

柴油机 DPF 后颗粒物排放研究

王建海,熊兴旺,于津涛,高俊华
(中国汽车技术研究中心,北京 100176)

A Study on Diesel Particle Number Emission Downstream of DPF

WANG Jianhai, XIONG Xingwang, YU Jintao, GAO Junhua
(China Automotive Technology & Research Center, Beijing 100176, China)

Abstract: Particle number emission tests with China V diesel fuel were conducted on a Euro VI diesel engine equipped with DPF in ESC, ETC, WHSC and WHTC tests. Results show that during the transient processes of those tests, the large absolute peaks of the engine's exhaust back pressure change rate result in instantaneous peaks of the exhaust particle number concentration although the exhaust gas is purified by DPF. The number of particles in the average diameter range of 50 nm to 80 nm accounts for 90% of the total number of particles emitted over the ESC test cycle, while the number of particles in the average diameter range of 60 nm to 110 nm accounts for 87% of the total number of particles emitted over the WHSC test cycle. The number of particles in the average diameter range of 10 nm to 70 nm accounts for 80% of the total number of particles emitted over the ETC test cycle, while the number of particles in the average diameter range of 10 nm to 40 nm and 50 nm to 60 nm accounts for 85% of the total number of particles emitted over the WHTC test cycle.

摘要: 在一台满足欧 VI 排放标准的柴油机上燃用国 V 柴油,带柴油机颗粒捕集器(DPF)进行了欧洲稳态循环(ESC)、欧洲瞬态循环(ETC)、全球统一稳态循环(WHSC)和全球统一瞬态循环(WHTC)试验。试验结果表明:在试验循环的瞬态过程中,发动机排气经过 DPF 后,较大的排气背压变化率绝对值峰值仍会导致排气中出现颗粒物数量浓度瞬时峰值。ESC 循环试验中平均粒径[50 nm, 80 nm]区间内总颗粒物数量排放占全部颗粒物的 90%, WHSC 中平均粒径[60 nm, 110 nm]区间内总颗粒物数量排放占全部颗粒物的 87%, ETC 在平均粒径[10 nm, 70 nm]区间内总颗粒物数量排放占全部颗粒物的 80%, WHTC 在平均粒径[10 nm, 40 nm]和[50 nm, 60 nm]区间内总颗粒物数量排放占全部颗粒物的 85%。

关键词: 柴油机颗粒捕集器(DPF); 颗粒物数量浓度; 颗粒物平均粒径

Key words: DPF; particle number concentrations; average particle diameter

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2018.01.013

中图分类号: TK421+.5

文献标识码: A

0 概述

柴油机颗粒物(PM)排放是大气 PM_{2.5} 污染的一个重要来源。柴油机颗粒捕集器(DPF)对柴油机尾气 PM 具有较高的净化效率。DPF 滤体对 PM 进

行捕集,并借助主动或被动再生将捕集的 PM 氧化^[1]。氧化型催化器(DOC)+DPF 组合中的 DOC 可以将排气中的 NO 氧化为 NO₂,有利于被动再生^[2]。

对一台安装 DPF 的柴油机稳态工况 PM 排放

收稿日期: 2017-01-18

修回日期: 2017-03-21

作者简介: 王建海(1975—),男,高级工程师,主要研究方向为汽车节能减排技术, E-mail: wangjianhai@catarc.ac.cn;

熊兴旺(通信作者),男,工程师,主要研究方向为天然气掺氢发动机、柴油机建模, E-mail: xiongxingwang@126.com。

的研究表明^[3],DPF 对核态及超细颗粒物的捕集效率较高,随转速和负荷增加,DPF 对不同模态 PM 的捕集效率降低,且高捕集效率所对应的 PM 粒径减小。ESC 稳态工况下^[4-5] DPF 对细颗粒物过滤效果更好;ETC 循环中 DPF 后的颗粒物主要以积聚态存在,转速快速上升时会导致少量 PM 瞬时峰值生成。研究发现^[6-7]:在稳态工况下 PM 的基本粒子均近似呈球形,与发动机工况和后处理无关;DOC 可以使 PM 基本粒子的碳层排列更有序;排气流经 DOC 后次级粒子由葡萄状结构向链状结构转化,但流经 DPF 后又向葡萄型结构转化。

目前针对瞬态过程中发动机 DPF 后 PM 排放的研究较少。本文针对 ESC 和 WHSC 循环工况间切换瞬态过程及 ETC、WHTC 瞬态循环,研究了柴油机 DPF 后的 PM 数量瞬态峰值,并对 ESC、WHSC、ETC 和 WHTC 循环全过程的 PM 平均粒径分布进行了统计分析。

1 试验系统与方案

1.1 试验发动机

本文发动机为采用废气再循环(EGR)+DOC+DPF+选择性催化还原系统(SCR)技术路线满足欧 VI 排放法规的 4 冲程高压共轨增压中冷柴油机,表 1 给出了试验用柴油机的性能参数。

表 1 柴油机性能参数

项目	参数
型式	直列水冷,4 冲程
进气方式	增压中冷
气缸数	6
供油系统	高压共轨
总排量/L	7.1
标定功率/kW	199
最大扭矩/(N·m)	1 065

1.2 试验设备

试验采用交流电力测功机,并使用全流排放测试系统对排气进行稀释,利用 NanoMet 3 进行 PM 采样测量。NanoMet 3 仪器采用扩散粒子分类器原理实时测量 PM 数量浓度与 PM 平均直径^[8],可用于测量 10~300 nm 的 PM 的数量浓度及平均粒径,适合发动机台架瞬态测试及 PEMS 型式认证^[9]。NanoMet 3 采样探头从 CVS 稀释系统前的排气管路中采样,本文所进行的试验中 NanoMet 3 选用固定稀释比 10。表 2 给出了试验中所用的关键设备。

1.3 试验方案

发动机安装 DPF 后处理,燃用国 V 柴油,依据

表 2 主要测试仪器及设备

设备名称	型号
交流电力测功机	AVLDynoRoad 30418 Sx
全流稀释系统	AVL CVS i60
颗粒物测量仪	Matter Aerosol NanoMet 3
进气空调	AVLCONSISAIR-1600

GB 17691—2005 标准^[10],进行了 ESC 循环和 ETC 循环试验。图 1 和图 2 分别给出了 ESC、ETC 循环试验中各工况点的转速和转矩。

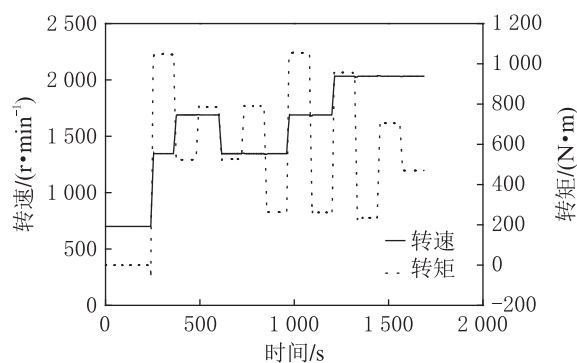


图 1 ESC 循环试验各工况转速和转矩

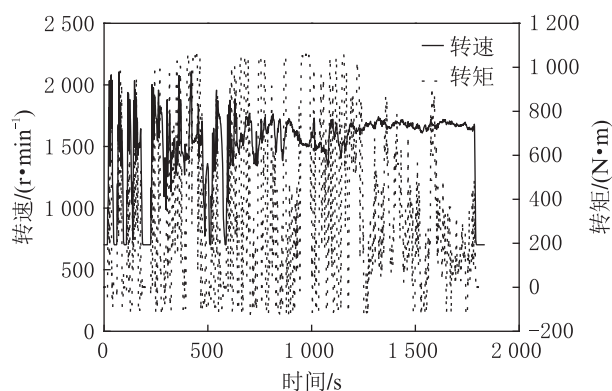


图 2 ETC 循环试验各工况转速和转矩

之后按照 DB11/964—2013^[11]进行了 WHSC 和 WHTC 循环试验。图 3 和图 4 分别给出了 WHSC 和 WHTC 冷态循环试验中各工况点的转速和转矩。

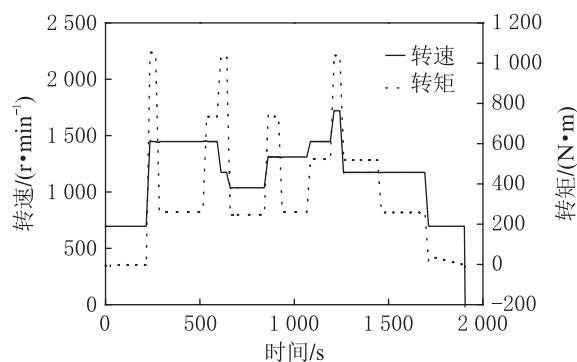


图 3 WHSC 循环试验各工况转速和转矩

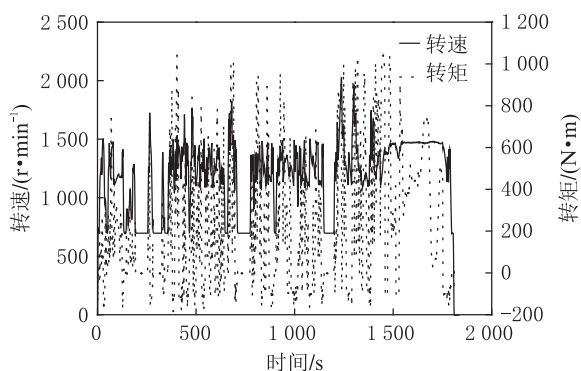


图4 WHC循环试验各工况转速和转矩

2 柴油机 PM 瞬时排放峰值

2.1 稳态循环工况切换过程 PM 瞬时排放峰值

图5为ESC循环和WHSC循环试验中,PM数量浓度排放随时间的变化情况。从图5可见,经过DPF过滤后,在稳态工况时PM数量排放较低,但在工况切换的瞬态过程中PM数量排放可能会瞬时升高,在瞬态过程的初始阶段甚至会出现局部峰值。这种现象在ESC循环中比在WHSC循环中表现更为明显。

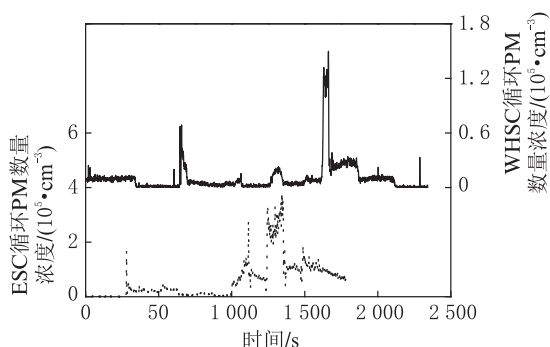


图5 ESC和WHSC循环PM数量排放实时曲线

图6为ESC和WHSC循环下排气背压变化率随时间的变化情况。从图6可知,ESC循环和WHSC循环中工况切换瞬态过程的初期都会存在瞬时排气背压变化率绝对值突然增大的现象,甚至会出现变化率绝对值的峰值,且ESC循环排气背压变化幅度大于WHSC循环。结合图5来看,图5中各PM数量瞬时峰值对应的瞬态过程的初始阶段的瞬时排气背压变化率绝对值都有明显峰值。

有研究表明:柴油机瞬态过程原始排气中PM以大粒径聚集态微粒为主,占到总数55%以上,且随着工况瞬变率的减小,PM数量逐渐减少^[12];连续再生颗粒捕集器对聚集态颗粒的捕集效率高于对核态颗粒的捕集效率^[13]。研究人员在装有DPF的柴油车上进行新欧洲行驶循环(NEDC)循环试验时观察到PM数量排放出现峰值的现象,分析认为PM数

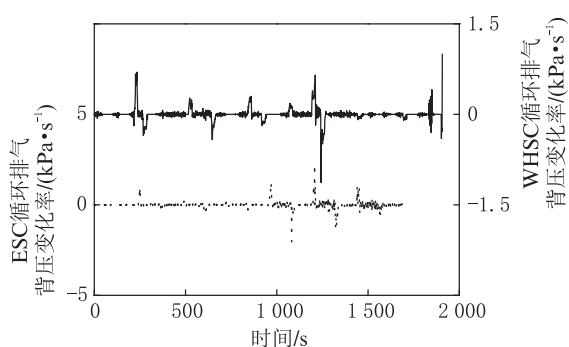


图6 ESC和WHSC循环排气背压变化率实时曲线

量峰值是DPF已捕获的PM被吹出DPF所致^[14-15]。

结合图5和图6的现象分析:稳态循环中工况切换瞬态过程初期,排气背压变化率的增大表明此时的工况瞬变率较大,导致发动机喷油和进气状态发生剧烈变化,涡轮迟滞效应会导致缸内燃烧变差,EGR率的变化进一步加剧燃烧的劣化,而造成PM数量原始排放增大;同时较大的排气背压变化率绝对值峰值可能会导致排气气流将DPF捕获的一部分PM吹出DPF。上述两个因素共同导致DPF后的排气PM数量排放增加甚至出现排放峰值的现象。

2.2 瞬态循环PM瞬时排放峰值

图7为ETC和WHTC循环试验中,各工况的PM数量浓度随时间的变化情况。从图7中可以看到:ETC循环开始阶段,PM数量浓度出现了若干次峰值,其中包括一个极高峰值,循环其余时间内PM数量浓度一直较低,即使存在局部峰值,峰值也都比较小。WHTC循环中,循环前600s内出现了若干明显的峰值,1200s后也存在两个明显峰值;另外前600s和1200s后的工况对应的PM数量浓度不明显峰值数量要多于600~1200s工况。

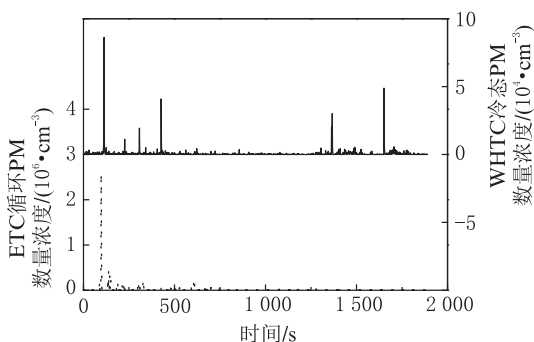


图7 ETC和WHTC循环PM数量排放实时曲线

图8给出了ETC和WHTC循环过程中排气背压变化率随时间的变化情况。

从图8可以看到:ETC循环中排气背压变化率一直处于变化中;前1200s内排气背压变化率波动剧烈,且排气背压变化率的绝对值峰值较高;1200s之

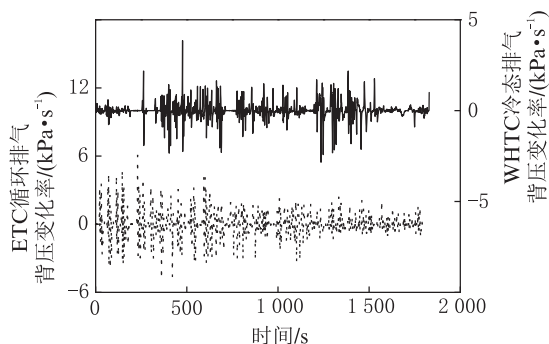


图 8 ETC 和 WHTC 循环排气背压变化率实时曲线

后的排气背压变化率波动程度明显减弱,排气背压变化率的绝对值峰值明显变小。WHTC 循环在 400~1 600 s 区域内也存在排气背压大幅震荡变化的工况区域,在这段工况区域内,起始阶段和最后阶段的排气背压变化率的绝对值峰值明显大于中间阶段。

参考稳态循环中排气背压变化率对 PM 数量的影响,瞬态循环中较大的排气背压变化率绝对值峰值表明此时缸内燃烧变差,会造成 PM 数量原始排放增加,同时也会导致排气气流将 DPF 捕获的一部分颗粒物吹出 DPF,形成 PM 数量瞬时峰值。

3 柴油机 DPF 后 PM 平均粒径分布

3.1 稳态循环全程 PM 平均粒径分布

图 9 为 ESC 和 WHSC 循环试验中,各工况的 PM 数量浓度随 PM 平均粒径的变化情况。

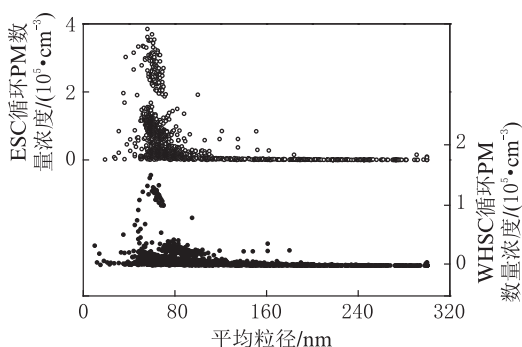


图 9 ESC 和 WHSC 循环颗粒物数量与平均粒径的关系

从图 9 中可以看到,ESC 和 WHSC 循环中 PM 数量浓度较高的工况多数分布于平均粒径[40 nm, 120 nm]区间内,其中 PM 数量浓度峰值工况多数分布于平均粒径为 60 nm 的区域附近。同时可以看到,60 nm 区域附近的工况点数量占[0 nm, 300 nm]区间内全部工况数量的百分比也较高。

为便于观察 ESC 和 WHSC 循环全过程中某粒径区间内累积 PM 数量排放关于平均粒径的分布情况,定义 PM 粒径区间百分比 $\eta_{(d,d+10)}$,如式(1)所示:

$$\eta_{(d,d+10)} = \frac{\sum_d^{d+10} N}{\sum_0^{300} N} \quad (1)$$

式中, d 为平均粒径, nm; N 为 PM 数量, cm^{-3} ; $\eta_{(d,d+10)}$ 表示平均粒径 $[d, d+10]$ 区间内 PM 数量之和占循环 PM 数量总和的百分比, %。

将图 9 中 ESC 和 WHSC 循环的所有工况点,从 0 nm 至 300 nm 以 10 nm 为一个平均粒径的区间长度,统计每一平均粒径区间内 PM 数量浓度总和,并计算该区间的 PM 粒径区间百分比 $\eta_{(d,d+10)}$,结果如图 10 所示。从图 10 中可以看到:ESC 循环中 PM 粒径区间百分比最高的是[60 nm, 70 nm]区间,约占全部排放的 58%;PM 粒径区间百分比超过 5%的区域集中于平均粒径[50 nm, 80 nm]区间,此区间内 PM 总量约占全部数量的 90%。WHSC 循环中 PM 粒径区间百分比最高的是[70 nm, 80 nm]区间,约占全部排放的 29%;PM 粒径区间百分比超过 5%的区域集中于平均粒径[60 nm, 110 nm]区间,此区间内 PM 总量约占全部数量的 87%。

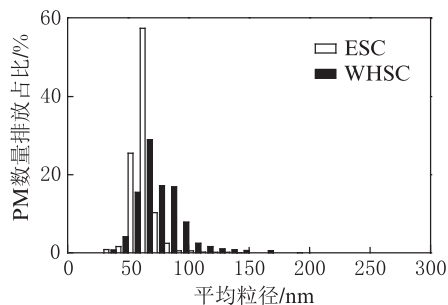


图 10 ESC 和 WHSC 循环各平均粒径区间 PM 数量占比

3.2 瞬态循环全程 PM 平均粒径分布

图 11 为 ETC 和 WHTC 循环试验中,各工况的 PM 数量浓度随 PM 平均粒径的变化情况。从图 11 中可以看到,ETC 和 WHTC 循环试验中,各平均粒径区间内所有工况对应的 PM 数量浓度基本没有差别。图 7 中的 PM 数量浓度出现明显峰值的工况点,其在图 11 中对应的平均粒径都小于 50 nm。

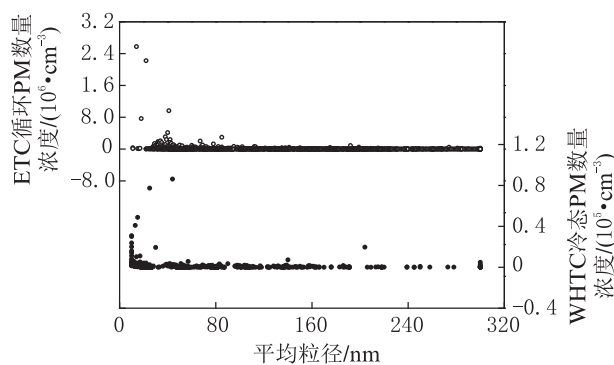


图 11 ETC 和 WHTC 循环 PM 数量与平均粒径的关系

将图 11 中 ETC 和 WHTC 循环的所有工况点从 0 nm 至 300 nm 以 10 nm 为一个平均粒径的区间长度,统计每一平均粒径区间内 PM 数量总和,并计算该区间的粒径区间 PM 百分比 $\eta_{(d,d+10)}$,如图 12 所示。

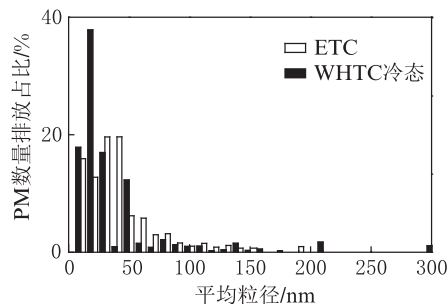


图 12 ETC 和 WHTC 循环各平均粒径区间 PM 数量占比

从图 12 可以看到:ETC 循环中 PM 粒径区间百分比最高的区间是[30 nm,40 nm]和[40 nm,50 nm],各占全部排放的 20%左右;PM 粒径区间百分比超过 5%的区域集中于平均粒径[10 nm,70 nm]区间,此区间内 PM 总量约占全部数量的 80%。WHTC 循环中 PM 粒径区间百分比最高的是[20 nm,30 nm]区间,约占全部排放的 38%;PM 粒径区间百分比超过 5%的区域集中于平均粒径[10 nm,40 nm]和[50 nm,60 nm]区间,其 PM 总量约占循环全部 PM 数量的 85%。

4 结论

(1) 装有 DPF 的柴油机在稳态循环工况间切换过程和瞬态循环过程中,较大的排气背压变化率绝对值峰值会导致 DPF 后的排气出现 PM 数量浓度瞬时峰值。

(2) DPF 后的排气中,ESC 循环下平均粒径在[50 nm,80 nm]区间内的 PM 数量约占全部 PM 数量的 90%;WHSC 循环下平均粒径在[60 nm,110 nm]区间内的 PM 数量约占全部 PM 数量的 87%;ETC 循环下平均粒径在[10 nm,70 nm]区间内的 PM 数量约占全部 PM 数量的 80%;WHTC 循环下[10 nm,40 nm]和[50 nm,60 nm]区间内的 PM 数量约占全部 PM 数量的 85%。

参考文献:

[1] 李鹏,谭丕强,楼狄明,等.满足国 V 排放的重型柴油机排气后处理技术[J].车用发动机,2010(4):1-5.
LI P, TAN P Q, LOU D M, et al. Exhaust aftertreatment technology for heavy duty diesel engine meeting national V emission[J]. Vehicle Engine, 2010(4): 1-5.
[2] 曹东晓,张俊,郭恒杰,等. DPF 主动再生柴油喷雾氧化的试验及模拟研究[J]. 内燃机工程, 2017, 38(2): 59-66.
CAO D X, ZHANG J, GUO H J, et al. Experimental and simulation study on diesel spray oxidation during active regeneration of DPF[J]. Chinese Internal Combustion Engine

Engineering, 2017, 38(2): 59-66.
[3] 孙万臣,刘高,郭亮,等.微粒捕集器对高压共轨柴油机超细微粒捕集特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(1): 133-139.
SUN W C, LIU G, GUO L, et al. Efficiency of DPF on ultrafine particles in a common-rail diesel engine[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1): 133-139.
[4] TANG T, CAO D, ZHANG J, et al. Experimental study of catalyzed diesel particulate filter with exhaust fuel injection system for heavy-duty diesel engines [C/OL]. SAE Paper, 2014, 2014-01-1496. [2014-04-01]. <http://papers.sae.org/2014-01-1496/>.
[5] 唐韬. 重型柴油机尿素 SCR 与 DPF 系统的集成和优化[D]. 北京:清华大学, 2014.
[6] 李磊. DOC 与 DPF 对柴油机排放颗粒微观特性影响的研究[D]. 洛阳:河南科技大学, 2014.
[7] 马志豪,李磊,钞莹,等. 用 HRTEM 研究 DOC 和 DPF 对柴油机颗粒排放的影响[J]. 内燃机工程, 2014, 35(2): 54-58.
MA Z H, LI L, CHAO Y, et al. Effects of DOC and DPF on particulate emissions of diesel engine using HRTEM[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(2): 54-58.
[8] FIERZ M, BURTSCHER H, STEIGMEIER P, et al. Field measurement of particle size and number concentration with the diffusion size classifier (Disc)[C/OL]. SAE Paper, 2008, 2008-01-1179. [2008-04-14]. <http://papers.sae.org/2008-01-1179/>.
[9] 魏国宁. 柴油机 DPF 改造技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
[10] 国家环境保护总局. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段): GB 17691—2005[S]. 北京:国家标准出版社, 2005.
[11] 北京市环境保护局. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(台架工况法): DB11/964—2013[S]. 北京:[出版者不详], 2013.
[12] 赖春杰,孙万臣,李国良,等. BTL/柴油混合燃料对柴油机瞬态工况微粒粒度分布的影响[J]. 内燃机工程, 2012, 33(6): 45-51.
LAI C J, SUN W C, LI G L, et al. Effect of BTL-diesel blended fuel on emitted particle size distribution in common-rail diesel engine under transient conditions[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(6): 45-51.
[13] 楼狄明,温雅,谭丕强,等. 连续再生颗粒捕集器对柴油机颗粒排放的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 1238-1244.
LOU D M, WEN Y, TAN P Q, et al. Effects of continuously regenerating diesel particulate filter on characteristics of particle size distribution from a diesel engine[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(8): 1238-1244.
[14] GIECHASKIEL B, MUNOZ-BUENO R, RUBINO L, et al. Particle measurement programme (PMP): particle size and number emissions before, during and after regeneration events of a Euro 4 DPF equipped light-duty diesel vehicle[C/OL]. SAE Paper, 2007, 2007-01-1944. [2007-07-23]. <http://papers.sae.org/2007-01-1944/>.
[15] 陈熊,李孟良,侯献军,等. 不同工况下 DPF 对柴油车颗粒物过滤特性的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(12): 1074-1077.
CHEN X, LI M L, HOU X J, et al. A study on the filtration characteristics of DPF for diesel vehicle particulates in different driving conditions[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(12): 1074-1077.