

DOI: 10.7652/xjtuxb201605013

稀燃条件下废气再循环对缸内直喷汽油机 微粒排放粒径分布的影响

麻斌, 董伟, 高莹, 孙平, 何玲, 徐长建, 蒲超杰
(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130025, 长春)

摘要: 在一台壁面/空气导向组合式喷雾的汽油缸内直喷(GDI)发动机上进行废气再循环(EGR)实验,以研究稀燃条件下 EGR 对 GDI 发动机均质和分层模式下微粒排放粒径分布及燃烧的影响。实验结果表明:EGR 的引入会抑制缸内燃烧,使缸压和瞬时放热率峰值降低、燃烧相位推迟、碳氢化合物排放增多;在均质和分层模式下随着 EGR 率升高,核态粒子数量浓度均呈先降后增的趋势,即存在最优 EGR 率使核态粒子数量浓度最低,均质模式下最优 EGR 率为 8%,降幅为未加入 EGR 时的 50%左右,而分层模式最优 EGR 率为 5%,降幅只有 20%左右;在分层模式下,积聚态粒子数量浓度随 EGR 率不断升高而持续降低;均质模式相较分层模式产生的积聚态粒子较少、核态粒子较多,2 000 r/min 相较 1 500 r/min 产生的积聚态粒子较多、核态粒子较少。该结果可为直喷汽油机稀薄燃烧的微粒排放控制提供参考。

关键词: 直喷汽油机;稀燃;均质模式;分层模式;废气再循环;微粒排放
中图分类号: TK417 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0087-08

Effects of EGR on the Particle Emission Size Distribution in Lean Burn Condition for Gasoline Direct Injection Engine

MA Bin, DONG Wei, GAO Ying, SUN Ping, HE Ling, XU Changjian, PU Chaojie
(State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The effects of exhaust gas recirculation (EGR) on the combustion and particle emissions of a gasoline direct injection (GDI) engine in homogeneous or stratified combustion mode under lean burn condition were investigated by an EGR experiment on a GDI engine with a combination of wall-guiding spray and air-guiding spray. The results show that the adoption of EGR suppresses the cylinder combustion, reduces the peak values of cylinder pressure and instantaneous heat release rate, delays the combustion phase and increases the emission of hydrocarbon. In the homogeneous and stratified mode, the nucleation particle number concentration firstly decreases and then increases with the increasing EGR rate, so there exists an optimum EGR rate to lead to a least number concentration of nucleation mode particles. The optimum rate of 8% results in a 50% reduction of concentration in the homogeneous mode while the rate of 5% results in a 20% reduction of concentration in the stratified mode. The number concentration of accumulation mode particle decreased with the increase of EGR rate in the stratified mode. The number concentration of accumulation mode gets less and the number

concentration of nucleation mode gets more in the homogeneous mode compared with the stratified mode. The number concentration in accumulation mode gets more and the number concentration in nucleation mode less at the speed of 2 000 r/min compared with the speed of 1 500 r/min.

Keywords: gasoline direct injection engine; lean burn condition; homogeneous mode; stratified mode; particulate emission

作为最具经济效益的先进汽油机技术之一,汽油缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)技术在降低燃油消耗率及低碳排放方面具有显著优势。一方面因为缸内直喷汽油的雾化吸热,使得 GDI 发动机比进气道喷射(port fuel injection, PFI)发动机拥有更为出色的抗爆性能,从而允许采用更高的压缩比,同时缸内燃油雾化吸热也有助于增加发动机新鲜充量;另一方面也因为 GDI 发动机相较 PFI 发动机拥有更为出色的稀燃特性。

文献[1-2]研究结果显示,采用稀燃的 GDI 发动机可以在保证燃烧稳定的前提下获得更高的燃烧效率,进一步降低 GDI 发动机燃油消耗率,节油效果相较 PFI 发动机可达 20%~25%。然而,工作于稀燃条件的 GDI 发动机,也带来两方面区别于 PFI 发动机的排放控制问题:一方面其独特的混合气制备方式将不可避免地缩短了缸内混合气制备时间,并有可能出现燃油湿壁等现象,相较 PFI 发动机其会产生更高的微粒排放且该问题在当量混合气及加浓混合气条件下同样存在^[3-4];另一方面传统三效后处理装置在稀燃条件下将出现对 NO_x 转化效率急剧降低的问题,需要采用废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)、三效后处理装置配合 NO_x 吸附催化剂及间歇性加浓混合气等技术控制 NO_x 排放^[5]。

文献[6-7]研究显示,三效催化器对 GDI 发动机核态粒子的产生有明显的抑制作用,对积聚态粒子则影响不大。文献[8]研究显示,GDI 发动机排放的微粒数量浓度及核态粒子数量浓度与微粒总数量浓度之比随点火角的提前而增大。文献[9]研究显示,GDI 发动机微粒粒径分布随过量空气系数的增大,由核态、积聚态双峰分布变化为核态单峰分布,且总数量浓度降低。文献[10-11]研究显示,在 GDI 发动机全负荷工况下应用 EGR 技术,CO₂ 排放最多可降低 17%,碳氢化合物(HC)、CO、NO_x 排放最多可降低 80%,且冷 EGR 可有效抑制爆震。文献[12]研究了 EGR 对 GDI 发动机微粒排放的影响,结果表明在多个工况下 EGR 可显著降低微粒

排放,且在部分工况内部 EGR 在降低微粒排放方面比外部 EGR 更有效。

针对 EGR 对 GDI 发动机稀燃条件下微粒排放特性的影响,本文利用一台 1.8 L 直列四缸壁面/空气导向组合式 GDI 发动机,在稀燃条件下结合自主开发的电子控制单元(ECU),分别研究了 GDI 发动机均质和分层 2 种燃烧模式中 EGR 率 r_{EGR} 对微粒排放的影响。

1 实验台架及测控系统

本文实验采用的 GDI 发动机为壁面/空气导向组合式喷雾,喷油器安装于进气道侧缸壁,进气道内安装滚流挡板,活塞顶面有专门设计的凹坑,发动机具体参数如表 1 所示。

表 1 发动机参数

结构参数	指标	结构参数	指标
型式	直列、水冷、四冲程	行程/mm	84.2
压缩比	9.6	点火缸号顺序	1—3—4—2
气缸数	4	额定功率/kW	118
缸径/mm	82.5	额定扭矩/N·m	250

注:额定功率转速为 5 000~6 200 r/min;额定扭矩转速为 1 500~4 200 r/min。

发动机控制采用实验室自主开发的实验 ECU,主控芯片为飞思卡尔 16 位双核处理芯片 9S12XDP-512,喷油器及高压油泵驱动模块采用意法公司 L9781 专业级芯片实现。图 1 为发动机实验台架布置方案,图 2 为实验台架实物,图 3 为实验 ECU 实物。

HC、NO_x、CO、CO₂ 等常规排放测试由 AVL 公司产 Di-Gas-4000 完成;发动机过量空气系数由 ETAS 公司产 LANBDA. LA4 配合氧传感器 LSU4 进行监测;燃烧过程监测及燃烧参数测试由日本 Ono Sokki 公司产 DS9100 型燃烧分析仪配合 AVL 公司产火花塞式缸压传感器和 Kistler 角标仪完成。微粒测量采用 TSI Model3090 发动机排放颗粒光谱仪,共分 22 级,粒径测量范围为 5~560 nm。由于发动机排气中微粒含量较高,在进行测量之前需

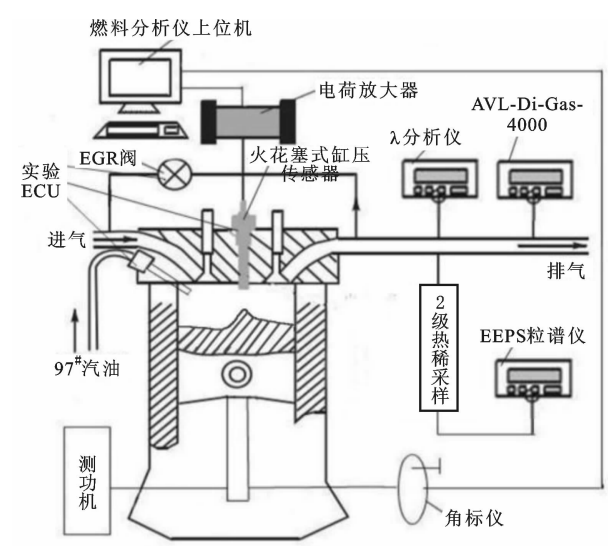


图 1 发动机实验台架布置

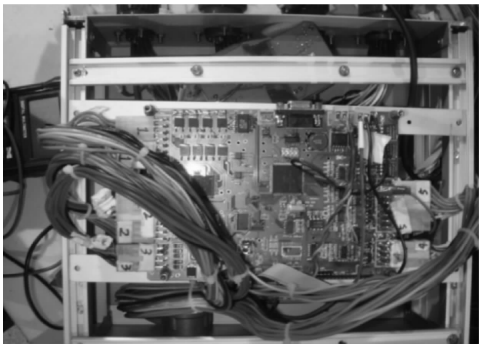


图 3 自主研发的实验 ECU



图 2 发动机实验台架实物

先进行稀释采样,而相关研究显示,稀释采样条件对微粒测量精度尤其是核态粒子(粒径 $\leq 30\text{ nm}$)的测量有很大影响^[13],故我们自行开发了 GDI 发动机排气微粒 2 级热稀释采样装置,具体工作原理参见文献^[14],结构简图如图 4 所示。利用该设备可精确

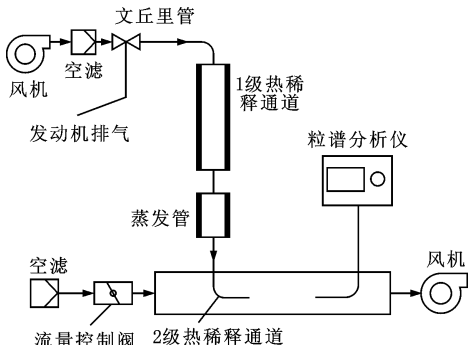


图 4 热稀释采样系统结构简图

控制稀释温度、稀释停留时间、稀释比等排气稀释过程关键参数^[14]。经过前期实验,选取了稀释比为 260、稀释温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,以保证较高的实验可重复性和实验精度。

实验选取发动机稀燃条件下 $1\,500\text{ r/min}$ 及 $2\,000\text{ r/min}$ 小负荷工况,分别研究 EGR 对 GDI 发动机均质和分层 2 种燃烧模式下微粒排放粒径分布和总数量浓度 $\text{dN/dlg}(D_p/\text{nm})$ 的影响,其中 N 为每毫升微粒的个数, D_p 为微粒粒径。表 2 对具体实验工况参数进行了描述。

表 2 实验工况参数描述

转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	平均有效 压力/ kPa	冷却水 温度/ $^{\circ}\text{C}$	过量空 气系数	点火时刻/ $(^{\circ})$	喷油压力/ MPa	喷油正时/ $(^{\circ})$	燃烧 模式	$r_{\text{EGR}}/\%$
1 500	400	83	1.2	30	3	240	均质	0.5, 8, 11, 15, 18
						60	分层	
2 000	400	83	1.2	35	7	240	均质	
						60	分层	

2 实验结果及分析

通常将发动机微粒排放按照当量直径划分为核态、积聚态和粗态 3 种。核态粒子粒径在 $3\sim 30\text{ nm}$ 之间,积聚态粒子粒径在 $30\sim 500\text{ nm}$ 之间,粗态粒子粒径大于 $2\,500\text{ nm}$ 。由于粗态粒子数量较少,对

GDI 发动机微粒排放影响不大^[15],所以此处不再讨论。

2.1 EGR 对 GDI 发动机均质模式下微粒排放影响

$1\,500\text{ r/min}$ 及 $2\,000\text{ r/min}$ 均质燃烧模式下, EGR 率对 GDI 发动机微粒排放粒径分布及总数量浓度的影响规律分别如图 5 和图 6 所示。

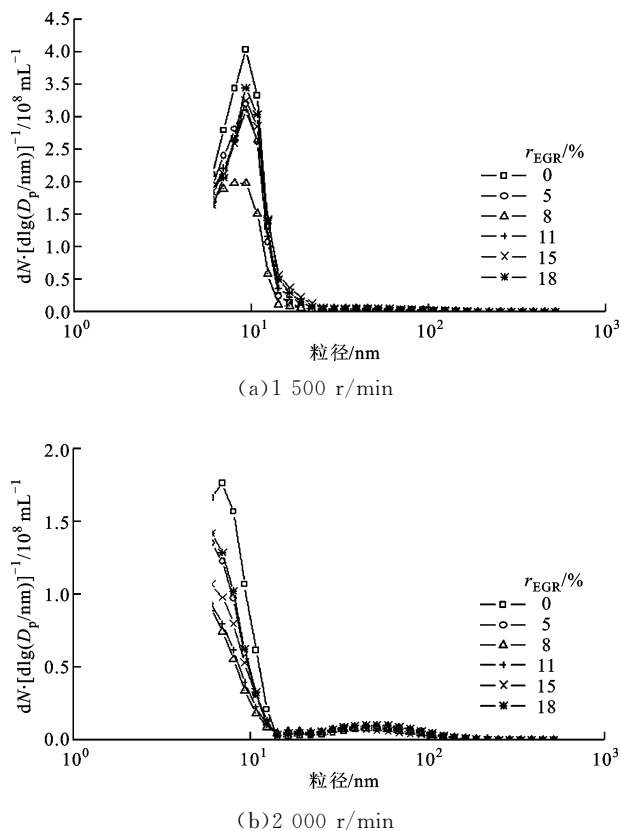


图 5 均质燃烧模式 EGR 对 GDI 发动机微粒排放粒径分布的影响

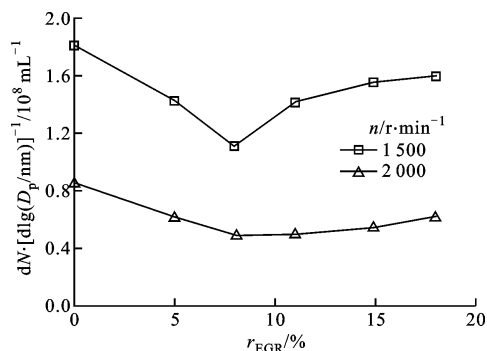


图 6 均质燃烧模式 EGR 对 GDI 发动机微粒排放总数量浓度的影响

由图 5 可见:均质燃烧模式下积聚态粒子的数量浓度很小,核态粒子的较多,其中 1 500 r/min 工况粒径峰值在 10 nm 附近,2 000 r/min 工况粒径峰值小于 10 nm;随 EGR 率不断加大,2 种转速工况的核态粒子数量浓度均呈 U 型变化趋势,且拐点出现在 EGR 率为 8% 时。由图 6 可见,随 EGR 率不断升高,2 种转速工况的微粒总数量浓度也呈 U 型变化趋势,与核态粒子数量浓度变化趋势一致,且最大值出现在 EGR 率为 0 时。

发动机工作过程生成的 HC 化合物及燃料不完

全燃烧生成的碳烟粒子是 GDI 发动机微粒排放的主要诱因,前者通过吸附作用形成核态粒子,后者通过吸附作用及团聚形成积聚态粒子^[16-17]。为了进一步分析实验现象,测量了上述均质燃烧工况下、不同 EGR 率时的燃烧参数和排气中 HC 含量(质量分数),如图 7~图 9 所示。

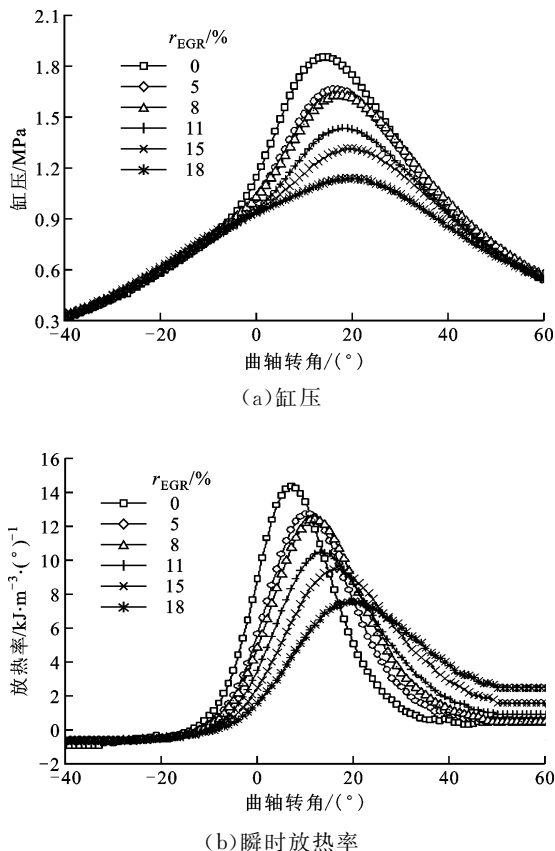


图 7 1 500 r/min 均质燃烧模式下 EGR 对 GDI 发动机燃烧参数的影响

如图 7、图 8 所示,1 500 r/min 和 2 000 r/min 均质工况下,随着 EGR 率不断升高,缸压和瞬时放热率峰值持续减小、燃烧相位右移,即缸内放热过程趋于迟缓。这主要是因为废气的热容效应和稀释作用随 EGR 率升高不断增强,热容效应使缸内燃烧温度降低,稀释作用使缸内氧浓度降低,两者共同抑制了缸内燃烧,使发动机燃烧相位后移,燃烧温度降低,后燃增多。由图 9 可见,随 EGR 率升高,排气中 HC 含量呈先小幅增大后急剧增大的变化趋势。

分析可知,实验工况在小 EGR 率时核态粒子浓度减小、粒径峰值左移。原因是小 EGR 率导致的后燃使膨胀行程中缸内温度升高,对核态粒子产生的氧化作用加强,但此时燃烧产生 HC 化合物浓度并没有大幅提升,这有利于减小核态粒子数量浓度和粒径峰值;大 EGR 率时,虽然膨胀行程中较高

的缸内温度对核态粒子的氧化作用依然存在,但大 EGR 率导致燃烧过程中产生的 HC 含量急剧增大,由此提高了 HC 化合物的成核几率,导致核态粒子数量浓度增大,粒径峰值右移。

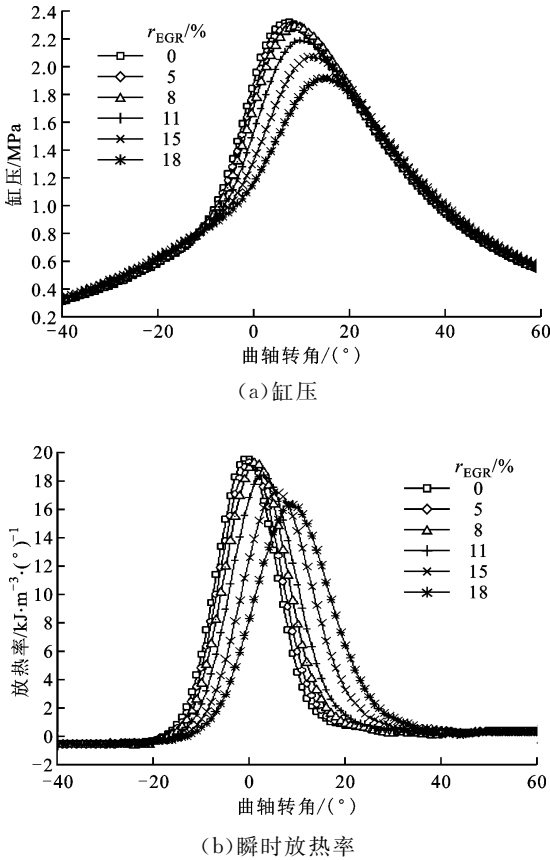


图 8 2 000 r/min 均质燃烧模式下 EGR 对 GDI 发动机燃烧参数的影响

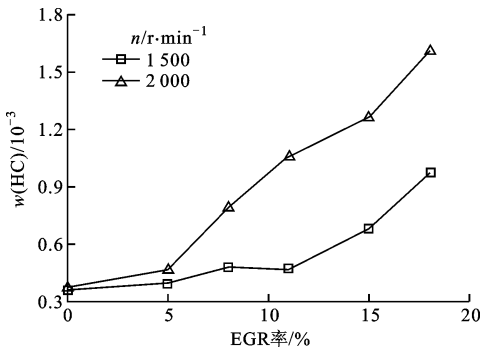


图 9 均质燃烧模式下 EGR 对 GDI 发动机 HC 排放的影响

2.2 EGR 对 GDI 发动机分层模式下微粒排放的影响

1 500 r/min 及 2 000 r/min 分层燃烧模式下, EGR 率对 GDI 发动机微粒排放粒径分布及总数量浓度的影响规律分别如图 10、图 11 所示。

由图 10 可见,分层燃烧模式下,发动机排气微

粒呈核态、积聚态双峰分布,其中积聚态粒子粒径峰值在 50 nm 附近,核态粒子粒径峰值在 10 nm 附近。随 EGR 率不断升高,2 种转速工况的核态粒子数量浓度和粒径峰值均呈 U 型变化趋势,拐点发生在 EGR 率为 5% 时,不同于均质模式,小 EGR 率对分层模式下核态粒子的抑制作用较小,且核态粒子数量浓度最大值出现在 EGR 率为 0 时。积聚态粒子随 EGR 率的不断升高呈现出数量浓度降低、粒径峰值左移,即粒径减小的变化趋势。如图 11 所示,由于实验工况下积聚态粒子与核态粒子变化趋势不统一,所以粒子总数量浓度无明显变化趋势。

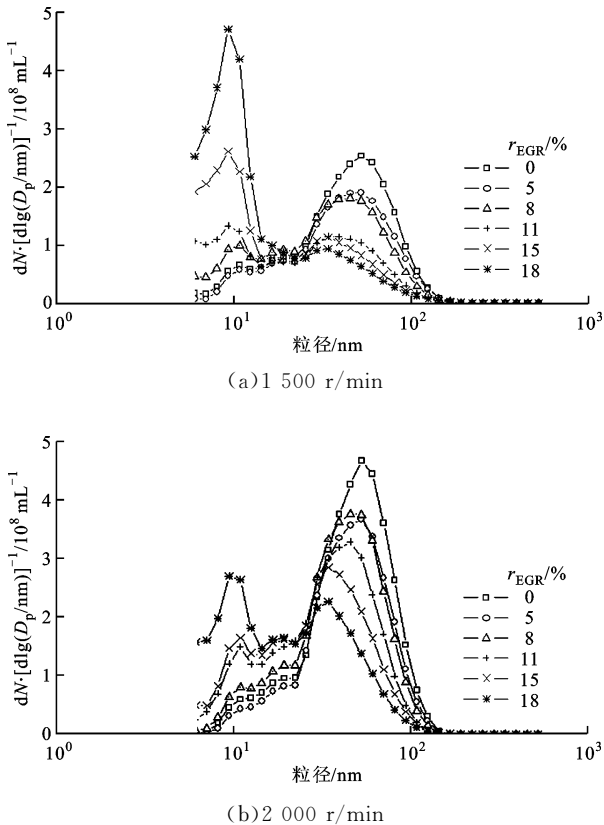


图 10 分层燃烧模式下 EGR 对 GDI 发动机微粒排放粒径分布的影响

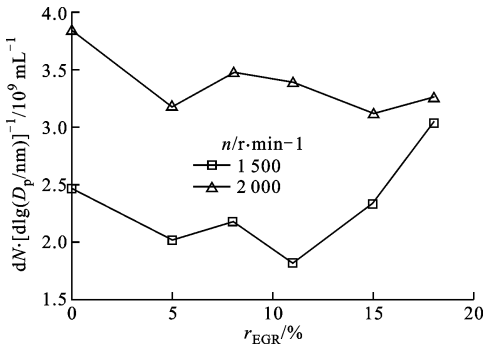


图 11 分层燃烧模式下 EGR 对 GDI 发动机微粒排放总数量浓度的影响

同样,为了进一步分析实验现象,测量了上述分层燃烧工况在不同 EGR 率时的燃烧参数和排气中 HC 含量,如图 12~图 14 所示。

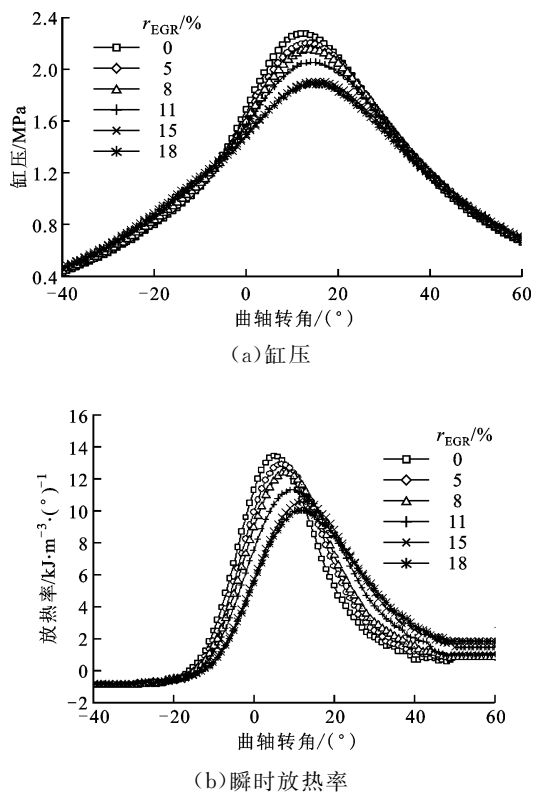


图 12 1 500 r/min 分层燃烧模式下 EGR 对 GDI 发动机燃烧参数的影响

如图 12、图 13 所示,1 500 r/min 和 2 000 r/min 分层工况下,随着 EGR 率的不断升高,缸压和瞬时放热率峰值持续减小、燃烧相位右移,即类似于均质模式,分层模式燃烧同样受到 EGR 热容效应和稀释作用的抑制,该抑制作用随 EGR 率的升高而加强。另一方面,如图 14 所示,分层模式下排气中 HC 含量随着 EGR 率的升高呈现较为均匀地增大趋势,且除个别点外,HC 排放低于均质燃烧模式。这是因为在稀燃工况下分层燃烧模式相较于均质燃烧模式拥有更加合理的缸内混合气分布,所以燃烧效率更高,HC 排放降低。

分析可知:实验工况下小 EGR 率导致核态粒子数量浓度降低、粒径峰值左移。原因是小 EGR 率导致的后燃增多使膨胀行程中缸内温度升高,对核态粒子产生的氧化作用增强造成的,但分层模式后燃量较少,故这种核态粒子的降幅随之减小;随着 EGR 率继续升高,燃烧过程中产生的 HC 含量随之增大,HC 化合物的成核几率增大,而此时膨胀行程中缸内温度对核态粒子的氧化作用有限,最终导致

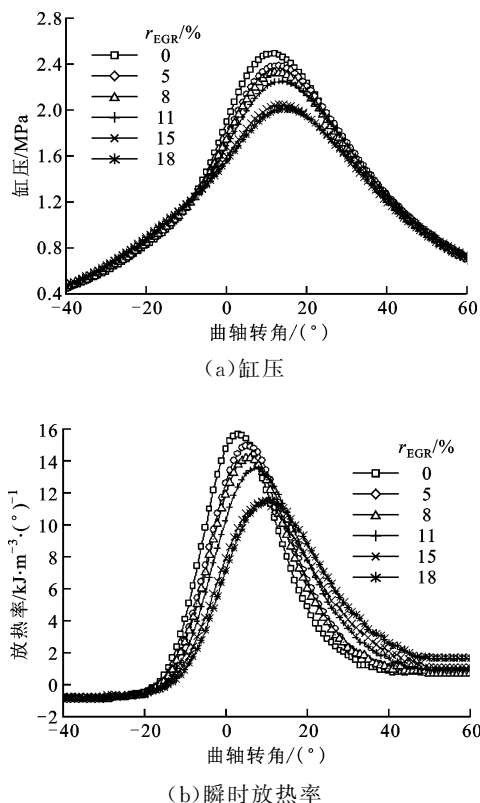


图 13 2 000 r/min 分层燃烧模式下 EGR 对 GDI 发动机燃烧参数的影响

核态粒子数量浓度显著增大、粒径峰值右移。发动机引入 EGR 后,积聚态粒子的产生明显受到了抑制。这主要是因为 EGR 直接导致缸内最高燃烧温度降低,其抑制了缸内不完全燃烧燃油的脱氢及热裂解作用,即抑制了碳烟粒子生成,同时降低了已生成碳烟粒子的吸附作用,从而使积聚态粒子浓度降低、粒径峰值左移。另外,EGR 引发的膨胀行程缸内温度升高、燃油湿壁及局部混合不均现象减弱等也有助于减少积聚态粒子的数量。

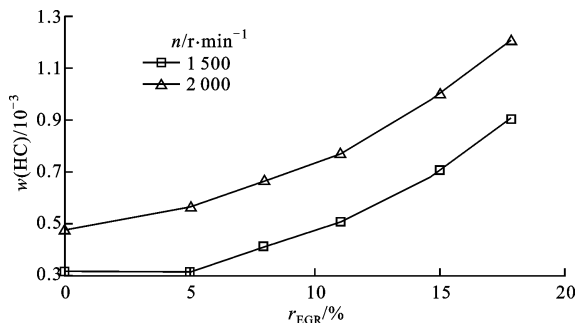


图 14 分层燃烧模式下 EGR 对 GDI 发动机 HC 排放的影响

2.3 燃烧模式和转速对 GDI 发动机微粒排放的影响

值得注意的是,同等 EGR 率下 GDI 发动机工

作于不同转速和燃烧模式,其微粒排放特性有很大区别,此处对上述 4 种工况在 EGR 率为 8% 时的微粒排放特性进行了分析。定燃烧模式时,2 种转速下 GDI 发动机微粒排放粒径分布对比如图 15 所示;定转速时,2 种燃烧模式下 GDI 发动机微粒排放粒径分布对比如图 16 所示。

由图 15 可见,在 2 种燃烧模式下,发动机微粒排放均呈现出随转速的升高核态粒子浓度降低、积聚态粒子浓度升高的变化趋势。分析可知,转速升高使得发动机散热损失减小、缸内温度升高,由此增强了 HC 化合物、核态粒子在高温下的氧化几率,较高的转速也会减小 HC 化合物在缸内停留的时间,从而抑制 HC 化合物向核态发展,最终导致 2 000 r/min 工况核态粒子数量浓度小于 1 500 r/min 工况。另一方面,2 000 r/min 工况采用更高的燃油喷射压力,使得燃油湿壁现象加剧,燃烧过程产生的碳烟粒子增多,从而导致 2 000 r/min 工况积聚态粒子浓度大于 1 500 r/min 工况。

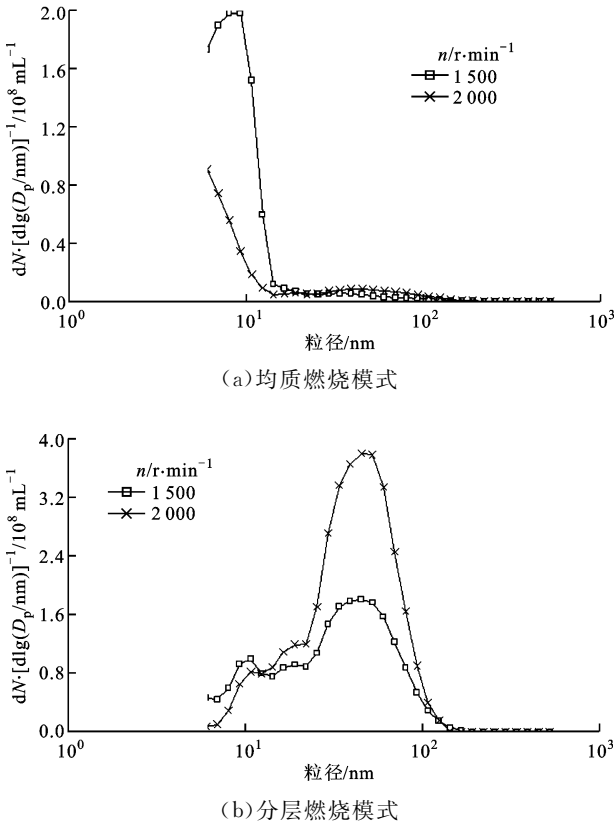


图 15 不同转速下 GDI 发动机微粒排放粒径分布对比

由图 16 可见,在 2 种转速下,均质模式产生的核态粒子均高于分层模式,而积聚态粒子则远低于分层模式。分析可知,分层燃烧模式的燃油喷射时刻靠近压缩上止点,导致燃油湿壁现象加剧,燃料不

完全燃烧产生的碳烟粒子团聚和吸附作用加强,它一方面产生了数量浓度远高于均质燃烧模式的积聚态粒子,另一方面碳烟粒子对 HC 化合物的大量吸附使 HC 化合物自身的成核作用受到了抑制,从而导致该模式下核态粒子数量浓度较均质燃烧模式低。

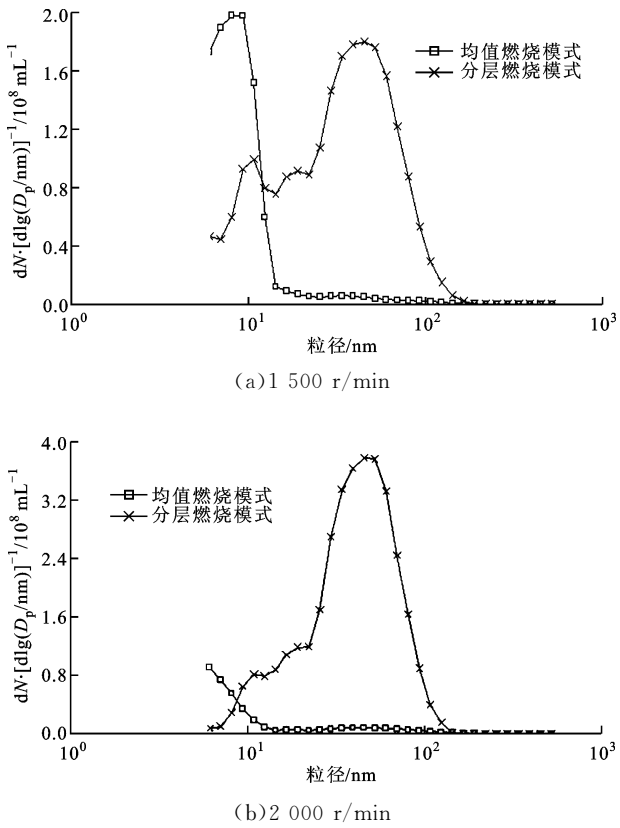


图 16 不同燃烧模式下 GDI 发动机微粒排放粒径分布对比

3 结 论

通过对一台 GDI 发动机进行 EGR 实验,研究了稀燃条件下 EGR 率对 GDI 发动机均质和分层模式下微粒排放的影响,获得结论如下。

(1)EGR 的引入会抑制缸内燃烧,使缸压和瞬时放热率峰值降低、燃烧相位推迟。随着 EGR 率不断升高,均质燃烧模式下 HC 排放呈先小幅增大后急剧增大的变化趋势,分层燃烧模式下 HC 排放则呈现较为均匀的增大趋势。

(2)GDI 发动机均质燃烧模式比分层燃烧模式产生的积聚态粒子数量浓度低,核态粒子数量浓度则较高;1 500 r/min 工况比 2 000 r/min 工况产生的积聚态粒子数量浓度低,核态粒子数量浓度则较高。

(3)在均质模式下引入 EGR,核态粒子数量浓度随 EGR 率的不断升高呈 U 型变化趋势,变化拐点发生在 EGR 率为 8% 时,较未加入 EGR 时降幅

约50%,发动机微粒排放的总数量浓度变化趋势与核态粒子一致。

(4)在分层模式下引入EGR,核态粒子数量浓度随EGR率的不断升高呈U型变化趋势,但不同于均质模式,拐点发生在EGR率为5%时,且降幅较未加入EGR时只有20%左右;积聚态粒子数量浓度随EGR率的不断升高呈持续降低趋势,在EGR率为18%时浓度最低,发动机微粒排放的总数量浓度无明显变化。

参考文献:

- [1] SANDQUIST H, LINDGREN R, DENBRATT I. Sources of hydrocarbon emissions from a direct injection stratified charge spark ignition engine, SAE 2000-01-1906 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2000.
- [2] KIRWAN J E, SHOST M. 3-cylinder turbocharged gasoline direct injection: a high value solution for low CO₂ and NO_x emissions, SAE 2010-01-0590 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2010.
- [3] MARICQ M M, PODSIADLIK D H, BREHOB D D. Particulate emissions from a direct-injection spark ignition (DISI) engine, SAE 1999-01-1530 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 1999.
- [4] KOKKO J, RANTANEN L, PENTIKAINEN J. Reduced particulate emissions with reformulated gasoline, SAE 2000-01-2017 [J]. Washington, DC, USA: SAE, 2000.
- [5] VAN BASSHUYSEN R. 汽油机直喷技术 [M]. 宋进桂, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] SAMUEL S, HASSANEEN A, MORREY D. Particulate matter emissions and the role of catalytic converter during cold start of GDI engine, SAE 2010-01-2122 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2010.
- [7] STOREY J, BARONE T, NORMAN K. Ethanol blend effects on direct injection spark-ignition gasoline vehicle particulate matter emissions [J]. SAE International Journal of Engines, 2010, 3(2): 650-659.
- [8] 钟兵, 洪伟, 苏岩, 等. 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 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 32-37.
ZHONG Bing, HONG Wei, SU Yan, et al. Effects of ignition timing on particulate emission characteristics of idling condition for gasoline direct injection engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 32-37.
- [9] 董伟, 于秀敏, 杨松, 等. 空燃比对直喷汽油机微粒排放特性的影响 [J]. 汽车技术, 2013(10): 1-3.

DONG Wei, YU Xiumin, YANG Song, et al. Effect of air-fuel ratio on particle emission performance of GDI engine [J]. Automobile Technology, 2013(10): 1-3.

- [10] CAIRNS A, BLAXILL H, IRLAM G. Exhaust gas recirculation for improved part and full load fuel economy in a turbocharged gasoline engine, SAE 2006-01-0047 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2006.
- [11] TAYLOR J, FRASER N. Water cooled exhaust manifold and full load EGR technology applied to a downsized direct injection spark ignition engine, SAE 2010-01-0356 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2010.
- [12] HEDGE M, WEBER P, GINGRICH J, et al. Effect of EGR on particle emissions from a GDI engine, SAE 2011-01-0636 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2011.
- [13] MONTAJIR R M. Thermal conditioning of exhaust Gas: potential for stabilizing diesel nano-particles, SAE 2005-01-0187v001 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2005.
- [14] 麻斌. 一种缸内直喷汽油机排气微粒热稀释采样系统: 中国, CN204679317U [P]. 2015-09-30.
- [15] 潘锁住. 缸内直喷汽油机排气微粒物理化学特征的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [16] PRPICE P, STONE R, COLLIER T. Particulate matter and hydrocarbon emissions measurements: comparing first and second generation DISI with PFI in Single cylinder optical engines, SAE 2006-01-1263 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2006.
- [17] ZERVAS E, DORLHENE P, DAVIAU R. Repeatability of fine particle measurement of diesel and gasoline vehicles exhaust gas, SAE 2004-01-1983 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2004.

[本刊相关文献链接]

- 邹玉红, 卢勇, 裴普成, 等. 双对置二冲程柴油机扫气过程的进气口结构影响规律. 2016, 50(1): 47-52. [doi: 10.7652/xjtuxb201601008]
- 钟兵, 洪伟, 苏岩, 等. 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. 2015, 49(3): 32-37. [doi: 10.7652/xjtuxb201503006]
- 刘鹤欣, 罗锐, 冉小鹏, 等. 采用高斯模型的垃圾焚烧污染物环境监测及布点. 2015, 49(5): 147-154. [doi: 10.7652/xjtuxb201505023]
- 刘亦夫, 刘兵, 刘亮, 等. 天然气缸内直喷发动机在不同喷射和点火时刻下的排放与燃烧特性. 2011, 45(5): 12-16. [doi: 10.7652/xjtuxb201105003]

(编辑 苗凌)