粉体工程基础

南京化工学院

1989年1月

目　　录

绪　论

第一章　颗粒特性

1·1　粒径与粒度

1·2　颗粒形状

第二章　颗粒的堆积构造特性

2·1　颗粒堆积特性及应用

2·2　均一球的堆积

2·3　异径球的填充

第三章　粉体层力学

3·1　粉体力学基础

3·2　粉体压计算

3·3　粉体的流动特性

第四章　粉体的流动

4·1　重力流动

4·2　机械强制流动

4·3　振动流动

4·4　压缩流动

第五章　粉体流体系统

5·1　湿粉体的性质

5·2　沉降现象

5·3　透过流动现象

5·4　悬浮现象

TQ172.4/6

绪　论

一、定义及历史

一般说来，粉体或粉粒体是同种或多种物质颗粒的聚集体或分散体，它属于颗粒学范畴，但通常是指固体的颗粒。从颗粒学科角度看，广义地还包括如气中的液体颗粒云、雾，以及液体固体中的气泡即所谓气体颗粒。

粉体颗粒的定义还不很统一，有认为以100μm为界，以下为粉体，也有以1000μm为界的。多数学者如Allen及Heywood等认为粉体是离散的物质，每个颗粒是大量分子的聚合体，并没有确切的上限尺寸，但与其所考虑的周围空间来说必须足够地小。按这个观点，则地球、太阳在茫茫的宇宙中仅是沧海一粟，也可视为粉体。

除颗粒大小作为粉体重要标志外，粉体颗粒还有一些特有的性质：如界面特大，吸附、吸湿现象明显，并有凝集、流变以及可能引起爆炸等现象。由于制造过程中物质本身许多连续面被切断，产生许多新生表面，晶体构造以及裂纹等缺陷，导致粉体化学活性增大，其机械力学性质、热性能、电性能、光性能、声学性能等均有较大变易，与原来大块固体物质的某种特性往往表现出不一致，给研究工作带来困难，这些特性往往表现出统计特性。鉴于此，有人将粉体看成是气、液、固三态之外的“第四物态”。

早在古代人类为开拓自然界已大量处理粉粒状物料，我国古代谷物操作、加工、磨粉、矿山冶金、化学造纸、火药等工农业已采用粉体技术，至十七世纪已有文献记载。从世界范围看，四十年代以后因工程技术发展需要处理大量粉体，如冶炼、化工及环境保护

等产生了一系列许课题，促进了粉体学科及技术的高速发展，使之成为一门独立的学科，至现代粉体又与高技术密切相关。

二、粉体与工业

粉体工程是研究粉体所共有的特性以及与粉体有关的工程技术问题的科学，因此它涉及方面很广，是一门跨学科、跨行业、跨部门的技术科学，粉体学科既研究各领域的共性，加以整理、提高，另一方面又与多种基础学科相比邻，与各工业部门的技术密切相关。粉体技术有关领域如下表。（见下页）

领域	有关内容
物理化学及力学	粉体特性（粒度、形状、充填、凝聚、吸附、流动等）
工业化学	扩散单元操作（干燥、析晶、萃取、吸附等） 反应工程（触媒、流态化、固定床、移动床、烧结等） 机械单元操作（粉碎、混合、过滤、收尘、浓缩、分级、捏和、分离、压榨、成粒等）
机械工业（包括化工机械）	固体输送（气送、水运等）及供给装量等
土木建筑工业	土壤压力、硅酸盐工业、涂料工业
钢铁（金属）工业	采矿、冶炼、粉末冶金、铸造砂及耐火材料树脂研磨材料等
电子电力工业	萤光粉、电极材料、焊接粉、铁氧粉、半导体原料燃料、炉渣处理、光电敏感材料
食品工业	制粉、速熟食、调味品、冲剂、奶粉
交通运输	轮胎（填料、炭黑等）
环卫工业	大气污染、污水处理等
原子能工业	燃料制造（黑铅、核燃料）污染防止
医药	制剂（压缩、成型、片剂、丸剂）制药（散药）
农副业	农药、肥料、土壤、粮食加工运输、饲料等
宇宙开发	火箭燃料、涂料、保温层、超轻耐热高强材料星际物质处理等

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

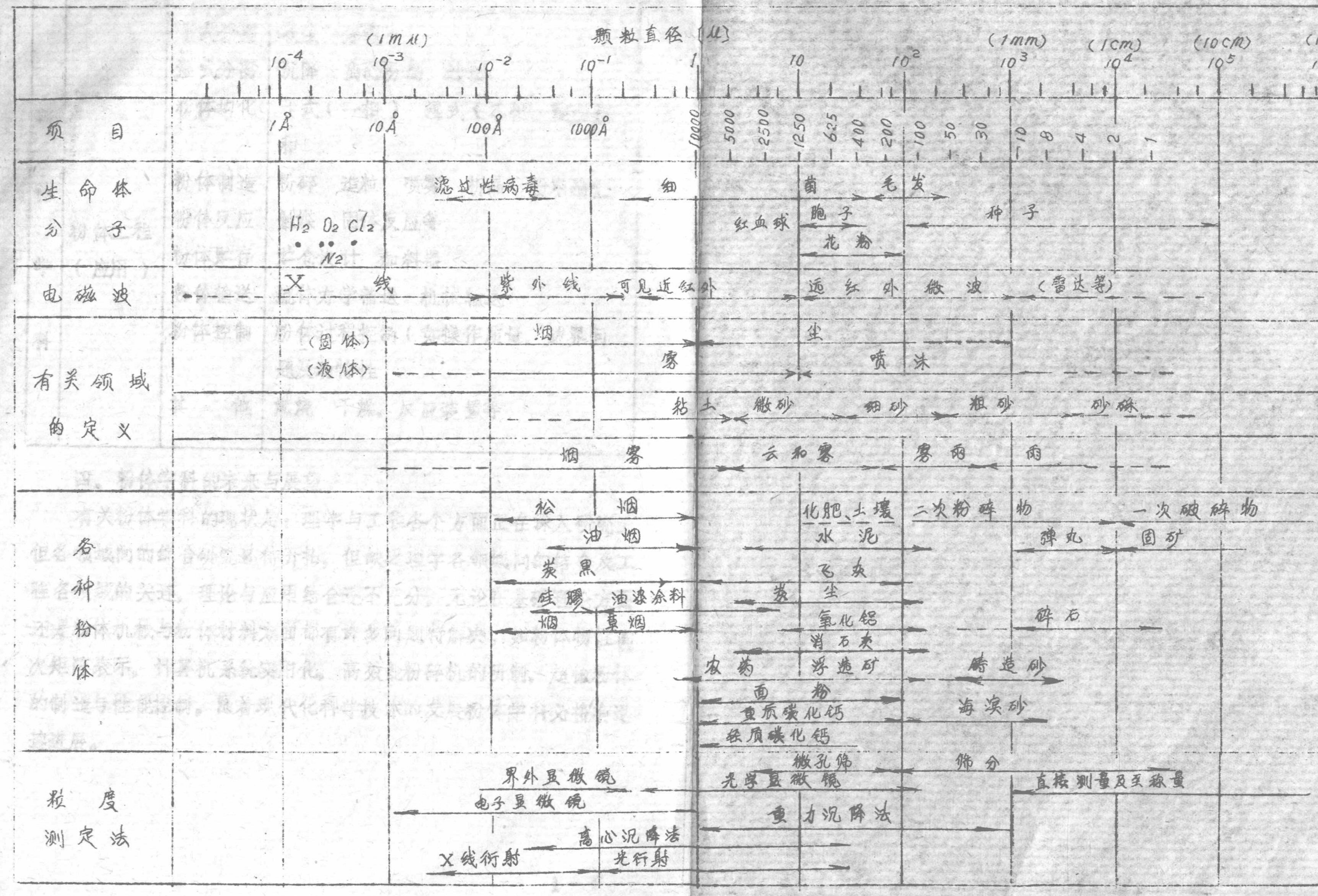
从表中可知粉体的含义不仅限于一般认为的干燥粉粒，也应当包括浆状体、烧结、水化产物等“湿”物料，所以应从更广范围内理解粉体，下图列出了按粒径范围分类的自然界和工业粉体的特性一一览表，有助于对广范围粉体的认识从而统一考虑各工业、自然现象之间的共同规律。

三、粉体的理学与工学

粉体这门学科在名称上目前还不完全统一，过去美国学者用过 Micromeritics，以后又用过Particulate Technology 英国用 Powder Technology，日本讲谈采用粉体工程学名，我国全国性学会采用颗粒学（Particuology）名称，目前教材仍采用粉体工程，不管名称如何从其研究的内容看可以分成科学与工程两大部分或者是基础理论与工程技术两大部分，详细分类如下表：

部门		分类	内容
粉体学科	粉体科学（基础）	粉体几何	粒径、粒度分布、形态、空隙
		粉体力学	静力学：内部应力、破坏强度、压力分布、内摩擦固结、融解 动力学：流动、运动、反弹
		粉体化学	吸附、凝集、融媒、溶解、析晶、沉淀升华及其他表面化学性质
		气溶胶	物化性质、发生、测定、动力学
		粉体计测	特性（粒度、浓度等）、流量、贮量混合度、取样法

颗粒和颗粒分散体特性表



	部　　门	分　类	内　　　　　　容
粉体学科	粉体工程（应用）	干式分离	收尘　分级
		湿式分离	沉降　离心分离　过滤
		粉体均化	干式（一相）　湿式（二相）混合捏和
		粉体制造	粉碎　造粒　喷雾　析晶　粉末冶金
		粉体反应	触媒　固体反应等
		粉体贮存	贮仓设计　加料器
		粉体输送	流体力学输送　机械输送
		粉体控制	粉体过程控制（如操作质量、边界问题及动特性
		其　　他	燃烧　干燥、反应装置等

四、粉体学科的未来与展望

有关粉体学科的现状是：理学与工程各个方面正在深入研究。但各领域间的综合研究还待开拓，但缺乏理学各领域间的结合及工程各领域的关连，理论与应用结合还不充分，无论在基础理论方面还是粉体机械与粉体材料方面都有许多问题待解决。如粉体物性高次矩阵表示，计算机系统实用化，高效能粉碎机的研制，超微粉体的制造与性能控制，随着现代化科学技术的发展粉体学科必将有迅速进展。

第一章　颗粒特性

粉体的基本单位是颗粒，是可以单独存在并参与操作并反应物料某种基本构造与性质的最小单位。

按颗粒的成因又可分为一次颗粒与二次颗粒，凡经机械粉碎处理或化学一次形成的颗粒称一次颗粒，由一次颗粒经由凝集、粘结、压实、烧结等操作而形成的颗粒称为二次颗粒。

1·1　粒径与粒度

粒径一般是指单颗粒的尺寸大小，它是粉体最基本的物性参数，由于形状大小及其百分组成不同粒径表示方法也就不同，对工业操作中由大小不一的颗粒组成的粉体其颗粒大小常称之为粒度。

粒径的定义与表达方法与颗粒的形成过程、测试方法及工业用途三方面有密切关系如何合理选用是个重要问题，例如粉碎产品一般呈角形比较粗大，喷雾溶融产品一般成园形，化学法如反应、蒸发等产品多属超微粉，从用途看化学反应要求比表面积大，涂料要求扁平度大，因此在表达和测定粒径时除应选择合适的测试方法外还应考虑到工业用途要求和颗粒本身特性。

1·1·1　单颗粒径表示法

对球、立方体、园柱、三角锥等规则体，可以其特定边长表示，对一般形状较为复杂的粉体其表示方法如下

① 当量球径

颗粒直径习惯上以几何学上方向性最好、应用最方便的球相比，

i　等体积球径　$d=\sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}=\sqrt{\frac{6\ell bt}{\pi}}$　……(1·1)

ii　等表面积球径　$d=\sqrt{S/\pi}=\sqrt{2(\ell b+bt+t\ell)/\pi}$

……(1·2)

iii 等表面积球径　$d=\frac{6V}{S}=\frac{3}{\frac{1}{\ell}+\frac{1}{b}+\frac{1}{t}}$　……(1·3)

iv　等沉降速球径　$d=\sqrt{18\mu u_o/(\rho_p-\rho)g}$……(1·4)

②　三轴径

当一个颗粒作三维测量时，设想其正好进入一个最小体积的直方体（外接直方体）。如图1·1，其长ℓ、宽b、高（厚）t称为该颗粒的三个轴径，按已知条件可采用其一、二或三个方向平均计算，平均的方法有：

1．算术平均径：为线尺寸的加和平均值

二轴：$(\ell+b)/2$　(1·5)

三轴：$(\ell+b+t)/3$　(1·6)

一般式：

$$d_a=\frac{\Sigma nd}{\Sigma n}\qquad(1·7)$$

ii．几何平均值：

二轴：$a=\sqrt{l\cdot b}$ 相当于面积相等的正方体的一边，又称等投影面积径 (1·8)

三轴：$a=\sqrt[3]{\ell\cdot b\cdot t}=\sqrt[3]{V}$ 相当于体积相等的正方体的一边，又称等体积径 (1·9)

一般式：$$\ln d_g=\frac{\Sigma n\ln d}{\Sigma n} \tag{1·10}$$

iii．调和平均径：相当于比表面积相等的正方体的尺寸，又称等比表面积径

二轴：$$a=\frac{2}{\frac{1}{\ell}+\frac{1}{b}} \tag{1·11}$$

三轴：$$a=\frac{3}{\frac{1}{\ell}+\frac{1}{b}+\frac{1}{t}} \tag{1·12}$$

$$S_V=\frac{S}{V}=\frac{2(\ell b+bt+t\ell)}{\ell\cdot b\cdot t}=\frac{3\cdot 2\cdot a^2}{a^3} \tag{1·13}$$

一般式：$$d_h=\frac{\Sigma n}{\Sigma\frac{n}{d}} \tag{1·14}$$

iv．等面积正方体径

$$S=2(\ b+bt+t\ )=3\cdot 2\cdot a^2 \tag{1·15}$$

$$\therefore a=\sqrt{\frac{2(\ell b+bt+t\ell)}{b}} \tag{1·16}$$

试读结束，需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

还有一些表示方法，常用的为以上几种

实验测定中，采用显微镜时，颗粒一般放置在最稳定态位置以薄面平铺着，故ℓ、b先定出，厚度t则垂直于平铺面。

③ 投影径

在光学和电子显微镜视野内，颗粒平铺排列时，必须从投影图决定颗粒径。由于观测上的特点，习惯规定有以下一些测定法。

i、Feret径：又称Green径，如图1·2(a) 由显微镜按一定方向移动读数装置，读取二条与颗粒相接的平行直线间距离而

图1·2

为Feret径，也称定向统计平均径，在观测时应注意使用液体分散剂时流动方向，应使颗粒配置保持随机性，这一情况在以下诸方面同样也应注意。

ii、Martin径：按定向读取颗粒投影面积两等分线长参考图中(b)

iii、定向最大径：按一定方向读取颗粒最大幅度尺寸（从内部量）如图中(c)，又称Krummbein径。

iv、投影园当量径：与颗粒投影面积相等的园的直径。又称Heywood径，以刻有各种尺寸标准园的目镜尺观察比较而得，或采用投影放大成像或拍成片观察比较，再用记数器自动记录。V等周长园当量径与颗粒投影图形周长相等的园直径几种粒径的说明：

Feret径＞投影园当量径＞Martin径，若e／b较小，则以Martin径代替投影园当量径偏差不大，而细长颗粒两者偏差较大，不同椭园度两者的比较见表1·1。经研究等周长园径接近于Feret径，尤其当颗粒周围元凹形的颗粒有：

$$\frac{\text{图形周长}}{\pi} \approx \text{Feret径} \approx \text{等周长园径。}$$

当颗粒为凸面体，颗粒排列是随机性的，则与颗粒形状无关，颗粒表面积S以颗粒平均投影面积A的四倍相等即 S＝4A

其中“4”称为“Canchy常数，实际由于显微镜下颗粒定向滑移，很难做到随机，

表1·1 不同椭园度Martin径与Feret径比较（Heywood数据）

长短径比	与投影园当量径的偏差	
	Martin径	Feret径
1	0	0
1·5	−1·01	+3·10
2	−2·83	+9·80
3	−7·04	+22·8
4	−10·8	+36·5
10	−25·7	+104·5

实测的Canchy常数比4小，为3·1～3·4，所以投影园当量径亦可作为求不规则颗粒表面积之用。

1·1·2 形状系数

当给颗粒直径定义时，往往以假定的简单几何形状为依据，为将某种方法求的粒径与颗粒的表面积和体积给予关连，与形状有关的系数是必要考虑的，本节仅就与体积和表面积有关的形状系数加以说明。

① 体积形状系数和表面积形状系数

先从一个颗粒考虑：

定义：$$V = \varnothing_V \cdot D_p^3 \qquad (1 \cdot 18)$$

$$S = \varnothing_s \cdot D_p^2 \qquad (1 \cdot 19)$$

式中：D_p—颗粒径　　$\varnothing_V$—体积形状系数

V—单颗粒体积　　$\varnothing_s$—表面积形状系数

S—单颗粒表面积

为球时　$\varnothing_V = \pi/6$　　$\varnothing_s = \pi$

立方体　$\varnothing_V = 1$　　$\varnothing_s = 6$

② 比表面积形状系数

颗粒单位体积的表面积称体积比表面积以S_V表示。单位质量的表面积称质量比表面积以S_W表示：则有

$$S_V = \frac{S}{V} = \frac{\varnothing_s D_p^2}{\varnothing_V D_p^3} = \frac{\varnothing}{D_p}, \quad S_W = \frac{S_V}{\rho_p} \qquad (1 \cdot 20)$$

此处：$\varnothing = \dfrac{\varnothing_s}{\varnothing_V}$ 称为比表面积形状系数，对于球$\varnothing = 6$，设以

D_{ps}代表等比表面积球当量径

$$S_V=\frac{6}{D_{ps}}=\frac{6}{\varnothing_c D_p} \quad 对于球\ \varnothing_c=1 \tag{1·21}$$

此处：$\varnothing_c$称为Carman形状系数或表面积系数

由$D_{pv}=(6V/\pi)^{\frac{1}{3}}$等体积球表面积为$\pi D_{pv}^2$

$$\frac{\pi D_{pv}^2}{S}=\frac{\pi(6V/\pi)^{\frac{2}{3}}}{S} \quad \frac{(6V/\pi)^{\frac{1}{3}}}{(6V/\pi)^{\frac{1}{3}}}=\frac{6V}{SD_{pv}}=\frac{6}{S_V D_{pv}}=\varnothing_c \tag{1·22}$$

此处$\varnothing_c$与后述的Wadell球形度ψ相等，即$\varnothing_c=\psi$。

1·1·3 平均粒径

对大小不均匀的颗粒组成的粒样，必须加以整理求得一道代表性粒径以便使用

设某个粒径为d，其个数为n，则有以下一些表示方法：

$$个数平均径\ D_1=\Sigma\left(\frac{ni}{\Sigma ni}\cdot di\right)=\frac{\Sigma nidi}{\Sigma ni} \tag{1·23}$$

$$长度平均径\ D_2=\Sigma\left[\frac{nidi}{\Sigma(nidi)}\cdot di\right]=\frac{\Sigma(nidi^2)}{\Sigma nidi} \tag{1·24}$$

$$面积平均径\ D_3=\Sigma\left[\frac{nidi^2}{\Sigma(nidi^2)}\cdot d\right]=\frac{\Sigma(nidi^3)}{\Sigma(n_id_i^3)} \tag{1·25}$$

$$体积平均径\ D_4=\Sigma\left[\frac{n_id_i^3}{\Sigma(n_id_i^3)}\cdot d\right]=\frac{\Sigma(n_id_i^4)}{\Sigma(n_id_i^3)} \tag{1·26}$$

考虑一组形状相同，不同大小的Σn个粒子，即其$\varnothing_s$、$\varnothing_v$相同

再设其中某组分粒径为d表面积为S体积为V个数为n，

则表面积平均值$=\Sigma(ns)/\Sigma n$

体积平均值$=\Sigma(nv)/\Sigma n$

有一个与此平均值相等形状相同的颗粒，其直径为d，则有

$$\varnothing_s D_s^2 = \frac{\Sigma(ns)}{\Sigma n}$$

$$\varnothing_v D_v^3 = \frac{\Sigma(nv)}{\Sigma n}$$

以每组分 $S=\varnothing_s d^2$，$V=\varnothing_v d^3$分别代入上两式得，

$$D_5 = D_s = \sqrt{\frac{\Sigma(ns)}{\Sigma n \varnothing_s}} = \sqrt{\frac{\Sigma(n\varnothing_s d^2)}{\Sigma n \varnothing_s}} = \sqrt{\frac{\Sigma(n_i d_i^2)}{\Sigma n_i}} \quad (1\cdot 27)$$

$$D_6 = D_v = \sqrt[3]{\frac{\Sigma(nV)}{\Sigma n}} = \sqrt[3]{\frac{\Sigma(n\varnothing_v d^3)}{\Sigma n \varnothing_v}} = \sqrt[3]{\frac{\Sigma(n_i d_i^3)}{\Sigma n_i}} \quad (1\cdot 28)$$

设单位质量粉体颗粒数为N，各粒径间有如下关系

$$S_w = \frac{\Sigma(ns)}{\rho_p \Sigma(nV)} = \frac{\varnothing_s \Sigma(nd^2)}{\rho_p \varnothing_v \Sigma(nd^3)} = \frac{\varnothing_s / \varnothing_v}{\rho_p D_3} = \frac{\varnothing}{\rho_p D_3} \quad (1\cdot 29)$$

又 $S_w = \varnothing_s D_s^2 N \rho_p$，$N = \dfrac{1}{\rho_p \varnothing_v D_v^3}$ (1·30)

$$D_1 \cdot D_2 = \frac{\Sigma nd}{\Sigma n} \cdot \frac{\Sigma(nd^2)}{\Sigma nd} = \frac{\Sigma(nd^2)}{\Sigma n} = \left(\frac{\Sigma(nd^2)}{\Sigma n}\right)^2$$

$$= D_s^2 \qquad (1\cdot31)$$

$$D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 = D_v^3, \quad D_3 = \frac{D_v^3}{D_s^2}$$

$$D_2 \cdot D_3 = \frac{\Sigma(n_i d_i^3)}{\Sigma n_i d_i} = D_{vd}^2$$

$$D_4 = \frac{D_w^4}{D_v^3} \qquad (1\cdot32)$$

各平均粒径的大小顺序为：

$$D_4 > D_3 > D_w > \{D_2 \gtrless D_v\} > D_s > D_1 > D_h$$

各平均粒径的定义及计算式列如表1·2。

注：粒径测定时，若没有个数频度 ，而采取质量频度，对球形颗粒有：

$$n = \frac{W}{\rho_p(\pi d^3/6)}$$

则以个数表达的和以质量表达的平均粒径间的变换有如下关系：

$$\left[\frac{\Sigma(nd^p)}{\Sigma(nd^q)}\right]^{\frac{1}{p-q}} = \left[\frac{\Sigma(Wd^{p-3})}{\Sigma(Wd^{q-3})}\right]^{\frac{1}{p-q}} \qquad (1\cdot33)$$

试读结束，需要全本请在线购买： www.ertongbook.com