

性能与排放

基于 PEMS 测量的 SSCR 系统整车道路排放测试研究

孙舒畅¹, 管斌¹, 陈婷¹, 倪红², 林赫¹

(1. 上海交通大学, 上海 200030; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 基于车载排放测试系统进行 SSCR 系统国 V 重型柴油车实际道路排放测试研究。SSCR 后处理系统使用前后整车 NO_x 排放特征的比较显示: 对比原 NO_x 排放, 在市区工况下, SSCR 系统可降低 61.3% 的 NO_x 排放, 在高速工况下可以降低 85.3% 的 NO_x 排放。测试研究表明: 安装有 SSCR 系统的国 V 重型柴油车在实际道路工况下 NO_x 排放符合国 V PEMS 标准(送审稿)。

关键词: 重型车辆; 车载排放测试系统 (PEMS); 固体 SCR 系统 (SSCR); NO_x

中图分类号: TK421⁺.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2018)04-0010-05

Research on On-Road Vehicle Emission Test with
SSCR System Based on PEMS MeasurementSun Shuchang¹, Guan Bin¹, Chen Ting¹, Ni Hong², Lin He¹(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030,
2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012)

Abstract: On-road emission characteristics of heavy-duty diesel vehicle were measured using a portable emission measurement system (PEMS) to test whether it is compliant with China V emission PEMS standard. The NO_x emissions characteristics before and after the use of SSCR after-treatment system show that compared with the original NO_x emissions, the vehicle with a SSCR system can reduce NO_x by 61.3% on urban roads, and 85.3% on expressways. The test results indicate that the China V heavy-duty diesel vehicle with a SSCR system is compliant with PEMS standard when it is running on roads.

Key words: heavy-duty diesel vehicle; portable emission measurement system (PEMS); solid selective catalytic reduction (SSCR); NO_x

0 引言

近 5 年来, 我国机动车保有量快速增长, 机动车尾气污染已成为我国空气污染的重要来源。尾气污染物是导致细颗粒物、光化学烟雾污染的重要原因, 污染防治的紧迫性凸显。柴油机的热效率、燃油经济性及可靠性较高, 是商用车辆的主要动力源。柴油车占全国汽车保有量的 10.2%。经初步核算: 2016 年全国机动车污染物排放为 4 472.5 万吨, 比 2015 年削减 1.3%, 其中, NO_x 排放 577.8 万吨, 而柴油车是 NO_x 排放的主要贡献者, 达

367.3 万吨, 占汽车排放总量的 68.7% 以上^[1]。气体污染物中, NO_x 排放对人体健康和生态环境的危害最大, NO_x 会损害人体的血液循环系统和呼吸系统, 严重时会造成死亡; 同时 NO_x 还会造成光化学烟雾, 形成酸雨, 破坏臭氧层^[2-3]。为此, 我国的国 VI 阶段排放法规中对 NO_x 排放的限制比国 V 阶段要严格很多。

降低发动机排放污染物的技术措施总体可分为两大类: 发动机燃烧系统优化和排气后处理技术。 NO_x 形成的条件是富氧、高温和高温持续时间, 柴油机在燃烧时具备这些条件; 同时柴油机排气具有

收稿日期: 2017-11-16; 修回日期: 2017-12-14

作者简介: 孙舒畅(1992-), 男, 硕士研究生在读, 主要研究方向为柴油机燃烧与排放, sscas1234@sjtu.edu.cn。

含氧量高、排气温度低等特点,使柴油机降低 NO_x 排放的难度大于汽油机。要达到国 V 及更高的国 VI 排放法规要求,须将发动机燃烧系统优化和排气后处理技术结合使用。常用的排气后处理技术有:催化吸附-还原(CAR)、选择性非催化还原(SNCR)、非选择性催化还原(NSCR)、选择性催化还原(SCR)^[4-7]。其中 SCR 技术是目前在汽车上应用最广泛的降低 NO_x 排放技术。SCR 技术是在特性催化剂的作用下,用氨或者其它还原剂将 NO_x 还原为 N_2 和 H_2O 。SCR 催化器的催化作用具有很强的选择性: NO_x 的还原反应被加速,还原剂的氧化反应则受到抑制。目前广泛商用的 SCR 系统所使用的还原剂是质量分数为 32.5% 的尿素水溶液,但是尿素水溶液作为还原剂存在几个较难解决的问题:1) 与 NO_x 直接反应的还原剂是 NH_3 ,但是尿素只有在超过 200 °C 时才能分解出 NH_3 ,而柴油机在某些低负荷工况下排气温度为 150 °C,甚至更低。虽然当下最先进的 SCR 催化剂也可以在 150 °C 促进 NH_3 和 NO_x 反应,但在 150 °C ~ 200 °C,还原剂的供给仍成为问题^[8-9]。2) 尿素水溶液热解时还会产生三聚氰酸、三聚氰酸一酰胺、三聚氰酸二酰胺、三聚氰胺等沉淀物,这些沉淀物会堵塞尿素泵,影响催化剂活性,同时增加尿素的消耗量^[11-12]。3) 相比固体尿素、氨基甲酸铵和金属络合物,同样质量的尿素水溶液携带的 NH_3 的质量最少,这就使车辆在行驶过程中须频繁添加尿素水溶液。

固体氨系统 (Solid Selective Catalytic Reduction), 简称 SSCR 系统, 使用金属络合物作为还原剂, 可以一举解决上述问题。1) 金属络合物在 40 °C 就开始分解出氨气, 可以在柴油机低负荷、低排温时喷射出 NH_3 ^[8-9]。2) SSCR 系统直接喷射氨气, 不会出现尿素水溶液热解后产生沉淀物的情况^[13]。3) 还原 1 g NO 需要 2.9 g 浓度为 34.4% 的尿素水溶液, 而使用金属络合物, 还原 1 g NO 的用量仅需 1.2 g。2.9 g 尿素水溶液的体积约为 3.00 cm^3 , 而 1.2 g 金属络合物的体积约为 1.00 cm^3 , 无论从体积上还是质量上, 以金属络合物作为 SCR 还原剂, 在携带运输上都比尿素水溶液具有优势^[12-13]。

由于氨气储存罐和氯化锶活性载体的成本原因, SSCR 系统的初投资成本略高于尿素系统的, 但是 SSCR 系统维护方便, 不会出现尿素结晶堵塞尿素泵的问题, 减少了尿素泵、排气管等部件的清理费用, 节省了成本。同时, 由于金属络合物还原 NH_3 的能力强于尿素水溶液, 因此在车辆行驶过程

中添加还原剂的频率会有所降低。综合起来, SSCR 系统的经济性和尿素 SCR 系统相接近^[13]。

目前国内对 SSCR 系统的研究仅限于固体铵和金属络合物的理化特性分析, 以及 SSCR 系统的设计和台架试验, 但是对 SSCR 系统在实际道路工况下的排放规律研究匮乏^[13]。本文使用车载排放测量系统 (Portable Emission Measure System, PEMS) 对安装 SSCR 系统的车辆进行排放测试, 研究不同工况下的排放规律。

1 测试柴油车基本参数

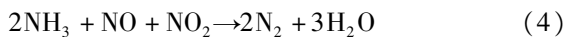
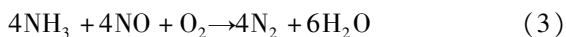
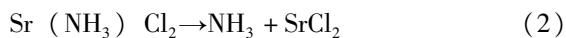
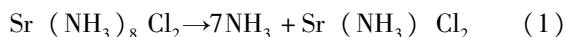
本文针对 1 台国 V 重型柴油车进行排放测试, 该车辆后处理系统为 SSCR, 考虑到试验成本, 试验时车辆为半载, 具体参数见表 1。

表 1 测试车辆基本参数

样车类型	N3 类半挂车牵引车
整备质量/kg	8 500
最大允许牵引质量/kg	37 305
测试载荷	半载
发动机最大净功率/kW	338
燃油类型	柴油
排放标准	国 IV 改国 V
制造日期	2016. 11. 29
后处理系统	SSCR

2 SSCR 系统反应机理

SSCR 由储氨模块、计量与供给控制模块 (含 DCU)、加热控制器及管路组成, 如图 1 所示。其工作原理如图 2 所示。以无机盐粉 (氯化锶) 作为吸附氨气的载体, 利用尾气余热使氨气从载体中释放, 采用温度传感器和压力传感器检测氨气压力变化, 达到 SSCR 系统工作压力状态时, DCU 与 ECU 通讯, 按照设定的排放控制策略, 通过控制计量供给模块实现氨气准确计量喷射。氨气在催化剂表面催化剂涂层的作用下与 NO_x 发生还原反应, 排出 N_2 。其主要反应过程见式 (1) ~ (4)。



车上的氨气罐在氨气用完之后直接更换, 由供应商给氨气罐充填氨气。在使用 20 ~ 30 次后, 由于氯化锶的活性降低, 必须对其进行处理, 将未释放完全的氨气与氯化锶分离开来, 对失效的氯化锶



图1 SS-CR后处理系统实物图

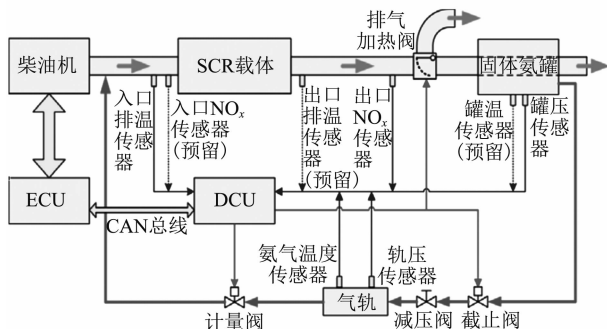


图2 SS-CR后处理系统结构图

进行回收再处理,达到重复使用的目的,避免对环境造成二次污染。

3 基于 PEMS 的 SS-CR 系统测试试验设计

3.1 整车排放试验设备

本研究采用奥地利 AVL 公司生产的 M. O. V. E 车载排放测试仪对重型柴油车进行实际道路排放测试。该设备采用非分散红外分析法 (NDIR) 测量 CO 和 CO₂, 氢火焰离子检测器 (FID) 测量 THC, 非分散紫外分析法 (NDUV) 测量 NO 和 NO₂; 使用美国 Garmin 公司的全球卫星定位系统 (Global Positioning System, GPS), 逐秒记录车辆行驶过程中的地理位置 (经度、纬度、高度) 和行驶速度。试验设备如图 3、图 4 所示。工作温度为 -10 ℃ ~ 50 ℃, 海拔为 0 ~ 3 000 m。本次试验主要研究安装有 SS-CR 系统的整车排放规律, 主要关注 NO_x 排放。

对于在紫外光谱中具有吸收带的非对称气体分子, 非扩散紫外分析仪通过测定试样气中对象成分的紫外光吸收能来测定其浓度。该分析仪由两个相同的紫外光源、试样室、比较室、检测室、截光室以及信号放大器和记录仪器等组成。当紫外线同时通过试样室和比较室时, 试样室的气体吸收紫外光能, 比较室的气体不吸收紫外光能, 致使检测室的两个腔所受的紫外能不同, 由此两个腔内温度变化

也不同, 使膜片发生位移, 于是电容电量发生变化, 根据电容量的变化即可确定待测气体的浓度。试样室中吸收的紫外光能与被测气体浓度的关系可以用式 (5) 表示:

$$E_a = E_i (1 - e^{-kcl}) \quad (5)$$

式中: E_a 为吸收能量, E_i 为入射能量, k 为光能吸收系数, c 为被测气体浓度, L 为试样管长度。

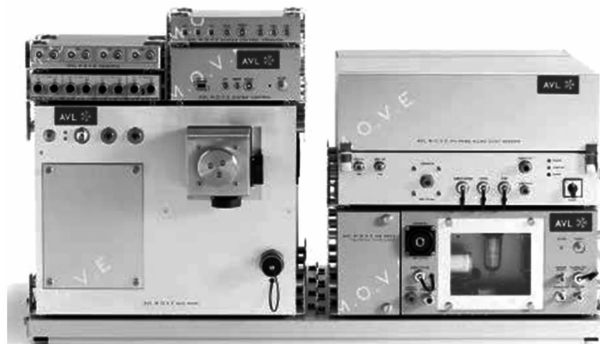


图3 PEMS 设备 (含颗粒物测量仪器)

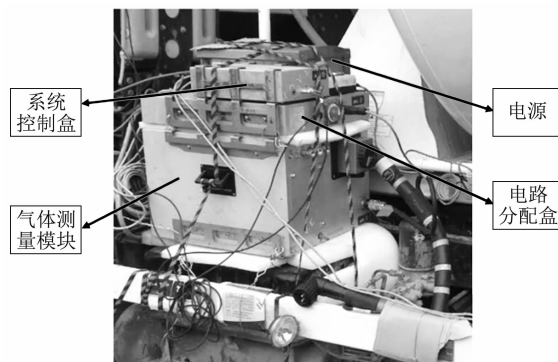


图4 PEMS 设备实物图 (安装于试验车辆)

3.2 整车排放试验工况

本次试验参考国 V PEMS 法规 (送审稿), 法规要求: NO_x 排放限值为 4 (g · kW⁻¹ · h⁻¹)。试验路线行驶工况的分配应按总行驶时间百分比的形式进行表述; 试验路线的构成应接近于车辆正常使用时的道路运行路况分布; 试验路线应包括: 市区路、市郊路和高速路。测试工况按市区道路: 车辆行驶速度 ≤ 50 (km · h⁻¹) (平均车速 15 ~ 30 (km · h⁻¹))、市郊道路: 车辆行驶速度 ≤ 75 (km · h⁻¹) (平均车速 45 ~ 70 (km · h⁻¹)) 和高速公路: 车辆行驶速度 > 75 (km · h⁻¹)。

对于 N3 类车辆, 车辆测试时的运行道路组成依次为: 10% 的市区路、10% 的市郊路和 80% 的高速路, 误差小于 5%。路线选择上海市区到无锡市, 经过 G2 京沪高速。为了避免堵车造成试验工况无法满足法规的标准, 选择在夜间进行试验。同时还在同一路段进行对比试验, 将 NO_x 原排放和

SSCR 系统处理过的尾气 NO_x 含量做对比。考虑到试验的经济成本问题, 选择 50% 的载荷作为试验载荷。

4 试验结果

4.1 法规符合性判定试验

图 5、图 6 所示为两次法规符合性试验。第一次试验, 市区、市郊、高速工况的比例为: 24.5%、29.9%、45.6%, 测试总时间共计 10 172 s。第二次试验, 市区、市郊、高速工况的比例为: 13.1%、13.6%、73.3%, 测试总时间共计 7 497 s。

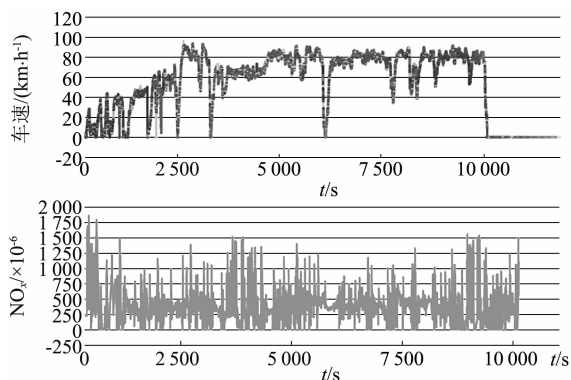


图 5 第一次法规符合性判定摸底试验

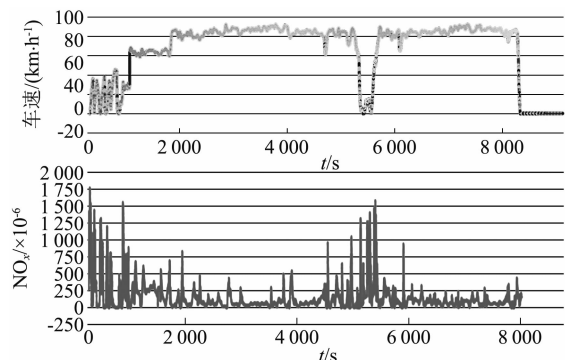


图 6 第二次正式法规符合性判定试验

第一次试验为摸底试验, 主要目的是熟悉道路情况, 工况比例未达到国 V 法规要求。第二次为正式测试试验, 工况比例符合国 V 法规标准。根据发动机扭矩和转速得到发动机的实时功率, 然后将 NO_x 流量和实时功率加权平均后得到 NO_x 排放量。第一次试验结果 NO_x 排放为 $2.68 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$, 第二次试验结果 NO_x 排放为 $1.18 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ 。两次试验结果均满足国 V 法规要求。在第一次试验中, 市区和市郊路比例大于法规要求, 瞬态加速工况较多, 对排放不利, 但第一次试验结果依然满足国 V 法规要求, 说明 SSCR 系统

具有满足未来更高法规要求的潜力。

从曲线总体变化趋势看: 随车速增大, 排气温度升高, NO_x 瞬态排放因子呈下降趋势。从曲线峰值特征看: 车辆在加减速频繁和低速工况下, NO_x 瞬态排放值较高, 其中在市区工况下加减速, NO_x 瞬态排放值最高。原因是车辆处于起动、低速等工况时, 发动机排气温度很低, 发动机转速较低, 气体流速也较慢, 难以形成均匀的混合气, 为维持正常运转, 混合气较浓, 因此 NO_x 排放因子较大; 随着车速增大并趋于稳定, 排气温度升高, 对应的发动机转速增大, 混合气浓度降低, NO_x 排放因子呈下降趋势; 同时随着排气温度升高, SCR 催化剂的活性也逐渐升高, NO_x 催化还原加强。

4.2 对比试验分析

第三、第四次试验为对比试验, 在市区工况下路试, 结果见图 7、8。第三次试验禁止 SSCR 后处理功能, 试验进行大约 40 min 时, ECU 开始限制发动机扭矩, 试验停止。第四次试验, 恢复 SSCR 后处理功能, 选择同一路段、同一驾驶员进行相似道路测试。第三次试验结果 NO_x 排放为 $8.58 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$, 第四次试验结果 NO_x 排放为 $3.33 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ 。从试验结果可以看出: 市区工况下采用固态氨喷射, NO_x 排放量明显降低, 降低量为 61.3%。而尿素 SCR 系统在市区工况 NO_x 排放较接近于原排, 相比之下, SSCR 系统在市区工况下优势明显。

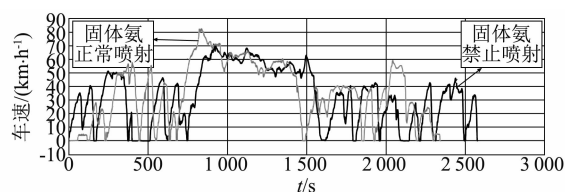


图 7 市区工况下 SSCR 系统与原排对比试验 (车速)

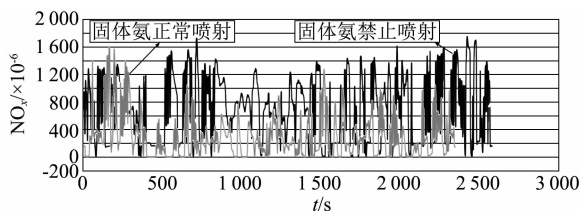


图 8 市区工况下 SSCR 系统与原排对比试验 (NO_x 排放)

第五次和第六次试验在高速工况下进行, 结果见图 9、图 10。第五次试验禁止 SSCR 后处理功能, 试验进行大约 30 min 时, ECU 开始限制发动机扭矩, 试验停止。第六次试验恢复 SSCR 后处理功能, 选择同一路段、同一驾驶员进行相似的道路测试。第五次试

验结果 NO_x 排放为 $7.36 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ ，第六次试验结果 NO_x 排放为 $1.08 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ 。对比第三次市区工况的试验结果 $8.58 (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ ，第五次高速工况的 NO_x 原排较低，原因是高速工况下加减速较少，发动机转速稳定。对比第五、第六次试验，从 NO_x 瞬态排放特征可以看出：高速工况采用固态氨喷射， NO_x 排放降低 85.3%，效果显著。

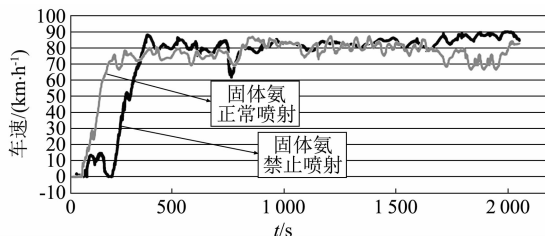


图9 高速工况下 SSCR 系统与原排对比试验 (车速)

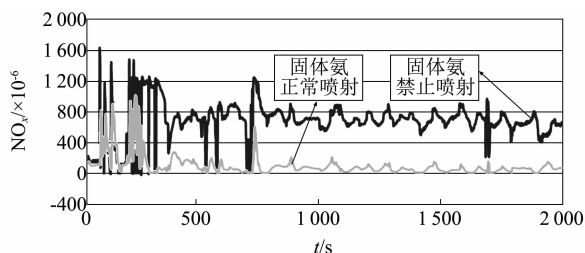


图10 高速工况下 SSCR 系统与原排对比试验 (NO_x 排放)

5 结 论

通过上述试验研究可以得到以下结论：

(1) 配置 SSCR 后处理系统的国 V 发动机整车满足国 V PEMS 标准 (送审稿) 的 NO_x 排放要求，而且具有满足更高排放法规要求的潜力。

(2) 市区工况下，SSCR 可以使整车 NO_x 排放降低 61.3%，明显优于尿素 SCR 系统；而在高速工况下，SSCR 可以使整车 NO_x 排放降低 85.3%，效果显著。

(3) 高速工况下，车辆行驶稳定， NO_x 原排

相比市区工况较低，因此，减少行车过程中的频繁加减速有利于减少车辆的排放。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2016 年中国机动车环境管理年报 [Z]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2016.
- [2] 赵航, 王务林, 杨建军, 等. 车用柴油机后处理技术 [M]. 北京: 中国科学出版社, 2010.
- [3] 王子亮. 光化学烟雾及其化学特征 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2005, 18 (2): 224-226.
- [4] 许洪军, 曹会智, 刘伍权, 等. 柴油机尾气氮氧化合物的机外净化技术研究 [J]. 内燃机, 2004 (6): 36-38.
- [5] EDWARDS S P, FRANKL G R, BINDER K, et al. Strategic analysis of technologies for future truck engines [C]. SAE Paper 2000.
- [6] 冒晓建, 卢成委, 尚文雁, 等. 满足未来排放要求的轿车用柴油机关键技术 [J]. 车用发动机, 2006, 161 (1): 6-14.
- [7] 管斌, 周校平, 林赫, 等. NH_3 -SCR 法降低柴油机 NO_x 排放的研究进展 [J]. 车用发动机, 2007, 171 (5): 1-7.
- [8] IITSUKA Y, YAMAUCHI H, SATO S, et al. Ammonia production from solid urea using nonthermal plasma [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2012, 48 (3): 872-877.
- [9] 楼狄明, 张正兴, 谭丕强, 等. 车用柴油机选择性催化还原技术研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32 (12): 103-108.
- [10] 唐韬. 重型柴油机尿素 SCR 与 DPF 系统的集成和优化 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [11] 冯向宇. 柴油机排气后处理系统应用的关键科学问题研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [12] 赵彦光. 柴油机 SCR 技术尿素喷雾热分解及氨存储特性的试验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [13] 马军彦. 固态铵 SCR 技术铵盐分解及 NO_x 低温还原特性研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2016.