

不同稀释条件与测量技术下缸内直喷汽车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征

樊筱筱, 蒋靖坤, 吴烨, 张强, 李振华, 段雷

(清华大学环境学院, 北京市海淀区 100084)

Characteristics of Particles Emitted by a Gasoline Direct Injection Vehicle Under Different Dilution Conditions and Measurement Systems

FAN Xiaoxiao, JIANG Jingkun, WU Ye, ZHANG Qiang, LI Zhenghua, DUAN Lei

(School of Environment, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: A gasoline direct injection (GDI) light-duty vehicle was tested to investigate the influence of dilution conditions and measurement systems on number concentration and size distribution of emitted particulate matters. Two dilution and sampling systems and three measurement systems were examined. It was found that most of emitted particulate matters were in accumulation mode, few were in nuclei mode. Geometric mean diameters of these two modes are 22 nm and 83 nm, respectively. Flow rate of the Constant Volume Sampling (CVS) was found to have little effects on particle size distributions. The difference in particle number concentration caused by tested dilution conditions is within $\pm 11\%$. Number concentrations measured by the PMP system have good repeatability. ELPI⁺ reports much higher particle number concentrations than those obtained by the PMP system. The differences are 23%~100%. Large discrepancy often occurs at rapidly changing driving conditions. Number concentrations measured by the CVS dilution system are much lower than those by the FPS dilution system.

KEY WORDS: gasoline direct injection (GDI); particulate matters; number concentration; size distribution; dilution condition; measurement technology

摘要: 利用 2 套稀释采样系统和 3 套测试系统对 GDI 汽油车排放颗粒物的数浓度和粒径分布特征进行了测试, 比较了不同稀释方式与测量技术下排放颗粒物的差异, 并探究了不同稀释流量对颗粒物测量结果的影响。结果表明, GDI 汽油车在使用满足国 V 标准的汽油时, 其排放颗粒物呈现核模态和积聚模态双峰分布, 峰值粒径分别出现在 22 nm 和

83 nm, 而积聚模态颗粒物居多。全流定容稀释系统(CVS)下在一定范围内改变稀释流量对颗粒物粒径分布影响较小, 数浓度测量结果相差 $\pm 11\%$ 。法规规定的测试系统(PMP 法)数浓度测量结果可重复性好, ELPI⁺测试结果要高于 PMP 法, 2 种方法的测量结果相差 23%~100%, 在速率变化较大的工况下相差更大。法规规定的 CVS 稀释系统测量的数浓度结果低于直采稀释系统的测量结果。

关键词: 缸内直喷; 颗粒物; 数浓度; 粒径分布; 稀释条件; 测量技术

0 引言

缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)汽油机由于具有良好的燃油经济性和 CO₂ 减排效果, 已经成为车用汽油机研究和应用热点^[1]。GDI 汽油机直接以较高压力将燃油喷入气缸内与空气混合, 形成的可燃混合气燃烧做功。与传统进气道喷射(port fuel injection, PFI)汽油机相比, GDI 汽油机能精确控制喷油量, 燃油经济性更好, 具有瞬态响应性能高、空燃比控制精确、冷启动性能良好等优点^[2]。但也正因为进气方式的改变, 使得燃烧前油气混合时间缩短, 油气混合不均匀、局部过浓的混合气或者未蒸发的液态油滴扩散燃烧, 引起排放颗粒物大幅增加^[3], 其排放水平远高于传统 PFI 汽油机^[4-5], 甚至高于装有颗粒物捕集器(diesel particulate filter, DPF)的柴油机^[6]。

随着 GDI 技术的发展与广泛应用, 各国对于 GDI 汽油车颗粒物排放的控制与管理逐步加严。美国加州 CARB 法规(LEV III)对轻型 GDI 汽油车排放颗粒物质量浓度的控制标准为 6mg/mi, 2017 年该项指标的控制标准将加严至 3mg/mi。欧盟欧 VI 标

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划) (2013CB228505); 国家自然科学基金项目(91544222)。

The National Basic Research Program (973 Program) (2013CB22850);
The National Natural Science Foundation of China (91544222).

准对轻型 GDI 汽油车不仅有质量浓度, 还增加了数浓度这一控制指标。2014 年欧 VI 标准对轻型 GDI 汽油车排放的颗粒物质量浓度和数浓度分别执行了 4.5mg/km 和 $6.0\times10^{12}\text{\#}/\text{km}$ 。我国 2013 年颁布的轻型车国 V 排放标准参照欧 VI 标准, 也对 GDI 汽油车排放颗粒物质量浓度提出了排放限值, 尽管对数浓度还未给出具体限制。因此, 无论从车用发动机技术更新, 还是机动车颗粒物排放控制角度, 研究 GDI 汽油车颗粒物排放特性都具有重要的意义。

机动车排放颗粒物的数浓度与粒径分布测量中, 测试条件尤其是尾气稀释条件(稀释比、停留时间、稀释方式和稀释气温湿度等)对于测量结果有着重要的影响^[7-9]。而测量技术的不同, 即使是对同一来源的颗粒物, 测量结果也有所差别。目前国内外关于稀释条件与测试技术对机动车排气颗粒物测量影响的研究主要针对对柴油车^[10-11], 对于 GDI 汽油车的关注还较少。已有研究主要是探究发动机运行工况与燃料等对 GDI 排放颗粒物影响^[12-14]。GDI 汽车排放颗粒物特性的研究, 首先离不开对其准确的测量, 因此了解测量过程中哪些因素对其排放特性有重要影响是非常必要的工作。

本研究的目的是揭示稀释条件对 GDI 汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布的影响, 通过比较不同稀释比、不同稀释系统与不同测试系统的结果, 探究不同测试条件下 GDI 汽油车排放颗粒物的数浓度和粒径分布特性, 以期为决策者开展 GDI 汽油车排放颗粒物控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 测试车辆与油品

本研究选取了一辆缸内直喷(GDI)轻型汽油车作为试验用车, 汽车参数见表 1。

表 1 试验车辆相关信息

Tab. 1 Information of the tested vehicle

类型	排量/L	功率/kW	车重/kg	行驶 里程/km	供油 方式	排放 水平
私家车	1.8T	118	2000	3000	GDI	国 IV

本研究使用的油品为定制汽油, 油品质量符合 2018 年将实施的国 V 车用汽油标准。经检测试验燃油主要理化特性如表 2 所示, 其中含硫量<1mg/kg, 满足国 V 汽油标准中国含硫量不超过 10mg/kg 的要求。

1.2 测试系统与方法

本试验车辆在底盘测功机上进行转鼓试验, 测

表 2 试验燃油主要理化特性

Tab. 2 Physiochemical properties of the fuel

燃油	密度/ (kg/m ³)	硫含量/ (mg/kg)	芳烃 含量/%	烯烃 含量/%	研究法 辛烷值	马达法 辛烷值
汽油	735.3	<1	33.5	20.9	98.3	89.2

试循环选用新欧洲驾驶循环(new European driving cycle, NEDC), 时长为 1180s, 总行驶距离约为 10.95 km, 平均车速为 33.35 km/h。循环内包括 780s 的市区测试工况与 400s 市郊测试工况, 平均车速分别为 18.8km/h 和 62.6km/h。为避免冷启动对测试的影响, 测试前对车辆进行 30 分钟的预热, 每组测试进行 3 次。试验流程见图 1。

本试验采用了 2 套不同的稀释系统。图 1(a)所示为全流定容稀释系统(constant volume sampling, CVS), 该系统将汽车排气全部引入稀释通道, 与经高效过滤器后的稀释空气进行混合, 降低污染物浓度以避免排气温度降低导致下游采样发生冷凝。该定容采样系统无需考虑汽车排气随瞬态工况变化的剧烈变动, 稀释比随排气量变化, 能精确测量以及计算污染物排放浓度, 为轻型车国 V 标准中规定使用的稀释系统。

图 1(b)所示为直采测试中常用的稀释系统(fine particle sampler, FPS)。该稀释系统直接在汽车排气口末端采样, 它由 2 级稀释组成, 一级稀释利用多孔管技术, 可实时调节稀释比与稀释温度, 二级稀释为喷射稀释, 可降低污染物浓度与温度以满足下游测试系统要求。该稀释系统可以实现定稀释比稀释, 多用于机动车车载测试。

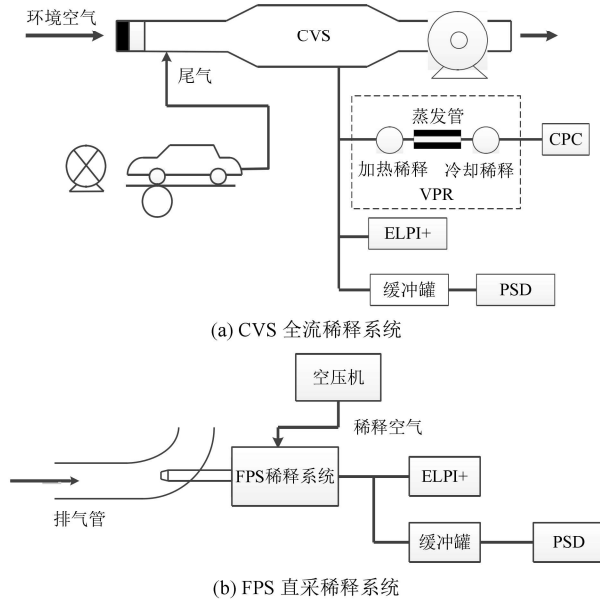


图 1 排气中颗粒物数浓度、粒径分布测试系统示意
Fig. 1 Particle Measurement systems

本试验采用3套颗粒物测量系统同步平行进行在线测量:①轻型车国V标准中颗粒物数浓度测量系统。该系统参照欧盟法规,采用颗粒物测量项目(particle measurement programme, PMP)对于数浓度测量方法的建议,由挥发性组分去除系统(volatile particle remover, VPR)和颗粒物冷凝生长计数器(condensation particle counter, CPC)组成(PMP),该测量系统通过2级稀释和蒸发管,去除颗粒物中挥发性组分,针对23nm~2.5μm的非挥发性固体颗粒物进行计数,可获得逐秒颗粒物数浓度结果;②静电低压撞击器(Electrical Low Pressure Impactor, ELPI⁺),ELPI⁺有14个分粒径通道,可同时获得14个粒径范围的逐秒数浓度,粒径测量范围为6nm~10μm;③颗粒物粒径谱仪(particle size distributions, PSD),该系统为本实验室搭建的粒径分布测试系统,由2组扫描电迁移率粒径谱仪(nano-SMPS与regular SMPS)组成,可分别同时测量3~67nm和20~600nm颗粒物粒径分布^[15]。本测试中测试工况NEDC为瞬态工况,考虑到SMPS时间分辨率,在PSD前加设了一个15L的缓冲罐以保证稳态测量条件。3套测试系统中,PMP系统只运用于CVS全流稀释系统,其余2套测试系统均运用于CVS和FPS稀释系统。

本试验通过调整CVS稀释通道总流量来改变颗粒物稀释比例,选取了4种不同CVS流量(8, 15, 19, 24 m³/min),测量了不同稀释条件下GDI汽车排放颗粒物的数浓度和粒径分布。通过比较不同稀释系统下不同仪器的测量结果,进一步分析颗粒物数浓度和粒径分布特征。

1.3 颗粒物数浓度计算

3套颗粒物测量系统均可获得颗粒物平均数浓度 N_{ave} (#/cm³)。CVS稀释系统下由平均数浓度结果分别经公式(1)可计算获得颗粒物数量排放因子(PN)。

$$PN = [N_{ave} \cdot Q_{CVS} \cdot t \times 10^6] / D \quad (1)$$

式中:PN为颗粒物数量排放因子, #/km; N_{ave} 为颗粒物平均数浓度, #/cm³; Q_{CVS} 为CVS通道流量, m³/min; t 为测试工况NEDC时长, min; D 为测试工况内行驶距离, km。

PSD系统平均数浓度 N_{ave} 需由平均粒径分布积分计算获得,如式(2):

$$N_{ave} = \int_{D_{p,low}}^{D_{p,up}} \frac{dN}{D_p} \cdot d(D_p) \quad (2)$$

2 结果及讨论

2.1 CVS稀释流量对测试结果影响

本研究通过调整CVS稀释通道总流量来实现稀释比例的变化。选取了4种不同CVS流量(8, 15, 19, 24 m³/min),分别对应的平均稀释比为:18:1, 32:1, 40:1, 47:1。流量的选取一方面考虑了CVS流量控制可调节范围,另一方面遵照轻型车国V标准中的测试规定,满足下游颗粒物数浓度测试系统上限要求。4种流量下GDI汽油车NEDC测试工况排放颗粒物的平均粒径分布与数浓度结果分别如图2和图3所示,其中各流量下粒径分布已经乘以了相应的平均稀释比。

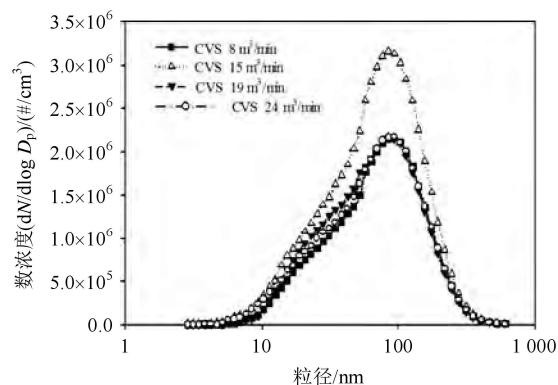


图2 CVS不同流量下颗粒物的平均粒径分布

Fig. 2 Particle average size distributions obtained under different CVS flow rates

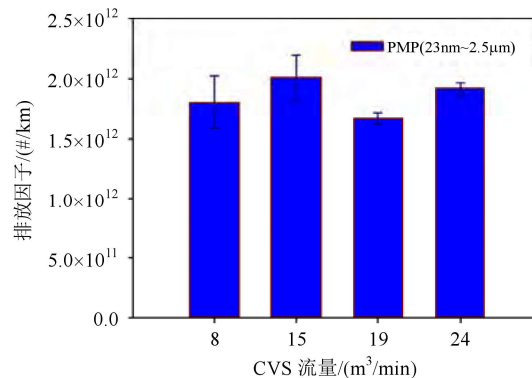


图3 CVS不同流量下颗粒物的数浓度

Fig. 3 Particle number concentrations obtained under different CVS flow rates

粒径分布结果显示,在不同稀释比条件下,测试GDI汽油车排放的颗粒物均呈现核模态和积聚模态双模态分布,利用双峰正态分布进行拟合,可以得出峰值分别出现在22nm和83nm,排放的颗粒物积聚态颗粒物居多。随着CVS流量的增大(稀释比例的增加),颗粒物粒径分布特征未出现明显的变化,且颗粒物平均几何粒径(GMD)几乎不变。不同稀释比下粒径分布除CVS流量为15 m³/min情况下

峰值高度略高之外, 其他 3 种流量下的粒径分布结果几乎重合

PMP 系统测试的数浓度结果显示, 数浓度与稀释流量间并未表现出相关关系, CVS 流量为 $15 \text{ m}^3/\text{min}$ 情况下数浓度最高, $19 \text{ m}^3/\text{min}$ 情况下则最低。4 种稀释比下数浓度相差并不大, 以 CVS 流量 $8 \text{ m}^3/\text{min}$ 为基准, 数浓度变化幅度不超过 11%。误差限表明测量误差也是造成不同稀释比下数浓度差异的原因之一。

本研究测试结果与其他研究相较有一定的可比性。Casati 等人对一辆柴油乘用车排放颗粒物在不同稀释条件下的测试结果所受影响进行了研究^[16]。研究采用二级稀释系统, 其中一级稀释直接对刚进入采样管的颗粒物即进行稀释, 通过调节稀释气的流量实现一级稀释比例的变化。结果表明, 在不同的稀释比例下, 积聚模态的颗粒物几乎不受影响, 而核模态的颗粒物则随着稀释比例的增加而减少。本研究与之相比, 积聚模态颗粒物表现出的规律相似, 即不受稀释比例的影响。

然而本研究中核模态颗粒的变化与 Casati 等人的研究结果不同。造成差异的主要原因与颗粒物粒径分布特征有关。Casati 的研究是针对柴油乘用车, 其使用的燃料也为高硫柴油(含硫量 310 mg/kg), 其排放的颗粒物主要以核模态为主。而本研究中针对的是 GDI 汽油车, 所用燃料为低硫汽油(含硫量 $<1 \text{ mg/kg}$)。核模态颗粒的形成会受到许多因素的影响, 燃料和润滑油中的硫是形成核模态颗粒物重要来源, 其前体物浓度也与积聚模态颗粒物浓度有关^[17]。本测试中油品含硫量较低, 导致了核模态颗粒物数量浓度较低, 因此不同稀释比例下未表现出柴油车那样明显的变化。

2.2 不同测量技术的影响

PMP 是考虑数浓度测试可重复性与准确性而提出的测试系统。为了规避测量核模态颗粒物时因测量条件不同而引起的结果差异, PMP 测试系统的设计思路是去除挥发性组分且只针对 23 nm 以上的固体颗粒物进行计数^[18]。尽管此套系统为法规所使用, 但是其对挥发性组分的去除直接影响了核模态颗粒物的形成, 而 23 nm 切割粒径的选择也引起低估固态颗粒物数量的质疑, PMP 系统测试结果与真实排放水平的差异引起人们的关注。本研究中 3 套颗粒物数浓度测量系统平行测量以探究测试技术的影响。为更好的比较, 测试结果只针对 $23 \text{ nm} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 其中 ELPI⁺只选取了 $28 \text{ nm} \sim 2.5 \mu\text{m}$

的分粒径数据。

图 4 所示为 1 个测试工况内, PMP 系统与 ELPI⁺测试所得的逐秒瞬态数浓度。结果显示, 2 测试系统瞬态响应一致性较好, 数浓度变化规律基本一致, 特别是在前 720s 的市区测试工况下。整个测试工况内, 数浓度的峰值一般出现在车速发生快速变化(加速和减速)的工况下, ELPI⁺测得的颗粒物数浓度略高于 PMP 结果, 而在急加速的情况下 2 系统的结果差异表现的更为突出。在非加速工况下 2 测试系统的结果差别约为 23%, 而在急加速/减速工况下差别可高达 100%。

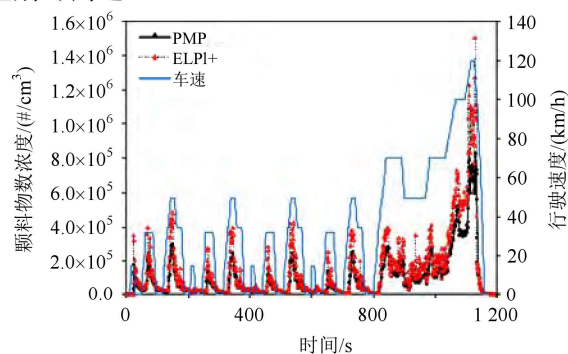


图 4 不同测试系统的瞬态颗粒物数浓度

Fig. 4 Particle number concentrations measured using PMP and ELPI+

这一研究结果与付海超^[19]等人研究的 GDI 汽油车在 NEDC 循环下颗粒物瞬态排放规律相似。造成数浓度差异的原因分析如下。首先 2 套系统的测量原理不同。PMP 系统中利用 CPC 进行计数, 其测试原理是先使颗粒物通过过饱和蒸汽冷凝生长, 再利用光散射原理, 通过测量颗粒物对光的散射实现计数。而 ELPI⁺是先使颗粒物荷电, 然后进入多级惯性撞击分级采样器, 根据粒径大小不同被不同级的收集板捕捉, 并使用静电计来测量电流强度, 基于电流强度获得各级颗粒物的数浓度。其次, 2 套系统表征的颗粒物粒径有所差别, CPC 使用的为电迁移率粒径, 而 ELPI⁺为空气动力学粒径。由于颗粒物并非球形, 因此同一大小的颗粒物 2 种粒径并不一定相等。同时 ELPI⁺中颗粒物荷电效率变化也会为结果带来不确定性。

2 种测试系统在工况发生剧烈变化时结果差异尤为突出。可能的原因如下: 在急加速工况下, 喷油量的增加会进一步增加油气混合的不均匀性, 局部过浓的混合气会产生未燃尽的碳颗粒, 使得更易生成积聚模态颗粒物。与此同时, 碳氢化合物的增加, 其凝结成核或是冷凝至积聚模态颗粒物表面上使之长大也会为颗粒物的测量造成影响。PMP 测试

系统中 VPR 的加入去除了挥发性组分,使得碳氢化合物对于颗粒物数浓度的影响不计,而 ELPI⁺测试结果则反映了急加速过程中颗粒物数浓度的急剧变化。

图 5 列出了不同稀释比条件下,3 种测试系统在 NEDC 工况时获得的 23nm~2.5 μ m 颗粒物数量排放因子。与 PMP 相比,ELPI⁺与 PSD 系统测试的数浓度结果偏高。由上述对瞬态响应的分析可知,除了测试技术的差异之外,PMP 系统中 VPR 的设置,可能使得在工况变化较大的情况下低估了颗粒物实际排放水平,造成整体工况内的数浓度偏低。PSD 测得的颗粒物数浓度由平均粒径分布积分计算而来。而 ELPI⁺测试的颗粒物数浓度主要是针对空气动力学粒径而言,而现有的数浓度测试与标准都是针对电迁移率粒径,因此探究颗粒物空气动力学粒径与电迁移率粒径转换关系也须成为机动车数浓度测试中的基础研究工作。

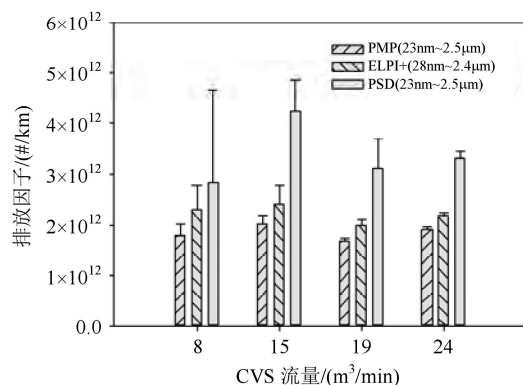


图 5 CVS 不同流量下各测试系统测得的颗粒物数量

Fig. 5 Particle numbers under different CVS flow rates using PMP, ELPI+, and PSD

2.3 不同稀释系统对测试结果的影响

CVS 系统是法规中规定使用的稀释系统,由于其为定容采样全流稀释,因此稀释比随汽车排气量的改变而变化,难以对稀释过程中各参数进行控制。而 FPS 直采系统中,FPS 4000 利用二级稀释系统,可以实现稀释比的精准控制。

本研究针对 2 种不同稀释系统下的 GDI 汽车排放颗粒物粒径分布结果进行了对比,结果如图 6 所示。其中 FPS 直采系统中稀释比控制为 50:1,为更好与 CVS 系统比较,选择了 CVS 流量 24m³/min 下、平均稀释比为 47:1 的粒径分布结果进行比较。

结果显示:FPS 直采系统中粒径分布为双峰分布,但积聚模态颗粒物峰值相较于 CVS 系统结果发生了右移,平均几何直径为 106nm。在相同粒径下,FPS 直采系统测得的颗粒物浓度高于 CVS 系统

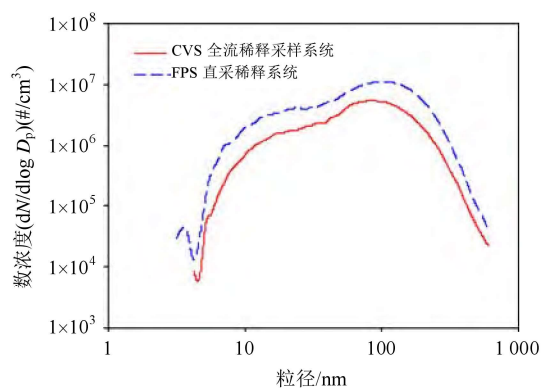


图 6 不同稀释系统下粒径分布

Fig. 6 Particle size distributions obtained using different dilution systems

的结果。Casati 等人^[16]在进行不同稀释系统下柴油车排放颗粒物粒径分布测试中也得到相似的结果。CVS 采样稀释系统下颗粒物排放要明显低于在排气口直接采样稀释的结果,且直接采样稀释系统粒径分布峰值右移。这一方面可能是因为稀释条件不同带来颗粒物排放结果的差异。FPS 系统为定稀释比稀释,而 CVS 通道总稀释流量不变,汽车排气量的变化引起稀释比的变化,可能造成稀释混合气温度的变化,使得排放颗粒物产生差异。另一方面可能同 CVS 稀释通道中颗粒物损失较大有关。Erkki 等人在研究中对使用 FPS 和 CVS 稀释系统下重型和轻型柴油车排放颗粒物的采样损失进行了计算,结果显示 FPS 稀释系统下颗粒物损失更低^[20]。这可能是因为颗粒物离开汽车排气管后进入 CVS 稀释采样系统至进入测量系统的距离远大于 FPS 直采系统,在此过程中大颗粒物可能在转弯处发生惯性沉降,而小颗粒物会因扩散作用而损失到管壁上^[21]。在未来的研究中需要更好的评估稀释系统和测量仪器中颗粒物的损失,并纳入到排放量计算中。

3 结论

本研究在改变 CVS 流量以实现稀释比变化的条件下,发现试验所用 GDI 汽油车在 NEDC 循环工况下排放颗粒物的平均粒径分布呈现双峰分布,积聚模态颗粒物较多。CVS 稀释流量变化对颗粒物粒径分布影响较小。在 CVS 流量 15 m³/min 条件下 GDI 汽油车排放的颗粒物数浓度最高。不同稀释流量下数浓度的测量结果之间相差 $\pm 11\%$ 。

运用不同测量技术对 GDI 汽油车排放颗粒物的特征进行了对比。PMP 方法获得的颗粒物数浓度结果最为稳定,重复性较好。ELPI⁺与 PSD 方法获

得的颗粒物数浓度都高于 PMP 测量结果。对比 ELPI⁺与 PMP 的瞬态数浓度测试结果表明, ELPI⁺测试结果要高于 PMP 法, 2 种方法的测量结果相差 23%~100%, 在速率变化较大的工况下相差更大, ELPI⁺在急变速的工况下能更好反映排放的瞬态变化, PMP 方法在速率变化较快的工况下可能低估了 GDI 汽油车颗粒物实际排放水平。

对比不同稀释系统的测试结果, 发现 CVS 稀释采样系统测得的数浓度明显低于 FPS 直采稀释系统。造成 CVS 系统颗粒物损失的具体原因还待进一步探究。

致谢

本文中实验是在厦门环境保护机动车污染控制技术中心的赖益土、清华大学何立强等人士大力支持下完成的, 在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 王建昕, 王志. 高效清洁车用汽油机燃烧的研究进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2010, 1(3): 167-178.
Wang Jianxin, Wang Zhi. Research progress of high efficient and clean combustion of automotive gasoline engines[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2010, 1(3): 167-178(in Chinese).
- [2] 孙勇, 王燕军, 王建昕, 等. 缸内直喷式汽油机的研究进展及技术难点[J]. 内燃机, 2002(1): 6-10.
Sun Yong, Wang Yanjun, Wang Jianxin, et al. New progress of gasoline direct injection engines' research and technical problems[J]. Internal Combustion Engines, 2002(1): 6-10(in Chinese).
- [3] Velji A, Yeom K, Wagner U, et al. Investigations of the formation and oxidation of soot inside a direct injection spark ignition engine using advanced laser-techniques[R]. SAE Technical Paper, 2010.
- [4] Braisher M, Stone R, Price P. Particle number emissions from a range of European vehicles[R]. SAE Technical Paper, 2010.
- [5] Liang B, Ge Y S, Tan J W, et al. Comparison of PM emissions from a gasoline direct injected (GDI) vehicle and a port fuel injected (PFI) vehicle measured by electrical low pressure impactor (ELPI) with two fuels: Gasoline and M15 methanol gasoline[J]. Journal of Aerosol Science, 2013, 57: 22-31.
- [6] Mathis U, Mohr M, Forss A M. Comprehensive particle characterization of modern gasoline and diesel passenger cars at low ambient temperatures[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(1): 107-117.
- [7] Abdul-Khalek I, Kittelson D, Brear F. The influence of dilution conditions on diesel exhaust particle size distribution measurements[R]. SAE Technical Paper, 1999.
- [8] Liu Z G, Vasys V N, Swor T A, et al. Significance of fuel sulfur content and dilution conditions on particle emissions from a heavily-used diesel engine during transient operation[R]. SAE Technical Paper, 2007.
- [9] Rönkkö T, Virtanen A, Vaaraslahti K, et al. Effect of dilution conditions and driving parameters on nucleation mode particles in diesel exhaust: Laboratory and on-road study[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(16): 2893-2901.
- [10] Giechaskiel B, Ntziachristos L, Samaras Z, et al. Formation potential of vehicle exhaust nucleation mode particles on-road and in the laboratory[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(18): 3191-3198.
- [11] Wong C P, Chan T L, Leung C W. Characterisation of diesel exhaust particle number and size distributions using mini-dilution tunnel and ejector-diluter measurement techniques[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(31): 4435-4446.
- [12] 陆叶强, 陈秋方, 孙在, 等. 汽车排放超细微粒数浓度及粒径谱特征的实验研究[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3309-3314.
Lu Ye qiang, Chen Qiufang, Sun Zai, et al. Ultrafine particle number concentration and size distribution of vehicle exhaust ultrafine particles[J]. Environmental Science, 2014, 35(9): 3309-3314(in Chinese).
- [13] 王嘉松, 陈达良, 宁治, 等. 不同燃料汽车排放超细微粒特性的实验研究[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2382-2385.
Wang Jiasong, Chan T L, Ning Zhi, et al. Experimental study on ultrafine particle characteristics exhausted from various fuelled vehicles[J]. Environmental Science, 2006, 27(12): 2382-2385(in Chinese).
- [14] 姚春德, 王全刚, 刘辰, 等. MMT 对汽油机微粒排放影响的试验研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1683-1689.
Yao Chunde, Wang Quangang, Liu Chen, et al. Effect of gasoline blended with MMT on PM emissions from a PFI engine[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1683-1689(in Chinese).
- [15] Liu J Q, Jiang J K, Zhang Q, et al. A spectrometer for measuring particle size distributions in the range of 3 nm to 10 μm [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016, 10(1): 63-72.

- [16] Casati R, Scheer V, Vogt R, et al. Measurement of nucleation and soot mode particle emission from a diesel passenger car in real world and laboratory in situ dilution [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(10): 2125-2135.
- [17] Kittelson D B, Watts W F, Johnson J P. On-road and laboratory evaluation of combustion aerosols—Part1: Summary of diesel engine results[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37(8): 913-930.
- [18] Giechaskiel B, Dilara P, Andersson J. Particle Measurement Programme (PMP) light-duty inter-laboratory exercise: Repeatability and reproducibility of the particle number method[J]. *Aerosol Science & Technology*, 2008, 42(7): 528-543.
- [19] 付海超. 缸内直喷汽油机颗粒物排放特性的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
Fu Haichao. Experimental study of particle emission characteristics from GDI engines[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013(in Chinese).
- [20] Erkki L, Pirita M, Johanna O, et al. Sampling and engine after-treatment effect on diesel exhaust particle size distributions[R]. SAE Technical Paper, 2005.
- [21] 余皎, 刘忠长, 许允, 等. 影响柴油机排气微粒测量结果的若干因素[J]. *内燃机学报*, 2000, 13(4): 340-344.
Yu Jiao, Liu Zhongchang, Xu Yun, et al. Influence of several parameters on measuring particulate matter in diesel engine exhaust gas[J]. *Transactions of CSICE*, 2000, 13(4): 340-344(in Chinese).



樊筱筱

收稿日期: 2016-03-15。

作者简介:

樊筱筱(1990), 女, 硕士研究生, 主要从事机动车排放颗粒物物化特征的研究工作, shirleyp33@aliyun.com;

蒋靖坤(1980), 男, 副教授, 主要从事大气颗粒物生成及转化过程研究, 大气颗粒物测量以及气溶胶测量仪器开发工作, 本文通讯作者, jiangjk@tsinghua.edu.cn

(责任编辑 王庆霞)

Characteristics of Particles Emitted by a Gasoline Direct Injection Vehicle Under Different Dilution Conditions and Measurement Systems

FAN Xiaoxiao, JIANG Jingkun, WU Ye, ZHANG Qiang, LI Zhenghua, DUAN Lei
(Tsinghua University)

KEY WORDS: gasoline direct injection (GDI); particulate matters; number concentration; size distribution; dilution condition; measurement technology

Uncertainties remain in the experimental measurement of number concentration and size distribution of particles emitted by vehicles, such as dilution conditions and measurement systems. Most studies have focused on diesel vehicles, lacking of research in gasoline vehicles.

In order to investigate the influence of dilution conditions and measurement systems on number concentration and size distribution of gasoline particles, a gasoline direct injection (GDI) light-duty vehicle is tested using two dilution and sampling systems and three measurement systems. The two dilution and sampling systems are Constant Volume Sampling system (CVS) and Fine Particle Sampler (FPS). Three measurement systems (PMP system, PSD and ELPI⁺) are worked in parallel. Particle number emission factor (PN) and average number concentration of PSD system are calculated by:

$$\begin{cases} PN = [N_{ave} \cdot Q_{CVS} \cdot t \times 10^6] / D \\ N_{ave} = \int_{D_{p,low}}^{D_{p,up}} \frac{dN}{D_p \cdot d \log D_p} \cdot d(D_p) \end{cases} \quad (1)$$

To investigate the influence of dilution factor on particle number concentration, 4 dilution flow rates are chosen to represent 4 dilution conditions. It is found that flow rate of the CVS has small effects on particle size distributions, which can be seen in Fig. 1. Most of emitted particles are in accumulation mode, few are in nuclei mode. Geometric mean diameters of these two modes are 22 nm and 83 nm, respectively. The difference in particle number concentration caused by tested dilution conditions is within $\pm 11\%$. Compared to the previous research, the GDI particles show the different characteristics to diesel particles in nuclei mode.

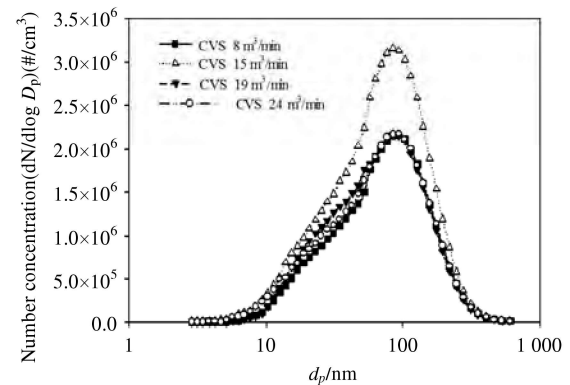


Fig. 1 Particle average size distributions obtained under different CVS flow rates

The results of particles number emission factor from 3 measurement systems are shown in Fig. 2. It is found that the results of PMP system which is recommended by the regulations have good repeatability. ELPI⁺ reports much higher particle number concentrations than those obtained by the PMP system. The differences are 23%-100%. PSD reports the highest particle number concentrations and its error bar shows the uncertainties in measurement. The large discrepancy occurs due to volatile materials which are removed in PMP systems. It indicates that PMP systems used by regulations underestimate the real emission level of GDI cars.

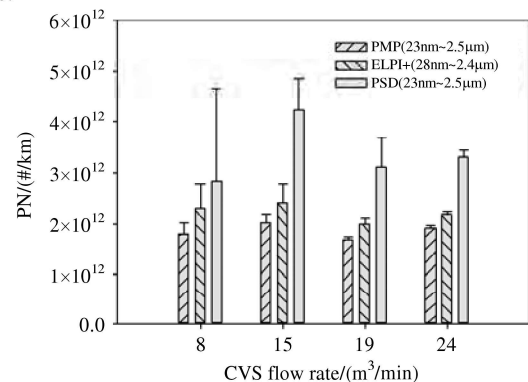


Fig. 2 Particle number concentrations under different CVS flow rates using PMP, ELPI⁺, and PSD