

DOI: 10.7652/xjtuxb201605014

控制参数对增压缸内直喷汽油机部分负荷下 微粒排放特性的影响

钟兵¹, 洪伟¹, 苏岩¹, 解方喜¹, 韩林沛²

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130025, 长春; 2. 浙江吉利汽车研究院有限公司, 311200, 杭州)

摘要: 为研究控制参数对缸内直喷(GDI)汽油机微粒排放特性的影响,在一台 GDI 汽油机上,当控制冷却液温度为 $(85\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、点火正时为 $\text{上止点前 } 30^{\circ}$ 时,研究了部分负荷下喷油压力、喷油正时和过量空气系数对微粒的粒径分布特性和数量浓度排放的影响。结果表明,增大喷油压力,微粒数量浓度峰值及其对应的粒径均减小。发动机转速提高,微粒的总数量浓度升高;1 500 r/min 时的积聚态微粒排放高于核态微粒排放,2 000 r/min 和 2 500 r/min 时核态微粒排放高于积聚态微粒排放。喷油正时为 $\text{上止点前 } 270^{\circ}$ 时,微粒排放最低;喷油正时为 $\text{上止点前 } 330^{\circ}$ 时容易形成较多较大尺寸的微粒,微粒数量浓度比其他喷油时刻高出一个数量级。增大过量空气系数,采用偏稀混合气可以降低微粒排放数量,采用浓混合气,核态微粒数量浓度高于积聚态微粒。该结果可为增压缸内直喷汽油机微粒排放特性研究提供参考。

关键词: 缸内直喷汽油机;部分负荷;微粒排放;控制参数

中图分类号: TK417 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0095-06

Effects of Control Parameters on the Particulate Emission Characteristics of Turbocharged Gasoline Direct Injection Engine under Part Load

ZHONG Bing¹, HONG Wei¹, SU Yan¹, XIE Fangxi¹, HAN Linpei²

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

2. Zhejiang Geely Automobile Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: To investigate the effects of control parameters on the particulate emission characteristics of gasoline direct injection (GDI) engine, a GDI engine was chosen to reveal the effects of control parameters (fuel injection pressure, fuel injection timing and excess air coefficient) on particle diameter distribution and particle number density of emission with the coolant temperature of $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, ignition timing of 30°CA BTDC under part load. The results show that the peak of the particle number density and the corresponding particle diameter reduced with the increase in fuel injection pressure. The total particle number density increased with the higher engine rotation speed. When the engine rotation speed was 1 500 r/min, the accumulation mode particle emissions were higher than the nucleation mode particle emissions compared with 2 000 r/min and 2 500 r/min which had opposite results. The particle emissions were lowest at the fuel injection timing of $270^{\circ}\text{CA BTDC}$, and there had bigger particles whose number density was about one order of magnitude higher than other fuel injection timing when the fuel injection

收稿日期: 2015-12-18. 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: 国家自然科学基金资助项目(51276080,51206059);中国博士后科学基金资助项目(2013M540250)。

网络出版时间: 2016-03-01

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160301.1018.014.html>

timing was 330° CA BTDC. Increasing the excess air coefficient and using lean mixtures could reduce particle emissions. The number density emissions of the nucleation mode particles were higher than accumulation mode particles with using rich fuel-air mixture. The results could provide references for the study of particulate emission characteristics of turbocharged gasoline direct injection engine.

Keywords: GDI engine; part load; particulate emission; control parameter

为了满足日益严格的法规要求,很多汽车厂商在汽车上采用了缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)汽油机。GDI 汽油机直接将燃油喷入缸内,同时可以在不同工况对燃油喷油量和燃烧过程进行更为精确的控制,从而降低燃油消耗量,提高输出功率^[1-2]。若采用分层燃烧、进气冷却和增压等相关措施,可进一步降低冷启动未燃碳氢和二氧化碳排放,因此 GDI 汽油机开始广泛应用于乘用车^[3]。尽管如此,GDI 汽油机仍存在一些缺点,与进气道喷射汽油机相比,GDI 汽油机是将燃油直接喷入缸内,燃油和空气混合时间较短,从而造成雾化不良和燃油湿壁等现象发生,因此其具有较高的微粒排放^[2]。

微粒对人类健康有着重要影响^[4]。大气中颗粒物按空气动力学直径可分为 3 类:粗颗粒物($<10\ \mu\text{m}$)、细颗粒物($<2.5\ \mu\text{m}$)、超细颗粒物($<0.1\ \mu\text{m}$)。超细颗粒物粒径小,易在肺内沉积,并可进入体内,同时其表面积较大,可以吸附较多的有害物质^[5],因此对人体呼吸系统和心脑血管产生不良影响,影响人类身体健康。所以,研究 GDI 汽油机的微粒排放特性具有十分重要的现实意义。

中国 III、IV 阶段轻型汽车污染物排放限值并没有对汽油车颗粒物排放进行限制,V 阶段加入了对 GDI 汽油机颗粒物质量(PM)排放的限制,而欧 VI 排放法规加入了对颗粒物数量(PN)排放的限制。国外学者对 GDI 微粒排放进行过较多的研究,文献[1,6-9]探究了喷油正时等对 GDI 发动机微粒的粒径、数量浓度和微粒的微观特性的影响,研究表明微粒生成是因为燃油雾化不良造成的,微粒尺寸对喷油正时较为敏感,提前喷油微粒尺寸增大,推迟喷油更易产生小尺寸纳米级颗粒。Bonatesta 等探究了点火正时等对微粒尺寸的影响,发现点火正时同样严重影响微粒尺寸^[7,10]。Farron 等探究了喷油压力对微粒排放的影响,发现降低喷油压力会导致微粒和未燃碳氢化合物排放量增大^[8]。

国内学者开展了过量空气系数^[11]、点火正时^[12-13]和喷油时刻^[14]等控制参数对 GDI 微粒排放的影响,其中过量空气系数对微粒排放的影响研究

不够深入,且缺少喷油压力对微粒排放特性的影响研究,因此本文可以作为该方面的有效补充。

鉴于点火正时对微粒排放影响的研究较多,因此本文固定点火正时,在一台 GDI 汽油机上,针对常用转速(1 500、2 000 和 2 500 r/min),控制发动机冷却水温度不变,在部分负荷(约 25%,40 N·m)下研究了控制参数(喷油时刻、喷油压力和过量空气系数)对微粒的数量浓度和粒径分布特性的影响。

1 试验装置

1.1 试验设备

图 1 为试验台架布置,其中发动机参数如表 1 所示,同时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 AVL 缸压传感器测量缸内压力,利用自行开发的基于飞思卡尔单片机控制系统在线调整发动机的运行参数。

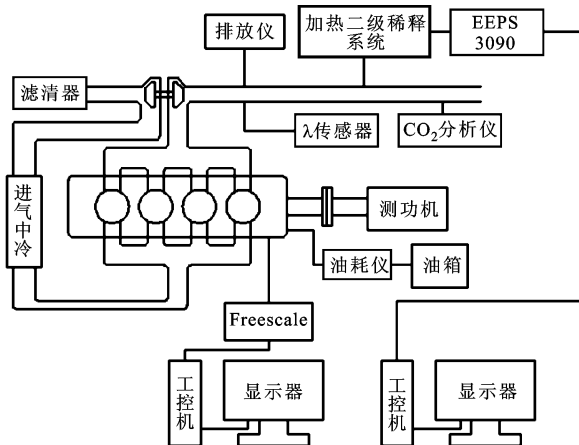


图 1 发动机试验台架布置示意图

试验采用美国 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。由于 GDI 汽油机排气中的微粒数量浓度具有较高的数量级^[6],为防止超出粒径质谱仪的测量范围,试验中采用带有加热功能的二级稀释系统进行稀释。各个工况点的总稀释比并不一致,每采集一个工况点记录一次稀释比,处理数据时每个数据点乘上各自的

稀释比后得出实际微粒排放。一级和二级加热的温度分别为 250 ℃ 和 300 ℃,一级加热的目的是为了对稀释空气进行加热,二级加热用于去除排气中的挥发性物质。

表 1 发动机参数

发动机类型	增压、GDI
排量/mL	1 390
压缩比	10
缸径/mm	75.6
行程/mm	76.5
1 800~3 500 r/min 下扭矩/N·m	210
4 800 r/min 下功率/kW	96

1.2 试验方法

试验中控制发动机转速为 1 500、2 000 和 2 500 r/min,冷却液温度为 (85±2) ℃,每一循环供油量为 0.063 mL(约 25% 负荷,40 N·m),使用 EEPS 采集并记录微粒排放数据,由此研究了控制参数对增压 GDI 汽油机微粒的粒径 D_p 分布和数量浓度 $dN/dlg(D_p/nm)$ 特性的影响,其中 N 为每立方厘米微粒的个数。试验中控制参数如表 2 所示。

表 2 试验中控制参数

点火时刻/ (°)	喷油时刻/ (°)	过量空气 系数	喷油压力/ MPa
30	330	0.9	4.5
	300		6.5
	270		8.5
	240	1.1	10.5
	210	1.2	12.5

注:粗体参数为其他参数变化过程中保持不变的参数。

2 试验结果及分析

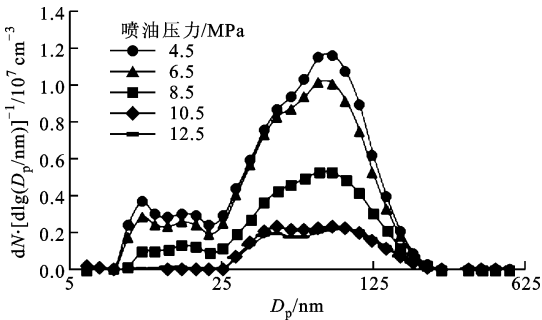
2.1 不同喷油压力的微粒排放特性

转速为 1 500、2 000 和 2 500 r/min,每一循环供油量为 0.063 mL,点火时刻于上止点前 30°,喷油时刻于上止点前 270°,过量空气系数为 1.0 时微粒排放特性如图 2 所示。

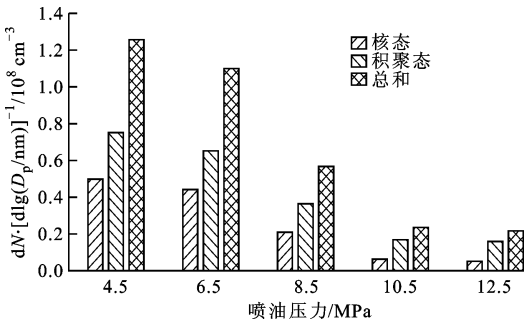
从图 2 可以看出,随着燃油喷油压力的升高,微粒数量浓度峰值逐渐降低,浓度峰值对应的微粒粒径逐渐减小。以 2 500 r/min 为例,当喷油压力从 4.5 MPa 提升到 12.5 MPa 时,数量浓度峰值由 $2.4 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 降低到 $0.93 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$,峰值浓度对应的粒径由 52.3 nm 减小为 39.2 nm。

分析可知:随着喷油压力的降低,油滴尺寸增大,油束贯穿距缩短,燃油雾化变差,燃油和空气混

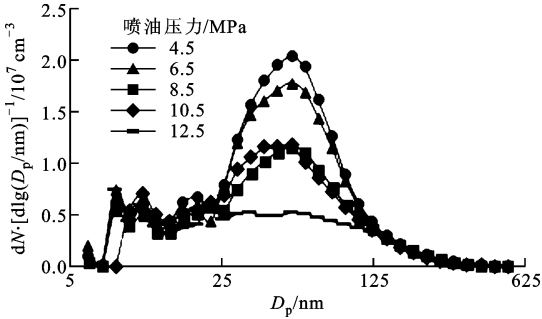
合不良,混合气均匀性变差,微粒和未燃碳氢化合物(UHC)的排放增多,微粒成核量增多,从而导致微粒排放的数量浓度增高;较大的液滴尺寸更易生成较大尺寸的微粒,使 UHC 排放增多,并对微粒生长过程起到了促进作用,从而加速了一系列表面生长等过程,致使微粒粒径增大。此外,喷油压力升高,



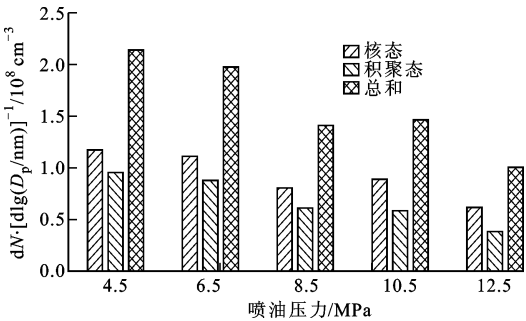
(a) 1 500 r/min 时微粒的粒径分布



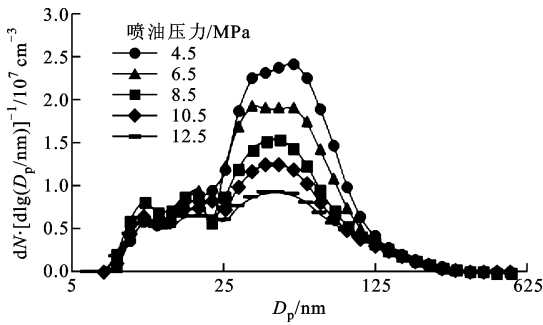
(b) 1 500 r/min 时微粒的数量浓度分布



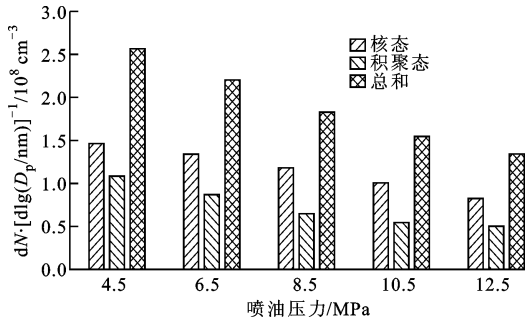
(c) 2 000 r/min 时微粒的粒径分布



(d) 2 000 r/min 时微粒的数量浓度分布



(e) 2 500 r/min 时微粒的粒径分布



(f) 2 500 r/min 时微粒的数量浓度分布

图 2 微粒的粒径分布特性和数量浓度随喷油压力的变化历程

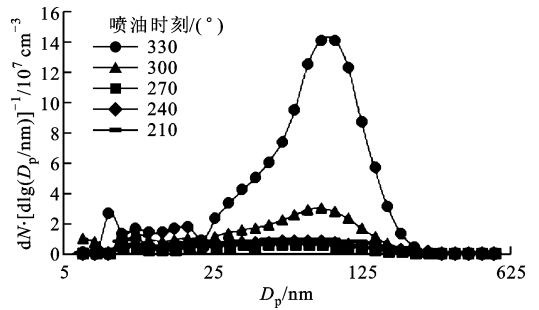
混合气混合均匀,燃烧改善,而燃烧温度和排气温度升高都可以加速微粒和 UHC 的后期氧化,致使微粒粒径减小,数量浓度降低。

对比图 2 的柱状图发现:①发动机转速提高,微粒数量浓度总和的排放量升高;②发动机转速为 1 500 r/min 时积聚态微粒排放高于核态微粒排放,与 2 000 r/min 和 2 500 r/min 的规律相反。例如,当发动机转速为 1 500 r/min、喷油压力为 4.5 MPa 时,数量浓度峰值为 $1.2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$,其对应的微粒粒径为 69.8 nm,而 2 000 r/min、喷油压力为 4.5 MPa 时,数量浓度峰值为 $2.0 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$,对应粒径为 52.3 nm。分析可知,发动机转速升高,气体温度(缸内和排气)升高,气体停留时间缩短,升高的缸内最高温度增大了微粒的生成和氧化率,但缩短了的停留时间会降低上述 2 个过程的持续时间。从试验结果来看,微粒的生成速率大于氧化速率。同等负荷下,与 2 000 r/min 和 2 500 r/min 相比,1 500 r/min 时节气门开度较小,发动机缸内气流运动较弱,较弱的气流运动不利于燃油雾化,这种环境利于生成较多的积聚态微粒。燃油雾化不良,碳氢化合物排放量增多,进而颗粒可在膨胀和排气过程中吸附更多的碳氢化合物,使得核态和积聚态微粒尺寸进一步增大。

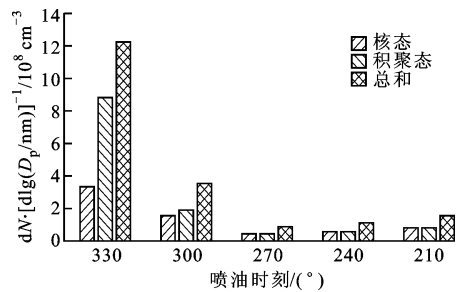
2.2 不同喷油正时的微粒排放特性

转速为 1 500、2 000 和 2 500 r/min,每一循环供油量为 0.063 mL,点火时刻于上止点前 30° ,喷油压力为 8.5 MPa,过量空气系数为 1.0 时微粒排放特性如图 3 所示。

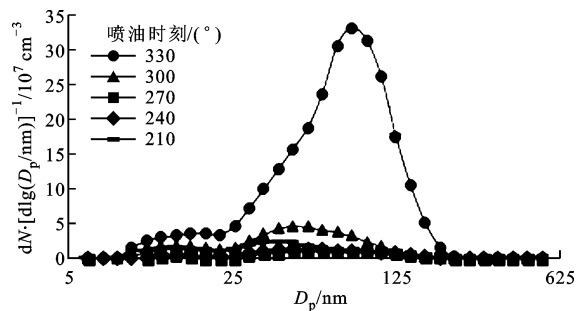
本试验是在进气行程喷油。从图 3 中可以看出,随着喷油时刻的推迟(由上止点前 330° 到 210°),微粒总数量先降低后升高,核态和积聚态微粒也呈现出同样的规律。喷油正时于上止点前 330° 出现较多、较大尺寸的微粒,积聚态微粒数量浓度明显高



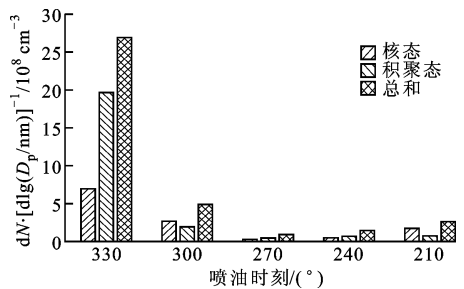
(a) 1 500 r/min 时微粒的粒径分布



(b) 1 500 r/min 时微粒的数量浓度分布



(c) 2 000 r/min 时微粒的粒径分布



(d) 2 000 r/min 时微粒的数量浓度分布

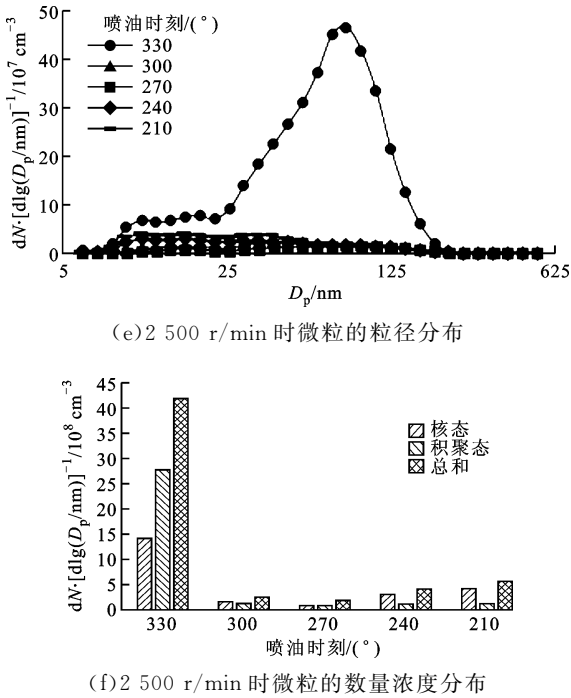


图 3 微粒的粒径分布特性和数量浓度随喷油时刻的变化历程

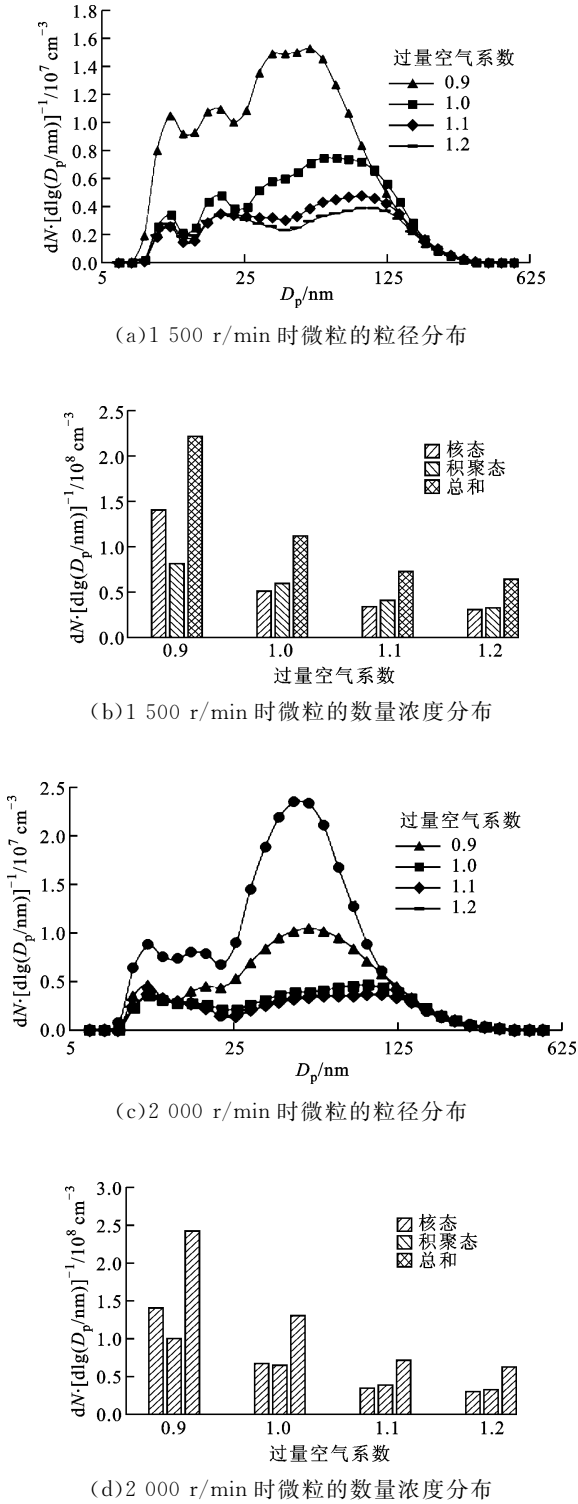
于核态微粒数量浓度,前者是后者的 2~3 倍。例如,图 3c、3d 中喷油正时于上止点前 330°生成的微粒总数量浓度高达 $40.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$,比 270°喷油高出一个数量级。喷油正时于上止点前 270°出现了最少的微粒排放。

文献[10]研究发现,喷油正时于上止点前 330°,加之较高的喷油压力(8.5 MPa),燃油喷雾可能撞击到活塞顶部,小部分的燃油将停留在缸壁和活塞顶端,直至压缩行程末期,这种局部富油区域和液态燃油的存在促进了微粒成核^[11],致使微粒成核率增大,进而使颗粒发生碰撞而凝聚和聚集的概率增大,容易形成较多、较大尺寸的微粒,最终使积聚态微粒排放高于核态微粒。推迟喷油,液态燃油和局部富油区域减小,上述情况得到改善,微粒排放降低。若继续推迟喷油,则燃烧温度降低,低温环境加之缩短了停留时间,不利于燃油和空气的混合,虽然存在局部过浓区域,但是低温环境对微粒的成核、聚集和凝聚过程起到了抑制作用,从而使得微粒排放呈现出上述规律。进气行程后期喷油,微粒排放相应增多,但增长幅度不大,这是因为相较于早喷,燃油空气混合时间缩短,燃油雾化不良容易形成较大尺寸的微粒。再者,推迟喷油,排温降低,低温环境使得微粒的后期氧化不足^[12],最终生成较多、较大尺寸的微粒。

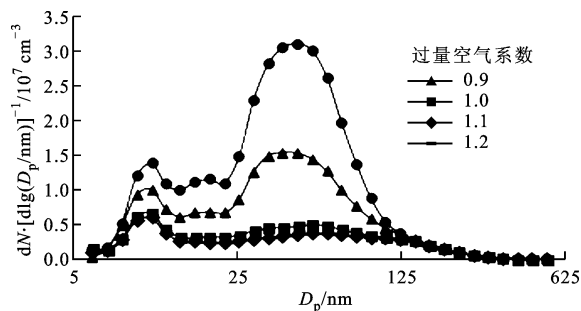
2.3 不同过量空气系数的微粒排放特性

转速为 1 500、2 000 和 2 500 r/min 时,每一循

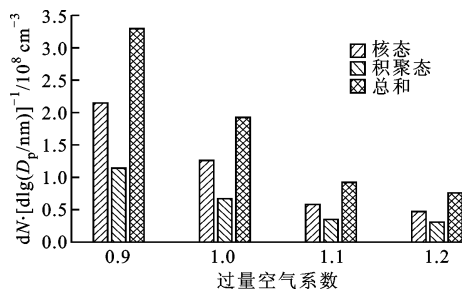
环供油量为 0.063 mL,点火时刻于上止点前 30°,喷油正时于上止点前 270°,喷油压力为 8.5 MPa 时的微粒排放特性如图 4 所示。



从图 4 中可以看出,当过量空气系数为 1.2 时,微粒数量浓度最低,随着过量空气系数的减小,数量浓度峰值增大。采用浓混合气,核态微粒数量浓度和微粒总数量浓度较高。例如:转速为 2 000 r/min,



(e) 2 500 r/min 时微粒的粒径分布



(f) 2 500 r/min 时微粒的数量浓度分布

图4 微粒的粒径分布特性和数量浓度随过量空气系数的变化历程

过量空气系数由 0.9 增大到 1.2 时,微粒总数量浓度由 $3.4 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 降低为 $0.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$;过量空气系数为 0.9 时,核态微粒数量浓度是积聚态微粒的 1.5 倍左右;过量空气系数增大到 1.2 时,核态和积聚态二者排放水平相当。

众所周知,随着过量空气系数的增大,油少气多,发动机排温升高,较高的排气温度增强了核态微粒的氧化(核态微粒是液态或半固态,积聚态微粒基本是固态的),加之碳氢化合物排放降低,抑制了膨胀和排气行程中微粒尺寸的增大^[15],因此,过量空气系数增大、发动机排温升高对微粒的成核和尺寸增大起到了抑制作用^[16]。采用浓混合气燃烧提高了微粒的成核速率,由于不存在局部富油区域和液态燃油,因此不会产生像低转速(1 500 r/min)和燃油早喷(上止点后 330°)时生成较多积聚态微粒,而是生成较多的核态微粒。

3 结 论

本文在一台增压直喷汽油机上保持发动机点火时刻不变,转速为 1 500、2 000 和 2 500 r/min,冷却液温度为 $(85 \pm 2)^\circ\text{C}$,研究了改变控制参数(喷油压力、喷油正时和过量空气系数)对部分负荷下微粒粒径分布特性和微粒数量浓度的影响,结论如下。

(1)增大喷油压力,喷雾贯穿距增大有助于燃油雾化而形成均匀混合气,数量浓度峰值及其对应的粒径均减小。发动机转速提高,微粒数量浓度排放量升高;当发动机转速为 1 500 r/min 时,积聚态微粒排放高于核态微粒排放,而 2 000 r/min 和 2 500 r/min 时核态微粒排放高于积聚态微粒排放。

(2)喷油正时于上止点前 270° 左右时,微粒排放较低。推迟喷油时刻,微粒总数量浓度先降低后升高,核态和积聚态微粒呈现出同样的规律。喷油正时于上止点前 330° 时,出现了较多、较大尺寸的微粒,比其他喷油时刻高出了一个数量级,且积聚态微粒数量浓度大约是核态微粒的 2~3 倍。

(3)增大过量空气系数、采用偏稀混合气燃烧有利于降低微粒排放。采用浓混合气燃烧,核态微粒的数量浓度高于积聚态微粒。

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] LIANG Bin, GE Yunshan. Comparison of PM emissions from a gasoline direct injected (GDI) vehicle and a port fuel injected (PFI) vehicle measured by electrical low pressure impactor (ELPI) with two fuels: gasoline and M15 methanol gasoline [J]. Journal of Aerosol Scienc, 2013, 57(5): 22-31.
- [3] ZHAO F, LAI M C. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(5): 437-562.
- [4] CUCCHI M, SAMUEL S. Influence of the exhaust gas turbocharger on nano-scale particulate matter emissions from a GDI spark ignition engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 76(2): 167-174.
- [5] 赵金镔. 大气超细颗粒物的分布特征及其对健康的影响 [J]. 环境与职业医学, 2007, 24(1): 76-79.
ZHAO Jinzhuo. The distributing character and composition of ultrafine particles and its effects on human health [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2007, 24(1): 76-79.
- [6] SEONG S H. CHOI examination of nanoparticles from gasoline direct-injection (GDI) engines using transmission electron microscopy (TEM) [J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(2): 175-181.

(下转第 133 页)