

水平采样直管内颗粒传输特性的研究

丛晓春,王成,曲京华

(山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室,山东 青岛 266590)

摘要:以 $0.1 \sim 20 \mu\text{m}$ 的单分散颗粒为研究对象,利用数值模拟的方法,对在层流状态下,颗粒在内径为4、7和10 mm,长度为0.2、0.5、1.0和1.5 m的水平采样直管内的运动特性进行模拟,得到水平采样直管内的流场及颗粒的浓度分布,通过对模拟结果的整理分析得到颗粒在水平采样直管内的传输效率。数值模拟发现,粒子的损失主要来源于重力和扩散作用;颗粒的传输效率要受到粒径、管长、管内径的影响;在层流状态下, $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 颗粒的传输效率几乎达到100%,不受管内径、管长和重力、布朗扩散力的影响; $2.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒的传输效率随粒径、管内径、管长的增大而减小。分析可得,通过减少采样管的输送长度或者在流量一定的基础上减小管内径均可提高颗粒在水平采样直管内的传输效率。通过对比分析模拟结果与理论公式,可以近似认为颗粒在水平采样直管内的传输效率等于在重力和扩散力单独作用下颗粒传输效率的乘积。

关键词:颗粒物;采样管;数值模拟;传输效率

中图分类号:X851

文献标识码:A

The study of transmission characteristics of particles in Straight horizontal sampling tube

CONG Xiaochun, WANG Cheng, QU Jinghua

(Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China)

Abstract: This paper chooses $0.1 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$ monodisperse particles as the research object. We adopted numerical simulation methods to study the transmission characteristics of particles in the straight horizontal sampling tube under laminar flow. Diameters of tube are 4 mm, 7 mm and 10 mm. The lengths of tube are 0.2 m, 0.5 m, 1.0 m and 1.5 m. We got the flow field of the tube and the particle concentration distribution. Through the analysis of simulation results, we obtained the transport efficiency of particles in the straight horizontal sampling tube. Based on the numerical simulation of particle transmission characteristics within the straight horizontal sampling tube, it is found that the particle loss is mainly from gravity and diffusion. Simultaneously, the particle transport efficiency is influenced by particle size, tube length and inner diameter. Under laminar flow, the transport efficiency of $0.1 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ particles is almost 100%, without the influence of inner diameter, tube length, gravity and Brownian diffusion force. The transport efficiency of $2.5 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$ particles decreases with the increasing of particle size, tube length and inner diameter. Through the analysis, it will improve the transport efficiency of particles by reducing the length of the sampling tube or the inner diameter on the basis of a flow. The simulation results compared with the theoretical formula, it can be approximated that the transport efficiency of particles is equal to the product of particle transport efficiency respectively under the action of gravity and diffusion.

Key words: particulate matter; sampling tube; numerical simulation; transport efficiency

随着经济的高速发展,城市化、工业化规模的扩大,空气中各种环境污染物的排放量迅速增加,以颗粒物尤其是细颗粒物污染为主^[1]。据现有文献可知,对于颗粒物运动特性的研究主要集中在工业管道和空调系统的通风管道^[2-4],有关颗粒物在采样仪器输送管路中的传输及沉降特性的研究很少。本文以层流状态下的采样输送管路中的水平直管段为研究对象,探讨颗粒物在采样管内的运动及沉降特性,分析管内径、管长、粒径等基本参数对传输效率的影响,为正确评价实际的采样结果和大气颗粒物的监测提供技术支持。

1 数值模拟参数

本文通过数值模拟 0.1、0.5、1.0、2.5、5.0、10、20 μm 的单分散颗粒在层流(2.83 L/min)状态下,在外径为 6.35、9.53、12.70 mm,壁厚 1~2 mm(即内径分别为 4、7、10 mm)的水平直管内的运动,来了解 0.1~20 μm 的颗粒物在采样管中的

沉降及传输特性。数学模型及数值模拟研究所需详细参数如表 1 所示。

对于颗粒相,在本模拟中采用可溯源至美国标准技术研究院(NIST)的单分散球形标准粒子(PSL 小球),其密度设定为美国 DUCK 标准小球的密度,即 1.05 g/cm³,浓度采用 2 000 个/cm³,这样则可以忽略颗粒在输送过程中颗粒的凝聚作用,其相关参数见表 2。

2 模拟结果与分析

2.1 速度场分布

以内径为 7 mm 的水平采样管的模拟结果为例进行管内速度场的分析。在数值模拟过程中,设置入口流速是均匀分布的,从图 1 中可以看出,在采样管入口截面,气流均匀分布,只是管道外边壁处的流速几乎为零;在出口截面上,流速成明显的同心圆分布,且趋于稳定状态,管道中心的流速

表 1 数学模型的主要参数

Tab.1 The main parameters of mathematical model

大气压力 /kPa	温度 /K	流量 /L·min ⁻¹	管内径 /mm	管长 /m	粒径 / μm	Re	流态
101.3	293.15	2.83	4	0.2/0.5/1.0/1.5	0.1/0.5/1.0/2.5/5.0/10/20	1 001	层流
101.3	293.15	2.83	7	0.2/0.5/1.0/1.5	0.1/0.5/1.0/2.5/5.0/10/20	572	层流
101.3	293.15	2.83	10	0.2/0.5/1.0/1.5	0.1/0.5/1.0/2.5/5.0/10/20	400	层流

表 2 颗粒相的主要参数

Tab.2 The main parameters of particle phase

采样流量/L·min ⁻¹	粒径/ μm	颗粒密度/kg·m ⁻³	颗粒浓度/个·cm ⁻³	质量流量/kg·s ⁻¹
2.83	0.1	1 050	2 000	5.18E-14
2.83	0.5	1 050	2 000	6.48E-12
2.83	1.0	1 050	2 000	5.18E-11
2.83	2.5	1 050	2 000	8.10E-10
2.83	5.0	1 050	2 000	6.48E-09
2.83	10	1 050	2 000	5.18E-08
2.83	20	1 050	2 000	4.15E-07

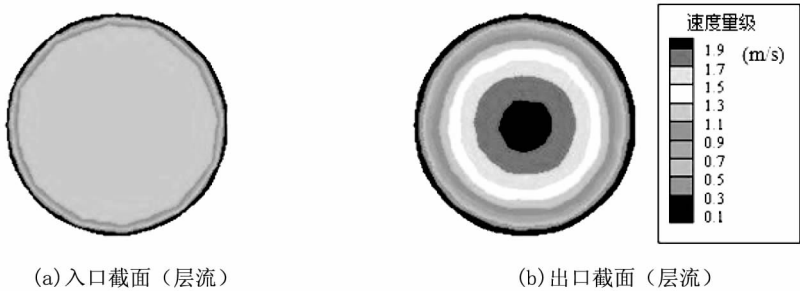


图1 入口和出口截面速度分布图(层流)

Fig.1 Velocity distribution of inlet and outlet (laminar flow)

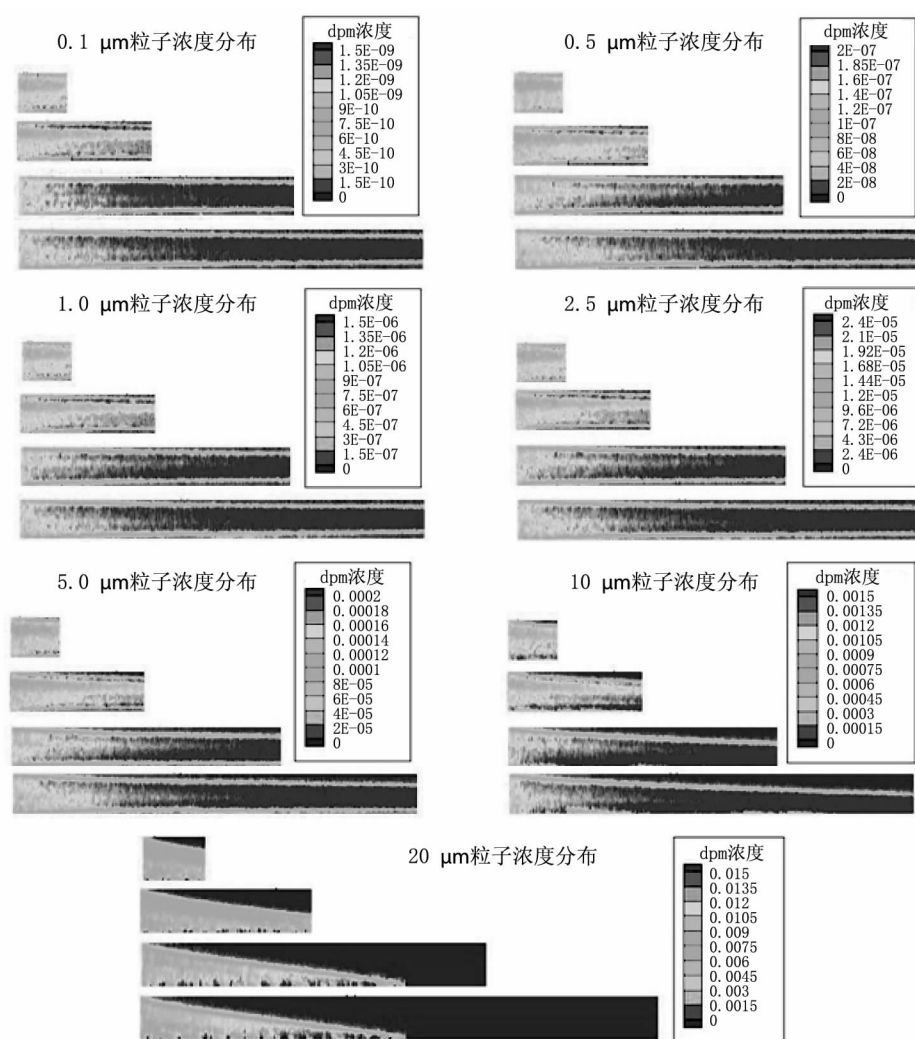


图2 层流状态下水平直管内颗粒的浓度分布

Fig.2 The particle concentration distribution in horizontal straight pipe under laminar flow

最大,靠近管道外壁面的流速几乎为零,此时的边界层比较薄,管内流体分层严重。这种速度分布恰好与圆管内层流的流动规律及边界层理论相符。

2.2 颗粒浓度场分布

以内径为7 mm的水平采样管为例,对颗粒的浓度场进行分析,层流状态下管内颗粒浓度(kg/m^3)分布如图2所示,而其他工况则以颗粒在管内的传输效率的形式进行描述,如图3所示。

在采样管的入口处,我们设定颗粒是均匀分布的。从图2可以看出,在颗粒进入采样管之后,颗粒的运动受到管内气流的影响,粒径为0.1~1.0 μm 颗粒受管内气流的影响较大,其随动性较强,受重力的影响不大;粒径为2.5~20 μm 的颗粒受气流的影响较小,相对来说,其随动性较差,在跟随气流的运动过程中,颗粒受到自身的重力

影响较大。

从图3可知,在层流状态下,随着颗粒粒径的增大,其在管内的传输效率逐渐减小,其机理是重力作用。对于0.1~1 μm 的粒子来说,其传输效率几乎达到100%,管内径、管长和重力、布朗扩散力对其产生的影响较小,这与文献[5]中的结论是相同的;对于2.5~20 μm 的粒子而言,在同一管长的采样管内,随着管内径的增大,其传输效率逐渐减小,这是由于管内径较大,粒子更可能碰撞到管道壁面而被捕集;在同一内径的采样管内,管长越大,其传输效率越小,这种影响随粒径的增大而越明显。例如,内径为4 mm的采样管内,当管长为0.2 m时,5 μm 粒子的传输效率为98.7%,20 μm 粒子的传输效率为80.9%;当管长为1.0 m时,5 μm 粒子的传输效率降低为93.6%,下降了5.2%,而20 μm 粒子的传输效率则降低为23.2%,下降了71.3%。Liu^[6]也得到了相同的变化趋势。

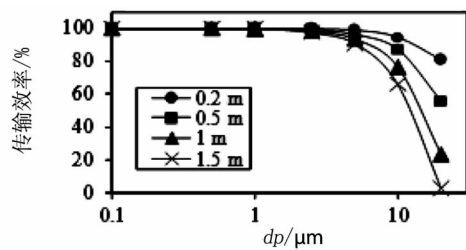
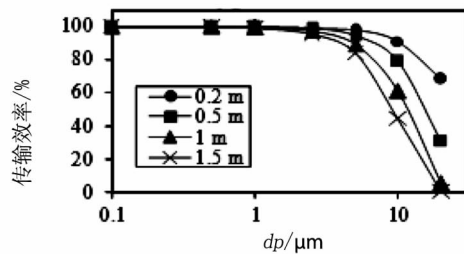
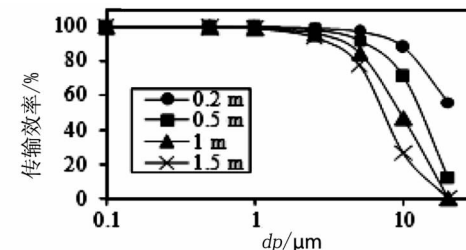
(a) $d=4$ mm, $Q=2.83$ L/min(层流)(b) $d=7$ mm, $Q=2.83$ L/min(层流)(c) $d=10$ mm, $Q=2.83$ L/min(层流)

图3 水平直管内颗粒的传输效率(层流)

Fig.3 The transmission efficiency of particles in the horizontal straight pipe (laminar flow)

2.3 理论公式对比分析

在圆形水平管道的层流中, Fuchs 和 Thomas^[7] 假设管内气流分布呈抛物线形, 这样就独立解决了有关重力沉降所带来的问题, 最先得出了层流状态下粒子在圆形水平管道中重力沉降的传输效率, 随后 Heyder 和 Gebhart^[8] 进一步的研究, 得到了颗粒重力沉降的传输效率的一般关系式:

$$\eta_{\text{tube, grav}} = 1 - \frac{2}{\pi} [2\varepsilon \sqrt{1 - \varepsilon^{2/3}} - \varepsilon^{1/3} \sqrt{1 - \varepsilon^{2/3}} + \arcsin(\varepsilon^{1/3})] \quad (1)$$

表3 颗粒传输效率的模拟结果与理论公式计算结果比较(层流)

Tab.3 Numerical simulation values compared with calculation results (laminar flow)

层流状态	0.1 μm	0.5 μm	1 μm	2.5 μm	5 μm	10 μm	20 μm
η_{grav}	100	99.9	99.8	99.1	96.6	87.1	54.2
η_{grav} (模拟结果)	99.4	99	98.7	98.4	95.1	82	52.1
η_{diff}	99.8	99.9	100	100	100	100	100
η_{diff} (模拟结果)	99.9	100	100	100	100	100	100
$\eta = \eta_{\text{grav}} \times \eta_{\text{diff}}$	99.8	99.8	99.8	99.1	96.6	87.1	54.2
模拟结果	98.7	98.7	97.2	96.5	94.3	80.3	50.6
偏差/%	1.1	1.1	2.6	2.6	2.4	7.8	6.6

(下转第112页)

$$\varepsilon = \frac{3}{4}Z = \frac{3}{4} \frac{L}{d} \frac{V_{\text{ts}}}{U} \cos\theta \quad (2)$$

式中: Z —重力沉降参数; L —管道长度, m; d —管道内径, m。

在布朗扩散的作用下, 粒子会在管壁上发生沉积, 颗粒扩散损失的传输效率可以定义如下:

$$\eta_{\text{tube, diff}} = \exp\left(-\frac{\pi d L V_{\text{diff}}}{Q}\right) = \exp(-\varepsilon Sh) \quad (3)$$

$$Sh = 3.66 + \frac{0.0668 \frac{d}{L} Re_f Sc}{1 + 0.04 \left(\frac{d}{L} Re_f Sc\right)^{2/3}} = 3.66 + \frac{0.2672}{\varepsilon + 0.10079\varepsilon^{1/3}} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\pi D L}{Q} \quad (5)$$

式中: V_{diff} —颗粒扩散沉积速度, 也称为质量传递系数; Sh —舍伍德数, 无量纲的质量转移系数; D —颗粒的扩散系数。

利用上述表达式计算颗粒扩散传输效率的理论结果与 Gormley 和 Kennedy 的层流管道颗粒扩散沉积实验的结果差别甚微, 能够很好的吻合^[9]。

本文分别在只考虑重力作用、只考虑布朗扩散作用以及同时考虑两者共同作用的条件下, 对不同粒径的颗粒在长度为 0.5 m, 内径为 4 mm 水平采样直管内的运动及传输效率进行数值模拟, 将得到的模拟结果与上述理论公式的计算结果进行如下比较, 如表 3 所示。

从表 3 中看出, 当单独考虑重力、单独考虑布朗扩散力的影响时, 通过数值模拟得到的结果与理论计算结果比较相近; 当同时考虑重力和布朗扩散力的共同影响时, 通过数值模拟得到的结果与重力、布朗力单独作用时理论传输效率乘积之间的偏差都在 10% 以内。因此, 在层流状态下, 可以近似认为颗粒在水平直管中的传输效率是其在重力、布朗扩散力单独作用下的传输效率之积。

4 结论

采用扩展卡尔曼滤波算法后的目标定位精度与滤波前有了明显的提高,跟踪精度也改善明显,提高了室内定位系统的定位精度。实时跟踪只在很少采样点的位置上有较大的误差,大部分采样点误差都在零值附近有很小的波动。由此可以看出采用扩展卡尔曼滤波算法进行滤波后,基本可以对目标进行实时、准确地跟踪。

参考文献:

- [1] LIU H, GAN Y, YANG J, et al. Push the Limit of WiFi Based Localization for Smartphones [C] // Proceedings of ACM MobiCom, 2012: 305 – 316.
- [2] MAUTZ R, TILCH S. Rvey of optical indoor positioning systems [C] // Proceedings of IEEE IPIN, 2011.
- [3] HILSENBECK S, BOBKOV D, SCHROTH G, et al. Based data fusion of pedometer and WiFi measurements for mobile indoor positioning [C] // Proceedings of ACM UBIComp, 2014.

(上接第 81 页)

3 结语

1) 在层流状态下,水平圆形采样管中流体的速度沿流动方向逐渐增大,靠近管道壁面的速度较小,管道中心处的速度最大。

2) 在水平采样管中,层流状态下, $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 颗粒的传输效率几乎达到 100%, 不受管内径、管长和重力、布朗扩散力的影响; $2.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒的传输效率随粒径、管内径、管长的增大而减小。通过减少采样管的输送长度或者在流量一定的基础上减小管内径,均可提高颗粒在水平采样管内的传输效率。

3) 在层流状态下,颗粒在水平采样管内总的传输效率近似于重力和扩散力单独作用下颗粒传输效率的乘积。

参考文献:

- [1] 张霞,孟琛琛,王丽涛,等.邯郸市大气污染特征及变化趋势研究[J].河北工程大学学报:自然科学版, 2015, 32(4): 69 – 74.
- [2] JIANG HAI, LU LIN, SUN KE. Experimental study and numerical investigation of particle penetration and deposi-

- [4] 曾钰,林都.基于伪线性 KF 和 EKF 的无源定位算法研究[J].中北大学学报:自然科学版, 2011, 32(2): 174 – 178.
- [5] 刘盼红.基于粒子群优化算法的 Hadoop 调度算法研究[J].河北工程大学学报:自然科学版, 2015, 32(1): 83 – 85.
- [6] OLAMA M M, DJOUADI S M, PAPAGEORGIOU I G, et al. Position and velocity tracking in mobile networks using particle and Kalman filtering with comparison[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1001 – 1010.
- [7] 谢先明.结合滤波算法的不敏卡尔曼滤波器相位解缠方法[J].测绘学报, 2014, 43(7): 739 – 745.
- [8] 杨铮,吴陈沭.位置计算:无线网络定位与可定位性[M].北京:清华大学出版社, 2014.
- [9] LI L, SHEN G, ZHAO C, et al. Experiencing and handling the diversity in data density and environmental locality in an indoor positioning service [C] // Proceedings of ACM MobiCom, 2014: 459 – 470.
- [10] ZHOU Q Y, KOLTUN V. Simultaneous localization and calibration; self – calibration of consumer depth cameras [C] // Proceedings of the IEEE CVPR, 2014: 454 – 460.

(责任编辑 王利君)

tion in 90° bent ventilation ducts [J]. Building and Environment, 2011(46): 2195 – 2202.

- [3] 张锦,刘泽华.通风管道中气溶胶颗粒沉降的探讨[J].节能与环保, 2009(6): 37 – 39.
- [4] TANG YINGJIE, GUO BING, ANDREW R MCFARLAND. A Computational Fluid Dynamics Study of Particle Penetration through an Omni – Directional Aerosol Inlet [J]. Aerosol Science and Technology, 2010(44): 1049 – 1057.
- [5] 巴伦,维勒克.气溶胶测量原理、技术及应用[M].白志鹏,张灿等译.北京:化学工业出版社, 2007.
- [6] LIU DELING. Evaluating Aerosol Transmission Efficiency in a Sampling System [J]. Journal of the IEST, 2013, 56(2): 29 – 42.
- [7] FUCHS N. A. Sampling of Aerosols [J]. Atmos Environ, 1975(9): 697 – 707.
- [8] HEYDER J, GEBHART J. Gravitational deposition of particles from laminar aerosol flow through inclined circular tubes [J]. Journal of Aerosol Science, 1977(8): 289 – 295.
- [9] GORMLEY P G, KENNEDY M. Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube [J]. Royal Irish Academy, 1949(52): 163 – 169.

(责任编辑 王利君)