

柴油/CNG 公交车排放颗粒物粒径分布特征隧道实测研究

朱春^{1,2}, 张旭^{1*}

(1. 同济大学机械工程学院, 上海 200092; 2. Queensland University of Technology, Brisbane 4001, Australia)

摘要:对澳洲某公路隧道中段和名义入口段进行连续4 d的超细颗粒物实测,通过数据分析发现隧道内柴油公交车和CNG公交车混合排放的颗粒物日平均粒径呈双峰模态分布.采用多元回归法分别计算柴油公交车和CNG公交车颗粒物数浓度粒径谱排放因子,发现柴油车/CNG颗粒物排放分别呈积聚态单峰分布和核模态单峰分布.对隧道内机动车颗粒物排放每30 min平均粒径分布进行核模态和积聚模态的对数正态分布曲线拟合分解,90组粒径分布叠加拟合曲线与实测结果的拟合度为0.972~0.998.采用髭须图对柴油车和CNG车颗粒物排放特征做统计分析发现,柴油公交车颗粒物排放呈积聚模态下的对数正态分布,其峰值粒径74.5~86.5 nm,该对数正态分布的几何标准差1.88~2.05. CNG公交车呈核模态的对数正态分布,峰值粒径19.9~22.9 nm,几何标准差为1.27~1.3.

关键词:柴油/CNG公交车;颗粒物粒径分布;峰值粒径;几何标准差;核模态;积聚模态

中图分类号:X513 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)10-2279-06

Quantitative Study of Diesel/CNG Buses Exhaust Particulate Size Distribution in a Road Tunnel

ZHU Chun^{1,2}, ZHANG Xu¹

(1. Mechanical Engineering College, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Queensland University of Technology, Brisbane 4001, Australia)

Abstract: Vehicle emission is one of main sources of fine/ultra-fine particles in many cities. This study firstly presents daily mean particle size distributions of mixed diesel/CNG buses traffic flow by 4 days consecutive real world measurement in an Australia road tunnel. Emission factors (EFs) of particle size distribution of diesel buses and CNG buses are obtained by MLR methods, particle distributions of diesel buses and CNG buses are observed as single accumulation mode and nuclei-mode separately. Particle size distributions of mixed traffic flow are decomposed by two log-normal fitting curves for each 30 min interval mean scans, the degrees of fitting between combined fitting curves and corresponding *in-situ* scans for totally 90 fitting scans are from 0.972 to 0.998. Finally particle size distributions of diesel buses and CNG buses are quantified by statistical whisker-box charts. For log-normal particle size distribution of diesel buses, accumulation mode diameters are 74.5-86.5 nm, geometric standard deviations are 1.88-2.05. As to log-normal particle size distribution of CNG buses, nuclei-mode diameters are 19.9-22.9 nm, geometric standard deviations are 1.27-1.3.

Key words: diesel/CNG bus; particle size distribution; peak diameter; geometric standard deviation; nuclei-mode; accumulation mode

机动车颗粒物排放水平和颗粒物分布特征是大气污染领域的重要研究内容.柴油/CNG等重型机动车是城市大气细微/超细颗粒物的主要排放源之一,这些机动车排放细微颗粒($D_p < 2.5 \mu\text{m}$)和超细颗粒物($D_p < 0.1 \mu\text{m}$)不仅被发现对人体健康危害远大于粗颗粒($2.5 \mu\text{m} < D_p < 10 \mu\text{m}$)^[1,2],而且由于大量汽车尾气排放颗粒物对光的散射和吸收作用,直接影响大气光辐射平衡,严重破坏了城市大气能见度,此外这些气溶胶颗粒物还以云凝结核的形式改变云层光学特性和云的分布,从而影响区域甚至全球气候变化^[3,4].颗粒物粒径分布是描述机动车颗粒物排放的物理特性重要表征参数.研究表明,机动车排放颗粒物主要分布在核模态($D_p < 50$

nm)和积聚态($50 \text{ nm} < D_p < 1000 \text{ nm}$),2个模态下的超细颗粒物质量占总质量比分很小,但粒子数浓度比分 $> 90\%$ ^[5],因此颗粒物数浓度比质量浓度分布研究更为显著.随着对细微/超细颗粒物测量技术的进步,国外学者于90年代末开始对机动车颗粒物数浓度粒径分布特征进行实验室研究,发现轻型柴油发动机颗粒物排放呈稳定的单峰准对数正态分布^[6,7],粒径分布模式与发动机类型、运行条件和燃油类型无关,即存在自模现象. Ristovski等^[8]通

收稿日期:2009-12-05;修订日期:2010-01-18

基金项目:2008年国家留学基金委项目(2008103042)

作者简介:朱春(1977~),男,博士研究生,主要研究机动车颗粒物排放与公路隧道通风,E-mail: zhuchun@163.com

* 通讯联系人,E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn

过台架试验发现不同含硫量柴油车呈现单峰或双峰模态分布, Jayaratne 等^[9]研究了 CNG 车发现颗粒物排放在核模态单峰分布. 我国学者近年来也开始对柴油发动机、二甲醚发动机, 以及生物柴油机排放颗粒物特性进行了实验室研究工作^[10-12]. 本研究通过某隧道的道路实测, 利用 SMPS (扫描式电迁移颗粒粒度仪) 测试分析柴油/CNG 车排放颗粒物 15 ~ 700 nm 粒径范围的粒径分布, 采用对数正态分布曲线拟合分析了机动车颗粒物分布特征, 以期建立机动车颗粒物数浓度粒径分布排放清单提供基础数据, 进而深入分析各类机动车颗粒物对人体的健康效应以及对大气能见度的影响.

1 实验方法

2005 年 6 月昆士兰科技大学 ILAQH 课题组对澳大利亚布里斯班市某隧道进行了连续 4 d 的颗粒物排放采样监测. 该隧道全长 511 m, 断面面积约 60 m². 作为公交快速专线的一部分, 隧道内只通行柴油公交车和 CNG 公交车, 采用双向单车道行车方式, 限制车速 50 km/h. 根据该市 2005 年车辆排放限值要求, 柴油公交车均采用超低硫 (含硫量 50×10^{-6}) 柴油燃料, 并至少满足欧 II 排放标准. 隧道全段内安装三组轴流风机, 在不稳定的自然通风情况下, 轴流风机自然开启, 以保证隧道内气流从名义入口侧流向出口侧.

隧道入口段和隧道中段分别安装 SMPS (扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪), 同时监测入口和隧道中部的颗粒物数浓度粒径谱分布. SMPS 型号 3934, 3071 TSI 静电分级器和 3010 CPC (凝聚颗粒计数器) 两部分, 进气流量 0.5 L/min, 鞘流流量 5 L/min, 测试颗粒物粒径范围 15 ~ 700 nm, 共 106 个粒径测试通道, 一次扫描反应时间 2.5 min, 测试粒子数积分浓度上限为 10^7 个/cm³.

隧道内部距入口约 10 m 处, 安装 DURAG D-FL 200T 气流风速仪以及温、湿度监测设备. 距离隧道出口约 20 m 处的公交车站有交通车辆监测系统, 根据录像扫描可以统计车流量和车辆类型数据.

2 结果与讨论

2.1 颗粒物日平均粒径分布

图 1 分别给出了 6 月 17 日 (周五) ~ 6 月 20 日 (周一) 日均颗粒物分布图. 根据车流录像监测, 隧道内夜间通车量很小, 因此取每日 06:00 ~ 22:00 时间段作为日均值计算数据. 测试 4 d 期间, 隧道内

日平均风速分别为 (1.64 ± 0.67) 、 (2.23 ± 0.29) 、 (1.55 ± 0.59) 和 (3.72 ± 0.32) m/s. 隧道入口颗粒物均为单峰分布, 全范围粒径段 (15 ~ 700 nm) 积分浓度分别为 8 245、5 615、7 777 和 7 118 个/cm³, 日均标准差 1 146 个/cm³. 日均分布中位径 (CMD) 分别 76.5、66.8、88.6、60.6 nm, 日均峰值粒径分别为 61.5、61.5、94.7 和 46.1 nm. 日均颗粒物中位径与峰值粒径之间有明显差异, 可见入口粒径分布不是对数正态分布, 可以判断隧道入口颗粒物受洞口外环境大气和附近交通车站尾气排放等综合因素影响. 隧道中间段日均颗粒物积分浓度分别 28 248、12 591、16 120 和 17 085 个/cm³, 隧道内日均浓度不仅随各日交通车流量变化, 而且受气流通风水平影响. 图 1(a)、1(c) 为周五和周日的低速通风条件下, 隧道中间段的粒度分布呈较明显的双峰分布, 粒径峰值分别在核模态 19 ~ 25 nm 和积聚模态 70 ~ 105 nm 之间. 周六和周一 [图 1(b)、1(d)], 在稳定、较大风速条件下隧道中段颗粒物浓度集中在 20 ~ 110 nm, 2 条 PSD 曲线左侧核模态区 (约 20 nm) 和曲线右侧的积聚模态区 (约 110 nm) 亦存在显著的斜率变化, 认为两曲线也呈双峰分布.

根据对交通监测系统的数据整理, 公交车通过隧道的日交通量非常稳定, 工作日的车流量 $(2\,084 \pm 34)$ 辆/日, 周六、周日的交通量为工作日的 50% 和 65%. 由于通过隧道的交通量较小, 测试 4 d 隧道入口的日均颗粒物积分浓度占隧道中间段浓度的比份较大, 分别为 29%、44%、48% 和 41%, 可见不能用隧道中间段颗粒物浓度直接代表机动车排放数据. 将隧道中段粒径分布与隧道入口数据对应求差, 结果可见该差值分布呈显著的双峰分布, 日均峰值粒径分别在核模态: 24.1、20.9、20.9 和 21.7 nm; 和积聚态 66.1、66.1、79.1 和 91.4 nm. 隧道内只通行柴油公交车和 CNG 公交车, 柴油车比例 54% ~ 57%, 可见各颗粒物日均差值分布是柴油和 CNG 车混合作用结果.

2.2 颗粒物粒径分布排放因子

研究表明, 机动车尾气管的高温气溶胶排放后迅速与周围空气混合稀释, 通过碰撞、凝并、均向成核等动力学过程而形成超细/细微颗粒物, 所有粒径范围颗粒物在空气中短时间内 (3 ~ 15 min) 保持稳定的数量, 即颗粒物粒径分布谱可认为保持常态^[5].

本计算中选定周日 06:00 ~ 22:00 时间段测试数据, 隧道内纵向风速大且稳定 (3.72 ± 0.32) m/s,

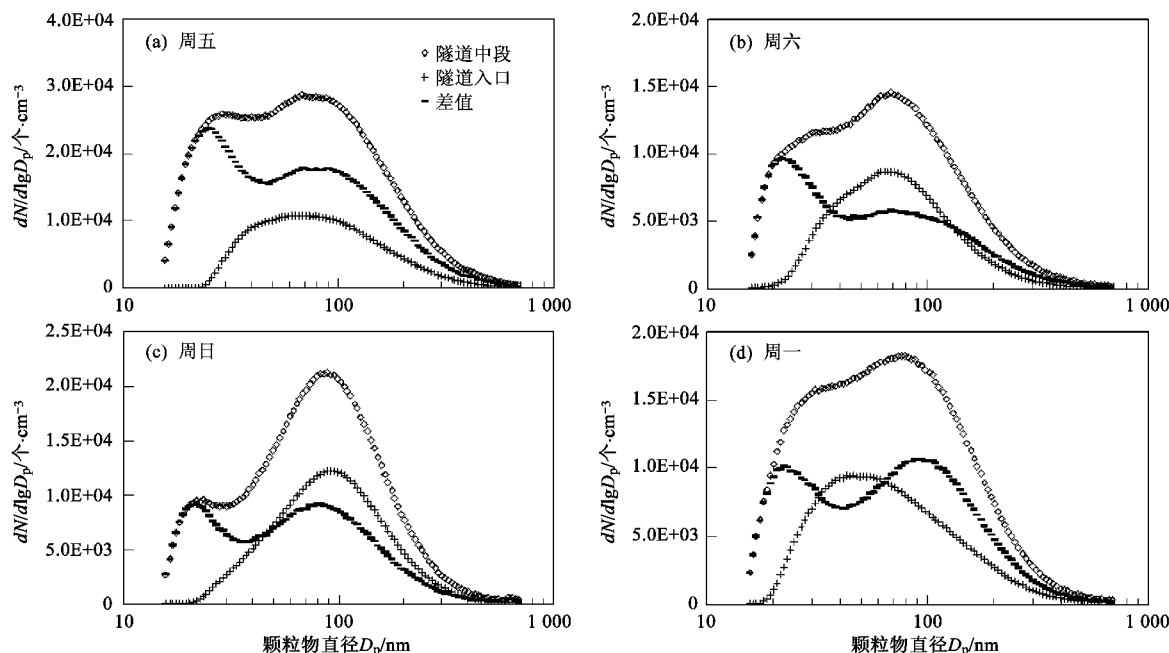


图1 隧道颗粒物粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution

颗粒物在隧道内驻留时间 < 3 min, 颗粒物在该隧道中保持数量守恒, 因此可利用隧道中间段和入口的污染物浓度差, 采用定容法计算机动车颗粒物各粒径段混合排放因子 $EF_{C,i}$, 计算公式为:

$$EF_{C,i}(t) = \frac{[c_{2,i}(t) - c_{1,i}(t)]AV(t)}{N(t)L} \quad (1)$$

式中, $EF_{C,i}(t)$ 为混合机动车颗粒物排放因子; $c_{1,i}(t)$ 为隧道入口断面颗粒物第 i 粒径段的粒数浓度; $c_{2,i}(t)$ 为隧道中段断面颗粒物第 i 粒径段粒数浓度; $N(t)$ 隧道测试时间段的机动车流量; $V(t)$ 为隧道内气流流速; L 为入口断面和中段断面的间距, 255 m; A 为隧道断面面积, 60 m², t 为时间间隔, 计算中取 10 min.

通过整理交通监测系统数据, 分别确定柴油和 CNG 公交车的交通量. 利用最小二乘法, 应用多元回归分析可以计算柴油车和 CNG 车颗粒物各粒径分布下的平均排放因子, 如公式(2):

$$EF_{C,i} = \frac{n_D}{n_D + n_{CNG}} EF_{D,i} + \frac{n_{CNG}}{n_D + n_{CNG}} EF_{CNG,i} \quad (2)$$

式中, $EF_{C,i}$ 为混合机动车流颗粒物第 i 粒径段排放因子, 个/km; $EF_{D,i}$ 柴油车颗粒物第 i 粒径段排放因子, 个/km; $EF_{CNG,i}$ 为 CNG 车颗粒物第 i 粒径段排放因子, 个/km; n_D 为柴油车交通量, 辆/min; n_{CNG} 为 CNG 车交通量, 辆/min.

图2分别计算出柴油车、CNG车颗粒物粒径分布谱排放因子. 柴油车颗粒物排放呈积聚态单峰分布, 峰值粒径约 100 nm, 积分浓度排放因子 $(3.96E + 14)$ 个/km [标准差 $(5.11E + 13)$ 个/km]. CNG 车颗粒物排放因子回归计算误差较大, 但在核模态存在明显峰值, 峰值粒径 22.5 nm. CNG 积分浓度排放因子 $(9.33E + 13)$ 个/km [标准差 $(6.32E + 13)$ 个/km], 粒径 > 40 nm 条件下, 排放因子结果误差较大, 一些粒径段排放因子回归结果出现负值. 根据已有文献对 CNG 车试验结果^[9], 积聚态颗粒物数排放浓度相对核模态可以忽略不计, 因此认为 CNG 车颗粒物不存在积聚模态“峰”, 从而判定 CNG 车颗粒物排放呈核模态单峰分布.

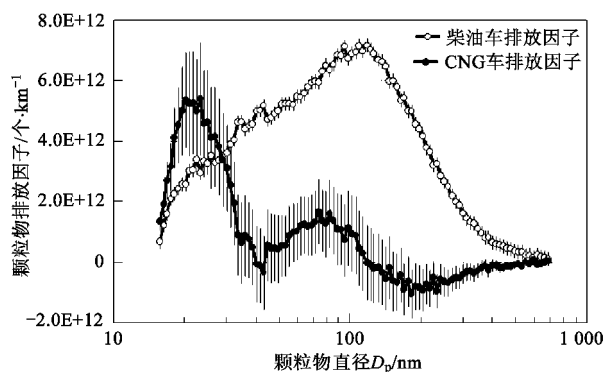


图2 柴油车/CNG车颗粒物粒径分布谱排放因子

Fig. 2 Particle number distribution EFs of diesel/CNG bus

2.3 柴油车/CNG 车颗粒物粒径分布解析拟合

根据对柴油车/CNG 车颗粒物排放因子分布的多元回归计算结果,判定柴油车和 CNG 排放颗粒物分别呈积聚态和核模态下的单峰分布. 已有大量研究表明,绝大多数颗粒物排放源粒径分布可以用对数正态分布函数拟合^[13]. 因此隧道内混合机动车颗粒物粒径分布,即隧道中段与隧道入口颗粒物数浓度差值分布可解析为柴油车和 CNG 车 2 个单模态对数正态分布的叠加结果.

多模态下对数正态分布叠加函数如公式(3):

$$F(D_p, \bar{D}_{p,i}, N_i, \sigma_i) = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{\sqrt{2\pi} \lg(\sigma_i)} \times \exp\left[-\frac{[\lg(D_p) - \lg(\bar{D}_{p,i})]^2}{2 \lg^2(\sigma_i)}\right] \quad (3)$$

式中, D_p 为排放源迁移粒径; $\bar{D}_{p,i}$ 为单模态峰值粒径; σ_i 为不同模态下对数正态分布几何标准差; N_i 为对应模态下峰值粒径的数浓度分布密度; n 为单模态粒径分布个数,本研究中为 2.

对隧道内机动车颗粒物粒径分布解析拟合,需要考虑计算时间段间隔. SMPS 单次扫描采样时间 2.5 min,当车辆瞬时通过采样点时可能使局部粒径

段的记录浓度过高,因而认为单次扫描记录认为不能准确描述机动车排放特征. 隧道内车流量有显著的时变特征以及气流风速的不稳定性,采用机动车颗粒物日均分布结果可能掩盖车辆不同状态下的排放特性变化. 本研究按每 30 min(每 12 次 SMPS 扫描)对隧道中段和入口颗粒物浓度差进行对数正态分布拟合,从而研究柴油车和 CNG 机动车颗粒物粒径分布特征. 对隧道中段和隧道入口气流时间延迟,根据计算时段的气流平均流速计算时间差来修正.

研究中对周五和周一工作日 06:00 ~ 22:00 全时段,以及周六、周日任选时段共 90 个 30 min 平均机动车颗粒物粒径分布进行了曲线拟合分析,分别用核模态对数正态分布和积聚态对数正态分布叠加曲线与机动车实测颗粒物 30 min 平均结果比较,所有叠加曲线拟合结果与测试结果均具有良好的拟合度 (R^2 范围 0.972 ~ 0.998),如图 3 给出 4 个测试日任选时段的机动车颗粒物分布拟合曲线、拟合求和叠加曲线和实测值关系,表 1 分别给出分解的单模态对数正态分布拟合曲线的峰值粒径 D_i (nm)、几何标准差 σ_i 和峰值颗粒物分布密度 N_i .

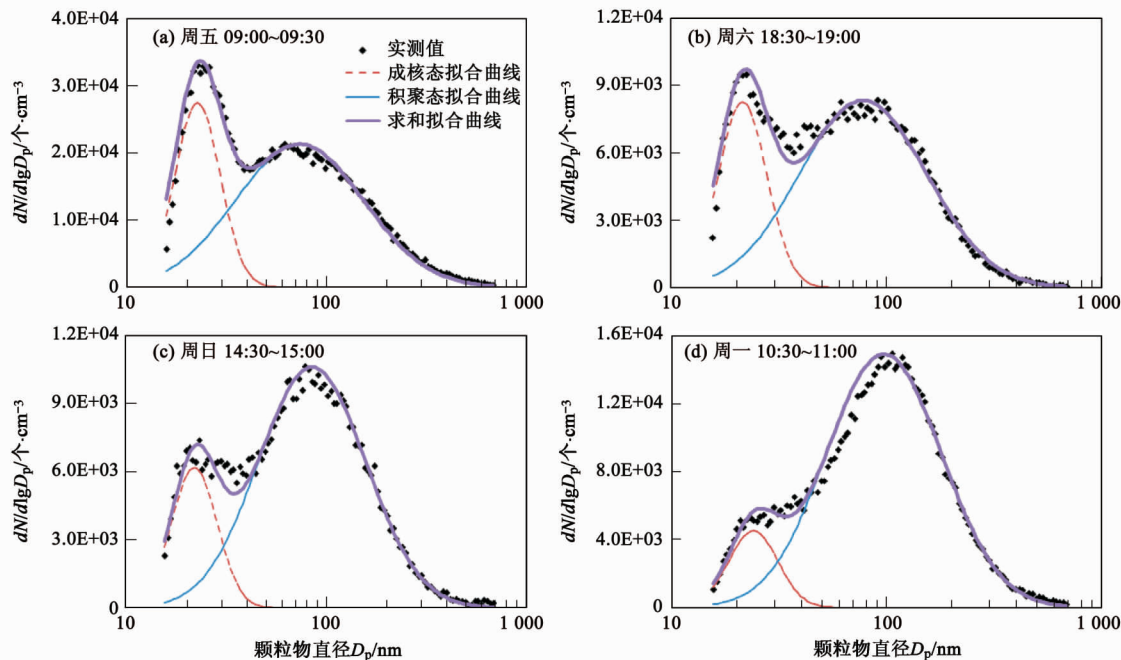


图 3 典型的机动车颗粒物分布拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of some typical vehicle size distributions

表 1 中,各时段下成核模态和积聚模态的峰值颗粒物分布密度 N_i 显著不同,主要受隧道内柴油车/CNG 车流量和通风水平影响. 然而,2 个模态分布下

的峰值粒径和几何标准差均显示相当一致的结果.

图 4 和图 5 采用髭须图对 4 个测试日的 90 组颗粒物粒径分布拟合结果进行统计研究. 结果显

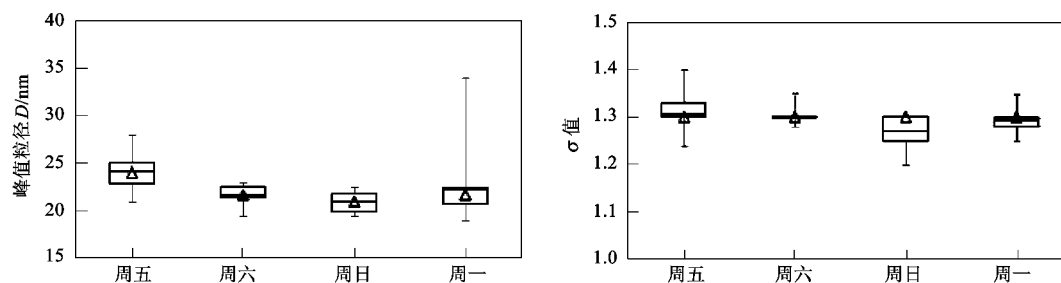
表 1 4 个典型机动车颗粒物单模态对数正态分布拟合结果

Table 1 Fitting curve results of four typical single log-normal distributions

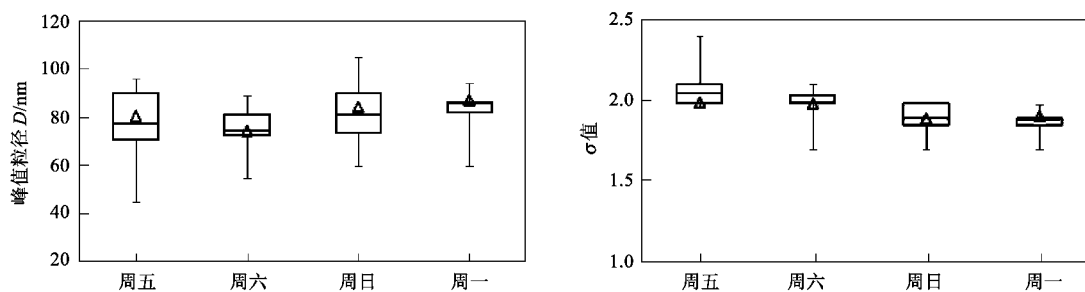
日期	计算时段	核模态			积聚态			拟合度
		D_1	σ_1	N_1	D_2	σ_2	N_2	
周五	09:00 ~ 09:30	22.5	1.3	$2.75\text{E}+04$	73	2.1	$2.13\text{E}+04$	0.9896
周六	18:30 ~ 19:00	21.5	1.3	$8.24\text{E}+03$	78	1.98	$8.32\text{E}+03$	0.9861
周日	14:30 ~ 15:00	23	1.3	$6.17\text{E}+03$	80	1.9	$1.06\text{E}+04$	0.9913
周一	10:30 ~ 11:00	24	1.3	$4.54\text{E}+03$	97	1.85	$1.49\text{E}+04$	0.9924

示,4 个测试日的成核模态对数正态分布的峰值粒径均值分别为 22.9、21.4、19.9 和 20.8 nm;中位数粒径分别为 24、21.7、21 和 21.7 nm. 测试日成核模态拟合对数正态分布几何标准差均值分别为 1.31、1.3、1.27 和 1.3;几何标准差中位数均为 1.3;25% ~ 75% 排序值峰值粒径在 19 ~ 25.1 nm,几何标准差在 1.2 ~ 1.33 范围. 积聚模态对数正态

分布的峰值粒径均值分别为 77.3、74.6、81 和 86.5 nm;中位数粒径为 80.5、74.5、84.5 和 87.5 nm. 测试日成核模态拟合对数正态分布几何标准差均值分别为 2.05、1.99、1.89 和 1.88;几何标准差中位数分别为 1.99、1.98、1.89 和 1.9,积聚态 25% ~ 75% 排序值峰值粒径在 55 ~ 86 nm,几何标准差在 1.89 ~ 2.1 范围.



图中,每个统计图块的横线由上倒下依次表示各日统计参数结果的最大值,75% 排序值,平均值,25% 排序值,最小值,三角符号表示统计中位数值,下同

图 4 成核模态对数正态拟合曲线峰值粒径与几何标准差 σ Fig. 4 Log-normal fitting distribution curves of nuclei-mode diameters and σ 图 5 积聚模态对数正态拟合曲线峰值粒径与几何标准差 σ Fig. 5 Log-normal fitting distribution curves of accumulation mode diameters and σ

根据以上统计结果,核模态和积聚模态对数正态分布曲线的峰值粒径和几何标准差 25% ~ 75% 数据的拟合结果均较为集中,统计均值和中位数结果接近,可见隧道内两类公交车颗粒物的数浓度排放分布具有稳定的峰值和分布形状. 根据前文分析,核模态对数正态分布对应 CNG 车颗粒物排放,

积聚模态对数正态分布对应柴油车颗粒物排放.

本研究通过拟合隧道实测数据结果,得出柴油/CNG 公交车在正常工况下(车速 50km/h)的颗粒物排放分布特征. 比较已有研究文献,Imhof 等^[14]通过测试 2 条欧洲隧道,发现轻型/重型机动车混合条件下隧道内颗粒物呈双模态分布,Plabutsch 隧道内颗

颗粒物在积聚模态下峰值粒径 80 ~ 100 nm,几何标准差 1.85 ± 0.02 ; Kingsway 隧道的积聚模态下颗粒物峰值粒径约 45 nm,几何标准差 2.22 ± 0.05 . Harris 等^[6,7]利用台架试验,研究轻型柴油发动机颗粒物排放平均粒径为 60 ~ 120 nm,几何标准差约为 1.8. Virtanen 等^[15]通过台架试验测试 100 km/h 车速下不同荷载下柴油公交车排放颗粒物对数分布的几何标准差 1.84 ~ 2.10,与本研究中对柴油车颗粒物排放分布一致. Jayaratne 等^[9]对不同荷载 60 km/h 车速下 CNG 公交车进行台架测试,峰值粒径 10 ~ 12 nm. 该结果比本实测拟合 CNG 车颗粒物峰值结果小 10 ~ 15 nm. 由于测试仪器限制,本研究中 SMPS 测试颗粒物粒径下限为 15 nm,不能得到更小粒径下的核模态分布,因此需要进一步研究. 通过向 Jayaratne 数据咨询,作者对任选的 CNG 车 2 组台架试验颗粒物排放分布做对数正态分布拟合,得到其几何标准差为 1.3 和 1.35,与本实测研究结果一致.

3 结论

(1) 连续 4 d 测试某公路隧道的颗粒物数浓度粒径分布谱,数据整理发现隧道内柴油/CNG 混合公交车颗粒物排放呈显著的双峰分布,日均峰值粒径分别在核模态:24.1、20.9、20.9 和 21.7 nm;和积聚态 66.1、66.1、79.1 和 91.4 nm.

(2) 应用多元回归法分别计算柴油公交车和 CNG 公交车颗粒物数浓度粒径谱排放因子,发现超低硫柴油公交车排放颗粒物呈积聚态单峰分布,峰值粒径约 100 nm,积分浓度排放因子 $(3.96E + 14)$ 个/km[标准差 $(5.11E + 13)$ 个/km]. CNG 公交车排放颗粒物认为呈核模态单峰分布,峰值粒径 22.5 nm,积分浓度排放因子 $(9.33E + 13)$ 个/km[标准差 $(6.32E + 13)$ 个/km].

(3) 利用对数正态分布函数分别拟合 2 个模态下柴油/CNG 公交车颗粒物分布,通过每 30 min 平均的共 90 组样本拟合计算,所有叠加拟合曲线结果与隧道实测结果均具有良好的拟合度 (R^2 范围 0.972 ~ 0.998). 采用髭须图计算分析两类公交车颗粒物粒径分布特征,柴油车排放颗粒物呈积聚模态下的对数正态分布,峰值粒径 74.5 ~ 86.5 nm,该对数正态分布的几何标准差 1.88 ~ 2.05. CNG 公交车呈核模态的对数正态分布,峰值粒径 19.9 ~

22.9 nm,几何标准差为 1.27 ~ 1.3.

致谢:衷心感谢昆士兰科技大学 Morawska L. 教授对本文的悉心指导.

参考文献:

- [1] Pope C A, Dockery D W, Schwartz J. Review of Epidemiological Evidence of Health Effects of Particulate Air Pollution[J]. *Inhal Toxicol*, 1995, **7**(1): 1-18.
- [2] Oberdorster G, Gelein R M, Ferin J, *et al.* Association of particulate air-pollution and acute mortality-involvement of ultrafine particle[J]. *Inhal Toxicol*, 1995, **7**(1): 111-124.
- [3] Chow J C. Introduction to the A&WMA 2002 Critical Review visibility: Science and regulation [J]. *J Air Waste Manage*, 2002, (6): 626-627.
- [4] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric Chemistry and Physics-From Air Pollution to Climate Change* [M]. (2nd Edition). John Wiley & Sons, 2006.
- [5] Kittelson D B. Engines and nanoparticles: A review[J]. *J Aerosol Sci*, 1998, **29**(5-6): 575-588.
- [6] Harris S J, Maricq M M. Signature size distributions for diesel and gasoline engine exhaust particulate matter[J]. *J Aerosol Sci*, 2001, **32**(6): 749-764.
- [7] Harris S J, Maricq M M. The role of fragmentation in defining the signature size distribution of diesel soot[J]. *J Aerosol Sci*, 2002, **33**(6): 935-942.
- [8] Ristovski Z D, Jayaratne E R, Lim M, *et al.* Influence of diesel fuel sulfur on nanoparticle emissions from city buses [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, **40**(4): 1314-1320.
- [9] Jayaratne, E R, Ristovski Z D, Meyer N, *et al.* Particle and gaseous emissions from compressed natural gas and ultralow sulphur diesel-fuelled buses at four steady engine loads[J]. *Sci Total Environ*, 2009, **407**(8): 2845-2852.
- [10] 宁智,刘双喜,资新运. 柴油机排气微粒特性的试验研究[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 765-769.
- [11] 李新令,黄震,王嘉松等. 二甲醚发动机超细颗粒排放属性实验研究[J]. *科学通报*, 2007, **52**(14): 1707-1713.
- [12] 张旭升,赵晖,胡宗杰,等. 共轨柴油机燃用生物柴油的排气颗粒粒径分布及核态纳米颗粒生成机理研究[J]. *中国科学 E 辑:技术科学*, 2009, **39**(9): 1589-1594.
- [13] Hussein T, Maso M D, Petaja T, *et al.* Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions[J]. *Boreal Env Res*, 2005, **10**: 337-355.
- [14] Imhof D, Weingartner E, Prevot A S H, *et al.* Aerosol and NO_x emission factors and submicron particle number size distributions in two road tunnels with different traffic regimes[J]. *Atmos Chem Phys*, 2006, **6**: 2215-2230.
- [15] Virtanen, A K K, Ristimäki J M, Vaaraslahti K M, *et al.* Effect of engine load on diesel soot particles[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(9): 2551-2556.