

柴油/甲醇双燃料发动机耦合后处理系统的排放性能研究

陈旨明¹, 刘军恒¹, 孙平¹, 嵇乾¹, 黄河²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 南京工业职业技术大学交通工程学院, 210046, 南京)

摘要: 为了实现压燃式发动机污染物的超低排放, 在一台高压共轨柴油机上进行柴油/甲醇双燃料燃烧模式耦合后处理系统的排放特性研究。通过调节不同负荷下进气预混甲醇比例, 分析了氧化催化转化器(DOC)、催化型颗粒物捕集器(CDPF)和选择性催化还原催化器(SCR)对柴油/甲醇双燃料发动机污染物排放的影响规律。结果表明: 双燃料模式的排气温度降低, 有效热效率在中低负荷时降低, 在高负荷时增加; 随着甲醇比例的增加, 排气中 CO、HC、NO₂ 和 HCHO 的体积分数增加, $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 显著提高, NO_x 和碳烟的排放量明显降低。后处理系统工作特性受发动机负荷影响较大: 在中低负荷时排气温度低, 后处理系统对 CO、HC 和 HCHO 转换效率较低; 在高负荷时排气温度高, 系统催化活性增强, 各种排放物转换效率也大幅提高。双燃料模式下, DOC 后端氧化升温明显, $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 经 DOC 后显著降低, 而纯柴油模式则呈相反趋势。在不同负荷下: CDPF 对碳烟的平均捕集效率超过 90%; SCR 催化反应降低 NO_x 的同时会导致 N₂O 排放增加, 甲醇的加入可在一定程度上减少 N₂O 生成。研究结果可为实现双燃料燃烧模式的排放控制提供基础数据。

关键词: 双燃料发动机; 排气温度; 后处理系统; 排放特性; 甲醇燃料

中图分类号: TK421+.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202212002 **文章编号:** 0253-987X(2022)12-0012-11

Experimental Study on Emission Characteristics of Diesel/Methanol Dual-Fuel Engine Coupled with an After-Treatment System

CHEN Zhiming¹, LIU Junheng¹, SUN Ping¹, JI Qian¹, HUANG He²

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

2. School of Traffic Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210046, China)

Abstract: This paper investigates the emission characteristics of a high-pressure common-rail diesel engine coupled with an aftertreatment system in the diesel/methanol dual-fuel combustion mode, aiming to achieve ultra-low emissions of compression-ignition engines. The effects of the diesel oxidation catalyst (DOC), catalytic diesel particulate filter (CDPF) and selective catalytic reduction (SCR) on pollutant emissions of the diesel/methanol dual-fuel engine are studied by adjusting the ratio of inlet premixed methanol under different loads. According to the results, the exhaust temperature drops in the dual-fuel mode and the effective thermal efficiency decreases under low and medium loads and increases under high loads. With the increase of methanol ratio,

收稿日期: 2022-04-25。 作者简介: 陈旨明(1998—), 男, 硕士生; 刘军恒(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51806086); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20200142); 江苏省高等学校自然科学研究项目(21KJD470002)。

网络出版时间: 2022-07-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220629.1623.002.html>

the volume fractions of CO, HC, NO₂ and HCHO in exhaust gas increases together with the $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ ratio while NO_x and soot emissions significantly decrease. The after-treatment system is greatly affected by engine loads: Under low and medium loads, the exhaust temperature is low so is the efficiency in the conversion of CO, HC and HCHO; under high loads, the exhaust temperature increases and the catalytic activity in the system is enhanced, leading to remarkable increase in the conversion efficiency of various emissions. In the diesel/methanol dual-fuel combustion mode, there is significant temperature increase at the back end of the DOC and a remarkable drop of the $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ ratio. However, the opposite trend was observed in the diesel combustion mode. The average soot capture efficiency of CDPF is higher than 90% under different loads. The catalytic reaction of SCR leads to the decrease in NO_x and increase in N₂O emissions. However, adding methanol can reduce the formation of N₂O to a certain extent. The research results may provide useful data for realizing emission control in the dual-fuel combustion mode.

Keywords: dual-fuel engine; exhaust temperature; aftertreatment system; emission characteristic; methanol fuel

柴油机因其较高的热效率和可靠的动力性而被广泛应用于交通运输和工程机械^[1]。然而,柴油机排气中的一氧化碳(CO)、碳氢(HC)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)等会对环境造成严重污染并危害人体健康^[2]。随着我国更为严格的排放法规颁布,仅依靠缸内燃烧优化和单一后处理的方式已难以满足更低的排放限值,而高效清洁替代燃料技术耦合多种后处理装置有望实现污染物的超低排放。

甲醇因汽化潜热大、含氧量高、燃烧清洁和具有可再生性等特点,常被用作柴油的替代燃料,甲醇在压燃式发动机上的应用一般以双燃料方式为主^[3-4]。Wei 等研究发现,柴油/甲醇双燃料燃烧可同时降低 NO_x 排放和 PM 数量浓度,打破 NO_x 和碳烟排放之间的 trade-off 关系,并提高发动机燃油经济性^[5]。然而,诸多研究发现,在中低负荷下随着甲醇比例的增加,双燃料发动机经济性变差,CO 和 HC 排放升高,小粒径 PM 数量增多,未燃甲醇(CH₃OH)、甲醛(HCHO)等非常规污染物排放增加^[6]。柴油机氧化催化器(DOC)结合催化型颗粒物捕集器(CDPF)作为针对 PM 机外净化最有效的装置,同时可有效降低 CO 和 HC 排放;选择性催化还原催化器(SCR)利用氨基或烃基还原剂可将排气中的 NO_x 还原为 N₂,是降低 NO_x 排放的主要手段^[7-8]。Nazarpoor 等^[9]研究发现,DOC 可以有效去除排气中的 CO 和 HC 成分,同时可将排气中的部分 NO 转换为 NO₂,促进 CDPF 对碳烟颗粒的净化。闫立冰等^[10]在 DOC 前加装了电磁旁通阀,通过闭环控制调节 SCR 前 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$,发现

$n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 的增加有利于提高 SCR 转化效率。Colombo 等^[11]通过建立详细动力学模型研究发现,NO₂ 的加入可改善低温工况下 SCR 的催化效率,在 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 为 0.5 时催化效果最佳。Liu 等^[12]开展了 PODE/乙醇双燃料发动机耦合 DOC 装置的排放特性试验,结果表明,DOC 可以高效净化双燃料燃烧产生的 HC、CO、甲醛和乙醛,并显著降低 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 。Chen 等^[13]在一台二元燃料(DMDF)发动机上研究了甲醇比例对 DOC/CDPF 系统再生性能的影响,结果表明,DMDF 模式与后处理系统相耦合可显著降低 CO、HC 和醛类排放,并可获得较高的 CDPF 入口温度和 $n(\text{NO}_2)/n(\text{PM})$,使 CDPF 在 DMDF 模式下保持较高的再生水平。因此,深入探讨双燃料燃烧模式与后处理系统的耦合关系,对于实现新型燃烧模式的排放控制具有重要工程价值。

为了更好地探究后处理系统 DOC/CDPF/SCR 对柴油/甲醇双燃料发动机排放特性的影响,本文通过调节进气预混甲醇比例,研究了柴油/甲醇双燃料发动机污染物排放特性,并对比分析了不同负荷下 DOC/CDPF/SCR 系统对污染物排放的转化效率。研究结果可为双燃料发动机耦合后处理系统的进一步优化和高效降低污染物排放提供基础数据。

1 试验系统与方案

1.1 试验台架与设备

试验用发动机为一台四缸增压中冷电控共轨柴油机,主要参数如表 1 所示。对发动机进气道进行

改造加装了一套甲醇喷射系统,采用进气道喷射方式预混甲醇,原机共轨系统控制柴油喷入缸内引燃预混合气。试验用甲醇为 99.9%(质量分数)的无水甲醇,柴油为市售 0 号柴油,含硫量(质量分数)低于 10^{-5} ,两种燃料的主要理化性质如表 2 所示。

表 1 发动机主要参数

Table 1 Main parameters of engine

参数	数值
型式	直列四缸
缸径/mm	95
活塞行程/mm	115
喷油系统	高压共轨
轨压/MPa	140
压缩比	17.5
排量/L	3.26
标定功率/kW	88(2 400 r/min)
最大扭矩/(N·m)	380(1 800 r/min)

柴油/甲醇双燃料发动机台架试验系统如图 1 所示。试验系统主要包括台架测控系统、燃料供给系统和排放测量系统。其中:台架测控系统采用 CAC250 型电力测功机及其自控系统来控制双燃料发动机的运行工况;燃料供给系统采用 AVL-753C 燃油温控仪和 AVL-735C 瞬态油耗仪控制柴油温度

表 2 试验燃料的理化特性

Table 2 Physical and chemical properties of test fuels

理化特性	数值	
	柴油	甲醇
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	835	720~790
十六烷值	55	<5
辛烷值	20~30	107~110
含氧量(质量分数)/%	0	50
低热值/($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	42.6	19.66
汽化潜热/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	250	1 109

和测量柴油油耗,并使用一台 FCM04 醇耗仪测量甲醇消耗量;排放测量系统采用 AVL-415S 滤纸式烟度计、HORIBA MEXA7200D 气体排放分析仪和 AVL-SESAM-FTIR 傅里叶红外光谱分析仪对排气烟度和气体污染物组分进行分析与测量。后处理系统 DOC/CDPF/SCR 布置在发动机排气出口 1 米处的排气管路中,其主要参数如表 3 所示,试验用还原剂为质量分数 32.5%的尿素水溶液,由中国石油天然气集团公司生产。

1.2 试验方案

预混甲醇采用进气道低压喷射,随着发动机进气一起导入气缸,引燃柴油通过原机共轨系统直接喷入气缸。通过平均有效压力(p_{me})衡量发动机转

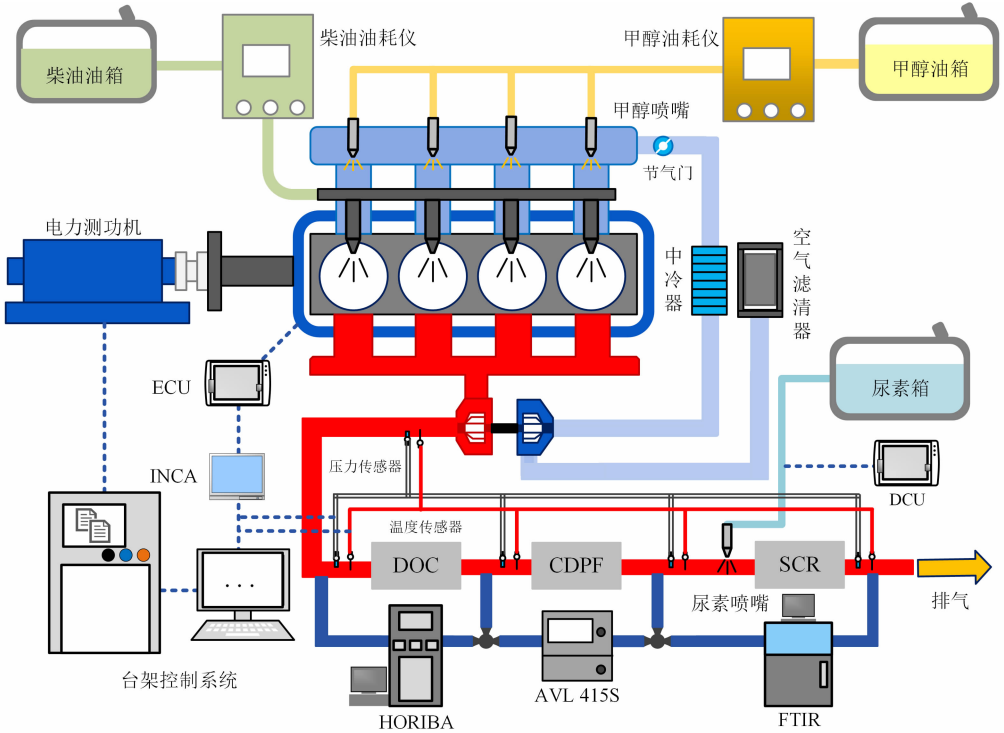


图 1 柴油/甲醇双燃料发动机试验台架结构

Fig. 1 Diesel/methanol dual-fuel engine test system diagram

表 3 后处理系统主要参数

Table 3 Main parameters of after-treatment system

参数	数值		
	DOC	CDPF	SCR
长度/mm	127.0	127.0	101.6
直径/mm	143.8	190.5	190.5
体积/L	2.06	3.62	2.89
孔目数	400	300	400
材质	堇青石	碳化硅	堇青石
催化剂涂层	Pt/Pd	Pt/Pd	Cu-ZSM-5

矩,试验选择原机最大转矩转速 1 800 r/min 下 $p_{me}=0.239,0.528,0.833$ MPa 共 3 个负荷定为中低负荷工况, $p_{me}=1.049$ MPa 为高负荷工况,进行对比研究。试验中,引燃柴油喷射压力和喷射时刻固定不变,进气预混甲醇的喷射压力为 0.6 MPa,依次调节进气道喷入甲醇的热值占缸内燃料燃烧总热值的 0、15%和 30%,在双燃料模式下,控制发动机的输出转矩恒定;根据 SCR 入口的 NO_x 浓度和排气流量确定尿素喷射量,控制尿素计量泵通过非气助式喷嘴将还原剂喷入 SCR 系统,对比分析原机和经过后处理系统催化后的排气污染物变化规律。

甲醇比例(R_M)定义为双燃料发动机每循环进气道喷入的甲醇燃料的热值与此循环下缸内总燃料的热值的比值

$$R_M = \frac{m_M h_M}{m_M h_M + m_D h_D} \times 100\%$$

(1)

式中: R_M 为甲醇比例,%; m_M 和 m_D 分别为甲醇与柴油的燃料消耗率, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; h_M 和 h_D 分别为甲醇与柴油的低热值, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

当量燃油消耗率(b_e)和有效热效率(η_e)常被用于评价双燃料发动机的燃油经济性^[14]。当量燃油消耗率是将双燃料模式下的醇耗量等热值转化为柴油后计算得到的总有效燃油消耗率,有效热效率则是衡量双燃料发动机将化学能转化为机械能的效率,两者计算公式分别为

$$b_e = \frac{m_M h_M + m_D h_D}{P_e h_D}$$

(2)

$$\eta_e = \frac{3.6 P_e h_D}{m_M h_M + m_D h_D} \times 100\%$$

(3)

式中: b_e 为当量燃油消耗率, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; η_e 为有效热效率,%; P_e 为发动机实际功率,kW。

后处理系统对排气污染物的转换效率(A)定义为后处理系统催化前后污染物排放浓度变化与催化前污染物排放浓度之比

$$A = \frac{\varphi_{in} - \varphi_{out}}{\varphi_{in}} \times 100\%$$

(4)

式中: A 为排气污染物的转换效率,%; φ_{in} 和 φ_{out} 分别为后处理系统催化前、后污染物的浓度。

试验开始前,发动机启动并预热 20 min,中冷后进气温度控制在 60 ℃,燃油温度控制在 38 ℃,冷却液水温和机油温度分别控制在 75 ℃和 85 ℃,并在不喷射尿素的情况下让发动机在额定工况下运转 10 min,防止催化器载体上存在吸附态氨而影响试验结果的准确性。

2 试验结果与讨论

2.1 R_M 对发动机经济性的影响

图 2 为在转速 1 800 r/min 时不同负荷下, R_M 对双燃料发动机当量燃油消耗率和有效热效率的影响。可以看出:在中低负荷时,随着 R_M 的增加,当量燃油消耗率增大,有效热效率降低;在高负荷时,呈现相反趋势。在 $p_{me}=0.239$ MPa 下, $R_M=30\%$ 时当量燃油消耗率与 $R_M=0$ 时相比由 $260.17 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 增加至 $291.79 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,有效热效率则从 32.5%降低至 29.1%。在 $p_{me}=1.049$ MPa 下, $R_M=30\%$ 时当量燃油消耗率与 $R_M=0$ 时相比由 $211.08 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 降低至 $202.88 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,有效热效率则从 40.13%增加至 41.75%。

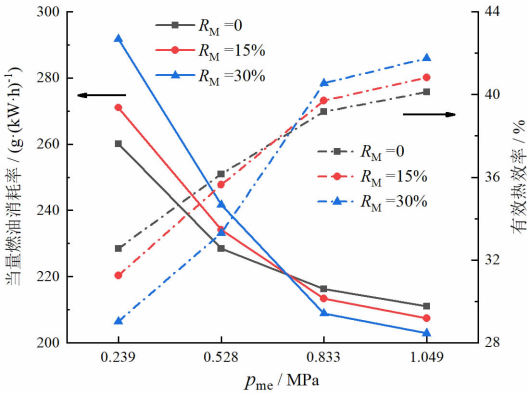


图 2 R_M 对当量燃油消耗率和有效热效率的影响
Fig. 2 Effects of R_M on b_e and η_e for dual-fuel engine

产生上述现象的原因是:在中低负荷时,缸内工质温度低,引燃柴油量少,压燃产生的点火能量较低,火焰传播速度慢导致缸内燃烧不完全;随着 R_M 的增加,甲醇较高的汽化潜热使得缸内温度进一步降低,燃烧恶化导致经济性变差,同时甲醇的十六烷值低和着火性能差对柴油着火起到抑制作用,导致

燃烧相位相对靠后,热功转换效率降低。在高负荷时,缸内温度较高,进气预混甲醇对缸内充量冷却效应减弱,缸内燃烧高温梯度降低使传热损失减小,甲醇蒸发使油气混合更充分且甲醇燃烧火焰传播速度也较快,缸内燃烧等容度得到改善。而且,甲醇含氧量(质量分数)高达 50%,可以有效缓解柴油机扩散燃烧时局部缺氧的问题,促进燃料充分燃烧,因而双燃料发动机热效率提高。

2.2 R_M 对排气温度的影响

图 3 为不同负荷下 R_M 对双燃料发动机后处理系统温度的影响。可以看出:不同部位的排气温度随 R_M 的增加呈下降趋势,在 DOC 前端温度变化趋势更加显著;在 $p_{me}=0.239, 1.049$ MPa 下, $R_M=30\%$ 时 DOC 入口温度与 $R_M=0$ 工况相比分别降低了 28.08℃和 35.42℃。这是由于在中低负荷时进气预混甲醇降低了进气充量温度,使得压缩终点缸内温度降低,且缸内燃料燃烧也不完全。随着 R_M 的增加,排气中的未燃甲醇增多,导致排气温度降低。在高负荷时发动机缸内温度高,致使甲醇冷却效应下降,但甲醇氧化反应路径也简单,燃烧速度快,在上止点处压力升高迅速,接近等容燃烧,高温持续期缩短且后燃比例也降低,导致排气温度下降^[15]。

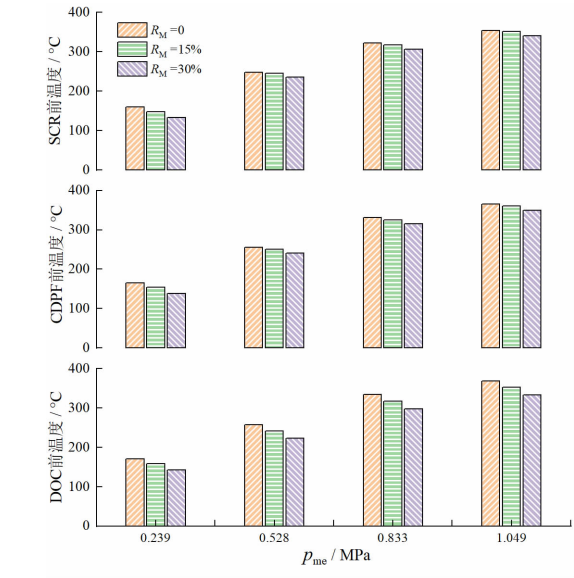


图 3 R_M 对后处理系统温度的影响

Fig. 3 Effects of R_M on the temperature characteristics of the aftertreatment system

在 $R_M=0$ 时,不同负荷下排气温度经过 DOC 后均有所降低,这是因为纯柴油燃烧时排气中的 CO 和 HC 含量低,DOC 氧化反应产生的热量少,不

足以抵消对流换热等因素导致的热损失。在双燃料燃烧模式下,除 $p_{me}=0.239$ MPa 负荷外,DOC 后端氧化升温明显,且升温幅度随着 R_M 增加而增大。这是因为进气预混甲醇使得排气中的 CO 和 HC 含量急剧增加,同时部分未燃甲醇随着扫气排出气缸,经过 DOC 时发生氧化反应产生较多热量导致排气温度的升高。在 $p_{me}=0.239$ MPa 下,因为负荷较小,发动机排气温度低,DOC 入口温度尚未达到催化剂的起燃温度,未能发生氧化反应释放热量。在 DOC 达到正常工作温度时,可以净化排气中绝大部分 CO 和 HC,在多数工况下排气经过 CDPF 时几乎不发生催化反应,因此 CDPF 后端的温度有所下降。

2.3 DOC 对常规气体排放物的影响

图 4 为不同负荷下 DOC 对柴油/甲醇双燃料发动机排气中的 CO 和 HC 体积分数的影响。可以看出:在 $R_M=0$ 的纯柴油模式下,各个负荷的 CO 和 HC 排放很低;随着 R_M 的增加,DOC 前的 CO 和 HC 排放急剧升高,且在中低负荷时增加趋势也更

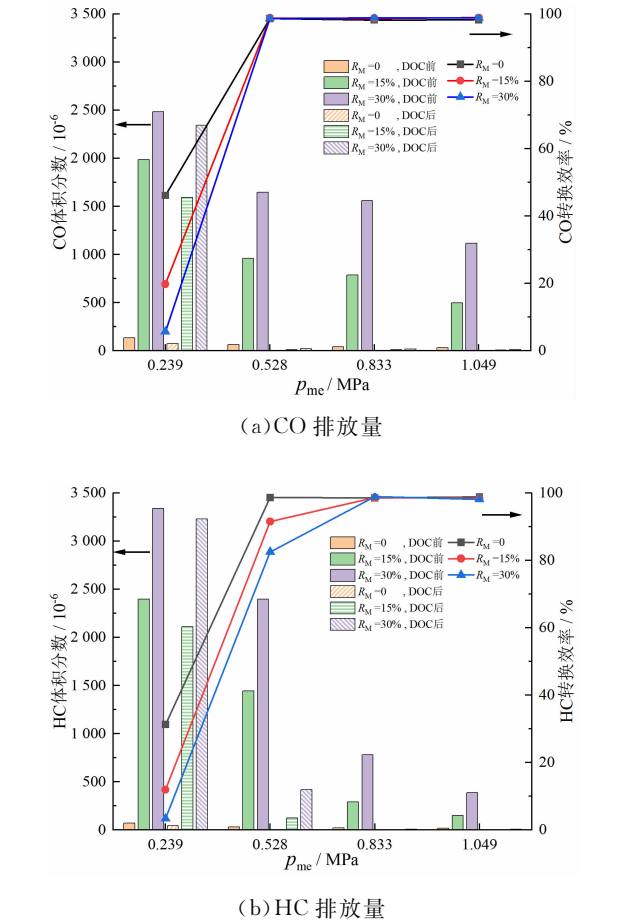


图 4 DOC 对 CO 和 HC 排放量的影响

Fig. 4 Effects of DOC on CO and HC emission for dual-fuel engine

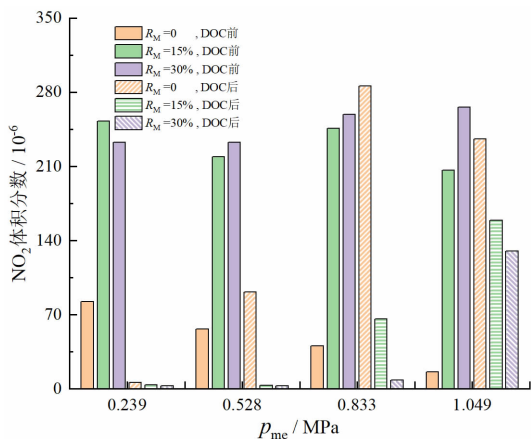
明显。在 $p_{me}=0.239$ MPa 下,与 $R_M=0$ 相比, $R_M=30\%$ 时 DOC 前 CO 和 HC 排放的增幅分别高达 17.61 倍和 46.55 倍。这是因为 CO 和 HC 是双燃料不完全燃烧的产物,进气预混甲醇降低了缸内燃烧温度,且随着 R_M 增加,滞燃期被延长,燃烧始点推迟导致燃烧相位靠后,后燃比例也增加,燃料燃烧并不完全。在小负荷时缸内温度低,这种趋势更明显。随着负荷增大,缸内温度升高,燃料燃烧效率提高,CO 和 HC 排放逐渐降低。

经过 DOC 催化后:在 $p_{me}=0.239$ MPa 下, $R_M=0$ 时的 CO 和 HC 转换效率分别为 46.08% 和 31.28%, $R_M=30\%$ 时的 CO 和 HC 转换效率仅为 5.63% 和 3.32%;在 $p_{me}=1.049$ MPa 时,两种燃烧模式下 DOC 对 CO 和 HC 的转换效率均可达到 98% 以上。这是因为在低负荷时,发动机排气温度低,催化剂活性下降使得 DOC 转换效率降低,双燃料模式下排气温度进一步下降而未能达到 DOC 正常工作温度,导致 CO 和 HC 排放的转化效率极低。随着负荷的增大,排气温度升高,催化剂活性增强使得 CO 和 HC 的转换效率升高。此外,双燃料燃烧时排气中的 NO_2 和 O_2 含量较高,排气处于富氧状态,加强了 DOC 对 CO 和 HC 的催化转换作用。从图 4 还可以看出,随着负荷下降,HC 转换效率逐渐低于 CO。这是因为催化剂受温度影响活性下降,CO 和 HC 在 DOC 中的反应产生竞争关系,而涂覆在 DOC 上的 Pt 催化剂对 CO 的氧化具有优先级,因此 Pd 的氧化活性受到抑制会导致 HC 转换效率低于 CO^[16]。

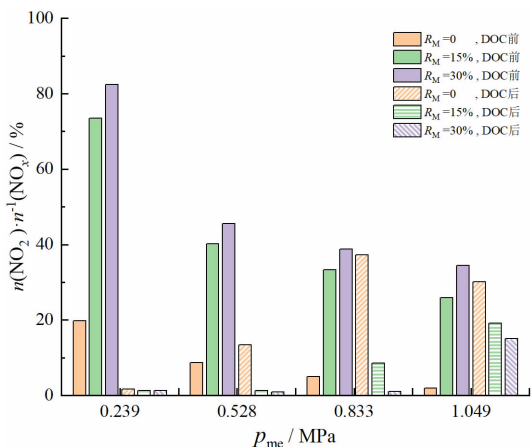
2.4 DOC 对非常规气体排放物的影响

图 5 为不同负荷下 DOC 对柴油/甲醇双燃料发动机排气中的 NO_2 体积分数和 $n(NO_2)/n(NO_x)$ 的影响。从图 5(a) 可以看出,在纯柴油模式下 DOC 前 NO_2 排放随着负荷增加而减小;随着 R_M 增加,双燃料模式的 NO_2 排放急剧升高,在 $p_{me}=0.239$ 和 1.049 MPa 下, $R_M=30\%$ 时 NO_2 排放分别达到了 $R_M=0$ 时的 2.82 倍和 16.35 倍。从图 5(b) 可以看出,随着 R_M 增加, $n(NO_2)/n(NO_x)$ 大幅提高,且低负荷时趋势更明显;在 $p_{me}=0.239$ 和 1.049 MPa 下,与 $R_M=0$ 相比, $R_M=30\%$ 时 $n(NO_2)/n(NO_x)$ 分别增加 62.71% 和 32.48%。

发动机缸内燃烧火焰后区的温度较低,此时生成的 NO 快速转变成 NO_2 ,在纯柴油燃烧时缸内温度高,且高温持续期较长, NO_2 在高温下又转变回 NO,其化学反应式^[17]为



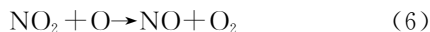
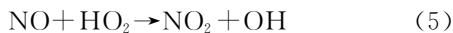
(a) NO_2 排放量



(b) $n(NO_2)/n(NO_x)$

图 5 DOC 对 NO_2 排放量和 $n(NO_2)/n(NO_x)$ 的影响

Fig. 5 Effects of DOC on NO_2 emission and $n(NO_2)/n(NO_x)$ for dual-fuel engine



进气预混甲醇降低了缸内燃烧温度,缸内低温燃烧区域增多, NO_2 向 NO 的转换被抑制。此外,甲醇在氧化过程中会发生脱氢反应生成部分 HO_2 , HO_2 促进了 NO 向 NO_2 的转换^[18]。而且,随着 R_M 的增加,预混甲醇量增多,中低负荷时排气管中存在较多未燃甲醇,NO 在排气管中滞留时间较长,增加了 NO_2 生成量。

经过 DOC 催化后,在中高负荷下 $R_M=0$ 时的 NO_2 排放以及 $n(NO_2)/n(NO_x)$ 显著提高,而双燃料模式在各个负荷下却呈相反趋势。在 $p_{me}=1.049$ MPa 下, $R_M=0$ 时 NO_2 的排放较催化前上升了 13.5 倍, $n(NO_2)/n(NO_x)$ 上升了 28.26%;在 $R_M=30\%$ 时, NO_2 排放较催化前下降了 50.97%, $n(NO_2)/n(NO_x)$ 则下降了 19.39%。这是因为纯

柴油燃烧时,涂覆在 DOC 载体上的 Pt 和 Pd 贵金属活性位上存在较多吸附态氧,排气中的 NO 被氧化为 NO₂,而双燃料模式下,排气中存在大量的 CO 和 HC 物质,它们占据了催化剂中的氧活性位,阻碍了氧化反应的进行。此外,HC 和 CO 具有强还原性,而 NO₂ 作为优异的氧原子来源,相比 O₂,NO₂ 在催化剂表面具有更大的黏附系数,排气经过 DOC 时,发生了式(7)、(8)所示的化学反应,促进了 NO₂ 向 NO 转化^[19]。



在 DOC 催化后,在 $R_M = 0$ 时的 NO₂ 排放和 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 随着负荷的增加呈现先升高后降低的趋势。这是因为 DOC 最佳氧化温度在 350 ℃ 左右,过高或者过低的温度都会导致氧化效果减弱。在中低负荷时,排气温度降低导致氧化反应变慢,NO₂ 生成速率下降;在高负荷时,纯柴油燃烧时排气温度过高,DOC 氧化作用衰减,且此时排气中 NO 浓度较高,Pt 表面会出现饱和现象,NO 与 O 竞争活性位,由于 NO—Pt 不如 O—Pt 结构稳定,富氧状态的排气氛围进一步抑制了 NO 的氧化效率^[20]。在 $p_{\text{me}} = 1.049$ MPa 时,随着 R_M 的增加,双燃料模式下排气温度下降至 NO 最佳氧化反应区间,NO 氧化反应速率加快,因此高负荷时双燃料模式下的排气经过 DOC 催化后 NO₂ 排放和 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 降幅也较小。在 $p_{\text{me}} = 0.239$ MPa 时,排气温度低于 DOC 起燃温度,NO 氧化反应几乎不能进行。同时,由于排气流量较小,催化器空速降低,排气在 DOC 内停留时间较长,导致 HC 和 CO 有充足的时间与 NO₂ 发生反应。因此,两种模式下的排气在小负荷下经过 DOC 后,NO₂ 排放和 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 均会大幅降低。

图 6 为不同负荷下 DOC 对柴油/甲醇双燃料发动机排气中的 HCHO 体积分数的影响。可以看出:纯柴油燃烧时 HCHO 排放较小;随着 R_M 的增大,HCHO 排放大幅升高,且小负荷的趋势更明显。在 $p_{\text{me}} = 0.239$ MPa 下, $R_M = 30\%$ 时的 HCHO 排放是 $R_M = 0$ 时的 13.71 倍。HCHO 是甲醇燃烧的中间产物,中低负荷时缸内温度较低,燃烧室壁面冷激效应增强,近壁面火焰淬熄效应形成淬熄层,导致甲醇氧化不完全。同时,由于甲醇对缸内充量的冷却作用,使得燃烧温度进一步降低,甲醇燃料燃烧不充分导致 HCHO 排放增加。此外,在扫气阶段,部分甲醇预混气被直接排出气缸,而此时排气温度较低,

甲醇无法进一步完全氧化,使得 HCHO 排放增加。高负荷时缸内温度较高,壁面淬熄层厚度小,缸内燃料燃烧充分且排气温度也显著升高,从而导致 HCHO 排放的降低。

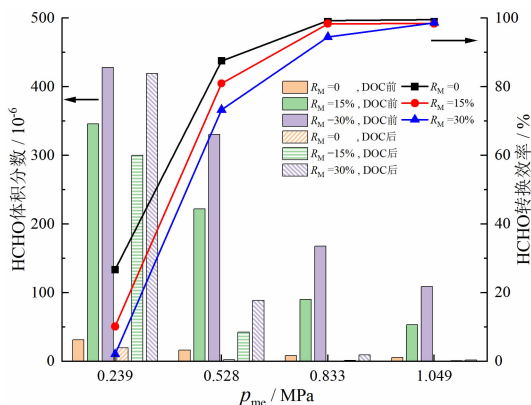


图 6 DOC 对 HCHO 排放量的影响

Fig. 6 Effects of DOC on HCHO emission for dual-fuel engine

在 $p_{\text{me}} = 0.239, 1.049$ MPa 下, $R_M = 0$ 时 DOC 对的 HCHO 转换效率分别为 26.71%、99.54%; $R_M = 30\%$ 时,两者分别为 2.06% 和 98.62%。这是因为:随着发动机负荷增加,排气温度升高,DOC 催化剂活性增强,促进了 HCHO 转换效率的升高;在低负荷时,排气温度较低,且随着 R_M 的增加而下降,DOC 系统未达到正常工作温度。因此,DOC 前后的 HCHO 排放无明显变化。

2.5 CDPF 对碳烟排放量的影响

图 7 为不同负荷下 CDPF 对柴油/甲醇双燃料发动机碳烟排放量的影响。可以看出:随着 R_M 的增加,双燃料发动机的碳烟排放逐渐降低;在 $p_{\text{me}} = 0.239$ MPa 下,与 $R_M = 0$ 相比, $R_M = 30\%$ 时碳烟排放降低了 45.98%;在 $p_{\text{me}} = 1.049$ MPa 时,碳烟排放降低了 36.55%。碳烟是柴油机在高温缺氧氛围下燃料不完全燃烧的产物,随着负荷增加,循环喷油量增多,混合气变浓且分布不均使得局部缺氧严重,烃分子发生部分氧化和热裂解导致多环芳香烃 (PAHs)、乙炔 (C₂H₂) 等碳粒的气相前驱物大量生成,从而导致碳烟排放增加^[21]。然而,甲醇自身不含 C—C 键,燃烧时不易产生不饱和烃,随着 R_M 增加,碳烟前驱体生成数量下降,减少了碳烟来源。同时,甲醇自身含氧且火焰传播速度快,可有效缓解局部缺氧问题。此外,甲醇的加入延长了着火滞燃期,增加了预混燃烧比例,并减少了扩散燃烧数量,最终减少了碳烟的生成。

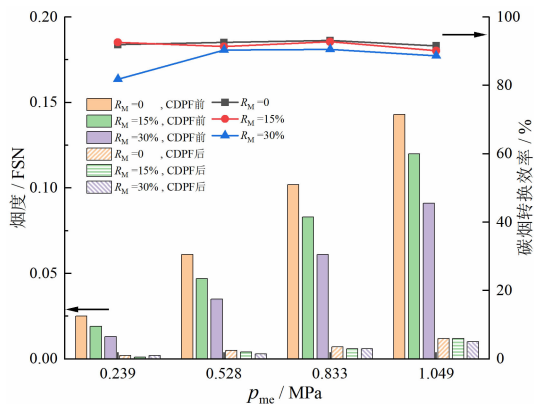


图 7 CDPF 对碳烟排放量的影响

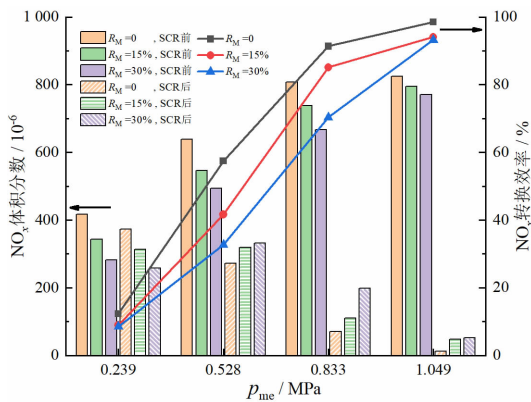
Fig. 7 Effects of CDPF on soot emission for dual-fuel engine

经过 CDPF 后,两种燃烧模式的碳烟排放量均大幅降低,在不同负荷下 CDPF 对碳烟排放的平均净化效率超过了 90%。在 $p_{me} = 0.239$ MPa 下, $R_M = 30\%$ 时的 CDPF 捕集效率降低至 81.82%。这是因为此时负荷小,发动机本身碳烟排放低,经 CDPF 捕集催化后已经接近零排放。CDPF 载体采用壁流式设计对排气中的碳烟颗粒进行拦截捕集,且 CDPF 表面涂覆了一定比例的 Pt 和 Pd 催化剂,可将排气中的部分 NO 氧化为 NO_2 , NO_2 的强氧化性可与碳烟发生反应生成 CO 和 CO_2 ,从而增强对碳烟的催化氧化效果^[22]。由于 CDPF 对碳烟的捕集以物理手段为主,因此几乎不受排气温度的影响,在中低负荷下也能保持较高的净化效率。

2.6 SCR 对 NO_x 排放量的影响

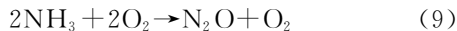
图 8 为不同负荷下 SCR 对柴油/甲醇双燃料发动机排气中的 NO_x 体积分数的影响。可以看出:随着 R_M 的增加, NO_x 排放降低,负荷越低时降低趋势越显著;在 $p_{me} = 0.239, 1.049$ MPa 下, $R_M = 30\%$ 时 NO_x 排放相较于 $R_M = 0$ 时分别降低了 32.22% 和 6.43%。Zeldovich 机理揭示出 NO_x 的生成条件为高温、富氧和高温持续期^[23],因此导致双燃料燃烧 NO_x 排放降低的原因如下:在中低负荷时,进气预混甲醇对缸内充量的冷却效应显著,缸内低温燃烧区域增多,平均燃烧温度下降;在高负荷时,甲醇掺烧使得火焰传播速率加快,高温持续期相应缩短,从而使 NO_x 排放有所降低。

随着负荷增大,SCR 对 NO_x 的转换效率显著提高,且 SCR 对纯柴油模式下 NO_x 的转换效率高干双燃料模式;在 $p_{me} = 1.049$ MPa 下, $R_M = 0$ 时 NO_x 的转换效率可达最高值 98.54%,而 $R_M = 30\%$

图 8 SCR 对 NO_x 排放量的影响Fig. 8 Effects of SCR on NO_x emission for dual-fuel engine

时的转换效率仅为 93.26%。这是因为随着负荷的增大,排气温度升高,使得 SCR 催化剂活性增强,在 $p_{me} = 1.049$ MPa 时,排气温度已处于 SCR 催化反应活性最佳窗口,转换效率也最高,此时 $n(NO_2)/n(NO_x)$ 对转换效率影响较大,在 DOC 的氧化作用下,纯柴油燃烧排气中的 $n(NO_2)/n(NO_x)$ 高于双燃料模式,因此纯柴油下 SCR 对 NO_x 转换效率略高。在 $p_{me} = 0.528, 0.833$ MPa 下, $R_M = 30\%$ 时 NO_x 的转换效率与 $R_M = 0$ 时的相比分别下降了 24.69%, 20.95%;在中等负荷时,随着 R_M 的增加,排气温度进一步下降,负载金属离子的分子筛活性降低,导致催化还原反应速率放缓,尿素的蒸发和热解速率也下降, NH_3 与 NO_x 混合质量较差,导致转换效率的降低。在 $p_{me} = 0.239$ MPa 时,SCR 未达到正常工作温度,催化剂活性受抑制且尿素分解缓慢,因此低负荷时 NO_x 转换效率极低。

N_2O 作为强温室气体,温室效应是 CO_2 的 300 倍,且对臭氧层有极大的破坏作用,因此有必要对 SCR 系统产生的 N_2O 排放进行研究。图 9 为不同负荷下 SCR 对柴油/甲醇双燃料发动机 N_2O 排放量的影响。可以看出,纯柴油燃烧模式下 SCR 前 N_2O 排放处于较低水平,而随着 R_M 的增加, N_2O 生成量增加。经过 SCR 催化反应后, N_2O 大量生成,且随着负荷的增大, N_2O 生成量增多,而随着 R_M 的增加, N_2O 生成量减小;在 $p_{me} = 1.049$ MPa 下, $R_M = 0$ 时排气经过 SCR 催化后 N_2O 生成量达到原机的 33.53 倍, $R_M = 30\%$ 时 N_2O 生成量有所下降,但依然为原机的 12.65 倍。这是因为尿素分解生成的 NH_3 在高温环境下与排气发生如下化学反应^[24]



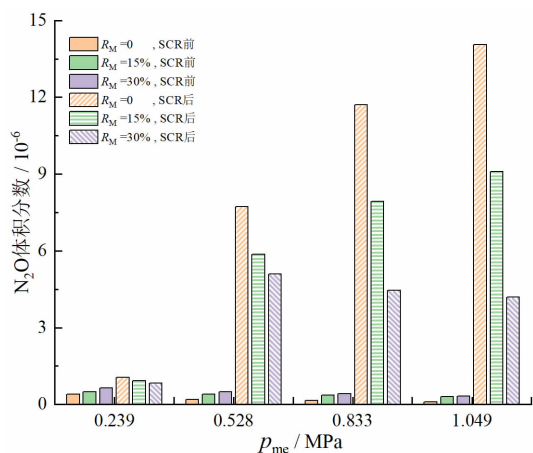
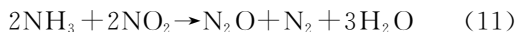
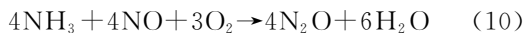


图9 SCR对N₂O排放量的影响

Fig. 9 Effects of SCR on N₂O emission for dual-fuel engine



随着负荷增大,尿素喷射量增加,参与反应的NH₃增多,导致N₂O生成量增加。部分N₂O是快速SCR反应的副产物,因此N₂O的生成也会受到排气中 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 的影响,纯柴油模式的排气经过DOC后 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 高于双燃料模式,导致N₂O生成量增多。随着 R_M 的增加,排气温度下降,NH₃氧化速率放缓,导致N₂O的生成量降低^[25]。然而,随着排气温度进一步下降,作为还原剂的尿素可以生成NH₄NO₃附着在SCR表面,一部分NH₄NO₃会在低温下分解产生N₂O,因此当 $R_M=30\%$ 时,N₂O排放随着负荷减小而逐渐增加^[26]。在 $p_{me}=0.239$ MPa时,由于排气温度过低,SCR催化反应迟缓,且尿素分解速率较慢,N₂O生成受到抑制。

3 结论

(1)随着 R_M 的增加,在中低负荷时双燃料发动机的经济性下降,而在高负荷时有所提高。甲醇的加入使排气温度降低,纯柴油模式下经过DOC后排气温度下降,而双燃料模式下DOC后端氧化升温明显,升温幅度随着 R_M 增加而升高。在两种燃烧模式下,排气温度经过CDPF后均有所下降。

(2)随着 R_M 的增加,双燃料发动机的CO、HC、NO₂和HCHO排放均大幅增加,且 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 也显著增大。DOC转换效率受负荷影响较大,在高负荷时,DOC可以高效净化尾气中CO、HC和HCHO排放,而在低负荷时的净化效率很低。

DOC可以将柴油模式下的NO转化为NO₂,而会显著降低双燃料模式下的 $n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ 。

(3)随着 R_M 的增加,双燃料发动机缸内局部缺氧问题得到缓解,扩散燃烧比例减少,碳烟前驱体生成数下降,双燃料模式的碳烟排放明显低于纯柴油模式,而CDPF捕集效率受到负荷的影响较小,在不同负荷和不同燃烧模式下均可保持较高的净化效率。

(4)随着 R_M 的增加:双燃料发动机的NO_x排放降低;SCR对NO_x的转换效率受负荷影响较大,且SCR对纯柴油模式下NO_x排放转换效率高于双燃料模式;SCR催化反应会导致N₂O排放增加,而甲醇的加入可以在一定程度上的减少N₂O生成。

参考文献:

- [1] 赵玉伟,王小琛,牛天林,等. 掺混聚甲氧基二甲醚对中国第六阶段标准柴油机燃烧与排放特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 28-34.
ZHAO Yuwei, WANG Xiaochen, NIU Tianlin, et al. Effects of PODEn addition on combustion and emission characteristics of a China-VI standard diesel engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 28-34.
- [2] 赵梓钊,刘帅,王忠,等. 重型柴油机燃用改性柴油的排放污染物研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(1): 41-50.
ZHAO Zichuan, LIU Shuai, WANG Zhong, et al. Effects of modified diesel fuels on pollutant emissions from a heavy-duty diesel engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(1): 41-50.
- [3] JIA Zhiqin, DENBRATT I. Experimental investigation into the combustion characteristics of a methanol-diesel heavy duty engine operated in RCCI mode [J]. Fuel, 2018, 226: 745-753.
- [4] 王利军,宋睿智,邹洪波,等. 甲醇柴油双燃料发动机甲醇掺烧比例的正交试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1284-1287.
WANG Lijun, SONG Ruizhi, ZOU Hongbo, et al. Orthogonal test on intake methanol ratio of methanol/diesel dual fuel engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(11): 1284-1287.
- [5] WEI Lijiang, YAO Chunde, WANG Quangang, et al. Combustion and emission characteristics of a turbo-charged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel [J]. Fuel, 2015, 140: 156-163.
- [6] 黄粉莲,田茂盛,万明定,等. 过量空气系数对柴油/

- 甲醇 RCCI 发动机非常规排放特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 52-61.
- HUANG Fenlian, TIAN Maosheng, WAN Mingding, et al. Effects of excess air coefficient on non-regulated emissions of diesel/methanol RCCI engines [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 52-61.
- [7] ZHANG Yunhua, LOU Diming, TAN Piqiang, et al. Experimental study on the particulate matter and nitrogenous compounds from diesel engine retrofitted with DOC+CDPF+SCR [J]. Atmospheric Environment, 2018, 177: 45-53.
- [8] 嵇乾, 唐程, 谈秉乾, 等. 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 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(4): 32-39.
- Ji Qian, TANG Cheng, TAN Bingqian, et al. Study on emission and regeneration performance of biodiesel blended fuel with catalyzed diesel particulate filter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(4): 32-39.
- [9] NAZARPOOR Z, GOLDEN S, LIU Rufen. Development of advanced ultra-low PGM DOC for BS VI DOC+CDPF+SCR system [J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2017, 10(1): 72-77.
- [10] 闫立冰, 任宪丰, 陈文森, 等. 控制排放中 NO_2 体积分数提高 SCR 效率的研究 [J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36(4): 65-69, 79.
- YAN Libing, REN Xianfeng, CHEN Wenmiao, et al. Research of improving SCR efficiency by adjusting NO_2 in exhaust [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2019, 36(4): 65-69, 79.
- [11] COLOMBO M, NOVA I, TRONCONI E. Detailed kinetic modeling of the NH_3 - NO/NO_2 SCR reactions over a commercial Cu-zeolite catalyst for diesel exhausts after treatment [J]. Catalysis Today, 2012, 197(1): 243-255.
- [12] LIU Junheng, YANG Jun, SUN Ping, et al. Compound combustion and pollutant emissions characteristics of a common-rail engine with ethanol homogeneous charge and polyoxymethylene dimethyl ethers injection [J]. Applied Energy, 2019, 239: 1154-1162.
- [13] CHEN Chao, YAO Anren, YAO Chunde, et al. Experimental study of the active and passive regeneration procedures of a diesel particulate filter in a diesel methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2020, 264: 116801.
- [14] LIU Junheng, YAO Anren, YAO Chunde. Effects of injection timing on performance and emissions of a HD diesel engine with DMCC [J]. Fuel, 2014, 134: 107-113.
- [15] CHEN Zhifang, YAO Chunde, WANG Quangang, et al. Study of cylinder-to-cylinder variation in a diesel engine fueled with diesel/methanol dual fuel [J]. Fuel, 2016, 170: 67-76.
- [16] PATTERSON M J, ANGOVE D E, CANT N W. The effect of carbon monoxide on the oxidation of four C_6 to C_8 hydrocarbons over platinum, palladium and rhodium [J]. Applied Catalysis: B Environmental, 2000, 26(1): 47-57.
- [17] 夏琦, 姚春德, 魏立江, 等. 柴油/甲醇组合燃烧发动机的氮氧化物排放研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 345-348.
- XIA Qi, YAO Chunde, WEI Lijiang, et al. Investigation on the nitrogen oxide emission from the diesel engine with DMCC mode [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(2): 345-348.
- [18] 黄永仲. 甲醇柴油双燃料发动机二氧化氮排放后处理方案研究 [J]. 内燃机工程, 2019, 40(4): 72-77.
- HUANG Yongzhong. Research on aftertreatment solution to nitrogen dioxide emissions from a diesel/methanol engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(4): 72-77.
- [19] 刘军恒, 沈辉, 孙平, 等. 乙醇预混与 PODE 直喷复合燃烧的气体排放特性 [J]. 内燃机学报, 2018, 36(3): 208-213.
- LIU Junheng, SHEN Hui, SUN Ping, et al. Gaseous emissions characteristics of ethanol premix and PODE direct injection compound combustion [J]. Transactions of CSICE, 2018, 36(3): 208-213.
- [20] 陈贵升, 和志高, 沈颖刚, 等. 掺混 PODE 对 DOC+CDPF 氧化及再生特性的影响 [J]. 内燃机学报, 2020, 38(1): 64-72.
- CHEN Guisheng, HE Zhigao, SHEN Yinggang, et al. Effect of blending PODE on DOC+CDPF performance of a diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 2020, 38(1): 64-72.
- [21] JIAO Penghao, LI Zhijun, SHEN Boxi, et al. Research of DPF regeneration with NO_x -PM coupled chemical reaction [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 737-745.
- [22] 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.
- [23] PARK S, CHO J, PARK J, et al. Numerical study of the performance and NO_x emission of a diesel-methanol dual-fuel engine using multi-objective Pareto optimization [J]. *Energy*, 2017, 124: 272-283.
- [24] JUNG Y, PYO Y, JANG J, et al. Nitrous oxide in diesel aftertreatment systems including DOC, DPF and urea-SCR [J]. *Fuel*, 2022, 310(Part C): 122453.
- [25] 唐韬, 张俊, 帅石金, 等. 柴油机后处理系统 N_2O 排放特性的试验研究 [J]. *汽车工程*, 2014, 36(10): 1193-1196.
- TANG Tao, ZHANG Jun, SHUAI Shijin, et al. An experimental study on the N_2O emission characteristics of diesel engine aftertreatment system [J]. *Automotive Engineering*, 2014, 36(10): 1193-1196.
- [26] 王磊, 黄志强, 彭程. 国六阶段车用柴油机尾气中 N_2O 排放特性的试验研究 [J]. *内燃机*, 2019(4): 26-30.
- WANG Lei, HUANG Zhiqiang, PENG Cheng. An experimental study on the N_2O emission characteristics of China VI vehicle diesel engine [J]. *Internal Combustion Engines*, 2019(4): 26-30.

(编辑 陶晴 杜秀杰)