

# 重型车低负荷运行特征及 NO<sub>x</sub> 排放特性

汪晓伟<sup>1</sup>, 景晓军<sup>1</sup>, 高涛<sup>1</sup>, 李刚<sup>2\*</sup>, 谷雪景<sup>2</sup>, 张佑源<sup>3</sup> (1. 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 东风柳州汽车有限公司, 广西 柳州 545000)

**摘要:** 利用远程监控数据分析了北京国六重型柴油城市用车在低负荷运行特征和排放特征,并选取了一台满足国六排放标准的 6L 柴油机,结合发动机在环方法在发动机台架上开展了国六法规循环(WHTC)和加州低负荷循环(LLC)的排放试验,对比分析了低负荷循环下的氮氧化物(NO<sub>x</sub>)排放特性.结果表明:国六城市柴油车的低负荷运行时间长,并且低负荷运行阶段 NO<sub>x</sub> 排放占比高.加州构建的 LLC 循环能够反映长时间运行在低负荷以及长时间怠速造成排温降低导致 NO<sub>x</sub> 转化效率降低的实际情况.LLC 循环下的 NO<sub>x</sub> 排放很高,主要原因是由于排温较低所致.中国也应该根据商用车实际行驶特征,开发低负荷工况来控制低负荷条件下的 NO<sub>x</sub> 排放.但由于车辆载荷对 NO<sub>x</sub> 转化效率和 NO<sub>x</sub> 排放有较大影响,因此开发低负荷工况时,需要考虑载荷设置.

**关键词:** 重型柴油车; 远程监控; 低负荷; 运行特性; 氮氧化物; 排放

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)11-5063-09

**Low load running characteristics and NO<sub>x</sub> emission under low load for heavy-duty diesel vehicles.** WANG Xiao-wei<sup>1</sup>, JING Xiao-jun<sup>1</sup>, GAO Tao<sup>1</sup>, LI Gang<sup>2\*</sup>, GU Xue-jing<sup>2</sup>, ZHANG You-yuan<sup>3</sup> (1. CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Dongfeng Liuzhou Motor Co., Ltd., Liuzhou 545000, China). *China Environmental Science*, 2022,42(11): 5063~5071

**Abstract:** The operation and emission performances of a heavy-duty diesel urban vehicle which meets the China VI emission standard have been investigated based on remote monitoring data. Furthermore, a 6L diesel engine which also meets the China VI emission standard has been adopted to carry out the World Harmonized Transient-State Cycle (WHTC) and California Low Load Cycle (LLC) emission tests on an engine test bench using the engine-in-the-loop methodology. The NO<sub>x</sub> emission characteristics under the low-load conditions have been studied. Results suggest that the heavy-duty diesel urban vehicle tends to run under the low-load conditions, accompanied with a large portion of NO<sub>x</sub> emitted. The LLC test reveals the fact that the engine spends more time running under the low-load condition, which leads to a low emission temperature as well as low NO<sub>x</sub> conversion efficiency. The high NO<sub>x</sub> emission under the LLC test is mainly caused by the low exhaust temperature. China is suggested to develop low-load cycle to control the NO<sub>x</sub> emissions under such conditions according to the actual driving characteristics of commercial vehicles. The loading setting should be taken into consideration when developing the low-load cycle given the fact that the NO<sub>x</sub> conversion and emission are significantly affected by the vehicle loading.

**Key words:** heavy-duty diesel vehicle; remote monitor; low load cycle; run characteristics; nitrogen oxides; emission

《中国移动源环境管理年报(2021)》显示<sup>[1]</sup>,我国 2020 年机动车排放的 NO<sub>x</sub> 约 626.3 万 t;汽车是机动车污染物排放总量的主要贡献者,其排放的 NO<sub>x</sub> 占比超过 90%;而柴油车 NO<sub>x</sub> 排放量超过汽车排放总量的 80%.《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》将 NO<sub>x</sub> 的排放限值较国五排放标准加严了 77%<sup>[2]</sup>,增加了车辆实际道路车载法排放试验(PEMS)来控制车辆实际道路的排放,并且采用功基窗口法来计算排放,要求 PEMS 测试中 90% 以上的有效窗口排放需低于 0.69g/(kW·h)的排放限值.众多研究探索了重型车的 PEMS 排放特性,表明 PEMS 测试更能反映车辆的真实排放情况<sup>[3-7]</sup>.但 PEMS 测试有效窗口指的是窗口平均功率大于发

动机最大功率的 20% 的窗口,也就意味着有一部分平均功率较小的低负荷循环排放并未进行评估.吕立群等<sup>[8]</sup>在最新的研究中发现功基窗口法规定的功率阈值导致大量发动机低功率、NO<sub>x</sub> 高比排放数据被剔除,严重低估重型车实际道路尤其城市工况下 NO<sub>x</sub> 排放水平.在车辆实际运行中,尤其是在市区行驶、交通拥堵、作业车辆(如清扫车、垃圾车)作业的过程中,车辆将长时间行驶在低速低负荷的区域.文献发现<sup>[9-14]</sup>,在低速阶段或者市区运行过程中,柴

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 国家重点研究计划(2019YFC0214800)资助;中国环境科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助(2021-JY-23)

\* 责任作者, 高级工程师, ligang@vecc.org.cn

油车实际的  $\text{NO}_x$  排放与认证结果存在较大的差异,其  $\text{NO}_x$  排放非常严重.但在目前的排放法规中,无论是发动机台架测试还是整车 PEMS 测试,都没有充分去考虑低负荷运行情况.因此,美国加州环保局委托西南研究院制定了一项新的重型发动机和整车的补充测试程序低负荷测试循环(LLC)<sup>[15-17]</sup>,并将在排放标准中正式实施.

为满足重型车下阶段排放标准进一步减排的要求,借鉴美国加州低负荷排放测试方法,研究开发适用于中国实际道路行驶的低负荷测试工况是必要的.目前鲜有文献对柴油车低负荷排放进行研究,仅张丹等<sup>[18]</sup>在整车转鼓上开展了整车 LLC 的测试,其发现整车 LLC 循环测得的  $\text{NO}_x$  比排放是中国重型商用车循环(C-WTVC)<sup>[19]</sup>的 15 倍.因此,本文基于远程监控平台的数据对我国实际行驶中的低负荷特征进行了分析,然后在一台满足国六排放标准的 6L 柴油机上,开展了基于国六法规循环(WHTC)和 LLC 发动机循环的研究;并采用发动机在环(EIL)的方法,在发动机台架上运行不同载荷的 LLC 整车循环,对低负荷循环下的  $\text{NO}_x$  排放特性进行阐释,分析了整车 LLC 循环和发动机 LLC 循环的排放差异.

## 1 试验方法

### 1.1 LLC 循环

LLC 循环是美国加州环保局委托西南研究院制定的一个时长为 5505s 的测试循环,如图 1 所示.LLC 循环包括一个整车循环和一个发动机循环,但目前规定只需要进行发动机循环,并且是在热态条件下开展试验<sup>[15]</sup>.

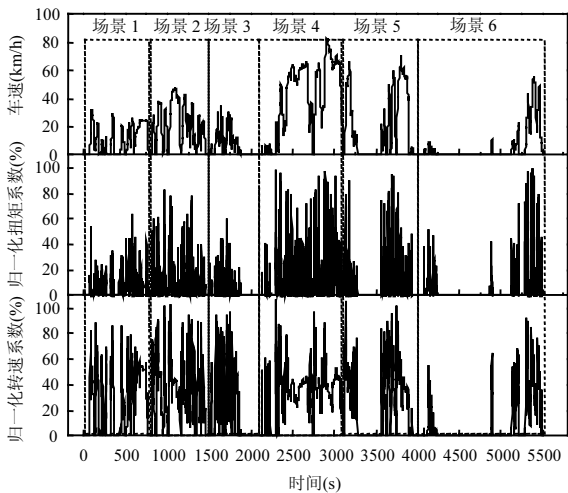


图 1 美国加州低负荷测试循环  
Fig.1 Low load cycle from California

LLC 循环的开发过程中采集了 751 辆车超过 600GB 的原始数据,并通过低负荷窗口定义、聚类分析等得到了代表性的工况片段,充分考虑了实际车辆行驶过程中出现的持续低负荷、高负荷到低负荷,低负荷到高负荷以及中速巡航等场景,再通过拼接、试验验证等方式获得了整车的 LLC 循环<sup>[17]</sup>.LLC 整车循环的各场景特性如表 1 所示.其中场景 1~3 为持续低负荷运行,场景 3 的平均车速、平均功率最低,怠速占比达到 53%.场景 4 为中速巡航以及倒拖,倒拖比例达到 28%,怠速占比最低,仅有 10%.场景 5 为高负荷转换到低负荷再到倒拖及短怠速,其倒拖比例最高,达到 34%.场景 6 为在原地长时间作业后,从低负荷转换到高负荷,怠速占比最高,为 66%.

表 1 LLC 循环中各场景的特性  
Table 1 The characteristics of each scenario in the LLC

| 序号 | 场景名称             | 来源  | 平均车速<br>(km/h) | 平均功率比<br>(%) | 倒拖时间占比<br>(%) | 怠速时间占比<br>(%) |
|----|------------------|-----|----------------|--------------|---------------|---------------|
| 1  | 持续低负荷            | 送餐车 | 11             | 5            | 15            | 31            |
| 2  | 持续低负荷            | 配货车 | 14             | 6            | 19            | 30            |
| 3  | 持续低负荷            | 配货车 | 7              | 3            | 15            | 53            |
| 4  | 中速巡航到倒拖          | 配货车 | 43             | 14           | 28            | 10            |
| 5  | 高到低负荷到倒拖和短怠速     | 送餐车 | 24             | 9            | 34            | 18            |
| 6  | 低到高负荷到服务(比如原地作业) | 转运车 | 4.5            | 4            | 5             | 66            |

在得到了 LLC 整车循环之后,西南研究院采用美国环保署的温室气体排放模型(GEM)将整车工况转换为发动机工况<sup>[15]</sup>,从而得到了发动机的 LLC 工况.值得注意的是,在转换过程中,所采用的的整车载荷均没有采用满载.这也是在本文中通过 EIL 分析不同载荷的 LLC 循环排放的原因.

### 1.2 EIL 方法

发动机在环的开发方法,是指在传统的发动机台架上,通过将构建的虚拟整车模型、驾驶员模型、道路和环境模型耦合到一起实现在发动机台架上对整车功能进行开发优化的一种方式<sup>[20-23]</sup>.该方法能够将驾驶策略、测试环境等变量进行统一,从而排除来自于驾驶、交通状况、环境条件的干扰,达到研究载荷这个唯一变量对同一个测试循环排放影响的目的.

### 1.3 基于远程监控数据的分析方法

目前国六法规要求重型车辆必须安装车载终端,向国家平台或地方平台传输数据.为研究我国实际行驶中的低负荷特征,首先对远程监控数据做了如下处理:1)剔除发动机转速为 0 的数据;2)剔除 NO<sub>x</sub> 传感器发送的无效值的数据(在数据中体现为一个 3000+或-10 以下的值).将低负荷工况定义为净输出扭矩百分比低于 20%的工况,分成 3 个区间,分别是低于 10%,10%~15%和 15%~20%.净输出扭矩百分比是指当前转速下的实际扭矩与参考扭矩的比值,在 OBD 数据中体现为扭矩百分比和摩擦扭矩百分比的差值.

计算各低负荷区间的时间占比和排放占比,其中:10%以下低负荷占比=发动机净输出扭矩百分比≤10%的点的数量/总的采集点的数量×100%;10%~15%低负荷占比 2=发动机净输出扭矩百分比>10%且≤15%的点的数量/总的采集点的数量×100%;15%~20%低负荷占比=发动机净输出扭矩百分比>15%且≤20%的点的数量/总的采集点的数量×100%;

参照国六法规,NO<sub>x</sub> 排放=SCR 下游 NO<sub>x</sub> 传感器浓度×(进气质量流量+燃油质量流量)×0.001587/3600,不再进行相关修正.分别计算 NO<sub>x</sub> 排放总质量以及 10%以下、10%~15%和 15%~20%低负荷运行下的 NO<sub>x</sub> 质量.将各低负荷区间的 NO<sub>x</sub> 质量除以 NO<sub>x</sub> 排放总质量,得到各低负荷区间下 NO<sub>x</sub> 排放占比.

本次研究随机抽取了北京国六标准的混凝土车、工程作业车、垃圾车和环卫车各 1 辆 1 个月的远程数据进行分析.

1.4 试验设备

本文中发动机台架试验设备包括 AVL 电力测功机,气体排放分析仪、颗粒物数量分析仪,以及 EIL 测试平台的整车驾驶员模型 AVL VSM<sup>TM</sup> 以及实时系统 AVL Testbed CONNECT<sup>TM</sup> (RT)等.主要的测试设备以及软件见表 2.

表 2 主要的测试设备和软件  
Table 2 Test equipment and software

| 设备名称    | 型号             | 精度                         |
|---------|----------------|----------------------------|
| 电力测功机   | AVL INDY P44   | 扭矩:±0.3%F.S.<br>转速:±1r/min |
| 测功机操作系统 | AVL PUMA 1.5.3 |                            |

续表 2

| 设备名称    | 型号                                    | 精度                                  |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 发动机进气系统 | AVL ACS2400FH                         | 压力:±1mbar<br>温度:±0.5℃<br>湿度:±3[%RH] |
| 气体分析仪   | AVL AMA i60                           | ±2%                                 |
| 颗粒计数器   | AVL 489                               | ±10%                                |
| 油耗仪     | AVL 753C/735S                         | ±0.12%                              |
| 颗粒物采样设备 | AVL SPC 472                           | 响应时间:≤0.3s<br>采样流量:≤±5%             |
| 整车驾驶员模型 | AVL VSM <sup>TM</sup>                 |                                     |
| 实时系统    | Testbed CONNECT <sup>TM</sup><br>(RT) |                                     |
| 滑行评估软件  | AVL Coastdown<br>Manager              |                                     |

1.5 试验发动机和整车模型

本文所研究的试验样机为一台 6L 的满足国六排放标准的重型柴油机,额定功率为 180kW,最大扭矩为 970Nm,排放控制技术路线为废气再循环(EGR)+柴油氧化催化器(DOC)+颗粒捕集器(DPF)+选择性催化还原器(SCR)+氨逃逸催化器(ASC).对应的整车模型为一辆 N3 非城市自卸车.整备质量为 9000kg,最大总质量为 24500kg,变速箱包括 10 个前进挡位.其中满载和空载下的滑行系数为实际道路滑行得到.在发动机台架使用滑行系数进行模拟滑行后通过 AVL 的 Coastdown Manager 软件评估调整后使用.发动机和整车建模的详细参数见表 3.

表 3 发动机及整车建模主要参数  
Table 3 Engine and vehicle parameters

| 参数       | 数值                   |
|----------|----------------------|
| 发动机排量    | 6.234L               |
| 气缸数      | 6                    |
| 压缩比      | 17.2                 |
| 额定功率/转速  | 180kW/2300r/min      |
| 最大扭矩/转速  | 970Nm/1100~1800r/min |
| 怠速转速     | 650r/min             |
| 排放控制技术路线 | EGR+DOC+DPF+SCR+ASC  |
| 排放水平     | 国六                   |
| 整备质量     | 9000kg               |
| 驱动型式     | 6×2                  |
| 轮胎规格     | 11R22.5              |
| 最大设计总质量  | 24500kg              |
| 变速箱      | 10 档手动               |
| 主减速比     | 5.286                |

1.6 试验过程

按照国六法规要求开展热态 WHTC(WHTC-H)

和 LLC 发动机工况试验(LLC\_发动机),并通过发动机在环开展满载和空载条件下的 LLC 整车工况试验(LLC\_整车满载和 LLC\_整车空载),测量气态污染物和颗粒物数量排放(PN).

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于远程监控数据的低负荷特征

由图 2 可见,4 类车的低负荷时间占比范围为 70%~92%.环卫车的低负荷时间占比最高,为 92%.垃圾车的低负荷时间占比最低,但也有 70%.从低负荷的  $\text{NO}_x$  排放占比来看,4 类车的低负荷  $\text{NO}_x$  排放占比范围为 39%~53%.环卫车的占比最低,为 39%.其他 3

类车的占比均超过了 50%.对于混凝土车,低负荷时间主要集中在 10%以下的负荷区间,且  $\text{NO}_x$  排放也主要集中在该区间,可能是因为这辆混凝土车在城区行驶少,主要是用于搅拌.工程作业车和垃圾车低负荷时间和  $\text{NO}_x$  排放主要集中在 10%~15%的负荷区间,而环卫车低负荷时间和  $\text{NO}_x$  排放主要集中在 10%以下的负荷区间.

尽管各车型由于技术水平和排放控制路线不一致,且样本量低.但由于是随机抽取,获得的结论也基本一致,即目前国六城市用车的低负荷运行时间长, $\text{NO}_x$  排放占比高,说明低负荷条件下的  $\text{NO}_x$  排放亟需控制.

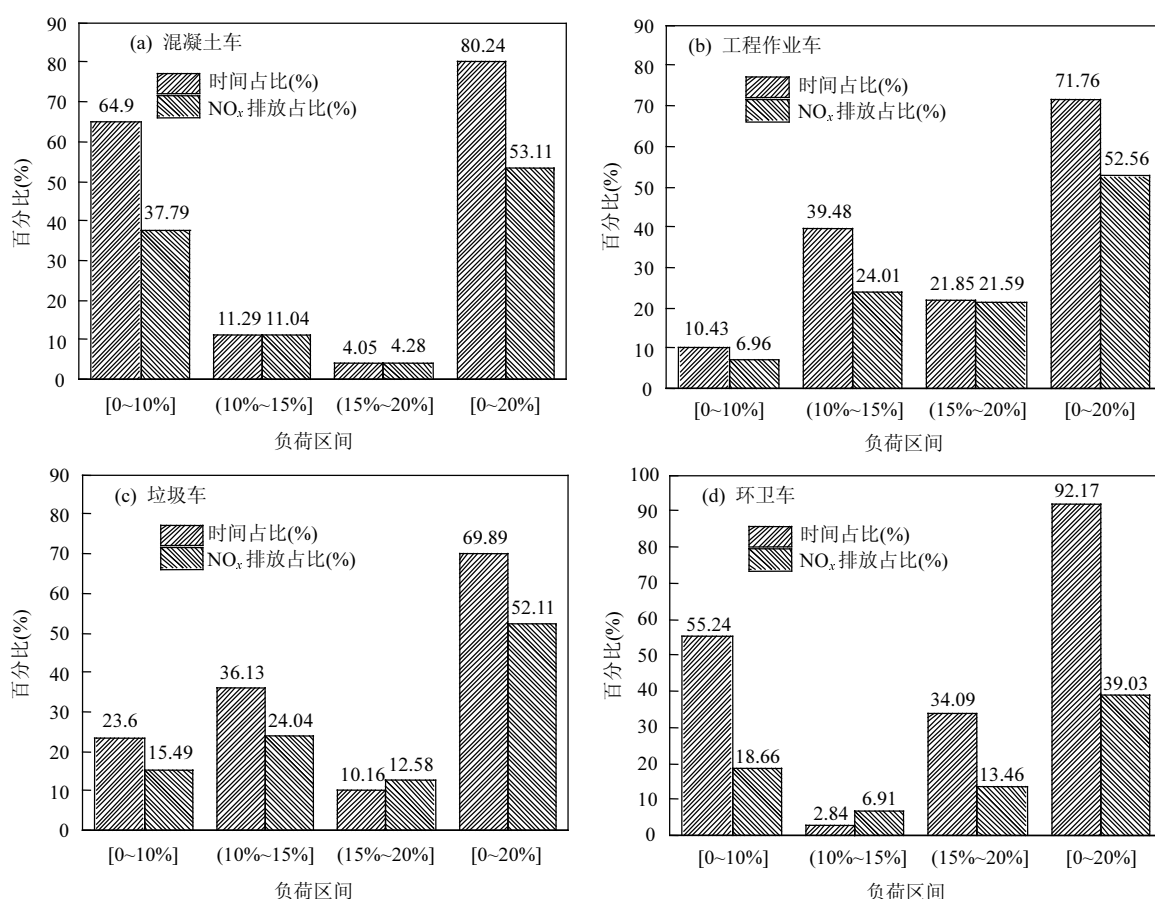


图 2 基于北京远程监控数据的重型车低负荷特征

Fig.2 Low load running characteristics from remote monitoring data in Beijing

### 2.2 不同循环下污染物排放

由表 4 可见,与热态 WHTC 相比,LLC 发动机循环的气态污染物排放均有增加,而颗粒物排放有所降低.其中 LLC 发动机循环的 CO 和 THC 排放分别是热态 WHTC 循环的 3.5 和 7.8 倍,但依然满足目前

国六排放法规的限值要求.而 LLC 发动机循环的  $\text{NO}_x$  排放是热态 WHTC 循环的 8.8 倍,是国六排放法规限值的 3.2 倍.LLC 发动机循环的 PN 排放是热态 WHTC 循环的 0.5 倍.

对比 LLC 整车循环满载和空载下的排放发现,

空载条件下,气态污染物排放升高,而颗粒物排放降低.满载的 CO、THC 和 NO<sub>x</sub> 排放比空载条件下分别增加了 231%、1223%和 382%,而 PN 排放降低了 40%.

表 4 不同循环下污染物比排放量

Table 4 Pollutants brake specific emissions under different cycles

| 循环       | CO<br>[g/(kW·h)] | THC<br>[g/(kW·h)] | NO <sub>x</sub><br>[g/(kW·h)] | PN<br>[#/ (kW·h)]    |
|----------|------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------|
| WHTC_H   | 0.02             | 0.015             | 0.17                          | $8.2 \times 10^{10}$ |
| LLC_发动机  | 0.07             | 0.116             | 1.49                          | $4.3 \times 10^{10}$ |
| LLC_整车满载 | 0.03             | 0.01              | 0.70                          | $7.0 \times 10^{10}$ |
| LLC_整车空载 | 0.09             | 0.138             | 3.37                          | $4.2 \times 10^{10}$ |
| 国六排放限值   | 4                | 0.16              | 0.46                          | $6 \times 10^{11}$   |

对比 LLC 整车循环和发动机循环的排放结果发现,空载 LLC 整车循环的 CO、THC 和 NO<sub>x</sub> 比发动机循环分别高 26.6%、19.4%和 126%,而 PN 排放低 1.5%.而满载 LLC 整车循环的 CO、THC 和 NO<sub>x</sub> 比发动机循环分别低 61.8%、91%和 53.1%,而 PN 排放高 64.6%.

上述结论说明了载荷对最终的污染物排放会产生较大的影响,跟 Wang 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致.他们研究了半挂牵引车载荷对排放的影响,发现载荷对于低速运行区间的排放影响最大.因此在开发 LLC 工况的过程中,在由整车工况转换为发动机工况时,需要合理设置车辆载荷.过高的车辆载荷转换的发动机工况,会降低低负荷的评估强度.而过低的车辆载荷转换的发动机工况,也不符合重型车作为商用运输车辆的实际用途.

2.3 不同循环下 NO<sub>x</sub> 瞬态排放特征

由图 3 可见,NO<sub>x</sub> 的排放增加主要对应 4 个区域.第 1 个是 LLC 开始的持续低负荷阶段,对应场景 1 和 2,此时 NO<sub>x</sub> 排放持续增加.第 2、3 区域对应场景 4、5,在一段时间的怠速后,转速和扭矩的增加,导致 NO<sub>x</sub> 排放增加.第 4 个区域对应场景 6,此时发动机经历了一个非常长时间的怠速,转速和扭矩增加后,NO<sub>x</sub> 排放明显增加.而在场景 3 中,尽管负荷很低,但并没有非常明显的 NO<sub>x</sub> 排放.

如图 4 所示,对于热态 WHTC 循环,其 NO<sub>x</sub> 瞬态排放峰值主要出现在循环的第 350~500s 的区域.该阶段的 NO<sub>x</sub> 占总的热态 WHTC 循环 NO<sub>x</sub> 排放的

85%.热态 WHTC 的最大峰值为 0.18g/s,而 LLC 发动机循环的 NO<sub>x</sub> 排放最大峰值为 0.29g/s.

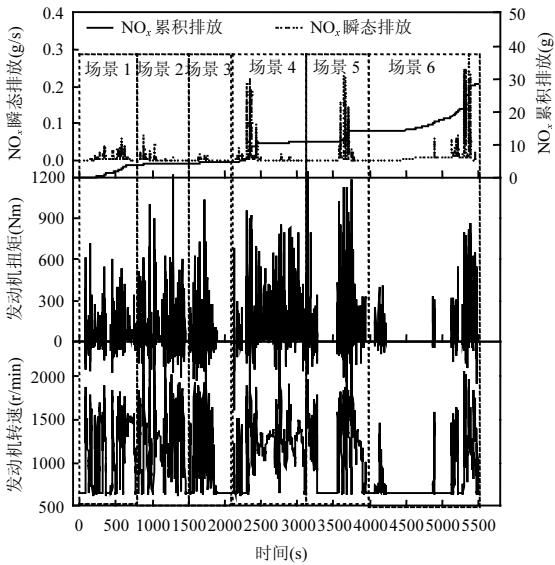


图 3 LLC 发动机循环 NO<sub>x</sub> 瞬态排放特性

Fig.3 NO<sub>x</sub> transient emission characteristics under LLC engine cycle

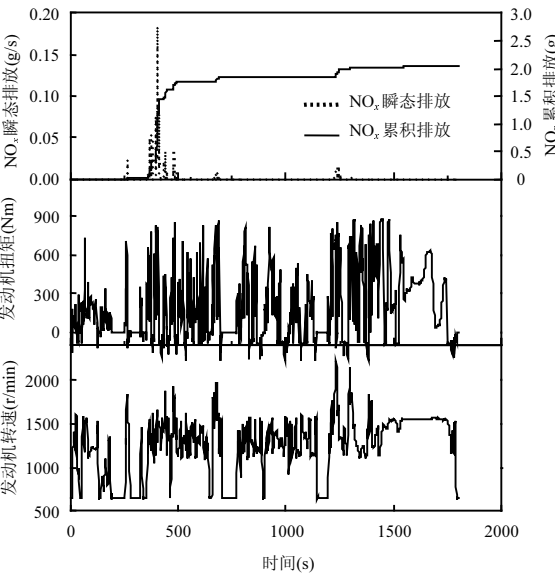


图 4 热态 WHTC 循环 NO<sub>x</sub> 瞬态排放特性

Fig.4 NO<sub>x</sub> transient emission characteristics under hot WHTC

由图 5 可见,满载条件下的 NO<sub>x</sub> 瞬态排放特性与 LLC 发动机循环相似,也是分为 4 个区域.但空载条件下 NO<sub>x</sub> 的瞬态排放特性与 LLC 发动机循环存在一定差异.最明显的差距是在场景 3.在 LLC 发动机循环中,NO<sub>x</sub> 排放增加很少.但在空载条件下的整车 LLC 循环中,NO<sub>x</sub> 排放显著增加.这说明在对场景

3 进行整车工况转化成发动机工况时,应将车辆载荷设置得更低一些,才能更好地体现对场景 3 这种持续超低负荷的管控效果。

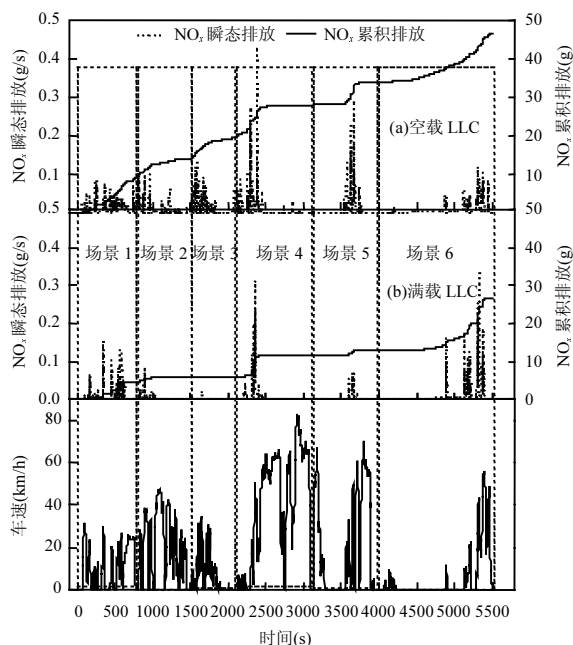


图 5 LLC 整车循环  $\text{NO}_x$  瞬态排放特性

Fig.5  $\text{NO}_x$  transient emission characteristics under LLC vehicle cycle

## 2.4 LLC 各场景 $\text{NO}_x$ 排放特性

由图 6 可见,LLC 发动机循环比排放最高的是场景 6,为  $4.56\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,约为国六排放限值的 9.9 倍。其次是场景 1、5、4,其比排放分别为国六排放限值的 4.1、2.5 和 2.1 倍。场景 2 和 3 的比排放都低于国六排放限值。而对于 LLC 整车循环,在满载条件下,比排放最高的是场景 6,为  $3.4\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,约为国六限值的 7.4 倍,其次是场景 1,其比排放为国六限值的 3.3 倍。其后依次为场景 4、2、5、3,比排放都低于国六排放限值。在空载条件下,比排放最高的是场景 1,达到  $10.2\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,为国六排放限值的 22.2 倍,其次是场景 6、3、2、5、4,其比排放分别为国六排放限值的 19.4、17.8、5.6、4.5 和 3.3 倍。

由图 7 可见,无论是整车循环还是发动机循环,场景 6 的  $\text{NO}_x$  排放占比都是最高的,其中 LLC 发动机循环和 LLC 整车满载循环的  $\text{NO}_x$  排放占比达到了 50%。LLC 发动机循环和 LLC 整车满载循环在场景 3 的  $\text{NO}_x$  排放占比极低,而 LLC 整车空载循环各场景的  $\text{NO}_x$  排放占比分布更加均衡。这也说明目前

LLC 发动机循环对场景 3 的考核作用不强。

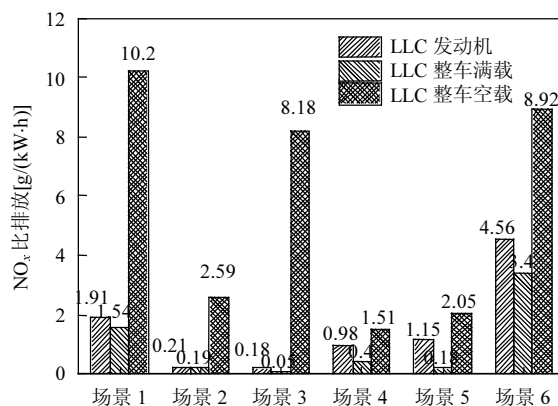


图 6 LLC 循环各场景  $\text{NO}_x$  比排放

Fig.6  $\text{NO}_x$  brake specific emission at each scenario in the LLC

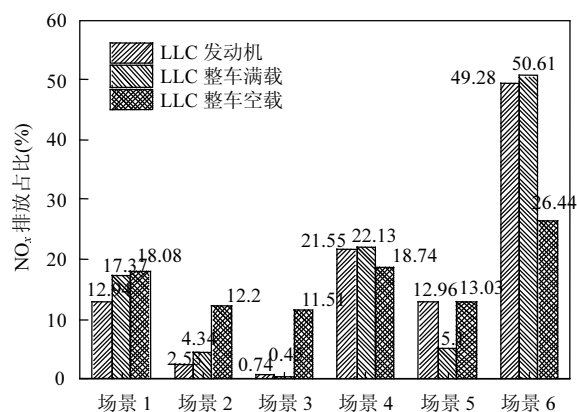


图 7 LLC 循环各场景  $\text{NO}_x$  排放占比

Fig.7  $\text{NO}_x$  emission ratio at each scenario in the LLC

## 2.5 讨论

影响最终  $\text{NO}_x$  排放的因素是发动机原排和 SCR 的催化效率。发动机原排取决于发动机的运行工况和控制策略如 EGR 的使用等<sup>[25-26]</sup>,而 SCR 的催化效率的影响因素很多<sup>[27-28]</sup>,但主要取决于排气温度。

基于 OBD 数据里的 SCR 前  $\text{NO}_x$  传感器和空气流量、燃油流量等参数,按照国六标准计算  $\text{NO}_x$  比排放的要求计算得到了 LLC 循环下各场景以及热态 WHTC 和 LLC 总循环的  $\text{NO}_x$  原排比排放,如表 5 所示。热态 WHTC 总循环的原排比排放跟 LLC 发动机总循环相差不大,分别为  $7.2, 7.0\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。而 LLC 整车满载循环和空载循环的总原排比排放相差不大,分别为  $8.8, 9.0\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,空载循环略高。从 LLC 的场景分布来看,对于 LLC 发动机循环,原排最高的是场

景 6,达 9.4g/(kW·h),最低的为场景 2,为 5.7g/(kW·h).对于 LLC 整车满载循环,原排最高的是场景 3,达 10.8g/(kW·h).其次为场景 6,为 10.1g/(kW·h).最低的为场景 1,为 6.6g/(kW·h).对于整车空载循环,原排最高的是场景 3,达 15.1g/(kW·h).其次为场景 1 和场景 6,分别为 14.6,13.5g/(kW·h).最低的为场景 4,为 6.6g/(kW·h).

表 5 基于前 NO<sub>x</sub> 传感器的 NO<sub>x</sub> 原排[g/(kW·h)]  
Table 5 NO<sub>x</sub> raw emissions from upstream NO<sub>x</sub> sensor [g/(kW·h)]

| 项目       | 1    | 2   | 3    | 4   | 5   | 6    | 总   |
|----------|------|-----|------|-----|-----|------|-----|
| LLC_发动机  | 6.9  | 5.7 | 6.8  | 6.8 | 7.0 | 9.4  | 7.0 |
| LLC_整车满载 | 6.6  | 8.5 | 10.8 | 8.5 | 9.2 | 10.1 | 8.8 |
| LLC_整车空载 | 14.6 | 8.4 | 15.1 | 6.6 | 9.0 | 13.5 | 9.0 |
| 热态 WHTC  | 7.2  |     |      |     |     |      |     |

基于 SCR 前后 NO<sub>x</sub> 传感器的值,计算了 SCR 的 NO<sub>x</sub> 转化效率.NO<sub>x</sub> 转化效率为 NO<sub>x</sub> 原排总量与 NO<sub>x</sub> 尾排总量的差值占原排总量的百分比.由表 6 可见,从整个循环来看,热态 WHTC、LLC 发动机循环、LLC 整车空载循环和 LLC 整车满载循环的平均 SCR 入口温度分别为 272,189,170,237℃.因此,热态 WHTC 的 NO<sub>x</sub> 转化效率最高,达 97%.LLC 整车空载循环的 NO<sub>x</sub> 转化效率最低,仅为 64%.LLC 发动机循环和 LLC 整车满载循环分别为 81%和 89%.由于 LLC 整车空载循环的原排又最高,因此其最终比排放高达 3.37g/(kW·h)(见表 4).热态 WHTC 的原排要略高于 LLC 发动机循环,但由于其 NO<sub>x</sub> 转化效率高,因此其最终比排放仅为 0.17g/(kW·h).尽管 LLC 整车满载循环的原排要高于 LLC 发动机循环,但由于其排温更高,因此其转化效率更高,导致其最终比排放只有 LLC 发动机循环的一半.这说明 NO<sub>x</sub> 转化效率对最终 NO<sub>x</sub> 排放的影响,要大于原排的影响.

从场景分布来看,LLC 发动机循环各场景中场景 2 的平均 SCR 入口温度最高,为 225℃,其 NO<sub>x</sub> 转化效率也高达 97%.场景 6 的平均 SCR 入口温度最低,仅有 147℃,其 NO<sub>x</sub> 转化效率只有 56%.LLC 整车满载循环各场景中场景 5 的平均 SCR 入口温度最高,为 297℃,其 NO<sub>x</sub> 转化效率也高达 98%.场景 6 的平均 SCR 入口温度最低,仅有 173℃,其 NO<sub>x</sub> 转化效率只有 64%.LLC 发动机循环和整车满载循环场景 6

的 NO<sub>x</sub> 原排也很高,因此最终的 NO<sub>x</sub> 排放也很高.

LLC 整车空载循环各场景中场景 5 的平均 SCR 入口温度最高,为 202℃,其 NO<sub>x</sub> 转化效率为 85%.场景 6 的平均 SCR 入口温度最低,仅有 133℃,其 NO<sub>x</sub> 转化效率只有 44%.此外,LLC 整车空载循环场景 1 和 3,转化效率分别为 41%和 51%,而场景 1、3 和 6 的 NO<sub>x</sub> 原排又非常高,因此这 3 个场景的 NO<sub>x</sub> 排放很高.此外,从表 6 中也可以看出,并不是平均入口温度越高,NO<sub>x</sub> 转化效率越高.这主要是因为这里的温度只是平均温度,并不能完全对应上瞬态 NO<sub>x</sub> 转化效率.

表 6 NO<sub>x</sub> 的转化效率及平均 SCR 入口温度  
Table 6 NO<sub>x</sub> catalytic efficiency and average SCR upstream temperature

| 项目           | 参数                       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 总   |
|--------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| LLC 发<br>动机  | NO <sub>x</sub> 转化效率 (%) | 73  | 97  | 98  | 86  | 91  | 56  | 81  |
|              | 入口平均温度 (℃)               | 180 | 225 | 193 | 214 | 207 | 147 | 189 |
| LLC 整<br>车满载 | NO <sub>x</sub> 转化效率 (%) | 81  | 97  | 99  | 91  | 98  | 64  | 89  |
|              | 入口平均温度 (℃)               | 201 | 260 | 235 | 290 | 297 | 173 | 237 |
| LLC 整<br>车空载 | NO <sub>x</sub> 转化效率 (%) | 41  | 73  | 51  | 75  | 85  | 44  | 64  |
|              | 入口平均温度 (℃)               | 156 | 185 | 159 | 201 | 202 | 133 | 170 |
| WHTC         | NO <sub>x</sub> 转化效率 (%) | 97  |     |     |     |     |     |     |
|              | 入口平均温度 (℃)               | 272 |     |     |     |     |     |     |

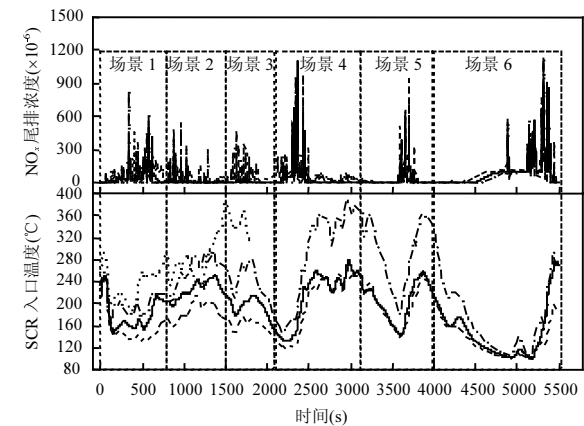


图 8 SCR 入口温度和 NO<sub>x</sub> 尾排浓度  
Fig.8 SCR upstream temperature and tailpipe NO<sub>x</sub> emission  
— LLC-发动机 --- LLC 整车空载 ···· LLC 整车满载  
- · - - WHTC

如图 8 所示,对于场景 1、2、3,由于持续低负荷运行,LLC 整车空载循环的 SCR 入口温度大部分都在 200℃以下.此外,场景 4、5、6 中,都有一段较长的怠速.这段时间 SCR 入口温度均有明显的下降,场景 6 尤为明显,所以 LLC 循环中场景 6 的 NO<sub>x</sub> 转化效率非常低.

### 3 结论

3.1 北京国六城市柴油车的低负荷运行时间长,NO<sub>x</sub> 排放占比高.重型柴油车低负荷下的 NO<sub>x</sub> 排放亟需控制.

3.2 基于发动机台架,结合 EIL 方法阐明 LLC 整车循环和发动机循环的排放特征以及跟目前 WHTC 循环排放特性的差异.LLC 循环能够反映长时间运行在低负荷以及长时间怠速造成排温降低导致 NO<sub>x</sub> 转化效率降低的实际情况.目前的 WHTC 循环并不能对这些场景进行考核,因此中国也应该根据商用车实际行驶特征,开发适合中国道路特征的低负荷工况.

3.3 车辆载荷对 NO<sub>x</sub> 转化效率和最终的 NO<sub>x</sub> 排放有较大影响,因此低负荷工况的开发过程中,尤其是在将整车工况转换成发动机工况时,应考虑载荷的影响.

3.4 LLC 循环下的 NO<sub>x</sub> 排放很高,主要原因是由于排温较低所致.因此,企业在针对 LLC 循环进行标定开发时,要尤其关注后处理系统的热管理以及 SCR 的低温转化性能.

### 参考文献:

- [1] 2021 年中国移动源环境管理年报—第一部分:机动车排放情况 [Z]. 北京:生态环境部, 2021.  
China mobile source environmental management annual report in 2021-Part 1: the situation of vehicle emission [Z]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2021.
- [2] 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].  
GB17691-2018 Limits and measurement methods for emissions from diesel fueled heavy-duty vehicle (Chinese VI) [S].
- [3] Mendoza V P, Suarez B R, Giechaskiel B, et al. NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O 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.
- [4] Petri S, Nils-Olof N, Rasmus P, et al. Real driving NO<sub>x</sub> emissions from Euro VI diesel buses[C]. SAE Paper, 2018-01-1815.
- [5] 葛蕴珊,王爱娟,王 猛,等.PEMS 用于城市车辆实际道路气体排放测试 [J]. 汽车安全与节能学报, 2010,1(2):141-145.  
Ge Y S, Wang A J, Wang M, et al. Application of portable emission measurement system (PEMS) on the emission measurements of urban vehicles on-road [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2010, 1(2):141-145.
- [6] 宋 东,郑永明,刘 爽,等.重型柴油车不同载荷下实际道路行驶排放特性 [J]. 汽车工程, 2020,42(10):1364-1368.  
Song D, Zheng Y M, Liu S, et al. Road driving emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles with different loads [J]. Automotive Engineering, 2020,42(10):1364-1368.
- [7] 程 颖,何立强,张少君,等.DOC+CDPF 对国 III 重型柴油货车实际道路排放的影响 [J]. 中国环境科学, 2020,40(6):2381-2388.  
Cheng Y, He L Q, Zhang S J, et al. Impacts of DOC+CDPF on real-world emissions from China III heavy-duty diesel trucks. [J]. China Environmental Science, 2020,40(6):2381-2388.
- [8] 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.  
Lv L Q, Yin H, Wang J F, et al. Research on real driving emissions from China-VI heavy-duty diesel vehicles based on work-based window method [J]. China Environmental Science, 2021,41(8):3539-3545.
- [9] Badshah H, Posada F, Muncrief R. Current state of NO<sub>x</sub> emissions from in-use heavy-duty diesel vehicles in the United States. White Paper [Z]. The International Council on Clean Transportation, 2019.
- [10] Jiang Y, Tan Y, Yang J C, et al. Understanding elevated real-world NO<sub>x</sub> emissions: Heavy-duty diesel engine certification testing versus in-use vehicle testing [J]. Fuel, 2022,307:1-7.
- [11] Bishop G A. On-road heavy-duty vehicle emissions monitoring system [J]. Environmental Science and Technology, 2015,49(3):1639-1645.
- [12] Dixit P, Miller J W, Cocker D R, et al. Differences between emissions measured in urban driving and certification testing of heavy-duty diesel engines [J]. Atmospheric Environment, 2017,166:276-285.
- [13] Grigoratos T, Fontaras G, Giechaskiel B, et al. Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2019,201:348-359.
- [14] Posada F, Badshah H, Rodriguez F. In-use NO<sub>x</sub> emissions and compliance evaluation for modern heavy duty vehicles in Europe and the United States. White Paper [R]. International Council on Clean Transportation, 2020.
- [15] Sharp C A. Heavy-duty engine low-load emission control calibration, low-load test cycle development, and evaluation of engine broadcast torque and fueling accuracy during low-load operation [R]. Southwest Research Institute, 2020.
- [16] 王志坚,王晓华,郭圣刚,等.满足重型柴油机超低排放法规的后处理技术现状与展望 [J]. 环境工程, 2020,38(9):159-167.  
Wang Z J, Wang X H, Guo S G, et al. Review and outlook of aftertreatment technologies to satisfy ultra-low emission regulations for heavy-duty diesel engines [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(9):159-167.
- [17] California Air Resources Board. Staff report: initial statement of reasons, for public hearing to consider the proposed heavy-duty



- engine and vehicle omnibus regulation and associated amendments, June [Z]. <https://www.arb.ca.gov/regact/2020/hdomnibuslownox/isor.pdf>, 2020.
- [18] 张 丹,高东志,包俊江,等.国VI重型柴油车低负荷排放特性试验研究 [J]. 柴油机设计与制造, 2021,4(27):42-46.
- Zhang D, Gao D Z, Bao J J, et al. Research on emission characteristics of China stage VI heavy-duty diesel vehicles [J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2021,4(27):42-46.
- [19] GB/T 27840-2011 《重型商用车燃料消耗量测试方法》[S].
- GB/T 27840-2011 Fuel consumption test methods for heavy-duty commercial vehicles [S].
- [20] 汪晓伟,凌 健,闫 峰.发动机在环(EIL)仿真的应用和进展综述 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2019,48(5):79-84.
- Wang X W, Ling J, Yan F. Review on engine-in-the-loop simulation: application and development [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2019,48(5):79-84.
- [21] Wang X W, Fu T Q, Wang C Q, et al. Fuel consumption and emissions at china automotive test cycle for a heavy duty vehicle based on engine-in-the-loop methodology [C]//2020 Journal of Physics: Conference, Series, 1549022119.
- [22] 汪晓伟,景晓军,高 涛,等.基于发动机在环的重型柴油车实际道路细小颗粒物排放特性研究 [J]. 汽车工程, 2022,44(1):58-63.
- Wang X W, Jing X J, Gao T, et al. Study on real driving fine particles emission characteristics for a heavy-duty diesel vehicle based on engine-in-the-loop methodology [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1):58-63.
- [23] Jiang S, Smith M, Kitchen J, et al. Development of an engine-in-the-loop vehicle simulation system in engine dynamometer test cell [Z]. SAE Paper, 2009-01-1039.
- [24] Wang X, Song G, Zhai Z, et al. Effects of vehicle load on emissions of heavy-duty diesel trucks: a study based on real-world data [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021,18(8):3877.
- [25] 杨永忠,申立中,毕玉华,等.大气压力/VNT/EGR 对车用柴油机性能与排放的影响 [J]. 内燃机工程, 2018,39(3):36-44.
- Yang Y Z, Shen L Z, Bi Y H, et al. Effect of atmospheric pressure/VNT/EGR on performance and emissions of a vehicle diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018,39(3): 36-44.
- [26] 陈贵升,王 凯,杨 杰,等.喷油策略耦合 EGR 对柴油机燃烧过程与 CDPF 再生性能的影响 [J]. 内燃机工程, 2017,38(3):131-141.
- Chen G S, Wang K, Yang J, et al. Effect of fuel injection strategy with EGR on diesel engine combustion process and CDPF regeneration performance [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2017,38(3):131-141.
- [27] 毕玉华,聂学选,刘少华,等.排气温度、排气流量和海拔高度对 SCR 系统 NO<sub>x</sub> 转化率和 NH<sub>3</sub> 泄漏量的影响研究 [J]. 汽车工程, 2021, 43(3):350-356.
- Bi Y H, Nie X X, Liu S H, et al. Study on the effects of exhaust temperature, exhaust flow rate and altitude on NO<sub>x</sub> conversion rate and NH<sub>3</sub> slip of SCR system [J]. Automotive Engineering, 2021,43(3): 350-356.
- [28] 吴 恒,程晓章,韦 伟.柴油机 SCR 系统 NO<sub>x</sub> 转化效率影响因素分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020,43(8):1036-1039.
- Wu H, Cheng X Z, Wei W. Analysis of factors affecting NO<sub>x</sub> conversion efficiency of diesel engine SCR system [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2020,43(8):1036-1039.

**作者简介:** 汪晓伟(1984-),男,湖南益阳人,高级工程师,博士,主要从事汽车及发动机节能减排工作.发表论文 40 余篇.