



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103454203 B

(45) 授权公告日 2015.06.17

(21) 申请号 201310406765.0

JP 特開 2000-46722 A, 2000.02.18, 全文.

(22) 申请日 2013.09.09

US 2002/003210 A1, 2002.01.10, 全文.

(73) 专利权人 中国科学院合肥物质科学研究院  
地址 230031 安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

审查员 周璇玮

(72) 发明人 桂华侨 李德平 程寅 王杰  
王焕钦 余同柱 刘建国 陆亦怀  
鲁岸立 张礁石 黄书华 伍德侠

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
任公司 11251

代理人 成金玉

(51) Int. Cl.

G01N 15/10(2006.01)

G01N 21/47(2006.01)

(56) 对比文件

CN 1563950 A, 2005.01.12, 全文.

US 2010/067007 A1, 2010.03.18, 全文.

CN 1502981 A, 2004.06.09, 全文.

CN 102564909 A, 2012.07.11, 全文.

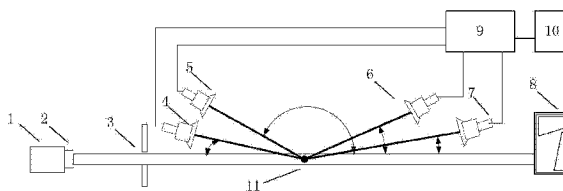
权利要求书1页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线  
测量系统及测量方法

(57) 摘要

一种大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线  
测量系统及测量方法, 利用的装置包括激光器、光  
电探测器及信号处理电路组成, 采用单个激光器和  
四个探测器实现单颗粒物粒径和化学成分信号的  
同时在线测量。本发明的方法实现简单、无需膜  
采样和离线分析, 有效拓展了基于光散射原理的  
大气颗粒物多物理和化学参数的实时在线传感方  
法。



1. 一种大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统,其特征在於:所述测量系统包括激光器(1)、准直透镜(2)、光阑(3)、第一探测器(4)、第二探测器(5)、第三探测器(6)、第四探测器(7)、光阱(8)、信号处理电路(9)和计算机(10);激光器(1)出射的激光经准直透镜(2)准直入射到采样颗粒物(11)上,散射光分别由与激光器(1)出射的角度呈15度、30度、140度、160度方向的第四探测器(7)、第三探测器(6)、第二探测器(5)、第一探测器(4)接收,直接透射的激光由光阱(8)吸收;第一探测器(4)、第二探测器(5)、第三探测器(6)、第四探测器(7)将接收到四个角度上的光信号 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ 分别转化为电信号并输入到信号处理电路(9),由信号处理电路(9)将信号变化量放大并将四个角度上的信号峰值 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 分别输入计算机(10),计算机(10)将峰值 $P_4$ 与标准光强-粒径关系曲线对照得出大气颗粒物粒径大小,将 $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$ 比值与标准峰值比值-化学成分数据库比对得出大气颗粒物的化学成分信息。

2. 根据权利要求1所述的大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统,其特征在於:所述激光器(1)采用半导体激光器,输出稳定光强的激光,以提高大气颗粒物的粒径测量精度。

3. 根据权利要求1所述的大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统,其特征在於:所述准直透镜(2)采用非球面准直透镜,以达到最佳的激光准直效果。

4. 根据权利要求1所述的大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统,其特征在於:所述第一探测器(4)、第二探测器(5)、第三探测器(6)、第四探测器(7)的接收角小于±4度,以确保各测量值的空间分辨率和有效性。

5. 根据权利要求1所述的大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统,其特征在於:所述光阱(8)应实现出射激光的吸收效率大于0.99,以避免杂散光对各探测器信号测量结果的干扰。

6. 根据权利要求1所述的大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统,其特征在於:所述采样颗粒物(11)应确保单个通过激光束,以避实现单个大气颗粒物信息的实时测量与分析。

7. 一种大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量方法,其特征在於实现步骤如下:

第一步,使颗粒物单个依次通过激光束,四个探测器得到信号峰值 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ ;四个探测器分别与激光束出射角度呈15度、30度、140度、160度;

第二步,测量在同样的大气颗粒物采样环境下,标准颗粒粒径与第四探测器(7)的信号光强 $P_4$ 之间的关系,通过三阶线性拟合得到标准光强-粒径关系曲线;

第三步,测量在同样的大气颗粒物采样环境下,标准颗粒成分与 $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$ 比值直接的关系,得到标准峰值比值-化学成分数据库;

第四步,测量在采用过程中通过激光光斑的单颗粒物散射光信号,将信号峰值 $P_4$ 与标准光强-粒径关系曲线比对,得到所需要的大气颗粒物粒径信息;

第五步,测量在采用过程中通过激光光斑的单颗粒物散射光信号,将信号峰值比值 $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$ 与标准峰值比值-化学成分数据库比对,得到所需要的大气颗粒物的化学成分信息。

## 一种大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统及测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统及测量方法,特别适用于大气颗粒物的微物理和化学参数的快速非接触测量。

### 背景技术

[0002] 随着我国经济的飞速增长和城市化进程不断加速,大气颗粒物是目前我国多数城市的首要污染物,灰霾污染呈显著上升趋势。目前,我国城市群大气污染为煤烟型与机动车尾气污染共存的特殊大气复合污染的类型,具有明显的局地污染和区域污染相结合、污染物之间相互耦合的特征,其表现为高浓度大气颗粒物使大气浑浊、能见度下降,“看不见蓝天”已成为许多城市的共同忧患,大气污染还给人体健康带来新的威胁,民众呼吸道疾病患病率显著上升。

[0003] 近年来,我国大气颗粒物监测技术取得了较大的进步,特别是  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度自动监测仪器生产形成了一定的规模。传统的大气颗粒物化学组分的测量方法主要有质谱、离子色谱(IC)、X射线、热光等方法,其中以质谱和离子色谱分析方法得到的颗粒物成份信息最为全面,但它们多采用离线的方式,前期处理工作较麻烦,还导致某些成分失活、测量精度降低,同时也存在仪器复杂、维护困难、价格昂贵等问题,难以大规模推广应用。市场上主要以安捷伦、岛津、赛默飞、布鲁克等厂商的仪器为主。

[0004] 随着光学技术的日益发展,光散射技术已成为一种大气颗粒物的非接触快速测量技术,逐渐成为激光粒子计数器的主流测量方法之一,美国 TSI、德国 Grimm 等公司也相继推出了商业化仪器。英国 Biral 公司利用粒形的方位角散射特性研发成功气溶胶粒形分析仪,可以  $10000s^{-1}$  的速度有效分析  $10\mu m$  以下的气溶胶粒子粒形信息。在专利方面,美国专利 US5684585 采用单一探测器分析颗粒物的散射特性与光学粒径的相互关系,形成光学粒子计数器,美国专利 US5999257 提出了一种利用后向散射光测量多个颗粒物的光浊度信息。目前,在大气颗粒物的在线监测方面,光散射技术还存在以下问题与不足:(1) 光散射技术实现的是大气颗粒物的粒径和数浓度的测量,难以获取大气颗粒物的化学成分等信息;(2) 现有的光散射粒径测量结果容易收到颗粒物折射率、粒子形状等参数的影响,从而降低了粒径测量的准确性;(3) 难以同时获取单颗粒物的粒径和化学组成成分信息。

### 发明内容

[0005] 本发明的技术问题:克服现有技术的不足,提出一种基于多角度光散射原理的大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量系统及测量方法,结构简单,可同时实现单颗粒物粒径和化学成分的实时非接触测量。

[0006] 本发明的技术方案:基于多角度光散射原理的大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量,其特征在于:测量系统包括激光器 1、准直透镜 2、光阑 3、第一探测器 4、第二探测器 5、第三探测器 6、第四探测器 7、光阱 8、信号处理电路 9、计算机 10,激光器 1 出射的

激光经准直透镜 2 准直入射到采样颗粒物 11 上, 散射光分别由与激光出射角度呈约 15 度、30 度、140 度、160 度方向的第四探测器 7、第三探测器 6、第二探测器 5、第一探测器 4 接收, 直接透射的激光由光阱 8 吸收, 第一探测器 4、第二探测器 5、第三探测器 6、第四探测器 7 将接收到各角度上的光信号  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$  分别转化为电信号并输入到信号处理电路 9, 由信号处理电路 9 将信号变化量放大并将信号峰值  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  分别输入计算机 10。将  $P_4$  与标准光强 - 粒径关系曲线对照得出大气颗粒物粒径大小, 将  $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$  比值与标准峰值比值 - 化学成分数据库比对得出大气颗粒物的化学成分信息。

[0007] 所述激光器 1 采用半导体激光器, 输出稳定光强的激光, 以提高大气颗粒物的粒径测量精度。

[0008] 所述准直透镜 2 采用非球面准直透镜, 以达到最佳的激光准直效果。

[0009] 所述第一探测器 4、第二探测器 5、第三探测器 6、第四探测器 7 的接收角小于  $\pm 4$  度, 以确保各测量值的空间分辨率和有效性。

[0010] 所述光阱 8 应实现出射激光的吸收效率大于 0.99, 以避免杂散光对各探测器信号测量结果的干扰。

[0011] 所述采样颗粒物 11 应确保单个通过激光束, 以实现单个大气颗粒物信息的实时测量与分析。

[0012] 一种大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量方法, 包括以下步骤:

[0013] 第一步, 使颗粒物单个依次通过激光束, 各探测器得到信号峰值  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ ;

[0014] 第二步, 测量在同样的大气颗粒物采样环境下, 标准颗粒粒径与第四探测器 7 的信号光强之间的关系, 通过三阶线性拟合得到标准光强 - 粒径关系曲线;

[0015] 第三步, 测量在同样的大气颗粒物采样环境下, 标准颗粒成分与  $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$  比值直接的关系, 得到标准峰值比值 - 化学成分数据库;

[0016] 第四步, 测量在采用过程中通过激光光斑的单颗粒物散射光信号, 将信号峰值  $P_4$  与标准光强 - 粒径关系曲线比对, 得到所需要的大气颗粒物粒径信息;

[0017] 第五步, 测量在采用过程中通过激光光斑的单颗粒物散射光信号, 将信号峰值比值  $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$  与标准峰值比值 - 化学成分数据库比对, 得到所需要的大气颗粒物的化学成分信息。

[0018] 本发明的基本原理是:

[0019] 大气颗粒物散射光场中 P 点的散射光强  $I_s$

$$[0020] \quad I_s = \frac{\lambda^2}{4\pi r^2} I_0 [I_{HH} + I_{VV}]$$

[0021] 其中 r 为球心到场点 P 距离, 为  $\lambda$  入射光波长,  $I_0$  为入射光强,  $I_{HH}$  为平行与入射光方向的极化光的相对强度;  $I_{VV}$  为垂直与入射光方向的极化光的相对光强。

[0022]  $I_{HH} = i_1(\theta) = |S_1(\theta)|^2$ ,  $I_{VV} = i_2(\theta) = |S_2(\theta)|^2$  其中  $S_1(\theta)$  和  $S_2(\theta)$  为两个与散射角有关的振幅函数,  $\theta$  为与散射光与入射光的夹角。可以表示为:

$$[0023] \quad S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n), \quad S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n)$$

[0024] 其中： $\pi_n = \frac{dP_n(\cos\theta)}{d(\cos\theta)}$ ， $\tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos\theta)$

[0025]  $P_n$ 、 $P_n^{(1)}$  分别为 Legendre 函数和一阶缔合 Legendre 函数，米散射系数  $a_n$ 、 $b_n$  可以表示为：

$$[0026] \begin{cases} a_n = \frac{\varphi_n(a)\varphi_n'(ma) - m\varphi_n'(a)\varphi_n(ma)}{\xi_n(a)\varphi_n'(ma) - m\xi_n'(a)\varphi_n(ma)} \\ b_n = \frac{m\varphi_n(a)\varphi_n'(ma) - \varphi_n'(a)\varphi_n(ma)}{m\xi_n(a)\varphi_n'(ma) - \xi_n'(a)\varphi_n(ma)} \end{cases}$$

[0027] 式中： $\varphi_n(x) = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} J_{n+1/2}(x)$ ， $\xi_n(x) = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} H_{n+1/2}^{(2)}(x)$ ， $\alpha = \frac{\pi R}{\lambda}$

[0028]  $J_{n+1/2}(x)$  和  $H_{n+1/2}^{(2)}$  分别是半整数 Bessel 函数和第二类 Hankel 函数。 $m$  为相对复折射率，即散射体的折射率与环境介质的折射率之比。

[0029] 大气颗粒物的成分不同时，其复折射率也各不相同，根据米散射理论计算大气颗粒物散射相函数分布时，不同角度的散射光强比值与大气颗粒物成分存在一定的相关性，因此可以实现大气颗粒物成分的判别。

[0030] 本发明与现有技术相比的优点在于：

[0031] (1) 本发明弥补了普通光散射法测量大气颗粒物参数的不足，比如单角度光散射法只能实现颗粒物粒径测量，前期的多角度探测方案只是基于粒子形状不同的设计而没有深入分析颗粒物化学成分与不同角度光散射信号的相互关系。本发明利用大气颗粒物的在小角度光散射下散射信号与粒径正相关、特定多角度光散射下散射信号与颗粒物化学成分相关的特性，实现单个大气颗粒物的粒径谱和化学成分的同时在线测量。该方法对于大气细颗粒物的变化特征及来源分析起到很好的技术支撑作用。

[0032] (2) 本发明实现简单、无需膜采样和离线分析，有效拓展了基于光散射原理的大气颗粒物多物理和化学参数的实时在线传感方法。

## 附图说明

[0033] 图 1 为本发明中大气颗粒物粒径和化学成分的实时在线测量方案示意图；

[0034] 图 2 为本发明中不同成分下大气颗粒物的多角度光散射特性示意图。

## 具体实施方式

[0035] 如图 1 所示，本发明的测量系统包括：激光器 1、准直透镜 2、光阑 3、第一探测器 4、第二探测器 5、第三探测器 6、第四探测器 7、光阱 8、信号处理电路 9、计算机 10。其中，激光器 1 选用 650nm、30mW 半导体激光器；光阱 8 采用布儒斯特光阱；探测器选用高灵敏度雪崩光电二极管；准直透镜 2 选用与激光器 1 发散角相匹配的非球面准直透镜；光阱 8 应实现出射激光的吸收效率大于 0.99，以避免杂散光对各探测器信号测量结果的干扰。采样颗粒物 11 应确保单个通过激光束，以实现单个大气颗粒物信息的实时测量与分析。

[0036] 激光器 1 出射的激光经准直透镜 2 准直入射到采样颗粒物 11 上，散射光分别由与

激光出射角度呈约 15 度、30 度、140 度、160 度方向的第四探测器 7、第三探测器 6、第二探测器 5、第一探测器 4 接收,其中第一探测器 4、第二探测器 5、第三探测器 6、第四探测器 7 的接收角小于  $\pm 4$  度,以确保各测量值的空间分辨率和有效性。直接透射的激光由光阱 8 吸收,第一探测器 4、第二探测器 5、第三探测器 6、第四探测器 7 将接收到各角度上的光信号  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$  分别转化为电信号并输入到信号处理电路 9,由信号处理电路 9 将信号变化量放大并将信号峰值  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  分别输入计算机 10 将  $P_4$  代入标准光强 - 粒径关系拟合函数得到所测量颗粒物粒径大小,将  $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$  比值与标准峰值比值 - 化学成分数据库比对判别出大气颗粒物的化学成分信息。

[0037] 如图 2 所示,沙尘、海盐、工业灰尘、盐类等均具有特定的光散射相函数,即存在特定的散射信号强度与散射角度的对应关系。在 15 度左右的散射光受大气颗粒物成分的影响小,作为测量颗粒物粒径的信号;在 30 度、140 度、160 度方向则存在不同的比值关系,作为分析颗粒物成分的信号。

[0038] 本发明测量方法实现步骤如下:

[0039] 第一步,使颗粒物单个依次通过激光束,各探测器得到信号峰值  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ ;

[0040] 第二步,测量在同样的大气颗粒物采样环境下,标准颗粒粒径(标准颗粒物采用 Duke 标准粒子,粒径分别为:0.3 $\mu\text{m}$ 、0.5 $\mu\text{m}$ 、0.7 $\mu\text{m}$ 、1.0 $\mu\text{m}$ 、2.0 $\mu\text{m}$ 、3.0 $\mu\text{m}$ 、5.0 $\mu\text{m}$ 、10 $\mu\text{m}$ )与第四探测器 7 的信号光强之间的关系,通过三阶线性拟合得到标准光强 - 粒径关系曲线。其中,拟合公式为  $y=B_0+B_1*x^1+B_2*x^2+B_3*x^3$ ,  $y$  为标准光强,  $x$  为标准颗粒粒径大小,  $B_0$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  为拟合参数;

[0041] 第三步,测量在同样的大气颗粒物采样环境下,标准颗粒成分(选取沙尘、海盐、工业灰尘、盐类等颗粒物)与  $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$  比值直接的关系,得到标准峰值比值 - 化学成分数据库;

[0042] 第四步,测量在采用过程中通过激光光斑的单颗粒物散射光信号,将信号峰值  $P_4$  与标准光强 - 粒径关系曲线比对,得到所需要的大气颗粒物粒径信息;

[0043] 第五步,测量在采用过程中通过激光光斑的单颗粒物散射光信号,将信号峰值比值  $P_1/P_4$ 、 $P_2/P_4$ 、 $P_3/P_4$  与标准峰值比值 - 化学成分数据库比对,得到所需要的大气颗粒物的化学成分信息。

[0044] 总之,采用单个激光器和四个探测器,并进行数据对比和分析以实现单颗粒物粒径和化学成分信号的同时在线测量。本发明实现简单、无需膜采样和离线分析,有效拓展了基于光散射原理的大气颗粒物多物理和化学参数的在线传感方法,特别是为大气颗粒物的实时监测与源解析提供了可靠的数据。

[0045] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。

[0046] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

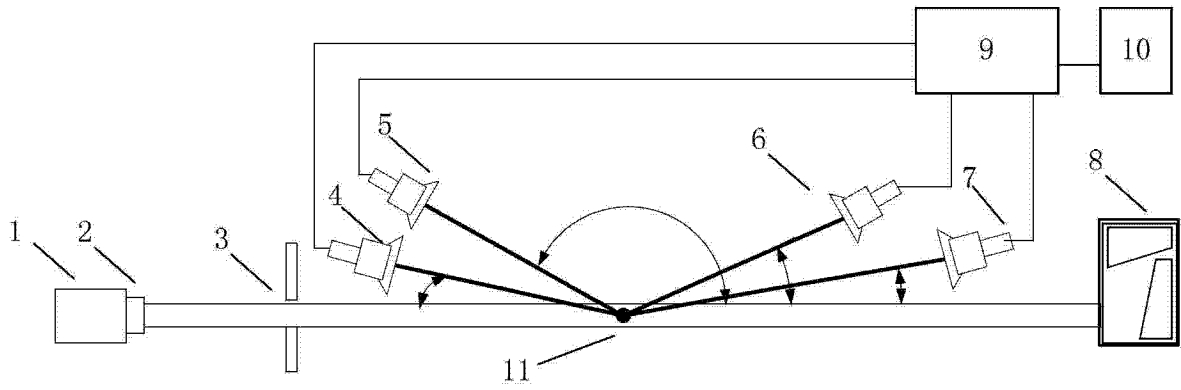


图 1

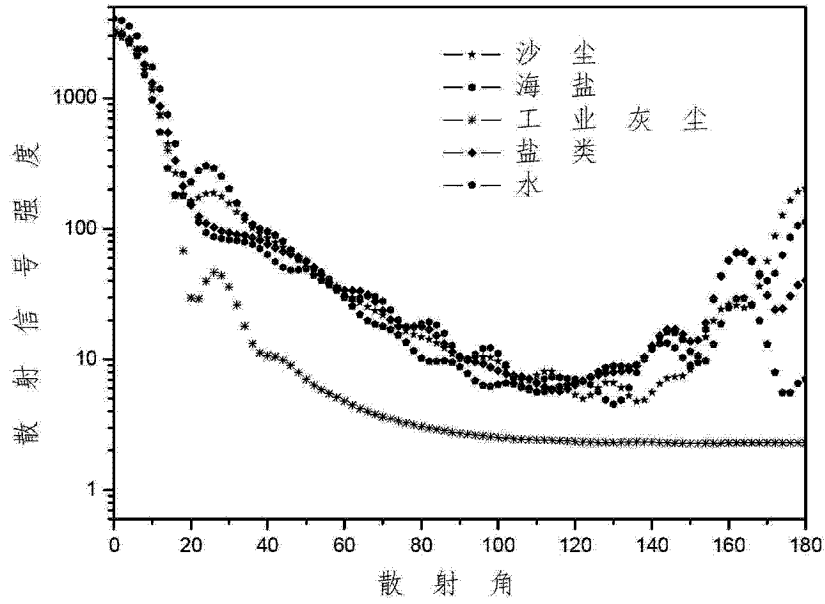


图 2