

生物柴油调合燃料匹配催化型颗粒物捕集器的排放与再生性能研究

嵇乾¹, 唐程¹, 谈秉乾², 孙平¹, 魏明亮³, 刘少康³

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 无锡恒和环保科技有限公司, 214174, 江苏无锡;
3. 拖拉机动力系统国家重点实验室, 471039, 河南洛阳)

摘要: 以一台非道路增压中冷共轨柴油机为试验对象, 将 $K_{0.2}-Ce_{0.5}Mn_{0.5}O_2$ 催化剂涂覆于柴油机颗粒物捕集器(DPF)的堇青石过滤体上, 探究柴油机催化型颗粒物捕集器(CDPF)对生物柴油调合燃料燃烧污染物排放的影响规律, 并开展了 CDPF 碳烟加载与再生特性的试验研究。试验结果表明, CDPF 能够明显降低纯柴油和生物柴油调合燃料的碳烟和气态污染物排放, 且对调合燃料的排放物降低效果更显著; CDPF 负载催化剂对柴油机气体排放的改善效果受负荷影响较大, 在标定工况下两种测试燃油 NO_x 排放较空白 DPF 时分别降低 17.1% 和 24.3%, HCHO 排放分别降低 35.1% 和 43.6%, CH_3CHO 排放分别降低 28.4% 和 29.9%; DPF 与 CDPF 两者对碳烟的捕集过程均包括深床捕集阶段、过渡阶段和滤饼层捕集三个阶段, 碳烟加载过程中 CDPF 前后压差的升高速率明显低于 DPF; 与纯柴油相比, 柴油机燃用生物柴油调合燃料时 CDPF 的前后压差升高速率有所降低, 再生平衡温度向低温区间偏移, 有利于实现低温再生。

关键词: 柴油机; 生物柴油; 催化型颗粒物捕集器; 排放特性; 颗粒物捕集器再生

中图分类号: TK421.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202204004 **文章编号:** 0253-987X(2022)04-0032-08



OSID 码

Study on Emission and Regeneration Performance of Biodiesel Blended Fuel with Catalyzed Diesel Particulate Filter

JI Qian¹, TANG Cheng¹, TAN Bingqian², SUN Ping¹, WEI Mingliang³, LIU Shaokang³

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Wuxi Henghe EP Tech Co. Ltd., Wuxi, Jiangsu 214174, China; 3. State Key Laboratory of Power System of Tractor, Luoyang, Henan 471039, China)

Abstract: A non-road turbocharged, intercooled and common rail diesel is the test object. In this paper, $K_{0.2}-Ce_{0.5}Mn_{0.5}O_2$ catalyst is applied to the dichroite filter of the diesel particulate filter (DPF), in order to explore the influence law of the catalyzed diesel particulate filter (CDPF) on the pollutants emission from the biodiesel blended fuel combustion. What is more, CDPF carbon black loading and regeneration characteristics are also tested. The test result shows that CDPF could obviously reduce the emissions of carbon black and gaseous pollutants from pure diesel and biodiesel blended fuels, and has a more significant reduction effect on emissions from blended fuels; The effect of CDPF supported catalyst on diesel gas emission is greatly affected by the load. Under the declared working conditions and compared with the blank DPF, the NO_x emissions of the two test fuels are decreased by 17.1% and 24.3%, the HCHO emissions are

收稿日期: 2021-08-31。 作者简介: 嵇乾(1987—),男,硕士,实验师。 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2020 M672133); 拖拉机动力系统国家重点实验室开放课题资助项目(SKT2021004)。

网络出版时间: 2021-12-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20211206.1556.006.html>

decreased by 35.1% and 43.6%, and the CH_3CHO emissions are decreased by 28.4% and 29.9% respectively; Both DPF and CDPF filtration include deep bed filtration stage, transition stage and cake layer stage. During carbon black loading, the increase rate of differential pressure before and after CDPF is significantly lower than that of DPF; Compared with pure diesel, the increase rate of differential pressure before and after CDPF when the diesel burns biodiesel blended fuel is reduced, and the regeneration balance temperature deviates towards the low temperature range, which is conducive to low temperature regeneration.

Keywords: diesel; biodiesel; catalyzed diesel particulate filter; emission characteristics; particulate filter regeneration

生物柴油是以动植物油脂、餐饮废油和微生物油脂等为原料通过脂交换法制备的各种长度不同的长碳链饱和或不饱和脂肪酸甲酯的混合物。与传统燃料相比,生物柴油属于富氧燃料,可使燃烧更加完全,有效减少排放物中的颗粒物(PM)、一氧化碳(CO)和未燃碳氢(HC)的排放量^[1-3]。柴油机颗粒物捕集器(DPF)是控制碳烟颗粒最有效的机外净化技术^[4]。DPF过滤体一般是由陶瓷或堇青石等制成,若将特定的催化剂涂覆在过滤体介质上,则称之为柴油机催化型颗粒物捕集器(CDPF)。要维持DPF的持续高效捕集,就需对DPF内的碳烟进行适时再生,DPF再生是限制其发展的关键因素^[5]。DPF再生技术主要有主动再生和被动再生,其中被动再生是在DPF过滤体内部涂敷催化剂,以降低碳烟燃烧所需的起燃温度,从而实现CDPF低温再生^[6]。

DPF过滤体涂敷催化剂使捕集器中吸附和被氧化的碳烟颗粒物处于相对平衡的状态以获得连续再生的理想状态,同时减少主动再生的次数,提高燃油经济性^[7-9],该技术领域的研究得到了国内外学者的广泛重视。李志军等^[10]通过数值模拟分析CDPF排气参数以及结构参数对碳烟分布的影响。研究表明CDPF捕集的碳烟质量浓度呈现先急剧上升后缓慢减少的特点。陈朝辉等^[11]基于发动机试验台架,探究了碳烟负载量对CDPF再生性能的影响,试验结果表明,CDPF再生过程中会消耗 NO_2 ,当碳载量为 636 g/m^3 时,CDPF后端 NO_2 浓度显著低于前端,其再生效率为93.1%。Andana等^[12]对两种不同催化剂的DPF进行被动再生试验研究,研究表明纳米结构的Ce基复合氧化物作为催化剂,其被动再生碳烟转化率最高达82%。Jeguirim等^[13]研究发现,当再生温度为 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在 O_2 和 NO_2 同时存在的情况下,会发生两种不同的碳氧化反应: NO_2 与碳表面发生直接反应以及 O_2 和 NO_2 的协同反应发生。

由于涂敷有催化剂,CDPF催化氧化能力得到改善,处理后排气中的活性物种数量明显增多,这些活性物种会与柴油机排气中部分污染物发生反应^[14]。本文将从CDPF在柴油机实际排气氛围下燃用生物柴油调合燃料对各类排放污染物的净化效果以及碳烟的加载和再生试验等方面展开试验研究,以期为CDPF在柴油机排放污染物排放控制技术方面的应用提供参考。

1 试验系统和方法

1.1 试验材料

试验柴油为普通市售0#柴油,选用广州富飞化工科技有限公司生产的棕榈油甲酯作为研究用生物柴油,其性状为透明液体,可以任意比例与柴油互溶。对生物柴油进行检测,得到其组分中不饱和脂肪酸甲酯占60%以上,主要以油酸甲酯、棕榈酸甲酯、硬脂酸甲酯为主。将生物柴油和柴油按1:4体积比例充分混合,得到的生物柴油调合燃料记为B20。

DPF过滤体材料对捕集效率以及催化剂活性有一定的影响^[15],本文采用堇青石材质的壁流式蜂窝陶瓷结构DPF过滤体,主要成分分子式为 $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$,制成直径为150 mm,长度为180 mm,孔密度为 31 cm^{-2} ,孔隙率为39%。

本试验所用催化剂是采用柠檬酸溶胶凝胶法制备的铈锰钾复合型催化剂 $\text{K}_{0.2}\text{-Ce}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ 。催化剂涂覆的工艺流程为“制浆-涂覆-干燥-焙烧”:以薄水铝石、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 以及醋酸溶液配制载体浆料,与 $\text{K}_{0.2}\text{-Ce}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ 催化剂按质量比5:1充分混合得到活性浆料,采用浸渍法将所制备的活性浆料涂覆在DPF过滤体上,最后再经过干燥与焙烧完成试验用CDPF的制备。此外,还需使用载体浆料配制同体积的浸渍溶液对空白DPF过滤体进行相同流程的预处理,以消除过滤体状态差异对试验结果的影响。

1.2 试验测试设备

台架试验选用一拖(姜堰)动力机械有限公司生产的 YD4C 型四缸涡轮增压柴油机,该机型满足非道路移动机械用柴油机国Ⅳ排放标准,表 1 为试验用柴油机的主要技术参数。为了研究柴油机燃用纯柴油和 B20 生物柴油调合燃料时的排放特性,须保持试验发动机的工作轨压、喷油时刻、排气背压和出水温度等参数恒定不变。

表 1 试验用柴油机的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the test diesel engine

发动机类型	直列四缸、涡轮增压
喷油系统	高压共轨
缸径×行程/mm×mm	93×102
排量/L	2.771
压缩比	17.5
额定功率/kW	53
标定转速/(r·min ⁻¹)	2 400
最大扭矩/(N·m)	255

台架试验系统主要包括台架测控系统、油耗测量系统和气体排放分析系统。发动机台架测控系统主要包括湖南湘仪动力测试有限公司生产的 CAC250 型号的电力测功机及其配套的 FC2005 测控软件;燃油温控和油耗测量系统选用的是 AVL-753C 燃油温控仪和 AVL-735S 瞬态油耗仪;发动机排气分析系统主要包括奥地利 AVL 公司生产的型号为 AVL-415S 滤纸式烟度计和傅里叶红外光谱气体分析仪(FTIR),发动机台架示意图如图 1 所示。

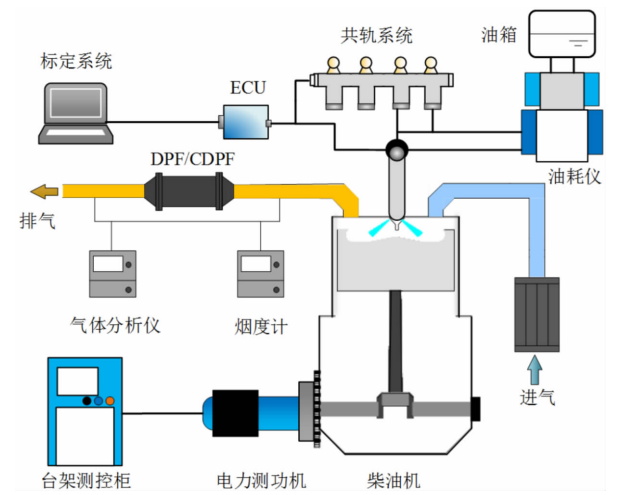


图 1 柴油机台架试验示意图

Fig. 1 Test schematic diagram of diesel engine

1.3 试验方法

试验选择柴油机标定转速 2 400 r/min 下的

25%、50%、75%和 100%负荷作为工况点。试验开始,发动机启动并预热 30 min,控制燃油温度在 38℃左右、出水温度在 80℃左右。试验过程中,为确保数据的准确性,须待柴油机稳定运转 5 min 左右,再测量并记录比油耗、排气温度和污染物排放等数据,同时每组数据记录三次取其平均值。由于油路中的残余燃油会对下组试验产生影响,因此在更换燃油时,将油管用待测燃油清洗,并在柴油机稳定运转 20 min 后再开展后续试验研究。

2 CDPF 对排放特性的影响规律

2.1 烟度排放分析

图 2 所示为柴油机燃用纯柴油和 B20 燃油在标定转速下不同负荷的排气烟度及过滤效率。从图 2 可以看出,两种燃油在原机状态及不同后处理装置后的排气烟度表现出相同的规律,均随着柴油机负荷的增加而上升。在相同工况下,CDPF 对排气烟度的降低效果优于 DPF,由于两种过滤体涂覆浆

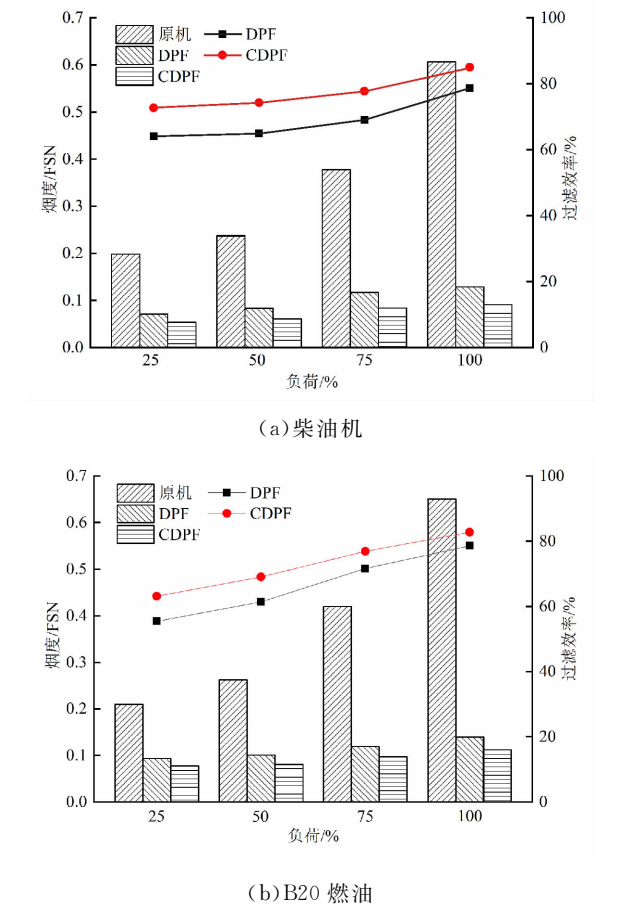


图 2 不同燃油和后处理装置对排气烟度及过滤效率的影响

Fig. 2 Effects of different fuels and aftertreatment devices on smoke emissions and filtration efficiency

料后的物理状态相同,因此碳烟排放过滤效率的变化主要是由 $K_{0.2}-Ce_{0.5}Mn_{0.5}O_2$ 催化剂活性的作用而产生的,催化剂通过表面氧物种的溢流可将柴油机排气中的 NO 氧化为 NO_2 , NO_2 的强氧化性可在较低的温度下与碳烟发生反应生成 CO 和 CO_2 ; 另一方面,在催化剂的作用下 NO 和 NO_2 会以 NO_2^- 和 NO_3^- 物种的形式存储在催化剂表面,进一步增强了碳烟的催化氧化效果^[16]。在 25%、50%、75% 和 100% 负荷下,加装 CDPF 后纯柴油和 B20 两种燃油的排气烟度较原机状态分别下降了 63.1%、69.1%、76.9%、82.8% 以及 72.7%、74.3%、77.8%、85.0%。高负荷下的碳烟排放过滤效率好于低负荷,这是由于随着排气温度的上升,CDPF 上涂覆的 $K_{0.2}-Ce_{0.5}Mn_{0.5}O_2$ 催化剂活性被逐步激发,对碳烟颗粒的氧化效果增强,使得排气烟度显著降低。对比两种燃油的排气烟度在 CDPF 作用下的数值变化,可以看出,CDPF 对 B20 燃油碳烟排放的过滤效率更高,这是因为 B20 燃油碳烟颗粒表面有更多的活性含氧官能团和脂肪族碳氢官能团,且颗粒无序化程度高,拥有更好的氧化活性,更容易在 CDPF 中发生催化氧化反应^[17]。

2.2 NO_x 排放分析

柴油机 NO_x 排放主要包括 NO、 NO_2 、 N_2O 等,其中 NO 约占 NO_x 总排放量的 90% 以上,影响 NO_x 生成的主要因素有燃烧温度、氧含量以及高温火焰的持续时间等^[18]。图 3 为柴油机工作在不同工况下,加装 DPF 或 CDPF 对 NO_x 排放及其相对降低率 R 的影响。 NO_x 排放相对降低率为

$$R = \frac{\varphi(NO_x)_{DPF} - \varphi(NO_x)_{CDPF}}{\varphi(NO_x)_{DPF}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\varphi(NO_x)_{DPF}$ 为 DPF 后 NO_x 体积分数; $\varphi(NO_x)_{CDPF}$ 为 CDPF 后 NO_x 体积分数。

由图 3 可知,相较于 DPF,燃用纯柴油和 B20 燃油在 CDPF 后的 NO_x 排放有所降低;在各负荷下的平均相对降低率分别为 13.8% 和 20.2%;高负荷较中低负荷的 NO_x 排放降低效果更明显,标定转速 100% 负荷工况下相对降低率达到 17.1% 和 24.3%。从试验结果可以看出,CDPF 对 NO_x 排放有一定的净化作用,其过程可以用 C—N—O 中间体机制反应机理来解释:CDPF 涂覆催化剂表面能够吸附 NO 并将其氧化为 NO_2 , NO_2 通过解离生成具有较强氧化性的活性氧 O_{ad} 和物种 NO_{ad} ,而 NO_{ad} 与自由碳 C_f 进一步反应生成 C[N,O] 中间体,这些活性组分间相互发生反应最终生成 CO_2 和 N_2 ^[19-20]。在低

负荷下,柴油机排气温度低于 300 °C,此时催化剂活性不高,加之 CO 和 HC 等气态污染物与 NO 在催化剂活性位上存在竞争吸附关系^[21],这使得在 NO_x 排放中仅有少部分 NO 参与氧化反应,因此 NO_x 排放降幅较小;中高负荷时,NO 向 NO_2 转化率逐渐提升, NO_x 排放下降趋势明显。在各个工况下 B20 燃油的 NO_x 排放均要高于纯柴油,这是因为生物柴油含氧量高,且缸内燃烧高温持续时间长等原因造成的。柴油机燃用 B20 燃油 NO_x 排放相对降低率更高的原因是生物柴油碳烟颗粒表面脂肪族 C—H 官能团、—OH 官能团和—C=O 官能团都明显高于纯柴油,使其更容易发生氧化反应,促进了 soot-NO- O_2 反应的进行。

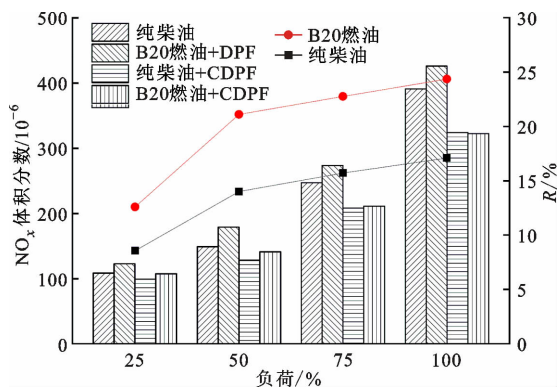


图3 不同燃油和后处理装置对 NO_x 排放及相对降低率的影响

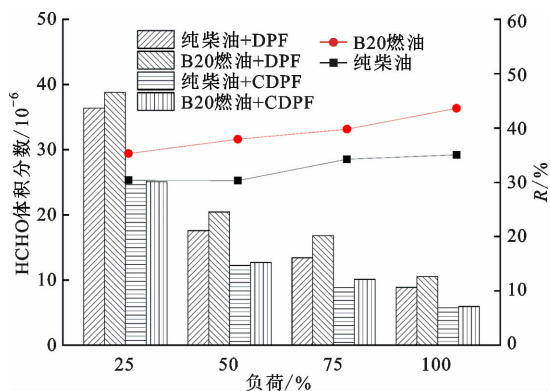
Fig. 3 Effects of different fuels and aftertreatment devices on NO_x emissions and relative reduction rate

2.3 醛类排放分析

柴油机醛类排放物来源于燃料的不完全燃烧,对人的皮肤、眼睛和嗅觉具有很强的刺激性,而生物柴油的化学组分特性和缸内燃烧环境均有利于醛类的生成^[22]。图 4 为柴油机燃用纯柴油和 B20 燃油工作在标定转速下,在 DPF 和 CDPF 后醛类排放及相对降低率随负荷的变化情况。由图 4 可知,随着负荷的增加,柴油机燃用两种试验燃油在不同后处理装置后的 HCHO 和 CH_3CHO 排放均呈下降趋势;后处理装置采用 DPF 时,B20 燃油的醛类排放略高于纯柴油,CDPF 后各油样间醛类排放没有明显区别。生物柴油的主要成分是不饱和脂肪酸甲酯,所含的羟基是醛类的重要来源^[23],发动机的排气温度随负荷的增加而升高,且由于生物柴油是含氧燃料,增加了醛类再次被氧化的几率,使醛类排放大幅下降。

与 DPF 相比,在标定转速的不同负荷下,燃用

纯柴油和 B20 燃油在 CDPF 后的 HCHO 排放降低了 30.4%~35.1% 和 35.3%~43.6%, CH₃CHO 排放也降低了 17.7%~28.4% 和 23.1%~29.9%。CDPF 降低醛类排放原因可归结为: 催化剂使 CDPF 过滤体介质中活性氧物种的数目增多, 催化剂表面不断输送活性氧, 为醛类的氧化提供了良好的环境, 使醛类能够更好的转化为 CO₂ 和 H₂O。



(a) HCHO

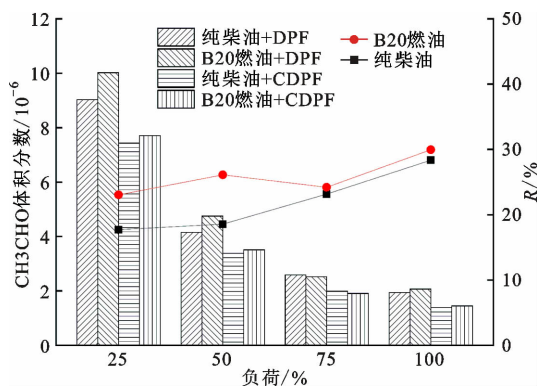
(b) CH₃CHO

图4 不同燃油和后处理装置对醛类排放及相对降低率的影响

Fig. 4 Effects of different fuels and aftertreatment devices on aldehyde emissions and relative reduction rate

3 CDPF 碳烟加载与再生特性

3.1 碳烟加载试验

柴油机燃用纯柴油在同一稳定工况下分别进行 DPF 和 CDPF 的碳烟的加载对比试验, 结果如图 5 所示。试验选择额定转速 2 400 r/min 下的 50% 负荷工况点, 此工况下发动机排气烟度较大且排气温度不高, 有利于碳烟加载试验的进行。通过碳烟加载过程中 DPF 和 CDPF 前后压力差值随时间变化的趋势, 分析不同后处理装置对碳烟的捕集特性。同时, 利用压差大小还可直观反应出碳烟颗粒在过滤体上的堆积量。由图 5 可知, DPF 和 CDPF 对碳

烟颗粒的捕集过程均包括深床捕集、过渡和滤饼层捕集 3 个阶段。在碳烟捕集初期主要捕集方式是深床捕集, 碳烟在碰撞、截留、颗粒扩散和重力沉降等各种力的作用下与深层介质孔道接触并沉积在表面, 在过滤器壁面逐渐形成一层逐渐变厚且细密的滤饼层。当进入滤饼层捕集阶段时, 滤饼层成为过滤碳烟颗粒的主要介质^[24]。随碳烟加载时间的推移, CDPF 前后压差的升高速率明显低于 DPF, 试验结束时两种后处理装置前后压差达到最大值, DPF 为 7.1 kPa, 而 CDPF 只有 4.6 kPa。CDPF 过滤体表面负载的 K_{0.2}-Ce_{0.5}Mn_{0.5}O₂ 催化剂降低了碳烟氧化反应所需活化能^[25], 碳烟起燃温度大大降低, 使部分碳烟可以在较低的排气温度下被氧化, 从而实现了 CDPF 的低温再生, 减缓了碳烟颗粒在孔道内累积的速度。

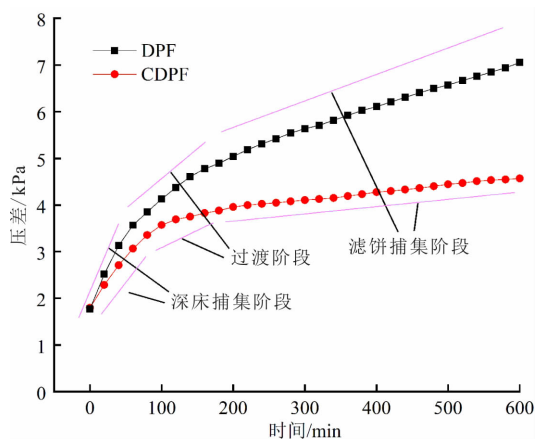


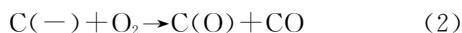
图5 DPF 和 CDPF 碳烟加载过程

Fig. 5 The soot loading process of DPF and CDPF

3.2 CDPF 再生试验

通过不同负荷下 CDPF 前后压差特性的变化, 研究燃用纯柴油和 B20 燃油时 CDPF 的再生特性。试验前将 CDPF 装置置于 800 °C 的马弗炉中加热 30 min 以确保 CDPF 完全再生, 在 2 400 r/min 中等负荷下加载碳烟, 为确保试验准确性, 两组试验碳烟加载量为 (5±0.1) g/L^[26]。转速为 2 400 r/min 时 CDPF 进行再生试验选取的柴油机稳态工况点如表 2 所示, CDPF 完成碳烟加载后, 调整柴油机按顺序和时间要求依次运行各工况。

Haynes 提出的 C(一)活性位点连续消耗和更新机理^[27], 解释了碳烟的氧化过程, 涉及以下反应



式中 C(一)是活性位点, C(O)是含氧官能团, 将进一步发生反应

$$C(O) \rightarrow C(-) + CO, CO_2 \tag{3}$$

$$C(O) + O_2 \rightarrow C(O) + CO, CO_2 \tag{4}$$

一般来说,中低负荷下排气温度和碳烟氧化速率较低,被捕集的碳烟会逐渐堆积在 CDPF 过滤体中,导致压差增大;随着负荷的增加排气温度显著上升,过滤体内碳烟的氧化速率逐渐升高,当碳烟被捕集速率与氧化速率相同时,CDPF 前后压差保持恒定,该状态下的排气温度被定义为再生平衡温度;当排气温度继续升高,碳烟的氧化速率超过被捕集速率,CDPF 前后压差开始减小。再生平衡温度是衡量 CDPF 再生过程的关键参数,也为确定 CDPF 再生时机提供了重要依据。

表 2 DPF 再生试验工况

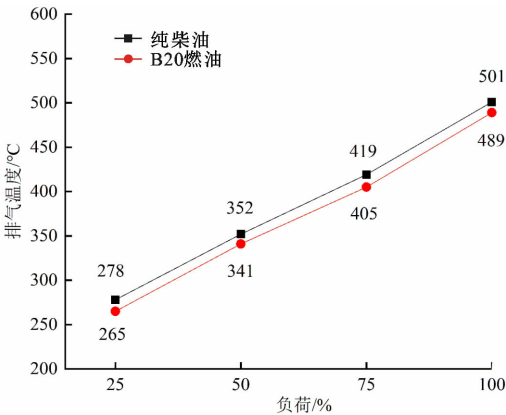
Table 2 The test conditions of DPF regeneration

工况	运行时间/min	扭矩/(N·m)	功率/kW
1	0~60	52.5	13.3
2	60~120	105.0	26.5
3	120~180	157.5	39.8
4	180~240	210.0	53.0

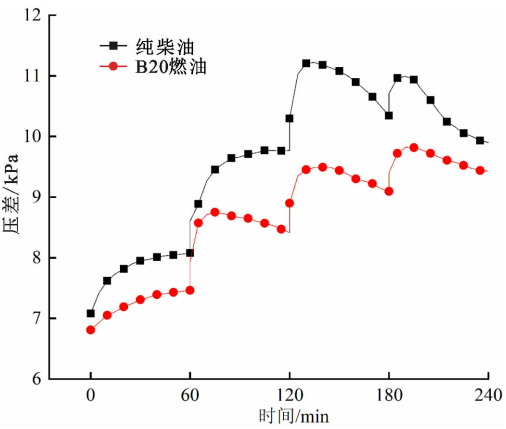
图 6(a)为柴油机燃用纯柴油和 B20 燃油在不同工况下排气温度的变化规律,图 6(b)为不同燃油对应 CDPF 前后压差的变化规律。在工况 1 下,纯柴油和 B20 燃油的排气温度分别为 278 ℃和 265 ℃,CDPF 前后压差随时间推移缓慢上升,由于排气温度和颗粒理化性质的差异,二者的压差升高速率有所差异。在工况 2 下,两种燃油的排气温度分别为 352 ℃和 341 ℃,在这一阶段中,二者的压差呈现不同的规律:纯柴油的压差随着时间的变化逐渐趋于平缓,B20 燃油则开始出现下降趋势。这说明燃用 B20 燃油时 CDPF 的再生平衡温度处于 265~341 ℃之间,而燃用纯柴油时 CDPF 的再生平衡点超过这个温度区间。在工况 3 时,两种燃油的排气温度分别为 419 ℃和 405 ℃,纯柴油的压差曲线开始平稳下降,这说明燃用纯柴油时 CDPF 再生平衡温度处于 352~419 ℃之间。在工况 4 时,两种燃油的排气温度分别为 501 ℃和 489 ℃,在这一阶段发动机达到了 100%负荷,排气流量和排气温度均达到最大值,两种燃油的压差曲线迅速下降,碳烟捕集速率始终低于碳烟氧化速率,CDPF 完全进入到再生模式。

对比同一工况下的两种燃油的试验结果可以发现,柴油机燃用 B20 生物柴油调合燃料时的 CDPF 前后压差升高速率和再生平衡温度都要明显低于纯柴油。这主要是因为:B20 燃油在各个负荷下的碳烟排放都要低于纯柴油,使得 CDPF 过滤体上捕集

的碳烟颗粒明显减少;B20 燃油的 NO_x 排放也要高于纯柴油,而排气中的 NO_x 浓度增加利于碳烟颗粒的氧化再生;B20 燃油的碳烟颗粒氧化活化能低于纯柴油的碳烟颗粒,有利于碳烟的氧化反应。这三方面因素共同影响着两种燃油的 CDPF 前后压差变化规律。



(a) 排气温度



(b) CDPF 前后压差

图 6 不同燃油下 CDPF 的再生特性曲线

Fig. 6 Regeneration characteristic curve of CDPF with different fuels

4 结 论

将具有较强活性的 K_{0.2}-Ce_{0.5}Mn_{0.5}O₂ 催化剂涂覆于 DPF 过滤体上制备出试验用 CDPF,进行柴油机燃用纯柴油和 B20 生物柴油调合燃料经过 CDPF 后的排放规律和再生特性试验研究,主要结论如下。

(1)CDPF 可以降低柴油机燃用纯柴油和 B20 生物柴油调合燃料的碳烟、NO_x、HCHO 和 CH₃CHO 排放,相同工况下对 B20 燃料排放物的改善效果更显著;与 DPF 相比,CDPF 能够进一步降低气态污染物排放,且降低率随负荷的增加趋势更加显著。在标定工况下,柴油机燃用生物柴油调合燃料匹配

CDPF对碳烟排放的过滤效率达85.0%; NO_x 、HCHO和 CH_3CHO 排放较DPF下降了24.3%、43.6%和29.9%。

(2)在碳烟加载过程中,DPF和CDPF对碳烟的捕集均遵循从深床捕集过渡到滤饼层捕集的规律,捕集过程中不同后处理装置前后压差随碳烟的捕集时间呈线型逐渐升高;在催化剂的作用下,CDPF前后压差的升高速率明显低于DPF,碳烟加载试验结束时CDPF前后压差最高比DPF降低了2.5 kPa。

(3)受纯柴油和B20燃料生成碳烟的理化性质差异和排气组分不同等因素影响,柴油机燃用B20生物柴油调合燃料时的CDPF前后压差升高速率和再生平衡温度都要明显低于纯柴油,燃用B20燃油时CDPF的再生平衡温度处于265~341℃之间,而纯柴油的再生平衡温度处于352~419℃之间。

参考文献:

- [1] 陈韬, 谢辉, 吴志新, 等. 车用柴油机燃用生物柴油的排放特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 5972-5977.
CHEN Tao, XIE Hui, WU Zhixin, et al. Emission properties of diesel engine fueled with biodiesel [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(11): 5972-5977.
- [2] 许广举, 李铭迪, 李学智, 等. 不同掺混比例生物柴油的非常规污染物排放特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 227-232.
XU Guangju, LI Mingdi, LI Xuezhi, et al. Characteristics of unregulated emissions from biodiesel fuel with different mixing proportion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 227-232.
- [3] 李莉, 王建昕, 肖建华, 等. 车用柴油机燃用棕榈生物柴油的颗粒物排放特性研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2458-2465.
LI Li, WANG Jianxin, XIAO Jianhua, et al. Particulate emission characteristics of vehicle diesel engine fuelled with palm-oil derived biodiesel [J]. China Environmental Science, 2014, 34(10): 2458-2465.
- [4] MENG Zhongwei, LI Jiansong, FANG Jia, et al. Experimental study on regeneration performance and particle emission characteristics of DPF with different inlet transition sections lengths [J]. Fuel, 2020, 262: 116487.
- [5] 汤东, 刘阳, 刘胜, 等. 柴油机颗粒捕集器热再生的影响因素研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(7): 867-873.
TANG Dong, LIU Yang, LIU Sheng, et al. Study on factors affecting thermal regeneration of diesel particulate filter [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(7): 867-873.
- [6] 张韦, 陈朝辉, 孔孟茜, 等. 柴油机催化型颗粒捕集器喷油助燃再生特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 92-99.
ZHANG Wei, CHEN Zhaohui, KONG Mengxi, et al. Bench test of regeneration characteristics of catalyzed diesel particulate filter based on fuel injection combustion system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(8): 92-99.
- [7] KONG H, YAMAMOTO K. Simulation on soot deposition in in-wall and on-wall catalyzed diesel particulate filters [J]. Catalysis Today, 2019, 332: 89-93.
- [8] 孟忠伟, 秦源, 方嘉, 等. 柴油机颗粒过滤器再生时颗粒层氧化燃烧特性探究[J]. 内燃机工程, 2019, 40(4): 58-63.
MENG Zhongwei, QIN Yuan, FANG Jia, et al. Experimental investigation of combustion characteristics of particulate layers during diesel particulate filter regeneration [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(4): 58-63.
- [9] 黄河, 孙平, 刘军恒, 等. 纳米 CeO_2 催化剂对柴油机碳烟颗粒和NO降低效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 56-60.
HUANG He, SUN Ping, LIU Junheng, et al. Reducing soot and NO emission from diesel engine exhaust catalyzed by nano- CeO_2 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 56-60.
- [10] 李志军, 汪昊, 何丽, 等. 催化型微粒捕集器碳烟分布及其影响因素[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(5): 1466-1474.
LI Zhijun, WANG Hao, HE Li, et al. Soot distribution features and its influence factors in catalytic diesel particulate filter [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(5): 1466-1474.
- [11] 陈朝辉, 张韦, 李泽宏, 等. 柴油机CDPF被动再生特性及机理分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 80-86.
CHEN Zhaohui, ZHANG Wei, LI Zehong, et al. Passive regeneration characteristics and mechanism of CDPF for diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 80-86.
- [12] ANDANA T, PIUMETTI M, BENSALD S, et al. Heterogeneous mechanism of NO_x -assisted soot oxidation

- tion in the passive regeneration of a bench-scale diesel particulate filter catalyzed with nanostructured equimolar ceria-praseodymia [J]. *Applied Catalysis: A General*, 2019, 583: 117136.
- [13] JEGUIRIM M, TSCHAMBER V, BRILHAC J F, et al. Oxidation mechanism of carbon black by NO_2 : effect of water vapour [J]. *Fuel*, 2005, 84(14/15): 1949-1956.
- [14] 朱淑维, 杨丽, 景有志, 等. 碱金属 K 的掺杂对钙钛矿型催化剂 $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{CoO}_3$ 四效催化性能的影响 [J]. *环境工程*, 2018, 36(10): 108-112, 129.
- ZHU Shuwei, YANG Li, JING Youzhi, et al. Effect of alkali metal K doping on four-way catalytic performance of perovskite-type catalyst $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{CoO}_3$ [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(10): 108-112, 129.
- [15] 孟忠伟, 陈超, 秦源, 等. 载体材料对 DPF 再生性能影响的试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2018, 39(3): 53-57.
- MENG Zhongwei, CHEN Chao, QIN Yuan, et al. An experimental study of substrate materials on regeneration performance of DPF [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2018, 39(3): 53-57.
- [16] WU Xiaodong, LIN Fan, XU Haibo, et al. Effects of adsorbed and gaseous NO_x species on catalytic oxidation of diesel soot with MnO_x - CeO_2 mixed oxides [J]. *Applied Catalysis: B Environmental*, 2010, 96(1/2): 101-109.
- [17] 俞瑶, 吕刚, 宋崇林, 等. 氧化反应温度对柴油机颗粒物表面官能团演变的影响 [J]. *燃烧科学与技术*, 2016, 22(1): 37-44.
- YU Yao, LV Gang, SONG Chonglin, et al. Impact of oxidation reaction temperature on surface functional groups transformation of diesel particles [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(1): 37-44.
- [18] 李小昱, 韩鹤友, 王为, 等. 柴油机应用不同配比生物柴油的经济性和排放特性 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 177-182.
- LI Xiaoyu, HAN Heyou, WANG Wei, et al. Economy and emission characteristics of different proportions of biodiesel from diesel engine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5): 177-182.
- [19] GUAN Bin, HUANG Yong, LIN He, et al. Promoting effects of barium substitution on the catalytic performances of $\text{FeCeO}_{2.8}$ for soot oxidation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(26): 8635-8646.
- [20] FINO D, FINO P, SARACCO G, et al. Studies on kinetics and reactions mechanism of $\text{La}_{2-x}\text{K}_x\text{Cu}_{1-y}\text{V}_y\text{O}_4$ layered perovskites for the combined removal of diesel particulate and NO_x [J]. *Applied Catalysis: B Environmental*, 2003, 43(3): 243-259.
- [21] KATARE 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.
- [22] 张学敏, 李芳, 葛蕴珊, 等. 甲醇柴油与生物柴油醛酮类排放物的研究 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 247-251.
- ZHANG Xuemin, LI Fang, GE Yunshan, et al. Research on carbonyl compound emission of methanol-diesel fuel and bio-diesel fuel [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 247-251.
- [23] 楼狄明, 石健, 胡志远, 等. 发动机燃用麻疯树油制生物柴油的非常规排放特性研究 [J]. *内燃机工程*, 2010, 31(5): 69-73.
- LOU Diming, SHI Jian, HU Zhiyuan, et al. Research on unregulated emissions in diesel engine fueled with biodiesel from *jatropha curcas* oil [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2010, 31(5): 69-73.
- [24] CHOI S, OH K C, LEE C B. The effects of filter porosity and flow conditions on soot deposition/oxidation and pressure drop in particulate filters [J]. *Energy*, 2014, 77: 327-337.
- [25] 黄超, 刘军恒, 孙平, 等. K 负载 $\text{Ce}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ 催化剂对柴油机碳烟氧化性能的影响 [J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(3): 781-787.
- HUANG Chao, LIU Junheng, SUN Ping, et al. Effect of K-supported $\text{Ce}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ catalyst on soot combustion performance [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(3): 781-787.
- [26] 张煜, 申立中, 黄粉莲, 等. 不同海拔下柴油机颗粒过滤器碳烟加载及再生特性研究 [J]. *内燃机工程*, 2020, 41(3): 49-55.
- ZHANG Yu, SHEN Lizhong, HUANG Fenlian, et al. Study on soot loading and regeneration characteristics of diesel particulate filter at different altitude levels [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2020, 41(3): 49-55.
- [27] HAYNES B S. A turnover model for carbon reactivity I. development [J]. *Combustion and Flame*, 2001, 126(1/2): 1421-1432.

(编辑 赵炜 杜秀杰)