

CDPF 贵金属负载量对柴油公交车颗粒 PAHs 影响

楼狄明,朱晓庆*,刘 影,谭丕强,胡志远 (同济大学汽车学院,上海 201804)

摘要: 基于装有氧化型催化器(DOC)和催化型颗粒捕集器(CDPF)后处理装置的柴油公交车,在中国典型公交车循环(CCBC)下研究了不同贵金属负载量分别为 15g/ft³(A 型)、25g/ft³(B 型)、35g/ft³(C 型)的新鲜及老化的 CDPF 对柴油发动机颗粒多环芳香烃(PAHs)排放特性的影响.结果表明:新鲜及老化的 CDPF 均能显著降低颗粒 PAHs 排放量 92%以上.且相比于老化的 CDPF,3 种新鲜的 CDPF 降低颗粒 PAHs 排放的效果相差不大,极差仅为 0.009ng/cm².3 种 CDPF 老化状态下降低颗粒 PAHs 毒性的效果都优于其新鲜状态下,且老化的 B 型 CDPF 降低颗粒 PAHs 总量及毒性的效果优于 A 型及 C 型 CDPF.

关键词: 柴油机; 贵金属负载量; 催化型连续再生颗粒捕集器; 颗粒 PAHs

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2018)01-0067-06

Effect of different metal loads of CDPF on particle PAHs emission from a diesel bus. LOU Di-ming, ZHU Xiao-qing*, LIU Ying, TAN Pi-qiang, HU Zhi-yuan (School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China). *China Environmental Science*, 2018,38(1): 67~72

Abstract: Based on the diesel bus with oxidized catalyst (DOC) and catalyzed particulate trap(CDPF), an experimental study was conducted, which investigated the impacts of fresh/aged CDPF with different amount precious metal loads of 15g/ft³(type A)、25g/ft³(type B) and 35g/ft³(type C) respectively on characteristics of PAHs from particle emission of diesel engine under China typical city bus driving cycle (CCBC). The results showed that after using fresh and aged CDPF, PAHs emission was reduced significantly, at least by 93%. Compared to aged CDPF, the effect of reducing PAHs emission by all three fresh type CDPF was similar, the extreme difference was only 0.009ng/cm². The effect to reduce toxicity of PHAs emission of all three aged type CDPF were better than when they were fresh. Besides, the effect of reducing PAHs emission and toxicity of aged B type CDPF was better than aged A and C type CDPF.

Key words: diesel engine; precious metal load; DOC+CDPF; particle PAHs

目前,我国大部分公交车装载柴油发动机,尾气直接排放在人口密集的市区,使城市雾霾天气增多和道路环境恶化^[1-3].因此,研究柴油公交车的排放对于控制城市环境污染具有重要意义.柴油机的排放物分为气态排放物和颗粒排放物,颗粒排放物中的多环芳香烃(PAHs)是由 2 个或更多数量芳环稠合在一起的有机化合物,具有的致癌、致畸和致突变性,对城市环境和人体健康有重要的影响^[4-6].

柴油机氧化型催化转化器(DOC)和催化型颗粒捕集器(CDPF)是两种发动机尾气处理装置.DOC 用于氧化排气中一部分有机可溶物^[7-8].CDPF 是在颗粒捕集器(DPF)上涂覆催化剂以促进 DPF 再生,这是降低颗粒物排放的有效途径^[9-11].DOC 与 CDPF 两者耦合工作,前端 DOC

将排气中的 NO 氧化为 NO₂,生成的 NO₂与 CDPF 中捕集的碳烟进行还原反应,从而实现 CDPF 的连续再生^[12-14].后处理装置新鲜状态是指刚投入使用、CDPF 内部堵塞物较少的状态;老化状态是指使用过一段时间、CDPF 内部阻塞物增多后的状态.经过老化处理的后处理装置可以模拟使用一段时间后后处理装置对颗粒 PAHs 的减排作用.研究不同贵金属负载量的 DOC+CDPF 在新鲜及老化状态下颗粒 PAHs 的组分和排放特性很有必要.Sarah 等^[15]得出分子量为 300~374 的芳香烃偏多,检测出某类 PAHs 异构体比苯并[a]芘毒性更强.文献[16-17]表明尾气有机物排放量中机油贡

收稿日期: 2017-06-07

基金项目: 上海科委课题项目(16dz1206700)

* 责任作者, 硕士研究生, zhuxiaoqing1030@163.com

献率偏高,机油是多环芳烃 PAHs 的主要来源.楼狄明等^[18]研究了贵金属负载量对 VOCs 的影响,得出贵金属负载量为 25g/ft³ 为最优的结论.但国内外对于新鲜及老化 CDPF 贵金属负载量对 PAHs 的影响研究很少.

本文基于重型车底盘测功机排放测试系统,在一辆柴油公交车安装 DOC+CDPF 进行排放测试研究,研究不同贵金属负载量的 CDPF 对排放物中 PAHs 组分以及排放特性的影响.

1 试验方案

1.1 试验设备

试验设备包括 MAHA-AIP 公司生产的重型车排放底盘测功机、芬兰 Dekati 公司的 FPS-4000 射流稀释器、四通道颗粒物采集装置.装置结构示意图如图 1.

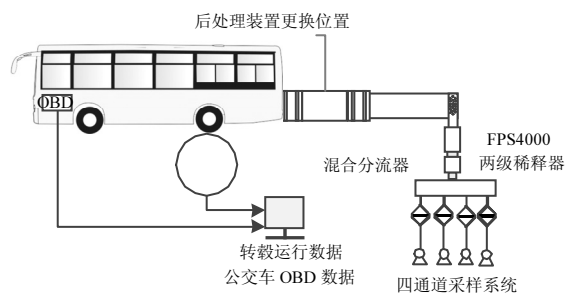


图 1 试验系统示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

1.2 试验车辆

试验车辆为一辆专用柴油公交车,主要参数如表 1 所示.

表 1 试验车辆主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of test vehicle

参数	参数值
整车质量(kg)	11900
总长×宽×高(mm)	11995×2530×3150
发动机排量(L)	8.820
额定功率/转速[kW/(r/min)]	192/2300
最大扭矩/转[(N·m)/(r/min)]	1100/1400
里程(km)	49383
试验燃料	0 号柴油

1.3 试验催化剂成分、老化处理方法

试验后处理装置采用 DOC+3 种不同贵金属负载量的 CDPF,得到 3 种连续再生催化型颗粒捕集器,简称 A 型、B 型、C 型.后处理系统 DOC 参数见表 2. CDPF 的参数详见表 3.

表 2 DOC 参数

Table 2 The parameter of DOC

参数	DOC
载体孔密度(cpsi)	400
载体过滤层壁厚(mm)	0.06
载体平均孔径(mm)	1.21
载体主要材料	FeCrAl
贵金属种类	Pt/Pd/Rh
贵金属负载量	55g/ft ³ , 10:1:0
涂层	γ-Al ₂ O ₃

表 3 CDPF 参数

Table 3 The parameter of CDPF

载体参数	A 型	B 型	C 型
孔密度(cpsi)		200	
过滤层壁厚(mm)		0.35	
孔隙率(%)		55	
平均孔径(mm)		1.45	
主要材料		堇青石	
贵金属种类		Pt/Pd/Rh	
贵金属总量(g/ft ³)	15	25	35
贵金属比例		10:2:1	
涂层		Al ₂ O ₃ +TiO ₂	

试验采用管式电阻老化炉对新鲜 CDPF 样品进行高温水热老化处理.老化炉的气体混合系统,可将多种气体进行混合后通过样品.放置样品的反应管使用高密度石英,有效避免混合气体与反应管发生反应.此外电阻炉中装有水鼓泡系统,可以在老化过程中加入水汽.模拟柴油车的水热老化条件为:温度为 750℃;时间 20h;空速 40000h⁻¹;气体成分(体积分数)分别为 10% O₂、5% CO₂、10% H₂O,N₂ 为平衡气.

1.4 试验循环

采用中国典型城市公交循环(CCBC).为了降低柴油车冷热启动对 CDPF 起燃温度和转化率的影响,在进行循环工况试验时,每组 CCBC 试验间隔 10min,CDPF 的进口端温度下降到 100℃ 以下,降低残余热量对 CDPF 催化活性的影响.

1.5 颗粒 PAHs 采集、分析方法

采用 $\phi 47\text{mm}$ 石英膜采集颗粒物,每个采集通道采用独立的无油真空泵进行样品抽取和流量控制.为了保证试验数据的可重复性以及柴油车颗粒物样品采集量达到仪器检测限,对柴油车原车、只安装 DOC 的柴油车以及安装新鲜及老化的 A、B、C 型后处理装置的柴油车分别进行 5 组试验,结果取平均值.

颗粒 PAHs 的分析方法:将石英滤膜剪碎后放入棕色广口玻璃瓶,加入 D 代混标(含全氘代 C24 烷烃、17 种全氘代 PAHs 和全氘代 C17 脂肪酸)于滤膜上,静置约 30min.然后加入 20mL 二氯甲烷 CH_2Cl_2 浸没样品,室温下超声抽提 3 次.将抽提液旋转浓缩至 1mL(70r/min, 32°C),用装有石英棉的滴管过滤、转移到 2mL 样品瓶中.再用高纯氮气缓吹至近干,重氮化,浓缩定容至 $50\mu\text{L}$,加入六甲苯进样内标.

所用分析仪器为 Agilent 气相色谱-质谱联用仪(7890GC/5975MSD).分析条件:采用 HP-5MS($30\text{m}\times 0.25\text{mm}\times 0.25\mu\text{m}$)色谱柱,高纯氮气作为载气,流速为 1.2mL/min ,进样口温度为 300°C ,脉冲无分流进样,其进样量为 $1\mu\text{L}$.程序升温:初始温度为 60°C ,保持 2min,然后以 5°C/min 的速率升至 300°C ,保持 10min,最后在 310°C 运行 5min,保证色谱柱内的高沸点物质尽量流出.质谱采用 EI 离子源,离子源温度为 230°C ,接口温度为 290°C ,电子能量为 70eV.采用 NIST 质谱标准库,选择离子扫描方法(SIM)检测 PAHs,采用内标法判定颗粒 PAHs 的排放量.

美国环保署(USEPA)将 16 种 PAHs 优先列为致癌污染物,包括萘(Nap)、苊烯(Acpy)、苊(Acp)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Flua)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、苊(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(IND)、苯并[g,h,i]花(BghiP)、二苯并[a,h]蒽(DBA).本文以这 16 种成分为分析对象.

2 结果与讨论

2.1 不同贵金属负载量的颗粒 PAHS 排放特性

由图 2 可见,只使用 DOC 可以降低原车 25%

的颗粒 PAHs 排放量.A、B、C 型 3 种不同贵金属负载量的 DOC+CDPF 后处理系统,新鲜时可以降低原车 93.3%、93.4%、93.7%的颗粒 PAHs 排放量,老化后可以降低原车 92.1%、95.6%、94.9%的颗粒 PAHs 排放量.DOC+CDPF 的后处理装置比只安装 DOC 可多减少 70%左右的颗粒 PAHs 排放量.可见 DOC 耦合 CDPF 可以有效降低颗粒 PAHs 排放量,其中 CDPF 不同贵金属负载量会产生不同的降低效果.

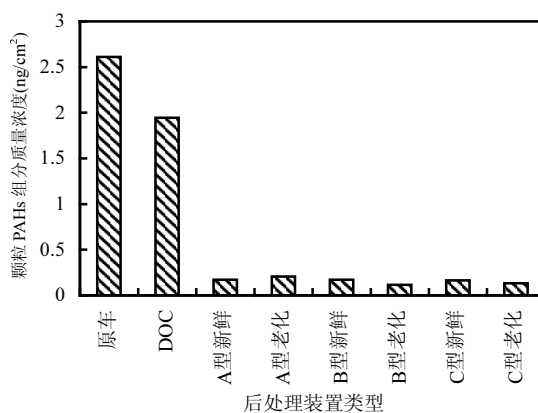


图 2 不同后处理装置颗粒 PAHs 排放量
Fig.2 Particle PAHs emissions with different aftertreatment devices

但并非贵金属负载量越多降低值越大,而是存在一个较为合理的贵金属负载量,使得 PAHs 减排效率较高.由图 3 可以得出,A、B、C 型 3 种后处理装置在新鲜状态下对颗粒 PAHs 降低量极差仅为 0.009ng/cm^2 ,在新鲜状态下 3 种催化剂对降低排放中颗粒 PAHs 的效率相差不大.老化的 A、B、C 型 3 种后处理装置相对于其新鲜状态对颗粒 PAHs 的降低作用并没有减弱,相反的 B、C 型的后处理装置减排作用有所增强.其中,B 型后处理装置在老化后对颗粒 PAHs 的降低量增加了 0.06ng/cm^2 ,高于 C 型.由此可见,3 种后处理装置新鲜时对降低颗粒 PAHs 的效果相差不大,而老化后 B 型后处理装置也就是贵金属负载量为 25g/ft^3 的催化剂,对降低颗粒 PAHs 的效果最佳.

分析上述结果出现的原因首先要从 CDPF 的结构开始.CDPF 的滤芯像蜂窝一样带有无数

的小孔,每个小孔都有一端是封闭的,出口处封闭的小孔与入口处封闭的小孔相邻设置,中间夹有过滤壁,进入过滤器的尾气会透过过滤壁的气孔,从出口排出,从而可以减少绝大多数的颗粒 PAHs.新鲜状态下的 CDPF 里过滤孔没有被堵塞或者只有少量残留物并不影响过滤性能,贵金属负载量对 CDPF 过滤颗粒 PAHs 作用影响不大.因此新鲜状态下的 3 种催化剂对颗粒 PAHs 的减少作用相差很小.

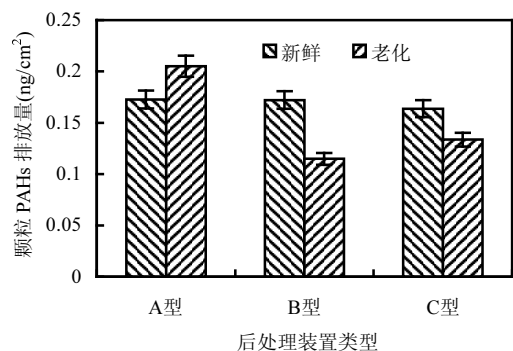


图3 新鲜及老化后处理装置下颗粒 PAHs 排放量
Fig.3 Particle PAHs emissions with fresh/aged aftertreatment devices

老化后的后处理装置颗粒 PAHs 的减排作用有所提高主要有 2 个原因.经过高温水热老化的 CDPF,老化处理时 750℃的高温可以促进贵金属在载体表面的再扩散^[19],同时也可以增加载体表面氧分子的活性位;由于颗粒物是成团存在的,废气进入过滤壁时,比气孔大的颗粒物会残留在过滤壁表面,所以老化后的 CDPF 过滤孔被逐渐堵塞,过滤作用也会增强.

催化剂中贵金属含量过高或过低都不利于催化性能的改善,这是因为当贵金属含量过高时,贵金属粒子容易发生团聚而形成较大的颗粒,贵金属在载体表面的分散度降低;当贵金属含量过低时,不能为催化反应提供足量的活性位,降低了催化活性^[20].因此,A 型催化剂老化后对颗粒 PAHs 的减排作用降低可能是因为其贵金属负载量过低,不能大幅提高 CDPF 中氧分子的活性位^[21],阻碍了氮氧化物的氧化反应的进行,不能保证 CDPF 有效再生,因此老化后对颗粒 PAHs

的减排效率小于新鲜状态的减排效率.

随着贵金属负载量的增加,排气中氮氧化物氧化效率增大,CDPF 中的温度增加,再生效率也同时增加,堵塞的颗粒发生氧化燃烧时也会放出热量,随着温度的升高,部分颗粒 PAHs 会在 CDPF 内发生氧化反应,所以贵金属负载量比较高的 B 型、C 型催化剂老化后对颗粒 PAHs 的降低作用都比 A 型催化剂的降低作用大.

老化后的 B 型催化剂性能优于 C 型催化剂的原因可能是因为:一、贵金属涂覆量增加会引起贵金属在载体表面发生重叠和烧结团聚等现象,增加样品的结晶度,抑制载体活性氧的流动性,并在一定程度上可能会抑制贵金属原子成为活性位点,降低催化剂的活化性能.二、贵金属涂覆在提升 CDPF 再生性能的同时会使载体孔隙率和渗透率降低,进而影响发动机的排气背压,使燃烧恶化导致污染物排放增加.

刘洪岐等^[22]得出结论:中等贵金属涂覆量既能保持再生率的提高,又能使载体保持较小的压降.本文中的 3 种贵金属负载量中,B 型后处理装置负载量适中,既能保持 CDPF 再生率的提高,又能使载体保持较小的压降,避免发动机缸内燃烧恶化,对于颗粒 PAHs 的减排作用好于 A、C 型.

2.2 不同贵金属负载量的颗粒 PAHs 组分

表 4 颗粒 PAHs 组分
Table 4 Particle PAHs' components

组分名称	原车	A 型	B 型	C 型
苯	0.042	0.020	0.015	0.015
萘	0.010	0.008	0.000	0.009
蒽	0.000	0.000	0.000	0.000
菲	0.020	0.063	0.005	0.013
芘	0.457	0.039	0.035	0.033
蒽	0.021	0.000	0.000	0.000
荧蒽	0.448	0.018	0.016	0.015
芘	1.378	0.019	0.014	0.016
苯并(a)蒽	0.036	0.007	0.005	0.008
蒽	0.097	0.038	0.029	0.027
苯并(b)荧蒽	0.050	0.005	0.004	0.004
苯并(a)芘	0.010	0.000	0.000	0.000
苯并(123-cd)芘	0.029	0.004	0.003	0.005
苯并(g,h,i)芘	0.057	0.003	0.003	0.004
二苯并(a,h)蒽	0.000	0.001	0.000	0.000

由表 4 可见,原车中菲、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(g,h,i)芘等组分排放

浓度都较高.相对于原车,A、B、C型3种老化后的后处理装置降低了大部分组分浓度.

表 5 选取了 5 种变化明显的颗粒 PAHs 组分, 可见 3 种后处理装置在各个组分上都可以有较好的减排效果, 其中 B 型后处理装置对于这 5 种组分都有较稳定的减排效果.

表 5 颗粒 PAHs 组分减排效果

Table 5 Reduction effect of particle PAHs' components

后处理装置	菲	荧蒹	芘	苯并(a)蒹	苯并(g,h,i)芘
A 型	11.7	24.9	72.5	5	19
B 型	13.1	28	98.4	7.2	19
C 型	13.8	29.9	86.1	4.5	14.3

由图 4 可见,B 型后处理装置在降低颗粒 PHAs 组分中茈、苯并(a)蒽、苯并(g,h,i)茈效果高于其他 2 种后处理装置,C 型在降低菲、荧蒽、屈上优于其他 2 种后处理装置,但 B、C 型 2 种后处理装置对于处理颗粒 PAHs 组分上的差异很小.这是因为贵金属负载量的提高可以降低颗粒 PAHs 各组分反应所需要的活性能^[21],从而减少排放中各个组分的颗粒 PAHs 的量.

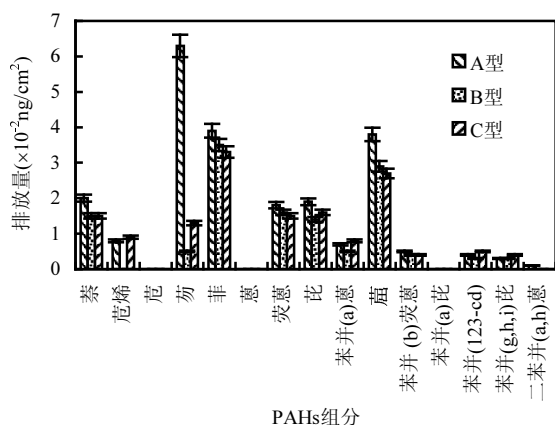


图 4 不同后处理装置颗粒 PAHs 组分

Fig.4 Particle PAHs'components with different aftertreatment devices

2.3 不同贵金属负载量的颗粒 PAHS 毒性

苯并[a]芘(Bap)是 16 种 PAHs 中致癌性和毒性最强的物质,被认为是致癌 PAHs 的代表物,目

前较多研究采用 Bap 等效毒性(BEQ)来评价 PAHs 的毒性.不同贵金属量催化剂处理后排放中颗粒 PHAs 的 BEQ 的计算公式为

$$\text{BEQ} = \sum W_i \times T_i \quad (1)$$

式中: W_i 为 PAHs 组分质量浓度, ng/cm^2 ; T_i 为各类 PAHs 毒性当量因子,具体值如表 6 所示.

表6 各组分 PAHs 的毒性当量因子

Table 6 The toxic equivalency factor of each PAHs' components

PAHs	T_i	PAHs	T_i
萘	0.001	蒎	0.01
苊	0.001	苯并[b]荧蒹	0.1
芴	0.001	苯并[k]荧蒹	0.1
菲	0.001	苯并[a]芘	1
蒽	0.01	苊并[123-cd]芘	0.1
荧蒹	0.001	苯并[ghi]芘	0.001
芘	0.001	二苯并[a,h]蒽	1
苯并[a]蒽	0.1		

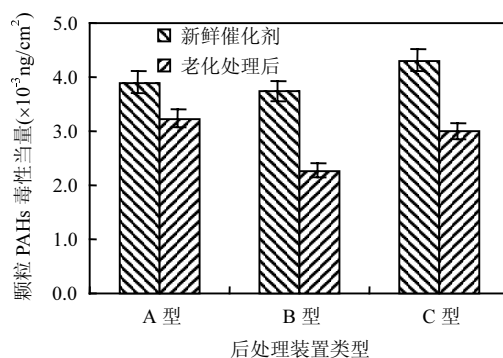


图 5 不同后处理装置颗粒 PAHs 毒性

Fig.5 Particles PAHs toxicity with different aftertreatment devices

从图 5 可以看出,A、B、C 3 种后处理装置在新鲜时,经过 B 型后处理装置处理的尾气中颗粒 PAHs 的毒性当量为 $0.0037\text{ng}/\text{cm}^2$,比 A 型低 4.1%,比 C 型低 13.2%。3 种后处理装置经老化处理后,B 型后处理装置处理后的尾气中颗粒 PAHs 的毒性当量为 $0.0022\text{ng}/\text{cm}^2$,比 A 型低 29.5%,比 C 型低 23.7%。由此看来,在后处理装置新鲜和老化状态下,贵金属负载量为 $25\text{g}/\text{ft}^3$ 的 B 型后处理装置对于降低颗粒 PAHs 毒性的能力都优于贵金

属负载量分别为 $15,35\text{g}/\text{ft}^3$ 的 A 型和 C 型催化器。从图 5 可以看出,A、B、C 3 种后处理装置老化状态下对降低颗粒 PAHs 的毒性都优于新鲜状态下的催化器。该结论可以为 CDPF 贵金属负载量的合理选择提供参考。

3 结论

3.1 柴油公交车安装 DOC+3 种不同贵金属负载量的新鲜及老化的 CDPF 可减少颗粒 PAHs 排放量 92%以上,比只安装 DOC 提高 70%左右。可见 DOC 与 CDPF 串联的形式可以大大降低排放中颗粒 PAHs 的量。

3.2 3 种后处理装置新鲜时对降低颗粒 PAHs 的效果相差不大,老化后贵金属负载量为 $25\text{g}/\text{ft}^3$ 的后处理装置,对降低颗粒 PAHs 的效果最佳。

3.3 B 型后处理装置在降低颗粒 PHAs 组分中芘、苯并(a)蒽、苯并(g,h,i)芘效果高于其他 2 种催化器,C 后处理装置在降低菲、荧蒽、屈上优于其他 2 种,但 B、C 型后处理装置对于处理颗粒 PAHs 组分上的差异很小。

3.4 贵金属负载量为 $25\text{g}/\text{ft}^3$ 的后处理装置对于降低颗粒 PAHs 毒性的能力都优于贵金属负载量分别为 $15,35\text{g}/\text{ft}^3$ 的后处理装置。3 种后处理装置老化状态下对降低颗粒 PAHs 的毒性的能力都优于新鲜状态。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部 2015 年中国机动车污染防治年报 [R]. 北京, 2015.
- [2] 孔少飞. 大气污染源排放颗粒物组成、有害组分风险评价及清单构建研究 [D]. 南京: 南开大学, 2012.
- [3] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析 [J]. 环境与可持续发展, 2011, 36(5): 15-19.
- [4] Sonntag D B, Gao H O, Holmén B A. Comparison of particle mass and number emissions from a diesel transit bus across temporal and spatial scales [J]. Transportation Research Part D, 2013, 25: 146-154.
- [5] Laroo C A, Schenk C R, Sanchez L J, et al. Emissions of PC-DD/Fs, PCBs, and PAHs from legacy on-road heavy-duty diesel engines [J]. Chemosphere, 2012, 89(11): 1287-1294.
- [6] 谭丕强, 阮帅, 胡志远, 等. 发动机燃用生物柴油的颗粒可溶有机组分及多环芳烃排放 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 115-121.
- [7] Bardon S, Bouteiller B, Bonnail N. Asymmetrical channels to increase DPF Lifetime [Z]. SAE Paper, 2004-01-09(50).
- [8] 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): 1-6.
- [9] 杨士超. 柴油机 CPF 捕集及主被动再生性能的数值模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] 谭丕强, 张晓峰, 胡志远, 等. DOC+CDPF 对生物柴油燃烧颗粒排放特性的影响 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 2978-2984.
- [11] 谢亚飞. 柴油公交车燃用餐厨废弃油脂制生物柴油的颗粒排放特性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2016.
- [12] Sharma H, Mhadeshwar A. A detailed micro kinetic model for diesel engine emissions oxidation on platinum based diesel oxidation catalysts (DOC) [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2012, 127: 190-204.
- [13] Katore S R, Patterson J E, Laing P M. Diesel aftertreatment modeling: A systems approach to NO_x control [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(8): 2445-2454.
- [14] 龚金科, 龙罡, 蔡皓, 等. 催化型微粒捕集器的再生与压降数值研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(12): 2820-2824.
- [15] Sarah G Riddle, Chris A Jakober, Michael A Robert, et al. Large PAHs detected in fine Particulate matter emitted from light-duty gasoline vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(38): 8658-8668.
- [16] Moacir Tavares Jr, Jurandir P Pinto, Alexandre L Souza, et al. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from diesel engine in a bus station, Londrina, Brazil [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 5039-5044.
- [17] Sandro Brandenberger, Martin Mohr, Koni Grob. Contribution of unburned lubricating oil and diesel fuel to particulate emission from passenger cars [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 6985-6994.
- [18] 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 等. 不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 [J]. 环境科学, 2017, 40(12): 1-11.
- [19] 方瑞梅, 何胜楠, 崔亚娟, 等. $(\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3)\text{-(La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3)$ 复合氧化物负载的 Pd 密偶催化剂: 载体焙烧温度的影响 [J]. 催化学报, 2012, 33(6): 1014-1019.
- [20] 卫婷. 纳米 Pd 催化剂的制备、表征及 CO 氧化反应活性 [D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [21] Timothy C W, Yaritz L, Jason D P, et al. Removal of hydrocarbons and particulate matter using a vanadia selective catalytic reduction catalyst: an experimental and modeling study [Z]. SAE paper, 2013-01-1071.
- [22] 刘洪岐, 高莹, 方茂东, 等. 涂覆量对 CDPF 压降和再生特性影响的研究 [J]. 汽车工程, 2016, 38(7): 800-804+799.

作者简介: 楼狄明(1963-), 男, 浙江东阳人, 教授, 博士, 主要研究方向为汽车发动机替代燃料应用技术和发动机排放控制后处理技术。发表论文 200 余篇。