

· 低碳内燃动力系统减排技术 ·

甲醇/柴油双燃料发动机超低排放集成控制试验研究

马浩然¹, 刘军恒^{1*}, 嵇乾¹, 魏明亮², 谈秉乾³

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

摘要: 在一台非道路共轨柴油机上增设一套甲醇喷射系统, 实现了甲醇/柴油双燃料燃烧模式, 在非道路国IV排放法规稳态八工况(NRSC)测试条件下, 利用尾气分析仪和 FTIR 对比研究了纯柴油模式和双燃料模式的排放特性, 并系统分析了 DOC+DPF+SCR 后处理系统对双燃料发动机尾气排放的转化效率。试验结果表明: 甲醇/柴油双燃料燃烧模式的 NO_x 和 Soot 排放明显低于纯柴油模式, 而 CO、HC、甲醇和甲醛排放却高于纯柴油模式; 经过后处理系统后, 对 CO 和 HC 排放的转化效率高于 99%, 同时 NO_x 和 Soot 的平均降幅分别为 84% 和 90%, 而双燃料模式的甲醇和甲醛排放能够被高效氧化, 平均净化效率在 90% 以上。NRSC 测试结果表明双燃料发动机加装 DOC+DPF+SCR 后 CO、HC、NO_x 和 PM 比排放指标均低于非道路国IV和欧V排放法规限值。

关键词: 非道路柴油机; 双燃料; 甲醇; 排放特性; 后处理系统

中图分类号: TK421+.5 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2022)05-0010-08

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4585

Experimental Study on Ultra-low Emissions Integrated Control of Diesel/Methanol Dual-fuel Engine

MA Haoran¹, LIU Junheng^{1*}, JI Qian¹, WEI Mingliang², TAN Bingqian³

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

Abstract: A methanol injection system is installed on a non-road common-rail diesel engine to realize the methanol/diesel dual-fuel combustion mode. Based on the non-road China-IV regulation Non-Road Steady Cycle (NRSC) test conditions, the emission characteristics of pure diesel mode and dual-fuel mode were comparative studied by using exhaust gas analyzer and FTIR. And the conversion efficiency of DOC+DPF+SCR post-treatment system on the dual-fuel engine exhaust emissions was systematically analyzed. The results show that the NO_x and Soot emissions of methanol/diesel dual-fuel combustion mode are

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 拖拉机动力系统国家重点实验室开放课题资助项目 (SKT2021004)。

* 通信作者: 刘军恒(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为内燃机排放控制技术。

ORCID: 0000-0002-1977-719X E-mail: liujunheng365@163.com

引用格式: 马浩然, 刘军恒, 嵇乾, 等. 甲醇/柴油双燃料发动机超低排放集成控制试验研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 10-17.

MA Haoran, LIU Junheng, JI Qian, et al. Experimental Study on Ultra-low Emissions Integrated Control of Diesel/Methanol Dual-fuel Engine[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2022, 41(5): 10-17.

significantly lower than those of pure diesel mode, while the CO, HC, methanol and formaldehyde emissions are higher than those of pure diesel mode. After the post-treatment system, the conversion efficiency of CO and HC emissions is higher than 99%. Meanwhile, the conversion efficiency of NO_x and Soot emissions is 84% and 90%, respectively. The methanol and formaldehyde emissions of dual-fuel mode can be oxidized efficiently, and the average efficiency is more than 90%. NRSC test results show that the CO, HC, NO_x and PM specific emission indexes of dual-fuel engine equipped with DOC+DPF+SCR are lower than the limits of non-road China-IV and Euro-V regulations.

Keywords: non-road diesel engine; dual-fuel; methanol; emission characteristics; post-treatment system

压燃式发动机具有热效率高、可靠性好和动力性强等优点,是交通运输、工程机械、农用动力和国防装备的主导动力。然而,传统压燃式发动机燃烧化石燃料产生大量的有害污染物和 CO₂ 排放,这将对绿色低碳社会发展和人类健康产生不利影响,且国内石油资源短缺,严重依赖进口,这也威胁着国家的能源安全。随着排放法规的日趋严格,特别是“双碳”目标的提出,促使内燃机必须在缸内高效燃烧的基础上结合缸外净化技术实现超低排放^[1-3]。

传统压燃式发动机采用缸内高压燃料喷射形成非均匀的混合气进行扩散燃烧,混合气浓度和温度分布都极不均匀,在扩散火焰外壳的高温区产生 NO_x,内部高温缺氧区产生颗粒物(particulate matter, PM),且它们之间存在着 trade-off 关系^[4]。为了突破传统压燃式发动机有害排放和热效率两个界限,研究人员自 20 世纪 90 年代开始探索新一代内燃机高效燃烧方式,其基本思想是通过组织内燃机的油气混合和燃烧过程来提高燃烧效率和热效率^[5-6]。Reitz 等^[7]提出了基于双燃料燃烧的反应控制压燃(reaction controlled compression ignition, RCCI)燃烧模式,利用两种燃料性质截然相反的燃料改变燃油活性而控制燃烧相位,通过燃料活性分层控制放热规律。RCCI 燃烧模式降低 NO_x 和 Soot 排放的原因是避免了缸内混合气高浓度区域与局部高温区域的产生,指示热效率提高得益于传热损失的减少与燃烧相位的有效控制^[8]。Yao 等^[9]提出了柴油/甲醇组合燃烧模式,即进气道喷射低活性燃料甲醇,在进气和压缩行程中与空气充分混合形成均质预混气,由缸内直喷高活性燃料柴油引燃甲

醇预混气。这种燃烧方式兼具稀薄燃烧和低温燃烧的特点,不仅替代了部分柴油燃料,还降低了 NO_x 和 Soot 排放,但 CO、HC、甲醇和甲醛等排放有所上升^[9]。同时,非道路柴油机工作环境更加恶劣,且仅依靠缸内燃烧优化难以实现排放水平的升级,通过集成氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)、颗粒物捕集器(diesel particulate filter, DPF)和选择性催化还原转化器(selective catalytic reduction, SCR)控制尾气排放已成为满足非道路国IV排放法规的技术路径^[10]。胡杰等^[11]研究了加装 DOC+DPF+SCR 集成后处理系统对农用柴油机排放特性的影响,结果表明加装 DOC+CDPF+SCR 后 CO、HC、NO_x、PM 和颗粒数量(particle number, PN)比排放均大幅下降,除 10% 负荷的 HC 排放外,其余排放均低于非道路国IV排放法规限值。Zhang 等^[12]在一台重型柴油机上开展了集成后处理系统(DOC+CDPF+SCR)对燃油经济性和排放特性影响规律的研究,结果表明,加装集成后处理系统对发动机的燃油经济性几乎没有不利影响,同时可将排放水平降至国IV排放法规限值,中高负荷排放水平可降至国V排放法规限值。冯鲁煜等^[13]在一台满足国V排放标准的柴油/甲醇双燃料发动机上系统探究了废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)耦合后处理系统(DOC+POC)对非常规排放特性的影响规律,柴油/甲醇双燃料发动机非常规排放物包括甲醇、甲醛、1,3-丁二烯、苯、甲苯和 SO₂,且以甲醇、甲醛和 SO₂ 为主,其他非常规排放物为痕量水平,经后处理后各项非常规排放净化效率在 99% 以上。

现有研究主要围绕车用发动机甲醇/柴油双燃料燃烧模式以及非道路柴油机的排放性能与控制

技术。然而, DOC+DPF+SCR 后处理技术路线对非道路甲醇/柴油双燃料发动机排放特性的影响规律尚不清楚。此外, 非道路甲醇/柴油双燃料发动机与非道路纯柴油发动机在加装 DOC+DPF+SCR 后处理系统前后的排放水平之间的差异也还未开展研究。因此, 本研究目的是通过台架试验探究 DOC+DPF+SCR 后处理系统对非道路甲醇/柴油双燃料发动机常规排放和非常规排放的影响规律, 并与排放法规限值进行比较, 以探明后处理系统集成控制非道路甲醇/柴油双燃料发动机实现超低排放的潜力。

1 试验装置与方法

1.1 试验设备

本试验基于 1 台四缸增压中冷、高压共轨柴油机, 满足我国非道路第四阶段排放标准, 原机主要参数如表 1 所示。在进气道加装甲醇喷射系统,

以 0.4 MPa 喷射压力向进气歧管内喷射甲醇, 在进气系统中新鲜充量与雾化蒸发的甲醇充分混合进入气缸。在缸内以 160 MPa 喷射压力直喷柴油燃料引燃甲醇预混气, 实现甲醇/柴油双燃料燃烧模式。试验中采用的基础燃料 0#柴油, 满足国 VI 标准; 试验用甲醇燃料为市售分析纯甲醇, 其纯度为 99.9%, 试验燃料的主要物化性质见表 2。

表 1 试验柴油机主要技术参数

型号	LR4A
形式	四缸直列增压中冷
缸径×行程 / mm×mm	105×125
总排量 / L	4.33
压缩比	17.5
额定功率 / kW	83(2200 r·min ⁻¹)
最大扭矩/(N·m)	440(1500 r·min ⁻¹)
喷射系统	电控高压共轨

表 2 甲醇与柴油的理化性质对比

燃料	化学式	密度(20 °C)/(kg·m ⁻³)	低热值/(MJ·kg ⁻¹)	汽化潜热/(kJ·kg ⁻¹)	十六烷值	自燃温度/°C
柴油	C ₁₀ -C ₂₁	0.83-0.86	42.5	270	40~55	220~260
甲醇	CH ₃ OH	0.79	19.7	1109	3	470

图 1 为甲醇/柴油双燃料发动机台架试验系统示意图。台架系统主要由燃料供给系统、发动机测控系统和排放分析系统 3 部分组成。分别采用 AVL735S 瞬态油耗仪和 FCM-04 型醇耗仪测量柴油和甲醇燃料的消耗率; 使用自制的甲醇控制系统控制进气道甲醇喷射, 喷醇时刻依据发动机的转速信号和凸轮轴信号确定, 通过调整甲醇喷射脉宽大

小实现甲醇喷射量的精确控制。试验采用湘仪公司生产的 CAC250 型电力测功机保持发动机的运转工况恒定, 配合 FC2005 测控软件来对发动机运行中的各类参数进行监控和储存。常规排放(CO、HC 和 NO_x)采用 Horiba MEXA-7200D 尾气分析仪测量, 排气烟度采用 AVL 415S 型滤纸式烟度计测量, 非常规排放(甲醇和甲醛)采用 AVL SESAM

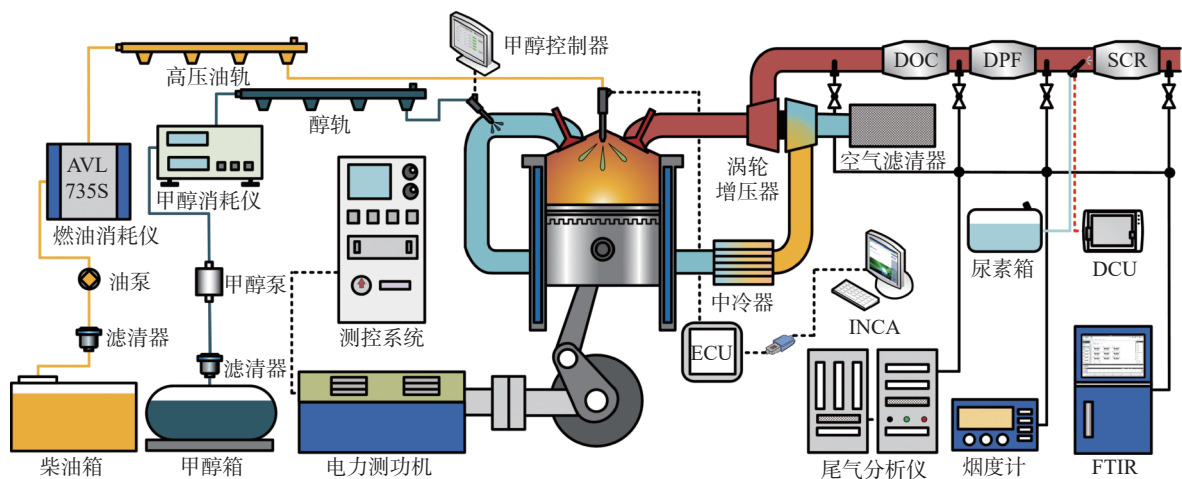


图 1 甲醇/柴油双燃料发动机台架装置示意图

i60FT 傅里叶红外光谱仪 (fourier transform infrared, FTIR) 测量。排放的集成控制采用 DOC+DPF+SCR 后处理系统, SCR 试验使用的还原剂为质量分数 32.5% 的尿素水溶液, 控制尿素计量泵通过非气助式喷嘴将尿素喷入 SCR 系统, 其喷射量根据 SCR 入口的 NO_x 浓度、氨氮比和排气流量计算得出, 其计算公式如下^[14]:

$$\text{AdBlue} = \frac{60 \times M_{\text{exhaust}} \times V_{\text{NO}_x}}{2 \times 1000 \times 0.325 \times 28.9} \times (n(\text{NH}_3) / n(\text{NO}_x)) \quad (1)$$

式中: AdBlue 为尿素喷射量, kg/h; M_{exhaust} 为排气

质量流量, kg/h; V_{NO_x} 为排气中 NO_x 的体积分数, 10^{-6} 。

试验采用的 DOC 使用堇青石作为载体, 涂敷了一定量的 Pt/Pd 贵金属催化剂, 对 CO 和 HC 有较高的净化效率; DPF 使用碳化硅作为载体, 并涂敷了一定量的 Pt/Pd 催化剂, 在一定温度下对 Soot 有较高的捕集效率和再生性能; SCR 也使用了堇青石作为载体, 催化剂采用最为常见的 Cu-ZSM-5 催化剂, 它具有较高的 NO_x 催化效率。DOC+DPF+SCR 后处理系统的主要技术参数见表 3。

表 3 后处理系统主要参数

催化器	长度/cm	直径/cm	体积/L	孔目数/psi	材质	催化剂涂层
DOC	12.7	14.38	2.06	400	堇青石	Pt/Pd
DPF	12.7	19.05	3.62	300	碳化硅	Pt/Pd
SCR	10.16	19.05	2.89	400	堇青石	Cu-ZSM-5

1.2 研究方法

本研究选取的试验工况点为非道路国 IV 排放标准中规定的非道路稳态测试循环 (non-road steady cycle, NRSC) 下的 8 个工况点。试验开始前, 先启动发动机预热 15 min, 控制进气温度为 60 °C, 燃油温度为 40 °C, 冷却水温 and 机油温度分别为 75 和 85 °C。在试验时测功机采用固定转速模式, 发动机先以纯柴油模式在试验工况下运行, 在保证发动机工作平稳和输出扭矩不变的前提下, 减少柴油燃料喷射量, 同时逐渐增加甲醇喷射脉宽从而弥补适量的甲醇燃料, 获得最大甲醇替代率。由于怠速状态下缸内温度低, 喷入甲醇容易导致发动机失火, 因此怠速工况下甲醇替代率为 0。每个工况点保持发动机稳定运行 300 s, 待发动机运转平稳后再记录相关试验数据, 所有试验均进行多次测量并取平均值, 保证试验的可重复性和再现性, 以减少试验误差, 甲醇/柴油双燃料燃烧模式运行的具体试验工况见表 4。

2 试验结果与讨论

2.1 后处理系统对双燃料发动机常规排放的影响

2.1.1 CO 排放

图 2 为在 NRSC 工况下 DOC+DPF 后处理系统对纯柴油模式和双燃料模式的 CO 排放的影

表 4 双燃料燃烧模式试验工况

工况编号	转速/(r·min ⁻¹)	负荷率/%	甲醇替代率/%	排气温度/°C
1	2 200	100	30	337
2	2 200	75	40	320
3	2 200	50	50	289
4	2200	10	20	212
5	1 500	100	30	395
6	1 500	75	40	371
7	1 500	50	60	297
8	750	空载	0	123

响。由图 2 可以看出, 双燃料模式下除第 8 工况点由于发动机在怠速状态下未喷射甲醇外, 其余各个工况的 CO 排放要明显高于原机, 两种模式下的 CO 排放经 DOC+DPF 催化后均降至超低水平; 双燃料模式的 CO 排在 DOC+DPF 后略高于纯柴油模式, 在 NRSC 第 3 工况点两种模式下的 CO 排放分别为 1.4×10^{-7} 和 1×10^{-6} 。这是因为 CO 是含碳燃料不完全燃烧的产物, 双燃料模式下甲醇较高的汽化潜热降低了缸内初始温度, 且随着替代率增加, 缸内整体反应活性降低, 滞燃期被延长, 燃烧相位推迟使得后燃比例增加, 较低的燃烧温度也导致燃料燃烧不完全^[15]。且第 3 工况点为高转速工况, 此时较高的排气流速和甲醇替代率使得排气中的 CO 未能及时氧化, DOC+DPF 催化转换效率略有

下降;因此,第3工况点排气经 DOC+DPF 后 CO 排放较高,但其转化效率依然保持在 99% 以上。

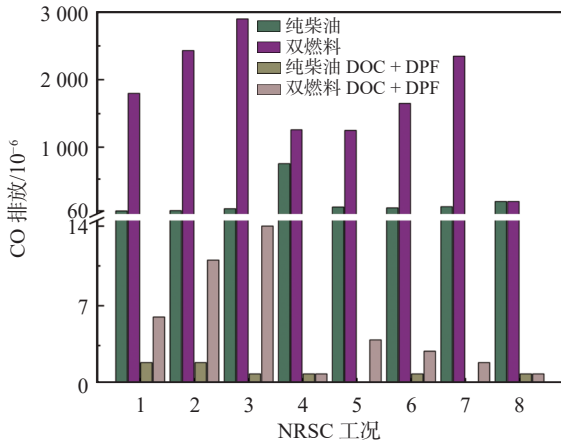


图2 DOC+DPF 对 CO 排放的影响

2.1.2 HC 排放

图3为在 NRSC 工况下 DOC+DPF 后处理系统前后纯柴油模式和双燃料模式的 HC 排放特性。从图中可以看出,甲醇/柴油双燃料模式会产生较多的 HC 排放,但经过 DOC+DPF 催化后两种模式的 HC 排放大幅降低,且催化后双燃料模式下 HC 排放略高于纯柴油模式,在 NRSC 第4工况点下两者 HC 排放达到最大,分别为 2.0×10^{-5} 和 8×10^{-6} 。这主要是由于甲醇的加入降低了缸内初始温度,增强了壁面淬熄效应和狭隙效应;同时,在气门重叠期也会有少量未反应的甲醇预混气被带出^[16]。两种模式下排气中的绝大部分 HC 被 DOC 氧化,DPF 中涂敷的 Pt/Pd 催化剂对 HC 也有一定的催化效果,且大负荷时较高的排气温度有利于提高 DOC+DPF 的催化活性;因此,经后处理器后两种模式的 HC 排放大幅降低。此外,第4工况点为高转速小

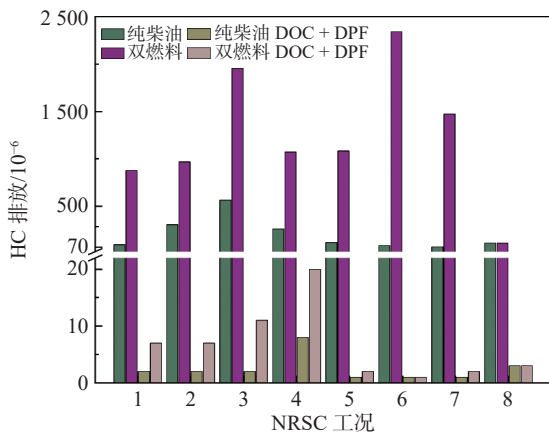


图3 DOC+DPF 对 HC 排放的影响

负荷工况,一方面,较高的转速使得气门重叠期甲醇逃逸的数量增多,在较大排气流速下,部分 HC 在催化器内来不及氧化便被排出;另一方面,小负荷时缸内燃烧温度降低导致燃烧不完全,较低的排气温度也会降低 DOC+DPF 催化活性,此时双燃料模式的 HC 转化效率为 98.1%。

2.1.3 NO_x 排放

图4为 NRSC 工况下 DOC+DPF+SCR 后处理系统前后纯柴油模式和双燃料模式的 NO_x 排放特性。由图4可以看出,各个工况下甲醇/柴油双燃料模式的 NO_x 排放明显低于纯柴油模式。这是因为甲醇高汽化潜热降低缸内整体燃烧温度,燃烧始点推迟延长了柴油燃料与甲醇预混气的混合时间,预混燃烧比例增加,燃烧持续期相应缩短,避免了缸内局部高温区和高温持续时间,从而降低了双燃料发动机的 NO_x 排放^[17]。经过后处理系统后 NO_x 排放平均转化效率为 84%,最高可达 98% 以上,但在 NRSC 第4工况点下双燃料模式的 NO_x 排放略高于纯柴油模式。这是由于 SCR 对 NO_x 的催化转换效率主要受排气温度和催化剂空速的影响,第4工况点下负荷小,且甲醇的加入进一步降低排气温度,涂敷在 SCR 催化剂上的分子筛活性降低导致催化反应速率放缓,较低的排气温度限制了尿素水溶液的蒸发热解,无法在短时间内生成足够的 NH₃ 参与 NO_x 的催化还原反应。同时,过高催化剂空速缩短了 NO_x 在催化器内的催化还原反应时间,也导致喷入排气管内的尿素水溶液来不及发生热解和水解,大量未分解的尿素会阻碍排气在 SCR 多孔介质载体中的流动,降低了 NH₃ 分布均匀性。

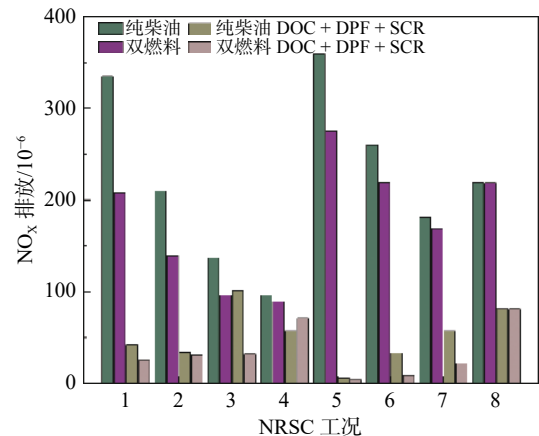


图4 DOC+DPF+SCR 对 NO_x 排放的影响

此外, NH_3 也会通过副反应氧化为 NO , 从而降低了 NO_x 转化效率。

2.1.4 Soot 排放

图 5 为在 NRSC 工况下 DOC+DPF 后处理系统前后纯柴油模式和双燃料模式的 Soot 排放特性。由图 5 可以看出, 在小负荷和怠速时纯柴油模式的 Soot 排放处于较低水平, 这是由于此时缸内燃烧过程中过量空气系数较大的缘故; 但随着负荷增大, 混合气空燃比下降, 虽然总体是富氧燃烧, 然而局部缺氧还是会导致 Soot 生成量的增加。在各个工况下双燃料模式的 Soot 排放均低于纯柴油模式。这是因为甲醇的加入替代了部分柴油燃料, 且甲醇不含 C-C 键, 不利于碳链生成, 且燃料自供氧的特点使得其燃烧时不产生碳烟; 同时, 甲醇的高汽化潜热和低反应活性可推迟燃烧始点, 这提高了柴油和甲醇的混合质量, 预混燃烧量的增加和甲醇较快的火焰传播速度共同减少了 Soot 的生成^[18]。经过后处理系统后, 甲醇/柴油双燃料模式 Soot 排放平均降幅在 90% 以上。这是因为 DPF 载体采用壁流式设计, 排气进入载体后被迫进入过滤壁面, 通过布朗扩散、流动拦截、惯性碰撞和重力沉降机理对排气中的碳烟颗粒进行捕集, 同时 DPF 表面涂覆的少量催化剂也促进了排气中碳烟的氧化, 因此各个工况下 DPF 对碳烟捕集效率均保持在较高水平。

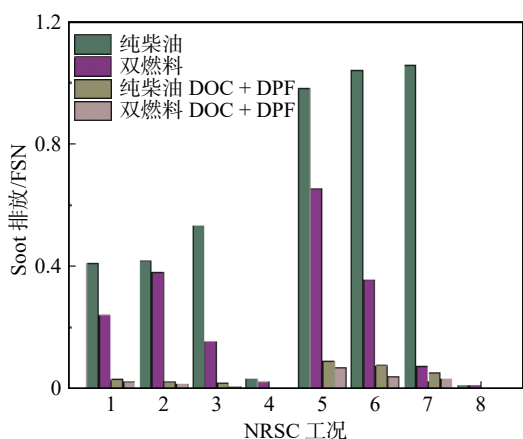


图 5 DOC+DPF 对 Soot 排放的影响

2.2 后处理系统对双燃料发动机非常规排放的影响

2.2.1 甲醇排放

图 6 为在 NRSC 工况下 DOC+DPF 后处理系统前后纯柴油模式和双燃料模式的甲醇排放特

性。由图 6 可以看出, 甲醇/柴油双燃料模式具有较高的甲醇排放, 且大部分甲醇排放可被 DOC+DPF 催化转化, 但在高转速下, 仍有小部分甲醇未能被完全氧化。双燃料模式具有较高甲醇排放的原因是: 换气过程中会有部分未燃甲醇直接进入排气管, 在燃烧过程中有部分甲醇未参与燃烧且燃烧过程中也会生成甲醇分子^[19]。在中高负荷下, 较高的排气温度使 DOC 催化剂处于最高活化窗口, 此时 DOC+DPF 对甲醇的转化效率在 89%~97% 之间。然而, 在第 4 工况点下排气温度较低且排气流速也大, 导致 DOC 催化活性受到抑制, 甲醇在 DOC 内停留时间也短, 甲醇未能完全氧化便被排出, 所以经 DOC+DPF 后其排放依然相对较高。在第 8 工况点双燃料模式的甲醇替代率为 0, 所以甲醇排放并不高。

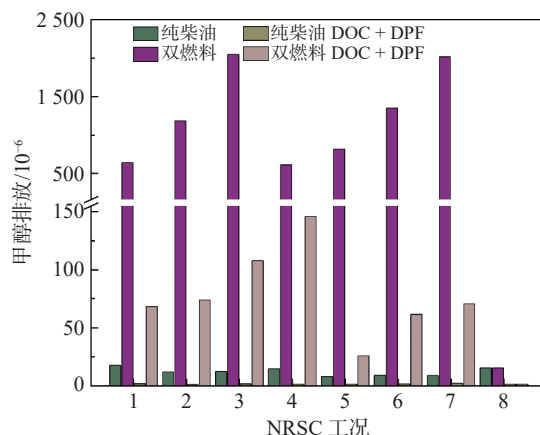


图 6 DOC+DPF 对甲醇排放的影响

2.2.2 甲醛排放

图 7 为在 NRSC 工况下 DOC+DPF 后处理系统前后纯柴油模式和双燃料模式的甲醛排放特性。由图 7 可以看出, 双燃料模式的甲醛排放较纯柴油模式大幅增加, 且随负荷降低甲醛排放逐渐增加。这是因为甲醛主要是由甲醇的不完全氧化反应所生成, 且通常在较低的温度区间 (700~1 000 K) 进行; 随负荷降低, 柴油喷射量减少, 已燃气体温度较低, 大致甲醛大量生成, 且缸内较弱氧化作用不利于甲醛的进一步分解; 排气管中的未燃甲醇因停留时间长和氧浓度高也会缓慢氧化生成甲醛^[20]。经后处理后, 虽然第 4 工况点甲醛的转化效率略有降低, 但整体上其转化效率依然高达 92%, 尤其在低转速工况下甲醛排放转化效率超过

99%。同时,甲醛催化效率受转速的影响较大,随着转速的升高甲醛排放明显升高。这是由于随着转速的提高,排气流速相应提高,较短的氧化时间导致甲醛不能被充分氧化消耗。

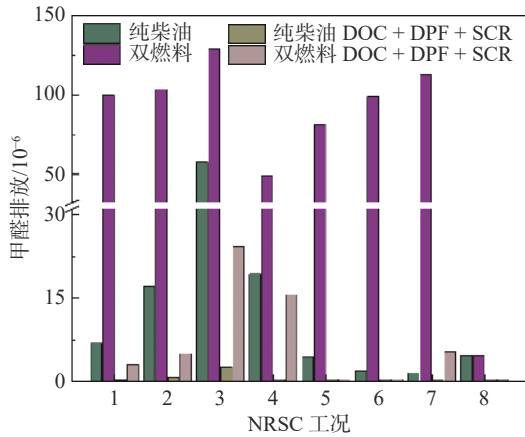


图7 DOC+DPF+SCR对甲醛排放的影响

2.3 NRSC 稳态循环测试结果分析

图8为在NRSC稳态循环测试下加装DOC+DPF+SCR后处理系统前后的纯柴油模式和双燃料模式的CO、HC、NO_x和PM比排放(单位: $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)对比结果。从图中可以看出,甲醇/柴油双燃料模式可以同时降低NO_x和PM的排放,与纯柴油模式相比,PM比排放从0.092下降至0.062,降幅为32.6%,NO_x比排放从2.73下降至1.95,降幅为28.7%。然而与纯柴油模式相比,HC和CO比排放显著增加,HC比排放由2.45上升至4.58,增加了0.87倍,CO排放增幅尤为显著,CO比排放由0.94上升至13.46,增加了13.32倍,可见仅凭机内净化措施已无法满足更严格的排放法规限值。在甲醇/柴油双燃料发动机后加装DOC+DPF+SCR后处理系统可有效降

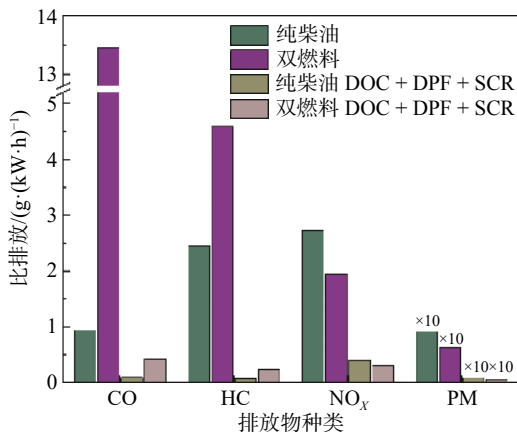


图8 NRSC 稳态循环下排放测试结果

低各项排放,在后处理系统后纯柴油与双燃料模式的PM排放分别降低至0.0084和0.0056,HC排放则分别下降至0.016和0.048,CO排放则分别下降至0.009和0.054,NO_x排放分别下降至0.402和0.303。在两种模式下均满足非道路国IV排放法规限值^[21];但纯柴油模式下NO_x排放高于欧V排放法规限值0.40,而甲醇/柴油双燃料模式能够满足欧V排放法规限值。

3 结论

在一台非道路甲醇/柴油双燃料发动机排气管上加装了DOC+DPF+SCR后处理系统,对比研究了在纯柴油模式和双燃料模式下的常规排放和非常规排放特性,并系统分析了后处理系统对双燃料发动机尾气排放的转化效率,主要研究结论如下所示。

1)与纯柴油模式相比,甲醇/柴油双燃料模式原机的CO和HC排放明显增加,这是由于甲醇的加入降低了缸内初始温度和燃料反应活性,导致燃料不能完全燃烧。在NRSC工况下,DOC+DPF对CO和HC排放的转化效率超过99%,实现了超低排放。

2)与纯柴油模式相比,甲醇/柴油双燃料模式能够同时降低柴油机NO_x和Soot排放,使两者处于较低排放水平。经过后处理系统后,NO_x和Soot的平均降幅分别为84%和90%,但在小负荷时排气温度过低导致NO_x转化效率略有下降。

3)纯柴油模式基本不产生甲醇排放,但会产生甲醛排放;而甲醇/柴油双燃料模式则会产生较高的甲醇和甲醛排放。但经DOC+DPF处理后甲醇和甲醛基本能够被氧化,对甲醇排放的转化效率在89%~97%,而对甲醛的平均转化效率超过92%。

4)NRSC稳态循环测试结果表明,加装DOC+DPF+SCR后处理系统后,两种模式均满足非道路国IV排放标准。但纯柴油模式下NO_x排放略高于欧V排放法规限值,而双燃料模式各项排放指标均满足欧V排放标准。

参 考 文 献

[1] 帅石金,王志,马骁,等. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(4): 417-439.

- [2] YOU J, LIU Z, WANG Z, et al. The exhausted gas recirculation improved brake thermal efficiency and combustion characteristics under different intake throttling conditions of a diesel/natural gas dual fuel engine at low loads[J]. *Fuel*, 2020, 266: 117035.
- [3] MOHIUDDIN K, KWON H, CHOI M, et al. Effect of engine compression ratio, injection timing, and exhaust gas recirculation on gaseous and particle number emissions in a light-duty diesel engine[J]. *Fuel*, 2021, 294: 120547.
- [4] VENUGOPAL I, BALASUBRAMANIAN D, RAJARAJAN A. Potential improvement in conventional diesel combustion mode on a common rail direct injection diesel engine with PODE/WCO blend as a high reactive fuel to achieve effective Soot-NOx trade-off[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 327: 129495.
- [5] KRISHNAMOORTHY M, MALAYALAMURTHI R, HE Z. A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 116: 109404.
- [6] WANG L, LIU J, JI Q, et al. Experimental study on the high load extension of PODE/methanol RCCI combustion mode with optimized injection strategy[J]. *Fuel*, 2022, 314: 122726.
- [7] REITZ R, DURAISAMY G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 46: 12 – 71.
- [8] LI J, YANG W, ZHOU D. Review on the management of RCCI engines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 65 – 79.
- [9] YAO C D, CHEUNG C, CHENG C, et al. Effect of diesel/methanol compound combustion on diesel engine combustion and emission[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 49(6): 1696 – 1704.
- [10] HU J, LIAO J, HU Y, et al. Experimental investigation on emission characteristics of non-road diesel engine equipped with integrated DOC+CDPF+SCR aftertreatment[J]. *Fuel*, 2021, 305: 121586.
- [11] 胡杰, 钟静, 廖健雄, 等. 集成式后处理装置对农用柴油机排放的影响[J]. *内燃机工程*, 2022, 43(1): 18 – 28.
- [12] ZHANG Y, LOU D, TAN P, et al. Experimental study on the particulate matter and nitrogenous compounds from diesel engine retrofitted with DOC+CDPF+SCR[J]. *Fuel*, 2018, 177: 45 – 53.
- [13] 冯鲁煜, 王斌, 危红媛, 等. 满足国五排放标准的柴油甲醇双燃料发动机非常规排放研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(2): 681 – 688.
- [14] 谭旭光, 王天友, 李志杰, 等. 高效清洁高可靠重型柴油机开发关键技术研究[J]. *内燃机学报*, 2020, 38(5): 385 – 391.
- [15] XU C, ZHUANG Y, QIAN Y, et al. Effect on the performance and emissions of methanol/diesel dual-fuel engine with different methanol injection positions[J]. *Fuel*, 2022, 307: 121868.
- [16] WEI L, YAO C, WANG Q, et al. Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel[J]. *Fuel*, 2015, 140: 156-163.
- [17] PARK S, CHO J, PARK J, et al. Numerical study of the performance and NOx emission of a diesel-methanol dual-fuel engine using multi-objective Pareto optimization [J]. *Energy*, 2017, 124: 272 – 283.
- [18] GENG P, YAO C, WEI L, et al. Reduction of PM emissions from a heavy-duty diesel engine with diesel/methanol dual fuel[J]. *Fuel*, 2014, 123: 1 – 11.
- [19] ZHANG Z, CHEUNG C, CHAN T, et al. Experimental investigation of regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with Euro V diesel fuel and fumigation methanol[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(8): 1054 – 1061.
- [20] ZHANG Z, CHEUNG C, CHAN T, et al. Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel/methanol compound combustion engine with and without diesel oxidation catalyst[J]. *Science of The Total Environment*, 2010, 408(4): 865 – 872.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. GB 20891—2014: 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第三、四阶段)[S]. 北京: 中国科学环境出版社, 2014.