

文章编号: 0253-2409(2013)03-0347-09

燃料特性对车用柴油机有害排放的影响

谭丕强, 赵坚勇, 胡志远, 楼狄明, 杜爱民

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 研究了车用柴油机燃用不同品质燃油时,其排气烟度、颗粒 PM、氮氧化物 NO_x 、碳氢 HC 和一氧化碳的排放特性,采用了五种不同硫含量、芳烃含量和十六烷值的柴油,进行了发动机台架实验和模拟整车 NEDC 循环实验。结果表明,随着燃油硫含量的减少,柴油机排气烟度、HC、CO、 SO_2 排放有所下降;模拟整车 NEDC 循环的 PM 排放显著降低; NO_x 排放的变化幅度很小。随着燃油芳烃含量的降低,柴油机排气烟度、PM、 NO_x 、HC、CO 排放的降幅显著。随着燃油十六烷值的升高,柴油机的排气烟度大都呈持续下降趋势;PM、HC 排放显著降低; NO_x 、CO 排放的变化幅度较小。

关键词: 柴油机; 燃油; 硫含量; 芳烃含量; 十六烷值; 排放

中图分类号: TK421.5 **文献标识码:** A

Effects of fuel properties on exhaust emissions from diesel engines

TAN Pi-qiang, ZHAO Jian-yong, HU Zhi-yuan, LOU Di-ming, DU Ai-min

(School of Automobile, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Exhaust emissions from a vehicle diesel engine with different property fuels were studied, and the emissions include exhaust smoke, particulate matter (PM), nitrogen oxide (NO_x), unburned hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO) and sulfur dioxide (SO_2). Engine bench test and simulated New European Driving Cycle (NEDC) test cycle were operated on the engine with five kinds of fuel, and the fuels have different sulfur content, aromatic content and cetane number. The results show that exhaust smoke, HC, CO and SO_2 emissions decrease with fuel sulfur content decreasing, and the PM emission under the simulated NEDC test cycle decreases remarkably, while NO_x emissions was not affected obviously. With fuel aromatic content decreasing, emissions including exhaust smoke, PM, NO_x , HC and CO descend distinctly. With cetane number ascending, the exhaust smoke, PM and HC emissions decline evidently, while NO_x and CO emissions have very small changes.

Key words: diesel engine; fuel; sulfur content; aromatic content; cetane number; emission

柴油机具有低油耗、强劲力的优点,在汽车领域的应用越来越广泛。面对日益严格的汽车排放法规和不断恶化的大气环境,控制车用柴油机的污染物排放成为当前的重要课题。在影响车用柴油机排放的诸多因素中,燃油特性非常关键。近年来,随着全球车用燃油标准的日趋严格,燃油特性对柴油机有害污染物排放的影响越来越明显。

在柴油的诸多理化特性参数中,硫含量、芳香烃含量和十六烷值都是非常重要的指标。其中,硫含量对柴油机烟度和 PM 排放影响较大^[1-3];芳烃含量不仅影响柴油机的烟度,且对 NO_x 、HC 和 CO 的排放也有不同程度的影响;十六烷值直接影响柴油机的燃烧过程,进而影响柴油机的排放^[4-7]。因此,上述三者均受到车用燃油标准的严格控制^[8,9]。

因此,本实验以一台车用柴油机为研究对象,分别燃用三组共五种理化特性参数不同的柴油,研究燃油的硫含量、芳香烃含量和十六烷值对柴油机有害污染物排放特性的影响,探索燃油对柴油机排放特性的影响规律。

1 实验部分

1.1 实验燃油

本实验使用三组共五种理化指标不同的柴油,表 1 为本次实验用油的主要理化特性。

由表 1 可知,第一组三种柴油的十六烷值分别为 63.0、54.7、50.2,硫含量和芳烃含量相近,分别命名为 CN63、CN55、CN50;第二组柴油的硫含量分别为 $< 10 \times 10^{-6}$ 、 330×10^{-6} ,芳烃含量和十六烷值相近,分别命名为 S10、S330;第三组柴油的芳香烃含

收稿日期: 2012-08-19; 修回日期: 2012-11-03。

基金项目: 国家自然科学基金(50906062); 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2008AA11A169); 教育部中央高校基本科研业务基金。

联系作者: 谭丕强(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事汽车清洁燃料和排放控制研究, E-mail: tpq2000@163.com。

本文的英文电子版由 Elsevier 出版社在 ScienceDirect 上出版(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/18725813>)。

量分别为 5.0%、30.7%，硫含量和十六烷值相近，分别命名为 A5、A30。其中，S10 和 CN55 为同一燃油，S330 和 A5 为同一燃油。

表 1 实验燃油的主要理化特性

Table 1 Main physical and chemical properties of test fuels

Fuel code	CN63	CN55/S10	CN50	S330/A5	A30
Sulfur content/ 10^{-6}	<10	<10	<10	330	330
Total aromatic/%	5.0	5.0	5.0	5.0	30.7
Cetane number	63.0	54.7	50.2	54.3	53.1
Density, 20 °C					
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.818	0.837	0.844	0.835	0.840

1.2 实验样机

实验所用发动机为一台车用柴油机，其主要参数见表 2。

表 2 实验样机的主要技术参数

Table 2 Test diesel engine specifications

Item	Parameter
Engine type	in-line, 4-cylinder
Bore×stroke d/mm	78.5×95.5
Displacement/L	1.896
Compression ratio	19
Rated power P/kW	96(4 000 r/min)
Peak torque/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	285(1 900 r/min)

1.3 实验方案

本实验采用两套方案分别对五种燃油进行发动机台架实验。对每一种燃油，测试顺序为先实验方案 1，再实验方案 2。

实验方案 1(柴油机负荷特性实验)：在发动机最大转矩转速 1 900 r/min 和标定功率转速 4 000 r/min 两个典型转速下，分别对实验样机进行负荷特性实验，在各转速下分别选取五个不同的负荷点进行测试，分别为 0%、25%、50%、75% 和 100%。研究柴油机燃用不同硫含量、芳香烃含量和十六烷值燃油时，其烟度、 NO_x 、HC、CO 和 SO_2 的排放特性。

实验方案 2(模拟整车 NEDC 循环)：由于中国国家排放标准中只有针对轻型车整车的 NEDC 实验循环，为研究燃油特性对有害物排放量的影响，本实验采用 AVL 动态发动机台架的 ISAC 整车道路模拟系统来模拟整车 NEDC 实验循环，研究燃用不同硫含量、芳香烃含量和十六烷值燃油时，其 PM、 NO_x 、HC 和 CO 的排放特性。

1.4 测试设备

实验采用的测控台架为 AVL-PUMA 动态发动

机实验测控系统。对于前述两个实验方案，具体的排放测试仪器如下。

实验方案 1：采用 AVL 415 滤纸式烟度计测试柴油机烟度；气体排放测试采用 AVL PEUS-Systems 公司的 SESAM 多组分气体分析仪，该仪器的测试方法为傅里叶变换红外光谱法 FT-IR，可同时测量超过 25 种不同气体成分，包括 CO、HC、 NO_x 和 SO_2 等有害气体排放。

实验方案 2：采用 AVL-Pierburg 公司的 AMA 4000 废气分析系统测试柴油机的 NO_x 、HC、CO；采用 AVL-Pierburg 公司的 FFP4000 全流颗粒测试系统采集排气颗粒 PM；采用 Sartorius CP2P-F 微克级精密电子天平进行颗粒 PM 称重。

2 结果与讨论

2.1 负荷特性的实验

2.1.1 烟度

图 1 为 1 900 和 4 000 r/min 转速下，进行负荷特性实验时，发动机燃用不同燃油的排气烟度。

由图 1 可知，这两个转速下烟度随柴油机负荷的变化趋势相似，总体呈现上升趋势，在低负荷到中等负荷过程中烟度排放上升但变化平缓，之后由中负荷到高负荷又明显上升。低负荷时喷油量较少，过量空气系数较大，缸内温度低，不利于形成碳烟。随着喷油量升高，过量空气系数减小，烟度升高；到达全负荷时，喷油量最大，加上此时过量空气系数减小，缸内温度急剧上升，导致烟度值明显升高。

由图 1(a) 可见，在相同工况下，柴油机排气烟度随燃油硫含量的减少而降低。硫在反应中所生成的硫酸盐，促进碳的聚合，形成碳烟，导致了柴油机排气烟度的升高^[10]。由图 1(b) 可知，随着燃油芳香烃含量的减少，柴油机排气烟度有所降低。燃油芳香烃的碳氢质量比明显大于烷烃，芳香烃含量越高，则燃油总体碳氢质量比越高。芳香烃物质在燃烧过程中很难分解和被氧化，随着其含量升高，燃油中的饱和烃含量愈多，其化学结构牢固，不易燃烧，故容易形成碳烟颗粒，造成柴油机的烟度升高。由图 1(c) 可见，随着燃油十六烷值的升高，柴油机的排气烟度大都呈持续下降趋势。燃油十六烷值越高，其燃油着火性能好，滞燃期更短，有利于降低柴油机的排气烟度^[11~13]。

2.1.2 NO_x 排放

图 2 为 1 900 和 4 000 r/min 转速下，进行负荷特性实验时，发动机燃用不同燃油的 NO_x 排放

特性。

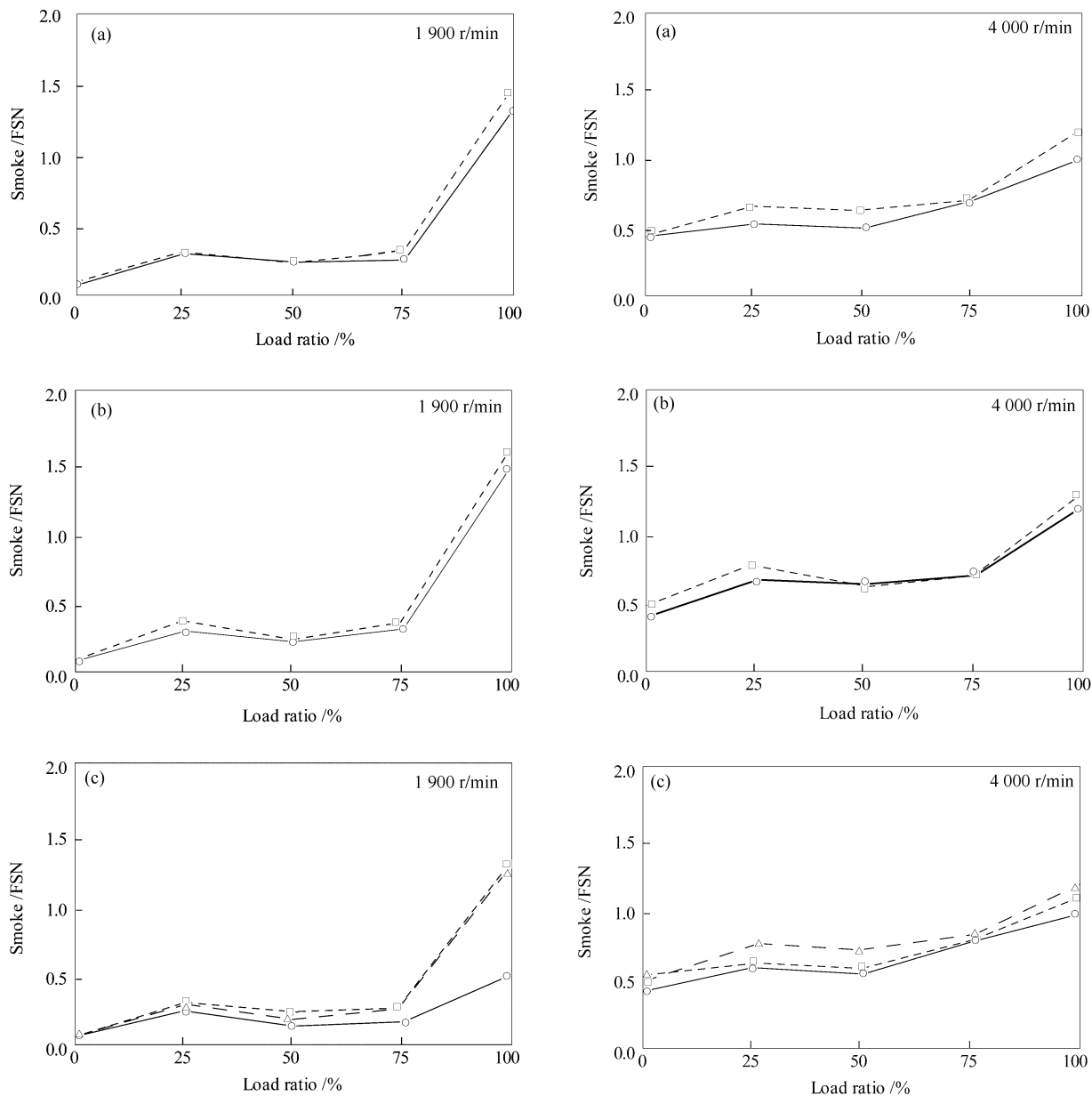


图1 柴油机燃用不同类型燃料时排气烟度

Figure 1 Exhaust smoke from the diesel engine with different types of fuels

(a): fuels with different sulfur content; (b): fuels with different aromatic content; (c): fuels with different cetane number
 (a): ○: S10, □: S330; (b): ○: A5, □: A30; (c): ○: C63, □: C55, △: C50

由图2可知,燃用这五种不同燃料时,NO_x排放的变化曲线较为类似,均随着发动机负荷的升高呈上升趋势,且先急后缓。1900 r/min 转速下全负荷时 NO_x 排放比 4000 r/min 转速下的大。这主要是由于1900 r/min为最大转矩时的转速,在全负荷时,供油量达到最大值,燃烧放出更多的热量,缸内温度很高,促进了NO_x的生成,相比4000 r/min时产生更高的NO_x排放^[14]。

由图2(a)可见,随燃油硫含量的降低,

1900 r/min时 NO_x 排放变化很小,而4000 r/min时,硫含量高的燃油 NO_x 排放稍低。燃油硫对柴油机 NO_x 排放的影响很小,但硫参与燃烧消耗了气缸内的氧气,对 NO_x 的生成有略微的抑制作用。由图2(b)可见,随着燃油芳香烃含量的降低,NO_x 排放明显降低。燃油芳香烃含量低时,其释放的热量会降低,同时十六烷值会稍高,使其 NO_x 排放降低。由图2(c)可见,燃油十六烷值变化对1900 r/min时 NO_x 排放的影响不大,而在4000 r/min时,单个循环

的时间变短,十六烷值的影响变大, NO_x 排放随燃油十六烷值的升高而降低。这是因为燃油十六烷值

升高,滞燃期缩短,放热率峰值降低,缸内温度降低,抑制了 NO_x 的生成。

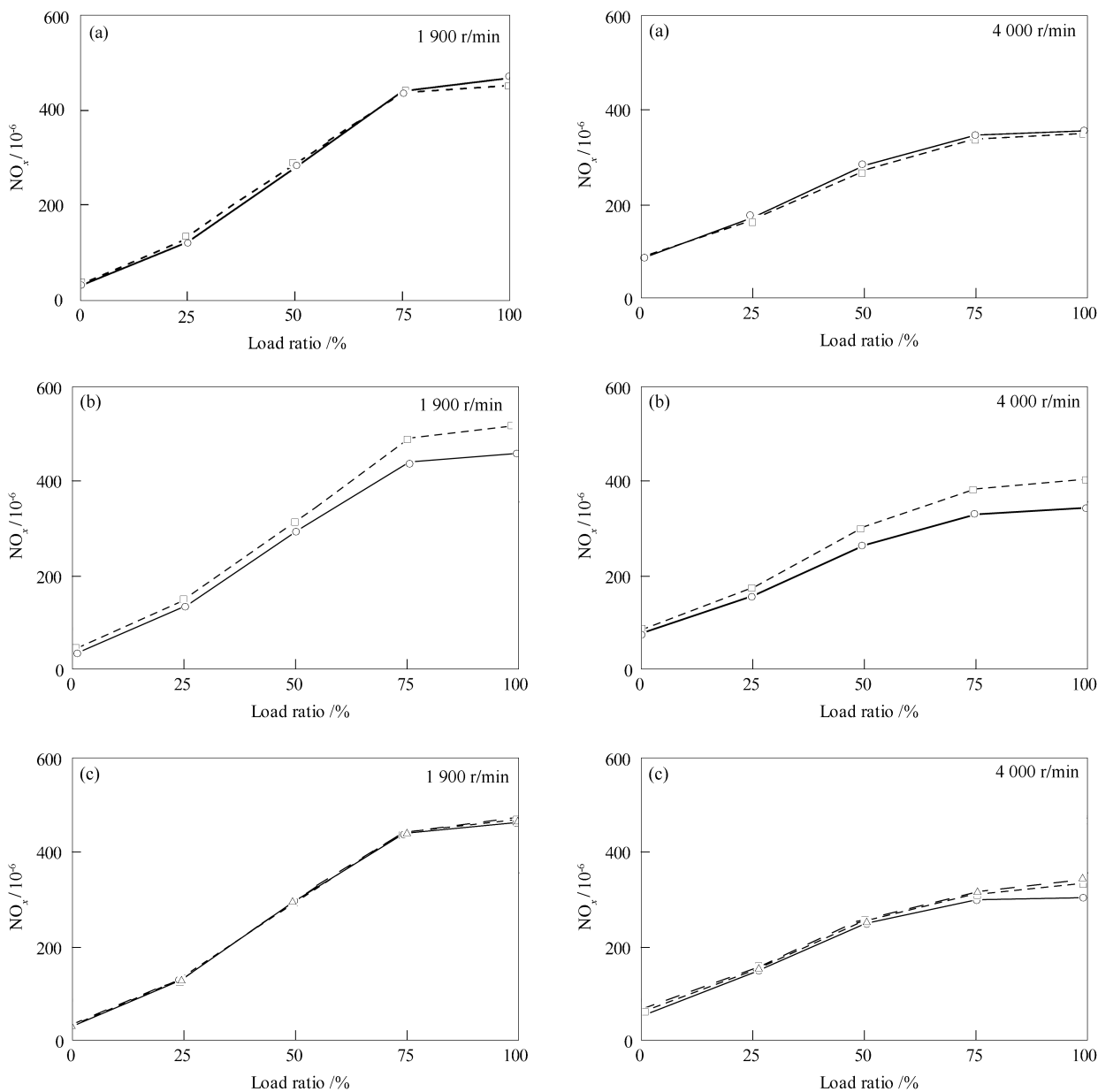


图2 柴油机燃用不同类型燃料时的 NO_x 排放

Figure 2 NO_x emissions from the diesel engine with different types of fuels

(a): fuels with different sulfur content; (b): fuels with different aromatic content; (c): fuels with different cetane number

(a): \circ : S10, \square : S330; (b): \circ : A5, \square : A30; (c): \circ : C63, \square : C55, \triangle : C50

2.1.3 HC 排放

图3为1900和4000 r/min转速下,进行负荷特性实验时,发动机燃用不同燃油的HC排放特性。

由图3可知,这两个转速下随着发动机负荷的升高,HC排放的变化差异明显。在1900 r/min时,HC排放呈下降趋势。这是因为低负荷时,由于循环喷油量少,大量混合气低于可燃极限值,燃烧室温度低,同时激冷效应和狭缝效应加剧,从而有较高

HC排放。随着负荷的增加,供油量增大,缸内温度不断升高,有利于HC的氧化。而在4000 r/min时,HC排放变化范围不大,无显著的规律性。

由图3(a)可见,随着燃油硫含量的降低,HC排放呈下降趋势。在缸内燃烧时,燃油中的硫发生氧化反应生成二氧化硫等硫化物,会在局部区域消耗一定的氧,从而对HC的氧化燃烧不利,硫含量越高,则影响越大。由图3(b)可见,随着燃油芳烃含

量的降低,柴油机 HC 排放明显降低。燃油芳烃含量降低,滞燃期缩短,滞燃期内的未燃及裂解碳氢减少,有利于降低 HC 排放。由图 3(c)可见,同转速同负荷下,柴油机 HC 排放随着燃油十六烷值的升

高而显著降低。十六烷值直接影响燃烧过程,燃油的十六烷值高,着火性能愈好,滞燃期变短,其未燃碳氢和裂解碳氢均减少,相比于 CN50 燃油,CN63 燃油燃烧所排放的 HC 显著降低。

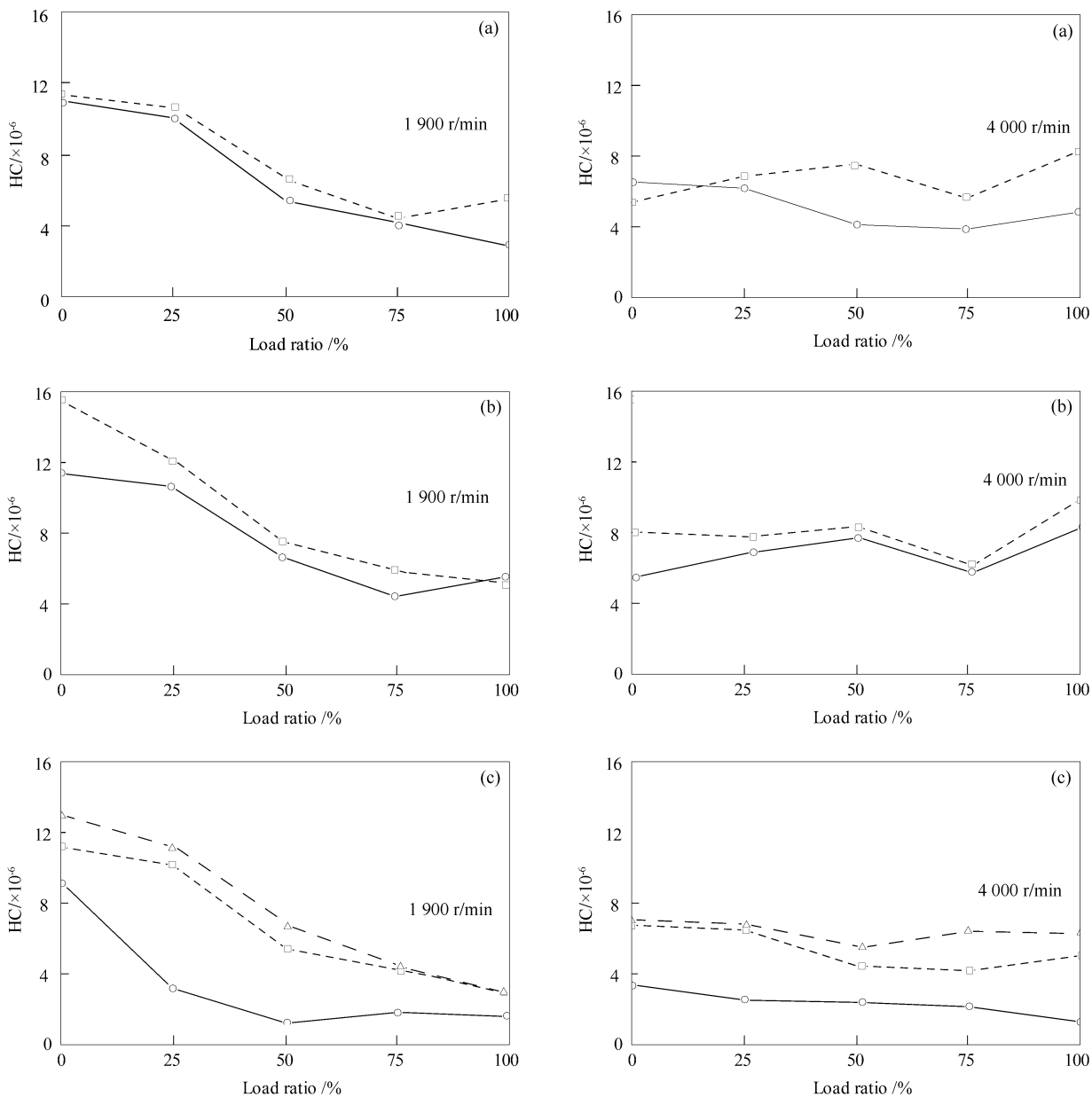


图3 柴油机燃用不同类型燃料时的 HC 排放

Figure 3 HC emissions from the diesel engine with different types of fuels

(a): fuels with different sulfur content; (b): fuels with different aromatic content; (c): fuels with different cetane number
 (a): ○: S10, □: S330; (b): ○: A5, □: A30; (c): ○: C63, □: C55, △: C50

2.1.4 CO 排放

图4为1900和4000 r/min 转速下,进行负荷特性实验时,发动机燃用不同燃油的CO排放特性。

由图4可知,这两个转速下随着柴油机负荷的增加,各燃油燃烧的CO排放变化曲线存在谷值,在发动机中等负荷时,CO的排放较低,在低负荷和全

负荷时其CO的排放均较高。1900 r/min 时,在25%负荷时出现谷值;4000 r/min 时先降后升,在50%负荷时出现谷值。CO是HC燃油在燃烧过程中生成的主要中间产物。低负荷时,过量空气系数较大,混合气过稀且局部温度过低情况严重,无法提

供足够的温度将 CO 进一步氧化成 CO_2 , 导致其排放较高; 高负荷时, 供油量, 过量空气系数较小, 局

部缺氧情况严重, 同样导致 CO 排放增加。

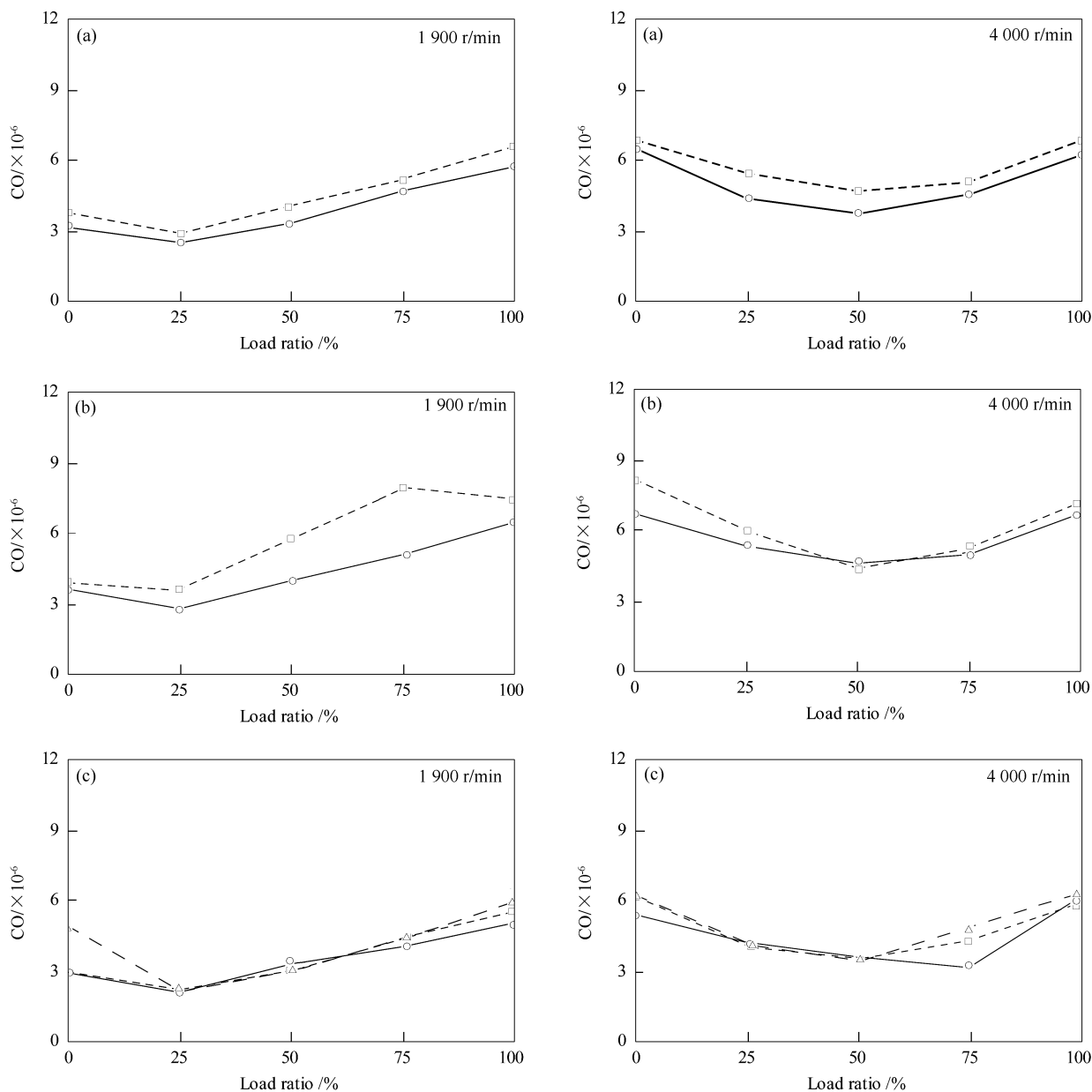


图 4 柴油机燃用不同类型燃料时的 CO 排放

Figure 4 CO emissions from the diesel engine with different types of fuels

(a): fuels with different sulfur content; (b): fuels with different aromatic content; (c): fuels with different cetane number
 (a): \circ : S10, \square : S330; (b): \circ : A5, \square : A30; (c): \circ : C63, \square : C55, \triangle : C50

由图 4(a) 可见, 柴油机 CO 排放随燃油硫含量的降低而降低。在燃烧的过程中, 燃油中的硫会在局部区域消耗一部分氧, 从而影响到 CO 的进一步氧化, 所以燃油硫含量越低, CO 的排放越少。由图 4(b) 可见, 随着燃油芳烃含量的降低, 柴油机 CO 排放明显降低。燃油芳烃含量高, 滞燃期变长, 滞燃期内的未燃及裂解碳氢增加, 加上高芳烃燃油的碳氢质量比高, 苯环的着火和燃烧较难, 导致燃烧持续

期延长, 都会导致 CO 排放增加。由图 4(c) 可见, 随着燃油十六烷值的升高, 柴油机 CO 排放呈下降趋势。十六烷值高的燃油, 燃烧滞燃期更短, 着火性能愈好, 燃烧性能得到改善, 将更多的 CO 氧化转化, 降低了柴油机 CO 排放。

2.1.5 SO_2 排放

图 5 为 1 900 和 4 000 r/min 转速下, 进行负荷

特性实验时,发动机的 SO₂ 排放特性。

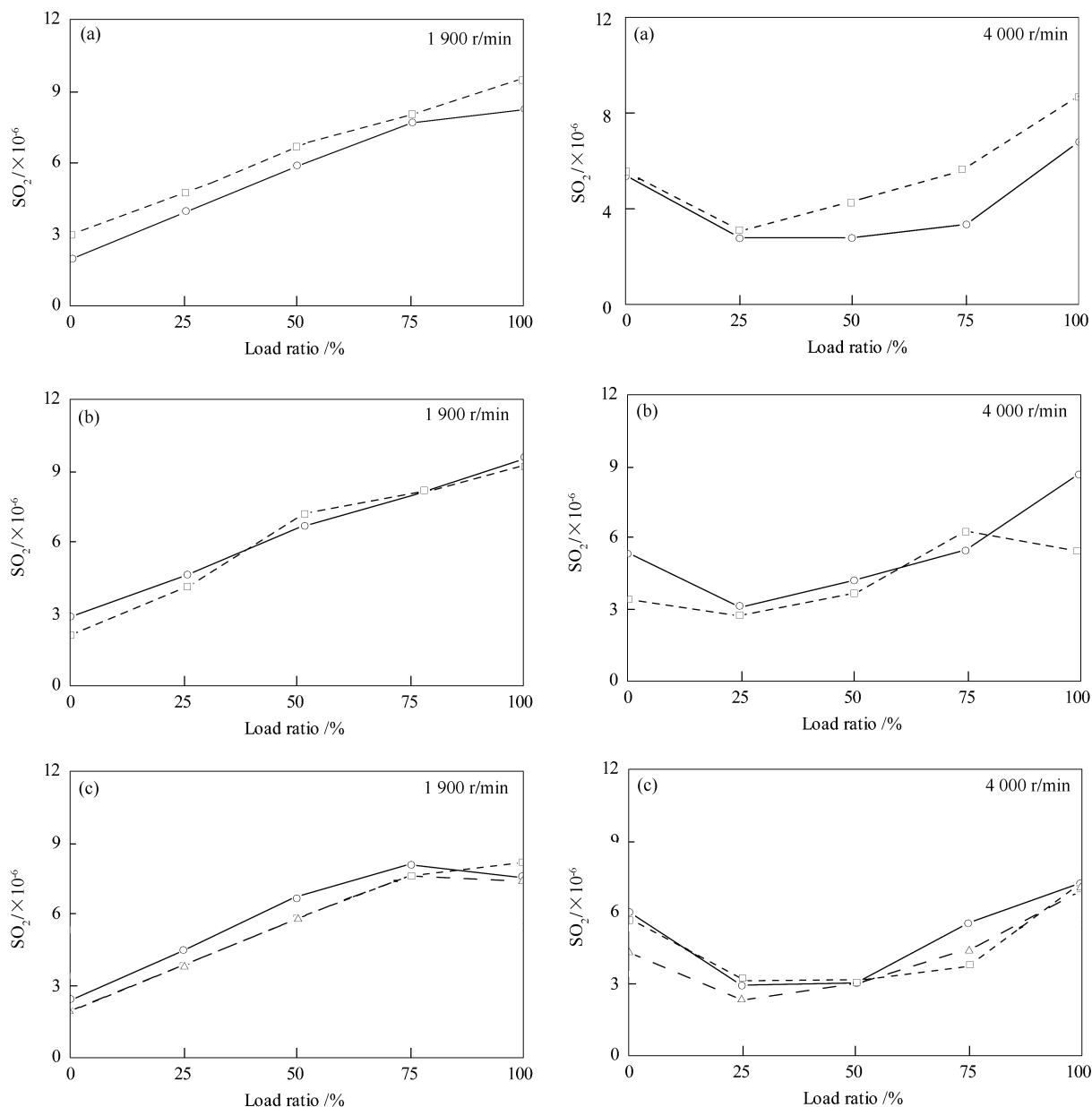


图 5 柴油机燃用不同类型燃料时的 SO₂ 排放

Figure 5 SO₂ emissions from the diesel engine with different types of fuels

(a): fuels with different sulfur content; (b): fuels with different aromatic content; (c): fuels with different cetane number
 (a): ○: S10, □: S330; (b): ○: A5, □: A30; (c): ○: C63, □: C55, △: C50

由图 5 可知,这两个转速下 SO₂ 排放随发动机负荷增加大都呈上升趋势,在两个转速下有所不同。1 900 r/min 转速下,SO₂ 排放随负荷的升高基本呈线性上升趋势,在高负荷时增速减缓。低负荷时供油量较少,缸内混合气中硫含量较低,故而燃烧生成的 SO₂ 较少。随着负荷的增加,供油量逐渐增多,缸内混合气中硫含量逐渐升高,且缸内温度升高,有利于硫的氧化,进而燃烧生成更多的 SO₂。4 000 r/min 转速下,SO₂ 排放则先降后升,在中低负

荷时出现谷值,这可能是由于此时硫被转化为硫酸盐类的比例较高的原因。

由图 5(a)可见,随着燃油硫含量的降低,柴油机 SO₂ 排放显著降低。燃油的硫含量对 SO₂ 的排放有着最直接的影响,含硫量较高的燃油,其燃烧所生成的硫氧化物较多,也最终导致了柴油机 SO₂ 排放的升高。由图 5(b)可见,相同工况下,随着燃油芳烃含量变化,柴油机 SO₂ 排放波动较小,且变化规律不明显。由图 5(c)可以看出,随着燃油十六烷

值的升高,SO₂的排放呈升高趋势,但在不同转速下规律不甚明显。十六烷值较高的燃油,滞燃期短,燃烧充分,缸内温度高,将更多的硫氧化为SO₂,产生的SO₂排放稍多。

2.2 模拟整车 NEDC 循环的实验

图6~图9为实验柴油机在AVL动态发动机台架上进行模拟整车NEDC实验循环的结果。

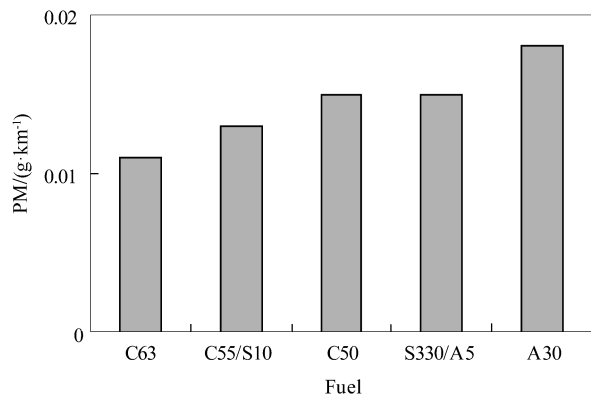


图6 柴油机模拟NEDC循环的PM排放

Figure 6 PM emissions of the diesel engine at NEDC

由图6可知,C63燃油的颗粒PM排放量最低,因为该燃油的硫含量和芳烃含量低、十六烷值明显高于其他燃油,且密度最小,有利于缸内燃油的燃烧过程。而A30燃油的颗粒PM排放量最高,这同样是由于其硫含量高、芳烃含量显著高于其他燃油的原因。可见,随着十六烷值的增加,或者硫含量的减少,或者芳烃含量的降低,发动机的PM排放量均呈持续下降趋势。

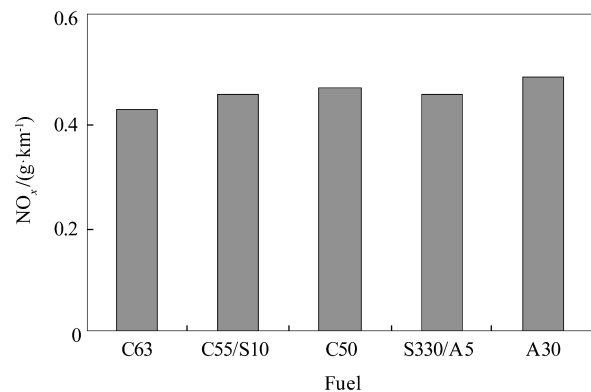


图7 柴油机模拟NEDC循环的NO_x排放

Figure 7 NO_x emissions of the diesel engine at NEDC

由图7可见,在模拟整车NEDC循环工况下,发动机燃用不同燃油的NO_x排放变化不大,但仍然可以看出C63燃油的NO_x排放较低。

图8为HC的排放结果,可以发现,其随着燃油

不同的变化趋势与PM排放类似,C63燃油的HC排放量最低,A30燃油的HC排放量最高;随着十六烷值的增加、硫含量或者芳烃含量的减少,发动机的HC排放量均有所下降。

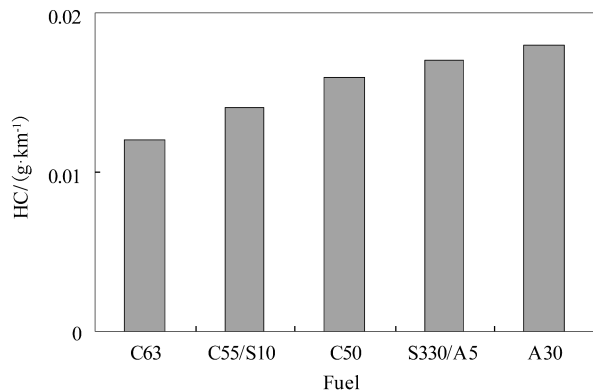


图8 柴油机模拟NEDC循环的HC排放

Figure 8 HC emissions of the diesel engine at NEDC

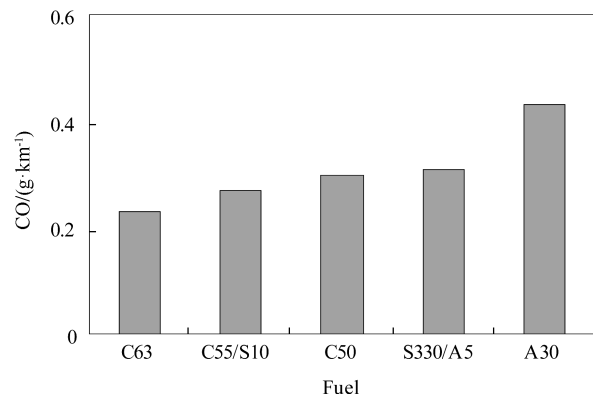


图9 柴油机模拟NEDC循环的CO排放

Figure 9 CO emissions of the diesel engine at NEDC

由图9可知,C63燃油的CO排放量最低,A30燃油的CO排放量最高,显著高于其他燃油,其他三种燃油的CO排放量差异不大。

3 结论

随着燃油硫含量的减少,柴油机的排气烟度降低,在中间转速下更为明显;模拟NEDC循环的颗粒PM排放量降幅明显;NO_x排放的变化幅度很小;HC、CO、SO₂排放则呈明显下降趋势。

随着燃油芳烃含量的降低,柴油机排气烟度和颗粒PM排放量显著降低,这与芳烃的碳氢质量比明显大于烷烃有关;NO_x、HC、CO排放明显降低;SO₂排放波动较小。

随着燃油十六烷值的升高,柴油机的排气烟度大都呈持续下降趋势,PM排放量降低;模拟NEDC循环的NO_x排放变化幅度较小;HC排放显著降低;

CO 排放有所下降。SO₂ 的排放变化无明显规律。

参考文献

- [1] LIU Z, VASYS V, SWOR T, KITTELSON D. Significance of fuel sulfur content and dilution conditions on particle emissions from a heavily-used diesel engine during transient operation[C], SAE Technical Paper, 2007-01-0319, 2007.
- [2] 刘双喜, 邵忠英, 高继东, 王建华. 燃油硫含量对轻型柴油车颗粒物排放的影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, **34**(5): 940-943.
(LIU Shuang-xi, SHAO Zhong-ying, GAO Ji-dong, WANG Jian-hai, Study on influence of diesel sulfur content on PM emissions from light duty vehicle[J], Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, **34**(5): 940-943.)
- [3] 刘双喜, 邵忠英, 包俊江, 高俊华. 燃油硫含量对国IV柴油轿车颗粒物排放特性的影响[J]. 汽车工程, 2011, **33**(3): 197-202.
(LIU Shuang-xi, SHAO Zhong-ying, BAO Jun-jiang, GAO Jun-hua, The effects of fuel sulfur content on the characteristics of particulate emission in state-IV diesel cars[J]. Automotive Engineering, 2011, **33**(3): 197-202.)
- [4] SPREEN K B, ULLMAN T L, MASON R L. Effects of cetane number, aromatics, and oxygenates on emissions from a 1994 heavy-duty diesel engine with exhaust catalyst[C]. SAE Technical Paper 950250, 1995.
- [5] TAKAHASHI K, SAKURAI Y, FURUSE T, SAKURABA T, IMAI S, KEZUKA T, AOKI R, SEKIMOTO M, WATANABE H. Effects of cetane number and chemical components on diesel emissions and vehicle performance[C], SAE Technical Paper, 2009-01-2692, 2009.
- [6] HOSSEINI V, NEILL W, GUO H, DUMITRESCU C, CHIPPIOR W, FAIRBRIDGE C, MITCHELL K. Effects of cetane number, aromatic content and 90% distillation temperature on HCCI combustion of diesel fuels[C], SAE Technical Paper, 2010-01-2168, 2010.
- [7] 陈文淼, 吴复甲, 王建昕, 帅石金. 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): 1-5.
(CHEN Wen-miao, WU Fu-jia, WANG Jian-xin, SHUAI Shi-jin. Effect of cetane number on combustion and emission of a euro-IV diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, **29**(6): 1-5.)
- [8] 朱庆云, 李雪静, 乔明, 任静. 世界汽柴油标准及供需发展趋势浅析[J]. 中外能源, 2011, **16**(10): 87-91.
(ZHU Qing-yun, LI Xue-jing, QIAO Ming, REN Jing. A brief analysis of the trends in global gasoline and diesel standards and supply-demand relations[J]. China Foreign Energy, 2011, **16**(10): 87-91.)
- [9] HARTENERY. A global crude refining and clean transportation fuel outlook through 2030[R]. World Refining & Fuels Service. 2011.
- [10] 陈文淼, 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): 41-45.
(CHEN Wen-miao, WANG Jian-xin, SHUAI Shi-jin. Effect of sulfur content in diesel fuel on engine performance[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, **29**(4): 41-45.)
- [11] BUTTS R, FOSTER D, KRIEGER R, ANDRIE M, RA Y. Investigation of the effects of cetane number, volatility, and total aromatic content on highly-dilute low temperature diesel combustion[C]. SAE Technical Paper 2010-01-0337, 2010.
- [12] MASSA C, DIAZ M, DA SILVA R, DE SOUZA FERREIRA A, FONTES S. Influence of cetane number on euro III engine emissions[C]. SAE Technical Paper 2007-01-2000, 2007.
- [13] 吕林, 许建华, 徐万毅. 柴油品质对船用柴油机颗粒与烟度排放的影响[J]. 内燃机工程, 2010, **31**(4): 44-48.
(LV Lin, XU Jian-hua, XU Wan-Yi. Effect of diesel oil quality on particulate and smoke emissions from marine diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, **31**(4): 44-48.)
- [14] SZYBIST J, BUNTING B. CETANE number and engine speed effects on diesel HCCI performance and emissions[C]. SAE Technical Paper 2005-01-3723, 2005.