

INTRODUCTION TO  
POWDER  
TECHNOLOGY

# 粉体工程导论

陆厚根 编著

同济大学出版社

# 粉体工程导论

陆厚根 编著

同济大学出版社

(沪)新登字204号

### 内 容 提 要

本书内容涉及粉体工程的三个主要方面:颗粒性质和行为,颗粒形成和制备以及颗粒处理技术。具体包括:颗粒粒度和形状的表征,颗粒群聚集特性,粉体层静力学,颗粒群流动,颗粒流体力学,粉碎、分级、分离、混合、造粒以及粉尘爆炸等。着重系统和详细阐述颗粒粒度和形状定量表征、超细粉碎和超细分级机理、粉碎机机械力化学、料仓设计原理以及粉尘爆炸等领域的新理论和技术。内容新颖、翔实。

本书可作为高等学校无机非金属材料、硅酸盐工程、化工、选矿、冶金、建筑材料、建材机械等专业本科生和研究生教材,亦可供从事粉体工程以及相关学科的科研、工程技术、管理技术人员作参考。

责任编辑 曹焜麟

封面设计 王肖坐

### 粉 体 工 程 导 论

陆厚根 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

上海崇江外文印刷厂排版

吴县人民印刷二厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张10.25 字数293千字

1993年8月第1版 1993年8月第1次印刷

印数1—2000册 定价:6.25元

ISBN7-5608-1216-3/TB·23

## 序

粉体工程学亦称颗粒学,是一门新兴的综合性技术科学。由于其跨学科、跨技术的交叉性和基础理论的概括性,因此,它既与若干基础科学相毗邻,又与工程应用广泛相联系。正因为颗粒同人类有着极其广泛的联系并具有重要的作用,所以国外从本世纪30年代开始便逐渐开展“颗粒学”的研究。最先从事这一研究的是美国学者J.M. Dallavalle, 1943年,他出版了世界上第一部颗粒学专著《Micromeritics》。其后,德国学者I. R. Meldau编写了《Handbuch der Staubtechnik》(1960年), Dallavalle的学生Orr又出版了《Particulate Technology》一书(1966年),日本学者久保、水渡、中川、早川合编了《粉体——理論と応用》(1979年),三輪茂雄编著了《粉体工学通論》(1981年)等等。无疑,这些论著对于粉体工程的发展起到了很大的推动作用。

80年代以来,随着世界范围内新技术、高新技术的突飞猛进,新型材料层出不穷。例如,现在人们创造的超硬、超强、超导、超纯、超塑等材料,使科学发展到了利用极端参数的阶段。要使材料达到极端状态,则往往要改变材料原有属性,而改变属性的方法之一就是使材料粒度细化至微细或超微细状态后再行组合。因此,近年来,在颗粒学中超细颗粒成为最引人入胜的研究课题。显然,材料科学与工程领域高新技术的开发大大推动了颗粒学的发展,丰富了颗粒学的内容。有关颗粒学中许多课题的研究日益表明,它已成为新兴产业和高新技术发展的关键。

笔者深入学习和蒐集了近年来粉体工程最新发展的新理论和新技术,并以1987年拙编《粉体工程概论》为基础,加以修改和充实,从而写成了这本拙著。

本书对粉体工程的基本问题、基础理论有较系统和原理性的阐述,

并力求内容有新意和突出超细颗粒为重点。例如,在“颗粒形状的数学分析”中,除阐述Fourier级数和分数维分析(Fractal Analysis)之外,还介绍了用分数谱(调和)函数(Fractal Harmonics)定量表征颗粒形状的最新研究成果。在“粉碎”中着重论述超微粉碎研究中的一些新理论:如引用裂纹大小分布函数表述材料强度;引用粉碎机械力化学概念表述助磨剂助磨作用机理以及新生表面活性增大等现象;引用粉碎速度论的概念把粉碎过程用数学模型来表述等。在“分级与分离”中着重阐述评价分离效果的主要参数的新概念与实现超微分级的新原理和新技术。此外,还就日益引起人们关注的粉尘爆炸问题,专门列了一章阐述粉尘爆炸机理及其防范措施。本书除可作高等学校材料科学与工程、硅酸盐工程、化工、选矿、冶金、建筑材料、建材机械等专业本科生和研究生教材外,还可供从事粉体工程的科研、工程技术、管理技术人员作参考。

本书编写过程中,承蒙中国纺织大学童祐嵩教授对颗粒粒度和形状的特征、颗粒群聚集特性两章的初稿作了审阅,同时还得到了祝文美副教授,梁伟萍、汤立杰工程师的大力支持和帮助,在此谨表衷心感谢。另外,笔者还向本书中所引用文献的作者致以深切的谢意。

由于粉体工程涉及面很广,笔者才疏学浅,书中疏漏和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

陆厚根

1992.10

# 目 录

## 1. 颗粒粒度和形状的特征

1.1 粒度	1
1.1.1 粒度的定义	1
1.1.2 颗粒群平均粒径	5
1.2 粒度分布	9
1.2.1 正态分布	10
1.2.2 对数正态分布	11
1.2.3 罗辛-拉姆勒 (Rosin-Rammler) 分布	17
1.3 颗粒形状	21
1.3.1 形状因子	22
1.3.2 形状的数学分析	26
1.4 粒度测量方法及其选择	34
1.4.1 粒度测量方法简介	34
1.4.2 测量方法的选择	41

## 2. 颗粒群聚集特性

2.1 颗粒层填充结构	43
2.1.1 均一球形颗粒群的规则填充	46
2.1.2 均一球形颗粒群的实际填充结构	48
2.1.3 非均一球形颗粒的填充结构	51
2.1.4 壁效应和局部填充结构	52
2.1.5 不同粒径球形颗粒的规则填充——最密填充理论	54
2.2 粉体中颗粒间的附着力	59
2.2.1 分子间引力导致的颗粒间引力	59

2.2.2	颗粒所带异号静电荷引起的引力	60
2.2.3	附着水分的毛细管力	61
2.2.4	磁性力	61
2.2.5	颗粒表面不平滑引起的机械交合力	61
2.3	湿颗粒群特性	62
2.3.1	填充层内的静态液相	62
2.3.2	液体架桥	63
2.3.3	颗粒间持液量	66
2.3.4	抽吸势	69
2.3.5	液体在粉体层毛细管中的上升高度	72

### 3. 粉体层静力学

3.1	粉体力学的基本概念	78
3.1.1	预备知识	78
3.1.2	莫尔圆概念	79
3.1.3	极限应力状态	83
3.1.4	粉体的被动和主动侧压力系数	87
3.2	粉体压力计算	89
3.2.1	詹森(Janssen)公式	89
3.2.2	料斗的压力分布	91
3.3	粉体贮仓容量计算	93

### 4. 颗粒群的流动

4.1	重力流动	96
4.1.1	流动型式	96
4.1.2	滑动线	97
4.1.3	质量流与漏斗流	98
4.1.4	动态压力	99
4.1.5	孔口流出	101
4.1.6	偏析现象	105

4.2	质量流料仓设计原理	108
4.2.1	开放屈服强度和粉体的流动函数	108
4.2.2	有效屈服轨迹和有效内摩擦角	110
4.2.3	料斗流动因数	110
4.2.4	料仓卸料口径的确定	111
4.2.5	粉体拱的类型及防拱措施	114
4.3	压缩流动	115
4.3.1	压力分布	115
4.3.2	压缩率	117

## 5. 颗粒流体力学

5.1	沉降现象	119
5.1.1	颗粒在流体中的运动方程	119
5.1.2	阻力系数和雷诺数	122
5.1.3	沉降速度的一般解法	123
5.1.4	过渡区沉降速度的一般解法	125
5.1.5	沉降速度的修正式	127
5.1.6	干扰沉降	133
5.2	透过流动现象	135
5.2.1	层流状态	135
5.2.2	湍流状态	142
5.3	悬浮现象	153
5.3.1	流化床	153
5.3.2	流体输送	155

## 6. 粉碎

6.1	粉碎概论	160
6.1.1	材料破坏、破碎、粉碎的概念	160
6.1.2	格里菲思(Griffith) 强度理论	161
6.1.3	粉碎模型	162



6.1.4	被粉碎材料的基本物性	166
6.1.5	粉碎需用功	174
6.1.6	碎料粒子碰撞速度	177
6.1.7	粉碎介质碰撞速度	178
6.1.8	混合粉碎	180
6.1.9	粉碎效率	183
6.1.10	助磨剂助磨作用机理	186
6.1.11	低温粉碎	190
6.2	粉碎机理的解析方法	191
6.2.1	功耗定律	191
6.2.2	粉碎能量平衡论	193
6.2.3	粉碎速度论	195
6.2.4	相似定律解析粉碎机理	200
6.2.5	连续粉碎机理解析	202
6.3	粉碎机械力化学	214
6.3.1	概述	214
6.3.2	粉碎平衡	215
6.3.3	晶格不规则	216
6.3.4	结晶结构的转变	218
6.3.5	单程粉碎和连续粉碎	219
6.3.6	粉碎表面的产生和内部能量的增大	224
6.3.7	新生表面的活性	225
6.3.8	粉碎机械力化学在工业中的应用	227

## 7. 分级与分离

7.1	分离结果的评价参数	229
7.1.1	分离效率	229
7.1.2	部分分离效率	232
7.1.3	分离界限与分离精度	235
7.2	分级	240

7.2.1 筛分	240
7.2.2 干式分级	247
7.2.3 湿式分级	252
7.3 分离	255
7.3.1 固气分离	255
7.3.2 按颗粒物性分离	263
7.3.3 固液分离	269

## 8. 混合与造粒

8.1 混合	284
8.1.1 混合目的	284
8.1.2 混合机理	285
8.2 造粒	288
8.2.1 造粒方法	289
8.2.2 颗粒群的凝聚	290

## 9. 粉尘爆炸

9.1 粉尘的爆炸性	295
9.1.1 燃烧和爆炸	295
9.1.2 粉尘爆炸机理	295
9.1.3 相对可燃性	297
9.1.4 粉尘爆炸特性	297
9.2 防止粉尘爆炸的方法	301
9.2.1 防止粉尘爆炸的方法	301
9.2.2 I.E.P. 系统防爆装置	304
附录	308

# 1. 颗粒粒度和形状的特征

## 1.1 粒 度

颗粒的粒度是粉体诸物性中最重要的特性值。为了正确地表达这一特性值,需要规定其测定方法和表示方法。

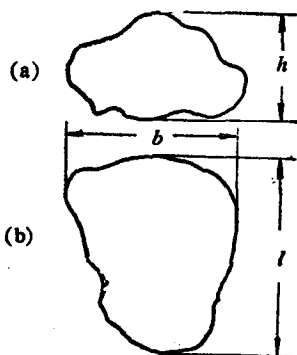
### 1.1.1 粒度的定义

这里先讨论单个颗粒的粒度。粒度是颗粒在空间范围所占大小的线性尺度。粒度越小,颗粒的微细程度越大。

表面光滑的球形颗粒只有一个线性尺寸,即其直径。粒度就是直径。非球形颗粒或虽然在大体上呈球形,但表面不光滑的颗粒,则可按某种规定的线性尺度表示其粒度。其中有一些规定是以某种意义的相当球或相当圆的直径作为粒度的。有些规定的粒度并不是相当球或圆的直径,也可统称为颗粒的直径。

设一个颗粒以最大稳定度(重心最低)置于一个水平面上,此时颗粒的水平投影像如图1.1(b)所示。在显微镜载物片上的颗粒往往是这种情况。如另一水平面与此水平面恰好夹住此颗粒,则定义这两水平面之间的距离为颗粒的高度 $h$ ,见图1.1(a) 颗粒一般并不测量其高度,但有时则需测量,例如对片状颗粒。

按 Heywood 规定,颗粒的宽度 $b$ 定义为夹住颗粒投影像的相距最近两平



(a)——垂直平面上的投影像;  
(b)——水平面上投影像.

图 1.1 颗粒投影图像

行线间的距离。与宽度垂直、能夹住此投影像的两平行线间的距离定义为颗粒长度  $l$ 。颗粒投影像的周长和面积分别用  $L$  和  $a$  表示。颗粒的表面积和体积分别用  $s$  和  $v$  表示。可以根据这些几何量  $b, l, h, L, a, s, v$  来定义颗粒的种种粒度或相当直径。

三轴径 以颗粒的长度  $l$ 、宽度  $b$ 、高度  $h$  定义的粒度平均值称为三轴平均径，其计算式及物理意义列于表 1.1。这种取定方法，对于必须强调长形颗粒存在的情况较适用。

三轴径的平均值计算公式

表 1.1

序号	计算式	名称	物理意义
1	$\frac{l+b}{2}$	二轴平均径	平面图形的算术平均
2	$\frac{l+b+h}{3}$	三轴平均径	算术平均
3	$\frac{3}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}}$	三轴调和平均径*	同外接长方体有相同比表面积的球的直径，或立方体的一边长
4	$\sqrt{lb}$	二轴几何平均径	平面图形的几何平均
5	$\sqrt[3]{lbh}$	三轴几何平均径	同外接长方体有相同体积的立方体的一边长
6	$\sqrt{\frac{2lb+2bh+2lh}{6}}$		同外接长方体有相同表面积的立方体一边长

\*注：长方体的比表面积  $S_m = 2(lb+lh+bh)/(0.785lbh) = 6/(\pi d)$ ，解之可求  $d$ 。

球当量径 无论从几何学还是物理学的角度来看，球是最容易处理的。因此，往往以球为基础，把颗粒看作相当的球。与颗粒同体积的球的直径称为等体积球当量径

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6v}{\pi}} \quad (1.1)$$

与颗粒等表面积的球的直径称为等表面积球当量径

$$d_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (1.2)$$

与颗粒具有相同的表面积对体积之比，即具有相同的体积比表面积  $S_v$  的球的直径称为比表面积球当量径

$$d_{sv} = \frac{6v}{S} = \frac{6}{S_v} = \frac{d_v^3}{d_s^2} \quad (1.3)$$

圆当量径 以与颗粒投影轮廓性质相同的圆的直径表示粒度。与颗粒投影面积相等的圆的直径称为投影圆当量径(亦称 Heywood径)(见图1.2(d))

$$d_a = \sqrt{\frac{4a}{\pi}} \quad (1.4)$$

与颗粒投影图形周长相等的圆的直径称为等周长圆当量径

$$d_L = \frac{L}{\pi} \quad (1.5)$$

统计平均径 是平行于一定方向(用显微镜)测得的线度，故又称定向径。

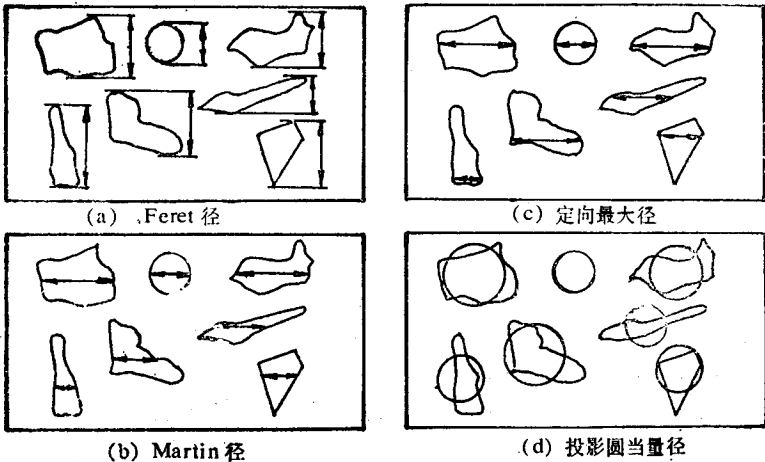


图 1.2 投影粒径的种类

(1) 定方向径 (Feret 径)  $d_F$  沿一定方向测颗粒投影像的两平行线间的距离。对于一个颗粒,随方向而异,可取其按所有方向的平均值。但对于取向随机的颗粒群,可沿一定方向,见图 1.2(a)。

(2) 定方向等分径(Martin 径)  $d_M$  沿一定方向将颗粒投影像面积等分的线段长度,见图 1.2(b)。

(3) 定向最大径 沿一定方向测定颗粒投影像,所得最大宽度的线段长度,见图 1.2(c)。

一般有这样的关系: Feret 径 > 投影圆当量径 > Martin 径, 如表 1.2 所示。若长短径比小,用 Martin 径代替投影圆当量径偏差不会太大,但细长颗粒的偏差则较大。

椭圆形颗粒 Martin 径与 Feret 径的比较(Heywood 资料) 表 1.2

长短径比	与投影圆当量径比的偏差%	
	Martin 径	Feret 径
1	0	0
1.5	-1.01	+3.10
2	-2.83	+9.83
3	-7.04	+22.8
4	-10.8	+36.5
10	-25.7	+104.5

以上各种粒度是根据颗粒的几何量而规定的。其中一部分也正是用显微镜或图像分析仪直接测量的。

作为粒度的表示,还有根据上述几何量规定以外的测定方法原理所相当的球的直径。例如阻力直径  $d_a$ , 它是与颗粒在同样介质中以相同速度运动时呈现相同阻力的球的直径;自由沉降直径  $d_f$ , 是与颗粒有

相同密度且在同样介质中有相同自由沉降速度的球的直径; Stokes 直径  $d_{st}$  是指层流区的自由沉降直径。可以证明

$$d_{st}^2 = \frac{d_v^3}{d_a} \quad (\text{当 } Re \text{ 很小时, } d_a \approx d_s) \quad (1.6)$$

### 1.1.2 颗粒群平均粒径

颗粒群可以认为由许多个粒度间隔不大的粒级构成。设由  $d_i$  至  $d_j$  的粒级内的颗粒个数为  $n$ , 取  $d_i$  至  $d_j$  的平均值  $d$  代表该  $n$  个颗粒的粒度,  $f_n$  为该粒级内粒度为  $d$  的颗粒个数占体系颗粒个数的分数,  $f_M$  为粒度  $d$  的颗粒质量(体积)分数。就  $d$  的测量而言, 它可以是  $d_n$ 、 $d_F$  或  $d_M$  等。当然, 在按一定方向测量  $d_F$  或  $d_M$  时, 测量颗粒的个数必须足够多。

以个数为基准的平均径可归纳为如下的表达式为

$$D = \left( \frac{\sum n d^\alpha}{\sum n d^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha-\beta}} = \left( \frac{\sum f_n d^\alpha}{\sum f_n d^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha-\beta}} \quad (1.7)$$

以质量(体积)为基准的平均径表达式为

$$D = \left( \frac{\sum f_w d^{\alpha-3}}{\sum f_w d^{\beta-3}} \right)^{\frac{1}{\alpha-\beta}} \quad (1.8)$$

在实际应用中, 有两个系列的平均径。现用个数基准式(1.7)来说明。

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad \alpha=1, \quad \beta=0, \quad D_{n,L} &= \frac{\sum nd}{\sum n} \\ \alpha=2, \quad \beta=0, \quad D_{n,S} &= \left( \frac{\sum nd^2}{\sum n} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \alpha=3, \quad \beta=0, \quad D_{n,V} &= \left( \frac{\sum nd^3}{\sum n} \right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

式中  $D_{n,L}$ ——个数长度平均径, 简称平均径;  
 $D_{n,S}$ ——个数表面积平均径, 简称表面积平均径;  
 $D_{n,V}$ ——个数体积平均径, 简称体积平均径。

以上三个平均径的共同特征是以颗粒群的颗粒个数去均分粒度之和、总表面积或总体积所得的平均径。其意义是指一个假想颗粒群的粒度，例如体积平均径  $D_{n_v}$  是指与该颗粒群的颗粒形状相同、总体积（质量）相同、颗粒数相同的粒度均匀的一个假想颗粒群的粒度。可以证明， $D_{n_v} \geq D_{n_s} \geq D_{n_L}$ ，当所有颗粒粒度相等时，等式成立。

$$\left. \begin{aligned}
 (2) \quad \alpha=1, \beta=0, D_{n_L} &= D_{1,0} = \frac{\sum nd}{\sum n} \\
 \alpha=2, \beta=1, D_{L_s} &= D_{2,1} = \frac{\sum nd^2}{\sum nd} \\
 \alpha=3, \beta=2, D_{s_v} &= D_{3,2} = \frac{\sum nd^3}{\sum nd^2} \\
 \alpha=4, \beta=3, D_{v_M} &= D_{4,3} = \frac{\sum nd^4}{\sum nd^3}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

式中  $D_{n_L}$ ——个数长度平均径；  
 $D_{L_s}$ ——长度表面积平均径；  
 $D_{s_v}$ ——表面积体积平均径，又称 Sauter 平均径；  
 $D_{v_M}$ ——体积四次矩平均径。

以上四个平均径的共同特征是  $\alpha - \beta = 1$ 。它们分别是以各粒级中的颗粒个数、粒度之和、表面积和体积为权，对  $d$  进行平均得到的，因此分别是个数分布、长度分布、表面积分布和体积（质量）分布的平均径。例如

$$D_{v_M} = D_{4,3} = \frac{\sum nd^4}{\sum nd^3} = \frac{\sum f_n d^4}{\sum f_n d^3} = \frac{\sum f_w d}{\sum f_w} = \sum f_w d$$

它是以体积（质量）为权的平均径，亦称体积（质量）平均径。必须指出， $D_{v_M}$  和体积平均径  $D_{n_v}$  意义不同，不可混淆。

式 (1.10) 中各平均径的意义亦指一假想颗粒群的粒度，例如  $D_{s_v}$  是指与该颗粒群的粒形相同、总体积相同、总表面积相同，且粒度均匀的一个假想颗粒群的粒度，亦即指与该颗粒群的粒形相同，比表面相同的一个颗粒的粒度。



可以证明,  $D_{vM} \geq D_{v0} \geq D_{L1} \geq D_{nL}$ , 当所有颗粒粒度相等, 等号成立。

以个数为准和质量为准的平均径计算公式可归纳于表 1.3。

平均径计算公式

表 1.3

序号	平均径名称	记号	个数基准	质量基准
加 权 平 均 径	1 个数长度平均径	$D_{nL}$	$\frac{\Sigma(nd)}{\Sigma n}$	$\frac{\Sigma(w/d^2)}{\Sigma(w/d^3)}$
	2 长度表面积平均径	$D_{L0}$	$\frac{\Sigma(nd^2)}{\Sigma(nd)}$	$\frac{\Sigma(w/d)}{\Sigma(w/d^2)}$
	3 表面积体积平均径	$D_{s0}$	$\frac{\Sigma(nd^3)}{\Sigma(nd^2)}$	$\frac{\Sigma w}{\Sigma(w/d)}$
	4 体积四次矩平均径	$D_{vM}$	$\frac{\Sigma(nd^4)}{\Sigma(nd^3)}$	$\frac{\Sigma(wd)}{\Sigma w}$
5	个数表面积平均径	$D_{ns}$	$\sqrt{\frac{\Sigma(nd^2)}{\Sigma n}}$	$\sqrt{\frac{\Sigma(w/d)}{\Sigma(w/d^3)}}$
6	个数体积平均径	$D_{nv}$	$\sqrt[3]{\frac{\Sigma(nd^3)}{\Sigma n}}$	$\sqrt[3]{\frac{\Sigma w}{\Sigma(w/d^3)}}$
7	长度体积平均径	$D_{nv}$	$\sqrt{\frac{\Sigma(nd^3)}{\Sigma(nd^2)}}$	$\sqrt{\frac{\Sigma w}{\Sigma(w/d^2)}}$
8		$D_w$	$\sqrt[4]{\frac{\Sigma(nd^4)}{\Sigma n}}$	$\sqrt[4]{\frac{\Sigma(wd)}{\Sigma(w/d^3)}}$
9	调和平均径	$D_h$	$\frac{\Sigma n}{\Sigma(n/d)}$	$\frac{\Sigma(w/d^3)}{\Sigma(w/d^4)}$

注:  $D_{nL} \cdot D_{L0} = D_{s0}$ ,  $D_{nL} \cdot D_{L0} \cdot D_{s0} = D_{v0}^3$ ,  $D_{s0} = D_{v0}^3 / D_{L0}^2$ ,  $D_{vM} = D_w^4 / D_{nv}$

$D_{L0} \cdot D_{s0} = D_{L0}^2$ ,  $D_{vM} > D_{s0} > [D_{L0} \geq D_{nv}] > D_{nv} > D_{nL}$ .

此外, 安德列也夫还提出用定义函数来求平均粒径。设有粒径为  $d_1, d_2, d_3, \dots$  组成的颗粒群, 该颗粒群有以粒径函数表示的某物理特性  $f(d)$ , 则粒径函数具有加和性质, 即

$$f(d) = f(d_1) + f(d_2) + f(d_3) + \dots \quad (1.11)$$