

机动车后处理系统快速老化技术研究

郑 健, 李忠照, 管 斌, 文灿华, 李友平

(上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 介绍了机动车不同排放后处理系统的老化机理, 指出: 影响 TWC、DOC、SCR 老化的主要因素为热老化, 而影响 GPF 和 DPF 老化的主要因素为灰分积聚。介绍了汽油机 TWC、GPF 快速老化技术以及柴油机后处理装置快速老化技术, 包括小样台架快速老化、马弗炉快速老化、DOC 前喷油快速老化、DPF 灰分加载快速老化、燃烧器快速老化等, 并比较分析了各种快速老化技术的特点及应用情况。

关键词: 排放后处理系统; 耐久性; 快速老化; 燃烧器

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)04-0015-06

Review of Rapid Aging Technologies of Vehicle After-Treatment System

Zheng Jian, Li Zhongzhao, Guan Bin, Wen Canhua, Li Youping

(Key Laboratory for Power Machinery & Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Aging mechanism for vehicle after-treatment devices is discussed. The primary mechanism of TWC/DOC/SCR deactivation is thermal aging, and ash deposition represents the most important aging mechanism for GPF/DPF. Current accelerated aging technologies for TWC and GPF used in gasoline engines are introduced respectively, and rapid aging technologies of diesel after-treatment system, including small sample in laboratory reactor, increasing temperature in furnace, engine bench installing fuel injection system in front of DOC, fuel doping generated ash for DPF, accelerated aging using burner are presented. The characteristics of various rapid aging technologies and their application are compared and summarized.

Key words: emission after-treatment system; durability; rapid aging; burner

0 引 言

发动机排放的一次颗粒物 (PM)、氮氧化物 (NO_x)、碳氢化合物 (HCs) 等污染物在大气中会演变成 PM_{2.5} 颗粒物。在北京、上海等大城市, 机动车发动机排放对大气 PM_{2.5} 的贡献率超过 20%。为了满足日益严格的排放法规, 汽油机后处理装置, 如三效催化器 (TWC, 净化排气中 HC、NO_x、CO)、汽油机颗粒过滤器 (GPF, 净化尾气中 PM); 柴油机后处理装置, 如柴油氧化催化器

(DOC, 净化排气中 HCs、CO)、选择性催化还原反应器 (SCR, 净化排气中 NO_x)、柴油机颗粒过滤器 (DPF, 净化排气中颗粒物 PM), 将作为标配部件应用于机动车的尾气后处理。安装有后处理装置的机动车将被强制要求在全生命周期内都必须满足相应排放法规。如国 6a 法规要求轻型车辆在 160 000 km 内排放须达标, 国 6b 法规进一步要求为 200 000 km^[1]; 而重型车辆则被要求在 700 000 km 内排放必须达标^[2]。排放法规对后处理装置的耐久性提出了很高的要求。

收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2017-12-14

作者简介: 郑健(1992-), 男, 硕士研究生在读, 主要研究方向为汽车排放污染物控制, zhengjian999@sjtu.edu.cn。

后处理装置的核心是催化剂,但催化剂在运行过程中会逐渐老化(热老化、磨损、中毒、开裂等),导致后处理装置效率逐渐降低。因此,提高机动车后处理装置耐久性的关键是提高催化剂老化后的性能,保证其在全生命周期内的催化转换效率能满足法规要求。

在机动车后处理装置批量生产之前对其耐久性,即催化剂老化性能进行测试是必须的。老化测试是对催化剂进行一定时间或里程的老化试验后测试其催化转化效率。根据法规,车用柴油机后处理装置老化试验要求后处理装置在发动机台架上经历几万小时台架老化试验,或整车车队进行几十万公里的道路老化试验,这须要耗费巨大的人力、物力和财力。因此,研发快速、低成本的发动机后处理装置老化技术,并对催化剂老化后性能进行测试,验证其在全生命周期内是否能达到排放法规要求,对发动机后处理行业具有重大意义。

1 汽油机后处理装置高温快速老化技术

汽油机后处理设备主要是三效催化器(TWC),随着排放法规的日趋严格,增加了对PM、PN的限制;针对GDI发动机,后处理设备增加了汽油机颗粒过滤器(GPF)。

1.1 TWC快速老化技术

现阶段主流TWC的载体为多孔陶瓷材料,在载体上涂覆了铂、铑、钯等贵金属催化剂。研究表明:TWC催化剂的老化主要是热老化。根据阿乌尼纽斯方程:高温老化效应可被加速,速率控制机制与温度呈非线性关系,老化温度与失活时间成指数关系^{[3-5]、[11-12]、[19-21]}。热老化所导致的高温失活对三效催化器效率的影响是累积的,并随着温度的上升以指数形式增加。基于这一原理,可以通过使催化剂在更短的时期暴露在一个适当的高温中,模拟整个使用寿命中的热负载,也即完整的里程积累过程试验可以替换为一个加速老化试验。

目前最常用的快速老化循环为标准台架循环(SBC),根据催化剂温度、发动机空燃比(A/F)和添加的第一个催化器前面的二次空气喷射量来定义SBC循环,每个循环60 s,如图1所示。在0~40 s内,为理论空燃比,通过发动机转速、负荷、点火正时的控制,实现循环内催化剂最低温度800℃;在41~45 s内,调节空燃比,加浓,以实现最高的催化剂温度;在46~55 s内,空燃比为浓,二次空气喷射开启,使废气中的氧含量在3%

左右,实现催化剂温度在整个循环内最高,为890℃;在56~60 s内,为理论空燃比,二次空气喷射开启,使废气中的氧含量在3%左右,通过发动机转速、负荷、点火正时的控制实现催化剂最低温度为800℃^[1]。

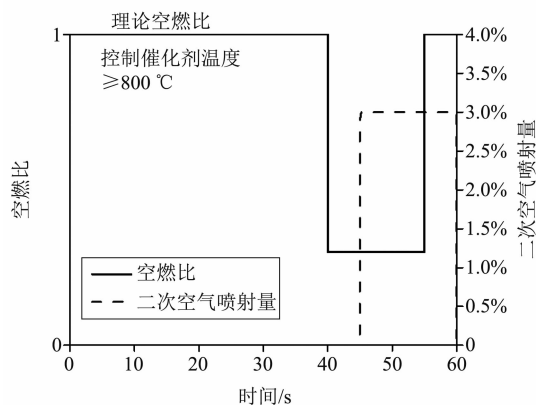


图1 SBC循环^[1]

其他常见循环还包括:GMAC875循环、Fuel-cut循环、ZDAKW循环、ARL-102循环^{[3]、[23]}等。这些循环都是利用空燃比波动来加速老化,空燃比的周期性浓稀交替冲击使催化剂的失活速度加快;老化温度不断提高,老化时间不断缩短;既考虑催化器入口温度,同时也兼顾催化器床层温度。

SBC循环主要在发动机台架上实现。SBC快速老化系统由测功机、发动机、快速老化控制系统、空燃比仪、二次压缩空气控制装置、排气流量计、排气背压调节阀等组成。SBC快速老化系统结构如图2所示。发动机采用大功率发动机,排量一般在6~8 L左右,可以同时两路或者多路测试后处理催化器。SBC快速老化系统在循环中能有效地控制空燃比和催化器床层温度,同时具有良好的可控性和重复性。

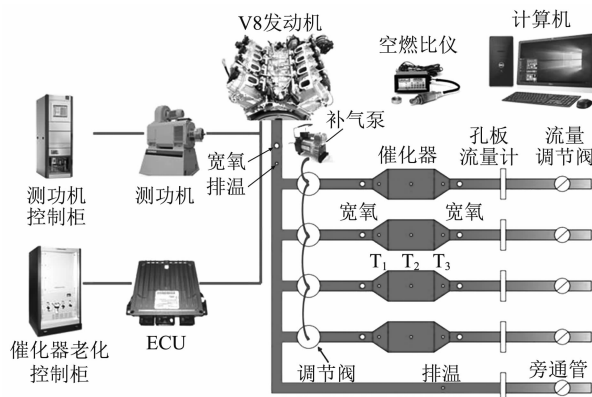


图2 SBC快速老化系统结构图

除了基于大功率发动机的快速老化系统,西南

研究院^[4]还开发了基于燃烧器的 FOCAS 快速老化系统。通过控制燃烧器模拟发动机 SBC 快速老化工况, 实现 TWC 催化器的老化。FEV 公司^[5]也开发了基于燃烧器的 HGATB 快速老化系统, 其燃烧器核心如图 3 所示。与发动机台架相比, 燃烧器系统具有明显的优点: 控制精度高, 空燃比变化幅度小 (1 ± 0.02), 可将 TWC 老化到法规要求限值的 $\pm 5\%$ 以内; 可以进行快速老化试验, 也可进行性能评价试验; 可模拟极高温度的老化周期, 减小催化器老化所需时间; 系统简单, 节约能源, 容易操作, 运营和维护成本低。

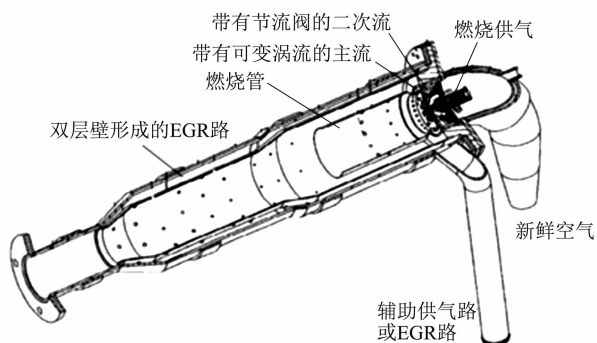


图3 燃烧器快速老化系统核心^[5]

1.2 GPF 快速老化技术

为了减少油耗, 提高发动机的经济性, 国 6 发动机多采用 GDI 发动机。GDI 发动机缸内燃烧会产生大量的 PN, 所以国 6 法规对汽油机的 PM 和 PN 做出了严格限制, 分别为 $4.5 (\text{mg} \cdot \text{km}^{-1})$ 、 $(6 \times 10^{11}) \cdot \text{km}^{-1}$ 。在柴油机上, DPF 被证明在控制颗粒物排放方面非常有效。与柴油机相比, 汽油机排放的尾气颗粒物浓度较低, GPF 灰分积聚程度较低。经过较长里程的整车道路循环, 灰分积聚情况也没有那么显著^[6], 没有发现 GPF 性能恶化的情况, 因此 GPF 的快速老化须要进一步研究。现阶段, GPF 耐久性测试主要采用整车道路循环测试^[7]和采用燃烧器方式对 GPF 进行快速加载^[8]。

福特公司^[7]采用整车道路循环在转鼓台架上分别进行了 209 000 km 和 241 000 km (13 万和 15 万英里) 的耐久性测试。在试验中只采用了发动机自带的标定校准, 没有对 GPF 进行特殊的校准或控制; 在减速过程中断油为 GPF 提供再生所需的 O_2 。试验结果表明: 该 GPF 在全生命周期内的灰分加载量为 $23 \sim 24 (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$, 满足排放法规限值。

MIT 和福特公司^[8]采用燃烧器方式对 GPF 进行快速加载, 认为: 法规没有要求所有的 GPF 样

件进行整车道路老化, 为了对 GPF 在整个生命周期内进行测试, 一种快速加载的方法是十分必要的。测试 DPF 耐久性的燃烧器台架如图 4 所示。

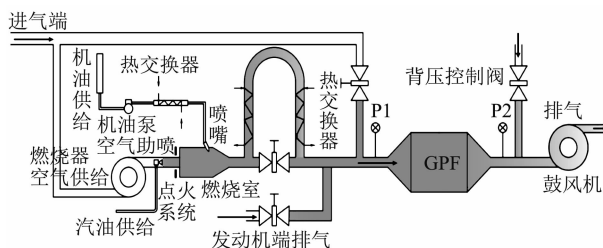


图4 测试 GPF 耐久性的燃烧器台架^[8]

商用燃烧机 (具有固定的流量) 提供的空气经旋转盘与喷嘴喷出的汽油混合, 由径向安装在喷嘴下方的 3 个火花塞点燃, 火焰进入燃烧腔燃烧; 在燃烧器上部加装喷嘴, 喷射所需的机油, 以燃烧产生的颗粒; 在燃烧腔下游安装管壳式换热器, 以便在连续操作过程中对排气温度进行调节, 控制 GPF 加载再生时的入口温度; 在换热器后方引入清洁的二次空气, 以便对废气中的含氧量进行独立调节; 在 GPF 入口前方提供一个阀门, 允许引入发动机排气进入 GPF 进行测试; 在 GPF 下游提供一个额外的空气入口, 以调节系统背压并冷却排气, 保护下游驱动系统的鼓风机。试验以 4 h 为一循环, 前 3.5 h 在 400°C 进行正常加载, 后 0.5 h 在 650°C 进行再生。流量控制在 $59.5 (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$, 使 GPF 灰分加载至 $30.5 (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$, 与 240 000 km (15 万英里) 状态对应。试验结果表明: 加速老化系统在基于系统的流量范围和温度能力的基础上, 对大型的 GDI 发动机后处理装置的研究具有良好的适用性。DPF 的性能通过快速加载与整车道路加载基本相同。

2 柴油机后处理系统高温快速老化技术

在国 VI 法规前, 柴油机的后处理技术路线主要有 EGR + DOC + DPF 和 DOC + DPF + SCR。随着国 VI 法规的实施, 形成了 EGR + DOC + DPF + SCR 技术路线。针对重型车辆, 国 VI 法规要求在 700 000 km 内排放必须达标。

在后处理系统中, DOC 主要的功能为氧化 HC、CO, 同时将 NO 氧化为 NO_2 , 提高 SCR 在低温下去除 NO_x 的效率^[9]。因此 DOC 的耐久性是非常重要的, 不仅直接影响 HC、CO 的排放控制, 而且还影响 SCR 的性能和 DPF 的再生。在柴油机后处理系统中, DOC 通常布置在排气歧管出口处,

便于在冷启动工况下快速起燃,因此DOC须要承受更高的温度和颗粒物的影响。研究表明:DOC主要的失活机理为热老化和灰分沉积^[9-10]。SCR通常布置在DPF下游,在DPF再生时,SCR将承受较大的热负荷,因此SCR主要的失活机理为热老化^[11-12]。DPF主要用于去除尾气中的颗粒与碳烟。当碳烟积累到一定程度时,影响排气背压,须要再生,去除沉积的碳烟。DPF的老化主要是灰分积聚和物理破碎。物理破碎包括因热应力导致的破碎和由振动、不正确封装导致的破碎。灰分积聚主要为由灰分、未燃碳烟导致的堵塞^[13]。过多的灰分积聚将导致柴油机排气背压快速升高,影响发动机运行,极端情况下会导致发动机停止运行。因此DPF耐久性失活最主要的是灰分积聚,其次为热老化^[13-14]。

汽油机可以通过提高发动机排气温度来对TWC和GPF进行快速老化。而柴油机排温难以达到600℃以上,因此必须采取其他方法来产生高温环境,用于后处理装置的加速老化。

2.1 小样台架快速老化

实验室小样台架快速老化是将容积为几毫升的催化剂配方样品,通过标准气体合成模拟汽车排气,再对催化剂小样进行老化^[24]。在实验中通常设计催化剂水热老化温度—持续时间矩阵进行老化试验,如表1所示。通过老化温度—持续时间矩阵试验可以获得该催化剂样品的失活边界条件及“不超过”运行温度,如图5所示。Schmieg S J^[11]等通过温度—时间矩阵进行了催化剂小样台架快速老化试验,将测试结果与整车道路老化后的SCR催化器不同位置小样进行对比,发现:小样测试中850℃老化16h后的小样和整车道路老化后催化器局部位置的催化剂的NO_x转化率、NO氧化率、NH₃氧化率和NH₃存储率有最佳的匹配效果。但小样台架老化不能对全尺寸的催化器进行老化,只能与全尺寸催化器的部分催化剂老化效果等效。

表1 小样测试老化温度—持续时间矩阵^[11]

老化温度/℃	老化时间/h											
	1	2	3	4	8	12	16	36	48	72	120	240
500	√						√			√		√
700	√						√			√		√
800	√	√					√	√	√	√	√	√
850	√	√		√	√	√	√	√				
875				√	√		√					
900	√	√	√	√								
950	√	√										

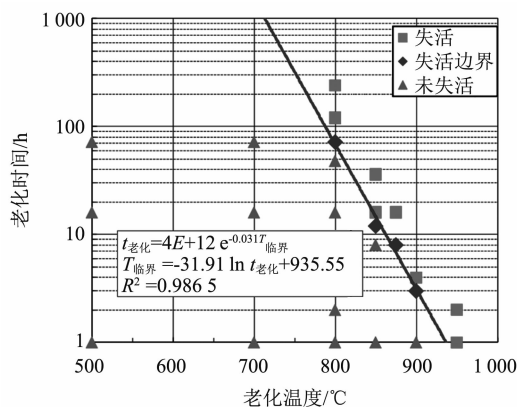


图5 催化剂样品的失活边界条件^[11]

2.2 马弗炉快速老化

目前,马弗炉快速老化是工业界中最常用的方法之一。马弗炉可以为催化器提供适宜的老化温度。将催化剂放入马弗炉中,将炉子腔体中的气体加热到所需高温,即可进行快速老化。马弗炉快速老化具有操作简单、成本低廉、可进行全尺寸催化器快速老化的优点。

虽然马弗炉可提供快速老化所需的温度,但不能模拟流经催化剂的真实柴油机尾气,如果通入相应组分,成本高昂。另外,马弗炉老化过程无法对催化剂性能参数进行监测,极易造成过度老化。

2.3 DOC前喷油快速老化

针对柴油机排气温度达不到600℃以上,开发了在后处理装置上游安装DOC,并在DOC上游喷射柴油来提高排气温度的技术,如图6所示。该技术可以在现有的发动机台架进行改造,节约成本;同时,柴油机台架老化采用真实尾气,且可通过传感器实时监测老化过程及催化剂性能变化等。Toops T J^[15]等基于单缸柴油机,采用在DOC前喷油技术,对DOC、DPF及Fe基分子筛SCR催化器整套后处理装置进行快速老化,保持SCR入口温度分别为650、750和850℃。试验结果发现:750℃入口温度下的快速老化结果和整车道路老化结果具有极强的相似性,也即可以在50h内完成2年的道路测试催化器的工作量。

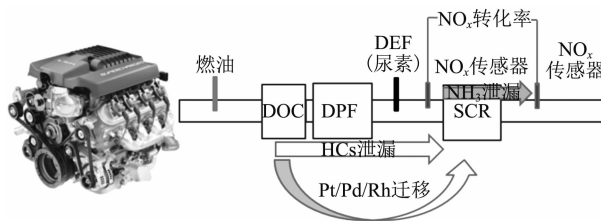


图6 DOC前喷油快速老化

2.4 DPF 灰分加载快速老化

近年来,有研究人员致力于确定润滑油添加剂对柴油后处理装置灰分积聚和性能下降的影响,但是对于许多试验现象,其内在机理还未完全理解。例如,对 DPF 通道中影响灰分沉积、迁移和积累的机理依然不解^[16],在试验中主要采用燃油掺杂的方式对 DPF 进行快速加载^[16-18]。

MIT 的 Sappok A G^[17]等利用一系列热反应器和燃烧室来模拟三种主要的机油消耗机制,即缸内燃烧、蒸发和挥发性损失以及通过阀门和涡轮增压器密封的损失。所用的装置和图 4 测试 GPF 耐久性的燃烧器台架相似;DPF 入口温度控制在 200 ~ 800 °C,在 10 h 内将两个 0.3 L 的 DPF 快速加载至 40 (g · L⁻¹),实现相当于 482 000 km (30 万英里)的整车道路等效老化。试验结果表明:润滑油的引入和燃烧方式对颗粒和灰分的形成有直接影响。通过燃油掺杂引入机油燃烧,PM 排放比正常的增加两倍。碳烟快速加载老化装置示意图如图 7 所示。

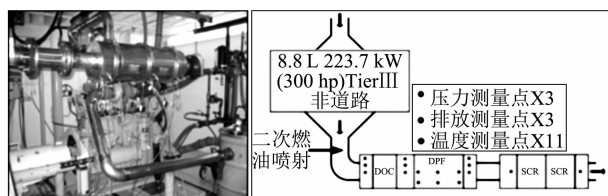


图 7 DPF 碳烟加载快速老化装置^[18]

2.5 燃烧器快速老化

采用柴油机台架对催化器进行老化,在老化过程中大功率柴油机将消耗大量燃油,成为老化试验的主要开支。而燃烧器系统提供了一种可选择的、能在更低油耗下产生更高排温的方法。Webb C C^[19]等验证了燃烧器系统与柴油机台架老化的等效性。该燃烧器系统由风机、供油系统、涡流混合段、燃烧室、高流量稀释系统等组成,如图 8 所示。该燃烧器可实现 750 °C、2 400 (kg · h⁻¹) 的温度—流量范围;还可以模拟柴油机尾气组分;通过在燃烧器内喷射去离子水,可实现对 SCR 入口水浓度的控制;通过在燃烧室内喷射硝基甲烷,可实现对 SCR 入口 NO_x 浓度的控制。试验中采用 650 °C、1 400 (kg · h⁻¹) 对柴油机后处理系统进行 100 h 老化,并与发动机台架老化进行对比。试验结果表明:燃烧器能产生与全尺寸高速公路柴油机等效的流量、温度的排气;由于含氮燃料的燃烧和去离子水的喷射,NO_x 和 H₂O 浓度可以独立控制,以匹配相应的柴油机;燃烧器老化系统比发动

机老化系统可使用更低的燃油消耗实现对后处理系统的老化。

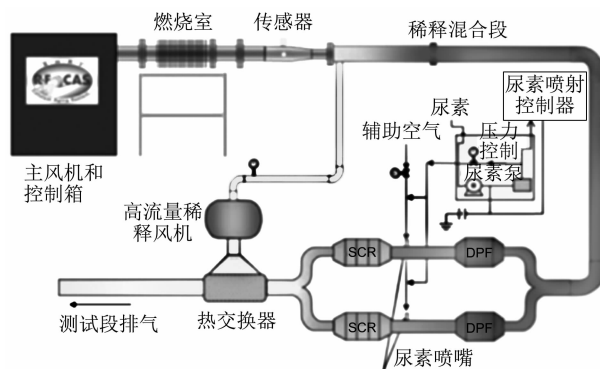


图 8 FOCASHGTR 燃烧器系统示意图^[19]

Sonntag F^[22]等对增加机油中硫含量;使用燃烧器产生灰分;将机油喷入进气歧管进入气缸燃烧;燃油掺杂 4 种快速加载方法进行了试验对比。结果表明:增加机油中硫含量快速加载方法和用以参考的正常加载的灰分生成结果非常相似;进一步增加机油中的硫含量至三倍,依然不能有效地线性地增加生成所需的灰分。而在进气歧管喷入机油进入气缸燃烧,发动机的正常机油油耗将快速增加,与参考的正常加载下生成的灰分有明显的差异。燃油掺杂快速加载的方式是一种简单,能在短时间内快速加载大量灰分的方式,但是灰分的形态和正常加载的灰分形态没有可比性。使用燃烧器(图 9)加载能在较小成本下完成灰分加载,且拥有较好的试验结果;同时燃烧器系统为参数化控制,具有较强的灵活性。

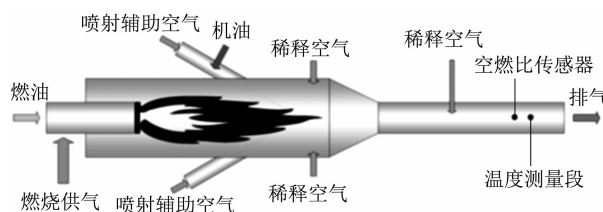


图 9 柴油机燃烧器系统^[22]

3 总 结

(1) 汽油机通过提高 TWC 催化器入口温度,能达到快速老化效果。可通过发动机台架和燃烧器台架进行高温快速老化,高温老化效果和整车道路老化结果一致性好。汽油机 GPF 的失活机理尚未完全明晰。GPF 耐久性测试主要采用整车道路循环,及采用燃烧器方式提高 DPF 入口温度和加速灰分积聚对 GPF 进行快速加载。

(2) 小样台架快速老化通过温度—持续时间矩

阵可以获得催化剂样品的失活边界条件, 及催化剂样品的“不超过”运行温度, 但是不能对全尺寸催化器进行老化, 仅与全尺寸催化器局部位置催化剂老化效果等效。马弗炉可提供快速老化所需的温度, 但马弗炉不能模拟流经催化器的真实柴油机尾气, 如果通入相应组分, 成本高昂; 另外, 马弗炉老化过程无法对催化剂性能参数进行监测, 极易造成过度老化。而 DOC 前喷油方式可通过传感器实时监测老化过程催化剂的性能变化。DPF 灰分加载快速老化与 DOC 前喷油快速老化相比, 增加了采用燃油掺杂方式加强灰分效果, 但对测试用发动机损害较大。

(3) 柴油机燃烧器系统能独立控制排气流量和温度、 H_2O 浓度、 NO_x 浓度; 可选择添加喷射机油产生碳烟灰分对 DPF 进行快速老化; 能在较短的时间内、以较低的成本实现对柴油机后处理装置的快速老化。

参考文献

- [1] 环境保护部 国家质量监督检验检疫总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段): GB 18352.6-2016 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [2] 环境保护部 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段) (征求意见稿) [R]. 2016.
- [3] 王建昕, 宁海洋, 李俊, 等. 评价汽车催化剂寿命的多段模式快速老化方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2000, 40 (5): 107-110.
- [4] INGALLS J R, BARTLEY G J, WEBB C C. Method and apparatus for testing catalytic converter durability: US, US7625201 [P]. 2009.
- [5] RUETTEN O, PISCHINGER S, KÜPPER C, et al. Catalyst aging method for future emissions standard requirements [C]. SAE 2010-01-1272.
- [6] MIKULIC H I, KOELMAN S, MAJKOWSKI P, et al. A study about particle filter application on a state-of-the-art homogeneous turbocharged 2L DI gasoline engine [J]. Chemistry Letters, 2010, 36 (6): 766-767.
- [7] LAMBERT C K, BUMBAROSKA M, DOBSON D, et al. Analysis of high mileage gasoline exhaust particle filters [C]. SAE, 2016, 9 (2).
- [8] JORGENSEN J, MURRAY T, SAPPOK A, et al. The effect of ash accumulation on gasoline particulate filters: a comparison between laboratory and field aged samples [J]. Food & Nutrition Bulletin, 2014, 21 (1): 65-72 (8).
- [9] JOHNSON T V. Vehicular emissions in review [C]. SAE 2014-01-1491.
- [10] WIEBENGA M H, CHANG H K, SCHMIEG S J, et al. Deactivation mechanisms of Pt/Pd-based diesel oxidation catalysts [J]. Catalysis Today, 2012, 184 (1): 197-204.
- [11] SCHMIEG S J, OH S H, KIM C H, et al. Thermal durability of Cu-CHA NH_3 -SCR catalysts for diesel NO_x reduction [J]. Catalysis Today, 2012.
- [12] PEREIRA M V L, NICOLLE A, BERTHOUT D. Hydrothermal aging effects on Cu-zeolite NH_3 -SCR catalyst [J]. Catalysis Today, 2015, 258: 424-431.
- [13] GUAN B, ZHAN R, LIN H, 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.
- [14] CHARBONNEAU P. A study of soot cake formation in a diesel particulate filter [J]. International Journal of Childrens Spirituality, 2009, 19 (1): 4-16.
- [15] TOOPS T J, KE N, FOSTER A L, et al. Deactivation of accelerated engine-aged and field-aged Fe-zeolite SCR catalysts [J]. Catalysis Today, 2010, 151 (3-4): 257-265.
- [16] SAPPOK A, SANTIAGO M, VIANNA T, et al. Characteristics and effects of ash accumulation on diesel particulate filter performance: rapidly aged and field aged results [C]. SAE 2009-01-1086.
- [17] SAPPOK A G, BEAUBOEUF D, WONG V W. A novel accelerated aging system to study lubricant additive effects on diesel aftertreatment system degradation [C]. SAE 2008-01-1549.
- [18] WILLIAMS A, MCCORMICK R, LUECKE J, et al. Impact of biodiesel impurities on the performance and durability of doc, DPF and SCR technologies: preprint [C]. SAE 2011-01-1136.
- [19] WEBB C C, MILLER J, SHARP. Diesel catalyst aging using a FOCASA[®] HGTR, a diesel burner system, to simulate engine-based aging [C]. SAE 2013-01-1070.
- [20] WEBB C C, MATHIS J A. Diesel fuel burner for diesel emissions control system: US, US 7032376 B1 [P]. 2006.
- [21] NAGAR P, SZAILER T, WEBB C. Comparison of SCR catalyst performance on RMC SET emission cycle between an engine and a high flow burner rig [C]. SAE 2013-01-1070.
- [22] SONNTAG F, EILTS P. Evaluation of accelerated ash loading procedures for diesel particulate filters [C]. SAE 2016-01-0939.
- [23] SKOWRON J F, WILLIAMSON W B, SUMMERS J C. Effect of aging and evaluation conditions on three-way catalyst performance [C]. SAE 892093.
- [24] 刘洋, 王家明, 孙亮, 等. 柴油机尿素 SCR 系统的钒基催化剂老化性能研究 [J]. 内燃机工程, 2014, 35 (6): 35-41.