

催化型颗粒捕集器的净化性能及劣化规律

张允华, 楼狄明, 谭丕强, 刘继跃

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于车载排放测试系统(PEMS), 测试并分析了 25、20、10 $\text{g} \cdot \text{ft}^{-3}$ ($1 \text{ ft}^3 = 0.028 3 \text{ m}^3$) 3 种不同贵金属负载量催化型颗粒捕集器(CDPF)对公交车尾气的净化性能及劣化规律。结果表明, 25 $\text{g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 贵金属负载量 CDPF 对公交车一氧化碳(CO)、总碳氢(THC)、颗粒数量(PN)及颗粒质量(PM)的净化性能最优。CDPF 对 CO、THC、PN 及 PM 的净化效率随使用里程的增加呈对数下降趋势, 25 $\text{g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 贵金属负载量 CDPF 净化效率下降趋势最为缓慢, 其抗劣化性能最优。使用 5 万公里后, 25 $\text{g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 贵金属负载量 CDPF 对 CO 和 THC 的净化效率仍分别高达 74% 和 70%, 对 PN 及 PM 的净化效率保持在 90% 以上。贵金属负载量对 CDPF 的 NO_x 净化效率影响不显著, 其随使用里程的劣化现象不明显。从兼顾成本-性能的角度考虑, 20 $\text{g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 贵金属负载量 CDPF 为最佳选择。

关键词: 柴油公交车; 催化型颗粒捕集器(CDPF); 贵金属负载量; 净化性能; 劣化规律

中图分类号: TK464

文献标志码: A

Purification Performance and Deterioration Rule of Catalyzed Diesel Particulate Filter

ZHANG Yunhua, LOU Diming, TAN Piqiang, LIU Jiyue

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

Abstract: The purification performance and deterioration rule of catalyzed diesel particulate filter (CDPF) with different precious metal loads (25, 20, 10 $\text{g} \cdot \text{ft}^{-3}$) on the exhaust emissions of bus was studied and analyzed based on portable emission measurement system(PEMS). The results show that the more the precious metal load on CDPF, the better the purification performance on CO, total hydrocarbon (THC), PN (particle number) and PM (particle mass) is. With the increase of the use time, the purification efficiency of CDPF decreases in the form of logarithmic and the more the precious

metal load, the slower the purification efficiency decrease is. After using for 50 thousand kilometers, CDPF with 25 $\text{g} \cdot \text{ft}^{-3}$ precious metal load can still keep purification efficiency about 74% and 70% for CO and THC respectively, and more than 90% for PN and PM. The precious metal loads and using mileage has no effects on the NO_x emission of buses. CDPF with 20 $\text{g} \cdot \text{ft}^{-3}$ precious metal load is the best choice considering both the cost and the performance.

Key words: diesel bus; catalyzed diesel particulate filter (CDPF); precious metal load; purification performance; deterioration rule

柴油机因其燃油消耗低、转矩输出高、可靠性好等优点在公交车上有着广泛的应用^[1]。然而, 柴油机排量、污染重的缺点却不容忽视, 尾气中一氧化碳(CO)、未燃碳氢(THC)以及黑烟都会给大气环境和人体健康带来极大的危害^[2]。尽管科学技术的快速发展不断助推柴油机先进技术的出现, 但单纯的机内净化措施仍很难满足日益严格的排放法规要求。近年来通过排气后处理技术控制柴油机尾气排放已经成为柴油机尾气净化的主要手段^[3]。其中, 催化型连续再生颗粒捕集器(CCRT)被公认为是一种高效的柴油机尾气净化装置, 该装置由氧化性催化转化器(DOC)和催化型颗粒捕集器(CDPF)串联而成。前端的 DOC 能氧化 CO、THC、可溶性有机成分(SOF)等排放污染物, 并将尾气中 NO 转化成 NO_2 ; 后端的 CDPF 可以实现对颗粒物的高效捕集, 并在贵金属催化剂作用下实现对 CO、THC、SOF 的进一步氧化, 同时借助前端生成的 NO_2 实现对捕集碳烟颗粒的氧化燃烧, 达到再生的效果^[4-6]。由此可见, CDPF 性能直接关系到柴油机的尾气排放水平。贵金属负载量不仅影响 CDPF 对尾气的捕集和转化性

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 上海市科委科研计划项目(16DZ1206700)

第一作者: 张允华(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为发动机排放控制。E-mail: zhangyunhua313@163.com

通讯作者: 楼狄明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为发动机替代燃料开发与排放控制。

E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

能,而且对 CDPF 的抗劣化性能同样产生较为显著的影响.因此,有必要对不同贵金属负载量 CDPF 随使用里程的性能劣化规律展开研究.

本文以相同型号安装不同方案 CDPF 的国 III 柴油公交车为研究对象,采用车载排放测试系统 (PEMS),对试验车辆不同使用里程下的尾气净化效率进行跟踪检测和分析,探寻不同贵金属负载量 CDPF 的净化性能及其随使用里程的劣化规律.

1 试验系统

车载排放试验系统如图 1 所示.采用日本 HORIBA 公司的 OBS-2200 车载排放测试仪对尾气中的 CO、THC 和 NO_x 进行检测,采用美国 TSI 公司的 EEPS-3090 对尾气中的颗粒数量(PN)及颗粒质量(PM)进行检测.此外,还包括用于气体稀释的 DI-2000 稀释器以及车辆行驶状态跟踪的 GPS 等附件^[7].

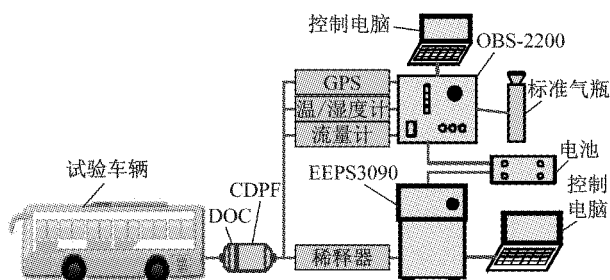


图 1 车载排放测试系统

Fig.1 Portable emission measurement system

1.1 试验车辆及燃油

试验车辆共计 3 辆,均为申沃 SWB6100V5 型公交车,其主要技术参数如表 1 所示.试验车辆所用燃料为市售并符合国 V 标准的柴油.

表 1 试验车辆技术参数

Tab.1 Specifications of the test bus

项目	参数
车型	申沃 SWB6100V5
变速器	自动
发动机	道依茨 D7E240
排量/L	7.1
功率/kW	177
排放标准	国 III

1.2 后处理方案

试验车辆所装后处理系统为 DOC 与 CDPF 串接而成,前端 DOC 参数固定,如表 2 所示.

后端的 CDPF 参数如表 3 所示,本试验设计了 3 种不同贵金属负载量(方案 A: $25 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$; 方案 B:

$20 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$; 方案 C: $10 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$) 的 CDPF,铂(Pt)、钯(Pd)、铑(Rh)质量比均为 10:2:1.

表 2 DOC 参数

Tab.2 Specifications of DOC	
项目	值
直径/mm	295
长度/mm	80
目数	300
壁厚/ μm	0.05
载体材料	FeCrAl
贵金属负载量/ $(\text{g} \cdot \text{ft}^{-3})$	60
$m_{\text{Pt}} : m_{\text{Pd}} : m_{\text{Rh}}$	10 : 0 : 1
涂层	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

表 3 CDPF 参数

Tab.3 Specifications of CDPF	
项目	值
贵金属负载量/ $(\text{g} \cdot \text{ft}^{-3})$	25、20、10
直径/mm	285.8
高度/mm	304.8
目数	200
壁厚/mm	0.35
孔隙率/%	55
过滤层平均孔径/ μm	8~13
载体材料	堇青石
$m_{\text{Pt}} : m_{\text{Pd}} : m_{\text{Rh}}$	10 : 2 : 1
涂层材料	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

1.3 试验方案

测试方案如表 4 所示.贵金属负载量不同的 3 种方案 CDPF 分别安装于车辆 I、车辆 II、车辆 III,对其进行 3 次跟踪试验检测,每次试验的间隔周期为 1 个季度,跟踪试验前首先对原车排放进行检测.第 3 次试验结束后对方案 A 后处理系统切割取样,进行 X 射线衍射分析(XRD)和表面原子价态及浓度分析(XPS),以考察老化对催化剂活性的影响. CCRT 初装时,为保证其性能充分激活,运行 1 个季度后进行减排性能检测.

表 4 试验方案

Tab.4 Test schemes

编号	CDPF 方案	试验次数	间隔周期
I 车	A	3	1 个季度
II 车	B	3	1 个季度
III 车	C	3	1 个季度

试验循环工况设计如图 2 所示,包括稳态试验工况循环和自由行驶工况循环.稳态试验工况下,车辆以 0、10、20、30、40、50、60 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 恒定车速行驶,每个速度下进行 1 min 的尾气采样,重复进行 3 次稳态循环测试;自由行驶工况下,驾驶员根据路况以不超过 60 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的车速自由行驶,行驶时间为 30 min. 整个测试过程均实时采样尾气排放并记录

车辆运行状态.

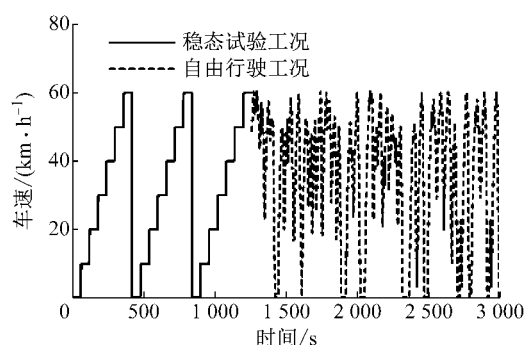


图 2 试验工况

Fig.2 Test condition

本次试验通过计算各排放物的全里程综合排放因子,分析后处理系统对气态污染物及颗粒污染物的净化能力.将 3 辆加装不同贵金属负载量 CDPF 后的排放数据分别与原车进行比较,计算得到相应气态物及颗粒物的净化效率.

为减小不同试验车次采集工况的差异对排放因子的影响,本文采用基于美国 EPA MOVES 的综合因子计算方法^[8],具体方法是根据公交车的比功率(VSP)进行微观工况区间划分.VSP 计算公式如下:

$$VSP = \frac{A}{M}v + \frac{B}{M}v^3 + (a + g\sin\theta)v \quad (1)$$

式中: A 、 B 分别为道路行驶负荷系数, $A=0.0661$, $B=1.79 \times 10^{-4}$; M 为车子质量,kg; a 为车辆加速度; v 为车辆速度; g 为重力加速度; θ 为路面倾斜角,试验测试均在水平路面进行, $\theta=0^\circ$.

车辆微观工况以车辆运行状态和 VSP 为表征参数,聚类划分 VSPbin 区间.其中,车辆运行状态划分为减速、怠速、低速($0 \sim 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、中速($20 \sim 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、高速($>40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)共计 5 个区间;VSP 的划分区间从小于等于 $-12 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$ 开始,增量为 $2 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$,一直划分到 $12 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$ 以上,共计 12 个区间,减速、怠速作为单独的 VSPbin 区间,低速、中速及高速各划分 12 个 VSPbin 区间,整个运行工况细分为 38 个 VSPbin 区间.

各污染物的综合单位里程排放因子计算公式如下所示:

$$F_i = 1000 \frac{\sum R_{i,j} D_j t}{\sum v_s} \quad (2)$$

式中: i 表示污染物类型,包括 CO、THC、颗粒数量(PN)及颗粒质量(PM); j 表示 VSPbin 排放单元的编号,共 38 个; F_i 表示第 i 类污染物的排放因子, $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$; $R_{i,j}$ 表示第 i 类污染物在第 j 个 VSPbin 单元

的排放速率, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$; D_j 表示行驶工况在第 j 个 VSPbin 单元的频率分布,%; t 表示行驶工况的总运行时间,s; v_s 表示车辆行驶的瞬时速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

完成第 3 次跟踪试验后,对方案 A 后处理系统切割取样,采用德国布鲁克 AXS 公司 D8 ADVANCE X 射线衍射仪对 CDPF 催化剂样品进行 X 射线衍射分析,采用美国 PerkinElmer 公司的 PHI 5000C ESCA X 射线光电子能谱仪对 CDPF 催化剂样品进行表面元素相对含量比例和价态分布分析.

2 结果与分析

2.1 使用里程分析

图 3 所示为 3 个阶段试验的 CDPF 使用里程情况.第 1 次试验在 CDPF 装车运行 1 个季度后进行,CDPF 随 I 车、II 车、III 车分别运行 2.5、1.6、1.2 万公里,平均运行 1.8 万公里;公交车再运行 1 个季度后进行第 2 次试验,CDPF 随 I 车、II 车、III 车分别运行 3.9、2.7、1.8 万公里,平均运行 2.8 万公里;第 3 次试验在第 2 次试验完成后 1 个季度进行,CDPF 随 I 车、II 车、III 车分别运行 6.5、4.5、3.4 万公里,平均运行 4.8 万公里.为便于分析使用里程对 CDPF 净化性能的影响,分别将 3 次使用里程记为 2、3、5 万公里.

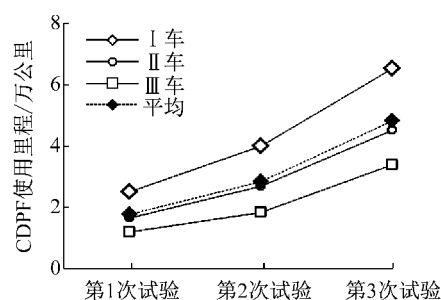


图 3 CDPF 使用里程分析

Fig.3 Using mileage of CDPF

2.2 排放性能分析

图 4 所示为不同测试阶段的 CO 排放因子.可以看出,原车的 CO 排放因子分布在 $4 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,加装净化器行驶 2 万公里后,车辆 I、II、III 的 CO 排放因子降至 $0.5 \sim 1.0 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,行驶 3 万公里后,车辆 I、II、III 的 CO 排放因子在 $1.1 \sim 1.6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,行驶 5 万公里后,车辆 I、II、III 的 CO 排放因子在 $1.2 \sim 2.5 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$.随着使用里程的增加,公交车的 CO 排放因子有所升高,但较原车仍降幅显著.从图 5 所示的 CO 净化效率来看,随着使用里程

的增加,CO 净化效率呈对数下降趋势. 2 万公里时,方案 A 后处理系统对 CO 的净化效率高达 90.71%,方案 B、C 后处理系统对 CO 的净化效率也分别达到 77.82% 和 73.87%,CO 的初始净化效率基本与 CDPF 的贵金属涂覆量成正比,随着使用里程的不断增加,3 种方案后处理系统对 CO 净化效率呈不同程度的下降趋势,其中方案 A、B 的 CO 净化效率下降趋势缓和,行驶 5 万公里时较初始净化效率分别下降 18.56% 和 24.08%,方案 C 的 CO 净化效率下降趋势较为显著,行驶 5 万公里时较初始净化效率降幅达 29.35%. 可见,方案 A 对 CO 的转化性能劣化速度最慢,方案 B 次之,方案 C 最快. 尽管 CCRT 对 CO 的主要净化作用来自 DOC,但 CDPF 的作用仍不容忽视,尤其是在 CCRT 长期使用后,前端 DOC 受高温冲击劣化现象更为显著,后端 CDPF 对 CO 的净化作用则逐渐凸显^[9]. 鉴于 3 种方案采用的 DOC 参数相同,可以认为造成 CO 净化效率差异性的主要原因是 CDPF 的贵金属负载量不同. 其中,方案 A 贵金属涂覆量最高,CDPF 气道单位面积上的催化剂活性位最多,从而带来较高的 CO 转化效率,而随着使用里程的不断增大,载体表面催化剂因高温烧结,贵金属原子分散均匀性变差,起催化作用的活性位数目减少,CO 转化率下降. 方案 A 的贵金属含量最高,即使部分催化剂烧结失活,仍有大量

的活性位起到催化作用,因此其 CO 转化能力的抗劣化性能最好^[10].

图 6 所示为不同测试阶段的 THC 排放因子. 原车 I、II、III 的 THC 排放因子为 75~125 mg·km⁻¹,加装 CCRT 行驶 2 万公里后,车辆 I、II、III 的 THC 排放因子降至 12~30 mg·km⁻¹,行驶 3 万公里后,车辆 I、II、III 的 THC 排放因子较上一阶段有所上升,为 17~36 mg·km⁻¹,行驶 5 万公里后,车辆 I、II、III 的 THC 排放因子进一步上升至 23~50 mg·km⁻¹. 从图 7 所示不同使用里程对应 THC 净化效率可以看出,随使用里程的增加,3 种方案对应的 THC 净化效率均呈对数下降趋势. 初始阶段,方案 A 的 THC 净化效果最优,方案 B、C 基本相当,至 5 万公里使用里程时,方案 A 的 THC 净化效果仍明显高于方案 B、C. 究其原因,具有较高贵金属负载量的方案 A 其载体表面催化活性位较多,对 THC 和 O₂ 的吸附能力较强,THC 的转化效率也因此较高. 随着使用里程的不断增加,载体表面的贵金属催化剂在持续的热冲击下结晶度增加,活性位数量减少,因此对 THC 的转化能力下降^[11],而方案 A 的后处理系统贵金属含量较高,除部分烧结的催化剂外,载体表面仍存有大量的活性位,因此其对 THC 转化能力的抗劣化性能优于方案 B、C.

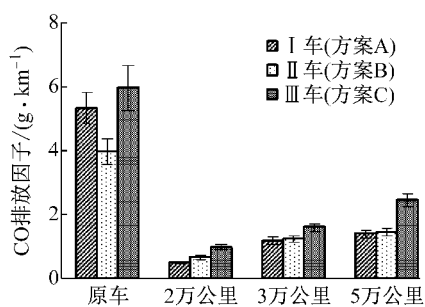


图 4 不同测试阶段的 CO 排放因子

Fig. 4 Emission factor of CO at different test stages

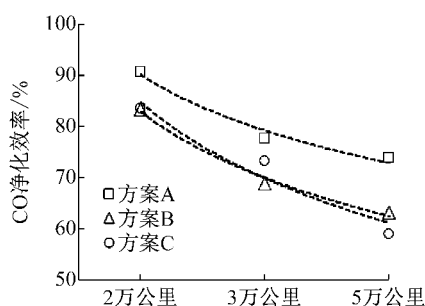


图 5 不同使用里程下 CO 净化效率

Fig. 5 Purification efficiency of CO under different mileages

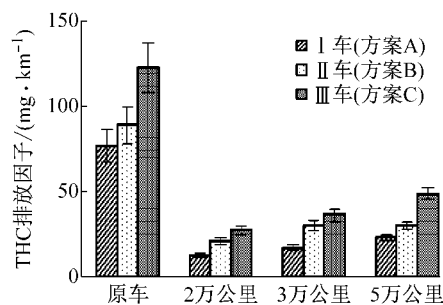


图 6 不同测试阶段的 THC 排放因子

Fig. 6 Emission factor of THC at different test stages

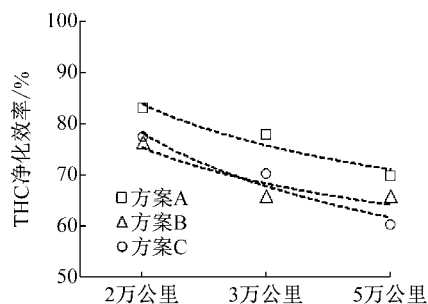


图 7 不同使用里程下 THC 净化效率

Fig. 7 Purification efficiency of THC under different mileages

图 8 所示为不同测试阶段的 NO_x 排放因子。原车 I、II、III 的 NO_x 排放因子分别为 8.84 、 9.79 和 $9.91 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ ，加装 CCRT 运行 2 万公里后，方案 A、B、C 对应车辆的 NO_x 排放因子略有变化，分别为 8.38 、 9.92 、 $9.65 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ ，5 万公里使用里程时， NO_x 排放因子较原车变化不大。CCRT 工作时，前端的 DOC 会将尾气中的 NO 氧化生成 NO_2 ， NO_2 流经 CDPF 时对捕集的碳烟进行氧化燃烧，自身被还原成 NO，整个过程 NO_x 的总量基本不变，因此 CCRT 的使用对 NO_x 并不会产生明显影响^[12]。贵金属涂覆量及其随使用里程的性能劣化也只会对 NO/ NO_2 的比例产生影响，而 NO_x 总量基本保持不变。

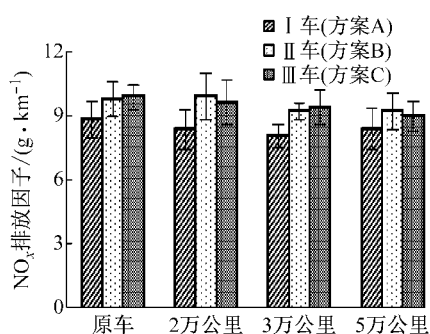


图 8 不同测试阶段的 NO_x 排放因子

Fig. 8 Emission factor of NO_x at different test stages

图 9 所示为不同测试阶段的 PN 排放因子。可以看出，原车 I、II、III 的 PN 排放因子量级均为 10^{14} ，使用 CCRT 后，PN 排放因子显著下降，较原车排放下降 1~2 个数量级。2 万公里使用里程对应的 PN 排放因子最小，之后随使用里程的不断增大，PN 排放因子有逐渐增大的趋势，但仍明显低于原车。从图 10 所示的不同使用里程对应 PN 净化效率来看，初始阶段 3 种方案对应的 PN 净化效率相当，均达到 96% 以上，随使用里程的增大，PN 净化效率呈对数下降趋势。方案 A 的 PN 净化效率下降较为缓和，5 万公里时的 PN 净化效率仍高达 92.0%，方案 C 的 PN 净化效率下降最为明显，5 万公里时的 PN 净化效率仅为 86.5%。究其原因，一方面，CDPF 的壁流式蜂窝结构具有较高的颗粒捕集效率；另一方面，流经 CDPF 的 SOF 会在贵金属催化剂作用下进一步被氧化，而捕集的碳烟颗粒会在前端产生的 NO_2 的作用下氧化燃烧，贵金属催化剂可以降低氧化燃烧的温度^[13-15]。方案 A 的后处理系统贵金属含量最高，即使部分催化剂随使用里程的增加发生高温烧结失效，仍有足量的贵金属原子分布在载体表面，保证催化性能，因此其抗劣化性能较好。

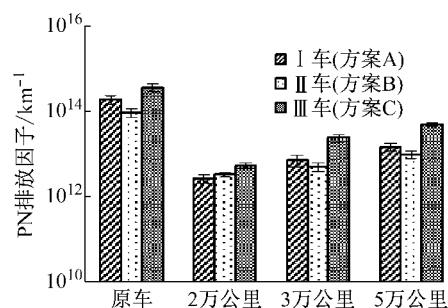


图 9 不同测试阶段的 PN 排放因子

Fig. 9 Emission factor of PN at different test stages

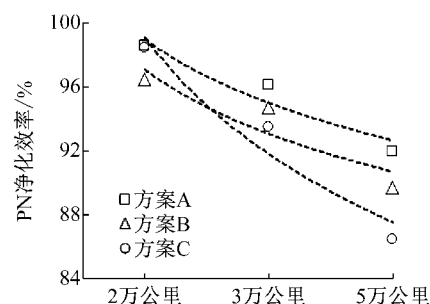


图 10 不同使用里程下 PN 净化效率

Fig. 10 Purification efficiency of PN under different mileages

图 11 所示为不同测试阶段的 PM 排放因子。可以看出，原车 I、II、III 的 PM 排放因子为 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$ ，使用 CCRT 行驶 2 万公里后，PM 排放因子显著下降至 $1.4 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$ ，随使用里程的进一步增加，PM 排放因子有上升的趋势，行驶至 5 万公里时，PM 排放因子分布在 $2.5 \sim 3.2 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$ 。图 12 所示为不同使用里程对应的 PM 净化效率。可以看出，随使用里程的增加，PM 净化效率呈对数下降趋势，并且方案 A 的 PM 净化效率明显高于方案 B、C，在 5 万公里使用里程时，方案 A 的 PM 净化效率仍保持在 90% 以上。究其原因，主要是因为方案 A 贵金属含量高，催化活性强，对碳烟中 SOF 的去除效果更为明显，并且较高的贵金属负载量更利于捕集颗粒的氧化燃烧，实现 CDPF 的被动再

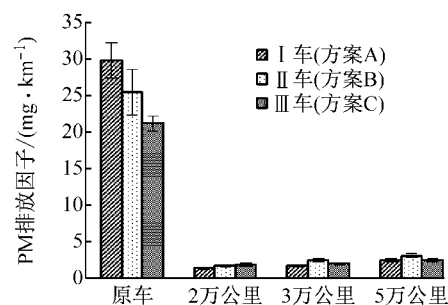


图 11 不同测试阶段的 PM 排放因子

Fig. 11 Emission factor of PM at different test stages

生^[16-17]. 另一方面, 贵金属含量较高, CDPF 的再生频率较快, 不利于产生积碳, 从而不会因过量积碳燃烧产生的高温而烧结催化剂^[18], 因此其抗劣化性能也较好.

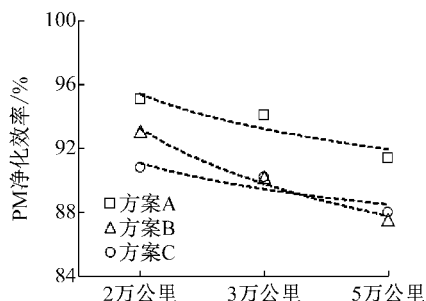


图 12 不同使用里程下 PM 净化效率

Fig. 12 Purification efficiency of PM under different mileages

2.3 老化特性分析

图 13 所示为方案 A 后处理系统新鲜态及运行 5 万公里后催化剂样品的 XRD 谱图. 可以看出, 新鲜态及 5 万公里老化后该催化剂样品谱图均在 $10^{\circ}\sim 11^{\circ}$ 、 $21^{\circ}\sim 22^{\circ}$ 和 $28^{\circ}\sim 29^{\circ}$ 范围出现明显的特征衍射峰簇, 分别记录为 a、b、c, 对其进行放大后发现, 经过 5 万公里实车老化后, 衍射峰簇向大角度偏移, 说明老化在一定程度上使催化剂样品的晶格收缩. 老化后样品的 XRD 谱图中出现一些新的晶相, 这可能是分散的贵金属和金属氧化物在柴油车老化过程中形成了晶相比较差的结晶物, 从而减小催化剂样品的催化活性.

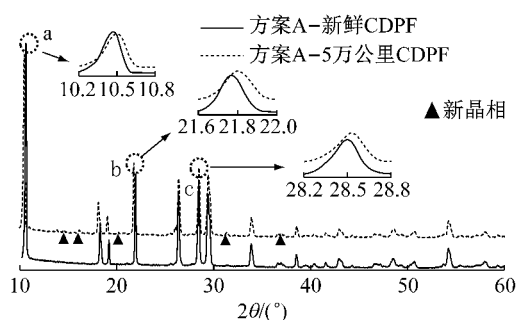


图 13 方案 A 新鲜态和老化态 CDPF XRD 谱图

Fig. 13 XRD spectrum of fresh and aged CDPF for scheme A

图 14 所示为方案 A 后处理老化前后表面贵金属价态及摩尔分数. 可以看出, CDPF 表面贵金属 Pt 主要以 +2 及 +4 价态分布. 新鲜态样品 Pt^{2+} 和 Pt^{4+} 的摩尔分数分别为 0.006 7 和 0.007 0, 经过 5 万公里老化后, 样品中 Pt^{2+} 和 Pt^{4+} 的摩尔分数分别为 0.002 0 和 0.002 3, 降幅分别为 70.27% 和

67.52%. 可见, 经过 5 万公里老化后, CDPF 仍存在一定数量的活性位, 但已显著低于新鲜态.

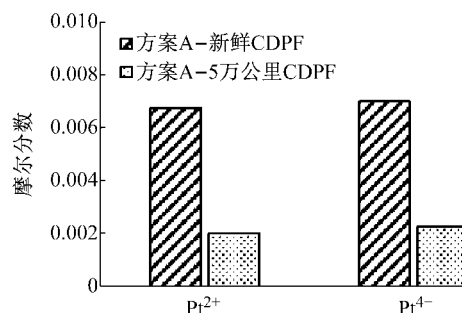


图 14 方案 A 新鲜态和老化态 CDPF 表面贵金属价态及摩尔分数

Fig. 14 Valence and mole fraction of noble metal on the surface of fresh and aged CDPF for scheme A

2.4 综合性能分析

为综合评估不同贵金属负载量 CDPF 的净化性能及劣化规律, 对不同方案后处理系统的污染物平均减排率和劣化系数进行计算. 其中, 平均减排率取 3 次试验减排率均值, 劣化系数根据减排率随使用里程的变化拟合计算得到.

图 15 和图 16 所示分别为不同方案 CDPF 的减排性能和劣化性能. 整体来看, 方案 A 的 CO、THC、PN 和 PM 减排效果最好, 但其贵金属涂覆量较方案 B 高 25%. 方案 B 的 PN 和 PM 减排效果与方案 A 相当, CO、THC 减排效果稍低, 但仍分别高达

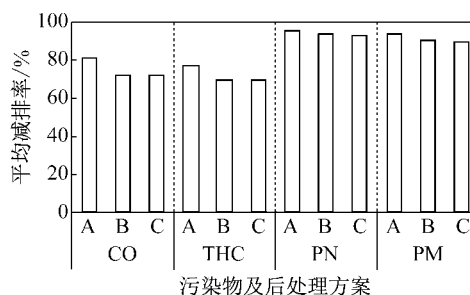


图 15 不同方案 CDPF 减排性能

Fig. 15 Emission reduction performance of CDPFs

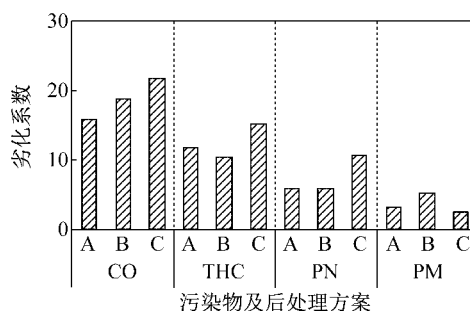


图 16 不同方案 CDPF 劣化性能

Fig. 16 Deteriorating property of CDPFs

71.8%、69.4%。方案 B 的劣化系数与方案 A 相当, 同样表现出较好的抗劣化性能。从兼顾成本-性能的角度考虑, 方案 B 为最佳选择。

3 结论

(1) 贵金属负载量对 CDPF 的尾气净化性能影响显著, 贵金属负载量较高的方案 A ($25 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$) 对 CO、THC、PN 以及 PM 的净化效率高于方案 B ($20 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$)、C ($10 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$)。

(2) 随使用里程的增加, 不同贵金属负载量 CDPF 的尾气净化效率均呈对数下降趋势, 但方案 A 的下降趋势较方案 B、C 缓慢, 其抗劣化性能最优。在 5 万公里使用里程时, 方案 A 对 CO、THC 的净化效率仍分别达 74% 和 70%, 对 PN 和 PM 的净化效率保持在 90% 以上。

(3) 贵金属负载量及使用里程均不对 CCRT 的 NO_x 净化效率产生显著影响, 公交车的 NO_x 排放因子与原车基本相当。

(4) 方案 A 的减排及抗劣化性能最优, 方案 B 次之, 但从兼顾成本-性能的角度考虑, 方案 B 为最佳选择。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 冯谦, 楼狄明, 计维斌, 等. DOC/DOC+CDPF 对重型柴油机气态物排放特性的影响研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(4):1.
FENG Qian, LOU Diming, JI Weibin, *et al.* Effects of DOC and DOC+CDPF on gaseous emissions from a heavy-duty diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(4):1.
- [3] MAY A A, NGUYEN N T, PRESTO A A, *et al.* Gas- and particle-phase primary emissions from in-use, on-road gasoline and diesel vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2014, 88:247.
- [4] YANG J, STEWART M, MAUPIN G, *et al.* Single wall diesel particulate filter (DPF) filtration efficiency studies using laboratory [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64:1625.
- [5] MARMUR A, PARK S K, MULHOLLAND J A, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in the southeastern United States using solvent extractable organic compounds as tracers [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(14): 2533.
- [6] ROTHE D, KNAUER M, EMMERLING G, *et al.* Emissions during active regeneration of a diesel particulate filter on a heavy duty diesel engine: stationary tests [J]. Journal of Aerosol Science, 2015, 90:14.
- [7] 张允华, 楼狄明, 谭丕强, 等. DOC+CDPF 对重型柴油车排放特性的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(5):1828.
ZHANG Yunhua, LOU Diming, TAN Piqiang, *et al.* Effects of DOC+CDPF on emission characteristics of heavy-duty diesel vehicle[J]. Environmental Science, 2017, 38(5): 1828.
- [8] 牛国华. 机动车排放因子模型数据库研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
NIU Guohua. Study on vehicle emission factor model database [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [9] CHOI B C, FOSTER D E. Overview of the effect of catalyst formulation and exhaust gas compositions on soot oxidation in DPF [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006, 20(1):1.
- [10] 于秋实. 负载型 Pt/Fe₂O₃ 催化剂的制备及其 CO 氧化反应性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
YU Qiushi. The preparation and the reaction of CO oxidation over the supported Pt/Fe₂O₃ catalyst [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [11] AN H, MCGINN P J. Catalytic behavior of Pt containing compounds for diesel soot combustion [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2006, 62:46.
- [12] SMELTZ A D, GETMAN R B, SCHNEIDER W F, *et al.* Coupled theoretical and experimental analysis of surface coverage effects in Pt-catalyzed NO and O₂ reaction to NO₂ on Pt [J]. Catalysis Today, 2008, 136(1/2):84.
- [13] SANDRA F, BALLESTERO A, TSAMPAS M N, *et al.* Silicon carbide-based membranes with high soot particle filtration efficiency, durability and catalytic activity for CO/HC oxidation and soot combustion [J]. Journal of Membrane Science, 2016, 501:79.
- [14] KANEEDA M, IIZUKA H, HIRATSUKA T, *et al.* Improvement of thermal stability of NO oxidation Pt/Al₂O₃ catalyst by addition of Pd [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2009, 90(3/4):564.
- [15] CHEN K, MARTIROSYAN K S, LUSS D. Temperature gradients within a soot layer during DPF regeneration [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66:2968.
- [16] AZAMBRE B, COLLURA S, DARCY P, *et al.* Effects of a Pt/Ce 0.68 Zr 0.32 O₂ catalyst and NO₂ on the kinetics of diesel soot oxidation from thermogravimetric analyses [J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92:363.
- [17] HERREROS J M, GILL S S, LEFORT I, *et al.* Enhancing the low temperature oxidation performance over a Pt and a Pt-Pd diesel oxidation catalyst [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, 147: 835.
- [18] BEATRICE C, DILORIO S, GUIDO C, *et al.* Detailed characterization of particulate emission of an automotive catalyzed DPF using actual regeneration strategies [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 39: 45.