

街道峡谷内超细颗粒数浓度和粒径分布特征试验研究

李新令, 黄震*, 王嘉松, 屠晓栋, 叶春

(上海交通大学燃烧与环境技术中心, 上海 200030)

摘要: 测试研究了街道峡谷内 4 个不同高度处 10 ~ 487 nm 粒径范围内颗粒的数浓度及粒径分布, 根据特定条件下的测量结果, 得到不同高度处颗粒数浓度粒径分布均呈包含 2 ~ 3 个峰的对数正态分布; 一定高度范围内(1.5 ~ 20 m), 随高度增加, 核模态数浓度显著降低, 其峰值粒径向大粒子方向偏移, 积聚模态数浓度和粒径分布变化不如核模显著; 随高度继续增大, 颗粒数浓度和粒径分布无显著变化. 同时对不同测点的 $PM_{2.5}$ 和 CO 的浓度进行了测试, 得到总颗粒数、总颗粒体积、CO 和 $PM_{2.5}$ 浓度垂直方向多呈幂函数递减规律分布. 受环境风速风向影响, 测试 I (高风速, 递升型街道峡谷) 时总颗粒体积、 $PM_{2.5}$ 和 CO 浓度均低于测试 II (低风速, 风向平行于街道峡谷) 时, 测试 I 时总颗粒数、总颗粒体积、 $PM_{2.5}$ 和 CO 浓度的垂直衰减率均低于测试 II 时; 无论递升型街道峡谷或风向平行于街道峡谷, 总颗粒数浓度垂直衰减率均大于同期 CO 和 $PM_{2.5}$ 的垂直衰减率, 表明总颗粒数浓度除了受环境空气的稀释作用影响外, 同时还受到沉降或凝并等作用的影响.

关键词: 街道峡谷; 超细颗粒; 数浓度; 粒径分布; 垂直衰减率

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)04-0695-06

Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution Measurements in a Street Canyon

LI Xin-ling, HUANG Zhen, WANG Jia-song, TU Xiao-dong, YE Chun

(Center for Combustion and Environmental and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A field experiment was conducted to measure concentrations and size distributions of particle ($10 \text{ nm} < D_p < 487 \text{ nm}$) at four heights in an asymmetric street canyon on Beijing East Road in Shanghai, China. It shows that particle number size distributions are bimodal or trimodal lognormal in form. At a certain height in the range from 1.5 to 20 m, particle number concentrations and size distributions significantly vary with the height. Particle number concentrations in nuclei mode drop significantly and the mode diameters shift to the larger diameter. The variations of particle number concentration and size distribution in accumulation mode are less significant than that in nuclei mode. Particle number concentrations and size distributions slightly change with increasing the height in the range from 20 to 38 m. Concentrations of CO and $PM_{2.5}$ were also measured. Power laws are found to be well fitted for the concentration decay of total particle number, total particle volume, CO and $PM_{2.5}$. Due to the effect of the wind speed and direction, the total particle volume, $PM_{2.5}$ and CO concentrations are lower for Test I (high wind speed and step-up street canyon) than for test II (low wind speed and wind channeling along the canyon), at the meantime, the decay rates of the total particle number, the total particle volume, CO and $PM_{2.5}$ concentrations for test I are lower than for test II. No matter how the wind direction changes, the decay rates of the total particle number concentrations are larger than those of CO and $PM_{2.5}$, which clearly shows that coagulation and deposition besides dilution processes affect the total particle number concentration.

Key words: street canyon; ultrafine particle; number concentration; size distribution; vertical decay rate

监测表明, 燃烧源密集的工业区或城市道路附近, 环境空气中往往悬浮大量的超细颗粒($D_p < 100 \text{ nm}$)^[1,2]. 对于城市道路附近, 环境空气中的超细颗粒主要来自于机动车的排放. 最近研究表明^[3], 某些呼吸道疾病同环境空气中的超细颗粒数浓度显著相关. 由于受稀释、成核、凝并、凝结和挥发等作用的影响^[4], 超细颗粒的数浓度和粒径分布随离开污染源距离的增加会发生显著变化^[5,6]. 城市街道峡谷, 由于其通风差、污染物不易扩散, 峡谷内往往形成高浓度的空气污染. 近年来国内外开展了较多关于街道峡谷内气体污染物的传输和扩散规律研究^[7-9], 表明当峡谷顶端风向与街道交角超过 30°, 且风速大于

1.5 m/s 时, 峡谷内会产生 1 个或多个旋涡, 街道配置如建筑高度与街道宽的比, 屋顶形状以及谷顶风速风向对峡谷内旋涡的数量和旋涡强度产生显著的影响, 从而影响污染物的浓度^[7]. Vardoulakis 等^[10]的研究表明, 风向平行于街道时, 由于垂直方向扩散作用较弱, 污染物容易在峡谷内累积.

上述研究主要针对峡谷内的流场或气体污染物的扩散规律进行试验研究或数值模拟, 而对于街道峡谷内的颗粒尤其是超细颗粒的研究较少. Longley

收稿日期: 2006-05-27; 修订日期: 2006-08-05

作者简介: 李新令(1976 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为机动车排放超细颗粒物理化学变化机理, E-mail: lx1@sjtu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: Z-huang@sjtu.edu.cn

等^[11]对街道峡谷内距离地面 4 m 和 17 m 处颗粒的粒径分布进行了测试,得到 17 m 处颗粒的数浓度较 4 m 处下降 50%,而颗粒粒径分布无显著变化.文献中未见关于不同风速风向下峡谷内颗粒浓度和粒径分布垂直分布的研究,并且关于超细颗粒浓度的垂直衰减率与气体或 PM_{2.5} 等污染物的垂直衰减率的相关性等研究也鲜见报道.本试验对垂直于街道峡谷和平行于街道的 2 种不同风向下,峡谷内一侧 4 个不同高度处的颗粒数浓度和粒径分布进行了测试,研究了风向和高度变化对颗粒的数浓度和粒径分布特征的影响.

1 试验方法与条件

1.1 测试地点

本试验选定上海市典型道路(北京东路)为实地观测场所,测试路段呈东西走向,为一不等高街道峡谷,北侧建筑高 40 m,南侧建筑高 18 m,车道宽 12 m,共 5 个车道,两侧人行道分别为 3 m 和 6 m.

1.2 测试仪器

采用 TSI 公司的 3034 型扫描迁移颗粒粒径分析仪(SMPS)进行颗粒数浓度和粒径分布特征的研究,颗粒测量范围为 10~487 nm,共分 54 个粒径分级,每 3 min 完成整个粒径范围的 1 个扫描.测试颗粒浓度范围为 10²~10⁷ 个/cm³.采用 TSI 公司的 DustTruck 进行 PM_{2.5} 采样.CO 浓度采用北京华云分析仪器研究所的 GXH-3011 型便携式红外线 CO 分析仪分析.风速风向采用上海风云气象仪器厂生产的 FYF-1 型便携式测风仪.

1.3 测试方法

本研究分别于 2005-05-30~2005-05-31 和 2005-11-23~2005-11-25 进行了 2 次试验,分别称其为测试 I 和测试 II.每日测试从早上 09:00 开始到下午

17:00 结束.采样布点如图 1 所示,同时测试超细颗粒、CO 以及 PM_{2.5}.SMPS 在每 1 个测点进行 3 次扫描,完成 4 个测点采样为完成 1 组测试,每组测试的顺序为测点 1→2→3→4.每天采样 8~10 组.风速风向仪置于北侧楼顶上,此高度高于市区建筑的平均高度.采用温湿度计记录环境温度湿度.

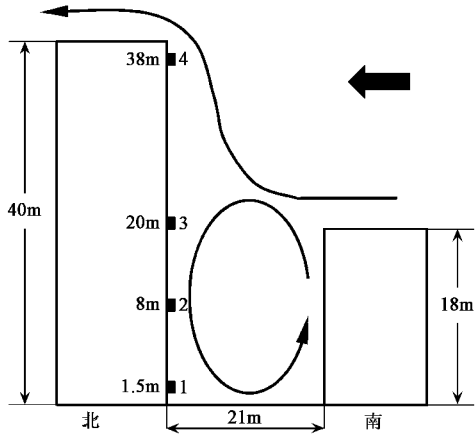


图 1 峡谷内测点位置垂直分布及测试 I 流场示意
Fig.1 Distribution of monitoring sites in vertical section and air flow field in test I within street canyon

1.4 气象和交通状况

测试道路地处商业中心地区,车流繁忙,小时车流量差别较小,基本为 1 700~1 800 辆/h 左右,测试道路禁止摩托车通行,小轿车、中型车和重型车比重分别为 70%、22% 和 8% 左右.测试 I 和测试 II 2 个试验阶段的气象条件存在较大差异,如表 1 所示,测试 I 的主导风向南风,垂直于街道,小时平均风速为 3 m/s 左右;测试 II 主导风向为西风,风向平行于街道,小时平均风速为 1.6 m/s 左右.风速风向如图 2 所示.

表 1 平均气象和交通状况

Table 1 Average meteorological and traffic conditions

项目	05-30	05-31	11-23	11-24	11-25
车流 /辆·h ⁻¹	1 780±240 ¹⁾	1 660±150	1 610±140	1 778±260	1 748±180
重型车比重/%	8±2	8±2	8±1	8±2	7±1
平均风速 /m·s ⁻¹	3.3±0.9	2.9±1.0	1.6±0.2	1.4±0.3	1.6±0.4
气温 /℃	30.1±2.4	32.8±2.7	21.1±1.2	18.1±1.8	19.4±2.1
湿度/%	38.5±6.2	41.1±4.4	38.2±3.1	30.7±5.2	35.6±5.6

1)平均值±标准差,下同

2 结果与分析

2.1 颗粒数浓度及粒径分布特征

图 3 所示为测试 I 和测试 II 颗粒平均数浓度粒径分布的垂直分布.对于环境空气中的颗粒物,按照粒径大小通常分为核模态($D_p < 0.05 \mu\text{m}$)、积聚模

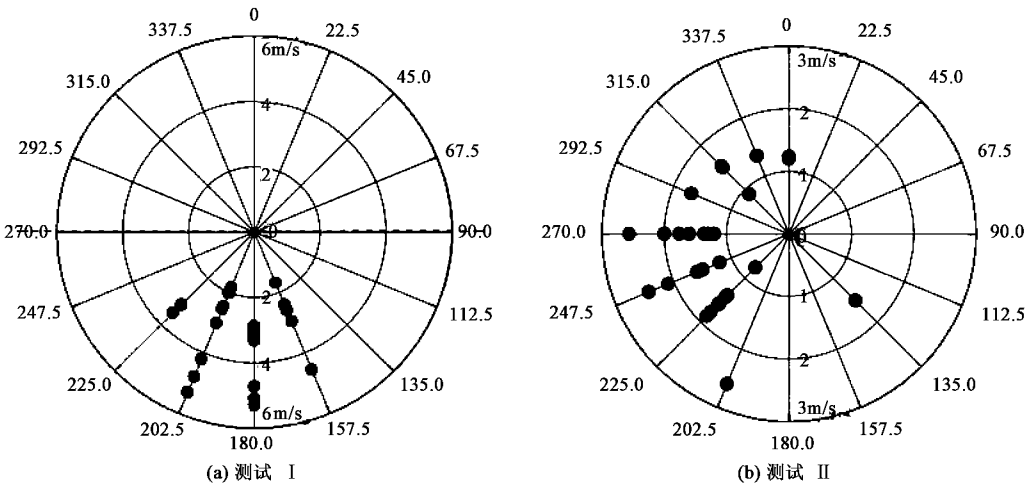


图2 测点风速风向
Fig.2 Wind speed and direction at sampling site

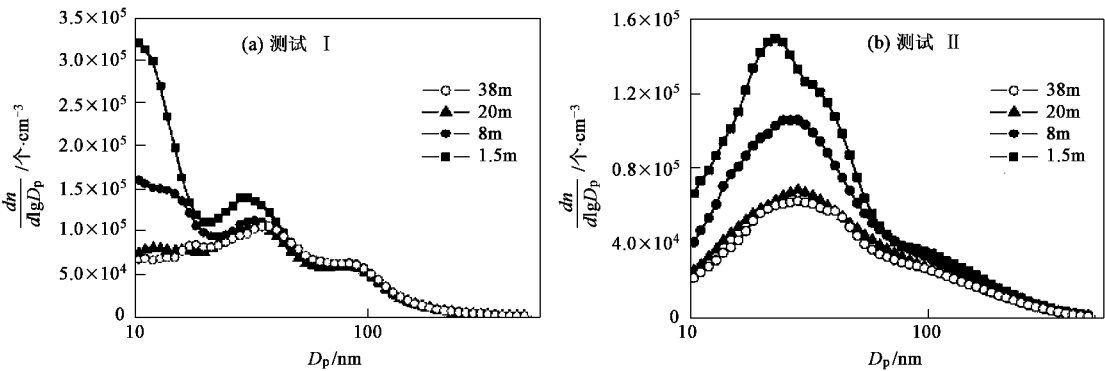


图3 垂直方向颗粒平均粒径分布
Fig.3 Vertical profile of particle mean number size distributions

态($0.05\text{ }\mu\text{m} < D_p < 1\text{ }\mu\text{m}$)和粗粒子($D_p > 1\text{ }\mu\text{m}$)3个模态,核模态主要由金属组分、元素碳和半挥发有机物以及硫酸盐等发生成核作用产生的^[12];而积聚模态主要由碳烟聚团以及吸附于聚团上的金属或矿尘所构成^[13].由图3(a)知,测试Ⅰ时,1.5 m处颗粒呈包括核模态1、核模态2和积聚模态的3峰分布,峰值粒径分别为10.4 nm、28.4 nm和89.8 nm.随高度增加,核模态粒径分布发生显著变化:1.5~8 m范围内核模态1和核模态2的数浓度峰值均显著下降,8~20 m范围内核模态1峰值继续显著下降,核模态2的峰值稍有下降,20 m处核模态1的峰结构基本消失;1.5~8 m范围内核模态1的峰值粒径均为10.4 nm,1.5~20 m范围内核模态2峰值粒径向大粒子方向偏移,由1.5 m处的28.4 nm增大为20 m处35.2 nm,20~38 m范围内核模态粒径分布特征(包括峰值和峰值粒径)无显著变化.1.5~38 m高

度范围内积聚模态的峰值和峰值粒径随高度增加无明显变化.

由图3(b)知:测试Ⅱ时,1.5 m处颗粒数浓度也呈包括模态1、核模态2和积聚模态的3峰分布,峰值粒径分别为22.9 nm、30.5 nm和77.7 nm,1.5~20 m高度范围内,核模态峰值随高度增加显著降低,峰值粒径向大粒子方向偏移,由1.5 m处的22.9 nm增大到20 m处的28.4 nm,20~38 m核模态的粒径分度没有发生显著变化.

由图3可见,1.5 m处,测试Ⅰ时核模态1的峰值为测试Ⅱ时的2倍左右,而测试Ⅰ时核模态1的峰值粒径比测试Ⅱ时小10 nm左右,测试Ⅰ和测试Ⅱ时核模态2的峰值和峰值粒径比较接近;8 m处,测试Ⅰ核模态仍为双峰分布,而测试Ⅱ时,核模态转变为单峰分布;20~38 m,2次测试核模态的分布特征均为单峰分布,测试Ⅱ时的峰值粒径比测试Ⅰ时

小5 nm左右.

图 4 分别为对测试 I 和测试 II 1.5 m 处的颗粒

数浓度粒径分布进行的对数正态分布拟合,显然两者均呈 3 峰对数正态分布.

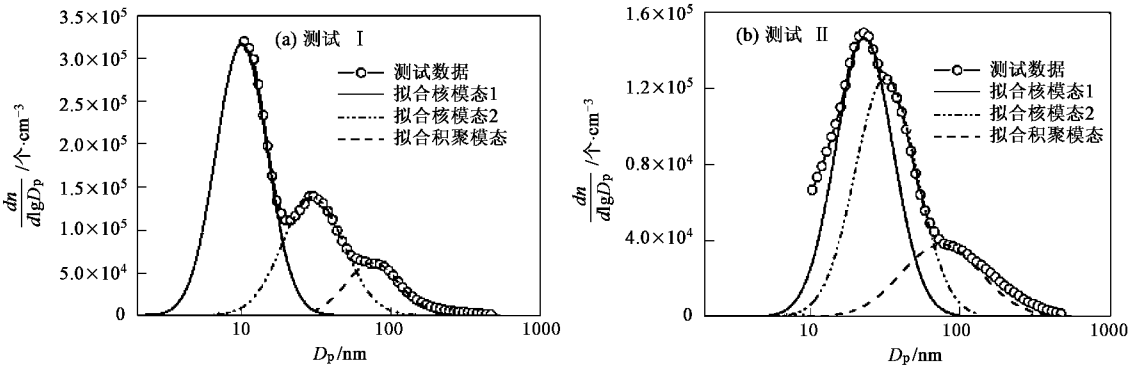


图 4 1.5 m 高度处颗粒平均数浓度粒径分布的测量值和拟合值

Fig.4 Fitted and measured particle mean number weighted size distribution at the height of 1.5 m

2.2 颗粒数浓度、体积浓度、PM_{2.5} 以及 CO 浓度垂直分布

为进一步研究超细颗粒衰减规律,本研究采用幂函数 $y = ax^b$ 拟合了 CO、PM_{2.5}、颗粒总数和总体积平均浓度随高度的衰减率,其中 y 表示污染物浓度, x 为高度, a 和 b 为系数,拟合曲线如图 5 所示,不同测点污染物浓度如表 2 所示.

拟合结果得到测试 I 时 CO、PM_{2.5}、颗粒数和颗粒体积浓度等对应幂函数的幂指数分别大于测试 II

时各污染物的幂指数,表明测试 I 时 CO、PM_{2.5}、颗粒数和颗粒体积浓度的垂直衰减率均低于测试 II 时.由图 5(a)~5(c)可见,相同的测试高度处,测试 II 时 CO、PM_{2.5}和颗粒体积浓度均高于测试 I 时,而测试 II 时颗粒数浓度则低于测试 I 时.

2 次测试均得到颗粒的数浓度的垂直衰减率均大于颗粒体积浓度、CO 或 PM_{2.5} 的垂直衰减率,如测试 I 和测试 II 时 20 m 处 CO 浓度分别为 1.5 m 处的 82% 和 63%,而同样高度处颗粒数浓度分别为 1.5 m

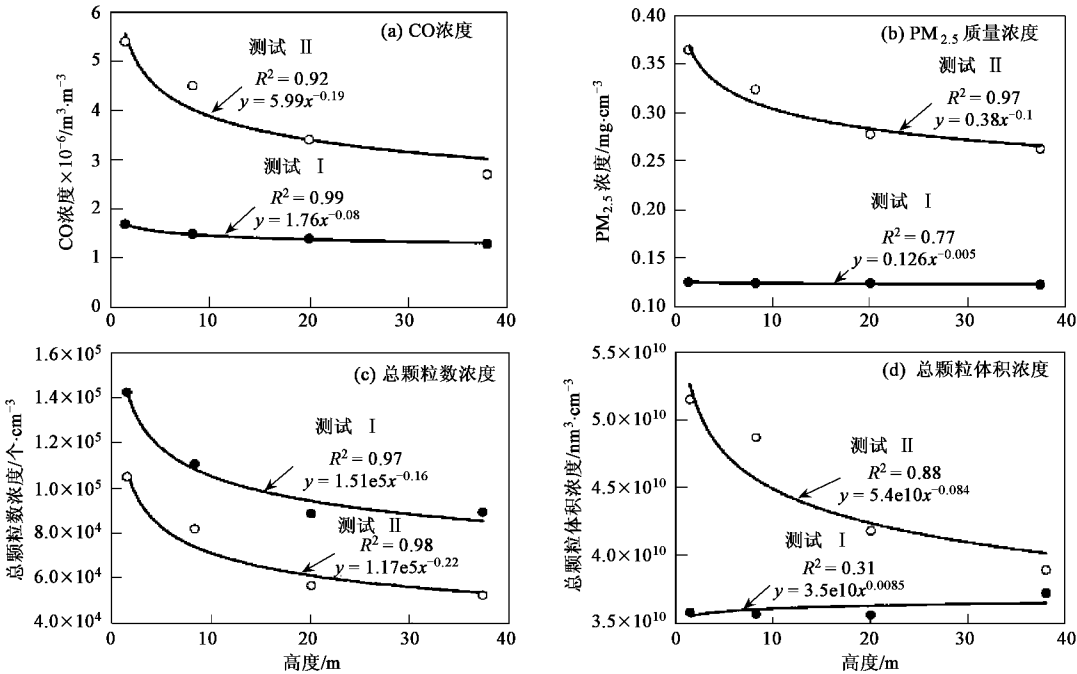


图 5 高度变化对总颗粒数、体积浓度、CO 和 PM_{2.5} 质量浓度的影响

Fig.5 Effects of the height on the total particle number, volume, CO and PM_{2.5} concentrations

表 2 不同高度处污染物平均浓度

Table 2 Measured averaged concentrations at increasing height from the ground

项目	测试 I				测试 II			
	1.5 m	8 m	20 m	38 m	1.5 m	8 m	20 m	38 m
CO × 10 ⁻⁶ /m ³ ·m ⁻³	1.7 ± 0.3	1.5 ± 0.2	1.4 ± 0.1	1.3 ± 0.1	5.4 ± 1.2	4.5 ± 0.6	3.4 ± 0.8	2.7 ± 0.5
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	125.5 ± 1.2	124.5 ± 1.4	124.5 ± 0.8	122.7 ± 0.3	364.6 ± 80.2	323.8 ± 60.4	277.7 ± 45.1	262.8 ± 30.4
颗粒数浓度 × 10 ⁵ /个·cm ⁻³	1.42 ± 0.42	1.10 ± 0.31	0.89 ± 0.45	0.89 ± 0.22	1.05 ± 0.48	0.82 ± 0.28	0.57 ± 0.19	0.52 ± 0.34
颗粒体积浓度 × 10 ¹⁰ /nm ³ ·cm ⁻³	3.58 ± 0.82	3.57 ± 1.02	3.57 ± 0.4	3.72 ± 1.24	5.15 ± 1.02	4.87 ± 1.17	4.18 ± 0.95	3.89 ± 0.77

处的 63% 和 54%。

3 讨论

测试 I 和测试 II 时,污染物浓度和垂直衰减率有显著的差异,测试 I 的风速较高,且风向由街道建筑较低一侧吹向较高一侧,构成典型的递升型街道峡谷.Xie 等^[7]对递升型街道峡谷内流场和污染物扩散特征进行了数值模拟,得到风速大于 1.5 m/s 时,峡谷内形成 1 个稳定的迎风侧气流向下的旋涡,如图 1 所示,旋涡携带污染物向下风向累积,导致背风侧污染物浓度较高,而迎风侧空气垂直运动强烈,污染物易于扩散稀释,浓度较低;同时强烈的混合稀释作用,导致迎风侧垂直方向浓度梯度较小.测试 II 风速较低,平均风速小于 1.5 m/s,且风向平行于街道,Vardoulakis 等^[10]的模拟结果表明,风平行于街道峡谷时,污染物随气流主要在水平方向传输,污染物不易从谷顶进入背景空气,污染物在峡谷内发生累积;同时风向平行于街道时,垂直方向气流运动较弱,因此垂直方向污染物混合不均匀,导致污染物在垂直方向有较大浓度梯度.由于测试 I 风速高,同时具有递升型街道峡谷的风场结构,而测试 II 风速较低,且风向平行于街道,因此测试 I 的颗粒体积浓度、CO 和 PM_{2.5} 浓度以及其垂直方向的浓度梯度均明显低于测试 II 时.测试 I 时,20 m(即测点位置高于较低一侧建筑总高度)和 38 m 处相比较,气体和颗粒的浓度以及颗粒的粒径分布无大的差别,测试 II 时也有相同的特征,显然 20 ~ 38 m 高度范围内,在一侧无建筑物阻挡的情况下,环境空气的稀释作用显著增强,由峡谷内进入谷顶的污染物被迅速稀释和扩散,导致污染物浓度垂直变化较小.

试验表明,测试 I 时颗粒数浓度明显高于测试 II 时,表现在近地面 1.5 m 处,测试 I 时得到大量 10 ~ 20 nm 之间核模态粒子,这些核模态粒子的产生可能与发动机排放的挥发性组分的成核作用有关.高的燃烧温度下,燃料中的硫与过量的氧反应生成 SO₂,少量的 SO₂ 继续被氧化为 SO₃,SO₃ 遇 H₂O 形成

H₂SO₄,H₂SO₄ 即使在极低的蒸气压下也同样会同 H₂O 迅速发生两元成核作用,产生 1 nm 左右的核模态粒子,这些核模态粒子由于凝并和凝结作用而粒径增大^[14].排气中的 SO₂ 本身不能直接参与成核作用,而受太阳辐射影响,SO₂ 容易发生光化学反应(如:SO₂ + OH→H₂SO₄),生成的 H₂SO₄ 与 H₂O 容易发成核作用^[15],测试 I 时有较强的太阳射,而测试 II 时为多云天气,太阳辐射较弱,因此,尽管车流和车型构成无较大差异时,即 SO₂ 的排放基本相当,测试 I 时强烈的光化学作用可能导致了近地面处有大量细粒子(20 nm 以下颗粒)产生.Wehner 等^[16]同样得到德国莱比锡市城区夏季比冬季核模态峰值小 5 nm 左右.

随高度增加,测试 I 时和测试 II 时颗粒粒径分布均有由近地面 1.5 m 处的 3 峰分布向 38 m 处的双峰分布转化,测试 I 时,20 m 处核模态 1 的峰结构不再明显,而测试 II 时 8 m 处,核模态 2 的峰结构不再明显,峰结构的变化可能与各模态粒子的浓度或粒径大小有关,测试 I 时和测试 II 时积聚模态的分布特征也有一定的差异,这可能与测试时期环境背景空气中的颗粒有关.

无论递升型街道峡谷或风向平行于街道,颗粒数浓度垂直衰减率均大于颗粒体积、CO 和 PM_{2.5} 的垂直衰减率.Gidhagen 等^[17]模拟了街道峡谷内 7 ~ 450 nm 颗粒的数浓度变化,得到凝并和沉降作用对 30 nm 以下颗粒具有显著的去 除作用,显然本试验中随高度增加,颗粒经历了凝并和沉降等变化;试验中得到核模态峰值粒径均随高度增加而向大粒子方向偏移,显然颗粒在传输过程中发生了凝并或凝结作用.

4 结论

(1) 街道峡谷内不同高度处颗粒数浓度粒径均呈包含 2 ~ 3 个峰的对数正态分布,随高度增加,测试 I 和测试 II 时颗粒粒径分布均有由近地面 1.5 m 处的 3 峰分布向 38 m 处的双峰分布转化.一定高度

范围内(1.5~20 m),随高度增加,核模态数浓度显著降低,其峰值粒径向大粒子方向偏移,而积聚模态数浓度和粒径分布变化不如核模显著;随高度继续增大,颗粒数浓度和粒径分布无显著变化。

(2) 测试 I 时,CO 和颗粒数浓度垂直方向均呈均显著的幂函数衰减规律率分布,而总颗粒体积浓度以及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度垂直衰减率较小,幂函数分布特征不如 CO 和颗粒数浓度显著;测试 II 时总颗粒数、总颗粒体积、CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的垂直方向均呈均显著的幂函数衰减规律率分布。

(3) 环境风速风向显著影响街道峡谷内污染物的浓度分布特征,测试 I 时(高风速,递升型街道峡谷)总颗粒体积、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 浓度均低于测试 II (低风速,风向平行于街道峡谷)时,且测试 I 时总颗粒数、体积、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 浓度的垂直衰减率均低于测试 II 时,而总颗粒数浓度与其它污染物有所差异,测试 I 时颗粒数浓度明显高于测试 II 时,表现在近地面 1.5 m 处,测试 I 时得到大量 10~20 nm 之间核模态粒子。

(4) 无论递升型街道峡谷或风向平行于街道峡谷,总颗粒数浓度垂直衰减率均大于同期 CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的垂直衰减率,显然总颗粒数浓度除了受空气的稀释作用外,同时还受到沉降、凝并或凝结等作用的影响。

参考文献:

[1] Keywood M D, Ayers G P, Gras J L, *et al.* Relationships between size segregated mass concentration data and ultrafine particle number concentrations in urban areas[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 2907 ~ 2913.

[2] Wählin P, Palmgren F, Van Dingenen R. Experimental studies of ultrafine particles in streets and the relationship to traffic[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: S63 ~ S69.

[3] Peters A, Wichmann H E. Epidemiological evidence on the health effects of ultrafine particles[J]. *Epidemiology*, 2001, **12**: 544.

[4] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*[M]. John Wiley, 1998.

[5] Zhu Y, Hinds W C, Kim S, *et al.* Study on ultrafine particles near a major highway with heavy-duty traffic [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 4323 ~ 4335.

[6] Hitchins J, Morawska L, Wolff R, *et al.* Concentrations of submicrometre particles from vehicle emissions near a major road [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 51 ~ 59.

[7] Xie X, Huang Z, Wang J. Impact of building configuration on air quality in street canyon[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 4519 ~ 4530.

[8] Xie S, Zhang Y, Qi L, *et al.* Spatial distribution of traffic-related pollutant concentrations in street canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**: 3213 ~ 3224.

[9] Lee I Y, Park H M. Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**: 2343 ~ 2349.

[10] Vardoulakis S, Fisher B E A, Gonzalez-Flesca N, *et al.* Model sensitivity and uncertainty analysis using roadside air quality measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 2121 ~ 2134.

[11] Longley I D, Gallagher M W, Dorsey J R, *et al.* Street canyon aerosol pollutant transport measurements[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, (334-335): 327 ~ 336.

[12] Schneider J, Hock N, Weimer S, *et al.* Nucleation particles in diesel exhaust: composition inferred from in situ mass spectrometric analysis[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**: 6153 ~ 6161.

[13] Kwon S, Lee K W, Saito K, *et al.* Size dependent volatility of Diesel Nanoparticles: Chassis Dynamometer Experiments [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**: 1794 ~ 1802.

[14] Baumgard K J, Johnson J H. The Effect of Fuel and Engine Design on Diesel Exhaust Particle Size Distributions [J]. *Society of Automobile Engineers*, 1996. **960131**: 37 ~ 50.

[15] Weingartner E, Nyeki S, Streit N, *et al.* Seasonal variation of size distributions and fine particle formation of continental aerosol at high alpine site[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, **29**: S509 ~ S510.

[16] Wehner B, Wiedensohler A. Continuous measurements of number size distributions in an urban area: statistical analysis[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, **29**: S597 ~ S598.

[17] Gidhagen L, Johansson C, Langner J, *et al.* Simulation of NO_x and ultrafine particle in street canyon in Stockholm, Sweden [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 2029 ~ 2044.