

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.10.008

基于国 VI 柴油机后处理系统综合性能试验研究

程晓章, 刘凡, 张子涵, 管金彪, 王涛

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为了研究柴油机后处理系统性能,文章搭建基于国 VI 标准下的柴油机后处理试验台架,采用柴油机氧化催化器(diesel oxidation catalyst,DOC)+柴油颗粒捕集器(diesel particulate filter,DPF)+选择性催化还原(selective catalytic reduction,SCR)+氨氧化催化器(ammonia slip catalyst,ASC)后处理技术路线进行试验。首先校对后处理台架中的温度和氮氧化物(NO_x)传感器偏差,提升试验的精确性;然后通过试验研究发动机动力性能与排放性能之间的关系,分析在一定废气流量下温度、氨(NH_3)存储量和 NO_x 转化率之间的关系;最后探究 DPF 载体涂敷层对后处理性能的影响。结果表明:发动机在最大转矩点,排气温度、油耗率达到最大,排放性能较差; NO_x 转化率随着 NH_3 存储量的增加而增加, NH_3 存储量随着温度的增加而降低;载体涂敷碱金属涂层后对发动机排放性能的影响较小。

关键词:后处理系统;发动机动力性; NO_x 转化率; NH_3 存储量;涂敷层

中图分类号:TK421.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)10-1349-07

Comprehensive performance test of diesel engine aftertreatment system based on China VI standard

CHENG Xiaozhang, LIU Fan, ZHANG Zihan, GUAN Jinbiao, WANG Tao

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the performance of the diesel engine aftertreatment system, this paper builds a diesel engine aftertreatment test bench based on China VI standard, and adopts the aftertreatment technology route with diesel oxidation catalyst(DOC), diesel particulate filter(DPF), selective catalytic reduction(SCR) and ammonia slip catalyst(ASC). The test first corrected the temperature and NO_x sensor deviation in the aftertreatment bench, which improved the accuracy of the test. Then, the relationship between engine power and emission performance was explored through experiments, and the relationship between temperature, NH_3 storage capacity and NO_x conversion rate at a certain exhaust gas flow was studied. The results show that when the engine is at the maximum torque point, the exhaust gas temperature and fuel consumption rate reach the maximum, and the emission performance is poor; the NO_x conversion rate increases with the increase of NH_3 storage, and the NH_3 storage decreases with the increase of temperature. In addition, the influence of the DPF carrier coating on the aftertreatment performance was explored, and it is shown that the carrier with an alkali metal coating has little effect on the engine emission performance.

Key words: aftertreatment system; engine power performance; NO_x conversion rate; NH_3 storage capacity; coating

当前,随着全球各国对能源以及环境问题的日益关注,面对汽车尾气这一污染源,各国政府制

定了相应的排放法规。在中国,号称史上最严的国 VI 排放法规于 2020 年 7 月 1 日正式实施。

收稿日期:2022-05-10;修回日期:2022-05-23

基金项目:合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2018JSKF0594)

作者简介:程晓章(1966—),男,安徽安庆人,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

国 VI 排放法规的实施也给柴油机后处理系统带来了新的挑战,柴油机排放的主要污染物为颗粒物(particulate matter, PM)和氮氧化物(NO_x),若柴油机只使用缸内燃烧等机内净化技术来降低污染物排放,则很难达到国 VI 排放法规标准。因此,只有使用高效的尾气处理技术,才能满足新的排放标准要求^[1]。

目前国内外比较成熟且得到广泛应用的后处理技术路线为柴油机氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)+柴油颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)+选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)+氨氧化催化器(ammonia slip catalyst, ASC)。DOC 主要通过吸附废气中的 CO、碳氢化合物(HC)和 NO,将 CO 和 HC 氧化成 CO_2 和 H_2O ,并把 NO 氧化成 NO_2 ,方便后续处理;DPF 通过内部的颗粒过滤装置,收集排气中的颗粒物,在颗粒物收集达到一定程度时,进行 DPF 再生^[2];SCR 通过在柴油机排气中喷入尿素水溶液产生氨(NH_3), NH_3 与尾气中的 NO_x 进行反应,将 NO_x 转化为 N_2 和 H_2O 排出;ASC 是将 NO_x 还原反应中过量的 NH_3 转化为 N_2 等气体^[3]。

本文搭建柴油机后处理试验台架,对台架中温度、 NO_x 传感器偏差进行校对,研究发动机动力性能与排放性能之间的关系,分析在一定废气流量下温度、 NH_3 存储量和 NO_x 转化率之间的关系,并对 DPF 载体涂敷层对于排放性能的影响进行探究,此外还进行了尿素结晶试验和稳态温损试验。

1 后处理系统模型

1.1 DOC 和 DPF 系统模型

DOC 主要是氧化尾气中的未燃 HC、CO,将其转化为 CO_2 和 H_2O ,同时将尾气中含量较多的 NO 氧化为 NO_2 ,再通过 DPF 进入 SCR 系统进行处理。

DPF 是通过交叉堵孔结构来过滤尾气中的颗粒物 PM,PM 捕集到一定程度需要进行 DPF 再生,降低 DPF 中的积碳^[4]。

DPF 再生包括主动再生和被动再生,其中,DPF 主动再生能够有效降低 PM 排放,通过缸内后喷等方式来增加尾气中未燃 HC 的量,经过 DOC 氧化,提升排气温度,使沉积在 DPF 上 PM 被氧化燃烧。

DOC 和 DPF 系统结构示意图如图 1 所示。

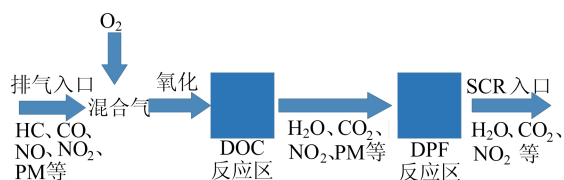


图 1 DOC 和 DPF 系统结构示意图

1.2 SCR 系统模型

SCR 系统主要由电控系统、尿素存储喷射系统、混合器、上下游排气温度传感器以及 NO_x 传感器等装置构成,其结构示意图如图 2 所示。在 SCR 系统中,质量分数为 32.5% 的尿素水溶液由尿素喷嘴喷入排气管中,并在里面发生热解水解反应,生成的 NH_3 与 NO_x 发生氧化还原反应,产生对环境友好的 N_2 和 H_2O ^[5]。

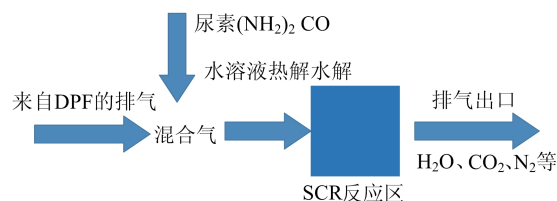
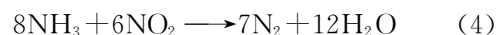
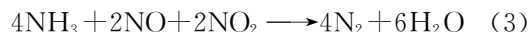
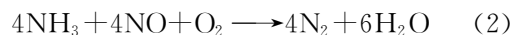


图 2 SCR 系统结构示意图

1.3 催化器载体化学反应

在 SCR 催化器载体表面发生以下化学反应:



反应式(1)表示异氰酸在催化剂表面水解产生 NH_3 和 CO_2 。因为在不采用废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)技术的条件下,柴油机排气中 90% 以上的 NO_x 是以 NO 的形式存在,所以在 SCR 反应过程中以反应式(2)为主,故式(2)被称为标准 SCR 反应。反应式(3)被称为 SCR 的快速反应,在低温条件下,式(3)的反应速率是式(2)的 17 倍,故而称之为快速反应。排气中 NO_2 的摩尔分数不足 10%,且 2 mol 的 NO_2 需要 4 mol 的 NH_3 才能反应完全,因此反应式(4)被称为慢速反应。

2 试验系统

2.1 台架搭建

试验用发动机为某公司生产的 4B5-70U32 型国 VI 高压共轨柴油发动机,发动机进气方式为增压中冷,参数见表 1 所列,试验所需的仪器仪表设备见表 2 所列。集成式后处理系统参数见表 3

所列。其中,尺寸为装置截面的长×宽,单位 dm。

表 1 4B5-70U32 型发动机参数

参数	数值
排量/L	2.84
额定功率/kW	51.5
额定转速/(r/min)	2 400
最大扭矩/(N·m)	240~252
最大扭矩转速/(r/min)	1 600~1 800
怠速转速/(r/min)	800

表 2 检验用仪器设备

设备名称	设备型号
电力测功机	1PH8228
AVL 质量流量计	7351CST
空气流量计	TOCEIL20N150
439 不透光烟度计	4390G004
油耗仪	RHK200
AVL AMA I60	AMAI60

表 3 后处理结构参数

参数	DPF	DOC	SCR+ASC
尺寸	7.50×6.00	5.66×6.00	7.50×8.00
规格	9/300	4/400	3/600
Pt 与 Pd 质量比	3 : 1	12 : 1	1 : 0
涂敷密度/(g/cft)	25	3	3
体积/L	4.5	2.5	5.8

在试验中心搭建发动机台架,台架采用集成式后处理系统,分别如图 3、图 4 所示。试验环境参数见表 4 所列。

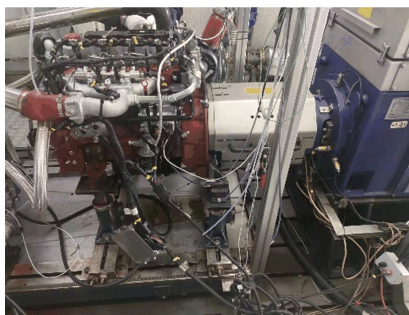


图 3 发动机试验台架

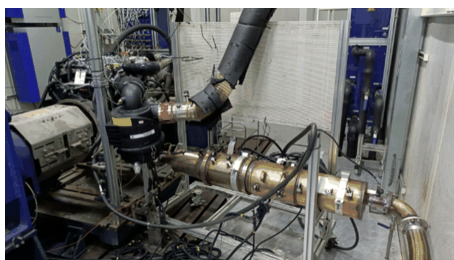


图 4 后处理集成系统

表 4 试验环境参数

参数	数值
试验环境温度/°C	25.0
进气温度/K	295.5
相对湿度/%	48.5
进气总压/kPa	100.8

2.2 后处理传感器打点布置

按照试验要求,需要对集成式后处理系统打孔,在孔上安装压力、温度和 NO_x 体积分数传感器以及采样接头,方便后续试验。传感器打点布置示意图如图 5 所示。

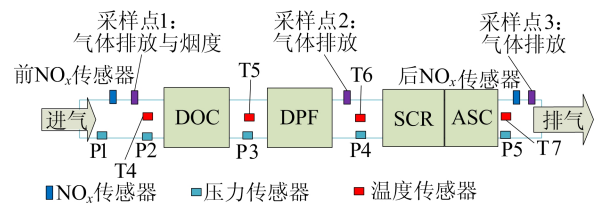


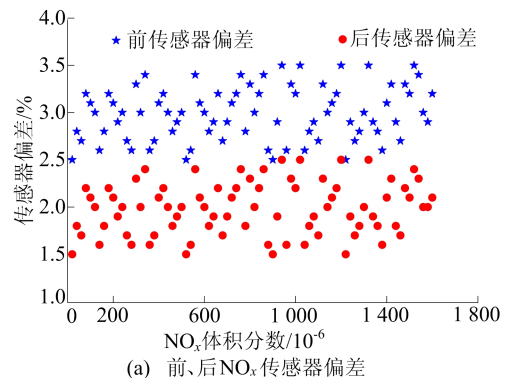
图 5 后处理传感器打点布置示意图

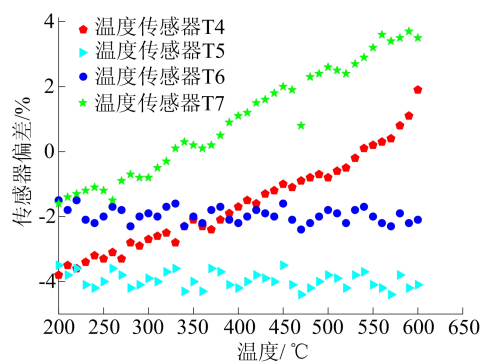
3 试验内容

3.1 传感器校对

对于柴油机后处理系统而言,各个后处理装置后的排气温度、NO_x 体积分数都是试验测试的重要内容。传感器数值的准确与否影响了试验的精度,同时传感器的安装不能对气流的通过产生阻碍,因此需要对传感器进行校对,减少数值偏差,保证试验的准确性。后处理温度传感器以及前、后 NO_x 传感器校对结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,前、后 NO_x 传感器偏差分布比较均匀,前、后 NO_x 传感器偏差分别分布在 +3%、+2% 左右,NO_x 传感器误差都在允许偏差(±5%)以内,符合试验要求。





(b) 后处理系统温度传感器偏差

图 6 后处理传感器偏差

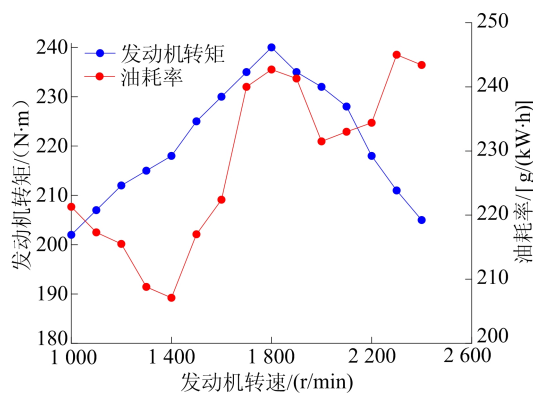
在温度传感器校对中,温度传感器 T5、T6 偏差主要分布在 -4% 、 -2% 左右,且分布比较均匀,而温度传感器 T4、T7 上下偏差都在 $\pm 5\%$ 以内,但是仍需调整其安装位置,使其误差尽量分布均匀,从而减少试验误差。

3.2 发动机排放测试

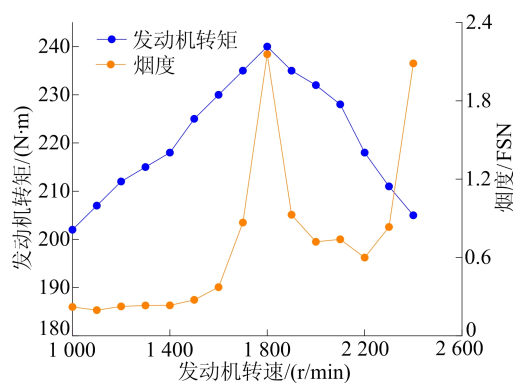
为了验证发动机动力性能与其排放性能之间的关系,设计排放性能试验来探究两者的关联性。通过电力测功机、油耗仪、烟度计和温度传感器分别采集发动机扭矩、油耗率、排气烟度值和排气温度,将得到的数值绘制成曲线,结果如图 7 所示。

从图 7a 可以看出,发动机油耗率开始随着转速的上升而降低,在 $1\ 400\ \text{r/min}$ 后逐渐上升,在发动机最大扭矩所对应的转速区间内保持稳定,之后再次下降,并在 $2\ 000\sim 2\ 200\ \text{r/min}$ 区间内缓慢增长,最后随着转速的增加而增加,在到达最大转速之前小幅下降;从图 7b 可以看出,烟度在 $1\ 600\ \text{r/min}$ 前保持平稳状态,达到 $1\ 600\ \text{r/min}$ 后剧烈上升,在最大扭矩点烟度排放达到最大值后急剧下降,在 $2\ 000\sim 2\ 200\ \text{r/min}$ 区间内上下小幅度波动,最后随着转速的增加迅速上升;从图 7c 可以看出,排气温度开始随着转速的增加逐渐降低,在 $1\ 400\ \text{r/min}$ 后随着转速的增加,排气温度迅速上升,在最大扭矩点时排气温度达到最高,之后随着转速上升,排气温度下降,在 $2\ 000\sim 2\ 200\ \text{r/min}$ 区间内,排气温度上下波动,最后,随着转速的增加,排气温度逐渐增加。

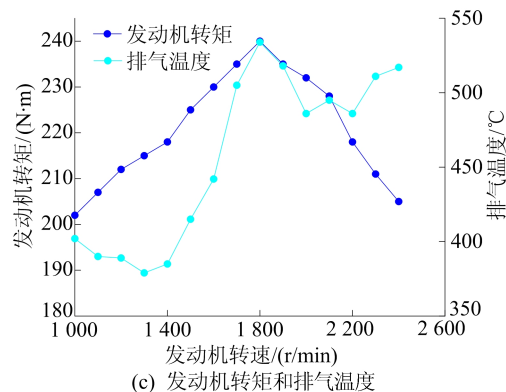
造成以上现象的原因与发动机的工作过程有关。当发动机进行冷启动时,因为气缸温度低,燃油不易雾化,且喷油器向气缸内喷入过量燃油,气缸内是浓混合气,所以此时发动机的油耗率和排气温度较高,但此时尾气中未燃 HC、CO 含量较高,烟度值较小。



(a) 发动机扭矩和油耗率



(b) 发动机扭矩和烟度



(c) 发动机扭矩和排气温度

图 7 发动机性能与排放关系曲线

随着发动机冷启动完成,此时喷油器向气缸内喷入的燃油量较少,混合气中 O_2 含量较高,混合气能够完全燃烧,且喷油量较少,故此时油耗率和排气温度有下降趋势,烟度值基本不变^[6];之后发动机的负荷增加,为了保证发动机动力性的需要,此时喷油器向发动机缸内喷入的燃油量增加,气缸内温度达到稳定水平,混合气浓度上升,此时气缸内混合气燃烧不充分,排放较为恶劣,故随着发动机负荷增加,排气温度、油耗率以及烟度值均上升;之后随着发动机负荷降低,气缸内混合气浓度下降,排放优化,发动机油耗率、排气温度、烟度值均随着负荷降低而减小;最后,当发动机到达最大转速前,由于转速增加,喷油次数增多,而混合

气在气缸内发生化学反应的时间减少,混合气燃烧不完全,部分混合气还未燃烧完全就被排出缸外,排放较为恶劣,发动机油耗、排气温度以及烟度值随着转速的增加而增加^[7]。

3.3 NH₃ 存储量与 NO_x 转化效率之间的关系

试验探究了废气流量在 350 kg/h 的情况下,不同温度对 NO_x 转化效率与 NH₃ 存储量(存储在催化剂表面的 NH₃)之间的关系以及在 350 kg/h 废气量下开氨存储时不同温度下的转化效率,试验结果如图 8 所示。

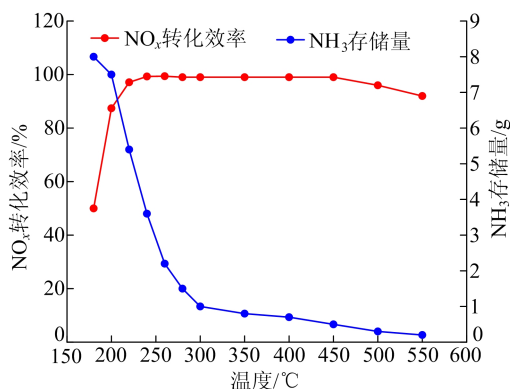
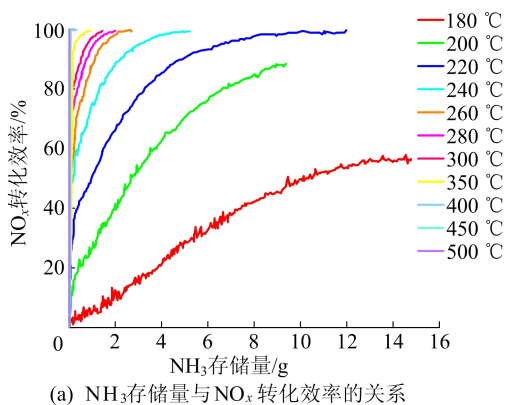


图 8 NH₃ 存储量对 NO_x 转化效率的影响

从图 8a 可以看出,在废气流量为 350 kg/h 的情况下,随着 NH₃ 存储量的增加,NO_x 转化效率逐渐增加,这是由于 NH₃ 存储量增加,吸附在催化剂表面上的 NH₃ 的量就增加,加快了 NO_x 还原反应的速率,从而增大了 NO_x 的转化效率^[8]。

从图 8b 可以看出,随着温度的增加,NH₃ 存储量逐渐减少,原因是随着温度的上升,催化剂活性增加,NH₃ 与 NO_x 的氧化还原速率增加,越来越多的 NH₃ 参与到氧化还原反应,导致吸附在催化剂表面上的 NH₃ 的量降低,故而 NH₃ 存储量

随温度升高而降低^[9]。从图 8b 还可以看出,NO_x 的转化效率先增加,然后在一定温度范围内保持稳定,在 480 °C 后,随着温度的增加,NO_x 的转化效率略微下降。原因是随着温度上升,催化剂活性增加,NH₃ 与 NO_x 的氧化还原速率逐渐增加,在 250~480 °C 温度区间内,催化剂活性很高,氧化还原速率保持在很高的水平;当温度大于 480 °C 时,温度对催化剂活性几乎无影响^[10-12],而 NH₃ 存储量过低,对 NO_x 的转化效率有一定影响,导致 NO_x 转化效率降低^[13-15]。

3.4 尿素结晶试验

在发动机试验台架上进行 WHTC 工况试验。选取前 345 s 工况进行连续 24 h 低温结晶试验,测得温度传感器 T6 平均温度在 200 °C 左右;结束后拆卸观察结晶现象并称重,结晶质量为 17.5 g,有轻微结晶现象,满足试验要求,尿素结晶图如图 9 所示。尿素结晶原因可能是使用的尿素纯度不高,或者是喷嘴安装存在一定的空隙^[16]。虽然 SCR 系统出现尿素结晶是正常现象,但是尿素结晶到一定程度会影响后处理性能,因此后续需要优化结构减少尿素结晶,减小其对发动机性能的影响。



图 9 尿素结晶图

3.5 稳态温度损失试验

稳态温度损失试验是指发动机在节气门开度、转速和其他主要参数保持不变的情况下进行的温度损失验证。温度损失的大小为传感器 T₅ 与 T₆ 的数值之差,T₅ 表示 DPF 入口处温度,T₆ 表示 SCR 入口处温度。取发动机转速为 1 300 r/min、

扭矩为 $70 \text{ N} \cdot \text{m}$ (小负荷工况) 和发动机转速为 2000 r/min 、扭矩为 $220 \text{ N} \cdot \text{m}$ (大负荷工况) 2 个工况点, 测得稳态温度损失分别为 11°C 和 18°C , 温差大小符合试验要求, 结果如图 10 所示。

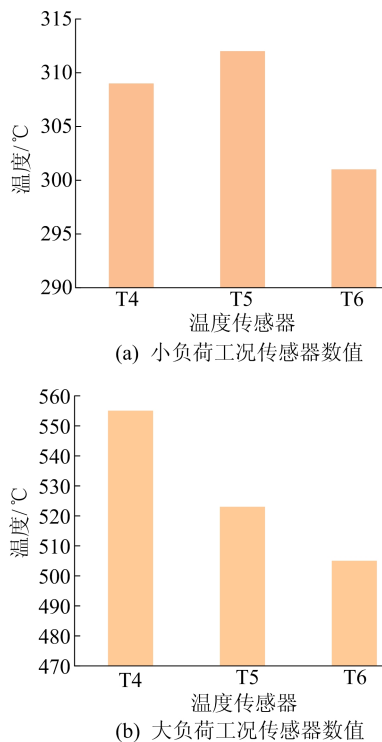


图 10 不同工况下传感器数值

3.6 DPF 载体涂敷性能试验

为了探究 DPF 涂敷层对发动机性能的影响, 试验用未涂敷材料的 DPF 空白载体 (SiC 载体) 和使用涂敷量为 40 g/L 的碱金属载体进行比较, 分别测试两者的排气背压以及油耗情况, 结果如图 11 所示。

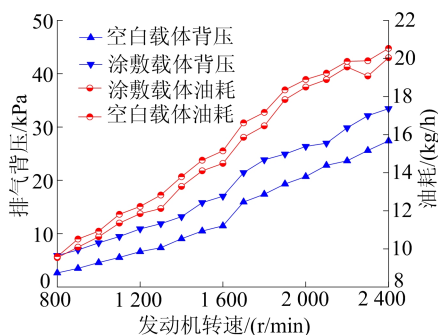


图 11 DPF 载体涂敷性能影响试验结果

从图 11 可以看出: DPF 载体涂敷层对发动机排气背压有一定的影响, 涂敷碱金属的 DPF 载体和空白载体的排气背压都近乎呈线性增长, 且

前者比后者排气背压高了 5.2 kPa 左右; 涂敷载体的油耗略大于空白载体。这是由于涂敷载体的排气背压大于空白载体, 降低了发动机功率, 为了保证发动机的动力性, 需要增加混合气浓度来保证发动机功率输出^[17]。

4 结 论

本文基于 4B5-70U32 型柴油机搭建发动机后处理试验台架, 通过一系列试验探究了后处理系统对发动机性能、排放情况的影响, 得出以下结论:

1) 试验对后处理系统的温度、 NO_x 传感器进行校对, 并对后处理系统进行稳态温损值进行测量, 得到的结果均符合试验要求。

2) 发动机在最大转矩点的油耗率、尾气烟度以及排气温度均达到最高值, 后续需要通过一系列技术手段降低最大扭矩点的排放值, 降低对环境的污染。

3) 在一定废气流量的情况下, 随着 NH_3 存储量的增加, NO_x 转化效率增加; 随着温度增加, NH_3 存储量减少, NO_x 转化效率先增后降。

4) 在尿素结晶试验中, 后处理尿素结晶量少, 符合试验标准, 但后续仍需要改善, 进一步降低尿素结晶对后处理系统性能的影响。

5) DPF 载体涂敷碱金属涂层对于空白载体而言, 对发动机性能有一定的影响, 但影响较轻微。

[参 考 文 献]

- [1] 周龙保. 内燃机学[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 210-220.
- [2] 孟忠伟, 王维, 蒋渊, 等. 柴油机颗粒捕集器的怠速再生性能试验研究[J]. 内燃机工程, 2021, 42(6): 7-12.
- [3] 常啸天. 基于国六标准的柴油机 SCR 系统结构优化及试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [4] 孟忠伟, 晋兆祥, 陈超, 等. DOC/SCR 组合方式及关键参数对 NO_x 转化效率的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10): 5483-5489.
- [5] ZHENG G, PALMER G, SALANTA G, et al. Mixer development for urea SCR applications; SAE Technicle Paper 2009-01-2897[R]. [S. l.]: SAE, 2009.
- [6] 刘志忠, 韩宗奇, 马玉环, 等. 电喷发动机闭缸循环工作排放与经济性试验研究[J]. 汽车工程, 2012, 29(6): 4-9.
- [7] WIEBENGA H, MICHELLE H, CHANG H K, et al. Deactivation mechanisms of Pt/Pd-based diesel oxidation catalysts[J]. Catalysis Today, 2012, 184(1): 197-204.

(下转第 1368 页)

测算法,对比发现,无论是在静态还是动态情境下本文算法都有良好的表现,是一种稳定的抗相机干扰的心率检测算法。

在实际检测过程中,相机晃动可能会导致视频模糊乃至严重失真,这会严重影响到本文算法的检测性能,在未来的研究中将继续针对大幅度的晃动,如车载心率检测等方向深入研究,不断提升算法鲁棒性。

[参 考 文 献]

- [1] 马斌. 静息心率与心血管病的研究进展[J]. 心血管病学进展, 2006, 27(增刊 1): 90-92.
- [2] 吴学思. 心率在心血管疾病中的意义[J]. 中华内科杂志, 2006, 45(7): 601-602.
- [3] 许彦坤, 石萍, 喻洪流. 基于成像式光电容积描记技术的人体生理参数检测研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2017, 36(6): 648-654.
- [4] VERKRUYSSSE W, SVAASAND L O, NELSON J S. Remote plethysmo-graphic imaging using ambient light[J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21434-21445.
- [5] LEWANDOWSKA M, NOWAK J. Measuring pulse rate with a Webcam[J]. Journal of Medical Imaging & Health Informatics, 2012, 2(1): 87-92.
- [6] POH M Z, MCDUFF D J, PICARD R W. Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation [J]. Optics Express, 2010, 18(10): 10762-10774.
- [7] DE H G, JEANNE V. Robust pulse rate from chrominance-based rPPG[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013, 60(10): 2878-2886.
- [8] LI X, CHEN J, ZHAO G, et al. Remote heart rate measurement from face videos under realistic situations [C]//IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2014: 4264-4271.
- [9] KUMAR M, VEERARAGHAVAN A, SABHARWAL A. DistancePPG: robust non-contact vital signs monitoring using a camera[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(5): 1565-1588.
- [10] 刘祎, 欧阳健飞, 闫勇刚. 基于普通摄像头的心率测量方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(7): 210-214.
- [11] 戚刚, 杨学志, 吴秀, 等. 非合作面部晃动情况下的心率检测[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(1): 126-136.
- [12] 桑海峰, 金芷伊. 基于光照矫正的面部局部区域心率检测[J]. 计算机应用, 2018, 38(增刊 2): 301-305.
- [13] 倪宗军, 陈辉, 张响, 等. 自适应去噪的非接触式生理参数检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(5): 153-160.
- [14] 魏闪闪, 谢巍, 贺志强. 新兴数字视频稳像中相机运动估计技术综述[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(2): 321-327.
- [15] 唐佳林, 郑杰锋, 李熙莹, 等. 基于特征匹配与运动补偿的视频稳像算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(2): 608-614.
- [16] 杨莉, 邵克勇, 刘远红, 等. 应用于电子稳像的改进块匹配算法[J]. 化工自动化及仪表, 2014, 41(5): 553-556.
- [17] 袁威, 高跃清, 吴金亮. 基于灰度投影和块匹配的无人机视频稳像方法[J]. 无线电工程, 2016, 46(2): 19-22.
- [18] 魏利胜, 甘泉. 基于小波变换的新型 SURF 图像拼接方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 766-772.
- [19] PAN Z, WEN Z. Analysis of image registration algorithm RANSAC and its improved algorithm[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 783(1): 121-138.
- [20] 黄宝华, 陈荣, 曾海山. 皮肤组织血液含量对皮肤光谱的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(1): 95-98.

(责任编辑 李 凯)

(上接第 1354 页)

- [8] 冯坦, 吕林. 催化剂涂层微孔结构对 SCR 系统 NO_x 转化效率的影响[J]. 内燃机工程, 2015, 36(1): 8-14.
- [9] BALETA J. Numerical modeling of urea water based selective catalytic reduction for mitigation of NO_x from transport sector [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88(12): 280-288.
- [10] 魏铤, 姚栋伟, 吴锋, 等. Cu-SSZ-13 柴油机 SCR 催化剂水热老化试验[J]. 内燃机学报, 2018, 36(6): 531-537.
- [11] 明淑君, 庞磊, 范弛, 等. 柴油机尾气中的碱性无机污染物引起 Cu-SAPO-18 脱硝催化剂的化学失活[J]. 催化学报, 2019, 40(4): 590-599.
- [12] 李敏. Urea-SCR 催化剂热失活特性数值仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [13] 赵彦光, 胡静, 华伦, 等. 柴油机尿素 SCR 系统动态氨泄漏的试验研究[J]. 内燃机工程, 2012, 33(3): 6-13.
- [14] 陶泽民, 宋崇林, 吕刚, 等. 钒基 SCR 催化剂动态反应特性的发动机试验研究 [J]. 内燃机学报, 2009, 27(5): 417-422.
- [15] 周炼. FAI SCR 标定系统的开发与催化剂氨存储特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [16] 朱明健, 胡振奇, 陈霍, 等. 柴油机 SCR 尿素结晶分析研究 [J]. 现代车用动力, 2017(3): 6-10.
- [17] 朱亚永, 赵昌普, 王耀辉, 等. 柴油机 DPF 流场压降及微粒沉积特性数值模拟[J]. 内燃机学报, 2017, 35(6): 10-17.

(责任编辑 胡亚敏)