

粉粒体过程自动化

[日] 井伊谷鋼一 著
增田弘昭 著
高增杰 译

中国建筑工业出版社

本书概述测定粉体物性的基本知识, 介绍粉体过程状态量(粉体流量、浓度、料位、压力、温度、水分)的检测方法, 粉体过程的执行机构, 粉体过程(粉碎、配料、集尘、干燥、输送)的控制及自动控制的实例, 并分析了气力输送系统、旋风分离器、粉碎机和流化床干燥器的粉体过程动态特性。

本书可供建材、冶金、化工、轻工、食品等部门有关从事粉体技术的科技人员、有关专业的院校师生阅读参考。

杨伦同志对本书译稿进行了全文审阅。

粉粒体プロセスの自動化

昭和50年5月30日初版发行

著者 井伊谷鋼一 増田弘昭

发行者 吉川育太郎

发行所 日刊工业新闻社

* * *

粉粒体过程自动化

高 增 杰 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 6 插页: 1 字数: 160千字

1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷

印数: 1— 3,400册 定价: 0.78元

统一书号: 15040·4561

前 言

粉体过程不同于流体过程，在粉体过程中，如果不用人工操作来对其状态量进行测定，那是很困难的，因此，其自动化技术尚处于落后状态。近年来，在实验范围内对测量及操作进行了研究，粉体处理的自动化方法逐渐有所发展，以粉体为对象进行在线计测及控制也正在变为可能。在举世自动化的时代里，尽管已经落后，但为赶上潮流，必须掌握这一粉体过程状态量的自动计测及粉体流量的操作。本书即为这一目的，以我们研究室的研究成果为中心，参考国内外文献综合写成。计测控制及自动化的书籍出版为数很多，但以粉体过程为对象，且对其各元件动态特性进行分析的书籍，大概本书还是第一本。正因为如此，内容既不够充分，也很难包括所有方面，加之解释中难免有不妥及错误之处，谨望给以批评指正。希望以本书为一个引子，进一步进行研究发展，使粉体过程的仪表和自动控制得以发展，而不亚于流体过程的自动化连续系统。

最后，谨向在本书内容上给以大力协作研究的名古屋大学和京都大学毕业生及其他各位协作研究人员表示感谢，并为近二十年来能对这一领域不断进行开发而深感荣幸。

井伊谷綱一

1975年4月

目 录

前言

第一章 粉体测定基础

1.1 粒度	1
1.2 颗粒形状	7
1.3 密度	11
1.4 比表面积	14
1.4.1 透气法	14
1.4.2 吸附法	16
1.5 摩擦角	17
1.5.1 休止角	17
1.5.2 内摩擦角	18
1.5.3 壁摩擦角	19
1.6 流动性	20
1.7 水分	23
1.8 电特性	25
1.8.1 电阻率	25
1.8.2 介电常数	25
1.8.3 带电量	26
1.9 附着特性	27
1.10 粉体的其他特性	29
注释	29
参考文献	31

第二章 粉体过程状态量的检测

2.1 粉体流量(流速)测定	34
2.1.1 称量法	34

2.1.2	电气方法	37
2.1.3	差压法	40
2.1.4	力学方法	42
2.1.5	统计学方法	47
2.1.6	其他方法	49
2.1.7	流动检测	52
2.2	粉体浓度(混合比)测定	53
2.3	粉体料位测定	60
2.3.1	称量法	61
2.3.2	电气方法	61
2.3.3	气压法	62
2.3.4	机械方法	62
2.3.5	能量吸收法	64
2.4	压力测量	66
2.5	温度测量	71
2.6	气体流量测定	74
2.7	粒度测定	76
2.7.1	直接分级法	76
2.7.2	能量吸收法	78
2.7.3	透气法	79
2.7.4	光散射法	80
2.7.5	音响法	80
2.7.6	统计学方法	80
2.7.7	其它方法	81
2.8	水分测量	82
注释		86
参考文献		88

第三章 粉体过程的执行机构

3.1	概要	92
3.2	旋转加料器	100
3.3	螺旋加料器	105
3.4	圆盘加料器	109

3.5 皮带加料器	117
3.6 振动加料器	123
3.7 操作阀	127
3.8 气力输送装置使用的加料器	131
注释	135
参考文献	136

第四章 粉体过程的控制

4.1 概要	138
4.2 粉碎过程	144
4.3 配料过程	147
4.4 集尘过程	151
4.5 水泥制造过程	154
4.6 干燥过程	158
4.7 输送过程	161
注释	162
参考文献	164

第五章 粉体过程的动态特性

5.1 气力输送系统的动态特性	165
5.2 旋风分离器的动态特性	168
5.3 粉碎机的动态特性	169
5.4 流化床干燥器的动态特性	172
注释	173
参考文献	174

附 录

附录1 数学公式推导	175
附录2 物理常数	183

第一章 粉体测定基础

固体颗粒的集合体称为粉体。当然将岩石那样大的颗粒的堆积状态称为粉体是很不恰当的，而且英国标准规定，组成颗粒在1000微米以下者为粉体（Powder）。但是，粉体生产过程中所处理的颗粒集合体包含大颗粒至小颗粒的广阔范围。而且颗粒包括面粉、砂、金属粉等多种物质，所以粉体特性也多种多样。很明显，在粉体过程中所发生的现象取决于这些粉体的物性。本章概述测定这种粉体物性所需的基础知识。

1.1 粒 度^{1)~6)}

如果想要从几何学上正确地表达单个颗粒的大小，这不仅是非常复杂的，而且近乎不可能。但是与粉体过程有关的颗粒个数很多，因此在很多情况下只应用两、三个统计性数值即已足够。所以，在粒度测定中，一般经常采用筛网、静止介质中的沉降（气相沉降法、液相沉降法）等。即使采用显微镜进行测定，也很少进行颗粒的三维测定，一般是测定某一定方向的长度。这样求得的直径称为定方向径^①。可以认为，取样至载玻片上的颗粒一一具有随机（紊乱）方向，因此从统计上看，可将定方向径视作适当的代表值，但一般需读出大量的颗粒的。关于在线（on-line）粒度测定将在2.7节中叙述，现根据不同粒径范围所采用的测定方法示于图1-1。利用标准筛所能得到的最小粒径，JIS^①规定为37微米，其他各国的规定也相同，英国标准（BS）将通过75微米（200目数）筛网的粉体称作亚筛（sub-sieve）粉。此外，采

① JIS即日本工业标准。——译者注

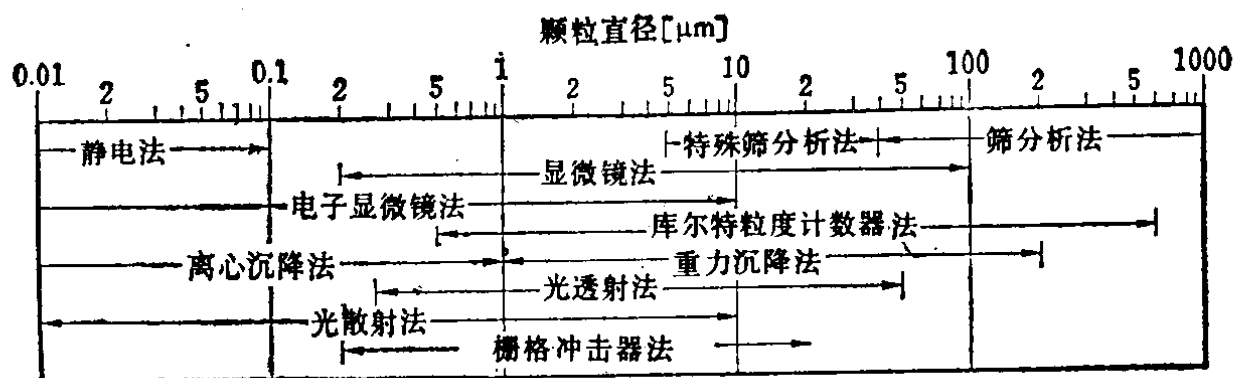


图 1-1 典型的粒度测定法及其适用范围

用特殊筛网可分级至数微米左右^②。

测定粒度分布的目的在于掌握粉体过程的特性，因此，并不需要颗粒在完全分离为单个状态下的粒度。当然根据不同目的，有时也需要完全分散状态下的粒度，但这种情况极少。因此，应考虑尽量在接近于实际过程的状态（在某种程度上团聚的状态）下进行测定。例如，流体中的颗粒运动是对象粉体过程的基本现象时，恐怕就应采用气相沉降法或液相沉降法。这种测定一般在斯托克斯定律能够成立的范围内进行，所得粒径一般称作斯托克斯径（Stokes diameter）。

$$D_p = \sqrt{\frac{18\mu v_t}{g(\rho_p - \rho_f)}} \quad (1-1)$$

式中 D_p ——斯托克斯径；

μ ——介质粘度；

v_t ——终端沉降速度^③（terminal or free-falling velocity）；

g ——重力加速度；

ρ_p ——颗粒密度；

ρ_f ——介质密度。

即通过测量沉降速度 v_t ，可以求出颗粒的代表粒径（等效沉降直径 equivalent free-falling diameter），而它则与现象密切相关。此外，在欲得知气流中 1 微米左右的粒度（其中可能含有团聚的颗粒）时，可设想采用多级惯性冲击分级的串级冲击

器④最为适宜，对此还将在2.7节中加以叙述。

此外，将求出的粒度分布进行表达时，经常采用下述对数正态粒度分布（lognormal size distribution）和洛津-拉姆拉（Rosin Rammler）分布。

对数正态分布（颗粒直径对数值为正态分布）：

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_{D_p}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{(\ln D_p - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} d(\ln D_p) \quad (1-2)$$

$\sigma = \ln \sigma_g$ (σ_g 为几何标准偏差)

$$= \ln D_{p15.9} - \ln D_{p50} \quad (1-3)$$

$$\mu = \ln D_{p50} \quad (D_{p50} \text{ 为中位径}) \quad (1-4)$$

R ——筛上累积分布

洛津-拉姆拉分布：

$$R = \exp \{ - (D_p / D_{p36.8})^n \} \quad (1-5)$$

式中 n ——常数（均衡数）。

式中， $D_{p15.9}$ 、 D_{p50} 、 $D_{p36.8}$ 等表示筛上累积值分别为总量的15.9%、50%、36.8%（ $R=0.159$ 、0.5、0.368）时的值。

如将这些分布分别在图1-2及图1-3中给出的座标上作图，则成为直线。在筛上累积分布 R 或筛下累积分布 F 与频率分布 f 之间存在下述关系：

$$-\frac{dR}{dD_p} = \frac{dF}{dD_p} = f \quad (1-6)$$

或

$$F = 1 - R = \int_0^{D_p} f dD_p \quad (1-7)$$

此外还有一种尝试，欲求出最大及最小粒径，从而更为精确地表达粒度分布⑤。

另外，在粒度分布中，有的如显微镜法计算粒数求出分布，有的如筛分析法测量重量求出分布。两者具有明显差异，前者称为粒数基准粒度分布，而后者称为重量基准粒度分布。当然，进一步还可以设想有长度基准、面积基准等。在欲写清楚这些基准

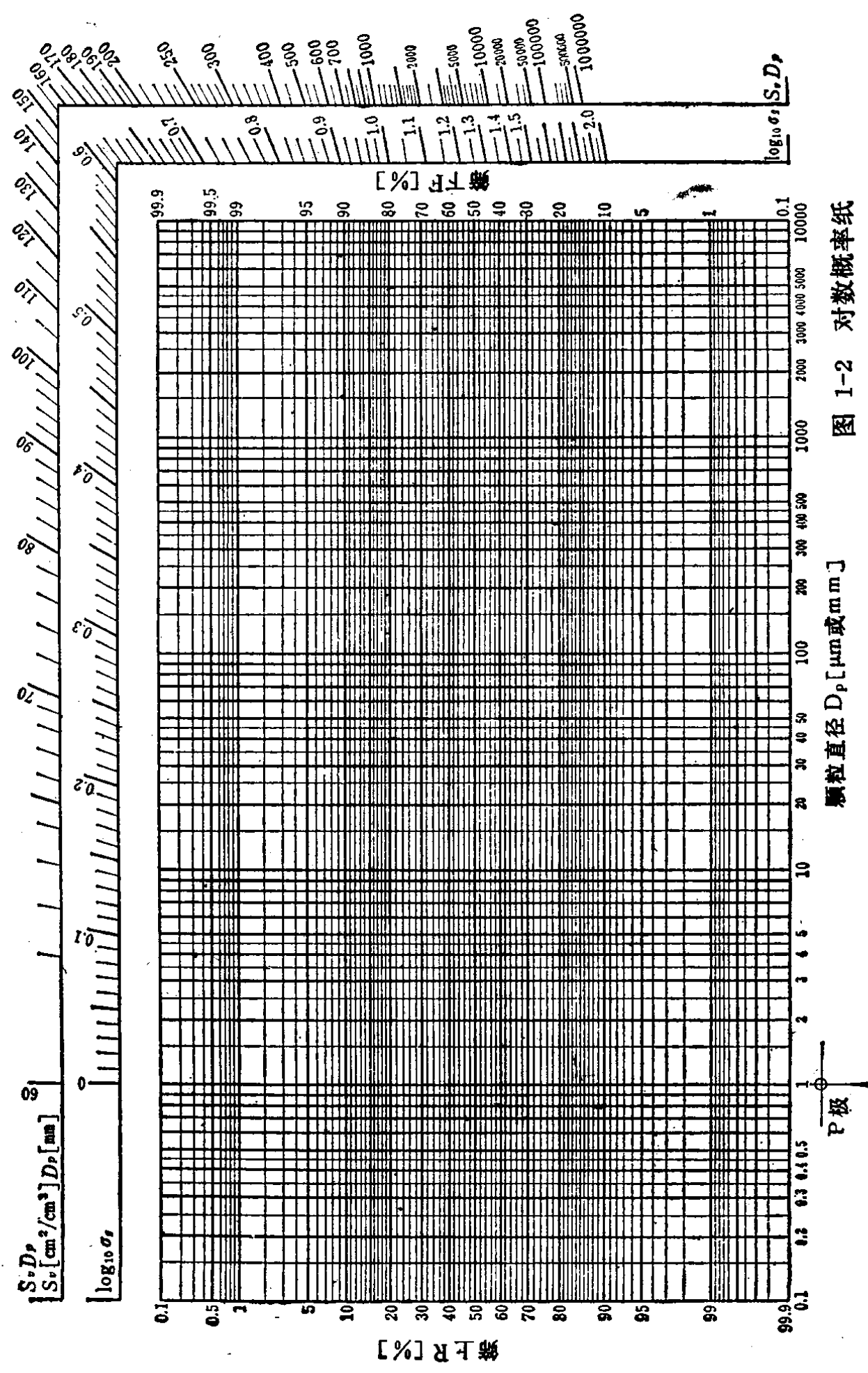


图 1-2 对数概率纸

时，可写作 $f^{(\beta)}$ ， β 取如下整数。

β	0	1	2	3
基准名称	粒 数	长 度	面 积	重量(体积)

一般说来，在粒数基准频率分布 $f^{(0)}$ 与 β 基准频率分布 $f^{(\beta)}$ 之间存在下述关系：

$$f^{(\beta)} = \frac{f^{(0)} D_p^\beta}{\int_0^\infty f^{(0)} D_p^\beta dD_p} \tag{1-8}$$

或者， $f^{(\alpha)}$ 与 $f^{(\beta)}$ 之间成为下列形式：

$$f^{(\beta)} = \frac{f^{(\alpha)} D_p^{\beta-\alpha}}{\int_0^\infty f^{(\alpha)} D_p^{\beta-\alpha} dD_p} \tag{1-9}$$

实际在很多情况下，较为简单的平均粒径比粒度分布本身更直接与现象有关，因此在很多情况下，将上述方法求出的粒度分布计算为平均粒径而加以应用。对于符合这种目的的平均粒径，如下定义将是适当的：

$$\overline{D}_p = y^{-1}(\bar{y}) \tag{1-10}$$

式中 $\overline{D}_p$ ——平均粒径；

y ——按均一粒径颗粒集合体（单分散系粉体）求出的粉体过程变量（粒径函数）；

$\bar{y}$ ——对具有粒度分布的粉体所测粉体过程变量；

y^{-1} —— y 的反函数。

这一公式表明： $y(\overline{D}_p)$ ，即若将平均粒径 $\overline{D}_p$ 作为根据单分散系粉体求出的关系式 $y(D_p)$ 中所包含的粒径代入，则可计算 $\bar{y}$ ，亦即计算出采用具有粒度分布的粉体所要测定的变量。例如，假设过程变量 y 与颗粒直径 D_p 的平方成正比，则

$$y = k D_p^2 \tag{1-11}$$

如利用此式反过来对 D_p 求解, 则

$$y^{-1} = D_p = \sqrt{y/k} \quad (1-12)$$

这是反函数, 从式(1-11)求出 $\bar{y}$, 即

$$\bar{y} = k \int_0^{\infty} f D_p^2 dD_p \quad (1-13)$$

若在 y 处代入 $\bar{y}$, 则上述意义的平均粒径:

$$\bar{D}_p = \sqrt{\int_0^{\infty} f D_p^2 dD_p} \quad (1-14)$$

在对理论和实践进行合理性比较时, 应用符合此种目的的平均粒径也很重要¹⁾。而且, 在对数正态粒度分布 f_{LN} 适用时, 得如下关系:

$$\int_0^{\infty} D_p^n f_{LN}^{(\beta)} dD_p = \exp(\mu^{(\beta)} n + \frac{1}{2} n^2 \sigma^2) \quad (1-15)$$

$$\left\{ \int_0^{\infty} D_p^n f_{LN}^{(\beta)} dD_p \right\}^{1/n} = \exp(\mu^{(\beta)} + \frac{n}{2} \sigma^2) \quad (1-16)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}^{(\beta)}(\mu^{(0)}, \sigma^2) &= \bar{y}^{(0)}(\mu^{(0)} + \beta \sigma^2, \sigma^2) \\ &= \bar{y}^{(\alpha)}\{\mu^{(0)} + (\beta - \alpha) \sigma^2, \sigma^2\} \end{aligned} \quad (1-17)$$

式(1-15)为上述各式的基本形式。设 $x = \ln D_p$, 应用式(1-2), 即可简单证明。由式(1-16)对 $y = k D_p^n$ 形式的过程的平均粒径进行计算, 非常容易。此外, 平均 μ 间存在如下关系:

$$\mu^{(\beta)} = \mu^{(\alpha)} + (\beta - \alpha) \sigma^2 \quad (1-18)$$

又, 式(1-17)表明, 通过将 $\bar{y}^{(\alpha)}$ 进行平移, 即可得到 $\bar{y}^{(\beta)}$ 。而且关于 $\bar{y}$, 成立如下关系:

$$\begin{aligned} \bar{y}^{(\alpha)} &= \int_0^{\infty} f^{(\alpha)} y dD_p \\ &= \frac{\int_0^{\infty} f^{(0)} D_p^{\alpha} y dD_p}{\int_0^{\infty} f^{(0)} D_p^{\alpha} dD_p} \end{aligned} \quad (1-19)$$

【例题】在某一粉体过程中，应用均一粒径颗粒（单分散系粉体），已知单位质量粉体的过程变量 y 与粒径平方成反比。对于具有粒度分布的粉体，采用何种平均粒径为宜？在粒度分布用平均 $\mu^{(0)}$ 、分散 σ^2 的对数正态分布表示时，写出平均粒径的计算式。

【解】过程变量 y ：

$$y = k/D_p^2 \quad (k \text{ 为常数}) \quad (\text{I})$$

故反函数 y^{-1} 为

$$y^{-1} = D_p^2 = \sqrt{k/y} \quad (\text{II})$$

又，采用重量基准频率分布 $f^{(3)}$ ， $\bar{y}$ 如下式：

$$\bar{y} = \int_0^{\infty} (k/D_p^2) f^{(3)} dD_p \quad (\text{III})$$

所以，根据平均粒径定义公式 (1-10)，在式 (II) y 处代入式 (III) 中的 $\bar{y}$ ，则平均粒径可得：

$$\bar{D}_p = \sqrt{1 / \int_0^{\infty} (f^{(3)} / D_p^2) dD_p} \quad (\text{IV})$$

又，利用式 (1-16)，以 $n = -2$ 、 $\beta = 3$ 代入（注意系重量基准），则

$$\bar{D}_p = \exp(\mu^{(3)} - \sigma^2) \quad (\text{V})$$

再应用式 (1-18)，并应用已知的 $\mu^{(0)}$ 及 σ^2 ，则可写成下列形式：

$$\bar{D}_p = \exp(\mu^{(0)} + 2\sigma^2) \quad (\text{VI})$$

1.2 颗粒形状^{7)~10)}

前节叙述的平均粒径，即使在颗粒不是球形，也将作为表达颗粒大小的最为重要的统计量，它很有用处。但在分析现象时，或许还进一步需要其他的统计量，其中之一就是称为（颗粒）形状因数的统计量。形状因数与平均粒径相同，可与粉体现象结合

起来进行考虑, 所以根据不同目的可以得出各种定义公式。

表面积形状系数 (surface shape-factor)

$$\phi_s \equiv s/D_p^2 \quad (1-20)$$

式中 ϕ_s ——表面积形状因数;

s ——单个颗粒的表面积;

D_p ——对象颗粒粒径 (代表径)。

当颗粒为球形或立方体时, ϕ_s 分别为 π 或 6。

如上式所示, 表面积形状系数是对单个颗粒进行定义, 但如果将所有颗粒均视作几何相似的话, 则它也就是颗粒集团的平均表面积形状系数。

为使式 (1-20) 适用于具有粒度分布的粉体, 应如何改变其形式为宜? 现根据前节所述平均粒径试进行考虑。如将颗粒表面积 s 看作过程变量, 并假定形状系数恒定, 则平均粒径可按下式求出:

$$\bar{D}_p = \sqrt{\int_0^\infty f^{(0)} D_p^2 dD_p} \quad (1-21)$$

如果利用这一平均粒径, 则根据下式可求出平均颗粒表面积 $\bar{s}$ 。

$$\bar{s} = \phi_s \bar{D}_p^2 \quad (1-22)$$

因此, 对于具有粒度分布的粉体, 其 (平均) 表面积形状系数可按下式定义:

$$\phi_s = \bar{s} / \bar{D}_p^2 \quad (\bar{D}_p \text{ 为式 1-21}) \quad (1-23)$$

即, 如求出表面积平均值 $\bar{s}$ 及由式 (1-21) 所定义的平均粒径, 则可求出 ϕ_s 。粉体试样的总表面积虽然因是否考虑细孔而有所差异, 仍可根据下述的比表面测定法求出。但是定义公式 (1-23) 为粒数基准, 因此为求出平均颗粒表面积还须求出颗粒个数^⑥。

体积形状系数 (volume shape-factor)

$$\phi_v \equiv v/D_p^3 \quad (1-24)$$

式中 ϕ_v ——体积形状系数;

v ——单个颗粒的体积;

D_p ——对象颗粒的粒径。

当颗粒为球形或立方体时, ϕ_v 分别为 $\pi/6$ 或 1。

此形状系数也是对单个颗粒进行定义。与面积形状因数的情况相同, 如扩展定义公式 (1-24), 则成为下列形式:

$$\phi_v = \bar{v} / \bar{D}_p^3, \quad \bar{D}_p = \sqrt[3]{\int_0^\infty f^{(v)} D_p^3 dD_p} \quad (1-25)$$

如果掌握下述的颗粒密度及粉体重量, 则可以求出粉体试样的总颗粒体积。但是, 根据采用颗粒的哪种体积, 即是否将内部的空洞视作体积的一部分, 其密度的值将有所差异。这种困难虽然可以按照目的在某种程度上得到解决, 但是定义式 (1-25) 是粒数基准, 与表面积形状系数的情况相同, 存在一个必须求出颗粒个数的问题。从这种意义上说, 这些形状系数不能说很实用。

现在, 假定式 (1-23) 为体积基准, 那么单位体积^⑦粉体的表面积 S_v 将是一个比较容易测量的量, 因此可以认为是实用的, 这就是下面所要叙述的比表面形状系数。

比表面积形状系数 (specific surface shape-factor)

$$\phi_{sv} \equiv S_v \cdot D_p \quad (1-26)$$

式中 ϕ_{sv} ——比表面积形状系数;

S_v ——比表面积 (cm^2/cm^3)。

这种比表面积形状系数也是就单个颗粒定义的。如应用式 (1-20) 及式 (1-24), 则

$$S_v = \frac{\phi_s D_p^2}{\phi_v D_p^3} = \frac{\phi_s / \phi_v}{D_p} \quad (1-27)$$

即 $\phi_{sv} = \phi_s / \phi_v \quad (1-28)$

球形颗粒时, 由于 $\phi_s = \pi$, $\phi_v = \pi/6$, 故 $\phi_{sv} = 6$ 。但 ϕ_{sv} 在立方体时仍为 6。

为使定义式 (1-26) 扩展至具有粒度分布的粉体, 需要求出平均粒径。现在, 就单位体积粉体进行考虑, 并且注意到比表面积 S_v 是过程变量, 则

$$y = S_v = \phi_{sv} / D_p$$

$$y^{-1} = D_p = \phi_{sv} / S_v$$

$$\bar{y} = \phi_{sv} \int_0^{\infty} \frac{f^{(3)}(D_p)}{D_p} dD_p \quad (\text{体积基准})$$

故

$$\bar{D}_p = y^{-1}(\bar{y}) = 1 / \int_0^{\infty} \frac{f^{(3)}(D_p)}{D_p} dD_p \quad (1-29)$$

它被称为体表面积平均径 (volume-surface mean diameter)。为参考起见, 将粒度分布写成粒数基准, 应用式 (1-8), 则成为下列形式:

$$\bar{D}_p = \frac{\int_0^{\infty} f^{(0)}(D_p) D_p^3 dD_p}{\int_0^{\infty} f^{(0)}(D_p) D_p^2 dD_p} \quad (1-30)$$

如果列举表示颗粒形状的有关定义, 则尚有下列数种:

$$\text{球形度 (sphericity)} = \frac{\text{具有与颗粒相等体积的球的表面积}}{\text{实际颗粒的表面积}} < 1$$

$$\text{圆形度 (circularity)} = \frac{\text{具有与颗粒相等投影面积的圆周长}}{\text{实际颗粒投影周长}} < 1$$

$$\text{表面系数 (surface factor)} = 6 / \phi_{sv} < 1$$

无论是球形还是立方体, 形状系数均为 $\phi_{sv} = 6$ 。由此可以看出, 形状系数系从宏观上对颗粒形状进行观察。但在研究颗粒之间的摩擦及附着现象时, 表示更为微观的表面凹凸的粗糙度系数似更有效。

$$\begin{aligned} \text{粗糙度系数} &= \frac{\text{颗粒的微观表面积}}{\text{表现平滑颗粒的宏观表面积}} \\ &\cong \frac{\text{根据吸附法测出的比表面积}}{\text{根据透气法测出的比表面积}} > 1 \end{aligned}$$

【例题】 半径为 r 、高为 l 的圆柱，其表面积形状系数、体积形状系数以及比表面形状系数为何值？

【解】 圆柱的表面积 s 及体积 v 为

$$s = 2\pi r^2 + 2\pi rl$$

$$v = \pi r^2 l$$

如采用高 l 作为粒径 D_p ，且设 $x = l/r$ ，则

$$\phi_s = 2\pi(1+x)/x^2$$

$$\phi_v = \pi/x^2$$

$$\phi_{sv} = 2(1+x) \quad (\text{I})$$

又 如采用 $2r$ 为粒径 D_p ，则

$$\phi_s = \pi(1+x)/2$$

$$\phi_v = \pi x/8$$

$$\phi_{sv} = 4(1+1/x) \quad (\text{II})$$

当 $x = 2$ 即 $l = 2r$ 时，两种情况均为 $\phi_{sv} = 6$ 。而如果 $x \rightarrow \infty$ ($l \gg r$ 、针状) 时，式 (I) 中， $\phi_{sv} \rightarrow \infty$ ；式 (II) 中， $\phi_{sv} \rightarrow 4$ 。反之，如 $x \rightarrow 0$ ($l \ll r$ 、平圆板状) 时，式 (I) 中， $\phi_{sv} \rightarrow 2$ ；式 (II) 中， $\phi_{sv} \rightarrow \infty$ 。

1.3 密 度^{11)~17)}

粉体密度大体可分为两种，即研究单个颗粒运动，由粉体重量求出粉体的组成颗粒所占容积时所需的密度，以及将粉体层 (powder bed) 所占容积换算为粉体质量时所需的密度。前者称为颗粒密度 (particle density)，后者称为粉体密度 (powder density) 或松密度 (bulk density)。

在研究流体中的颗粒运动或计算颗粒的动量及动能时，需要用到颗粒的质量。通常如图1-4所示，颗粒内含有开口细孔 (open pore) 及封闭细孔 (closed pore，包括空洞)。按是否将它们视为颗粒体积的一部分，颗粒密度分别定义如下^⑧。

真密度 (true density)：颗粒的质量与除去开口细孔、封