

文章编号: 1001-3806(2002)04-0303-03

激光粒度测量中大角散射产生误差分析及修正

王少清 董学仁

(济南大学, 济南, 250022)

摘要: 大多数散射式激光粒度仪采用样品池后置式的光路结构, 依据傅里叶光学原理确定同心圆环光电探测器上每一圆环接收的散射光角范围, 分析了在大角散射的情况下, 这种确定散射光角范围的方法产生误差的原因、误差的大小及对粒度分析的影响。给出了正确计算散射光角范围的公式。

关键词: 激光粒度分析; 光散射; 大角散射

中图分类号: TN206 **文献标识码:** A

Analysis and correction of the errors resulted from large-angle scattering in laser particle size measurement

Wang Shaoqing, Dong Xueren

(Jinan University, Jinan, 250022)

Abstract: Most laser particle sizer based on light scattering adopt such a structure in which the sample cell is put behind the Fourier lens. The angle range of scattered light received by a ring of the concentric-ring-shipped photoelectric detector is determined according to the Fourier optics. In accordance with such determination, the reason of resulting error under large-angle scattering has been analyzed, the magnitude of the errors has been calculated, and the effect on particle sizing has been discussed. The formula, which is proper to determining the angle range of scattered light received by every detecting ring, have been derived.

Key words: laser particle sizing; light scattering; large-angle scattering

引言

粉体的粒度分布是其重要的指标之一。在众多的粉体粒度测试方法中, 激光散射法粒度分析具有独特的优点。我国自 70 年代开始研制激光粒度仪。起初均采用样品池置于傅里叶透镜之前的光路。目前, 大多数激光粒度仪采用的是样品池置于傅里叶透镜之后的光路^[1~3], 如图 1 所示。这种光路的最大优点是, 通过调节样品池的位置, 可以任意改变粒度测量范围^[4]。此外, 与样品池置于傅里叶透镜之前的光路相比, 还可缩短光路的长度, 减小仪器的体

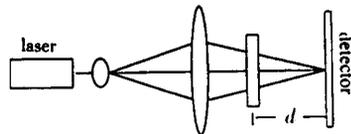


Fig. 1 The optics of sample box behind the Fourier lens

积, 节省一个准直透镜, 降低仪器成本。光电探测器多采用同心环形光靶, 其基本结构如图 2 所示。



Fig. 2 The sketch map of homocentric optical-electric detector

这种光路利用了傅里叶变换的一个基本性质, 即样品池内所有颗粒发出的散射角为 θ 的散射光, 都将落在位于共扼面处的光电探测器的某一相应的圆周上, 该圆周的半径为:

$$r = d \tan \theta \quad (1)$$

这样, 光靶上内外半径分别为 r_1 和 r_2 的圆环接收到的散射光的散射角范围为:

$$\tan \theta_1 = r_1 / d, \tan \theta_2 = r_2 / d \quad (2)$$

如果光靶共有 m 个圆环, 则根据所选择的散射模型(夫朗和费衍射或米氏散射)可确定颗粒群的粒度分级, 进而计算出标准矩阵。

从散射原理可知, 颗粒越小, 散射光的角分布范围越大。为了能用有限尺寸的光靶接收到尽可能小的颗粒的大角散射光, 就要使散射面尽量靠近接收面。以目前国内通用的光靶为例, 其最大接收环的半径约为 15mm, 有的激光粒度仪将 d 值取到

作者简介: 王少清, 男, 1958 年 3 月出生。教授。主要从事物理教学、激光粒度分析理论的研究及仪器的研究开发。

激光技术 jgjs@sina.com

收稿日期: 2001-07-19; 收到修改稿日期: 2001-11-07

50mm 或 40mm。这样按(2)式算得的最大接收角可达约 21°。还有的仪器为了扩大测量的下限,加装了大角度辅助光电探测器,接收角达接近 90°。下面的分析将证明,只有在近轴条件成立的情况下,才可以由(2)式来确定 r_{i1} 和 r_{i2} ;而在样品池后置时大角散射的情况下,由(2)式来确定 r_{i1} 和 r_{i2} 将产生很大的误差。

1 散射式激光粒度分析的基本原理

散射式激光粒度分析的基本依据为^[5]:

$$E_i = \sum_{j=1}^M E_{ij} N_j \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

式中, E_i 为光靶上第 i 个圆环接收到的散射光通量, N_j 为第 j 组颗粒(颗粒半径为 $r_{j1} \sim r_{j2}$) 的颗粒数,即粒度分布, E_{ij} 为标准矩阵元,由下式给出:

$$E_{ij} = 2 \int_{r_{j1}}^{r_{j2}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(r, R, \theta) \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} d\theta \quad (4)$$

式中, d 为样品池到光靶平面的距离, $I(r, R, \theta)$ 表示一个半径为 r 的颗粒在散射角为 θ 的方向上距该颗粒为 R 处的散射光强。其物理意义为: $N_j E_{ij}$ 为光靶第 i 个圆环应接收到的由第 j 组颗粒产生的散射光的光通量。利用实验测得的值 E_1, \dots, E_m , 据(4)式即可求得粒度分布 N_1, \dots, N_m 。

由此可见,标准矩阵元 E_{ij} 的计算是十分重要的。其计算直接与第 i 个圆环接收的散射光的角范围 $\theta_{i1} \sim \theta_{i2}$ 及颗粒分级 $r_{j1} \sim r_{j2}$ 有关,而 r_{j1} 和 r_{j2} 的确定又与 θ_{j1} 和 θ_{j2} 有关。因此,如何确定第 i 个圆环接收的散射光的角范围 $\theta_{i1} \sim \theta_{i2}$ 非常重要。下面的分析将证明,只有在近轴条件成立的情况下,才可以由(2)式来确定 r_{i1} 和 r_{i2} ;而在样品池后置时大角散射的情况下,由(2)式来确定 r_{i1} 和 r_{i2} 将产生很大的误差。

2 大角散射情况下确定 r_{i1} 和 r_{i2} 的公式

如图 3 所示,由于光路的轴对称性,散射平面(即颗粒所在的平面)的坐标用 r_0 表示,接收平面(即光靶所在的平面)的坐标用 ρ 表示。那么,散射面上一个离轴半径为 r_0 的颗粒发出的散射角为 θ 的两条散射光线在接收面上的坐标为:

$$\rho_1 = \frac{(d^2 + r_0^2) \tan \theta}{d + r_0 \tan \theta}, \quad \rho_2 = \frac{(d^2 + r_0^2) \tan \theta}{d - r_0 \tan \theta} \quad (5)$$

根据光路的对称性可知,散射面上所有离轴半径为 r_0 的颗粒发出的散射角为 θ 的散射光将落在接收面上的一个环带内,其内外半径 r_{i1} 和 r_{i2} 由(5)

式确定。反过来,位于接收面处的光靶上的一个内外半径分别为 r_{i1} 和 r_{i2} 的圆环,其接收到的散射光的散射角范围 $\theta_{i1} \sim \theta_{i2}$ 如何确定呢?

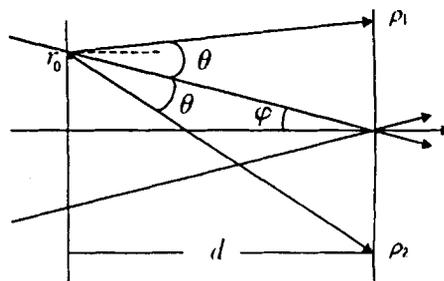


Fig. 3 The position of the scattered light with scattering angle θ on the receiving plane

首先考虑 r_{i1} 和 r_{i2} 随颗粒位置 r_0 的变化。取(5)式中 r_{i1} 和 r_{i2} 对 r_0 的导数有:

$$\frac{d r_{i1}}{d r_0} = \frac{\tan^2 \theta}{d^2} \frac{r_0^2 + 2 r_0 d / \tan \theta - d^2}{(1 + r_0 / d \tan \theta)^2},$$

$$\frac{d r_{i2}}{d r_0} = \frac{\tan^2 \theta}{d^2} \frac{d^2 - r_0^2 + 2 r_0 d / \tan \theta}{(1 - r_0 / d \tan \theta)^2}.$$

设颗粒的最大离轴半径为 r_{0max} (即会聚光在样品池上的照射区半径),由于在一般情况下有 $r_{0max} \ll d$ (如 $d = 40\text{mm}$, $r_{0max} = 3\text{mm}$),在 r_0 的全部取值范围内有 $d / d r_0 < 0$ 和 $d / d r_0 > 0$,所以, r_{i1} 随 r_0 的增大而减小, r_{i2} 随 r_0 的增大而增大。即对于某一确定的散射角,离轴半径较大的颗粒产生的散射光在接收面上的光环带包含离轴半径较小的颗粒在接收面上的光环带在内,离轴半径为 r_{0max} 的颗粒产生的散射光在接收面上的光环带最宽,其它颗粒的散射光均落在由 r_{0max} 确定的内外半径分别为 r_{i1} 和 r_{i2} 的圆环内。

再考虑 r_{i1} 和 r_{i2} 随散射角 θ 的变化。取(5)式中 r_{i1} 和 r_{i2} 对 θ 的导数有:

$$\frac{d r_{i1}}{d \theta} = \frac{(d^2 + r_0^2) d}{\cos^2 \theta (d + r_0 \tan \theta)^2} > 0,$$

$$\frac{d r_{i2}}{d \theta} = \frac{(d^2 + r_0^2) d}{\cos^2 \theta (d - r_0 \tan \theta)^2} > 0.$$

故 r_{i1} 和 r_{i2} 均随 θ 的增大而增大,但 r_{i2} 比 r_{i1} 增大得快。

由(5)式中的第 1 式有:

$$\tan \theta = r_{i1} d / (d^2 + r_0^2 - r_{i1} r_0) \quad (6)$$

由(5)式中的第 2 式有:

$$\tan \theta = r_{i2} d / (d^2 + r_0^2 + r_{i2} r_0) \quad (7)$$

显然,随 r_{i1} 和 r_{i2} 的增大而增大。

综合以上分析,可以得出如下结论:位于接收面处的光靶上的内外半径分别为 r_{i1} 和 r_{i2} 的圆环,其

接收到的来自于散射面上所有颗粒的散射光的散射角范围 i_1 和 i_2 就是将 i_1 代入 (7) 式, i_2 代入 (6) 式, 并用 r_{0max} 代替 (6), (7) 两式中的 r_0 , 即:

$$\begin{aligned} \tan i_1 &= i_1 d / (d^2 + r_{0max}^2 + i_1 r_{0max}) \\ \tan i_2 &= i_2 d / (d^2 + r_{0max}^2 - i_2 r_{0max}) \end{aligned} \quad (8)$$

(8) 式即为在大角散射时确定光靶上圆环接收散射光角范围的精确公式。

在近轴小角散射情况下, 有 $d \gg i_1$ 和 i_2 及 r_{0max} 。从而可近似有: $\tan i_1 = i_1 / d, \tan i_2 = i_2 / d$ 。可见, (2) 式为 (8) 式在近轴小角散射情况下的近似。

3 误差分析示例

以国内较常用的光靶 (由天津大学电子系制造) 为例, 分别用 (2) 式和 (8) 式计算出 i_1 和 i_2 , 结果见表 1。其中取 $d = 40\text{mm}, r_{0max} = 2\text{mm}$; i_1 和 i_0 分别表示用 (2) 式和 (8) 式计算出的第 i 个接收环接收散射光的角宽度; 相对误差 = $(i_0 - i_1) / i_0$ 。散射角的单位为度。表中仅列出对后 16 个圆环的计算结果。

由表 1 可见, 在大角散射的情况下, 两种计算结果相差很大。环半径越大, 即散射角越大, 误差越大。由 (4) 式可知, 标准矩阵元 E_{ij} 的计算直接与第 i 个圆环接收的散射光的角范围 $i_1 \sim i_2$ 有关。当 i 较小时, 可以认为 E_{ij} 的值与 i 近似成正比。那么, 利用两种不同方法确定的 $i_1 \sim i_2$ 算出的 E_{ij} 的值相差可达 27%。另外, E_{ij} 的计算还与颗粒分级 $r_{j1} \sim r_{j2}$ 有关, 而 r_{j1} 和 r_{j2} 又由 j_1 和 j_2 来确定。由此可见, i_1 和 i_2 的误差对散射式激光粒度分析的

影响之大。所以, 在大角散射的情况下, 必须由 (8) 式来确定光靶上每一圆环接收散射光的散射角范围 i_1 和 i_2 。

Table 1 The comparison of i_1 and i_2 from formula (2) and formula (8)

ring's number	results from formula (2)		results from formula (8)			errors %	
	i_1	i_2	i_1	i_1	i_2		
17	3.50	3.91	0.41	3.48	3.91	0.43	4.65
18	3.96	4.43	0.46	3.94	4.43	0.48	4.17
19	4.48	5.01	0.53	4.45	5.02	0.57	7.02
20	5.07	5.67	0.59	5.03	5.69	0.65	9.52
21	5.72	6.42	0.70	5.68	6.44	0.76	7.89
22	6.46	7.24	0.77	6.41	7.27	0.86	10.5
23	7.29	8.16	0.86	7.23	8.20	0.96	10.4
24	8.21	9.18	0.97	8.13	9.23	1.09	11.0
25	9.23	10.31	1.08	9.14	10.38	1.23	12.2
26	10.36	11.56	1.20	10.25	11.65	1.39	13.4
27	11.61	12.93	1.32	11.46	13.04	1.57	15.9
28	12.97	14.42	1.44	12.80	14.56	1.76	18.2
29	14.47	16.04	1.57	14.26	16.22	1.95	19.5
30	16.08	17.79	1.71	13.83	18.02	2.19	21.8
31	17.83	19.67	1.84	17.53	19.95	2.42	24.0
32	19.71	21.68	1.97	19.95	22.03	2.68	26.5

参 考 文 献

[1] 张福根. 中国粉体技术, 2000, 6: 45 ~ 48.
 [2] 王乃宁, 徐贯东. 中国激光, 1998, A25(10): 897 ~ 900.
 [3] 沈建琪, 蔡小舒, 王乃宁. 中国激光, 1999, A26(4): 312 ~ 316.
 [4] 黄婉云. 傅里叶光学教程. 北京: 北京师范大学出版社, 1985.
 [5] 王少清, 任中京, 张勇 *et al.* 应用激光, 1995, 15: 169 ~ 172.

简 讯

第 1 届激光加工技术高级研讨班招生启事

为促进高等学校、科研院所和高科技企业激光加工领域高层次人才培养, 推动我国激光加工技术的快速发展, 国家教育部教人司 (2002) 22 号文件批准并委托华中科技大学激光技术国家重点实验室、激光加工国家工程研究中心共同举办“第 1 届激光加工技术高级研讨班”。

此次高级研讨班采取专家专题讲授、学术交流与演示实践相结合的教学形式进行。届时聘请国内外知名专家、学者讲学, 并组织学员进行必要的演示实践和学术交流与研讨。研讨班的主要内容:

1. 激光束质量对激光加工性能的影响;
2. 铝合金等特殊材料激光焊接、切割机理及工艺研究;

3. 激光等离子体对材料加工质量的影响及控制方法探讨。

研讨班时间安排: 10 月 14 日研讨班学员报到。10 月 15 日至 11 月 3 日专家专题讲授、学术交流及研讨。11 月 4 日至 11 月 7 日演示实践。有关本届高级研讨班的招生简章和具体报名办法可以从激光技术国家重点实验室网站 <http://www.laserlab.hust.edu.cn> 下载。

联系人: 许德胜副教授, 华中科技大学激光技术国家重点实验室 (430074); E-mail: lsklab@hust.edu.cn; 电话兼传真: 027-87543755; <http://www.laserlab.hust.edu.cn>