



沉积不同碳载量DPF对柴油机颗粒物数量排放特征影响

王浩浩, 肖有强, 薛振涛

引用本文:

王浩浩, 肖有强, 薛振涛. 沉积不同碳载量DPF对柴油机颗粒物数量排放特征影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(12): 210–215.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

增压重型柴油机米勒循环应用的潜力研究

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(12): 223–230 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.12.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.12.029)

基于深度学习的DPF故障诊断及应用

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(8): 126–133 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.08.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.08.015)

基于振动信号的柴油机NO_x排放虚拟传感研究

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(6): 141–148 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.06.017)

考虑碳排放的多式联运多目标路径规划

重庆理工大学学报(自然科学). 2022, 36(11): 219–225 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.11.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.11.026)

引燃柴油预喷策略对甲醇/柴油缸内双直喷性能及排放的影响研究

Study on the Effect of Ignition Diesel Pre-injection Strategy on the Performance and Emissions of Methanol/Diesel Dual Direct Injection

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(4): 85–92 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.04.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.04.012)



“内燃机高效清洁低碳化燃烧与优化控制”专栏(专栏主编:史程 燕山大学 博士)

沉积不同碳载量 DPF 对柴油机颗粒物数量排放特征影响

王浩浩¹, 肖有强¹, 薛振涛¹, 王建东¹, 张瑜¹, 谭建伟²

(1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061;

2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要:为研究沉积在 DPF 孔道内碳载量对柴油机颗粒物数量排放的影响,将车载 PEMS 路谱在台架复现,分析了 4 种碳载量下颗粒物数量排放因子、瞬时排放特征。结果表明:DPF 的 PN 排放随着碳载量的升高而升高;在新鲜 DPF 情况下,PN 瞬时排放较高部分集中于市区工况且持续时间较短,而在含有碳载量 DPF 情况下,PN 瞬时排放较高部分集中于高速工况且持续时间较长;在高速工况下,随着 DPF 孔道内碳载量的不断积累,PN 瞬时排放与碳载量呈现一定的正相关性。此外,DPF 内部孔道的变化情况直接与颗粒物数量排放特征相关。

关键词:柴油机;颗粒物数量;排放;碳载量

中图分类号:TK417

文献标识码:A

文章编号:1674-8425(2022)12-0210-06

0 引言

柴油机因其动力性强、可靠性好、热效率高等特点,已被广泛应用于各类车辆、工程机械^[1-2]领域。然而,柴油机颗粒物排放约占机动车颗粒物排放总量的 90% 以上^[3],对人类健康和生活环境造成一系列影响,已引起了广泛关注。为有效控制柴油机颗粒物排放污染,机动车排放标准不断升级,欧盟和我国第六阶段排放标准对颗粒物

量(particle mass, PM)和颗粒物数量(particle number, PN)提出限值要求。当前对于 PM 测量采用滤纸称重法,但由于 PM 限值的下降和滤纸自身重量的影响,测量的准确度和重复性下降,难以满足测量结果一致性要求^[4-5]。此外,随着发动机后处理控制技术的提升,颗粒物质量排放呈现逐年降低趋势^[5-6],柴油机颗粒物数量排放问题日益凸显。

迄今为止,国内外研究者针对颗粒物数量

收稿日期:2022-07-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3503205)

作者简介:王浩浩,男,博士,工程师,主要从事柴油机排放后处理研究,E-mail:wanghaohao@weichai.com;通讯作者 谭建伟,男,博士,副教授,主要从事柴油机排放后处理研究,E-mail:tanjianwei@bit.edu.cn。

本文引用格式:王浩浩,肖有强,薛振涛,等.沉积不同碳载量 DPF 对柴油机颗粒物数量排放特征影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(12):210-215.

Citation format:WANG Haohao, XIAO Youqiang, XUE Zhenhao, et al. The effects of DPF with various deposited soot loads on particle number emissions of diesel engines[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2022, 36(12): 210-215.

排放问题进行了广泛且深入的研究。Lv 等^[7]采用便携式排放测试系统(portable emissions measurement system, PEMS)针对国 IV、国 V 柴油车研究了 PN 排放特征,研究表明,PN 排放因子与车速、油耗不直接相关且数值较大。Stavros 等^[8]研究了尿素喷射量对柴油机 PN 排放影响,发现喷入 100×10^{-6} 尿素导致 23 nm 以上、23 nm 以下颗粒物数量分别增长 129%、67%。Barouch 等^[9]分析了颗粒物数量采集设备不确定度对 PN 排放结果影响,指出对于 23 nm 颗粒物全流稀释采集、直接采集、PEMS 采集不确定度分别为 32%、34%、39%。楼狄明等^[10]研究了船舶主机在不同负荷下颗粒物数量分布情况,结果表明,随着负荷增加,颗粒物数量浓度呈现先降低后升高趋势。Wang 等^[4]采用室内转毂测量方法研究了 2 辆汽油车在不同环境温度对颗粒物数量排放的影响,发现在 $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 颗粒物数量排放是 $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 颗粒物数量排放的 6 倍,指出低温下较大的滑行阻力是引起 PN 排放增长的根本原因。

此外,相关研究表明柴油机颗粒物捕集器(diesel particulate filter, DPF)对柴油机 PN 捕集效率超过 96% 以上^[7,11-12]。随着 DPF 的使用,DPF 需要定期再生,其本质是将沉积在 DPF 孔道内的颗粒物进行燃烧,进一步影响颗粒物数量的排放。合理的再生时机直接影响 DPF 的使用,而判断 DPF 再生时机的实质是对沉积在 DPF 孔道内碳载量的判断^[13]。目前,关于碳载量对柴油机颗粒物数量排放影响研究鲜有报道。

进一步,研究表明 PN 在实际道路上排放较高^[7],且 PEMS 试验安装设备繁多,所需成本较高,综上,本文基于发动机台架试验,将车载 PEMS 路谱在台架复现,研究了沉积在 DPF 孔道内不同碳载量对柴油机颗粒物数量排放影响,其结果对改善柴油机性能、降低颗粒物数量排放具有一定参考意义。

1 试验方法

试验装置如图 1,主要设备仪器包括柴油机、交流电力测功机、后处理装置、颗粒物采集设备 AVL489。试验所用柴油机为满足国 VI 标准某型

号直列四缸机。所用后处理装置为氧化型催化器(DOC)、颗粒捕集器(DPF)、选择性催化还原(SCR)、氨逃逸催化器(ASC)。颗粒采集设备 AVL489 连接于柴油机后处理装置之后,对柴油机排气进行直接采集。所用颗粒物采集设备 AVL489 采用凝结粒子计数(condensation particle counters, CPC)原理进行颗粒物数量浓度检测,PN 测量 50% 切割效率直径(D50)为 23 nm,工作液为正丁醇。试验用柴油为满足国六标准市售 0 号柴油,其理化特性分析结果见表 1。

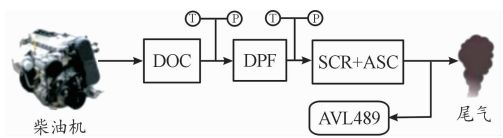


图 1 试验装置示意图

表 1 试验用柴油理化特性分析结果

项目	参数
热值/(MJ · kg ⁻¹)	42.87
密度/(kg · m ⁻³)	835.50
黏度/(mm ² · s ⁻¹)	5.06
碳质量分数/%	86.14
氢质量分数/%	13.86
硫含量/(mg · L ⁻¹)	4.40
锌质量分数/%	0.002 4

首先对使用新鲜件 DPF 情况下柴油机尾排颗粒物数量浓度进行测量,之后,拆下 DOC、SCR/ASC 装置,对 DPF 进行积碳试验。当 DPF 碳载量达到预期目标时,重新安装 DOC、SCR/ASC 装置,检测颗粒物数量浓度,如此反复进行试验。此外,为排除尿素喷射量对 PN 排放的影响,在试验过程中未喷尿素。DPF 积碳工况为 1 600 r/min、40% 负荷,当积碳工况运行一段时间,拆解 DPF 称重,直至达到目标碳载量为止。在进行积碳前,先称量新鲜 DPF 重量作为后续称重基准。试验所用 DPF 积碳量分别为 0.5、1.0、1.5 g/L。测量颗粒物数量浓度工况选用该机型在所配套整车的 PEMS 试验工况,如表 2、图 2 所示。试验过程中所有发动机相关秒采数据由台架监控设备实时记录。

表2 PEMS 试验工况

	速度/(km·h ⁻¹)	占比/%
市区工况	15~30	45±5
市郊工况	45~70	25±5
高速工况	≥70	30±5

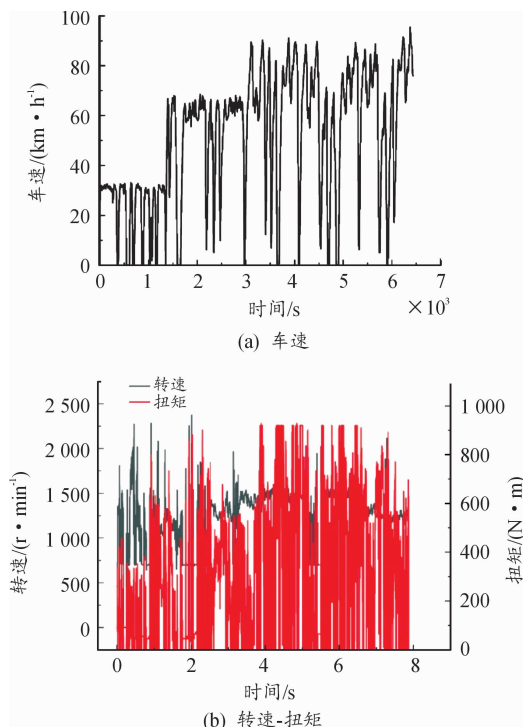


图2 台架试验用 PEMS 工况曲线

颗粒物数量浓度根据国六排放标准使用功基窗口法获得(功基窗口法详细计算过程可参考文献[14]),如图3所示,从第1个有效工况点开始计算直到累计功达到基准试验室循环功为止,作为第1个窗口;然后以第1个工况平移采样周期开始计算直到累计功达到基准试验室循环功为止,作为第2个窗口;其余窗口依次类推。每一个窗口和颗粒物数量比排放 e_p (个/kW·h) 的计算见式(1)。窗口平均功率大于最大功率的20%时,窗口有效,有效窗口比例应大于50%。如有效窗口比例小于50%,使用较低功率阈值判断窗口有效性,直到有效窗口比例大于50%为止,但较低功率阈值不应小于最大功率的10%。如较低功率阈值为最大功率的10%时,有效窗口比例仍小于50%,则试验无效。按照国六法规要求,90%以上有效窗口的排放要小于法规限值。将有效窗口的颗粒物比排放浓度按照从小到大的顺序排列,选

择90分位数作为评价标准。

$$e_p = \frac{m}{W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})} \quad (1)$$

式中: m 为各污染物的排放量,个/窗口; $W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})$ 为第 i 个平均窗口的发动机循环功, kW·h。

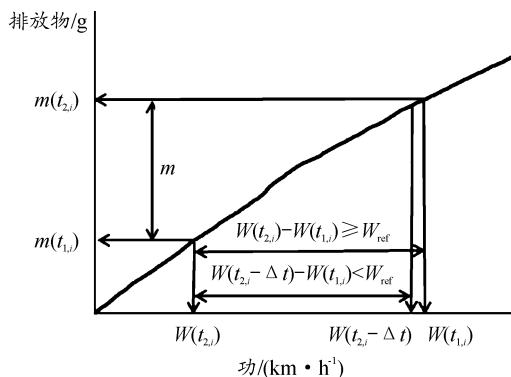


图3 功基窗口法浓度曲线

2 结果与讨论

2.1 PN 排放特征

PN 排放因子如图4所示,在0、0.5、1.0、1.5 g/L碳载量下,PN 排放因子分别为 8×10^{11} 、 3.5×10^{12} 、 3.8×10^{12} 、 4.1×10^{12} (个/kW·h)。相较含有碳载量 DPF 情况下,新鲜 DPF 情况下(碳载量为0 g/L)PN 排放因子低于当前法规限值,这表明 DPF 可以有效降低 PN 排放,与以前相关报道类似^[13-14]。在 DPF 含有碳载量情况下,PN 排放随着碳载量的升高而升高,这表明:随着 DPF 的使用,柴油机 PN 排放存在超标风险。Lv 等^[7] 研究表明,半挂车 PN 实际道路排放量保持在较高水平被低估,因此将来需对在用柴油车 PN 实际道路排放重点关注。

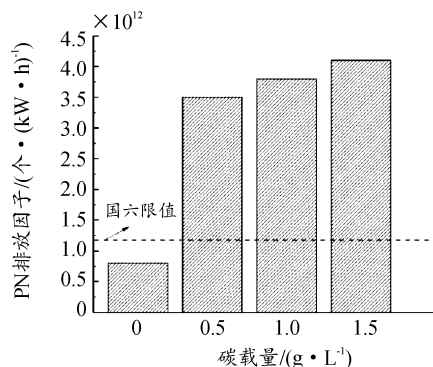


图4 不同碳载量下 PN 排放因子

2.2 PN 排放瞬态分析

为进一步分析在 DPF 含有不同碳载量情况下 PN 排放特征,PN 瞬时排放特征及柴油机排温(DPF 进口)变化情况如图 5、6 所示。

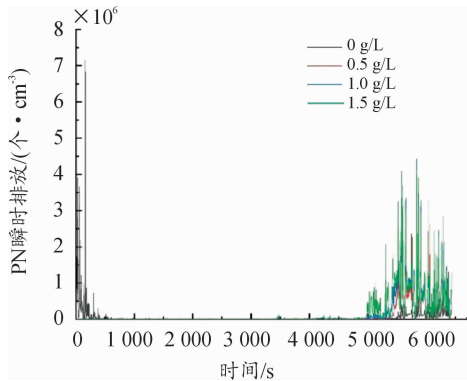


图 5 不同碳载量下 PN 瞬时排放特征

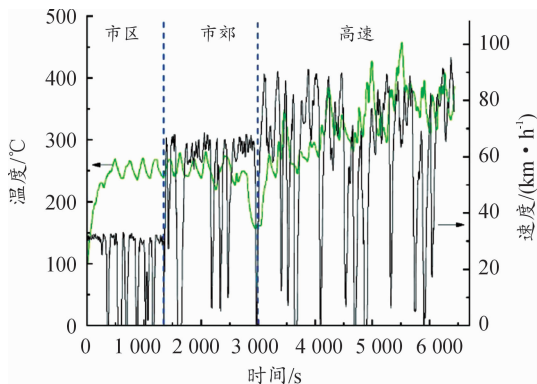


图 6 温度变化情况

在新鲜 DPF、含有碳载量 DPF 情况下,PN 瞬时排放趋势呈现相反趋势,即在新鲜 DPF 情况下,PN 瞬时排放较高集中于市区工况且持续时间较短,而在含有碳载量 DPF 情况下,PN 瞬时排放较高部分集中于高速工况且持续时间较长。在市区工况下,相较于 DPF 孔道内沉积一定碳载量时 PN 瞬时排放,DPF 碳载量为 0 g/L 时,PN 瞬时排放峰值振幅较大且最高可达 7×10^6 个/cm³。在市郊工况下,DPF 孔道内有无沉积一定碳载量 PN 瞬时排放结果相似,排放量均保持在较低水平且峰值较少。在高速工况下,相较于 DPF 碳载量为 0 g/L 时,PN 瞬时排放峰值,DPF 孔道内沉积一定碳载量时,PN 瞬时排放峰值较大。主要原因分析如下:① 相较于市区、市郊工况,高速工况下柴油机缸内柴油、空气混合较浓^[15];② 高速工况下排气

流速高导致颗粒物在 DPF 内停留时间短^[16];③ 高速工况下,如图 6,排温超过 300 °C 且持续时间较长,DPF 被动再生加剧。此外,在高速工况下,随着 DPF 孔道内碳载量的不断积累,PN 瞬时排放与碳载量呈现一定的正相关性。

2.3 DPF 内部变化分析

如 2.2 所述,在市区、高速工况下,PN 瞬时排放在 DPF 孔内有无碳载量时呈现出不同的特征。DPF 作为柴油机颗粒物最有效的捕集装置,其内部孔道的变化情况直接与颗粒物数量排放特征相关。因此,结合图 5、6,推断 DPF 孔道内颗粒物变化情况如下。新鲜 DPF 孔道内仅有所涂覆的贵金属未含有柴油机颗粒物,当含有大量颗粒物的排气通过 DPF 孔道时,DPF 不能将其快速有效地捕集,大量的颗粒物穿过孔道进入大气中,因此,在 PEMS 循环初期会检测到大量颗粒物,如图 5 所示。之后颗粒物在 DPF 孔道内不断积累,DPF 对颗粒物的捕集主要经过深床过滤、过渡过滤、滤饼过滤 3 个阶段^[3-17]。随着滤饼层在 DPF 孔道内的建立,DPF 的捕集效率也不断提高,研究表明,DPF 孔道内碳载量的增加会降低 PN 的排放量^[18],因此,在图 5 市郊工况中 PN 排放量保持在较低水平,瞬时峰值也较低。进入高速工况后,尾排排温升高,超过 300 °C 且持续时间较长,使得 DPF 进行被动再生,大量的颗粒物被燃烧,DPF 孔道内的滤饼层破坏,大量的颗粒物从 DPF 孔道内逃逸,因此,在图 5 高速工况中 PN 排放出现大量峰值。碳载量越大,DPF 发生被动再生越剧烈,逃逸的颗粒物越多,因此,在高速阶段 PN 瞬时排放与 DPF 孔道内碳载量呈现出一定的正相关性。当前,对于 DPF 的研究主要集中于其再生性能^[19-20]、DPF 与其他后处理装置匹配使用问题^[21]、DPF 对柴油机的影响^[22]、DPF 的数值模拟^[23]等方面,对于 DPF 可视化研究鲜有报道,将 DPF 捕集颗粒物过程可视化将进一步提高对 DPF 的认识。

3 结论

1) DPF 的 PN 排放随着碳载量的升高而升高。

2) 在新鲜 DPF 情况下 PN 瞬时排放较高集中于市区工况且持续时间较短,而在含有碳载量 DPF 情况下 PN 瞬时排放较高部分集中于高速工况且持续时间较长。

3) 在高速工况下,随着 DPF 孔道内碳载量的不断积累,PN 瞬时排放与碳载量呈现出一定的正相关性。

4) DPF 内部孔道的变化情况直接与颗粒物数量排放特征相关。

参考文献:

- [1] WANG Haohao, TAN Jianwei, GE Yunshan, et al. Pore morphology and fractal dimension of ash deposited in catalyst diesel particulate filter[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(10): 11026 - 11037.
- [2] ZHANG Mengzhu, GE Yunshan, ZHANG Chuanzhen, et al. An assessment of how distance and diesel oxidation catalyst will impact thermal decomposition behaviors of particles[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 90:157 - 169.
- [3] 王浩浩,葛蕴珊,谭建伟. 颗粒捕集器中沉积灰分对柴油机非常规污染物排放影响研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(3):81 - 85.
- [4] WANG Yachao, ZHAO Haiguang, HOU Pan, et al. Particle number emissions from fully warmed gasoline vehicles at various ambient temperatures[J]. *Chemosphere*, 2022, 306:1 - 6.
- [5] 苏盛. 汽车超细颗粒物排放特征研究[D]. 北京:北京理工大学, 2021.
- [6] VICTOR V, BAROUCH G. Assessment of gaseous and particulate emissions of a Euro6d-temp diesel vehicle driven >1 300 km including six diesel particulate filter regenerations[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(6):1 - 10.
- [7] LV Liqun, GE Yunshan, JI Zhe, et al. Regulated emission characteristics of in-use LNG and diesel semi-trailer towing vehicles under real driving conditions using PEMS [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 88: 155 - 164.
- [8] AMANATIDIS S, NTZLACHRISTOS L, BAROUCH G, et al. Impact of selective catalytic reduction on exhaust particulate formation over excess ammonia events[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48:11527 - 11534.
- [9] BAROUCH G, LÄHDE T, MELAS A, et al. Uncertainty of laboratory and portable solid particle number systems for regulatory measurements of vehicle emissions[J]. *Environmental Research*, 2021, 197:111068.
- [10] 楼狄明,欧天津,施利华,等. 基于 PEMS 的船舶主机的颗粒物排放特性及成分分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(3):87 - 91.
- [11] FLEISCHMAN R, AMIEL R, CZERWINSKI J, et al. Buses retrofitting with diesel particle filters: Real-world fuel economy and roadworthiness test considerations[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 67:273 - 286.
- [12] MENDOZA-VILLAFUERTE P, SUAREZ-BERTO A R, BAROUCH G, et al. NO_x, NH₃, N₂O and PN real driving emissions from a Euro VI heavy-duty vehicle. Impact of regulatory on-road test conditions on emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609:546 - 555.
- [13] 王丹,刘忠长,田径,等. 基于压降进行 DPF 碳载量估算的研究[J]. *汽车工程*, 2016, 38(12):1415 - 1419.
- [14] 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, 287 - 300.
- [15] 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.
- [16] 张允华,楼狄明,谭丕强,等. DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 1828 - 1834.
- [17] 彭子航. 润滑油灰分在催化型微粒捕集器内的沉积及其影响研究[D]. 北京:北京理工大学, 2018.
- [18] 谷雨,宫宝利,徐辉,等. 柴油车颗粒数量排放特性研究[J]. *车用发动机*, 2022(3):38 - 43.
- [19] FANG Jia, MENG Zhongwei, LI Jian, et al. The influence of ash on soot deposition and regeneration processes in diesel particulate filter[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124:633 - 640.
- [20] STEPIEN Z, ZIEMIANSKI L, ZAK G, et al. The evaluation of fuel borne catalyst (FBC's) for DPF regeneration[J]. *Fuel*, 2015, 161:278 - 286.
- [21] GUAN Bin, ZHAN Rijin, LIN He, et al. Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in

- internal combustion engines[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154: 225 – 258.
- [22] YU Quanshun, TAN Jianwei, GE Yunshan, et al. Application of diesel particulate filter on in-use on-road vehicles [C]//8th International Conference on Applied Energy, Beijing, 2017.
- [23] YAMAMOTO K, YAMAUCHI K. Numerical simulation of continuously regenerating diesel particulate filter [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34: 3083 – 3090.

The effects of DPF with various deposited soot loads on particle number emissions of diesel engines

WANG Haohao¹, XIAO Youqiang¹, XUE Zhentao¹,
WANG Jiandong¹, ZHANG Yu¹, TAN Jianwei²

(1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to investigate the effects of soot loads deposited in diesel particulate filter (DPF) channels on particle number (PN) emissions of a diesel engine, this paper analyzes PN emission factors and PN transient emissions under four soot loads, with the road spectrum of vehicle-mounted portable emission measurement system (PEMS) showing on an engine bench. The results show that PN emissions increase with an increase of soot loads in the DPF. When the DPF is fresh, a higher PN transient emission is concentrated under urban conditions and the duration is shorter. Under high way conditions, however, a higher PN transient emission is concentrated and the duration is longer when the DPF is loaded with soot. In this case, as soot accumulates in a DPF channel, PN transient emissions and soot loads show a positive correlation. Furthermore, the internal DPF channel condition is related to PN emissions.

Key words: diesel engine; particle number; emission; soot load

(责任编辑 符有梅)