

乘用车汽油机实际道路行驶中NO排放穿透现象与机理分析

寇英杰¹, 张永浩¹, 胡宗杰², 范宝庆³, 吴 宁³, 沈 源³, 李理光^{1,2}

¹同济大学中德学院, 上海

²同济大学汽车学院, 上海

³吉利汽车动力研究院, 浙江 宁波

Email: 865000185@qq.com

收稿日期: 2021年3月20日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月28日

摘 要

为了满足将在中国正式实施的国家六b排放法规的要求, 减少实际道路条件下的瞬态排放是其有效措施之一。本文针对实际道路条件下的NO排放特性, 以一款在中国市场出售的轻型汽油车为研究对象, 使用NO快速采样分析仪作为车载测量设备, 对该车实际道路运行下三效催化反应器(TWC)前后的NO排放浓度进行采样和分析。研究发现, 换挡瞬态过程是导致瞬时NO_x排放升高的重要因素: 换挡的同时若不踩油门踏板, 排气管则出现NO_x瞬时峰值。基于对换挡和燃油切断条件的数据分析, 提出采用NO_x瞬态排放的优化控制策略减少车辆在实际道路上的NO_x排放的方法。

关键词

轻型汽油车, 实际道路条件, 车载瞬态测量, NO_x排放

Analysis on the Penetration Phenomenon and Mechanism of NO Emissions from Gasoline Engines of Passenger Cars in Actual Road Driving

Yingjie Kou¹, Yonghao Zhang¹, Zongjie Hu², Baoqing Fan³, Ning Wu³, Yuan Shen³,
Liguang Li^{1,2}

¹CDHK, Tongji University, Shanghai

²Automobile College, Tongji University, Shanghai

³Geely Automobile Power Research Institute, Ningbo Zhejiang

文章引用: 寇英杰, 张永浩, 胡宗杰, 范宝庆, 吴宁, 沈源, 李理光. 乘用车汽油机实际道路行驶中 NO 排放穿透现象与机理分析[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(2): 380-390. DOI: 10.12677/aep.2021.112042

Email: 865000185@qq.com

Received: Mar. 20th, 2021; accepted: Apr. 21st, 2021; published: Apr. 28th, 2021

Abstract

In order to meet the requirements of the national 6b emission regulations that will be officially implemented in China, reducing transient emissions under actual road conditions is one of its effective measures. For this article, aiming at the characteristics of NO emission under actual road conditions, a light gasoline vehicle sold in the Chinese market as the research object, the NO fast sampling analyzer is used as a vehicle-mounted measurement device. The NO emission concentration before and after the three-way catalytic reactor is sampled and analyzed on the actual road. Studies have found that the transient process of shifting is an important factor leading to the increase of instantaneous NO_x emissions: if you do not step on the accelerator pedal while shifting, the exhaust pipe will have an instantaneous peak of NO_x. Based on the data analysis of gear shift and fuel cut-off conditions, an optimized control strategy for NO_x transient emissions is proposed to reduce the NO_x emissions of vehicles on actual roads.

Keywords

Light-Duty Gasoline Vehicles, Actual Road Conditions, On-Board Transient Measurement, NO_x Emissions

Copyright © 2021 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

随着国六排放法规即将实施，乘用车道路工况实时排放的测试和控制成为业内关注的热点。国六法规主要不同之处，一是将实验室型式核准排放测试由NEDC (New European Driving Cycle)工况改为WLTC (World-wide Light-duty vehicles Test Cycle)工况。因为WLTC工况覆盖的车辆运行区域和发动机工作区域更广，与车辆实际行驶状态更接近，测试结果相比于NEDC工况将更有参考意义[1] [2]。二是国六法规引入欧盟RDE (Real Road Emission)测试作为II型试验，要求测量轻型车在实际道路上行驶时的NO_x、CO和PN排放，对汽车排放的要求标准更高、更严[3]。

针对国六法规的要求，国内外研究机构和企业都开展了大量研发工作，特别是围绕国六b进行了道路实时工况的排放控制开发。韦进金等[4]专门研究WLTC循环换挡策略对排放的影响，通过选取一辆四驱柴油车进行试验，结果表明：在NO_x万有特性图上，高速换挡策略主要集中于高转速且低喷油量区域，其NO_x比排放较低；低速换挡策略集中于低转速且高喷油量区域，NO_x比排放较高；在暖机过程高速换挡策略水温上升比低速换挡策略更快，摩擦阻力更小，燃烧效率更好，排放水平更低。禹文林等人[5]专门研究了混合动力汽车实际道路行驶的排放特征，他们发现在节气门突然加大的瞬间，NO_x会出现相应的排放峰值，认为主要原因是急加速的瞬间发动机需要功率混合气，混合气加浓偏离理论空燃比导致三效催化剂转化效率降低。王山等人[6]研究实际道路排放试验中CO、NO_x和PN的排放特征，发现CO主要集中在产生在高速工况下，NO_x对驾驶行为有一定敏感度，在长时间激烈驾驶时，NO_x排放量增加。罗

佳鑫等人[7]进行在 RDE 工况下的排放试验,分析得 CO 和 THC 排放较低;直喷汽油车的 PN 排放与车速、加速度存在较强的相关性;在冷启动过程中由于三效催化剂尚未达到起燃温度,不能正常工作,导致车辆的 CO 和 NO_x 排放较高。北京理工大学的付秉正、周小燕、葛蕴珊等[8]选取了四辆轻型汽油车、两辆轻型柴油车和一辆混合动力汽车作为研究对象。通过实际道路试验发现,轻型汽油车 RDE 排放中 CO 较高,而轻型柴油车 RDE 排放中 NO_x 较高,并建议应重点关注两种车型的 CO 和 NO_x 排放;混合动力汽车排放状况良好,尾气排放因子均低于国 5 法规限值。同时他们对一辆 GDI 汽油车重复进行 6 次 RDE 道路测试时发现 RDE 试验中汽车的动力学参数与相对正加速度跟 NO_x、PN 排放有明显相关性。

Toshizaemon Noce 等人[9]对不同发动机根据实际驾驶排放(RDE)在实际道路中进行模拟试验,其结果表明,实际测试的汽油发动机能量转换系数在 0.405 ± 0.04 L/kWh 的相同范围内,与当今乘用车汽油机的标准相差甚远(自然吸气和涡轮增压分别为 0.264 L/kWh 和 0.281 L/kWh),其结果还验证了涡轮增压发动机的效率更高。Daniel Neumann 等人[10]采用一种新颖的闭环燃烧控制方法,减少瞬态运行中 NO 排放,其利用数字燃烧率整形(DiCoRS),设置了 DiCoRS 控制器的目标燃烧速率,以实现降低局部燃烧温度和减少 NO 排放。英国 Cambustion 公司的 Martin Irwin 等人[11]利用该公司生产的针对 RDE 排放测量的仪器进行实际道路排放试验,结果发现车辆在实际道路行驶时,遇到红绿灯后加速离开、经过减速带后加速离开以及进入高速时的加速过程都会出现 NO_x 排放峰值,提出通过减少道路减速带的数量以降低城市区域内机动车 NO_x 的排放。

当前国内外有关轻型车实际道路排放的研究目前关注重点是 RDE 试验的测试方法、试验数据的处理方法以及整车尾气的总体排放情况,为有针对性地进行发动机标定和优化,降低整车的尾气排放,需要提取到轻型车的气体瞬态排放特征。本文研究关注汽车实际行驶过程中气体的瞬态排放特性,在以往研究的基础上,使用高频快速响应的气体采样设备,通过实际道路排放测试和转鼓模拟 RDE 工况排放测试,重点研究轻型汽油车实际行驶时的 NO 瞬态排放特性,并且提出针对瞬态工况下 NO 排放特性应对策略。

本文旨在通过对一款国内在售的轻型汽油车进行实际道路行驶的排放试验,提取轻型车实际道路行驶的瞬态 NO_x 排放特征,研究排放产生机理;通过对当前车辆的 NO_x 气体排放测量,分析路面行驶产生 NO 排放峰值的区域及路况;关注某些瞬态 NO 排放特别高的区域,便于企业进一步优化发动机技术和控制策略;为 OEM 应对国六法规进行更有针对性的整车和动力系统标定提供数据与理论支持。

2. 主要设备和仪器

RDE 法规中对车载排放测试设备有具体要求,测量设备应具备独立分析确定排气浓度的功能,同时需要有独立的外接电源,可实现与车辆 ECU (Electronic Control Unit)建立通讯。目前使用最多的车载排放测试设备为便携式排放测试系统 PEMS (Portable Emission Measurement System),该套系统具有便于安装、易于测量、集成度高的特点;除了尾气分析模块,该系统还集成了排气质量流量计、GPS 定位、温湿度计等多个模块,还有专门的后处理系统做完整的数据分析,可直接得到测量报告。目前使用最多的 PEMS 设备有 AVL 公司的 M.O.V.E.和 Horiba 的 OBS-ONE。但 PEMS 设备普遍存在采样频率较低,响应时间在 1 s 左右,此时发动机缸内已经经历了多个燃烧循环,这使得测量的排放数据与发动机工作状态难以实现准确对应,因此这类设备只能测量和大致的反应汽车的整体排放情况,却难以准确的分析和解决瞬态排放问题,所以本文选取了英国 Cambustion 公司的 CLD 500 车载 NO 测试设备作为试验的主要测量仪器。

快速排放采样设备 CLD500

CLD500 NO 分析仪是一种能快速高频响应(最快响应时间约为 4 ms)分析 NO 浓度的设备,具有体积小、便于安装、功耗低、精度高、采样频率高(最高可达 100 Hz)、可实现双路直接采集等诸多优点,非

常适合用于汽车实际道路行驶过程中的快速气体采样。该设备还自带 $\text{NO}_2\text{-NO}$ 的转化装置，以精确测量 NO 的浓度。通过 CLD500 可以准确地测量出瞬时排放的位置(时间、空间)，以便准确解释排放产生的原因和机理，为解决排放实时控制、整车标定和优化提供支持。

该套车载系统由排放分析仪、臭氧发生器、独立外接电源、逆变器、主控电脑、采样管路和采样探头组成，如图 1 所示。其中，1 是 CLD500 排放分析仪及臭氧发生器集成模块，2 是采样管路及探针，3 是主控电脑，4 是 12 V 外接电源，5 是车载氧气瓶，6 是 220 V 升压逆变器。其中逆变器将 12 V 外接电源升压至 220 V 供设备使用，车载氧气瓶给臭氧发生器提供氧气产生臭氧，产生的臭氧供给排放分析仪测量 NO 浓度，主控电脑控制设备的预热、标定和测量。控制设备预热完成后开始进行零度和满度的标定。在预热过程中，设置采样管路头部加热温度为 280°C ，采样探头温度为 120°C ，两条采样管路的参数设置相同，但控制是分开的。

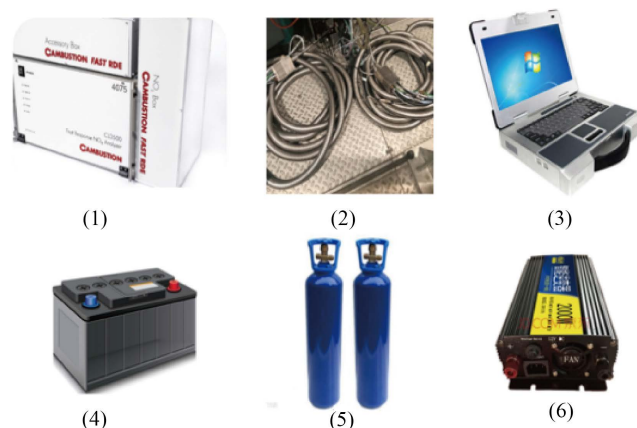


Figure 1. CLD500 vehicle emission system composition
图 1. CLD500 车载排放系统组成

3. 试验方案

本研究选取上海市嘉定区一段路线作为试验路段。

3.1. 试验车辆选择和采样点设置

试验车辆为 1.4 T 进气道喷射型汽油车，部分参数如表 1 所示。

Table 1. Data of test vehicle
表 1. 试验车数据

动力类型	汽油机
发动机类型	1.4T-PFI
发动机额定功率(kW)	104
变速箱类型	6MT
整备质量(kg)	1550
油品	92#
行驶里程(km)	1680
出厂年月	2018.08
后处理系统	TWC
环保标准	国 VI

将 CLD500 的采样点分别设置在试验车三效催化器的进口和出口, 直接测量发动机缸内燃烧生成的 NO 浓度和经过三效催化器处理之后的 NO 浓度。测得的排放数据与 ECU 参数进行时序校准后, 就可以分析发动机工况对原机 NO 排放的影响、瞬态 NO 排放特征以及行驶过程中三效催化器的工作状态。

3.2. ECU 参数采集和时序校准

为有效且准确地分析发动机工况对瞬态 NO 排放产生的影响, 需要采集发动机 ECU 的基本参数, 以监测不同时刻发动机的实际工作状况。本文的研究通过 CAN 线、INCA 软件和 ETAS590 模块直接采集发动机 ECU 参数, 采集频率为 130 Hz。采集发动机 ECU 参数时, 需保证 ECU 测量参数与 CLD500 测量的 NO 排放数据进行时序校准。在本次试验中将 CLD500 输出的模拟电压信号以及温度传感器的压力信号接入到 Dual-Meter 设备中, 然后该设备通过 ETAS590 模块与 INCA 软件进行通讯, 从而实现同步采集 ECU 参数和车载排放数据。

3.3. 片段法数据分析

由于 CLD500 和发动机 ECU 的采样频率高, 试验数据量庞大, 并且试验持续时间相对较长, 单次试验得到的单个变量数据多达几十万行, 单次试验数据内存最多达到几百兆。为此本文采用的是片段法, 将整个工况的试验数据分为许多片段, 逐一分析不同片段的工况及排放特点[2]。在划分片段的时候, 可以找到一些特殊工况下的数据进行分析。这样便于对大量数据进行处理分析, 也可以更有针对性的找出车辆实际行驶过程中不同工况条件下的排放特征。

4. 实际道路行驶瞬态 NO 排放特性

众多的研究结果都表明, 目前轻型汽油车实际道路行驶过程中最容易超标的尾气排放是 NO。英国的 Duckhouse 和 Peckham 等人[12]在研究机动车瞬态排放时发现轻型汽油车在道路试验过程中三效催化器出口处会出现 NO 排放恶化的现象, 他们将这种排放恶化的现象称作 NO 的穿透或泄露(NO Breakthrough)。

通常住宅区空气中 NO 浓度最高不能超过 0.15 mg/m^3 , 换算成体积浓度约为 0.12×10^{-6} ; 而工作区的 NO 浓度最高不能超过 5 mg/m^3 , 换算成体积浓度约为 4.07×10^{-6} , 三级标准下的 NO 日平均浓度限值为 20 mg/m^3 , 换算成体积浓度为 16.3×10^{-6} 。由此可见, 空气中 NO 的浓度限值比较低, 基本都低于 20×10^{-6} 。实际在排放试验过程中, 当发动机处于热机稳态工况下运行时, 催化器出口处检测到的 NO 浓度低于 10×10^{-6} , 而在一些特殊工况下, 催化器出口处测量到的 NO 浓度会非常高。这些尾气进入到空气中后还会被大幅稀释, 所以考虑稀释倍数为 10 倍时, 要满足 NO 排气浓度低于空气中气体浓度限值的要求, 那么催化器出口端的 NO 浓度应低于 200×10^{-6} 。当催化器出口处 NO 浓度值超过 200×10^{-6} 时, 本文称为 NO 穿透。

4.1. NO 排放特性

内燃机燃烧生成的氮氧化物 NO_x 主要包括 NO 和 NO_2 , 对于汽油机, 其尾气中的 NO_2 通常只占 NO_x 总质量的 1%~2% [13], 因此一般对汽油机的氮氧化物排放重点关注 NO。

对试验车实际道路行驶 NO 浓度分析, 催化器入口的(Engine-out) NO 浓度与发动机节气门开度有明显的相关性, 如图 2 所示。当发动机节气门开度突然增大时, 发动机缸内燃烧生成的 NO 明显增加, 节气门开度相对平稳时, 催化器入口的 NO 也相应处于较低水平。原因是当发动机需求负荷增大时, ECU 会控制节气门开度以增加进气量; 而发动机的负荷增大时, 缸内燃烧温度升高, 导致催化器入口的 NO 增加。

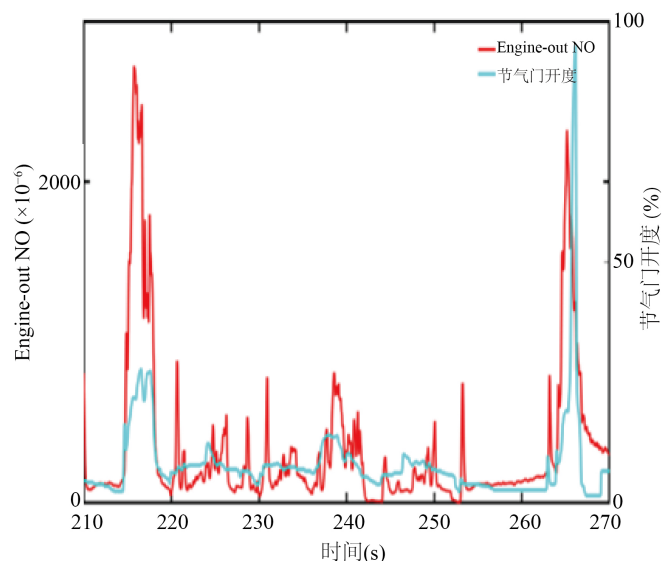


Figure 2. Correlation of NO concentration at the entrance of catalytic converter of test car and throttle opening

图 2. 试验车催化器入口 NO 浓度与节气门开度的相关性

4.2. 汽油车瞬态 NO 排放特性的数据采集与分析

在分析汽油车瞬态 NO 排放特征时将具体到每一个工况点,如发动机的运行工况和车辆的行驶工况。本文重点研究区域是三效催化器出口出现 NO 排放尖峰,即 NO 穿透的区域。分析特殊区域下 NO 穿透的机理,提出有效控制策略以优化排放恶化的工况。

4.2.1. 瞬态 NO 排放分析

图 3 中所示为本文试验车道路行驶时的 NO 瞬态排放特性。该段数据截取自试验车在某次路试试验中的一个典型片段,时间为 360~380 s。该过程中最特殊的是三效催化器出口处出现了三个 NO 排放尖峰 A、B、C,各自的尖峰浓度值都超过了 200×10^{-6} ,最高的 B 峰甚至达到了 1200×10^{-6} ,这表明在短短 20 s 的时间内一共出现了三次典型的 NO 穿透催化器现象。这些 NO 尖峰也正是该车路试过程中 NO 排放的主要来源,如果能有效避免这些尖峰的出现,那么该试验车的 NO 排放总量会有非常明显的降低。

图 3 下方是对该片段 A、B、C、D 四个工况点说明。

1) A 工况点催化器出口处出现 NO 浓度为 698.4×10^{-6} 的排放尖峰(A1: 出现 NO 尖峰之前汽车油门踏板位置为 0,即未踩油门,对应发动机缸内燃烧生成的 NO 也为 0; A2: NO 尖峰出现之前持续了 1.2 s 左右的断油,此时发动机需求转矩也为 0; A3: 发动机转速由 1 点的 3120 r/min 迅速降低到 2 点的 1440 r/min);

2) B 工况点催化器出口处出现 NO 浓度为 1213×10^{-6} 的排放尖峰;

3) C 工况点催化器出口处出现 NO 浓度为 350.6×10^{-6} 的排放尖峰,其出现的情况与 A、B 处完全一致;

4) D 工况点汽车油门踏板位置为 0,即未踩油门,但此时并未出现断油信号和催化器后端的 NO 峰值。

从上述对图 3 中特定点的分析,可以发现该片段中 A、B、C 三个催化器后端 NO 排放尖峰出现的原因是完全一致的。在这三个尖峰之前均出现了汽车换挡但未加大油门、发动机需求转矩为 0、发动机原机 NO 排放为 0、短暂断油和发动机转速急剧变化的现象。总结此时出现催后 NO 排放尖峰的原因:减小

油门、换挡而未加大油门,此时汽车继续前进,发动机需求转矩为 0,因为道路阻力和减小油门开度使得发动机转速迅速下降,同时出现短暂断油的现象,由此过量空气系数急剧升高,混合气处于极稀的状态;发动机也出现停缸现象,发动机缸内并未燃烧,原机 NO 排放近似为 0。因为过量空气系数极高,这些气体进入三效催化器内部使得催化器处于富氧状态[2]。当重新喷油的瞬间,发动机缸内重新开始燃烧并伴随排气生成,但此时三效催化器内的氧气与 THC 和 CO 发生反应,导致没有足够的还原剂与 NO 发生反应,所以部分 NO 气体直接穿过催化器到达出口端,测得 NO 浓度尖峰。

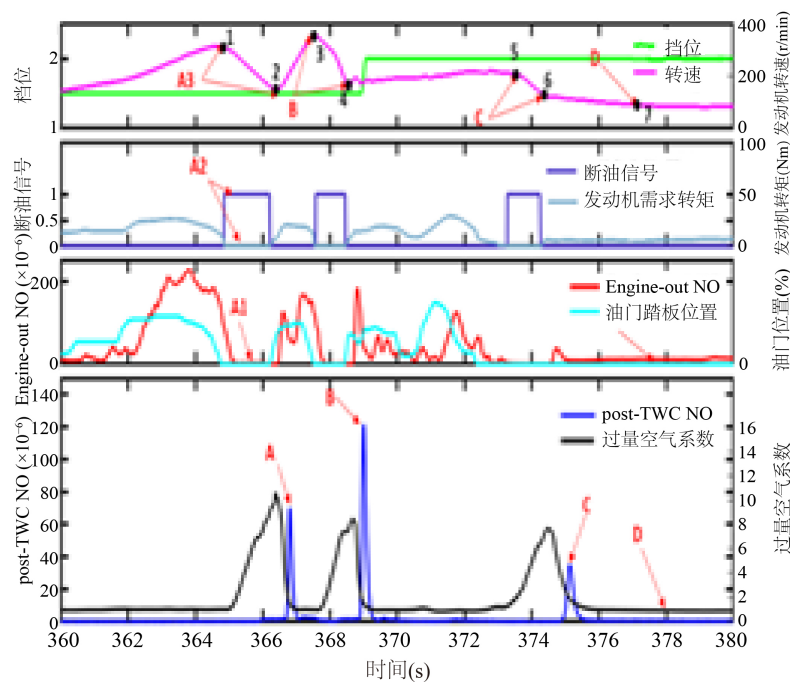


Figure 3. Transient NO emission characteristics of test vehicles on road (360 s~380 s)

图 3. 试验车道路行驶 NO 瞬态排放特性(360 s~380 s)

通过验证其他时间点出现 NO 穿透的位置,图 4 和图 5 出了 391~394 s、395~398 s、514~517 s 和 602~605 s 的瞬态排放结果,都证明了上述结论的一致性和准确性。

4.2.2. 发动机瞬时断油对瞬态 NO 排放影响

需要注意的是,并非所有发动机瞬时断油使得过量空气系数变大的情况都会出现 NO 穿透三效催化器的现象。图 6 中所示的 B 区域出现了短暂的发动机断油,同时三效催化器前端的氧传感器测得过量空气系数达到 4.2,但是此时并没有出现催化器出口处的 NO 排放尖峰。分析认为,真正影响 NO 穿透三效催化器的是催化器内部的还原反应是否完全,只有当催化器内部出现过量空气系数偏大,整体氧浓度偏高时,NO 才可能会因反应不完全而被排出催化器。但是试验测量的是催化器进口处的过量空气系数,并不能准确的反应催化器内部的气体组分情况。对比图 6 中的 A、B 两个区域,A 区域中出现断油信号的短时间内进气流量明显高于 B 区域,同时 A 区域的断油持续时间也明显长于 B 区域,最终导致催化器前端的氧传感器检测到 A 区域的过量空气系数高达 15.3,而 B 区域的过量空气系数最高仅为 4.2,这说明在 A 区域有明显多于 B 区域的新鲜空气存在。这些气体进入催化器后与随后缸内燃烧排出的尾气混合发生反应,因为 A 区域中氧气过多,导致有部分 NO 并未完全参与反应;而 B 区域进入催化器的氧气相比

于 A 区域要少很多, 所以缸内燃烧产生的排气进入催化器后仍然有足够的还原剂与 NO 发生反应, 因而催化器出口处并没有检测到 NO 排放尖峰。

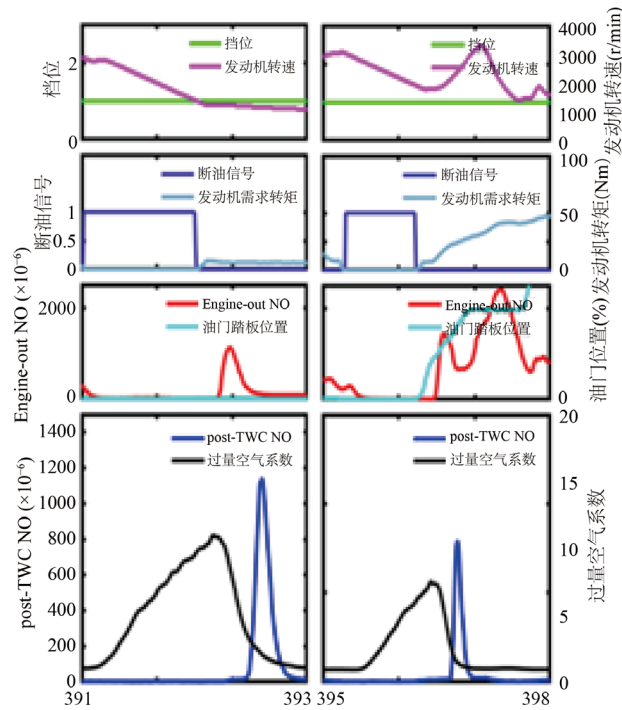


Figure 4. Transient NO emission characteristics of test vehicles on road
图 4. 试验车道路行驶 NO 瞬态排放特性

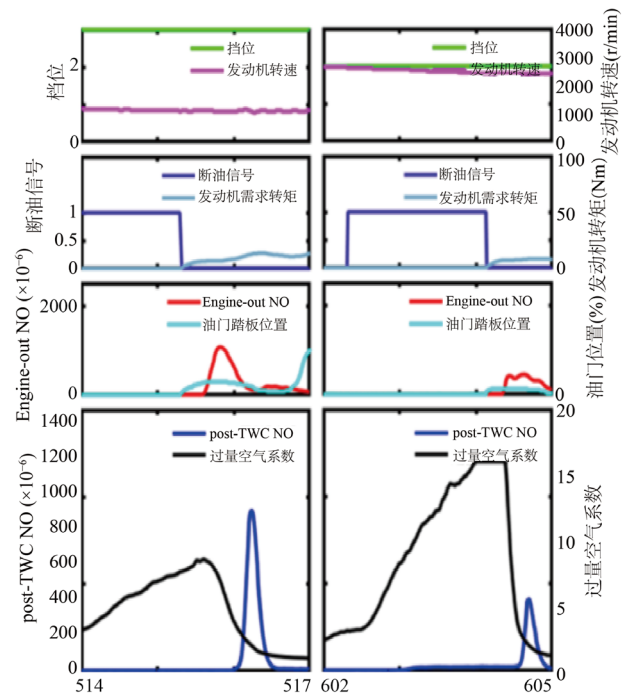


Figure 5. Transient NO emission characteristics of test vehicles on road
图 5. 试验车道路行驶 NO 瞬态排放特性

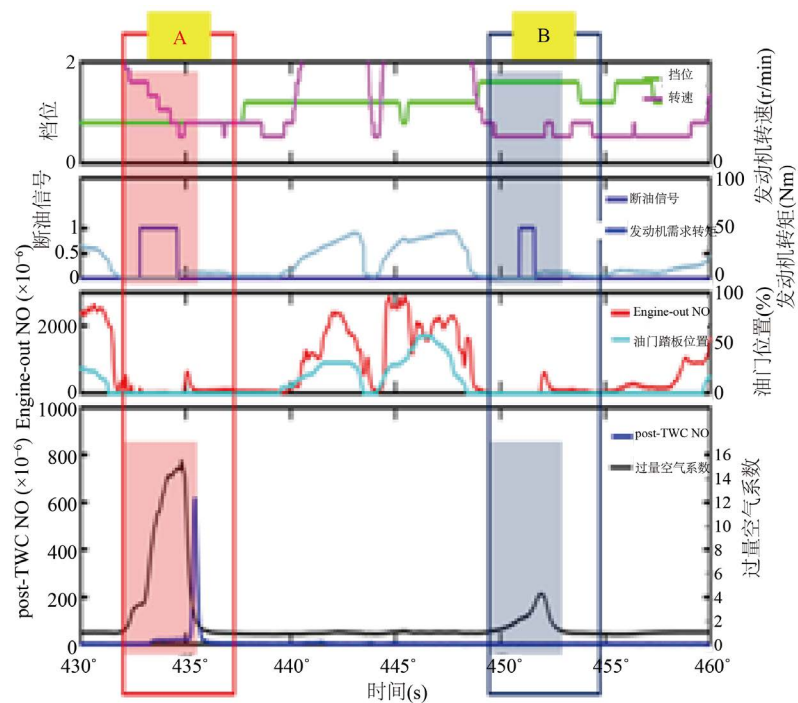


Figure 6. Comparison of NO emissions of the test vehicle at two instantaneous fuel cutoffs

图 6. 试验车在两处断油瞬时的 NO 排放对比

从上文对图 6 的分析可知，断油信号持续的时间长短可能会影响催化器前端混合气过量空气系数的高低。为了更准确的说明该现象，现将试验车行车片段 200~400 s 的排放结果由图 7 给出。

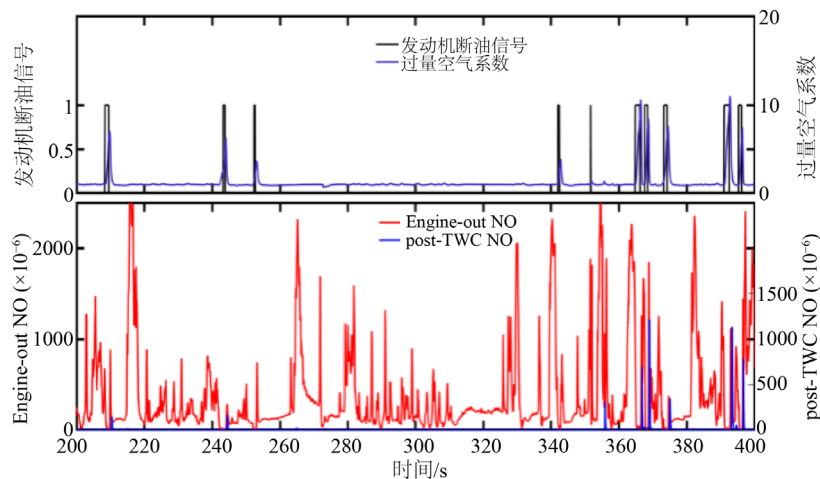


Figure 7. The influence of the time of the fuel cut signal on the excess air coefficient

图 7. 试验车断油信号持续时间对过量空气系数的影响

图 7 中发动机断油信号与过量空气系数具有明显的对应关系，每一次断油信号出现的瞬间都会有相应极高的过量空气系数，而且断油信号持续的时间越长，则对应出现的过量空气系数值越大，说明此时的混合气越稀，混合气过稀进入催化器中很可能会使得三效催化器富氧从而出现 NO 穿透现象。但是需要注意，瞬时过量空气系数的高低与催化器出口处检测到 NO 排放尖峰的大小没有必然关系，过量空气

系数越大,混合气越稀,但并不意味着此时穿透催化器的 NO 越多,因为最终影响 NO 穿透催化器的因素是在三效催化器内部 NO 是否能够完全发生反应。所以当过量空气系数小于 1,即混合气处于偏浓状态时,通常不会出现 NO 穿透催化器的现象。

4.2.3. 小结

轻型汽油车在快速减小油门踏板开度的过程中,会依靠自身惯性继续前进,此时发动机处在高速运转的状态中,进入气缸中的新鲜空气很少,为降低有害气体的排放同时减少燃油消耗,发动机发出瞬时断油信号,导致催化器前端气体的过量空气系数偏高,这些气体进入到催化器后会与排气中的 THC 和 CO 发生氧化反应,当氧气量过多,NO 会因还原剂不够,反应不完全而被排到催化器出口处,导致催化器后端检测到 NO 穿透。

轻型车实际道路行驶过程中出现催化器出口处 NO 排放尖峰的主要原因有:实际道路行驶过程中有档位变化时,ECU 控制发动机瞬时断油;当实际行驶中依靠汽车惯性前进时,ECU 控制发动机瞬时断油;当激烈驾驶,突然减小油门,同样引起 ECU 控制发动机瞬时断油。这三类断油信号的出现,会使得混合气出现瞬时偏稀,这些气体进入三效催化器后使得催化器富氧,没有足够的还原剂 THC、CO 与 NO 发生氧化还原反应,故部分未完全反应的 NO 被排到催化器出口端。

4.3. 针对 NO 瞬态排放特性的应对策略

为了应对实际行驶过程中 NO 瞬态穿透催化器的现象,应该着重关注和检测行驶时出现断油信号的位置和工况,并相应在这些断油信号出现的瞬时之后采取混合气加浓的策略,以补给三效催化器足够的 THC 和 CO,使之与 NO 发生氧化还原反应,降低 NO 排放。

断油会降低油耗但很可能会导致 NO 穿透催化器进入到大气中,所以一定要在燃油经济性和排放性之间找准平衡点。可以适当地将断油时间控制得更短一些或控制发动机减小油门踏板开度之后的进气量迅速降低,使得混合气不至于过稀而使三效催化器内部富氧,最后导致 NO 穿透催化器。

5. 结论

1) 过量空气系数急剧升高,引起发动机停缸,缸内可燃混合气未被燃烧,未燃混合气进入三效催化器内部导致催化器处于富氧;发动机重新喷油,催化器入口出现 NO 浓度尖峰,NO 排放会穿透三效催化器,导致 NO 排放泄露。

2) 瞬时过量空气系数大小与是否检测到 NO 排放尖峰大小没有必然关系,试验测量的是催化器进口处的过量空气系数,无法准确地反应催化器内部的气体组分情况,催化器内部的氧化还原反应是否完全直接影响 NO 是否穿透三效催化器,只有当催化器内部出现过量空气系数偏大情况时,NO 才可能会因反应不完全而被排出催化器。

3) 断油信号持续时间影响催化器入口的混合气过量空气系数。断油信号引起过量空气系数上升;断油信号持续的时间越长,过量空气系数值越大。

致 谢

感谢 Cambustion 公司为试验研究提供的瞬态道路工况 NO 排放车载测试系统,感谢吉利动力研究院提供的试验用车辆。

参考文献

[1] 中国汽车技术研究中心,中国环境科学研究院. GB18352.5-2013 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五

- 阶段) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [2] Zhang, Y., Deng, J., Li, Q., Liu, Y., *et al.* (2020) Characteristics of Transient NO_x Emissions of HEV under Real Road Driving. SAE Technical Paper 2020-01-0380. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0380>
- [3] 中国环境科学研究院, 北京理工大学, 中国汽车技术研究中心, 厦门市环境保护机动车污染控制技术中心, 北京市机动车排放管理中心. GB18352.6-2016 轻型汽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, 2016.
- [4] 韦进金, 于晖, 黄辰君. 国六 WLTC 循环换挡策略对排放的影响[J]. 内燃机与配件, 2020(6): 67-69.
- [5] 禹文林, 葛蕴珊, 王欣, 彭子航, 王学智, 尹航. 混合动力汽车实际道路行驶排放特性研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(10): 1139-1145.
- [6] 王山, 朱海兵, 姚王锴, 张斌. 轻型汽油车的实际道路排放试验研究[J]. 汽车实用技术, 2019(16): 140-143.
- [7] 罗佳鑫, 温溢, 杨正军, 朱庆功, 潘朋. 国六轻型车实际道路与实验室工况排放特性对比研究[J]. 车用发动机, 2019(6): 64-70.
- [8] 付秉正, 杨正军, 尹航, 周小燕, 谭建伟, 葛蕴珊. 轻型汽油车实际行驶污染物排放特性的研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(4): 376-380.
- [9] Noce, T., de Morais Hanriot, S., Sales, L.C.M., *et al.* (2020) Energy Conversion Factor for Gasoline Engines in Real-World Driving Emissionf Cycle. *Automotive Innovation*, **3**, 169-180. <https://doi.org/10.1007/s42154-020-00098-x>
- [10] Neumann, D., Schäfers, L., Muthyala, P., *et al.* (2020) Reduction of Transient Engine-Out NO_x-Emissions by Advanced Digital Combustion Rate Shaping. *Automotive Innovation*, **3**, 181-190. <https://doi.org/10.1007/s42154-020-00101-5>
- [11] Irwin, M., Bradley, H., Duckhouse, M., Hammond, M. and Peckham, M.S. (2018) High Spatio-Temporal Resolution Pollutant Measurements of On-Board Vehicle Emissions Using Ultra-Fast Response Gas Analyzers. *Atmospheric Measurement Techniques*, **11**, 3559-3567. <https://doi.org/10.5194/amt-11-3559-2018>
- [12] Duckhouse, M.P.G., Peckham, M., Bradley, H., Irwin, M., *et al.* (2018) On Board Fast Measurement of Vehicle NO_x Emissions. SAE Technical Paper 2018-01-0646. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0646>
- [13] 冯洪庆. 465 汽油机稀薄燃烧及 NO_x 排放催化控制研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2004.