

应用激光侧向散射测量粒径分布的 理论研究

张志伟 卫敬明 郑 刚 王乃宁
(上海理工大学动力学院 上海 200093)

提要 提出一种新型的颗粒测量方法,基于 Mie 散射理论,从另一独特的视角接收大角度的侧向散射光,并建立新的理论模型,可使测量下限扩展,技术要求有所改善。结合目前已经成熟的半导体激光和 CCD 技术,运用此原理可使颗粒测量仪器向更轻便、灵敏发展。

关键词 Mie 散射,侧向散射,粒径分布,条形阵列光敏二极管

1 引 言

现有的激光测粒仪主要是以前向衍射和角散射方式为主。前向衍射的测量下限受镜头焦距、镜头直径和光靶半径的限制,有的仪器附以偏振方式扩展测量下限。而前、后向的单角或多角散射方式由于测量区很小,难以控制,且散射光极其微弱,需要用光子计数器等器件来接收。随着光电检测技术的发展,以往被忽视、难以测量的大角度散射光也能被检测到。我们研究的利用侧向散射光测量微粒尺寸,是吸取前向衍射和角散射测量之所长,又避其之短的新方法。

2 基本原理

按照 Mie 理论,单一颗粒经光强为 I_0 , 波长为 λ 的单色光照射, 散射角 θ 方向的光强 $I(\theta)$ 为

$$I(\theta) = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} (i_1 + i_2) \quad (1)$$

式中 r 为散射颗粒到观测点的距离, 强度函数 $(i_1 + i_2)$ 是颗粒与水的相对折射率 m 、波长 λ 、散射角 θ 和颗粒直径 d 的函数

$$i_1 + i_2 = f \left[\alpha = \frac{\pi d}{\lambda}, m, \theta \right] \quad (2)$$

不同粒径的颗粒在其他条件相同的情况下, 散射光分布差别较大。图 1 所示为 $0.1 \mu\text{m}$ 及 $1 \mu\text{m}$ 颗粒的分布情况。

侧向散射原理如图 2 (a) 所示, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 的氦氖激光束经针孔滤波、透镜会聚成平行光柱, 再用光圈和狭缝截取一束平行光带, 光带的厚度为 ϕ , 宽度为 b , 且有 $b > \phi$ 。在平行光带中放置一长方体玻璃器皿, 透明的底面与光带平行, 光束穿过的器皿中是含颗粒的水, 这段光

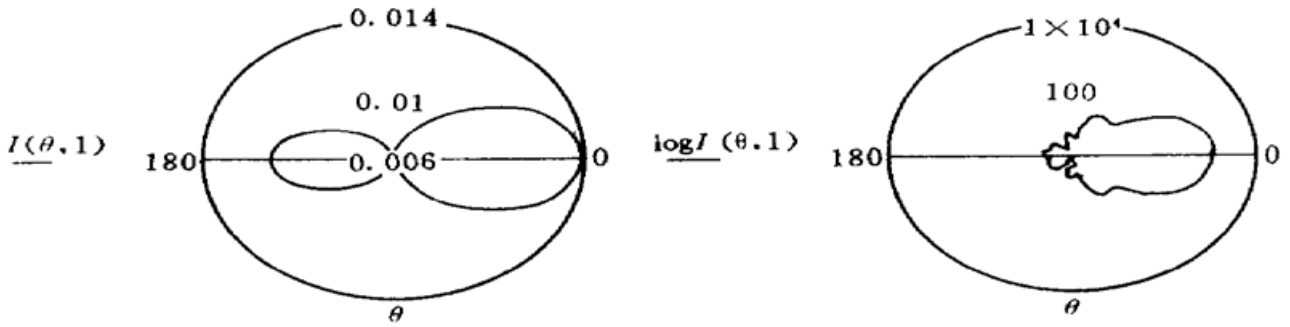


图 1 0.1 μm 及 1 μm 颗粒的散射光强分布

Fig. 1 The intensity distribution of light scattered from 0.1 μm and 1 μm particles

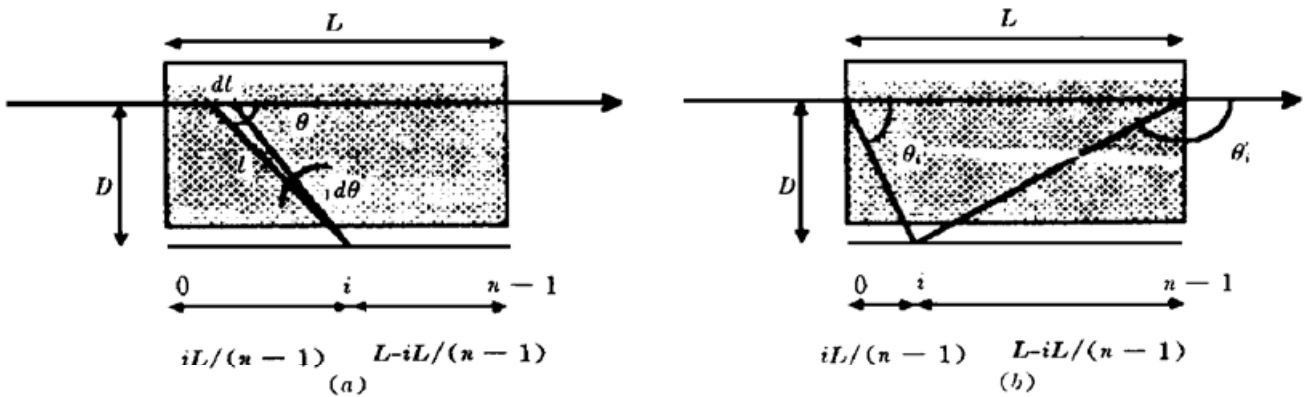


图 2 侧向散射原理示意图

Fig. 2 Scheme of lateral scattering elements

程等于器皿内壁的长边 L 。设水中含直径为 d 的颗粒, 单位体积中颗粒数浓度用 N 表示。

紧贴透明底面的外壁, 与光带成空间平行地放置一长条形光电二极管阵列, 接收由水中颗粒发出的散射光能。它与激光束之间的垂直距离为 D 。

为便于分析, 先对结构作一些简化限制和假设: (1) 假设颗粒的大小分布和浓度在整个水体中是均匀一致的; (2) 器皿长边 L 设计成和条形二极管阵列的长度相等; (3) 光带的宽度 b 略大于二极管阵列的窗口宽度 B , 即 $B \leq b \ll D$; (4) 底面玻璃平行度好, 相对较薄, 其折射率接近水的折射率, 对光线的偏折、反射可忽略; (5) 玻璃器皿的前后等侧壁可经处理, 对散射光和杂散光只吸收而不反射。

设光电二极管阵列各单元为等面积 S , 等间隔地选取其中 $n (= 16)$ 个作为采样计算单元。若使用 CCD 或 SSPA 作为光敏元件, 光敏窗口很小, 即可将单元看作一个微元点, 间隔距离即为 $a = \frac{L}{n-1}$ 。如图 2(a) 所示, 落于微元 S 上的光能量 dE 为

$$dE = I(\theta) \cdot N \cdot dV \cdot S \cdot \sin\theta \tag{3}$$

式中 dV 为光带中一微元体积, $dV = b\phi dl$, $S\sin\theta$ 为单元 S 对 θ 角的迎光面积, 则有

$$dE = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} f(\alpha, m, \theta) \cdot N \cdot b\phi \cdot dl \cdot S\sin\theta \tag{4}$$

因为 $rd\theta \approx dl\sin\theta$, 且 $r = D/\sin\theta$, 则

$$dE = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 D} f(\alpha, m, \theta) \cdot N \cdot b\phi \cdot S\sin\theta \cdot d\theta \tag{5}$$

将式中的常量用 K 表示, 即

$$K = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 D} \cdot b\phi \cdot S \quad (6)$$

如图 2(b) 所示, 对于其中第 i 个测光单元, 散射光能是从 θ_i 到 θ_i' 的范围内积分, θ_i, θ_i' 角为

$$\begin{aligned} \theta_i &= \arctg \frac{D}{i \cdot \alpha} = \arctg \frac{(n-1) \cdot D}{i \cdot L} \\ \theta_i' &= \pi - \arctg \frac{D}{L - i \cdot \alpha} = \pi - \arctg \frac{(n-1) \cdot D}{(n-1-i) \cdot L} \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (7)$$

代入(5) 式, 则第 i 个测光单元接收到的散射光能

$$E_i = K \cdot N \int_{\theta_i}^{\theta_i'} f(\alpha, m, \theta) \sin\theta \cdot d\theta \quad (8)$$

以上讨论分析是假设测量区中存在单一颗粒的情况, 但实际测量的颗粒往往不是单分散。如果测量区中有许多大小不同的颗粒, 并设直径为 d_j 的颗粒数浓度为 N_j , 则该颗粒群所产生的散射光能将是每种颗粒所产生散射光能的总和。第 i 个测光单元接收到的总散射光能量为

$$E_i = \sum_j K \cdot N_j \int_{\theta_i}^{\theta_i'} f\left[\frac{\pi \cdot d_j}{\lambda}, m, \theta\right] \sin\theta \cdot d\theta \quad (9)$$

一般情况下, 颗粒尺寸分布采用重量频率 W 表示, 设直径为 d_j 的颗粒的重量频率为 W_j , 则

$$N_j = \frac{6W_j}{\pi \cdot \rho \cdot d_j^3} \quad (10)$$

代入(9) 式

$$\begin{aligned} E_i &= \sum_j K \cdot \frac{6W_j}{\pi \cdot \rho \cdot d_j^3} \int_{\theta_i}^{\theta_i'} f\left[\frac{\pi \cdot d_j}{\lambda}, m, \theta\right] \sin\theta \cdot d\theta \\ C &= K \cdot \frac{6}{\pi \cdot \rho} \\ E_i &= C \sum_j \frac{W_j}{d_j^3} \int_{\theta_i}^{\theta_i'} f\left[\frac{\pi \cdot d_j}{\lambda}, m, \theta\right] \sin\theta \cdot d\theta \end{aligned} \quad (11)$$

在数据处理过程中, 对光能量计算采用归一化方法, 同时对颗粒尺寸分布用百分率表示, 式中 C 在计算时可不必考虑

$$\begin{aligned} e_i &= \frac{E_i}{\sum E_i} \\ w_j &= \frac{W_j}{\sum W_j} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (12)$$

若用 n 个采样计算单元, 可得一线性方程组

$$e_1 = t_{1,1}w_1 + t_{1,2}w_2 + t_{1,3}w_3 + \dots \quad (13)$$

$$e_n = t_{1,n}w_1 + t_{2,n}w_2 + t_{3,n}w_3 + \dots$$

其中

$$t_{i,j} = \frac{1}{d_j^3} \int_{\theta_i}^{\theta_i'} f\left[\frac{\pi \cdot d_j}{\lambda}, m, \theta\right] \sin\theta \cdot d\theta \quad (14)$$

用矩阵形式表示为 $E = TW$, 其中

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T \tag{15}$$

$$W = (w_1, w_2, w_3, \dots)^T \tag{16}$$

$$T = \begin{pmatrix} t_{1,1} & t_{2,1} & t_{3,1} & \dots \\ t_{1,2} & t_{2,2} & t_{3,2} & \dots \\ & & & \ddots \\ t_{1,n} & t_{2,n} & t_{3,n} & \dots \end{pmatrix} \tag{17}$$

T 为光能分布系数矩阵, 此矩阵一旦算得, 只要利用线阵列光电二极管测出被测颗粒群所产生的侧向散射光能分布 E , 通过对线性方程组用优化方法求解, 就可得到颗粒尺寸分布 W 。图 3 是以表面图和等高图表现 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的粒径按对数等分成 16 档, 在 16 个等间距的光探测器上的光能分布系数矩阵。

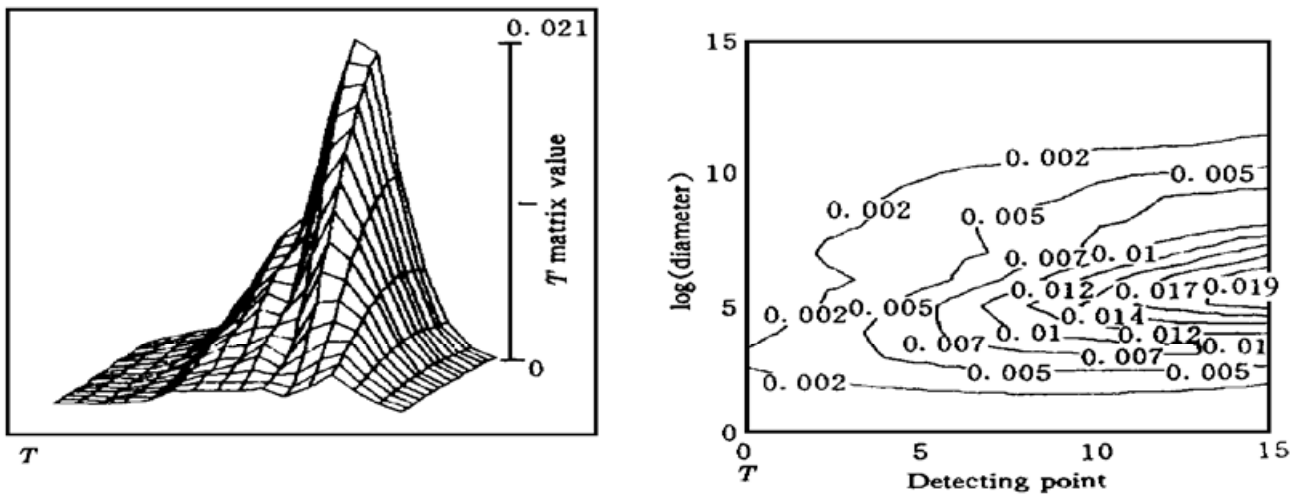


图 3 T 矩阵的表面图和等高图

Fig. 3 The surface and contour plot of the T matrix

3 试验验证

以上述理论分析为依据, 我们用自扫描光电二极管和线阵列对标准粒子进行验证试验, 结果较为满意。图 4 是粒径为 $1.98 \mu\text{m}$ 的标准颗粒的实测光强信号, 分布规律与理论值吻合得较好, 且不同的浓度在信号强度上也有所反映。

4 结 论

结合上述理论分析, 只要具备相应的器件等条件, 利用侧向散射方法测量粒径分布是可行的。因为计算中引入几何参数 D 和 L , 所以它对加工、调节的要求较高。但与角散射方法相比, 要求低得多, 结构也较简单, 有利于发展便携式仪器。

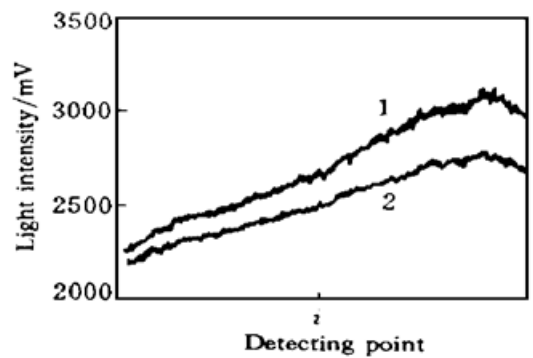


图 4 测量 $1.98 \mu\text{m}$ 标准颗粒所得的光能分布
1: 浓; 2: 淡
Fig. 4 Light energy distribution measured from $1.98 \mu\text{m}$ critical particles
1: dense; 2: dilute

参 考 文 献

- 1 Wang Naining, Zhang Hongjian, Yu Xianhuang. FAM laser particle sizer. *Journal of Shanghai Institute of Mechanical Engineering* (上海机械学院学报), 1990, **12**(1): 1~ 10 (in Chinese)
- 2 Wang Naining, Yu Xianhuang. Laser Particle sizer based on Mie scattering and Fraunhofer diffraction. *Powder Technology* (粉体技术), 1996, **2**(1): 1~ 6 (in Chinese)
- 3 Yuan Xianghui. Solid Imaging Sensor and its Application. Chongqing: Chongqing University Press, 1996. 39~ 93 (in Chinese)

Study of Laser Lateral Scattering Used to Measure Particle Size Distribution

Zhang Zhiwei Wei Jingming Zheng Gang Wang Naining
(*University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093*)

Abstract This paper puts forward a method based on Mie scattering theory, which detects the lateral scattering light from a new view-point. A novel theoretical calculation model is established. According to this principle the measuring range of particle sizes is extended while technical requirements are reduced. Combining with mature semiconductor lasers and the CCD image technique, this method will make the particle sizer portable and more sensitive.

Key words Mie theory, lateral scattering, particle size distribution, imaging sensor