

不同载体汽油机颗粒捕集器再生性能试验研究

南征¹,李楠^{1*},刘海涛²,张秋实²,赵庆良²,
华伦²,伊藤雅晃³,毛星烨³

1.燕山大学 车辆与能源学院,河北 秦皇岛 066000;2.清华大学 苏州汽车研究院,江苏 苏州 215000;
3. NGK 环保陶瓷有限公司,上海 200336

摘要:为满足日益严格的颗粒物排放标准的要求,以不同载体的汽油颗粒捕集器(gasoline particulate filter,GPF)为研究对象,对GPF进行台架性能测试,通过试验对比分析2种载体GPF的再生性能,研究不同载体GPF入口再生温度、不同碳载量下碳烟颗粒的燃烧特性以及载体内部温度的变化规律。试验结果表明:随着再生温度、碳载量、空燃比的提升,主动再生时,GPF再生速率均有所增加;被动再生时,载体内部最高温度出现在载体中后段,载体后端的径向温度梯度较大,再生时需重点关注该位置;2种再生方式的再生效率均随碳载量的增加有所降低。

关键词:GPF;载体;主动再生;被动再生;再生效率

中图分类号:TK411.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2021)06-0029-07

引用格式:南征,李楠,刘海涛,等.不同载体汽油机颗粒捕集器再生性能试验研究[J].内燃机与动力装置,2021,38(6):29-35.

NAN Zheng,LI Nan,LIU Haitao,et al. Experimental study on regeneration performance of gasoline particulate filter with different carriers[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2021,38(6):29-35.

0 引言

近年来,我国汽车保有量不断增加,据统计,截至2020年6月,我国机动车保有量已达到3.6亿辆,其中汽车保有量达2.7亿辆,占机动车总量的75%^[1]。随着机动车保有量的增加,机动车排放污染物成为我国大气污染的重要来源,特别是细小颗粒物(particulate matter,PM),大气中的PM随着呼吸进入心肺等器官,对人体健康造成了严重的威胁^[2-5]。为了应对环境问题带来的挑战,2016年底文献[6]发布,该标准实行6a阶段、6b阶段分步实施方案,分别于2020年7月1日和2023年7月1日实施^[6]。文献[6]对PM排放做出进一步限制:自2020年7月1日起,轻型汽车的汽油机I型试验的PM排放限值为4.5 mg/km、粒子数量(particle numbers,PN)为 6.0×10^{11} 个/km;自2023年7月1日起,PM排放限值为3 mg/km。严格的排放标准对汽油机排放提出更高要求。文献[6]规定,在3a或6万km内,由于排放相关部件出现问题引发的排放污染物超出限值,相应的维修更换费用须由汽车生产企业承担,因此,汽油机颗粒捕集器(gasoline particulate filter,GPF)的性能以及再生技术至关重要^[7-10]。加装GPF后,随着碳烟不断积累,造成排气背压升高,影响汽油机的经济性和动力性,需要对GPF进行周期性再生,及时清除GPF中的碳烟颗粒,使其氧化成对人体无害的CO₂排出^[11-12]。

收稿日期:2020-06-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0211100)

第一作者简介:南征(1998—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要研究方向为内燃机后处理排放,E-mail:1306647207@qq.com。

* **通信作者简介:**李楠(1982—),男,石家庄人,工学博士,副教授,主要研究方向为能源利用、污染物排放与控制,E-mail:linan@ysu.edu.cn。

目前关于 GPF 的研究较多集中在性能和再生策略方面。范明哲等^[13]在某六缸直喷机械增压发动机上搭建 GPF 碳载量模型进行主动再生和被动再生策略研究,得到 2 种再生模型的偏差分别为 9% 和 6%,模型精度满足工程应用。陈京瑞等^[14]研究了 GPF 的再生及保护策略,通过 GPF 入口温度、排气质量流量和氧气的质量分数计算 GPF 温度,避免 GPF 热损坏,进行排温保护。杨永真等^[15]研究了再生速率与碳载量、GPF 中心温度、氧气的质量分数之间的关系,得到再生速率与碳载量、温度、氧气的质量分数呈现非线性的正相关趋势,温度和氧气的质量分数升高均促进再生效率提升。

本文以某 1.5 L、满足国六排放标准的缸内直喷 (gasoline direct-injection, GDI) 汽油机配置的 GPF 为研究对象,通过台架试验对 2 种不同载体 GPF 的再生性能以及再生时内部温度的分布情况进行研究。对比不同碳载量、不同温度时的再生特性,为 GPF 的匹配提供理论依据。

1 试验设备及方案

1.1 发动机台架及主要设备

台架试验中使用的测功机测控系统为 HORIBA STARS,最高转速为 10 000 r/min,转速测量精度为 ± 1 r/min、频次低于 10 Hz,本次台架试验的主要测试仪器设备及精度如表 1 所示。

表 1 主要测试设备的型号及精度

| 设备 | 测功机 | 油耗仪 | 排放仪 | 冷却液温控系统 | 温度传感器 | 高精度电子秤 |
|----|-----------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|--|------------------|
| 型号 | Hi250 HORIBA 电力测功机 | AVL 740 | MEXA-ONE-D2-EGR | DET8510 | K 型温度传感器 ($\Phi 0.5$ mm \times 700 mm) | MSU14202S-OCE-d0 |
| 精度 | 转矩精度等级 0.05 | $\pm 0.1\%$ 满量程 | 0.01×10^{-6} | ± 1 $^{\circ}\text{C}$ | $\pm 0.75\%$ 满量程 | 0.01 g |

试验用汽油机主要技术参数如表 2 所示。

表 2 汽油机主要技术参数

| 进气方式 | 排量/L | 额定功率/kW | 额定转速/(r \cdot min $^{-1}$) | 最大扭矩/(N \cdot m) | 最大扭矩下转速/(r \cdot min $^{-1}$) |
|------|------|---------|-------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 增压 | 1.5 | 125 | 5500 | 250 | 1500~4000 |

1.2 后处理整体布局及规格

试验用发动机后处理系统采用前级三效催化器 (three way catalyst, TWC)、后级 GPF 的底盘式布局。TWC 与 GPF 之间的距离约为 50 cm,2 种不同 GPF 载体的规格如表 3 所示。

表 3 GPF 载体参数

| 载体 | 直径/mm | 长度/mm | 材料 | 孔隙率/% | 中值孔径/ μm | 壁厚/mm | 目数 |
|----|-------|-------|-----|-------|---------------------|---------|-----|
| A | 118 | 127 | 堇青石 | 63 | 19 | 0.203 2 | 300 |
| B | 118 | 127 | 堇青石 | 63 | 15 | 0.203 2 | 300 |

A 为目前市售 GPF 载体,B 为下一代具有更高捕集效率的 GPF 载体,为了满足未来标准更加严格的排放要求,载体 B 壁面之间的平均中值孔径更小。为方便对 GPF 进行拆装称质量,在 GPF 两端焊制法兰。法兰两端的缩口处安装压力传感器和温度传感器,测量 GPF 进、出口温度和压力,台架布置如图 1 所示。

试验前应对新的 GPF 激活处理,累碳误差为 ± 0.2 g;为了确保称量准确,在积碳和再生前、后对其称量 3 次取平均值;每次称量前、后在马弗炉中以 250 $^{\circ}\text{C}$ 的温度保温 1 h,除掉载体中冷凝的水分,在同

一温度下进行保温处理可以避免温度不同带来的称量误差。再生过程中,测量 GPF 载体内部的温度,温度传感器布置位置如图 2 所示,将 12 个热电偶布置在 GPF 内部,径向位置等距布置 3 个热电偶,轴向位置等距布置 4 组热电偶测量载体内部温度;测点 1~4 测量载体中心温度,测点 5~8 测量载体(1/2R 处)温度,测点 9~12 测量载体外圈温度。

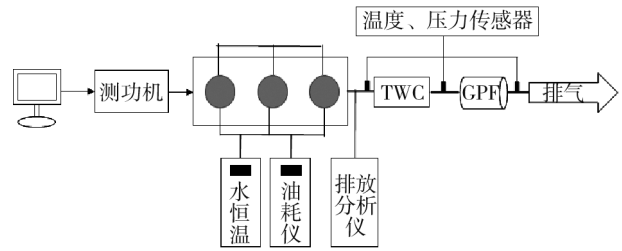


图 1 台架布置简图

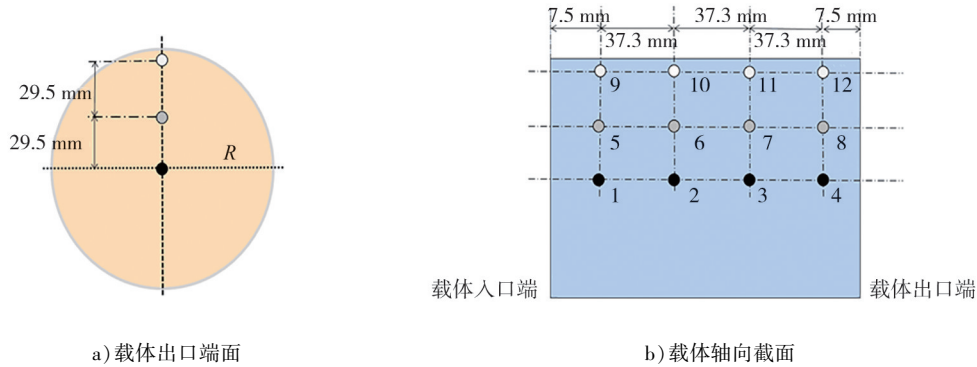


图 2 载体内部温度传感器布置位置示意图

1.3 试验方案

对 GPF 主动再生和被动再生 2 种方式进行试验,对比不同碳载量、不同再生温度下 2 种 GPF 的再生特性。

1.3.1 主动再生

汽车行驶在市区时 GPF 的温度一般达不到再生需求,且市区的频繁起-停更容易产生碳烟,影响发动机的性能,因此需要调整发动机的运行模式,提升排温,创造有利的再生环境。综合考虑汽车的常用转速,试验将再生时发动机转速设置为 2000 r/min,主动再生过程如图 3 所示。再生结束后,改变工况使发动机进入怠速工况,怠速转速为 900 r/min。本次试验空燃比 $\lambda = 1.05$ 时再生时间为 480 s, $\lambda = 1.10$ 时再生时间为 200 s。

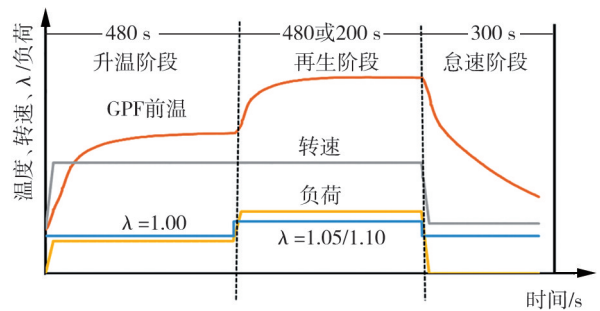


图 3 主动再生过程示意图

1.3.2 被动再生

汽车在高速工况行驶突然断油时,排气中氧气的质量流量迅速增大,此时如果温度达到再生条件, GPF 中的 PM 会迅速燃烧,但由于此时排气质量流量较小,再生时碳烟燃烧产生的高温不能被及时带走,热量聚集在载体后端,很容易烧坏载体,因此需要保证 GPF 瞬时的峰值温度低于载体温度限值。本试验在碳载量分别为 2 g/L 和 4 g/L 时进行断油再生,燃油切断时间为 180 s,碳载量为 2 g/L 的 GPF 在入口温度为 700 °C 时停止供油,碳载量为 4 g/L 的 GPF 在入口温度为 600 °C 时停止供油。

2 试验结果及分析

2.1 主动再生过程对载体的影响

再生温度分别为 550、600 和 700 °C 时,碳载量为 2 g/L 的 GPF 再生速率和再生效率如图 4 所示。

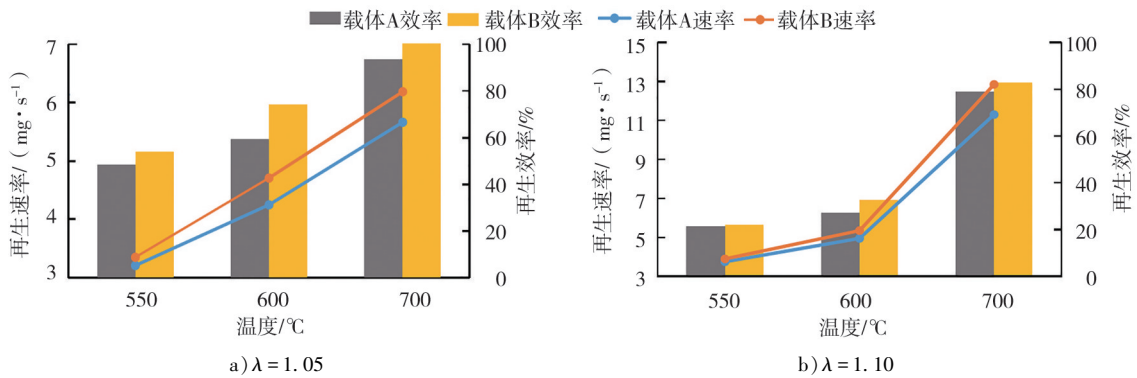


图4 碳载量为2 g/L时 GPF 再生速率和再生效率对比

由图4可知:再生速率和再生效率均随温度的升高而增大; λ 相同时,载体B的再生速率和再生效率均高于载体A,主要原因是碳载量为2 g/L时,碳烟颗粒处于深床捕集,由于载体B壁面之间的平均中值孔径较小,比表面积增大,单位体积所承载的碳烟颗粒增多,同时比表面积增大也增加了碳烟颗粒与氧气接触的比率,因此再生阶段载体B内部的碳烟颗粒再生速率和效率更大。

由图4a)可知:当 $\lambda = 1.05$ 时,再生速率随再生温度线性升高,当再生温度为550 °C时,载体A和载体B的再生速率差距不大,分别为3.21 mg/s和3.35 mg/s;再生温度升高到700 °C时,2种载体的再生速率分别达到5.67 mg/s和6.19 mg/s。

由图4b)可知:当 $\lambda = 1.10$ 时,再生速率在温度为550、600 °C时保持在较低水平且相差不大;温度为700 °C时再生速率大幅提升,分别为11.30 mg/s和12.85 mg/s,载体B的再生速率比载体A高12.06%,相较于 $\lambda = 1.05$,载体B的再生速率提升了1倍,说明在氧含量和温度足够高时颗粒物更容易燃烧,GPF中碳烟颗粒的反应速率显著增加。

对比再生效率发现, $\lambda = 1.05$ 时,载体A在700 °C时的再生效率达到93.47%,载体B高达99.66%,进一步说明随着温度升高,载体的再生性能更加优异。 $\lambda = 1.10$ 、再生温度为550 °C时,载体A和载体B再生效率基本一致,分别为21.25%和21.97%,主要是因为再生温度较低,未能形成较好的再生环境,因此差异较小。

碳载量为4 g/L时不同再生温度的GPF再生速率和再生效率对比如图5所示。

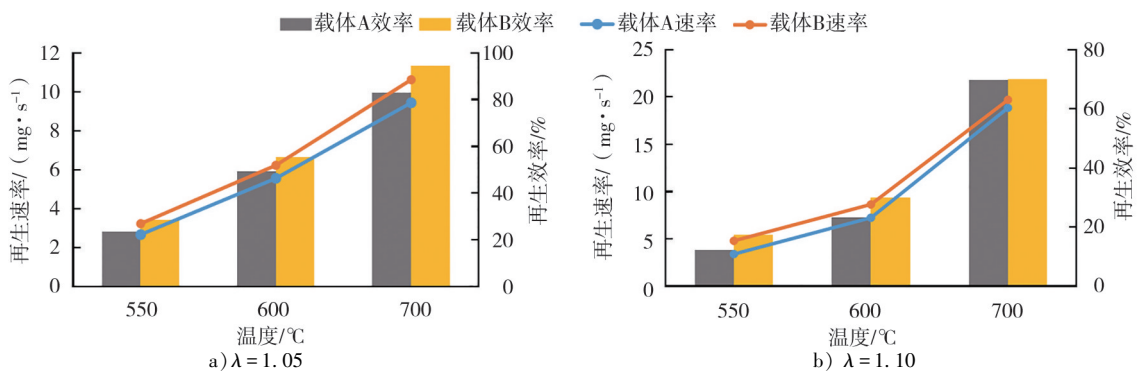


图5 碳载量为4 g/L时 GPF 再生速率和再生效率对比

由图5可知:GPF再生速率随着温度的升高增大,且 λ 相同时,碳载量为4 g/L的GPF的再生速率在600 °C和700 °C时明显大于2 g/L的。这是因为随着碳载量的增加,更多的碳烟参与到反应中,使得再生速率相应升高。

由图5a)可知: $\lambda = 1.05$,再生温度为700 °C时,2种载体的再生速率分别为9.44 mg/s和10.63 mg/s,差距较大。由图5b)可知, $\lambda = 1.10$ 、再生温度为700 °C时,2种载体的再生速率趋近一致,约为19.70 mg/s,主要因为此时温度高且氧含量充足,再生环境处于最佳状态,因此差异性较小。

λ 相同时,随着碳载量的增加,GPF 再生效率降低。一方面,当碳载量较大,碳烟的沉积从深床捕集逐渐变成表面过滤为主,碳烟将载体表面的涂层覆盖,使氧化性气体对碳烟的作用减弱,导致再生效率降低;另一方面,随着碳载量增加,孔道内部的有效体积减小,空气流速增大,空气与碳烟的接触时间减小,使得整体的再生效率相较于碳载量为 2 g/L 时有所降低。此外,载体 B 的再生效率普遍优于载体 A,主要是因为载体 B 的平均中值孔径较小、孔道内部有效体积减小导致的。

2.2 被动再生过程对载体的影响

2.2.1 再生温度场分布

碳载量为 2 g/L、GPF 前温度达到 700 °C 时停止供油,2 种载体的内部温度场变化如图 6 所示。

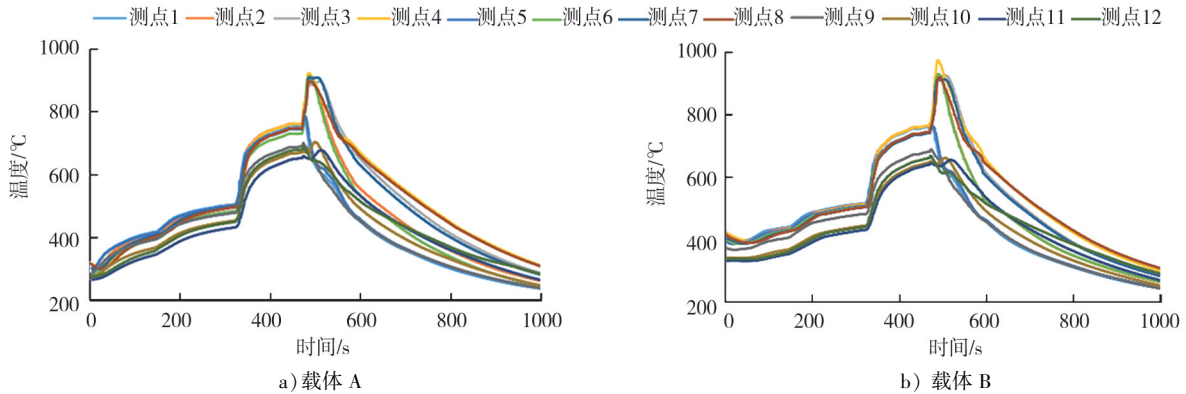


图6 碳载量为 2 g/L 时 2 种载体内部温度

由图 6 可知:停止供油后,GPF 内部的温度由正常的升温可控变为指数上升的升温失控状态,一段时间后,随着碳烟的不断再生,放热量逐渐减少,内部温度逐渐降低;载体 A 在断油后 15 s 出现峰值温度,最高温度出现在 GPF 尾端中心点即测点 4 处,达 923.9 °C。载体 B 在断油后 18 s 出现峰值温度,同样在测点 4 处,为 974.5 °C。载体 A 出现峰值温度所需的时间较短,这是因为载体 A 在较短的时间快速升温将碳烟反应掉,此时载体 B 还剩余部分碳烟,随着剩余碳烟继续再生,温度持续增加。载体 B 升高到最高温度用时较长,主要是因为中值孔径小,导致氧气流受阻,反应较慢,温度升高较慢。

边缘处的温度测点几乎未出现峰值温度,这是由于载体边缘位置散热较快,碳烟在边缘处的分布较少导致。GPF 径向温度分布呈现靠近内圈温度最高、中圈次之、外圈温度最低的规律。主要是因为 GPF 上游变径对气流的影响,中间位置碳加载较多,再生过程中载体中心碳烟反应更剧烈,因此中心温度高于边缘。轴向温度分布呈现靠近出口端温度高于靠近进口端温度,主要原因是车辆减速停止供油后,由于排气气流的影响,载体前端的碳烟再生产生的高温传到后端,不断积累且不能及时排出,加上后端碳烟氧化产生更多的热量使得后端温度较高。

碳载量为 4 g/L、GPF 前温度达到 600 °C 时进行断油,2 种载体的内部温度场变化如图 7 所示。

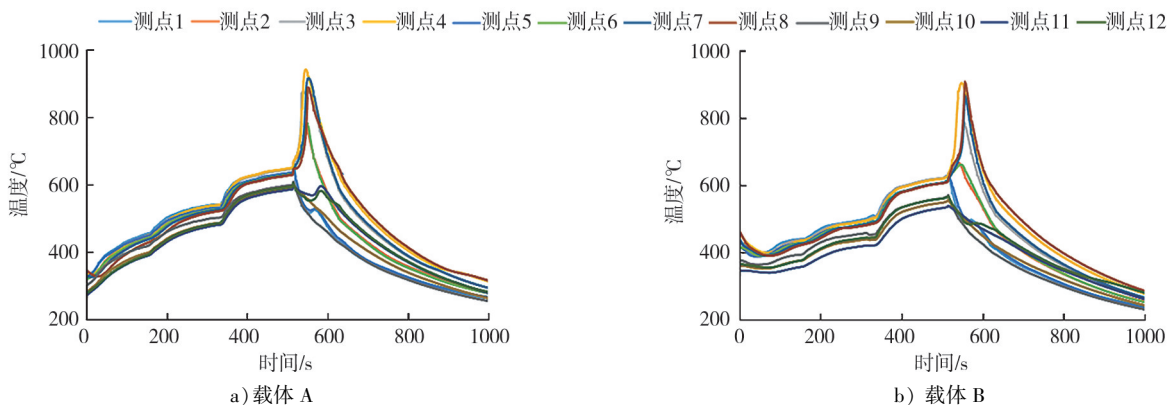


图7 碳载量 4 g/L 时 2 种载体内部温度

由图7可知:载体A在断油后33s出现峰值温度,在测点4处,为942.2℃,载体B在断油后44s出现峰值温度,在测点8处,为910.2℃。碳载量为4g/L时,碳烟层捕集占主导地位,此时2种载体壁面捕集较多的碳烟导致中值孔径带来的差异不明显,但是由于碳载量增加使壁面渗透下降,导致孔道内部气流运动较差,空气补充不及时,载体的被动再生速率降低,因此载体B的温度较载体A偏低。

碳载量为4g/L时载体内部温度的分布情况与2g/L相似,都呈现出中间温度高于边缘,出口温度高于入口,且载体A升高到最高温度所用的时间比载体B短。2种载体中心与边缘处出现明显的温度差,主要是因为碳载量增大,中间温度本身就高,触发再生时碳烟反应更加剧烈,边缘处散热较快,因此形成较大的温度差异。

2.2.2 再生效率及温度梯度

被动再生时,再生效率及温度梯度如表4所示。

表4 被动再生时再生效率及温度梯度

| 载体 | 再生效率/% | | 最大温度梯度/(℃·cm ⁻¹) | |
|----|----------|----------|------------------------------|----------|
| | 碳载量为2g/L | 碳载量为4g/L | 碳载量为2g/L | 碳载量为4g/L |
| A | 98.15 | 67.43 | 87.40 | 116.43 |
| B | 92.76 | 44.58 | 102.37 | 142.52 |

由表4可知:碳载量相同时,载体A的再生效率高于载体B,主要是因为载体B的中值孔径小,再生时空气流速较快,减小了氧气与碳烟的接触时间,导致再生效率偏低。碳载量为4g/L时,2种载体的再生效率明显降低,主要是因为断油前GPF入口温度较低,断油时GPF入口温度会出现降低趋势,导致碳烟燃烧效率降低;随着碳载量增加,碳烟沉积由深床层变为饼层,载体表面的催化剂被覆盖,不能与空气较好地接触,从而使整体再生效率降低。

GPF高温损坏不仅与最大耐受温度有关,也与其轴向和径向的温度变化率有关。当碳载量为4g/L时,载体A的最大径向温度梯度出现在测点11和测点7之间,达到116.43℃/cm,载体B的最大温度梯度出现在测点12和测点8之间,为142.52℃/cm,最大温度梯度均出现在载体后端径向位置。碳载量为2g/L时,2种载体的最大温度梯度出现在测点12和测点8之间,分别为87.40℃/cm和102.37℃/cm;载体B的最大径向温度梯度比载体A高,因此被动再生时应重点关注载体末端径向位置的温度梯度,防止因为温差过大导致载体破裂。

3 结论

通过发动机台架试验,分析了2种不同载体GPF主动再生和被动再生之间的差异,得到再生过程中载体内部的温度变化和再生效率,为下一代GPF的使用提供了依据。

1)载体B的再生速率和再生效率均优于载体A,碳载量为4g/L, $\lambda=1.10$ 时,载体B在700℃的再生速率达到19.70mg/s;碳载量为2g/L, $\lambda=1.05$ 时,载体B在700℃时的再生效率高达99.66%。

2)主动再生时,随着再生温度和 λ 的升高,GPF的再生速率和再生效率均有所提升;随着碳载量的增加,再生速率升高,但是再生效率有所降低。

3)被动再生时载体内部峰值温度出现在载体中心靠近出口处,且温度分布规律为径向温度呈现出中间高、边缘低的趋势,轴向温度为入口低、出口高。

4)被动再生时,载体A的再生效率优于载体B;碳载量相同时,载体B的径向温度梯度高于载体A。被动再生时最高温度出现在载体中心出口处,最大温度梯度均出现在载体末端径向位置处,再生时需要重点关注该位置的温度梯度不得超过载体耐受极限,后续试验会对载体极限碳载量的断油再生进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2020)[R]. 北京:生态环境部,2020.
- [2] 宋丽莹,赵金镗. 大气细颗粒物对中枢神经系统的不良影响及作用机制[J]. 卫生研究,2020,49(4):684-688.
- [3] KAZUHIRO Y, SHINIXHI K, KAZUYA S. Filtration and regeneration performances of SIC fiber potentially applied to gasoline particulates[J]. Fuel,2019,243:28-33.
- [4] ATHANASIOS M, GIORGIO M, ALESSANDRO M, et al. Assessment of different technical options in reducing particle emissions from gasoline direct injection vehicles [J]. Journal of Aerosol Science,2013,63:115-125.
- [5] BONATESTA F, CHIAPPETTA E, ROCCA L A. Part-load particulate matter from a GDI engine and the connection with combustion characteristics[J]. Applied Energy,2014,124:366-376.
- [6] 环境保护部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 18352.6—2016[S]. 北京:中国环境科学出版社,2016.
- [7] BOGER T, ROSE D, NICOLIN P, et al. Oxidation of soot (printex U) in particulate filters operated on gasoline engines[J]. Emission Control Science and Technology,2015,1:49-63.
- [8] 李配楠,程晓章,骆洪燕,等. 基于国六标准的汽油机颗粒捕集器的试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2017,34(1):1-5.
- [9] FENG Xiangyu, LIU Haixu, LI Weiwei, et al. On-vehicle fuel cut testing for gasoline particulate filter applications[C]// 2019 WCX SAE World Congress Experience. Detroit, USA; SAE International, 2019.
- [10] 杨世东,许巧云,孔永平,等. 轻型汽油车国6b后处理GPF匹配与问题研究[J]. 化学工程与装备,2019(9):155-156.
- [11] YUE H C, LEHMEN A, VAN NIEUWSTADT M, et al. Impacts of drive cycle and ambient temperature on modelled gasoline particulate filter soot accumulation and regeneration[C]// 2018 WCX SAE World Congress Experience. Detroit, USA; SAE International, 2018.
- [12] CHAN T W, SAFFARIPOUR M, LIU F S, et al. Characterization of real-time particle emissions from a gasoline direct injection vehicle equipped with a catalyzed gasoline particulate filter during filter regeneration[J]. Emission Control Science and Technology,2016,2(2):75-88.
- [13] 范明哲,张宾,STERZER A,等. 汽油机GPF碳载量模型和再生策略的试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2018,35(6):1-10.
- [14] 陈京瑞,朱晓峰,张志谋,等. 缸内直喷式汽油机颗粒物捕集器最新技术发展[J]. 小型内燃机与车辆技术,2017,46(3):87-91.
- [15] 杨永真,郭向阳,吴春玲,等. 缸内直喷增压汽油机GPF再生速率研究[J]. 内燃机与配件,2020(7):5-6.

Experimental study on regeneration performance of gasoline particulate filter with different carriers

NAN Zheng¹, LI Nan^{1*}, LIU Haitao², ZHANG Qiushi²,
ZHAO Qingliang², HUA Lun², ITO Masaaki³, MAO Xingye³

1. School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China;

2. Suzhou Automotive Research Institute, Tsinghua University, Suzhou 215000, China;

3. NGK Ceramics Co., Ltd., Shanghai 200336, China

Abstract: In order to meet the more stringent requirements of particulate emission standards, the gasoline particulate filter (GPF) is studied. The performance of GPF is tested, and the regeneration performance of two kinds of GPF is compared and analyzed, and the combustion characteristics of soot under different regeneration temperature or different soot loading and the temperature variation in the sample are studied. The results show that the regeneration rate increases with the increase of temperature, soot loading and air-fuel ratio. During passive

(下转第41页)