

氧化型催化剂载体长度对柴油机排放性能的影响

楼狄明, 王亚馨, 孙瑜泽, 张允华

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于轻型柴油机台架试验平台, 研究柴油机氧化型催化转化器(DOC)载体长度变化对后处理系统减排性能的影响。结果表明: 适当增大 DOC 载体长度可提高对一氧化碳(CO)、总碳氢化合物(THC)和一氧化氮(NO)的氧化率, 过量增大对氧化性能的提升有限, 同时影响 DOC 在低温低负荷下减排效果; DOC 耦合催化型柴油机颗粒捕集器(CDPF)对颗粒物数量(PN)的减排效果受 DOC 载体长度影响较小。从兼顾成本与性能的角度出发, 适当增大 DOC 载体长度能有效提高减排效果, 但过量增大对减排效果提升影响不大。

关键词: 柴油机氧化型催化转化器(DOC); 载体长度; 气态物排放; 颗粒物

中图分类号: TK427

文献标志码: A

Effect of DOC Carrier Length on Emission Performance of Diesel Engine

LOU Diming, WANG Yaxin, SUN Yuze, ZHANG Yunhua

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

Abstract: Based on light-duty diesel engine bench test platform, the effect of the length of diesel oxidation catalyst's (DOC) carrier on the emission reduction performance of aftertreatment system was studied. The results show that, increasing the length of the DOC's carrier can increase the oxidation rate of carbon monoxide (CO), total hydrocarbons (THC) and nitric oxide (NO). However, excessive increase in the length of the DOC carrier has limited improvement on the oxidation performance and will reduce the emission reduction effect of DOC under low temperature and low load. The reduction rate of DOC coupled catalyzed diesel particulate filter (CDPF) on particle number (PN) is less affected by the length of the DOC carrier. From the perspective of balancing cost and performance, appropriately increasing the length of the DOC carrier can effectively improve the emission reduction effect, but the excessive increase has little effect on

the improvement of emission reduction effect.

Key words: diesel oxidation catalyst (DOC); length of carrier; gaseous emission; particulate matter

柴油机具有功率适用范围广、燃油效率高、耐久性好等优点, 在交通运输、工程机械等领域有着不可或缺的作用。近年来, 排放法规日益严格^[1-2], 给柴油机的发展带来了巨大挑战。以当前的技术水平, 仅仅依靠机内净化技术已不能满足柴油机排放法规要求, 必须依靠氧化型催化转化器(DOC)、柴油机颗粒捕集器(DPF)、选择性催化还原反应器(SCR)、稀燃 NO_x 捕集器(LNT)等后处理技术。DOC 不仅能够大幅降低 HC 及 CO 的排放^[3-5], 还可以减少颗粒物排放中的可溶性有机物(SOF)。文献[6]表明, DOC 能降低核模态颗粒物数量浓度和积聚态颗粒物数量浓度, 但积聚态颗粒物数量浓度受负荷的影响较大。DOC 可以将 NO 氧化成 NO_2 , 为催化型柴油机颗粒捕集器(CDPF)在较低温度下实现连续被动再生提供条件^[7-8], NO_2 浓度增加还可以促进 SCR 中快速反应的进行。因此, DOC 对于柴油机尾气处理有着重要作用。

影响 DOC 转化效率的主要因素有排气温度、反应气体在载体中停留时间、排气中硫含量等^[9-10]。理论上, 反应气体在载体中停留时间越长, 反应就越充分, 转化效率就越高^[11]。DOC 载体长度的增加可以使气体在载体中的滞留时间及反应面积增加, 对 DOC 催化氧化性能的提高有促进作用。文献[12]中对不同容积 DOC 的模拟结果表明, 提高 DOC 容积能够提高 NO_2 在氮氧化物(NO_x)中的占比。文献[13-14]的研究表明, DOC 载体长度越长, DOC 内流动均匀性越好, HC、CO 减排率就越高, 但是造成的压力损失也越高。除背压外, DOC 的体积受到车辆

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0103501)

第一作者: 楼狄明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为排放控制技术。E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

通信作者: 王亚馨(1994—), 女, 博士生, 主要研究方向为发动机排放与控制技术。E-mail: wangyaxin312@163.com

安装空间限制,增加 DOC 载体长度在提高安装难度的同时还会造成 DOC 成本增加。

目前国内外对于 DOC 载体长度的模拟研究已经比较成熟,但是 DOC 载体长度对 DOC 本身特别是对 DOC+CDPF+SCR 整体后处理系统影响的试验研究较少。本文基于发动机台架试验平台和轻型柴油机 DOC+CDPF+SCR 后处理系统,研究 DOC 载体长度变化对排气温度、背压、自身减排性能以及 DOC+CDPF+SCR 后处理系统减排性能的影响,为实际 DOC 应用中的选型及设计提供参考。

1 试验设备及试验方法

1.1 试验装置

试验发动机选取 1.91 L 排量、直列四缸、废气涡轮增压中冷轻型国五柴油机,主要技术参数如表 1 所示。

表 1 试验柴油机主要参数

Tab.1 Main parameters of the tested diesel engine	
参数	数值
排量/L	1.91
发动机型式	16 气门、双顶置凸轮轴、增压中冷、高压共轨燃油喷射
气缸缸径/mm	80
行程/mm	96
压缩比	18 : 1
额定功率/kW	75
额定转速/(r · min ⁻¹)	3 200
最大扭矩/(N · m)	250
最大扭矩对应转速/(r · min ⁻¹)	2 000
外形尺寸/(mm×mm×mm)	690×650×690
排放标准	国五

本次试验中使用的 DOC 样品编号及主要参数如表 2 所示,CDPF 参数如表 3 所示。

表 2 DOC 主要参数

Tab.2 Main parameters of DOC	
参数	数值
载体长度/mm	118(DOC1)、135(DOC2)、142(DOC3)
载体直径/mm	144
载体材质	堇青石
孔密度/cpsi	300
贵金属负载量/(g · ft ⁻³)	25
催化剂组分	Pt 和 Pd
贵金属配比(Pt 和 Pd 的质量比)	5 : 1
壁厚/mm	0.127

注:cpsi 指每平方英寸横截面上的孔道数;1 ft=0.304 8 m。

表 3 CDPF 主要参数

Tab.3 Main parameters of CDPF	
参数	数值
载体直径/mm	144
载体长度/mm	254
载体材质	碳化硅
孔密度/cpsi	200
贵金属负载量/(g · ft ⁻³)	10
催化剂组分	Pt 和 Pd
贵金属配比(Pt 和 Pd 的质量比)	10 : 1
壁厚/mm	0.35

试验中搭建的台架系统如图 1 所示。台架系统的主要设备包括电力测功机、油耗仪以及台架辅助设备(冷却水温调节系统、机油恒温装置、发动机数据采集箱、空气滤清器等)。台架系统主要排放测试仪器包括 MEXA-1600D 型气态物分析仪、EEPS-3090 型颗粒粒径分析仪以及 Dekati DI-2000 型射流稀释器。台架控制台与电力测功机、油耗仪、排放测试系统及各传感器连接,操作整个试验台架的动作并输出相应设备信息及测试结果。

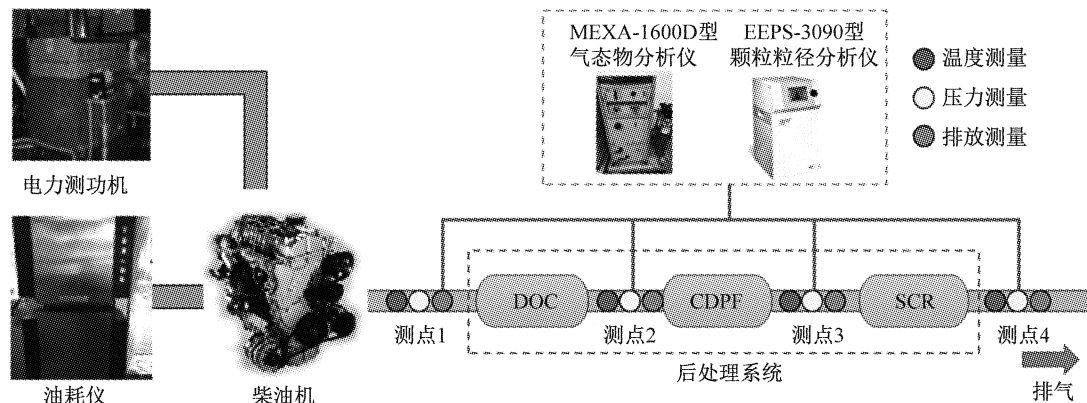


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Test device

1.2 试验方案

为研究不同载体长度 DOC 对 DOC+CDPF+SCR 后处理系统气态物排放及颗粒物排放减排率的影响,采用三种不同载体长度的 DOC 装置(DOC1、DOC2、DOC3),选取 DOC 前、DOC 后、DOC+CDPF 后以及 DOC+CDPF+SCR 后四个测点,研究发动机最大扭矩对应转速(下文简称发动机转速)2 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下负荷比分别为 10%、25%、50%、75%、100% 时五种测试工况的排放特性,包括 HC、CO、 NO_x 及颗粒物排放。

2 试验结果与分析

2.1 排气温度与背压

温度是影响 DOC 性能的重要因素之一,当温度低于气体起燃温度时,催化剂及载体只能起到一定的吸附作用。最佳反应温度范围约在 250 $^{\circ}\text{C}$ 到 400 $^{\circ}\text{C}$ 之间,当温度过高时,由于催化剂性能的变化等因素,转化效率下降。

图 2 为发动机转速 2 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时不同载体长度 DOC 后排气温度变化。低负荷下 DOC 后排气温度较低,在 130 $^{\circ}\text{C}$ 到 180 $^{\circ}\text{C}$ 左右。三种载体长度 DOC 后排气温度差异较小,适当减小 DOC 载体长度在低负荷时有利于提高 DOC 后的排气温度。

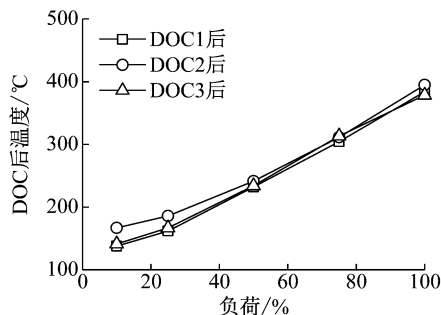


图 2 不同载体长度 DOC 后排气温度

Fig.2 Exhaust temperature at different carrier lengths after DOC

图 3 为发动机转速 2 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时不同载体长度 DOC 前后排气压差的变化。从试验结果看出,适当减小 DOC 载体长度能有效减少 DOC 的压力损失,从而改善发动机的油耗及排放特性。当 DOC 载体长度缩短量超过临界值时,DOC 排气压差变化不大。

2.2 DOC 后排放特性分析

2.2.1 THC 排放特性

图 4 为发动机转速 2 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时三种载体

长度 DOC 后 THC 排放情况。

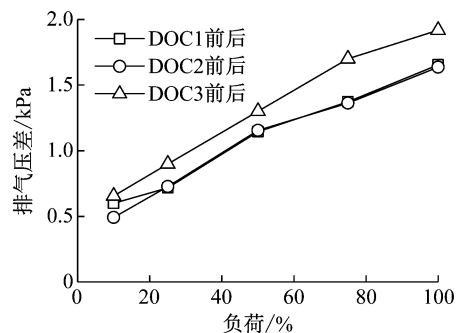


图 3 不同载体长度 DOC 前后排气压差

Fig.3 Pressure difference at different carrier lengths before and after DOC

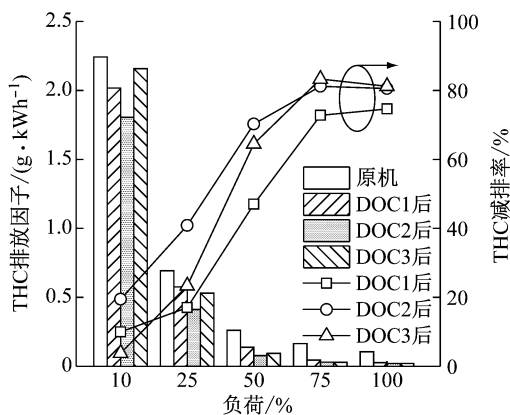


图 4 不同载体长度 DOC 后 THC 排放

Fig.4 THC emission at different carrier lengths after DOC

由图 4 可知,DOC 后 THC 排放因子明显降低,DOC 在净化 THC 方面起主要作用。DOC 后 THC 减排率随着负荷的升高而逐渐增大。低负荷时,DOC 对 THC 的减排效果较差,减排率在 20% 左右。原因在于低负荷下排气温度较低,反应气体没有达到起燃温度,催化剂没有起到很好的反应催化效果,此时载体长度较小的 DOC1 和 DOC2 对 THC 的减排率较好。低负荷下适当降低 DOC 载体长度有利于 DOC 对 THC 减排性能的提高,DOC2 在低负荷下对 THC 的减排率最高。高负荷工况下,DOC 对 THC 的减排率大幅升高,减排率维持在 75%~80% 左右,载体长度越大,DOC 对 THC 减排率越高。在 75%~100% 负荷区间,三种载体长度 DOC 对 THC 的平均减排率分别为 74.6%、80.5%、81.2%。高负荷条件下适当增大 DOC 长度可提高对 CO、THC 和 NO 的氧化率。当 DOC 载体长度过大,对 CO、THC 和 NO 氧化性能的提升有限。

2.2.2 CO 排放特性

图 5 为发动机转速 2 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时三种载体长度 DOC 后 CO 排放情况。

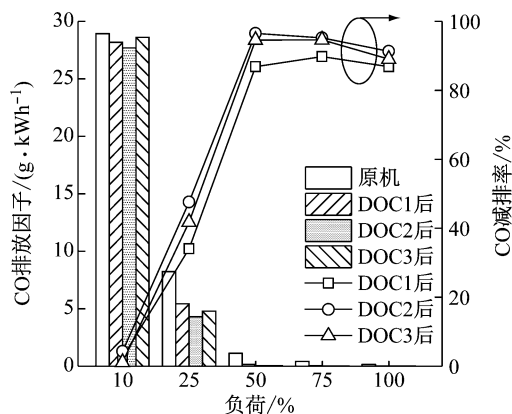


图5 不同载体长度 DOC 后 CO 排放

Fig.5 CO emission at different carrier lengths after DOC

由图5可知,随着负荷的增加,DOC后CO减排率逐渐增大.原因在于低负荷时,缸内出现混合气过稀以及局部区域温度过低的情况,淬熄现象增加,造成了CO排放量的上升.在低负荷条件下,DOC对CO的减排率较低,小于45%.一方面是因为排气温度较低,催化剂没有起到很好的催化效果;另一方面,在低温时THC对于CO的氧化有一定的抑制作用.随着负荷的增大,温度升高,CO减排率逐渐增大.在50%~100%负荷条件下,CO减排率大幅升高,减排率稳定在88%~95%,载体长度最短的DOC1后CO减排率相比DOC2后有明显降低,而DOC2和DOC3对于CO减排率的差距较小.可以看出,适当增加DOC长度能有效提高CO减排率,但超过一定限值后,DOC对于CO减排率提升有限.

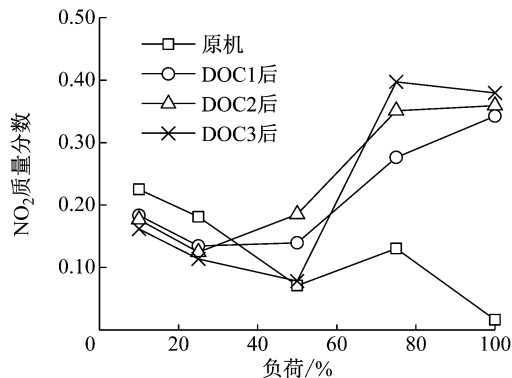
2.2.3 NO氧化特性

DOC可以将NO氧化成 NO_2 ,促进CDPF中的被动还原反应以及SCR中的快速反应.研究不同载体长度DOC时NO的氧化性能对分析整体DOC+CDPF+SCR后处理系统的性能有一定的参考意义.

图6为发动机转速 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时三种载体长度DOC后NO转化情况,纵坐标为DOC后 NO_2 在 NO_x 中的质量分数.

由图6可知,低负荷工况下,NO有少量升高, NO_2 在 NO_x 中的质量分数有少量降低.这是由于低温时HC、CO和 NO_2 之间转化率存在竞争关系^[15-16].在 110°C 以下, NO_2 被HC和CO还原,当有十二烷和间二甲苯等碳氢化合物存在时, NO_2 的还原反应温度甚至可以到 140°C 以上.随着温度升高, O_2 成为主要还原剂,NO可以被氧化为 NO_2 ^[17], NO_2 在 NO_x 中的质量分数升高,同时CO氧化放热,促进NO氧化反应进行.随着负荷的增大, NO_2 质量分数逐渐增大.在高负荷条件下,三种载体长度

DOC后的 NO_2 在 NO_x 中的质量分数最大分别为0.34、0.36、0.38.高负荷条件下,载体长度最大的DOC3对NO的氧化性能最好,原因在于此时排气温度较高,因而载体长度越大,反应时间越长,NO氧化越充分.在所有负荷工况中,载体长度居中的DOC2在低负荷时的氧化性能更为稳定.适当降低DOC长度可以提高低负荷工况下DOC对NO的氧化性能,但是过量减小DOC长度将导致高负荷时NO氧化性能的降低.

图6 不同载体长度 DOC 后 NO_2 质量分数Fig.6 NO_2 mass fraction at different carrier lengths after DOC

2.3 CDPF后颗粒物排放特性

柴油机的颗粒物排放较为严重,催化型柴油机颗粒捕集器(CDPF)是主要的颗粒物处理装置.本节主要研究DOC载体长度变化对CDPF颗粒物净化性能的影响.

2.3.1 颗粒物数量排放特性

图7为发动机转速 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时三种载体长度DOC后处理系统CDPF后颗粒物数量(PN)净化情况.

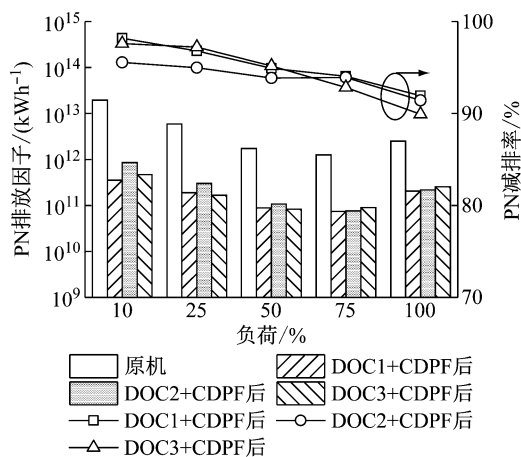


图7 不同载体长度 DOC 后处理系统 CDPF 后 PN 排放

Fig.7 PN emission at different carrier lengths of DOC aftertreatment system after CDPF

由图 7 可知,随着负荷增加,颗粒物数量先逐渐减少后增加.原因在于随着发动机负荷增大,缸内温度升高,颗粒物的氧化更充分,较容易产生相对细小的颗粒,颗粒物数量增大.三种载体长度 DOC 后处理系统 CDPF 后对于 PN 都有较好的减排效果,整体颗粒物减排率在 90% 以上.在低负荷范围内,载体长度最大的 DOC3 对于 PN 减排率最高.在高负荷状态下,三种载体长度 DOC 后处理系统 CDPF 后 PN 减排率有所降低,相较而言,载体长度较短的 DOC1+CDPF 和 DOC2+CDPF 对 PN 的减排率较高. DOC 载体长度的变化对 DOC+CDPF 的 PN 减排率的影响较小.三种载体长度 DOC 后处理系统 CDPF 后 PN 的平均减排率分别为 95.2%、94.0%、94.5%.

2.3.2 颗粒物质量排放特性

图 8 为发动机转速 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时三种载体长度 DOC 后处理系统 CDPF 后颗粒物质量(PM)减排率情况.

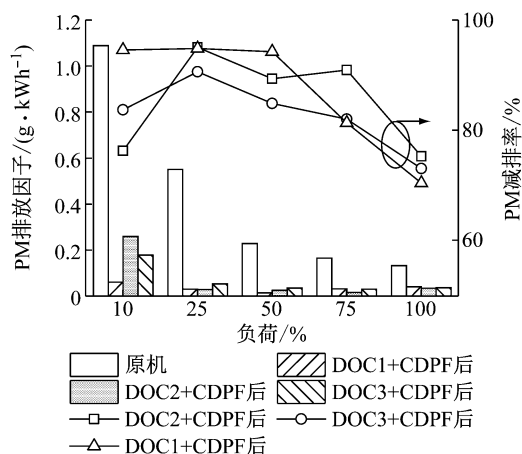


图 8 不同载体长度 DOC 后处理系统 CDPF 后 PM 排放
Fig.8 PM emission at different carrier lengths of DOC aftertreatment system after CDPF

如图 8 所示,发动机转速 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,PM 排放因子整体随负荷升高而下降.原因在于低负荷条件下,低温条件促进了挥发性物质的凝结,同时抑制了颗粒物的氧化过程,导致 PM 较大.随着负荷增加,温度上升,有利于核模态颗粒物氧化,因而 PM 变小.三种载体长度 DOC 对于 PM 的减排率在 75%~95%,最高为 94.6%.在 100% 负荷时,DOC+CDPF 对于颗粒物的减排率有明显下降,原因在于高负荷时大于 350°C 高温下 DOC 中硫酸盐增多,影响 DOC 氧化作用.随着负荷增加,排气流速增大,气体在 DOC+CDPF 内的滞留时间减少,同时气体流速增加会将 CDPF 中饼层捕集的颗粒吹出,PM

增加.三种载体长度 DOC+CDPF 对于 PM 的平均减排率分别为 87.1%、85.4%、82.9%.综合来看,载体长度较小的 DOC+CDPF 对于 PM 的减排率较好,原因在于 DOC 载体长度较小时,DOC 后压力损失较少,并且在低负荷时温度较高,有利于 PM 的减排.同时载体长度较大的 DOC 对脱除颗粒物中 SOF 的效果更好,使得颗粒物表面活化能上升,影响 CDPF 的被动再生效果.

2.4 SCR 后排放特性

在 DOC+CDPF+SCR 系统中,由于 SCR 对 CO、HC 以及 PM 和 PN 的减排效果甚小,而对 NO_x 降低起主导作用,因此仅对 SCR 后 NO_x 排放特性进行分析.

图 9 为发动机转速 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时 NO_x 排放因子和三种载体长度 DOC 后处理系统 SCR 后的减排率.

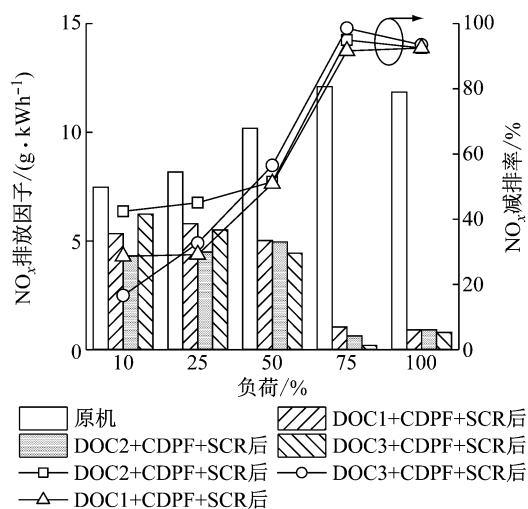


图 9 不同载体长度 DOC 后处理系统 SCR 后 NO_x 排放
Fig.9 NO_x emission at different carrier lengths of DOC aftertreatment system after SCR

随着负荷的增大,发动机缸内温度增加,发动机 NO_x 排放因子升高.在低负荷范围内,各装置对于 NO_x 的减排率较低.原因在于低负荷时排气温度较低,SCR 不能更好地进行催化转化.在低负荷范围内,载体长度较小的 DOC 后处理系统的 NO_x 减排率较为稳定.在 75%~100% 高负荷范围内,三种载体长度 DOC 后处理系统 SCR 后 NO_x 排放因子大幅降低,但减排率均在 90% 以上,在该负荷区间的平均减排率分别为 92.0%、93.7%、95.9%.DOC 长度越大, NO_x 减排率越高.原因在于载体长度较大的 DOC 后处理系统对 NO 氧化效果最好,生成的 NO_2 促进了 SCR 内快速反应的进行.

2.5 综合分析

为了更好地分析 DOC 载体长度对减排率的影响,综合比较了低温低负荷工况及高负荷工况下后处理系统的减排率. 低温低负荷工况取 10%、25%及 50%负荷条件下污染物减排率平均值,高温高负荷工况取 75%及 100%负荷条件下污染物减排率平均值.

图 10、11 分别为不同载体长度 DOC 后处理系统在低温低负荷工况及高温高负荷工况下的污染物减排率. 可以看出,在低温低负荷工况下,DOC2 后处理系统气态物减排效果最好,DOC1 后处理系统颗粒物减排效果较优. 高温高负荷工况下,载体长度最大的 DOC3 后处理系统的气态物减排率最高;颗粒物方面,DOC2 后处理系统的减排效果最好. 综合考虑成本及减排效果,DOC2 最优.

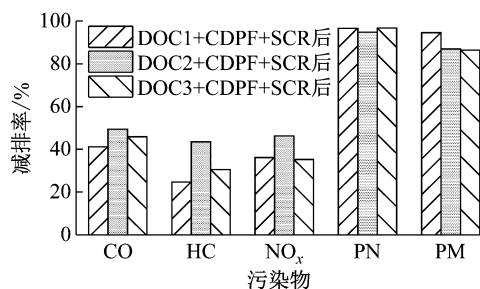


图 10 低温低负荷工况下污染物减排率

Fig. 10 Pollutant reduction rate under low temperature and low load conditions

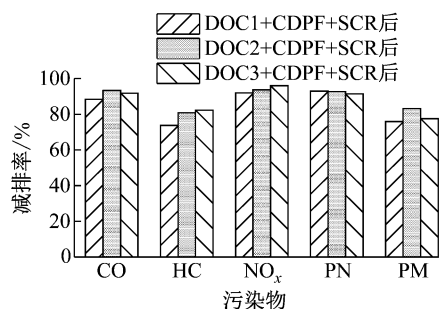


图 11 高温高负荷工况下污染物减排率

Fig. 11 Pollutant reduction rate under high temperature and high load conditions

3 结论

(1) DOC 后排气温度受 DOC 载体长度影响不大,但 DOC 载体长度对排气压差影响较为显著,随着 DOC 载体长度增大,排气压差增大. 当过量增大 DOC 载体长度时,排气压差的增长率有较大上升.

(2) DOC 载体长度变化对 CO、THC 和 NO 的

氧化性能影响显著. 低温低负荷情况下,载体长度较小的 DOC 对 CO、THC 及 NO 的氧化效果更好;中高负荷情况下,随着 DOC 载体长度的增加,DOC 后 NO₂ 质量分数和 CO、HC 的减排率相应上升. 适当增大 DOC 载体长度可有效提高对 CO、THC 和 NO 的氧化率. 当 DOC 载体长度过大时,对 CO、THC 和 NO 氧化性能的提升有限.

(3) 三种载体长度 DOC 后处理系统 CDPF 后 PN 和 PM 的减排率分别为 95.2%、94.0%、94.5% 和 87.1%、85.4%、82.9%,减排率受 DOC 载体长度的影响不大.

(4) DOC 载体长度变化对 SCR 后的 NO_x 减排效果有一定影响,DOC 载体长度越大,高负荷下的 NO_x 减排率越高.

(5) 从兼顾成本与性能的角度出发,载体长度居中的 DOC2 最优. 适当增加 DOC 载体长度能有效提高减排效果,但过量增加对减排效果的提升不大,同时影响 DOC 在低温低负荷时的减排效果.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (China 5) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [2] 温溢, 纪亮, 刘宪, 等. 国五国六工况下轻型车排放特性研究[J]. 环境科学与技术, 2016(增刊 2): 50.
WEN Yi, JI Liang, LIU Xian, *et al.* A study on emission characteristics in China 5 and China 6 driving cycles for light-duty vehicle[J]. Environmental Science & Technology, 2016 (S2): 50.
- [3] RAMADAS S, SUSEELAN S P, PARAMADHAYALAN T, *et al.* Optimization of diesel oxidation catalyst (DOC) on passenger cars to improve emission robustness[R]. Detroit: SAE, 2015.
- [4] 葛蕴珊, 赵伟, 王军方, 等. DOC 对柴油机排放特性影响的研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(5): 460.
GE Yunshan, ZHAO Wei, WANG Junfang, *et al.* Effects of diesel oxidation catalyst on emission from diesel [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(5): 460.
- [5] 楼狄明, 刘影, 谭丕强, 等. DOC/DOC+CDPF 对重型柴油车气态物排放的影响[J]. 汽车技术, 2016(10): 22.
LOU Diming, LIU Ying, TAN Piqiang, *et al.* The influences of DOC and DOC+CDPF on gaseous emissions of heavy-duty diesel vehicle[J]. Automobile Technology, 2016(10): 22.

(下转第 592 页)