

# 在用共轨柴油机燃用沪四柴油的超细颗粒排放

胡志远, 杨 奇, 谭丕强, 楼狄明

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 以一台满足国 III 排放的在用共轨柴油机为试验样机, 采用排气颗粒数量及粒径分析仪, 研究了该机燃用国二柴油和沪四柴油欧洲稳态工况(ESC)循环下的超细排气颗粒数量和粒径分布特性。结果表明: ESC 循环 A, B, C 转速工况下, 随着发动机负荷的增加, 该机燃用国二柴油、沪四柴油的超细颗粒数量排放降低; 燃用国二柴油超细颗粒的粒径分布呈双峰对数分布, 除怠速工况外, 燃用沪四柴油超细颗粒的粒径分布呈单峰对数分布; 与国二柴油比较, 该机燃用沪四柴油超细颗粒总颗粒数量、核态颗粒数量排放降低, 排气颗粒的几何平均粒径增大。

**关键词:** 共轨柴油机; 柴油; 超细颗粒; 颗粒数量

**中图分类号:** TK421<sup>+</sup>.5; U469.74

**文献标志码:** A

## Ultrafine Particle Number Emission and Size Distribution of an On-used Common Rail Diesel Engine Fueled with Shanghai IV Diesel

HU Zhiyuan, YANG Qi, TAN Piqiang, LOU Diming

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

**Abstract:** An on-used common rail diesel engine which met the national standard III of China was used as the test prototype, and the number and size distribution characteristics of ultrafine particle of the diesel engine fueled with China II and Shanghai IV diesel were carried out respectively under Europe steady state cycle (ESC), by using an engine exhaust particle sizer (EEPS). The test result shows that the particle number emission of the diesel engine fueled with either China II or Shanghai IV diesel at A, B, and C speed cases of ESC reduces respectively as the load increases. The exhausted particle size distribution of the engine fueled with China II diesel is obviously in bimodal logarithmic distribution whereas it is in unimodal logarithmic distribution when the engine is fueled with Shanghai IV diesel under ESC except for idle case. Compared with China II diesel, the total ultrafine particle number emission, the nucleation mode particle number emission of the diesel engine

reduce together, while geometric mean diameter of the exhaust particle becomes larger. Therefore, the engine's nucleation particle number emission reduces obviously when the engine is fueled with Shanghai IV diesel.

**Key words:** common rail diesel engine; diesel; ultrafine particle; particle number

随着工业化、城市化进程的高速发展, 我国细颗粒物等大气污染物的排放量已居全球前列。研究表明, 颗粒物的危害性大小与颗粒的直径、数量密切相关。颗粒越细, 其在空气中悬浮时间越长, 则越容易吸入人体肺部而引起疾病<sup>[1-2]</sup>。因此, 超细颗粒物的综合治理已成为国家政策和民生关注的焦点, 是当前社会各界高度关注和亟待解决的重大环境问题。

空气中的细颗粒物人为一次排放源主要来自机动车尾气、燃煤烟尘、建筑扬尘以及冶金水泥等, 机动车尾气是目前各大城市大气细颗粒污染的最主要来源之一, 尤以柴油车的尾气细颗粒物排放最为突出。因此, 采取措施降低柴油机的细颗粒物数量排放是减少空气中细颗粒物数量的有效途径之一。

燃油品质是影响柴油机颗粒物排放的重要因素, 高品质柴油应该在适当提高十六烷值的同时较大幅度地降低硫含量<sup>[3-5]</sup>。目前, 国内外学者有关柴油机颗粒排放特性研究主要包括发动机燃用低硫柴油的外特性、负荷特性等稳态工况颗粒数量排放特性<sup>[6-7]</sup>, 瞬态工况烟度排放及颗粒数量排放特性<sup>[8-9]</sup>, 高十六烷值<sup>[10]</sup>、低芳烃含量<sup>[11]</sup>对柴油机颗粒物排放特性的影响等。有关柴油机在欧洲稳态工况(ESC)循环下燃油品质对颗粒物数量和粒径分布影响的工作少见报道, 仍缺乏 ESC 循环工况下油品硫含量对柴油机颗粒排放属性的认识。

本文对一台在用电控高压共轨柴油机分别燃用国二柴油和沪四柴油的超细颗粒数量排放特性进行

试验研究,系统考察该共轨柴油机燃用国二柴油、沪四柴油 ESC 循环工况下的超细颗粒数量、颗粒粒径分布及质量排放特性,考察沪四柴油对在用柴油车超细颗粒物排放的降低效果。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验样机及设备

试验样机为一台在用车使用的,满足国Ⅲ排放标准、直列四缸四冲程、涡轮增压中冷、高压共轨直喷式柴油机。该柴油机的总排量为 5.3 L,缸径和行程分别为 114 和 130 mm,压缩比为 18:1,标定功率为 132 kW(2 300 r·min<sup>-1</sup>),最大扭矩为 660 N·m(1 400~1 600 r·min<sup>-1</sup>)。

颗粒数量和粒径分布测试仪器为美国 TSI 公司的发动机排气颗粒数量和粒径分析仪(EEPS),该仪器可快速测取柴油机的排气颗粒数量及粒径分布,测量粒径范围为 5.6~560 nm,在 0.1 s 内可测取一个完整的颗粒粒径分布图谱,并同步输出 32 个粒径通道的颗粒数量和粒径分布数据。排气颗粒测试系统示意图如图 1 所示。

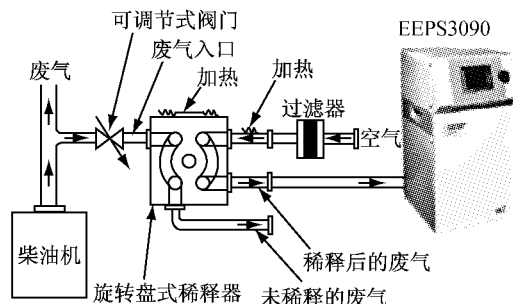


图1 排气颗粒粒径分布测试系统

Fig.1 Exhaust particle sizer testing system

### 1.2 试验燃料及方案

试验燃料分别为国二柴油和沪四柴油,其主要理化指标如表 1 所示。

表1 试验燃料的主要理化指标

Tab.1 Main physical and chemical characteristics of diesel

项目	国二柴油	沪四柴油
密度(20℃)/(g·L <sup>-1</sup> )	839.9	824.1
黏度(20℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	4.597	4.286
硫含量/10 <sup>-6</sup>	1 060	30
芳烃含量/%	30.0	23.3
十六烷值	51.2	54.7
C含量/%	86.24	84.60
H含量/%	12.95	14.28
低热值/(MJ·L <sup>-1</sup> )	38.399	38.069

试验根据 GB17691—2005 规定的 ESC 循环进行,试验中的 A,B,C 转速分别为 1 425,1 765 和 2 105 r·min<sup>-1</sup>。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 超细排气颗粒数量

图 2 为该机燃用国二柴油和沪四柴油 ESC 循环各个工况的核模态颗粒(粒径≤50 nm)和聚集态颗粒(粒径>50 nm)的数量排放特性。其中,A25,A50,A75 和 A100 分别代表 ESC 循环工况 A 转速下(1 425 r·min<sup>-1</sup>)负荷分别为 25%,50%,75%和 100%的工况点;B25,B50,B75 和 B100 分别代表 ESC 循环工况 B 转速(1 765 r·min<sup>-1</sup>)下负荷分别为 25%,50%,75%和 100%的工况点;C25,C50,C75 和 C100 分别代表 ESC 循环工况 C 转速(2 105 r·min<sup>-1</sup>)下负荷分别为 25%,50%,75%和 100%的工况点。

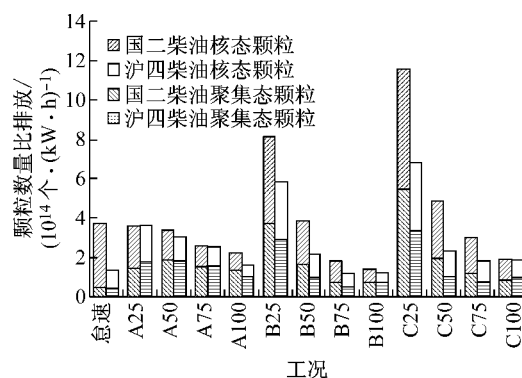


图2 ESC循环各工况下核态、聚集态颗粒数量比排放

Fig.2 Emission characteristics of nuclei mode and accumulation mode particles in different cases during ESC

由图 2 可见,ESC 循环 A,B,C 转速工况下,随着发动机负荷的增加,国二柴油和沪四柴油的颗粒数量比排放降低。这是因为,随着负荷的增加,喷油量增加,排气颗粒数量浓度增大;同时,随着负荷的增加,发动机产生的有效功率增大,其颗粒数量比排放随着发动机负荷的增加而降低<sup>[12]</sup>。

由图 2 可见,ESC 循环工况下,与国二柴油比较,沪四柴油的总颗粒数量比排放、核态颗粒数量比排放降低,且核态颗粒的降低幅度较大。大部分工况的聚集态颗粒数量比排放降低,个别工况(A25)的聚集态颗粒数量比排放有所升高。因此,沪四柴油可降低柴油机的超细颗粒数量排放。这是因为,核态颗粒

由燃烧室内形成的一次颗粒及硫酸盐、碳氢等物质成核作用而形成的二次颗粒组成<sup>[12]</sup>。研究表明,柴油中 1%~3% 的硫燃烧后直接转化为硫酸盐<sup>[13]</sup>,且硫酸盐是发动机排放的超细颗粒物的重要组成部分<sup>[14]</sup>。由于沪四柴油的硫含量较低,燃烧产生的硫酸盐排放量较少,超细颗粒数量比排放较低。另一方面,直喷式柴油机未燃碳氢的浓度随柴油十六烷值升高而减小<sup>[15]</sup>,沪四柴油十六烷值较高,未燃碳氢减少,降低了由碳氢成核作用而形成的二次颗粒的产生。两方面因素综合作用,沪四柴油的核态颗粒数量比排放降低。同时,沪四柴油的运动黏度低、密度小,喷雾及雾化效果较高,有利于柴油在缸内的燃烧,降低柴油机的聚集态颗粒排放。同时,沪四柴油的芳烃含量较低,多环芳烃是聚集态颗粒中碳烟的先导物<sup>[16]</sup>,有利于降低柴油机的聚集态颗粒排放。另外,沪四柴油的体积热值略低,为保证发动机的功率,需喷入更多体积的柴油,几个因素综合作用,可能是导致部分工况下沪四柴油聚集态颗粒数量排放略有增加的原因。

ESC 十三工况,该机燃用国二柴油、沪四柴油的颗粒物数量比排放如表 2 所示。可见,ESC 循环工况下,该机燃用沪四柴油的核态颗粒、聚集态颗粒和总颗粒数量比排放均降低。

表 2 ESC 循环工况超细颗粒数量比排放

Tab.2 Ultrafine particle number emission during ESC			
柴油名称	核态颗粒/(个· (kW·h) <sup>-1</sup> )	聚集态颗粒/(个· (kW·h) <sup>-1</sup> )	总颗粒/(个· (kW·h) <sup>-1</sup> )
国二柴油	2.23×10 <sup>14</sup>	1.59×10 <sup>14</sup>	3.82×10 <sup>14</sup>
沪四柴油	1.28×10 <sup>14</sup>	1.23×10 <sup>14</sup>	2.51×10 <sup>14</sup>

## 2.2 超细排气颗粒数量的粒径分布

图 3 为该机燃用国二柴油和沪四柴油 ESC 循环工况超细排气颗粒数量的粒径分布特性。图中,横坐标表示颗粒粒径大小,纵坐标表示颗粒数浓度大小,横、纵坐标均为对数坐标。

由图 3 可见,ESC 循环工况下,该机燃用国二柴油的排气颗粒数量的粒径分布呈明显的双峰对数分布,排气颗粒在核态颗粒和聚集态颗粒形成两个数量排放峰值。其中,核态颗粒数量峰值对应的颗粒粒径约 6~9 nm,聚集态颗粒数量峰值对应的颗粒粒径约 52~60 nm。该机燃用沪四柴油后,除怠速工况外,ESC 其他工况排气颗粒数量的粒径分布呈明显的单峰对数分布,排气颗粒数量峰值对应的颗粒粒径约 45~52 nm;与燃用国二柴油相同,该机燃用沪四柴油怠速工况排气颗粒数量的粒径分布呈明显的双峰对数分布,核态颗粒数量峰值对应的颗粒粒径

约 9 nm,聚集态颗粒数量峰值对应的颗粒粒径约 52 nm。综合图 3a~m 可见,该机燃用沪四柴油后,排气颗粒数量的粒径分布由双峰对数分布调整为单峰对数分布,小颗粒(核态颗粒)数量排放降低,除个别工况外,大部分工况的聚集态颗粒数量排放亦降低。

## 2.3 超细颗粒几何平均粒径

几何平均粒径既反映了颗粒数浓度极大值的位置,又综合了粒径分布的形态,其计算公式如下:

$$D_g = \exp[(\sum n_i \ln d_i)/N] \quad (1)$$

式中: $D_g$  为几何平均粒径, nm;  $n_i$  为第  $i$  个粒径区间的颗粒数;  $d_i$  为第  $i$  个粒径区间的特征粒径, nm;  $N$  为总颗粒数, 即  $\sum n_i$ 。图 4 为 ESC 循环工况,该机燃用国二柴油和沪四柴油排气颗粒的几何平均粒径。

由图 4 可见,ESC 循环工况,除怠速工况外,该机燃用国二柴油排气颗粒的几何平均粒径为 40~53 nm,燃用沪四柴油排气颗粒的几何平均粒径为 42~56 nm;怠速工况下,该机燃用国二柴油的几何平均粒径约为 14 nm,燃用沪四柴油的几何平均粒径约为 22 nm。与国二柴油比较,燃用沪四柴油后,由于核态颗粒数量排放的降低,几何平均粒径增大。

## 2.4 超细颗粒质量排放特性

ESC 循环工况,该机燃用国二柴油、沪四柴油的超细颗粒物质量排放分别为 0.083 g·(kW·h)<sup>-1</sup> 和 0.074 g·(kW·h)<sup>-1</sup>,与国二柴油比较,沪四柴油的颗粒物质量排放降低。图 5 为 ESC 循环工况,该机燃用国二柴油和沪四柴油排气颗粒中超细颗粒的质量排放。

由图 5 可见,ESC 循环工况,该机燃用国二柴油与沪四柴油的超细颗粒物质量排放主要为颗粒粒径 > 50 nm 的聚集态颗粒,核态颗粒质量排放仅占其颗粒质量排放的 3%~10%。与国二柴油比较,该机燃用沪四柴油后,个别工况(低转速中低负荷、高转速全负荷)的超细颗粒质量排放略有增加,其他工况的超细颗粒质量排放降低。

## 3 结论

(1) ESC 循环 A,B,C 转速工况下,随着发动机负荷的增加,该机燃用国二柴油、沪四柴油的超细颗粒数量比排放降低。

(2) 与国二柴油比较,该机燃用沪四柴油 ESC 循环工况的超细颗粒总数量、核态颗粒数量比排放降低,且核态颗粒数量比排放的降低幅度较大。

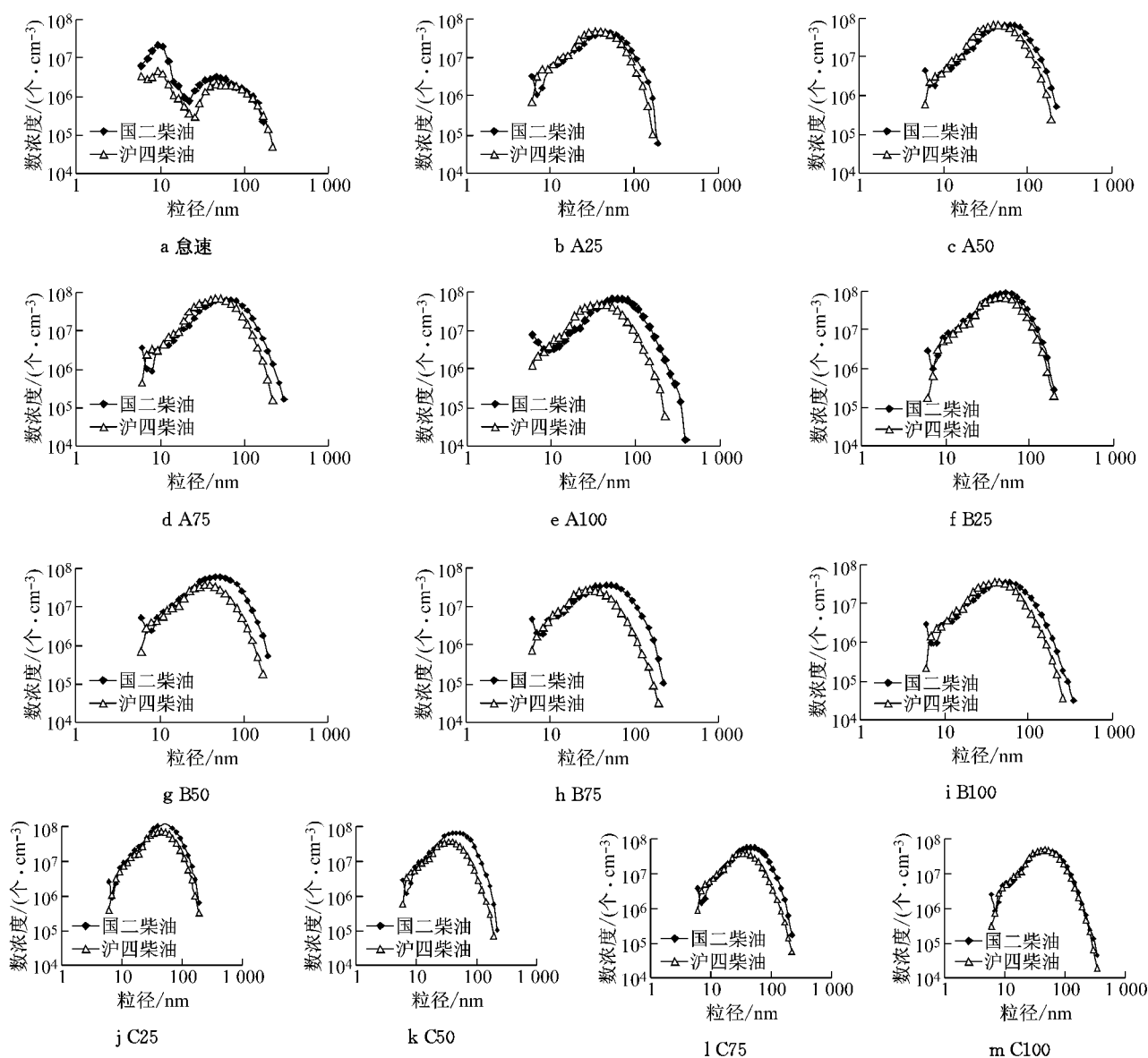


图 3 ESC 循环工况超细颗粒数量的粒径分布特性

Fig.3 Size distribution of exhaust ultrafine particle number concentration during ESC

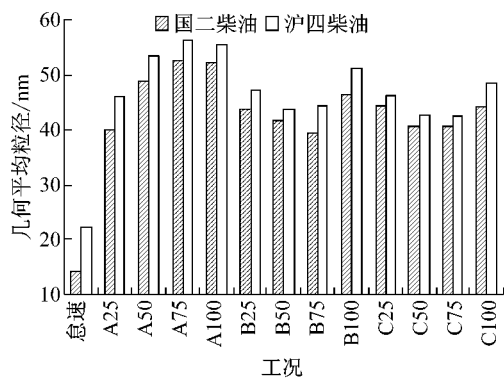


图 4 国二柴油和沪四柴油超细颗粒几何平均粒径

Fig.4 Ultrafine particles' geometric mean diameter characteristics of the engine fueled with China II diesel and Shanghai IV diesel

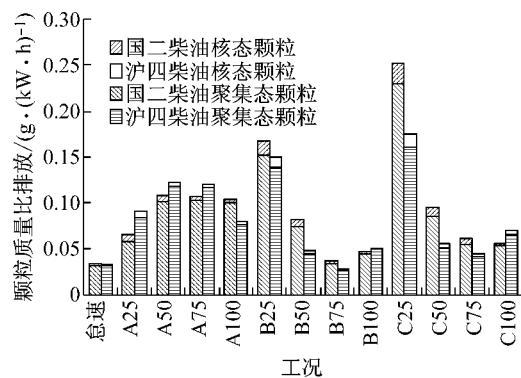


图 5 国二柴油和沪四柴油超细颗粒质量特性

Fig.5 Ultrafine particles' mass characteristics of the engine fueled with China II diesel and Shanghai IV Diesel

(3) ESC 循环工况下,该机燃用国二柴油超细颗粒数量的粒径分布呈明显的双峰对数分布;燃用沪四柴油怠速工况外超细颗粒数量的粒径分布呈明显的单峰对数分布,其他工况超细颗粒数量的粒径分布呈明显的单峰对数分布。

(4) ESC 循环工况,该机燃用国二柴油、沪四柴油超细颗粒的几何平均粒径为 40~56 nm,怠速工况超细颗粒的几何平均粒径较小,与国二柴油比较,沪四柴油超细颗粒的几何平均粒径增大。

(5) 与国二柴油比较,该机燃用沪四柴油 ESC 循环工况低转速中低负荷、高转速全负荷的超细颗粒物质量排放略有增加,ESC 循环工况加权超细颗粒物质量排放降低。

## 参考文献:

- [1] Johnson T V. Diesel emission control in review [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2009, 1(1): 68.
- [2] Ibal M A, Wichmann H E, Kreyling W, et al. Epidemiological evidence on health effects of ultrafine particles [J]. Aerosol Med, 2002, 15(2): 189.
- [3] Zannis T C, Hountalas D T, Papagiannakis R G, et al. Effect of fuel chemical structure and properties on diesel engine performance and pollutant emissions; review of the results of four european research programs [J]. International Journal of Fuels and Lubricants, 2009, 1(1): 384.
- [4] Akasaka Y, Sakurai Y. Effects of fuel properties on exhaust emission from DI diesel engine [J]. JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering, 1998, 41(1): 13.
- [5] 陈文森,吴复甲,王建昕,等. 柴油品质对发动机排放性能影响[J]. 汽车工程, 2008, 30(8): 657.  
CHEN Wenmiao, WU Fujia, WANG Jianxin, et al. The effects of fuel properties on diesel engine emissions [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(8): 657.
- [6] 赵红,王小臣,葛蕴珊,等. 柴油硫的质量分数对柴油机微粒特性的影响[J]. 内燃机学报, 2010, 28(4): 351.  
ZHAO Hong, WANG Xiaochen, GE Yunshan, et al. Effects of sulfur content on particulate matter emitted from diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(4): 351.
- [7] 刘炜,张武高,李新令,等. 低硫柴油直喷燃烧超细颗粒排放特性研究[J]. 科学通报, 2009, 54(12): 1773.  
ZHANG Wei, ZHANG Wugao, LI Xinling, et al. Characteristics of ultrafine particle from a compression ignition engine fueled with low sulfur diesel [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54: 1773.
- [8] Daniels T L, McCormick R L, Graboski M S, et al. Effect of diesel sulfur content and oxidation catalysts on transient emissions at high altitude from a 1995 Detroit Diesel Series 50 urban bus engine [EB/OL]. [1996-10-01]. <http://papers.sae.org/961974.html>, 1996-10-01.
- [9] Liu Z G, Vasys V N, Kittelson D B. Nuclei-mode particulate emissions and their response to fuel sulfur content and primary dilution during transient operations of old and modern diesel engines [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(18): 6479.
- [10] Alleman T L, Eudy L, Miyasato M, et al. Fuel property, emission test and operability results from a fleet of class 6 vehicles operating on gas-to-liquid fuel and catalyzed diesel particle filters [EB/OL]. [2004-10-25]. <http://papers.sae.org/2004-01-2959.html>, 2004-10-25.
- [11] 武涛,黄震,张武高,等. 柴油/GTL 混合燃料特性及对柴油机排放的影响[J]. 汽车工程, 2007, 29(56): 397.  
WU Tao, HUANG Zhen, ZHANG Wugao, et al. A study on the properties of diesel/GTL blended fuel and its effects on emissions [J]. Automotive Engineering, 2007, 29(56): 397.
- [12] 刘志华,葛蕴珊,丁焰,等. 柴油机和 LNG 发动机排放颗粒物粒径分布特性研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(6): 518.  
LIU Zhihua, GE Yunshan, DING Yan, et al. The size distribution characteristic of PM emitted from diesel engine and LNG engine [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(6): 518.
- [13] Wall J C, Hoekman S K. Fuel composition effects on heavy-duty diesel particulate emissions [EB/OL]. [1984-10-01]. <http://papers.sae.org/841364.html>, 1984-10-01.
- [14] 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(16): 6153.
- [15] 陈文森,吴复甲,王建昕,等. 十六烷值对欧 IV 柴油机燃烧与排放性能的影响[J]. 内燃机工程, 2008, 29(6): 1.  
CHEN Wenmiao, WU Fujia, WANG Jianxin, et al. Effect of cetane number on combustion and emission of a Euro-IV diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, 29(6): 1.
- [16] 王忠,黄慧龙,许广举,等. 柴油机单环芳香烃类污染物的试验研究[J]. 内燃机学报, 2010, 28(1): 42.  
WANG Zhong, HUANG Huilong, XU Guangju, et al. Experimental study on mono-aromatic hydrocarbon emissions of diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(1): 42.