

近场接收时颗粒的消光特性

吴伟亮 蔡小舒 王乃宁 尉士民
(上海理工大学动力学院, 上海 200093)

摘 要 讨论了在近场接收条件下颗粒的消光特性。计算表明: 在近场接收时, 颗粒的实际消光特性与远场接收相比, 存在很大的区别——实际消光系数不但同颗粒的性质和大小有关, 而且与颗粒在光束中的位置相联系。对于大颗粒, 近场和远场间的消光系数在数值上也有很大差异, 如果采用近场接收来测量颗粒的大小, 必须考虑这些因素的影响, 否则将极大增加测量误差。还论述了近场接收时消光法测量颗粒时测量区定义中的问题, 论证了如果能恰当定义测量区, 可以把由于采用近场接收带来的误差限制在一个可接受的范围之内。

关键词 光散射, 近场散射, 消光系数, 颗粒测量。

1 引 言

在用消光法测量颗粒尺寸时, 由朗伯-比尔(Lambert-Beer)定理, 有

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\tau L), \quad (1)$$

式中 τ 为颗粒介质层的浊度, L 为光线穿越介质的长度。 I_0 和 I 分别为入射光强和出射光强。

设介质中仅含有性质相同的单一粒径的球形颗粒, 当散射是不相关单散射时, 可以写出浊度 τ 的具体表达式^[1]

$$\tau = \frac{\pi}{4} k_{\text{ext}}(D) D^2 N, \quad (2)$$

式中 D 为颗粒直径; $k_{\text{ext}}(D)$ 为颗粒的消光系数, 它是粒径、光波长 λ 和颗粒相对折射率的函数; N 是颗粒在单位体积中的数量浓度。

由此可见, 颗粒介质层的浊度取决于颗粒的消光系数、粒径大小和浓度。消光系数可以理解为被颗粒散射的光能与入射到颗粒投影面积上光能的比值, 即

$$k_{\text{ext}} = \frac{E_{\text{sca}}}{E_{\text{pro}}}, \quad (3)$$

消光系数是一个重要的物理参数, 它的准确与否, 直接影响着颗粒测量的精度。

根据远场衍射理论, 所有颗粒的消光系数等于 2; 而在米氏(Mie)理论中, 随着颗粒的增大, 消光系数将趋于 2^[2], 图 1 是用米氏理论计算的消光系数 k_{ext} 随颗粒的元因次尺寸参数

$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$ 的变化曲线。由于米氏理论是麦克斯韦方程对球形颗粒在平面入射波时的精确数学

解, 它更能反映颗粒在平面入射光波情况下的真实特性。

在远场接收条件下, 可以认为被颗粒散射的光能均不能被接收器件所接收, 所以可以采用上述消光系数值。但在近场接收时, 由于颗粒同接收器件的距离很近, 前向小角内的部分散射光能会被接收器件接收, 如图 2 所示。这时颗粒的实际消光系数将较直接按米氏理论计算的为小, 因而必须考虑由此对颗粒测量的影响。

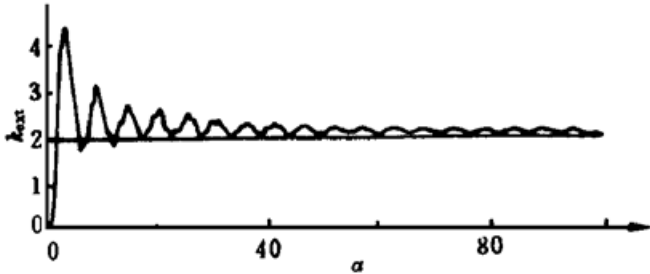


Fig. 1 Extinction curve by Mie theory

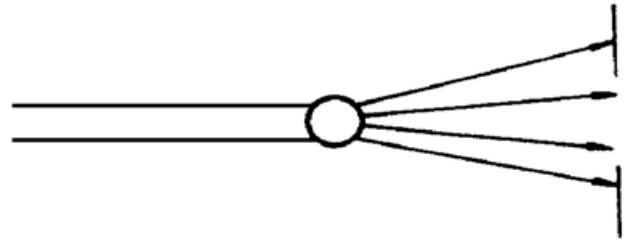


Fig. 2 Geometry of near reception

2 近场接收时颗粒的消光系数

考虑到公式的通用性, 可以按照消光截面的定义来改写浊度表达式

$$\tau = A_{\text{ext}}N, \tag{4}$$

式中 A_{ext} 为颗粒的消光面积。

下面, 论述在近场接收时消光截面的一些特性。

当非偏振的平面光波照射到球形颗粒上时, 散射光强分布为^[3]

$$I(\theta) = \frac{i_1(\theta) + i_2(\theta)}{8\pi^2 r^2} \lambda^2 I_0, \tag{5}$$

I_0 为入射光强; λ 为入射光波长; $i_1(\theta)$ 、 $i_2(\theta)$ 为散射函数, 可以由米氏理论求出; θ 为散射光线与光轴的夹角, r 为测量点到颗粒的距离。

近场接收颗粒散射光时, 入射光、颗粒、散射光及接收面如图 3 所示。设入射平行光束的横截面为圆形, 接收器件是半径为 R 的圆面, 颗粒位于距接收面 H 处, 与光轴的距离为 S , 由几何关系可以求出颗粒散射角 θ 与角度 φ 的关系

$$\theta(\varphi) = \arctan \left(\frac{\sqrt{R^2 - S^2 \sin^2 \varphi} - S \cos \varphi}{H} \right), \tag{6}$$

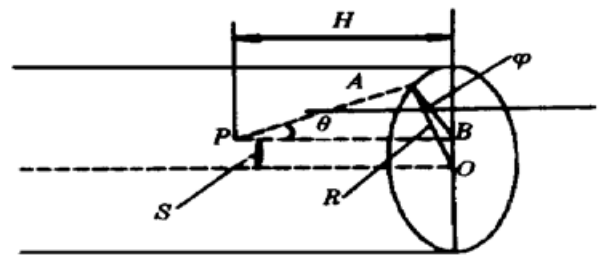


Fig. 3 Geometry of the particle and receiver

以接收器件尺寸半径 R 为特征尺寸, 对上式进行无量纲处理

$$\theta(\varphi) = \arctan \left(\frac{\sqrt{1 - S'^2 \sin^2 \varphi} - S' \cos \varphi}{H'} \right), \tag{7}$$

其中 $S' = \frac{S}{R}$ 、 $H' = \frac{H}{R}$ 为无量纲几何尺寸。

在近场接收条件下, 位于点 P 的颗粒散射光在接收平面上的光通量为

$$E_i = \iint_{\Omega} I(\theta) ds = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta(\varphi)} I(\theta) r^2 \sin(\varphi) d\theta d\varphi, \tag{8}$$

由 φ 的对称性, 上式可简写成

$$E_i = \iint_s I(\theta) ds = 2 \int_0^{\pi\alpha\varphi} \int_0^{\pi} I(\theta) r^2 \sin \vartheta d\theta d\varphi \quad (9)$$

将(5)式代入

$$E_i = \frac{I_0 \lambda^2}{4\pi^2} \int_0^{\pi\alpha\varphi} \int_0^{\pi} (i_1 + i_2) \sin [\theta(\varphi)] d\theta d\varphi \quad (10)$$

这样可根据(10)式求出近场接收到的光通量。由上面也可以看出, 近场接收时接收的光通量不仅与颗粒的性质有关, 而且与颗粒在光束中的位置、接收面积大小有关。

同理, 近场接收时被颗粒散射掉的光通量为

$$E_0 = \frac{I_0 \lambda^2}{4\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} (i_1 + i_2) \sin [\theta(\varphi)] d\theta d\varphi \quad (11)$$

按照颗粒消光系数的定义, 近场接收时的消光系数为

$$k_{\text{ext}} = \frac{4E_0}{\pi I_0 D^2} = \frac{1}{\pi \alpha^2} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} (i_1 + i_2) \sin [\theta(\varphi)] d\theta d\varphi \quad (12)$$

图 4 是根据(12)式得到的近场接收时消光系数和光轴上的颗粒与接收面距离的关系曲线。

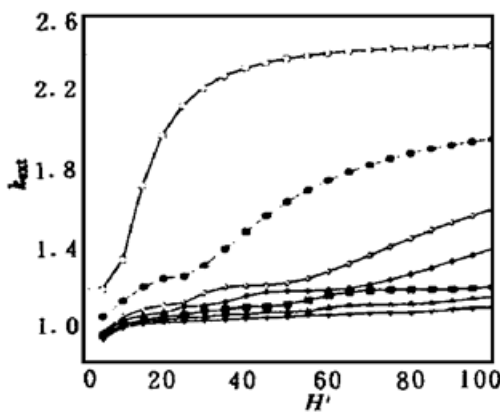


Fig. 4 Extinction curve of particulates in different axial distance. From up to down, $\alpha = 25, 75, 150, 200, 300, 500, 750$

从图中可以看出, 当颗粒与接收面的距离在 $20R \sim 50R$ 时, 消光系数有一定的规律: 在 $\alpha < 150$ 时(对于 He-Ne 激光器所发出的红光, 颗粒粒径约为 $30 \mu\text{m}$), 消光系数随颗粒与接收面距离的不同变化较大; 而在 $\alpha > 150$ 后, 这种变化逐渐变小。表 1 列出了它们之间的差异。

表 1 所指的误差是在 $H = 35R$ 处的消光系数对 $H = 20R$ 或 $H = 50R$ 消光系数的最大误差。从表 1 可以看出, 当 $\alpha > 150$ 后, 用位于光束中的颗粒的消光系数代替其他任意点的消光系数, 所引入的误差小于 10%, 这在工程上是完全可以接受的。并且随着颗粒的增大, 这个误差越来越小。这主要是随着颗粒的增大, 散射光将向前向集中, 几何光学作用趋于明显。

Table 1. Extinction coefficient of particle in different axial distance

relative size	25	75	150	200	300	500	750
$H' = 20$	1.98	1.25	1.11	1.08	1.06	1.04	1.02
$H' = 35$	2.29	1.40	1.21	1.13	1.09	1.06	1.04
$H' = 50$	2.38	1.64	1.23	1.19	1.12	1.08	1.05
max. error/%	13.0	17.1	8.3	5.3	2.8	1.9	1.9

另一方面, 在远场接收时, 颗粒在光束中的位置与远场的光能分布无关。而在近场接收时, 颗粒的径向位置直接关系到接收立体角中的散射光能分布, 也就影响到了消光系数。所以, 有必要研究颗粒不在光轴中心时对消光性能的影响。图 5 是颗粒与接收面距离分别为 $H = 20R$ 、 $H = 35R$ 和 $H = 50R$ 时, 颗粒位置沿径向变化时消光系数的变动情况。

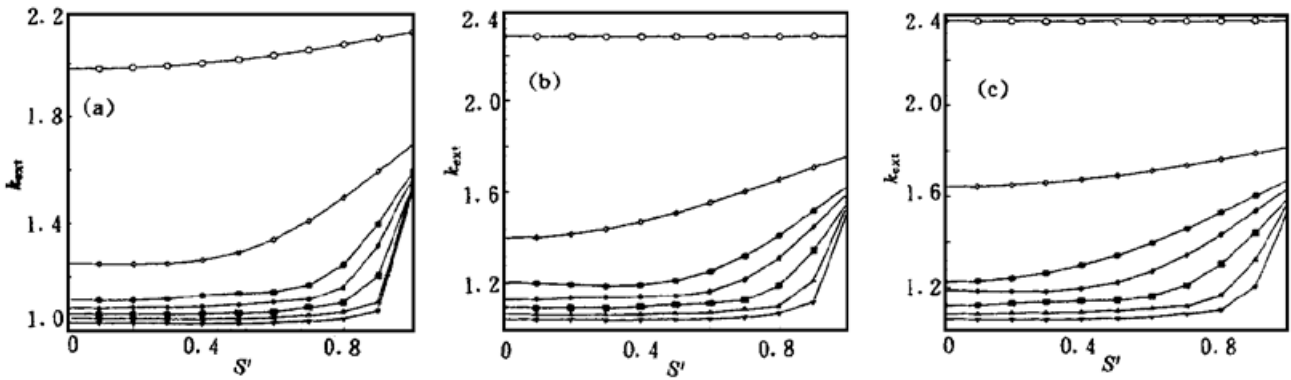


Fig. 5 Extinction curve of particles in different radial distance. (a) $H = 20R$, (b) $H = 35R$, (c) $H = 50R$. From up to down $\alpha = 25, 75, 150, 200, 300, 500, 750$

从图 5 可以看出, 颗粒距光轴的距离在 $0.4R$ 以内消光系数变化不是很大。类同于表 1, 表 2 列出了 $H = 35R$ 横截面上颗粒距光轴 $S' = 0$ 和 $S' = 0.4$ 的消光系数与 $S' = 0.2$ 的数值及比较的最大误差。可以看出, 在一定范围内颗粒的偏心对消光系数的影响是非常有限的。

Tabel 2. Extinction coefficient of particle in different radial distance

relative size	25	75	150	200	300	500	750
$S' = 0.0$	2.286	1.401	1.206	1.128	1.092	1.065	1.039
$S' = 0.2$	2.287	1.421	1.198	1.139	1.094	1.064	1.041
$S' = 0.4$	2.290	1.479	1.200	1.148	1.103	1.068	1.044
max. error/%	0.1	4.1	0.7	1.0	0.8	0.4	0.3

3 测量区定义

由以上论述可知, 如果采用近场接收, 相对粒径 $\alpha > 150$ 时, 在 $H = 20R$ 、 $H = 50R$ 和半径为 $S = 0.4R$ 所组成的圆柱形区域内的颗粒消光系数仅在一个很小的范围内变化, 这就提出一个问题: 能否直接将这一区域定义为测量区, 采用单一的消光系数。因为在近场接收时, 颗粒的消光系数同其位置有关。这种简化将会带来误差, 为了保证测量的可靠性, 必须使误差限定在一定的范围之内。设在测量区中的颗粒为单一粒径的颗粒, 由朗伯-比尔公式可得

$$\frac{\pi D^2}{4} k_{\text{ext}} = \text{const.} \quad (3)$$

由上式可得粒径的相对误差为

$$\left| \frac{dD}{D} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{dk_{\text{ext}}}{k_{\text{ext}}} \right|, \quad (14)$$

由此可见, 用位于上述区域中部的颗粒的消光系数所带来的颗粒粒径的误差等于为简化消光系数而代入的误差的一半, 由此得到的结果在工程上是可以接受的。图 6 和图 7 给出了按上面定义的消光系数及消光面积同颗粒粒径的关系曲线。

如果接收面的半径为 2 mm , 则实际测量区长度可达 60 mm 。如果测量区长度进一步缩短, 在一定消光系数误差范围内的颗粒粒径还将进一步减小。例如, 如果将 $H = 20R$ 至 $H = 25R$ 、 $S = 0.4R$ 之间的区域作为测量区, 则对于 $\alpha = 5$ 至 $\alpha = 1000$ 的颗粒所引入的消光系数误差均小于 5% 。所以, 这种定义测量区的方法在一定条件下, 对一个很大粒径范围都

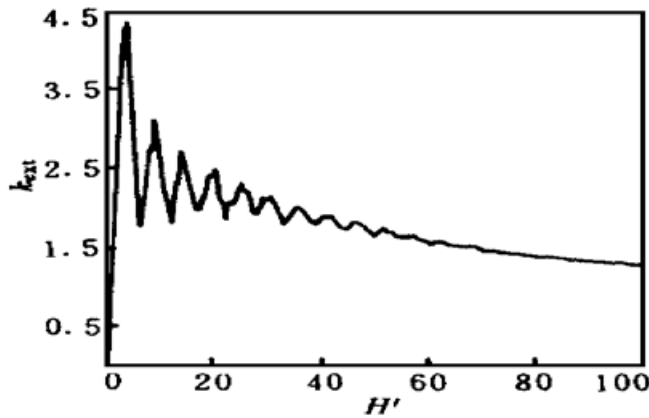


Fig. 6 Extinction curve of particles in near reception

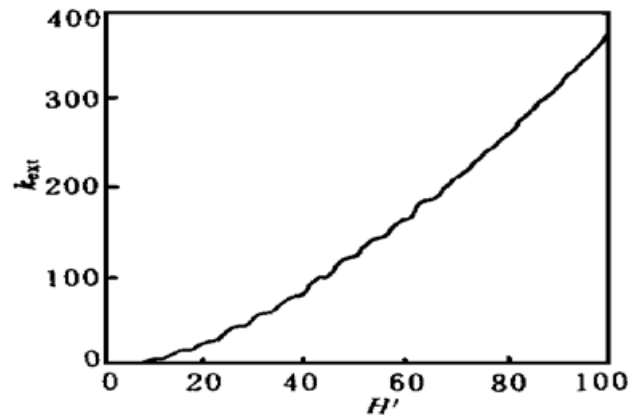


Fig. 7 Extinction area of particles in near reception

是适用的。

结 论 从上面的分析可以得出如下结论: 对于近场接收, 消光系数不但与颗粒的性质和大小有关, 还与颗粒在光束中的位置相联系; 如果能适当地调整颗粒与接收面的位置和光束与接收面大小的关系, 可以使消光系数对位置的变化关系限定在一定范围之内; 利用上述特性, 可以简化测量区中同一大小颗粒消光系数的计算, 提高测量精度。

参 考 文 献

- [1] 蔡小舒, 王乃宁. 光全散射法测量微粒尺寸分布的研究. 光学学报, 1991, 11(11): 1049~ 1053
- [2] Kerker M. *The Scattering of Light and other Electromagnetic radiation*. New York: Academic, 1969. 104~ 127
- [3] Van de Hulst. *Light Scattering by Small Particle*. New York: John Wiley & Sons, 1957. 128~ 130

Extinction Characteristics of Particle in Near Reception

Wu Weiliang Cai Xiaoshu Wang Naining Yu Shimin

(Department of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

(Received 24 September 1998; revised 17 December 1998)

Abstract The particle extinction characteristics, determined by reception in short distance, is discussed. Calculations show that the extinction coefficient in short distance, especially for the large particles, is very different from that in long distance, i. e. it is not only dependent on particle properties, but also the location of particle in measuring beam. Therefore, the above mentioned factors should be taken into account when the short distance reception is used to measure the particle size. Furthermore, the way to define the measurement volume under the reception in short distance is also described, the particle diameter and concentration can be clearly determined by above mentioned method.

Key words light scattering, scattering in near field, extinction coefficient, particle sizing.