

# 国Ⅳ柴油公交车上海市道路 NO<sub>x</sub> 和超细颗粒排放

胡志远, 秦 艳, 谭丕强, 楼狄明

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 在上海市城区选定道路上开展国Ⅳ柴油公交车实际道路排放试验, 研究该车实际道路行驶工况氮氧化物(NO<sub>x</sub>)及超细颗粒数量排放特征。结果表明: 实际道路该车平均速度为 20.59 km·h<sup>-1</sup>, NO<sub>x</sub> 和超细颗粒数量排放因子分别为 9.33 g·(km·辆)<sup>-1</sup> 和 5.78×10<sup>14</sup> 个·(km·辆)<sup>-1</sup>; NO<sub>x</sub> 排放主要集中在中高车速(>35~55 km·h<sup>-1</sup>)、大加速度( $a>0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )工况, 超细颗粒数量排放主要集中在中高车速、大加速度工况; 加速行驶模式下 NO<sub>x</sub> 和超细颗粒数量排放较高, 不同行驶模式下粒径小于 100 nm 的颗粒数量排放差别较大。

**关键词:** 国Ⅳ柴油公交车; 上海市实际道路; NO<sub>x</sub>; 超细颗粒数量

中图分类号: U467.1<sup>+</sup>1

文献标志码: A

## On-road NO<sub>x</sub> and Ultrafine Particle Emission Characteristics of China IV Diesel Bus in Shanghai

HU Zhiyuan, QIN Yan, TAN Piqiang, LOU Diming

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The on-road emission test of a China IV diesel bus was conducted on some specific roads of Shanghai to study the real-world emission characteristics of NO<sub>x</sub> and ultrafine particle. The results show that the test bus has an average speed of 20.59 km·h<sup>-1</sup>, and NO<sub>x</sub> and ultrafine particle number emission factors are 9.33 g·(km·vehicle)<sup>-1</sup> and 5.78×10<sup>14</sup> particles (km·vehicle)<sup>-1</sup>, respectively. The on-road NO<sub>x</sub> emissions mainly concentrate at middle-high speed (>35~55 km·h<sup>-1</sup>) and large acceleration ( $a>0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) driving conditions, and ultrafine particle emissions concentrate at middle-high speed ( $v>40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) and large acceleration driving conditions. During acceleration mode, the emission rates of NO<sub>x</sub> and ultrafine particle number are relatively high. Ultrafine particle number emission rates of

four driving modes vary obviously when the particle size is smaller than 100 nm.

**Key words:** China IV diesel bus; real road of Shanghai; NO<sub>x</sub>; ultrafine particle number

公交车是城市的主要公共交通工具之一, 由于运行环境的特殊性, 公交车处于频繁启动、制动、怠速和低速行驶工况, 大部分时间在低速大转矩和怠速工况下运行。研究表明: 担负 70% 以上客运量的公交车是废气排放大户, 上海中心城区公交车氮氧化物(nitrogen oxides, NO<sub>x</sub>)、颗粒物排放分担率分别为 37.6% 和 45%<sup>[1]</sup>。

NO<sub>x</sub> 是燃烧过程各种氮氧化物的总称, 排气中的碳氢化合物(hydrocarbon, HC)和 NO<sub>x</sub> 在一定条件下, 经阳光照射会发生光化学反应, 生成以臭氧(O<sub>3</sub>)、醛类为主的光化学烟雾, 对人类伤害巨大, 是柴油公交车污染物控制的重点<sup>[2]</sup>。柴油公交车的颗粒物排放主要以粒径小于 0.1 μm 的超细颗粒物为主。颗粒物粒径越小, 其危害越大。因此, 研究国Ⅳ公交车的 NO<sub>x</sub> 和超细颗粒物排放特性, 是目前关注的热点。

我国采用等同欧盟法规的测试循环对轻型柴油车和重型柴油机进行型式认证和生产一致性检查, 其中重型车用发动机采用欧洲稳态工况(European steady state cycle, ESC)和欧洲瞬态工况(European transient cycle, ETC)循环。但是, 我国城市机动车行驶的实际工况与欧洲存在很大差异, 采用现行工况测试机动车尾气污染物排放无法得到准确的结论, 对制定具体的排放控制策略产生不利的影响<sup>[3]</sup>。同时, 重型车辆实际道路行驶时发动机的负荷和转速集中区域与现阶段发动机台架试验 ETC 工作区域不完全相同, 导致两者的排放特性不同<sup>[4-5]</sup>。因此,

研究柴油车实际道路排放特性是制定和评价城市机动车的尾气污染物排放,并进行有效控制的基础。

应用便携式排放测试设备(portable emission measurment system, PEMS)测量车辆的实际道路排放特征,具有方便、灵活、准确并能实时测量车辆道路排放情况等特点,成为车辆实际道路测试的一个重要发展方向<sup>[6]</sup>。国内外学者利用 PEMS 设备,分别对西班牙首都马德里市<sup>[7-8]</sup>的柴油公交车,北京市的国Ⅲ、国Ⅳ柴油公交车,压缩天然气公交车<sup>[9-11]</sup>,天津市的柴油公交车<sup>[12]</sup>的实际道路 CO, HC, NO<sub>x</sub> 和颗粒排放特征进行了试验研究。

本文结合上海市实际道路状况,采用一套便携式车载排放测试设备,以国Ⅳ柴油公交车为研究对象,选择上海市典型主干道、次干道、快速路构建试验路线,对国Ⅳ柴油公交车在上海市实际道路的

NO<sub>x</sub> 和超细颗粒排放特性进行试验研究,全面考察上海市国Ⅳ柴油公交车的实际道路 NO<sub>x</sub> 和超细颗粒排放特性。

## 1 试验设备及方案

### 1.1 试验路线

测试路线为上海市城区实际道路,覆盖快速路、主干路和次干路等主要道路类型,路线总长约为 22 km,快速路、主干路和次干路长度分别占路线总长的 26%,38% 和 35%。试验在 2012 年 5 月下旬进行,分别于 7:00—9:00 间的高峰和 9:30—11:30 间的平峰时段开展两次不同交通条件下的测试,测试路线如图 1 所示。



图 1 试验路线  
Fig.1 Test route

### 1.2 试验车辆

试验车辆为一辆装备选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)后处理装置,排放满足国Ⅳ标准的柴油公交车,其主要技术参数如表 1 所示。试验燃油为上海市市售硫含量低于  $50 \times 10^{-6}$  的沪Ⅳ柴油。

为真实反映公交车实际道路运行情况,试验时,测试车辆上装有若干桶水来模拟车辆的载人运行,水桶的总质量约为公交车最大载荷的 60%。试验过程中,车辆在试验路线的公交站点随机停靠 20 站来模拟站点乘客上下车。

### 1.3 试验方案

颗粒物测量采用美国 TSI 公司生产的颗粒粒径

分析仪(engine exhaust particle sizer, EEPS 3090)。EEPS 3090 粒径分析仪测量范围为 5.6~560.0 nm,它可在 0.1 s 内快速测取一个完整的颗粒粒径

表 1 试验车辆的主要技术参数

Tab.1 Technical specifications of the test bus	
项目	参数
发动机类型	涡轮增压中冷柴油机
排量/L	7.1
最大功率(转速)	213 kW (2 300 r·min <sup>-1</sup> )
最大扭矩(转速)	1200 N·m (1 050~1 650 r·min <sup>-1</sup> )
里程表读数/km	53 550
最大总质量/kg	17 500
长度/m	12
排放等级	国Ⅳ
后处理技术	选择性催化还原(SCR)

分布图谱,并同步输出 32 个粒径通道的颗粒数量和粒径分布数据。 $\text{NO}_x$  测量采用日本 Horiba 公司生产的车载排放测试仪(on-board system-2200, OBS-2200),它由抗震的气体分析仪单元、用来控制系统和记录数据的计算机、附属传感器和连接尾气管的皮托管流量计组成, $\text{NO}_x$  测量精度 $\leq 2\%$ 。研究表明,基于 OBS-2200 的车载排放测试系统对车辆气态排放物的测量与实验室定容稀释采样(constant volume sampling, CVS)系统之间的相关系数均在 0.9 以上<sup>[13]</sup>,可以有效地用于车辆实际道路排放的测量。运用全球定位系统(global positioning system, GPS)测量车辆运行中的行驶速度及经纬度,绝对位置误差小于 5 m,利用差分全球定位技术(differential global positioning system, DGPS)进行技术矫正,速度精度达到  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,时间分辨率可达  $1 \mu\text{s}$ 。试验设备及其连接布置如图 2 所示。

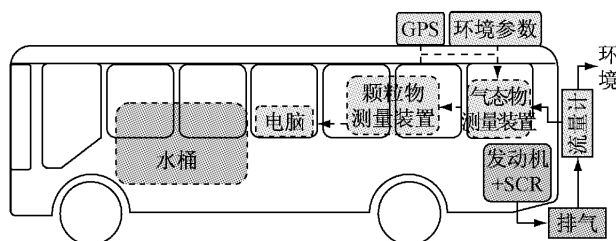


图 2 试验设备布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of PEMS

## 2 试验结果

### 2.1 实际道路行驶特征及排放因子

对获得的国Ⅳ柴油公交车实际道路行驶工况数据进行统计分析,得到测试车辆在上海市典型道路下的行驶特征,如表 2 所示。

表 2 国Ⅳ柴油公交车实际道路行驶特征

Tab.2 Driving characteristics of the test bus on each road type

项目	主干道	次干道	快速路	综合道路	中国典型城市公交循环
平均速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	17.45	15.45	55.19	20.59	15.89
怠速比例/%	31.29	25.63	0.24	25.73	29.00
匀速比例/%	9.45	8.82	31.63	11.52	11.40
加速比例/%	31.29	35.27	37.11	33.52	34.00
减速比例/%	27.97	30.28	31.02	29.23	25.60

从表 2 可知,试验公交车实际道路行驶具有平均车速低、怠速比例高、加减速频繁的行驶特点,与文献<sup>[14]</sup>的研究结果一致,说明此次试验能反映上

海公交车实际道路行驶情况;行驶特征参数值与中国典型城市公交循环<sup>[15]</sup>差异不大,说明试验工况具有较好的代表性。同时,由于试验道路中包括了快速路,且在快速路未进行靠站,试验公交车的平均速度较高。

图 3 为国Ⅳ柴油公交车实际道路行驶时主干道、次干道、快速路以及综合道路下各速度段的行驶比例,可见测试车辆低速( $>0 \sim 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )和中速( $>20 \sim 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )行驶比例分别达 53% 和 30%。表 3 为实际道路工况下  $\text{NO}_x$  和超细颗粒数量基于行驶里程的排放因子,其计算方法参考 GB 18352.5—2013《轻型车汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》<sup>[16]</sup>:某污染物排放因子 $(\text{g} \cdot \text{km}^{-1}) = \text{某污染物排放总量}(\text{g}) / \text{行驶里程}(\text{km})$ 。

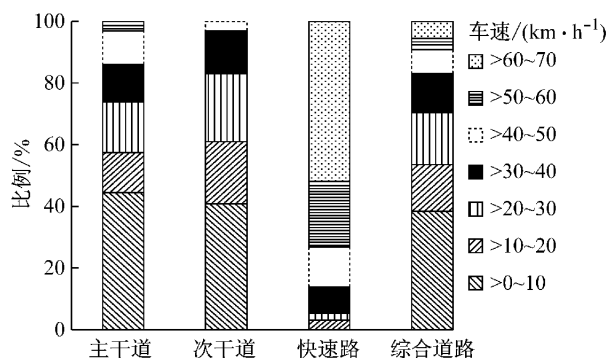


图 3 实际道路车速分布情况

Fig.3 Speed distribution of the tested bus based on real-world

表 3 实际道路平均排放因子

Tab.3 Emission factors of the test bus based on real-world

排放因子	主干道	次干道	快速路	综合道路
$\text{NO}_x / (\text{g} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1})$	10.47	11.29	5.19	9.33
颗粒数量/ $(\text{个} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1})$	$6.42 \times 10^{14}$	$6.49 \times 10^{14}$	$4.08 \times 10^{14}$	$5.78 \times 10^{14}$

结合表 2 和 3 可知, $\text{NO}_x$  和超细颗粒数量排放因子与车辆行驶速度有密切关系,快速路上车速高,则  $\text{NO}_x$  和超细颗粒排放低,而主干道和次干道车速低,其  $\text{NO}_x$  和超细颗粒排放均相对较高。测试车辆综合道路的  $\text{NO}_x$  排放因子为  $9.33 \text{ g} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ ,超细颗粒数量排放因子为  $5.78 \times 10^{14} \text{ 个} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ 。

### 2.2 实际道路的 $\text{NO}_x$ 和超细颗粒瞬态排放特征

为研究国Ⅳ柴油公交车实际道路的  $\text{NO}_x$  和超细颗粒数量瞬态排放特征,选择柴油公交车实际道

路行驶时,能反映公交车的主要行驶速度、加速度,涵盖怠速、加速、减速等主要行驶模式的800 s时间

片段,分析公交车实际道路瞬态行驶工况下的NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量排放特点,如图4所示。

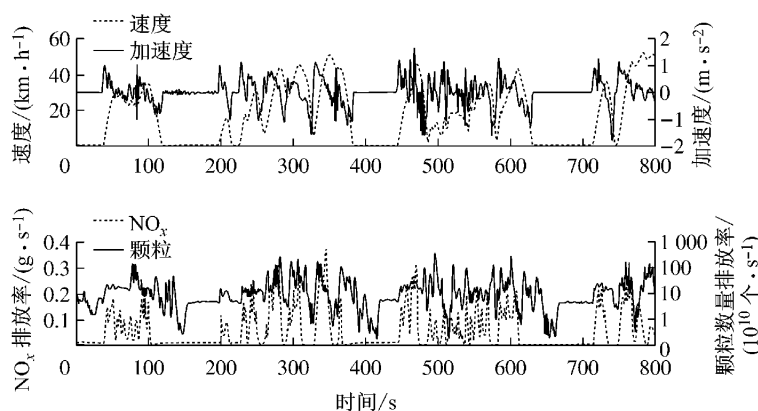


图4 国IV柴油公交车实际道路的NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量瞬态排放特性

Fig.4 Transient emission characteristics of NO<sub>x</sub> and ultrafine particle number of the test bus

由图4可知,试验国IV柴油公交车的NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量瞬态排放对加速度变化十分敏感。怠速时,NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量排放率分别保持在约0.01 g·s<sup>-1</sup>和 $>4 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{11}$ 个·s<sup>-1</sup>的水平;加速行驶时,NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量排放率显著增大,分别达到0.37 g·s<sup>-1</sup>和 $3.1 \times 10^{13}$ 个·s<sup>-1</sup>;减速行驶时,NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量排放率迅速下降,分别降低到0.06 g·s<sup>-1</sup>和 $1.7 \times 10^{10}$ 个·s<sup>-1</sup>。同时,与NO<sub>x</sub>瞬态工况的排放特点相比,超细颗粒数量排放从车辆减速行驶开始过渡到发动机怠速时出现较大波动,且经过相对较长的一段时间后恢复到怠速时的排放水平。

图5为测试车辆实际道路行驶时,其NO<sub>x</sub>排放率随车辆行驶速度-加速度的变化情况。可见,车辆实际道路行驶时,车辆加速行驶产生的NO<sub>x</sub>的排放率总体高于减速行驶,这与文献[17]的研究结果一致。NO<sub>x</sub>排放率先随着车辆行驶速度和加速度的增加而增大,在车速为55 km·h<sup>-1</sup>,加速度为0.7 m·

s<sup>-2</sup>左右时达到峰值,最大排放率为0.83 g·s<sup>-1</sup>。当车辆以高车速、大加速度行驶时,由于此时的喷油量大幅度增加,局部出现过浓混合气的可能性增大,燃烧不完全,NO<sub>x</sub>排放降低。

图6为测试车辆超细颗粒数量排放率随车辆行驶速度-加速度的变化情况。可见,当车辆的行驶速度较低时( $\leq 20$  km·h<sup>-1</sup>),超细颗粒数量排放率较低(约 $2.4 \times 10^{12}$ 个·s<sup>-1</sup>),且随着加速度变化其波动较小;车辆减速行驶的超细颗粒数量排放低于加速行驶,且随车速变化波动较小;当车速 $>20$  km·h<sup>-1</sup>、加速度 $>0$  m·s<sup>-2</sup>时,随着车辆行驶速度和加速度的增大,其超细颗粒数量排放显著增加。超细颗粒数量排放率峰值出现在车速为60 km·h<sup>-1</sup>、加速度为0.6 m·s<sup>-2</sup>处,其值为 $3.97 \times 10^{13}$ 个·s<sup>-1</sup>。因此,超细颗粒数量排放主要集中在中高车速、大加速度工况。这是因为,加速操作导致喷油量增加,局部出现过浓混合气的可能性增大,燃烧不完全导致颗粒数量排放剧增<sup>[18]</sup>,尤其在高速下的急加速操作,

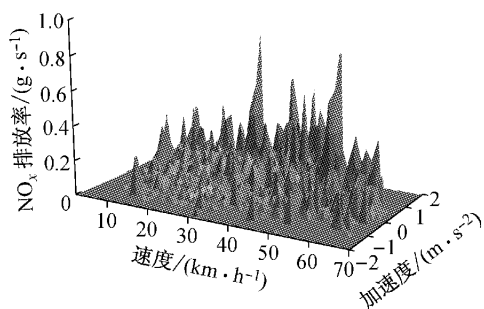


图5 NO<sub>x</sub>排放率随速度-加速度的变化

Fig.5 Dependence of NO<sub>x</sub> emission rate on vehicle speed and acceleration

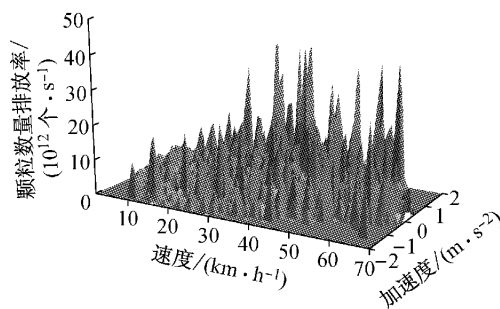


图6 超细颗粒数量排放率随速度-加速度的变化

Fig.6 Dependence of ultrafine particle number emission rate on vehicle speed and acceleration

产生高颗粒数量排放率的可能性最大。

### 2.3 不同行驶模式的 NO<sub>x</sub> 和超细颗粒排放特征

将测试车辆实际道路行驶模式划分为怠速( $v=0$  且  $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \leq a \leq 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )、匀速( $v \neq 0$  且  $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \leq a \leq 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )、加速( $a > 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )和减速( $a < -0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )四种行驶模式,分析国IV柴油公交车实际道路怠速、匀速、加速和减速行驶时的 NO<sub>x</sub> 和超细颗粒数量排放特性,分别如图7和8所示。

由图7可见,国IV柴油公交车实际道路怠速行驶模式的 NO<sub>x</sub> 排放率最低,减速模式次之,加速模式的 NO<sub>x</sub> 排放率最高。这是因为车辆怠速或减速行驶时,喷油量较少,燃烧温度低,不利于 NO<sub>x</sub> 的生成。由表2可知,试验公交车匀速行驶模式多集中于快速路,且平均车速较高,使用高速档的机率增大,此时发动机缸内燃烧温度较高,NO<sub>x</sub> 生成量相对较大。当车辆加速行驶时,喷油量增加,发动机热负荷变大,NO<sub>x</sub> 生成量增加。

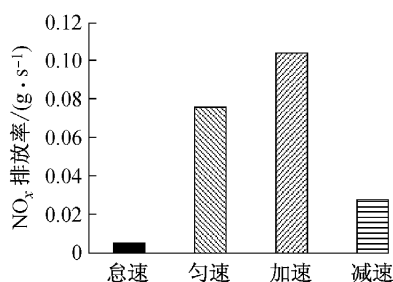


图7 不同行驶模式的 NO<sub>x</sub> 排放

Fig.7 NO<sub>x</sub> emission rate at different driving modes

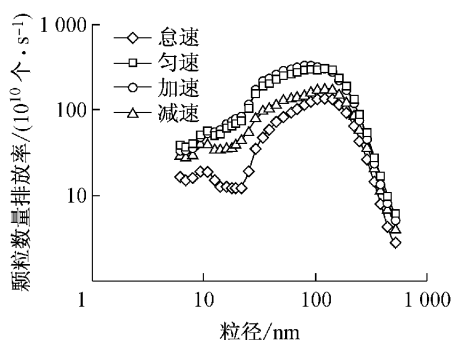


图8 不同行驶模式的超细颗粒数量排放粒径分布

Fig.8 Ultrafine particle number size distribution at different driving modes

由图8可见,四种行驶模式下超细颗粒数量粒径分布趋势相同,呈双峰对数分布,第1个峰值粒径在10 nm附近,第2个峰值粒径在100~110 nm之间。相比于北京市国III公交车实际道路颗粒物排放结果<sup>[19]</sup>,本次试验测得的国IV柴油公交车的核模态

颗粒大幅度降低,这是因为本次测试车辆为采用选择性催化还原后处理技术的国IV柴油公交车,车辆本身的颗粒物排放较低,且使用沪IV柴油的硫含量( $<50 \times 10^{-6}$ )较低,较低的含硫量可降低核模态颗粒的形成<sup>[19]</sup>。从颗粒排放数量上看,加速模式的超细颗粒数量排放率最高,其次为匀速模式和减速模式,怠速模式的超细颗粒数量排放率最低。5.6~560.0 nm 粒径分布范围内,当颗粒径小于100 nm时,不同行驶模式的颗粒数量排放差别较大,怠速、匀速、加速、减速行驶模式平均超细颗粒数量排放率分别为  $0.9 \times 10^{12} \text{ 个} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $2.8 \times 10^{12} \text{ 个} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $3.1 \times 10^{12} \text{ 个} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $1.6 \times 10^{12} \text{ 个} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当颗粒粒径大于100 nm时,不同行驶模式的颗粒数量排放基本相当。

### 2.4 比功率对 NO<sub>x</sub> 与超细颗粒数量排放率的影响

比功率(vehicle specific power, VSP)综合反映了车辆实际行驶时速度、加速度、坡度以及风阻等参数,其定义为单位质量机动车的瞬时输出功率,单位为  $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$ 。试验车辆为柴油公交车,其 VSP 计算公式为<sup>[20]</sup>

$$\text{VSP} = v(a + gs + gC_R) + \frac{1}{2} \rho_a \frac{C_D A}{m} v^3 = v(a + 0.09199) + 0.00169v^3 \quad (1)$$

式中: $v$  为行驶速度, $a$  为行驶加速度, $g$  为重力加速度( $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ), $s$  为道路坡度(量纲一,取零), $C_R$  为滚动阻力系数(量纲一,取0.00938), $\rho_a$  为环境空气密度(20℃时为  $1.207 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), $C_D$  为风阻系数(量纲一,取0.6), $A$  为车辆迎风面积(取  $7 \text{ m}^2$ ), $m$  为车辆总质量(取运输类客车质量  $14900 \text{ kg}$ )。

为提高分析精度,在划分 VSP 区间时,以  $1 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$  为步长。在计算统计过程中发现,约99.3%的 VSP 集中在  $-13 \sim 11 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$ ,其他数据对排放贡献较少,这与文献<sup>[21]</sup>中所得的 VSP 分布比例一致,因此选取 VSP 在  $-13 \sim 11 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$  区间的的数据,即可分析测试车辆实际道路行驶时 NO<sub>x</sub> 和超细颗粒数量排放率随 VSP 的变化规律,如图9所示。

由图9可见,VSP=0  $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$  时所占比例最高,约37%,表明测试车辆实际道路下怠速行驶及低速、低加速度行驶的比例较高。在所取 VSP 区间内,当 VSP<0  $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$  时,NO<sub>x</sub> 和超细颗粒数量排放相对较低且变化幅度不大;当 VSP>0  $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$  时,NO<sub>x</sub> 和超细颗粒数量排放随 VSP 的增大而显著增加。这是因为,大部分负值 VSP 对应着减速行驶模式,此时发动机转速急速降低,NO<sub>x</sub> 和超细颗粒数量排放率较低;而正值 VSP 数值越大,机动车越易处

于大加速度工况,NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量排放率增大<sup>[22]</sup>.

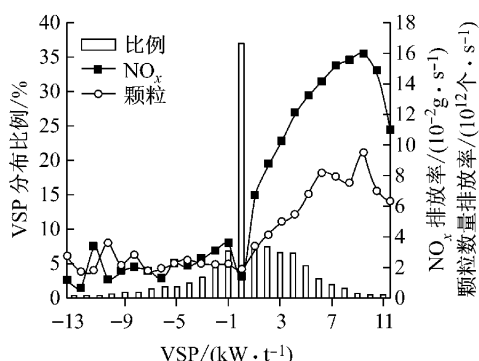


图9 VSP对NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量排放率的影响

Fig.9 Effect of VSP on NO<sub>x</sub> and ultrafine particle number emission rates

图10为超细颗粒数量粒径分布随VSP的变化情况.由图10可知,当VSP=0 kW·t<sup>-1</sup>时,各粒径区间的颗粒数量排放率均最低;当VSP<0 kW·t<sup>-1</sup>时,各粒径区间的颗粒数量排放率较低,且随VSP的增大,颗粒数量的变化幅度不大;当VSP>0 kW·t<sup>-1</sup>,随着VSP的增大,粒径为>30~120 nm的颗粒数量排放率显著增加,且聚集态颗粒(粒径大于50 nm)数量排放峰值对应的颗粒粒径减小.这是因为,随着VSP的增加,公交车越易为大加速度工况,喷油量增加,混合气局部过浓的可能性增大,高温缺氧条件下发生部分氧化和热裂解,聚集态颗粒的排放增加,峰值粒径变小<sup>[23]</sup>.

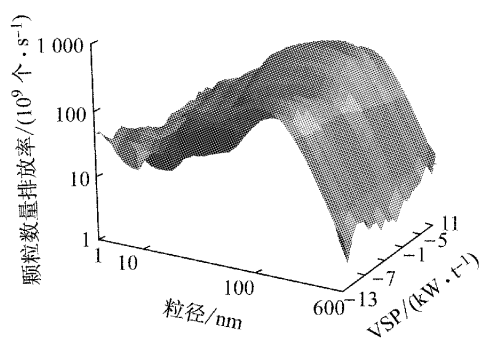


图10 VSP对超细颗粒数量粒径分布的影响

Fig.10 Effect of VSP on ultrafine particle number size distribution

### 3 结论

(1)试验国IV柴油公交车实际道路行驶具有平均车速低、怠速比例高、加减速频繁的行駛特点,平均行驶速度为20.59 km·h<sup>-1</sup>,低速(>0~20 km·

h<sup>-1</sup>)和中速(>20~40 km·h<sup>-1</sup>)行驶比例分别达53%和30%.

(2)试验国IV柴油公交车实际道路NO<sub>x</sub>排放因子为9.33 g·(km·辆)<sup>-1</sup>,超细颗粒数量排放因子为5.78×10<sup>14</sup>个·(km·辆)<sup>-1</sup>.

(3)试验国IV柴油公交车的实际道路NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量瞬态排放对加速度变化十分敏感;NO<sub>x</sub>排放主要集中在中高车速(>35~55 km·h<sup>-1</sup>)、大加速度(a>0.5 m·s<sup>-2</sup>)工况;超细颗粒数量排放主要集中在中高车速、大加速度工况.

(4)怠速、匀速、加速、减速四种行驶模式中,怠速的NO<sub>x</sub>和超细颗粒排放率最低,减速次之,加速最高.四种行驶模式下超细颗粒数量粒径分布均呈双峰对数分布,第1个峰值粒径在10 nm附近,第2个峰值粒径在>100~110 nm之间.不同行驶模式小于100 nm的颗粒数量排放差别较大.

(5)当VSP<0 kW·t<sup>-1</sup>时,试验国IV柴油公交车的NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量排放率较低,且变化幅度不大;当VSP>0 kW·t<sup>-1</sup>时,NO<sub>x</sub>和超细颗粒数量排放随VSP的增大而显著增加,聚集态颗粒排放数量峰值对应的颗粒粒径变小.

### 参考文献:

- [1] 胡志远,谭丕强,楼狄明,等.在用柴油公交车燃用天然气合成油的试验研究[J].汽油技术,2008(4):41.  
HU Zhiyuan, TAN Piqiang, LOU Diming, et al. Experimental research of in-used diesel bus fueled by biodiesels [J]. Automobile Technology, 2008(4): 41.
- [2] 王建强,杨建军,高继东,等.柴油车尾气排放控制技术进展[J].科技导报,2011,29(11):67.  
WANG Jianqiang, YANG Jianjun, GAO Jidong, et al. The progress of diesel vehicle emissions and control technique [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(11): 67.
- [3] 王云鹏,郭栋,隗海林,等.城市分等级道路车辆运行速度对排放的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(7):110.  
WANG Yunpeng, GUO Dong, KUI Hailin, et al. Impact of driving speed on vehicle emission on four different graded roads [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(7): 110.
- [4] 李孟良,苏茂辉,秦孔建,等.实际行驶工况下柴油车发动机负荷分布及排放[J].江苏大学学报:自然科学版,2007,28(3):213.  
LI Mengliang, SU Maohui, QIN Kongjian, et al. Diesel engine load distribution and exhaust emissions under real-world driving condition [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(3): 213.
- [5] 李孟良,苏茂辉,马金荣,等.北京地区实际行驶工况下柴油机负荷分布研究[J].车用发动机,2007(1):27.  
LI Mengliang, SU Maohui, MA Jinrong, et al. Research on

- diesel engine load distribution under the Beijing district real-road driving cycle[J]. *Vehicle Engine*, 2007(1): 27.
- [6] 张雄,李孟良,乔维高. 汽车排放污染物测试的发展方向:车载排放测试[J]. *北京汽车*, 2006(6): 34.  
ZHANG Xiong, LI Mengliang, QIAO Weigao. The development direction of vehicle emission measurement technology: on-board emission measurement system[J]. *Beijing Automotive Engineering*, 2006(6): 34.
- [7] López J M, Jiménez F, Aparicio F, *et al.* On-road emissions from urban buses with SCR + Urea and EGR + DPF systems using diesel and biodiesel[J]. *Transportation Research: Part D*, 2009, 14(1): 1.
- [8] 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.
- [9] Liu Z H, Ge Y S, Johnswon K C, *et al.* Real-world operation conditions and on-road emissions of Beijing diesel buses measured by using portable emission measurement system and electric low-pressure impactor [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(8): 1476.
- [10] Wang A J, Ge Y S, Tan J W, *et al.* On-road pollutant emission and fuel consumption characteristics of buses in Beijing[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(3): 419.
- [11] 刘双喜,陈杰峰,李孟良,等. ELPI在重型车车载PM测试中的应用研究[J]. *汽车工程*, 2007, 29(7): 582.  
LIU Shuangxi, CHEN Jiefeng, LI Mengliang, *et al.* A study on the application of electrical low pressure impactor to the on-board measurement of particulate matter in heavy duty vehicle [J]. *Automotive Engineering*, 2007, 29(7): 582.
- [12] 秦孔建,高俊华,高继东,等. 重型车车载排放测试系统的集成和验证[J]. *汽车工程*, 2009, 31(11): 1081.  
QIN Kongjian, GAO Junhua, GAO Jidong, *et al.* Integration and validation of an on-board emission measurement system for heavy-duty vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(11): 1081.
- [13] 秦孔建,李孟良,高继东,等. 天津市在用车辆排放车载测试试验研究[J]. *汽车工程*, 2007, 29(9): 771.  
QIN Kongjian, LI Mengliang, GAO Jidong, *et al.* An experimental study on the on-board measurement of the emission for in-use vehicles in Tianjin city[J]. *Automotive Engineering*, 2007, 29(9): 771.
- [14] 杜爱民,步曦,陈礼,等. 上海市公交车行驶工况的调查和研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(7): 943.  
DU Aiming, BU Xi, CHEN Li, *et al.* Investigation on bus driving cycles in Shanghai[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2006, 34(7): 943.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 19754—2005 重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 19754—2005 Test methods for energy consumption of heavy-duty hybrid electric vehicles [S]. Beijing: China Standards Press, 2005
- [16] 中华人民共和国环境保护局,国家质量监督检验检疫总局. GB 18352.5—2013 轻型车汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18352.5—2013 Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [17] 高继东,秦孔建,梁荣亮,等. 北京道路工况下公交车PM和NO<sub>x</sub>排放特性试验研究[J]. *汽车工程*, 2011, 33(9): 757.  
GAO Jidong, QIN Kongjian, LIANG Rongliang, *et al.* An experimental study on the PM and NO<sub>x</sub> emission characteristics of public bus in real driving condition in Beijing [J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33(9): 757.
- [18] 李旭海. 北京市实际道路公交车颗粒物排放研究[J]. *北京汽车*, 2008(1): 32.  
LI Xuhai. A study on PM emissions of public bus in real driving condition in Beijing[J]. *Beijing Automotive Engineering*, 2008(1): 32.
- [19] 陈文森,王建昕,帅石金. 柴油硫含量对排放特性的影响[J]. *内燃机工程*, 2008, 29(4): 41.  
CHEN Wenmiao, WANG Jianxin, SHUAI Shijin. Effect of sulfur content in diesel fuel on engine performance[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2008, 29(4): 41.
- [20] Andrei P. Real world heavy-duty vehicle emissions modeling [D]. Morgantown, WV: West Virginia University, 2001.
- [21] 郝艳召,于雷,宋国华,等. 基于比功率参数的北京市柴油公交车行驶和排放特征研究[J]. *汽车工程*, 2010, 32(2): 103.  
HAO Yanzhao, YU Lei, SONG Guohua, *et al.* A Study on driving and emission features of diesel buses in Beijing based on VSP parameter[J]. *Automotive Engineering*, 2010, 32(2): 103.
- [22] 郭栋,王云鹏,邹广德,等. 基于车载测试的机动车比功率与排放关系的研究[J]. *汽车工程*, 2012, 34(1): 18.  
GUO Dong, WANG Yunpeng, ZOU Guangde, *et al.* A study on the correlation between VSP and vehicle emission based on on-board emission test[J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34(1): 18.
- [23] 李新令,黄震,王嘉松,等. 柴油机排气颗粒浓度和粒径分布特征试验研究[J]. *内燃机学报*, 2007, 25(2): 113.  
LI Xinling, HUANG Zhen, WANG Jiasong, *et al.* Investigation on concentrations and size distribution characteristic of particles from diesel engine[J]. *Transactions of CSICE*, 2007, 25(2): 113.