

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.08.008

基于国 VI 标准柴油机 SCR 排放标定试验研究分析

程晓章, 张子涵, 刘凡, 管金彪

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章为了检验选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统在尾气排放中的各方面性能,对柴油机进行 AVL 后处理台架搭建测试,在集成式后处理系统柴油机氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)+柴油颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)+SCR+氨氧化催化器(ammonia slip catalyst, ASC)的技术路线下,完成系统裸排、背压、WHTC 排放、尿素结晶、传感器校对、开闭环标定等一系列测试;研究后处理系统对柴油机造成的排放阻力和温度损失,讨论氮氧化物(NO_x)的转化率与氨(NH_3)存储量之间的关系以及两者关系在不同排气流量和不同温度下的变化规律,并研究 SCR 系统对比柴油机原排所起的功效。结果表明: NO_x 的转化效率随着 NH_3 存储量增大而逐渐变大,随着排气流量增大呈负指数增长,在一定温度下随温度呈正指数增长,超过一定温度后受催化剂材料约束;SCR 系统造成的温损和压阻均在可接受范围内,且对 NO_x 有可观的转化效率,在混合器改进后效率有所提升,可满足国 VI 排放标准。

关键词:柴油机;选择性催化还原(SCR);转化效率

中图分类号:TK421.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)08-1057-08

Calibration test on SCR system of diesel engine based on China VI standard

CHENG Xiaozhang, ZHANG Zihan, LIU Fan, GUAN Jinbiao

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

Abstract: In order to test the performance of selective catalytic reduction(SCR) system in exhaust emissions, a diesel engine AVL post-treatment bench was built. Under the technical route of integrated post-treatment system with diesel oxidation catalyst(DOC) + diesel particulate filter(DPF) + SCR + ammonia slip catalyst(ASC), a series of tests were completed, such as system bare discharge, back pressure, WHTC discharge, urea crystallization, sensor calibration, open and closed loop calibration, etc. The emission resistance and temperature loss of diesel engine caused by the post-treatment system were explored, and the relationship between NO_x conversion efficiency and ammonia(NH_3) storage was proved. The relationship between the SCR system and diesel engine exhaust was further studied with different exhaust flow rate and different temperature. The results show that the NO_x conversion efficiency increases gradually with the increase of NH_3 storage, increases negatively with the increase of exhaust flow rate, and increases positively with the temperature at a certain temperature. And it is also constrained by the catalyst material exceeding a certain temperature. The temperature loss and pressure resistance caused by the SCR system are within the acceptable range, and the conversion efficiency of NO_x is considerable. After the improvement of the mixer, the efficiency is improved and can meet the China VI emission standard.

Key words: diesel engine; selective catalytic reduction(SCR); conversion efficiency

收稿日期:2022-05-18;修回日期:2022-06-21

基金项目:合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2018JSKF0269)

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。

随着国家对碳达峰与碳中和目标的确定,在研究新能源车技术时,对于传统机动车排放,尤其是重型柴油机的尾气排放处理也越来越重视^[1]。在最新实施的国 VI 标准中:CO 排放的限制值为 500 mg/km;非甲烷烃类排放限制值为 35 mg/km;氮氧化物(NO_x)排放的限制值为 35 mg/km;颗粒物(particulate matter, PM)排放的限制值为 6 × 10¹¹ mg/km。这意味着柴油机依靠传统的后处理技术难以达到日益增高的排放需求,高效的后处理技术成为柴油机必须采用的排气控制手段^[2]。

目前,在柴油机上较为成熟且稳定的技术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),主要用来满足对颗粒物 PM 的捕捉、碳氢化合物(HC)和 CO 的氧化、CO₂ 和 H₂O 以及 NO_x 的还原。一些系统中还会添加氨氧化催化器(ammonia slip catalyst, ASC)实现对氨气(NH₃)的氧化,防止 NH₃ 未完全反应而造成的泄露^[3]。

尿素 SCR 技术是目前应用最广泛的降低柴油机 NO_x 排放的方法之一。经过研究表明,SCR 系统的催化性能主要取决于催化剂,同时与系统内部的流动特性、尿素水溶液的分解、NH₃ 的分布均匀性以及尾气混合度、系统结构有关^[4]。如果流畅内部速度均匀性较低,或者还原剂分布不均匀,那么在通过载体时会造成载体局部压力过大,使排气背压增大,同时造成催化剂老化失效,使用寿命降低。

SCR 系统中,混合器是提高 NH₃ 分布均匀性和尿素液滴蒸发分解效率的一种有效装置:
① 由于混合器的破壁设计,当液滴撞击到混合器时可以破碎成更小的液滴,加速尿素水溶液的蒸发与分解,提高还原剂进入催化载体时的均匀度;
② 改变喷雾喷出后的流体流动方向,可以避免摊布在壁面形成液膜,从而降低尿素结晶的生成风险。混合器的扰流作用还可以加强还原剂与尾气的混合度^[5]。

本文通过搭建试验台架,对后处理系统背压、温度损失以及 NO_x 传感器偏差进行测试,研究不同混合器和 NH₃ 存储量对 NO_x 转化效率的影响,分析尿素结晶和排放限值问题。

1 选择性催化还原系统

1.1 SCR 系统模型

SCR 系统主要由控制单元、尿素喷射单元和

催化转化单元构成。其技术原理为:由电控单元计算并喷出适量的 32.5% 的尿素水溶液,尿素液滴经过蒸发、热解水解等一系列物理与化学反应,生成 NH₃,NH₃ 与尾气混合后再催化载体进行还原反应,以达到降低 NO_x 排量目的。SCR 系统结构示意图^[6]如图 1 所示。

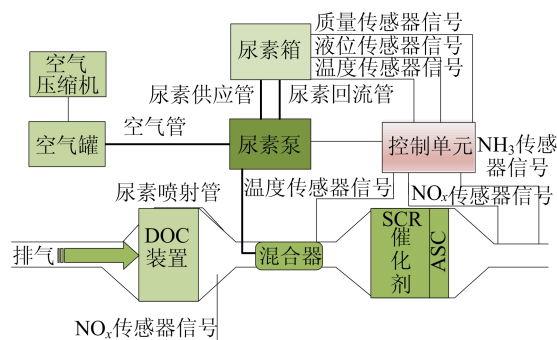
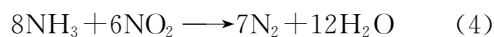
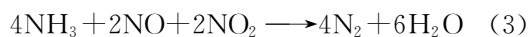
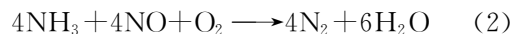


图 1 SCR 系统结构示意图

1.2 催化器表面化学反应

在催化器载体内,HC、NO 水解再次生成 NH₃,还原剂有选择性地与尾气中 NO_x 发生还原反应,达到减排目的,且尾气中的 NO_x 相较于 O₂ 仍是较少的,因此反应大多集中在富氧环境下发生^[7]。

催化器载体内发生的反应主要为:



在排放的尾气中,NO 占据 NO_x 的 90% 以上,式(2)也作为反应的标准反应;随着 NO 与 NO₂ 的比例发生变化,当其质量比约为 50% 时,催化器内部以式(3)为主,此时反应速率变高,式(3)也被称为快速 SCR 反应;当 NO₂ 与 NO 质量比持续增大时,起主导作用的为式(4),该式也被称为慢速 SCR 反应,此时 NO_x 的转化效率变低^[8];当催化载体内部温度过高时,达到 450 °C 以上,NH₃ 对于 O₂ 的选择性要高于还原剂,且在尾气中 O₂ 的含量远远高于 NO_x 的含量,此时 NH₃ 则直接与 O₂ 产生氧化反应,在防止 NH₃ 泄露的同时也会造成 NO_x 转化效率的降低^[9]。

2 试验系统

2.1 试验台架搭建

试验基于某公司 H20-120E60 国 VI 高压共轨

柴油机进行。在试验中心完成加装后处理系统的发动机台架搭建系统^[10],如图 2、图 3 所示。



图 2 发动机台架



图 3 后处理集成系统

试验用发动机参数见表 1 所列,发动机进气方式为增加中冷,供油系统形式为高压共轨。检验用仪器设备见表 2 所列。

表 1 发动机参数

参数	数值
排量/L	1.968
额定功率/kW	9
怠速转速/(r/min)	800±50
最大扭矩/(N·m)	325
容积压缩比	(17.5±0.5):1

表 2 检验用仪器设备

设备名称	设备型号
测功机	AVL220
测试系统	AVLPUMA
气体分析仪	AMAT60, CVS, FTIR
颗粒分析仪	PTS
托盘天平	Sartorius
烟度计	AVL415S/439
油耗仪	AVL735

2.2 后处理传感器打点布置示意图

按技术要求对后处理器进行打孔,安装压力、温度传感器以及采样接头,用于后续试验。各传感器打点布置示意图如图 4 所示。

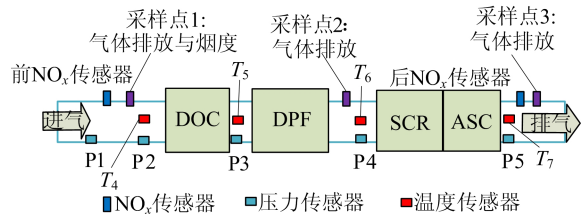
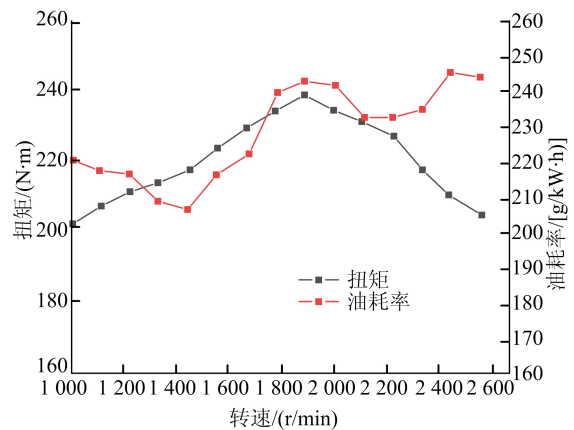


图 4 后处理各传感器试验布置示意图

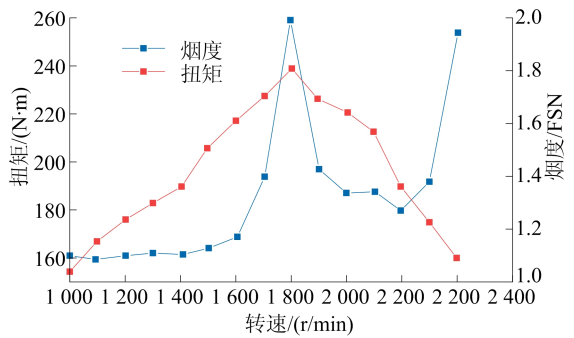
3 试验内容

3.1 发动机排放测试

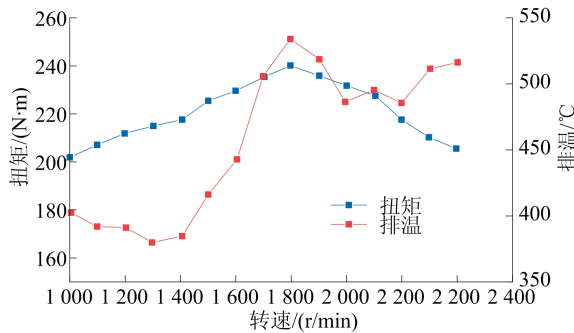
发动机不同工况下排放示意图如图 5 所示。



(a) 发动机不同扭矩和油耗率



(b) 发动机不同扭矩和烟度



(c) 发动机不同扭矩和排温

图 5 发动机不同工况下排放示意图

从图 5a 可以看出,发动机油耗率在初始阶段

随转速的上升而降低,在 1 400 r/min 后逐渐上升,在最大转矩所对应的转速区间内保持稳定,之后再次下降,并在 2 000~2 200 r/min 区间内缓慢增长。分析可知在启动初始阶段,需要向气缸内喷入浓混合气,随着启动时间的增长混合气的浓度逐渐降低,故而油耗率降低;同时为确保发动机的动力性,需增加混合气的浓度,故而油耗率再次增加;最后随着转速上升,混合气燃烧不够完全,导致油耗率在 2 200 r/min 后再次上升。

从图 5b 可以看出,排气烟度在 1 600 r/min 前保持平稳状态,在最大转矩点烟度排放达到峰值后急剧下降,在 2 000~2 200 r/min 区间内上下小幅度波动。这是由于在启动工况时,虽然喷入气缸的是浓混合气,但是多数燃油因温度较低未被雾化,之后混合气浓度逐渐降低,氧气含量的增加增强了燃烧的充分性,烟度排放较小;在转速增加到接近发动机最大转速时,气缸内反应时间降低,混合气未完全燃烧,导致烟度排放增加。

从图 5c 可以看出,开始阶段排气温度随着转速的增加逐渐降低,而在 1 400 r/min 后随着转速的增加排气温度迅速上升,在最大转矩点时排气温度达到最高,之后随着转速的增加,排气温度下降,最后趋于平稳。这是由于开始喷入较浓混合气,发动机排气温度较大,后来随着混合气浓度降低,燃烧完全,发动机排气温度下降;之后由于再次喷入混合气后,混合气在气缸内燃烧不完全,排出气缸后还在反应,导致排气温度再次上升。

3.2 排气背压测试

在加装集成式后处理系统后,由于对内部流程的扰动,不可避免地会引起压力的损失。因此对后处理系统进行各点位压力测试,测试结果见表 3 所列。

表 3 后处理系统压损

测量点	P-4	DOC	DPF	SCR+ASC	总背压
压力/kPa	32.8	3.7	15.4	13.4	34.4

由压力传感器可测得各部件的最大压力损失如下:经过 DOC 的压损为 3.7 kPa;流经 DPF 的压损为 15.4 kPa;通过混合器的压损为 1.7 kPa;SCR 的压损为 5.7 kPa。后处理系统总背压为 34.4 kPa,小于评估标准的 35.5 kPa,故满足系统试验需求。

3.3 后处理温度损失

后处理系统的温度损失认定为 T_5 与 T_6 之

间的温度差, T_5 为进入 DPF 入口前的温度, T_6 为 SCR 入口处温度。

稳态工况下的温度损失如图 6 所示。从图 6 可以看出:稳态工况下,2 370 r/min 转速时(扭矩为 70 N·m)测得的温度损失为 11 °C(低负荷);1 450 r/min(扭矩为 330 N·m)转速时测得的温度损失为 18 °C(高负荷)。

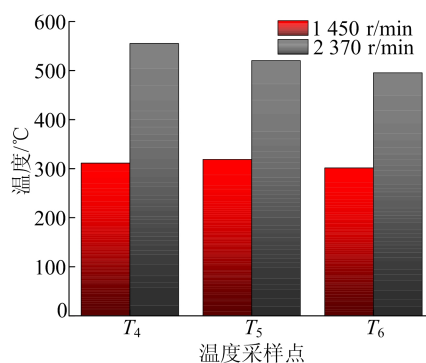
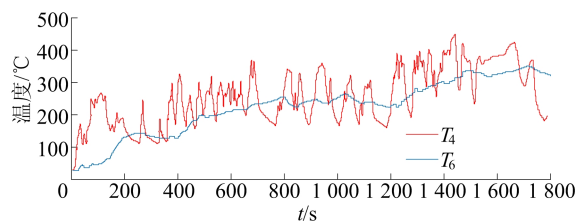
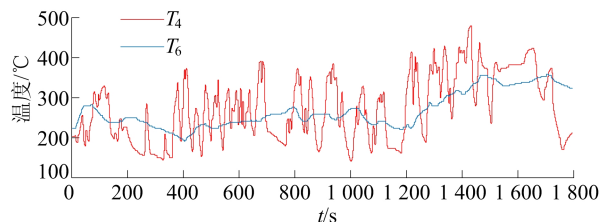


图 6 稳态工况下温度损失

瞬态工况下温度损失定义为 T_4 与 T_6 之间的温度差,如图 7 所示。由图 7 可知,在温度损失瞬态分析中,WHTC 冷态工况测得温度损失为 33 °C,WHTC 热态工况测得温度损失为 12 °C,均满足系统的技术要求。



(a) WHTC冷态工况



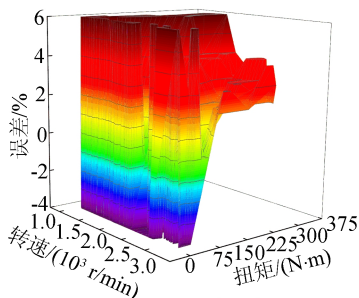
(b) WHTC热态工况

图 7 瞬态工况下温度损失

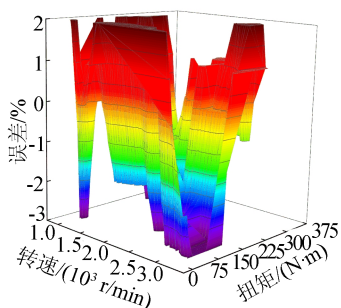
3.4 NO_x 传感器校对

在试验中要测量 NO_x 的转化效率来确定后处理系统的功效,因此在后处理系统入口和出口处均需安置 NO_x 传感器。传感器安装应使传感器流向标志与流体流向一致,同时应相互平行,使

2 个法兰的中心位于同一轴线,避免产生附加应力。这就需要对传感器进行校对以减小误差,确保测量的准确性。传感器误差分析如图 8 所示。



(a) 上游 NO_x排放量与分析仪误差



(b) 下游 NO_x排放量与分析仪误差

图 8 NO_x 传感器误差

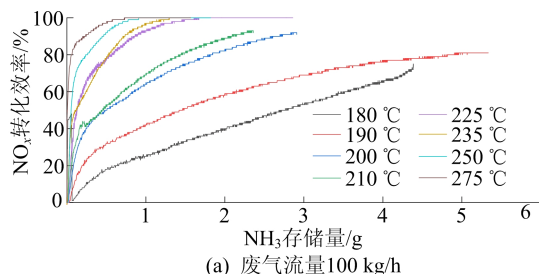
从图 8 可以看出:上游 NO_x 传感器在 NO_x 体积分数为 4×10^{-4} 以上误差在 $\pm 5\%$ 以内,分布较为均匀,在 NO_x 体积分数为 4×10^{-4} 以下误差在 $\pm 10\%$ 以内,仍满足技术要求;下游 NO_x 传感器误差在 6% 左右。可见,前、后传感器误差均值都在系统误差值允许范围以内,但仍需要调整其位置,进一步提高试验的准确性。

3.5 loading and empty 试验

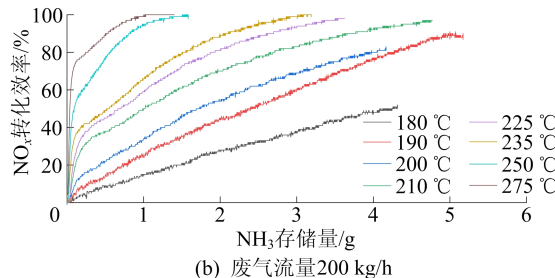
loading and empty 试验主要验证催化器性能以及初步标定 SCR 模型,选点主要依据于 WHTC 中 T_6 温度和废气流量以及整个 Engine Map 中的范围。试验测得 NO_x 转化率与 NH₃ 存储量的关系以及转换效率在不同废弃流量与不同温度下的转变,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,NO_x 转化效率的变化趋势是随着 NH₃ 存储量的增大而增加的,同时两者的关系又受温度和废气流量的影响。当废气流量增大时,NO_x 转化效率降低,这是由于流量过大对于 NH₃ 的吸附和脱附都有着一定程度的劣化,同时流量增大也会造成尾气无法与还原剂充分融合,气体均匀度和反应时间降低,使得系统整体的转化效率降低。而在废气流量不变的情况下,

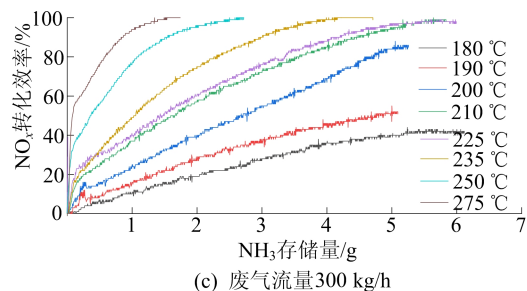
SCR 上游温度上升时,NH₃ 存储量不断减少;NO_x 转化效率则随着温度的上升呈抛物线趋势,SCR 上游温度在 400 °C 以下时,效率逐渐增加,在 400 °C 以上时,效率逐渐减小,这是由于铜基分子筛的后处理器特性,当 SCR 温度在高温时 SCR 反应会伴随一些副反应,造成 NO_x 转化效率降低和催化剂活性下降。从 NH₃ 存储时间分析,SCR 上游温度增加时,NH₃ 存储效率不断降低,而在 250~450 °C 之间是后处理系统的最佳反应温度,反应速率快,催化剂活性高,因此转化效率增大的同时 NH₃ 存储量也随之降低。这意味着电控单元要随时跟随工况的改变来调节尿素水溶液喷射量,从而避免 NH₃ 泄露或还原剂不完全的风险。



(a) 废气流量 100 kg/h



(b) 废气流量 200 kg/h



(c) 废气流量 300 kg/h

图 9 NH₃ 存储量与 NO_x 转化效率之间的关系

3.6 SCRFBC & AD 试验

SCRFBC & AD 试验选择将发动机控制在某一个工况下(对应一定的废气量和 T_6 温度),尿素一直保持着自动喷射状态(NH₃ 存储满的状态),将 SCRA_{d-facdpMn1Av} 的值由 1.0 调整为 0.7,同时系统会反馈出下游的 NO_x 含量升

高,当处于稳定后开始记录。记录数据并利用阶跃响应公式求出 T_N 、 K_{PR} ,再分别填入 SCRFBCTiNO_xct1pi 与 SCRFBFacNO_xct1pi 2 张 Map 图。阶跃响应示意图如图 10 所示。

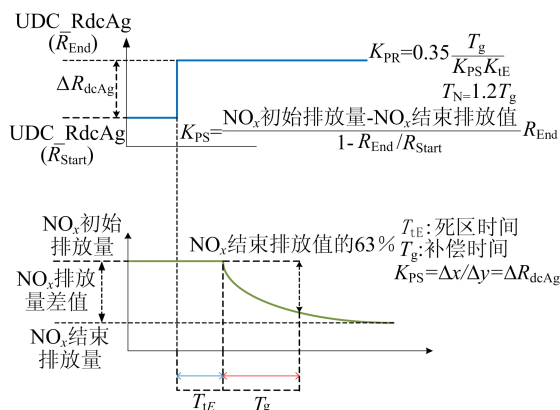


图 10 阶跃相应示意图

通过对 2 张 Map 图的标定,达到对尿素喷射量动态修正的目的,用于避免尿素量过少不达标或者用户往尿素里加水等情况,从而提升系统的动力性能,减少系统的无用功。观察 FBC-FAC 的动态修正,若在尿素量过大时将 FAC 值降低,在尿素量过低时 FAC 值升高,则达到试验目的。实际测试结果如图 11 所示。

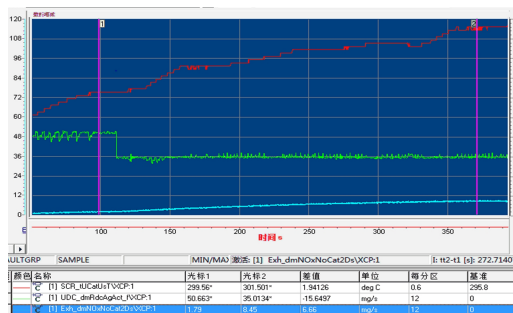


图 11 实际测试结果示意图

3.7 混合器对 NO_x 转化效率的影响

混合器可以使尿素水溶液在喷射进入管道后更容易蒸发分解,与尾气的混合度更高,提高还原剂浓度达到催化载体前的均匀性指数,从而达到提升转化效率的目的。

常规混合器与高效新型混合器模型对比如图 12 所示。常规混合器工作原理较为简单,在气体通过混合器后,由于其扰流或旋流作用,改变气体原始流向,使其绕轴线进行旋转形成涡流,在这期间尾气与 NH₃ 混合,提高两者的接触面积和时间。而高效新型混合器在满足上述功能的同时还

需对气流进行二次变向,使其从涡流再转变为轴线直线气流通过^[11]。

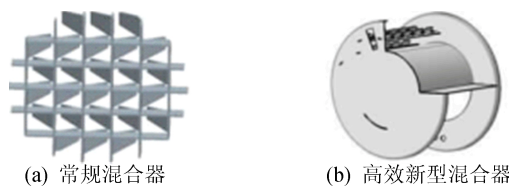


图 12 常规混合器与高效新型混合器模型对比

不同转速、不同扭矩下常规混合器与高效新型混合器对 NO_x 转化效率的对比如图 13 所示。其中,黑实线、红虚线分别表示常规混合器、高效新型混合器对 NO_x 的转化效率。

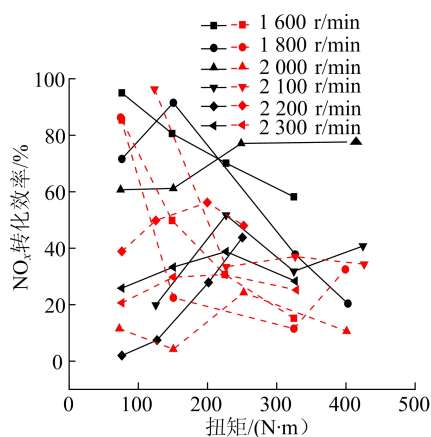


图 13 2 种混合器对 NO_x 转化效率的对比

由图 13 可知:在低转速下,常规混合器与高效新型混合器对 NO_x 的转化效率均较低且较为接近,这是由于系统在低工况下温度较低,整体反应较为缓慢,反应活性不高;而在高速高载荷下高效新型混合器对 NO_x 的转化效率比常规混合器高出 8% 左右,且新型混合器对 NO_x 的转化效率保持在 9% 以上,有利于系统性能的提升。

3.8 尿素结晶试验

对原结构 SCR 系统和改进后的 SCR 系统进行尿素结晶试验,试验方案为在台架上进行 12 h 城区路谱试验, T_0 平均温度保持在 200~300 °C。试验结束后拆卸观察 SCR 系统各部件结晶现象,并通过 3 次称重,取其平均值,再与各部件的原质量进行比较,得出最终的尿素结晶结果。

原 SCR 系统的尿素结晶试验结果如图 14 所示。由于原 SCR 系统使用的是常规式混合器,结构比较复杂,对气流的阻力较大,形成了较多的尿素结晶,而在其他位置几乎没有出现尿素结晶。

原 SCR 系统各部件尿素结晶变化见表 4 所列。从表 4 中数据可以看出,混合器部分的尿素

结晶量最大,试验前、后质量变化为 9.30 g,尿素喷嘴与载体部分结晶量较少,最终 SCR 系统的尿素结晶量为 10.73 g。



图 14 原 SCR 系统的尿素结晶

表 4 原 SCR 系统各部件尿素结晶变化 单位:g

部件	原质量	试验后质量			增量
		1	2	3	
混合器	1 031.0	1 040.2	1 040.4	1 040.3	9.30
载体	7 934.0	7 935.1	7 935.2	7 935.0	1.10
尿素喷嘴	251.0	251.2	251.4	251.4	0.33

优化后的 SCR 系统的尿素结晶情况如图 15 所示。从图 15 可以看出,在催化剂载体与尿素喷嘴中都只有一点尿素的结晶,而在尿素喷嘴座处尿素结晶较多,由于喷嘴座孔安装不严,才会导致此处存在一定的尿素结晶^[12]。



图 15 优化后 SCR 系统的尿素结晶

优化后 SCR 系统各部件尿素结晶变化见表 5 所列。从表 5 中数据可以看出,在尿素喷嘴及座孔处的尿素结晶量比其他部分要多,整个 SCR 系统的尿素结晶量为 2.8 g,与原 SCR 系统相比,尿素结晶量大幅下降。

一旦某个部位产生尿素结晶,随着试验时间的增长,尿素结晶的积累会逐渐增多,在该部位会形成阻塞,不仅会增大排气的阻力,还会影响尿素的分解和混合,从而干扰后处理系统正常运行,在后期将会继续优化 SCR 系统,改进试验方案以减少尿素结晶。

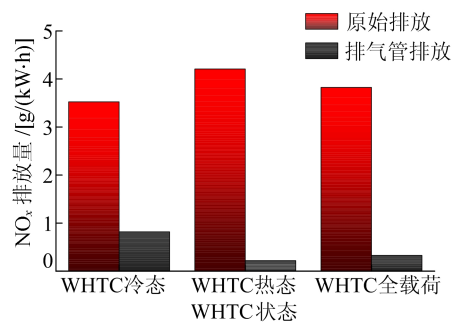
表 5 优化后 SCR 系统各部件尿素结晶变化 单位:g

部件	原质量	试验后质量			增量
		1	2	3	
混合器	1 056.0	1 057.1	1 057.1	1 057.1	1.10
载体	7 934.0	7 934.2	7 934.2	7 934.3	0.23
尿素喷嘴	251.0	252.4	252.6	252.4	1.47

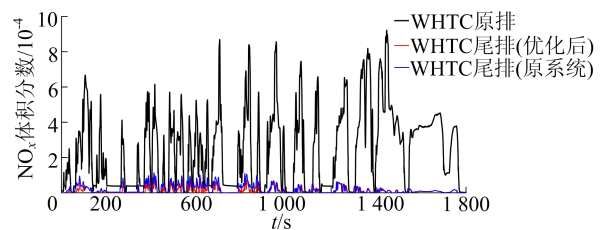
3.9 排放结果分析

WHTC 瞬态循环测试是国 VI 标准柴油车污染物排放的测试方法,可以监测 1 800 s 内逐秒变化的瞬态工况。利用 WHTC 循环试验结果进行发动机排放的调整和再标定,可以优化燃料喷射,有效调整发动机低速低负荷区域的 PM 排放,改善现行法规排放控制区以外工况点的排放状况。

通过气体分析仪采样得到 WHTC 冷态与热态循环中的 NO_x 排放,同时检验 WHTC 技术准确性,结果如图 16 所示。



(a) 不同WHTC工况排放测试结果



(b) 加装集成式后处理系统排放测试结果

图 16 WHTC 测试循环下 NO_x 排放

从图 16 可以看出,对比原排,在添加后处理系统后的尾气排放中 NO_x 的体积分数明显降低,且 WHTC 工况下最大偏差为 2%,满足技术要求。同时意味着在个别工况下,NO_x 排放量甚至趋近于 0,符合国 VI 排放标准。

4 结 论

1) 加装集成式后处理系统后的排气背压、温损以及 NO_x 传感器误差均在试验可控范围之内。

2) NO_x 的转化效率随着 NH₃ 存储量增大而

(下转第 1085 页)

- Science, 2020, 92: 24-35.
- [3] 高菁,杨旭东. 基于规则的机位分配问题研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(增刊 2): 51-53.
- [4] PTERNEA M, HAGHANI A. An aircraft-to-gate reassignment framework for dealing with schedule disruptions[J]. Journal of Air Transport Management, 2019, 78: 116-132.
- [5] XU L, ZHANG C, WANG F. A robust approach to airport gate assignment with a solution-dependent uncertainty budget[J]. Transportation Research Part B-Methodological, 2017, 105: 458-478.
- [6] 赵家明. 机场停机位智能分配方法研究及实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [7] SOARES I B, DE H Y, JANUARIUS K, et al. Departure management with a reinforcement learning approach; respecting CFMU slots[C]//IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems-ITSC. [S. l.]: IEEE, 2015: 1169-1176.
- [8] 王红微,杨鹏. 基于深度强化学习的机场货运业务优化研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 34(3): 651-660.
- [9] 李倩雯. 机场停机位优化分配模型构建[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [10] LINHARES A, YANASSE H H, TORREAO J R A. Linear gate assignment: a fast statistical mechanics approach [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 1999, 18(12): 1750-1758.
- [11] ZHAN W H, LUO C B, WANG J, et al. Deep-reinforcement-learning-based offloading scheduling for vehicular edge computing [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5499-5465.
- [12] NGUYEN N D, NGUYEN T T, VAMPLEW P, et al. A prioritized objective actor-critic method for deep reinforcement learning [J]. Neural Computing & Applications, 2021, 33(16): 10335-10349.
- [13] MORRISON D R, JACOBSON S H, SAUPPE J J, et al. Branch-and-bound algorithms: a survey of recent advances in searching, branching and pruning[J]. Discrete Optimization, 2016, 19: 79-102.
- [14] LIANG B J, LI Y L, BI J, et al. An improved adaptive parallel genetic algorithm for the airport gate assignment problem[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 25(6): 1-17.

(责任编辑 李 凯)

(上接第 1063 页)

逐渐变大,且随着排气流量的增大呈负指数增长,在一定温度下随温度呈正指数增长。当 SCR 上游温度在 400 °C 以下时,NO_x 转化效率则随着温度的上升呈抛物线的趋势;在 400 °C 以上时,转化效率因后处理材料特性逐渐降低。

3) 高效新型混合器相较于常规混合器对气体分布均匀性有更好的提升,对于 NO_x 的转化也有更好的效果。

4) 根据尿素结晶和排放试验,尿素结晶集中聚集在喷嘴与混合器出口处,SCR 入口壁面上也有少量结晶。在 WHTC 冷态和热态循环下 NO_x 排放符合国 VI 标准。

[参 考 文 献]

- [1] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 216-220.
- [2] 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.
- [3] ZHENG G Y, PALMER G, SALANTA G, et al. Mixer Development for Urea SCR Applications; SAE Paper 2009-01-2879[R]. [S. l.]: SAE, 2009.
- [4] 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.
- [5] 王谦,张铎,何志霞,等. 柴油机 Urea-SCR 系统数值模拟与混合器结构优化[J]. 内燃机工程, 2015, 36(3): 50-57.
- [6] 王静,王谦,赵炜,等. 车用尿素 SCR 系统的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 386-393.
- [7] 辛喆,张寅,王顺喜,等. 柴油机 Urea-SCR 催化剂转化效率影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 30-34.
- [8] 陶泽民,李纲,马宁,等. 车用 Urea-SCR 系统 NO_x 动态转化效率的试验研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2010, 37(3): 53-55.
- [9] 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.
- [10] 张传霞. 柴油机 SCR 技术 NO_x 转化效率影响因素及催化剂温度特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [11] 肖遥. 柴油机尾气 SCR 系统的尿素喷射流场特性与防结晶设计分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [12] 朱博文. 柴油机集成式后处理系统结构优化和试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.

(责任编辑 胡亚敏)