

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.005

点火定时对缸内直喷汽油机燃烧及颗粒物排放的影响*

潘锁柱 宋崇林 裴毅强 吕刚

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 采用燃烧分析仪和 DMS500 型快速颗粒取样分析仪, 在一台缸内直喷汽油机上进行了点火定时对燃烧过程和颗粒物排放影响的试验研究。结果表明: 随着点火定时的不断延迟, 火焰发展期逐渐缩短, 快速燃烧期逐渐增大, 缸内压力峰值逐渐下降, 瞬时代热率峰值和缸内最高燃烧温度均逐渐降低且后移, 放热过程迟缓, 膨胀行程缸内温度逐渐升高。缸内直喷汽油机排气颗粒物排放呈包括核态和积聚态颗粒物的双峰分布; 随点火定时的推迟, 核态和积聚态颗粒物峰值数密度均逐渐降低, 颗粒物总数量浓度逐渐降低, 积聚态颗粒物峰值粒径逐渐减小, 而核态颗粒物峰值粒径受点火定时的影响较小。

关键词: 汽油机 缸内直喷 点火定时 燃烧过程 排放

中图分类号: TK411.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0023-05

Effect of Spark Timing on Combustion and Particle Emission for Gasoline Direct Injection Engine

Pan Suozhu Song Chonglin Pei Yiqiang Lü Gang

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The effects of sparking timing on combustion process and particle emission were investigated experimentally on a gasoline direct injection engine by using combustion analyzer and DMS500 fast particulate spectrometer. Results showed that with the delay of spark timing, flame development duration decreased gradually, and rapid burning duration increased gradually. Peak value of heat release rate and cylinder mean temperature showed a gradually decrease and backward shift, which induced a slow heat release process and high cylinder temperature in expansion stroke. Also, spark timing delay led to decrease in the peak cylinder pressure. Moreover, exhaust particles from GDI engine exhibited a bimodal size distribution including nucleation mode and accumulation mode particles. As the reduce of spark advance, total particle number concentration and peak value of particle number density in nucleation mode and accumulation mode decreased gradually, and peak size of accumulation mode particles showed a decreasing trend, but spark timing exhibited a slight influence on peak size of nucleation mode particles.

Key words: Gasoline engine Gasoline direct injection Spark timing Combustion process Emission

引言

汽油缸内直喷(Gasoline direct injection, GDI)技术已成为内燃机领域的研究热点之一^[1-3]。采用

汽油缸内直喷方式将缩短缸内工质的混合时间, 并带来燃油撞击燃烧室壁面形成湿壁和局部工质混合不均等现象, 增加 GDI 汽油机颗粒物排放^[4-5]。现有研究表明, GDI 汽油机颗粒物排放水平介于柴油

收稿日期: 2012-06-19 修回日期: 2012-07-25

* 国家自然科学基金资助项目(50976076)、天津市应用基础及前沿技术研究计划资助项目(10JCZDJC24900)和高等学校博士点专项科研基金资助项目(20090032110002)

作者简介: 潘锁柱, 博士生, 主要从事内燃机排气污染物控制技术研究, E-mail: suozhup@163.com

机和进气道喷射(PFI)汽油机之间,其质量和数量排放约为 10 mg/km 和 10^{13} 个/km,约为PFI汽油机的10倍^[6-8]。因此,在能源和环境的双重压力下,GDI汽油机燃烧过程和颗粒物排放已被国内外学者广泛关注。

点火定时(Spark timing, ST)是点燃式内燃机的主要控制参数之一,显著影响汽油机缸内燃烧过程,对燃油消耗率、扭矩输出和排放特性等具有较大的影响^[9-13]。在国内,点火定时对汽油机燃烧过程和排放影响的研究工作还主要集中在PFI汽油机上,有关点火定时对GDI汽油机燃烧过程和排放影响的研究较少。本文针对点火定时对GDI汽油机燃烧过程、污染物排放的影响开展研究。

1 试验设备及试验方法

1.1 试验设备及仪器

试验发动机为四缸GDI汽油机,采用较高几何压缩比12,并采用美国DELPHI公司开发的电控系统(ECU),可实现喷油定时、喷油脉宽、点火定时及空燃比等参数的灵活柔性控制。发动机的主要性能参数如表1所示。试验用燃料为市售93号无铅汽油。图1为试验台架系统示意图。采用杭州奕科机电有限公司生产的WE33H型水力测功机和EM0103P型测控系统对GDI汽油机进行工况控制;缸内燃烧数据采集与分析系统为自行研制的发动机燃烧分析仪,所用设备主要有KISTLER6117BFD16型火花塞式缸压传感器、KISTLER5018型电荷放大器、NI公司M系列USB-6259型高性能数据采集卡和LabVIEW软件;采用HORIBA公司MEXA-730 λ 型空燃比分析仪进行空燃比测量;颗粒物测量采用Cambustion公司DMS500型快速型微粒光谱仪,共分22级,粒径测量范围为 $5\sim 1\,000\text{ nm}$,测量响应时间可达 100 ms ,带有两级稀释系统,试验设定稀释比分别为4和150,稀释气体为高纯空气。

表1 GDI汽油机结构参数

Tab.1 Structure parameters of GDI gasoline engine

参数	数值
喷油方式	缸内直喷
进气方式	自然吸气
气门数	16
缸径/mm	77.8
行程/mm	78.8
压缩比	12
额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	6000
额定功率/kW	86
燃烧室形状	蓬顶形
排量/L	1.5
后处理装置	三元催化转换器

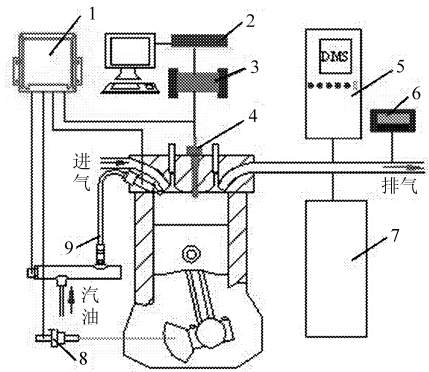


图1 试验装置示意图

Fig.1 Sketch diagram of experimental set-up

1. ECU
2. 采集卡
3. 电荷放大器
4. 火花塞式缸压传感器
5. DMS500型快速型微粒光谱仪
6. λ 型空燃比分析测量仪
7. 气体分析仪
8. 转速传感器
9. 油轨

1.2 试验方法

在城市道路中,汽油机通常在中、低转速部分负荷工况下运行。因此,选取转速为 $2\,000\text{ r/min}$ 、平均有效压力为 0.1 MPa (工况1)和 0.3 MPa (工况2),以及转速为 $3\,000\text{ r/min}$ 、平均有效压力为 0.3 MPa (工况3)工况。通过改变点火定时进行试验研究,以揭示GDI汽油机在部分负荷工况下点火定时对燃烧过程和颗粒物排放的影响规律。试验过程中,3个工况下喷油定时均为压缩上止点前 280°CA ,空燃比均为14.7,转速为 $2\,000\text{ r/min}$ 、平均有效压力为 0.1 MPa 和 0.3 MPa 工况时喷油压力为 5 MPa ,转速为 $3\,000\text{ r/min}$ 、平均有效压力为 0.3 MPa 工况时喷油压力为 8 MPa 。并且,在改变点火定时的过程中均保持3个工况对应的喷油定时、压力及脉宽等参数恒定不变。此外,每组数据均在发动机工况稳定后平行测量3次,测量点均分布于三元催化转换器前端。控制冷却水温在 $(85\pm 1)^\circ\text{C}$ 之间,机油温度在 $(90\pm 1)^\circ\text{C}$ 之间,以消除发动机冷却水温和机油温度对GDI汽油机部分负荷燃烧过程和颗粒物排放的影响。

2 试验结果与讨论

2.1 点火定时对燃烧过程的影响

图2为GDI汽油机在3种工况下点火定时对火焰发展期和快速燃烧期的影响。火焰发展期定义为从点火时刻到累积放热率为10%的曲轴转角间隔,快速燃烧期定义为累积放热率从10%到90%的曲轴转角间隔。由图可见,随着点火定时的不断延迟,火焰发展期逐渐缩短,表明延迟点火定时有利于在GDI汽油机缸内迅速形成火焰核心。这主要是由于推迟点火一方面增加了缸内工质的混合时间,使燃油与空气的混合更加充分,更易于点燃;另一方面活

塞离上止点越近,缸内工质的被压缩程度越高,点火时所对应的缸内温度、压力越高,有助于火焰核心的形成和发展。两者的共同作用导致了火焰发展期随点火定时的推迟而缩短。然而,从图2也可以看出,推迟点火却导致快速燃烧期逐渐增大,即延迟点火造成缸内燃烧放热过程逐渐变得平缓。这是因为随着点火定时的不断延迟,燃烧始点逐渐后移,缸内工质燃烧所对应的缸内压力和温度相对于提前点火时较低,较低的温度、压力将延缓缸内工质的氧化反应,不利于火焰的快速传播^[14]。并且,燃烧始点后移还造成了缸内工质在膨胀行程内的燃烧比例增加,膨胀行程活塞下行将加大火焰的传播距离,增大火焰传播时间。因此,以上两者的共同作用导致了快速燃烧期随点火定时的变化规律。

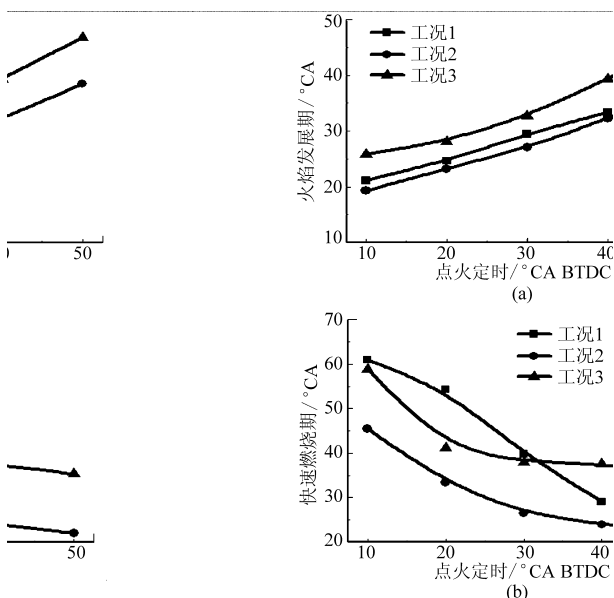


图2 点火定时对滞燃期和燃烧持续期的影响

Fig. 2 Effect of spark timing on flame development duration and rapid burning duration

(a) 火焰发展期 (b) 快速燃烧期

图3和图4为GDI汽油机在3种工况下点火定时对缸内压力、瞬时放热率和缸内平均温度的影响。由图可见,随着点火定时的不断延迟,瞬时放热率峰值、缸内压力峰值均逐渐降低,并且,除点火定时为 10°CA BTDC 时缸内压力峰值所对应曲轴转角有一定程度前移外,其它情况下的缸内压力峰值和瞬时放热率峰值所对应曲轴转角均明显后移。这表明推迟点火导致GDI汽油机放热过程逐渐变得迟缓。此外,缸内平均温度峰值随点火定时的推迟而逐渐降低,峰值逐渐后移,并且在膨胀行程后期随点火定时的延迟缸内平均温度逐渐升高。这主要是由于随着点火定时的延迟,燃烧始点所对应的相位后移,燃烧持续时间增加,火焰传播速度减弱,导致缸内工质放热过程逐渐迟缓,瞬时放热率峰值降低且后移,进

而造成缸内压力和缸内温度峰值的降低和后移,并且促进了膨胀行程后期缸内温度随点火定时延迟而升高。

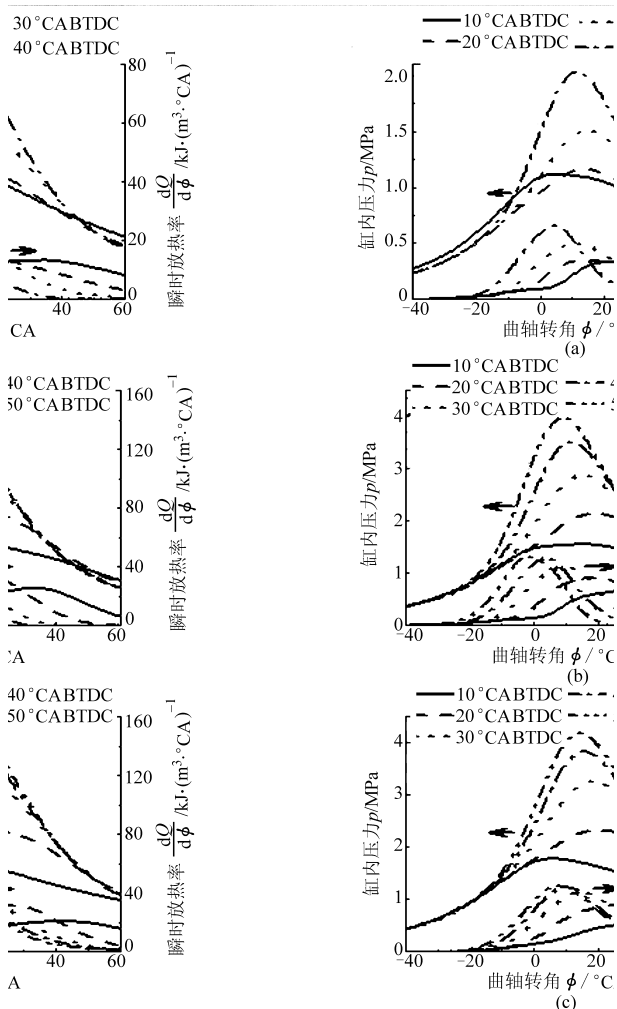


图3 点火定时对缸内压力和瞬时放热率的影响

Fig. 3 Effect of spark timing on cylinder pressure and heat release rate

(a) 工况1 (b) 工况2 (c) 工况3

2.2 点火定时对颗粒物排放和粒径分布的影响

图5为GDI汽油机在3种工况不同点火定时下颗粒物的粒径分布情况。由图可见,GDI汽油机排气颗粒物表现为包括核态和积聚态颗粒物的双峰分布。并且,随着点火定时的不断延迟,积聚态颗粒物峰值数密度逐渐降低,对应的峰值粒径有逐渐减小的趋势;核态颗粒物峰值数密度也表现为随点火定时的延迟而逐渐降低,峰值粒径无明显变化趋势。转速为 2000 r/min 工况时,峰值粒径均分布在 $6\sim 9\text{ nm}$ 之间,转速为 3000 r/min 工况时,峰值粒径均在 15 nm 左右。

通常认为积聚态颗粒物是缸内燃油在高温缺氧条件下发生热裂解和脱氢反应生成的初级碳烟粒子,经过团聚和吸附HC、金属灰烬和硫酸盐等物质

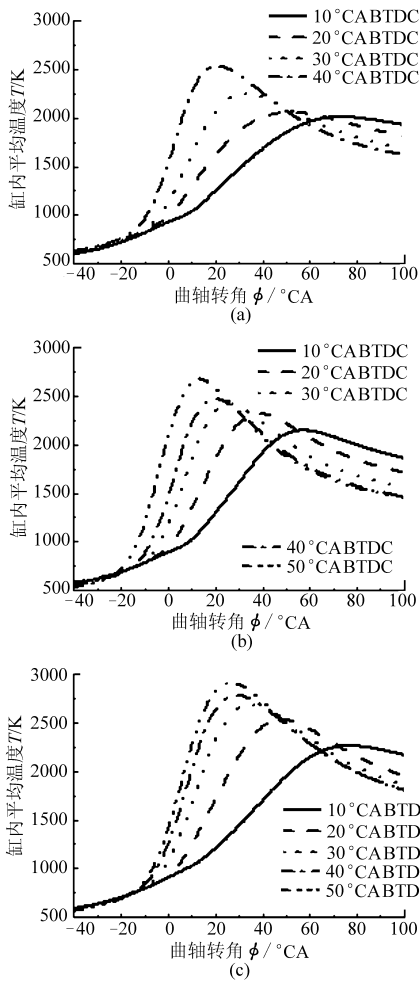


图4 点火定时对缸内平均温度的影响

Fig. 4 Effect of spark timing on cylinder mean temperature

(a) 工况1 (b) 工况2 (c) 工况3

而形成的^[15-16]。随着点火定时的不断延迟,缸内燃油与新鲜空气的混合时间逐渐增加,缸内工质的混合雾化状态逐步改善,局部不均匀倾向逐渐减弱,缸内燃烧状态向更加充分的方向发展,减少了初级碳烟粒子的生成,从而抑制了积聚态颗粒物的生成;并且,推迟点火定时使缸内最高燃烧温度降低,减轻了局部过浓区域燃油的热裂解和脱氢倾向,有利于抑制初级碳烟粒子的生成,减少积聚态颗粒物的生成;此外,推迟点火定时使膨胀行程缸内燃烧温度和排气温度升高,增强了高温条件下积聚态颗粒物的氧化速率,导致积聚态颗粒物排放降低。三者的共同作用导致了积聚态颗粒物随点火定时延迟的变化规律。

以往的研究结果认为核态颗粒物主要是发动机燃烧过程中生成的HC化合物和硫酸盐等物质经过成核现象而形成^[15]。随着点火定时的不断推迟,缸内工质混合时间增加,缸内燃烧状态改善,HC排放量逐渐减少;同时,推迟点火定时使缸内压力降低,进入缝隙的未燃混合气减少,也减少了未燃HC的生成量;HC化合物生成量的减少将导致其成

核现象形成核态颗粒物的几率降低,从而减少核态颗粒物的生成。另外,推迟点火定时造成的膨胀行程燃烧温度和排气温度升高,也增强了对核态颗粒物的氧化作用,降低了核态颗粒物的排放量。以上因素的共同作用导致核态颗粒物峰值数密度随点火定时的不断延迟而逐渐降低。

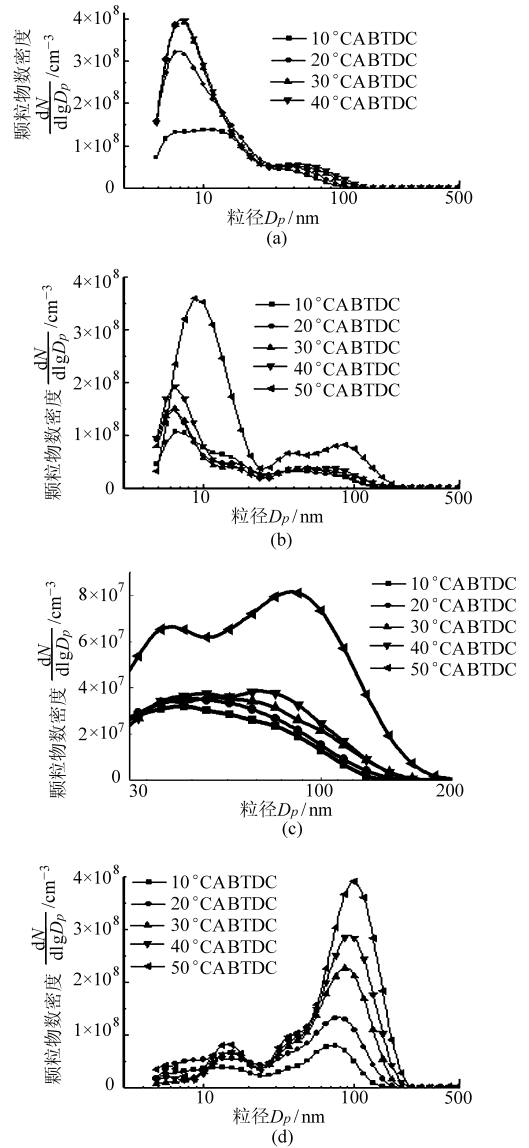


图5 点火定时对颗粒物粒径分布的影响

Fig. 5 Effect of spark timing on particle size distribution

(a) 工况1 (b) 工况2 (c) 工况2放大图 (d) 工况3

图6和图7为GDI汽油机在3种工况不同点火定时下积聚态颗粒物数量浓度和颗粒物总数量浓度的变化情况。由图可见,随着点火定时的不断延迟,积聚态颗粒物数量浓度逐渐降低,降低比例达77.5%,且工况3时降低趋势较为明显。颗粒物总数量浓度随点火定时的推迟呈现了显著的降低趋势,降低比例达73.5%。因此,在保证GDI汽油机动力输出的同时,合理优化点火定时是降低GDI汽油机颗粒物排放的一项有效技术手段。

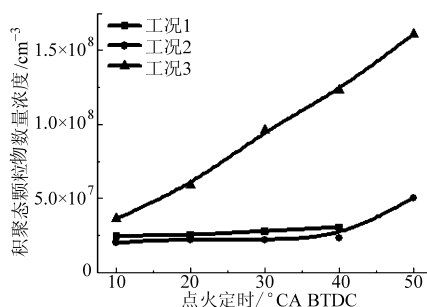


图 6 点火定时对积聚态颗粒物数量浓度的影响

Fig. 6 Effect of spark timing on number concentration of accumulation mode particles

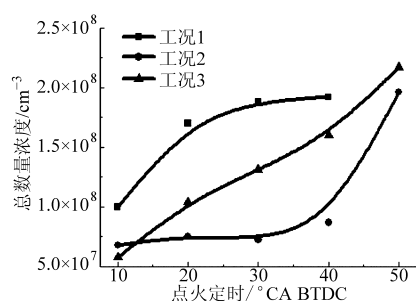


图 7 点火定时对颗粒物总数量浓度的影响

Fig. 7 Effect of spark timing on total particle number concentration

3 结论

(1) 随着点火定时的不断延迟, 火焰发展期逐渐缩短, 快速燃烧期逐渐增大。

(2) 推迟点火定时, 缸内压力和瞬时放热率峰值逐渐降低, 且瞬时放热率有后移倾向, 缸内工质放热过程迟缓, 缸内最高燃烧温度逐渐降低且后移, 膨

胀行程缸内平均温度逐渐升高。

(3) GDI 汽油机排气颗粒物呈包括核态和积聚态颗粒物的双峰分布。并且, 随着点火定时的不断延迟, 核态和积聚态颗粒物峰值数密度均逐渐降低, 颗粒物总数量浓度逐渐降低, 积聚态颗粒物峰值粒径有逐渐减小的趋势, 而核态颗粒物峰值粒径受点火定时的影响较小。

参 考 文 献

- Schwarz C, Schunemann E, Durst B, et al. Potentials of the spray-guided BMW DI combustion system[C]. SAE Paper 2006-01-1265, 2006.
- Zhao F, Lai M C, Harrington D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(5): 437~562.
- Katashiba H, Honda T, Kawamoto M, et al. Improvement of center injection spray guided DISI performance[C]. SAE Paper 2006-01-1001, 2006.
- Price P, Stone R, Collier T, et al. Particulate matter and hydrocarbon emissions measurements: comparing first and second generation DISI with PFI in single cylinder optical engines[C]. SAE Paper 2006-01-1263, 2006.
- Yang J, Kenney T. Some concepts of DISI engine for high fuel efficiency and low emissions[C]. SAE Paper 2002-01-2747, 2002.
- Mohr M, Steffen D, Forss A M. Particulate emissions of gasoline vehicles and influence of the sampling procedure[C]. SAE Paper 2000-01-1137, 2000.
- Aakko P, Nylund N O. Particle emissions at moderate and cold temperatures using different fuels[C]. SAE Paper 2003-01-3285, 2003.
- Ntziachristos L, Mamakos A, Samaras Z, et al. Overview of the European particulates project on the characterization of exhaust particulate emissions from road vehicles: results for light-duty vehicles[C]. SAE Paper 2004-01-1985, 2004.
- Heywood J B. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York; McGraw-Hill, 1988.
- Zhong S, Daniel R, Xu H, et al. Combustion and emissions of 2, 5-dimethylfuran in a direct-injection spark-ignition engine[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(5): 2891~2899.
- 高莹, 李书华, 杨世春, 等. 点火时刻对缸内直喷汽油机燃烧过程影响的研究[J]. 汽车技术, 2011(2): 1~4.
Gao Ying, Li Shuhua, Yang Shichun, et al. Research on effects of ignition timing on combustion for GDI engine[J]. Automobile Technology, 2011(2): 1~4. (in Chinese)
- Daniel R, Tian G, Xu H, et al. Ignition timing sensitivities of oxygenated biofuels compared to gasoline in a direct-injection SI engine[J]. Fuel, 2012, 99(9): 72~82.
- Maricq M M, Podsiadlik D H, Brehob D D, et al. Particulate emissions from a direct-injection, spark ignition (DISI) engine[C]. SAE Paper 1999-01-1530, 1999.
- Ma F, Wang Y, Liu H, et al. Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variations in a lean burn natural gas spark-ignition engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(2): 823~831.
- Maricq M. Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review[J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(11): 1079~1118.
- 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.