

RGB 三波段消光法测量细微颗粒粒度分布研究

黎石竹 蔡小舒 高伟 刘浩

上海理工大学 颗粒与两相流测量研究所, 上海 200093

摘要 提出了采用彩色相机 RGB 信号实现三波段消光法测量微米级颗粒粒度分布的方法。当一束平行白光入射到弥散细微颗粒时, 测量不同波长的透射光强信号, 用多波长消光法理论反演可以测得被测弥散细微颗粒粒度。当用彩色相机拍摄透射光, 得到的图像实际是 RGB 三个波段的透射光信号, 该信号与相机的 RGB 响应曲线、光源光谱特性、被测颗粒粒径及颗粒浓度有关。对 RGB 三波段信号用消光法理论进行分析和反演计算, 可以得到细微颗粒的粒度分布。通过数值模拟与实验验证, 表明用彩色相机 RGB 三波段消光法可以测量亚微米到 $3\ \mu\text{m}$ 大小的颗粒粒度分布。将该方法与图像法颗粒粒度测量相结合, 可以将彩色相机测量颗粒粒度的范围拓展到从亚微米到数百微米。

关键字 测量; 彩色相机; 三波段消光法; RGB; 颗粒粒度

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0712004

Measuring Fine Particle Size with RGB Three Wavelength Bands Light Extinction Method

Li Shizhu Cai Xiaoshu Gao Wei Liu Hao

Institute of Particle and Two-phase Flow Measurement, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract A camera based RGB three wavelength bands light extinction for fine particle size measurement is proposed. When a particle system is illuminated by a parallel white light, the transmitted light of different wavelengths can be analyzed by the light extinction theory to calculate the particle size. Using a color camera as a detector, the transmitted light is recorded in RGB three wavelength bands. The recorded signal is related to the camera's RGB response curve, light source spectrum characterization, particle size and concentration. Analyzing the RGB three wavelength bands signal with the light extinction theory, the particle size distribution can be determined. The simulations and experiments are carried out. And the results show the feasibility of this method. This approach combining image measurement with the light extinction method, enable the camera based particle size measurement ranged from sub micrometer to hundreds micrometers.

Key words measurement; color camera; three wavelength bands; light extinction; RGB; particle size

OCIS codes 120.1880; 040.1520; 290.2200

1 引言

多波长消光法测量颗粒粒度分布已得到广泛应用^[1-4], 彩色数字相机近年来在图像法测量颗粒粒度分布方面也得到了越来越多的应用^[5]。但二者的测量范围不同, 受光散射理论的限制, 多波长消光法的测量范围在大约 $0.1\sim 5\ \mu\text{m}$ 左右^[6], 而图像法测量受相机分辨率限制, 测量范围从大约 $10\ \mu\text{m}$ 到数百微米, 小于 $10\ \mu\text{m}$ 后测量误差会大幅度增加。在许多颗粒在线测量应用中, 被测颗粒的粒度分布范围可能正好跨越这两种方法的测量范围, 从亚微米到数百微米, 如在汽轮机湿蒸汽研究中, 存在有大量自发凝结产生的大约 $0.5\sim 2\ \mu\text{m}$ 大小的一

收稿日期: 2014-12-8; 收到修改稿日期: 2015-02-12

基金项目: 上海市科委科研项目(13DZ2260900)

作者简介: 黎石竹(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事两相流测量研究, E-mail: lszxtt@foxmail.com

导师简介: 蔡小舒(1955-), 男, 博士, 教授, 主要从事两相流、颗粒测量方面的研究。E-mail: usst_caixs@163.com(通信联系人)

次水滴,以及少量数十微米到数百微米的二次水滴^[7]。这就需要发展可以满足这类颗粒粒度测量的方法。

图像法由于具有“眼见为实”的特点,且可以测量被测颗粒的形貌,近年随电荷耦合元件(CCD)技术的飞速发展而得到迅速发展,尤其是彩色图像法,还可以提供更多的颗粒形貌等信息,促进了图像法测量颗粒粒度的发展。多波长消光法测量颗粒粒度的基本原理是颗粒在不同波长光入射下会散射和吸收入射光,其透射光的衰减(消光)与被测颗粒的粒度分布和浓度有关,可以用米氏光散射理论描述。而彩色 CCD 接收到的透射光信号同样是消光信号,只是 RGB 三个波段光的消光信号。对其用米氏光散射理论进行分析,有可能得到细微颗粒的粒度分布。

2 RGB 三波段消光法测量原理

RGB 三波段消光法测量原理建立多波长消光法以及 CCD 彩色信号测量基础之上,在提出 RGB 三波段消光法之前,先简单介绍消光法以及 CCD 彩色信号形成原理。

2.1 消光法颗粒测量原理

消光法基本原理为:强度为 I_0 、介质中波长为 λ 的光入射到多分散颗粒系,出射光强度为 I ,如图 1 所示。

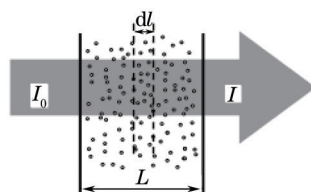


图 1 消光法测量原理图

Fig.1 Extinction measurement schematics

由朗伯-比尔定理可得到如下光强衰减:

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{\pi}{4} L \int_a^b N(D) D^2 k_{\text{ext}} dD, \quad (1)$$

式中 L 为光程, $N(D)$ 为颗粒粒径分布函数, D 为颗粒粒径, k_{ext} 为消光系数,可以由米氏光散射理论计算得到。

多波长消光法测量多个波长入射到同一试样的入射光强 I_0 和透射光强 I ,得到:

$$\ln(I/I_0)_{\lambda_i} = -\frac{\pi}{4} L \int_a^b N(D) D^2 k_{\text{ext},\lambda_i} dD, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

在实际测量中,如不需测量颗粒粒径分布,仅需测量颗粒平均粒度时,可以用索特尔平均粒径 D_{32} 来代替粒径分布函数,此时(2)式简化为:

$$\ln(I/I_0)_{\lambda_i} = -\frac{\pi}{4} L N D_{32}^2 k_{\text{ext},\lambda_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

对于同一被测颗粒系,式中的 D_{32} 和 N 应该相同,将多个波长的测量结果相比,可得:

$$\frac{\ln(I/I_0)_{\lambda_i}}{\ln(I/I_0)_{\lambda_j}} = \frac{k_{\text{ext},\lambda_i}}{k_{\text{ext},\lambda_j}}, \quad i \neq j; \quad i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

(4)式左边是测量值,当折射率和测量光波长已知时,右边消光系数仅是待求值 D_{32} 的函数。这样就可以通过测量多对波长下的入射光强和透射光强比来反演计算颗粒粒径^[6]。

2.2 CCD 相机 RGB 信号

在采用彩色 CCD 作为传感器中, CCD 一般是单片面阵元件,通过在 CCD 像元表面装有按 Bayer 规律排列的基色滤光片实现 RGB 三基色分离;每个像元只对一种基色进行感光,通过与周围其他 2 种基色信号插值得到彩色图像。图 2 是按 Bayer 规律排列的 CCD 的 RGB 像元^[8]。目前,采用面阵 CCD 获取彩色图像的方式广泛应用于数码相机及遥感成像设备^[9]。不同公司的彩色 CCD 三基色滤光片的光谱特性不同,图 3 显示在三波段消光法测量实验中采用的型号为 IMx-720G CCD 面阵的响应曲线。

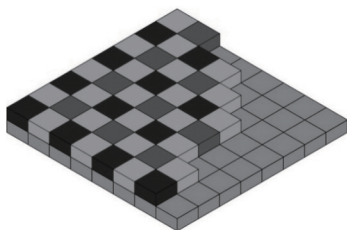


图2 按 Bayer 规律排列 CCD 的 RGB 像元示意图

Fig.2 CCD RGB pixel arrangement diagram according to Bayer law

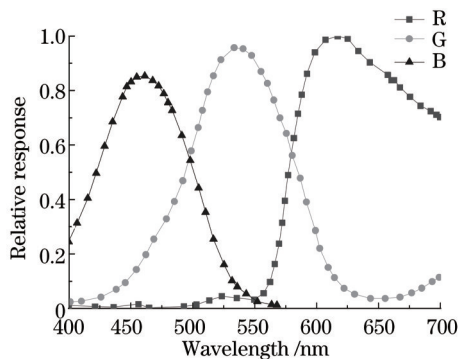


图3 CCD 的 RGB 响应曲线

Fig.3 CCD RGB response curves

2.3 RGB 三波段消光法

RGB 三波段消光法的测量原理与多波长消光法类似,如图 4 所示

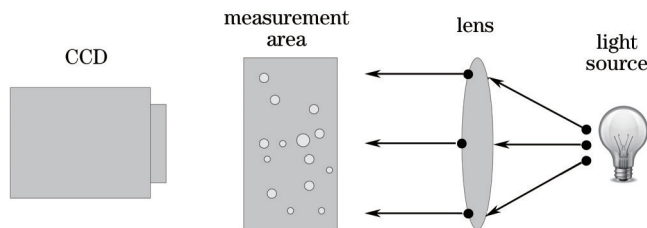


图4 RGB 三波段消光法的测量原理示意图

Fig.4 Schematic measurement of RGB three wavelength bands light extinction method

在测量区没有颗粒时,白光光源发出的光经透镜形成平行光入射,经过测量区域照射到 CCD 相机,相机在每一个像素点上会产生响应电荷数,该电荷数与光源光谱、CCD 的响应曲线有关,其关系式为(5)式:

$$I_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) I_{\lambda} d\lambda, \tag{5}$$

式中 I_0 为 CCD 得到的光强值; λ_1 为光源波长和 CCD 量子效率曲线波长下限值; λ_2 为光源波长和 CCD 量子效率曲线波长上限值; $f(\lambda)$ 为 CCD 的响应曲线; I_{λ} 为光源在不同波长下的光强值。

在有颗粒时,光源发出的光经过测量区域,原始入射光会衰减,这时 CCD 每个像素点在同样曝光时间下产生的电荷数会减少。

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) I_{\lambda_i} d\lambda, \tag{6}$$

式中 I 为 CCD 得到的经过颗粒散射之后的光强值; I_{λ_i} 为不同波长光经过颗粒散射之后的光强值。

颗粒散射的消光系数可以用米氏散射理论计算^[6]。对于单一粒径颗粒群,引入郎伯-比尔公式,由(2)式、(5)式和(6)式可以得到

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{\pi}{4} D^2 \int_{\Delta\lambda} f(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m) d\lambda. \tag{7}$$

对于彩色 CCD,可由 R,G,B 的响应曲线得到相应三个公式:

$$\begin{cases} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_R = -\frac{\pi}{4} D^2 \int_{\Delta\lambda} f_R(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m) d\lambda \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_G = -\frac{\pi}{4} D^2 \int_{\Delta\lambda} f_G(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m) d\lambda \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_B = -\frac{\pi}{4} D^2 \int_{\Delta\lambda} f_B(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m) d\lambda \end{cases} \quad (8)$$

而对于有分布粒径的颗粒群,有

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{\pi}{4} L \int_{\Delta D} D^2 N(D) \int_{\Delta\lambda} f(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m) d\lambda dD, \quad (9)$$

对此式离散化处理,可得:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{\pi}{4} L \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]. \quad (10)$$

同理,对于彩色 CCD,可由 R,G,B 的响应曲线得到三个离散化方程,

$$\begin{cases} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_R = -\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_R}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)] \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_G = -\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_G}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)] \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_B = -\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_B}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)] \end{cases} \quad (11)$$

将(11)式各式分别相除,得到如下方程组

$$\begin{cases} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_R = \frac{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_R}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]}{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_G}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]} \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_G = \frac{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_G}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]}{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_R}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]} \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_B = \frac{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_B}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]}{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_G}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]} \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_R = \frac{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_R}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]}{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_B}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]} \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_G = \frac{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_G}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]}{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_B}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]} \\ \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_B = \frac{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_B}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]}{-\frac{\pi}{4} \sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f_{\lambda_R}(\lambda) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]} \end{cases} \quad (12)$$

同时满足这三个方程的颗粒粒径 D , 就是被测颗粒的粒径。这就建立起了 RGB 三波段消光信号与被测颗粒粒度间的关系, 可以将彩色 CCD 作为一个传感器, 根据测得的 3 个波段光强值的比值反演计算得到颗粒粒径。

2.4 三波段消光法模拟分析

首先对 RGB 三波段消光法理论进行数值模拟, 模拟 CCD 在不同粒径下所测量的光强衰减 $\ln(I/I_0)$ 。选择 IMI tech 公司生产的 IMx-720G 型号 12 位彩色相机, CCD 型号为 ICX274 AL/AQ, 其响应曲线图 3 所示, 光谱响应范围在 400~700 nm 之间。采用白光 LED 作为光源, 其光谱曲线见图 5。

选择聚苯乙烯标准颗粒作为被测颗粒, 折射率为 1.59, 其在水中的相对折射率为 1.195。模拟在上述白光 LED 光源下, 颗粒粒径范围 0.1~5 μm 内不同粒径颗粒, 代入(12)式, 得到彩色 CCD $\frac{\ln(III_0)_R}{\ln(III_0)_G}$, $\frac{\ln(III_0)_R}{\ln(III_0)_B}$, $\frac{\ln(III_0)_G}{\ln(III_0)_B}$ 的模拟信号, 如图 6 所示。

由图 6 可见, 在小于 0.5 μm 处, 曲线存在振荡现象, 这表明在此区域会存在解的多值性。因此确定 RGB 三波段消光法的测量下限在 0.5 μm ; 在 0.5~2.8 μm 区域, 曲线区分明显, 通过测量值可以较为容易地反演计算出颗粒粒径; 2.8~3.6 μm 区域, 曲线分布集中, 需要比较精确的测量值才可以反演得出准确的颗粒粒径; 而 3.6~5 μm 区域, 曲线分布与 0.6~2 μm 区域相类似, 测量结果反演计算结果很容易落入 0.6~2.0 μm 之间,

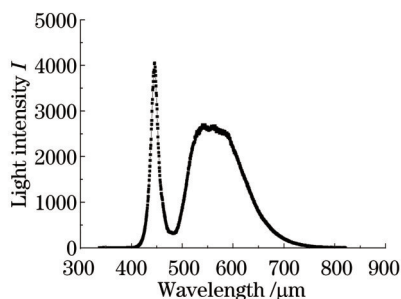


图5 白光LED光谱

Fig.5 White LED spectrum

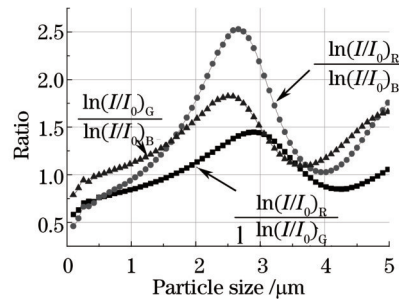


图6 0.1~5 μm单一粒径 CCD响应电荷数自然对数比值

Fig.6 CCD responding charge number ratio of natural logarithm of single particle from 0.1 μm to 5 μm

得到错误的结果。为此,限制 RGB 三波段消光法测量颗粒的范围在大约 0.5~3.6 μm 之间,可以保证得到的解是唯一解。在 0.5~5 μm 范围内,增加被测颗粒的粒度约束条件,可以得到唯一解。

2.5 RGB 三波段消光法反演计算模拟

对于 RGB 三波段消光法反演计算采用非负最小二乘法(NNLS)进行反演求解(11)式。这一问题归结为解矩阵方程 $TW = E$, 同时满足下列条件:

$$\begin{cases} \|TW - E\| \rightarrow \min \\ W \geq 0 \end{cases}, \quad (13)$$

式中 $W \geq 0$ 表示非负数解,即颗粒粒径必须大于等于零。

对于单分散颗粒,采用非负最小二乘法的反演公式如下:

$$\sum_{i,j=1}^3 \left\{ \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_i - \frac{-\pi}{4} LD^2 \sum_{\Delta\lambda} f(\lambda_i) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_j - \frac{-\pi}{4} LD^2 \sum_{\Delta\lambda} f(\lambda_j) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)} \right\}^2 \rightarrow \min, \quad (14)$$

$i \neq j.$

对于有分布的颗粒群,NNLS 的反演公式如下:

$$\sum_{i,j=1}^3 \left\{ \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_i - \frac{\sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f(\lambda_i) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)_j - \frac{\sum_{\Delta D} [D^2 N(D) \sum_{\Delta\lambda} f(\lambda_j) I(\lambda) E_{\text{ext}}(\lambda, D, m)]}} \right\}^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

$i \neq j.$

模拟 0.4~3.0 μm 不同粒径颗粒的 CCD 响应值,采用 NNLS 反演计算,计算结果见图 7、图 8 和图 9。

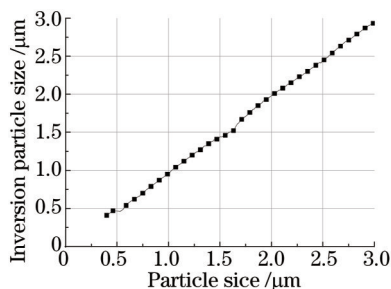


图7 粒径反演计算结果

Fig.7 Particle inversion results

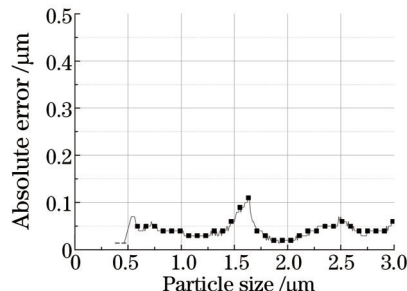


图8 粒径反演计算绝对误差

Fig.8 Particle inversion absolute error

由图 8 可见在粒径为 1.6 μm 时,绝对误差达到最大,约为 0.11 μm。从图 9 可得 0.5 μm 时相对误差最大,超过 10%。在 0.4~3 μm 范围相对误差可控制在 15% 以内,在 1~3 μm 粒径范围测量相对误差小于 10%。在汽轮机湿蒸汽测量中,一次水滴的粒径集中于 1~2 μm 附近,因此,测量误差小于 10%,可以满足要求。

实际存在颗粒的粒度大都是有分布的,模拟 R-R 分布函数情况下的反演计算,模拟中分别假设 $D=1 \mu\text{m}$ 和 $D=2 \mu\text{m}$, 分布参数 $k=7, 8, \dots, 12$, 利用(15)式反演计算。表 1 和表 2 分别给出了 $D=1 \mu\text{m}$ 和 $D=2 \mu\text{m}$ 的反演计算结果。

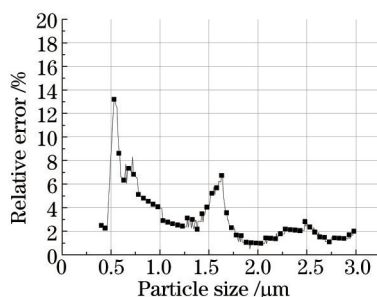


图9 粒径反演计算相对误差

Fig.9 Particle inversion relative error

表1 $D=1 \mu\text{m}$ 反演计算结果

Table 1 $D=1 \mu\text{m}$ inversion results

k	7	8	9	10	11	12
Setting D_{32}	0.9043	0.9177	0.9279	0.9358	0.9421	0.9474
Inversion results D_{32}	0.965	0.965	0.965	0.9716	0.9717	0.9733
Relative error	6.7065	5.1515	4.0037	3.8252	3.1331	2.7399

表2 $D=2 \mu\text{m}$ 反演计算结果

Table 2 $D=2 \mu\text{m}$ inversion results

k	7	8	9	10	11	12
Setting D_{32}	1.8087	1.8354	1.8557	1.8716	1.8843	1.8948
Inversion results D_{32}	1.935	1.9333	1.9333	1.9333	1.9367	1.9367
Relative error	6.983	5.3331	4.1834	3.3008	2.7793	2.2121

由表1和表2可知,对于R-R分布函数的颗粒群,利用RGB三波段消光法测量其索泰尔直径 D_{32} ,其相对误差可控制于7%以内。

3 实验验证

实验选用 $2.1 \mu\text{m}$ 和 960 nm 聚苯乙烯标准颗粒, 3 W 白光LED光源,相机为IMI tech公司生产的型号为IMx-720G的12位彩色相机,曝光时间 $20 \mu\text{s}$ 。表3和表4分别是 $2.1 \mu\text{m}$ 标准颗粒实验中测量区没有颗粒和存在颗粒时获得的CCD响应矩阵的部分数据。

表3 未加入 $2.1 \mu\text{m}$ 标准颗粒时 CCD 响应矩阵(部分数据)

Table 3 CCD response matrix of not added $2.1 \mu\text{m}$ standard particles (partial data)

2886	947	2888	2969	2938	1210	2615	2981
2975	1073	2773	2899	3275	1407	2662	2954
2952	953	2855	2980	3115	1177	2615	2965
3054	1045	2769	2930	3334	1363	2619	3022
2813	983	2812	2927	3043	1175	2645	3014
3077	1083	2795	2951	3364	1411	2686	3075
2926	1005	2908	2911	2953	1157	2722	3039
3112	1094	2827	2957	3317	1490	2555	3045

表4 加入 $2.1 \mu\text{m}$ 标准颗粒之后 CCD 响应矩阵(部分数据)

Table 4 CCD response matrix of added $2.1 \mu\text{m}$ standard particles (partial data)

2376	751	2300	2602	2500	998	2151	2475
2470	848	2208	2348	2761	1148	2144	2467
2405	818	2373	2484	2509	931	2061	2459
2548	862	2251	2443	2716	1176	2131	2457
2321	820	2292	2517	2492	998	2119	2454
2591	925	2277	2419	2712	1183	2143	2430
2302	832	2345	2518	2487	1014	2072	2495
2562	946	2263	2403	2751	1130	2090	2514

表5 和表6 分别是 960 nm 标准颗粒实验中测量区没有颗粒和存在颗粒时获得的 CCD 响应矩阵的部分数据。

表5 未加入 960 nm 标准颗粒时 CCD 响应矩阵(部分数据)

Table 5 CCD response matrix of not added 960 nm standard particles (partial data)

2813	1322	2777	2905	2893	1485	2464	2919
2966	1329	2676	2848	3179	1713	2517	2865
2824	1314	2708	2845	2933	1523	2488	2807
2990	1369	2607	2821	3206	1784	2476	2793
2887	1314	2603	2916	2896	1592	2369	2923
3023	1374	2570	2837	3246	1756	2453	2869
2881	1286	2700	2926	2989	1511	2528	2863
2968	1513	2667	2859	3091	1785	2414	2896

表6 加入 960 nm 标准颗粒之后 CCD 响应(部分数据)

Table 6 CCD response matrix of added 960 nm standard particles (partial data)

2237	1061	2106	2335	2312	1187	2011	2326
2455	1098	2066	2266	2585	1416	2002	2273
2325	1048	2140	2413	2328	1233	1939	2376
2438	1140	2030	2285	2567	1481	1942	2251
2315	1088	2157	2371	2385	1211	2017	2320
2413	1127	2016	2312	2520	1462	1935	2272
2256	1117	2133	2291	2342	1271	2042	2362
2422	1167	2068	2287	2563	1446	2017	2307

由上述测量得到的 CCD 响应可以看出,由于加入标准颗粒,每个像素的响应电荷数(即光强信号)均有所衰减,对这些光强信号采用 NNLS 反演计算,得到下述结果,2 者的测量误差小于 10%。

表7 实验测量结果

Table 7 Experimental results

Particle size	Inversion of particle size	Error
2.1 μm	1.9 μm	9.50%
960nm	1044nm	8.75%

4 结 论

近年 CCD 传感器技术的发展,为颗粒测量提供了非常便利与直观的测量手段,可以得到颗粒的粒度大小与形貌特征,但是对于小于 3 μm 的颗粒,由于 CCD 传感器的分辨率原因等,目前难以准确测量。根据多波长消光法测量原理,结合彩色 CCD 的 RGB 成像原理,提出采用彩色 CCD 传感器测量细微颗粒粒度的三波段 RGB 消光法,通过数值模拟和实验验证了此方法的可行性。采用三波段 RGB 消光法的测量范围从 0.5 μm 到 5 μm 左右,正好与图像法颗粒粒度测量范围相衔接,扩展了图像法测量颗粒的粒径下限,实现彩色相机从亚微米到数百微米颗粒的粒度测量。

参 考 文 献

- 1 Mingxu Su, Feng Xua, Xiaoshu Cai, *et al.*. Optimization of regularization parameter of inversion in particle sizing using light extinction method[J]. China Particuology, 2007, 5(4): 295-299.
- 2 Q Zhang, P A Rubini. Modelling of light extinction by soot particles[J]. Fire Safety Journal, 2011, 46(3): 96-103.
- 3 D Álvarez, M Castillo, F A Payne, *et al.*. Application of light extinction to determine stability of beef emulsions[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(2): 309-315.
- 4 Uwe Kätzel, Frederic Gruy, Frank Babick, *et al.*. Light extinction at agglomerates of spheres—a practical test on the submicroscale[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 289(1): 116-124.
- 5 Wu Xuecheng, Wang Qinhuai, Luo Zhongyang, *et al.*. Measurement of particle rotation in CFB riser with high-speed digital video

camera technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 72-77.

吴学成, 王勤辉, 骆仲泱, 等. 高速数字摄影应用于流化床内颗粒旋转特性的测试[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 72-77.

6 Cai Xiaoshu, Su Mingxu, Shen Jianqi, *et al.*. Particle Size Measurement Techniques and Applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.

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.

7 Cai Xiaoshu, Wang Lili, Ouyang Xin, *et al.*. A novel integrated probe system for measuring the two phase wet steam flow in steam turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(6): 743-746.

蔡小舒, 汪丽莉, 欧阳新, 等. 一种新型的测量汽轮机内湿蒸汽两相流的集成化探针系统[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(6): 743-746.

8 Yang Yongming, Li Qingjun, Li Wenming, *et al.*. Modulation transfer function for color area CCD based on Bayer filtering[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1611-1618.

杨永明, 李清军, 李文明, 等. 基于Bayer滤波的彩色面阵CCD调制传递函数[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1611-1618.

9 Gérard Gouesbet, Gérard Gréhan. Generalized Lorenz-Mie Theories[M]. Berlin: Springer, 2011.

栏目编辑: 刘丰瑞