

Experimental analysis and research on the effect of long-term vibration on the performance of vehicle carbon canisters

Xiaohong Yu ^{1,2}, Yiyao Liu ¹, Tao Chen ^{1*}, and Hua Zhao ¹

¹Tianjin University State Key Laboratory of Internal Combustion Engine, Tianjin 300350, China

²Ingevity Performance MATERIALS Co., Ltd., Zhuhai 519050, China

Abstract: The long-term vibration of the carbon canister during vehicle operation can lead to changes in its performance, thereby affecting its performance on evaporation emissions. A vibration test bench simulating vehicle vibration characteristics is used to simulate the working state of the carbon canister under actual driving conditions, analyze the amount of carbon powder precipitation and flow resistance changes in the canister after long-term operation, and compare the adsorption and desorption performance of the canister before and after aging and their effect on the evaporative emissions. The results showed that the carbon canister will produce carbon powder precipitation after being continuously subjected to the forward and backward vibration of the vehicle. This leads to a decrease in the ultimate adsorption and desorption capacity of the aged carbon canister for fuel vapor, with a more significant decrease in adsorption capacity. However, in the 2-day Diurnal Breathing Loss (DBL) test, due to the increase in flow resistance of the aged carbon canister, it is more difficult for the adsorbed fuel vapor to diffuse outward. For the unsaturated carbon canister, fuel leakage and evaporative emissions can be reduced. In evaporative emission management, it is necessary to adjust the control strategy reasonably based on the working status of the carbon canister.

Keywords: Evaporative emission, Carbon canister, Vibration aging.

* Corresponding author: carden.yu@hotmail.com

长期振动对车载炭罐性能影响的试验分析研究

余小红^{1,2}, 刘义遥¹, 冯译方¹, 陈韬^{1*}, 赵华¹

¹天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300350

²英杰维特功能材料有限公司, 珠海 519050

摘要: 车载炭罐在车辆运行中受到长期振动的作用会导致其性能变化, 从而影响其对燃油蒸发排放的控制作用。为此, 采用能够模拟车辆振动特性的振动试验平台模拟实际行驶条件下炭罐的工作状态, 分析长期运行后炭罐内炭粉析出量和流阻变化, 对比炭罐老化前后的吸脱附性能及其对车辆蒸发排放的影响。结果表明, 炭罐在受到车辆前后向振动的持续作用后会产生炭粉析出。导致老化炭罐对燃油蒸气的极限吸附量及脱附量降低, 且吸附量降低更为明显。但在 48 小时昼间呼吸损失 (Diurnal Breathing Loss, DBL) 测试中, 老化后炭罐由于流阻增大, 吸附的燃油蒸气向外扩散更加困难, 在炭罐未饱和的条件下可减少燃油逸失, 实际蒸发排放降低。在蒸发排放管理中, 需要根据炭罐的工作状态变化合理调整其控制策略。

关键词: 蒸发排放、炭罐性能、振动老化

1 前言

车辆蒸发排放是指车辆在使用过程中由于燃油系统呼吸效应或密封不严、燃油渗透或加油时油气逃逸等现象, 导致燃油中的挥发性有机物 (VOCs) 逃逸至大气中所形成的污染物排放^[1]。

在当前机动车保有量下, 机动车燃油蒸发排放约占地球总挥发有机物排放的 25%^[2,3,4]。其中, 大部分挥发性有机物自身便具有毒性, 而且部分有机物会在光照作用下和空气或车辆尾气中的氮氧化物进一步反应生成细颗粒物 (PM_{2.5}) 以及臭氧 (O₃) 等有害物质^[5,6,7], 从而产生二次污染。在我国深圳、珠海等地区, 这些二次污染物已经成为主要的大气污染物类型^[8,9]。因此, 环境保护法规也提升了对车辆蒸发排放的重视, 无论是限值还是测试过程, 都做了极为严格的限制。

在最新的欧七排放法规中, 蒸发排放限值从欧六排放法规的每测试循环 2 g 降低至 0.5 g, 同时还增加了对于加油时蒸发排放 0.05 g/L 的限值^[10,11]。作为对蒸发排放限制最为严格的美国三阶段低排放汽车法规 (LEV III), 对蒸发排放限值为每测试循环 0.3 g, 加油排放限值为 0.05 g/L, 同时对运行损失的测试环境以及测试条件做出了要求^[12]。而在我国颁布的轻型车国六排放法规中, 将蒸发排放限值限制在每测试循环 0.7 g, 加油排放的限制为 0.05 g/L, 与欧七排放法规相近^[13]。同时, 轻型车国六法规中也加入了 OBD 监控要求, 通过压力检测实现对蒸发排放控制系统泄漏的监控。预计在拟定中的我国第七阶段排放法规将会针对蒸发排放推出更为严格的测试方式、排放限值和监控要求。

在当前蒸发排放控制系统中, 车载炭罐吸附从油箱中蒸发的燃油蒸气; 当炭罐吸附接近饱和时, ECU 控制炭罐清洗阀打开, 利用发动机进气歧管与外部环境之间的负压将燃油蒸气从炭罐中脱附至发动机进气管, 进而进入气缸内参与燃烧, 从而避

免燃油蒸气逃逸到大气中。但是，蒸发排放控制系统中传感信息非常有限，炭罐的吸附和脱附过程的流量变化无法直接监控，而且吸脱附的性能还会受到长期工作的影响而产生变化。为获取炭罐吸附/脱附过程的关键信息，国内外研究者开展了深入的探索。东京电机大学的 Hiroo Hata 对炭罐进行了吸附-脱附实验，建立了车辆蒸发排放的估计模型^[14]，对日本月均移动源蒸发排放量做了估计。那不勒斯费德里科二世大学的 Romagnuolo Luca 利用正丁烷对炭罐进行了吸附实验，建立了炭罐正丁烷吸附和热变化的一维模型^[15]，该模型能够反映环境温度对炭罐性能的影响，并可用于优化吹扫策略以降低车辆蒸发排放。东风日产技术中心的林志昌等人^[16]研究了脱附流量对炭罐蒸发排放性能的影响，结果显示随着脱附流量的减少炭罐的蒸发排放性能急剧恶化。泛亚汽车研究中心的齐斌等人^[17]研究了高原环境对炭罐脱附性能的影响，发现高海拔环境下炭罐脱附流量较平原降低，可采取放宽扫气率限值，提高目标冲洗量的方法保证高原环境下蒸发排放限值对炭罐的要求。江淮汽车的陈强等人通过 200 次吸附脱附循环模拟炭罐老化过程，研究了炭罐模拟老化后工作能力的变化^[18]，结果表明，新炭罐的首次吸附工作能力极强，此后其工作能力将保持在一个略低水平。从上述结果可以看出，在炭罐工作过程不能被直接观测的情况下，影响其工作过程的因素却有很多，因此，为有效控制车辆的蒸发排放，需要对影响炭罐工作性能的影响因素进行逐个深入的分析。

在车辆实际行驶过程中，车身的持续振动会造成的炭粉颗粒碰撞或摩擦，从而破坏炭粉颗粒的内部和外部结构，从而影响其吸附和脱附性能。目前由振动造成的炭罐性能变化尚未有公开研究的报导，但其必然对炭罐吹扫策略的合理性产生影响，进而影响车辆实际使用中的蒸发排放控制。

本文为探索长期振动对炭罐的工作性能影响，开展模拟 160000 公里车辆振动的试验，对比分析不同表征组分的炭罐老化前后的吸脱附特性，为道路运行车辆的蒸发排放控制提供支撑。

2 试验平台与测试方法

2.1 车辆长期振动模拟试验介绍

实际行驶条件下炭罐老化性能测试的核心在于模拟实际车辆行驶过程中的振动和蒸气流动特性，以测试炭罐的老化过程。在试验中，采用振动试验台分别模拟 XYZ 三个方向的振动。振动实验台振动频率为 5-60 Hz，扫频速度 1 Hz/s，振幅为±0.5 mm。由于试验时间的限制，通过提高振动频率以在短时间内模拟长时间的行驶过程，并通过车辆实际振动频率的计算确定振动试验的时长。

在整个炭罐振动过程中，采用 25 L/min 的流量对已经在静态条件下吸附饱和的炭罐进行脱附。在脱附气流经过炭罐后分别布置有 250 μm 和 10 μm 两种滤网承接从炭罐中脱附出的炭粉，并在每次实验前后对滤网进行称重计算实验过程中脱附出的活性炭粉质量。试验平台的结构如图 1 所示。其中，实验系统由振动实验台、实验炭罐、流量计、真空泵、10 μm 和 250 μm 滤网组成。振动实验台选用苏州苏试 DC-200 电动振动试验台进行振动；A、B、C 三个实验炭罐中炭粉主成分一致，但其中的结构成型添加剂表征比例分别为 5 份，10 份，15 份；流量计型号为 ME4003，量程为 0-50 L/min，连接 12 V 稳压电源；真空泵型号为 JBL-1500W 一级真空泵，包括过滤器，调压装置，启动开关，真空度-97 kPa，最大流量 300 L/min。振动试验的参数选择来自于实车测试。

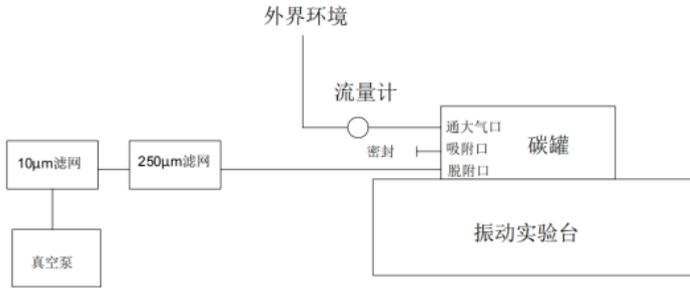


图 1 试验平台结构示意图

由于国六阶段排放法规要求炭罐工作需满足 160000 km 的行驶需求，为了缩减模拟测试的时间，需要测算模拟振动频率与测试时间。为此，针对实际车辆道路运行中的振动特性进行了测试。采用加速度传感器测试了炭罐安装位置在实际行驶中的振动情况。加速度传感器的采样频率为 10 Hz。实验载体为某国产品牌轿车。试验路线全长 3.5 km，除起始点外无明显坡度，行驶里程往返全程 7 km，进行了多次测试，时间保持在 4 分 30 秒至 5 分钟以保证平均车速为 45 km/h 左右。

实际道路测试得到的车辆三个方向的加速度如图 2 所示。其中，X、Y、Z 方向分别是车辆的主行驶方向，侧方向和垂直方向。结果表明，车辆行驶过程中，三个方向的加速度变化频率相近，X 方向主要受到车辆行驶过程中加减速的影响，Z 方向为车辆受路面振动条件影响或车辆减震系统自身产生的振动，而 Y 方向为车辆自身横向的振动，三个方向振动频率均在 2 Hz 附近波动，变化不明显，平均加速度为 0.5 m/s^2 。

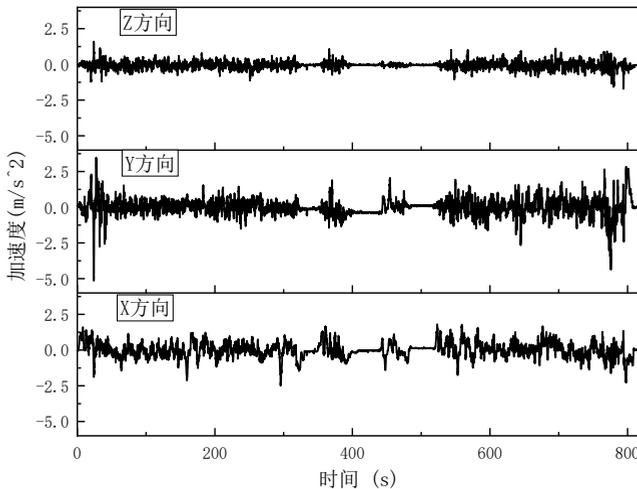


图 2 车辆在测试路线上的加速度变化（XYZ 方向）

由上述结果可以看出炭罐在实际运行中的振动频率和幅度均较低。为了缩短振动模拟试验所需时间，采用等效的方法用振动试验台的高频振动代替实际行驶过程中的同幅低频振动来加速老化过程。试验中尽可能保持振幅不变，采用频率 5-60 Hz 扫频的方式进行振动。振动频率为 5 Hz 时，振动台的振动幅值与实际平均值一致。振动频率为 60 Hz 时，其在相同振动时间内振动次数相当于实际的 30 倍。假设车辆行

驶速度为 80 km/h, 在 XYZ 方向振动合计 60 小时约等于车辆行驶 144000 km, 与 160000 km 的法规限值相接近, 可认为满足测试需求。考虑到 60Hz 时, 振动台的幅值较小, 因此, 本研究采用 5-60 Hz 扫频振动的方式开展, 频率更换间隔为 1 分钟, XYZ 方向振动依次持续各 20 小时, 以模拟车辆实际行驶过程中的振动情况。同时, 每 20 小时固定振动方向也可以为老化导致的炭粉析出提供分析依据。

1.2 炭罐性能测试方法介绍

采取相同的测试流程以对比模拟老化试验对炭罐性能的影响。主要按照国六法规的汽车蒸发排放物测定规程对炭罐的吸附、脱附以及蒸发排放性能进行测试, 同时对不同流速下炭罐吸附脱附流阻进行了测试。

1.2.1 炭罐吸附脱附性能以及蒸发排放测试方法

本次测试按照国六法规中蒸发污染物排放测定规程中的测试流程进行, 由于测试对象为炭罐而非整车, 因此对测试方法进行了一定的简化。该测试按如下顺序进行:

(1) 炭罐预处理: 将炭罐连接至炭罐工作能力测试台 (Webber EMI 210-55) 利用 23 °C, 50%浓度汽油蒸气/空气混合气以 2 L/min 流速将炭罐加载至临界点 (炭罐通大气口检测到 5000 ppm 浓度燃油蒸气), 之后以 23 °C, 22.7 L/min 干燥空气从炭罐通大气口流入脱附口流出对炭罐进行脱附, 脱附总体积为 300 倍炭罐有效容积。重复以上吸附脱附循环直至连续 3 个循环内炭罐吸附量与脱附量之差小于 1 g, 以达到炭罐性能稳定的状态, 记录每个炭罐达到稳定状态所用循环次数。

(2) 丁烷加载至临界点: 将炭罐连接至炭罐工作能力测试台 (Webber EMI 210-55) 利用 23 °C, 50%容积丁烷和 50%容积氮气的混合比例以 40 g/h 的流量将炭罐加载至临界点 (监测到炭罐产生 2 g 蒸发逃逸排放), 记录此过程中炭罐质量增量。

(3) 高温浸车: 将炭罐吸附口连接 150L 容积油箱、脱附口密封、通大气口开放, 油箱内加注 60 L 汽油。将炭罐及油箱放入密闭舱 (CSZ ZPS-64-2-H/AC), 密闭舱温度设置为 38 °C, 浸车总时长 22 小时, 测量此过程中炭罐质量增量。

(4) 炭罐热脱附: 将吸附至临界点的炭罐连接至自研的炭罐智能脱附实验测试台, 以 38 °C, 25 L/min 干燥空气从炭罐通大气口流入脱附口流出对炭罐进行脱附, 脱附总体积为 150 倍炭罐有效容积, 本次测试炭罐有效容积为 1.8 L, 脱附总容积为 270 L。测量此过程中炭罐质量减少量即为炭罐脱附量。

(5) 48 小时 DBL 测试: 将炭罐吸附口连接到 150 L 容积油箱、脱附口密封、通大气口连接 Tedlar 材质气袋, 油箱内加注 60 L 汽油。将炭罐及油箱放入密闭舱 (CSZ ZPS-64-2-H/AC), 密闭舱温度按照 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)》中表 FB.1 密闭式标定和昼夜换气排放试验用密闭室昼夜环境温度变化表的规定执行。测试时长 48 小时, 测试第 6 小时更换气袋, 第 12 小时取下气袋, 测量两个气袋质量增量之和为第一天 DBL 测试蒸发排放量; 第 25 小时重新连接气袋, 测试第 30 小时更换气袋, 第 36 小时取下气袋, 测量两个气袋质量增量之和为第二天 DBL 测试蒸发排放量。

1.2.2 炭罐吸附脱附流阻测试方法

将完全脱附的炭罐连接到 DBL-压降测试台 (Webber EMI) 上, 吸附口连接测试台、脱附口密封、通大气口开放, 以 10-90 L/min 的气体流速, 以 10 L/min 为间隔的空气通入炭罐, 测量炭罐吸附口与通大气口之间的压降即为炭罐吸附流阻; 将通大气口连接

测试台、吸附口密封、脱附口开放，以相同实验流程进行测试，测量炭罐通大气口与脱附口之间的压降即为炭罐脱附流阻。

3 测试结果与分析

2.1 炭罐振动试验过程中的性能变化

为了分析模拟实际行驶条件下对炭罐性能的影响，本研究测量了振动过程中炭粉析出特性和振动后的炭罐流阻变化情况。由于振动试验时间较长，且炭罐在初始状态下不易发生老化和炭粉析出现象。因此，试验采用累计的方式分别测量了振动 20、40、60 小时之后的总炭粉析出量。三个炭罐在 20、40、60 小时后的炭粉析出量如图 3 所示。结果表明，炭罐 B 在第一天 20 小时振动后出现了明显的炭粉析出，达到了 71 mg，而后续 40 小时的振动试验中该炭罐的炭粉析出量也明显大于其他两个炭罐。而三个炭罐在前 20 小时的炭粉析出量均大于后 40 小时。在前 20 小时的实验中，炭罐振动方向与车辆前进方向一致。结果表明，车辆的加减速性能会对炭罐结构性能的稳定性影响较大。

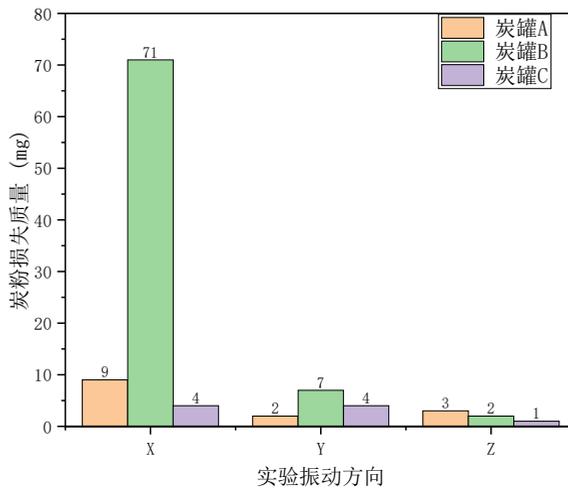
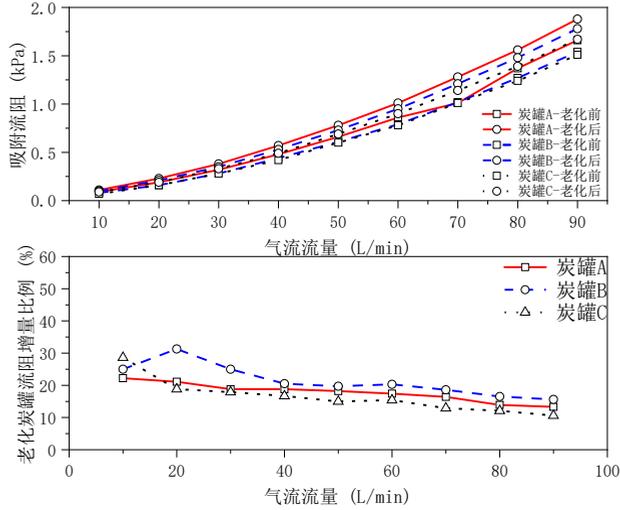
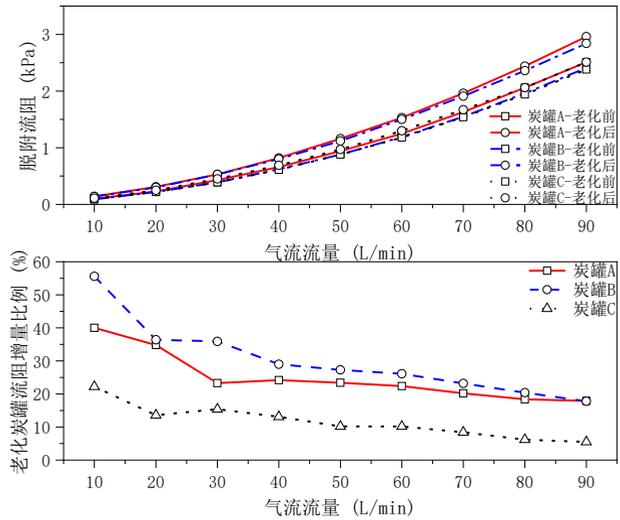


图 3 炭罐三个方向振动后的炭粉析出量

振动试验后，炭罐的流阻与振动前相比发生了明显变化，特别是炭粉析出量多的炭罐 B，其流阻出现了明显上升。三个炭罐的吸附脱附流阻变化如图 4 所示。在相同炭罐初始炭粉量的情况下，炭罐的流阻上升量与炭粉析出量呈现明显的正相关性。同时，三个炭罐流阻在振动前后的增量均呈现出随流速增大而降低的现象。上述现象的原因可能在于随着车辆行驶过程中的振动以及脱附过程的影响，其原本结构发生改变，炭罐内活性炭颗粒内外部结构发生破碎，脱离原本位置，堵塞气流通过通道，导致炭罐的流阻增大。而随着气流流速的增大，堵塞的情况有所缓解，因而在高流速情况下，炭罐流阻的增量比例会出现下降的趋势。因此，在炭罐实际脱附过程中，要考虑发动机瞬时脱附速率会受到不同炭罐老化状态下流阻变化的影响。而从炭罐脱附出的炭粉也可能对发动机的燃烧和颗粒物排放性能造成影响，这方面的影响有待于后续更深入的研究。



(a) 吸附流阻

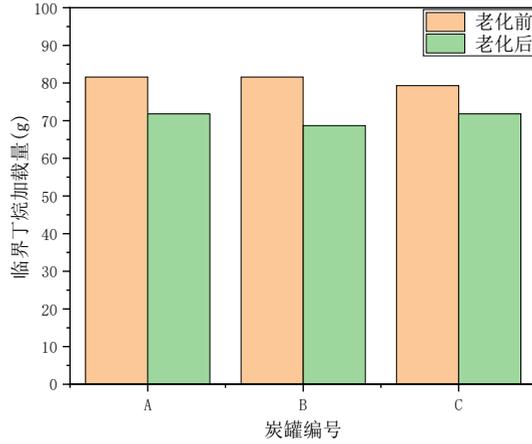


(b) 脱附流阻

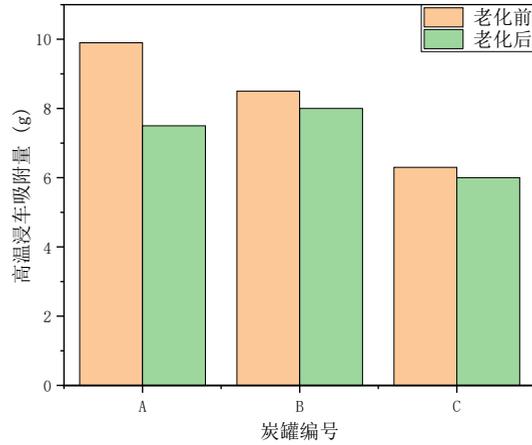
图 4 炭罐振动前后流阻变化特性

2.2 炭罐振动试验前后吸脱附特性变化

为了进一步分析炭粉析出和流阻特性变化对炭罐吸脱附性能的影响，测试了炭罐振动脱附后的二次静态吸附特性和吸附后的静态再脱附特性。试验结果分别如 5 和图 6 所示。结果表明，由于炭罐炭粉重量的减少，炭罐的临界吸附量以及炭罐被击穿后的吸附能力均出现了明显降低。同时，炭罐流阻的升高和炭粉质量变化带来的最大吸附能力的降低。特别是炭粉质量的降低，导致炭罐性能达到稳定状态时所需要的循环数也有所下降。三个炭罐预处理过程中的炭罐性能达到稳定状态前吸附脱附循环数由振动前的 28、33、31 次循环降低至 22、20、21 次循环。而炭罐振动模拟老化吸附后的脱附流程结果表明，由于炭罐流阻升高，脱附难度增大，导致脱附量相应降低。



(a) 临界丁烷加载量



(b) 高温浸车炭罐增重

图 5 炭罐振动前后的静态吸附特性

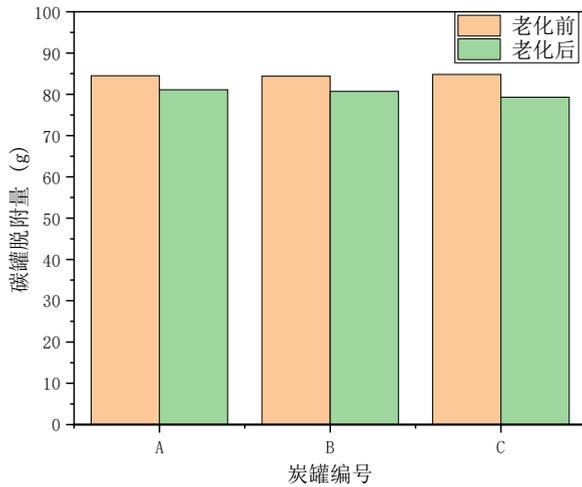
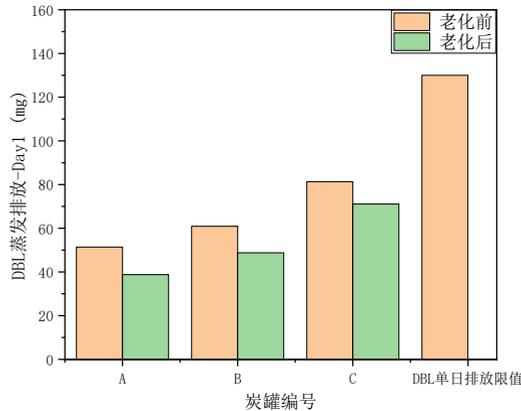


图 6 炭罐振动前后的脱附特性

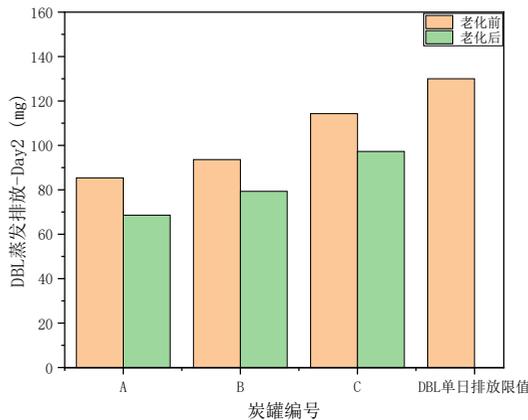
综合对比振动前后炭罐的吸附和脱附性能，可以看出老化后炭罐的吸附脱附性能均出现了较为明显的劣化情况，说明在老化炭罐对于燃油蒸气总吸附能力下降。若不能及时对炭罐进行脱附吹扫，炭罐被击穿会提早发生，而导致蒸发排放的大幅度增加。因此，对于老化炭罐的实时加载量预测监控以及脱附吹扫控制策略模型提出了更高的要求。

2.3 炭罐振动试验前后车辆蒸发排放变化

图 7 展示了车辆燃油系统在 48 小时昼间呼吸损失(Diurnal breathing loss ,DBL)试验中第一天和第二天的蒸发排放量，均低于行业内对于炭罐 DBL 测试单日蒸发排放的限值。与前面的临界丁烷加载量测量结果相比，模拟老化后的炭罐在 DBL 试验中明显排放量低于装有模拟老化前炭罐的燃油系统。而随着试验时间延长，炭罐的蒸发排放逐渐升高。由于老化后炭罐吸脱附流阻较大，因此在外界环境条件相同的情况下，燃油蒸气更难从老化炭罐中逃逸。此时，蒸发排放的主要来源是炭罐内吸附的燃油蒸气向外界环境扩散，与炭罐的吸附能力关联性较小。由于老化后炭罐内燃油蒸气向外界环境的扩散量小于老化前炭罐，可认为依照国六要求进行的 DBL 测试中老化后的炭罐测试结果优于老化前炭罐。然而，在真实场景中，车辆停放时长可能会大于 DBL 测试时长，这将导致老化炭罐被击穿的风险增加，使得蒸发排放大幅上升。



(a) 第一天排放



(b) 第二天排放

图 7 炭罐模拟老化前后燃油系统 DBL 试验蒸发排放量

4 全文总结

针对车辆燃油系统炭罐在车辆实际行驶条件下的性能，采用模拟振动试验的方式构建老化的吸附炭罐，并对炭罐模拟老化前后的性能参数及实际排放测试中的蒸发排放等性能进行了对比，主要结论如下：

1. 实际行驶过程中，当前车辆的炭罐受到车辆振动，特别是车辆前进后退方向的加速度和振动条件影响，出现较为明显的炭粉析出，炭罐内活性炭颗粒被破碎脱离原本位置堵塞气流通过流道，最终导致炭罐的吸附和脱附流阻升高；

2. 振动试验后的炭罐达到稳定状态所需循环数明显降低，且吸附量由于炭粉质量的降低而降低，同时由于炭粉析出导致的孔隙比例增加也导致了脱附量降低。这将导致炭罐的临界吸附量下降，对于炭罐实时加载量预测以及脱附控制策略提出了更高的要求

3. 在实际排放测试中，老化炭罐在 DBL 试验体现出了更好的蒸发排放性能。但是，由于 48 小时 DBL 实验中炭罐均未达到饱和，因此只体现出了炭罐内燃油蒸气扩散逃逸的部分，并未实际表现出炭罐吸附和脱附性能的变化。此时，老化炭罐由于流阻增加，燃油蒸气扩散更加困难，所以能够在 DBL 实验中体现出更优的蒸发排放性能。

参考文献

1. 张宝成, 杨良保. 光化学烟雾 [J]. 化学教育, 2004, 25(6): 4-7
2. 朱庆功, 刘俊女, 赵笑春等. 北京市轻型汽油车蒸发排放总量评估[J]. 中国环境科学, 2022, 42(03): 1066-1072. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0070.
3. 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南. 基于隧道测试的机动车 VOCs 排放特征及源解析 [J]. 环境科学, 2022, 43(04): 1777-1787. DOI: 10.13227/j.hjkk.202108192.
4. 2021 年中国移动源环境管理年报(摘录一)[J]. 环境保, 2021, 49(Z2): 82-88.
5. 邓拓宇, 陈鸿展, 张金谱. 广州市大气 VOCs 污染特征及 O₃ 生成潜势分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(01): 51-59. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2023.01.07.
6. 周毕安, 胡君, 奇奕轩 等. 北京怀柔夏季大气中的 VOCs 及其对 O₃ 和 SOA 的生成贡献[J]. 中国科学院大学学报, 2023, 40(01): 39-49.
7. 张永合, 吕敬文, 南文瑄. 大气环境挥发性有机物的污染特性分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(10): 59-62. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2023.10.015.
8. 赵燕, 李大伟, 翟宇虹, 方晓丹. 2014 年-2021 年珠海市环境空气质量变化趋势及污染特征研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(12): 144-149.
9. 代园园, 龚绍琦, 张存杰. 粤港澳大湾区空气污染物的时空分布及其影响因素[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 4001-4017.
10. UNECE. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements: UN R83.07[S]. Geneva: UNECE, 2017.
11. European Commission. Commission Regulation (EU) 2017/1151 of 1 June 2017 supplementing Regulation (EC) No. 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type -approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair

- and maintenance information, amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) No 1230/2012 and repealing Commission Regulation (EC) No 692/2008 (Text with EEA relevance): (EU) 2017/1151 [S].Brussels: European Parliament, The European Council,2017.
12. The United States Environmental Protection Agency Website; WWW3.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm.
 13. 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: 中国环境出版社, 2016
 14. Hata, H., Yamada, H., Kokuryo, K., Okada, et al K. Estimation model for evaporative emissions from gasoline vehicles based on thermodynamics[J]. *Sci. Total Environ.* 618, 1685–1691
 15. Romagnuolo Luca, Frosina Emma, Fortunato Francesco, et al. 1D model for n-butane adsorption and thermal variation for EVAP canister of gasoline-fueled vehicles: Validation with experimental results and DFSS optimization[J]. *Applied Thermal Engineering*, Volume 209,2022,118267,ISSN 1359-4311.
 16. 林志昌,邵亚宾,周宇翔. 脱附流量对炭罐蒸发排放性能的影响[C]//中国汽车工程学会 (China Society of Automotive Engineers) .2020 中国汽车工程学会年会论文集 (4) . 机械工业出版社 (China Machine Press) , 2020:933-936.DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.024042.
 17. 齐斌,朱小慧,陈鹏.高原环境下炭罐脱附流量的影响及优化研究[J].*小型内燃机与车辆技术*,2022,51(05):41-43+58.
 18. 陈强,邢天龙,穆海宁 等.国VI车用炭罐老化试验研究[J].*客车技术与研究*, 2018,40(05):38-40+47.DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2018.05.012.