

·综述·

## 缸内直喷式汽油机颗粒物捕集器最新技术发展\*

陈京瑞<sup>1</sup> 朱晓峰<sup>2</sup> 张志谋<sup>1</sup> 娄林<sup>2</sup> 石磊<sup>1</sup>

(1- 上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室 上海 200240

2- 泛亚汽车技术中心有限公司)

**摘要**: 基于《轻型汽车污染物排放限值及其测量方法(第六阶段)》排放标准正式推出的具体国情, 阐述了汽油机颗粒物捕集器中积碳和灰分的生成机理和相应的质量估计模型, 介绍了汽油机颗粒物捕集器的再生管理和温度保护机制, 明确了捕集效率的计算。

**关键词**: 缸内直喷式汽油机 颗粒物捕集器 积碳模型 灰分模型 捕集效率 再生管理 温度保护

中图分类号: TK411.5 文献标识码: A 文章编号: 2095-8234(2017)03-0087-05

## The Current Technology Development of Gasoline Particulate Filter for Gasoline Direct Injection Engine

Chen Jingrui<sup>1</sup> Zhu Xiaofeng<sup>2</sup> Zhang Zhimou<sup>1</sup> Lou Lin<sup>2</sup> Shi Lei<sup>1</sup>

1- Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University (Shanghai, 200240, China) 2- Pan Asia Technical Automotive Center

**Abstract**: Under the specific background of the publication of the emission limitation and measurement method for the light-duty vehicle (sixth stage), the mechanism and mass estimation model of soot and ash in the GPF (gasoline particulate filter) are elaborated. The regeneration method and temperature management of GPF are explained. The filtration efficiency calculation is introduced.

**Keywords**: Gasoline direct engine; Gasoline particulate filter; Soot model; Ash model; Filtration efficiency; Regeneration management; Temperature protection

### 引言

机动车尾气排放是中国大城市大气雾霾的主要来源之一。而我国作为全球最大汽车市场, 汽油车量大面广, 所以其节能减排的意义重大。为了应对日益严峻的环境恶化挑战, 中华人民共和国环境保护部于 2016 年 12 月 23 日发布了《轻型汽车污染物排放限值及其测量方法(第六阶段)》<sup>[1]</sup>。国六标准要求轻型汽车的汽油机颗粒物排放限值自 2020 年 7 月 1 日起低于 4.5 mg/km 及  $6.0 \times 10^{11}$  个/km, 自 2023 年 7 月 1 日起低于 3 mg/km, 这在发动机控制技术、排放后处理技术等各方面对汽车及零部件企业提出了新

的挑战。因此, 与汽油机颗粒物捕集器(Gasoline Particulate Filter)相关的研究和应用日渐升温, 如大众集团明确表示将于 2017 年 6 月开始逐步在汽油发动机车型上 100% 普及 GPF, 首先会装备 GPF 的车型会是 1.4T 的途观和 2.0T 的奥迪 A5。国外几大催化剂企业, 如庄信、巴斯夫等在 GPF 技术研发上正从试验验证阶段向市场应用阶段过渡。

目前国内无锡的威孚力达催化净化器有限责任公司已经开发出堇青石材料的壁流式 GPF。但有关直喷式汽油机颗粒物捕集器的颗粒生成机理和质量估计、再生控制、温度保护等的相关文献仍然较少, 本文力图能够阐明这一问题。

\* 基金项目: 上海汽车工业科技发展基金会项目(编号 1627)。

作者简介: 陈京瑞(1989—)男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为内燃机增压技术。

通讯作者: 石磊(1977—)男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为内燃机增压技术。

### 1 GPF 基本原理

缸内直喷汽油机排出的含有颗粒排放物的废气通过排气管道进入 GPF，在经过其内部密集设置的微孔过程中将颗粒物吸附在过滤器管壁上；当颗粒的吸附量达到一定程度后，通过再生机制将吸附在上面的积碳微粒烧掉，变成对人体无害的二氧化碳排出。捕捉器的再生功能必须在可控的基础上完成。总的来说，GPF 的过滤机理与柴油机颗粒物捕集器 (DPF) 基本相同，其结构也与 DPF 相似。GPF 的结构及原理示意图如图 1 所示。

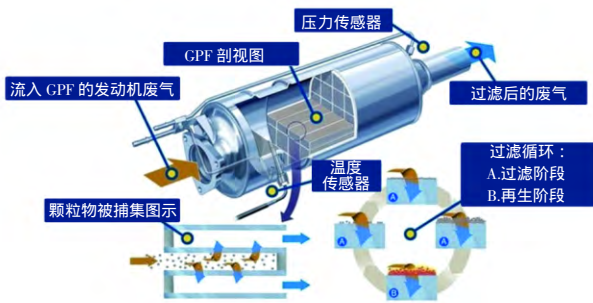


图 1 GPF 结构及原理<sup>[2]</sup>

### 2 颗粒物研究现状

#### 2.1 积碳(Soot)生成机理

GDI 汽油机碳烟排放主要来源于附壁油膜的池火燃烧和缸内局部浓区的燃烧。颗粒物排放的影响因素如表 1 所示：

表 1 颗粒物排放的影响因素<sup>[3-5]</sup>

混合气组织方式	混合气条件	分层混合气的碳烟排放要比均质混合气高
燃油理化特性	引导方式	喷雾引导比壁面引导的颗粒物排放低
	芳香烃	芳香烃体积分数越高，碳烟排放量越大
	含氧组分	含氧燃料中的氧有助于降低碳烟排放
	挥发性	T90 温度越高，碳烟排放量越大
发动机运行及控制参数	负荷	中等负荷下的微粒排放浓度最高
	喷射时刻	较早的喷射时刻利于减少微粒排放
	2 次喷射	可适当减少微粒排放，2 次喷射存在最佳值
	点火时刻	点火时刻推迟，微粒数目减少
	过量空气系数	过量空气系数的增加，颗粒物排放减少
	EGR	聚态颗粒物排放下降，核态颗粒物上升

#### 2.2 积碳质量估计

Michiel 等人<sup>[6]</sup>将 GPF 的积碳估计分为开环积碳估计和基于压降的估计两个方面。积碳质量的多少为是否进入再生控制模式提供判决条件。

##### 2.2.1 开环积碳估计

直喷式汽油机仅在冷启动状态和高负载情况下才排放大量颗粒物。因此可以建立以发动机冷却液

温度和燃油数量为自变量的积碳估计开环回归模型。

$$PM = a_0 + a_1 T_{cool} + a_2 W_{fuel} + a_3 T_{cool} W_{fuel} \text{ 冷机} \tag{1}$$

$$PM = b_0 + b_1 T_{cool} + b_2 W_{fuel} + b_3 T_{cool} W_{fuel} \text{ 热机}$$

式中：PM 为积碳质量， $T_{cool}$  为发动机冷却水温度， $W_{fuel}$  为废气质量流量， $a_0/a_1/a_2/b_0/b_1/b_2$  为标定量。

该公式依靠发动机参数和标定量来精确确定。当发动机参数或者标定参数改变时，该公式也要相应改变。这种简单的公式有利于快速估算积碳量。

##### 2.2.2 基于压降的估计

如果在 GPF 中使用了压力传感器，则积碳量的估计就和 DPF 中相类似。根据多孔介质中流体流动的数学物理方程 Darcy-Forchheimer 方程：

$$\Delta p = c_0 + c_1 \nu(T) R(S) F + c_2 \rho(T) F^2 \tag{2}$$

式中： $R(S)$  为无单位的约束因子， $S$  为积碳率 (g/L)， $F$  为体积流量， $T$  为废气温度， $c_0/c_1/c_2$  为标定量， $\nu(T)$  为动力粘度， $\rho$  为密度， $\Delta p$  为 GPF 前后压降。

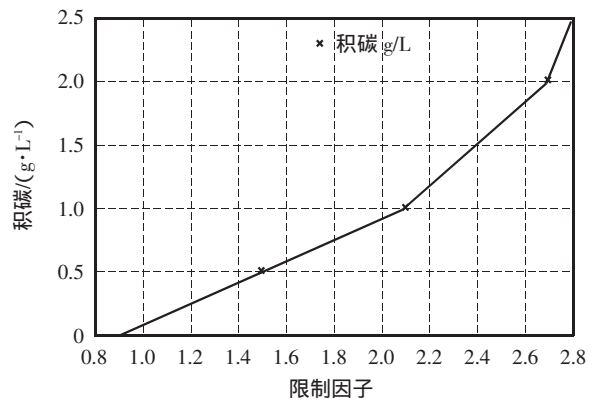


图 2 积碳量和约束因子的函数关系

假定对于干净的 GPF 约束因子为 1。因为灰分会穿入微孔内部，灰分生成量的估计是很麻烦的。因此积碳量和限制因子的关系需要根据灰分量做出一个修正，这可以通过油耗量和其他发动机运转条件来进行灰分估计，或者在确信没有积碳时估计一个对于 P-F 曲线的偏移量。

#### 2.3 灰分(Ash)生成机理

Lambert 等人<sup>[7]</sup>通过电子显微镜观测到灰分的累计过程如图 3 所示。

Hennebert 等人<sup>[8]</sup>通过放射性元素示踪法分析灰分的来源，发现实验中测得的 GPF 中捕集的灰分量，仅占基于耗油量和机油硫酸盐含量估计的灰分总量的 48%。这可能是由于如下三个原因：灰分可能被壁面上的油膜吸收，或者随窜气回到机油箱；由于 GPF 捕集效率较低，导致部分灰分通过了 GPF，部分含锌的灰分在 GPF 前的三效转化器内已经积聚。同时，利

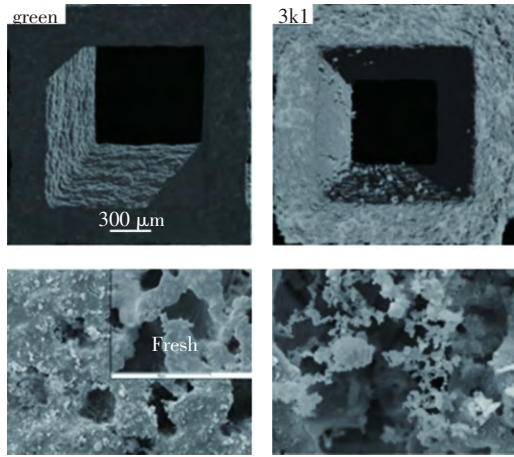


图 3 灰分在电子显微镜下的累计过程

用同位素示踪法,通过对元素锌、钙的监测,发现GPF捕获的灰分中,源于机油的部分小于总捕获量的50%,所以燃料和机械磨损等也是灰分的主要来源。

通过对 GPF 捕集到的灰分进行 X 射线荧光分析,可以得到如图 4 所示的灰分的组成分析。从图中可以发现,金属氧化物(主要是  $Fe_2O_3$  和  $Cr_2O_3$ )在灰分总量中占有不少份额,这同时也印证了机械磨损是灰分的主要来源之一。而  $CaO$ 、 $P_2O_5$ 、 $SO_3$ 、 $MoO_3$ 、 $SiO_2$  和  $ZnO$  主要来自于机油,这部分可以达到灰分总量的 45% 左右。与机油类似,汽油中也含有形成灰分的元素,可能导致在再生周期不能被氧化而积聚在排气系统中。虽然这些元素的浓度很低,但是考虑到汽油的消耗量远大于机油,因此这部分的灰分也是不能忽略的。

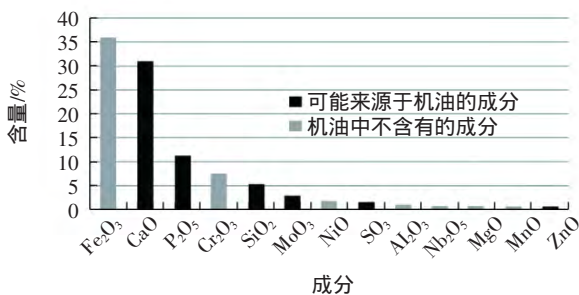


图 4 灰分的成分分析

### 2.4 灰分(Ash)质量估计

Custer 等人<sup>[9]</sup>提出了在试验过程中估算灰分质量的公式。

$$AL = \frac{Oil_{cons} \rho_{oil} x_{ash}}{V_{filter}} \cdot FR_{ash} \cdot Mi \quad (3)$$

其中  $AL$  为灰分积载量( $g/L$ ),  $Oil_{cons}$  为机油消耗率( $L/km$ )  $\rho_{oil}$  为机油密度( $g/L$ )  $x_{ash}$  为灰分元素浓度,  $FR_{ash}$  为理论量与实际量之间的修正系数(需要实验测定)  $Mi$  为模拟行驶里程( $km$ )。

## 3 GPF 控制模型

在长期工作中,捕集器里的颗粒物逐渐增加会引起发动机背压升高,导致发动机性能下降,所以要定期除去沉积的颗粒物,恢复捕集器的过滤性能。这一过程称为颗粒物捕集器再生。捕集器的再生有主动再生和被动再生两种方法。

### 3.1 再生控制

主动再生指的是利用燃油添加剂或者催化剂来降低微粒的着火温度,使微粒能在正常的发动机排气温度下着火燃烧。添加剂(有钨、铁和锆)要以一定的比例加到燃油中,添加剂过多会影响三元催化剂的寿命,但是如果过少,就会导致再生延迟或再生温度升高。

被动再生指的是利用外界能量来提高捕集器内的温度,使微粒着火燃烧。当捕集器中的温度达到  $550\text{ }^\circ\text{C}$  时,沉积的颗粒物就会氧化燃烧,如果温度达不到  $550\text{ }^\circ\text{C}$ ,过多的沉积物就会堵塞捕集器,这时就需要利用外加能源(例如电加热器、燃烧器或发动机操作条件的改变)来提高 GPF 内的温度,使颗粒物氧化燃烧。Michiel<sup>[6]</sup>总结了两种主要的被动再生方式:减速断油(Deceleration Fuel Cut Off)和点火延迟(Ignition Retard)。

#### 3.1.1 减速断油(DFCO)

当汽车在高速行驶中突然松开加速踏板减速时,发动机将在汽车惯性力的作用下高速旋转而车辆没有动力请求,此时可采取减速断油策略。一方面由于加速踏板已经抬起,进入气缸的空气量很少,如不停止供油,混合气将会很浓而导致燃烧不完全。另一方面,对于汽油机来说,也只有在减速断油时才会有过量的氧气通过 GPF,一定程度上可能引发后燃,导致 GPF 温度急剧升高。尤其在高速高负荷工况下的频繁加减速,会使得后燃现象加剧, GPF 温度急速升高,由此可除去沉积的颗粒物,恢复捕集器的过滤性能。

#### 3.1.2 点火延迟

对于与 TWC 耦合的 GPF,其加热策略主要是点火延迟,这会导致燃烧效率的降低和尾气中可燃物的增加。再生时的 GPF 温度与积碳厚度、再生速度相关,将目标温度和二者建立函数关系。点火延迟的限制标准为  $20^\circ$  曲轴转角,超出这个限制则会产生 NVH 效果和较低的燃油效率。因此,典型的控制策略包括了不同程度的点火延迟。在最大车速为  $48\text{ km/h}$  的驾驶循环中,一般程度的点火延迟可以在驾驶员没有察觉的情况下实现  $50\text{ }^\circ\text{C}$  左右的温度提升,见

图5。激进程度的点火延迟可以实现 200 °C 的温度提升,但该过程以舒适性和燃油消耗为代价,见图 6。这样的状况一般要在仪表盘上设置一个报警灯来提示驾驶员车辆正处于特殊状况。要说明的是对于后置式的 GPF,这样的温度提升目标是很难达到的。

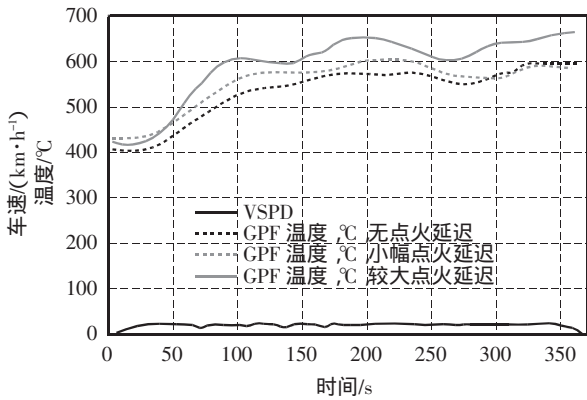


图5 一般程度的点火延迟

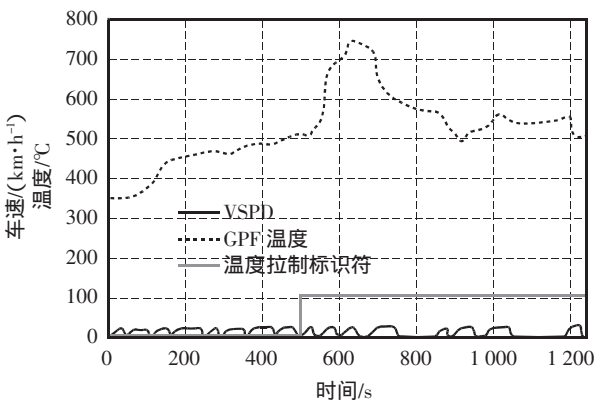


图6 激进的点火延迟

### 3.2 再生效率计算

再生效率是衡量 GPF 的一个重要指标,需要考 虑到的参数有 GPF 的容积、几何结构、涂层组成、贵金属浓度、积碳量、排气温度、气流速度和氧气的浓度。颗粒被捕集的机制见图 7 扩散作用、拦截作用、重力作用和惯性碰撞作用<sup>[10]</sup>。

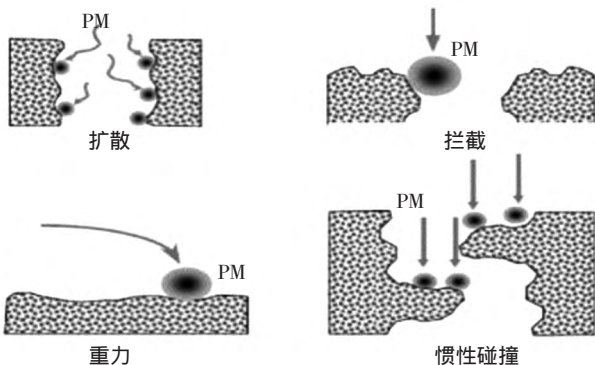


图7 颗粒被捕集的机制图示

Xin Liu 等人<sup>[11]</sup>忽略了重力作用建立了以下陶瓷材料过滤器的捕集模型,并试验验证了其准确性。对于单个半球型颗粒物附着点,其过滤效率计算公式如下:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_d)(1 - \eta_r)(1 - \eta_i) \quad (4)$$

式中  $\eta$  为总效率,  $\eta_d$  为扩散效率,  $\eta_r$  为拦截效率,  $\eta_i$  为碰撞效率。

$$\begin{cases} \eta_d = 3.5 g(\varepsilon) Pe^{-2/3} \\ g(\varepsilon) = \varepsilon^{1/3} [2 - \varepsilon - \frac{9}{5}(1 - \varepsilon)^{1/3} - \frac{1}{5}(1 - \varepsilon)^2]^{1/3} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\varepsilon$  为孔隙率,  $Pe$  为佩克莱数。

$$\eta_r = \frac{1.5g(\varepsilon)^3 R_c^2}{(1 + R_c)^{(3-2\varepsilon)/(3\varepsilon)}} \quad (6)$$

式中  $R_c$  表达式见(8)。

$$d_c = \frac{3(1 - \varepsilon)}{2\varepsilon} d_{pore} \quad (7)$$

式中  $d_{pore}$  为空隙直径,  $d_c$  为半球型颗粒物附着点尺寸。

$$R_c = d_p / d_c \quad (8)$$

$$\eta_i = \frac{J}{4Ku^2} S_i \quad (9)$$

式中  $J$  表达式见(10),  $Ku$  为 Kuwabara 数,表达式见(12),  $S_i$  为斯托克斯数。

$$J = (29.6 - 28(1 - \varepsilon)^{0.62}) R_c - 27.5 R_c^{2.8} \quad (10)$$

$$Ku = -0.51 \ln(\alpha) + \alpha - 0.25\alpha^2 - 0.75 \quad (11)$$

式中  $\alpha$  为。

至此可得总的捕集效率:

$$E = 1 - e^{-\frac{3c\eta\tau}{2d_c}} \quad (12)$$

式中  $\tau$  为过滤器管壁厚度。

### 3.3 GPF 温度控制模型

GPF 再生管理,一方面需要通过提升 GPF 入口温度或改变发动机的工况,来促进碳颗粒的氧化,另一方面需要通过热管理避免 GPF 的不当再生引起的烧蚀损坏。根据进口温度、排气流量和氧气的浓度可以计算 GPF 的温度。

GPF 需要保护自己在高温、富氧、多碳的情况下不被损坏,如果这三个条件同时发生,则会导致 GPF 结构的开裂或者融化,同时也会导致捕集效率的降低。控制氧气的含量可以有效地控制积碳燃烧,在 GPF 中通过计量进入 GPF 的氧气流量来控制积碳燃烧速率,这样也就控制了放热速率。Michiel<sup>[6]</sup>等人提出了以下计算 GPF 温度的物理模型:

使用热力学第一定律分析该模型,把 GPF 当作一个混合均匀的反应器,假设其温度和流出气体的温度相同,则 GPF 中温度的升高满足以下方程:

$$\frac{d(c_{\text{gpf}}m_{\text{gpf}}T_{\text{gpf}} + c_{\text{p,exh}}m_{\text{exh}}T_{\text{exh}})}{5} = Q_{\text{soot}}m_{\text{soot,burn}} + c_{\text{v,exh}}W_{\text{exh}}T_{\text{pre,gpf}} - c_{\text{v,exh}}W_{\text{exh}}T_{\text{post,gpf}} \quad (13)$$

其中  $c_{\text{gpf}}$  为 GPF 的比热容  $m_{\text{gpf}}$  为 GPF 的质量  $c_{\text{p,exh}}$ 、 $c_{\text{v,exh}}$  分别为排气的定压比热容和定容比热容  $m_{\text{exh}}$  为排气的质量  $W_{\text{exh}}$  为排气的质量流量  $Q_{\text{soot}}$  为碳烟的热值。

Michiel<sup>[6]</sup>等人测试了在 600 °C 的进口温度、排气流量为 10 kg/h、氧气浓度为 20.95% 时的 GPF 温度曲线,结果如图 8 所示。它说明在 6 s 的减速断油时间内,相当数量的积碳被燃烧。

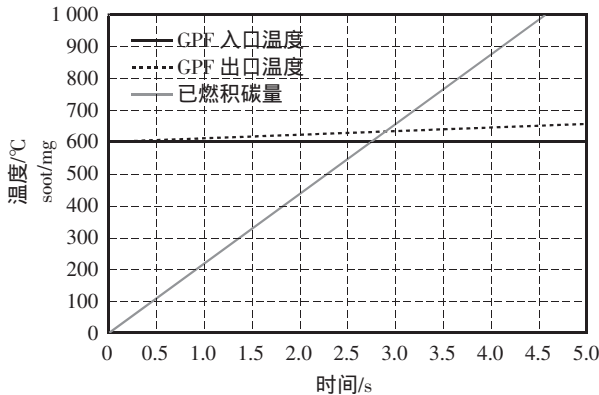


图8 GPF 温度曲线

相反地,在给定一个 GPF 的温度限制下,也可以计算出 GPF 可以承受的暴露在该氧气浓度中的时间,以此来限制减速断油时间。可以制作一个以输入氧气量和 GPF 进口温度为自变量的插值表。氧气流量越大,进口温度越高,减速断油时间就越短。

$$t_{\text{max,DFCO}} = f(W_{\text{O}_2,\text{gs}} \cdot T_{\text{pre,gpf}}) \quad (14)$$

式中:  $W_{\text{O}_2,\text{gs}}$  为废气中氧气质量流量  $T_{\text{pre,gpf}}$  为 GPF 前废气温度  $t_{\text{max,DFCO}}$  为减速断油最大允许时间。

### 3.4 GPF 对发动机的影响

在后处理系统中加入 GPF 后对发动机的控制带来正反两个方面的影响。

有益方面在于发动机在冷启动、急加速过程等颗粒物排放严重的工况下不必从控制方面太多的考虑排放性,而把控制重心集中在满足工况要求上。此外,对于喷嘴积碳导致的颗粒物排放也有了有效处理。

坏的方面在于 GPF 会不可避免地提高发动机排气压力。而排气背压的升高,会增加缸内残余气体并可能引发爆燃问题。此外,由于 GPF 的再生工作是间歇性的,发动机背压会有所变动,这将给汽油机爆燃和点火控制带来挑战。

## 4 结论

本文主要阐述了 GPF 中积碳、灰分的产生机理

及影响因素、GPF 的再生和保护策略。

1) GDI 发动机碳烟主要是由附壁油膜的池火燃烧和缸内局部浓区的燃烧导致的,并受到混合气组织方式、燃油理化性质和发动机运行参数的影响。GPF 的积碳量可以根据 GPF 前后的压降来估算,或者利用冷却剂温度和废气质量流量进行开环估计。灰分源于机油、机械磨损和燃油等,主要通过机油消耗量估算灰分的积累量。

2) GPF 再生方式分为主动再生和被动再生,常用的再生方式有减速断油和点火延迟。

3) GPF 可以根据进口温度、排气流量和氧气的浓度计算 GPF 的温度,由此决定再生时间,以避免 GPF 的不当再生引起的烧蚀损坏。

4) 基于颗粒物被捕集机制的建模可以准确计算陶瓷式 GPF 的过滤效率。

### 参考文献

- 1 中华人民共和国环境保护部. GB18352.6-2016 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2016
- 2 日本松下 Panasonic 公司产品样本[EB/OL]. <http://pesesgd.panasonic.cn/>,2015-12-16
- 3 Fischer M, Kreutziger P, Sun Y, et al. Clean EGR for gasoline engines-Innovative approach to efficiency improvement and emissions reduction simultaneously[C]. SAE Paper 2017-01-0683
- 4 帅石金,董哲林,郑荣,等. 车用汽油机颗粒物生成机理及排放特性研究进展[J]. 内燃机学报,2016,34(2):105-116
- 5 朱小慧,陈鹏,方俊华. 燃料特性和工况对直喷汽油机微粒排放的影响[J]. 上海交通大学学报,2017,51(1):69-75
- 6 Van Nieuwstadt M, Ulrey J. Control strategies for gasoline particulate filters[C]. SAE Paper 2017-01-0931
- 7 Lambert C, Chanko T, Jagner M, et al. Analysis of ash in low mileage rapid aged and high mileage gasoline exhaust particle filters[J]. SAE Paper 2017-01-0930
- 8 Bernardoff R, Hennebert B, Delvigne T, et al. A study of ash accumulation in the after-treatment system of a gasoline direct injection engine equipped with a gasoline particulate filter[R]. SAE Paper 2017-01-0879
- 9 Custer N, Kamp C, Sappok A, Pakko J, et al. Lubricant-derived ash impact on gasoline particulate filter performance [J]. SAE Paper 2016-01-0942
- 10 尹乾熙. 缸内直喷汽油机微粒捕集器捕集特性研究[D]. 长春:吉林大学,2015
- 11 Liu X, Kim J, Chanko T, et al. A modeling analysis of fibrous media for gasoline particulate filters[R]. SAE Paper 2017-01-0967

(收稿日期 2017-05-09)