

基于光散射的粒子测量方法综述

叶超, 孟睿, 葛宝臻

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 基于光散射的粒子测量方法具有非接触、测量范围较大、实时测量等优点, 是颗粒物理化学特性测量的一类主要方法。介绍了基于光散射测量颗粒粒径、复折射率和浓度等参数的主要方法、原理以及各种方法的适用范围, 以及基于光散射的粒子测量研究方面的新进展和存在不足的方面。基于光散射的粒子测量方法的适用范围各有侧重, 其趋势将向着更宽的测量范围, 更高的测量精度, 与多参数同时测量等方向继续发展。

关键词: 光散射; 参数测量; 颗粒物化参数; 研究进展

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.04.001

Survey of particle measurement methods based on light scattering

YE Chao, MENG Rui, GE Bao-zhen

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University,
Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: Particle measurement methods based on light scattering have the advantages of non-contact, wide measurement range and real-time measurement, etc., and it is a principal method to measure physical and chemical properties of the particles. The main methods and principle that measure particle size, refractive index and concentration etc. based on light scattering are introduced, and application range of each method is also discussed. The research progress and aspects to be improved of particle measurement based on light scattering are described. Particle measurement methods based on light scattering focus on different aspects. The overall trend goes toward wider measurement range, higher accuracy and multiple-parameter measurement.

Key words: light scattering; parameter measurement; particle physical and chemical parameters; research progress

1 引言

颗粒是指处于分割状态下的微小的各项无机物、有机物或微生物等。随着科学技术的发展, 许多部门的技术问题与粒子测量息息相关, 而其关心的粒子的理化特性和粒度范围也各不相同。环境方面, 研究颗粒的化学成分、浓度分布对化学物质的催化和降解具有重要意义^[1]; 气象学中, 颗粒对可见光的散射会造成大气能见度的降低, 影响地气系统

的辐射平衡, 进而影响全球气候变化, 研究颗粒的成分、物理化学特性是该领域的重点^[2]; 生物医学中, 颗粒检测重点一般是颗粒的成分、生物活性与浓度分布, 据此可以有效避免在日常生活和医疗活动中对人体健康造成危害^[3]; 工业生产中, 颗粒的浓度和粒度分布直接影响微电子产品的质量和产量^[4]; 空气环境监测方面, PM₁₀和PM_{2.5}能对人体造成极大的伤害, 其核心就是对大气颗粒空气动力学粒径的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61275012) 资助。

作者简介: 叶超 (1988 -), 男, 硕士研究生, 主要从事颗粒测量方面的研究。E-mail: honey198811@163.com

通讯作者: 葛宝臻 (1964 -), 男, 博士, 教授, 主要从事光电检测与信息处理, 激光粒子测量和激光三维彩色数字化技术等方面的研究。E-mail: gebz@tju.edu.cn

收稿日期: 2014-10-15; **修订日期:** 2014-10-28

测量^[5]。

可见颗粒测量在化工、气象学、生物医学、天文学、环境监测以及国防工业等领域都具有重要意义。在描述颗粒性质时,主要采用的参数有表面形貌、粒径及其分布、质量浓度、数量浓度、化学组分、复折射率、生物特性、光学特性等^[6]。光散射法相较于其他粒子测量方法具有非接触、测量范围较大、实时测量等优点。所以基于光散射的粒子测量法是颗粒特性研究中一类重要方法。本文介绍了国内外基于光散射方法测量颗粒粒径、复折射率和浓度等参数的主要方法、原理以及每种方法适用于何种参数的测量,简述了光散射粒子测量技术的进展,希望对国内开展该方面的研究提供有益的帮助。

2 基于光散射的粒子测量方法

基于光散射的粒子测量方法是以光的散射理论为基础的颗粒测量方法,是现今研究应用最为广泛的颗粒测量方法之一。颗粒的光散射特性与粒径大小及其相对折射率密切相关,因此光的散射特性可以作为颗粒测量的一种尺度^[7]。反应颗粒散射特性的物理量有强度函数、散射系数、吸收系数、消光系数等^[8]。基于光散射的粒子测量方法多种多样,但这些方法的基本原理都如图 1 所示,光源发出光束照射到待测颗粒样品上发生散射,光电探测器接收散射光信号后转换为电信号,计算机再对电信号进行处理得到所需数据。

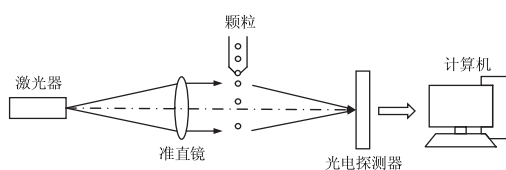


图1 光散射粒子测量仪器的工作原理

光散射的粒子测量方法按接收散射信号的不同可以分为角散射单颗粒检测法、动态光散射法、衍射散射法以及全散射法^[9]。基于空气动力学的单颗粒检测技术也是光散射法的一种。

2.1 基于角散射的单颗粒检测技术

通过测量颗粒在空间中某一个或多个角度下的散射光通量,得到颗粒的粒度及其分布信息的方法就是基于角散射的单颗粒检测方法。基于光散射的粒子测量方法以 Mie 散射理论为基础。在波动光学理论的麦克斯韦方程和适当的边界条件下,Mie 散射理论给出了在单色平面波的照射下不同直径,不同介电常数的均匀球形颗粒的远场散射的解^[10]。根据 Mie 理论在一定散射角接收范围内,光通量 F 与待测颗粒的粒度 D 有如下关系:

$$F = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \sin(\theta) \times (\pi - 2\arcsin \left[\frac{\cos \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right)}{\sin \theta} \right]) d\theta \quad (1)$$

式中, θ_1 和 θ_2 之间的积分区域为散射光信号的接收范围, θ 为散射光与入射光的夹角; θ_1 、 θ_2 分别为散射光信号关于散射面的垂直分量和平行分量在散射角 θ 上的投影; $i_1(\theta)$ 和 $i_2(\theta)$ 是待测粒子粒度的函数。

其原理如图 2 所示,选取合适的光源,入射光经准直聚焦后,选择适当的散射角度接收散射光信号避免测量结果的多值性,光电探测器将光信号转换为电信号,根据脉冲信号确定颗粒粒径分布信息^[11]。

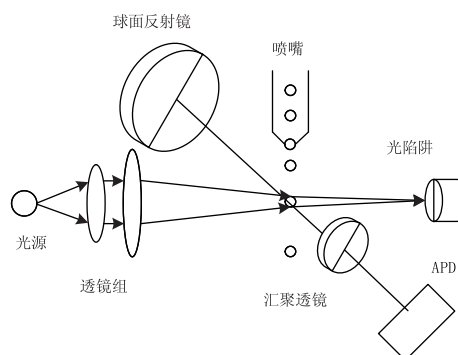


图2 基于角散射的单颗粒测量系统结构图

2.2 基于衍射散射的粒子检测技术

基于衍射散射的粒子检测技术是通过测量前向小角度的散射光强得到颗粒粒径及其分布信息。对于粒径几倍于波长的粒子的散射光,其衍射成分是散射光的主要部分,利用夫琅和费衍射对其近似^[12]。衍射光角度与粒子粒径呈反向变化关系。根据 Mie 理论,自然光以初始光强为 I_0 照射到均匀球形粒子群上,粒子到光电探测阵列接收环的距离为 r ,光电探测阵列的第 N 环接收到散射光能为:

$$E_N = c^i \sum_i \frac{W_i}{D_i^3} \int_{s_N}^{s_{N+1}} \frac{i_1 + i_2}{r^2} ds \quad (2)$$

其中, λ 为入射光波长; i_1 、 i_2 分别是散射强度的垂直分量和平行分量。粒径为 D_i 的颗粒的尺寸分布为 W_i 。用矩阵表示为 $E = TW$ 。 T 是光能分布矩阵系数,当已知探测到的能量为 E 时,就可以求出粒子的尺寸分布 W 。

其原理如图 3 所示^[13],激光器发出的光经针孔和准直镜后形成平行光,通过光电探测阵列采集经过傅里叶透镜后的不同位置的散射光强,根据 Mie 光散射理论可以得到形成散射图样的全场粒子的粒度分布^[14]。

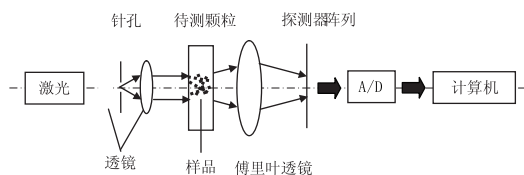


图3 基于衍射散射的粒子测量原理图

2.3 基于全散射的粒子检测技术

基于全散射光强的检测技术是一种全场粒子检测技术,也称消光法。它以 Lambert-Beer 为理论基础^[15]。由于颗粒对光的散射和吸收,使光强有不同程度的衰减。与其他测量方法不同的是,基于全散射的粒子测量方法测量的是透射光相对于入射光的衰减^[16]。在粒子性质一定的前提下,粒子群的散射光强度与其质量浓度或体积浓度成正比。该检测技术应用在粒子浓度比较大的场合,粒子间距远大于粒子直径,每个粒子的散射光独立不相干,Mie 散射理论模型仍然适用,对 Mie 散射光强公式的积分做一修正后,该方法可以检测全场粒子的质量浓度^[17]。修正公式为:

$$F = N \frac{\lambda^2 I_0}{8\pi^2} \int_{D=0}^{D=\infty} \int_{\theta=\phi-\beta}^{\theta=\phi+\beta} [i_1(D, \theta, m) + i_2(D, \theta, m)] \cdot \omega(\theta, \phi) F_N(D) d\theta dD \quad (3)$$

式中, $\omega(\theta, \phi)$ 是检测立体角函数; $F_N(D)$ 是颗粒数量分布函数; $i_1(D, \theta, m)$ 和 $i_2(D, \theta, m)$ 是待测粒子粒度的函数。

其测量原理如图4所示。与单粒子检测系统的结构类似,主要由照明光源、反射镜、探测器和光陷阱组成。全散射系统采用的是具有一定面积的平行光,通过同时测量多个粒子在不同空间角度处的消光光谱反演粒子物的质量浓度或体积浓度^[18]。

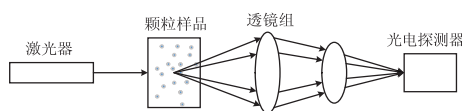


图4 基于全散射的粒子场检测技术基本原理图

2.4 基于动态光学散射的粒子检测技术

动态光散射(Dynamic Light Scattering, DLS), 也称光子相关光谱(Photon Correlation Spectroscopy, PCS)或准弹性光散射(quasi-elastic scattering), 它是通过研究颗粒的布朗运动导致的散射光强波动的现象, 从而获得一定角度下随时间的变化的散射光强的波动信号, 进而通过数据处理方法反演颗粒的粒度及其分布的一种方法^[19]。

动态光散射中, 对于单分散颗粒, 在均匀平面波照射下, 其散射光强度相同, 相位不同。对于整个分

散系, 探测器接收到的散射光强为:

$$I_s = I_s(1) \left[N + 2 \sum_{j>i=1}^N \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \quad (4)$$

式中, $I_s(1)$ 为一个颗粒的散射光强度, δ_i 为第 i 个颗粒的散射光相位角。考虑粒子的热运动, 每个颗粒的瞬时散射光相位角不断变化, 所以总散射光强 I_s 是时间的函数^[20]。原理如图5所示, 利用精密控制的短间隔脉冲信号控制光电探测器接收样品池的散射光信号, 记录散射光强度与时间间隔, 用光散射模型计算自相关函数, 经傅里叶变换可以得到散射光的频谱密度函数, 进而反演散射颗粒的粒径分布信息^[21]。

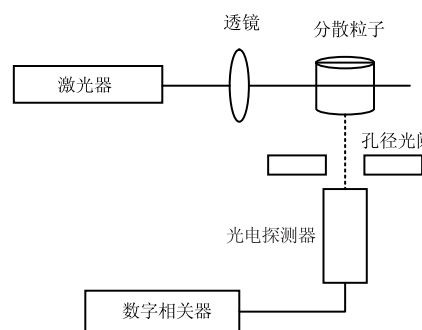


图5 动态光散射粒子检测技术系统图

2.5 基于空气动力学的单颗粒检测技术

通过测量颗粒的飞行时间实现对空气动力学粒径测量就是基于空气动力学的单颗粒检测方法。根据流体力学原理, 粒子在静止空气中沉降时的飞行速度 U_t 与其空气动力学直径 D_p 满足:

$$U_t = \frac{CD_p \rho_p g}{18\mu} \quad (5)$$

式中, C 为坎宁安修正因子; ρ_p 是颗粒密度; μ 是粘度系数, 因此颗粒的空气动力学粒径可以转化为其沉降速度的测量^[22]。

测量原理如图6所示, 当颗粒飞过两束距离已知的激光时, 探测器接收到颗粒的散射光信号, 产生的两个相邻散射光信号的时间间隔即为颗粒飞行时间。再利用标准粒径颗粒建立飞行时间和空气动力学粒径的关系曲线, 就可实现对待测颗粒的空气动力学粒径测量的目的^[23]。

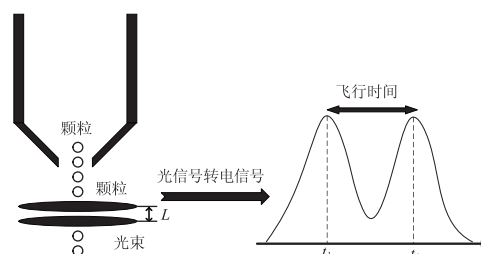


图6 空气动力学粒度检测技术原理图

3 基于光散射的粒子检测方法研究进展

目前基于光散射的粒子检测方法是粒子测量研究热点之一。光散射法具有测量范围宽、非接触式测量、实时在线测量、多参数测量等优点,但对测量环境和待测颗粒也有一定的限制,在这些方面需要进一步完善。

基于光散射的粒子测量方法的适用范围各有侧重。从测量原理分类,基于空气动力学的测量技术测量的是空气动力学粒径分布,基于角散射的检测技术测量的是几何粒径分布;从粒径测量范围分类,基于空气动力学和角散射检测技术的粒度测量范围可以达到微米级^[24],对于全场粒子粒度分布的测量,动态光散射检测技术主要测量颗粒粒度为纳米级,衍射散射法测量的颗粒粒度是微米、亚微米量级^[25];从测量参数分类,全场散射法可以测量颗粒场的质量浓度,通过几种不同光散射检测方法的结合,除测量粒径及分布信息,还可以实现对颗粒折射率、密度等多种参数的测量^[26]。

目前基于光散射的粒子测量方法的研究进展主要集中在以下几方面:

(1)通过几种不同粒度分布测量方法的结合,实现了对颗粒折射率的测量。通过交叉分析空气动力学粒径和几何粒径两种原理的测量结果,可以得到相同测量样本的折射率信息^[27];结合浊度计或空气动力学粒径谱仪,利用粒度谱的对应关系,可以得到颗粒的复折射率信息^[28];基于 Mie 散射原理中颗粒的消光系数与折射率存在的关系,利用光谱分析仪测量粒子透射消光系数进而反推粒子系折射率^[29]。

(2)粒度测量下限和精度有所提高。在角散射单颗粒检测技术中,接收多种波长的散射光信号,调整散射光接收角度范围,都可以提高粒度测量精度;在基于衍射的颗粒测量技术中,除了采用多种波长的激光,也可以对散射信号接收的光学结构进行改进,引入侧向散射或后向散射,可以进一步提高粒度测量的下限^[30]。

(3)实现多参数的同时测量。不同光散射粒度测量方法给出的粒度分布意义不同,其中隐含了颗粒的很多物化参数信息,通过不同测量方法的结合可以实现颗粒不同参数的同时测量。例如在单粒子质谱仪的基础上,测量颗粒的空气动力学粒径和组成成分的同时实现对数浓度、尺寸分布和颗粒非球度的测量^[31]。

(4)颗粒检测技术的理论研究进一步完善。例

如在角散射测量技术中,现有的经典光散射方法已较为完整,在经典 Mie 散射理论上进一步分析非球形颗粒、含核颗粒的散射光强空间分布特性以及分析多层介质球散射特性^[32],偏振态下 Mie 散射特性的研究等^[33],都为颗粒检测的进一步发展奠定了基础。

(5)对纳米颗粒的检测技术发展迅速。依据动态光散射法和 X 射线光源为探究纳米颗粒特性的研究打下了基础^[34]。

基于光散射的粒子检测方法在以下几方面还需完善:①分辨率在测量粒度分布很窄的样品中相对较低,可测粒度范围还需进一步拓宽^[35]。②在单颗粒检测技术中,由于模型建立在球形单分散条件下,测量不规则、折射率渐变、粒径分布宽的颗粒时会引入较大的误差^[32]。③解决测量高浓度或低浓度颗粒场的技术困难。在高浓度场中,颗粒会因多重光散射,聚集效应、应电力作用等原因造成检测的不准确,粒度及其分布的测量误差较大^[36]。④粒度测量的环境范围有所限制。例如在动态光散射测量技术中,由于它是一种基于准静态光散射的光学直读测量方法,在流场测量中存在限制^[37]。

4 小结

颗粒的测量在许多学科的研究与应用中具有重要意义。光散射方法作为颗粒物理化学特性测量的一类重要方法,具有适用范围广、测量范围宽、准确性高、非接触式测量、测试速度快、实时在线测量等优点。已经成为当前应用研究的主流。目前基于光散射的粒径测量的研究发展迅速并取得一些进展,实现了对粒子折射率的测量,测量范围和精度有所提高,对不规则、非理想的粒子进行理论分析,可测粒子浓度扩大,对纳米颗粒研究深入,而整体发展趋势是向着更大的测量范围,更高的测量精度,与多参数同时测量的方向发展,对颗粒测量的针对性和具体要求也将越来越高。

参考文献:

- [1] JIN Hangbiao, LIU Yanxiang, YE Yanglong. Effect of particle dispersions in Yangtze River on the photodegradation of acetaminophen[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(1): 48-53. (in Chinese)
靳航标, 刘延湘, 叶杨龙. 长江水体分散颗粒物对乙酰氨基酚光降解的影响[J]. 环境化学, 2013, 32(1): 48-53.
- [2] WANG Minjun, HAN Yongxiang, DENG Zuqin, et al. Relationship between dust aerosols and solar radiation in

- global dust source regions[J]. China Environmental Science, 2012, 32(4): 577-583. (in Chinese)
- 王民俊, 韩永翔, 邓祖琴, 等. 全球主要沙源区沙尘气溶胶与太阳辐射的关系[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 577-583.
- [3] WEI Lanfen, PAN Xieshang, WANG Yaxia, et al. Research on change regularity of some cleanliness indexes in clean surgical theaters in operation[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2010, 27(5): 554-556. (in Chinese)
- 魏兰芬, 潘协商, 王亚霞, 等. 洁净手术室部分净化指标动态变化规律的研究[J]. 中国消毒学杂志, 2010, 27(5): 554-556.
- [4] YANG Enjiang. Research for the effects of the environmental and electrostatic factors on IC packagings[J]. Electronics and Packaging, 2004, 3(1): 43-48. (in Chinese)
- 杨恩江. 环境与静电对集成电路封装过程的影响[J]. 电子电路与贴装, 2004, 3(1): 43-48.
- [5] HUANG Yanmin, SHU Jiong, GU Ying. Comparison of two analysis methods of fugitive road dust size in shanghai city[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2007, (6): 37-43. (in Chinese)
- 黄嫣旻, 束炯, 顾莹. 上海道路扬尘粒径两种分析方法的比较[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2007, (6): 37-43.
- [6] Paul A Haren. Aerosol measurement[M]. Beijing: Chemical industry press, 2005. (in Chinese)
- 保罗·巴伦. 气溶胶测量[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [7] ZHANG Zhenzhong, BAI Honggang. Light scattering measurement of particle size[J]. Shanxi Science and Technology, 2011, 26(1): 89-91. (in Chinese)
- 张振中, 白宏刚. 颗粒粒径的光散射法测量研究[J]. 山西科技, 2011, 26(1): 89-91.
- [8] CHEN Tingjiang. The application of light scattering method in particle measuring technique[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- 陈庭将. 光散射法在颗粒测量技术中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [9] CHEN Jianqi. Study of extending the lower limit of light scattering method to measuring particles[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 1999. (in Chinese)
- 沈建琪. 光散射法测粒技术延伸测量下限的研究[D]. 上海: 上海理工大学, 1999.
- [10] LI Jianli, YUAN Jinghe, HUO Bingzhong, et al. Experimental study of Mie scattering of microsphere particles[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2009, 36(4): 5-8. (in Chinese)
- 李建立, 袁景和, 霍丙忠, 等. 基于 Mie 散射理论的微球体颗粒数值模拟计算和实验研究[J]. 上海计量测试, 2009, 36(4): 5-8.
- [11] XU Wanyu, TIAN Yili, ZHANG Haiyan. Investigation of dust density measurement based on scattering theory[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2004, 13(4): 124-124. (in Chinese)
- 徐如瑜, 田贻丽, 张海燕. 基于光散射的粉尘浓度测量的研究[J]. 重庆职业技术学院学报, 2004, 13(4): 124-124.
- [12] WEI Yongjie, WEI Yaoling, GE Baozhen. Optical receiver design of laser particle sizer with two detecting planes[J]. China Powder Science and Technology, 2009, 15(1): 8-10. (in Chinese)
- 魏永杰, 魏耀林, 葛宝臻. 两探测面结构激光粒度仪的接收光路设计[J]. 中国粉体技术, 2009, 15(1): 8-10.
- [13] GE Baozhen, PAN Linchao, ZHANG Fugen, et al. Abnormal moving of scattered energy distribution and its effect on particle size analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 319-326. (in Chinese)
- 葛宝臻, 潘林超, 张福根, 等. 颗粒散射光能分布的异常移动及其对粒度分析的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 319-326.
- [14] ZHANG Fugen. Optical structure of laser particle size analyzer[C]. 2006 Annual Conference of Chinese Society of Particuology cum Symposium on Particle Technology across Taiwan Straits, 2006. (in Chinese)
- 张福根. 激光粒度仪的光学结构[C]. 中国颗粒学会 2006 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会, 2006.
- [15] LIU Benli, WANG Hongxia, ZHU Youzhang, et al. Research on interference characteristics of smoke screen to laser[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(7): 736-739. (in Chinese)
- 刘本利, 王红霞, 竹有章, 等. 烟幕对激光的干扰特性研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 736-739.
- [16] WANG Naining, WEI Jinming. An improvement and development for the particle size measurements based upon total scattering technique[J]. Journal of Shanghai Institute of Mechanical Engineering, 1987, 9(4): 7-16. (in Chinese)
- 王乃宁, 卫敬明. 光学全散射微粒测量方法的改进和发展[J]. 上海机械学院学报, 1987, 9(4): 7-16.
- [17] Dellago C, Horvath H. On the accuracy of the size distribution on information obtained from light extinction and scattering measurements - 1: Basic Consideration and Models. J. Aerosol Science, 1993, 24(2): 129-141.
- [18] WANG Ying. Study of improving the precision of the concentration of PM10 by photometer method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- 王莹. 提高光度计法可吸入颗粒物质量浓度测量系统的精度研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [19] LI Chunyan, KONG Ming, ZHAO Jun. Measuring time analysis for Au particle size measurement at different con-

- centration using PCCS [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40 (11):1178-1181. (in Chinese)
- 李春燕,孔明,赵军. 光子相关光谱法测量不同浓度金颗粒粒径的测量时间分析[J]. *激光与红外*, 2010, 40 (11):1178-1181.
- [20] ZHENG Gang, SHEN Jin, SUN Guoqiang, et al. New advance in study of particle sizing with dynamic light scattering[J]. *Journal of University of Shanghai For Science and Technology*, 2002, 24(4):313-318. (in Chinese)
- 郑刚,申晋,孙国强,等. 对动态光散射颗粒测量技术中几个问题的讨论[J]. *上海理工大学学报*, 2002, 24(4):313-318.
- [21] WANG Yuan. Research about sub-micro particles sizing based on dynamic light scattering [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- 王远. 基于动态光散射的超细颗粒测试技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
- [22] Moffet R C, Prather K A. Extending ATOFMS measurements to include refractive index and density[J]. *Analytical chemistry*, 2005, 77(20):6535-6541.
- [23] Vaden T D, Imre D, Beránek J, et al. Extending the capabilities of single particle mass spectrometry: I. Measurements of aerosol number concentration, size distribution, and asphericity [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2011, 45(1):113-124.
- [24] Wilson J C, Liu B Y H. Aerodynamic particle size measurement by laser-Doppler velocimetry [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1980, 11(2):139-150.
- [25] ZHENG Gang, SHEN Jin. New development of study on particle sizing with dynamic light scattering[J]. *Journal of Shandong Institute of Technology*, 2002, 16(4):49-54. (in Chinese)
- 郑刚,申晋. 用动态光散射法测量纳米、亚微米颗粒研究的新进展[J]. *山东工程学院学报*, 2002, 16(4):49-54.
- [26] LI Xuebin, et al. Method of retrieving refractive index of aerosol particles [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(2):401-404. (in Chinese)
- 李学彬,等. 大气气溶胶粒子折射率虚部反演方法研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(2):401-404.
- [27] Jenny L Hand & Sonia M Kreidenweis. A new method for retrieving particle refractive index and effective density from aerosol size distribution data [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2002, 36(4):1012-1026.
- [28] LI Xuebin, HAN Yong, XU Qingsan, et al. Measurement of refractive imaginary part of aerosol particles with two particle counters [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2006, 6(z2):1-4. (in Chinese)
- 李学彬,韩永,徐青山,等. 两种粒子计数器相结合测量大气气溶胶粒子折射率虚部[J]. *过程工程学报*, 2006, 6(z2):1-4.
- [29] LIU Xiaodong, DAI Jingmin. Measurement of the complex refractive index of particles based on Mie theory and transmission method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5):820-824. (in Chinese)
- 刘晓东,戴景民. Mie 散射理论测量粒子系复折射率的透射方法 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5):820-824.
- [30] Sabbagh-Kupelwieser N, Maisser A, Szymanski W W. From micro - to nanosized particles: Selected characterization methods and measurable parameters [J]. *Particology*, 2011, 9(3):193-203.
- [31] Vaden T D, Imre D, Beránek J, et al. Extending the capabilities of single particle mass spectrometry: I. Measurements of aerosol number concentration, size distribution, and asphericity [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2011, 45(1):113-124.
- [32] SUN Xianming, WANG Haihua, SHEN Jin. Study on light backscattering by spheroid with inclusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8):288-292. (in Chinese)
- 孙贤明,王海华,申晋. 含核椭球粒子后向散射特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8):288-292.
- [33] YANG Ying, HUANG Zhuqing, CAO Xiaoling. Research on the features of particle's Mie scattering based on polarization state [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(12):1376-1380. (in Chinese)
- 杨颖,黄竹青,曹小玲. 偏振状态下微粒的 Mie 散射特性研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(12):1376-1380.
- [34] YANG Hui, ZHENG Gang, WANG Yajing. Measurement of nano-particles by dynamic light scattering based on spectral estimation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9):1996-2001. (in Chinese)
- 杨晖,郑刚,王雅静. 用动态光散射现代谱估计法测量纳米颗粒 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9):1996-2001.
- [35] HU Songqing, LI Lin, GUO Siyuan, et al. Modern technology of particle size measurement [J]. *Modern Chemical Industry*, 2002, (1):58-61. (in Chinese)
- 胡松青,李琳,郭祀远,等. 现代颗粒粒度测量技术 [J]. *现代化工*, 2002, (1):58-61.
- [36] YANG Hui, HENG Gang, LI Mengchao, et al. Back scattering PCS for particle sizing in high concentrated suspension [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1):179-183. (in Chinese)
- 杨晖,郑刚,李孟超,等. 高浓度超细颗粒的后向光子相关光谱测量技术研究 [J]. *光子学报*, 2009, 38(1):179-183.
- [37] Leung A B, Suh K I, Ansari R R. Particle-size and velocity measurements in flowing conditions using dynamic light scattering [J]. *Applied optics*, 2006, 45(10):2186-2190.