

引用格式: XIAO Xinyu, XIONG Bing, CHEN Jun, et al. Influence of Divergent Beam on Particle Size Measurement by Light Extinction Method[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5):0551314

肖新宇,熊兵,陈军,等. 发散光束对消光法颗粒粒径测量影响[J]. 光子学报, 2022, 51(5):0551314

发散光束对消光法颗粒粒径测量影响

肖新宇¹,熊兵²,陈军¹,杨荟楠¹,苏明旭¹

(1 上海理工大学 能源与动力工程学院,上海市动力工程多相流动与传热重点实验室,上海 200093)

(2 中国航发四川燃气涡轮研究院,成都 610500)

摘要:采用蒙特卡罗方法模拟光子在散射介质中传输的物理过程,研究发散光束对消光法粒径测量的影响。将平行入射光条件下数值结果与 Lambert-Beer 模型进行对比验证,分析了入射光发散角变化对消光光谱的影响。搭建基于发散光束的消光实验平台,分别在入射光平行和发散条件下测得三种聚苯乙烯乳胶球标准颗粒消光光谱,其与蒙特卡罗模拟结果变化趋势基本一致。数值和实验消光光谱的粒径反演结果表明:随发散角增大,测得粒径与标称值误差越大,发散角为 5° 时粒径的反演误差均在 4.62% 以内,但发散角为 20° 时标称粒径 0.2、0.8、2.88 μm 的颗粒样品测量误差分别为 4.25%、12.75%、-9.55%。进行误差修正,通过蒙特卡罗方法建立的发散光束数值模型构造系数矩阵,对粒径 0.8 μm 的颗粒在发散角为 5~20° 的实验消光光谱反演,误差在 2.00% 以内。

关键词:颗粒测量;消光法;蒙特卡罗方法;发散光束;反演

中图分类号:O436.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225105.0551314

0 引言

在颗粒测量方法^[1-3]中消光法测量原理简单、操作简便,易实现仪器设备微型化,如利用光纤和光谱仪即可测得携带粒径信息的消光谱并反演颗粒粒径分布^[4-5]。消光法的理论基础为 Lambert-Beer(LB)定律和 Mie 散射理论,前者反映了光束在介质中的透射和衰减特性,后者描述单个均质球形颗粒的光散射规律。通过测量离散状态颗粒系的消光谱再结合 Mie 理论构建消光系数矩阵,可反演出颗粒粒径分布^[6-7]。该方法通常基于平行入射光条件,但在一些特定应用场景中入射光束并非严格平行,例如高斯光束照射或某些发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光源条件。此外,测量空间狭小时往往采用光纤传递发射和接收信号,因其具有一定的发散和接收角,按平行入射光假设处理会导致误差。

关于非平行光束消光和光散射问题,刘福水等^[8]搭建一套非平行光二维测试系统准确获得扩散火焰中的碳烟浓度分布,解决了平行光消光法在碳烟测试中的波束偏移问题。冯冰等^[9]利用蒙特卡罗方法^[10-12](Monte Carlo Method, MCM)模拟大气气溶胶对高斯光束的侧向散射,获得侧向散射光强和散射系数曲线并与实验结果对比验证。周田华等^[13]基于蒙特卡罗仿真分析光束发散参数对接收光场分布的影响,通过光束预聚焦处理一定程度上抵消水体传输引起的光束扩散,增强了接收光信号功率。CHEN J 等^[14]基于 Mie 理论推导了发散光束入射下探测面上散射光空间分布的解析表达式,通过不同发散角模拟和实验的散射光强分布曲线验证了其适用于不同发散角下小粒径测量。WANG Z 等^[15]基于蒙特卡罗偏振辐射传输模型,研究了激光束发散对来自均匀平面平行水云的激光雷达多次散射偏振信号的影响。VALI Z 等^[16]基于蒙特卡罗模型,研究平面光束、高斯光束和球面光束的发散度对清澈水域链路对中的影响,发现提高发射器波束发散度可以减小发射和接收器未对中的影响,并且存在一个最佳发散角可平衡横向偏移、功率损耗和信号带

基金项目:国家自然科学基金(No.51776129),中国航发四川燃气涡轮研究院外委课题

第一作者:肖新宇(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为消光法颗粒粒径测量技术。Email: xiaoxinyu139@163.com

导师(通讯作者):苏明旭(1973—),男,教授,博士,主要研究方向为超声、光散射颗粒测量理论和技术。Email:sumx@usst.edu.cn

收稿日期:2021-10-18;录用日期:2022-01-07

<http://www.photon.ac.cn>

宽之间关系。LIM等^[17]设计一种基于梯度散射的光纤扩散器,利用蒙特卡罗方法模拟了不同的非对称因子和光纤发射角下光纤扩散器在水和空气中的发射性能。NICO S等^[18]基于统计消光法在线测量颗粒通过光束运动产生的光强波动,根据统计的波动信号计算出颗粒平均粒径和颗粒浓度,并设计一种空间频率滤波器有效减小了颗粒多次散射对信号测量的影响。

不过,上述研究均未涉及多波长条件的消光法测量问题,消光法由于借助了不同波长下消光谱信息,而非散射光的空间分布信息,其特点和前述研究不同。为此,作者借助蒙特卡罗方法和标准颗粒的测量从数值和实验角度研究发散光束对消光法颗粒粒径测量的影响。

1 测量方法

1.1 消光法原理

如图1所示,一束直径远大于被测颗粒粒径,强度为 I_0 ,波长为 λ 的平行单色光入射到一含有测颗粒群的介质时,由于颗粒对光的散射和吸收,透射光 I 的强度为

$$I = I_0 \exp(-\tau L) \quad (1)$$

式中, τ 是介质浊度, L 为光程。对于球形被测颗粒,且各颗粒光散射满足不相关单散射,单位体积内 N 个粒径为 D 的单分散颗粒系浊度 τ 为

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

式中, C_{ext} 和 k_{ext} 分别为消光截面和消光系数,是入射光波长 λ 、被测颗粒粒径 D 、颗粒相对于介质的相对折射率 m 的函数。将式(2)代入式(1)可得

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4} NLD^2 k_{\text{ext}} \quad (3)$$

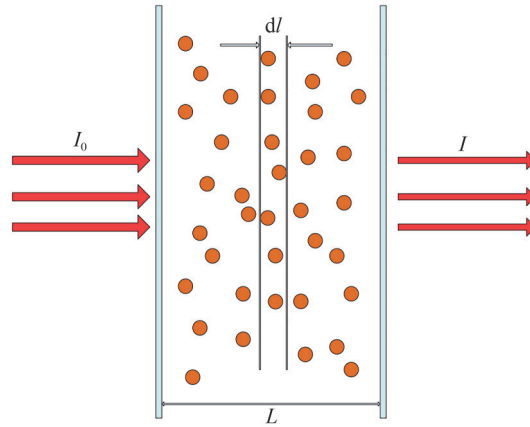


图1 消光法测量原理示意

Fig. 1 Schematic of light extinction measurement

理论上,通过LB定律建立正演模型并计算消光系数矩阵,对所测消光谱反演可得颗粒粒径分布信息。不过,该模型的适用前提需满足平行光入射条件,而实际测量如采用非平行入射光源,仍依照LB模型会带来一定误差。对于发散光入射情形,引入蒙特卡罗方法,将入射光束离散化处理成离散光子,通过统计不同方位接收器接收到的光子数即可模拟不同发散角范围下的消光特性,进而分析对消光谱和粒径反演的误差。

1.2 蒙特卡罗仿真流程

蒙特卡罗方法是以概率统计为基础的随机模拟方法,将光在颗粒离散介质中的散射过程视为光子与颗粒的碰撞过程,且每次散射只与前一次散射有关^[19]。通过跟踪大量的光子轨迹模拟光在散射介质中传播的整个物理过程,统计出各个方位接收器接收到的光子数,并可获得边界逃逸、前向透射、散射的光子数。

图2为模拟发散光束穿过散射介质的传播模型,散射介质厚度为 L ,介质到发射和接收器距离都为 S 。假设光束在 $z=0$ 平面沿着 z 轴方向传播,发散角为 θ 。光子的初始出射坐标 (x_0, y_0, z_0) 为 $(0, 0, 0)$,初始出射

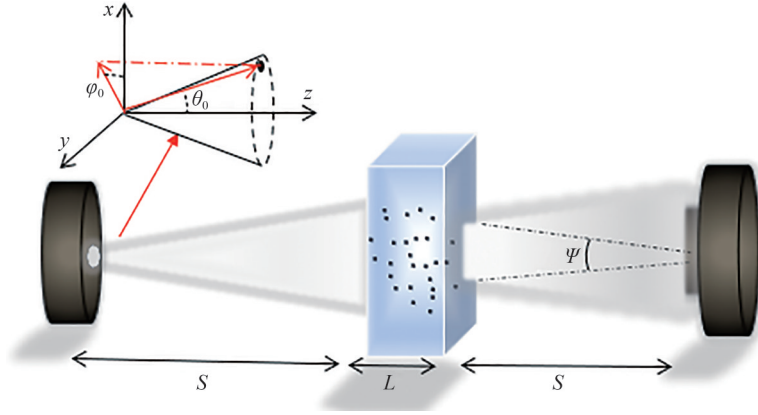


图2 发散光束仿真模型

Fig. 2 Simulation model of the divergent beam

方向余弦 $(u_{x_0}, u_{y_0}, u_{z_0})$ 表示为

$$\begin{cases} u_{x_0} = \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \\ u_{y_0} = \cos \theta_0 \sin \varphi_0 \\ u_{z_0} = \cos \theta_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, θ_0 和 φ_0 为发散光子的初始散射角和方位角,光子在初始发散角范围内均匀分布。结合初始方向余弦可计算得光子刚进入测量区坐标为 $(\frac{S}{\cos \theta_0} u_{x_0}, \frac{S}{\cos \theta_0} u_{y_0}, S)$,并以此坐标作为起算坐标。光子与颗粒碰撞相邻的两次散射之间的随机自由步长可表示为

$$l = -\frac{\ln r_l}{K_{\text{ext}}} \quad (5)$$

式中, r_l 是 $[0,1]$ 范围内均匀分布随机数,消光效率 K_{ext} 可由Mie散射理论计算。结合起算坐标、初始方向余弦以及相邻散射间的随机自由步长,光子首次发生散射的坐标 (x_1, y_1, z_1) 可以表示为

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + (\frac{S}{\cos \theta_0} + l) \cdot u_{x_0} \\ y_1 = y_0 + (\frac{S}{\cos \theta_0} + l) \cdot u_{y_0} \\ z_1 = z_0 + S + l \cdot u_{z_0} \end{cases} \quad (6)$$

光子与颗粒碰撞后的空间散射角分布可以由Henyey-Greenstein相函数^[20]确定,对相函数抽样,散射角 θ_1 的抽样表示为

$$\theta_1 = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[1 + g^2 - \left(\frac{1 - g^2}{1 - g + 2gr_{\theta_1}} \right)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

式中, r_{θ_1} 是另一个 $[0,1]$ 范围内随机数, g 是不对称因子。再结合初始方向余弦以及发生散射后的散射角、方位角得到新的方向余弦为

$$\begin{cases} u_{x_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sqrt{1 - u_{z_0}^2}} (u_{x_0} u_{z_0} \cos \varphi_1 - u_{y_0} \sin \varphi_1) + u_{x_0} \cos \theta_1 \\ u_{y_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sqrt{1 - u_{z_0}^2}} (u_{y_0} u_{z_0} \cos \varphi_1 + u_{x_0} \sin \varphi_1) + u_{y_0} \cos \theta_1 \\ u_{z_1} = -\sin \theta_1 \cos \varphi_1 \sqrt{1 - u_{z_0}^2} + u_{z_0} \cos \theta_1 \end{cases} \quad (8)$$

据此,由每一次散射后的方向余弦以及随机自由步长可以确定每次光子与颗粒碰撞的坐标,直至判定

光子是否被吸收、从边界逃逸还是被接收。依据反照率 $a(a=C_{\text{sca}}/C_{\text{ext}}$, 散射截面与消光截面的比值) 判定光子是否被吸收, 当随机数 $r_a \geq a$ 时光子被吸收, 反之被散射。假设接收器直径为 d , 接收角为 ψ , 当光子 z 轴方向坐标 $z_i \geq 2S + L$, 停止对光子跟踪并修正坐标得 $z_i = 2S + L$, 此时判定光子被接收的条件为

$$\begin{cases} x_i^2 + y_i^2 \leq \left(\frac{d}{2}\right)^2 \\ \frac{\sqrt{(u_{x_i})^2 + (u_{y_i})^2}}{u_{z_i}} \leq \tan \frac{\psi}{2} \end{cases} \quad (9)$$

记录接收光子数目 n , 并重复下一个光子历程, 直到完成所有光子计算, 统计各个物理过程的光子数得到散射介质的消光特性。消光谱可表示为

$$\ln(I/I_0) = \ln(n/n_{\text{set}}) \quad (10)$$

式中, n 为接收光子总数, n_{set} 为设定光子数。

2 数值模拟

2.1 光子去向统计

按照前述模型编制计算程序, 通过统计每个物理过程的光子数可得颗粒系的散射和吸收特性。算例选取颗粒粒径 $D=0.2 \mu\text{m}$ 、相对折射率 $m=1.196$ 、体积浓度 $C_v=4 \times 10^{-5}$ 、介质厚度 $L=10 \text{ mm}$, 接收器尺寸 $d=0.8 \text{ mm}$ 。光子在散射介质中传输过程的分类如图 3, 可以看出在给定粒径下, 随着波长增大透射光子数逐渐增多。按光散射理论, 波长增大时亚微米区颗粒的无因次参数 $\alpha(\alpha = \pi d/\lambda)$ 减小, 消光系数减小, 再结合蒙特卡罗方法计算随机自由步长的公式分析, 波长增大导致随机步长增大, 光子准直透射的概率增加。无因次参数减小, 光子与颗粒碰撞后的角散射特性趋于均匀, 图中前后向散射的光子数逐步接近。同时, 光子准直透射的概率增大, 发生散射、吸收以及边界逃逸的光子数逐渐减小。

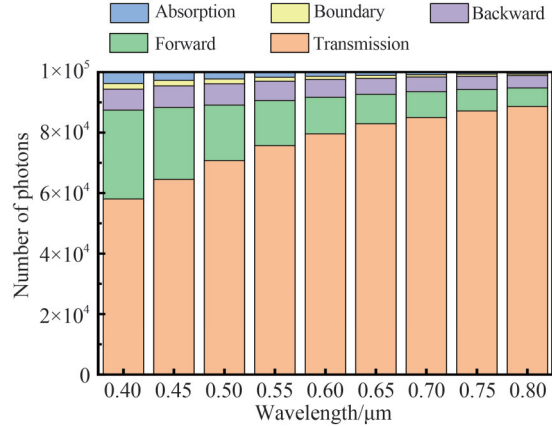


图 3 光子去向统计
Fig. 3 Statistics of photon events

2.2 程序验证

为验证蒙特卡罗计算程序的正确性, 设定光子准直出射(发散角为零), 将蒙特卡罗方法计算的准直透射光消光谱与 LB 模型预测对比验证, 并由图 4 给出在不同粒径下消光谱 $\ln(I_0/I)$ 随波长 λ 的变化规律。算例选取粒径 D 为 $0.2, 2.88 \mu\text{m}$ 、 $m=1.196$ 、 $C_v=4 \times 10^{-5}$ 、 $L=10 \text{ mm}$, 为减小复散射对计算结果影响, 粒径 $0.8 \mu\text{m}$ 时

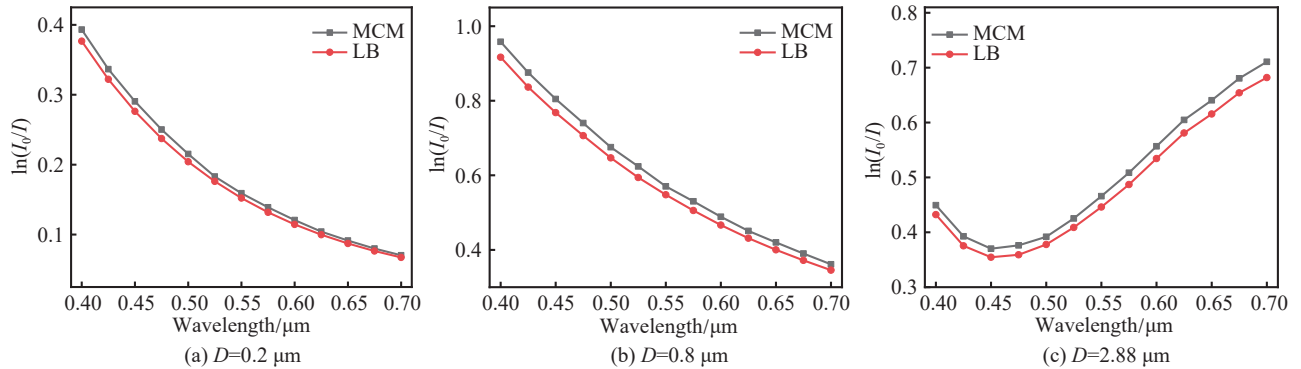


图 4 蒙特卡罗和 LB 模型消光谱对比
Fig. 4 Comparison of extinction spectra of Monte Carlo and LB models

选取体积浓度 $C_v=2\times 10^{-5}$ 。由图中曲线可以看出蒙特卡罗和LB模型计算结果吻合较好,其在不同的粒径下消光曲线的变化趋势均非常接近。综合考虑计算效率以及计算结果稳定性,数值计算光子数选取 10^5 。

2.3 不同接收器尺寸和接收角消光谱

图5(a)为粒径 $D=0.8\ \mu\text{m}$ 、接收角 $\psi=25^\circ$ 、光子准直入射时,不同接收器尺寸下消光谱 $\ln(I_0/I)$ 随波长 λ 的变化规律。从图中不同接收器尺寸下的消光谱曲线可以发现,接收器尺寸越大对应消光值越小,这是由于大尺寸接收器接收的透射和散射光能越多所致。图5(b)为不同接收角下消光谱 $\ln(I_0/I)$ 随波长 λ 的变化规律,在光子准直入射情况下,接收角度从 $10^\circ\sim 30^\circ$ 变化对于消光谱的影响较小。

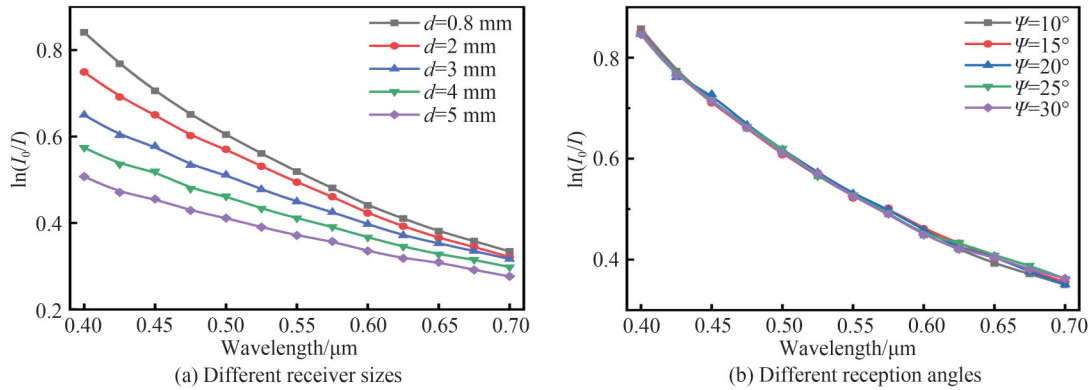


图5 不同接收器尺寸和接收角消光谱对比

Fig. 5 Comparison of extinction spectra with different receiver sizes and different reception angles

2.4 不同发散角范围消光谱

图6是接收器尺寸 $d=0.8\ \text{mm}$ 、接收角 $\psi=25^\circ$, 三种粒径颗粒不同发散角下消光谱 $\ln(I_0/I)$ 随波长 λ 的变化规律。从图6(b)、(c)可以看出消光值随发散角递增,因发散角增大使得光子发生散射后穿过介质时愈加偏离接收器中心,导致接收器接收到的散射光能更少。同理,发散角增大光子在与颗粒碰撞发生越界的概率越大,也会导致消光作用增强。再通过与图6(a)对比发现,粒径 $D=0.2\ \mu\text{m}$ 时发散角增大消光值会略微增大但是曲线无明显差异,经分析可知该粒径下透射光子占主导,发散角的变化所导致接收的散射光能变化对于总接收光能的影响甚微。从单颗粒光散射特性可知此粒径下颗粒的无因次参量 α 很小,光子与颗粒碰撞后散射呈均匀分布,相较于大粒径颗粒前向接收散射光能占比更小。模拟选取接收尺寸为 $0.8\ \text{mm}$, 如接收尺寸增大,则发散角的变化对消光曲线的影响应更明显。

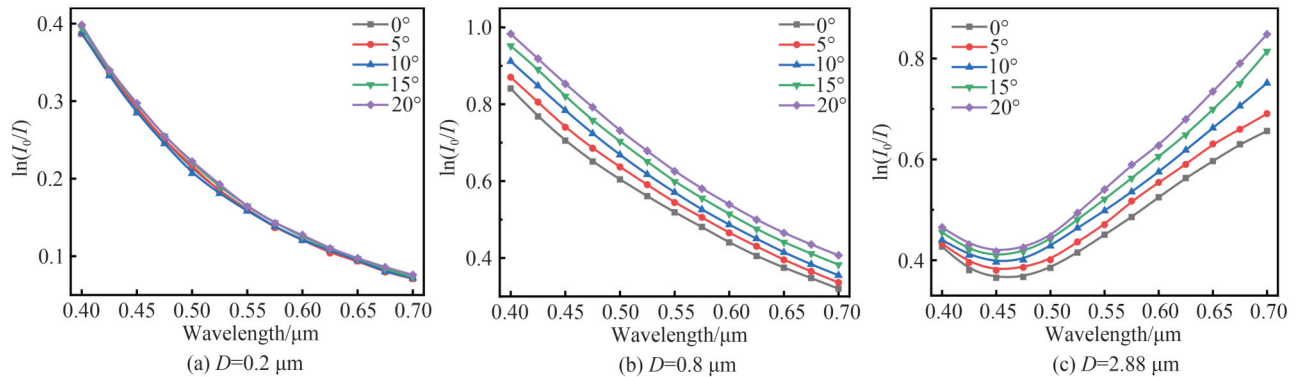


图6 不同发散角范围的消光谱对比

Fig. 6 Comparison of extinction spectra at different divergence angles

3 实验与结果

3.1 实验系统

实验系统如图7,实验采用波长范围为 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$, 输出功率为 $0\sim 1\ \text{mW}$ 可线性调节的LED光源,如海

光电科技生产的 SEED3000 型光谱仪(可测光谱范围为 $0.341\sim 1.064\ \mu\text{m}$, 波长数目为 2 048), 多模发射和接收光纤直径为 $0.8\ \text{mm}$, 发射和接收角均为 25° , 发射和接收光纤的距离 $Z=100\ \text{mm}$ 。LED 光源发出具有一定发散角(60°)的白光光束, 发散光束通过焦距为 $25\ \text{mm}$ 、孔径为 $25.4\ \text{mm}$ 的傅里叶光学透镜汇聚成平行准直光束, 照射在光程 $L=10\ \text{mm}$ 的四通光样品池上。样品池置于发射、接收光纤之间, 控制光束完全照射到样品池壁面, 经过颗粒的散射吸收发生衰减后, 携带颗粒粒径信息的光能被光纤接收并传递至光谱仪, 将 10 次连续采集的实验数据取平均后计算消光谱。为测得发散光束消光谱, 首先通过调节透镜与光源距离使光束汇聚, 控制第一个光阑孔径取光束最均匀部分, 再调节第二个光阑孔径(可调节范围为 $1.5\sim 30\ \text{mm}$), 根据两个光阑间距和孔径限定其发散角分别为 5° 、 10° 、 15° 、 20° , 进行实验。

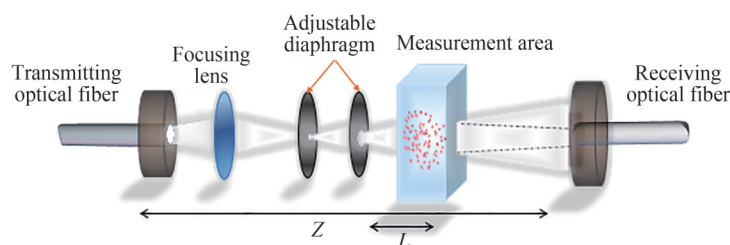


图7 消光实验系统示意图

Fig. 7 Schematic of light extinction experiment system

3.2 消光谱和颗粒粒径分布反演

实验用标准颗粒为中国石油大学研制标称直径分别为 0.2 、 0.8 、 $2.88\ \mu\text{m}$ 的三种聚苯乙烯乳胶微球。分别测得每种颗粒在平行光及不同发散角入射条件下的透射光能, 经处理得如图 8 所示的消光谱曲线。对于粒径 $D=0.2\ \mu\text{m}$ 颗粒, 发散角变化对消光谱影响不明显, 但是对 $D=0.8\ \mu\text{m}$ 和 $D=2.88\ \mu\text{m}$ 的颗粒, 随着发散角增大消光谱有明显的变化, 其变化趋势和数值模拟结果基本一致。消光法 LB 模型中透射光是指理论准直出射光束(未发生散射), 但由于实际光程所限部分前向小角散射光也会被接收, 这与单颗粒散射特性相关并和光波长、颗粒粒径及入射光角度等参数关联, 进而对获取的消光值大小与光谱曲线产生影响。

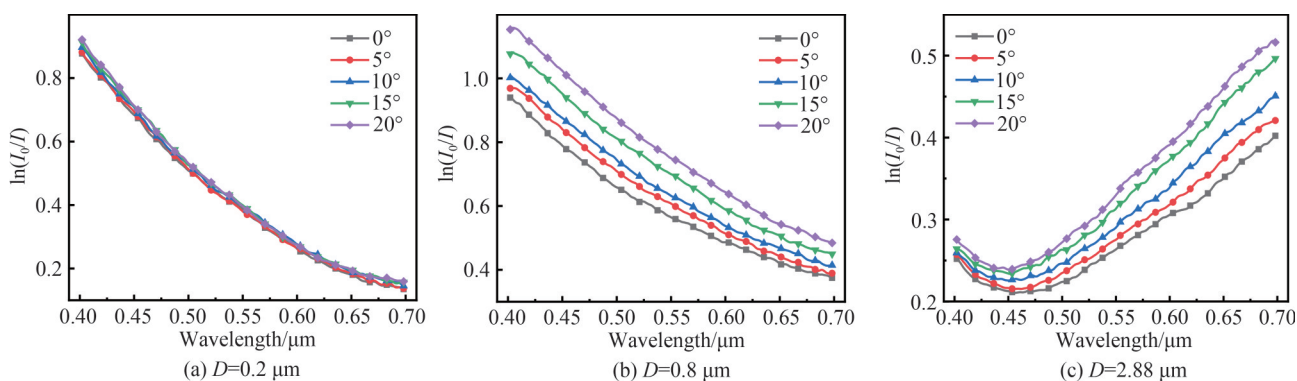


图8 实验测得不同发散角下的消光谱

Fig. 8 The experimental extinction spectra at different divergence angles

在 $400\sim 700\ \text{nm}$ 波长范围内等间距的选取 50 个波长的消光谱, 采用 DFP(Davidon-Fletcher-Powell)算法^[21-22]反演得到粒径分布结果。如图 9 所示, 对 $0.2\ \mu\text{m}$ 颗粒, 发散角变化对反演结果影响不明显, 粒径分布曲线较为稳定, 对粒径 0.8 、 $2.88\ \mu\text{m}$ 颗粒, 随着发散角增加反演结果误差越大, 粒径分布曲线整体发生偏移。

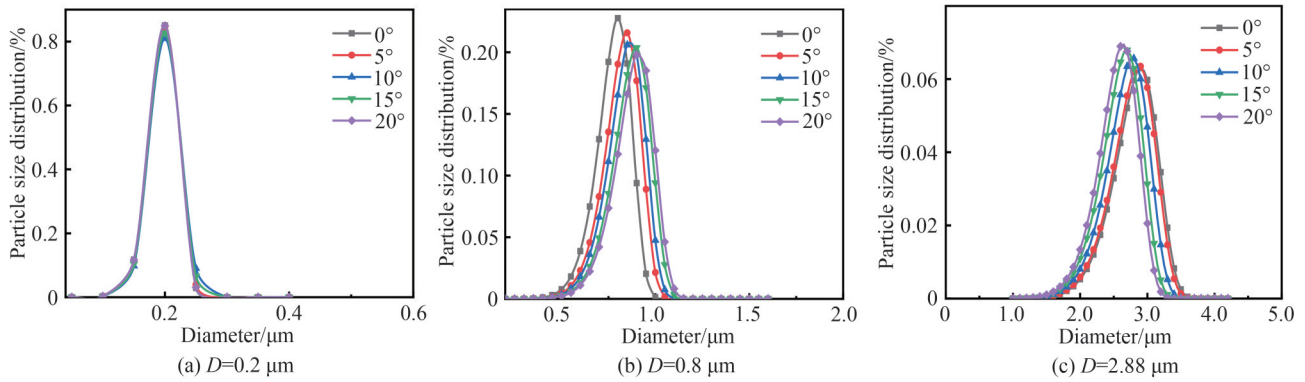


图9 不同发散角下反演颗粒粒径分布
Fig. 9 Inversed particle size distributions at different divergence angles

3.3 颗粒粒径误差

图10为不同发散角下,由数值模拟和实验消光谱反演的索太尔(Sauter)平均直径与标称值的误差。从图中可以看到平行光入射时,反演结果误差较小,随发散角增大模拟和实验消光谱的反演结果与标称值误差整体增加。发散角在 5° 范围内三种粒径的反演结果误差均在 4.62% 以内,但发散角增至 20° 时,对于粒径为 $0.8\ \mu\text{m}$ 的颗粒模拟和实验反演结果误差达 10.29% 和 12.75% ;对于粒径为 $2.88\ \mu\text{m}$ 的颗粒模拟和实验反演结果误差达 -7.64% 和 -9.55% ,此时发散光束将严重影响测量结果。

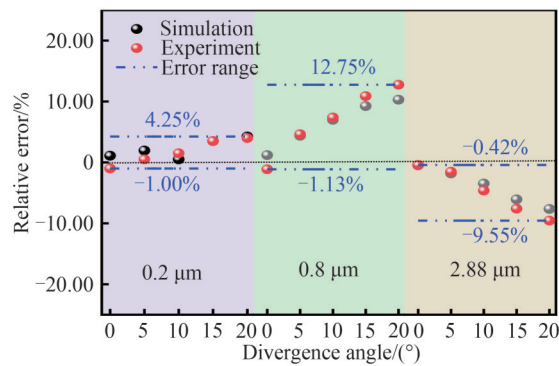


图10 不同发散角下模拟和实验平均粒径结果误差
Fig. 10 Errors of mean sizes at different divergence angles in simulations and experiments

3.4 颗粒粒径反演修正

为修正发散光束对消光法粒径测量结果的影响,在粒径 $0.05\sim 5\ \mu\text{m}$ 、入射光波长 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 区间各线性分50档,用蒙特卡罗程序计算不同发散角下的消光值并构建系数矩阵代替Mie理论计算的消光系数矩阵,代入反演算法。对粒径 $0.8\ \mu\text{m}$ 的颗粒在发散角为 5° 、 10° 、 15° 、 20° 下实验消光谱反演,修正前后反演结果与误差如表1。可见经修正后,不同发散角下粒径的反演结果误差在 2.00% 内,表明该方法可减小入射光束发散对测量结果造成的误差。

表1 修正前后不同发散角下颗粒反演结果和误差($D=0.8\ \mu\text{m}$)

Divergence angle/ $^\circ$	Experiment		Correction	
	Inversion size/ μm	Relative error/ $\%$	Inversion size/ μm	Relative error/ $\%$
0	0.791	-1.13	0.807	0.87
5	0.837	4.63	0.795	-0.63
10	0.859	7.38	0.784	-2.00
15	0.887	10.88	0.812	1.50
20	0.902	12.75	0.811	1.38

4 结论

采用蒙特卡罗方法模拟发散光束下发散角变化对消光法粒径测量的影响,搭建基于发散光束的消光法实验平台,针对三种不同粒径的聚苯乙烯乳胶球标准颗粒进行实验,测得不同发散角条件下的消光谱,并反演出颗粒粒径分布。结果表明:不同发散角下实验消光谱的变化趋势与数值模拟结果基本一致;颗粒粒径反演误差整体上随发散角增大而增加,在 20° 发散角下粒径为 0.2 、 0.8 、 $2.88\ \mu\text{m}$ 的颗粒测量结果误差分别为 4.25% 、 12.75% 、 -9.55% 。对粒径 $0.8\ \mu\text{m}$ 的颗粒在发散角为 5° 、 10° 、 15° 、 20° 的实验消光谱反演修正,反演误差在 2.00% 以内,该方法可实现对于此类问题的误差修正。

参考文献

- [1] DAI Jun, SHEN Jianqi. Application of genetic algorithm in particle size measurement technology based on forward light scattering [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 0512002.
戴珺, 沈建琪. 前向光散射颗粒测量技术中遗传算法的应用[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 0512002.
- [2] STEELMAN Z A, HO D S, CHU K K, et al. Light-scattering methods for tissue diagnosis [J]. Optica, 2019, 6(4): 479-489.
- [3] 蔡小舒, 苏明旭, 沈建琪. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [4] LI Tan, SU Mingxu, CHEN Ju, et al. Effect of particle shape on particle size measurement in multi-wavelength light extinction method [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 269-276.
李潭, 苏明旭, 陈军, 等. 多波长消光法粒径测量中颗粒形状的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 269-276.
- [5] ZHAO Y, AMBROSE R. A real-time method for sensing suspended dust concentration from the light extinction coefficient [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 67: 104242.
- [6] ZHOU H, LI L. Experimental research on size distribution of suspended particles in water based on Mie scattering theory [J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 769(4): 042063.
- [7] ZHOU Y, CHEN J, YANG H N, et al. Influence of spheroidal particle shape on particle size characterization by multi-wavelength light extinction method. Results in Physics, 2018, 10: 22-27.
- [8] LIU Fushui, DAI Yujie, HE Xu, et al. Application of a novel uncollimated light extinction for soot concentration measurement [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(12): 1283-1288.
刘福水, 戴钰杰, 何旭, 等. 一种新型非平行光消光法在碳烟测试中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(12): 1283-1288.
- [9] FENG Bing, HU Miao, LI Peng, et al. Monte-Carlo simulation and experimental study of side-scattered lidar echo signals [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(10): 1028002.
冯冰, 胡淼, 李鹏, 等. 侧向散射激光雷达的蒙特卡罗仿真与实验研究[J]. 光子学报, 2018, 47(10): 1028002.
- [10] JONSSON J, BERROCAL E. Multi-scattering software: part I: online accelerate Monte Carlo simulation of light transport through scattering media [J]. Optical Express, 2020, 28(25): 37612-37638.
- [11] WU Qiong, WANG Bo, WANG Tao, et al. Analysis of underwater wireless optical transmission characteristics based on Monte Carlo method [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 0406002.
吴琼, 王博, 王涛, 等. 基于蒙特卡洛法的水下无线光传输特性分析[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 0406002.
- [12] MA Y, LIU W, CUI Y, et al. Multiple-scattering effects of atmosphere aerosols on light-transmission measurements [J]. Optical Review, 2017, 24(4): 590-599.
- [13] ZHOU Tianhua, FAN Tingwei, MA Jian, et al. Influence of beam parameters on propagation of blue-green laser underwater [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2020, 15(1): 40-47.
周田华, 范婷威, 马剑, 等. 光束发射参数对蓝绿激光海洋传输特性的影响[J]. 大气与环境光学学报, 2020, 15(1): 40-47.
- [14] CHEN J, WANG H, SHEN J X. Light scattering of particles illuminated by a divergent beam [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(10): 1410-1415.
- [15] WANG Z, ZHANG J, GAO H. Impacts of laser beam divergence on lidar multiple scattering polarization returns from water clouds [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2021, 268: 107618.
- [16] VALI Z, GHOLAMI A, MICHELSON D G, et al. Use of gaussian beam divergence to compensate for misalignment of underwater wireless optical communication links [J]. IET Optoelectronics, 2017, 11(5): 171-175.
- [17] LI M, VU T, SANKI G, et al. Internal-Illumination photoacoustic tomography enhanced by a graded-scattering fiber diffuser [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2021, 40(1): 346-356.
- [18] NICO S, SIEGFRIED R, SERGIY A. Investigations on the capability of the statistical extinction method for the determination of mean particle sizes in concentrated particle systems [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2018, 35(9): 1800191.
- [19] ZHANG Qianqian, GAO Jun, XU Xiaohong, et al. Analysis of multiple scattering polarization transmission properties [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 190-197.
张倩倩, 高隽, 徐小红, 等. 多粒子散射的偏振传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 190-197.

- [20] HENYEY L G, GREENSTEIN J L. Diffuse radiation in the galaxy[J]. *The Astrophysical Journal*, 1940, 93(1):70–83.
- [21] ZHANG L H, PAN P Q, ZHANG S P. On the local and superlinear convergence of a parameterized DFP method[J]. *Numerical Functional Analysis and Optimization*, 2014, 35(1): 111–131.
- [22] ROBERT J S, SANDRA L H. *Applied numerical methods for engineers using MATLAB and C*[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

Influence of Divergent Beam on Particle Size Measurement by Light Extinction Method

XIAO Xinyu¹, XIONG Bing², CHEN Jun¹, YANG Huinan¹, SU Mingxu¹

(1 *School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China*)

(2 *China Gas Turbine Research Institute, Chengdu 610500, China*)

Abstract: The theoretical basis of extinction method is Lambert–Beer law and Mie scattering theory, the former reflects the transmission and attenuation characteristics of light beam in the medium, while the latter describes the light scattering law of a single homogeneous spherical particle. By measuring the extinction spectrum of the discrete particle system and combining the extinction coefficient matrix constructed by Mie theory, the particle size distribution can be retrieved. This method is usually valid under the parallel incident light conditions, but the incident light is not strictly parallel in some specific application scenarios, such as gaussian beam irradiation or certain LED light source conditions. In addition, when the measurement zone is narrow, optical fiber is often used to transmit and receive signals. Since it has a certain divergence and receiving angle, data processing according to the assumption of parallel incident light can inevitably lead to errors. For this kind of problem, the Monte Carlo modeling method is introduced to manipulate the continuous incident light beam into discrete photons, and the scatterings of light by the suspended particle are regarded as the collision events between photons and particles, in which each scattering is only related to the previous scattering. By tracing a large number of photon trajectories, the entire physical process of light propagating in a scattering medium can be simulated and illustrated clearly. By counting the number of photons received by receivers in different azimuths, together with those escaping from the boundary, experiencing forward transmission, scattering and absorption, the extinction characteristics under different divergence angles can be obtained accordingly, and investigating the influence of divergent beam on particle size measurement by the extinction method. After the comparison and verification of numerical results using the Monte Carlo and Lambert–Beer model under parallel incident light, the effect of the divergence angle of incident light on the extinction spectrum is analyzed numerically. The simulation results show that the influence of divergence angle on the extinction spectrum is different for particles with various sizes, but the extinction spectrum increases gradually with the increase of divergence angle. Furtherly, through a divergent beam–based light extinction experiment device, the extinction spectra for three reference materials of polystyrene latex particles are measured under the conditions of parallel and divergent incident light respectively, which yield a basically accordant tendency with the Monte Carlo simulation results. The inversion results of particle size show that with the increase of divergence angle, the error between particle size measured by extinction method and the nominal value is becoming greater correspondingly. In particular, the error can be kept within 4.62% until the divergence angle is up to 5°, but at the divergence angle of 20°, the errors of the samples with nominal sizes of 0.2, 0.8 and 2.88 μm are 4.25%, 12.75% and –9.55%, respectively. With the established numerical model of divergent beam, the resultant coefficient matrix is modified based on Monte Carlo method, suppressing the inversion error of the experimental spectral inversion within 2.00% for 0.8 μm particles at divergence angles from 5° to 20°. Thus, the proposed model can be used to evaluate the particle size measurement for parallel light hypothesis extinction method under divergent beam, and more importantly it can provide a novel idea for the improvement of coefficient matrix and error correction.

Key words: Particle sizing; Light extinction method; Monte Carlo method; Divergent beam; Inversion

OCIS Codes: 290.2200; 290.5820; 290.5850