

基于 Gregory 理论的光脉动法颗粒在线测量中背景光强的估算

秦授轩 蔡小舒 马力 于彬

(上海理工大学颗粒与两相流测量研究所, 上海 200093)

摘要 用光脉动法在线测量颗粒浓度和粒度时, 必须预知原始光强, 但在在线测量中原始光强不仅难以测得, 而且极易受环境影响产生变化。假设在短时间间隔内原始光强不发生变化, 基于 Gregory 的光脉动法理论, 可以得到颗粒数目浓度比。结合不同时刻浓度比以及透射光信号的标准偏差和均值, 可以推导出原始透射背景光强。实验结果证明, 该方法得到的原始透射背景光强和预先测得的原始透射背景光强吻合得很好, 最大偏差小于 1.1%。

关键词 测量; 在线测量; 入射光强; 颗粒浓度; 光散射; 光脉动法

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0812007

Evaluation of Incident Light Intensity Based on Gregory Theory of Light Fluctuation for In-Line Particle Sizing Measurement

Qin Shouxuan Cai Xiaoshu Ma Li Yu Bin

(*Institute of Particle & Two-Phase Flow Measurement Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract For in-line measurement of particle size and concentration based on the light fluctuation method, the intensity of incident light must be pre-detected. However, it is very difficult to measure the incident light intensity during the in-line measurement because the incident light intensity is easily affected by many factors. A novel method based on Gregory's light fluctuation method is proposed. The relation among the intensity of incident light, the ratio of particle concentrations at different time, the standard deviation and the mean value of the intensity of transmitted light is established. With those measurable parameters the intensity of incident light may be obtained. Experimental results agree well with the pre-detected value of the intensity of incident light, and the maximum deviation is less than 1.1%.

Key words measurement; in-line measurement; incident-light intensity; particle concentration; light scattering; light-fluctuation method

OCIS codes 120.5820; 290.5850; 290.2200

1 引 言

颗粒粒度和浓度的在线测量在许多领域有着十分重要的作用, 煤粉的粒度和浓度对于电厂锅炉燃烧优化, 提高燃烧效率, 降低 NO_x 排放有很大影响。燃烧器之间煤粉浓度不均匀则燃烧不能很好组织, 会

引起火焰偏斜、结焦、燃烧不稳和 NO_x 增加等^[1]。水泥厂球磨机出来的水泥粒度大小与水泥的标号直接相关^[2]。汽车发动机中汽油或柴油雾化特性与发动机的燃烧效率和排放密切相关^[3]。在粉体制备行业, 通过对制粉设备出口处粒度的在线检测, 可以实时

收稿日期: 2011-01-25; **收到修改稿日期**: 2011-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50836003)和上海市科委项目(10540501000)资助课题。

作者简介: 秦授轩(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事颗粒和两相流测量等方面的研究。E-mail: shaani@163.com

导师简介: 蔡小舒(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事颗粒、两相流测量及大气排放监测等方面的研究。

E-mail: usst_caixs@163.com

地控制气流磨的加工时间,使产品加工过程最优化^[4]。在环保行业中,通过对除尘过滤器前后细小颗粒的浓度及粒度的在线监测,可以实时地了解除尘效率^[5]。又例如在石油化工行业中需要对进入烟气透平的高温烟气中含有的催化剂颗粒粒度和浓度进行监测,以避免催化剂颗粒对烟气透平的磨损^[6]。

近年来,多种基于光散射原理的颗粒在线测量方法得到发展^[7],如前向光散射测量方法、多波长消光法、光脉动法、透射率起伏频谱法^[8]和光散射计数法^[9,10]等。在采用光散射方法进行颗粒粒度和浓度在线检测时面临的一大困难是如何准确测量原始透射背景光(指测量区中没有被测颗粒时的透射光强)。一般原始光强都是预先离线测得。但在监测期间,由于各种复杂因素会造成实际透射背景光强与预测的背景光强不一致。为解决该问题很多人做了许多努力,找到一些方法^[11,12],但这些方法在很多情况下并不适用。如在线监测煤粉粒度和浓度时,不仅仪器需要长时间运行,而且工况恶劣(被测煤粉温度很高,环境工作温度在冬季和夏季最大可以相差 60 °C 以上)。在这种情况下不解决透射光强的准确测量问题,将会严重影响测量的准确性和精度^[13]。

与其他光散射方法相比,光脉动法以其测量原理相对简单,易于实现在线测量,可以同时测量颗粒的粒度和浓度而成为一种新的在线测量方法。但光脉动法也需要测量原始光强。针对这个问题,本文结合光脉动法测量原理,提出了一种只需要测得两组不同时间序列透射光信号就可以估算原始光强的方法。

2 原理及算法

2.1 消光法原理

由消光法测粒原理可知^[14],当一束平行单色光照射到被测颗粒时,由于颗粒对光的散射和吸收,透射光的光强将会衰减,这可用 Lambert-Beer 定律描述:

$$\ln(I/I_0) = -\tau L = -NCL = -\frac{\pi}{4}LND^2 E(\lambda, m, D), \quad (1)$$

式中 I 是透射信号光强, I_0 是背景光强, τ 是浊度,它是颗粒粒度和浓度的综合度量, N 是单位体积颗粒浓度, L 是测量光束在测量体内的行程, $C = \frac{\pi}{4}D^2 E(\lambda, m, D)$, 是颗粒的消光截面积, D 是颗粒的粒径, E 是消光系数,它是入射光波长 λ , 颗粒粒径 D 和颗粒相对折射率 m 的复杂函数,可由米氏光散射理论^[15]求得。

消光法测量原理示意图如图 1(a) 所示。

(1)式中 N 和 D 是未知的被测参数。在测得背景光 I_0 透射信号光 I 后,反演算法可以求得 N 和 D ^[7]。

定义测量体的体积 V ,它是测量光束截面 A 和光程 L 的乘积,如图 1(b)所示。在测量光束直径远远大于颗粒粒度,且测量体体积也很大时,测量体内被测颗粒数目相当大。尽管连续不断流过测量体的颗粒数目会略有变化,仍可认为测量时在测量体内的颗粒数目基本保持不变,属定常稳态流动,透射光强基本保持稳定,如图 1(c)所示。

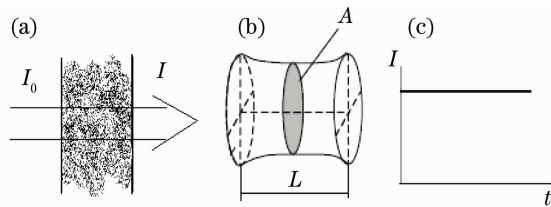


图 1 消光法测量颗粒原理。(a)消光法测量原理; (b)测量区示意图;(c)透射光信号

Fig. 1 Principle of particle measurement by light extinction method. (a) Principle of extinction; (b) measurement area; (c) transmitted-light signal

2.2 Gregory 光脉动法理论

(1)式可以改写成

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4A} \nu D^2 E(\lambda, m, D), \quad (2)$$

式中 $\nu = NAL$ 是测量体内的颗粒数。若减小测量光束的截面积 A 和光程 L ,也就减小了测量体体积,则测量体内的颗粒数目也会相应减少。在被测颗粒处于流动状态时,如果 V 减小到一定程度,则颗粒在测量体中的流动不再属于定常稳态流动,流过测量体的被测颗粒数目不能再认为是基本上保持不变,而是随时间呈现出随机性变化,时多时少,造成透射信号光强 I 出现随机脉动。如果 A 减小到稍大于颗粒

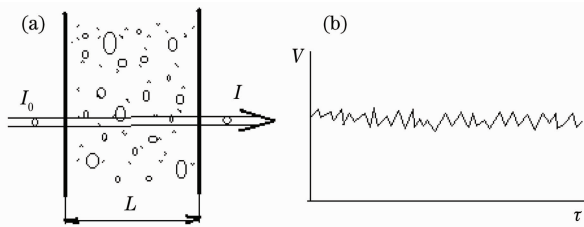


图 2 光脉动法测量原理。(a)光脉动法测量原理示意;(b)脉动透射光信号

Fig. 2 Principle of particle measurement by light fluctuation. (a) Principle of light fluctuation method; (b) transmitted-light fluctuation

粒度,则随机脉动程度会显著增强,如图 2 所示。这就意味着通常认为是噪音的脉动信号实际上包含着颗粒粒度和浓度的信息。

据此, Gregory^[16] 提出了通过透射信号光透射率起伏得到单分散颗粒粒度的光脉动方法。根据米氏光散射理论,在无因次粒度参数 $\alpha = \pi D/\lambda$ 较大时,消光系数 E 趋于 2, (2)式可以重写为

$$\frac{\bar{I}}{I_0} = \exp\left(-\frac{\nu C}{A}\right), \quad (3)$$

式中 \bar{I} 是透射信号光强时间序列的平均值, $C = \frac{\pi}{4} D^2 E(\lambda, m, D)$ 。

在颗粒处于流动状态时,如管道内的气力输送粉体颗粒,因为流入测量体的颗粒数目是随机的,且流出测量体的颗粒对流进测量体的颗粒没有影响,所以认为进入测量体的颗粒数目满足泊松分布规律,于是透射光强信号的时间序列的标准差就可以描述为

$$I_{\text{rms}} = I_0 \exp(-\nu C/A) \sinh(\nu^{1/2} C/A) = \bar{I} \sinh(\nu^{1/2} C/A), \quad (4)$$

由于测量体的体积很小,在测量体中的颗粒数目较少,且 C 相对 A 也较小,所以即使颗粒浊度相当高时, $\nu^{1/2} C/A$ 仍将远远小于 1^[17], 即 $\nu^{1/2} C/A \ll 1$ 。根据双曲函数的性质^[18], (4)式可简化为

$$I_{\text{rms}} = I_0 \exp(-\nu C/A) (\nu^{1/2} C/A) = \bar{I} (\nu^{1/2} C/A). \quad (5)$$

将(3)式和(5)式联立,可得

$$\ln(I_0/\bar{I}) / (I_{\text{rms}}/\bar{I}) = \nu^{1/2}, \quad (6)$$

由 ν 的定义, (6)式可写成

$$\ln(I_0/\bar{I}) / (I_{\text{rms}}/\bar{I}) = (NAL)^{1/2}. \quad (7)$$

由(7)式可知,在测得背景光 I_0 和透射光信号时间序列后可以得到被测颗粒的浓度 N , 进一步可以由(2)式得到被测颗粒的粒度。

现在的问题转化为在在线测量中如何正确得到 I_0 。

2.3 实际透射背景光强估算

由(5)式可知,时间序列透射信号光强的标准差 I_{rms} 和其均值 \bar{I} 的比值 I_{rms}/\bar{I} 与被测颗粒的浓度均方根 $N^{1/2}$ 成线性关系,即

$$\frac{I_{\text{rms}}}{\bar{I}} = \beta N^{1/2}, \quad (8)$$

式中 β 为和测量体几何参数及被测颗粒消光截面有关的系数。在用同一测量系统在线测量颗粒时,测量体的几何参数是已确定的,不会发生变化,不同时刻测量的被测颗粒粒度也是确定的。由此,对于确定的

测量体系, β 也是确定的,但颗粒浓度则会随时间发生变化。

对不同时刻 t_1 和 t_2 测得的时间序列透射信号,由(7)式有

$$\frac{I_{\text{rms}1}/\bar{I}_1}{I_{\text{rms}2}/\bar{I}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{1/2}, \quad (9)$$

(9)式给出了不同时刻被测颗粒浓度的相对变化。

假设这 2 个时间序列信号的测量时间间隔很小,在此期间,原始透射背景光没有发生变化,即 $I_{01} = I_{02} = I_0$ 。在实际测量中,完成 1024 个测量信号所需的时间以毫秒计,2 个时间序列信号的测量时间间隔也是毫秒级,所以这一假设符合实际在线测量的情况。对这 2 个时间序列信号,由(3)式可以得到

$$\frac{\ln(\bar{I}_1/I_0)}{\ln(\bar{I}_2/I_0)} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (10)$$

将(9)式和(10)式联立,可以得到

$$\frac{I_{\text{rms}1}/\bar{I}_1}{I_{\text{rms}2}/\bar{I}_2} = \left[\frac{\ln(\bar{I}_1/I_0)}{\ln(\bar{I}_2/I_0)}\right]^{1/2}, \quad (11)$$

在(11)式里只有一个未知量 I_0 , 其余都是测量值。据此可以计算求得原始光强 I_0 , 再由(7)式可以得到颗粒的浓度 N , 进而由(2)式得到颗粒的粒度 D 。

3 实验及实验结果

3.1 实验系统

图 3 给出了实验装置示意图。含有被测颗粒样品的净水从样品池经驱动泵流过测量段再回到样品池,测量段是矩形的透明玻璃管。激光器发出的激光经扩束后由一透镜汇聚穿过测量段,透射光被安装在测量段另一侧的透镜接收后由光敏二极管接收放大后经数据采集系统采集送计算机处理。为能得到小的测量体,采用焦距较长的透镜汇聚入射激光

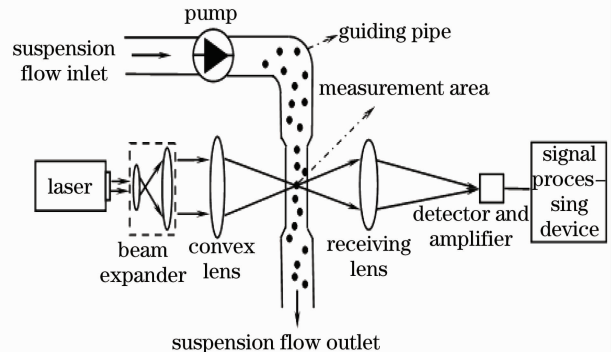


图 3 实验装置系统图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental device

束, 汇聚的入射激光束束腰正处于测量段, 形成直径很小的测量体。改变透镜的焦距可以改变束腰的大小, 形成不同大小的测量体。

实验时先测量没有加入颗粒时的原始透射背景光信号 I_0 , 然后在样品池中加入不同浓度的样品颗粒, 分别测量不同浓度颗粒流动时的透射信号光序列 I 。

3.2 实验条件

驱动泵为丹东百特生产的 BT-800 自动循环进样系统, 其流速可调, 实验流速 2.1 m/s。在没有加入颗粒的情况下测得的原始光强为 3.2434 V (电压信号)。被测颗粒系是通过筛分得到的玻璃微珠, 设其粒径分布符合 Rosin-Rammler 分布函数, $\bar{D} = 28.9 \mu\text{m}$, 分布参数 $k = 6.3$, 可以近似认为是单分散颗粒^[7]。实验共进行了 4 种不同浓度颗粒的测量, 分别在样品池中加入 1, 2, 3 和 4 g 玻璃微珠。循环进样系统的水容积为 800 mL。为保证测量的数据满足泊松分布的要求, 在实验中采用了较低的采样频率。同时为研究不同采样频率是否会给测量结果带来影响, 分别进行了采样频率为 2.5 kHz 及 6.25 kHz 的实验。

在系统运行数分钟达到稳定后测量原始透射背景光强, 得到如图 4 所示的信号。从图 4 可见原始透射背景光信号很稳定, 没有出现随时间的变化或脉动。

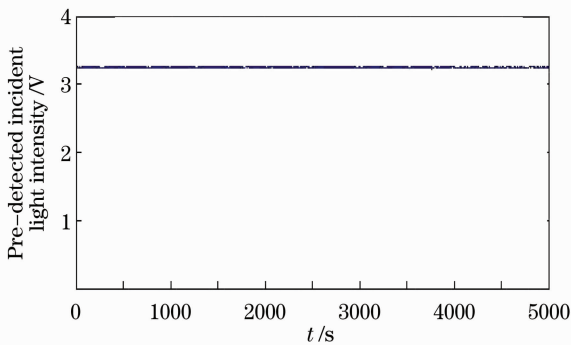


图 4 原始透射背景光强

Fig. 4 Pre-detected incident light intensity

3.3 数据处理

图 5 是不同浓度玻璃颗粒时测得的透射信号光时间序列。从图中可见随颗粒浓度的增加, 透射信号光不仅脉动幅值增加, 脉动频率也不断增加。2 种采样频率的测量结果都显示了同样的趋势。

图 6 是 4 种颗粒浓度的消光值, 在实验的浓度范围中颗粒浓度与消光值的变化呈线性关系, 表明

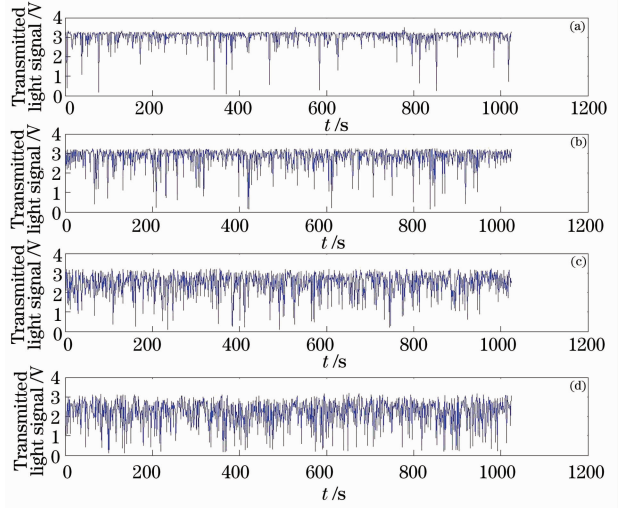


图 5 不同浓度下透射光强。(a) 1 g/(800 mL);

(b) 2 g/(800 mL); (c) 3 g/(800 mL); (d) 4 g/(800 mL)

Fig. 5 Transmitted light signal of different concentrations.

(a) 1 g/(800 mL); (b) 2 g/(800 mL);

(c) 3 g/(800 mL); (d) 4 g/(800 mL)

在此实验中没有出现因颗粒浓度过高带来的复散射影响^[19]。

分别对不同浓度时测得的透射光信号序列求取均值和标准差, 按(9)式得到浓度比, 然后按(11)式求得原始透射背景光 I'_0 。计算结果如表 1 所示。

从表 1 可见计算得到的原始透射背景光强 I'_0 与实验开始时测得的原始透射背景光强 I_0 吻合很好, 最大偏差小于 1.1%, 这在工业现场的在线测量应用中完全可以满足要求。这表明本文提出的方法是正确的。采用 6.25 kHz 和 2.5 kHz 采样频率得到的结果一致表明在满足泊松分布的条件下, 采样频率的不同不会对测量结果产生影响。

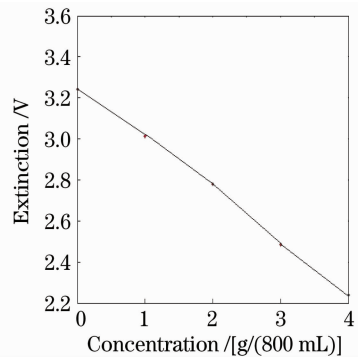


图 6 不同浓度下的消光值

Fig. 6 Extinction in different concentrations

表 1 数据处理结果
Table 1 Calculation results

Sampling frequency /kHz	Microsphere mass /g	Intensity of transmitted light /V	Standard deviation of transmitted light /V	Concentration ratio (down/up)	Calculation results I'_0 /V	Deviation /%
6.25	1	3.0338	0.3875	3.65	3.248	0.142
	3	2.5328	0.6181			
	3	2.5328	0.6181			
	4	2.2288	0.6652	1.496	3.279	1.098
	2	2.7703	0.5429	2.3194	3.267	0.728
	4	2.2288	0.6652			
2.5	1	3.0139	0.4082	2.056	3.259	0.048
	2	2.7793	0.5397			
	2	2.7793	0.5397	2.31	3.279	1.098
	4	2.2386	0.661			
	2	2.7793	0.5397	1.686	3.279	1.098
	3	2.4837	0.6263			

4 结 论

针对光脉动法在线测量中难以获得原始透射背景光强的问题,提出一种基于 Gregory 理论的由不同浓度比反演计算原始透射背景光强的方法。实验结果证明提出的方法是可行的,计算得到的透射背景光强与预先测得的原始透射背景光强吻合得很好,最大偏差小于 1.1%。该方法有助于提高在线测量颗粒粒度和浓度的准确性。

参 考 文 献

- Cen Kefa. Experimental Study and Measurement Technology of Boiler Combustion[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987
岑可法. 锅炉燃烧试验研究方法及测量技术[M]. 北京:水利电力出版社,1987
- Xu Ning. Cement Industry Environmental Engineering Handbook [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2008
徐宁. 水泥工业环保工程手册[M]. 北京:中国建材工业出版社,2008
- Xu Gangke. Functional Composite Materials for Activating and Combustion Supporting [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2006
许刚科. 燃油活化及助燃功能复合材料研究[D]. 天津:河北工业大学,2006
- Liu Changjiang, Yang Yunchuan. Analysis of particle crushing by jet mill[J]. *China Powder Science and Technology*, 2004, **10**(1): 31~33
刘长江, 杨云川. 气流磨粉碎颗粒分析[J]. 中国粉体技术, 2004, **10**(1): 31~33
- Shu Fan. Factors influencing dust removal efficiency of cyclone filter [J]. *China Pulp & Paper Industry*, 2008, **29**(4): 58~61
舒帆. 旋风除尘器除尘效率的影响因素分析[J]. 中华纸业, 2008, **29**(4): 58~61
- Xie Kaiyun, Yang Tao. Commercial application of new type BSX 3rd-stage cyclone separator in FCC unit[J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2010, **40**(4): 30~32
谢凯云, 阎涛. BSX 新型三级旋风分离器在催化裂化装置上的应用[J]. 炼油技术和工程, 2010, **40**(4): 30~32

- Cai Xiaoshu, Su Mingxu, Shen Jianqi *et al.*. Grain Size Measurement Technology and Application[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
- Xu Yamin, Shen Jianqi, Cai Xiaoshu. Characteristics of transmission fluctuation frequency spectrum with band pass filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3184~3190
许亚敏, 沈建琪, 蔡小舒. 基于带通滤波器的透射率起伏信号频谱特征[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3184~3190
- Yang Juan, Bian Baomin, Gu Fang. A mathematics for aerosol mass measurement using light scattering counting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 407~411
杨娟, 卞保民, 顾芳. 光散射计数法颗粒群质量测量的数学模型[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 407~411
- Peng Gang, Lai Xiaoming, Yan Zhengang *et al.*. Fractal characteristic of statistic parameter of particles scattering pulse signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1693~1696
彭刚, 赖小明, 闫振纲等. 颗粒群光散射脉冲信号统计参数分形特征[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1693~1696
- J. M. Adams. Light extinction photometer for measurement of particle sizes in polydispersions [J]. *Rev. Sci. Inst.*, 1968, **39**(11): 1748~1751
- Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhou Shan *et al.*. Effect to online energy measurement device for long-pulse laser by laser pulse width[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1088~1092
魏继锋, 关有光, 周山等. 激光脉冲宽度对长脉冲激光能量在线测量装置的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 1088~1092
- Jia Zhihai, Fan Xueliang, Li Junfeng *et al.*. On-line measurement of pneumatic conveying of pulverized coal in pipes[J]. *J. Physics: Conference Series*, 2009, **147**(1): 1~7
- Cai Xiaoshu, Wang Naining, Wei Jingming *et al.*. Experimental investigation of the light extinction method for measuring aerosol size distributions[J]. *J. Aerosol Science*, 1992, **23**(7): 749~757
- H. C. van de Hulst. Light Scattering by Small Particles[M]. New York: Dover Publication Inc. 1981
- John Gregory. Turbidity fluctuations in flowing suspensions[J].

- J. Colloid and Interface Science*, 1985, **105**(2): 357~371
- 17 Qin Shouxuan. Pulse Spectrum Method Based on Light-Line Measurement of Coal Particles [M]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2010
秦授轩. 基于光脉动谱法的煤粉颗粒在线测量[D]. 上海:上海理工大学, 2010
- 18 Compiling Group of Handbook of Mathematics. Handbook of Mathematics [M]. Beijing: Science Press, 1978
数学手册编写组. 数学手册[M]. 北京:科学出版社, 1978
- 19 M. Kerker. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation[M]. New York: Academic Press, 1969