

基于光散射理论的煤层气颗粒杂质质量浓度研究

乔丹¹,王志勇²,刘建丽^{1*}

(1.山西大学 物理电子工程学院,山西 太原 030006;

2.山西国化能源有限责任公司,山西 太原 030006)

摘要:分析和精确测定煤层气中颗粒杂质的质量浓度对保障煤层气质量和煤层气集输系统的安全具有重要意义。本文对光散射法测量颗粒物的质量浓度进行了理论和实验研究。对煤层气中常见的粉尘颗粒物,理论上分析了光源波长、颗粒物粒径、颗粒物折射率对散射光分布的影响。实验选用532 nm激光作为光源,对标准粉尘颗粒物进行了散射实验,该实验装置可以有效应用于大质量浓度范围的颗粒物质量浓度测定;同时,实验标定90°~110°为最优散射角,在该散射角下测量的质量浓度平均相对误差最小,约5%。

关键词:颗粒物质量浓度;光散射法;颗粒物粒径;散射角

中图分类号:O439 文献标志码:A 文章编号:0253-2395(2024)06-1238-08

Research on Mass Concentration of Particulate Matter in Coalbed Methane Based on Light Scattering Theory

QIAO Dan¹, WANG Zhiyong², LIU Jianli^{1*}

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Guohua Energy Co., Ltd, Taiyuan 030006, China)

Abstract: For the purpose of assuring the quality of coalbed methane and the security of the coalbed methane gathering and transportation system, analysis and precise measurement of the mass concentration of particulate matter in coalbed methane are of greatest importance. In this paper, theoretical and experimental researches are used to determine the mass concentration of particulate matter using the light scattering method. Theoretically, the distribution of scattered light for typical dust particles in coalbed methane was examined in relation to the wavelength of the light source, the size of the particles, and the refractive index of the particles. The experiment employed a 532 nm laser as its light source and tested the scattering of common dust particles. This experiment can be utilized to determine particle mass concentration with effectiveness in a wide concentration range. Additionally, the ideal scattering angle, with an average relative error of the measured mass concentration at only about 5%, is between 90 and 110 degrees.

Key words: mass concentration; light scattering; particle size; scattering angle

0 引言

煤层气是与煤伴生、共生的气体资源,是近年来国家大力发展的绿色能源。我国煤层气

资源丰富,在煤层气大规模开采利用的背景下^[1],保障煤层气质量和集输系统的安全具有重要意义。在煤层气的开采过程中,煤粉、岩屑、泥浆等固体颗粒物会随气体一同进入运输

收稿日期:2023-03-23;接受日期:2023-09-04

作者简介:乔丹(1998—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为颗粒物质量浓度的测量与分析。E-mail:qiaodan6014@163.com

* 通信作者:刘建丽(LIU Jianli),E-mail:liujl@sxu.edu.cn

引文格式:乔丹,王志勇,刘建丽.基于光散射理论的煤层气颗粒杂质质量浓度研究[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(6):1238-1245. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023124

管道,经过重力分离器和过滤器后,煤层气中依然有大量粒径在微米量级的颗粒物。这些颗粒物会对管道管壁冲蚀,造成严重安全生产事故^[2],因此,分析和精确测量煤层气中的颗粒物质量浓度十分重要。

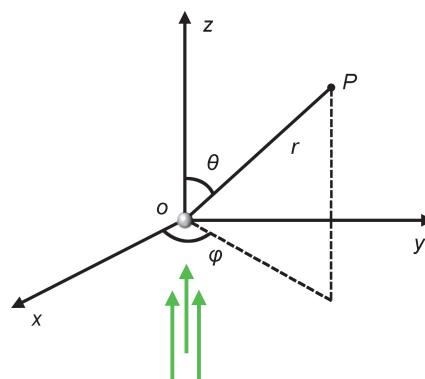
常见的颗粒物质量浓度检测方法可分为采样法和非采样法两大类,采样法中主要有滤膜称重、微量振荡天平和压电晶体法等^[3],非采样法中主要有电容法、光透射和光散射法等^[4]。采样法原理简单,结果可靠,但取样操作较为复杂、自动化程度较低。非采样法通过颗粒物的物理、光学等性质进行颗粒物浓度标定,光散射法相比于其他方法,测量浓度范围大、可分析的颗粒物粒径范围宽(纳米颗粒、微米颗粒)、准确度和重复性好^[3-5]。基于这些优势,光散射法已广泛应用于城市空气、燃煤电厂排放气体、粉尘车间等环境中的颗粒物质量浓度测量^[6-14]。2009年,Grimm等采用90°散射角测量装置监测空气中PM1、PM2.5-1、PM10-2.5,测量范围0~60 μg/m³,相对偏差约±10%^[8]。2017年,赵济坤等搭建基于光散射法的烟尘浓度测量装置,针对浓度范围在10 mg/m³~100 mg/m³的含尘气体,测量相对误差在10%以内^[9]。2018年,Chen等研究了燃煤电厂排放气体的颗粒物粒径、形貌、组成成分等参数对颗粒物质量浓度测量的影响,实验指出,在约25°的散射角下,颗粒物质量浓度测量的零点漂移最小、测量灵敏度相对较高^[10]。2019年,徐畅等针对燃煤电厂排放设计颗粒物质量浓度测量装置,测量范围为0~30 mg/m³,测量相对误差在10%以内^[11]。

煤层气中的颗粒物质量浓度远大于空气以及燃煤电厂排放气体中的颗粒物质量浓度。例如,经检测的山西省天然气管网郑庄站进气端煤层气中颗粒物质量浓度大约为416 mg/m³,长子站进气端约为532 mg/m³,屯留站进气端约为153 mg/m³等;煤层气开采企业的集输站内,颗粒物质量浓度通常大于1 g/m³。长输管网企业对煤层气进行多级处理和过滤后^[15-16],煤层气中的颗粒物质量浓度将大大减小,经过处理后的高品质煤层气可对接国家天然气管网。因此,相较于现有研究,本文关注两个问题,一是在大的颗粒物质量浓度范围内,光散射法是否

依然能够有效检测;二是前向散射、90°散射、后向散射,研究各个角度下的散射情况,标定最佳散射角。煤层气中常见的粉尘颗粒物主要有Fe₃O₄、SiO₂、Al₂O₃、CaO、MnO等;颗粒物粒径主要集中在0.1 μm~20 μm的范围内,下面针对这些颗粒物展开分析。本文将为煤层气上游企业中颗粒物质量浓度的检测提供理论和实验参考。

1 颗粒物散射特性分析

光散射法是一定波长的光照射在颗粒物上,散射光强、散射光功率与颗粒物的质量浓度成正比,从而可推算出颗粒物的质量浓度^[17-20]。颗粒物的弹性光散射理论主要有瑞利散射、米氏散射和夫琅禾费衍射。由于常见光源的波长与研究的微米量级的颗粒物粒径大小相当,米氏散射理论在这类颗粒物质量浓度的研究中得到了广泛的应用。图1所示为一折射率 m 、粒径为 D 的球形颗粒位于坐标原点处;一束光强为 I_0 、波长为 λ 的单色平行自然光沿着 z 轴方向入射^[21-22]。



注:绿色箭头为光的入射方向;点P为观察点; r 为点P到原点的距离; θ 为散射角; φ 为方位角。

图1 米氏散射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Mie scattering

根据米氏散射理论,空间P点的散射光强可表示为^[20-26]

$$I_s(\theta) = \frac{\lambda^2 I_0}{8\pi^2 r^2} [i_1(\lambda, D, m, \theta) + i_2(\lambda, D, m, \theta)], \quad (1)$$

其中 $i_1(\lambda, D, m, \theta)$ 和 $i_2(\lambda, D, m, \theta)$ 与入射光波长、颗粒物粒径、折射率和散射角有关,分别为散射光中偏振垂直于和平行于散射面的散射光强分布函数。

$$i_1(\lambda, D, m, \theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \right|^2, \quad (2)$$

$$i_2(\lambda, D, m, \theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)] \right|^2, \quad (3)$$

其中 a_n 和 b_n 为米氏散射系数, π_n 和 τ_n 为米氏散射角函数^[26-27]。

考虑散射区域内颗粒物总数为 N 、颗粒粒径为 D 的单分散颗粒群, 假设散射光不存在相干性, 单分散颗粒群的散射光强 $I_{SM}(\theta)$ 可认为是单个颗粒物散射光强的 N 倍, 即

$$I_{SM}(\theta) = \frac{\lambda^2 I_0 N}{8\pi^2 r^2} [i_1(\lambda, D, m, \theta) + i_2(\lambda, D, m, \theta)] \quad (4)$$

考虑散射区域内颗粒物总数为 N 、颗粒粒径分布函数为 $f(D)$ 的多分散颗粒群, 其散射光强 $I_{SP}(\theta)$ 为

$$I_{SP}(\theta) = \int_0^{\infty} \frac{\lambda^2 I_0}{8\pi^2 r^2} [i_1(\lambda, D, m, \theta) + i_2(\lambda, D, m, \theta)] N f(D) dD \quad (5)$$

已知颗粒物的密度为 ρ , 散射区域体积为 V , 可知颗粒物的质量浓度 C_m 为

$$C_m = \frac{\rho \pi \bar{D}^3}{6} \frac{N}{V}, \quad (6)$$

结合(5)式和(6)式, 多分散颗粒群的散射光强可表示为

$$I_{SP}(\theta) = I_0 C_m \int_0^{\infty} \frac{3V\lambda^2}{4\pi^3 r^2 \rho \bar{D}^3} [i_1(\lambda, D, m, \theta) + i_2(\lambda, D, m, \theta)] f(D) dD \quad (7)$$

由(5)式和(7)式均可知, 颗粒物的质量浓度与颗粒群的散射光强成正比。

表1 煤层气中的四种常见颗粒物及参数

Table 1 The parameters of the four particulate matters in coalbed methane

颗粒物	折射率	密度/(g·cm ⁻³)
Fe ₃ O ₄	2.9	5.18
SiO ₂	1.46	2.2
Al ₂ O ₃	1.66	3.5
CaO	1.84	3.35

表1所示为煤层气中的几种常见颗粒物, 列出了颗粒物的折射率和密度。以单分散颗粒群为例, 讨论散射光的特性, 散射光的特性直接反映质量浓度的特征。图2所示为不同入射

光波长($\lambda=532$ nm、808 nm、1 064 nm)下, Fe₃O₄ 和 SiO₂ 颗粒群的散射光强分布图。从图中可以看出, 当 $D=0.5$ μm 时, 不同散射角下的散射光强波动较大, 入射光波长对散射光强的影响较大; 当 $D=5$ μm 时, 不同波长下的散射光强分布稍有不同, 但总体来看, 散射光强的大小在相同的数量级上。

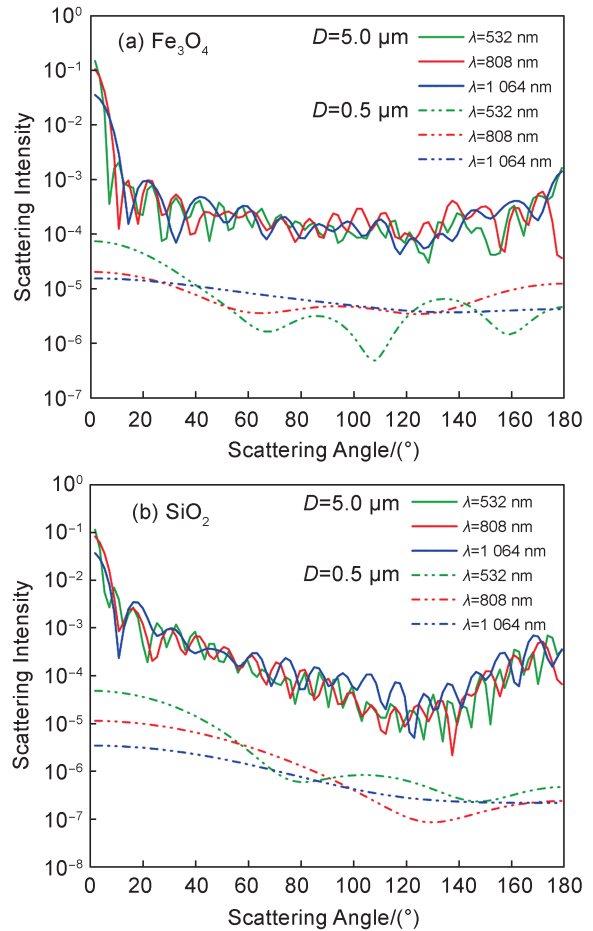


图2 不同入射光波长下的散射光强分布图

Fig. 2 Scattering light intensity of particles with different laser wavelengths

考察不同粒径 ($D=0.5$ 、1.0、5.0、10.0 μm) 的颗粒物, 选用波长 $\lambda=532$ nm 的激光束照射到不同粒径的 Fe₃O₄ 和 SiO₂ 颗粒物上, 得到图3所示的散射光强分布图。由图可知, 对两种不同的颗粒物, 散射光强均随着颗粒物粒径的增大而增大; 在 $D=0.5$ μm 时, 前向散射明显优于后向散射; 随着 D 的增大, 后向散射光强逐渐增强。颗粒物粒径对散射光强的大小和分布均有影响。

图4给出了 Fe₃O₄、SiO₂、Al₂O₃ 和 CaO 四种

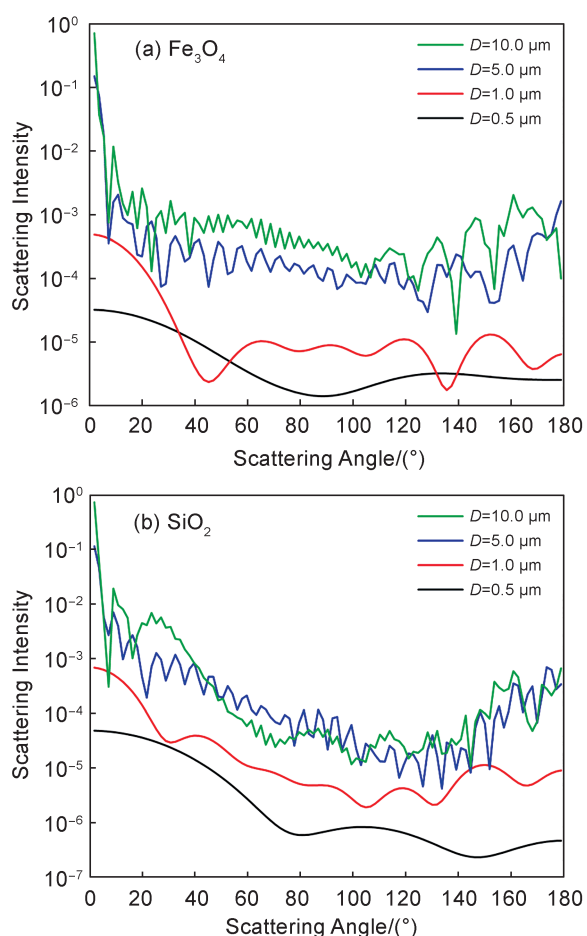


图3 不同颗粒物粒径的散射光强分布图

Fig. 3 Scattering light intensity of particles with different sizes

不同颗粒物的散射光强分布图。在 $D=0.5 \mu\text{m}$ 时, 折射率对后向散射的光强影响较大; 随着粒径的增大, 光强差异变小。考虑不能完全忽略颗粒物对入射光的吸收作用, 因此, 需要考察复折射率的情况。以 Fe_3O_4 的折射率取 2.9、 $2.9-0.05i$ 、 $2.9-0.14i$ 为例, 得到图 5 所示的散射光强图。折射率虚部数值为吸收系数^[27], 由图可知, 随着颗粒物对光吸收的增加, 散射角 $\theta > 20^\circ$ 的散射光强明显减小, 后向散射减弱。

2 颗粒物质量浓度光学测量方法

基于光散射原理测量颗粒物质量浓度的实验中, 利用光电探测器采集散射光信号, 采集的光信号为一立体角内的散射光功率。图 6 所示为计算散射光功率的示意图, 采光区域的中心轴线与 Z 轴的夹角为散射角 θ , 散射光功率为散射光强在分析区域内的面积分。

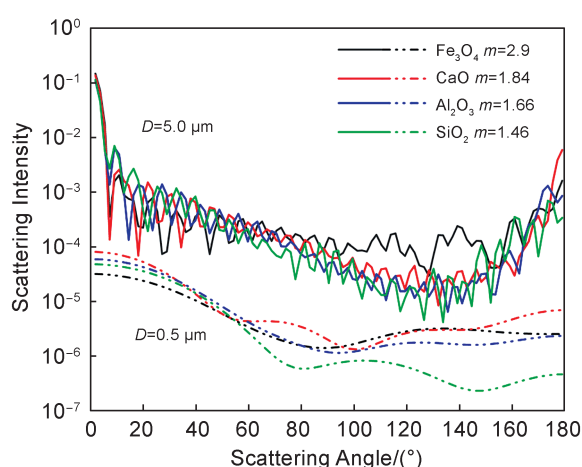


图4 四种不同颗粒物的散射光强分布图

Fig. 4 Scattering light intensity of four different particles

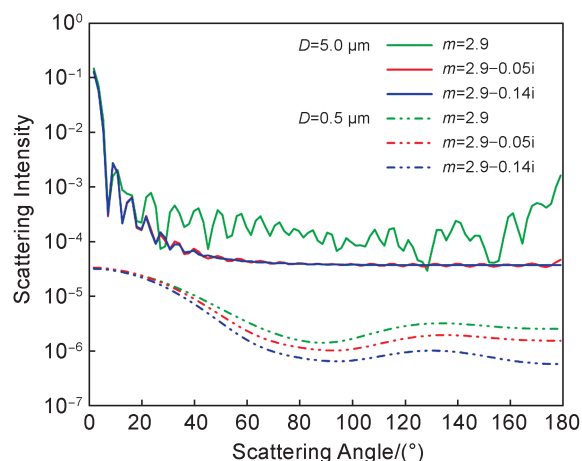
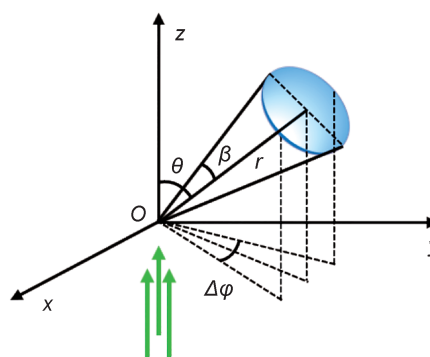


图5 颗粒物对光的吸收作用对散射光强的影响

Fig. 5 The influence of the absorption of light on the scattering light intensity



注: 绿色箭头为光的入射方向; r 为采光区域中心到原点的距离; θ 为散射角; β 为采光半角; $\Delta\varphi$ 为方位角变化量。

图6 散射光功率的计算示意图

Fig. 6 Power calculation for measuring mass concentration of particulate matter

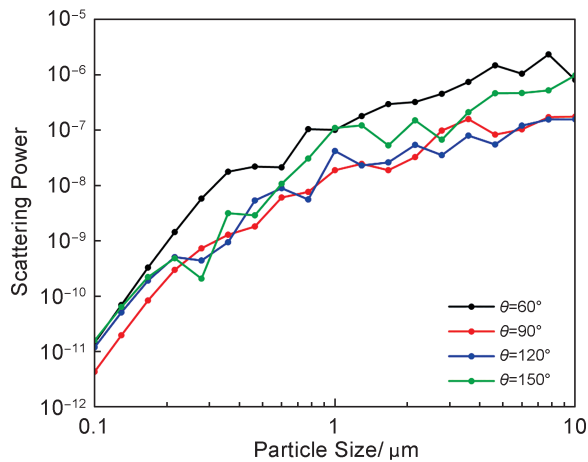
考虑颗粒总数为 N 、颗粒粒径为 D 的单分散颗粒群, 探测器接收到的散射光功率为^[28-29]

$$P_{SM} = \int_{\theta-\beta}^{\theta+\beta} I_{SM} r^2 \Delta\varphi \sin\theta d\theta = I_0 C_m \frac{3V\lambda^2}{4\pi^3 \rho D^3} \int_{\theta-\beta}^{\theta+\beta} [i_1(\lambda, D, m, \theta) + i_2(\lambda, D, m, \theta)] \Delta\varphi \sin\theta d\theta, \quad (8)$$

同理,对多分散颗粒群,探测器接收到的散射光功率为

$$P_{SP} = \int_{\theta-\beta}^{\theta+\beta} I_{SP} r^2 \Delta\varphi \sin\theta d\theta = I_0 C_m \frac{3V\lambda^2}{4\pi^3 \rho D^3} \int_{\theta-\beta}^{\theta+\beta} \Delta\varphi \sin\theta d\theta \int_0^\infty [i_1(\lambda, D, m, \theta) + i_2(\lambda, D, m, \theta)] f(D) dD. \quad (9)$$

一般考虑粉尘颗粒的粒径分布函数不变,由上两式可知散射光功率与测量区域的光强成正比,与颗粒物的质量浓度成正比。在参数 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 、 $m = 1.46$ 、 $\beta = 20^\circ$ 的情况下,不同散射角下的散射光功率如图 7 所示。 $\theta = 60^\circ$ 和 90° 时,散射光功率基本上随着粒径的增大而增大; $\theta = 120^\circ$ 和 150° 时,不同粒径下的散射光功率波动较大。图 8 给出了 $\theta = 90^\circ$ 时,不同采光半角下的散射光功率,从图中可以看出, β 越大,散射光功率越大。



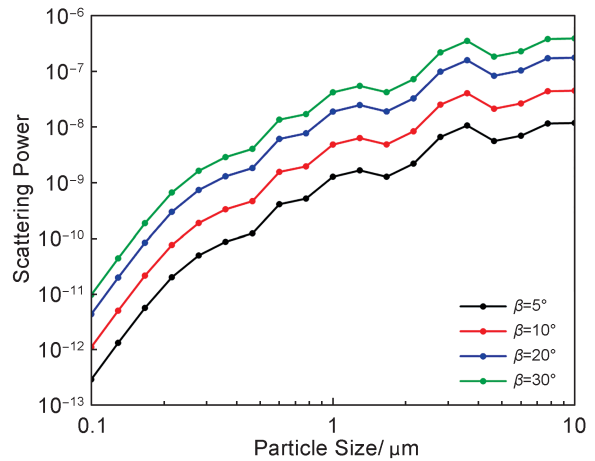
注:横坐标为对数坐标。

图 7 不同散射角下的散射光功率与粒径之间的关系

Fig. 7 The power versus the particle size with different scattering angles

3 实验测量标准粉尘颗粒物的质量浓度

测量颗粒物质量浓度的实验装置示意图如图 9 所示。选用波长为 532 nm 的固体激光器作为光源,通过透镜组后得到光斑直径约 3.5 mm 的平行光束。标准粉尘颗粒物选用超细试验粉



注:横坐标为对数坐标。

图 8 不同采光半角下的散射光功率与粒径之间的关系

Fig. 8 The power versus the particle size with different detection angles

尘(型号:ISO 12103-1 A1,简称 A1 粉尘)和精细试验粉尘(型号:ISO 12103-1 A2,简称 A2 粉尘),其主要成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 等,占比分别为 68%~76%、10%~15%、2%~5%、2%~5%、2%~4%;A1 粉尘的平均粒径约为 $5.1 \mu\text{m}$,A2 粉尘的平均粒径约为 $17.6 \mu\text{m}$ 。散射区域为 16.0 mm 光程的比色皿容器,利用蒸馏水为载体,通过振荡和搅拌使粉尘颗粒均匀分布在蒸馏水中,模拟粉尘颗粒在气体中的悬浮状态。通过颗粒物的透射光束进入光陷阱,最大程度地避免光束反射和杂散到探测区域;散射光经过光阑、聚焦透镜进入光电探测器,其中 $\beta = 29^\circ$;光电探测器将收集到的光信号转化为电压信号,实验通过光电探测器的电压信号来表征颗粒物的质量浓度^[30-31]。

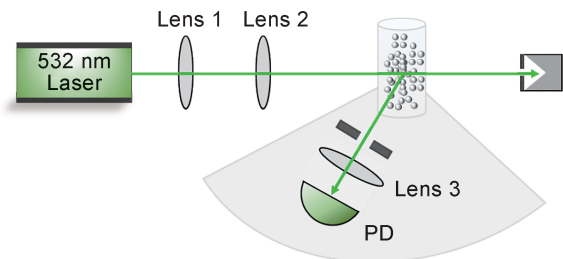


图 9 测量颗粒物质量浓度的实验装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the experimental setup

图 10 给出了四个不同的散射角下,光电探测器的电压值与称重法标定的颗粒物质量浓度之间的关系。图中方块、圆点、三角形分别为

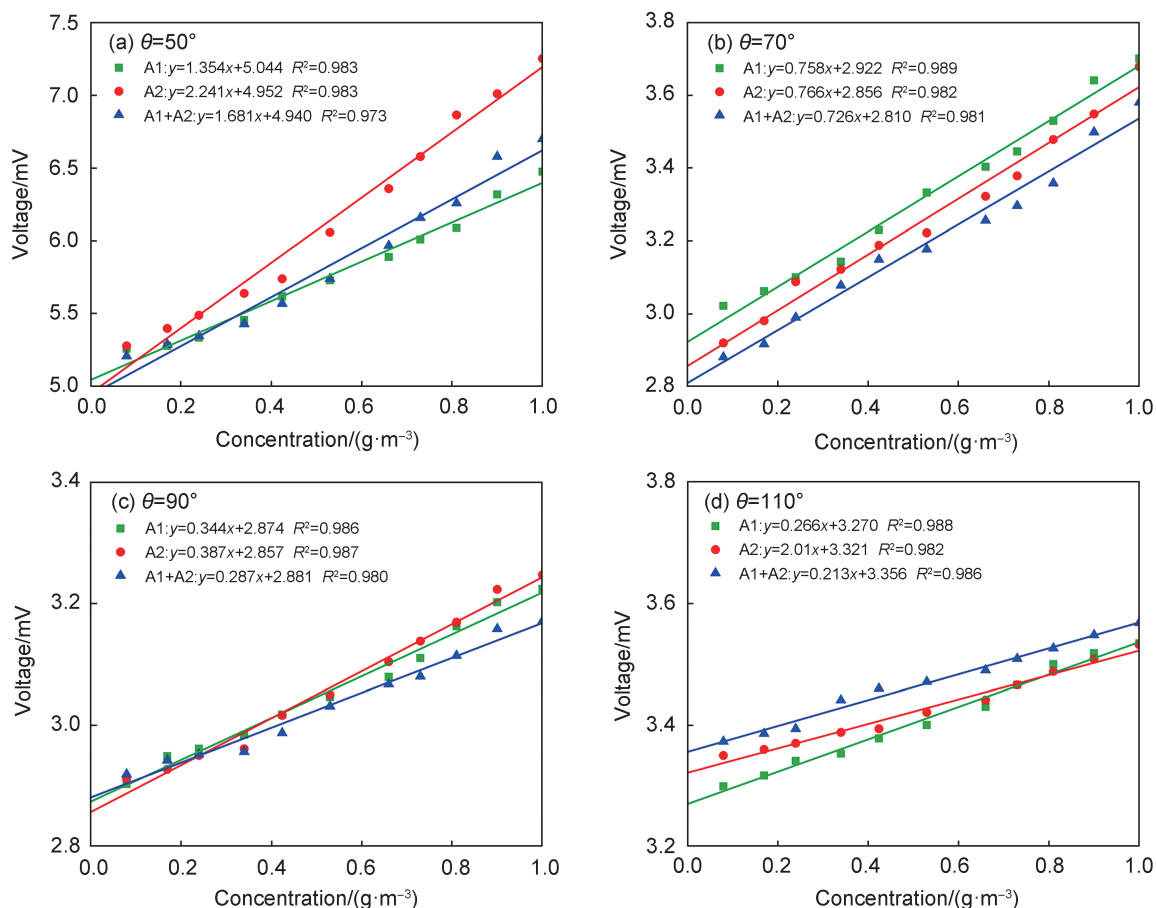


图 10 不同散射角下,光电探测器的电压信号与称重法标定的质量浓度之间的关系

Fig. 10 The measured voltages of photodetector versus the mass concentration measured by weighing method under different scattering angle

利用 A1 粉尘、A2 粉尘、A1A2 混合粉尘 (1:1 混合) 测得的实验数据,实线为拟合线。从图中可以看出,颗粒物的质量浓度与光电探测器的电压值之间均呈现较好的线性关系,线性拟合优度 R^2 均大于 0.98;拟合直线截距不为零,表示该装置有零点漂移,需要校准。通过大量实验数据汇总,表格 2 给出了该装置的平均相对误差,在测量范围为 $0 \sim 1.0 \text{ g/m}^3$ 内时, 90° 散射角下的测量平均相对误差较小,为 5.33%;在测量范围为 $1.0 \text{ g/m}^3 \sim 10.0 \text{ g/m}^3$ 内时, 110° 散射角下的测量平均相对误差较小,为 4.27%。根据实验数据,评估给出 $90^\circ \sim 110^\circ$ 为最优化的实验散射角。该装置可对标准粉尘颗粒物的质量浓度进行测定,测量范围为 $0 \text{ g/m}^3 \sim 1.0 \text{ g/m}^3$ 、 $1.0 \text{ g/m}^3 \sim 10.0 \text{ g/m}^3$,系统测量误差较小。该装置的测定浓度范围和测量精度均满足煤层气上游企业的测定要求。

表 2 不同散射角下颗粒物质量浓度测量的平均相对误差

Table 2 Average relative errors in the mass concentration measurement under different scattering angles

测量范围	50°	70°	90°	110°	130°
$0 \text{ g/m}^3 \sim 1 \text{ g/m}^3$	6.20%	6.26%	5.33%	5.83%	7.17%
$1.0 \text{ g/m}^3 \sim 10 \text{ g/m}^3$	6.20%	5.87%	4.83%	4.27%	5.73%

4 结论

近年来,煤层气中颗粒物质量浓度的研究受到了人们的关注。光散射法是测量颗粒物质量浓度的有效方法。本文分析了光源波长、颗粒物粒径、颗粒物折射率对散射光分布的影响。对粒径较小的颗粒物,优化选取短波长光源;对粒径较大的颗粒物,光源波长对散射光强大小的影响很小。颗粒物粒径越小,前向散射较强;颗粒物粒径增大,后向散射增强。颗粒物的折射率对散射光强的大小和分布均有影响,尤其是复折射率,颗粒物对光的吸收越强,后向散射

会明显减弱。实验上搭建了颗粒物浓度测量装置,对标准粉尘颗粒物进行了散射实验,在大的颗粒物质量浓度范围内,质量浓度与光电探测器的探测值之间均呈现良好的线性关系,光散射法是有效检测方法;实验选定了最佳散射角,为后续仪器化实验装置提供了关键参数。标准粉尘的成分主要有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 等,煤层气中的颗粒物成分主要有 Fe_3O_4 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MnO 等,颗粒物成分较为相似,但占比不同,因此,需要根据实际颗粒物情况来标定测量的电压值与质量浓度值之间的变换参数。本文的理论和实验研究为煤层气中的颗粒物质量浓度的检测提供了参考。

参考文献:

- [1] 张懿,朱光辉,郑求根,等.中国煤层气资源分布特征及勘探研究建议[J].非常规油气,2022,9(4):1-8. DOI: 10.19901/j.fcgyq.2022.04.01.
ZHANG Y, ZHU G H, ZHENG Q G, et al. Distribution Characteristics of Coalbed Methane Resources in China and Recommendations for Exploration Research[J]. *Unconv Oil Gas*, 2022, 9(4): 1-8. DOI: 10.19901/j.fcgyq.2022.04.01.
- [2] 李德慧,李国富,刘亮亮,等.山西省煤层气(瓦斯)开发利用现状及发展方向[J].矿业安全与环保,2022,49(2):132-136. DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2022.02.024.
LI D H, LI G F, LIU L L, et al. Present Situation and Development Direction of Coalbed Methane (Gas) Exploitation and Utilization in Shanxi Province[J]. *Min Saf Environ Prot*, 2022, 49(2): 132-136. DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2022.02.024.
- [3] 李昆,钟磊,张洪泉.烟尘浓度测量方法综述[J].传感器与微系统,2013,32(2):8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9787.2013.02.003.
LI K, ZHONG L, ZHANG H Q. Review of Smoke Concentration Measurement Method[J]. *Transducer Microsyst Technol*, 2013, 32(2): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9787.2013.02.003.
- [4] 张珊珊,雷志勇.基于光散射与透射原理的粉尘浓度测量方法研究[J].计算机与数字工程,2016,44(2):362-366. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9722.2016.02.040.
ZHANG S S, LEI Z Y. Atmosphere Dust Detection Based on Light Scattering and Transmission[J]. *Comput Digit Eng*, 2016, 44(2): 362-366. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9722.2016.02.040.
- [5] 杨永青,迟颖.超低排放颗粒物质量浓度测量装置研制及试验研究[J].科技创新与生产力,2020(5):72-74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9146.2020.05.072.
YANG Y Q, CHI Y. Development and Experimental Study of Mass Concentration Measurement Device of Ultra-low Emission Particulate Matter[J]. *Taiyuan Sci Technol*, 2020(5): 72-74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9146.2020.05.072.
- [6] BAU S, JACOBY J, WITSCHGER O. Evaluation of the Diffusion Size Classifier (meDiSC) for the Real-time Measurement of Particle Size and Number Concentration of Nanoaerosols in the Range 20-700 nm[J]. *J Environ Monit*, 2012, 14(3): 1014-1023. DOI: 10.1039/C2EM10619A.
- [7] WANG X L, CHANCELLOR G, EVENSTAD J, et al. A Novel Optical Instrument for Estimating Size Segregated Aerosol Mass Concentration in Real Time[J]. *Aerosol Sci Technol*, 2009, 43(9): 939-950. DOI: 10.1080/02786820903045141.
- [8] GRIMM H, EATOUGH D J. Aerosol Measurement: The Use of Optical Light Scattering for the Determination of Particulate Size Distribution, and Particulate Mass, Including the Semi-volatile Fraction[J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2009, 59(1): 101-107. DOI: 10.3155/1047-3289.59.1.101.
- [9] 赵济坤,程永强.基于光散射法的烟尘发生及浓度测量系统设计[J].激光与红外,2017,47(8):996-1001. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.08.014.
ZHAO J K, CHENG Y Q. Design of Dust Generation and Concentration Measurementsystem Based on Light Scattering Method[J]. *Laser Infrared*, 2017, 47(8): 996-1001. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.08.014.
- [10] CHEN D, LIU X W, HAN J K, et al. Measurements of Particulate Matter Concentration by the Light Scattering Method: Optimization of the Detection Angle[J]. *Fuel Process Technol*, 2018, 179: 124-134. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.06.016.
- [11] 徐畅,陆勇,陈璐,等.燃煤电厂超低排放背景下颗粒物在线测量方法研究[J].现代化工,2019,39(11)221-225. DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.11.047.
XU C, LU Y, CHEN L, et al. Research on On-line Monitoring Technology for Particulate Matters Based on Ultra-low Emission Requirements in Coal-fired Power Plants[J]. *Mod Chem Ind*, 2019, 39(11)221-225. DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.11.047.
- [12] LI T H, WU Y. Design of Indoor Dust Concentration Monitor Based on Light Scattering Detection Method[J]. *Sci Res Essays*, 2014, 9(9): 321-324. DOI: 10.5897/sre2014.5910.
- [13] 付士根,亢永,王庆.基于光散射法粉尘个体监测仪研制[J].中国安全生产科学技术,2021,17(6):149-153. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.06.024.
FU S G, KANG Y, WANG Q. Development of Individual Dust Monitor Based on Light Scattering Method[J]. *J Saf Sci Technol*, 2021, 17(6): 149-153. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.06.024.
- [14] 徐化超,程学珍,李继明.基于前向散射原理的差分式粉

- 尘浓度测量装置[J]. 激光杂志, 2019, **40**(5): 54-57. DOI: 10.14016/j.cnki.jgzz.2019.05.054.
- XU H C, CHENG X Z, LI J M. Differential Dust Concentration Measuring Device Based on Forward Scattering Principle[J]. *Laser J*, 2019, **40**(5): 54-57. DOI: 10.14016/j.cnki.jgzz.2019.05.054.
- [15] 郭简, 梅永贵, 王景悦, 等. 沁水盆地煤层气集输管网粉尘监测分析[J]. 天然气工业, 2014, **34**(8): 118-122. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2014.08.019.
- GUO J, MEI Y G, WANG J Y, *et al.* Coal Dust Detection and Analysis of the Gathering and Flow Lines of the Qinshui CBM Gas Field[J]. *Nat Gas Ind*, 2014, **34**(8): 118-122. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2014.08.019.
- [16] 刘震, 姬忠礼, 于明俭, 等. 煤层气集输系统颗粒杂质分布及应对措施[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(9): 2281-2286. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0208.
- LIU Z, JI Z L, YU M J, *et al.* Distribution Characteristics and Solutions on Particulate Matter in Coalbed Methane Gathering System[J]. *J China Coal Soc*, 2016, **41**(9): 2281-2286. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0208.
- [17] CHEN D, LIU X W, HAN J K, *et al.* A New Angular Light Scattering Measurement of Particulate Matter Mass Concentration for Homogeneous Spherical Particles[J]. *Sensors*, 2019, **19**(10): 2243. DOI: 10.3390/s19102243.
- [18] FU S G, LIU Q M, HUANG J G, *et al.* Application Research of Light Scattering Principle in Dust Measurement System[J]. *China Saf Sci J*, 2020, **30**: 37. DOI: 10.16265/J.CNKI.ISSN1003-3033.2020.06.006.
- [19] JONES A R. Light Scattering for Particle Characterization [J]. *Prog Energy Combust Sci*, 1999, **25**(1): 1-53. DOI: 10.1016/s0360-1285(98)00017-3.
- [20] DICK W D, ZIEMANN P J, MCMURRY P H. Multiangle Light-scattering Measurements of Refractive Index of Submicron Atmospheric Particles[J]. *Aerosol Sci Technol*, 2007, **41**(5): 549-569. DOI: 10.1080/02786820701272012.
- [21] 汪文涛, 周骛, 蔡小舒, 等. 基于后向光散射的无组织排放颗粒物质量浓度远程测量方法[J]. 光学学报, 2019, **39**(12): 1201001. DOI: 10.3788/AOS201939.1201001.
- WANG W T, ZHOU W, CAI X S, *et al.* Remote Measurement Method for Mass Concentration of Fugitive-dust-emission Particulate Based on Backward Light Scattering[J]. *Acta Opt Sin*, 2019, **39**(12): 1201001. DOI: 10.3788/AOS201939.1201001.
- [22] 胡森, 谢家亮, 吴端法, 等. 基于CCD后向散射激光信号的PM 2.5 测量研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(2): 0201002. DOI: 10.3788/AOS201535.0201002.
- HU M, XIE J L, WU D F, *et al.* Measurement of PM 2.5 Concentration Based on the Charge-Coupled Device Backward Scattering Lidar[J]. *Acta Opt Sin*, 2015, **35**(2): 0201002. DOI: 10.3788/AOS201535.0201002.
- [23] 吴金雷, 张金碧, 张莉, 等. 大气颗粒物近前向光散射特性研究[J]. 光学学报, 2016, **36**(5): 0529001. DOI: 10.3788/AOS201636.0529001.
- WU J L, ZHANG J B, ZHANG L, *et al.* Near Forward Light Scattering Characteristics of Airborne Particles[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(5): 0529001. DOI: 10.3788/AOS201636.0529001.
- [24] 沈建琪, 刘蕾. 经典Mie散射的数值计算方法改进[J]. 中国粉体技术, 2005, **11**(4): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5548.2005.04.001.
- SHEN J Q, LIU L. An Improved Algorithm of Classical Mie Scattering Calculation[J]. *China Powder Sci Technol*, 2005, **11**(4): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5548.2005.04.001.
- [25] 张合勇, 赵卫疆, 任德明, 等. 球形粒子Mie散射参量的Matlab改进算法[J]. 光散射学报, 2008, **20**(2): 102-110. DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2006.03.006
- ZHANG H Y, ZHAO W J, REN D M, *et al.* Improved Algorithm of Mie Scattering Parameter Based on Matlab [J]. *J Light Scatt*, 2008, **20**(2): 102-110. DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2006.03.006
- [26] 马英, 王龙江, 俞杰, 等. 基于近前向光散射法的气溶胶浓度测量[J]. 激光与光电子学进展, 2017, **54**(9): 092901. DOI: 10.3788/LOP54.092901.
- MA Y, WANG L J, YU J, *et al.* Measurement of Aerosol Concentration Based on Forward Light Scattering Method [J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2017, **54**(9): 092901. DOI: 10.3788/LOP54.092901.
- [27] YU X Y, SHI Y B, WANG T, *et al.* Dust-concentration Measurement Based on Mie Scattering of a Laser Beam[J]. *PLoS One*, 2017, **12**(8): e0181575. DOI: 10.1371/journal.pone.0181575.
- [28] ZHANG R R, ZHAO H. Small-angle Particle Counting Coupled Photometry for Real-time Detection of Respirable Particle Size Segmentation Mass Concentration[J]. *Sensors*, 2021, **21**(17): 5977. DOI: 10.3390/s21175977.
- [29] ZHANG H, NIE W, LIANG Y, *et al.* Development and Performance Detection of Higher Precision Optical Sensor for Coal Dust Concentration Measurement Based on Mie Scattering Theory[J]. *Opt Lasers Eng*, 2021, **144**: 106642. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2021.106642.
- [30] CUI X J, LI X, YU J X. Design and Analysis of Particles Detecting System Based on Near Forward Light Scattering [C]//International Conferences on Optoelectronics and Microelectronics Technology and Application. Shanghai: SPIE, 2016. DOI:10.1117/12.2264571.
- [31] 李硕, 史克南, 李松等. 抗干扰激光粉尘传感器技术研究[J]. 应用激光, 2023, **43**(8): 131-138. DOI:10.14128/j.cnki.al.20234308.131.
- LI S, SHI K A, LI S, *et al.* Research of Anti-Interference Laser Dust Sensor[J]. *Appl Laser*, 2023, **43**(8): 131-138. DOI: 10.14128/j.cnki.al.20234308.131.