

# 鞘流技术在气溶胶颗粒物光学传感器上的应用研究

鲁晨阳<sup>1,2</sup>, 张佩<sup>1</sup>, 王光辉<sup>3</sup>, 朱菁<sup>1</sup>, 黄惠杰<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>上海镭慎光电科技有限公司, 上海 201800

**摘要** 鞘流技术是实现高浓度气溶胶颗粒物光学检测的关键技术之一。在空气动力学理论和国外相关研究的基础上设计了一种气体鞘流器来实现高浓度气溶胶粒子的有效测量。首先根据大型通用有限元分析软件 ANSYS 中的 Gambit 和 Fluent 模块对鞘流器进行仿真分析, 确定了一组最佳的设计参数并依此制作了相应的鞘流器实物, 仿真结果表明该鞘流器可以将样气气流直径从 1 mm 压缩到 0.34 mm, 有明显的压缩效果。接着提出了一种用光学尘埃粒子计数器的粒径分布误差间接分析鞘流器压缩效果的实验方案, 并对比分析了在同一台粒子计数器上分别配置  $\phi 1.0$  mm 普通气嘴、0.5 mm 普通气嘴以及鞘流气嘴三种情况下 0.3  $\mu\text{m}$  粒子粒径的分布情况。实验结果表明, 本研究设计的鞘流器能够有效降低尘埃粒子的重叠率, 显著提升粒子计数器的浓度检测上限值。该结果验证了流体动力学分析的可行性, 为实现高浓度气溶胶粒子的光学测量提供了重要基础。

**关键词** 测量; 空气动力学原理; 气体鞘流技术; 弹性光散射技术; 气溶胶测量; 气溶胶光学传感器

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0104006

## Application of Sheath Flow Technique in Aerosol Particle Sensor

Lu Chenyang<sup>1,2</sup>, Zhang Pei<sup>1</sup>, Wang Guanghui<sup>3</sup>, Zhu Jing<sup>1</sup>, Huang Huijie<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optoelectronics Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Shanghai Lasensor Photoelectric Technology Co., Ltd., Shanghai 201800, China

**Abstract** Sheath flow is one of the key technologies for the optical detection of high concentration aerosol particles. Based on the aerodynamics theory and the related researches abroad, a gas sheath flow jet is designed to achieve the effective measurement of high concentration aerosol particles. First, a group of optimal design parameters are determined according to the simulation analysis by the Gambit and Fluent modules in the large-scale general finite element analysis software of ANSYS, and a real sheath flow jet is made as well. In addition, the simulation results show that the sheath flow jet can compress the diameter of sample air flow from 1 mm to 0.34 mm, and the compression effect is obvious. Then, a kind of experiment scheme is put forward, in which the compression effect of a sheath flow jet is indirectly analyzed using the size distribution errors of a particle counter. Finally, the comparison and analysis of 0.3  $\mu\text{m}$  particle distributions are achieved for  $\phi 1.0$  mm ordinary jet,  $\phi 0.5$  mm ordinary jet and sheath flow jet on the same particle counter. The experimental results show that the sheath flow jet designed here can effectively reduce the overlap rate of dust particles and significantly increase the concentration detection limit of a particle counter. These results verify the feasibility of hydrodynamic analysis and provide an important basis for the optical measurement of high concentration aerosol particles.

**Key words** measurement; aerodynamics principle; gas sheath flow technique; elastic light scattering; aerosol measurement; aerosol optical sensors

**OCIS codes** 120.0280; 290.1090; 280.1100; 280.3420; 350.4990

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-09-21; 录用日期: 2018-10-15

基金项目: 上海国际科技合作项目 (1652071050)、中国国际科技合作项目 (2016YFE0110600)、中国科学院青年创新促进会人才项目

\* E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn

# 1 引言

气溶胶是指固态或液态微粒悬浮在气体介质中形成的相对稳定的分散体系<sup>[1]</sup>。气溶胶的浓度会影响人体健康,在某些特殊环境需要严格地控制气溶胶的浓度。至今,研究学者已对大气气溶胶特性展开了多方面的研究,包括大气气溶胶的浓度、大气气溶胶谱分布<sup>[2]</sup>和大气气溶胶光学厚度<sup>[3]</sup>等,为了解大气气溶胶提供了更加有利的基础。

目前,气溶胶粒子的实时监测技术主要有弹性光散射测量技术和激光诱导本征荧光技术,前者可用来测量气溶胶粒子的浓度,后者则能进一步探测空气中生物粒子的浓度。激光诱导本征荧光检测技术是在近 20 年才兴起的技术,目前国内外已经做了很多研究<sup>[4-6]</sup>。基于弹性光散射测量技术研制的气溶胶监测仪器在国内外已经发展得非常成熟,包括各种类型的光学尘埃粒子计数器、激光粉尘仪等。国外是在 20 世纪六七十年代开始这方面的研究<sup>[7-9]</sup>,至今为止已有很多商业化的产品,比如美国 PMS 公司的 0.1  $\mu\text{m}$  粒子计数器,美国 TSI 公司的 8530 粉尘仪,美国 Lighthouse 公司的 SOLAIR 5350 尘埃粒子计数器,美国 Metone 公司的 804 便携式粒子计数器等。而国内是从 20 世纪 90 年代,中国科学院上海光学精密机械研究所和南京理工大学分别开始光学尘埃粒子计数技术的研究,并开发出了可适用于洁净室洁净度测量的光学粒子计数器<sup>[10-11]</sup>。但目前,在颗粒物浓度较高(如滤料测试台、高粉尘浓度作业场所)的环境下,配置普通气嘴的气溶胶粒子检测性能不佳且寿命短,主要原因是当测量的粒子浓度过高时,空气中的尘埃粒子会在光敏感区发生重叠(即多个粒子一起通过光敏感区,并被当作一个粒子),会导致漏计,给空气中粒子精确测量带来很大的麻烦,并且进入光学仪器腔体内的脏的空气会污染内部的光学元件,从而影响测量精度。气体鞘流器的作用可有效减少重叠率,同时保护腔体及光学器件不受污染。

鞘流技术最早应用于流式细胞仪等液体介质上。本研究设计的气体鞘流器借鉴于应用在液体介质上的鞘流技术。液体鞘流器的应用在国内外非常广泛,西门子有限公司的 Kong 等<sup>[12]</sup>研究了液体鞘流的形成、控制和检测。上海交通大学的陈林等<sup>[13]</sup>把鞘流应用到毛细管电泳-激光诱导荧光检测系统,并且扩展到了基因分析研究。詹宁波等<sup>[14]</sup>研究了鞘流技术在光散射式液体粒子检测装置上的应用。

虽然国内鞘流技术在液态物质上的测量获得了成功的应用,但是几乎没有基于气体鞘流器的研究,只有国外少数机构和公司对气体鞘流器进行了研究。美国 TSI 公司在他们研发的仪器的专利上介绍了气体鞘流器,但是仅描述了鞘流器的作用<sup>[15-16]</sup>,并没有详细描述其相关参数和结构。韩国科学技术院的 Hyun 等<sup>[17]</sup>从理论上研究了影响气体鞘流器性能的各项参数,并且做了相应的仿真,但是并没有制作实物及设计实验来验证其性能。

研究气体鞘流器在气溶胶粒子光学传感器上的应用,不仅从理论上计算气体鞘流器各个参数,利用专业软件 ANSYS 对参数进行仿真优化,利用仿真的参数设计并制作了实物,并且提出了一种新的实验方案来验证鞘流器的性能,为国内气溶胶光学传感器在高浓度下更加准确的测量提供了基础。

## 2 基于鞘流技术的尘埃粒子光学传感器

鞘流器在各种气溶胶粒子检测仪器上的作用相同,气路结构相似,本研究以尘埃粒子计数器为介绍主体。基于弹性光散射测量技术的尘埃粒子计数器的光学系统已经非常成熟,在此对光学系统只作简单介绍。其结构示意图如图 1 所示。

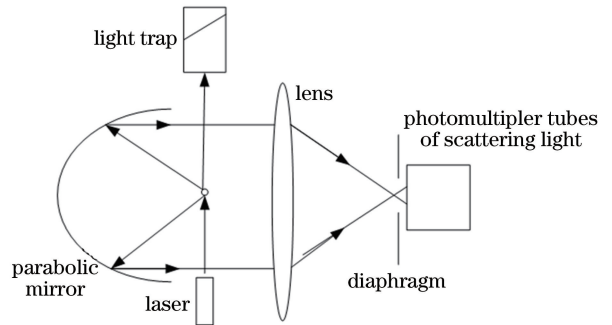


图 1 尘埃粒子计数器的光学系统示意图

Fig. 1 Optical system diagram of dust particle counter

粒子随气流经过光敏感区,侧向散射光被一个曲面反射镜收集,然后经过一系列透镜组会聚到一个光电倍增管中。每当有一个粒子经过光敏感区,就会产生一个光脉冲信号。粒子越大,散射光越强,随之光脉冲信号的幅值也越强。

鞘流气嘴和普通气嘴的结构如图 2 所示。鞘流的实现有两种方式:一种是内循环,即用一个气泵提供样气和鞘气的动力;另一种是外循环,有两个气泵,其中一个用于提供鞘气。本研究设计的气路是外循环方式,由独立的一个气泵来提供鞘流,结构示意图如图 3 所示。

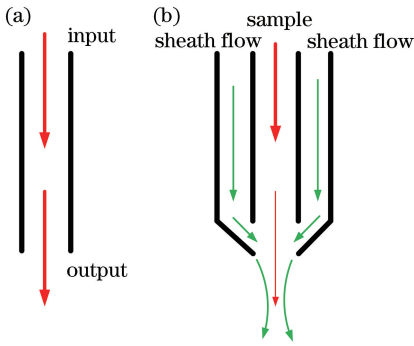


图 2 气嘴的结构示意图。(a)普通气嘴;(b)含鞘流器的气嘴

Fig. 2 Structural diagram of air nozzle. (a) Ordinary gas nozzle; (b) gas nozzle with sheath flow

如图 3 所示,气泵 1 提供鞘气,气泵 2 提供总的吸力,由两个节流阀(control valve)来控制鞘气和样气的流量,并且由两个质量流量计来监测实时流量。鞘流支路中的过滤器能够过滤空气中 0.1 μm 以上的粒子,确保鞘气是干净的气流,不会对样气中的颗粒物浓度产生影响。

### 3 鞘流器的仿真分析和设计

鞘流器最初主要应用在液态物质测量的仪器设备上,用于压缩目标流体,其设计关键在于流场的分析和计算。借鉴液体鞘流器,结合基础的理论计算并借助 ANSYS 仿真分析软件来设计气体鞘流器。

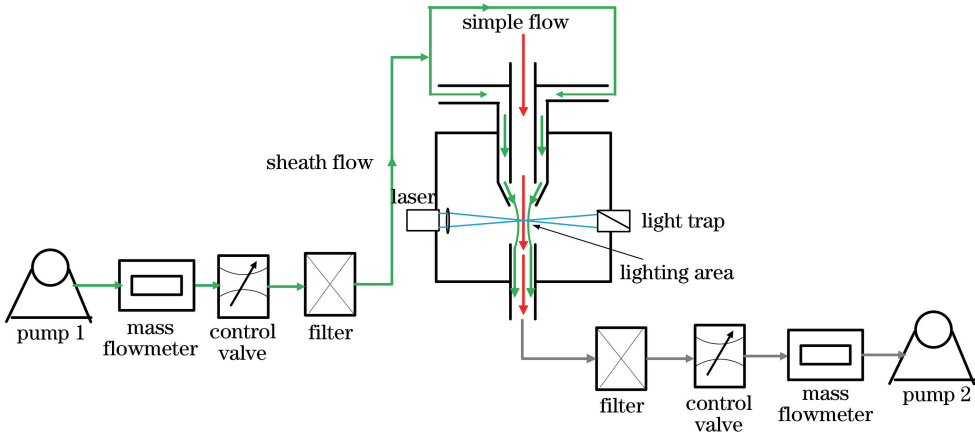


图 3 鞘流气路设计图

Fig. 3 Design of sheath flow path

#### 3.1 仿真实理论基础

##### 1) 初始关键参数确定

气体在鞘流器中的流动必须是层流,主要参数是雷诺数  $Re$ 。流场的雷诺数  $Re$  为流体所受惯性力与黏性力之比,是无量纲数,其表达式为

$$Re = \frac{\rho_0 u_0 D_0}{\mu_0} = \frac{4\rho_0 Q_0}{\mu_0 \pi D_0}, \quad (1)$$

式中  $\rho_0$  为空气密度,  $u_0$  为气流的平均速度,  $Q_0$  为流量大小,  $\mu_0$  为空气动力黏度,  $D_0$  为当量直径。层流必须满足的条件<sup>[18]</sup>如表 1 所示。

表 1 常见管道的临界雷诺数

Table 1 Critical Reynolds number of common pipelines

Pipe shape	Smooth metal tube	Rubber hose	Smooth concentric ring slit	Smooth eccentric ring slit	Concentric ring slit with a ring groove	Eccentric ring slit with a ring groove	Slide valve por
$Re_{cr}$	2000-2300	1600-2000	1100	1000	700	400	260

当雷诺数  $Re < Re_{cr}$  时,为层流,反之则为紊流。鞘流结构分别由光滑金属圆管和光滑同心环缝构成。由此可以看出,若雷诺数满足层流这个条件,则必须满足方程:

$$Re_1 = \frac{\rho_0 u_0 D_1}{\mu_0} = \frac{4\rho_0 Q_1}{\mu_0 \pi d} < 2300, \quad (2)$$

$$Re_2 = \frac{\rho_0 u_0 D_2}{\mu_0} = \frac{4\rho_0 Q_2}{\mu_0 \pi (d_2 + d + 2s)} < 1100, \quad (3)$$

式中  $Q_1$  为样气流量,  $d$  为样气管道当量直径,  $Q_2$  为鞘气流量,  $d_2$  为样气管道外径,  $s$  为样气管道壁厚。(2)式表示样气管道的雷诺数范围,(3)式表示鞘气管道的雷诺数范围。结合实验仪器的结构尺寸以及机械加工工艺,确定鞘流器内部壁厚  $s$  为 0.3 mm, 样气喷嘴当量直径  $d_1$  为 1 mm, 鞘气的当量直径为 0.7 mm。由 (2)、(3) 式可知: 样气流量  $Q_1 < 1.5759$  L/min, 鞘气流量  $Q_2 < 3.46$  L/min, 为仿真

建模提供基础。

### 2) 仿真计算模型—离散相模型介绍

在整个测量系统中,粒子随气流运动,因此选择离散型模型对整个过程进行仿真来跟踪粒子的运动轨迹。稳态离散相模型的求解过程可以分为以下几步:①求解连续相流场,②创建离散相喷射源,③求解耦合流动,④用 Plot 或者 Report 图形界面来跟踪离散相。

对于连续相流场(气流):本研究设计的鞘流器中的气流处于层流状态,因此利用层流模型对连续相流场进行数值计算。层流模型可以由经过 Boussinesq 假设后的 N-S(Navier-Stokes)方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right] + ArT\delta_{zi}, \quad (4)$$

能量方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right), \quad (5)$$

和连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

表示,式中  $u_i$  为第  $i$  相速度,  $u_j$  为第  $j$  相速度,  $P$  为粒子动量,  $r$  为粒子半径,  $T$  为粒子能量,  $A$  和  $\delta_{zi}$  为层流模型常数,  $\nu$  为分子黏性系数,  $K$  为分子扩散系数。

对于离散相(气流中的颗粒):在离散相模型中,可以通过对拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程进行积分来求解气溶胶粒子的运动轨迹,其在笛卡尔坐标系下( $x$  方向)的微分方程为<sup>[19]</sup>

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x, \quad (7)$$

式中:  $u$  流体相速度;  $u_p$  为颗粒速度;  $\rho$  为流体密度;  $\rho_p$  为颗粒密度;  $g_x$  为  $x$  方向重力加速度;  $F_x$  为  $x$  方向的其他作用力,其他作用力包括热泳力、布朗力和 Saffronmna 升力,可忽略不计;  $F_D(u - u_p)$  为颗粒的单位质量拽力,可表示为

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_{re}}{24}, \quad (8)$$

式中:  $\mu$  为流体动力黏度;  $d_p$  为颗粒直径;  $C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_{re}} + \frac{a_3}{Re_{re}^2}$ , 为拽力系数,  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  对于球形颗粒在一定雷诺数范围内为常数;  $Re_{re}$  为相对雷诺数(颗粒雷诺数),可由

$$Re_{re} = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (9)$$

得到<sup>[19]</sup>。求解过程及结果显示由 ANSYS 软件多次迭代计算完成。

### 3.2 仿真过程分析

利用 ANSYS 软件进行该鞘流器的仿真工作,仿真主要包括:建模和网格化(Gambit 模块)、选择计算模型和设置参数(Fluent 模块)及结果分析。由于鞘流器的核心作用区域是中心对称结构,所以建模时采用平面模型,建模完成后的结果如图 4 所示。

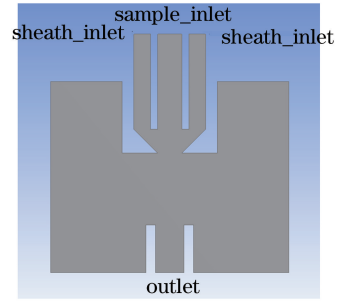


图 4 仿真模型图

Fig. 4 Schematic of simulation model

建模及网格划分完成后,选择在第 3.1 节中介绍的离散相模型进行分析求解。结合国内外的相关研究,影响气体鞘流器性能好坏的因素有很多,包括样气和鞘气流量之比、鞘流器内径和外径大小、喷嘴直径及喷嘴的倾斜角度等,以获取样气的最小压缩截面为目标开展优化工作。

在仿真中,除了喷嘴倾斜角以外,其他鞘流器结构在 3.1 节已经确定,所以只从鞘气和样气流量比及喷嘴的倾斜角这两个方面讨论对样气压缩效果的影响。首先确定样气流量为 1 L/min,鞘气流量为 3 L/min 的条件下(样气流量和鞘气流量在保证层流的情况下,可以根据需求来选择),不同喷嘴倾斜角对样气压缩效果的影响。图 5 为喷嘴倾斜角为 30°、45°、60°时的样气仿真压缩图。

仿真结果表明喷嘴倾斜角越大,压缩效果越好,但是在样气和鞘气交汇处更容易出现紊流现象,如图 5 所示,仿真的条件下当喷嘴角度为 60°时,样气会打破层流的约束。经过多次仿真发现,在其他变量确定以后,喷嘴倾斜角有一个临界角度使得样气有最好的压缩效果,这个临界角度和其他变量的大小有关。然后确定喷嘴倾斜角为 45°,记录不同流量下的样气压缩效果并总结,其仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知,在满足层流的条件下,鞘气流量越



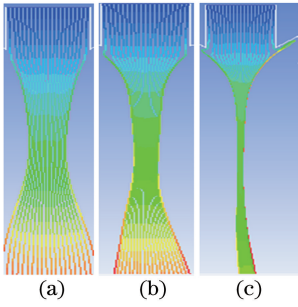


图 5 不同喷嘴倾斜角的样气仿真压缩图。  
(a) 30°; (b) 45°; (c) 60°

Fig. 5 Simulated results of sample gas for different nozzle inclination angles. (a) 30°; (b) 45°; (c) 60°

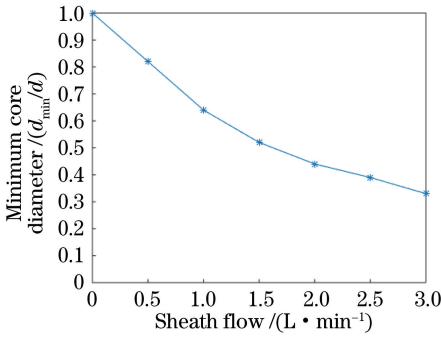


图 6 不同流量比下的最小压缩量的仿真结果图

Fig. 6 Simulation results of minimum compression amount under different flow rates

大样气压缩越明显。以上分析表明,在满足层流的条件下,喷嘴倾斜角越大,鞘气和样气的气流量之比越大,压缩效果越好。但是需要指出的是,不同设计参数的鞘流器都有一定的压缩效果,可以结合实际应用时的要求及加工工艺的水平,来确定最合适的鞘流器结构参数。

### 3.3 仿真设计结果

为了能实际验证仿真结果的正确性,根据仿真

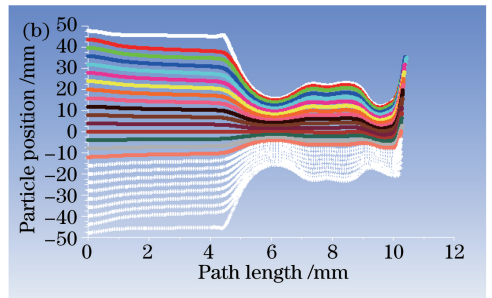
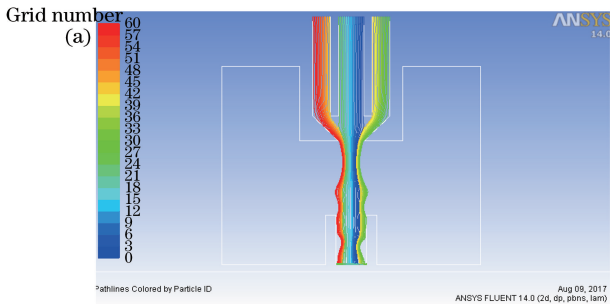


图 8 鞘流器仿真结果图。(a)粒子运动轨迹;(b)粒子分布曲线

Fig. 8 Simulated results of sheath flow. (a) Particle trajectory; (b) particle distribution curves

由图 8(a)可以直观地看到样气被明显压缩了,由图 8(b)可知样气被鞘流压缩后的最小处直径是 0.34 mm,此处离喷嘴出口 1.5 mm。由此可知,样

得到的结果及实际加工工艺确定了最合适的关键参数,根据这些参数设计实物,然后进行实验验证。选择样气流量为 1 L/min,鞘气流量为 3 L/min,喷嘴倾斜角为 45°等,表 2 所示为该仿真过程中的关键参数。

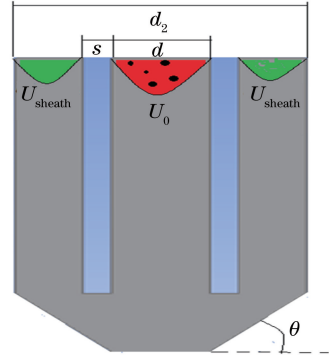


图 7 设计参数示意图

Fig. 7 Schematic of design parameters

表 2 关键参数

Table 2 Key parameters

Parameter	Value
Carrier gas nozzle diameter $d$ / mm	1
Sheath gas nozzle diameter $d_2$ / mm	3
Inclination angle $\theta$ / (°)	45
Wall thickness $s$ / mm	0.3
Carrier gas velocity $U_0$ (1 L/min) / (m · s <sup>-1</sup> )	21.22
Sheath gas velocity $U_{sheath}$ (3 L/min) / (m · s <sup>-1</sup> )	9.88
Carrier and sheath gas	Air
Particle diameter $d_m$ / μm	0.5
Particle density $\rho$ / (kg · m <sup>-3</sup> )	1040 (polystyrene)
Particle mass flow rate $m$ / (kg · m <sup>-3</sup> )	$5 \times 10^{-5}$

在以上参数的设定下,求解完成后,后处理操作中得到的粒子的运动轨迹和分布结果如图 8 所示。

根据理论计算和以上仿真结果,确定了鞘流器的机械结构,并由 Solidworks 软件设计实际结构,给出工程图,如图 9 所示。

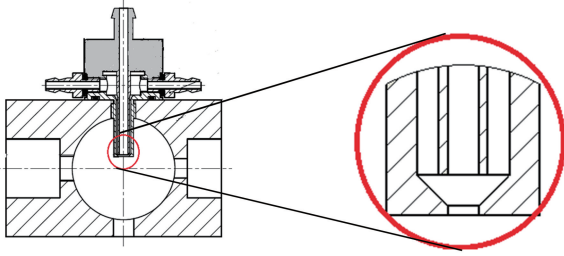


图 9 鞘流器结构示意图

Fig. 9 Structural diagram of sheath flow

图 9 所示为本研究设计的鞘流器工程图,右图是出气口处的局部放大图。根据工程图加工的实物如图 10 所示。



图 10 气体鞘流器实物图

Fig. 10 Physical map of gas sheath flow

## 4 实验设计和结果分析

### 4.1 实验验证思想

液体鞘流器技术已经成熟并在各个领域得到很

好的应用效果,一般是采用 CCD (charge couple device) 直接观测其性能效果。但是气体鞘流器的性能测试难度较高,主要原因是粒子通过光敏感区的速度较快,时间大约为  $4 \mu\text{s}$ ,而通常 CCD 的分辨率为几千 frame/s,不能直接捕捉高速运行的微小粒子,因此不能和液体鞘流器一样用 CCD 直接去观察其鞘流效果。

本研究采用间接测量法来验证气体鞘流器的效果。在此次实验中,参照标准《JJF 1190—2008 尘埃粒子计数器校准规范》<sup>[20]</sup> 和《GB/T 6167—2007 尘埃粒子计数器性能试验方法》<sup>[21]</sup> 内容,按粒径分布误差间接判定气体鞘流器的效果。在光学系统参数和样气流量不变的情况下,光敏感区的样气截面直径越小,对应的粒径分布误差越小。尘埃粒子计数器标定好后,高浓度下  $0.3 \mu\text{m}$  粒子的粒径分布误差越小,说明鞘流器的样气通道被压缩后的截面积越小,区分  $0.3 \mu\text{m}$  和  $0.5 \mu\text{m}$  粒子的能力越强。

### 4.2 实验设备及实验过程

验证方法的主要过程如下:用一台最小测量粒径为  $0.3 \mu\text{m}$  的光学尘埃粒子计数器,分别装上  $\phi 0.5 \text{ mm}$  普通气嘴、 $\phi 1.0 \text{ mm}$  普通气嘴及本研究设计的鞘流器气嘴后,对比分析  $0.3 \mu\text{m}$  粒子在不同浓度下的粒径分布情况。通过光敏感区的气流直径越小,越不容易出现重叠。仿真结果表明本实验中设计的鞘流器的压缩效果是从  $\phi 1.0 \text{ mm}$  压缩到  $\phi 0.34 \text{ mm}$ ,由于  $\phi 0.34 \text{ mm}$  在工艺上难以精确加工且样气流量也难以达到  $1 \text{ L/min}$ ,所以用  $\phi 0.5 \text{ mm}$  气嘴来判断所设计的鞘流器样气的最小压缩截面直径是否在  $0.5 \text{ mm}$  以下。整个实验系统如图 11 所示。

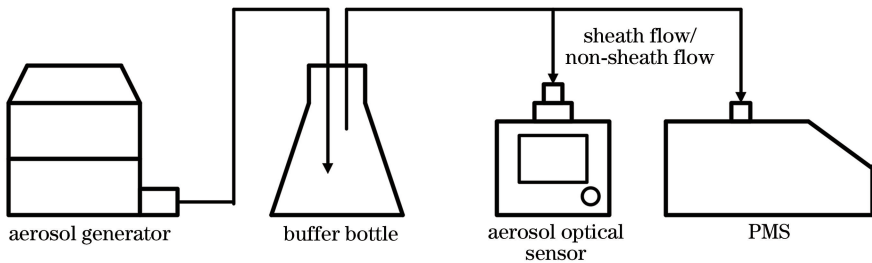


图 11 实验装置图

Fig. 11 Schematic of experimental device

在整个实验系统中, $0.3 \mu\text{m}$  和  $0.5 \mu\text{m}$  的标准聚苯乙烯小球(PSL)用于发生气溶胶,气溶胶发生器在锥形瓶中产生稳定的气溶胶,气溶胶的浓度可以通过调节气溶胶发生器来控制。LASAIR® III 110 可用来实时监测锥形瓶里气溶胶的浓度,并且是气溶胶光学传感器标定的参照样机。整个实验过

程如下所述。

1) 首先调配好  $0.5 \mu\text{m}$  标准粒子的悬浊液,放到气溶胶发生器上,在锥形瓶中产生目标气溶胶。观察 PMS 仪器上  $0.5 \mu\text{m}$  粒子的浓度。调节气溶胶发生器,使锥形瓶中的粒子浓度达到  $1000 \text{ particle} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,然后保持其稳定。

2) 原气嘴是没有鞘流的直径为 1 mm 的普通气嘴,然后和 PMS 仪器进行标定。确保 0.5 μm 粒径档的值和 PMS 仪器的值的误差在 5% 以内,并且 0.5 μm 以上粒径档的浓度( $N_{0.5}$ )是 0.3 μm 以上粒径档的浓度( $N_{0.3}$ )的 50% 左右。满足国家标准《GB/T 6167—2007 尘埃粒子计数器性能试验方案》<sup>[20]</sup>。

3) 调配好 0.3 μm 标准粒子的悬浊液,放到气溶胶发生器上,在锥形瓶中产生目标气溶胶。在低浓度下,0.5 μm 以上粒径档的浓度( $N_{0.5}$ )不足 0.3 μm 以上粒径档的浓度( $N_{0.3}$ )的 30%,满足标准《JJF 1190—2008 尘埃粒子计数器校准规范》<sup>[21]</sup>。

4) 然后调节气溶胶发生器,使得在锥形瓶中产生稳定的不同浓度的 0.3 μm 标准粒子的气溶胶,观察及记录下不同浓度时 0.5 μm 以上粒径档的浓度

( $N_{0.5}$ )和 0.3 μm 以上粒径档的浓度( $N_{0.3}$ )之比( $N_{0.5}/N_{0.3}$ )。

5) 进气嘴换上直径为 0.5 mm 的普通气嘴,然后重复 2)~4)过程。

6) 进气嘴换上鞘流器,其样气出气口也是直径为 1 mm 的圆孔。然后重复 2)~4)过程。

7) 记录并比较三种情况下的粒径分布情况

### 4.3 传感器标定结果

传感器的标定是整个实验的基础,不仅规范了三种传感器标准粒子的初始测量,而且可以用来判断传感器是否满足国家标准。为了减少偶然误差,上述实验中,每一个浓度都测量了 6 个周期,每个周期为 30 s,然后取 6 个周期的平均值。三种情况标定以后的结果如表 3 所示。

表 3 标定过程中 0.5 μm 标准粒子浓度绝对值标定结果

Table 3 Calibration results of absolute concentration vale of 0.5 μm standard particles in calibration process

Type	Particle size /μm	Concentration / (particle·L <sup>-1</sup> )							$\frac{N_{0.5}}{N_{0.3}} / \%$	>0.5 μm (PMS)
		1	2	3	4	5	6	Average		
1.0 mm sheath jet	>0.3	2119	2123	2277	2128	2073	2064	2130.67	50.1	1089
	>0.5	1063	1038	1123	1088	1050	1041	1067.17		
φ0.5 mm jet	>0.3	2064	2177	2096	2284	2156	2203	2163.33	51	1145
	>0.5	1076	1140	1156	1148	1075	1100	1115.83		
φ1.0 mm jet	>0.3	2241	2218	2347	2277	2413	2353	2308.16	50.5	1194
	>0.5	1121	1120	1202	1145	1212	1189	1164.83		

表 4 标定过程中 0.3 μm 标准粒子浓度绝对值标定结果

Table 4 Calibration results of absolute concentration vale of 0.3 μm standard particles in calibration process

Type	Particle size /μm	Concentration / (particle·L <sup>-1</sup> )							$\frac{N_{0.5}}{N_{0.3}} / \%$
		1	2	3	4	5	6	Average	
1.0 mm sheath flow jet	>0.3	1014	942	912	984	970	964	964.33	16
	>0.5	156	138	168	156	150	152	154.33	
φ0.5 mm jet	>0.3	1056	1017	1120	1001	1098	1053	1057.5	17.9
	>0.5	200	190	182	176	200	189	189.5	
φ1.0 mm jet	>0.3	1200	1014	1160	1108	1068	1014	1094	18.9
	>0.5	204	194	192	198	196	188	196	

从表 3 和表 4 中的结果可知,装有 φ0.5 mm、φ1.0 mm 普通气嘴和装有鞘流器气嘴的光学传感器的标定结果都满足国家标准要求。

### 4.4 实验结果分析

标定完后,在不同 0.3 μm 标准粒子浓度下,分别测量三种气嘴的 0.5 μm 以上粒径档的数目在 0.3 μm 以上粒径档的数目中所占的比例( $N_{0.5}/N_{0.3}$ ),以此来评价三个光学传感器的性能,结果如图 12 所示。在实验中也测量了在不同 0.5 μm 标准粒子浓度下(最高浓度是 15000 particle · L<sup>-1</sup>)

$N_{0.5}/N_{0.3}$  的结果,发现在不同浓度下,三种气嘴的该比值一直保持在 50% 左右。

由图 12 可知,测试粒子粒径为 0.3 μm 时,随着浓度的增加,0.5 μm 以上粒径档的数目占 0.3 μm 以上粒径档的数目的比值在低浓度时保持稳定,当达到一定浓度后比值有一个快速上升的过程,即超出了仪器的饱和测量浓度,发生了 0.3 μm 粒子严重重叠现象,使得 0.5 μm 以上粒子浓度变高。

本次实验中,三种气嘴的饱和测量浓度如表 5 所示。

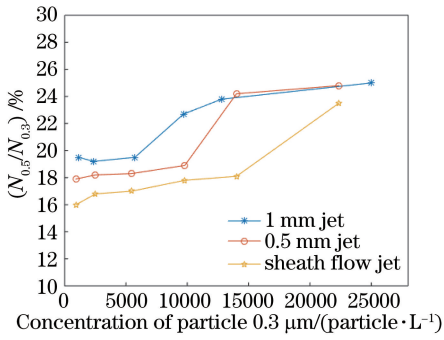


图 12 鞘流器性能测试结果

Fig. 12 Performance test results of sheath flow

表 5 三种气嘴的饱和测量浓度范围

Table 5 Saturation measurement concentration ranges of three jets

Jet type	Saturation measurement concentration /(particle·L <sup>-1</sup> )
φ1.0 mm jet	5000-10000
φ0.5 mm jet	10000-14000
φ1.0 mm sheath flow jet (core diameter 0.34 μm)	15000-23000

结合图表可知 φ1.0 mm 气嘴的饱和和测量浓度在 5000~10000 particle · L<sup>-1</sup> 之间, φ0.5 mm 气嘴的饱和和测量浓度在 10000~14000 particle · L<sup>-1</sup> 之间, 而使用 φ1.0 mm 气嘴装有鞘流器后饱和和测量浓度范围提升到 15000~23000 particle · L<sup>-1</sup>, 效果明显。由此可知, 气嘴越小通过光敏感区的气流直径越小, 饱和测量浓度会增加。使用鞘流器后 0.5 μm 以上粒径档的数目占 0.3 μm 以上粒径档的数目之比一直比普通气嘴小, 说明使用鞘流器可增强传感器区分 0.3 μm 和 0.5 μm 粒子的能力。

## 5 结 论

研究了鞘流技术在气溶胶颗粒物光学传感器上的应用。基于空气动力学理论和国外相关研究的基础, 利用 ANSYS 软件中的 Gambit 和 Fluent 模块对鞘流器进行了设计及仿真分析, 确定了一组最佳的设计参数并且制作了鞘流器实物。仿真结果表明本研究设计的鞘流器能够把直径为 1 mm 的样气气流压缩到 0.34 mm。

为了实际验证鞘流器的性能, 提出了一种间接方法来避免气流中的颗粒运行速度快而难以被 CCD 捕捉的难题。利用光学尘埃粒子计数器分别装上 φ0.5 mm 普通气嘴、φ1.0 mm 普通气嘴以及本研究设计的鞘流器气嘴后(样气出气口直径为 φ1.0 mm), 对比分析 0.3 μm 粒子在不同浓度下的

粒径分布情况, 来验证鞘流器的性能。实验验证了光敏感区处的样气截面直径越小越不容易出现重叠的现象, 且在装上鞘流器后区分 0.3 μm 粒径档的粒子和 0.5 μm 粒径档的粒子的能力大幅度增强: φ1.0 mm 气嘴的饱和测量浓度在 5000 ~ 10000 particle · L<sup>-1</sup> 之间, φ0.5 mm 气嘴的饱和测量浓度在 10000~14000 particle · L<sup>-1</sup> 之间, 而使用鞘流器后饱和测量浓度范围提升到 15000 ~ 23000 particle · L<sup>-1</sup>, 效果明显。本研究设计的鞘流器减少了粒子重叠率, 从而验证了流体动力学分析的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Yu X H, Che F X. Modern air microbiology and sampling detection and identification techniques[M]. Beijing: Military Medical Science Press, 1998: 1-3. 于玺华, 车凤翔. 现代空气微生物学及采检鉴技术[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 1998: 1-3.
- [2] Xu J W, Liu D, Xie C B, et al. Multi-wavelength fitting simulation and inversion of atmospheric aerosol spectrmm distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001006. 徐继伟, 刘东, 谢晨波, 等. 大气气溶胶谱分布的多波长拟合模拟反演[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001006.
- [3] Chen S S, Xu Q S, Xu C D, et al. Calculation of whole atmospheric aerosol optical depth based on micro-pulse lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0701002. 陈莎莎, 徐青山, 徐赤东, 等. 基于微脉冲激光雷达计算整层大气气溶胶光学厚度[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0701002.
- [4] Wang C J, Pan Y L, James D, et al. Direct on-strip analysis of size- and time-resolved aerosol impactor samples using laser induced fluorescence spectra excited at 263 and 351 nm [J]. Analytica Chimica Acta, 2014, 820: 119-132.
- [5] Lu C Y, Zhang P, Wang G H, et al. Accurate measurement of airborne biological particle concentration based on laser-induced fluorescence technique[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 117: 24-33.
- [6] Hausmann A, Duschek F, Fischbach T, et al. Standoff detection: classification of biological aerosols using laser induced fluorescence (LIF) technique[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9073: 90730Z.
- [7] Kaye P H, N A Eyles and J M Clark. A laser scattering instrmmnt for airborne particle size and shape classification [C] // Proceedings of 2nd



- International Congress on Optical Particle Sizing. [S. l.]: [s. n.], 1990: 501-510.
- [8] Pinnick R G, Hill S C, Nachman P, *et al.* Fluorescence particle counter for detecting airborne bacteria and other biological particles [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1995, 23(4): 653-664.
- [9] Hairston P P, Ho J, Quant F R. Design of an instrument for real-time detection of bioaerosols using simultaneous measurement of particle aerodynamic size and intrinsic fluorescence [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28(3): 471-482.
- [10] Chen X F. Mathematical modeling and application of particle counter signal transmission and processing [D]. Nanjing: Nanjing university of science and technology, 1998.  
程晓飞. 粒子计数器信号传输与处理的数学建模及应用[D]. 南京: 南京理工大学, 1998.
- [11] Liang C L, Huang H J, Ren B Q, *et al.* Study of miniature optical sensor for laser particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(9): 1260-1264.  
梁春雷, 黄惠杰, 任冰强, 等. 激光尘埃粒子计数器微型光学传感器的研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(9): 1260-1264.
- [12] Kong B, Fan S J, Zhuo Y, *et al.* A method for sheath flow forming, controlling, and detecting[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6716: 67160A.
- [13] Chen L, Ren J C. Optimization of capillary electrophoresis-laser induced fluorescence detection with sheath-flow cuvette and its application to genetic analysis [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2003, 31(12): 1413-1416.  
陈林, 任吉存. 毛细管电泳-激光诱导荧光鞘流检测系统优化研究及在基因分析中的应用[J]. *分析化学*, 2003, 31(12): 1413-1416.
- [14] Zhan N B, Wu T H, Chen F, *et al.* Light-scattering liquid particle detector based on sheath flow technology[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2010, 31(4): 7-9.  
詹宁波, 吴太虎, 陈锋, 等. 基于鞘流技术的光散射式液体粒子检测装置[J]. *医疗卫生装备*, 2010, 31(4): 7-9.
- [15] Hairston P. P, Dorman F D, and Sem G J, *et al.* Apparatus for measuring particle sizes and velocities: US5561515A[P]. 1996-10-01.
- [16] Ho J Y W. Fluorescent biological particle detection system: US5701012A[P]. 1997-11-23.
- [17] Hyun W K, Choi D Y, Lee K H, *et al.* Effects of sheath gas geometry on aerosol jet patterning and coating[C]//International Conference on Flexible and Printed Electronics, November 11-13, 2009, Jeju Island, Korea. [S. l.]: [s. n.], 2009: 11-13.
- [18] He C X, Zhang T H. Hydraulic drive and pneumatic drive[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1998: 24-25.  
何存兴, 张铁华. 液压传动与气压传动[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1998: 24-25.
- [19] Zhu H J, Liu Y H, Xie L H. Fluent 12 fluid analysis and engineering simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 187.  
朱红钧, 林元华, 谢龙汉. Fluent 12 流体分析及工程仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 187.
- [20] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Chinese standard book number: GB/T 6167-2007, Test method for performance of dust particle counter[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国标准书号: GB/T 6167-2007 尘埃粒子计数器性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [21] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. National measuring technique standard of the People's Republic of China: JJF 1190-2008, Calibration specification for airborne particle counter, Beijing: Standards Press of China, 2008.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家计量技术规范: JJF 1190-2008 尘埃粒子计数器校准规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.