

DOI: 10.7652/xjtuxb201503006

点火时刻对怠速工况缸内直喷汽油机 微粒排放特性的影响

钟兵¹, 洪伟¹, 苏岩¹, 解方喜¹, 娄子睿², 许允¹

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130025, 长春; 2. 一汽轿车股份有限公司, 130012, 长春)

摘要: 为研究缸内直喷(GDI)汽油机典型工况、怠速工况时的微粒排放特性,在一台 4G15 缸内直喷汽油机上,通过控制冷却液温度为 $(80\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、喷油时刻为上止点前 310° 、过量空气系数为 1,研究了点火时刻对缸内直喷汽油机怠速工况微粒粒径分布特性的影响。结果表明:微粒数量浓度和表面积浓度随着点火时刻的提前而增加;微粒数量浓度随粒径分布呈单峰状态,核模态微粒数量浓度粒径分布峰值很小且不明显,积聚模态微粒数量浓度明显高于核模态微粒数量浓度;微粒的体积浓度随点火时刻的提前而增大,核模态微粒体积浓度占总体积浓度的比例随点火时刻的提前而减小。

关键词: 直喷汽油机;点火时刻;微粒排放;怠速

中图分类号: TK41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)03-0032-06

Effects of Ignition Timing on Particulate Emission in Idling for Gasoline Direct Injection Engine

ZHONG Bing¹, HONG Wei¹, SU Yan¹, XIE Fangxi¹, LOU Zirui², XU Yun¹

(1. State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. First Automobile Workshop Car Co. Ltd., Changchun 130012, China)

Abstract: To investigate the particle emission characteristics in idling condition for GDI (gasoline direct injection) engine, a 4G15 GDI engine was chosen as the test bed to reveal the effects of ignition timing on particle size distribution in idling in the cases of coolant temperature of $(80\pm 1)^{\circ}\text{C}$, injection timing of 310° CA (crank angle) BTDC (before top dead center) and excess air ratio around 1.0. The results show that the particulate number and surface area concentration increase with the advancing ignition timing; the size of particle number concentration behaves as a unimodal distribution while the size peak of nucleation mode is lower and obscure and the number of accumulation mode particles reaches obviously higher than nucleation mode particles. The particle volume concentration increases with the advancing ignition while the volume concentration ratio of nucleation mode particle in total volume concentration decreases with the advancing ignition.

Keywords: gasoline direct injection engine; ignition timing; particulate emission; idling condition

进气道喷射(PFI)火花塞点火汽油机具有噪声低、 NO_x 和微粒排放低以及快速起动等优点,因此在乘用车上得到了广泛应用。与柴油机相比,PFI

发动机燃油经济性较差^[1],如果结合二者的优点,缸内直喷(GDI)汽油机将得到长足发展。

GDI 发动机是将燃油直接喷入缸内,通过精确

收稿日期: 2014-07-02。 作者简介: 钟兵(1989—),男,博士生;苏岩(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA111702);国家自然科学基金资助项目(51276080);中国博士后科学基金项目(2013M540250)。

网络出版时间: 2015-01-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150105.0843.001.html>

控制燃油喷射量可降低燃油消耗量,提高输出功率^[1],因此 GDI 发动机广泛应用于乘用车^[2]。与 PFI 汽油机相比,GDI 发动机是将燃油直接喷入缸内,从而造成雾化不良、燃油湿壁等现象,特别是怠速工况下具有较高的微粒排放。所以,对于长期在市区行驶的汽车来说,研究 GDI 发动机怠速过程中的微粒排放特性具有十分重要的意义。

本文在一台 GDI 发动机的冷却水温度、喷油时刻和过量空气系数不变的情况下,研究了怠速工况点火对 GDI 汽油机微粒排放特性的影响。

1 试验装置

1.1 试验设备

试验在一台 4G15 GDI 汽油机上进行,发动机主要技术参数包括排量 1.468 L、缸径 77.5 mm、行程 82 mm、压缩比 11、最大功率 73 kW(6 000 r/min)。选用长春第一光学有限公司生产的 WYCH21A3 型光电信号编码器采集曲轴转角信号,采用瑞士奇石乐(Kistler)的 6117B 缸压传感器测量缸内压力,采用北京瑞博华公司的 RBT5300 数据采集卡采集信号,利用 80C196kc 单片机对发动机喷油和点火进行控制,采用美国 TSI 公司生产的微粒粒径谱仪 EEPSTM3090 测量发动机尾气微粒粒径分布。此外,设计制造了针对本发动机的温控系统,可以控制冷却液的温度范围为 0~115℃。发动机测试台架布置如图 1 所示。

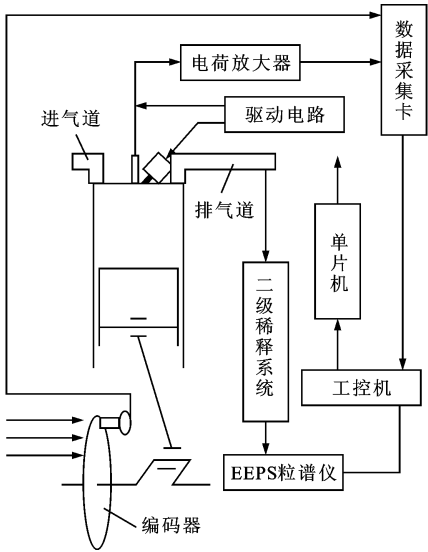


图 1 发动机测试台架布置

GDI 汽油机排气中的微粒数量浓度较高^[3],如不进行稀释直接使用微粒粒径谱仪测量,会超出测量量程而导致设备出现故障。根据微粒测量法规及

EEPSTM3090 对取样温度的要求,必须将取样气体温度降低到 52℃ 以下。本试验中使用的稀释系统能够充分满足测量仪器和测量法规对测量条件的要求,保证微粒粒径测量的准确性。稀释风洞系统如图 2 所示。

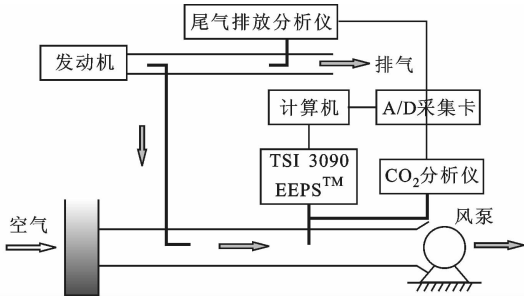


图 2 稀释风洞系统

1.2 试验方法

试验中始终控制过量空气系数 $\Phi_a=1$,喷油时刻为进气行程上止点前 310°,冷却水温为 $(80\pm1)^\circ\text{C}$ 。当转速为 800 r/min 时,点火时刻分别控制在压缩上止点前(BTDC)0°、5°、10°、15°、20°,用 EEPS 采集、记录数据,以分析这一工况下点火时刻对微粒排放特性的影响。当发动机转速分别为 1 000 r/min 和 1 200 r/min 时,重复上述试验,根据试验数据分析不同工况下点火时刻对微粒的影响。

2 试验结果及分析

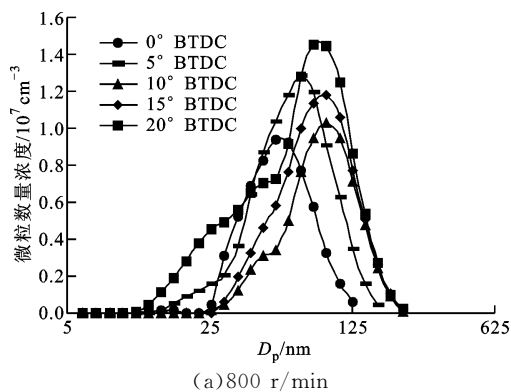
2.1 微粒粒径分布特性

喷油时刻在上止点前 310°、过量空气系数为 1.0 以及不同点火时刻下微粒数量浓度 $dN/d(\lg D_p)$ (N 为微粒数量)随微粒粒径 D_p 的变化如图 3 所示。

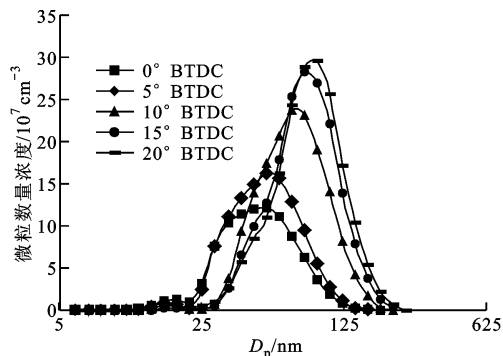
内燃机排气中出现的颗粒是燃料在燃烧过程中经历了成核、生长和氧化过程^[4]后形成的。燃料在高温中经过裂解或氧化裂解形成颗粒核心(成核),成核后又经历了表面增长和凝聚 2 个过程。当颗粒物生长到某一尺寸时,增长速度急剧下降,且以积聚的方式形成链状结构物。这一过程伴随着颗粒的氧化,因此排气中颗粒的量是颗粒生成和氧化竞争的结果^[5]。

从图 3 可以看出,不同点火时刻 GDI 发动机微粒粒径分布成单峰态,相对积聚模态微粒($50\text{ nm}<D_p<1\text{ 000 nm}$)来说,核膜态微粒($0\text{ nm}<D_p<50\text{ nm}$)峰值较小。

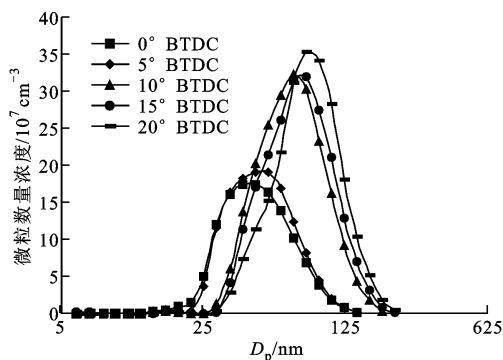
喷油时刻为上止点前 310°、过量空气系数为 1.0、转速为 1 000 r/min 时,点火时刻于上止点前 5°时微粒数量浓度峰值为 $1.25\times10^8\text{ cm}^{-3}$,点火时



(a) 800 r/min



(b) 1 000 r/min



(c) 1 200 r/min

图3 喷油时刻在上止点前 310° 、过量空气系数为1.0以及不同点火时刻下微粒数量浓度随粒径的变化

刻于上止点前 20° 时微粒数量浓度峰值为 $3.05 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 。

可见,随着发动机转速的提高,微粒数量浓度峰值增大,这是由发动机转速升高、燃烧持续期缩短、燃油雾化和油气混合时间缩短、微粒生成增多^[1]所致。

分析可知,4G15 GDI发动机在上止点前 310° 喷油,如果缸内形成均质混合气后在压缩上止点附近点火燃烧,那么随着点火时刻的提前,缸内混合气提前燃烧,从而造成缸内最高压力和温度升高。缸内最大温度升高会导致微粒成核速率提高,形成核膜态微粒数量增多。缸内温度高对微粒和HC的后

期氧化不利,使得HC排放量增多,进而颗粒可在膨胀和排气过程中吸附更多的HC,最终导致核膜态微粒数量浓度升高。点火时刻提前使得空气和燃油的混合时间缩短,从而造成燃油雾化不良,进而促使微粒数量浓度呈现增加的态势。积聚模态微粒基本上是固态的,而核膜态是液态或半固态。固态在高温下形成,需要在更高温度下氧化,所以不可能在排气过程氧化。点火时刻提前,缸内温度提高,由此促进了固态形成。所以,点火提前,颗粒浓度增大,积聚模态浓度增大。

2.2 微粒数量、表面积浓度特性

微粒数量和表面积浓度随点火时刻的变化历程如图4和图5所示。

随着点火时刻从上止点前 0° 逐渐提前到上止点前 20° ,核模态微粒数量逐渐减少,积聚模态微粒的数量浓度增加,核模态微粒占单位体积总微粒数量的比例(数量浓度百分比)从40%左右逐渐下降到10%。当过量空气系数为1.0、转速为1000 r/min时,核模态微粒数量浓度由 $4.89 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 下降到 $1.96 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$,减小的幅度达到59.9%。微粒表面积浓度 $dS/d(\lg D_p) = \pi(dN/d(\lg D_p))D_p^2$ 与数量浓度变化规律一致,积聚模态微粒的单位体积表面积随着点火提前角的增加而增大。积聚模态微粒表面积浓度占总的表面积浓度的比例(表面积浓度百分比)由73.31%上升到98.21%,增幅达33.9%。

随着点火时刻的提前,微粒的表面积浓度变化规律同数量浓度变化规律一致,缸内最高温度升高导致核态微粒数量增多。固态的积聚模态微粒在高温环境中生成,其氧化需要更高的温度,因此在膨胀和排气过程中不可能生成积聚模态微粒,该微粒主要是在燃烧过程中形成。点火时刻提前,缸内温度升高,积聚模态微粒生成速率提高,而微粒的表面积浓度主要是由积聚态微粒的表面积浓度体现的,最终积聚模态表面积浓度随着点火时刻的推移而增大。

2.3 微粒体积浓度特性

微粒的体积浓度 $dV/d(\lg D_p) = \frac{\pi}{6}(dN/d(\lg D_p))D_p^3$ 变化特性如图6所示。

微粒的体积浓度随着点火提前角的增加而增大,尤其是积聚模态微粒的特征更加明显,点火提前角在上止点前 10° 、 15° 、 20° 时,积聚模态微粒的体积浓度相对上止点前 0° 、 5° 高,尤其比上止点前 0° 高出一个数量级。

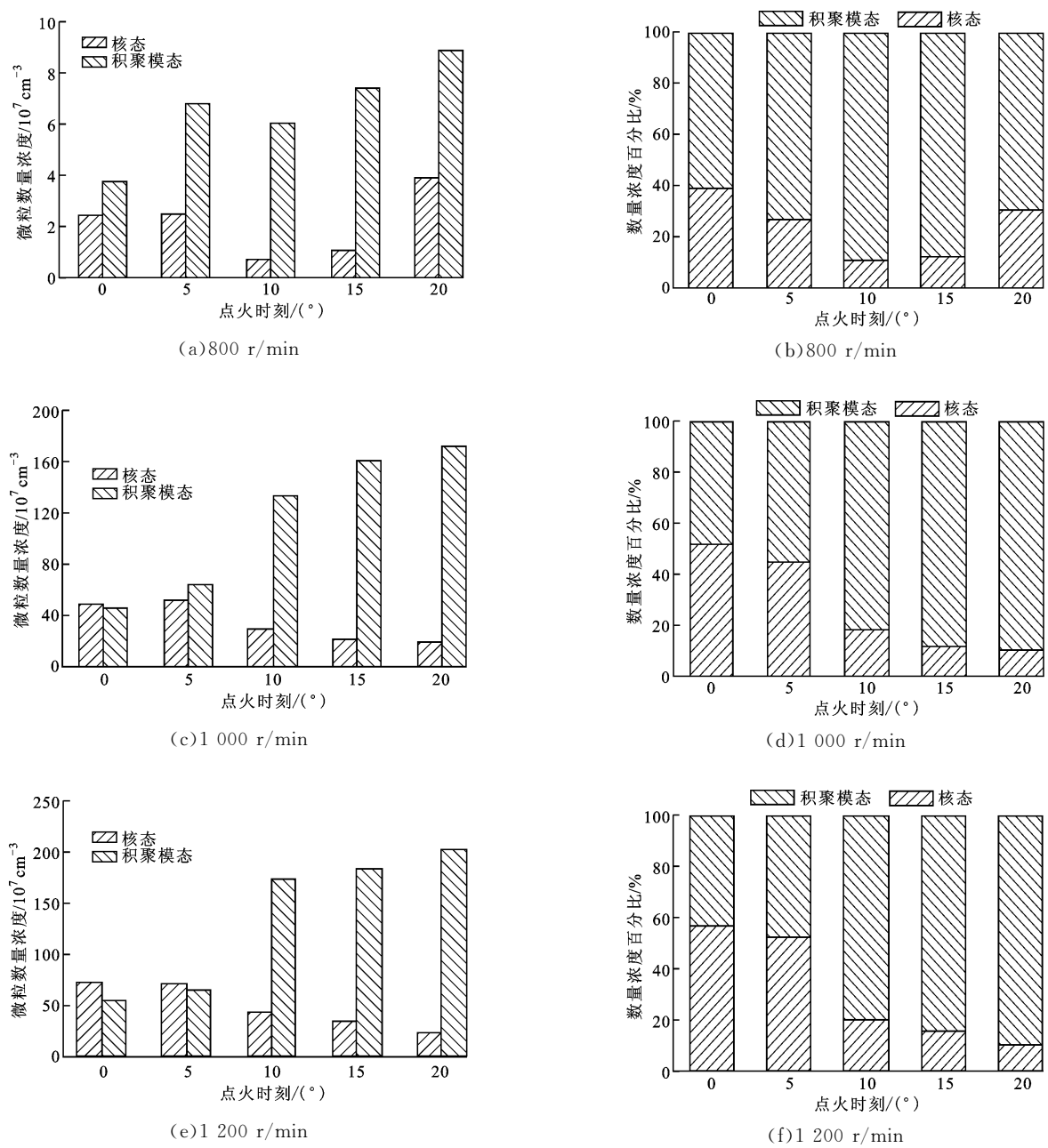
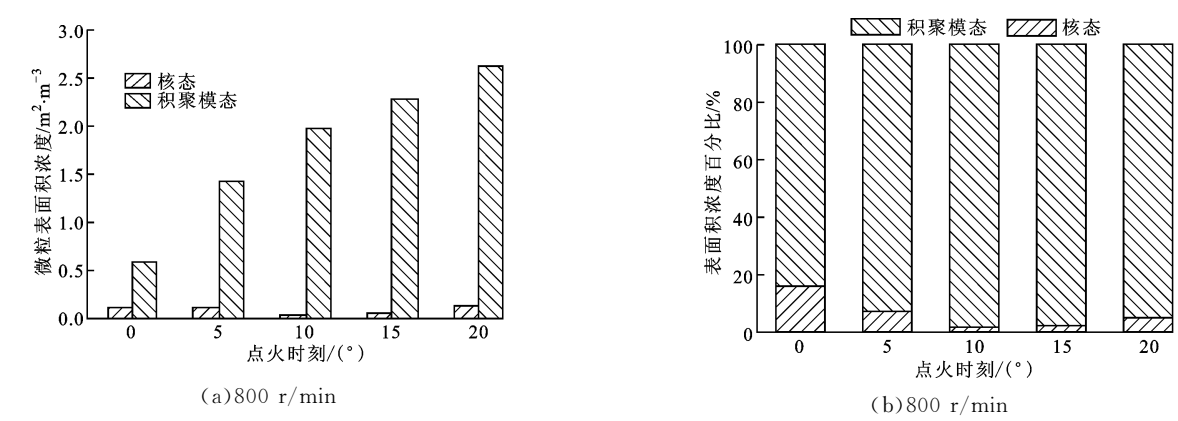
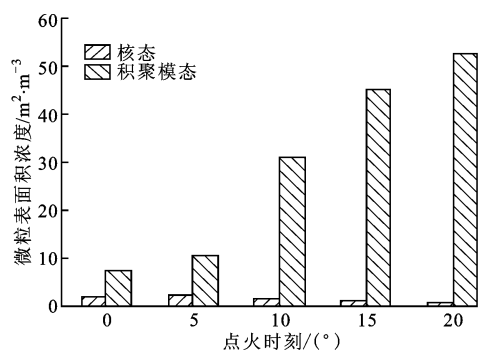
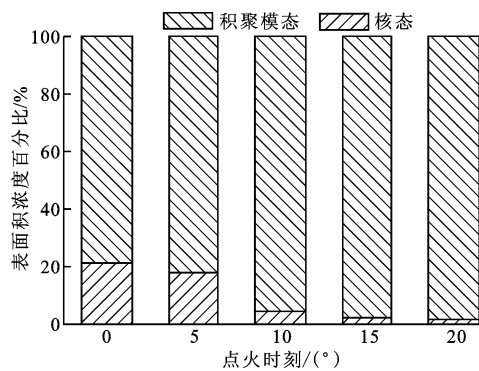


图 4 喷油时刻在上止点前 310°、过量空气系数为 1.0 以及不同点火时刻下微粒数量浓度特性

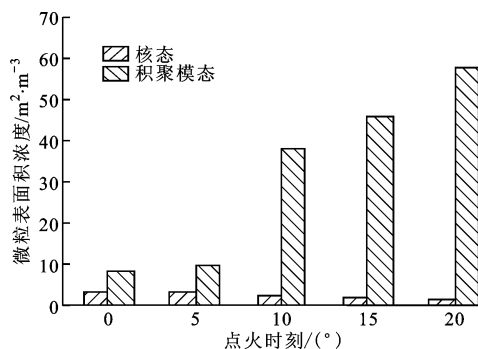




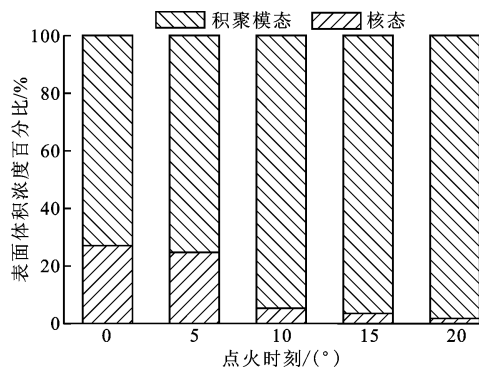
(c) 1 000 r/min



(d) 1 000 r/min

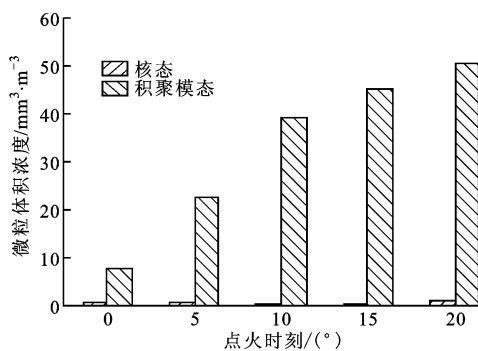


(e) 1 200 r/min

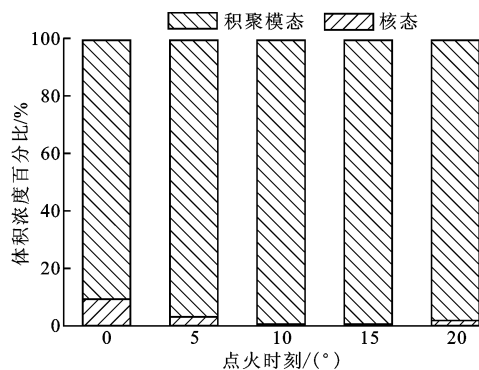


(f) 1 200 r/min

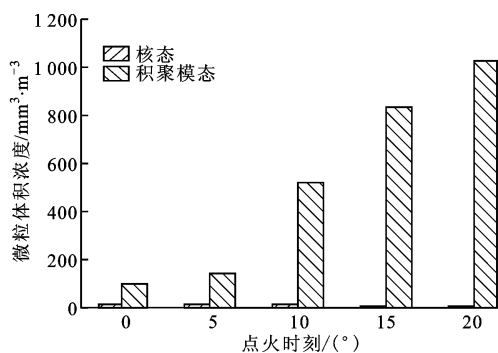
图5 喷油时刻在上止点前310°、过量空气系数为1.0以及不同点火时刻下表面积浓度特性



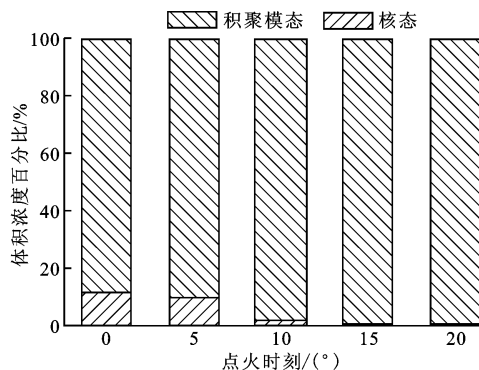
(a) 800 r/min



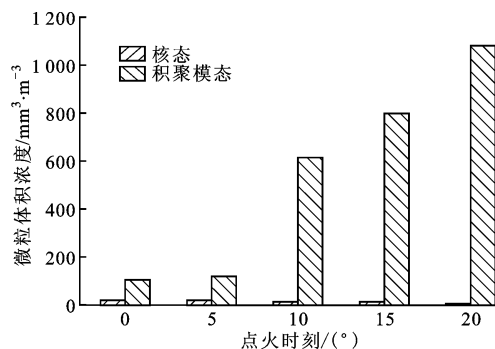
(b) 800 r/min



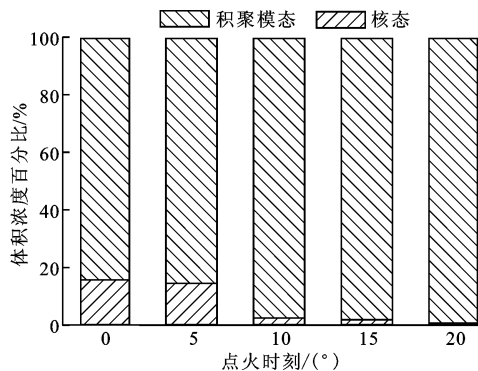
(c) 1 000 r/min



(d) 1 000 r/min



(e) 1 200 r/min



(f) 1 200 r/min

图6 喷油时刻在上止点前 310°、过量空气系数为 1.0 以及不同点火时刻下微粒的体积浓度特性

核模态微粒的体积浓度相对较小,随着点火时刻的提前,核模态微粒体积浓度占总体积浓度的比例逐渐下降,当过量空气系数为 1.0、转速为 1 200 r/min 时,核模态微粒的体积浓度百分比由 15.38% 下降到 0.79%,降幅达 94.8%。这是因为核模态微粒的单个体积相对较小,当基础炭粒吸附于未燃 HC 后在基础炭粒表面形成油膜,表面活性增强,加之此时缸内温度较高,更容易发生聚合反应而形成直径较大的积聚模态微粒^[6],最终核模态微粒明显减少。

3 结 论

本文在一台 4G15 发动机上进行了试验,冷却液温度为(80±1)℃,喷油时刻在上止点前 310°,过量空气系数为 1.0。试验中使用 EEPS 采集、记录数据,由此研究了不同点火时刻对怠速工况 GDI 发动机微粒排放特性的影响,结论如下。

(1)不同点火时刻 GDI 汽油机微粒数量浓度粒径呈单峰分布。积聚模态微粒粒径分布峰值明显大于核模态微粒粒径。

(2)微粒表面积浓度与数量浓度变化规律一致,积聚模态微粒的单位体积表面积随着点火提前角的增加而增大。

(3)微粒的体积浓度随点火时刻的提前而增大,点火时刻在上止点前 20°时,积聚模态微粒的体积浓度比上止点前 0°高出一个数量级。

(4)微粒的表面积浓度和体积浓度主要由积聚模态微粒体现,核模态上述 2 个浓度较小且随着点火时刻的提前进一步减小。

参考文献:

- [1] HEEJE S, KYEONG L, SEUNGMOCK C. Effects of engine operating parameters on morphology of particulates from a gasoline direct injection (GDI) engine, SAE 2013-01-2574 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2013.
- [2] ZHAO F, LAI M C, HARRINGTON D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25: 437-562.
- [3] SEONG H J, LEE K, CHOI S. Effects of engine operating parameters on morphology of particulates from a gasoline direct injection (GDI) engine, 2013-01-2574 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2013.
- [4] 原达. 缸内直喷(GDI)汽油机微粒排放粒径分布特性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012
- [5] KAYES D, HOCHGREB S. Mechanisms of particulate matter formation in spark-ignition engines: 1 Effect of engine operating conditions [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(5): 3957-3967.
- [6] 周松. 内燃机排放与污染控制 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

(编辑 苗凌)