥、储藏及加工等提供了基础的技术和手段。采用数字电桥对茶叶进行了以电容为主的多项电特性参数的测定，检测评定茶叶的综合品质，为茶叶的标准化、规模化生产提供技术支持；研究植物生理电特性生理指标，用套针式电阻传感器测量玉米茎秆的生理电阻，用介电常数变化型平行平板电容传感器测量玉米叶片的生理电容，准确实时地反映植株的水分状况，该技术可用于作物的抗旱亏水诊断及自动节水灌溉。

## 5. 农业物料的光学特性

研究物料对光的反射、吸收、透过、光密度和发光等性质，可对农业物料进行粒度测量、品质检测与评定、化学成分测定与分析、分选与分级、成熟度和新鲜度的判别等。测定

桃的分光反射特性,并通过图像处理,可有效检测桃内部的损伤情况;通过光的漫反射光谱特性研究樱桃的坚实度和糖分含量;对两个品种的麻鸡蛋和以色列鸡蛋在无损状态下,进行了光透射率追踪试验及其新鲜度指标同步试验,建立了不同品种的鸡蛋在光透射率敏感波长下的光透射率与其新鲜度指标的数学模型,得到了鸡蛋按光特性透射率分级的技术参数,为鸡蛋无损分级装置的设计研究提供了理论依据。

目前,我国在该领域的研究取得了许多基础性研究成果,但在工程实际中的应用与国外同类研究相比有很大差距。在研究与学习的过程中,应不断创立新思维、新理论、新方法和新技术,不断拓展新的研究领域,在扎实基础理论研究的前提下,根据我国农业现代化发展的实际要求,积极开展该领域的技术开发与应用研究。该领域的研究及技术应用,将增强我国农业生产和农产品加工能力,推动农业现代化的快速发展。

## 第二章 农业物料的基本物理参数

谷物、果蔬、禽、蛋、奶、油、烟、茶等农业物料具有基本物理特征和参数，如形状、尺寸、体积、密度、孔隙率、表面积、比表面积和含水率等。这些物理特征和参数在农业工程的各个领域中有广泛的应用，如设计谷物排种器等农业机械时需要首先确定谷粒的三轴尺寸或粒径；输送农业物料时必须了解物料的形状和尺寸；清选花生或马铃薯中的土块时应该根据密度进行区分；设计红枣等果实去核装置时需要确定其外形特征；干燥谷物和果蔬时有必要测定含水量和分析冷却曲线以便优化干燥工艺等。

### 第一节 形状和尺寸表示法

#### 一、图形比较法

农业物料的形状和尺寸对农业机械的设计和研究有着重要意义。如机械分选和分级、气流输送和分离以及产品的热处理等必须精确地确定物料的形状和尺寸。只有知道物料的形状和尺寸，才可以充分地描述物料的形状。

由于农业物料的形态差异较大，多数为不规则体，因而不能用单独的一个尺寸确切地表达，一般用查表的方法来确定其标准形状，即图形比较法。具体方法为将物料的纵剖面 and 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，进而确定物料的形状。这种方法适用于较大的物料，如水果和蔬菜等。图 2-1 是苹果和桃子形状的标准图形。

图 2-1 中描述形状的术语如表 2-1 所示。

表 2-1 描述水果和蔬菜标准图形的术语表

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

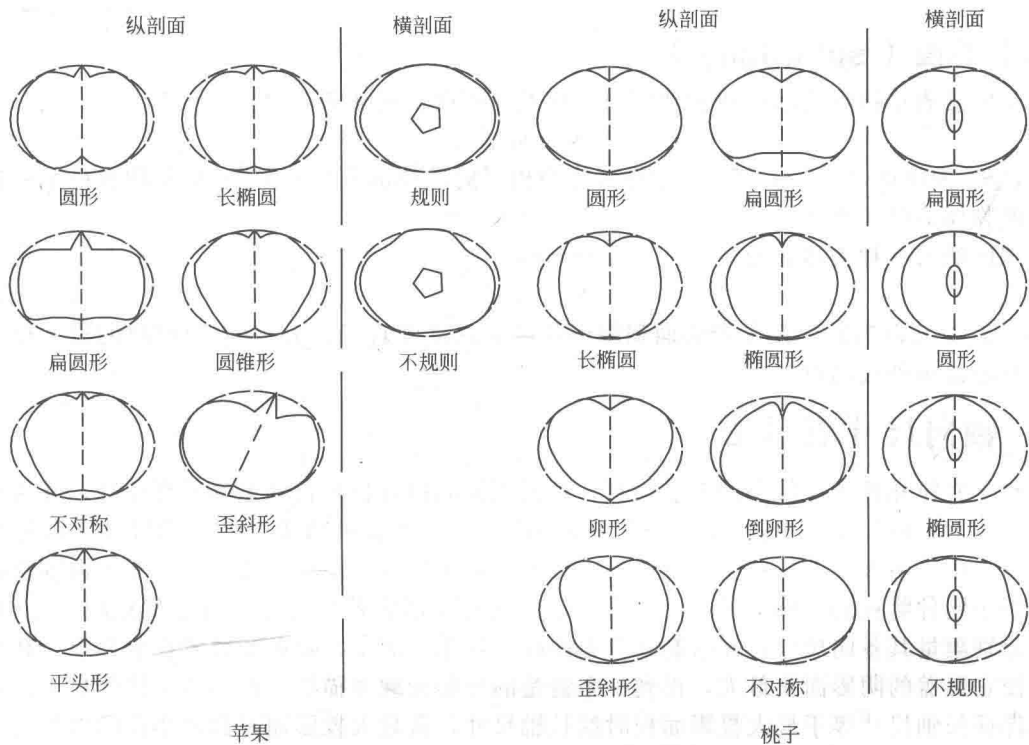


图 2-1 苹果和桃子形状的标准图形

## 二、类似几何体表示法

物料的很多性能都与物料的形状有关。当物料的形状和球体、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，即类似几何体表示法。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。例如，对于大多数水果而言，其形状接近于球状，称之为类球体，常用形状指数圆度和球度来定量描述。

### (一) 圆度 (roundness)

圆度是表示物料角棱的锐度，它表明物料在投影面内的实际形状和圆形之间的差异程度，用下式计算。

$$R_d = A_p / A_c \quad (2-1)$$

式中， $R_d$  为圆度，%； $A_p$  为物料在自然放置稳定状态下的最大投影面积； $A_c$  为  $A_p$  的最小外接圆面积。

圆度还可以用下式表示。

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

式中， $r$  为物体各棱角处的曲率半径； $R$  为最大内切圆半径； $N$  为相加的棱角总数。

有时，圆度也可用圆度比表示。

$$R_r = r / R \quad (2-3)$$

式中， $R_r$  为圆度比； $r$  为物料投影中最小锐角处的曲率半径； $R$  为与物料投影面积相等的

圆的半径。

## (二) 球度 (sphericity)

球度是表示物料实际形状和球体之间的差异程度, 定义如下。

$$S_p = d_e / d_c \quad (2-4)$$

式中,  $S_p$  为球度, %;  $d_e$  为与实际物料体积相等的球体的直径;  $d_c$  为实际物料最小外接球直径或物体的最大直径。

球度的另一种表达式为

$$S_p = d_i / d_e \quad (2-5)$$

式中,  $d_i$  为实际物料的最大投影面积图形的最大内接圆直径;  $d_e$  为实际物料的最大投影面积图形的最小外接圆直径。

## 三、轴向尺寸表示法

对于谷粒和种子等较小的农业物料, 可采用显微镜或投影仪测量其外形轮廓, 并用三个相互垂直的轴向尺寸, 即长 ( $a$ )、宽 ( $b$ ) 和厚 ( $c$ ) 来表示物体的形状和尺寸。长指平面投影图形中的最大尺寸, 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。由于同种物料的个体差异较大, 为了表示物料全部颗粒的尺寸, 可随机选取 1000 粒样品, 分别测量其各向尺寸, 并绘制其分布曲线。具体方法是, 将种子放置在平台上, 转动种子以使其覆盖的阴影面积最大, 得到一个清楚的外形轮廓并描绘, 再将种子转到最小投影面积, 保证长轴尺寸等于最大投影面积时的长轴尺寸, 从最大投影面积和最小投影面积图中测量三轴尺寸值。

通过测量农业物料的三轴尺寸, 可以描述其不同形状。当  $a > b > c$  时, 三个轴向尺寸均不相等, 谷粒呈扁长形, 如小麦等; 当  $a > b = c$  时, 宽度和厚度相等但小于长度, 谷粒呈圆柱形, 如小豆等; 当  $a = b > c$  时, 长度和宽度相等但大于厚度, 谷粒呈扁圆形, 如野豌豆等; 当  $a = b = c$  时, 三个轴向尺寸相等, 谷粒呈球形, 如大豆和豌豆等。图 2-2 为种子和谷粒的轮廓外形和三轴尺寸。

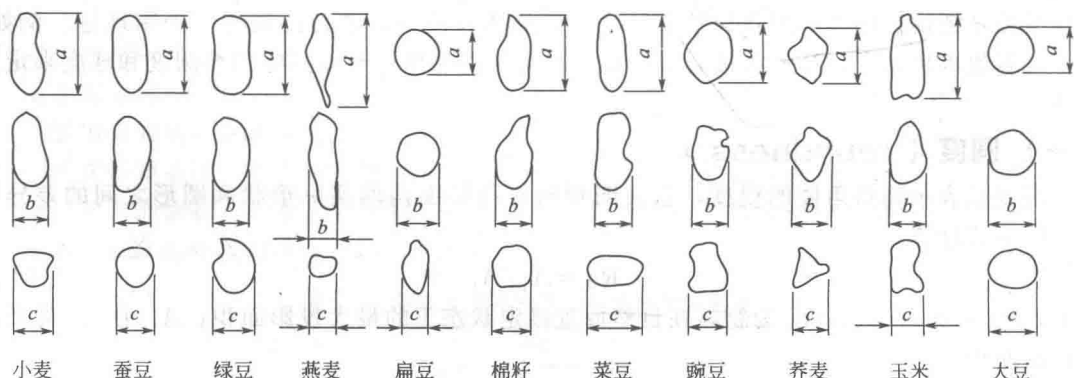


图 2-2 种子和谷粒的轮廓外形和三轴尺寸

## 四、粒径表示法

粒径 (granularity) 用来表示颗粒状或粉粒状物料的形状和尺寸, 可表示为单个粒子的单一尺寸或表示为诸多不同尺寸粒子组成的粒子群平均粒径, 也称为粒度。计算方法如表 2-2 和表 2-3 所示。



表 2-2 单一粒径计算方法

名称	计算公式	名称	计算公式
长轴粒径	$a$	圆等效粒径	$(4f/\pi)^{1/2}$
短轴粒径	$b$	几何平均粒径	$(abc)^{1/3}$
二轴算术平均粒径	$\frac{1}{2}(a+b)$	圆柱体等效粒径	$(fa)^{1/3}$
三轴算术平均粒径	$\frac{1}{3}(a+b+c)$	立方体等效粒径	$V^{1/3}$
调和平均粒径	$3\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}\right)^{-1}$	球等效粒径	$(6V/\pi)^{1/3}$
表面积平均粒径	$\frac{1}{6}(2ab+2bc+2ac)^{1/2}$	定向粒径	$d_g$
体积平均粒径	$3abc(ac+bc+ac)^{-1}$	定向面积等分粒径	$d_m$
外棱矩形等效粒径	$(ab)^{1/2}$	斯托克斯粒径	$\left(\frac{18\eta v_t}{\rho_g - \rho_l}\right)^{1/2}$
正方形等效粒径	$f^{1/2}$		

注:  $f$  为投影面积,  $V$  为粒子体积,  $\eta$  为流体黏性系数,  $v_t$  为粒子沉降速度,  $\rho_g$  为粒子密度,  $\rho_l$  为流体密度; 定向粒径  $d_g$  指粒子投影图上任意方向的最大距离; 定向面积等分粒径  $d_m$  指按一定方向将投影面积分割成二等分时的直线长度。

表 2-3 平均粒径计算公式

名称	计算公式	物理意义
算术平均粒径	$d_1 = \sum nd / \sum n$	单一粒径的算术平均值
几何平均粒径	$d_2 = (d_1' \cdot d_2' \cdots d_n')^{1/n}$	$n$ 个粒径的 $n$ 次方根
调和平均粒径	$d_3 = \sum n / \sum (n, d)$	各粒径的调和平均值
面积长度平均粒径	$d_4 = \sum nd^2 / \sum nd$	表面积总和除以粒径的总和
体面积平均粒径	$d_5 = \sum nd^3 / \sum nd^2$	全部粒子的体积除以总表面积
重量平均粒径	$d_6 = \sum nd^4 / \sum nd^3$	重量等于总重量, 数目等于总个数的等粒子粒径
平均表面积粒径	$d_7 = (\sum nd^2 / \sum n)^{1/2}$	将总表面积除以总个数, 取其平方根
平均体积粒径	$d_8 = (\sum nd^3 / \sum n)^{1/3}$	将总体积除以总个数, 取其立方根
比表面积粒径	$d = 6 / (\gamma_s \cdot S)$	由比表面积 $S$ 计算的粒径
中粒径	$d_{50}$	粒径分布的累积值为 50% 时的粒径
多数粒径	$d_{mod}$	粒径分布中频率最高的粒径

注:  $d_3 < d_2 < d_1 < d_7 < d_8 < d_4 < d_5 < d_6$ 。

测定粒径的方法多样, 有很多是费时费力的, 还有一些需要借助仪器和测试技术。以下介绍两种简易的农业物料平均粒径的测定计算方法。

### (一) 粗颗粒的平均粒径计算

若粒子状农业物料的尺寸范围在可以一粒一粒捡起的范围内, 如大豆、小麦等物料可采用这种方法。

首先从试样中随机采集  $n$  个粒子 (一般取 200 粒及以上), 用普通天平测定其总质量为  $m$ 。设粒子密度为  $\rho_s$ , 则平均粒径  $d_s$  可按下式计算。

$$m = \frac{\pi}{6} d_s^3 \rho_s n \quad (2-6)$$

$$d_s = \left( \frac{6m}{\pi \rho_s n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2-7)$$

由式(2-7)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。

## (二) 细粉平均粒径计算

若粒子状农业物料的尺寸较小,无法一粒一粒采集,如面粉等粉料,可以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(50~100g),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 $d_1' \sim d_2'$ 粒级的粒子其平均粒径为 $d_1 = \sqrt{d_1' d_2'}$ ,其质量占总质量的百分数为 $x_1$ ;  $d_2' \sim d_3'$ 粒级的粒子其平均粒径为 $d_2 = \sqrt{d_2' d_3'}$ ,其质量占总质量的百分数为 $x_2$ 。

$d_m' \sim d_{m+1}'$ 粒级的粒子其平均粒径为 $d_m = \sqrt{d_m' d_{m+1}'}$ ,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粒径或算术平均粒径计算。

调和平均粒径为:

$$d_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^m (x_i / d_i)} \quad (2-8)$$

算术平均粒径为:

$$d_s = \sum_{i=1}^m (x_i d_i) \quad (2-9)$$

筛分法通常使用普通的金属丝网筛子。对25.4mm以上开孔,直接以开孔尺寸表示孔的大小;对25.4mm以下的孔,用25.4mm长度上的孔数表示孔的大小,称为目,有时称为网目。我国常用泰勒标准筛,它有两个序列,筛比 $\sqrt{2}$ ,即每两个相邻筛号的筛子,其筛孔尺寸相差 $\sqrt{2}$ 倍,筛孔面积相差2倍;另一个是附加系列,筛比是 $\sqrt[4]{2}$ 。基筛是200目的筛子,筛孔尺寸为0.074mm。其他筛孔尺寸均按筛比倍率决定。一般采用基本序列,在要求有更窄的粒级时可插入附加序列的筛序。常用标准筛直径为200mm,高度为50mm。

## (三) 粒径分布

粒径分布是以粒子群的质量或粒子数的百分率计算的粒径累计分布曲线或粒径频率分布曲线表示的,是农业物料分级的重要参考标准。

图2-3是马铃薯淀粉粒径累积分布曲线,横坐标是粒径( $\mu\text{m}$ ),纵坐标是累积分布量(%)。累积分布量包括两条曲线,一是将包含某一级在内的小于该级的颗粒数占全部粉末数的百分含量进行累积并作图,称为“负”累积分布曲线;二是将包含某一级在内的大于该级的颗粒数占全部粉末数的百分含量进行累积并作图,称为“正”累积分布曲线。图2-4是马铃薯淀粉粒径频率分布曲线,横坐标是粒径( $\mu\text{m}$ ),纵坐标是各区间的颗粒数占所统计颗粒总数的百分数(%)。利用粒径频率分布曲线,可以根据粒径分布的最大范围和显微镜的测量精度,将粒径范围划分成若干个区间,统计各粒径区间的颗粒数量,并在后续加工中确定物料的分选精度或控制物料的粒径范围。粒径频率分布曲线通常符合正态分布规律。

在累积分布曲线上,累计数为50%时的粒径称为中径 $d_{50}$ (图2-5)。在频率分布曲线上,频率分布最高点的粒径称为多数径 $d_{\text{mod}}$ (图2-6)。

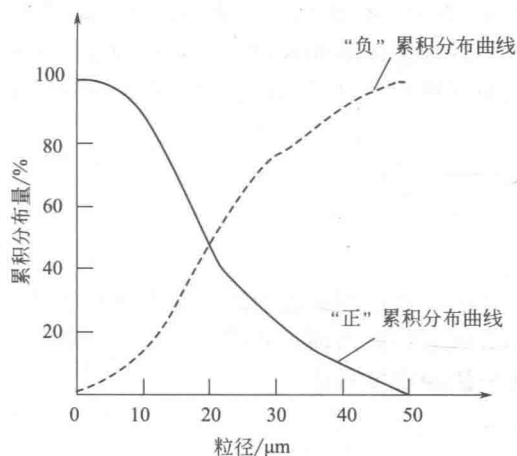


图 2-3 马铃薯淀粉粒径累积分布曲线

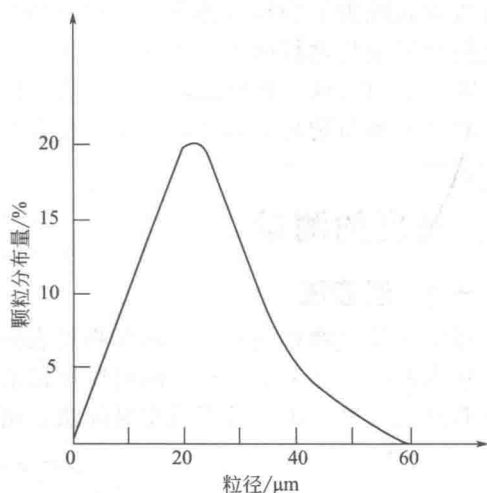


图 2-4 马铃薯淀粉粒径频率分布曲线

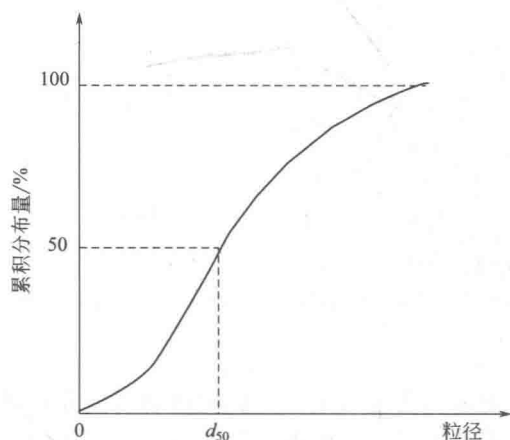


图 2-5 颗粒中径

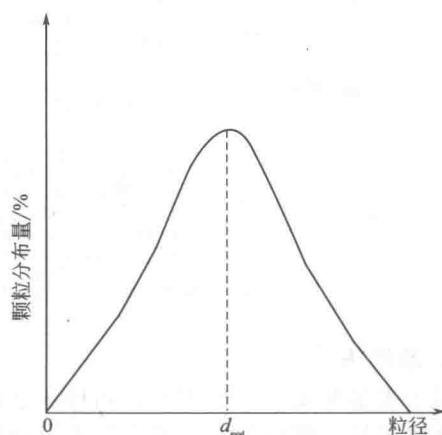


图 2-6 颗粒多数径

## 第二节 密度测量法

农业物料的密度、比重和体积是机械设计及产品分析不可缺少的最基本的原始数据。例如，干草的干燥和储存、储存仓和青储仓的设计、青储料的机械压缩、颗粒饲料和草饼的稳定性、分离和分级、气流和水力输送、种子纯度测定和成熟度评定等都需要密度和体积的数据。

### 一、密度的定义

物体每单位体积内所具有的质量称为密度 (density)。物体的质量与同体积的 1 大气压、4℃ 的纯水的质量之比称为比重。根据体积测定方法的不同，农业物料的密度可分为真密度 (true density)、容积密度 (bulk density) 和颗粒密度 (particle density)。

真密度是物料质量与除去内部孔洞的物料体积之比，一般用  $\rho_t$  表示。由于通过研磨、