

华南理工大学科学丛书

# 粉体科学与工程

魏诗榴摇著

华南理工大学出版社

· 广州 ·

摇图书在版编目 (悦穿) 数据

摇粉体科学与工程 魏诗榴著 广州: 华南理工大学出版社,

圆园园圆

摇 (华南理工大学科学丛书)

摇 陈岸尧 魏诗榴 魏诗榴

摇 I 援粉...摇 II 援魏...摇 III 援粉末技术摇 IV 援裁月源

摇 中国版本图书馆 悦穿数据核字 (圆园园圆) 第 圆缘圆缘号

总发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 员号楼, 邮编 缘园园圆)

发行部电话: 园园园园园园园园园园园园园园 (传真)

责任编辑: 袁摇泽

印刷: 广东省阳江市教育印务公司

责任编辑: 袁摇泽

印刷者: 广东省阳江市教育印务公司

开摇插本: 员员员员员员员员员员 印张: 苑苑苑 插页: 猿猿猿 字数: 圆园园千

版摇插次: 圆园园圆年 圆月 第 员版 第 员次印刷

印摇插数: 员~ 员员员册

定摇插价: 圆园园元

版权所有 摇盗版必究

《华南理工大学科学丛书》编审委员会

顾问摇刘振群摇刘正义摇黄仲涛

主任摇刘焕彬

委员摇刘焕彬摇杨晓西摇黄石生

摇摇摇韩大健摇瞿金平摇刘永清

摇摇摇何镜堂摇陈焕钦摇谢存禧

摇摇摇沈尧天摇童摇真摇徐建闽

摇摇摇钱摇宇摇蔡摇敏摇杨昭茂

## 出版说明

华南理工大学，是国家教育部直属的一所全国重点高等学校。自1958年建校以来，尤其是改革开放以来，已发展成为以工为主、理工结合，管、经、文、法协调发展的多科性大学。目前，在校任教的教授、副教授（含相当的其他高级职称人员）有1500多人。在他们当中有相当一批是在基础理论、应用科学或工程技术领域方面探索研究几十年而取得可喜成果，为繁荣发展我国科学和教育事业做出重要贡献并在国内外享有声誉的著名教授、专家、学者。我们编辑出版《华南理工大学科学丛书》的宗旨是：选择在华南理工大学任职的教授、专家、学者，将他们在某学科或领域处于科学前沿或取得突破性成果的科学论著，按统一的规格要求汇统成丛书，陆续出版面世，以集中反映华南理工大学具代表性的科研成果及其在有关学科领域中的地位和特色，为科研成果的积累、传播、交流及转化为生产力提供有益的条件。

《华南理工大学科学丛书》列选资格由本丛书编审委员会审定，并由华南理工大学拨出专项基金资助出版。选编的原则是：

- 一、列入本丛书的作者（或第一作者），必须是在  
员

华南理工大学担任现职的教师或在学的研究生。除博士点或博士后流动站的导师外，其他教师或研究生的著作必须有两名以上同行专家提出评论意见推荐。

二、凡申请列入本丛书的著作，均应是反映华南理工大学某学科领域的优势、特色和科学水平的，在国内或国内外处于先进水平或领先地位的学术专著；对科学研究成果卓著、学术界知名度大且年事已高的老教授，有选择地适当安排出版其科学论文集。

三、列入本丛书的著作均应使用中华人民共和国法定计量单位（或国际单位制）和有关的新标准（~~1984~~1984年前发表的著作附新制与旧制对照表）；在引用他人著作或观点时，应注明出处和列出参考文献。

四、作者已在国外发表的论著，选用时保留发表时的文种，并注明发表的时间、地点和刊物名称。

出版高层次的科学丛书，对出版社是全方位的考验，如出现缺点和错误，欢迎读者批评指正。

华南理工大学出版社

## 第 员章 摇 绪 摇 论

### 员 员 粉、粉体、粉体科学与工程

煤粉是粉，水泥也是粉，我们把在干法水泥生产过程中的生料叫生料粉。在生活中，我们凭直觉判断“粉”的东西。至于“粉”到底是什么东西，它的内在特征是什么，它同称之为“粒”和“块”的物料的界限在哪里，大小达到什么程度才能称之为“粉”，我们是不甚明了的。在这里，我们有必要对“粉”下一个定义。

粉是各个单独的固体颗粒的集合体，我们把这种集合体称为粉体，是对实物“粉”这种物体抽象化的判断。乍然一看，不免会引起一些困惑。首先，它跟我们日常的观念有些冲突。譬如，在我们心目中，“粉”和“粒”是不同的概念。米粒经过磨细之后才叫米粉，为什么集合在一起的“粒”竟然成了粉体？再说，粉只能是极其微细的固体单元的集合体，而这里却将极其微细的单元在尺寸上升格为粒，混淆了“粉”和“粒”的差别。其次，所指的粒在尺寸上所覆盖的范围也是含糊不清，究竟多大的尺寸才不叫粒，而叫“块”呢？事实证明，将直觉中的粉转化为抽象的粉体和把构成粉体的固体颗粒的尺寸不明确界定，这是有益的而且是科学的做法。因为物质一旦以粉体的形态出现，它便具有作为“粉”的固有特性。

粉体的固有特性是：

(员) 粉体虽然是固体颗粒的集合体，但它的性质与固体不一样。首先，粉体具有异常发达的表面积，单位质量的粉体的表面积（比表面积）很大。由于固体与液体、气体，或者固体与固体之间发生化学反应时都是从固体表面上开始的，所以比表面积越大，越有利于反应的进行，使反应加快，从而强化生产过程。这就是在水泥生产中，先要把块状石灰石等原料变成粉，然后把烧成后的块状熟料再次变成粉的原因。料块变粉的前后，虽然它依然是固体，化学组成和矿物结构也都没有变化，但这时候已经有了质（例如性质）的变化。粉体能在特定的条件下（温度、时间等）完成大尺寸的固体所不能完成的水泥矿物合成反应及水泥水化反应。其次，整块固体的质点（颗粒）是由比较强的键力结合起来的。固体具有比较强的刚度，而且组成固体的质点（颗粒）不会轻易就被拆散。相反，粉体各个颗粒的集合状态是靠弱得多的摩擦力、范德华力等维系的，是松散体，各个颗粒之间的相互位置容易变动。也就是说，粉体几乎没有刚度，容易变形和倾泻，容易发生颗粒之间的相对运动。

(圆) 粉体的颗粒之间的相对运动是由于其松散性使然，这与流体（气体和液体）因具有流动性而流动迥然不同。液体（更不用说气体了）的流动性表现在：将一杯水倒在地面上，水马上摊开，成为一层水膜。这说明静止的液体没有内摩擦力，它不可能靠内部的结构支撑起来。然而，将松散的固体颗粒集合体——粉体倒出，它却可以堆积成为锥状，靠内摩擦力产生结构而不至于摊展成为薄层。因此，粉的颗粒之间容易发生相对运动是由于粉具有松散性，并不像流体那样具有流动性。所以粉体的颗粒之间的相对运动与流体的流动在本质上迥异。

(獭) 从本质上说，液体和气体是宏观上的连续体，而粉体则是各个独立的松散的颗粒的集合体，颗粒之间产生空隙，空隙中充满着空气和水，所以粉体不是连续体，具有显著的不连续

性。料仓中粉的结拱、堵塞，装卸时发生的急冲、泛溢等现象都是因为粉的不连续性而造成的。

总之，粉体虽然是固体颗粒的集合体，但它的性质和性状与固体有显著的差别。从本质上说，它更不能归属于液体和气体一类物体之中。所以，粉体是独立于固体、液体和气体之外的另一种物体，是物质的聚集状态固态、液态和气态之外的第四种物态。所以，对于处于这种物态之下具有独特性质的物体，我们把它称为粉体。

粉体一词虽然在 19 世纪 70 年代才开始出现，但人类接触粉体却是非常久远的事了。史前，人类已经懂得将植物的种子制成粉末提供食用。古代仕女用的化妆品也不乏脂粉一类的粉制品。后来，各行各业都有一套制备粉体和处理粉体的经验，形成各自的技术体系。既然从性质上说各行各业所处理的粉都可归并到粉体这一范畴内，各行各业的粉体技术自必有共同之处。所以可以以粉体为纲，将这些相对独立的技术体系括为一综合的技术体系，即粉体技术体系，从而诞生了一门新的科学与工程学，这就是粉体科学与工程。

粉体科学与工程是以粉体（松散不连续固体颗粒的集合体）为对象，研究和探讨粉体的性质和形状、粉体现象及其产生的规律以及粉体处理（~~剥解~~）和处置（~~剥解~~）技术的一门学科。虽然粉体科学与工程所牵涉的大部分问题的着眼点是“颗粒的集合体”，但也有一些问题是针对个体颗粒的，例如对颗粒的形貌、特别细小的颗粒的特性等的探讨，于是诞生了诸如“颗粒学”、“超微颗粒学”等一类分支学科。

因为粉体现象服从于与固体、液体及气体不同的规律——粉体规律，所以粉体规律可以在粉体这一范畴之内应用。例如，通过实践，人们发现：料仓无论储藏的是水泥或是碎石块，侧压和底压随高度的变化关系都是服从于同一规律，因此在料仓料压的

计算当中，碎石块也可以作为粉体来处理，尽管这时石块与人们心目中的石粉已大相径庭。这就可以理解为什么在有关粉体的定义中不明确标明组成粉体的颗粒尺寸上限的原因；同时又可以理解为什么与粉体同时出现过的一些术语，如块体、粒体及粉粒体工程等，到如今已经很少使用了。因为作为一种独立存在的物体，必有它区别于别的物体的一系列性质，而称为块和粒的物体，都不具备这样的条件，更何况作为块料和粒料的标志的尺寸大小又难以界定。正由于这样，块体、粒体或粉粒体工程等一类术语也就逐渐失去其存在下去的基础了。

## 水泥工业生产与粉体科学与工程

水泥工业生产中所处理和处置的物料，都是属于松散物料的范畴。其中有不少是严格意义上的“粉”；绝大多数的物料更可归纳为粉体。即使是明显的块状物料，也需要在生产过程中使之变为粉体。既然人们面对的是各式各样的粉体，那么就不能不对粉体的特征和行为有所了解，同时要熟悉粉体性质的表征和测试方法，知道各种粉体处理和处置系统的运作原理及其优化手段。

水泥工业生产中处理、处置和制备的对象都是粉体，本书就以粉体为纲，提纲挈领，从粉体的内在特征出发，从系统工程的角度探讨粉体的各种加工系统，使读者获得工程方面而不是工艺方面的知识。

# 第 四 章 筛 粒 度 分 析 与 颗 粒 尺 寸

粉体是由大小不同的颗粒构成。由同一尺寸的颗粒组成的粉体叫单分散系统，由不同尺寸的颗粒组成的粉体叫多分散系统。

研究粉体，首先遇到的问题是怎样表征多分散系统的尺寸，而说明多分散系统的尺寸最直接的方法是将颗粒的组成情况表达出来，这种组成情况叫粒度组成。粒度组成可通过对粉体取样做实际测定得出，所得结果是对多分散系统进行研究的原始数据。

## 筛 粒 度 分 析

通过实验测定粉体粒度组成的方法叫粒度分析，常用的方法是筛析法。

使用一套孔径由大到小的标准筛将粉体试样分为各种粒级的过程称为筛析。由此得出的每一种粒级中的颗粒尺寸尽管仍有差别，但已处在一个比较狭小的范围之内，称出各个粒级的质量，即可知道粒度的组成。

实验室进行筛析用的标准筛，筛孔尺寸的变化遵循着一定的标准。国际上通用的标准是：顺序排列的各层筛的筛孔尺寸形成一几何级数，主序列的公比是  $\sqrt[4]{2}$ ，称为筛比。因此，主序列相邻的两层筛的筛孔的净面积相差一倍。在主序列当中，还插入好几个辅助系列。我国的试验筛标准（GB 6003-1983）参照采用 ISO 563-1981 制定。金属丝编织网筛（方孔）的筛孔尺寸是从 0.075mm 到 100mm；穿孔板筛方形筛孔的尺寸是从 0.075mm 到 100mm。





粒度特性曲线。粒度特性曲线之中，表示各个粒级的数量的曲线叫粒级特性曲线，表示累计数量的曲线叫累计特性曲线。后者又分为筛余曲线和筛出曲线（图 10-10）。在绘制曲线时，以横坐标表示粒度大小。现在是用筛析法测定粒度，所以也就是筛孔的尺寸。以纵坐标表示相对数量，即质量百分数。

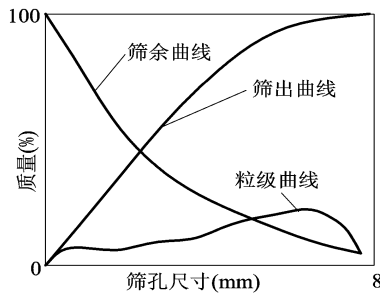


图 10-10 筛析法粒度特性曲线

在绘制粒级特性曲线时，纵坐标所代表的颗粒数量可以绘在与颗粒粒级相应的较大或较小的筛孔尺寸上，也可以绘在这两筛孔尺寸的算术平均值上。

由于各粒级的筛比为 $\sqrt{2}$ ，故细颗粒粒级的间距较小，大颗粒粒级的间距较大。用普通坐标纸绘制曲线时，实验点集中在筛孔尺寸较小处，分布很不均匀。若采用半对数坐标纸，则各个粒级的间距相等，都等于 $\sqrt{2}$ ，因此实验点平均分布在整个粒度范围内，曲线就比较容易绘制。

### 10-10-1 粉体分布曲线

前文已指出，粉体是细小颗粒的集合体，所以粉体现象具有统计特征。把粉体作为统计集合体处理，进行有关粒度组成的研究时，颗粒的尺寸是集合体的总量，或称随机变量。试样中颗粒愿

的总数目或总质量是统计的范围。各个粒级中颗粒的数目或质量称为频数或绝对频率。各个粒级的频数与所在范围的比叫该粒级的出现频率。

根据粒度分析的结果（抽样调查的结果），可以绘出颗粒分布频率图。绘图时，用直角坐标轴的横坐标表示颗粒尺寸（图 10-10），在相应的粒度间隔上画出一矩形，其面积与各粒级的颗粒数目或质量，亦即频数成一定的比例。这样得到的一系列彼此紧靠的高低不同的矩形叫直方图或频率图，它便表示出各粒级出现的频率。

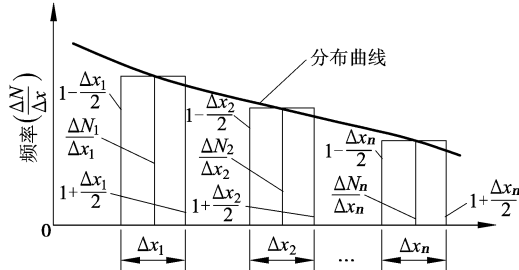


图 10-10 频率分布曲线

由于各个矩形的高度等于  $\frac{\Delta N_1}{\Delta x_1}, \frac{\Delta N_2}{\Delta x_2}, \dots, \frac{\Delta N_n}{\Delta x_n}$ ，所以只要以各个粒度间隔为底边，作一向上高度为单位长度的间隔上的频数的矩形。

如果各个矩形的间距缩小，则作为直方图各矩形顶部的阶梯线将接近于一圆滑曲线，其极限叫分布曲线。

实际上，为了根据粒度分析数据绘出分布曲线，可在各粒级的平均尺寸上量取纵坐标，其大小等于该粒级的频数除以该粒级的尺寸范围，连接这些纵坐标各点而得的一根圆滑曲线，即分布曲线。

分布曲线与粒级特性曲线的区别是：二者的横坐标都是表示

颗粒尺寸，并无差别。至于纵坐标，对于粒级特性曲线，表示的是各粒级的颗粒数目（或质量） $\Delta n_{i1}, \Delta n_{i2}, \dots$ ，画曲线时，以  $n_{i1}$  代表 灶个颗粒，则纵坐标高度分别为  $\Delta n_{i1}/n_{i1}, \Delta n_{i2}/n_{i2}, \dots$ ，对于分布曲线，纵坐标表示的是各粒级的颗粒数目（或质量）除以各粒级的尺寸范围，即  $\Delta n_{i1}/\Delta d_{i1}, \Delta n_{i2}/\Delta d_{i2}, \dots$ ，画曲线时，以  $n_{i1}$  代表 噪单位的  $\Delta n_{i1}/\Delta d_{i1}, \Delta n_{i2}/\Delta d_{i2}, \dots$ ，则纵坐标高度分别为  $\Delta n_{i1}/\Delta d_{i1}, \Delta n_{i2}/\Delta d_{i2}, \dots$ ，灶及 噪的大小可以根据画曲线的方便而随意选取。当粒级的间隔相同时，即  $\Delta d_{i1} = \Delta d_{i2} = \dots$ ，可令  $n_{i1} = n_{i2} = \dots$  灶灶，则两种曲线的纵坐标也完全一样。此时粒级特性曲线与分布曲线相同。但当粒度间隔不相等时，两种曲线便有所区别。事实上，由标准试验筛筛析得出的结果，粒级的间隔是不等的，所以在一般情况下，这两种曲线不是同一样的曲线——此其一。

粒级特性曲线的纵坐标  $\Delta n_i$ （或  $\Delta Q_i$ ）表示各个粒级中的颗粒数目（或质量）；分布曲线的纵坐标  $\Delta n_i/\Delta d_i$ （或  $\Delta Q_i/\Delta d_i$ ）表示颗粒平均直径为  $d_i$  处，当直径增大 员单位长度时，颗粒数目（或质量）的增长速度。前者表示静态，后者表示动态——此其二。

分布曲线与累计特性曲线的关系是：在无穷小的粒度间隔  $\Delta d_i$  中的颗粒数目为：

$$\Delta n_i = \frac{\Delta n}{\Delta d_i} \Delta d_i \quad (\text{圆})$$

或者，颗粒的质量为：

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta Q}{\Delta d_i} \Delta d_i \quad (\text{圆})$$

因而小于某一尺寸  $d$  的颗粒的数目及质量（累计数量）分别为：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{x_0}^x \frac{\Delta N}{\Delta x} \\ \sum_{x_0}^x \frac{\Delta M}{\Delta x} \end{aligned} \right\} \text{(图 10-1)} \quad \begin{aligned} \Delta N \\ \Delta M \end{aligned}$$

由于  $\sum_{x_0}^x \frac{\Delta N}{\Delta x}$  (或者  $\sum_{x_0}^x \frac{\Delta M}{\Delta x}$ ) 是累计特性曲线 (筛出曲线), 而  $\frac{\Delta N}{\Delta x}$  或  $\frac{\Delta M}{\Delta x}$  是分布曲线, 所以累计特性曲线是分布曲线的积分曲线。由于这种原因, 有时也把累计特性曲线称为累计分布曲线。

这两种曲线各有其特点 (图 10-1)。分布曲线是从粒度组成的变化方面去说明多分散系统的特性, 说明“动”的性质, 曲线的极大值表示数量 (颗粒数目或质量) 最多的颗粒集中的地方。如果没有某种尺寸的颗粒存在, 则曲线立即降到零。所以对于粒度组成的变化情况最容易反映出来。但要从分布曲线了解某一粒级的数量多到什么程度, 两个粒级之间哪一个粒级的颗粒数量比较多, 即要了解粒度的数量关系却不容易, 因为颗粒的数量只能根据曲线下面的面积算出。

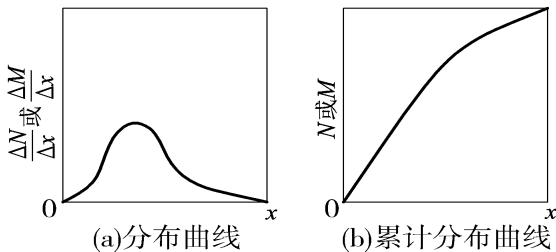


图 10-1 分布曲线与累计分布曲线

累计分布曲线在反映粉体粒度组成的变化方面却没有分布曲线那么敏感。数量最多的颗粒集中在哪一个粒级附近只能根据曲线的某一段的斜率来判断。表示某一狭窄粒级完全不存在也是十分不明显的。但从累计分布曲线却极容易准确地了解某个粒级

的数量以及对某些粒级的数量进行比较。

因此，分布曲线和累计分布曲线各有其用途。这两种曲线合在一起就能全面地表征出多分散系统的粒度组成情况。

### 颗粒尺寸分布的数学式

粒度特性还可以用数学式表示。使用数学式表示多分散系统的粒度特性有以下好处：

(1) 有了描述颗粒尺寸分布的数学式，就可以将粒度组成外推到整个粒度范围，主要是外推到特别细小的粒级。因为直接使用粒度分析方法去取得这些粒级的分布数据是十分费时的。

(2) 可以推算颗粒的表面积、颗粒数目、颗粒体积及其它指标。例如，在涉及化学反应的问题中，往往需要用到表面积这个指标。当然，表面积是可以比表面积测定仪测定的。不过，这种测定并不是直接测定物料的表面积，而是通过物料的某种性质，例如透气性、吸附性等，来间接衡量物料比表面积的大小。既然如此，当然也可以使用粒度分布的数学式，根据粒度分析的结果间接推算出表面积的大小，以便与比表面积测定仪的测定结果进行比较。

(3) 有了数学式之后，就可以通过运算，把粉体某一方面的指标用单一的平均值集中表示出来。例如用平均直径这个单一平均值表示物料的粒度，而相当于这个平均直径的一批颗粒，在比表面积这个指标方面，是与原来的颗粒完全一致的。

总的来说，颗粒分布数学式具有下述的形式，质量分布曲线为：

$$\frac{dW}{dR} = \frac{dF}{dR} - \frac{dF}{dR} \quad (1)$$

式中： $R$ 为颗粒尺寸； $F$ 为筛下料累计曲线； $F$ 为筛上料累计曲线。