

不同燃料汽车排放超细微粒特性的实验研究

王嘉松¹, 陈达良², 宁治², 张镇顺², 黄震¹

(1. 上海交通大学燃烧与环境技术研究中心, 上海 200030; 2. 香港理工大学机械工程系, 香港)

摘要: 利用底盘测功机和粒径范围 0.015~0.7 μm 的扫描迁移微粒测定仪 SMPS, 对柴油出租车、柴油小巴车、汽油私家车和液化石油气 (LPG) 出租车进行了高低怠速和 10 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 到 70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 不同运行工况条件下排放的超细微粒粒径分布试验研究。研究表明, 不同燃料车在不同工况条件下排放的细微粒尤其是超细微粒特征呈现显著的不同。柴油车贡献更多的是粒径在 30~150 nm 的核模态和积聚模态微粒, LPG 和汽油车贡献更多的是 15~30 nm 的核模态微粒。总体上, 柴油车比汽油车和 LPG 燃料车排放更多的微粒数和微粒质量; 柴油车、汽油车和 LPG 车排放的 SMPS 可测细微粒总数、总质量分别约为 $(0.3\sim 3.6)\times 10^8$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, $0.03\sim 0.6$ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; $2.3\times 10^4\sim 1.2\times 10^7$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, $8\times 10^{-5}\sim 0.1$ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; $8.2\times 10^3\sim 8.8\times 10^6$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, $1.7\times 10^{-5}\sim 0.09$ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 对所有测试汽车, 在低怠速和低行驶速度时, 排放微粒数少, 在高怠速和高行驶速度时, 排放微粒数多。

关键词: 底盘测功机; 柴油; 汽油; LPG; 运行工况; 细微粒; 超细微粒

中图分类号: X502 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2382-04

Experimental Study on Ultrafine Particle Characteristics Exhausted from Various Fuelled Vehicles

WANG Jiasong¹, CHAN T L², NING Zhi², CHEUNG C S², HUANG Zhen¹

(1. Research Center for Combustion and Environmental Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: The fine particle size distribution characteristics obtained from a diesel taxi, a diesel light bus, a gasoline private car and a liquefied petroleum gas (LPG) fuelled taxi were carried out on a chassis dynamometer system. The measurements were performed at different driving modes, i. e., with low and high idling and from 10 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ to 70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 4 cruise operations using the instrument SMPS for collecting particles of 0.015~0.7 μm diameter in range. It was found that different fuelled vehicles and different driving modes characterize considerable differences in size number and mass concentration distributions. Diesel vehicles contribute much more nuclei and accumulation mode particles of 30~150 nm, while LPG and gasoline fuelled vehicles exhaust much more nuclei mode particles of 15~30 nm. Overall, diesel fuelled vehicles exhaust much more particles number and mass than gasoline and LPG fuelled vehicles; In the present study, diesel vehicles exhaust the ranges of total SMPS particle number, mass concentration with $(0.3\sim 3.6)\times 10^8$ number $\cdot\text{cm}^{-3}$, $0.03\sim 0.6$ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ respectively, and gasoline and LPG fuelled vehicles exhaust $2.3\times 10^4\sim 1.2\times 10^7$ number $\cdot\text{cm}^{-3}$, $8\times 10^{-5}\sim 0.1$ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; $8.2\times 10^3\sim 8.8\times 10^6$ number $\cdot\text{cm}^{-3}$, $1.7\times 10^{-5}\sim 0.09$ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectively; For all types of vehicles, the particle number and mass concentrations are small at low-idle and low-speed driving modes, and are large at high-idle and high-speed driving modes. They generally increase with the vehicle speed increasing from 10 to 70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Key words: chassis dynamometer; diesel; gasoline; liquefied petroleum gas (LPG); driving cycle; fine particle; ultrafine particle

细和超细微粒对人体有很大危害, 因其容易被呼吸进入人体肺部导致呼吸道和肺部疾病^[1], 人体健康与微粒浓度有很大的相关性^[2,3]. 在城市大气环境中, 80% 的微粒数浓度与细及超细微粒有关^[4], 其中很大一部分源自机动车排放^[5]. 机动车排放的细及超细微粒特征在国外引起了广泛关注^[6~8]. 国内在城市道路微粒^[9]和发动机台架细微粒特征^[10]方面有一些研究, 但大多关注较粗微粒的信息且多是质量浓度信息。

过去十几年来, 随着超细微粒粒径分布测定仪的问世, 大量国外和港澳地区研究人员开始关注超细微粒排放问题, 且多集中在柴油发动机排放的

微粒特征研究. 一般认为, 柴油机比汽油机和液化石油气 (LPG) 发动机排放更多的微粒^[11]. 在柴油机排放的微粒中, 通常核模态 (粒径 $D_p < 50$ nm) 的微粒质量在总质量中小于 20%, 而其数量在总数量中却高达 90%^[7]. 在发动机不同负荷条件下, 负荷越大, 所排放的微粒数量越多^[12,13]. 不同燃料类型的发动机排放不同粒径分布的微粒数量, 即使对于同一辆汽车, 在不同行驶工况条件下, 排放的微粒数量和分

收稿日期: 2005-12-27; 修订日期: 2006-03-30

基金项目: 香港特别行政区研究基金项目 (Poly U 5154/01E); 香港理工大学基金项目 (B-Q497)

作者简介: 王嘉松 (1967~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机动车排放与大气环境影响, E-mail: jswang@sjtu.edu.cn

布特征也可能存在很大的差异,这方面的研究还很少,且在国内尚未见相关报道.因此有必要同时研究不同燃料车辆在不同运行工况条件下的超细微粒排放特征,本文拟在底盘测功机上进行多工况细微粒测试分析,包括低怠速、高怠速,和 10、30、50、70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的不同行驶工况,用以一定程度地代表城市车辆的交通状况,同时选定具有代表性的 4 种不同燃料和车种的在用车分别进行测定,以揭示城市在用车的超细微粒排放状况和特征.

表 1 测试车辆相关参数¹⁾

Table 1 Parameters for the tested vehicles

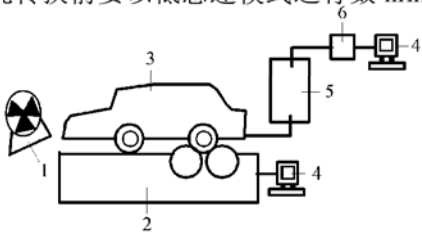
燃料	类型	生产年限	容量 / L	已行驶里程表 / km	自重 / kg	传动方式
柴油	出租车	1999	2 986	432 900	1 880	手动
柴油	小巴	1993	3 600	923 700	3 980	手动
汽油	私家车	1998	1 498	56 200	1 515	自动
LPG	出租车	2001	1 998	146 600	1 870	自动

1) 测试车辆生产厂家 TOYOTA

所采用的粒度分布测定仪是美国 TSI 公司的带粒子计数器 CPC3010 的微粒扫描粒度测定仪 SMPS 3071A, 其粒径计数范围是 0.015~ 0.7 μm , 设定扫描时段为 150s.

1.3 测试方案

测试在底盘测功机实验台上进行,该系统结构如图 1 所示.汽车尾气排气管出口联结两级稀释通道,再经 SMPS 测定微粒物特征,其测试原理参见文献[13].测试工况为低怠速(LI)、高怠速(HI)、低速(10 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、30 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)和中高速(50 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)的 6 种恒定运行工况模式,用以代表目前香港典型的城市交通模式,选取图 2 所示的 t_2 ($t_2 \geq 150\text{s}$) 时段的恒定速度条件下或怠速工况的中间稳定条件下进行.为确保获得稳定且重复性好的数据,尽量减少排气温度的影响,每辆车所有工况都测量 3~ 4 次,发动机首次启动均在怠速工况下预热,运行工况转换前要以低怠速模式运行数 min.



1. 风扇; 2. 底盘测功机; 3. 测试汽车;
4. 电脑; 5. 两组长稀释通道; 6. SMPS

图 1 转鼓微粒测试示意

Fig. 1 Schematic diagram for particle measurement on chassis dynamometer

1 测试条件与方法

1.1 测试车辆

测试是在 2003-07~ 2003-08, 利用香港理工大学和香港职业技术学院的相关设备完成的.考虑到香港交通的实际,选取柴油出租车、柴油中巴车、汽油私家车、LPG 出租车各 1 辆为研究对象,相关参数如表 1 所示.

1.2 微粒分析仪

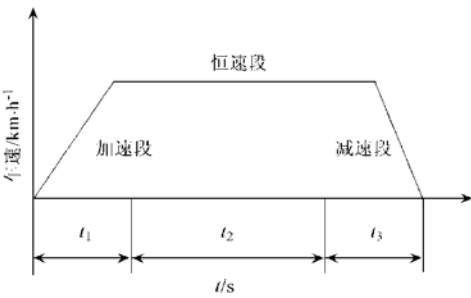


图 2 行驶工况示意

Fig. 2 Diagram of driving cycles

2 结果与讨论

为全面揭示不同粒径微粒分布特征,以 3 个粒径段的微粒数浓度(cm^{-3})和质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)作为基本分析参数.假设所有微粒呈球形,密度为 $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,这样可将数浓度转化为质量浓度.结合本研究所用 SMPS 的粒径范围,这 3 个粒径段分别是核模式微粒(nuclei mode, nanoparticles, $15\text{nm} < D_p < 50\text{nm}$)、超细微粒(ultrafine particles, $15\text{nm} < D_p < 100\text{nm}$)和全粒径段细微粒(fine particles, $15\text{nm} < D_p < 700\text{nm}$).

图 3~ 6 分别给出上述车辆在不同运行工况条件下的各段微粒数浓度及质量浓度测试分析结果.

图 3 是柴油出租车分析结果.可以看出,柴油出租车排放的微粒在低怠速工况时最少,在高怠速工况时最多;在行驶工况下,10~ 50 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时数浓度和质量浓度都较接近,在 70 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时数浓度(细微

粒总数)和质量浓度最大;在这几种运行工况下,细微粒总数为 $(1.0 \sim 3.6) \times 10^8$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,总质量浓度为 $0.07 \sim 0.6 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;核模态微粒在整个细微粒比例中,数浓度占 $16\% \sim 39\%$,质量浓度占 $1\% \sim 3\%$,超细微粒在整个细微粒比例中,数浓度占 $78\% \sim 88\%$,质量浓度占 $7\% \sim 32\%$ 。

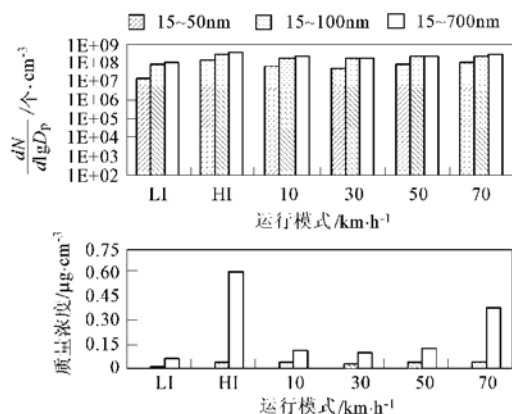


图3 柴油出租车在不同运行工况下的 SMPS 微粒数量和质量浓度

Fig. 3 SMPS particle normalized number and mass concentration at different driving modes for diesel taxis

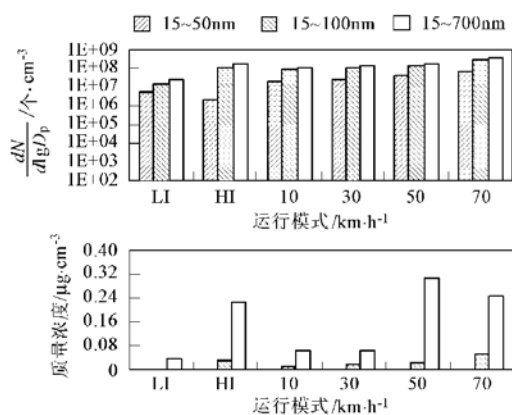


图4 柴油小巴在不同运行工况下的 SMPS 微粒数量和质量浓度

Fig. 4 SMPS particle normalized number and mass concentration at different driving modes for diesel light bus

图4是柴油小巴车的测试分析结果。排放的微粒在低怠速最少,在 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时最多;在行驶工况下,随着车速增加,微粒的数浓度和质量浓度增加;细微粒总数为 $(0.27 \sim 3.5) \times 10^8$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,总质量浓度为 $0.04 \sim 0.3 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;核模态微粒在整个细微粒比例中,数浓度占 $1\% \sim 21\%$,质量浓度占 $0.02\% \sim 1.8\%$,超细微粒在整个细微粒比例中,数浓度占 $56\% \sim 82\%$,质量浓度占 $8\% \sim 32\%$ 。

图5和图6分别给出的是汽油私家车和LPG出租车的测试分析结果。可以看到,它们与柴油车排

放微粒物有些不同,微粒总数远低于柴油车,但总体趋势仍然是低怠速和低速工况下排放的微粒数少,质量小,高怠速和高速工况下排放的微粒数多;对于汽油私家车,细微粒总数为 $2.3 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^7$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,总质量浓度为 $8 \times 10^{-5} \sim 0.12 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,核模态微粒在整个细微粒比例中,数浓度占 $12.8\% \sim 51.4\%$,质量浓度占 $0.07\% \sim 0.3\%$,超细微粒在整个细微粒比例中,数浓度占 $63.8\% \sim 71.6\%$,质量浓度占 $0.4\% \sim 7.5\%$;对于LPG出租车,细微粒总数为 $8.2 \times 10^3 \sim 8.8 \times 10^6$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,总质量浓度为 $(1.7 \times 10^{-5} \sim 0.09) \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,核模态微粒在整个细微粒比例中,数浓度占 $2\% \sim 60\%$,质量浓度占 $0.03\% \sim 0.2\%$,超细微粒在整个细微粒比例中,数浓度占 $44.6\% \sim 84.7\%$,质量浓度占 $0.5\% \sim 7.2\%$ 。图5和图6也同时反映了汽油车和LPG车排放的核模态微粒物数量在高怠速和高行驶速度情况下占的比例较高,但质量浓度却非常小,在图中因数据太小不能反映出来。

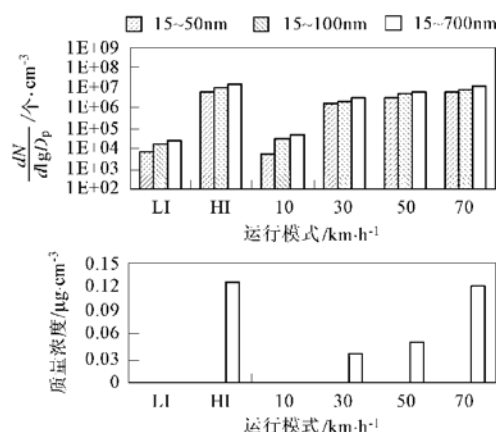


图5 私家车在不同运行工况下的 SMPS 微粒数量和质量浓度

Fig. 5 SMPS particle normalized number and mass concentration at different driving modes for private car

总的来看,无论是柴油车、汽油车还是LPG燃料车,基本上随着负荷或车速的增加,微粒物总数和质量浓度有增加的趋势,可以认为是由于高速或高负荷条件下,燃料消耗增加从而加大了微粒的排放量;相比之下,汽油车和LPG燃料车排放的微粒数比柴油车少,但是,排放的超细微粒物尤其是核模态微粒在整个微粒排放中所占的比例比柴油车还多,因此,相应的质量浓度占的比例比柴油少。事实上,汽油车和LPG燃料车贡献大量的微粒是 $30 \sim 50 \text{ nm}$ 以下的核模态微粒,而柴油车贡献大量的微粒是 $30 \sim 150 \text{ nm}$ 的超细微粒,这与Harris和Maricq^[14]在发动机台架

上所得结果类似,与 Morawska 等^[15]所得的 20~130nm 范围接近。

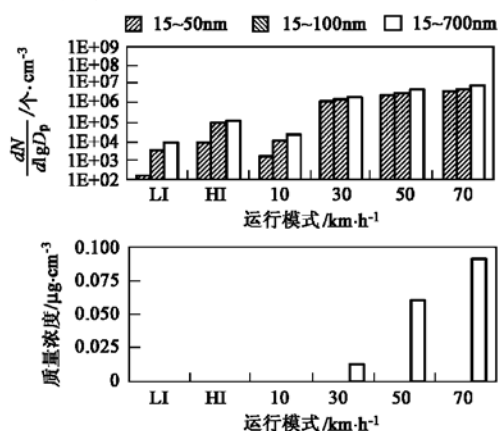


图 6 LPG 出租车在不同运行工况下的 SMPS 微粒数量和质量浓度

Fig. 6 SMPS particle normalized number and mass concentration at different driving modes for LPG taxi

本研究所选取的车辆虽然燃料、排放率、年限等都不同,但可体现不同运行工况条件下的微粒排放特征。总体上讲,柴油车比非柴油车排放更多微粒,且呈对数正态分布规律,但汽油车或 LPG 燃料车排放更大数量比率的核模态微粒,这一结论与过去的研究^[11-14]结果趋于一致。研究发现,在高怠速和高行驶速度时,非柴油车排放微粒只比柴油车少 $10 \sim 10^3$ 的数量级,而在低怠速和低速时,差别非常大,非柴油车排放的微粒物数量和质量都非常少。这说明汽油车或 LPG 车排放的微粒物总数随着车速或负荷的增加而显著增加。

3 结论

(1) 柴油车贡献最多的是粒径在 30~150 nm 的核模态和超细微粒, LPG 和汽油车排放最多的是 15~30 nm 的核模态微粒。

(2) 总体上,柴油车比汽油车和 LPG 燃料车排放更多的微粒数和微粒质量。

(3) 对于所测试的几种车辆,一般说来,在低怠速和低行驶速度时,排放微粒数少,质量小,在高怠速和高行驶速度时,排放微粒数多,质量大,随着车速由 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提升到 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,微粒的数浓度和质量浓度增加;与柴油车排放的粒径分布规律相比,汽油车和 LPG 车排放更大比例的核模态微粒;柴油车排放的粒径范围通常在核模态和积聚模态的较窄的范围,而非柴油车排放的微粒粒径可能在包括整个范围的较宽范围。

(4) 在目前的研究条件下,柴油车、汽油车和

LPG 车排放的 SMPS 微粒总数、排放总质量约为 $(0.3 \sim 3.6) \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, $0.03 \sim 0.6 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $2.3 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^7 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, $8 \times 10^{-5} \sim 0.1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $8.2 \times 10^3 \sim 8.8 \times 10^6 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, $1.7 \times 10^{-5} \sim 0.09 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

(5) 柴油车排放的核模态微粒数量多者可达 40%,质量小于 4%;汽油车和 LPG 车排放的核模态微粒数量多者可达 50%~60%,质量却小于 0.3%;柴油车排放的超细微粒数量多者可达 80%~90%,质量却小于 30%,汽油车和 LPG 车排放的超细微粒数量多者可达 70%~80%,质量却小于 10%。

参考文献:

- [1] Peters A, Wichmann H E, Tuch T, *et al.* Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles [J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 1997, **155**: 1376~1383.
- [2] Schlesinger R B. Toxicological evidence for health effects from inhaled particulate pollution: do it support the human experience? [J]. Inhalation Toxicology, 1997, **7**: 99~109.
- [3] 童永彭, 张桂林, 叶舜华. 大气微粒物致毒效应的研究进展 [J]. 环境与职业医学, 2003, **20**(3): 246~248.
- [4] Baik N J, Kim Y P, Moon K C. Visibility study in seoul [J]. Atmos. Envir., 1996, **30**: 2319~2328.
- [5] Morawska L, Bofinger N, Kocis L, *et al.* Comprehensive characterization of aerosols in a subtropical urban atmosphere: Particle size distribution and correlation with gaseous pollutants [J]. Atmos. Envir., 1998, **32**: 2461~2478.
- [6] Williams D J, Milne J W, Quigley S M, *et al.* Particle emissions from 'in use' motor vehicles II. diesel vehicles [J]. Atmos. Envir., 1989, **23**: 2647~2661.
- [7] Kittelson D B. Engines and nanoparticles: a review [J]. J. Aerosol Science, 1998, **29**: 575~588.
- [8] Shi J P, Roy M H, Brear F. Particle size distribution from a modern heavy duty diesel engine [J]. Science of the Total Environment, 1999, **235**(1): 305~317.
- [9] 王玮, 岳欣, 刘红杰, 等. 交通来源微粒物排放因子的研究 [J]. 环境科学研究, 2001, **14**(4): 36~40.
- [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] Greenwood S J, Coxon J E, Biddulph T, *et al.* An investigation to determine the exhaust particulate size distributions for diesel, petrol and compressed natural gas fuelled vehicles [C]. SAE Paper 961085.
- [12] Patschull J, Roth P. Measurement and reduction of particles emitted from a two-stroke engine [J]. J. Aerosol Sci., 1995, **26**: 979~987.
- [13] Wong C P, Chan T L, Leung C W. Characterisation of diesel exhaust particle number and size distributions using tunnel and ejector diluter measurement techniques [J]. Atmos. Envir., 2003, **37**: 4435~4446.
- [14] Harris S J, Maricq, M M. Signature size distributions for diesel and gasoline engine exhaust particulate matter [J]. J. Aerosol Science, 2001, **32**: 749~764.
- [15] Morawska L, Bofinger N, Kocis L, *et al.* Submicron and supermicron particulates from diesel vehicle emissions [J]. Environ. Sci. Tech., 1998, **32**: 2033~2042.