

国六重型柴油车劣化排放特性分析

鞠伟达, 鲁永亮, 李 智

中汽研汽车检验中心(广州)有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2024年9月23日; 录用日期: 2024年10月16日; 发布日期: 2024年10月25日

摘 要

重型柴油车是我国目前最主要的交通工具, 并占据了较高的NO_x和PM排放, 基于实际道路行驶测量方法(PEMS)模拟后处理中毒和老化情况下的实车排放, 选取了一辆技术路线为: EGR + DOC + DPF + SCR的国六重型柴油车进行不同劣化件组合的排放分析。结果表明: DOC失效比SCR转化效率降低产生的NO_x排放更多; 低速行驶时, EGR率过高反而会导致排放增加; 目前国六的技术路线能够很大程度上起到净化排气的作用; 任何一个部件的异常工作状态都会导致排放明显增加。

关键词

重型柴油车, 国六, 排放特性, 实际道路行驶测量方法

Analysis of Deteriorated Emission Characteristics of China VI Heavy-Duty Diesel Vehicle

Weida Ju, Yongliang Lu, Zhi Li

China Automotive Research & Testing Center (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Sep. 23rd, 2024; accepted: Oct. 16th, 2024; published: Oct. 25th, 2024

Abstract

Heavy duty diesel vehicles are currently the most important means of transportation in China, accounting for a high proportion of NO_x and PM emissions. Based on the actual road driving measurement method (PEMS) simulation of post treatment emissions under poisoning and aging conditions, a national VI heavy duty diesel vehicle with a technical route of EGR + DOC + DPF + SCR was selected for emission analysis of different deteriorated component combinations. The results

show that DOC failure produces more NO_x emissions than SCR conversion efficiency reduction; When driving at low speeds, an excessively high EGR rate can actually lead to an increase in emissions; At present, the technical route of National VI can largely play a role in purifying exhaust gas; The abnormal working state of any component will lead to a significant increase in emissions.

Keywords

Heavy-Duty Diesel Vehicle, China VI, Emission Characteristics, Real-World Driving Measurement Method

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,我国运输结构仍以公路运输为主,据统计,2022年全国营业性客运量占61.2%,营业性货运量占73.8%。汽车是移动源中排放污染物最主要的贡献者,重型柴油车作为目前最主要的货运、客运的交通工具,以20%的市场保有量,占据了80%以上的NO_x总排放和90%以上的PM总排放[1]。

随着排放标准的不断升级,搭载电控技术、高压共轨、涡轮增压等技术已成为重型柴油车的标配,整车的燃油经济性、可靠性也在一次次的升级中得到迭代。2018年6月,生态环境部发布GB17691-2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》后,NO_x的排放限值较国五排放标准加严了77%,并增加了使用便携式排放分析系统(portable emission measurement system, PEMS)在实际道路采集整车排放的要求,国六阶段,整车厂和发动机厂采取的主流技术路线为:废气再循环(EGR) + 催化氧化器(DOC) + 颗粒捕集器(DPF) + 选择性催化还原(SCR) [2] [3]。

截至2022年国内的重型车保有量为839万辆,随国四国五阶段重型柴油车不断淘汰和替换后,满足国六阶段的重型柴油车将逐渐成为市场的主流。重型柴油车作为用户的生产工具,在实际使用过程中由于燃油、尿素品质的参差不齐,随着使用时间的增长,后处理中毒或老化,其排放很有可能会劣化5~10倍以上。本研究通过采集实际道路PEMS工况路谱,在转鼓上进行复现后,对发动机及后处理各功能部件进行不同程度劣化,通过测量单一劣化件和组合劣化件的实际排放,探究后处理各功能部件对排放的影响,为在用车排放监管和标准制修订提供一定的科学依据[4]-[7]。

2. 实验方法

2.1. 测试车辆及设备

本研究选取一辆满足国六排放标准的N2类非城市厢式运输车,额定功率112 kW,发动机排量2.478 L,采用EGR + DOC + SCR + DPF的技术路线,使用满足国六要求的市售柴油,样车及发动机部分参数见表1。

试验测试台由美国BBK公司BEP-9250重型底盘测功机和日本HORIBA公司的MEXA-ONE排放分析系统组成,能够准确模拟车辆的惯量并测量实时排放。

底盘测功机模拟惯量为3500~60000 kg,排放分析系统采用不分光红外线法(non-dispersive infrared, NDIR)测量CO₂与CO,采用化学发光法(chemiluminescent detector, CLD)测量NO_x,采用凝聚颗粒计数法(condensation particle count, CPC)测量PN。

Table 1. Sample vehicle parameters**表 1.** 样车参数

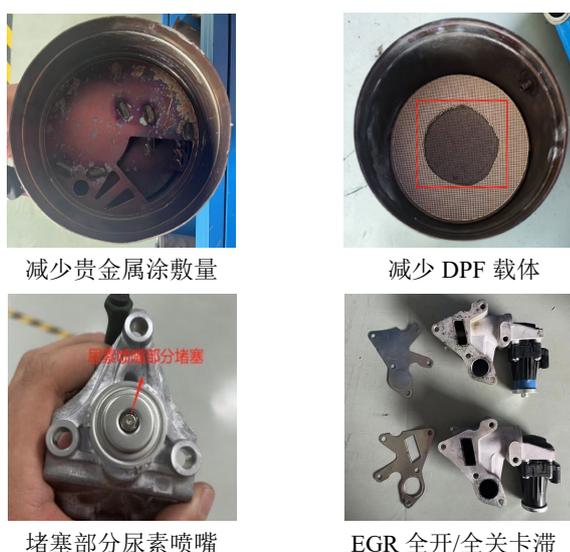
| 名称 | 车辆参数 |
|---------------------|--------------------|
| 最大设计总质量(kg) | 4490 |
| 外廓尺寸:长 × 宽 × 高 (mm) | 5990 × 2180 × 2355 |
| 驱动型式及位置 | 4 × 2, 后轮驱动 |
| 发动机形式 | 直列四缸 |
| 额定功率/转速(kW/r/min) | 112/2800 |
| 排量(L) | 2.478 |
| 进气方式 | 增压中冷 |
| 涂层材料 | Cu 基分子筛 |

2.2. PEMS 循环

按照国六标准要求,按照 45%市区路,25%市郊路,30%高速路在广州市附近一条典型 PEMS 路线上进行路谱采集,将速度-时间路谱导入至转鼓后,按照 3285 kg 的测试质量,28.4%的加载比例,采用 GB/T 27840-2011 中规定的货车行驶阻力系数推荐值进行试验。通过 OBD 诊断仪采集 CAN 信号,解析出参考扭矩、发动机实际百分比扭矩、发动机摩擦扭矩、发动机转速等参数后用于计算瞬时功率并进行积分得到试验累计功[8]。

2.3. 劣化件制作方法

本研究使用了:DOC、DPF、SCR、EGR、尿素喷嘴五种不同程度劣化的劣化件。其中 EGR 劣化通过更换全开和全关的 EGR 阀劣化件模拟。DOC、SCR 均是利用在载体上贵金属催化的作用下发生氧化还原反应来还原排放污染物,故通过减少贵金属涂敷量来控制反应速率,本研究 DOC 未涂敷贵金属,SCR 的贵金属涂敷量减少了 50%。DPF 的劣化通过减少壁流式载体来模拟,本研究载体减少量为:Φ15 cm (直径) × 2 cm/6 cm/10 cm (深度)。本研究选取的尿素喷嘴共有 3 个喷射孔,分别采用单孔堵塞和双孔堵塞的方式模拟尿素喷射量减少。测试用劣化件见图 1。

**Figure 1.** Deteriorated parts for testing**图 1.** 测试用劣化件

2.4. 基于比排放数据的分析方法

国六标准的 PEMS 测试中,增加了使用功基窗口法来计算排放,要求有效窗口的通过率在 90%以上,众多学者对重型车 PEMS 循环的排放特性进行了分析,表明了 PEMS 工况测试能够反映车辆真实的排放水平。窗口平均功率大于发动机最大功率的 20%的窗口定义为有效窗口,这同时说明部分平均功率较小窗口的排放未被统计。吕立群在最新的研究中发现由于 20%的功率阈值的要求,大量低功率、高排放的数据被剔除,未参与 PEMS 试验的计算,而导致实际的排放污染物与认证试验结果差异较大。本研究采用的试验工况、车辆载荷、试验温度等均相同,为更明确地反映车辆实际的排放,采用总污染物/总累计功(即比排放)的方式反馈车辆的排放水平,来探究后处理各功能部件对排放的影响[9] [10]。

2.5. 试验过程

依次更换表 2 所述劣化件至样车后,参考典型路谱的速度曲线在底盘测功机上运行车辆,进行排放数据采集,采用同一名驾驶员进行试验,保证驾驶习惯一致,车辆全程使用国六市售柴油。

Table 2. Overall experimental situation

表 2. 总体实验情况

| 分类 | 项目 |
|----------|--|
| 对照组 | 无故障 |
| 单劣化件故障 | DOC 失效(未涂敷贵金属) |
| | SCR 转化效率降低(贵金属涂敷量减少) |
| | DPF 载体减少 - $\Phi 15 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ |
| 不同劣化程度故障 | EGR 阀全开卡滞 |
| | EGR 阀全关卡滞 |
| | DPF 载体减少 - $\Phi 15 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ |
| | DPF 载体减少 - $\Phi 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ |
| 联合故障 | SCR 劣化 + EGR 阀全开卡滞 |
| | SCR 劣化 + EGR 阀全关卡滞 |
| | SCR 劣化 + 尿素喷嘴(单孔堵塞) |
| | SCR 劣化 + 尿素喷嘴(双孔堵塞) |

3. 结果讨论

3.1. 单劣化部件排放分析

由表 3 可见,CO 排放依次为法规限值的 3.86%, 0.95%, 1.08%, 0.81%, 均处在一个较低的排放水平。特征路谱的发动机负荷如图 2 所示,发动机负荷在 20%以下的时间占比达到 40.8%,由于载荷较低,发动机的高负荷工况较少,而柴油机须在过量空气系数 < 1.5 时,即高负荷工况下才会急速生成 CO;但不能否认,DOC 表面的贵金属对于氧化 CO 还是有较强作用。

PN 和 PM 的排放在 DOC 失效和 DPF 载体破损后明显增加,PN 较对照组分别增加了 11 倍和 1222 倍;PM 较对照组分别增加了 4.3 倍和 5.3 倍。可见 DOC 失效后,PN 增长的主要原因为 DOC 不能把尾气中的可溶性有机物消除,对于缸体中燃料燃烧产生的 NO 也不能氧化为 NO_2 ,致使 DPF 中作为降低燃烧温度的 NO_2 催化剂量减少,降低了 DPF 转化效率。而 DPF 壁流式载体的破损对碳颗粒的捕集和处理

影响更加明显。

Table 3. Statistics of emission results of single deteriorated parts

表 3. 单劣化件排放结果统计

| 劣化部件 | DOC 失效 | DPF 载体减少 | SCR 转化效率降低 | 对照组 |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|
| CO (mg/kWh) | 231.3 | 56.8 | 64.6 | 48.6 |
| NO _x (mg/kWh) | 2079.7 | 288.4 | 1253.8 | 249.9 |
| PN (#/kWh) | 3.32E + 11 | 5.12E + 13 | 3.01E + 10 | 4.19E + 10 |
| PM (mg/kWh) | 6.135 | 7.351 | 1.547 | 1.385 |

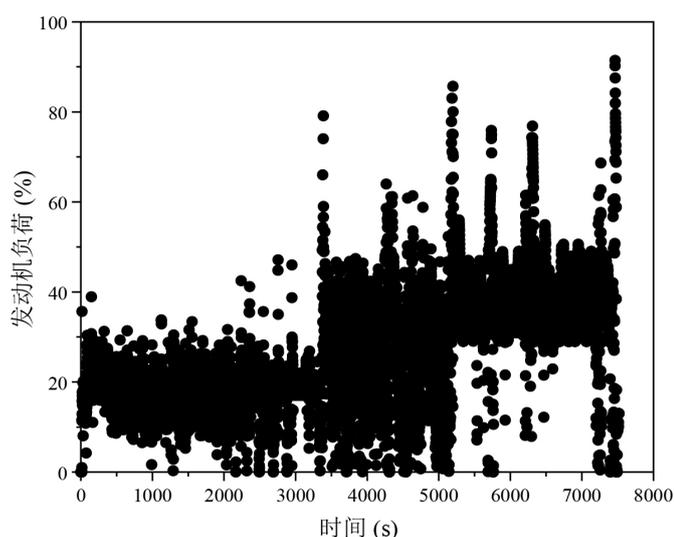


Figure 2. Real time load map of engine

图 2. 发动机实时负荷图

更换 DOC 和 SCR 劣化件后, NO_x 的排放量急剧增加, 较对照组分别增加了 8.3 倍和 5.0 倍, 且 DOC 失效比 SCR 转化效率降低产生的 NO_x 排放更多。这说明 DOC 对排气中 NO 的氧化作用尤为重要, 图 3 和图 4 中 NO 和 NO₂ 的数量级印证了这一点, 原排中 NO 与 NO₂ 的比值约为 9:1, 此时催化器中发生的主要是标准 SCR 反应, 反应速率低, 反应温度高, 不利于尾气的净化, 反应的化学方程式如下:



而正常工作的 DOC 可以使尾气中的 NO₂ 占比增加, 使 SCR 中进行快速 SCR 反应, 允许在更低的反应温度下, 更高效地转换氮氧化物, 反应的化学方程式如下:



对比对照组, DOC 失效后的 NO 的最终排放大幅升高了 12.3 倍, NO₂ 最终排放提高了 5.1 倍。

3.2. 不同劣化程度劣化件排放分析

由表 4 可见, EGR 阀开度对 NO_x 的影响明显, 这与 EGR 技术的工作原理息息相关。发动机燃烧后的废气氧含量极低且比热容较高, 部分废气重新进入气缸中与燃油和空气混合后, 氧气浓度降低; 比热容升高, 气体燃烧的最高温度降低; 有效避免了 NO 的高温富氧的生成条件。

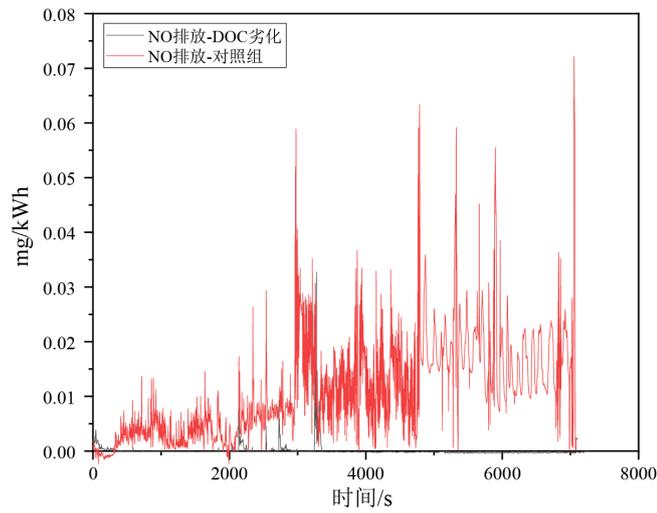


Figure 3. Comparison of DOC Failure NO Emissions
图 3. DOC 失效 NO 排放对比

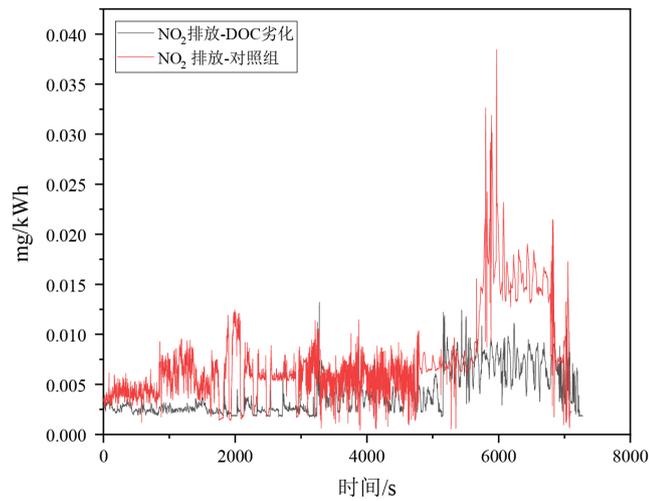


Figure 4. Comparison of NO₂ emissions from DOC failure
图 4. DOC 失效 NO₂ 排放对比

Table 4. Statistics of emission results of deteriorated parts with different degrees of deterioration
表 4. 不同劣化程度劣化件排放结果统计

| 劣化部件 | NO _x (mg/kWh) | PN (#/kWh) | PM (mg/kWh) |
|-------------------------|--------------------------|------------|-------------|
| EGR 阀全开卡滞 | 375.3 | 3.10E + 10 | 12.568 |
| EGR 阀全关卡滞 | 3145.7 | 2.14E + 10 | 0.583 |
| DPF 载体减少-Φ15 cm × 2 cm | 288.4 | 5.12E + 13 | 7.351 |
| DPF 载体减少-Φ15 cm × 6 cm | 301.1 | 9.46E + 13 | 9.153 |
| DPF 载体减少-Φ15 cm × 10 cm | 261.9 | 2.18E + 14 | 14.572 |

EGR 阀全开降低了缸内燃烧的温度，对 NO_x 生成有抑制作用，但其 NO_x 的比排放是表 5 对照组的 1.5 倍。对模态数据进行分段分析，EGR 阀全开时的低速段 NO_x 排放为对照组的 2.19 倍，可见由于缸内

燃烧的温度降低, 在 PEMS 工况运行期间, 后处理的平均温度降低。这使车辆在低速段运行时, 催化转化器的 NO_x 转化效率降低, 从而拉高了 EGR 阀全开时 NO_x 的比排放。在实际运行工况中, EGR 率的控制对车辆排放的影响有较大作用, 低速行驶时, EGR 率过高反而会导致排放增加, 只有发动机功率和 EGR 率相比配才能更好地满足降低排放的要求。

如图 5 可见, 中高速段的 NO_x 排放低于对照组, 这也符合缸内燃烧温度的升高对 NO_x 的生成有一定的促进作用的结论。

EGR 阀开度为 0 时, 没有废气进入气缸, 混合气中氧含量较高; 比热容降低, 气体燃烧的最高温度升高; 高温富氧的状态加剧了 NO_x 的生成, 图 6 中的瞬态数据在全速度段均大幅升高, 和 EGR 阀全开相比, EGR 阀全关的 NO_x 排放增大了 6.45 倍。

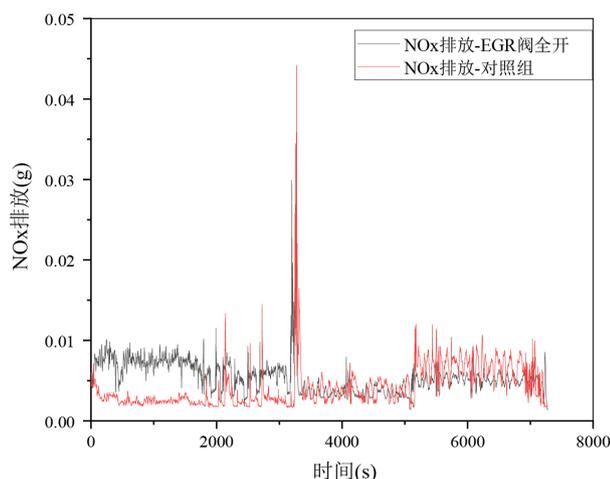


Figure 5. Comparison of NO_2 emissions with EGR valve fully open

图 5. EGR 阀全开 NO_2 排放对比

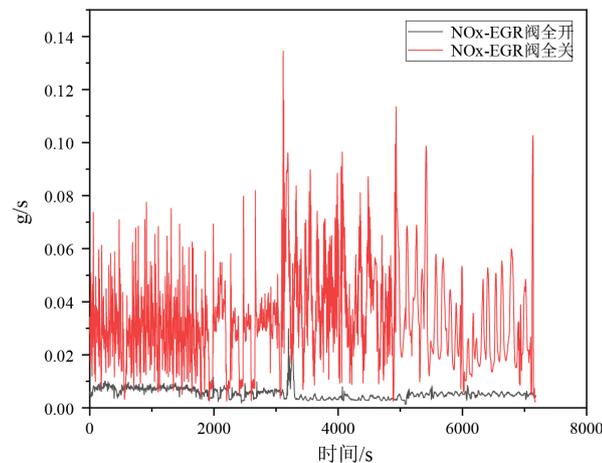


Figure 6. Comparison of NO_x emissions in different states of EGR valve

图 6. EGR 阀不同状态 NO_x 排放对比

如图 7 所示, PM 排放的变化情况与 NO_x 恰恰相反, EGR 阀全开时滤纸收集到的黑碳质量远远高于

EGR 阀全关；而 PN 的变化并不明显。这是由于在 EGR 全开时，氧气浓度降低；且柴油的扩散燃烧会导致压燃过程中存在混合不均匀的情况，形成了局部高温、缺氧的条件，促进了碳烟的生成。

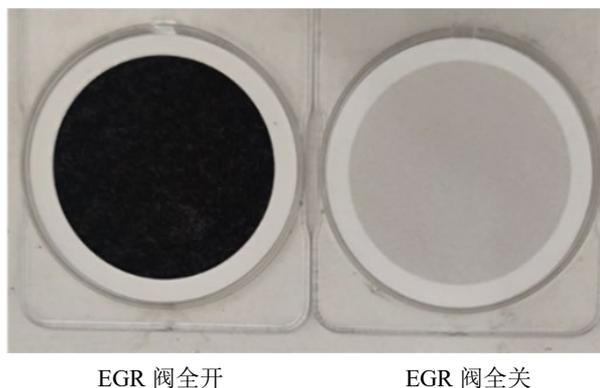


Figure 7. Comparison of filter paper soot in different states of EGR valve

图 7. EGR 阀不同状态滤纸碳烟对比

更换不同劣化程度的 DPF 载体后，NO_x 的变化量不明显，如图 8 所示，颗粒物数量和颗粒物质量均有一定程度的增加，可见壁流式的载体结构对颗粒物的捕集效率相当显著。不同的是，随着 DPF 劣化程度的加剧，PN 先急剧增加，再平稳增长；PM 的增长速率基本稳定。

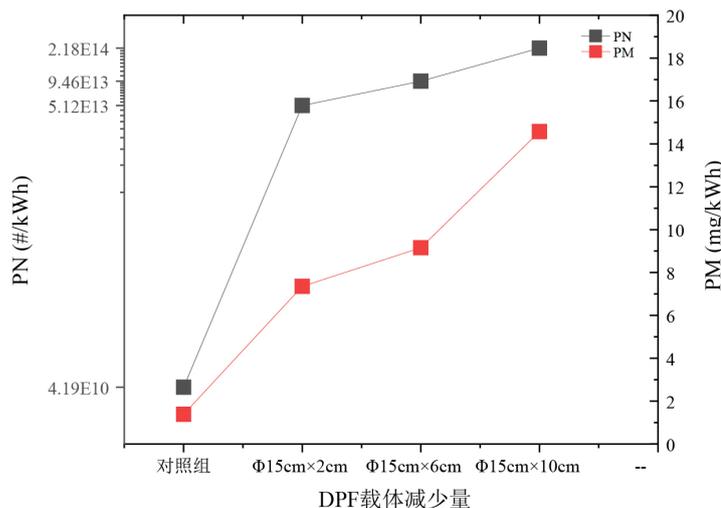


Figure 8. Comparison of DPF carrier reducing carbon smoke

图 8. DPF 载体减少碳烟对比

3.3. 联合劣化故障排放分析

为进一步模拟重型柴油车实际使用过程中，后处理劣化的排放情况，对影响 NO_x 排放的部分劣化件进行分组，探究劣化状态下，NO_x 排放的恶化情况，实验结果如表 5 所示。

SCR 的转化效率降低和 EGR 阀全开卡滞同时生效时，车辆的比排放增加并不明显，相较于 EGR 阀全开卡滞的单一故障，NO_x 的比排放仅增加了 9.8%，一氧化氮和二氧化氮的比例基本相同。这说明在排放较低的情况下，SCR 劣化对 NO_x 的排放结果影响不明显。

Table 5. Statistics of joint degradation fault emission results
表 5. 联合劣化故障排放结果统计

| 劣化部件 | NO _x (mg/kWh) | NO (mg/kWh) | NO ₂ (mg/kWh) |
|---------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| SCR 劣化 + EGR 阀全开卡滞 | 412.4 | 110.9 | 301.5 |
| SCR 劣化 + EGR 阀全关卡滞 | 4026.7 | 2322.4 | 1704.3 |
| SCR 劣化 + 尿素喷嘴(单孔堵塞) | 3576.9 | 1958.6 | 1618.3 |
| SCR 劣化 + 尿素喷嘴(双孔堵塞) | 8768.5 | 4689.1 | 4079.4 |

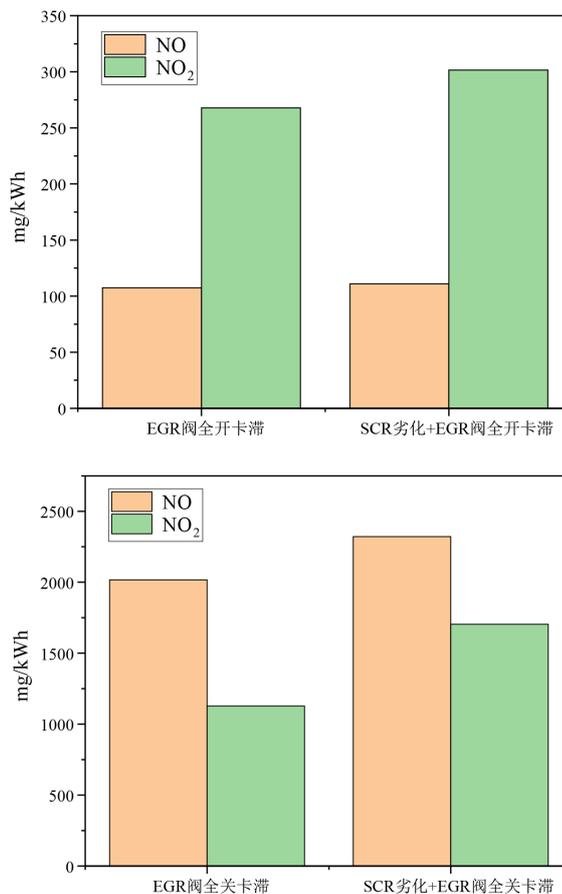


Figure 9. Comparison of SCR + EGR combined fault NO_x
图 9. SCR + EGR 联合故障 NO_x 对比图

如图 9 所示, SCR 的转化效率降低和 EGR 阀全关卡滞同时生效时, 车辆的比排放增加较为显著, 相较于 EGR 阀全关卡滞的单一故障, NO_x 的比排放增加了 28.0%, 且一氧化氮在氮氧化物的占比明显增加, 这说明催化转化器已经不能将额外生成的一氧化氮氧化为二氧化氮, 且由于一氧化氮和二氧化氮的占比均较高, 这说明由于贵金属涂敷量的降低, 快速 SCR 反应催化还原氮氧化物的速率受限, 即使有较高水平的氮氧化物产生也不能高效地进行催化还原, 若 SCR 中的贵金属涂敷量继续降低, 排放结果将会劣化得更加明显。

如图 10 所示, 在 SCR 劣化的情况下, 尿素喷嘴不同程度的堵塞会直接导致 NO_x 排放的升高, 单孔堵塞和双孔堵塞的 NO_x 排放分别是 SCR 劣化的 2.85 倍和 6.99 倍。且低速段、中速段、高速段的增量基

本相同。这也说明，尿素喷射量和发动机负荷是呈正相关的，在减少喷射量或者尿素兑水的情况下，NO_x的排放会在车辆运行的整个生命周期内增加。

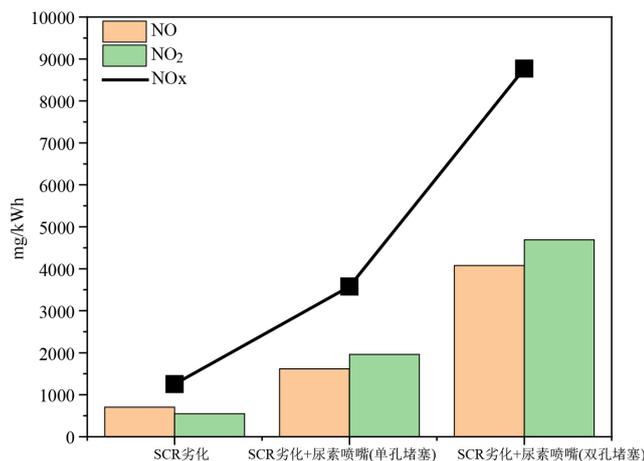


Figure 10. Comparison of NO_x caused by SCR + nozzle blockage combined fault

图 10. SCR + 喷嘴堵塞联合故障 NO_x 对比图

3.4. 结果分析

本研究共使用了 5 个部分的劣化件，进行了 11 种不同劣化状态的 PEMS 循环排放采集。模拟了加注劣质燃油导致后处理中毒、使用时间增长导致后处理老化、尿素兑水等在用车使用过程中易发生的后处理系统故障，并模拟了实际使用过程中多个部件劣化的排放情况。

结果显示，PN 和 NO_x 对劣化件的敏感程度很高，CO 和 CO₂ 敏感程度较低。在良好的工作状态下，EGR + DOC + DPF + SCR 的技术路线能够很大程度上起到净化排气的作用；DOC 对 DPF 和 SCR 的转化效率均有促进作用，三者结合对 NO_x 和碳烟的净化效果明显，任何一个部件的劣化都会导致排放明显增加；EGR 阀的开度要结合发动机负荷进行调控，选择合理的 EGR 阀开度才能使污染物降低，否则会起到适得其反的作用。

4. 结论

- 1) 采用 EGR + DOC + DPF + SCR 技术路线的重型柴油车能够较好控制车辆的排放水平。
- 2) 后处理部件的劣化导致其失效或部分失效时，会使其工作效率降低，NO_x 和碳烟的排放会明显增加；其中 DOC 失效比 SCR 转化效率降低产生的 NO_x 排放更多，低速行驶时，EGR 率过高反而会致排放增加。
- 3) 尿素和燃油的质量情况对后处理影响明显，对照重型柴油车的实际使用情况，在用车后处理中毒和老化的情况需要通过远程终端、遥感、油品尿素抽检等方式加强监管。
- 4) 本研究选取的车辆和技术路线具有唯一性，实验结果对于其他排量和技术路线的重型柴油车的适用性还需进一步验证。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 2022[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2022.
- [2] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB17691-2018 重型柴油车污染物排放限值及测量方法

- (中国第六阶段) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [3] 高舒芳. 柴油发动机尾气后处理技术的发展探析[J]. 内燃机与配件, 2023(8): 109-111.
- [4] 马成功, 李梁, 张凡, 等. 重型国六在用柴油车劣化排放特性研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(2): 214-218.
- [5] 殷子渊, 张凯山. 机动车尾气排放劣化率研究方法与发展[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(一). 北京: 《工业建筑》杂志社有限公司, 2019: 6.
- [6] 温溢, 刘俊女, 刘宪, 等. 北京市第五阶段出租车排放劣化特性[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4487-4492.
- [7] 于增信, 徐志军, 孙莉, 等. 在用车排放劣化规律研究[J]. 车用发动机, 2012(2): 63-65.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T27840-2011 重型商用车燃料消耗量测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [9] 常啸天, 程晓章, 朱博文, 王浩, 邢晓通. 基于国VI柴油机 SCR 系统 NO_x 转化效率影响因素研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2022, 45(2): 171-175.
- [10] 吕立群, 尹航, 王军方, 等. 基于功基窗口法的国六重型柴油车实际道路排放研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3539-3545.