

柴油机燃油催化微粒后处理器性能与再生

田 径¹, 韩永强¹, 刘忠长¹, 李 骏², 李 康²

(1. 吉林大学 汽车动态模拟国家重点实验室,长春 130022; 2. 中国第一汽车集团公司 技术中心,长春 130011)

摘要:在车用 0# 柴油中添入铁基燃油添加剂(FBC),在一台配置无涂敷碳化硅微粒捕集器(DPF)的 CA6DL2-35E3 高压共轨重型柴油机上对其排放微粒进行捕集加载与再生试验。试验结果表明:在 ESC-13 工况测试循环下,采用低含硫量的欧 IV 0# 柴油可实现 DPF 微粒捕集效率达 90%。再生过程 DPF 中轴线出口位置具有最高燃烧温度,为热应力集中区。依据 ESC 测试工况权重分布及可实现再生工况范围,可再生与不可再生工况权重比大于极限再生与加载时间比,可实现可靠再生。DPF 微粒加载量引起 EGR 率明显畸变,适用于 EGR 机内净化耦合 DPF 的欧 IV 技术路线。

关键词:动力机械工程;柴油机;微粒捕集器;再生;燃油添加剂;微粒排放

中图分类号:TK42 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2011)01-0018-06

Performance and regeneration of diesel particulate filter with fuel borne catalyst on diesel engine

TIAN Jing¹, HAN Yong-qiang¹, LIU Zhong-chang¹, LI Jun², LI Kang²

(1. State Key Laboratory of Automobile Dynamical Simulation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. China FAW Group Corporation R&D Center, Changchun 130011, China)

Abstract: The trapping, loading and regenerating behaviors of a non-coated SiC diesel particulate filter (DPF) were investigated experimentally on a CA6DL2-35E3 high pressure common rail heavy-duty diesel engine with the fuel borne catalyst(FBC) added into the used 0# diesel fuel. The results show that the particulate trapping efficiency was up to 90% under the ESC-13 test cycle using low sulfur Euro4 0# diesel fuel. During the regeneration process the temperature at DPF outlet position was the highest near the central axis, being the thermal stress concentration area. According to the ESC condition weight distribution and the feasible regenerative condition range, the weight ratio between the regenerative and non-regenerative conditions is much higher than the ratio between the limit regenerative time and loading time. This implicates the DPF with FBC can regenerate reliably. The particulate loading in DPF causes EGR change obviously, so the DPF/FBC technology is suitable for the technical route of EGR coupled with DPF for the Euro4 diesel engine.

Key words: power machinery and engineering; diesel engine; diesel particulate filter (DPF); regeneration; fuel borne catalyst(FBC); particulate emission

收稿日期:2009-11-27.

基金项目:国家自然科学基金项目(50976046);“863”国家高技术研究发展计划项目(2008AA11A115).

作者简介:田径(1981-),男,讲师,博士.研究方向:内燃机公害与控制. E-mail:tianjing@email.jlu.edu.cn

通信作者:韩永强(1975-),男,教授.研究方向:内燃机公害与控制. E-mail:hanyq@jlu.edu.cn

成,在机外后处理过程中采用微粒捕集器(DPF)进行微粒捕集的减排技术路线是目前国际上柴油机达欧IV排放法规要求的重要技术路线之一,相应地对微粒捕集器的再生能力及燃油品质均提出了较高的要求。目前在燃油中加入添加剂(FBC)是被动再生方式研究的热点。添加剂一般为可溶性的金属或金属盐等,燃烧后生成的金属氧化物对微粒起催化作用,适用于非涂敷式微粒捕集器载体,除了较好的抗硫能力,可降低微粒的起燃温度,加速碳粒燃烧,将其转化成气体排放,从而在较低的排气温度下不需外部能源,过滤体能自行再生^[1-5]。本研究基于EGR+DPF技术使重型柴油机达欧IV排放标准,在不设置辅助再生系统的前提下,利用含铁基FBC实现微粒捕集器的再生,研究DPF/FBC对发动机排放的影响以及加载再生规律,并考察DPF负载导致的排气背压对EGR系统的影响规律。

1 试验测控系统的建立

试验发动机为排放达欧Ⅲ标准的CA6DL2-35E3增压中冷高压电控共轨重型柴油机,具体参数如下:直列六缸水冷四冲程涡轮增压;排量为8.6 L;燃油供给系为Bosch共轨系统;采用基于VGT驱动的高压EGR系统;燃烧室为缩口 ω 型;最大排气流量为1600 kg/h;标定功率/标定转速为255 kW/2100 r·min⁻¹;最大扭矩/转速为1514 N·m/1500 r·min⁻¹;HOLSET V400增压器;EGR率为ESC循环NO_x达欧IV排放标准。试验装置包括了南峰CW440电涡流测功机、HORIBA MEXA7200E排放分析仪、SIEMENS温控装置、FCMM油耗仪、VGT/EGR实时控制系统以及测量装置等,图1为试验台架结构及测控装置示意图;微粒捕集器采用碳化硅滤芯材料,捕集容积为17.8 L,试验过程利用新加坡润英联公司提供的铁基燃油添加剂,按照 250×10^{-6} 质量比与柴油进行混合燃烧;KNE-043 EGR阀控制系统通过PMW控制步进电机来实现,控制电压为5 V,电机步数为45步,EGR阀行程正比于负载率;HOLSET400型VGT系统采用气源+电磁阀+膜片式气动执行阀的执行方式,VGT叶片开度大小利用气压控制阀改变气动膜片室中压力以控制拉杆行程的方法来间接反映。

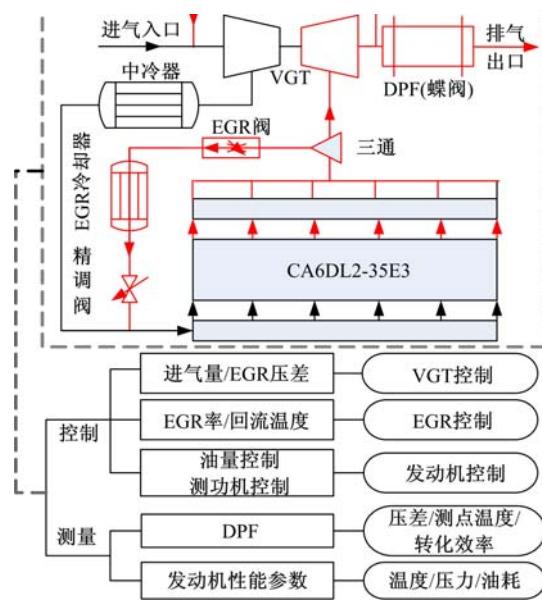


图1 台架结构及测控装置示意图

Fig. 1 Sketch map of bench layout and control devices

2 ESC-13工况排放

研究分别在市售0#柴油以及欧IV柴油中加入添加剂FBC,按ESC-13工况法进行排放试验,测量并比较两种柴油DPF前后的排放,试验结果如图2、表1所示。

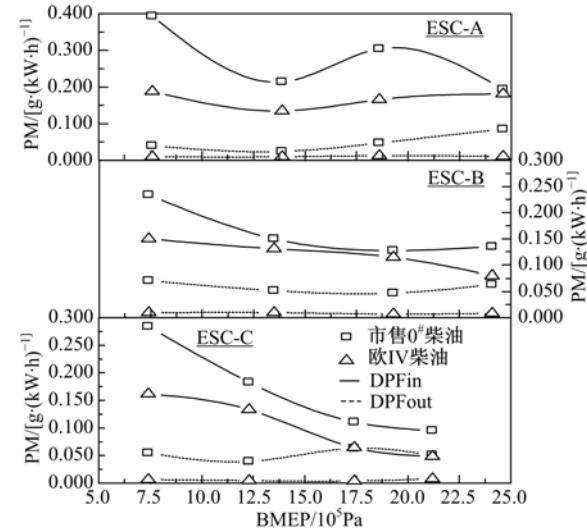


图2 柴油含硫量对微粒排放的影响示意图

Fig. 2 Influence on particle emission with sulfur content

从图2可看出:柴油品质对发动机原始排气和DPF转换效率均有明显影响。市售0#燃油的高含硫量导致部分工况下柴油机原始排气微粒排放比欧IV燃油高出80%左右;同时高含硫量的市售燃油会造成DPF的转化效率下降,可以认为

应造成 DPF 出口微粒排放高所致。表 1 的 ESC-13 工况微粒比排放结果数据显示:0# 欧Ⅳ柴油 DPF 微粒转化效率为 90%,微粒比排放已达到欧Ⅳ排放限值;而不同柴油添加 FBC 对气体排放及燃油消耗率影响不大。

表 1 ESC-13 工况排放结果比较

Table 1 ESC-13 specific emission results' comparison

排放物质	测点位置	0# 市售柴油/ [g·(kW·h) ⁻¹]	0# 欧Ⅳ柴油/ [g·(kW·h) ⁻¹]
CO		1.710	1.984
HC	DPF 出入	0.132	0.13
NO _x	口平均值	3.912	3.843
be		225.9	224.8
PM	DPFin	0.165	0.113
&	DPFout	0.056	0.011
转化效率/%		65.9	89.9

3 DPF 微粒加载与再生

为研究 FBC/DPF 微粒加载与再生特性,试验设定 ESC 测试循环转速为 1330 r/min(以下简称 A 转速)、170 Nm(转矩)工况为微粒加载工况,此工况下 DPF 入口温度为 170°C,远低于所知催化剂起燃温度(约 400 °C),可有效抑制已捕集微粒在 DPF 内的氧化。当微粒加载到 DPF 前后背压压差为 10 kPa 时确定为微粒满载背压,此时再进行强制再生。微粒再生过程中,试验利用测功机瞬态控制从加载工况匀速过渡到目标温度所对应再生工况的时间均设定为 10 s,在转矩达到再生工况时开始记录 DPF 背压及温度参数,结合 DPF 前后背压变化及加载前与再生后称重综合检验 DPF 微粒再生完成度;并根据采集 DPF 背压数据结果分析,将再生终了过程维持压差不下降或不变的时刻确定为再生结束,分析 FBC 添加剂对 DPF 微粒加载与再生过程的影响规律。

3.1 DPF 入口温度对再生时间的影响规律

A 转速、不同再生温度(DPF 入口温度分别

表 2 ESC 测试工况加载再生信息

Table 2 Trapping and regeneration information in ESC test conditions

T _{DPFin} /°C	工况			DPF 背压压差			工况			耗时	再生后 DPF 质量增量/g
	转速/ (r·min) /(Nm)	转矩/ (Nm)	加载前	加载后	再生后	转速/ (r·min) /(Nm)	T _{DPFin} /°C				
510	A *	165	9	85	13	加载	A	165	170	11 h 40 min	—
510	A	750	27	116	30	加载	A	165	170	13 h 10 min	—
420	A	165	7	85	10	再生	A	750	510	约 800 s	4.0
420	A	600	21.5	102	24	再生	A	600	420	约 855 s	4.5

注:A 转速表示转速为 1330 r/min。

生过程及数据信息如图 3、图 4 及表 2 所示。

从图 3 可以看出,由于新 DPF 滤芯透过率较大,表面积及流通系数均较大、吸附速率较低,微粒加载缓慢,初期 360 min 加载时间内,DPF 背压压差增大约 2 kPa。随着吸附微粒的增加,表面积增大,流通系数下降、空速逐渐降低,微粒加载速度加快。两次加载过程耗时基本一致,约 12.5 h 后加载达到满载背压,负载量均为 8.902 g/L。图 4 为在加载过程中 DPF 出口位置,0.5 h 一次微粒采集与初始工况微粒排放量的比较,由图 4 也可以得出相似的结论,而在满载时刻 DPF

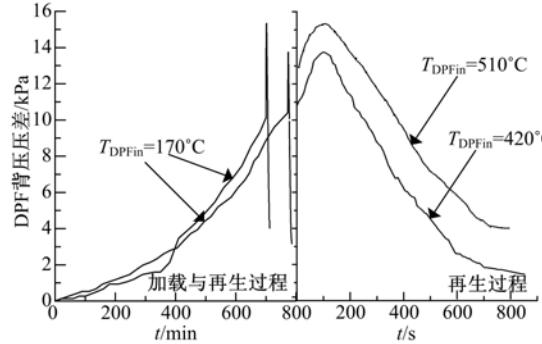


图 3 不同 DPF 入口温度加载再生过程示意图

Fig. 3 Trapping and regeneration process with different DPF inlet temperatures

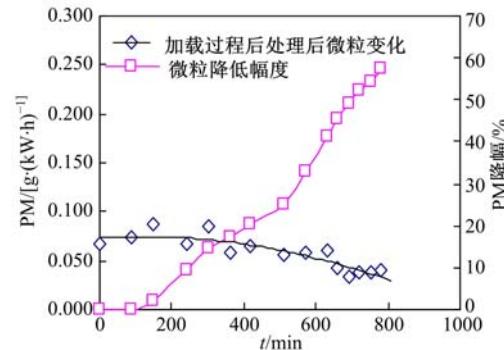


图 4 加载微粒随时间的变化关系

Fig. 4 Variation of particle trapping with time

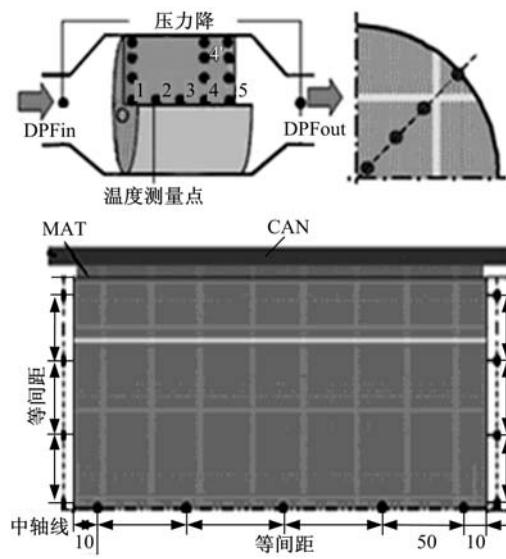
再生过程中,由于工况过渡过程中排气流量的骤然增大,导致 DPF 前后背压压差迅速升高,在 A 转速、不同 DPF 入口温度(500°C , 400°C)条件下,二者再生过程出现压差峰值时刻都在达到目标工况开始算起约 65 s 后,且基本一致;最大背压压差分别为 15.5 kPa 及 13.6 kPa,造成此差别的原因是进气量的不同;当 DPF 入口温度超过催化剂起燃温度时,DPF 内累积的微粒开始有燃烧反应,DPF 前后背压压差开始降低,此后随着燃烧微粒量的增加,DPF 内部温度上升迅速,DPF 背压压差呈线性下降趋势,并在接近原始工况(压差为 3.7 kPa 和 2.9 kPa)后趋于缓慢,表明再生过程接近完成。从表 2 可以看出,在主动温度再生范围内,DPF 入口温度越高,微粒再生耗时越短, 500°C 再生温度下再生时间为 800 s,比 400°C 再生温度下的再生时间减少了近 1 min。

另外,从表 2 还可以看出,再生后与全新 DPF 背压压差有一定的差别,并且每次再生后均有所增加。其原因主要为三个方面:生成的硫酸盐沉积导致流通系数变小;再生时间不足(后期再生速度减慢);再生温度较低,无法使硫酸盐挥发排空。

3.2 DPF 载体温度分布

对于利用 FBC 催化再生的 DPF 载体,再生过程温度分布一方面受到 DPF 入口温度分布及 DPF 内部废气浓度分布的影响,进而影响到 DPF 的转化效率;另一方面由于 DPF 内部微粒燃烧再生所产生的高热应力可能会造成 DPF 载体裂缝,而温度分布是对载体热应力场分布的重要表征。因而研究 DPF 内部温度场分布将有利于优化 DPF 载体设计,并改善转化效率^[6]。图 5 为试验采用的温度测点分布图。试验温度测量装置采用 K 型铠装 1.25 mm 直径温度传感器,最高耐热温度为 1000°C ,测量响应时间为 0.3 s,满足测量要求。

为测量 DPF 载体温度分布,进行了一次完整的加载与再生过程研究。加载与再生工况分别是 A 转速、165 Nm 及 B 转速($1650\text{ r}/\text{min}$)、1200 Nm(DPF 入口温度为 500°C),变化规律同此前 A 转速下加载与再生试验规律基本一致,加载时间与再生时间均约为 11 min。图 6 为再生过程中不同测点位置温度随时间的变化关系,可以看出,



直径 = 270 mm, 长度 = 310 mm

图 5 温度测点布置示意图

Fig. 5 Temperature measuring points' distribution

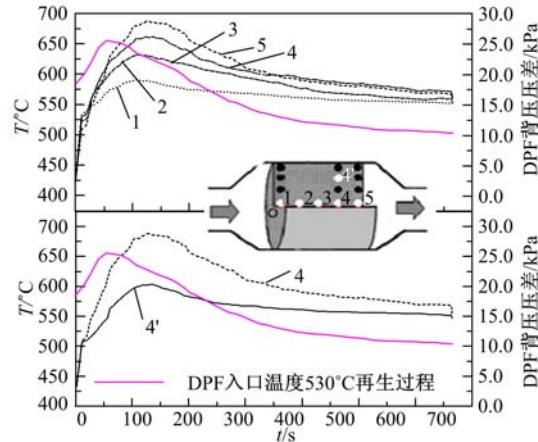


图 6 测点温度随时间的变化关系

Fig. 6 Variation of measuring points' temperature with time

当试验工况达到再生目标工况时,DPF 入口温度较低(约 420°C),随着 DPF 入口温度的升高,虽然 DPF 内部微粒受金属氧化物催化开始出现微粒燃烧,但短时间内再生微粒少,导致此过程约 40 s 时间内 DPF 背压仍受变工况影响呈急剧增大趋势。此后,DPF 内部因热量累积增大使微粒剧烈燃烧,DPF 背压呈线性下降趋势。根据测点温度数据结果比较可知,最高微粒燃烧温度出现在 DPF 中轴线出口处,为热应力集中区域;轴心线出口较入口温度峰值延迟约 30 s,峰值高约 100°C ;径向方向峰值温度出现时刻接近,距离轴心为 $2/3$ 轴径的位置处峰值温度降低约 50°C 。

为了确定 FBC 型燃油添加剂辅助 DPF 微粒再生的温度范围,需确立发动机各转速下实现微粒再生的临界温度,建立可再生发动机运行工况边界。

本试验在 ESC-A 转速、170 Nm 转矩工况下,首先加载 DPF 前后背压压差到 3.33 kPa(25 mmHg)用于观测吸附载体微粒量的变化,并在发动机不同转速设定较低 DPF 入口温度对应的扭矩作为初始转矩,每隔 5 min 按 50 Nm 转矩由小到大递增,直至出现 DPF 背压下降为止,并以此时的 DPF 入口温度表征再生临界温度。试验数据结果如图 7 所示。

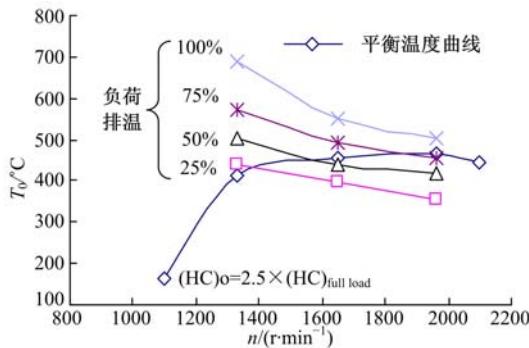


图 7 再生临界温度与可实现再生工况范围

Fig. 7 Regeneration critical temperatures and feasible regeneration condition ranges

从图 7 可以看出:除 1100 r/min 转速再生临界温度低于 200 °C 以外,其他转速下平衡温度都在 400°C 以上,变化量整体不超过 50 °C,可以认为发动机的排气流量,空速(受发动机转速及转矩影响)对 DPF 微粒再生临界温度影响不大。另外,由于平衡工况时 HC 排放约是此转速全负荷工况 HC 排放的 2.5 倍,过多的 HC 排放在经过低空速 DPF(低转速负荷)时受到催化以促进 HC 氧化并累积放热,微粒受氧化燃烧致使低转速时临界温度过低。

由于等负荷率工况转速越低排温越高,通过比较 ESC-13 工况(0# 欧Ⅳ柴油)DPF 入口温度和工况对应转速再生平衡温度可知,除了低负荷不易实现再生外,中低转速、中大负荷以及高转速、大负荷均可实现再生。

3.4 再生可靠性评价

ESC 稳态测试循环可表征重型柴油机典型使用工况,各工况的权重也基本能反映各工况实际使用时间分布。从图 7 可以看出,能够实现可

外,按照 ESC 测试工况的权重分布,可再生工况与不可再生工况权重总和分别为 0.45 和 0.5,即可认为发动机运行过程中满足加载、再生条件的时间比例是 9 : 10。结合表 2 的实验结果可以看出,最慢的 A 转速再生所需时间为 14 min,而加载时间最短的 A 转速加载时间为 720 min,也即加载与再生所需时间比例约是 50 : 1,要远大于满足加载再生的时间比例,表明在重型柴油机实际运行中添加 FBC 后,在常用工况下能够实现可靠再生。

另外,研究中加载时间仅依靠 A 转速、低负荷确定,该工况下微粒的总排放量较小。按照相同效率(捕集百分比)加载最快的工况可认为是绝对微粒排放量最多、且不能再生的工况 C50。根据原始微粒排放测试结果分析,C50 的微粒排放量为加载工况的 1.5~2.5 倍,考虑到空速较大时排气阻力系数会有所增加,加载速率也会有所提高,二者的共同影响使得极限加载速度会提高 8~12 倍,则其极限加载周期为 1~1.5 倍(60~90 min),而极限再生周期最长时间假设是 A 转速实验工况为 14 min,即加载与再生时间比约为 4 : 1,远大于实际循环的权重比,说明样机在实际极限运转循环中可实现可靠再生。

4 DPF/FBC 对 EGR 系统的影响

为研究 DPF/FBC 对 EGR 系统的影响,在耦合 VGT/EGR 系统匹配性能优化的基础上,改变 DPF 微粒加载量,探讨不同 DPF 加载量对 EGR 率瞬变的影响规律。

通过 VGT/EGR 系统性能优化可知,在尽量避免功率损失的前提下减小 VGT 叶片开度,使排气烟度尽可能小来实现 VGT 系统性能匹配,介入 EGR 后使 NO_x 比排放尽可能低的同时,需以烟度变化不大为前提来实现 VGT/EGR 系统性能优化^[7]。试验结果表明:当 EGR 率增至约 10% 时,烟度及 NO_x 比排放均处于较低的水平。以此为前提,试验在排气管 DPF 安装位置改装蝶阀,以模拟 DPF 背压,通过蝶阀开度的调节实现 DPF 不同背压(即不同微粒加载量)的调节,形成的压差回流直接将废气引入压气机前端(见图 1),实现废气再循环。试验过程中 DPF 加载量以 10 kPa 背压压差作为加载满载,按照空载、25% 加载、50% 加载、75% 加载、满载进行背压调节。

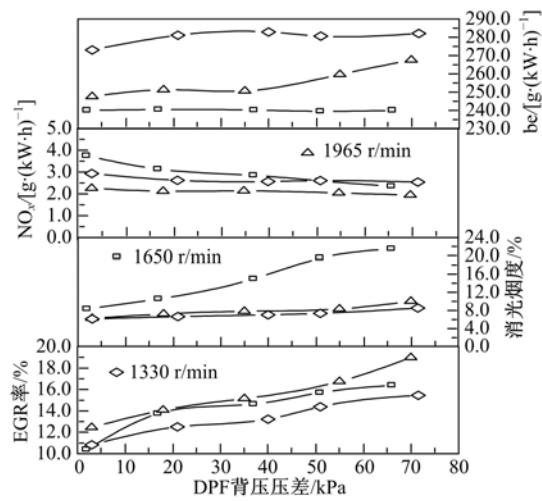


图 8 DPF 加载量对发动机参数的影响

Fig. 8 Influence of DPF trapping amount on engine parameters

图 8 显示了不同转速等负荷率下 EGR 率、发动机排放及燃油经济性随 DPF 微粒加载量(背压模拟)变化的示意图。从图 8 可以看出: VGT/EGR 性能优化后以 DPF 空载状态下的 10% EGR 率为基准, 各转速满载背压所引起的 EGR 率变化趋势相似, 增幅相近、且均超过了 5%, 变化比率均达到了 50%。这就表明 DPF 负载量的变化对 EGR 系统影响很大, 而 DPF 后处理系统一般运用于基于机内净化 NO_x 耦合 DPF 系统的欧Ⅳ技术路线, 其 EGR 系统随 DPF 加载量的畸变将是一个值得关注的领域。

由于低转速、小负荷进气量少, 混合气形成品质差, NO_x 排放、消光烟度在 EGR 畸变情况下变化明显。从数据上显示, 25% 负荷率、DPF 空载到满载过程, 低转速烟度升高量约为 13%, NO_x 排放降幅约 40%; 而中高转速升高量不超过 5%, NO_x 比排放降幅均在 10% 以上。

5 结 论

(1) 采用欧Ⅳ柴油为燃料添加 FBC 型添加剂, ESC-13 工况下 DPF 对 PM 的转化效率达 90%, 可使欧Ⅲ柴油机的 PM 排放达欧Ⅳ标准。

(2) 同工况加载过程重复性较好, ESC 测试循环 A 转速、170 Nm 转矩工况加载时间约为 12.5 h; 再生过程中 DPF 轴心出口位置具有最高燃烧温度, 为热应力集中区域。

(3) 除 1100 r/min 转速因受到 HC 排放影响

平衡温度随转速变化不大, 且均略大于 400 °C。

(4) ESC-13 工况范围内, 除低负荷工况不易实现微粒再生外, 中大负荷均可实现微粒再生。依据 ESC 测试工况的权重分布, 可再生与不可再生的权重比大于极限再生加载时间比, 可实现可靠再生。

(5) 不同工况下, 由于 DPF 加载量不同所带来的排气背压变化均会引起 EGR 率的畸变, 适合以 EGR 机内净化 NO_x 耦合 DPF 的欧Ⅳ技术路线。

参 考 文 献:

- [1] Richards P, Terry B, Pye D. Demonstration of the benefits of DPF/FBC systems on London black cabs [C]// SAE Paper, 2003-01-0375.
- [2] Richards P, Kalischewski W. Results from a 1/4 million km, heavy-duty truck trial, using FBC regenerated DPFs[C]// SAE Paper, 2004-01-0074.
- [3] Mayer A, Nöthiger P, Andreassen L, et al. Retrofitting TRU-diesel engines with DPF-systems using FBC and intake throttling for active regeneration[C] // SAE Paper, 2005-01-0662.
- [4] Richards P, Vincent M W, Johansen K, et al. Metal emissions, NO_x and HC reduction from a base metal catalysed DPF/FBC system[C]// SAE Paper, 2006-01-0420.
- [5] 王天友, ERIC Lim Khim Song, 林漫群, 等. 燃油催化微粒捕集器微粒捕集与强制再生特性的研究[J]. 内燃机学报, 2007, 259(6):527-531.
Wang Tian-you, ERIC Lim Khim Song, Lin Man-qun, et al. A research on the filtration and regeneration of fuel borne catalyst diesel particulate filter of diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2007, 259 (6):527-531.
- [6] Mizutani T, Watanabe Y, Yuuki K, et al. Soot regeneration model for SiC-DPF system design[C]// SAE Paper, 2004-01-0159.
- [7] 田径, 刘忠长, 葛思非, 等. 可变几何截面增压器/废气再循环对重型柴油机性能和排放的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(4):384-388.
Tian Jing, Liu Zhong-chang, Ge Si-fei, et al. Effect of VGT/EGR system on performances and emissions of heavy-duty diesel engine[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(4):384-388.