

激光粒度仪用标准颗粒样板设计原理初探

王少清 任中京

(山东建材学院, 济南 250022)

摘要:分析了现有标准颗粒粉末的不足,并说明了标准颗粒样板的优点和制作必要性;按照设计标准颗粒样板的程序,分别讨论了颗粒尺寸分布函数的选择,重量百分比分布函数与个数百分比分布函数间的转换,颗粒总数的确定,颗粒群的分级和每一级代表粒径的确定及颗粒在标准板上位置的随机分布等问题。最后给出了一个计算机模拟设计实例。

关键词:颗粒大小测定;激光粒度仪;标准颗粒样板

1 引言

颗粒的尺寸分布(或称颗粒级配)是粉末产品的关键性指标之一。颗粒尺寸分布的测量具有重要的意义。在各种颗粒尺寸分布测量仪器中,以激光散射式粒度仪最具特色,由于其对被测颗粒无接触、无污染,测量速度快,适用范围广且可用于在线测量而倍受使用者的青睐。但目前在激光粒度仪的研制、生产和使用过程中,普遍存在着一个问题,即如何对仪器的测量结果进行评价和对仪器进行定期检查与校准。在此最关键的是要具有高精度的标准颗粒。目前主要是使用各种标准颗粒粉末对粒度仪进行检验与校准。但存在着下列几方面的问题,首先是现有的标准颗粒(如聚苯乙烯球,玻璃微珠等)本身的真实尺寸与其标称值就有较大的误差;第二,形状也不能保证是标准的球形;第三,样品的准备较麻烦;第四,基本上是一次性使用,成本较高。克服以上种种不足的一个好方法是使用标准颗粒样板。标准颗粒样板就是在块镀有不透明金属膜(通常用铬)的透明基板上用光刻或电子束曝光等方法按着一定的尺寸分布制作出大量的小圆屏。当用激光照射标准颗粒样板时,其上的小圆屏就相当于一个个的球形小颗粒,发出散射光。其光场分布与激光粒度仪原理要求的完全相符。接收标准颗粒样板产生的散射光场并对其进行逆运算,求解标准颗粒样板的尺寸分布函数,与标称值相对比,即可得知被检测的粒度仪的测量精确度。这种标准颗粒样板可永久使用,粒径标称值与实际值的误差很小,使用非常方便。目前,少数进口的激光粒度仪配有这种样板。用户可用它对仪器做经常性的检定。国内尚无此类产品问世,且国内外均未见论及此种标准颗粒样板制作原理方法的文献。因而本文拟就其中关的问题加以探讨。

2 颗粒尺寸分布模型及其选择

目前通用的颗粒尺寸分布模型可大致分为两类,可称为“函数分布型”和“随机分布型”。所谓“函数分布型”就是颗粒尺寸分布可用一解析函数表示;常用的函数有 Rosin-Romiler 分布函数(简称 R-R 分布),对数分布和对数正态分布等^[1]。在激光型颗粒度仪发展的早期阶段,基本上是采用函数型颗粒尺寸分布模型。这种只具有基于一种或几种特定分布函数的反演软件的激光颗粒度仪实际测量时往往会产生较大的误差,因为被测颗粒群可能不符合其中任一种分布。这就需要用所谓“随机分布型”尺寸分布函数——即颗粒的尺寸分布不能用一个解析函数来描述——来描述颗粒群的尺寸分布。随着反演技术的提高,近来的激光颗粒度仪在对颗粒群的散射光场进行反演时已不再受颗粒尺寸分布函数的限制,采用了无约束自由拟合反演法。这种算法理论上说可以反演任何尺寸分布形式的颗粒群的散射场,适用性广泛。同时还配有函数拟合型反演程序,以适应不同的需要。根据以上情况,在制做标准颗粒样板时,可考虑制做两种:一种满足“函数型分布”,另一种则满足“随机型分布”。这样既可以满足不同的需要,又能全面地检验激光颗粒度仪的软件和硬件功能。

不论是哪种类型的分布函数,均可用 $F(D)$ 表示。故下面的讨论中不再加以区分。

3 质量百分比分布函数与个数百分比分布函数之间的转换

实际生和粉体工程书籍中给出的颗粒尺寸分布函数多为质量百分比按颗粒尺寸分布的函数。设在颗粒尺寸 D 到 $D+dD$ 之间的颗粒质量为 dM ,颗粒群总质量为 M ,则质量百分比分布函数定义为

$$F_M(D) = dM/(MdD) \quad (1)$$

其物理意义为在粒径 D 附近单位尺寸间隔内的颗粒质量占颗粒群总质量的百分比。对上式积分则得到累积质量百分比分布函数 $R_M(D)$:

$$R_M(D) = \int_0^D F_M(D)dD \quad (2)$$

其物理意义的为粒径小于 D 的颗粒的质量占颗粒群总质量的百分比。显然二者知其一即可。

若在粒径区间 $D-D+dD$ 内的颗粒的个数为 dN ,颗粒群总个数为 N ,则定义颗粒具数百分比尺寸分布函数为

$$F_N(D) = \frac{dN}{NdD} \quad (3)$$

其物理意义为分布于粒径 D 附近单位尺寸间隔内的颗粒数占总颗粒数的百分比。

设计标准颗粒样板时,必须使用个数百分比尺分布函数。所以下面推导从 $F_M(D)$ 向 $F_N(D)$ 的转换关系式。

设颗粒是直径为 D ,质量密度为 ρ 的球。则有

$$dM = \frac{1}{6}\pi D^3 \rho dN$$

将(2)式代入即可得到

$$dN = \frac{6M}{\rho\pi} D^{-3} F_M(D) dD \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式又得到

$$F_N(D) = \frac{6}{\pi\rho} \frac{M}{N} D^{-3} F_M(D) \quad (5)$$

再将(4)式对全部颗粒尺寸区间取积分得

$$N = \int_0^{\infty} dN = \frac{6M}{\pi\rho} \int_0^{\infty} D^{-3} F_M(D) dD$$

代入(5)式即得到

$$F_N(D) = D^{-3} F_M(D) / \left[\int_0^{\infty} D^{-3} F_M(D) dD \right] \quad (6)$$

由此即可实现从质量百分比分布函数 $F_M(D)$ 向个数百分比分布函数的转换。完全对称地可得到逆向转换的公式为

$$F_M(D) = D^3 F_N(D) / \left[\int_0^{\infty} D^3 F_N(D) dD \right] \quad (7)$$

4 标准颗粒样板上颗粒总数的确定

板上颗粒总数的确定要遵循下面两条原则：一是颗粒个数要足够多，以保证标准颗粒样板具有充分的代表性；二是颗粒之间的距离要满足非相关散射的要求，即相邻颗粒间的距离要大于颗粒半径的三倍^[2]。

由于颗粒群中含有多种半径不同的颗粒，故可用其平均直径 \bar{D} 来估算颗粒总数。平均直径 \bar{D} 用 $F_N(D)$ 表示为

$$\bar{D} = \int_{D_{min}}^{D_{max}} D F_N(D) dD \quad (8)$$

其中 D_{min} 和 D_{max} 为颗粒群的最小和最大直径。设要制做的标准板有效面积为 S 。图 1 所示的颗粒排列方式是满足原则二的最密排列。可见每个颗粒所占的面积为一边长为 $1.5\bar{D}$ 的等边三角形的面积：

$$S_0 = \frac{9}{16} \sqrt{3} \bar{D}^2$$

那么，样板上所能排列的最大颗粒数为

$$N_{max} = \frac{S}{S_0} = S / \left(\frac{9}{16} \sqrt{3} \bar{D}^2 \right)$$

但由于非相关散射不允许散射体现则排列，且 \bar{D} 仅为平均直径，所以实际上能排列的颗粒数 N 要远小于 N_{max} ，为

$$N = k N_{max} = k S / \left(\frac{9}{16} \sqrt{3} \bar{D}^2 \right) \quad (9)$$

其中 k 为小于 1 的系数。

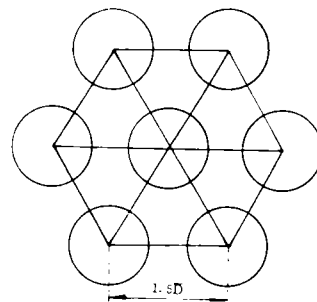


图 1 颗粒排列方式

5 颗粒群的分级和代表粒径的确定

对于分布函数为连续型函数的颗粒群,存在着需将颗粒群按粒径分成若干组的问题。由于每一组都包含一定的粒径范围,故每组还要确定一个代表粒径和颗粒个数。设将颗粒群分成 n 组,其中第 i 组颗粒的直径区间为 (D_i, D_{i+1}) ,当 $i=1$ 时, $D_1 = D_{min}$, $i=n$ 时, $D_{n+1} = D_{max}$;代表粒径用 \bar{D}_i 表示,颗粒数用 N_i 表示。由于被颗粒散射的光能量与颗粒截面积成正比,故可用每组颗粒的面积平均直径作为该组颗粒的代表粒径,即 \bar{D}_i 由下式决定

$$\bar{D}_i^2 \int_{D_i}^{D_{i+1}} F_N(D) dD = \int_{D_i}^{D_{i+1}} D^2 F_N(D) dD \quad (10)$$

而 N_i 则由

$$N_i = N \int_{D_i}^{D_{i+1}} F_N(D) dD \quad (11)$$

来决定。

分组区间 (D_i, D_{i+1}) 通常采用等比级数划分,即

$$D_{i+1} = l D_i \quad (12)$$

一般取 $l > 1$, 如果 $l = \sqrt{2}$ 。这样划分的区间从小颗粒到大颗粒逐渐加大。这与小颗粒区颗粒数目比大颗粒区多得多有关。

5 标准板上颗粒的位置分布

按激光散射式粒度仪测量原理的要求,颗粒在板上的位置必须是随机的。这可以通过计算机来控制。程序设计的基本原则是相邻颗粒间的距离不小于较大颗粒的半径的三倍,且位置坐标是随机分布的。值得一提的是,在安排颗粒位置时,应先从大颗粒开始。这样程序运行较节省时间,且不易出现死循环。

上面所讨论的五个问题是设计一块标准颗粒样板所必须解决的。下面以 $R-R$ 分布函数为例,设计一块面积为圆形,直径 8mm 的标准颗粒样板。 $R-R$ 分布的质量百分比按颗粒直径分布的函数为^[1]。

$$F_M(D) = 100mD^{m-1} \frac{1}{D_0^m} \exp[-(D/D_0)^m] \quad (13)$$

其中 m 和 D_0 为分布参数。今取 $D_{min} = 1\mu\text{m}$, $D_{max} = 256\mu\text{m}$, $m = 2$, $D_0 = 100\mu\text{m}$ 。将直径区间 $1 \sim 256\mu\text{m}$ 按公比为 $\sqrt{2}$ 的等比级数分成 16 级。按实际制做十万个颗粒计算,经过上述五个步骤后,求得各组代表粒径和各组颗粒数见表 1。实际制做时即以各 D_i 为直径,在板上制做 N_i 个圆形颗粒,即可得到满足设计要求的标准颗粒样板。

表 1 模拟设计结果

级 数 i	$D_i - D_{i-1}$	D_i (μm)	N_i
1	1—1.4	1.2	30208
2	1.4—2.0	1.7	21204
3	2.0—2.8	2.4	14907
4	2.8—4.0	3.4	10561
5	4.0—5.6	4.8	7425
6	5.6—8.0	6.7	5239
7	8.0—11.3	9.5	3683
8	11.3—16.0	13.5	2578
9	16.0—22.6	19.0	1789
10	22.6—32.0	26.9	1220
11	32.0—45.3	37.9	802
12	45.3—64.0	53.5	491
13	63.0—90.5	75.2	261
14	90.5—128	105	105
15	128—181	145	25
16	181—256	199	2

图 2 为颗粒在板上位置随机分布的示意图,由计算机按所编的程序绘制。实际制做时可将计算机求得的每一个颗粒在标准板上的位置坐标及其直径输入电子束曝光机的控制主机,控制电子束在镀铬母板上进行曝光。曝光后的母板经适当的显影和定影处理后,就成为所需的标准颗粒样板。用一块母板可翻制多块子板,从而使制做成本大大下降。

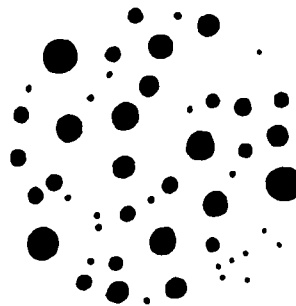


图 2 颗粒在板上位置随机分布示意图

参 考 文 献

[1](英)T. 艾伦,颗粒大小测定. 北京:中国建筑工业出版社,1984

[2]H. C. van de Hulst,Light Scattering by Small Particles. Dover Publication,Inc. ,New York,1981

First Study of Design Principle of Standard Particle-Plate Used For Laser Particle Sizer

Wang Shaoqing, Ren Zhongjing

(*Shandong Institute of Building Materials, Jinan 250022*)

Abstract

After having analyzed the deficiencies of the existing standard Particle powder, the advantages of standard particle-plate and the necessity of producing it were described. Then, according to the programe of designing standard particle-plate, what were descussed, in proper order, are the selecting of particle size distribution functions, the transform between mass percentage distribution functions and number percentage distribution functions, the determination of total particle number on the plate, the classification of particles, the determination of the representative diameter of each class particles, and the random distribution of the particles, positions on the plate. lastly, a simulated design example, which was done with a computer, was given.

Key words: Particle size measurment, Laser particle sizer, Standard particle-plate