

不同后处理装置对柴油车颗粒物减排的影响

张 静, 楼狄明, 谭丕强, 赵可心

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 为研究柴油机氧化催化器(DOC)、催化型颗粒捕集器(CDPF)与 DOC+CDPF 三种后处理装置对颗粒物的减排性能随行驶里程的变化规律, 采用便携式排放测试系统(PEMS)跟踪检测三辆分别加装 DOC、CDPF 与 DOC+CDPF 的柴油公交车。结果表明: 行驶里程达到 7 万 km 时 DOC 性能劣化, 且 DOC 对核膜态颗粒物减排能力的劣化程度大于凝聚态颗粒物, 颗粒物数量(PN)和颗粒物质量(PM)减排率大幅下降至 26.29% 和 7.69%, 应进行保养; CDPF 有效工作时间短, 需要定期进行保养, CDPF 对 PN 的减排率通过及时的高温保养可维持在较稳定水平; DOC+CDPF 对颗粒物减排率始终维持在较高水平, 且随行驶里程的增加呈先升后降的趋势, 对核膜态颗粒物减排能力的劣化程度大于凝聚态颗粒物, 至 12 万 km 时样车 PN 和 PM 减排率下降至 82.68% 和 68.41%。DOC+CDPF 对颗粒物有更好且更稳定的减排效果。

关键词: 后处理装置; 颗粒物; 行驶里程; 柴油车

中图分类号: X734.2

文献标志码: A

Particle Emissions Characteristics of Diesel Bus with Different After-treatments

ZHANG Jing, LOU Diming, TAN Piqiang, ZHAO Kexin

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To assess the change of particle emissions characteristics of diesel oxidation catalyst convertor (DOC), catalyzed diesel particulate filter (CDPF), and catalyzed continuously regeneration trap (DOC + CDPF) with the increase of mileage, diesel particle number and mass emissions of three heavy-duty diesel buses have been measured: one equipped with a DOC, one equipped with a CDPF, and another equipped with an integration of DOC and CDPF. The emission measurement was conducted using a portable emissions measurement system (PEMS). Results show that the operating lifetime of DOC is around 70,000 km

where the decreasing amplitudes of particle number (PN) and particle mass (PM) decrease to 26.29% and 7.69%; and the deterioration degree of the nucleation-mode concentration is bigger than accumulation-mode. The operating lifetime of CDPF is comparatively short; so, periodic maintenance with high temperature is necessary. The decreasing amplitude of PN can be kept at a steady level by maintaining timely. The combination of DOC and CDPF has a better impact on particle emission, with higher decreasing amplitudes of both PN and PM, and smaller fluctuations compared to other after-treatments used in this study. As the mileage increases, the particles increase firstly and then decrease; and the deterioration degree of the nucleation-mode concentration is bigger than accumulation-mode. The decreasing amplitudes of PN and PM obtained after 120 000 km have shown 82.68% and 68.41% degradation of the performance of DOC+CDPF; so, it should be maintained at this moment. The combination of DOC and CDPF has stable performance.

Key words: after-treatment; particle emissions; driving distance; diesel bus

柴油发动机被广泛应用于重型汽车、非道路机械、船舶、国防装备等领域,但其对大气环境的污染不能被忽视。虽然柴油机燃烧技术等机内净化技术已取得较大突破,但仍无法满足日益严格的排放法规要求,必须同时采用柴油机尾气后处理技术^[1-7]。

柴油机后处理技术有氧化型催化转化器(diesel oxidation catalytic converter, DOC),颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF),催化型颗粒捕集器(catalyzed diesel particulate filter, CDPF),选择性催化还原系统(selective catalytic reduction, SCR)和连续再生颗粒捕集器(DOC+CDPF)等^[6-8]。其中 DOC 可氧化排气微粒中的可溶性有机物组分(SOF),进而实现颗粒物的减排^[8-9]。DPF 的壁流式

收稿日期: 2017-10-06

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(16DZ1206702)

第一作者: 张 静(1993—),女,博士生,主要研究方向为柴油机尾气后处理技术。E-mail: zhangjing_tongji@163.com

通信作者: 楼狄明(1963—),男,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为柴油机尾气后处理技术。E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

结构可有效捕集排气中的颗粒物,但颗粒物的长期累积会堵塞过滤结构的滤孔,影响DPF的减排性能,甚至影响柴油机的正常工作,因此将颗粒物燃烧去除的再生技术至关重要^[8-10].CDPF是在DPF的过滤体内部涂覆催化剂,催化剂降低颗粒物的起燃温度,使后处理器同时具备颗粒物捕集和被动再生能力.DOC和CDPF组合使用,DOC可催化氧化总碳氢化合物(THC)、CO和SOF等,同时将排气中的NO氧化为具有强氧化性的NO₂,与CDPF中的颗粒物反应生成CO₂和N₂,实现CDPF的连续再生^[10-14].

DOC内部和CDPF内部涂覆铂、铑和钯等贵金属,且涂覆面积大,因此一套DOC+CDPF的市场价格较高.但后处理装置在实际使用过程中受工况、油品、天气等因素以及催化剂化学中毒、热老化等因素的影响,颗粒物减排效果会有所降低,需要对其保养维护,而一次高温保养价格也较高.因此后处理器的使用寿命和减排性能对用户需求和环境保护都至关重要,对不同后处理器耐久性的研究是一个关键^[15-20].

本文则采用便携式排放测试系统(portable emission measurement system,PEMS)进行整车道路排放检测,研究DOC,CDPF与DOC+CDPF三种后处理装置在实际道路使用过程中对颗粒物排放的减排效果,以及随着行驶里程增加,颗粒物排放特性的变化规律.

1 试验设备及方案

1.1 试验样车及燃料

试验选用三辆柴油公交车作为样车,分别加装DOC、CDPF和DOC+CDPF后处理装置,定期进行道路排放检测.样车均为申沃SWB6100V5型,柴油机为道依茨D7E240型,样车具体技术参数见表1.

表1 试验样车的基本参数

参数名称	参数值
变速器	自动
发动机型号	道依茨 D7E240-EC01
整备质量/kg	10 100
发动机排量/L	7.146
最高车速/(km·h ⁻¹)	85
额定功率与转速之比/(kW·r ⁻¹ ·min)	177/2 300
最大扭矩与转速之比/(N·m·r ⁻¹ ·min)	920/1 200~920/1 700
排放标准	原车国三

试验过程基于便携式排放测试系统(PEMS).颗

物检测设备包括美国TSI公司的发动机废气排放颗粒物粒径谱仪(EEPS-3090)和379020型旋转盘稀释器,采用固定稀释比100:1,稀释器加热温度为120℃.所有试验设备都放在车内,排气管与测试设备通过耐高温管穿过后窗进行连接,实验设备、电池和测试者重量占柴油车总重量的约15%.试验所用燃料为市售国V标准-10号柴油,经采样化验,硫含量为1.4 ng·L⁻¹.

1.2 试验用后处理装置

本试验所用DOC与CDPF具体参数见表2,DOC+CDPF即为两者的串联耦合.

表2 DOC和CDPF的具体参数

项目名称	DOC参数	CDPF参数
内径/mm	295	285.8
长度/mm	80	304.8
目数	300	100
壁厚/μm	0.05	0.45
孔隙率/%	93.5	55
载体材料	FeCrAl	堇青石
催化剂组分	γ-Al ₂ O ₃	γ-Al ₂ O ₃
贵金属剂量/(g·m ⁻³)	2 120	1 240
Pt: Pd: Rh(质量比)	10:1:0	10:2:1
助剂成分	Fe ₂ O ₃ + ZrO ₂	Fe ₂ O ₃ + CeO ₂
涂层	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O

1.3 试验方案

测试路段选取上海市江湾新城附近的几条较为开阔且车流稀少的道路;测试工况包括稳态工况、加减速瞬态工况、自由行驶工况.一次完整测试的速度图谱如图1所示.为保障试验的一致性和通用性,跟踪试验均选择在非高峰时间段;每次试验均严格按照预先设计的试验循环进行;测试时公交车上仅有驾驶员,测试人员,测试设备和电池,总重约占样车整备质量的15%;每次测试之前进行统一的预处理,样车放置于(23±3)℃的空调房间内至少12h(过夜),保温结束后安装测试设备,测试开始之前怠速运行15min,直至排气温度能够维持(160±5)℃.

每次测试是按时间段安排,由于每辆车的运营时间和路线不同,且实际跟踪过程中存在不确定因素,因此每辆车测试的实际行驶里程不同.安装后处理装置后各样车跟踪检测的里程统计情况见表3,表中“-”指未进行测试,“test1”指第一次测试,以此类推.环境温度和湿度统计见表4(DOC样车和CDPF样车分别在7万km和4万km后进行了改装,无法继续跟踪检测).其中,CDPF由于本身单独使用时的再生问题,为维持其性能,在第二次检测时进行24h高温保养处理,并对高温保养前后的CDPF样

车分别进行颗粒物排放测试,DOC 样车和 DOC+CDPF 样车在试验过程中均未进行过保养。

根据 EEPS 测量的颗粒数量和粒径结果计算颗粒质量排放,计算公式如下:

$$C_{PM} = C_{PN} (4/3 \times 3.14 \times (D/2)^3) \times 10^{-9}$$

式中: C_{PM} 为 PM 排放浓度; C_{PN} 为 PN 排放浓度; D 为颗粒粒径。

颗粒物减排率的计算如下:

$$\eta = (C_{without} - C_{with}) / C_{without} \cdot 100\%$$

式中: η 为颗粒物减排率; $C_{without}$ 为原车颗粒物排放浓度; C_{with} 为加装后处理装置后的颗粒物排放浓度。

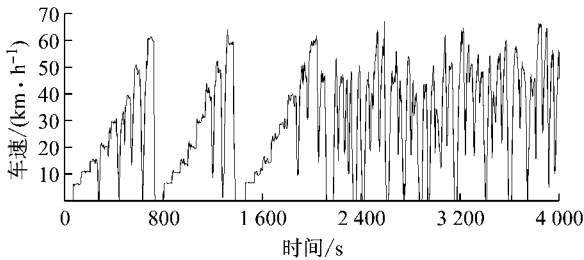


图 1 测试循环车速图谱

Fig.1 Speed map in one test

表 3 样车行驶里程统计

Tab.3 Driving distance of buses

里程/万 km	DOC 样车	CDPF 样车	DOC+CDPF 样车
0	test 1	test 1	test 1
1.5	—	test 2	test 2
3	test 2	test 3	test 3
4	test 3	test 4	test 4
7	test 4	—	test 5
8	—	—	test 6
12	—	—	test 7

表 4 试验环境平均温度、湿度统计

Tab.4 Average ambient temperature and relative humidity

	DOC 样车						
	test1	test2	test3	test4			
平均温度/°C	29.9	19.7	23.7	27.5			
平均湿度/%	34.0	26.2	30.37	43.8			
	CDPF 样车						
	test1	test2	test3	test4			
平均温度/°C	24.03	32.9	21.7	23.1			
平均湿度/%	49.2	46.1	38.0	29.1			
	DOC+CDPF 样车						
	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7
平均温度/°C	20.1	19.8	19.5	23.8	35.5	10.4	29.6
平均湿度/%	38.3	35.6	35.1	33.6	42.4	47.3	41.7

2 结果与讨论

2.1 颗粒物数量

本文在数据处理时将粒径在 50 nm 以下的颗粒

视为核膜态颗粒,粒径在 50 nm 以上的颗粒视为凝聚态颗粒^[8],图 2~图 4 所示为 DOC、CDPF 和 DOC+CDPF 样车核膜态颗粒和凝聚态颗粒数量浓度随行驶里程的变化。

DOC 样车在行驶里程到达 3、4、7 万 km 时,其核膜态颗粒数量浓度和凝聚态颗粒数量浓度分别为 1.01×10^7 、 1.73×10^7 、 7.17×10^7 个· cm^{-3} 和 6.75×10^6 、 1.30×10^7 、 2.71×10^7 个· cm^{-3} ,相对初装时分别变化了 -36.91%、8.58%、349.64% 和 -50.52%、-4.59%、98.72%。可见 3 万 km 时,DOC 对颗粒数量的减排能力相对初装时有所提高,4 万 km 时 DOC 对颗粒数量的减排能力与初装时相当,但行驶至 7 万 km 时,颗粒数量急剧上升,DOC 严重恶化。由图 2 可以看出,随行驶里程的增加,核膜态颗粒对 DOC 样车总排放的贡献率逐渐上升,由 53.89% 升高至 72.56%,而凝聚态颗粒物的贡献率逐渐降低,说明 DOC 对核膜态颗粒物减排能力的劣化程度大于凝聚态颗粒物。

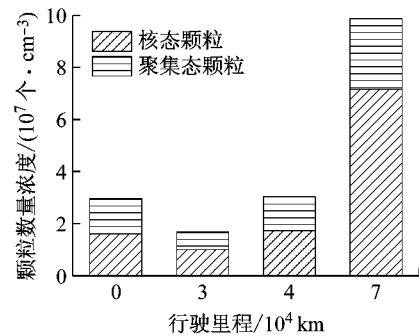
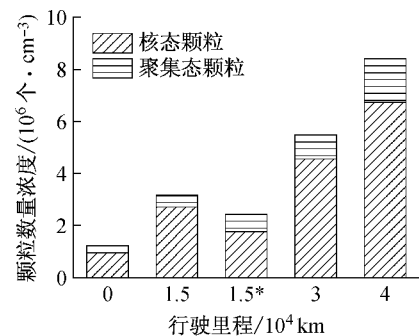


图 2 DOC 样车颗粒物数量浓度随行驶里程变化

Fig.2 Change of concentration of particle number of DOC with driving distances



1.5 对应保养前排放,1.5* 对应保养后排放

图 3 CDPF 样车颗粒物数量浓度随行驶里程变化

Fig.3 Change of concentration of particle number of CDPF with varying driving distances

CDPF 初装时,样车核膜态颗粒和凝聚态颗粒数量浓度分别为 9.45×10^5 和 2.81×10^5 个·

cm^{-3} ,对总排放的贡献率分别为 77.08% 和 22.92%,见图 3。

行驶至 1.5 万 km 时,核膜态颗粒和凝聚态颗粒数量浓度升高至 2.71×10^6 和 4.48×10^5 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$,相比初装时,分别提高了 186.34% 和 59.30%;核膜态颗粒对总排放的贡献率相比初装时提高了 11.32%,CDPF 减排能力出现恶化,这主要是所捕集颗粒物对虑孔的堵塞所致^[11]。

当天试验结束后对 CDPF 进行了 24 h 高温保养,清除堵塞 CDPF 的颗粒,保养后再次进行了排放测试.图 3 中 1.5* 对应保养后的排放情况,可见颗粒物排放整体有所降低,但凝聚态颗粒物数量浓度略有增加,并且保养后的颗粒物浓度仍比初装时高,可见高温保养可有效改善 CDPF 减排性能,但仍不能恢复到原始状态.行驶里程到达 3 万 km 时,核膜态颗粒和凝聚态颗粒数量浓度分别升高至 4.56×10^6 和 9.22×10^5 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$,相比初次保养后分别提高了 157.95% 和 37.34%;核膜态颗粒对总排放的贡献率相比保养后提高了 14.77%,可见 CDPF 对核膜态颗粒物的减排能力又出现了恶化,对凝聚态颗粒物的减排能力也有较大幅度的下降.4 万 km 时,颗粒物浓度继续上升,CDPF 减排能力继续下降.可见 CDPF 的有效工作时间较短,需定期进行保养。

DOC+CDPF 初装时,核膜态颗粒数量浓度和凝聚态颗粒数量浓度分别为 4.07×10^5 和 7.51×10^4 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$,核膜态颗粒和凝聚态颗粒对总排放的贡献率为 84.44% 和 15.56%,见图 4。

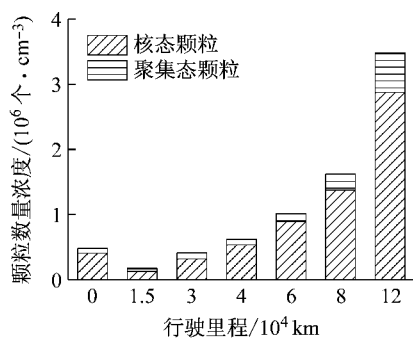


图 4 DOC+CDPF 样车颗粒物数量浓度随行驶里程变化
Fig.4 Change of concentration of particle number of DOC+CDPF with driving distances

1.5 万 km 时,颗粒物总数量有所降低,核膜态颗粒数量浓度和凝聚态颗粒数量浓度分别为 1.31×10^5 和 4.39×10^4 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$,核膜态颗粒数量浓度比初装时降低了 70.33%,后处理器的减排性能有所升高.之后随行驶里程的增加,颗粒数量排放逐渐增

加,且核膜态颗粒物对总排放的贡献率呈上升趋势,相反,凝聚态颗粒物对总排放的贡献率呈下降趋势.行驶里程到达 12 万 km 时,样车颗粒数量浓度相比初装时升高了约 1 个量级,可见 DOC+CDPF 的减排能力在 12 万 km 时已下降。

2.2 颗粒物粒径分布

图 5~图 8 所示为各样车不同行驶工况下的颗粒物排放粒径分布随行驶里程的变化,将行驶工况分为减速工况(加速度 $a \leq -0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)、低速巡航工况($0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v < 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,其中 v 为速度, $|a| < 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)、中速巡航工况($20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v \leq 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $|a| < 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)、高速巡航工况($40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v \leq 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $|a| < 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)和加速工况($a \geq 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

图 5 所示为 DOC 样车粒径分布随行驶里程的变化.初装时,50 nm 附近的颗粒浓度明显高于其他粒径的颗粒浓度,仅减速工况下略低.3 万 km 时,颗粒物排放整体有所降低,且 50 nm 附近的颗粒浓度降低幅度较大,而 10 nm 以下的颗粒物浓度上升.行驶里程到达 4 万 km 时,颗粒物浓度升高,且在高速及加减速时增幅较大.行驶里程到达 7 万 km 时,各工况核膜态和凝聚态颗粒浓度均大幅上升,DOC 减排能力严重下降.整体上,颗粒数量粒径分布大体上都呈明显的核膜态颗粒和凝聚态颗粒的双峰对数分布,随行驶里程的累积,颗粒物浓度先略微下降后逐渐升高,浓度升高的粒径范围逐渐扩散,峰位置向大粒径方向偏移,增幅也逐渐变大,且核膜态颗粒物浓度增幅大于凝聚态颗粒物,高速巡航及加减速工况尤为显著。

图 6 所示为 CDPF 样车粒径分布随行驶里程的变化.初装时,中速巡航工况两峰值处颗粒物浓度相似,其他工况时核膜态颗粒峰值浓度较高.1.5 万 km 保养前后的核膜态颗粒和凝聚态颗粒的排放情况见图 7.高温保养后,核膜态颗粒物浓度平均降低 35.27%,而凝聚态颗粒物浓度平均升高 43.73%,可见高温保养可有效维持 CDPF 对核膜态颗粒物的减排效果.图中 1.5 万 km 处对应保养后的粒径分布,可见,随行驶里程的增加,核膜态和凝聚态颗粒物浓度逐渐升高,且升高的粒径范围逐渐扩大,但核膜态颗粒物浓度升高幅度更大.整体上,CDPF 样车排气颗粒数量粒径分布大体上都呈明显的核膜态颗粒和凝聚态颗粒的双峰对数分布,小粒径处峰值明显大于大粒径峰值,且随行驶里程的增加,两峰值差值变大。

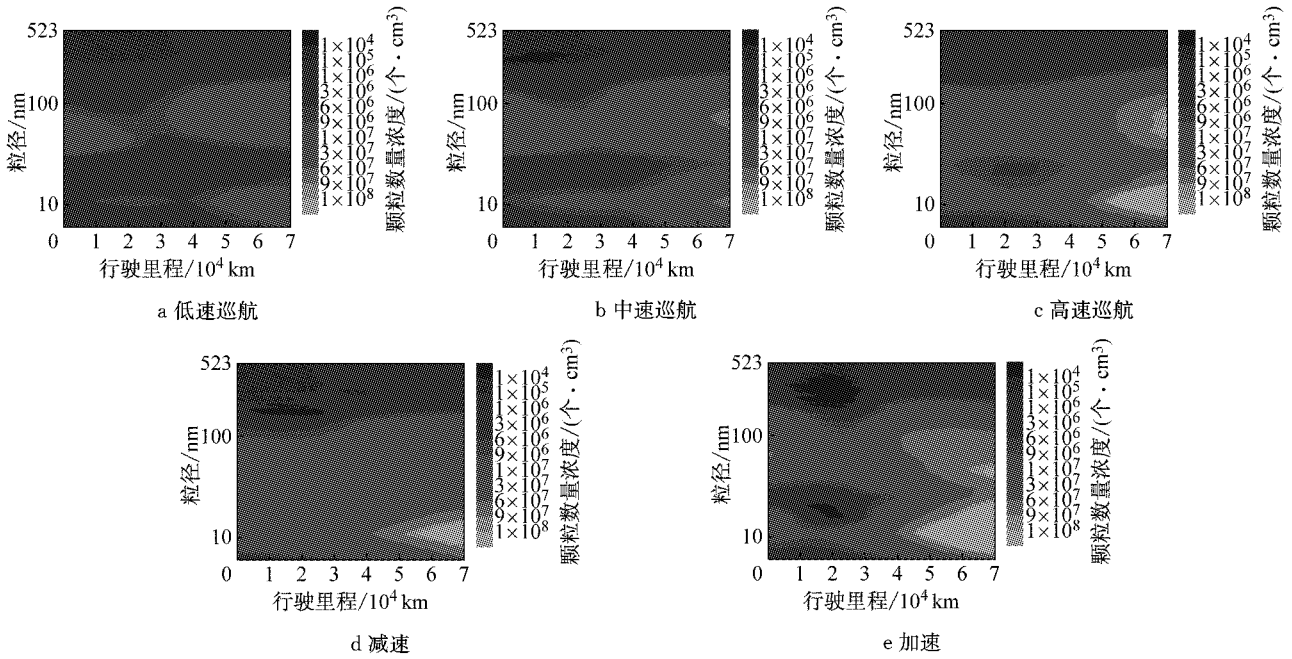


图 5 DOC 样车不同工况下颗粒物粒径分布随行驶里程的变化

Fig.5 Change of particulate distribution of DOC with driving distances in conditions

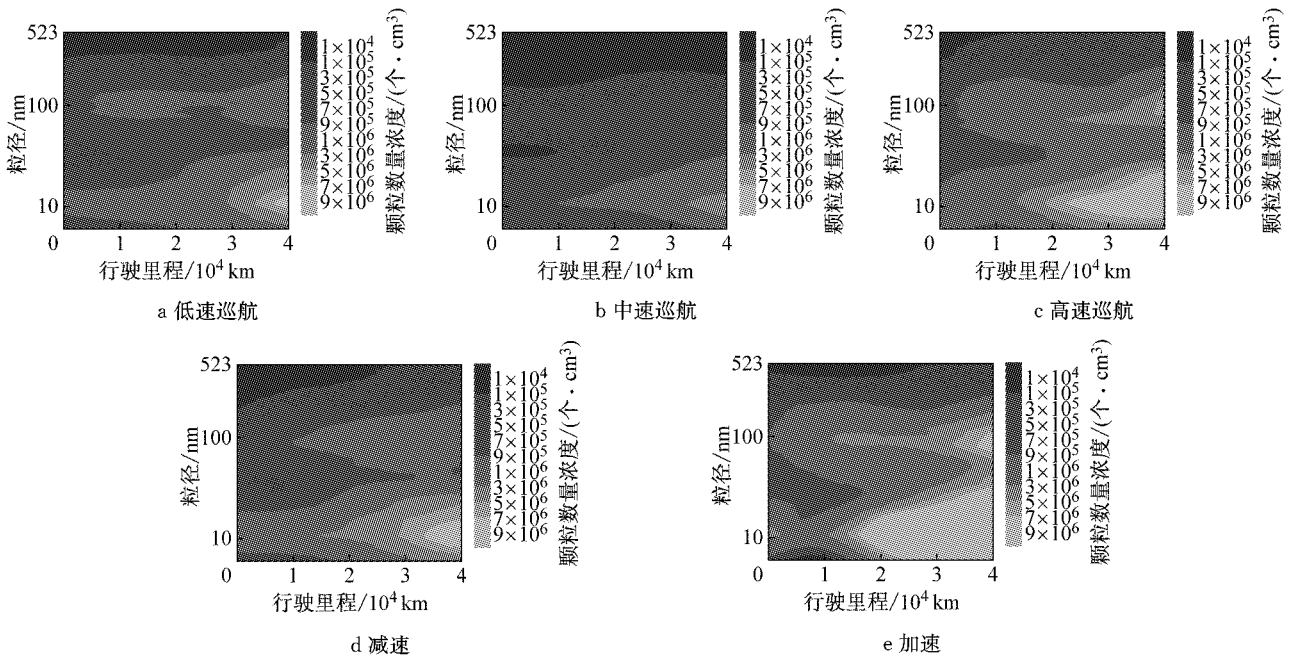


图 6 CDPF 样车不同工况下颗粒物粒径分布随行驶里程的变化

Fig.6 Change of particulate distribution of CDPF with driving distances in conditions

图 8 所示为 DOC+CDPF 样车粒径分布随行驶里程的变化. 初装时, 颗粒数量粒径分布呈多峰对数分布. 行驶至 1.5 万 km 时, 各粒径段的颗粒物浓度较初装时均有降低, 凝聚态颗粒降幅较大, 说明颗粒物和灰分在壁面积积形成的致密饼层对颗粒物的过滤有帮助作用^[18]. 3 万 km 处, 凝聚态颗粒物浓度和核膜态颗粒物浓度均略有增加, 变化幅度不大, 之后随行驶里程的增加, 颗粒物浓度整体继续呈上升趋势

势, 且这种上升趋势向核膜态颗粒物偏移, 在高速和加减速工况下尤为明显, 这主要是因为随颗粒物和灰分的累积, 以及上游 DOC 的老化, 贵金属颗粒暴露面积减少, 后处理器对 SOF 和挥发性纳米颗粒的氧化作用逐渐减弱^[19-20]. 并且随着小粒径颗粒数量的增多, 颗粒数量粒径分布又逐渐转化为明显的双峰对数分布. 整体来说, DOC+CDPF 样车颗粒数量粒径分布随行驶里程的增加, 呈多峰-双峰的变化趋

势,且核膜态峰值增幅大于凝聚态峰值,核膜态颗粒物的排放随行驶里程的增加呈降低趋势,而凝聚态

颗粒物先降低后升高,且升高幅度低于核膜态颗粒物.

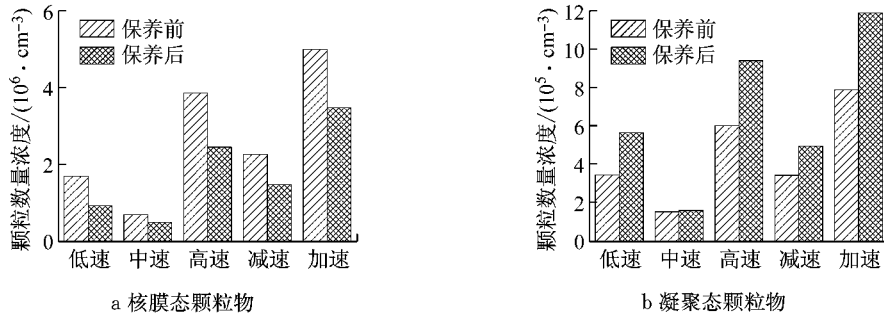


图 7 CDPF 保养前后的核膜态颗粒物和凝聚态颗粒物排放

Fig. 7 Concentration of nucleation mode and the accumulation mode particles before and after CDPF maintenance

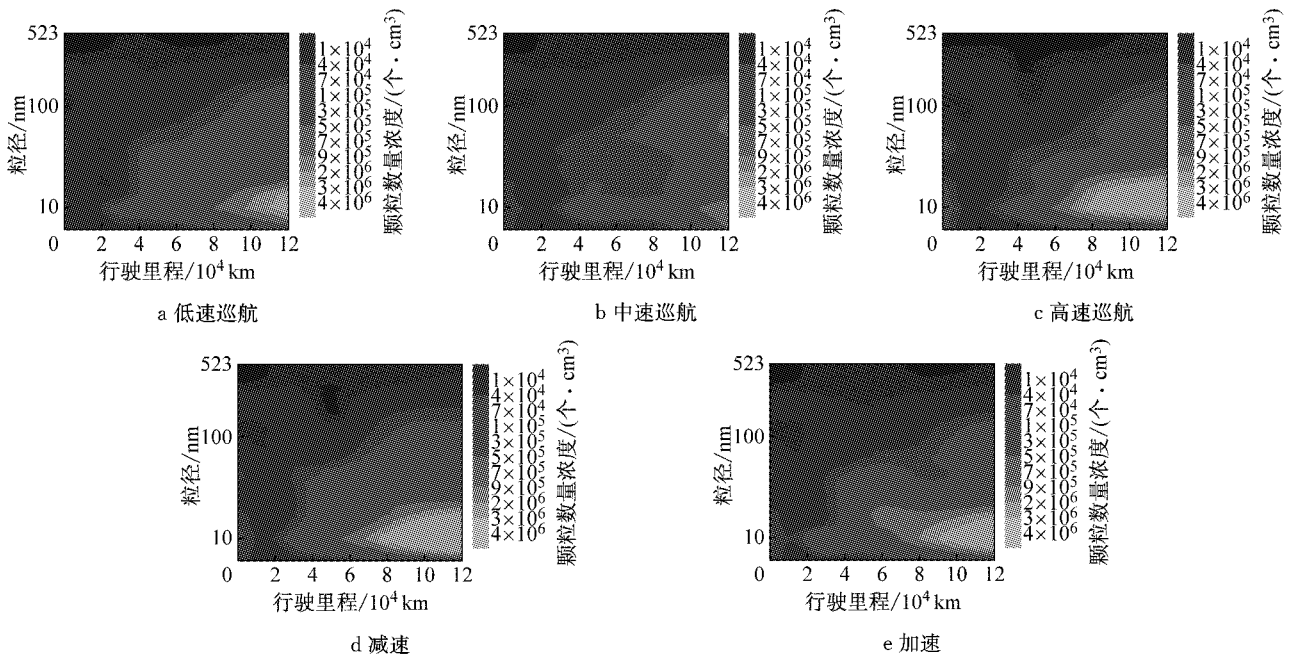


图 8 DOC+CDPF 样车不同工况下颗粒物粒径分布随行驶里程的变化

Fig. 8 Change of particulate distribution of DOC+CDPF with driving distances in conditions

2.3 颗粒物减排率

图 9 和图 10 所示为 DOC、CDPF、DOC+CDPF 样车的 PN 和 PM 减排率随行驶里程的变化.

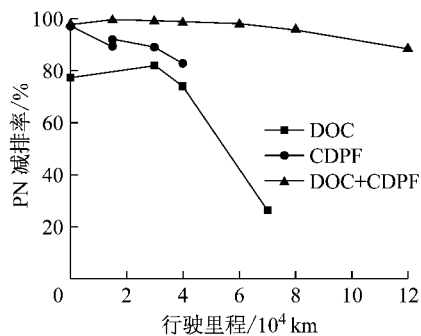


图 9 PN 减排率随行驶里程变化

Fig. 9 Change of PN decreasing amplitude with driving distances

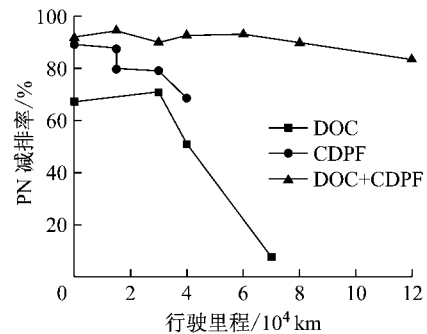


图 10 PM 减排率随行驶里程变化

Fig. 10 Change of PM decreasing amplitude with driving distances

由于 DOC 对可溶有机物 SOF 的氧化作用,该样车的颗粒物排放有所改善. 其颗粒物减排率呈先

上升后下降的趋势,初装时 PN 与 PM 减排率为 77.20%与 67.22%,于 3 万 km 处分别提高 6.09%与 5.32%,但升高幅度不大,至此 DOC 对颗粒物的减排能力较为稳定、尚无劣化现象.此后 DOC 后的颗粒物减排率开始明显下降,在 4 万 km 与 7 万 km 处,PN 减排率连续下降至 73.79%和 26.29%,而 PM 则下降至 50.95%与 7.69%,可见,4 万 km 处,DOC 的 PM 减排率降幅明显大于 PN 的降幅,7 万 km 处,PN 与 PM 减排率降幅均较大,DOC 对颗粒物的减排能力开始严重劣化.

CDPF 初装时的 PN、PM 减排率分别为 97.28%和 89.13%,1.5 万 km 处,CDPF 进行了 24 h 的高温保养,清除堵塞 CDPF 的颗粒,第一次保养前,PN 和 PM 减排率分别为 89.11%和 87.59%,保养后分别变为 91.73%和 79.60%,PN 减排率有小幅回升而 PM 减排率却进一步下降,可见高温保养可有效维持 CDPF 对颗粒数量的减排效果,对颗粒质量减排能力的维持无有效作用.这可能是因为高温保养时,被捕集的颗粒物累积形成的滤饼被烧掉,之前被覆盖的催化剂活性位重新暴露,但滤饼对颗粒过滤的辅助效果也因此变差.3 万 km 时,PN 减排率略微下降,PM 减排率略微上升,变化幅度在 3%之内,4 万 km 时,PN 和 PM 减排率相比保养后又分别下降了 10.94%和 16.36%,需要对其再次进行保养维护.

从图 9 和图 10 可以看出,相比较 DOC 和 CDPF 样车的跟踪结果,DOC+CDPF 样车的颗粒物减排率始终维持在较高水平,且波动幅度较小.在行驶里程到达 8 万 km 之前,其工作状态高效且较稳定,PN 减排率始终维持在 97.92%到 99.25%之间,PM 减排率维持在 90.02%到 94.56%之间,变化幅度小,且 PM 转化效率随行驶里程的增加呈先略微上升后下降的趋势,这与 CDPF 过滤壁面的微观结构有直接关系,燃油和添加剂中的灰分累积会造成过滤体内孔道的阻塞,使过滤壁面气体流经的缝隙变小,从而对 PM 的过滤有一定的辅助作用^[8,18].行驶里程到达 8 万 km 后,DOC+CDPF 的颗粒物减排效果有所下降,8 万 km 与 12 万 km 处的 PN 减排率分别为 95.65%和 88.53%,PM 转化效率分别为 89.82%和 83.35%.可见 12 万 km 时颗粒物减排率下降明显,此时应对后处理器进行保养以维持其高效的减排性能.

三者相较而言,DOC 对 PN 有一定的减排效果,但其性能会较早劣化,而 PM 减排效果则较低,且更

早开始劣化,说明其对凝聚态颗粒物的减排能力较差;CDPF 的 PN 减排率较高,且可通过及时的高温保养而维持其减排率,而 PM 减排率在初装时与 DOC+CDPF 相当,但此后略有下降,且其性能通过保养亦不可有效恢复;DOC+CDPF 的颗粒物转化效率始终高于其他两者,由于前端 DOC 对排气中 SOF 的氧化能力强,还可将 NO 氧化为氧化性能较强的 NO₂,实现 CDPF 的被动再生,同条件下 CDPF 中累积的颗粒更少,因此在车辆里程数相同时,有 DOC 辅助的 CDPF 具有更好的颗粒物减排性能.

综合以上分析,DOC 与 CDPF 组合使用对于降低颗粒物排放效果最优,且被动连续再生可有效延长后处理装置使用寿命.

3 结论

(1)DOC 样车的核膜态颗粒对总颗粒排放的贡献率随行驶里程的增加逐渐上升,DOC 对核膜态颗粒减排能力的劣化程度大于凝聚态颗粒;CDPF 对核膜态颗粒的减排效果随行驶里程的增加下降明显,而凝聚态颗粒减排效果的下降相对较小,高温保养可有效维持 CDPF 对核膜态颗粒物的净化效果,对凝聚态颗粒物则没有明显效果;DOC+CDPF 对颗粒物的减排效果随行驶里程的增加呈先升后降的趋势,且对核膜态颗粒减排能力的劣化程度大于凝聚态颗粒.

(2)DOC 样车的颗粒数量粒径分布大体上呈核膜态颗粒和凝聚态颗粒的双峰对数分布,且峰位置随行驶里程的增加向大粒径方向偏移;CDPF 样车排气颗粒数量粒径分布大体上呈核膜态颗粒和凝聚态颗粒的双峰对数分布,核膜态峰值明显大于凝聚态峰值,且随行驶里程的增加,两峰值差值变大;DOC+CDPF 样车颗粒数量粒径分布随行驶里程的增加,呈多峰-双峰的变化趋势,且核膜态峰值增幅大于凝聚态峰值.

(3)DOC 性能明显劣化之前,PN 和 PM 的平均减排率分别为 77.63%和 62.99%,7 万 km 时 PN 和 PM 减排率大幅下降至 26.29%和 7.69%,DOC 对 PN 和 PM 的减排能力明显下降;CDPF 样车的 PN 的减排率较高,始终在 80%以上,且可通过及时的高温保养而保持其减排率,而 PM 减排率在初装时与 DOC+CDPF 相当,但此后略有下降,且其性能通过保养亦不可有效恢复;DOC 和 CDPF 组合使用具有更好的颗粒物减排效果,样车减排率始终维持

在较高水平,8万 km 之前 PN 减排率维持在 95% 以上,PM 减排率维持在 89% 以上,波动幅度小,且 PM 减排率随行驶里程的增加呈先升后降的趋势,至 12 万 km 时样车 PN 和 PM 减排率下降至 82.68% 和 68.41%,减排性能出现明显下降。

(4) 不同后处理装置需要保养的周期不同。DOC 样车行驶里程达到 7 万 km 时颗粒物排放显著增加,应进行保养;CDPF 有效工作时间短,需要定期进行高温保养;DOC+CDPF 组合使用时,颗粒物排在行驶里程达到 12 万 km 时明显增加,DOC+CDPF 的连续再生可有效延长后处理装置的工作寿命。

参考文献:

- [1] MYUNG C L, PARK S. Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: a review [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2012, 13(1): 9.
- [2] E J Q, PHAM M, ZHAO D, *et al.* Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: a review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 620.
- [3] MOHANKUMAR S, SENTHILKUMAR P. Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine: a comprehensive review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 1227.
- [4] HAUPT D, NORD K, TINGVALL B, *et al.* Investigating the potential to obtain low emissions from a diesel engine running on ethanol and equipped with EGR, Catalyst and DPF[C/CD]//SAE 2004 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2004; 2004-01-1884.
- [5] JOHNSON T V. Review of diesel emissions and control[J]. *International Journal of Engine Research*, 2010, 10(5):275.
- [6] GUAN B, ZHAN R, LIN H, *et al.* Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NO_x, from diesel engine exhaust[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66(1-2): 395.
- [7] 岳广照,刘兴华,仇滔. 柴油机选择性催化还原系统氨泄漏及控制研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(4): 634.
YUE Guangzhao, LIU Xinghua, QIU Tao. Research on ammonia slip and control of diesel engine SCR system[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(4): 634.
- [8] GUAN B, ZHAN R, LIN H, *et al.* Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 154: 225.
- [9] 王庐云,黄赵洁,漆仲华,等. 柴油车 DOC 催化剂贵金属负载工艺研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2014, 42(1):27.
WANG Luyun, HUANG Zhjie, XI Zhonghua, *et al.* Study on loading process of precious metal for DOC catalysts[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2014, 42(1): 27.
- [10] 马志豪,钞莹,李磊,等. 柴油机后处理装置的颗粒排放物拉曼光谱研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 26.
MA Zhihao, CHAO Ying, LI Lei, *et al.* Raman spectroscopy research of particulate emissions from diesel engine with after-treatment device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 26.
- [11] 王丹. 柴油机微粒捕集器及其再生技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
WANG Dan. Study on particulate filter and its regeneration [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [12] MA Z H, CHAO Y, Li L, *et al.* Raman spectral analysis of particulates of diesel engine with DOC and CDPF after-treatment devices[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 651: 401.
- [13] 郭佳栋,葛蕴珊,谭建伟,等. 国IV公交车实际道路排放特征[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(5): 477.
GUO Jiadong, GE Yunshan, TAN Jianwei, *et al.* Real-world emission characteristics of China IV buses[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(5): 477.
- [14] 楼狄明,张允华,谭丕强,等. 基于 DOC+CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性[J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4545.
LOU Diming, ZHANG Yunhua, TAN Piqiang, *et al.* Emission characteristics of gaseous pollutants from city bus fueled with biodiesel based on DOC + CDPF technology in real road conditions[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4545.
- [15] JEULAND N, DEMENTHON J B, PLASSAT G, *et al.* Performances and durability of DPF (diesel particulate filter) tested on a fleet of Peugeot 607 taxis first and second test phases results [C/CD]//SAE 2002 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2002; 2002-10-21.
- [16] JEULAND N, DEMENTHON J B, GAGNEPAIN L, *et al.* Performances and durability of DPF (diesel particulate filter) tested on a fleet of Peugeot 607 taxis: final results[C/CD]//SAE 2004 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2004; 2004-01-0073.
- [17] KUMAR D, RAJU A, SHETH N, *et al.* On road durability and performance test of diesel particulate filter with BS III and BS IV fuel for Indian market[C/CD]// SAE 2016 Word Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2016; 2016-01-0959.
- [18] 徐正飞,张卫锋,资新运,等. 轻型柴油车排气后处理系统耐久性的研究[J]. *汽车工程*, 2012, 34(2): 116.
XU Zhengfei, ZHANG Weifeng, ZI Xinyun *et al.* A study on the durability of emission after-treatment system for light-duty diesel vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34 (2): 116.
- [19] 楼狄明,贺南,谭丕强,等. DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2059.
LOU Diming, HE Nan, TAN Piqiang, *et al.* Effect of DOC/CCRT aging on gaseous emission characteristics of an in-used diesel engine bus [J]. *Environmental Science*, 2016, 37 (6): 2059.
- [20] 楼狄明,赵可心,谭丕强,等. 不同后处理装置对柴油车排放特性的影响——基于行驶里程的后处理装置对柴油公交车气态物排放特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36 (8): 2282.
LOU Diming, ZHAO Kexin, TAN Piqiang, *et al.* Gaseous emission characteristics of diesel bus equipped with different after-treatments based on driving distance [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(8): 2282.