

亚微米粒子虚拟冲击器的研制

张 佩^{1,2} 赵永凯¹ 杨 巍¹ 黄惠杰¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 亚微米虚拟冲击器是实现高灵敏度生物气溶胶光学在线监测的前提,是当前的研究热点之一。基于空气动力学理论与相关研究基础,设计了一种切割粒径为 $0.4\ \mu\text{m}$ 的亚微米级粒子虚拟冲击器,利用计算流体动力学 (CFD) 分析软件 Fluent 以及离散相模型对虚拟冲击器结构的入口喷嘴与收集孔间距、收集孔径和流量比等各种设计参数进行模拟与分析,得到了一组优化设计参数并制作了虚拟冲击器实物。测试结果表明,该虚拟冲击器具有良好的浓缩效果,对 0.37 、 0.5 、 $0.7\ \mu\text{m}$ 聚苯乙烯乳胶球 (PSL) 粒子的收集效率等参数与仿真结果基本吻合,验证了流体动力学分析方法的可行性。该虚拟冲击器切割粒径的实验测试结果达到 $0.4\ \mu\text{m}$,满足实际应用需求。

关键词 生物光学; 虚拟冲击器; 流体动力学; 亚微米粒子; 生物气溶胶监测

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0116002

Development of a Virtual Impactor for Submicron Particles

Zhang Pei^{1,2} Zhao Yongkai¹ Yang Wei¹ Huang Huijie¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A virtual impactor for submicron particles is prerequisite for bio-aerosol optical online monitoring and it is a hot research topic. Based on aerodynamics and past research work, a $0.4\text{-}\mu\text{m}$ -cutpoint virtual impactor is designed with the help of a commercial computational fluid dynamics (CFD) package, Fluent. Discrete phase model (DPM) is applied to simulate and analyze the effect of nozzle-to-collection probe distance, collection probe diameter and minor-to-major flow ratio. The virtual impactor with optimum design parameters is fabricated and tested. According to the experimental results, the virtual impactor can collect $0.37\ \mu\text{m}$, $0.5\ \mu\text{m}$ and $0.7\ \mu\text{m}$ PSL microspheres efficiently as desired, which proves that the CFD method is practical. Cutoff diameter of the virtual impactor can reach $0.4\ \mu\text{m}$, which is fit for practical applications.

Key words biotechnology; virtual impactor; fluid dynamics; submicron particles; bio-aerosol monitoring

OCIS codes 170.6280; 280.1100; 280.1415; 350.4990

1 引 言

虚拟冲击器是传统惯性冲击器的重要分支,基于惯性原理实现粒子浓缩,能显著提高气体中所需粒径范围内气溶胶粒子的浓度,是实现高灵敏度生物气溶胶光学在线监测的前提,已成为当前研究热点之一^[1]。

生物气溶胶是大气与其中包括的活性有机体或

由活性有机体释放出来的粒子、大分子物质或挥发性化合物构成的悬浮体系^[2]。这些粒子可统称为生物气溶胶粒子,其粒径范围为 $0.01\sim 100\ \mu\text{m}$ 。生物气溶胶直接影响环境,威胁人体健康。拥有实时、灵敏的大气生物气溶胶监测技术与手段可有效预防生物气溶胶引起的危害。

随着光学技术的不断发展,现代生物检测领域

收稿日期: 2013-08-16; **收到修改稿日期**: 2013-08-20

基金项目: 上海市自然科学基金 (11ZR1441700)

作者简介: 张 佩 (1986—), 男, 博士研究生, 主要从事精密光电测控技术方面的研究。E-mail: zhp19860626@163.com

导师简介: 黄惠杰 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学生物传感技术、光学检测技术、高数值孔径光学光刻技术、光学设计等方面的研究。E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn

越来越多地引入了光学手段。基于光学测量的生物气溶胶监测技术具有快速、无损、灵敏等优点,成为目前的研究主流之一^[3-4]。该技术一般以生物气溶胶粒子的形状、尺寸与本征荧光特性作为主要判断依据,其中本征荧光是判别生物属性的最重要条件。

由于大气生物气溶胶粒子浓度较低,为提高荧光检测灵敏度,一般采用先富集采样后检测的方式,这种方法的实时性受限于富集时间^[5]。利用虚拟冲击器可对气溶胶粒子进行浓缩后直接进行荧光检测,从而实现生物气溶胶的在线监测,其实时性更好,而且有效地避免了传统撞击式采样器存在的粒子反弹、采集面污染及粒子生物活性降低等诸多问题。

在 20 世纪 80 年代,国外就已经对虚拟冲击器展开了系统的理论和应用研究,此后,国外的研究人员对虚拟冲击器作了深入的探讨,并逐渐将虚拟冲击器应用到相关设备上^[6-9]。而国内对虚拟冲击器的研究和应用较少,多应用于低浓度气溶胶的快速采样^[10]。目前投入实际应用的虚拟冲击器的切割粒径多为微米量级,针对亚微米量级粒子的虚拟冲击器的研究相对较少。常见的致病菌等生物气溶胶粒子一般粒径在 0.4~10 μm 之间,可直接经由呼吸道进入人体而产生危害;另外,粒径越小,粒子的分子运动越明显,轨迹方程越复杂。因此,开展亚微米级粒子的虚拟冲击器研究具有重要的理论和应用价值。

本文从实际应用需求出发,设计了一种亚微米粒子虚拟冲击器,通过对不同设计参数进行模拟与分析,为优化设计提供了有效的依据。依据设计与仿真结果,制作了虚拟冲击器实物。结果表明,其收集效率等性能参数与仿真分析结果基本吻合,为实现光学在线监测生物气溶胶提供了前提。

2 生物气溶胶光学在线监测系统

本征荧光是生物粒子中所含的有机分子或分子团,如氨基酸、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)、核黄素等物质在特定波长,尤其是紫外波段激发光激发下产生的特有荧光,是判别生物属性的最重要条件^[11-12]。但单个生物气溶胶粒子的荧光强度极弱,需要专用的单气溶胶粒子产生气路与微弱光信号检测系统。因此,一般可通过对多气溶胶粒子样本进行荧光检测以提高灵敏度。多气溶胶粒子样本的采集方法主要有富集与浓缩两种,富集采样法常用惯性冲击器进行采样,其检测时间受限于样本富集时间^[13]。浓缩采样方法采用虚拟冲击器进行采样,可用于实时在线监测。

图 1 是拟采用的一种生物气溶胶光学在线监测系统,由虚拟冲击器、粒子缓冲腔、粒子计数装置以及荧光检测单元等组成。图 2 为虚拟冲击器的工作原理图,它是一种基于惯性原理实现大气中不同粒径粒子分离的装置。大气气溶胶被采样进入气路,经入口喷嘴加速喷出后,分为流量大小不同的两部分气流。气流中小粒径粒子惯性力较小,在气流的粘性力的作用下会逐渐改变运动轨迹进入大流量出口,而粒径较大的粒子由于惯性直接随较弱的气流进入小流量收集孔。这样,原来大气气溶胶中的大粒子被浓缩到较小的流量中,得到浓度较高的实时采样气溶胶。收集效率为 50% 的颗粒粒径即为虚拟冲击器的切割粒径。

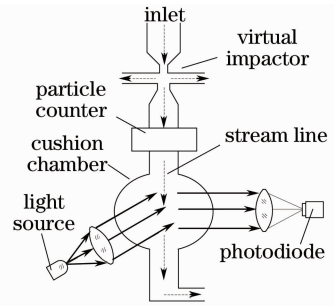


图 1 生物气溶胶光学在线监测原理示意图
Fig. 1 Principle schematic of bio-aerosol optical online monitoring

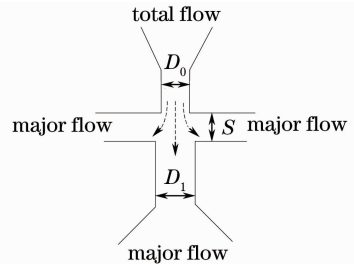


图 2 虚拟冲击器的工作原理示意图
Fig. 2 Operating principle schematic of a virtual impactor

虚拟冲击器的小流量出口经粒子计数装置后连接到粒子缓冲腔。浓缩后的气溶胶进入粒子缓冲腔,腔内的粒子在较短时间内运动比较稳定。荧光检测单元由激发光路与荧光接收光路组成。激发光经光学系统后在缓冲腔内形成一个光斑,即光敏感区。光敏感区内的生物气溶胶粒子受激产生荧光,被荧光接收系统接收,由光电探测器件转换为电信号后进行分析。图 1 中粒子计数装置可测量进入粒子缓冲腔之前气溶胶的浓度值。根据荧光特性和粒子浓度的变化,本系统可对大气中的生物气溶胶进行实时在线监测。

3 虚拟冲击器的设计

3.1 理论基础

虚拟冲击器一般基于 Marple 理论进行设计, 主要涉及斯托克斯数 S_i 和流场雷诺数 Re 两个参数^[6]。

流场的雷诺数 Re 是流体所受惯性力与粘性力之比的无量纲数, 其表达式为

$$Re = \frac{\rho u D_0}{\mu} = \frac{4\rho Q_0}{\mu \pi D_0}, \quad (1)$$

式中 ρ 为空气的密度, u 为气流的平均速度, Q_0 为流量大小, μ 为空气动力粘度。雷诺数 Re 越大, 湍流现象越明显, 粒子损失越大。

斯托克斯数 S_i 是粒子的截止距离与喷口半径之比的无量纲数。 $\sqrt{S_i}$ 是虚拟冲击器的重要特征值, 切割粒径可以通过所设计的虚拟冲击器切割效率为 50% 时的 $\sqrt{S_{i50}}$ 的值得到。对于亚微米粒子, 需要采用引入了滑移修正因子的斯托克斯数 S_i , 其具体可表达为

$$S_i = \frac{\rho_p C_c d_p^2 u}{9\mu D_0} = \frac{4\rho_p C_c d_p^2 Q_0}{9\mu \pi D_0^3}, \quad (2)$$

式中 ρ_p 为粒子密度, d_p 为粒子的空气动力学直径, C_c 为滑移修正因子。滑移修正因子 C_c , 又称坎宁汉因子, 受到流场压力、粒子大小、形状、状态等因素的影响^[14]。斯托克斯定律的一个重要假设是在粒子表面上气体的相对速度为零。对于粒子的尺寸小到接近于气体分子平均自由程时, 这一假设就不成立了, 此时在粒子的表面上有滑移, 粒子的运动比由斯托克斯定律算出的要快。因此, 对于亚微米量级粒子的运动分析, 需要引入滑移修正因子。 C_c 的计算方法可表达为

$$C_c = 1 + \frac{2}{Pd_p} \times [6.32 + 2.01 \exp(-0.1095 Pd_p)], \quad (3)$$

式中 P 为绝对压强 (单位: cmHg), 标准大气压为 76 cmHg (1 cmHg=1333.224 Pa)。

3.2 设计参数

依据常见致病菌的尺寸, 这里拟设计的虚拟冲击器的切割粒径为 $0.4 \mu\text{m}$ ^[15]。根据(1)式和(2)式可知, 要实现这种亚微米级的切割粒径, 需要较小的人口喷嘴直径 D_0 和较大的采样流量 Q_0 。这里根据机械加工的常用尺寸选取 $D_0=0.7 \text{ mm}$ 。

1) 采样流量及流量比

为了实现对亚微米级气溶胶粒子的浓缩, 通常需使虚拟冲击器内喷嘴出口的气流处于雷诺数较高的湍流状态。但较高的雷诺数会导致虚拟冲击器内部较

多的粒子损失。为了补偿高雷诺数引起的粒子损失, 一般小流量与总流量的流量比 R 不应低于 0.1 ^[16]。

在气路系统中, 通过节流小孔的最大流量受限于节流小孔孔径的大小, 因此这里所设计的亚微米粒子虚拟冲击器的最大采样流量 Q_0 与入口喷嘴孔径 D_0 密切相关^[17]。根据已确定的喷嘴直径 $D_0=0.7 \text{ mm}$, 由通过节流小孔流量的计算公式, 取采样流量 Q_0 为 4.5 L/min 。

2) 结构参数

图 2 中已标示出虚拟冲击器的主要结构参数, 包括入口喷嘴的孔径 D_0 , 收集孔的孔径 D_1 以及二者之间的距离 S 。根据相关设计经验, 一般收集孔的孔径 D_1 取为入口喷嘴孔径 D_0 的 $1.3 \sim 1.4$ 倍, 两孔之间的距离 S 取为 D_0 的 $1.2 \sim 1.8$ 倍, 此外, 还要保证两个孔的同轴度误差小于 0.05 mm ^[16]。

4 仿真分析与实验验证

4.1 前处理与离散相模型的求解

Fluent 软件是国际上比较流行的商业计算流体动力学 (CFD) 软件包, 专用于流体力学分析^[18]。这里直接利用 Ansys 软件自带的建模和网格划分工具所设计的虚拟冲击器建模及网格划分完成之后的结果如图 3 所示。

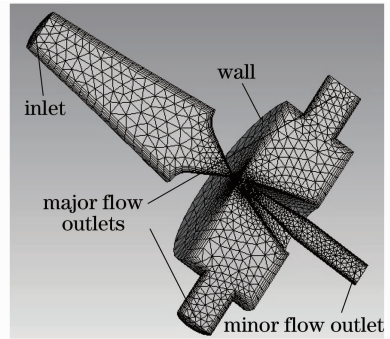


图 3 虚拟冲击器的网格划分结果

Fig. 3 Meshing result of virtual impactor

虚拟冲击器浓缩气溶胶粒子的过程具有确切定义的入口与出口边界条件, 可采用稳态拉式离散相模型进行数值分析^[19]。稳态拉式离散相问题的求解过程一般为: 先求解连续相流场, 然后创建离散相喷射源 (即射流源), 最后求解耦合流动。

这里设计的虚拟冲击器中的气流处于湍流状态, 因此利用湍流模型对连续相流场进行数值计算, 采用在气流场的湍流分析中应用较为普遍的标准 $k-\epsilon$ 模型。在该模型中, k 方程和 ϵ 方程分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (5)$$

式中 G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项, G_b 为由于浮力引起的湍流动能 k 的产生项, Y_M 代表可压缩湍流中脉动扩张的贡献, $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数, σ_k 和 σ_ϵ 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数, S_k 和 S_ϵ 为用户定义的源项^[20]。

气溶胶粒子的轨道可以通过积分拉式坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解。颗粒作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的形式(X 方向)为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x, \quad (6)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_c Re_\tau}{24}, \quad (7)$$

$$Re_\tau = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}, \quad (8)$$

式中 u_p 为粒子速度, Re_τ 为粒子的雷诺数; g_x 为 X 方向重力加速度, F_x 为 X 方向的其他作用力^[21]。其他作用力包括热泳力、布朗力和 Saffman 升力, 可忽略不计。

在求解前, 设置离散相模型的边界条件为: 入口边界设置为速度入口(入口速度 $v_e = 3.05$ m/s); 大流量出口边界设置为流量出口, 类型为陷入; 小流量出口边界设置为流量出口, 类型为逃逸; 壁面边界设置为陷入。

求解完成后, 可在后处理操作中得到粒子的运动轨迹和分布结果, 图 4 为 $0.4 \mu\text{m}$ 的粒子经过虚拟冲击器时的运动轨迹。其中主要结构参数为: $D_0 = 0.7$ mm, $D_1 = 0.9$ mm, $S = 0.9$ mm, $Q_0 =$

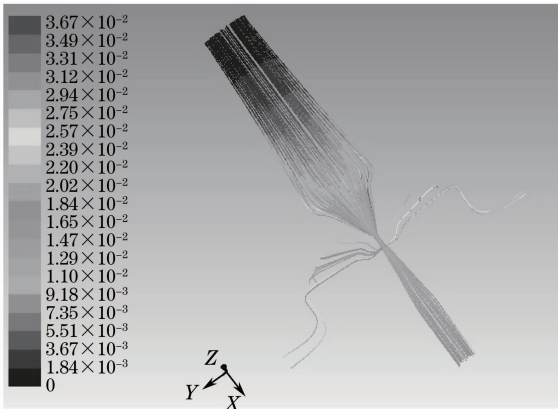


图 4 仿真得到的 $0.4 \mu\text{m}$ 粒子的运动轨迹图
Fig. 4 Simulated traces of $0.4 \mu\text{m}$ particles

4.5 L/mm, $R = 1:4.5$ 。

4.2 不同参数下的数值模拟结果

在上述模型基础上, 分析了主要设计参数对虚拟冲击器收集效率的影响。

1) 收集孔的孔径 D_1 对收集效率的影响

固定入口喷嘴的结构, 取孔径 $D_0 = 0.7$ mm, 间距 $S = 0.9$ mm, 进气口采样流量 $Q_0 = 4.5$ L/min, 流量比 $R = 1:4.5$, 对不同收集孔的孔径 D_1 条件下粒子的运动轨迹进行仿真, 经统计得到一组虚拟冲击器的收集效率曲线, 如图 5 所示。

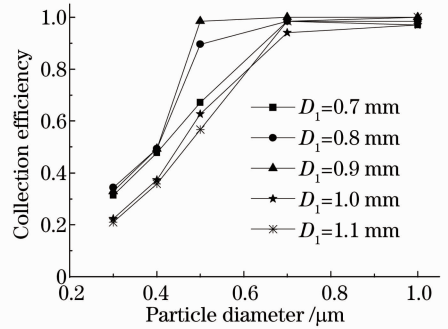


图 5 不同收集孔孔径 D_1 下的收集效率曲线
Fig. 5 Particle collection efficiency for different collection probe diameters D_1

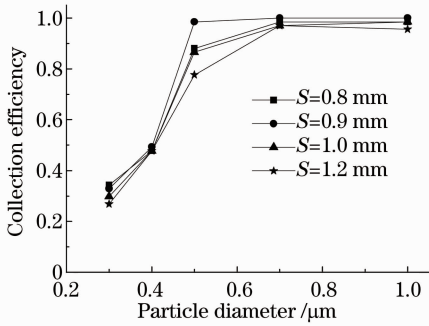
从曲线可以看出, 收集孔孔径 D_1 对收集效率的影响较显著。 D_1 在 0.9 mm 时切割效率最大, 在小于或大于 0.9 mm 时切割效率均不断减小。另外, D_1 在 0.9 mm 时切割曲线陡度最陡, 此时虚拟冲击器的切割效果更好。该值也符合经验值范围, 即 D_1 为 $1.3 D_0 \sim 1.4 D_0$, 即 $0.91 \sim 0.98$ mm。

2) 两孔间距 S 对收集效率的影响

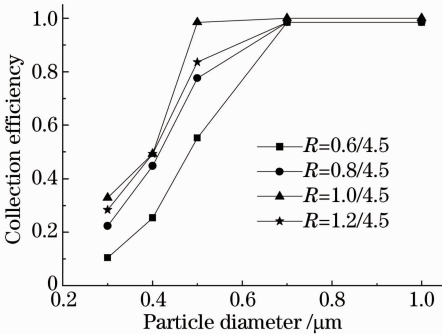
取喷嘴孔径 $D_0 = 0.7$ mm, 收集孔的孔径 $D_1 = 0.9$ mm, 进气口采样流量 $Q_0 = 4.5$ L/min, 流量比 $R = 1:4.5$, 取不同间距 S 进行仿真, 统计得到一组虚拟冲击器的收集效率曲线, 如图 6 所示。

从曲线可以看出, 当两孔间距 S 在 0.9 mm 时, 收集效率最高且切割曲线最陡, 此值也在经验值范围, 即 S 约为 $1.2 D_0 \sim 1.8 D_0$, 即 $0.84 \sim 1.26$ mm。当 S 小于 0.9 mm 或大于 0.9 mm 时, 收集效率均有下降。但是, 两孔间距 S 对收集效率的影响不如收集孔孔径 D_1 的影响显著。

3) 流量比 R 对收集效率的影响

图 6 不同两孔间距 S 下的收集效率曲线Fig. 6 Particle collection efficiency for different nozzle-to-collection probe distances S

取喷嘴孔径 $D_0 = 0.7 \text{ mm}$, 收集孔孔径 $D_1 = 0.9 \text{ mm}$, 间距 $S = 0.9 \text{ mm}$, 进气口采样流量 $Q_0 = 4.5 \text{ L/min}$, 取不同流量比 R 进行仿真, 统计得到一组虚拟冲击器的收集效率曲线, 如图 7 所示。从曲线可以看出, 切割粒径随流量比 R 的增大而减小。这是因为小流量出口的相对流量越大, 小粒径粒子受该气流的作用力增大, 改变运动轨迹的作用力降低。

图 7 不同流量比 R 时的收集效率曲线Fig. 7 Particle collection efficiency for different minor-to-major flow ratios R

综合上述流体动力学分析结论, 为使虚拟冲击器切割粒径达到 $0.4 \mu\text{m}$, 且具有较好的切割效果, 选取设计参数为: $D_0 = 0.7 \text{ mm}$, $D_1 = 0.9 \text{ mm}$, $S = 0.9 \text{ mm}$, $Q_0 = 4.5 \text{ L/min}$, $R = 1:4.5$ 。

4.3 实验验证

根据仿真分析得到的优化设计参数, 设计并实际加工出了虚拟冲击器, 如图 8 所示。为检测其浓缩性能, 这里以 $0.37, 0.5, 0.7 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯 (PSL) 标准粒子为被测对象, 配以光散射激光粒子计数器 (OPC)、质量流量计等测量工具, 搭建了如图 9 所示的虚拟冲击器性能测试装置。测量同一时间段内进入虚拟冲击器之前的标准粒子数 (即粒子计数器 OPC1 的计数值) 和从虚拟冲击器小流量出口流出的标准粒子数 (即 OPC2 的计数值), 将这一时

间段内 OPC2 与 OPC1 的计数值的比值作为虚拟冲击器的收集效率。



图 8 虚拟冲击器实物图

Fig. 8 Schematic of fabricated virtual impactor

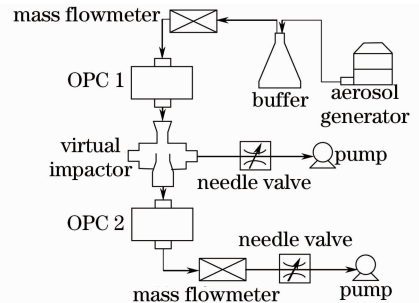


图 9 虚拟冲击器的性能测试装置

Fig. 9 Experimental setup used to evaluate the performance of virtual impactor

利用瑞士 TESA 公司的 TESA VISIO 300 GL 同轴变焦型影像测量仪测得虚拟冲击器实物的入口喷嘴孔径 $D_{0R} = 0.71 \text{ mm}$, 收集孔孔径 $D_{1R} = 0.90 \text{ mm}$ 。同时间接测得两孔间距 S_R 为 1.00 mm 。据此实测值重新进行仿真分析得, 该虚拟冲击器对 $0.37, 0.5, 0.7 \mu\text{m}$ PSL 粒子的收集效率分别为 43.3% 、 79.1% 和 100% 。

考虑到两台粒子计数器串接于气路系统且处在不同的流量下, 因此测量之前先对两台粒子计数器进行标定。完成标定后, 利用图 9 所示的装置测得该虚拟冲击器对 $0.37, 0.5, 0.7 \mu\text{m}$ PSL 粒子的收集效率分别为 55.1% 、 78.0% 和 100% 。

根据收集效率实测结果与仿真结果, 作出该虚拟冲击器的收集曲线, 如图 10 所示。对比结果可以看出, 该虚拟冲击器对 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 粒子的实测收集效率与理论计算偏差不大, 对 $0.37 \mu\text{m}$ 粒子的偏差接近 12% 。这里实验测试过程中, 采用了 2 台尘埃粒子计数器, 粒子计数器的读值是有误差的。根据《GB/T6167-2007 尘埃粒子计数器性能试验方法》可知, 在测试计数响应时, 被测粒子计数器的最小粒径档两次读数的相对误差不应超过 10% ; 在尘埃粒子计数器的性能实验的比较法中, 被测计

数和参照计数器读值的偏差在 20% 以内。据此可以认为,该虚拟冲击器 0.37 μm 粒子处测量值与理论值之间接近 12% 的偏差属于正常范围。因此,实验结果与仿真结果基本吻合。

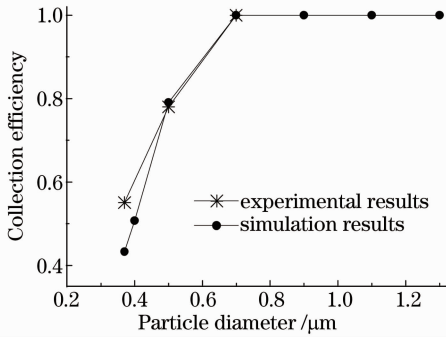


图 10 虚拟冲击器收集效率曲线

Fig. 10 Particle collection efficiency of virtual impactor

5 结 论

虚拟冲击器的研制是实现高灵敏度生物气溶胶光学在线监测的前提。基于理论与实际研究基础和流体动力学方法,设计并仿真分析了虚拟冲击器结构中入口喷嘴与收集孔间距、收集孔孔径以及流量比等设计参数对粒子收集效率的影响,得到了具体的优化参数,并在此基础上研制出了一种 0.4 μm 切割粒径的虚拟冲击器。测试结果表明,该虚拟冲击器收集效果良好,实现了对 0.4 μm 以上粒径粒子的有效浓缩。虚拟冲击器的实测结果与仿真结果基本吻合。本文的工作验证了设计虚拟冲击器时流体动力学分析方法的可行性,为进一步优化设计并开展生物气溶胶光学在线监测技术研究奠定了基础。

致谢 衷心感谢刁兆亮工程师对本文内容所作的贡献。

参 考 文 献

- David S Ensor. Aerosol Science and Technology: History and Reviews[M]. Minnesota, USA: Research Triangle Institute Press, 2011. 509-525.
- Wathes Christopher M, Cox C Barry. Bioaerosols Handbook[M]. Chelsea: Lewis Publishers, 1995. 11-14.
- Richard DeFreez. LIF bio-aerosol threat triggers: then and now[C]. SPIE, 2009, 7484: 74840H.
- Lan Tiange, Xiong Wei, Fang Yonghua, *et al.*. Study on passive detection of biological aerosol with Fourier-transform infrared spectroscopic technique[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1656-1661.
兰天鸽, 熊伟, 方勇华, 等. 应用被动傅里叶变换红外光谱技术探测生物气溶胶研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1656-1661.
- Cai Shuyao, Zhang Pei, Zhu Linglin, *et al.*. Research on detection technology of bio-aerosols with tryptophan intrinsic fluorescence measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512009.
蔡舒窈, 张佩, 朱玲琳, 等. 基于色氨酸本征荧光测量的生物

- 气溶胶检测技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512009.
- Virgil A Marple, Chung M Chien. Virtual impactors: a theoretical study[J]. Environmental Science & Technology, 1980, 14(8): 976-984.
- M C Kim, K W Lee. Design modification of virtual impactor for enhancing particle concentration performance[J]. Aerosol Science & Technology, 2000, 32(3): 233-242.
- J Keskinen, K Janka. Virtual impactor as an accessory to optical particle counters[J]. Aerosol Science & Technology, 1987, 6(1): 79-83.
- Virgil A Marple, Benjamin Y H Liu, Robert M Burton. High-volume impactor for sampling fine and coarse particles[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1990, 40(5): 762-767.
- Liang Xiaojun. Design on the Low Concentration Bioaerosol Concentrator and Its Verification of Capacity[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2011. 25-26.
梁晓军. 一种低浓度微生物气溶胶浓缩器的设计和性能验证[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2011. 25-26.
- Wu Hao, Zhu Tuo, Kong Yan, *et al.*. Study on the absorption and fluorescence spectra of lactobacillus plantarum[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 262-266.
武浩, 朱拓, 孔艳, 等. 植物乳杆菌的吸收和荧光光谱研究[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 262-266.
- Ronald G Pinnick, Steven C Hill, Stanley Niles, *et al.*. Real-time measurement of fluorescence spectra from single airborne biological particles[J]. Field Analytical Chemistry and Technology, 1999, 3(4-5): 221-239.
- Richard DeFreez, Ezra Merrill, Sam Albanna, *et al.*. Design considerations and performance characteristics of AirSentinel, a new UV-LIF bio-aerosol threat detection trigger[C]. SPIE, 2005, 5990: 59900O.
- Jung Hyeun Kim, George W Mulholland, Scott R Kukuck, *et al.*. Slip correction measurements of certified PSL nanoparticles using a nanometer differential mobility analyzer (Nano-DMA) for Knudsen number from 0.5 to 83[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2005, 110(1): 31-54.
- Zhou Deqing. A Course of the Science of Microbiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 9-10.
周德庆. 微生物学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 9-10.
- Billy W Loo, Christopher P Cork. Development of high efficiency virtual impactors[J]. Aerosol Science & Technology, 1988, 9(3): 167-176
- He Cunxing, Zhang Tiehua. Hydraulic and Pneumatic Transmission[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1998. 244-245.
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. 244-245.
- Sun Yunqiang, Xi Fengjie, Xu Xiaojun, *et al.*. Model for the optical field and fluent field coupling effects[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202013.
孙运强, 习锋杰, 许晓军, 等. 内通道流场与光场能量耦合的数值模拟[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202013.
- Zhu Gangxian, Li Dichen, Zhang Anfeng, *et al.*. Influence of deposited layer's structure on flow field of coaxial powder feeding nozzle[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1636-1642.
朱刚贤, 李涤尘, 张安峰, 等. 沉积层结构对同轴送粉喷嘴粉末流场的影响规律[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1636-1642.
- Ruan Hongyan, Lü Jianjun, Yang Bo, *et al.*. Analysis of flow field for supersonic nozzle in laser cutting[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1233-1237.
阮鸿雁, 吕建军, 杨波, 等. 激光切割超音速喷嘴的流场特性[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1233-1237.
- Zhu Hongjun, Lin YuanHua, Xie Longhan. 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.

栏目编辑:何卓铭