

跨微米尺度混合颗粒粒径的同步测量方法

赵蓉¹, 潘科玮², 杨斌^{1*}, 平力¹, 蔡小舒¹

¹上海理工大学上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;

²上海航天动力技术研究所发动机技术发展研究室, 上海 201109

摘要 基于多波长消光法和图像法颗粒测量原理, 提出了跨微米尺度混合颗粒粒径同步测量方法, 建立了亚微米-十微米尺度颗粒粒径消光光谱反演算法及十微米以上尺度颗粒粒径图像处理算法; 采用分光棱镜, 搭建了消光光谱与背光图像同步测量装置, 利用 500 nm~76.9 μm 粒径范围内的 10 种标准颗粒配成跨微米尺度混合颗粒样品并开展实验研究。结果表明: 利用所提方法开展跨微米尺度混合颗粒粒径同步测量时, 亚微米-十微米尺度颗粒消光光谱与十微米以上尺度颗粒背光图像的相互影响可忽略, 可同步测量得到跨微米尺度混合颗粒粒径; 利用消光法和图像法分别开展亚微米-十微米、十微米以上尺度颗粒粒径测量, 与标准颗粒粒径相比, 相对误差均小于 8%, 且测量重复性较好, 这为跨微米尺度混合颗粒提供了一种有效的粒径测量手段。

关键词 测量; 多波长消光法; 图像法; 跨微米尺度; 混合颗粒; 粒径测量

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0712001

Synchronous Measurement Method of Trans-Micron Scale Mixed Particle Size

Zhao Rong¹, Pan Kewei², Yang Bin^{1*}, Ping Li¹, Cai Xiaoshu¹

¹Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Solid Rocket Motor Technology Development Research Center, Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China

Abstract Based on the principles of particle size measurement by multi-wavelength light extinction and image methods, a method for synchronous measurement of trans-micron scale mixed particle size is proposed, and the extinction spectral inversion algorithm for submicron-ten microns particle size and the image processing algorithm handling particle size over ten microns are established. The device for synchronously measuring extinction spectra and backlight images is established with a dispersion prism. The experiment with the trans-micron scale mixed particle samples prepared by ten kinds of standard particles with the sizes of 500 nm-76.9 μm is conducted. The results show that when the method is used to synchronously measure the trans-micron scale mixed particle size, the interaction between the extinction spectrum of submicron-ten microns scale particles and the backlight image of particles over ten microns can be ignored, and the trans-micron scale mixed particle size can be measured synchronously. The extinction method and the image method are respectively used to measure submicron-ten microns particle size and particle size over ten microns, the relative errors are less than 8% compared with those with the standard particle size, and the measurement repeatability is good, which provides an effective particle size measurement method for trans-micron scale mixed particles.

Key words measurement; multi-wavelength light extinction method; image method; trans-micron scale; mixed particles; particle size measurement

OCIS codes 120.5820; 290.5850; 350.4990; 110.2960

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2019-11-19; 录用日期: 2019-12-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0600601)、国家自然科学基金(51806144)、上海市自然科学基金(19ZR1454500)

* E-mail: yangbin@usst.edu.cn

1 引 言

跨微米尺度混合颗粒是指 $100\text{ nm}\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 粒径范围内数个颗粒尺寸量级同时存在的颗粒群,广泛存在于化工生产、环境科学、生物医学、材料制备等领域^[1-4]。亚微米-十微米尺度颗粒与十微米以上尺度颗粒的光散射特性完全不同,目前跨微米尺度混合颗粒粒径测量方法主要有:将跨微米尺度混合颗粒进行粒径分级后,采用光学颗粒计数对颗粒进行统计获得其粒径分布^[5];采用大角度光散射测量的方法拓宽颗粒粒径测量范围^[6];多方法组合测量衔接颗粒粒径范围^[7]。其中,多方法组合测量方法能发挥各方法在相应测量范围内的优势而被广泛关注。

消光法基于 Mie 散射理论,通过测量不同波长入射光穿过颗粒介质后的透射光强度来实现颗粒粒径分布反演^[8-9]。然而,当被测颗粒尺寸远小于或远大于入射波长时, Mie 散射理论可分别近似为瑞利散射理论和衍射理论,此时入射波长下的消光比已不是关于被测颗粒粒径的函数,因此,消光法的颗粒粒径测量范围通常为 $0.06\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ ^[10]。图像法具有测量直观,数据处理较为便捷等优点,为了避免光衍射失真,且受像素分辨率限制等,该方法主要应用于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上颗粒粒径测量^[11-13]。消光法和图像法在各自测量范围内具有精度高、重复性好等优

点,将两种方法进行组合,二者的粒径测量范围可得到较好的互补,这为两种方法组合测量跨微米尺度混合颗粒提供了可能。黎石竹等^[14]结合消光法与图像法特点,将消光法测量原理应用于图像像元 RGB 响应信号透射衰减处理中,并基于彩色图像 RGB 三波段消光法实现了亚微米-微米尺度颗粒粒径分布测量。但是,由于 RGB 三波段各自的响应波长范围较宽且相互叠加,其消光衰减是波段积分的结果,因此亚微米级颗粒粒径的精确反演较为困难。

本文结合消光法与图像法颗粒粒径测量原理,采用分光棱镜搭建了消光光谱与背光图像同步测量跨微米尺度混合颗粒系统,利用独立的多波长消光法与图像法同步获得了跨微米尺度混合颗粒粒径分布,并开展了不同微米尺度混合颗粒粒径分布的同步测量实验研究,为跨微米尺度混合颗粒提供了一种有效的粒径测量手段。

2 测量系统及原理

2.1 测量系统

结合多波长消光法与图像法粒径测量原理,采用半透半反分光棱镜,搭建了跨微米尺度混合颗粒粒径测量系统,如图 1 所示。该系统由光源、会聚透镜、光阑、比色皿、分光棱镜、准直透镜、光谱仪、远心镜头、互补金属氧化物半导体 (CMOS) 相机和计算机等构成。

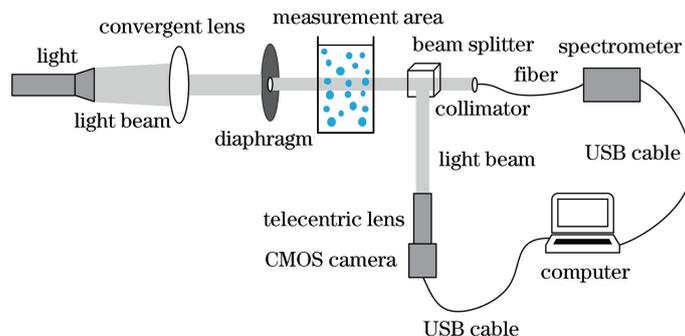


图 1 测量系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of measurement system

采用海洋光学 HR-4000 型光纤光谱仪采集不同波长的单色光强信号并将其送入计算机中进行数据处理;图像传感器采用的是深圳京航科技有限公司 JHUM120Bm 型黑白 CMOS 相机,最大帧率为 60 frame/s ,最短曝光时间为 $17.18\text{ }\mu\text{s}$,最长曝光时间为 1126.38 ms ,分辨率为 1280×960 , CMOS 传感器尺寸为 $1/3\text{ inch}$ ($1\text{ inch}=2.54\text{ cm}$),像元尺寸为 $3.75\text{ }\mu\text{m}$;镜头采用的是日本 VST 公司生产的型号

为 VS-TC2-110-LD 及 VC-TC4-65 的物方远心镜头,对应的放大倍率分别为 2 和 4,工作距离分别为 110 mm 和 64.5 mm ;光源选择功率为 20 W 的卤素灯光源;分光棱镜尺寸为 $25.4\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}$,分光比为 $50:50$;实验样品选用北京海岸鸿蒙生产的标称粒径分别为 $500, 700, 900\text{ nm}$ 及 $2.1, 3.1, 5.1, 9.7, 15.1, 51.0, 76.9\text{ }\mu\text{m}$ 的 10 种聚苯乙烯标准颗粒。

在实验系统布置中,需严格控制测量光束为平行光,以满足消光法及图像法的颗粒粒径测量需要。因此,卤素灯光源发射出的光束经会聚透镜会聚后,再经过光阑以控制光束的宽度,保证经过测量区域的光束为强度较高的平行光。分光棱镜将经过测量区域的平行光束分成相互垂直且强度相同的两路光束。其中,一路光束由准直透镜接收并传入光谱仪,测得待测区域的光强衰减信息,采集的数据经过通用串行总线(USB)传输进入计算机,再采用计算机编程对测得的光谱数据进行处理,从而反演出亚微米-十微米尺度颗粒粒径分布参数;另一路光束传入远心镜头,镜头接收待测区域两相流的颗粒图像并将其映射到 CMOS 相机靶面上,获得十微米以上尺度颗粒图像信息,经计算机编程软件处理后统计获得颗粒粒径分布结果,最终实现跨微米尺度混合颗粒粒径同步在线测量。

2.2 测量原理

采用多波长消光法对亚微米-十微米尺度的颗粒进行粒径测量,多波长消光法测量颗粒粒径的基本原理遵循 Lambert-Beer 定律,如图 2 所示,一束强度为 I_0 的平行光入射并经过含有均匀悬浮颗粒的测量区时,由于颗粒的散射与吸收作用,透射光强 I 将会发生一定程度的衰减,其衰减程度与颗粒大小和浓度等因素有关。

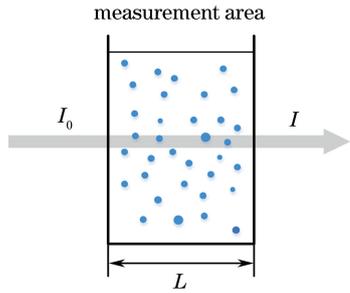


图 2 消光法测量原理示意图

Fig. 2 Schematic of extinction measurement

若待测颗粒为由 N_D 个单颗粒组成的单分散颗粒系,则其消光值为

$$\ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{\lambda_i} = -\frac{\pi}{4} L N_D D^2 Q_{\text{ext}}(\lambda_i, m, D), \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, S,$

式中: $(I/I_0)_{\lambda_i}$ 为消光值,由实验测量得到; L 为光通过颗粒系介质的距离; N_D 为颗粒总数; S 为选取波长数; λ_i 为入射光波长; i 为入射光波长序号; $Q_{\text{ext}}(\lambda_i, m, D)$ 为消光系数,是关于粒径 D 、波长 λ 及相对折射率 m 的函数,可由经典 Mie 理论计算得出。

然而,实际颗粒系一般为具有一定尺寸范围的多分散颗粒系,其消光值满足关系式

$$\ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{\lambda_i} = -\frac{3}{2} L N_D \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{Q_{\text{ext}}(\lambda_i, m, D)}{D} f(D) dD, \quad (2)$$

式中: $f(D)$ 为待求颗粒系的体积频度分布函数; D_{\min} 为待测颗粒系粒径范围下限; D_{\max} 为待测颗粒系粒径范围上限。

(2) 式为第一类 Fredholm 积分方程,直接积分计算较困难,采用数值积分将其离散化,则多个波长下的消光值可组成由矩阵表示的线性方程组:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} \mathbf{f}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E} = [\ln(I/I_0)_{\lambda_1}, \ln(I/I_0)_{\lambda_2}, \dots, \ln(I/I_0)_{\lambda_S}]^T$; 消光系数矩阵 \mathbf{A} 中各个元素可表示为 $A_{ij} = -3LN_{Dc_j}Q_{\text{ext}}(\lambda_i, m, D_j)/(2D_j)$, $j = 1, 2, 3, \dots, N$, 其中, N 为粒径分档数, c_j 为数值积分系数, D_j 为第 j 档颗粒粒径; $\mathbf{f} = [f(D_1), f(D_2), \dots, f(D_j), \dots, f(D_N)]^T$ 为待测颗粒系的粒径分布函数。

基于函数限制模式的非线性最小二乘优化算法,通过比较待测颗粒系在设定的粒径分布及多波长下算得的消光值 $E_{\text{cal},i}$ 与多波长下实测得的消光值 $E_{\text{mea},i}$, 建立目标函数 $F = \sum_{i=1}^S (E_{\text{mea},i} - E_{\text{cal},i})^2$, 进行反演计算找到最佳的待测参数,使得目标函数达到最小,即可得到待测颗粒系的粒径分布。

对于十微米以上尺度的颗粒,采用图像法进行颗粒粒径测量。图像法颗粒两相流测量原理如图 3 所示,采用背光照明方式,照射主光轴方向上的待测区域,使待测区域内的颗粒两相流图像可以由远心镜头接收并被完整映射到图像传感器靶面上,呈现亮背景、暗颗粒的图像效果。

颗粒图像的数字信号通过数据接口传输给计算机,由计算机进行图像采集和图像分析。通过计算机软件编程对采集到的初始颗粒图像进行一系列处理,使灰度图转化为二值图。

具体的处理流程如下:首先对原始图像进行灰度化处理,消除色彩因素,从而提高处理效率;然后对灰度图像进行滤波去噪、图像增强和图像填充等预处理工作,以保证后续分析的准确性;再通过二值化操作来突出颗粒特征信息,并对二值化图像进行粘连颗粒、不完整颗粒去除等再处理工作;最后获得能够准确反映被测颗粒信息的二值图,并从中提取出颗粒特征信息。二值图中包含两部分,像素值为

0 的黑色背景部分和像素值为 1 的白色颗粒部分。若待测颗粒为球形颗粒,则其颗粒像素直径 d_p 是与白色颗粒部分面积相同的圆的直径,颗粒测量直径 d 可由下式计算得到:

$$d = \frac{a}{n} \times d_p, \quad (4)$$

式中: a 为图像传感器的像元尺寸; n 为镜头放大倍率。

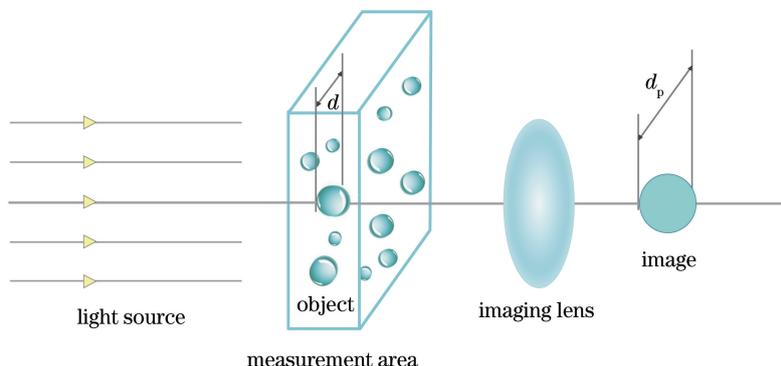


图 3 图像法颗粒两相流测量原理示意图

Fig. 3 Schematic of particle two-phase flow measurement by image method

3 实验数据及分析

3.1 跨微米尺度混合颗粒对消光法测量的影响分析

采用上述测量系统对标称粒径分别为 900 nm 和 51 μm , 折射率为 1.59 的聚苯乙烯标准颗粒进行粒径测量实验, 分散介质为蒸馏水, 其折射率为 1.33。实验前, 对配置的颗粒溶液进行充分搅拌, 使待测颗粒均匀分布在测量区域, 颗粒相对折射率 $m = 1.2$ 。

在进行消光法颗粒粒径测量实验时, 同一实验配置两份具有相同体积分数的 900 nm 标准颗粒样品溶液, 其中一个样品用来进行单一 900 nm 标准颗粒消光实验, 获得衰减透射光谱; 另一个样品再加入 51 μm 标准颗粒配置成 900 nm + 51 μm 混合标准颗粒样品, 并测得其衰减透射光谱。

典型初始光谱、加入单一 900 nm 标准颗粒及 900 nm + 51 μm 混合标准颗粒衰减透射光谱如图 4 所示。加入的 51 μm 标准颗粒的数量浓度较低, 明显看出其对 900 nm 标准颗粒衰减透射光谱影响较小。为了进行更精确验证, 采用非线性最小二乘优化算法对透射光谱曲线进行反演计算, 粒径分布反演结果如图 5 所示, 由单一 900 nm 标准颗粒样品溶液和 900 nm + 51 μm 混合标准颗粒样品溶液的光谱衰减反演获得的颗粒平均粒径 \bar{D} 分别为 882.5 nm、866.5 nm, 相对误差 R 分别为 1.94 %、3.72 %。可见, 该数量浓度下的 51 μm 标准颗粒对 900 nm 标准颗粒粒径测量的影响较小。

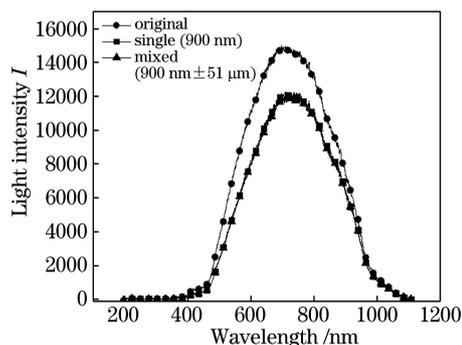


图 4 典型信号消光光谱曲线

Fig. 4 Typical signal extinction spectra

3.2 跨微米尺度混合颗粒图像处理过程与结果分析

在跨微米尺度混合颗粒实际同步测量中, 亚微米-十微米尺度颗粒的消光作用会导致十微米以上尺度颗粒成像背景响应值较小, 并且颗粒图像边缘响应值梯度较小, 必须对原始图像进行滤波去噪、灰度归一化处理、背景均匀化、图像填充等预处理以保证颗粒粒径测量准确性。在图像采集过程中, 信号的转换、传输、存储等加工变换会使得图像受到随机干扰信号即噪声的影响, 而这些噪声在进行图像处理时会被误处理为微小颗粒, 因此采用维纳滤波方法对图像进行滤波去噪, 结果如图 6(a) 所示。照明亮度不均匀会导致图像背景不均匀, 在后续对图像进行二值化时可能会丢失部分图像信息, 为避免光照不均匀造成的颗粒测量误差, 对图像进行灰度归一化处理, 如图 6(b) 所示。当清晰颗粒周围出现阴影时, 直接二值化处理会导致该颗粒及其周围

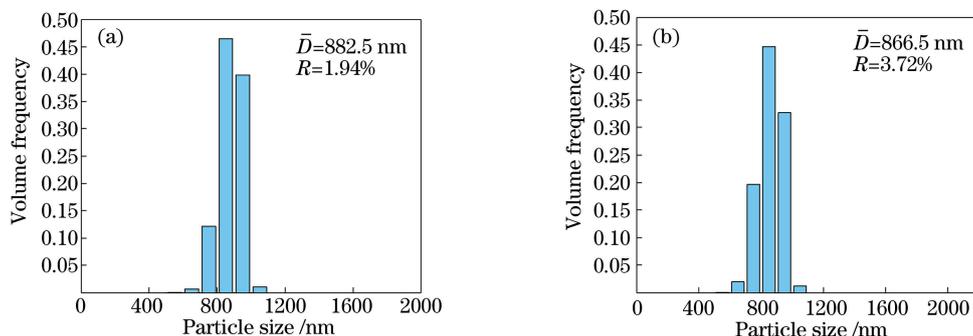


图 5 典型信号消光法颗粒粒径分布反演结果。(a) 单一 900 nm 标准颗粒样品溶液；
(b) 900 nm + 51 μm 混合标准颗粒样品溶液

Fig. 5 Inverse results of particle size distribution by typical signal extinction method.

(a) Single 900 nm standard particle sample solution; (b) mixed 900 nm + 51 μm standard particle sample solution

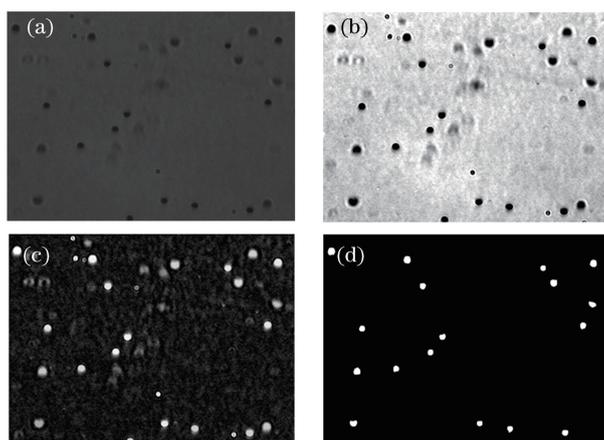


图 6 典型图像预处理过程。(a) 滤波去噪图片；(b) 灰度归一化图；(c) 背景均匀化图；(d) 二值化图

Fig. 6 Typical image preprocessing. (a) Filtered and de-noised image; (b) grayscale normalized image;
(c) background homogenized image; (d) binarized image

连通区域均被处理为目标颗粒,使得颗粒测量结果偏大,因此通过图像形态学对图像进行底帽变换,实现背景均匀化,如图 6(c)所示。由于颗粒的光学特性,部分颗粒图像中间存在亮斑,二值化后会出现孔洞,影响颗粒粒径的后续计算,需进行填充,且由于颗粒运动的随机性,颗粒之间有时会粘连或重叠,颗粒图像边缘会不完整,需除去这些粘连颗粒及不完整颗粒,由此最终处理得到的二值化图像如图 6(d)所示。通过统计图 6(d)所示颗粒二值化图像,可获得颗粒粒径分布测量结果,如图 7 所示。已知该标准颗粒的标称粒径为 51 μm,实验测得的平均粒径为 52.7 μm,相对误差为 3.33%,验证了上述处理过程对十微米以上尺度颗粒粒径测量的准确性。

3.3 跨微米尺度混合颗粒粒径测量结果分析

为了验证基于多波长消光法和图像法的跨微米尺度混合颗粒粒径同步测量方法的准确性,采用聚苯乙烯标准颗粒进行精度验证实验,选用粒径为

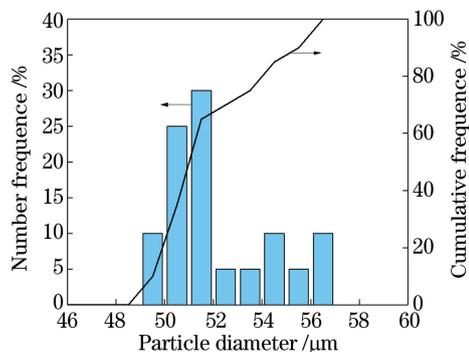


图 7 典型信号图像法颗粒粒径分布测量结果

Fig. 7 Measurement results of particle size distribution by typical signal image method

500,700,900 nm 的亚微米级颗粒和粒径为 2.1, 3.1,5.1,9.7,15.1,51.0,76.9 μm 的微米级颗粒,配置了表 1 所示的 9 种双粒径混合颗粒样品溶液。

测量结果的不确定度受到光源、光谱仪、工业相机等实验仪器稳定程度影响,因此每组样品溶液实

表 1 粒径测量结果及相对误差

Table 1 Particle size measurement results and relative errors

Sample number	Standard particle size		Multi-wavelength light extinction method		Image method	
	Submicron-ten microns	Over ten microns	Measurement result	Relative error /%	Measurement result	Relative error /%
1	900 nm	76.9 μm	(864.8 \pm 4.7) nm	3.91	(76.71 \pm 0.16) μm	0.25
2	900 nm	51.0 μm	(880.1 \pm 2.7) nm	2.21	(52.33 \pm 0.10) μm	2.61
3	900 nm	15.1 μm	(874.1 \pm 9.8) nm	2.88	(15.60 \pm 0.08) μm	3.31
4	500 nm	51.0 μm	(490.9 \pm 2.8) nm	1.81	(52.00 \pm 0.17) μm	1.96
5	700 nm	51.0 μm	(685.1 \pm 2.4) nm	2.13	(52.05 \pm 0.16) μm	2.05
6	2.1 μm	51.0 μm	(2.18 \pm 0.01) μm	3.59	(52.14 \pm 0.16) μm	2.24
7	3.1 μm	51.0 μm	(3.20 \pm 0.01) μm	3.38	(52.10 \pm 0.17) μm	2.16
8	5.1 μm	51.0 μm	(5.29 \pm 0.01) μm	3.65	(52.31 \pm 0.13) μm	2.57
9	9.7 μm	51.0 μm	(9.29 \pm 0.04) μm	4.19	(52.07 \pm 0.18) μm	2.10

验均选取 10 组光谱数据及颗粒图像进行分析,统计获得 10 组颗粒粒径测量结果的算数平均值,并分析其 A 类不确定度 u_A ,按 $(\bar{D} \pm u_A)$ 形式表达,并将实验测量结果与标准颗粒的标称粒径进行对比,如表 1 所示。可见结合多波长消光法与图像法颗粒粒径测量原理的跨微米尺度混合颗粒粒径测量系统具有较好的测量重复性,同时混合颗粒粒径测量结果与其标称粒径均较为接近,满足颗粒直径相对偏差小于 8% 的要求^[15]。

4 结 论

针对跨微米尺度混合颗粒粒径同步测量问题,提出了结合多波长消光法与图像法的颗粒粒径同步测量方法,采用分光棱镜搭建了颗粒消光光谱与背光图像同步测量系统,建立了算法并分析了待测颗粒的消光光谱和图像信息,实现了跨微米尺度混合颗粒的同步测量。选用粒径为 500, 700, 900 nm 的亚微米级颗粒及粒径为 2.1, 3.1, 5.1, 9.7, 15.1, 51.0, 76.9 μm 的微米级颗粒,进行了 9 组双粒径跨微米尺度混合颗粒样品溶液的测量实验。结果显示,结合消光法与图像法颗粒粒径测量原理的跨微米尺度混合颗粒粒径测量系统具有较好的测量重复性,且消光光谱粒径反演结果及图像法的粒径测量结果较其标称粒径的误差均小于 8%,满足国家标准物质局要求。

参 考 文 献

[1] Zhao Y C, Zhang J Y, Wei F, et al. Experimental study on agglomeration of submicron particles from coal combustion[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2007, 58(11): 2876-2881.

赵永椿, 张军营, 魏凤, 等. 燃煤超细颗粒物团聚促进机制的实验研究[J]. 化工学报, 2007, 58(11): 2876-2881.

- [2] Lang H M, Qin K, Yuan L M, et al. Particles size distributions and aerosol optical properties during haze-fog episodes in the winter of Xuzhou[J]. China Environmental Science, 2016, 36(8): 2260-2269.
郎红梅, 秦凯, 袁丽梅, 等. 徐州冬季雾-霾天颗粒物粒径及气溶胶光学特性变化特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2260-2269.
- [3] Luo F S, Han A J, Yang Y, et al. Application of superfine powder technology in TCM[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2001, 32(10): 941-942.
罗付生, 韩爱军, 杨毅, 等. 超细粉体技术在中药行业中的应用[J]. 中草药, 2001, 32(10): 941-942.
- [4] Chen J. Synthesis and luminescence properties of rare earth doped silica nano and micro materials [D]. Changchun: Jilin University, 2018: 30-122.
陈杰. 稀土掺杂二氧化硅纳/微米材料的制备及发光性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018: 30-122.
- [5] Xu L, Okada K, Zhang P, et al. An observational study of physical and chemical characteristics of atmospheric aerosol particles from late spring to early autumn over the Beijing area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(3): 401-411.
许黎, 冈田菊夫, 张鹏, 等. 北京地区春末—秋初气溶胶理化特性的观测研究[J]. 大气科学, 2002, 26(3): 401-411.
- [6] Li C, Cai X S, Zhou W, et al. Online measurement method for ultra-low soot emission based on imaging light scattering[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(3): 208-213.
李琛, 蔡小舒, 周骛, 等. 基于图像光散射法的超低排放烟尘在线测量方法[J]. 动力工程学报, 2019,

- 39(3): 208-213.
- [7] Liu H, Zhou W, Cai X S, et al. Wet steam measurement for steam turbines based on RGB three wavelength bands light extinction and single frame single exposure imaging method [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(10): 816-823.
刘浩, 周骛, 蔡小舒, 等. 基于RGB三波段消光法和单帧单曝光图像法的汽轮机湿蒸汽测量实验研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(10): 816-823.
- [8] Zhang H M. Research of multi-wavelength extinction method for particle size distribution[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015: 1-4.
张昊梅. 多波长消光法粒径测量方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015: 1-4.
- [9] Onofri F R A, Barbosa S, Touré O, et al. Sizing highly-ordered buckyball-shaped aggregates of colloidal nanoparticles by light extinction spectroscopy [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 126: 160-168.
- [10] Cai X S, Su M X, Shen J Q, et al. Particle size measurement techniques and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010, 115-149.
蔡小舒, 苏明旭, 沈建琪, 等. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 115-149.
- [11] Gao L J, Yan Y, Lu G, et al. On-line measurement of particle size and shape distributions of pneumatically conveyed particles through multi-wavelength based digital imaging [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 27: 20-28.
- [12] Yang B, Xiang Y H, Liu H, et al. Discussion on special form of coarse water in wet steam flow of a steam turbine[J]. Thermal Turbine, 2015, 44(4): 249-252.
杨斌, 项延辉, 刘浩, 等. 汽轮机湿蒸汽特殊形态二次水滴探讨[J]. 热力透平, 2015, 44(4): 249-252.
- [13] Carter R M, Yan Y. An instrumentation system using combined sensing strategies for on-line mass flow rate measurement and particle sizing [C] // Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 18-20, 2004, Como, Italy. New York: IEEE, 2004: 864-867.
- [14] Li S Z, Cai X S, Gao W, et al. Measuring fine particle size with RGB three wavelength bands light extinction method[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0712004.
黎石竹, 蔡小舒, 高伟, 等. RGB三波段消光法测量细微颗粒粒度分布研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0712004.
- [15] Wang L, Sun X G. Research on pattern search method for inversion of particle size distribution in spectral extinction technique [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 618-622.
王丽, 孙晓刚. 基于模式搜索的光谱消光粒径分布反演算法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 618-622.