

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估

罗李娜¹, 程真^{1*}, 朱雯斐¹, 张强², 楼晟荣³, 乔利平³, 晏乃强¹

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 北京科领奈尔环境科技有限公司, 北京 100083; 3. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 细颗粒物 (PM_{2.5}) 理化性质测量是研究大气 PM_{2.5} 污染源及成因的重要手段之一, 最大限度降低细颗粒物在采样输送过程中的损失对提高测量结果的准确性至关重要。为了评估常规测量体系中采样管路内 PM_{2.5} 的输送损失情况, 并在此基础上探究合适的采样管路布置方案, 本研究采用数值计算方法分析了管径、管长及弯管数目这 3 个主要参数在不同变化范围内对 PM_{2.5} 输送效率的影响。结果表明, 流量为 20.0 L min⁻¹ 时, 管径 4 mm、管长 1.0 m 的竖直接管内 PM_{2.5} 质量浓度输送效率为 89.6%, 管径增至 14 mm 时输送效率升至 98.3%。流量为 1.0 L min⁻¹ 时, 管径 4 mm、管长 10.0 m 的水平管路内 PM_{2.5} 质量浓度输送效率仅为 86.7%, 管长降至 0.5 m 时输送效率提高至 99.2%。弯管弧度为 90° 时, 流量 20.0 L min⁻¹、管径 4 mm 的湍流态弯管处, PM_{2.5} 质量浓度输送效率低至 85.2%。流量 (L min⁻¹) 与管径 (mm) 之比小于 1.4 使管内流态为层流时有利于降低颗粒物输送损失。为保证 PM_{2.5} 输送效率在 97% 以上, 2.5、5.0 和 10.0 L min⁻¹ 仪器建议选择管长在 6.0 m 以内的竖直接管; 流量为 16.7 L min⁻¹ 和 20.0 L min⁻¹ 仪器建议选择管径在 12 mm 以上的竖直接管; 水平管路管长由流量与管径之比确定; 在湍流流态下, 建议减少弯管的使用数量。

关键词: 细颗粒物; 采样管路; 传输损失; 输送效率; 在线测量

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2016)

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation

LUO Li-na¹, CHENG Zhen^{1*}, ZHU Wen-fei¹, ZHANG Qiang², LOU Sheng-rong³, QIAO Li-ping³, YAN Nai-qiang¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Beijing Clean Air Environmental Technologies Co., Ltd., Beijing 10083, China; 3. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: In-situ measurement of PM_{2.5} physical and chemical properties is one substantial approach for the mechanism investigation of PM_{2.5} pollution. Minimizing PM_{2.5} transport loss in sampling tube is essential for ensuring the accuracy of the measurement result. In order to estimate the integrated PM_{2.5} transport efficiency in sampling tube and optimize tube designs, the effects of different tube factors (length, bore size and bend number) on the PM_{2.5} transport were analyzed based on the numerical computation. The results shows that PM_{2.5} mass concentration transport efficiency of vertical tube with flowrate at 20.0 L min⁻¹, bore size at 4 mm, length at 1.0 m was 89.6%. However, the transport efficiency will increase to 98.3% when the bore size is increased to 14 mm. PM_{2.5} mass concentration transport efficiency of horizontal tube with flowrate at 1.0 L min⁻¹, bore size at 4mm, length at 10.0 m is 86.7%, increased to 99.2% with length at 0.5 m. Low transport efficiency of 85.2% for PM_{2.5} mass concentration is estimated in bend with flowrate at 20.0 L min⁻¹, bore size at 4mm, curvature angle at 90°. Laminar flow of air in tube through keeping the ratio of flowrate (L min⁻¹) and bore size (mm) less than 1.4 is beneficial to decrease the PM_{2.5} transport loss. For the target of PM_{2.5} transport efficiency higher than 97%, it is advised to use vertical sampling tubes with length less than 6.0 m for the flowrates of 2.5, 5.0, 10.0 L.min⁻¹ and bore size larger than 12 mm for the flowrates of 16.7 or 20.0 L.min⁻¹. For horizontal sampling tubes, tube length is decided by the ratio of flowrate and bore size. Meanwhile, it is suggested to decrease the amount of the bends in tube of turbulent flow.

Key words: fine particulate matter; sampling tube; transport loss; transport efficiency; on-line measurement

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期:

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2014BAC22B01); 国家重点研发计划“大气污染成因与控制技术研究”重点专项 (2016YFC0208700)

作者简介: 罗李娜 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为细颗粒物污染, E-mail: luolina@sjtu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: chengz88@sjtu.edu.cn

高浓度大气细颗粒物 (PM_{2.5}, 空气动力学当量直径小于或等于 2.5μm 的颗粒物) 污染易导致能见度下降、影响气候变化并威胁人体健康, 是我国当前最为严重并亟待解决的环境问题之一^[1~7]。应用在线监测仪器如微量振荡天平法颗粒物分析仪 TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) 1450F、扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometers) 和在线气溶胶及气体检测系统 MARGA (Monitor for Aerosols and Gases in ambient Air) 等开展 PM_{2.5} 质量浓度、数浓度及化学组分等理化性质监测, 是研究 PM_{2.5} 污染特征及成因、来源的主要途径^[8~12]。通常, PM_{2.5} 经由采样管从采样口输送至监测仪器, 理想采样过程应保证 PM_{2.5} 质量浓度、数浓度和化学组分等性质在采样管中不发生改变。然而, 受重力沉降、扩散沉降和湍流惯性沉降等机制影响, 颗粒物在采样管中不可避免发生损失, 将直接或间接影响仪器测量结果^[8,13~20]。在环境保护部 2013 年发布的《环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 连续自动监测系统技术要求及检测方法》(HJ 653-2013) 中, 明确要求采样管内颗粒物输送效率应大于或等于 97%^[21]。因此, 在布置 PM_{2.5} 在线监测仪器采样管时应应对管路内输送损失情况进行评估, 以免损失程度过大导致测量结果不能真实反映大气颗粒物的理化性质。

采样管内颗粒物输送损失量可通过实验测量或数值计算两种方式进行评估^[8,20,22,23]。实验测量方式一般应用气溶胶发生装置及气溶胶浓度在线检测仪器, 通过测量采样管进、出口颗粒物浓度得出管路内颗粒物损失量^[8,20]。实验测量方法准确度高, 但灵活性较差, 且对实验仪器精确度要求较为苛刻。数值计算方式主要应用经过实验验证且准确度较高的理论或经验公式估算颗粒物损失量。与实验测量相比, 数值计算虽然存在可接受范围内的误差^[8,22,23], 但可在设计阶段对不同的管路参数变化做出快速响应。从应用角度出发, 数值计算比实验测量方式更适用于测量仪器采样管路设计, 因此本研究基于数值计算方式估算采样管内 PM_{2.5} 输送效率。

目前, 研究者针对颗粒物输送效率数值计算方法开展了不少研究, 基于实验测量或理论分析, Heyder 等^[15]和 Schwendiman 等^[16]分别提出了层流、湍流态倾斜管路内颗粒物在重力沉降下的输送效率计算公式; Gormley 等^[17]给出了受扩散沉降机制作用的颗粒物损失计算公式; Lee 等^[18]探究了湍流惯性沉降机制作用下的颗粒物输送效率计算公式; Pui 等^[19]基于实验测量结果给出了与雷诺数无关的弯管处颗粒物输送效率计算方法。在此基础上, AeroCalc^[8]、Particle Loss Calculator^[22]和核设施取样管路颗粒物损失计算软件^[23]等工具的开发实现了管路内颗粒物全程输送损失快速分析的功能, 但其计算结果仅针对单粒径颗粒物, 无法对 PM_{2.5} 整体损失进行分析。从大气颗粒物测量角度出发, 我们更关注 PM_{2.5} 整体质量浓度、数浓度等在采样管中的传输损失量。因此, 本研究基于单粒径颗粒物输送效率经典计算公式, 结合典型城市大气颗粒物粒径谱分布, 对常规在线 PM_{2.5} 监测仪器采样管在不同管径、管长和弯管条件下的 PM_{2.5} 输送效率进行数值计算, 并根据计算结果对采样管路布置提出建议, 以期对大气颗粒物在线测量的管路布置提供参考。

1 数值计算方法

本研究采用 PM_{2.5} 输送效率 η_{trans} 这一指标评价颗粒物在采样管中的输送损失情况。 η_{trans} 即为通过采样管到达监测仪器与采样管入口的 PM_{2.5} 数浓度或质量浓度之比, 该定义与文献^[21]一致。在计算中, 采样管内单粒径颗粒物全程输送效率为颗粒物在各输送管段、各沉降机制下的输送效率之积^[式 (1)]^[8]。PM_{2.5} 全程输送效率运用加权平均法求解, 加权因子为单粒径颗粒物输送效率, 权重为该粒径颗粒物数浓度或质量浓度在 PM_{2.5} 整体中的占比。其中, 颗粒物输送效率计算部分选取文献^[15~19]中总结的经典计算公式, 颗粒物数浓度分布选用 Ruprecht 等^[24]提出的城市颗粒物浓度谱。

$$\eta_{\text{trans}}(d_p) = \prod_{\text{tube sections}} \left(\prod_{\text{mechanisms}} \eta_{\text{tube section, mechanism}}(d_p) \right) \quad (1)$$

$$\eta_{\text{trans, number concentration}} = \sum_{0.001}^{2.5} (\eta_{\text{trans}}(d_p) \times \frac{n^0(d_p)}{\sum_{0.001}^{2.5} n^0(d_p)}) \quad (2)$$

$$\eta_{\text{trans, mass concentration}} = \sum_{0.001}^{2.5} (\eta_{\text{trans}}(d_p) \times \frac{m^0(d_p)}{\sum_{0.001}^{2.5} m^0(d_p)}) \quad (3)$$

$$m^0 = n^0 \cdot \rho^0 \cdot \frac{1}{6} \pi (d_p)^3 \quad (4)$$

式中, d_p 为颗粒物空气动力学当量直径, 单位为 μm ; n^0 为某粒径颗粒物数浓度, 单位为 $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$; m^0 为某粒径颗粒物质量浓度, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $\eta_{\text{tube section, mechanism}}$ 为某管段某机制下某粒径颗粒物输送效率; η_{trans} 为单粒径颗粒物全程输送效率; $\eta_{\text{trans, number concentration}}$ 为 $\text{PM}_{2.5}$ 全程数浓度输送效率; $\eta_{\text{trans, mass concentration}}$ 为 $\text{PM}_{2.5}$ 全程质量浓度输送效率; ρ^0 为颗粒物密度, 取 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.1 单粒径颗粒物输送效率

采样管某管段内颗粒物输送效率由各沉降机制下输送效率之积决定。本研究选取重力沉降^[15, 16]、扩散沉降^[17]、湍流惯性沉降^[18]和弯管惯性沉降^[19]这 4 种影响颗粒物输送效率的主要机制为分析对象。同一沉降机制下颗粒物输送效率计算公式的选取与管内气流流态有关, 流态划分由管路内气流雷诺数 Re 决定, Re 计算式选取文献[8]中推荐的经典公式。当 Re 小于 2000 时流态为层流, 当 Re 大于 4000 时为湍流, 其余为过渡态。假定环境大气处于标准状态, 雷诺数判别式可简化为式 (5)。式 (5) 中 Q 为仪器流量, 单位为 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; D 为管路内径, 单位为 mm 。因此, $Q/D < 1.433$ 时, 气流为层流状态; 当 $Q/D > 2.866$ 时, 气流为湍流状态。

$$R_e = 1395.8 \frac{Q}{D} \quad (5)$$

由于各沉降机制下颗粒物输送效率计算方法不是本研究关注重点, 故对此不做详细展开, 具体计算公式可参见文献[15~19]中对此部分的详细叙述。其中, 重力沉降计算公式适用于粒子沉降速度轴向分量低于管中流速的情况。对于流态处于过渡区的颗粒物沉降现象, 由于其情况较为复杂并无可借鉴公式, 因此本研究不涉及过渡区内颗粒物输送效率的分析。在实际采样过程中, 应尽量避免采样管路内气流处于过渡区, 颗粒物在此流态下损失情况较为复杂不易估计。此外, 本研究所涉及管路均指不锈钢管, 管径均指管路内径。

1.2 城市颗粒物浓度谱

选用 Ruprecht 等^[24]提出的城市颗粒物三模态分布[式 (6)]作为本研究 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度谱。其中, 模态 I 中参数 N 为 9.93×10^4 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, d_p 为 $0.013 \mu\text{m}$, $\lg\sigma$ 为 0.245; 模态 II 中 N 为 1.11×10^3 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, d_p 为 $0.014 \mu\text{m}$, $\lg\sigma$ 为 0.666; 模态 III 中 N 为 3.64×10^4 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, d_p 为 $0.05 \mu\text{m}$, $\lg\sigma$ 为 0.337。由于 $0.001 \mu\text{m}$ 以下颗粒物主要以气体分子存在, 故选取 $0.001 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 粒径段作为研究范围^[1, 8]。

$$n^0(\log d_p) = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \log \sigma_i} \cdot \exp\left(-\frac{(\log d_p - \log \bar{d}_{pi})^2}{2 \log^2 \sigma_i}\right) \quad (6)$$

1.3 参数设置

常见 $\text{PM}_{2.5}$ 在线监测仪器如 TEOM 和 MARGA 等采样流量为 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 部分在线仪器如 SMPS 流量为 $0.2 \sim 5.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, ELPI (Electrical Low Pressure Impactor, 静电低压撞击器) 流量为 $10.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[8~12]。综合考虑在线仪器流量大小和其分布范围, 选取如表 1 所示的 6 组不等间距流量作为分析对象。为了保证本研究分析管路条件具由代表性且覆盖范围广, 根据对实际测量仪器采样管入口管径及管长的调研情况,

选取 4~14 mm 管径、0.5~10.0 m 管长作为数值计算参数，具体分布如表 1 所示。PM_{2.5} 粒径计算范围根据测量仪器可监测范围选取 0.001~2.5 μm，以 0.001 μm 为粒径分布间隔，共计 2499 组粒径区间。

表 1 采样管输送效率计算参数

Table 1 Sampling tube parameters of numerical computation	
类型	参数设置
流量 $Q/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	20.0、16.7、10.0、5.0、2.5、1.0
管长 L/m	0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0
管径 D/mm	4、6、8、10、12、14

2 结果与讨论

2.1 管径对细颗粒物输送效率的影响

管径对于 PM_{2.5} 输送效率的影响主要体现在其对管路内气流流态的影响。PM_{2.5} 在线监测仪器采样流量一般为固定值，因此流态判别指标雷诺数 Re [式(5)]大小主要取决于管径。当管内为层流时，主要沉降机制为重力沉降和扩散沉降；管内为湍流时，主要沉降机制为重力沉降、扩散沉降和湍流惯性沉降。气流流态转变时，管路内颗粒物沉降机制类型及数量发生改变，结合颗粒物全程输送效率计算公式[式(1)]可知，当沉降机制数量增加时，由于乘积效应，PM_{2.5} 输送效率易大幅度降低。因此，本节从流态类别出发，分析管径变化对 PM_{2.5} 输送效率的影响程度。

为了探究常见在线监测仪器采样管内气流流态分布情况，选取不同流量及管径组合条件，结合雷诺数判别式[式(5)]，进一步分析了管路内流态变化趋势(图 1)。由图 1 可知，当仪器流量低于 5.0 L·min⁻¹ 时，采样管内流态均为层流；当流量大于 5.0 L·min⁻¹ 且小于 10.0 L·min⁻¹ 时，管路内流态在管径低于 7 mm 时易处于过渡区，7 mm 以上均为层流；当流量大于 10.0 L·min⁻¹ 时，管路内三种流态均易存在，且随流量增大湍流态及过渡态比例逐渐增加；当流量为 20.0 L·min⁻¹ 时，仅当管径为 14 mm 时管路内流态为层流，管径小于 7 mm 为湍流，其余条件下管路内流态处于过渡区。由此可见，采样管内气流流态以层流居多，且呈现出随流量增大及管径降低由层流经过渡区转变为湍流的趋势。

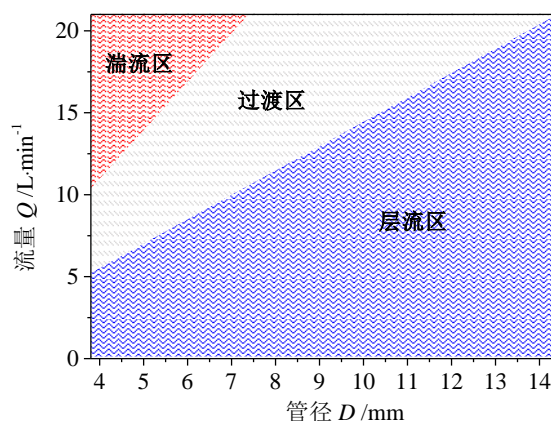


图 1 流量及管径对气流流态的影响

Fig. 1 Impact of flow rate and tube bore size on flow types of airflow

《环境空气颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})连续自动监测系统安装和验收技术规范》(HJ 655-2013)中建议采样管竖直安装^[25]，故此部分选取长度为 1.0 m 的竖直采样管进行分析。图 2 为 PM_{2.5} 数浓度和质量浓度输

送效率随流态变化情况。从中可知，层流态采样管内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率随采样流量增大而升高，除流量为 $1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 外，其余流量条件下输送效率均在 97% 以上，且当流量大于 $10.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时输送效率高于 99%，符合文献[21]要求。图 2 中仅有流量 $16.7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm ，流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 和流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 6 mm 三组管路条件下管内流态处于湍流。其中，流量 $16.7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 和流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率分别为 96.60% 和 96.52%，不仅低于同流量下层流态管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率 ($>99\%$)，同时超出文献[21]要求。流态对于 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率的影响程度与数浓度有所不同。层流态管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送情况受管径及流量变化影响小，输送效率均高于 99%，但湍流态下输送效率受管径影响大，采样管内流量为 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，管径由 6 mm 降至 4 mm ， $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率由 99.14% 降至 89.59%，不仅高于文献[21]要求，而且低于同流量下管内为层流态时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率。

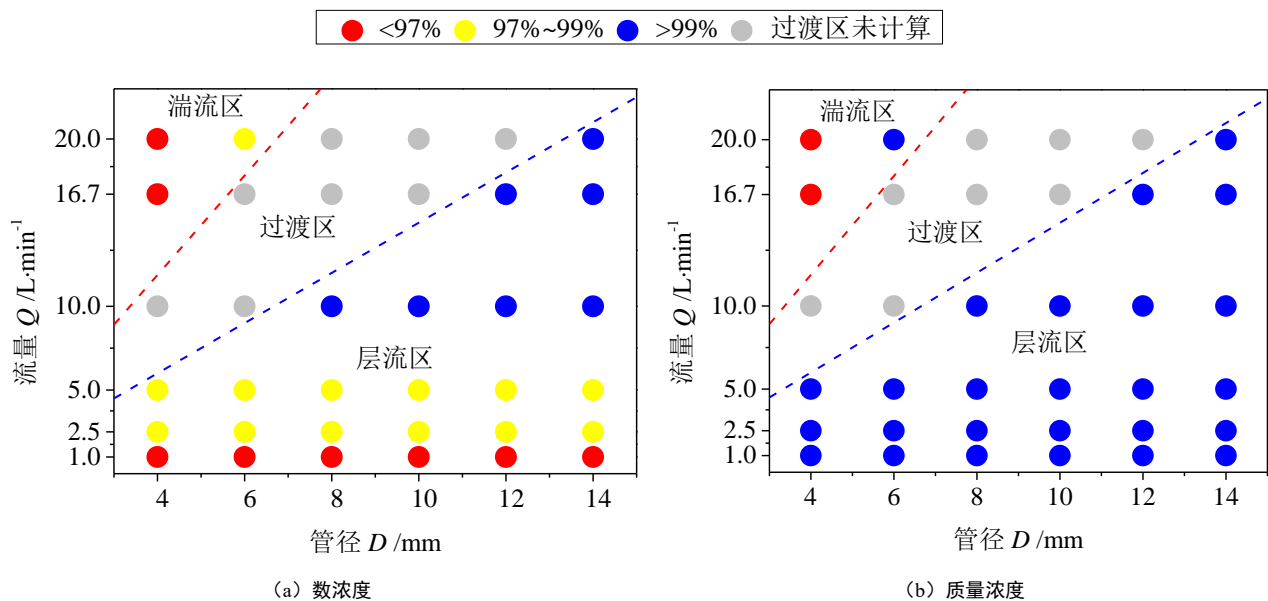


图 2 流态对垂直管路 ($L = 1 \text{ m}$) $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响

Fig. 2 Impact of flow type on $\text{PM}_{2.5}$ transport efficiency in vertical tube ($L = 1 \text{ m}$)

图 2 中流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效率均为最低值，且质量浓度输送效率低于 90%，因此对该管路条件下颗粒物在各沉降机制下的输送效率变化情况进一步展开分析 (图 3)。由图 3 可知，重力沉降下颗粒物输送效率为 100%，扩散沉降主要影响粒径 $d_p < 0.01 \mu\text{m}$ 颗粒物，湍流惯性沉降主要影响粒径 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 颗粒物。由于全程输送效率为各机制下输送效率之积，因此扩散沉降和湍流惯性沉降为影响颗粒物沉降的主要机制。 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $d_p < 0.01 \mu\text{m}$ 颗粒物数浓度占比为 6.73%，质量浓度占比低于 0.001%，而 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 颗粒物数浓度占比为 0.16%，质量浓度占比为 49.39%，故 $d_p < 0.01 \mu\text{m}$ 颗粒物对数浓度输送情况影响大，而 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 颗粒物对质量浓度输送情况影响大。根据两种机制所影响颗粒物粒径范围可知，数浓度输送效率主要受扩散沉降机制影响，质量浓度输送效率则主要受湍流惯性沉降机制影响。由此可见，流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率低主要是管内流态为湍流所导致。因此，层流态较湍流态更有利于采样管内 $\text{PM}_{2.5}$ 输送。

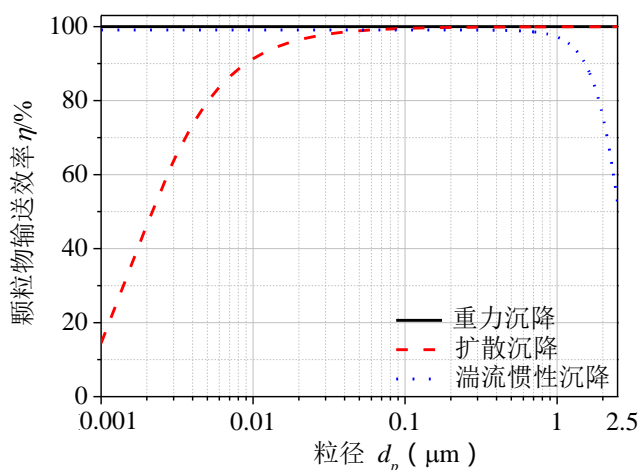


图3 $Q=20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L=1.0\text{ m}$, $D=4\text{ mm}$ 条件下垂直管路颗粒物输送效率

Fig. 3 Transport efficiency of particulate matter in vertical tube ($Q=20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L=1.0\text{ m}$ and $D=4\text{ mm}$)

对层流态垂直采样管进一步分析可知，该方向采样管内颗粒物重力沉降比例为 0，仅有扩散沉降作用于颗粒物，由文献[16, 17]中扩散沉降机制计算公式可知，受扩散沉降作用导致的颗粒物损失量大小与管径无关，因此同一流量条件不同管径采样管内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度沉降比例相同。由图 3 分析结果可知，扩散沉降主要作用于粒径小于 $0.01\ \mu\text{m}$ 颗粒物， $\text{PM}_{2.5}$ 中此范围内颗粒物数浓度占比（6.73%）远高于质量浓度占比（低于 0.001%），因此层流态下垂直管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率随管径及流量变化的程度大于质量浓度。颗粒物在输送过程中不可避免发生损失，但可通过优化管路参数包括摆放角度、长度等尽量降低各沉降机制对颗粒物的影响。采样管竖直摆放可最大限度降低重力沉降机制的影响，从而通过减少沉降机制数量的方式达到降低 $\text{PM}_{2.5}$ 全程输送损失的目的，且对于层流态采样管路而言，管径可选范围大。

综合分析图 2 和图 3 可知，与湍流态相比，采样管内流态为层流时， $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效率均易达到文献[21]中的要求。以文献[21]中 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率推荐值为下限即采样管内 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率应大于或等于 97%，对于流量为 2.5, 5.0 和 $10.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 仪器的垂直采样管，管径为 4~14 mm 均符合要求；流量为 $16.7\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 仪器建议选择管径大于 12 mm 的垂直采样管；流量为 $1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 且与颗粒物数浓度性质相关的监测仪器，即使采样管内处于层流态 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率仍低于 97%，实际应用中此类仪器应对采样管路进行调整或校准。

2.2 管长及倾角对细颗粒物输送效率的影响

常见 $\text{PM}_{2.5}$ 采样体系中采样管连接采样口与仪器进样口主要有两种方式：①单一连接，即不涉及弯管颗粒物由垂直管路直接输送至仪器；②组合连接，即颗粒物经过由弯管连接的多段管路输送至仪器，一般为垂直管路、弧度为 90° 弯管与水平管路组合。基于管径部分分析结果，选取表 1 中处于层流条件的流量和管径组合分别对垂直管路及水平管路管长对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响进行分析。

图 4 为管长 0.5~10.0 m 垂直采样管内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效率变化情况。从中可知， $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率随管长增加而降低，且降低程度随流量降低而增大。流量为 $20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，管长由 0.5m 增加至 10.0 m， $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率仅降低 1.96%，且各长度下输送效率均高于 97%，符合文献[21]要求；流量为 $1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，随管长增加 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率降低比例增至 11.37%，且仅有管长为 0.50m 时输送效率高于 97%。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率变化趋势与数浓度相似，输送效率随管长增加而降低，但降低幅度存在显著差异，0.5~10.0 m 管路内六组流量（1.0、2.5、5.0、10.0、16.7、 $20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ）条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率均高于 99%，随管长增加输送效率降低比例低于 0.1%。由此可见，垂直采样管的管路长短主要影响 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率。

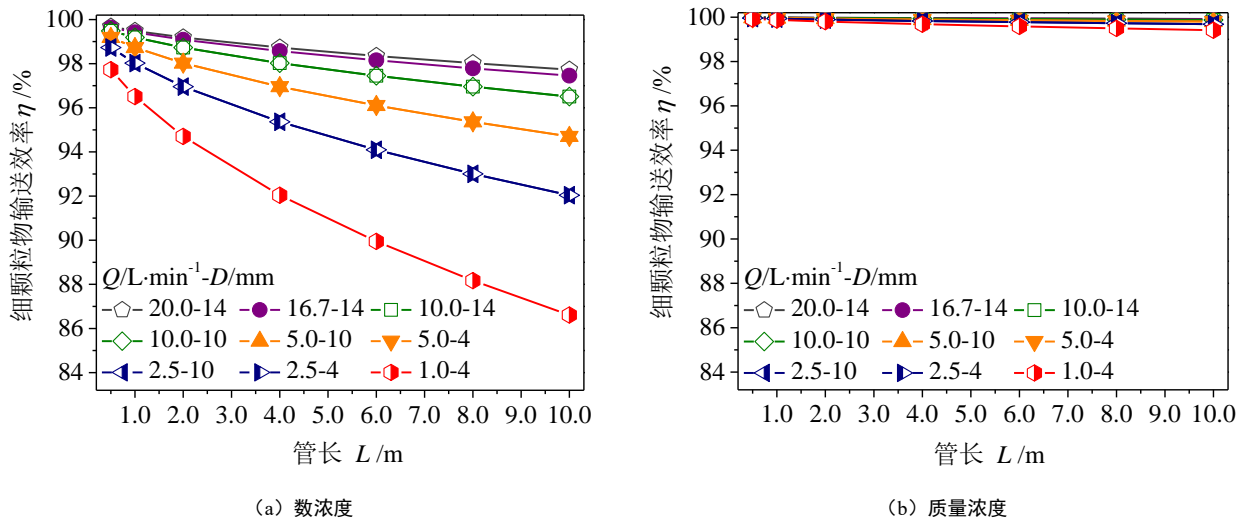


图 4 竖直管路管长对 PM_{2.5} 输送效率的影响

Fig. 4 Impact of vertical line length on PM_{2.5} transport efficiency

上述计算结果中，流量 1.0 L·min⁻¹、管径 4 mm、管长 10.0 m 管路条件下 PM_{2.5} 数浓度输送效率最低。对该条件下颗粒物输送效率变化情况进一步分析（图 5）可知，竖直管路内导致颗粒物损失的机制为扩散沉降，主要影响粒径 $d_p < 0.1 \mu\text{m}$ 颗粒物，此范围内颗粒物数浓度占 PM_{2.5} 整体的 71.99%，质量浓度则占 PM_{2.5} 整体的 0.89%，故数浓度输送效率受管长影响的程度高于质量浓度，且扩散沉降量随流量降低呈指数增加。因此，仪器流量越小，PM_{2.5} 数浓度输送效率随竖直管路管长增加而降低的趋势越明显。

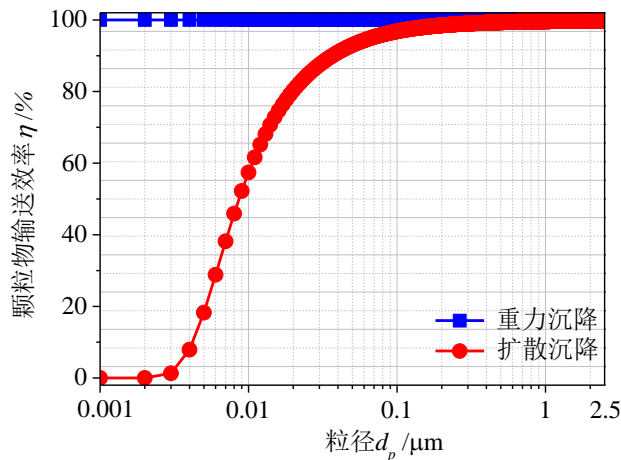


图 5 $Q = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L = 10.0 \text{ m}$, $D = 4 \text{ mm}$ 条件下竖直管路颗粒物输送效率

Fig. 5 Transport efficiency of particulate matter in vertical tube ($Q = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L = 10.0 \text{ m}$ and $D = 4 \text{ mm}$)

图 6 为管长 0.5~10.0 m 水平采样管内 PM_{2.5} 数浓度和质量浓度输送效率变化情况。由图 6 可知，水平管路内 PM_{2.5} 数浓度输送效率随管长增加而降低，整体变化趋势与竖直管路（图 4）基本相同，即流量越小 PM_{2.5} 输送效率随管长降低的程度越显著。同一流量、管径及管长条件下水平管路内 PM_{2.5} 数浓度输送效率均略低于竖直管路，降低量在 0.31% 以内，这一现象说明改变管路方向为水平或竖直对 PM_{2.5} 数浓度输送效率影响较小。对于 PM_{2.5} 质量浓度，同一流量条件下输送效率随管长增加而降低，降低程度受流量与管径共同影响，流量与管径比值越小降低程度越显著。流量 20.0 L·min⁻¹、管径 14 mm 管路条件下 Q/D 值最大，管长由 0.5 m 增加至 10.0 m 时，PM_{2.5} 质量浓度输送效率降低 2.33%；流量 1.0 L·min⁻¹、管径 4 mm 管

路条件下 Q/D 值最小, 质量浓度输送效率降低高达 12.59%。从应用角度来说, 管路 Q/D 值越大, 质量浓度输送效率随管长增加而降低的比例越小, 越有利于灵活改变管路设计方案。

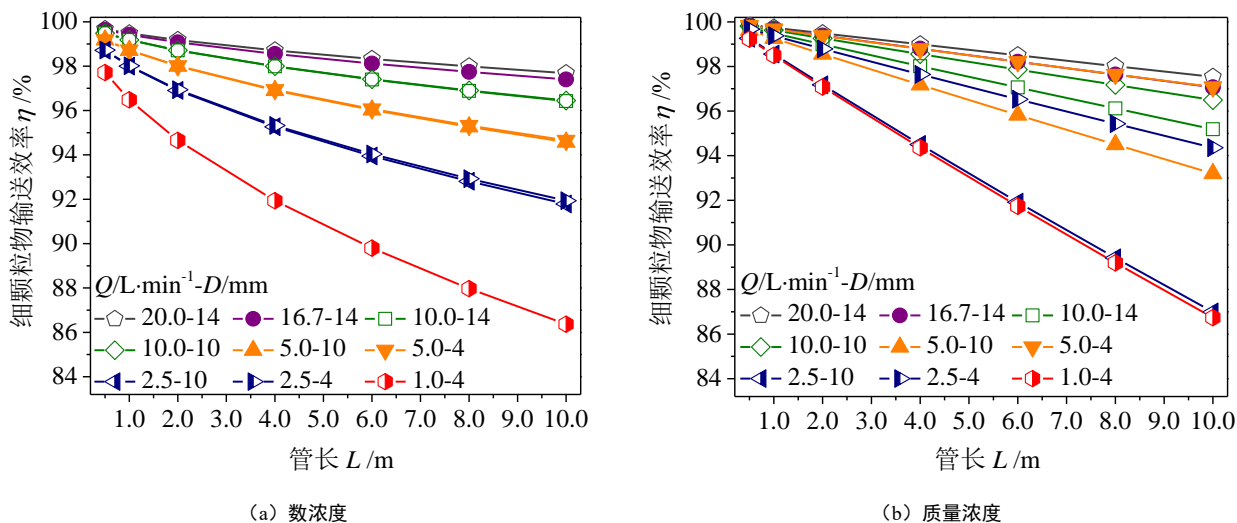


图 6 水平管路管长对 $PM_{2.5}$ 输送效率的影响

Fig. 6 Impact of horizontal line length on $PM_{2.5}$ transport efficiency

与竖直管路计算结果一致, 流量 $1.0 L \cdot min^{-1}$ 、管径 4 mm、管长 10.0 m 管路条件下 $PM_{2.5}$ 输送效率最低, 对此条件下颗粒物输送效率变化情况进一步分析 (图 7) 可知, $d_p < 0.1 \mu m$ 和 $d_p > 1 \mu m$ 为颗粒物主要损失区域, 依据前述此范围内颗粒物质量浓度和质量浓度在 $PM_{2.5}$ 占比情况, $d_p < 0.1 \mu m$ 主要影响数浓度输送效率, $d_p > 1 \mu m$ 主要影响质量浓度输送效率。其中, $d_p > 1 \mu m$ 范围内颗粒物发生损失由重力沉降导致, 依据文献[15]中重力沉降计算公式, 颗粒物输送效率与 Q/D 值呈正相关, 因此质量浓度输送效率随管长增加的降低程度与管径和流量有关。

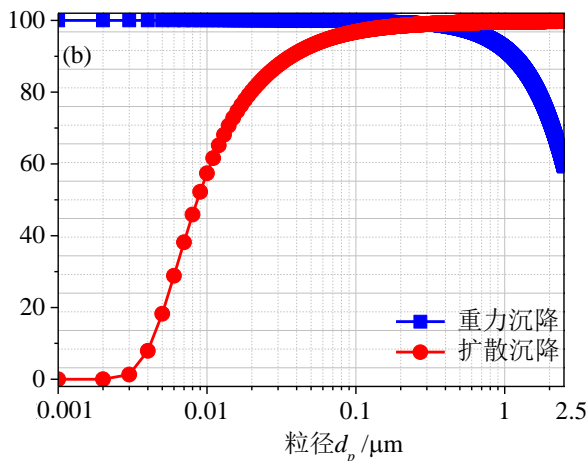


图 7 $Q = 1.0 L \cdot min^{-1}$, $L = 10.0 m$, $D = 4 mm$ 条件下水平管路颗粒物输送效率

Fig. 7 Transport efficiency of particulate matter in horizontal line ($Q = 1.0 L \cdot min^{-1}$, $L = 10.0 m$ and $D = 4 mm$)

竖直管路与水平管路内颗粒物受扩散沉降影响程度相同, 唯一区别在于重力沉降仅影响水平管路内颗粒物输送。对比竖直管路 (图 5) 和水平管路 (图 7) 内颗粒物输送效率可知, 水平管路较竖直管路增加 $d_p > 1 \mu m$ 这一损失范围, 该范围颗粒物质量占比大, 因此水平管路内质量浓度输送效率明显低于竖直管路; 另一损失区域 $d_p < 0.1 \mu m$ 主要受扩散沉降影响, 扩散沉降机制与管路倾角无关, 且该区域颗粒物数浓度占比大, 因此竖直管路和水平管路内 $PM_{2.5}$ 数浓度输送效率基本相同。

整体来说,同一流量、管径条件下垂直管路内 $PM_{2.5}$ 输送效率高于水平管路,减小管长可以提高 $PM_{2.5}$ 输送效率。若以文献[21]中所要求颗粒物输送效率应在 97%及以上为限,与 $PM_{2.5}$ 数浓度有关的采样仪器,无论是垂直管路还是水平管路,流量为 $20.0 L \cdot min^{-1}$ 和 $16.7 L \cdot min^{-1}$ 时,管长范围为 $0.5 \sim 10.0 m$ 时均符合要求;流量为 $2.5, 5.0$ 和 $10.0 L \cdot min^{-1}$ 时,建议管长不超过 $6.0 m$;流量为 $1.0 L \cdot min^{-1}$ 时,管长应不超过 $0.5 m$ 。与质量浓度有关的采样仪器,若采用垂直管路,管长范围为 $0.5 \sim 10.0 m$ 时均符合要求,若采用水平管路,则应根据 Q/D 值大小来选择,当 $Q/D > 1.0$ 时,管长范围为 $0.5 \sim 10.0 m$ 均符合要求; $0.5 < Q/D < 1.0$ 时,建议管长不超过 $5.0 m$; $Q/D < 0.5$ 时,建议管长不超过 $2.0 m$ 。

2.3 弯管对细颗粒物输送效率的影响

弯管一般用于连接两段不同方向的采样管路,在 $PM_{2.5}$ 采样体系中一般采用弧度为 90° 的弯管连接水平采样管段和垂直采样管段。弯管处气流方向发生改变,由于惯性作用,颗粒物会在弯管处发生沉积。图 8 为层流态弯管内 $PM_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效率随弯管数目变化情况。由图 8 可知,弯管内为层流时, $PM_{2.5}$ 数浓度输送效率和质量浓度输送效率在不同流量及管径条件下均在 99%以上,且随弯管数目增加输送效率降低比例低于 1%。图 9 为湍流态弯管内 $PM_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效率变化情况。由图 9 可知,湍流态弯管内 $PM_{2.5}$ 数浓度输送效率均在 99%以上,符合文献[21]要求。 $PM_{2.5}$ 质量浓度输送效率变化情况则与数浓度存在明显差异,流量 $16.7 L \cdot min^{-1}$ 、管径 $4 mm$,流量 $20.0 L \cdot min^{-1}$ 、管径 $4 mm$,流量 $20.0 L \cdot min^{-1}$ 、管径 $6 mm$ 三组条件下弯管内 $PM_{2.5}$ 质量浓度输送效率均在 97%以下,其中流量 $20.0 L \cdot min^{-1}$ 、管径 $4 mm$,流量 $20.0 L \cdot min^{-1}$ 、管径 $6 mm$ 弯管内输送效率分别为 85.21%和 87.33%,且随着弯管数目增加,输送效率显著降低,弯管数为 4 时,流量 $20.0 L \cdot min^{-1}$ 、管径 $4 mm$ 弯管内 $PM_{2.5}$ 质量浓度输送效率低至 55%。

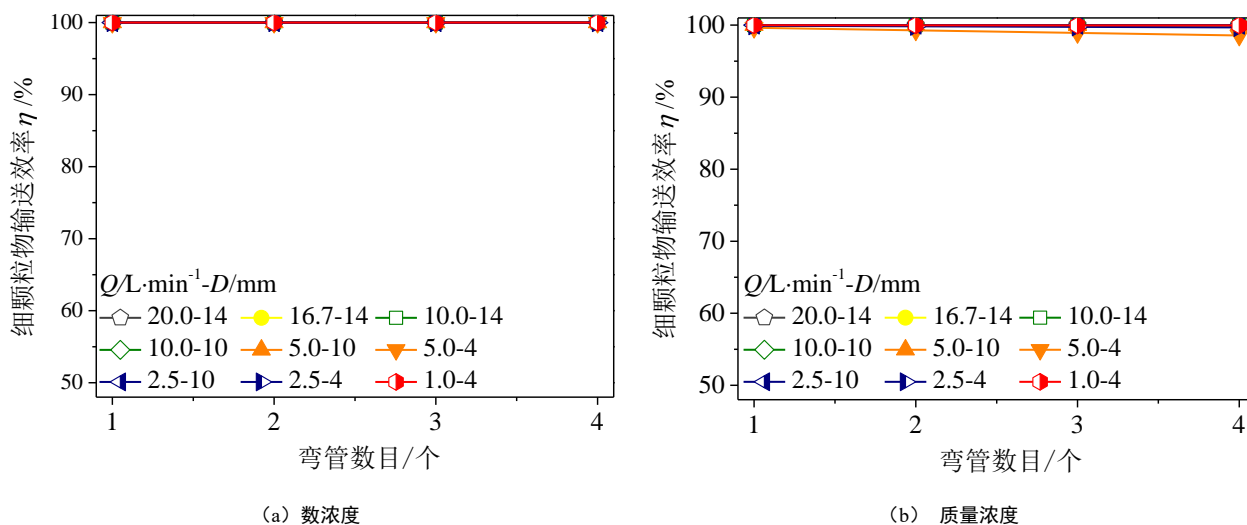


图 8 层流态条件下弯管对 $PM_{2.5}$ 输送效率的影响

Fig. 8 Impact of bend in laminar flow on $PM_{2.5}$ transport efficiency

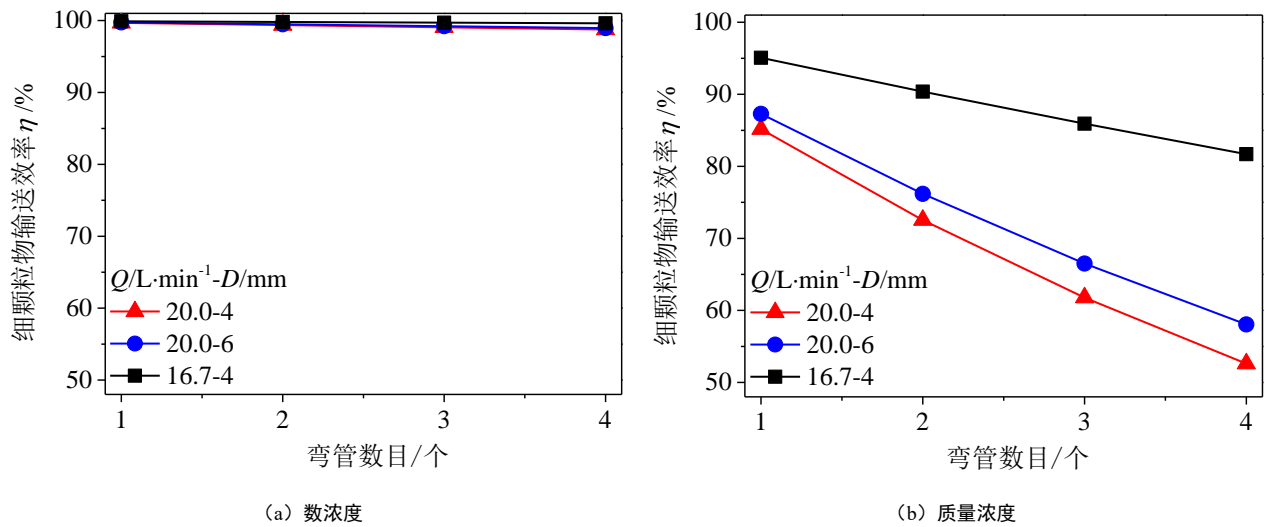


图9 湍流态条件下弯管对 PM_{2.5} 输送效率的影响

Fig. 9 Impact of bend in turbulent flow on PM_{2.5} transport efficiency

流量 20.0 L·min⁻¹、管径 4 mm 弯管内 PM_{2.5} 质量浓度输送效率最低，但数浓度输送效率高达 99%，因此对该条件下弯管内颗粒物输送效率变化情况进一步展开分析（图 10）。由图 10 可知，颗粒物损失主要集中在 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ 范围，该粒径范围内颗粒物质量浓度占比为 87.30%，数量浓度占比为 4.15%，因此弯管湍流惯性沉降机制主要影响颗粒物质量浓度输送，导致湍流态弯管内 PM_{2.5} 质量浓度损失明显，但数浓度基本无变化。

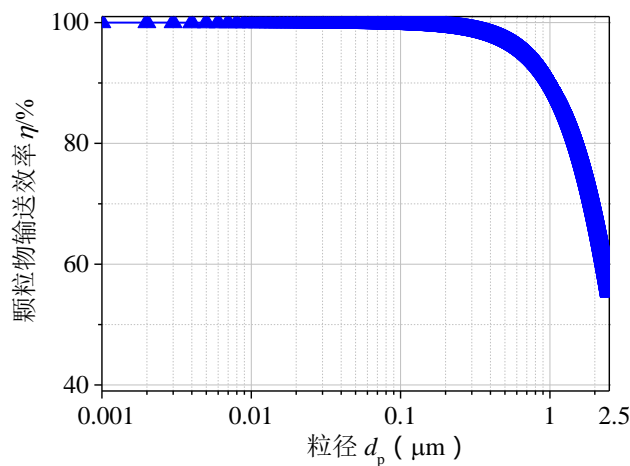


图 10 $Q = 20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $D = 4 \text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$ 条件下弯管颗粒物输送效率

Fig. 10 Transport efficiency of particulate matter at bend of tube ($Q = 20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $D = 4 \text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$)

尽管从数值分析角度考虑，弯管仅对湍流状态下 PM_{2.5} 质量浓度输送效率有较大影响，其余情况下输送效率可高于 97%。但 Von 等^[22]发现弯管处 PM_{2.5} 损失量计算结果小于实际测量结果，这一偏差可能是由于在弯管内颗粒物流态不仅由雷诺数决定，还与弯管形状例如曲率半径等因素有关。此外，颗粒物全程输送效率为弯管输送效率与其他管段输送效率之积，增设弯管不可避免会降低整体输送效率。基于以上分析，为提高采样管路内 PM_{2.5} 输送效率，在管路内流态为湍流时，应尽量减少弯管的使用数量。

2.4 其他影响因素

颗粒物在采样管路内输送，除受重力沉降、扩散沉降等主要机制影响外，还会发生静电沉降和热迁移沉降。静电沉降是由于带电颗粒物在采样管内受库仑力或镜像力作用而发生沉降，由于采样管路内电场分

布情况无法估计,因此较难对静电沉降损失进行定量计算。目前,颗粒物静电沉降的研究主要针对单极荷电颗粒物,如 Liu 等^[26,27]发现 0.03 μm 氯化钠气溶胶荷电量为 1 时,在流量 1.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管长 3.0 m、管径 7.94 mm 聚氯乙烯材质管路内静电输送效率低至 88%,当采用导电采样管如铜管、不锈钢管时可以降低静电沉降影响。若采用绝缘管路输送单极荷电粒子,其静电沉降量可能高于其他沉降机制。尽管大气颗粒物带电量较低,电荷分布总体处于玻尔兹曼平衡状态,但仍应在实际采样体系中通过采用导电材质管路,尽量降低静电损失。热迁移沉降是由于采样管路内存在温度梯度,例如采样管管壁温度低于管内温度,导致颗粒物由高温处向低温处移动产生沉降^[28,29]。Von 等^[22]研究表明,对于大气颗粒物采样,采样管管壁与管内温度差在 40°C 以内时,热迁移损失量可忽略不计。此外,当采样管管路突然收缩或扩张时,颗粒物也会由于惯性作用产生沉降,但考虑到 $\text{PM}_{2.5}$ 输送管路一般不会涉及此情况且相关计算公式适用范围过窄,因本研究此未对此进行分析。

3 结论及建议

(1) 管径选取应以保证管内气流处于层流流态为原则。与湍流态相比,采样管内流态为层流时易满足 HJ 653-2013 中 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率应大于或等于 97% 的要求。仪器流量为 20.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 且采样管内为层流时, $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率高于 99%,而湍流时低至 90%。对于流量为 2.5、5.0 和 10.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 仪器的竖直采样管路,管径为 4~14 mm 时均符合 HJ 653-2013 要求; 16.7 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 20.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 仪器建议选择管径大于 12 mm 的竖直采样管; 流量为 1.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 且与颗粒物数浓度性质相关的监测仪器,即使采样管内处于层流流态, $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率仍低于 97%,实际应用中此类仪器应对采样管路进行调整或校准。

(2) 管长对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响程度与监测仪器类别和管路摆放倾角有关。同一流量、管径条件下竖直管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率高于水平管路,减小管长可以提高 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率。与数浓度有关的采样仪器,无论是竖直管路还是水平管路,流量为 1.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,建议选择管长不超过 0.5 m 的采样管; 流量为 2.5、5.0 和 10.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,建议选择管长不超过 6.0 m 的采样管; 流量为 16.7 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 20.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,管长为 0.5~10.0 m 时均符合 HJ 653-2013 要求。与质量浓度有关的采样仪器,若采用竖直管路,管长为 0.5~10.0 m 时均符合 HJ 653-2013 要求; 若采用水平管路,则应根据 Q/D 值大小来选择,当 $Q/D > 1.0$ 时,管长为 0.5~10.0 m 时均符合要求; $0.5 < Q/D < 1.0$ 时,管长应不超过 5.0 m; $Q/D < 0.5$ 时,管长应不超过 2.0 m。

(3) 弯管内气流为湍流态时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率较低。弯管弧度为 90° 时,流量 20.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm,流量 20.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 6 mm 的湍流态弯管处, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率分别为 85.21% 和 87.33%。从提高 $\text{PM}_{2.5}$ 全程输送效率的角度考虑,管路内为湍流时,建议减少弯管的使用数量。

参考文献:

- [1] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. 350-393.
- [2] Szopa S, Balkanski Y, Schulz M, *et al.* Aerosol and ozone changes as forcing for climate evolution between 1850 and 2100 [J]. Climate Dynamics, 2013, 40(9-10): 2223-2250.
- [3] Kan H D, Chen R, Tong S. Ambient air pollution, climate change, and population health in China [J]. Environment International, 2012, 42(1): 10-19.
- [4] Madrigano J, Kloog I, Goldberg R, *et al.* Long-term exposure to $\text{PM}_{2.5}$ and incidence of acute myocardial infarction [J]. Environmental Health Perspectives, 2013, 121(2): 192.
- [5] Cheng Z, Luo L N, Wang S X, *et al.* Status and characteristics of ambient $\text{PM}_{2.5}$ pollution in global megacities [J]. Environment international, 2016, 89-90: 212-221.
- [6] Kulkarni P, Baron P A, Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 69-103.
- [7] Sioutas C. Evaluation of the measurement performance of the scanning mobility particle sizer and aerodynamic particle sizer [J]. Aerosol Science & Technology, 1999, 30(1): 84-92.

- [8] Charron A, Harrison R M, Moorcroft S, *et al.* Quantitative interpretation of divergence between PM₁₀ and PM_{2.5} mass measurement by TEOM and gravimetric (Partisol) instruments [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(3): 415-423.
- [9] M. Matti Maricq, Diane H. Podsiadlik, Richard E. Chase. Size distributions of motor vehicle exhaust PM: A comparison between ELPI and SMPS measurements [J]. *Aerosol Science & Technology*, 2000, **33**(3):239-260.
- [10] 程萌田,潘月鹏,王辉,刘全,王跃思. 大气 PM_{2.5} 中水溶性离子在线观测技术的应用研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2943-2949.
Cheng M T, Pan Y P, Wang H, *et al.* On-line measurement of water-soluble composition of particulate matter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 2943-2949.
- [11] 程念亮, 李云婷, 张大伟,等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Formation mechanism of a serious pollution event in January 2013 in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [12] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013~2014 年北京大气重污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1):27-35.
Li L J, Wang Z S, Zhang D W, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013~2014 [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1):27-35.
- [13] Chang K N, Chen Y K, Huang S-H, *et al.* Penetration of charged particles through metallic tubes [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2012, **48**(48): 10-17.
- [14] Kumar P, Fennell P, Symonds J, *et al.* Treatment of losses of ultrafine aerosol particles in long sampling tubes during ambient measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(38): 8819-8826.
- [15] Heyder J, Gebhart J. Gravitational deposition of particles from laminar aerosol flow through inclined circular tubes [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1977, **8**(4):289-295.
- [16] Schwendiman L, Stegen G, Glissmeyer J. Report BNWL-SA-5138 [R]. Richland: Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1975. 1-5.
- [17] Gormley P, Kennedy M. Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube [A]. In: *Proceedings of the Royal Irish Academy. Section A: Mathematical and Physical Sciences*[C]. Dublin: Royal Irish Academy, 1948. 163-169.
- [18] Lee K, Gieseke J. Deposition of particles in turbulent pipe flows [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1994, **25**(4): 699-709.
- [19] Pui D Y, Romay-Novas F, Liu B Y. Experimental study of particle deposition in bends of circular cross section [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1987, **7**(3): 301-315.
- [20] 何启梅, 王启燕, 高鸿恩, 等. 气溶胶在采样管中的沉积特性研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(6): 119-121.
He Q M, Wang Q Y, Gao H E, *et al.* Deposition of aerosol particles in sampling pipe [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(6): 119-121.
- [21] HJ 653-2013, 环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 连续自动监测系统技术要求及检测方法[S].
- [22] Von Der Weiden S, Drewnick F, Borrmann S. Particle loss calculator—a new software tool for the assessment of the performance of aerosol inlet systems[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, **2**(2): 479-494.
- [23] 卢正永, 张志龙, 李爱武, 等. 气溶胶取样管道粒子损失的计算软件[A]. 见: 中国核学会辐射防护学会、中国环境学会核安全与辐射环境专业委员会. 全国放射性流出物和环境监测与评价研讨会论文汇编[C]. 杭州: 中国核学会辐射防护学会、中国环境学会核安全与辐射环境专业委员会, 2003. 261-270.
- [24] Ruprecht J, Hobbs P V. *Aerosol Cloud Climate Interactions* [M]. San Diego: Academic Press, 1993. 1-31.
- [25] HJ 655-2013, 环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 连续自动监测系统安装和验收技术规范[S].
- [26] Liu B, Pui D, Rubow K, *et al.* Electrostatic effects in aerosol sampling and filtration [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 1985, **29**(2): 251-269.
- [27] Liu B Y, Pui D Y. Electrical neutralization of aerosols [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1974, **5**(5): 465-472.
- [28] Romay F J, Takagaki S S, Pui D Y H, *et al.* Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent pipe flow [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, **29**(8):943-959.
- [29] Montassier N, Boulaud D, Renoux A. Experimental study of thermophoretic particle deposition in laminar tube flow [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1991, **22**(5):677-687.

联系方式

稿件第一作者

姓名：罗李娜

身份证号码：230184199203120229

通信地址及邮编：

上海市闵行区东川路 800 号

上海交通大学环境科学楼 602 室

固定电话：021-54745591

手机：15221693813

电子邮箱：luolina@sjtu.edu.cn

稿件通讯联系人

姓名：程真

通信地址及邮编：

上海市闵行区东川路 800 号

上海交通大学环境科学楼 600 室

固定电话：021-54745591

手机：13816159663

电子邮箱：chengz88@sjtu.edu.cn

附图

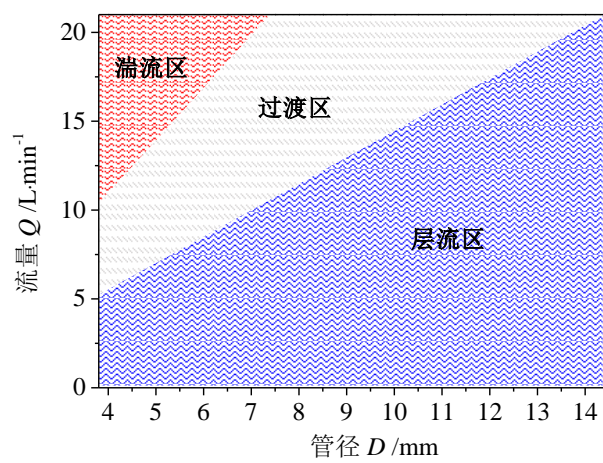


图1 流量及管径对气流流态的影响

Fig. 1 Impact of flow rate and tube inner diameter on flow regimes of airflow

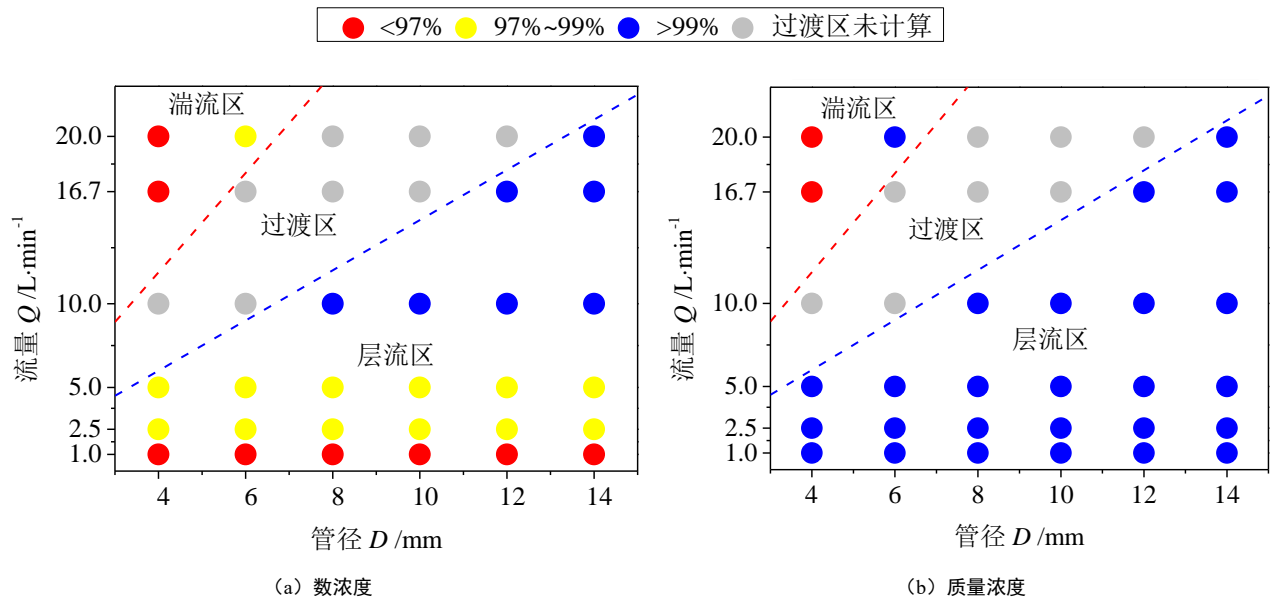


图2 流态对竖直管路 ($L = 1\text{ m}$) $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响

Fig. 2 Impact of flow type on $\text{PM}_{2.5}$ transport efficiency in vertical tube ($L = 1\text{ m}$)

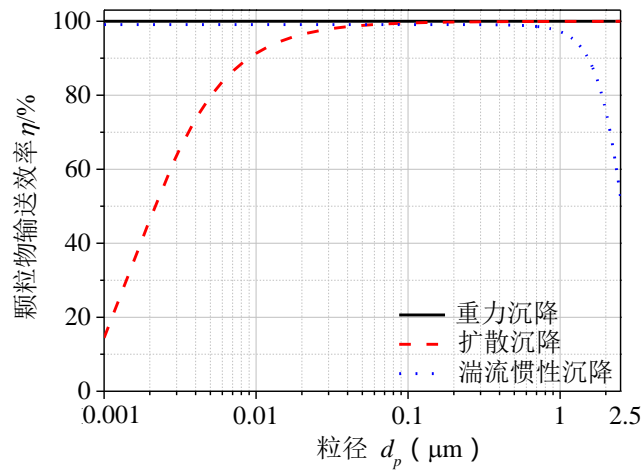
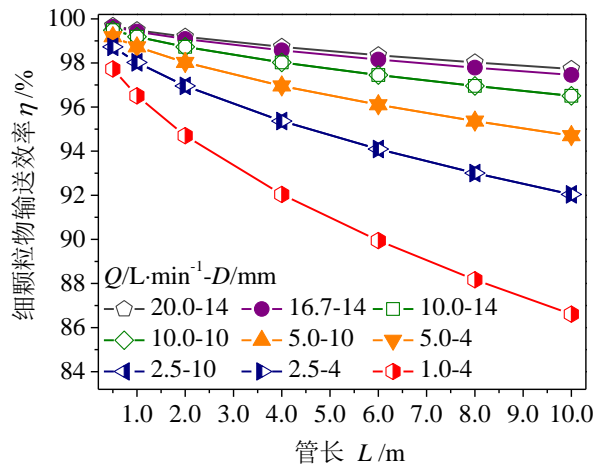
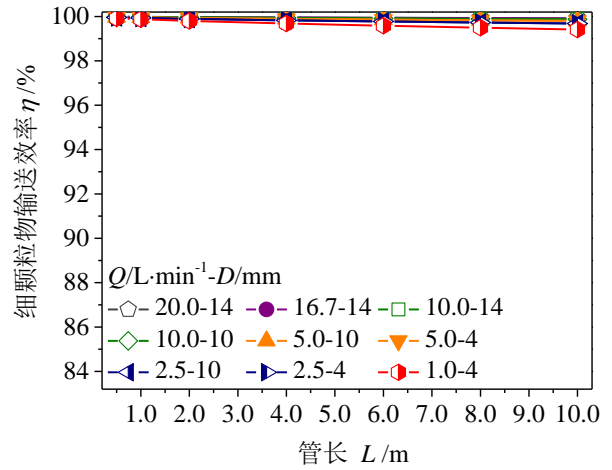


图 3 $Q = 20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L = 1.0 \text{ m}$, $D = 4 \text{ mm}$ 条件下竖直管路颗粒物输送效率

Fig. 3 Transport efficiency of particulate matter in vertical tube ($Q = 20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L = 1.0 \text{ m}$ and $D = 4 \text{ mm}$)



(a) 数浓度



(b) 质量浓度

图4 竖直管路管长对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响

Fig. 4 Impact of vertical line length on $\text{PM}_{2.5}$ transport efficiency

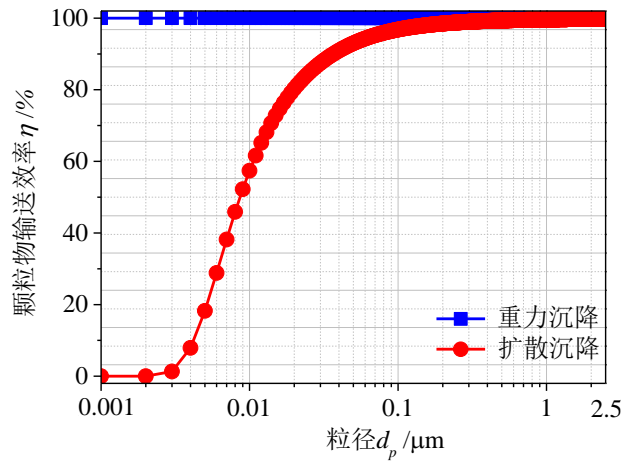
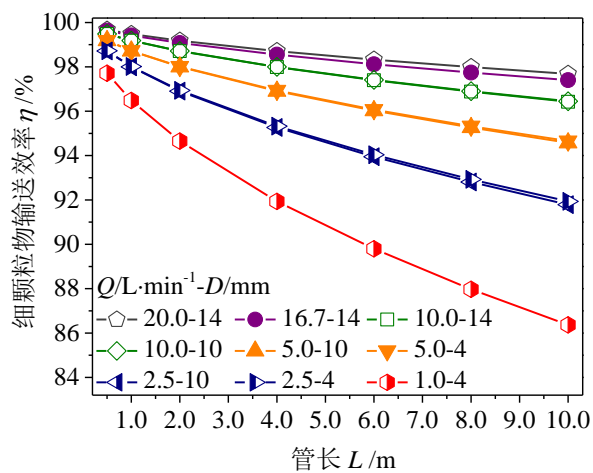
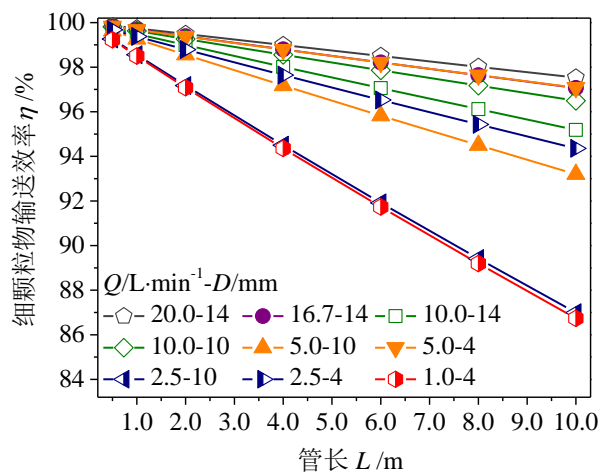


图5 $Q = 1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, $L = 10.0 \text{ m}$, $D = 4 \text{ mm}$ 条件下竖直管路颗粒物输送效率

Fig. 5 Transport efficiency of particulate matter in vertical tube ($Q = 1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, $L = 10.0 \text{ m}$ and $D = 4 \text{ mm}$)



(a) 数浓度



(b) 质量浓度

图 6 水平管路管长对 PM_{2.5} 输送效率的影响

Fig. 6 Impact of horizontal line length on PM_{2.5} transport efficiency

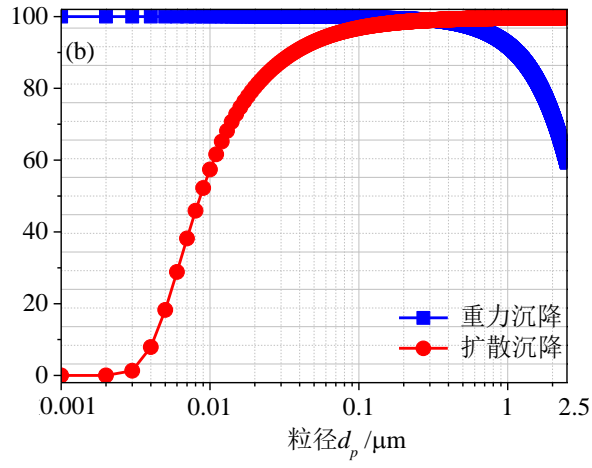
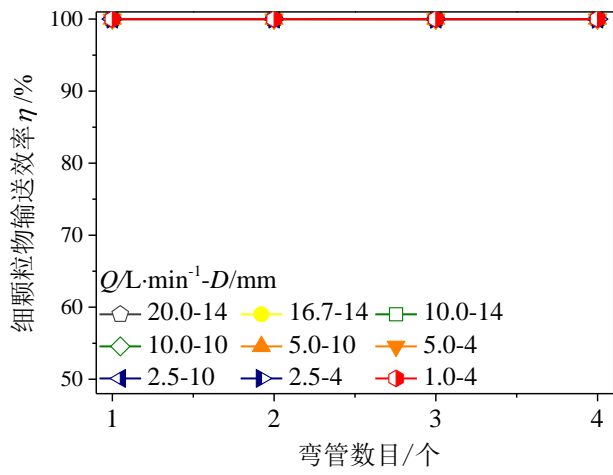
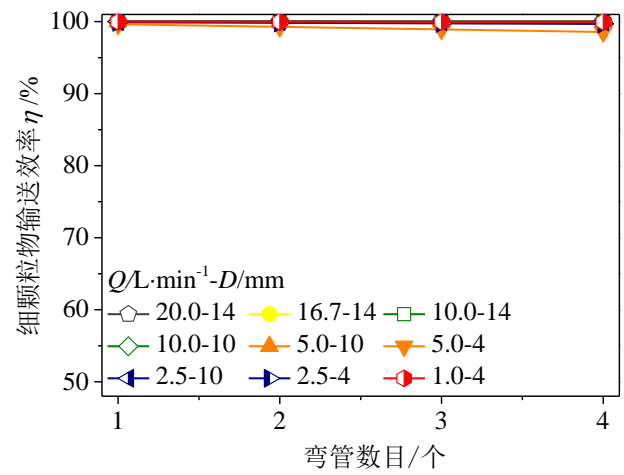


图7 $Q = 1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, $L = 10.0 \text{ m}$, $D = 4 \text{ mm}$ 条件下水平管路颗粒物输送效率

Fig. 7 Transport efficiency of particulate matter in horizontal line ($Q = 1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, $L = 10.0 \text{ m}$ and $D = 4 \text{ mm}$)



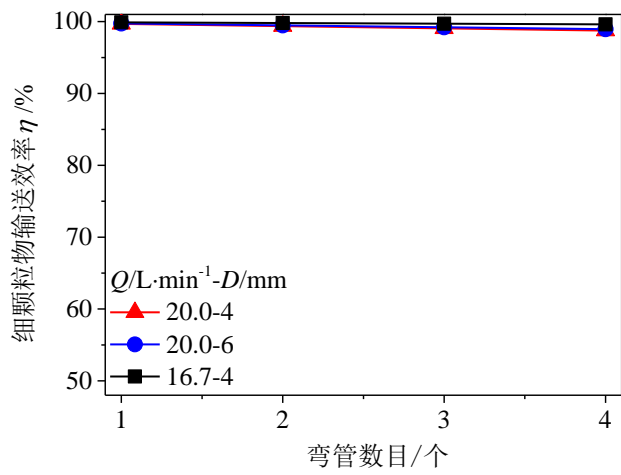
(a) 数浓度



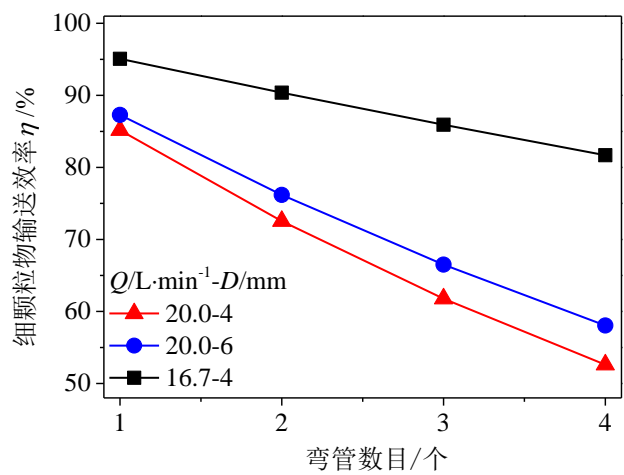
(b) 质量浓度

图 8 层流态条件下弯管对 PM_{2.5} 输送效率的影响

Fig. 8 Impact of bend in laminar flow on PM_{2.5} transport efficiency



(a) 数浓度



(b) 质量浓度

图9 湍流态条件下弯管对PM_{2.5}输送效率的影响

Fig. 9 Impact of bend in turbulent flow on PM_{2.5} transport efficiency

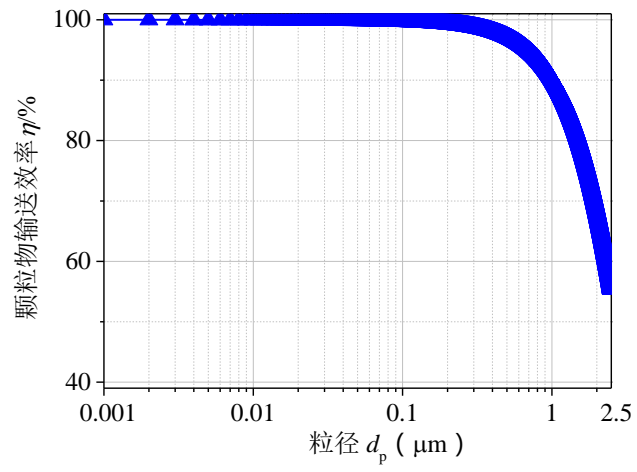


图 10 $Q = 20.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, $D = 4 \text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$ 条件下弯管颗粒物输送效率

Fig. 10 Transport efficiency of particulate matter at bend of tube ($Q = 20.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ $D = 4 \text{ mm}$ $\theta = 90^\circ$)