

柴油机燃用 Ce 基 FBC 燃油颗粒物微观结构与化学分析

刘军恒¹ 孙平¹ 嵇乾¹ 苏雯博² 肖雪¹ 姚肖华¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 杭州 311231)

摘要:以环烷酸铈溶液作为燃油添加剂(FBC),依次按 Ce 元素质量比为 50、100、150、300 mg/kg 添加到柴油中,分别配制出 F50、F100、F150 和 F300 燃油。对共轨柴油机燃用铈基 FBC 燃油的燃烧颗粒,采用热重分析、气相色谱-质谱联用仪、扫描电镜和粒径分级采样的方法,研究了 FBC 燃油颗粒的氧化特性、可溶有机物组分(SOF)、粒径分布及微观结构。结果表明:随 FBC 掺混比的提高,颗粒物的氧化反应向着低温区域移动,含铈元素 150 mg/kg 时为最佳掺混比;与纯柴油颗粒相比,FBC 颗粒的 SOF 中高碳原子数目下降,多环芳烃含量减少了 49.2%;FBC 颗粒粒径向着小粒径方向移动,核模态颗粒的数量浓度峰值增加了 8.9%,而质量浓度峰值降低了 14.5%;FBC 颗粒物含有 Ce 元素质量分数为 1.23%,其形貌为疏松多孔的海绵状,粘结程度明显降低。

关键词:柴油机;颗粒捕集器;燃油添加剂;铈元素;微观结构

中图分类号:TK421.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2017)02-0342-06

Microstructure and Chemical Properties of Particulate from Diesel Engine Fueled with Ce-based FBC Fuel

LIU Junheng¹ SUN Ping¹ JI Qian¹ SU Wenbo² XIAO Xue¹ YAO Xiaohua¹

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Hangzhou 311231, China)

Abstract: In order to remove the deposited particles inside diesel particulate filter (DPF) and realize the DPF regeneration, fuel borne catalyst (FBC) additive is thought to promote diesel particle combustion with the active metal component in fuel. FBC can reduce the particulate ignition temperature, and also decrease the peak temperature of regeneration process. Naphthenic acid cerium solution was selected as FBC, which was blended with diesel by the ratios of 50 mg/kg, 100 mg/kg, 150 mg/kg and 300 mg/kg (Ce mass fraction) and marked as F50, F100, F150 and F300, respectively. The particulate physicochemical properties of a common rail engine fueled with Ce-based FBC were studied by using thermogravimetric analysis, gas chromatography/mass spectrometry (GC - MS), scanning electron microscopy (SEM) and staged sampling particulate system methods. The variations of oxidation susceptibility, soluble organic fraction (SOF) components, size distribution and microstructure of particulate with and without FBC were studied. Results showed that the oxidation reaction of particulate matter (PM) was moved to the low temperature area with the increase of FBC ratio, and the mass fraction of 150 mg/kg for Ce was the optimal blending ratio. The ignition temperatures of PM combustion were reduced by 94 °C, 131 °C, 150 °C and 152 °C, and the peak temperatures were reduced by 61 °C, 123 °C, 146 °C and 161 °C with the four FBC fuels. Before and after adding FBC, the mass fraction of SOF in PM sample were 29.6% and 24.1%, respectively. Compared with pure diesel PM sample, the high number of carbon atoms in SOF was decreased, and the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were decreased by 49.2%. For FBC particle sample the particle sizes were moved towards small size direction, the peak number concentration of accumulation modal particle was decreased by 14.4%, the peak number concentration of nuclear modal particle was increased by 8.9%, and the peak mass concentration was decreased by 14.5%. FBC particle sample, which had porous sponge morphology and low bonding degree, contained 1.23% of Ce element.

Key words: diesel engine; diesel particulate filter; fuel borne catalyst; cerium element; microstructure

收稿日期: 2016-07-08 修回日期: 2016-08-19

基金项目:内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金项目(K2016-05)、江苏省自然科学基金项目(BK20160538)、江苏省高校自然科学研究重大项目(14KJA470001)和江苏大学高级人才科研启动基金项目(15JDG163)

作者简介:刘军恒(1986—),男,讲师,博士,主要从事内燃机燃烧理论及排放控制技术研究,E-mail: liujunheng@ujs.edu.cn

引言

柴油机由于其油耗低、可靠性好等优点被广泛应用在农业机械、交通运输和工程机械等领域,但柴油机的 NO_x 和颗粒物排放对大气环境和人类健康危害极大^[1-4]。柴油机排放的颗粒物是 PM2.5 的重要来源,通常由多种挥发和半挥发有机物凝结在碳核表面形成,尤其是多环芳烃 (PAHs) 因其较强的致畸性和致癌性而广泛受到关注。柴油机颗粒捕集器 (DPF) 是目前公认的降低颗粒物最有效的手段^[5-7],随着我国法规对降低颗粒物的要求不断严格,加装 DPF 装置将成为一项必备方案,相应地对燃油品质和 DPF 再生技术提出了更高要求^[8-9]。

DPF 连续催化再生技术包括:①在载体表面涂覆含有贵金属的涂层^[10],通过分解捕集的颗粒物来降低过滤器再生温度,但该技术对燃油中硫含量敏感,要求含硫量低。②在燃油中加入燃油添加剂 (FBC)^[11],FBC 一般是可溶性金属盐或有机物 (铈、铁、铜和铂等),其燃烧后生成的金属氧化物与颗粒物共同沉积在 DPF 上起到催化作用,使颗粒物的起燃温度大幅降低,从而实现发动机正常运行的排气温度满足 DPF 连续稳定被动再生条件^[12-13]。柴油中硫含量对 FBC-DPF 的影响非常小,更适于硫含量高的地区使用^[14]。

有机金属化合物催化碳烟燃烧的作用主要是由接触度决定的物理特性和由本征活性决定的化学特性。当柴油中添加剂浓度较低时,物理作用较化学作用起决定性作用;浓度达到阈值后,添加剂成分决定的化学作用才充分发挥。因而,在添加剂调制时一方面要提高催化剂与碳烟的有效接触,力求添加剂在燃油中均匀溶解;另一方面在保证发动机性能正常下,调节添加剂浓度到催化效果最佳值,充分发挥其化学作用^[15]。本文选用环烷酸铈溶剂作为燃油添加剂,针对 Ce 基 FBC 添加剂对柴油机颗粒物的氧化特性、可溶性有机组分 (SOF)、微观结构和粒径分布的影响,采用热重分析、气相色谱-质谱联用 (GC-MS)、扫描电镜和粒径分级采样技术,对颗粒的理化特性加以研究,旨在为柴油机 FBC-DPF 催化再生技术的应用提供一定的理论依据和试验数据。

1 试验设备与方案

1.1 试验样机及燃料

样机采用 YZ4DB1-40 型直列 4 缸电控共轨增压中冷柴油机,主要技术参数见表 1。柴油选用市售国 IV 号柴油,其含硫量低于 5.0×10^{-5} 。FBC 添

加剂为环烷酸铈溶液,为棕色粘稠状液体,环烷酸铈分子式为 $(\text{C}_n\text{H}_{2n-1}\text{COO})_4\text{Ce}$,式中 n 为 7~18,能够与柴油任意比例互溶,本文所选环烷酸铈溶液中的铈元素质量分数为 10%。依次按 Ce 元素质量比 50、100、150、300 mg/kg 比例添加到柴油中,依次标记为 F50、F100、F150 和 F300。

表 1 柴油机主要参数

Tab. 1 Main parameters of diesel engine

| 参数 | 数值 |
|--|-------------|
| 缸径 × 行程 / (mm × mm) | 105 × 118 |
| 工作容积 / L | 4.09 |
| 燃烧室型式 | 直喷 ω 型 |
| 压缩比 | 17.5 |
| 喷油装置 | 电控高压共轨 |
| 最大喷油压力 / MPa | 160 |
| 额定功率 (转速) / kW (r·min ⁻¹) | 95 (2 600) |
| 最大扭矩 (转速) / (N·m) (r·min ⁻¹) | 400 (1 500) |
| 外特性最低油耗率 / (g·(kW·h) ⁻¹) | 190 |

1.2 分析仪器

发动机试验台架为 AVL-PUMA 型发动机全自动测控系统,该系统采用交流电力测功机;颗粒采集设备为 AVL 公司的 SPC472 型颗粒采样器,该仪器采用分流稀释系统;使用 METTLER 公司的 TGA/DSC1 型热重仪器分析颗粒物的氧化特性;使用 Agilent 公司的 GC-MS 色谱质谱联用仪分析颗粒中 SOF 的含量和种类;使用日立公司的 S-4800 型场发射扫描电子显微镜对颗粒样品进行 SEM/EDS 分析;使用 TSI 公司的 EEPS-3090 型颗粒物粒径谱仪分析发动机排气颗粒物的数量浓度与质量浓度,其时间分辨率为 0.1 s,为了试验的可重复性,每个工况重复运行 3 次,验证试验结果的不确定性不超过 5%。

1.3 试验方案

发动机参照 ESC13 工况试验循环运行,使用 Pall-Flex 玻璃纤维滤膜采集不同 FBC 比例的颗粒样品,完毕后纤维滤膜在 100℃ 恒温箱中干燥 10 min。在热重分析中,各种样品约 3 mg,温度控制区间为 40~800℃,升温速率为 20℃/min,保护气为 N_2 ,反应气为 O_2 ,流速 30 mL/min,通过热重分析碳烟氧化过程并确定最佳 FBC 比例,从而优化方案。

将柴油和 FBC 的燃烧颗粒物置于 CH_2Cl_2 溶剂中,用超声清洗器进行超声洗脱,对固、液混合物进行分离和过滤,过滤后得到的滤液为 SOF 分析液。色谱质谱试验采用 HP-5MS 型石英毛细管色谱柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm),采用程序升温,载气为 He,进样量为 1 μL;电离方式 EI 电子轰击法,轰

击能量为 70 eV, 离子源温度为 230℃, 参照 NIST05 质谱标准库, 采用峰面积归一法对 SOF 各组分进行定量分析。

对柴油和 FBC 的颗粒样品进行喷金处理, 利用电子显微镜观察添加 FBC 前后颗粒物形貌与粒径, 使用 X 射线能量色散谱仪对 PM 样品进行 EDS 元素分析。同时在发动机最大扭矩转速 $n = 1\ 500\ \text{r/min}$ 的 100% 负荷下研究添加 FBC 前后微粒的数量浓度与质量浓度分布规律。通过上述研究方法系统探讨 FBC 对柴油机微粒的微观结构和化学特性的影响。

2 试验结果与讨论

2.1 颗粒氧化特性分析

图 1 为不同 FBC 掺混比燃油燃烧颗粒样品的氧化特性曲线。由图 1a 可见, 随着 FBC 掺混比的增加, 颗粒氧化反应向低温区域移动。定义 TG 曲线上峰值失重率点的切线与 TG 曲线基线延长线的交点对应的温度为起始燃烧温度 (T_c), 与柴油相比, F50、F100、F150 和 F300 燃烧颗粒样品的 T_c 分别降低了 94℃、131℃、150℃ 和 152℃, 其燃烧颗粒峰值失重率所对应的温度分别降低了 61.3℃、122.7℃、145.7℃ 和 161℃; 从图 1b 中可见, 峰值失重率随 FBC 掺混比的增大而逐渐降低。

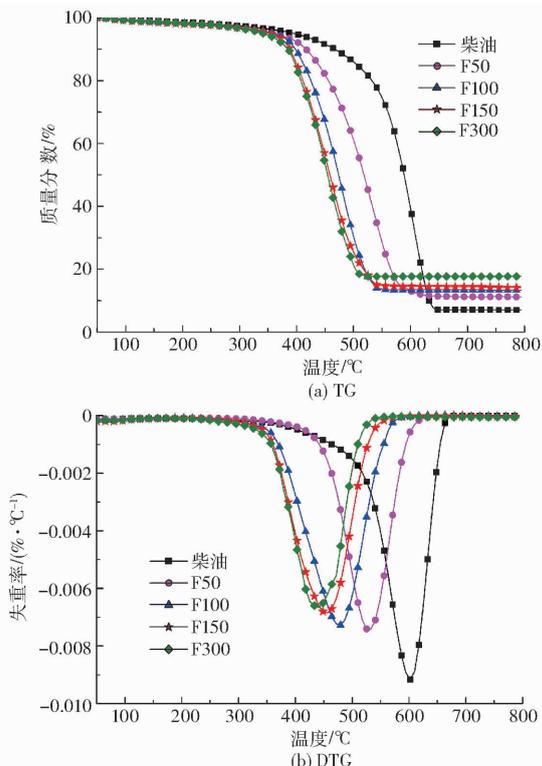


图 1 不同 FBC 掺混比柴油燃烧颗粒的氧化特性
Fig. 1 Oxidation characteristics of particles for different FBC ratios

由于 FBC 添加剂的燃烧产物 CeO_2 在柴油机工作过程中与气缸内的细小碳粒紧密结合, 随颗粒排出气缸并被 DPF 捕集后, 起到催化剂作用, 实现颗粒的低温氧化燃烧。该催化燃烧机理为电子转移机理和氧转移机理的共同作用^[16]: 一方面, 催化剂削弱了碳烟颗粒表面 C—C 键的稳定性, 从而加强了碳烟的低温燃烧活性; 另一方面, 催化剂 CeO_2 独特的晶格结构可以提供大量的氧空位, CeO_2 向 Ce_2O_3 转化过程中会释放氧活性较强的晶格氧, 能够与碳烟在较低温度下发生氧化反应, 随后 Ce_2O_3 利用 O_2 实现 CeO_2 再生。 CeO_2 在反应过程中起氧传递作用, 使碳烟更易获得 O_2 而被氧化。此外, 颗粒燃烧反应速率与颗粒形态相关, 随着粒径减小, 比表面积增加致使吸附氧能量加强, 其化学反应活性增强。当加入 FBC 添加剂后, 颗粒形貌趋于细化, 其组分更易吸附周围气体分子从而较早发生氧化反应, 促进低温区域氧化反应的进行。

根据有机金属添加剂对颗粒的催化作用机理, FBC 掺混比决定了有机金属催化颗粒氧化的物理与化学特性, 且存在阈值效应。从图 1 中 F300 和 F150 两种燃油燃烧颗粒样品氧化过程的 TG 和 DTG 曲线可见, 催化效果基本无变化。说明含铈 150 mg/kg 时, 由本征活性决定的化学催化作用已充分发挥, 虽然 F300 颗粒氧化的 T_c 和峰值温度略有下降, 但残余灰分的质量分数高达 17.7%。为避免灰堵堵塞 DPF 及金属氧化物的二次污染, 150 mg/kg 掺混比是合理值。

2.2 颗粒物中 SOF 组分分析

添加 FBC 前后颗粒样品中 SOF 总离子流色谱如图 2 所示。将萃取前后的颗粒样品、滤纸和过滤器进行称量计算, 得出柴油与 FBC 添加后 SOF 成分的质量分数分别为 29.6% 和 24.1%, 可见添加 FBC 使得 SOF 成分下降。添加 FBC 前后 SOF 组分变化如表 2 和表 3 所示, 其中质量分数低于 2% 和基本无变化的未列出, SOF 碳原子数的分布如图 3 所示。由表 2 知柴油颗粒的 SOF 组分主要由 C14 ~ C29 直链及支链烷烃、有机酸酯和芳香烃等组成, 分别占 SOF 的 49.2%、35.4% 和 7.57%, 其中质量分数最高的十六酸甲酯占 13.69%, 危害最大的 PAHs (荧蒹、芘等) 所占质量分数为 4.65%。C14 ~ C24 直链与支链烷烃主要是由于缸内局部区域缺氧, 导致油气混合不均及燃烧恶化, 柴油燃烧不充分产生^[17]; C25 ~ C29 高碳烷烃主要是窜入燃烧室的未燃润滑油^[18]。由表 3 可知, FBC 颗粒的 SOF 组分主要由烷烃和有机酸酯组成, 质量分数分别为 40.2% 和 51.6%, 荧蒹、芘等 PAHs 质量分数为 2.36%, 较纯

柴油下降了49.2%。这是由于缸内燃烧生成的 CeO_2 具有独特的储氧/放氧能力,更高的活性氧浓度促进了燃烧过程,降低了未燃燃油比例,但较高的温度却促进脂类化合物的生成^[19-20]。

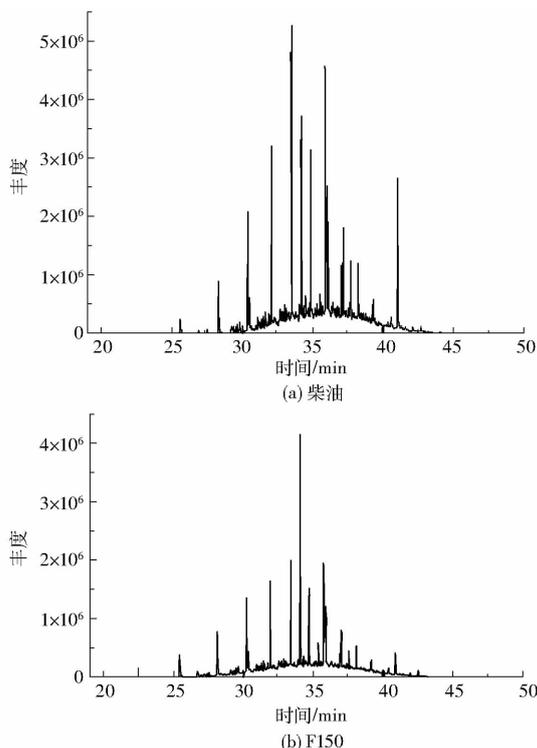


图2 添加FBC前后PM中SOF的总离子流色谱

Fig.2 Total ionic chromatograms of SOF with and without FBC

表2 柴油颗粒SOF的GC-MS检测结果

Tab.2 SOF of PM from diesel engine without FBC

| 编号 | 保留时间/min | 化合物 | 化学式 | 质量分数/% |
|----|----------|--------------------------|-------------------|--------|
| 1 | 28.114 | 正十七烷 | $C_{17}H_{36}$ | 3.13 |
| 2 | 30.198 | 正十八烷 | $C_{18}H_{38}$ | 6.24 |
| 3 | 31.906 | 正十九烷 | $C_{19}H_{40}$ | 8.63 |
| 4 | 33.372 | 十六酸甲酯 | $C_{17}H_{34}O_2$ | 13.69 |
| 5 | 34.052 | 邻苯二甲酸二异丁酯 | $C_{16}H_{22}O_4$ | 7.44 |
| 6 | 35.734 | 11-十八烯酸甲酯 | $C_{19}H_{36}O_2$ | 9.83 |
| 7 | 35.791 | 亚油酸甲酯 | $C_{19}H_{34}O_2$ | 3.53 |
| 8 | 35.893 | 正二十七烷 | $C_{27}H_{56}$ | 3.54 |
| 9 | 36.891 | 蒹蒹 | $C_{16}H_{10}$ | 2.09 |
| 10 | 37.540 | 芘 | $C_{16}H_{10}$ | 2.56 |
| 11 | 38.069 | 正二十四烷 | $C_{24}H_{50}$ | 2.35 |
| 12 | 40.882 | 2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚) | $C_{23}H_{32}O_2$ | 7.57 |

由图3可见,纯柴油颗粒样品中SOF的碳原子数分布为C14~C29,而碳原子质量分数较大的集中在C16~C24,约占85.0%,其中C19、C17和C16的质量分数较大,分别占24.9%、18.5%和13.4%。FBC颗粒中SOF的碳原子分布与纯柴油基本相似,

表3 FBC150颗粒SOF的GC-MS检测结果

Tab.3 SOF of PM from diesel engine with FBC

| 编号 | 保留时间/min | 化合物 | 化学式 | 质量分数/% |
|----|----------|--------------------------|-------------------|--------|
| 1 | 25.417 | 正十六烷 | $C_{16}H_{34}$ | 2.19 |
| 2 | 28.114 | 正十七烷 | $C_{17}H_{36}$ | 4.92 |
| 3 | 30.317 | 2,6,10,14-四甲十六烷 | $C_{20}H_{42}$ | 2.04 |
| 4 | 31.906 | 正十九烷 | $C_{19}H_{40}$ | 2.92 |
| 5 | 33.372 | 十六酸甲酯 | $C_{17}H_{34}O_2$ | 12.71 |
| 6 | 34.052 | 邻苯二甲酸二异丁酯 | $C_{16}H_{22}O_4$ | 21.76 |
| 7 | 35.363 | 邻苯二甲酸丁基-8-甲基壬基酯 | $C_{22}H_{34}O_4$ | 2.72 |
| 8 | 35.738 | 反式油酸甲酯 | $C_{19}H_{36}O_2$ | 7.74 |
| 9 | 35.791 | 亚油酸甲酯 | $C_{19}H_{34}O_2$ | 5.41 |
| 10 | 35.893 | 正二十七烷 | $C_{27}H_{56}$ | 5.49 |
| 11 | 36.891 | 蒹蒹 | $C_{16}H_{10}$ | 1.00 |
| 12 | 37.540 | 芘 | $C_{16}H_{10}$ | 1.07 |
| 13 | 40.873 | 2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚) | $C_{23}H_{32}O_2$ | 2.19 |

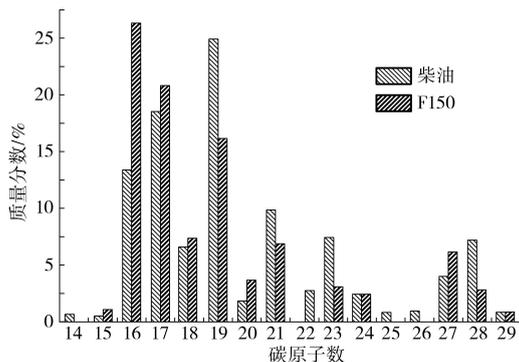


图3 添加FBC前后PM样品中SOF的碳原子数分布

Fig.3 Carbon distribution in SOF with and without FBC

集中在C16~C24质量分数约为89.2%,其中C16、C17和C19低碳原子数目的质量分数较大,分别占26.3%、20.9%和16.1%。添加FBC后SOF组分中高碳原子数目下降,低碳原子数目上升,主要原因是FBC在燃烧过程中产生了较高的O、OH等活性氧化基团,部分高碳原子在活性物种作用下发生化学反应转化为低碳原子。

2.3 颗粒物粒径分布规律

柴油机颗粒物粒径位于50 nm~1 μm之间的为积聚模态,粒径小于50 nm的为核模态。图4给出了柴油机燃用纯柴油与添加FBC,在1400 r/min转速100%负荷下,所得到的排气颗粒物数量浓度和质量浓度分布图。由图4a可见,添加FBC前后颗粒的数量浓度分布曲线的形状基本一样,但是添加FBC后积聚模态颗粒的数量浓度下降,峰值浓度下降14.4%,其对应的粒径约90 nm,而核模态的数量浓度上升,峰值浓度增加8.9%,其对应粒径小于10 nm,粒径总体向小粒径方向发展。由图4b可见,

颗粒的质量浓度曲线呈单峰,峰值在 200 nm 附近,说明积聚模态颗粒对质量分布起主要作用,虽然在数量上核模态多,但其粒径小,质量小。FBC 较纯柴油排放的颗粒物质量浓度峰值下降了 14.5%。这是由于碳烟主要是在高温缺氧条件下生成的,而积聚模态颗粒物一般是碳烟颗粒吸附凝聚一定的碳氢化合物和硫化物等组成,而 FBC 燃烧后生成的 CeO_2 可提供大量的活性氧原子,可促进碳氢化合物和大粒径颗粒的氧化反应。

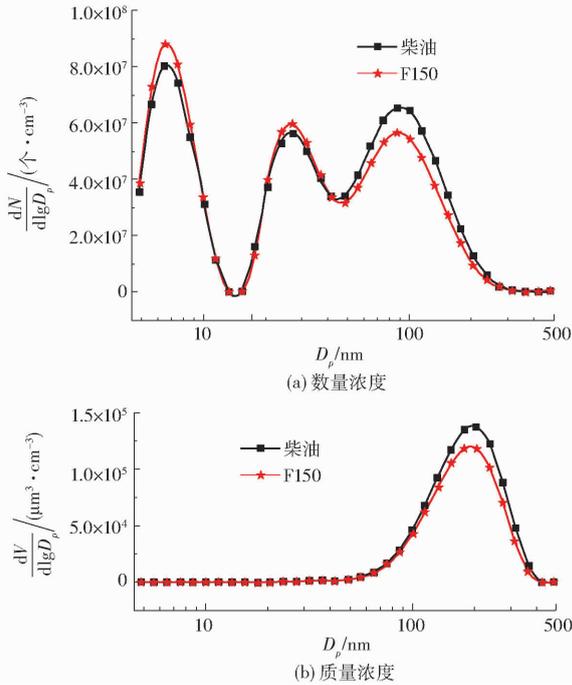


图 4 添加 FBC 前后微粒的数量浓度和质量浓度分布
Fig. 4 Particle number and mass concentration distributions with and without FBC

2.4 颗粒物形貌与元素分析

图 5 为采用扫描电镜得到的纯柴油和添加 FBC 的燃烧颗粒形貌图,放大倍数为 5 万倍。由图 5a 可见,纯柴油颗粒物样品形貌不规则,呈链状或团絮集聚体,这些不规则的颗粒堆积物由粒径 50 ~ 100 nm 的球状碳粒子附着有机物粘结而成。由图 5b 可见, FBC 的颗粒物样品形貌为不均分布的球状颗粒集聚体,颗粒物的粒径和孔隙率变小,呈现疏松多孔的海绵状,粘结程度明显降低。这是因为 FBC 在燃烧中产生大量强氧化性的活性基团,与燃油及各种中间产物发生一系列反应,可将颗粒中的碳粒子和 SOF 组分氧化,从而降低了颗粒物的粘结度。这与图 4 中添加 FBC 后颗粒向小粒径方向移动的结论一致。

图 6 为柴油机燃用纯柴油和添加 FBC 燃料燃烧颗粒的 X 射线能谱图。由图 6a 可见,除颗粒物样品表面喷金处理而检测到 Au 元素外,纯柴油颗粒物样品检测到的主要元素有:C、O、S、Si 和 Zn 等,

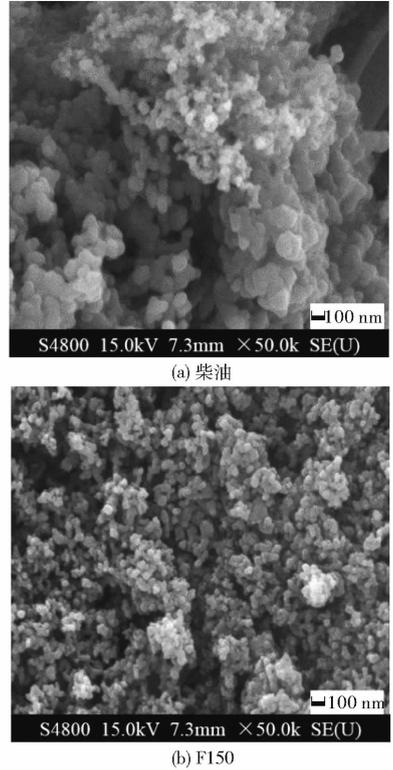


图 5 添加 FBC 前后的颗粒形貌图 (50 000 倍)
Fig. 5 Morphology of PM with and without FBC

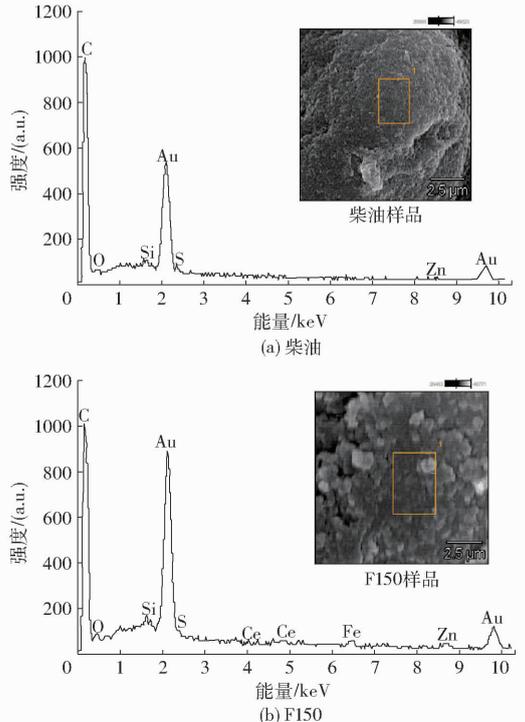


图 6 添加 FBC 前后的颗粒能谱 (EDS)
Fig. 6 X-ray energy spectrum diagrams of PM with and without FBC

其中 C 元素是颗粒样品的主要化学元素,O 元素存在是颗粒表面吸附了不完全氧化的物质,元素 S 来自于柴油,而 Si、Zn 等元素来自润滑油及其添加剂。由图 6b 可见,FBC 燃油颗粒物样品的主要元素有:C、O、Si、Ce、Fe 和 Zn 等,其中 Fe 元素可能来自于活

塞环与缸套磨损或采样过程的金属碎屑,而 Ce 元素则由 FBC 燃烧生成的氧化物附着在碳烟颗粒表面,其含量占颗粒物质量分数的 1.23%。

3 结论

(1)随着 FBC 掺混比的增加,FBC 燃油燃烧颗粒物的氧化反应向低温区域移动,但其催化活性存在阈值效应,含铈 150 mg/kg 时为折中最佳掺混比。

(2)添加 FBC 前后颗粒样品中 SOF 的质量分

数分别为 29.6% 和 24.1%;与纯柴油颗粒中 SOF 的组分相比,FBC 燃油的 PAHs 下降了 49.2%,高碳原子数目下降,低碳原子数目上升。

(3)与纯柴油颗粒分布比较,柴油机燃用 FBC 燃油排放颗粒物的粒径向着小粒径方向发展,颗粒物质量浓度峰值下降了 14.5%。

(4)FBC 燃油颗粒物样品的形貌为不均分布的球状颗粒集聚体,呈现疏松多孔的海绵状,粘附程度下降,并在其样品中检测到 1.23% 的 Ce 元素。

参 考 文 献

- 魏立江,马雁,韩国鹏,等. 重型柴油机进气预混甲醇实现国 IV 排放[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(6):269-274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150639&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.039.
WEI Lijiang, MA Yan, HAN Guopeng, et al. Realizing national phase IV emission standard of heavy-duty diesel engine by using premixed methanol/diesel dual fuel [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(6):269-274. (in Chinese)
- KHAN M Y, JOHNSON K C, DURBIN T D, et al. Characterization of PM - PEMS for in-use measurements conducted during validation testing for the PM - PEMS measurement allowance program [J]. Atmospheric Environment, 2012,55:311-318.
- 楼狄明,孔德立,强蓄,等. 国 V 柴油机燃用柴油/生物柴油排放性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):25-30. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140905&flag=1 DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.005.
LOU Diming, KONG Deli, QIANG Qiang, et al. Emission experiment on a Chinese V diesel engine fueled with diesel/biodiesel [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):25-30. (in Chinese)
- LIATI A, EGGENSCHWILER P D, GUBLER E M, et al. Investigation of diesel ash particulate matter: a scanning electron microscope and transmission electron microscope study [J]. Atmospheric Environment, 2012,49:391-402.
- 韦雄,冒晓建,祝轲卿,等. 基于机内技术的 DPF 再生控制策略研究[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(11):1-6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131101&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.001.
WEI Xiong, MAO Xiaojian, ZHU Keqing, et al. Control strategy of DPF regeneration based on machine technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):1-6. (in Chinese)
- JANEZ L, MARINA C, ALFREDO S. Modelling soot deposition and monolith regeneration for optimal design of automotive DPFs [J]. Chemical Engineering Science, 2016,151:36-50.
- BERGMANN M, KIRCHNER U, VOGT R, et al. On-road and laboratory investigation of low-level PM emissions of a modern diesel particulate filter equipped diesel passenger car [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(11):1908-1916.
- 资新运,张卫锋,姚广涛,等. 柴油机微粒捕集器复合再生策略的试验研究[J]. 汽车工程,2011,33(7):628-631.
ZI Xinyun, ZHANG Weifeng, YAO Guangtao, et al. An experimental study on the compound regeneration strategy for diesel particulate filter [J]. Automotive Engineering, 2011,33(7):628-631. (in Chinese)
- BAI S Z, TANG J, WANG G H, et al. Soot loading estimation model and passive regeneration characteristics of DPF system for heavy-duty engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2016,100:1292-1298.
- BEATRICE C, IORIO S D, GUIDO C, et al. Detailed characterization of particulate emissions of an automotive catalyzed DPF using actual regeneration strategies [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012,39:45-53.
- STEPIEN Z, ZIEMIANSKI L, ŻAK G, et al. The evaluation of fuel borne catalyst (FBC's) for DPF regeneration [J]. Fuel, 2015,161:278-286.
- BLANCHARD G, SEGUELONG T, MICHELIN J, et al. Ceria-based fuel-borne catalysts for series diesel particulate filter regeneration [C]. SAE Paper 2003-01-0378,2003.
- LEE D W, SUNG J Y, PARK J H, et al. The enhancement of low-temperature combustion of diesel PM through concerted application of FBC and perovskite [J]. Catalysis Today,2010,157(1-4):432-435.
- MAYER A, CZERWINSKI J, BONSAK P, et al. DPF system for high sulfur fuels [C]. SAE Paper 2011-01-0605, 2011.
- BURTSCHER H, MATTER U. Particle formation due to fuel additives [C]. SAE Paper 2000-01-1883, 2000.
- STANMORE B R, BRILHAC J F, GILOT P. The oxidation of soot: a review of experiments, mechanisms and models [J]. Carbon, 2001,39(15):2247-2268.

- 2000, 34(4): 558–560. (in Chinese)
- 10 邓良伟, 蔡昌达, 陈铭铭, 等. 猪场废水厌氧消化液后处理技术研究及工程应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 92–94.
DENG Liangwei, CAI Changda, CHEN Geming, et al. Study and application of technology for post-treatment of anaerobically digested effluent of piggery wastewater [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 92–94. (in Chinese)
- 11 SIEGRIST H. Nitrogen removal from digester supernatant—comparison of chemical and biological methods [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(1): 399–406.
- 12 BAEZA J, GABRIEL D, LAFUENTE J. Improving the nitrogen removal efficiency of an A²/O based WWTP by using an on-line knowledge based expert system [J]. Water Research, 2002, 36(8): 2109–2123.
- 13 OBAJA D, MACE S, COSTA J, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2003, 87(1): 103–111.
- 14 PI K, LI Z, WAN D, et al. Pretreatment of municipal landfill leachate by a combined process [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, 87(3): 191–196.
- 15 OZYONAR F, KARAGOZOGLU B, KOBYA M. Air stripping of ammonia from coke wastewater [J]. Engineering Science & Technology, 2012, 15(2): 85–91.
- 16 MINOCHA V K, RAOA P. Ammonia removal and recovery from urea fertilizer plant waste [J]. Environmental Technology, 1988, 9(7): 655–664.
- 17 BASAKCILARDAN-KABAKCI S, IPEKOGLU A N, TALINLI I. Recovery of ammonia from human urine by stripping and absorption [J]. Environmental Engineering Science, 2007, 24(5): 615–624.
- 18 GUŠTIN S, MARINŠEK-LOGAR R. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89(1): 61–66.
- 19 刘良, 訾海, 陈新颖, 等. 猪粪厌氧消化液两阶段闭式循环氨脱除工艺优化[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 211–216. <http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view-abstract.aspx?file-no=20150930&flag=1>. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.030.
LIU Liang, ZI Hai, CHEN Xinying, et al. Optimization of ammonia stripping process in two-stage air-recirculation for anaerobic digestion of pig manure [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 211–216. (in Chinese)
- 20 刘红, 解茂昭, 韩景东, 等. 黏性液体中锐孔处气泡的形成[J]. 热科学与技术, 2005, 4(3): 262–266.
LIU Hong, XIE Maozhao, HAN Jingdong, et al. Bubble formation from submerged orifice in viscous liquid [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(3): 262–266. (in Chinese)
- 21 BONMATI A, FLOTATS X. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterisation and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion [J]. Waste Management, 2003, 23(3): 261–272.
- 22 SALMINEN E, RINTALA J, HÄRKÖNENJ, et al. Anaerobically digested poultry slaughterhouse wastes as fertiliser in agriculture [J]. Bioresource Technology, 2001, 78(1): 81–88.
- 23 GANIDI N, TYRREL S, CARTMELL E. The effect of organic loading rate on foam initiation during mesophilic anaerobic digestion of municipal wastewater sludge [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(12): 6637–6643.
- 24 SUHARTINI S, HEAVEN S, BANKS C J. Comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of sugar beet pulp: performance, dewaterability and foam control [J]. Bioresource Technology, 2014, 152: 202–211.
- 25 DALMAU J, COMAS J, RODRÍGUEZ-RODAI, et al. Validation of a knowledge-based risk model for biological foaming in anaerobic digestion simulation [C]//Proceedings of the AIAI Workshops, 2009: 322–332.

(上接第 347 页)

- 17 宋崇林, 段家修, 刘文胜, 等. 柴油机排气微粒中有机可溶成分的分离与定性分析[J]. 内燃机学报, 1997, 15(2): 225–230.
SONG Chonglin, DUAN Jiexiu, LIU Wensheng, et al. Separation and identification of soluble organic fraction in diesel exhaust particulates [J]. Transactions of CSICE, 1997, 15(2): 225–230. (in Chinese)
- 18 WILLIAMS P T. Diesel particulate emission; role of unburnt fuel in the organic fraction composition [C]. SAE Paper 870554, 1987.
- 19 王桂华, 王钧效, 张锡朝, 等. 柴油机排气微粒中 SOF 成分的试验研究[J]. 内燃机学报, 2004, 22(2): 110–115.
WANG Guihua, WANG Junxiao, ZHANG Xichao, et al. Experimental study on soluble organic fractions of diesel exhaust particulates [J]. Transactions of CSICE, 2004, 22(2): 110–115. (in Chinese)
- 20 赵洋, 王忠, 刘帅, 等. 废气再循环气体成分对柴油机颗粒结构特征的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 280–285. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view-abstract.aspx?file_no=20150740&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.040.
ZHAO Yang, WANG Zhong, LIU Shuai, et al. Effect of gas composition in exhaust gas recirculation on structural feature of particulates from diesel engine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 280–285. (in Chinese)