

不同测试循环下的制动鼓磨损排放研究*

危红媛¹, 白凤月¹, 王 宠¹, 王 珊¹, 王凤滨¹, 张 琳¹, 吴春玲¹, 杜天强², 汪晓伟¹, 张新峰²,
马 尧², 常 鹏¹, 郭守峰¹, 贾春富¹, 刘俊霆¹

(1. 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300; 2. 中汽零部件技术(天津)有限公司, 天津 300300)

[摘要] 随着汽车排放标准的日益严格, 汽车非尾气颗粒物排放特别是制动磨损颗粒物排放日益凸显。为了探究不同测试循环下的制动磨损颗粒物排放特征, 本研究选取了一套鼓式制动器在基于制动惯量台改造的制动排放测试系统上开展了WLTP-Brake、WLTP、C-WTVC和CHTC-LT这四个不同测试循环下的PM_{2.5}、PN₁₀排放研究工作。研究结果显示, 制动鼓在不同测试循环下的平均制动初始/终了温度存在较大差异, 最高制动终了温度基本上均出现在循环中最大制动初速度对应的制动事件中; 试验制动鼓在WLTP-Brake循环下的PM_{2.5}排放因子为1.67 mg/km/wheel(欧七整车排放限值7 mg/km/vehicle), 因此制动鼓的颗粒物排放控制与制动盘一样需要引起重视; 此外, 各循环的制动初速度对制动颗粒物排放的影响明显大于平均制动减速度等制动特征参数。该研究对制动器企业进行低排放制动器的研发测试工作具有实际参考价值。

关键词: 制动鼓; 颗粒物排放; 测试循环

Experimental Study on Wear Emission Under Different Test Cycles of Brake Drum

Wei Hongyuan¹, Bai Fengyue¹, Wang Chong¹, Wang Shan¹, Wang Fengbin¹, Zhang Lin¹,
Wu Chunling¹, Du Tianqiang², Wang Xiaowei¹, Zhang Xinfeng², Ma Yao², Chang Peng¹,
Guo Shoufeng¹, Jia Chunfu¹ & Liu Junting¹

1. CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300;

2. CATARC Component Technology (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300

[Abstract] With the increasingly strict emission standards for automobiles, non-exhaust particulate matter emission, especially brake wear particulate matter emission, is becoming more prominent. In order to investigate the emission characteristics of brake wear particles under different test cycles, in this study a set of drum brakes is selected to conduct research on PM_{2.5} and PN₁₀ emission under different test cycles (WLTP-Brake, WLTP, C-WTVC and CHTC-LT cycle) on a brake emission testing system modified based on a brake inertia table. The research results show that there are significant differences in the average initial/final braking temperature of the brake drum under different test cycles, and the highest final braking temperature generally occurs in the braking event corresponding to the maximum initial braking speed in the cycle. The PM_{2.5} emission factor of the test brake drum under WLTP-Brake cycle is 1.67 mg/km/wheel (the Euro 7 vehicle emission limit of 7 mg/km/vehicle), so the particulate matter emission control of the brake drum, like the brake disc, needs our attention. In addition, the initial braking speed of each cycle has a significantly greater impact on brake particle emission than braking characteristic parameters such as average braking deceleration. This study has practical reference value for the development and testing of low emission brakes for brake enterprises.

Keywords: brake drum; particle emission; test cycle

* 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司内部自立课题(TJKY2425001)资助。

原稿收到日期为2024年06月28日, 修改稿收到日期为2024年08月21日。

通信作者: 危红媛, 高级工程师, 博士, E-mail: weihongyuan@catarc.ac.cn。

前言

汽车非尾气颗粒物主要来源于制动磨损、轮胎磨损、路面磨损和道路再悬浮尘(非直接来源)等^[1-4]。随着汽车排放法规的不断加严,汽车尾气颗粒物排在得到削减的同时也使得其非尾气颗粒物的排放问题日益凸显^[5]。欧盟委员会的研究表明,汽车尾气源和非尾气源对交通相关PM₁₀排放总量的贡献几乎相等,且随着尾气排放控制的日益严格,非尾气源对交通相关排放的相对贡献将越来越大^[6]。有研究表明,摩擦制动过程排放的颗粒物贡献了16%~55%的城市非尾气PM₁₀排放以及39%~63%的城市非尾气PM_{2.5}排放^[7]。因此,制动磨损颗粒物排放已成为国内外下一个阶段排放标准的监管方向。

当前国内外制动排放测试方法主要有销盘摩擦器法^[8-10]、制动测功机法^[11]、底盘测功机法^[7]、密闭室法^[12]和实际道路法^[13]等,在不同测试系统上测试得到的制动磨损颗粒物排放因子及其粒径分布特征存在一定差异。由于制动测功机法较符合实际道路运行条件,且试验边界条件可控、重复性及再现性好等,当前已发布的日本JASO C470:2020《乘用车制动磨损颗粒物排放测量方法》^[14]、欧七提案中的制动磨损颗粒物排放测试法规均采用此方法^[15]。

联合国全球统一汽车技术法规(UN GTR)的PMP工作组自2017年起就已经启动基于制动测功机的轻型车制动磨损颗粒物排放测试方法研究工作,目前已完成相应测试工况^[15]、测试系统和测试方法等的开发工作。2024年5月公布的欧七法规中已明确提出对M1、N1类车辆的制动磨损颗粒物排放的测试方法和限值等要求,并计划于2026年11月实施;此外,PMP工作组也计划于2025年6月完成重型车制动排放测试方法标准第一版草案,当前其正在开展基于制动测功机的排放测试方法研究工作。然而,我国的汽车制动磨损颗粒物测试方法研究尚处于预研阶段,目前并没有成熟的测试系统和测试方法。

制动磨损颗粒物排放主要受制动摩擦材料、制动初速度、制动减速度、制动温度及制动载荷等的影响^[5,7,16-20]。其中,与制动排放测试工况相关的影响因素主要是制动初速度、制动减速度等。由于不同测试循环的制动初速度、减速度等制动特征参数不同,因此同一制动器在不同测试循环下的制动磨损颗粒物排放也存在差异。为了探究不同测试循环的

制动排放特征,本研究选取了一套鼓式制动器在基于制动惯量台改造的制动排放测试系统上开展了试验研究工作,对比研究了试验制动鼓在CHTC-LT、C-WTVC、WLTP-Brake和WLTP循环下的制动排放。

1 试验装置和方法

1.1 制动排放测试系统

本研究参考欧七提案中的轻型车制动排放测试系统,基于重型制动惯量台(主要技术参数如表1所示),通过增加冷却空气调节系统(主要技术参数见表2)、制动器外壳、冷却空气通道、颗粒物排放测试系统(AVL M. O. V. E. PM-PEMS iX 494用于PM_{2.5}测试、AVL489用于PN₁₀测试)等,构建了制动排放测试系统,如图1所示。经测试,排放测试系统冷却空气管道内的平均测量流量与设定值的偏差小于3%,符合欧七提案规定的该偏差需要在±5%以内的要求,说明测试系统的气密性满足试验要求。

表1 重型制动惯量台主要技术参数

参数	数值
主轴最大转速/(r·min ⁻¹)	1 200
惯量范围/(kg·m ²)	20 ~ 2 500
液压制动压力/MPa	≥20.6
液压提升速率/(MPa·s ⁻¹)	≥70
气压制动压力/MPa	≥1.5
气压提升速率/(MPa·s ⁻¹)	≥2
力矩传感器量程/(N·m)	0 ~ 35 000

表2 环境模拟系统主要技术参数

参数	数值
温度调节范围/°C	15 ~ 25
温度控制精度/°C	±2
温度测量精度/°C	±1
湿度调节范围/%RH	40 ~ 60
湿度控制精度/%RH	±5
湿度测量精度/%RH	±2
冷却风速/(m·s ⁻¹)	8 ~ 15
风速控制精度/(m·s ⁻¹)	0.5
风量/(m ³ ·h ⁻¹)	100 ~ 1 000

1.2 试验制动鼓

试验制动鼓的摩擦片材料为NAO,搭载该制动鼓的车辆是满载质量为3.66 t的N2类车,试验制动鼓及搭载该制动鼓车辆的主要技术参数如表3所示。



图1 试验装置图

表3 试验制动鼓主要技术参数

参数	制动鼓
摩擦片材料	NAO
车辆类型	N2
车辆最高车速/(km·h ⁻¹)	95
车辆满载质量/kg	3 660
汽车轴距/m	2 765
车轮滚动半径/mm	398.5
制动有效半径/mm	150
轮缸缸径/mm	28.58
轴荷分配比/%	50

1.3 试验方法

采用K型热电偶测量试验制动鼓的制动温度, K型热电偶的安装以及制动鼓在制动惯量台上的安装等均按照UN GTR标准要求进行。制动鼓须经过充分磨合以稳定其颗粒物排放行为后再进行正式的排放试验, 以保证排放测试结果的重复性^[11]。在该研究中, 磨合阶段及不同测试循环的正式排放测试阶段的冷却空气温度和湿度均分别控制在(23±2)℃、(50±10)%的范围, 冷却空气流量则保持在(650±30)m³/h的范围内。本研究采用CHTC-LT循环对制动鼓进行磨合, 每个循环开始前须保证制动盘温度在(23±5)℃, 运行70个CHTC-LT循环后, 连续5个循环的PN₁₀排放因子的偏差小于5%^[11], 项目组认为制动鼓排放稳定。

在正式排放测试开始之前, 项目组检查了排放测试系统的背景颗粒物浓度: 在制动鼓不运转的情况下, 在(650±30)m³/h的冷却空气流量下持续监测冷却空气管道内的PN₁₀浓度, 当管道内的平均背景PN₁₀浓度低于UN GTR标准中规定的20 #/cm³时, 认为背景浓度稳定, 可以开展不同测试循环的正式排

放测试工作。本研究选取的制动鼓虽搭载于重型车上, 但其最大设计总质量接近于轻型车, 因此在测试循环的选取上项目组选择了适用于轻型车的WLTP-Brake循环、WLTP循环, 以及适用于重型车的CHTC-LT循环、C-WTVC循环(见图2)。为了使PM_{2.5}测试所用的颗粒物收集滤纸有足够的荷重以保证测试结果的准确性和重复性, 因此在正式排放测试过程中, 除了WLTP-Brake循环只运行1次之外(10个行程之间均停下来等温度降到40℃后再进入下一个行程), 其他3个时长不大于30min的测试循环均运行5个循环, 且每个循环开始前保证制动鼓温度降到40℃。

2 不同测试循环制动特征参数分析

表4是本研究采用的不同测试循环的统计特征。对于循环平均车速而言, 适用于轻型车的WLTP尾气循环与WLTP-Brake循环均较高, 因其最高车速均可达到131 km/h左右。在平均减速度方面, UN GTR构建的制动排放测试专用循环WLTP-Brake循环最高, 比WLTP循环高41%, 虽然这两条循环曲线都基于同一个实际道路车辆行驶数据库构建, 但是WLTP循环用于车辆尾气测试, 因此更多考虑会引起车辆排放增加的加速过程, 而WLTP-Brake循环则更注重引起制动排放的减速过程, 因此二者的平均减速度差异较大。对于平均每公里制动次数而言, CHTC-LT循环最高, 达到了2.2次/km, 而WLTP-Brake循环则是最低的, 仅为1.58次/km。

2.1 制动初速度累积频率分布

制动初速度对制动磨损颗粒物排放有重要影响, 图3所示是不同测试循环的制动初速度累积频率分布情况。从图中可以看出, 不同循环的制动初速度中值(第50百分位)的大小排序为: WLTP-Brake<CHTC-LT<C-WTVC<WLTP。不同循环下同一累积频率对应的制动初速度的差异大多不会超过20 km/h, 但总体而言同一累积频率下WLTP循环的制动初速度基本上均高于其他循环。CHTC-LT循环低于20 km/h的制动初速度占比明显高于其他循环, 制动初速度在22~55 km/h区间内的累计分布频率与WLTP-Brake循环相近。WLTP循环和WLTP-Brake循环的最大制动初速度均为131 km/h左右。如前所述, WLTP-Brake循环和WLTP循环都基于同一个实际道路车辆行驶数据库构建, 但其制动初速度中值差异较为明显, 可能是因为WLTP-Brake循

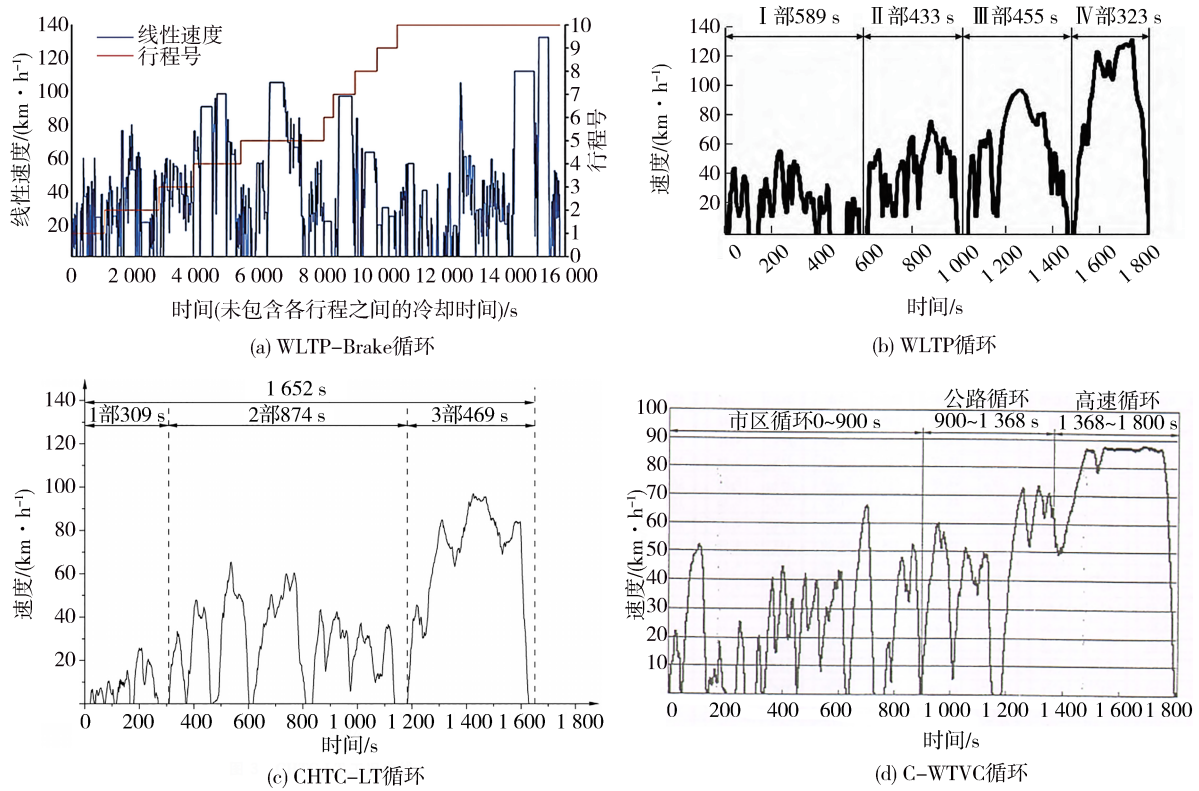


图2 本研究采用的制动排放测试循环

表4 不同测试循环的统计特征

参数	CHTC-LT 循环	C-WTVC 循环	WLTP-Brake 循环	WLTP 循环
循环总时长/s	1 652	1 800	15 826	1 800
循环总里程/km	15.88	20.51	192.2	23.3
循环平均车速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	34.62	40.997	43.7	46.6
平均减速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	0.28	0.39	0.97	0.57
循环制动次数	35	33	303	48
平均制动事件 次数/($\text{次}\cdot\text{km}^{-1}$)	2.20	1.61	1.58	2.06

环在构建过程中考虑使其制动初速度分布更接近于数据库中的情况,而WLTP循环在工况构建时则未重点考虑该参数。

2.2 平均制动减速度累积频率分布

制动减速度也是描述制动强度的主要指标,图4所示是不同测试循环的平均制动减速度累积频率分布情况。从图中可以看出,不同循环的平均制动减速度中值(第50百分位)的大小排序为:CHTC-LT < C-WTVC < WLTP < WLTP-Brake。与不同循环下制动初速度累积频率分布规律不同的是,同一累积频

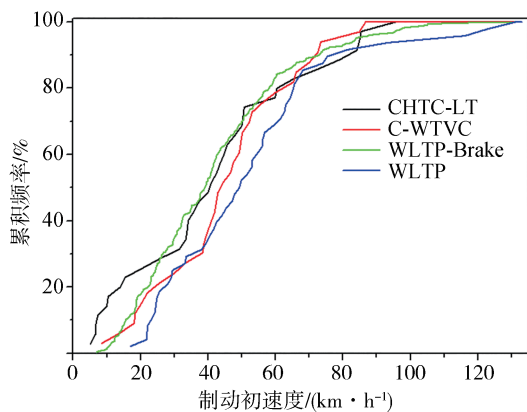


图3 不同测试循环的制动初速度累积频率分布情况

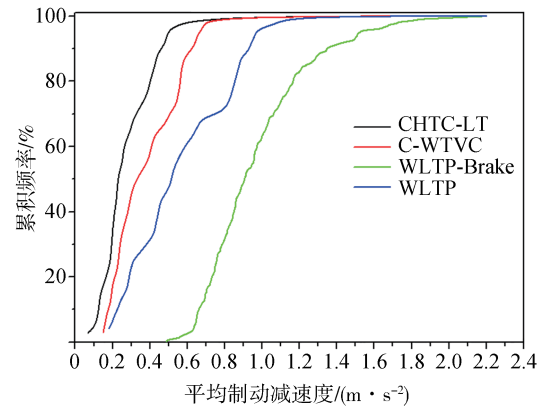


图4 不同测试循环的平均制动减速度累积频率分布情况

率下不同循环下的平均制动减速度排序均无变化, WLTP-Brake 循环、CHTC-LT 循环的平均制动减速度累计频率分布始终分别是最低和最高的。WLTP-Brake 循环的平均制动减速度明显高于其他循环,其最高值达到了 2.183 m/s^2 , WLTP 循环的最高值则仅为 1.18 m/s^2 。

2.3 制动间隔时间累积频率分布

制动间隔时间主要通过影响制动器温度,从而影响到制动颗粒物排放,图 5 所示是不同测试循环的制动间隔时间累积频率分布情况。从图中可以看

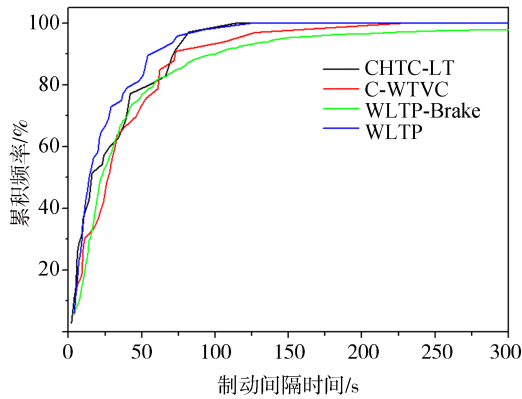


图 5 不同测试循环的制动间隔时间累积频率分布情况

出,不同循环的制动间隔时间中值(第 50 百分位)的大小排序为:WLTP<CHTC-LT<WLTP-Brake<C-WTVC。WLTP-Brake 循环的最大制动间隔时间为 659 s,而 WLTP 循环仅为 70 s。与不同循环下的制动初速度累计频率分布类似,不同循环的制动间隔时间累积频率分布存在交叉,但可以看出同一累积频率下,C-WTVC 循环和 WLTP-Brake 循环对应的制动间隔时间相对而言更长一些,而 WLTP 循环的制动间隔时间基本上均最短。

3 不同循环下的制动鼓制动温度对比

研究发现制动磨损颗粒物排放存在临界制动温度,当制动器温度超过临界温度时,颗粒物排放明显增加,且此时主要以小粒径颗粒物排放为主,同时可能伴随着挥发性的成分存在^[21-23],因此,制动温度对制动颗粒物排放具有重要影响。图 6 所示是不同测试循环每一次制动的制动鼓制动初始温度和制动终了温度的对比。从图中可以看出,除了 WLTP-Brake 循环因各行程之间需要热浸而使各行程一开始的制动温度均为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下外,其余 3 个循环的制动初始温度和终了温度均随循环的进行呈上升的趋势。不

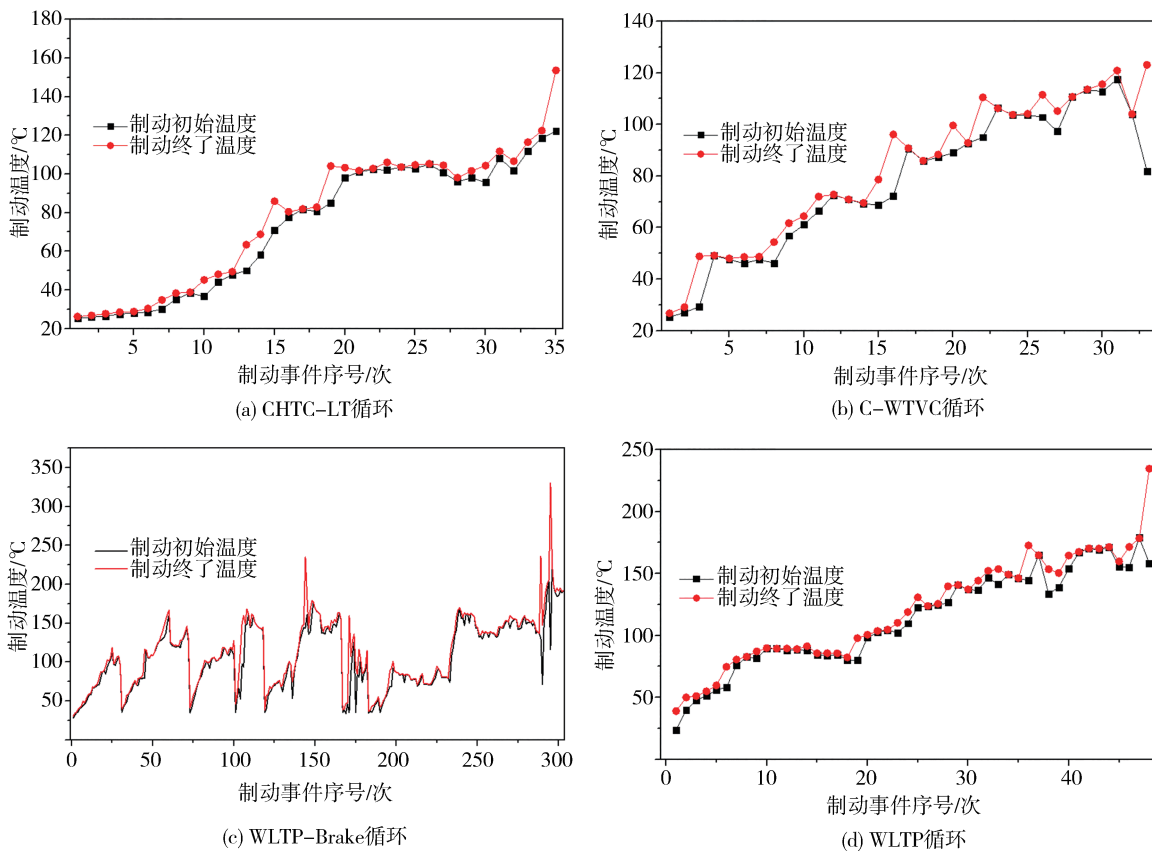


图 6 不同测试循环下的制动鼓温度对比

同循环下的最高制动终了温度排序为 C-WTVC<CHTC-LT<WLTP<WLTP-Brake, CHTC-LT 循环和 C-WTVC 循环的最高制动终了温度仅分别为 154 和 123 °C, 而 WLTP-Brake 循环和 WLTP 循环的最高制动终了温度则在最高制动初速度分别为 132.5 和 131 km/h 制动事件下分别达到了 330.1 和 234.6 °C。不同循环下的平均制动初始/终了温度排序为 CHTC-LT<C-WTVC<WLTP-Brake<WLTP, 在 WLTP-Brake 循环下因为各行程之间的热浸段(即前一行程结束后需要等制动器温度降低到 40 °C 以下之后才可开始下一行程)而拉低了制动鼓在该循环下的平均制动温度。此外, 通过对比除 WLTP-Brake 循环外其他 3 个不同循环的制动间隔时间中值(第 50 百分位)的大小排序, 可以得出不同循环下的平均制动初始/终了温度不仅受制动间隔时间的影响, 还会受到制动初速度、制动减速度等的综合影响的结论。

4 制动颗粒物排放对比

4.1 制动颗粒物排放因子分析

图 7 所示是不同测试循环下的 $PM_{2.5}$ 、 PN_{10} 排放因子。从图中可以看出 WLTP 循环下的 $PM_{2.5}$ 、 PN_{10} 排放因子明显高于其他循环, 且其 $PM_{2.5}$ 排放因子甚

至是其他循环的 2 倍, 而 WLTP-Brake 循环的 $PM_{2.5}$ 、 PN_{10} 排放因子均最低。不同循环下的 $PM_{2.5}$ 排放因子排序为: WLTP-Brake<C-WTVC<CHTC-LT<WLTP。 PN_{10} 排放因子排序为: WLTP-Brake<CHTC-LT<C-WTVC<WLTP。由此分析, 各循环 PN_{10} 、 $PM_{2.5}$ 排放因子的排放规律与不同循环制动初速度累积频率中值的分布规律较为接近, 但与制动减速度、制动时间间隔等其他制动特征参数的分布规律差异较大, 可见测试循环的制动初速度对颗粒物排放的影响大于制动减速度、制动间隔时间等其他制动特征参数。Liu 等^[24]采用有限元分析方法和制动测功机试验测试了前轴制动盘在 WLTP、LACT 和 WLTP-Brake 循环下的制动排放, 研究结果同样表明, 制动初速度的增加会导致制动颗粒物排放的增加, 并提出了降低高速制动的频率可能是减少 PM_{10} 排放的有效策略。Liu 等^[25]的研究还指出, 控制 PM_{10} 排放的前 5 个最重要因素为耗散能、制动初速度、最终制动温度、制动功率和制动减速度。此外, 刘笃优等^[26]研究了制动初速度、制动减速度和制动初温 3 个因素对制动摩擦材料磨损的影响, 结果表明制动初速度对磨损颗粒物的影响最大。基于本试验结果及其他公开发表论文的结论可知, 制动减速度对制动排放的影响小于制动初速度。

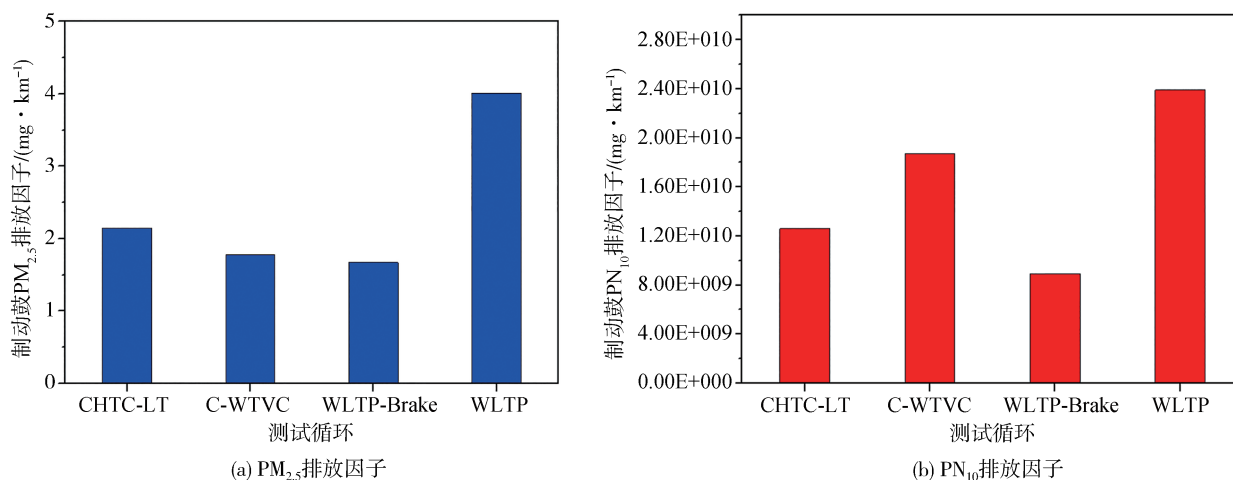


图 7 不同循环下的制动 $PM_{2.5}$ 、 PN_{10} 排放因子

由于制动鼓磨损的颗粒物容易落在鼓中而不易逸出, 因此制动鼓磨损产生的颗粒物排放研究对于制动盘来说相对较少^[11,27-28]。然而本次试验研究结果显示, WLTP-Brake 循环下的制动鼓 $PM_{2.5}$ 排放因子可达 1.67 mg/km, 因试验制动鼓的轴荷分配比为

50%, 因此可将该值乘以 4(4 个轮子/辆车)即可得到每辆车的 $PM_{2.5}$ 排放因子, 即为 6.68 mg/km。当前版本的欧七提案中, 对于纯电动以外的轻型车, 其每辆车制动 PM_{10} 排放限值为 7 mg/km。虽然制动鼓磨损排放的颗粒物主要集中在小粒径范围, 但如果加上

试验制动鼓在 2.5~10 μm 粒径段之间的 PM 排放,那么该制动鼓则很有可能无法满足欧七提案的限值要求。因此,本研究得出的结论是,制动鼓的 PM 排放并不比想象中的少,因此其制动磨损排放控制与制动盘一样需要引起重视。

4.2 制动 PN_{10} 瞬态排放分析

图 8 和图 9 分别是不同测试循环下的 PN_{10} 瞬态排放情况。从图中可以看出, WLTP-Brake 循环和 WLTP 循环的 PN_{10} 排放分别在从制动初速度 132.5、131 km/h 减速至 34 km/h、0 的制动事件中出现明显高于其他制动事件的峰值,峰值浓度可达 $4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ \#}/\text{cm}^3$ 。该瞬态 PN_{10} 排放最高的制动事件, WLTP-Brake 循环和 WLTP 循环的制动减速度分别为 1.82 和 0.52 m/s^2 ,而这两个循环的最大制动减速度分别为 2.18 和 1.18 m/s^2 ,可见瞬态 PN_{10} 排放最高值对应于循环中最大制动初速度的制动事件,而非循环中最大减速度的制动事件。Liu 等^[24]的测试也得出在 WLTP-Brake 循环和 WLTP 循环的最大制动减速度的制动事件中,制动盘的 PM_{10} 排放量也是最高的结论。这也进一步验证了如前所述的制动初速度对颗粒物排放的影响大于制动减速度、制动间隔时间等其他制动特征参数的结论。除了该制动事件外,各循环其他制动事件下的 PN_{10} 瞬时浓度均低于 $2 \times 10^4 \text{ \#}/\text{cm}^3$ 。

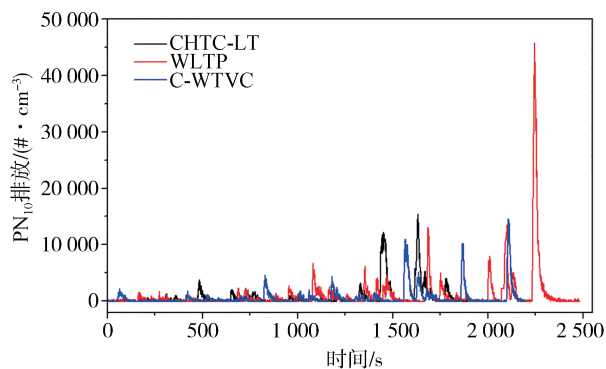


图 8 CHTC-LT、WLTP 和 C-WTVC 循环下的制动 PN_{10} 瞬态排放

GTR 标准要求测试并记录各行程间热浸段的 PN 排放,但热浸段排放不参与最终的 PN 比排放计算,图 9 展示的 PN_{10} 排放数据也包含了各行程间的热浸阶段。经分析,发现 WLTP-Brake 循环试验中, PN_{10} 瞬态排放峰值超过 $1 \times 10^4 \text{ \#}/\text{cm}^3$ 的制动事件如表 5 所示,从表中可以看出,这些制动事件均为制动初速度高于 95 km/h 的制动事件,而制动减速度则有高

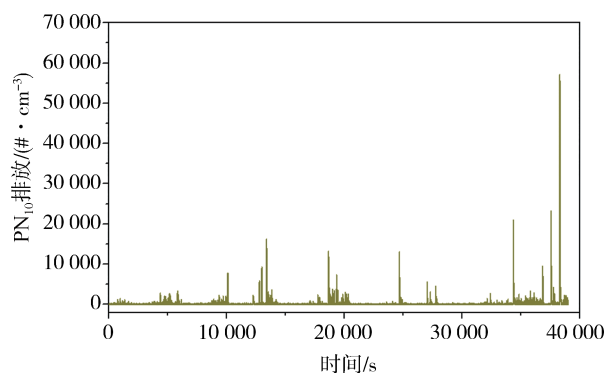


图 9 WLTP-Brake 循环下的制动 PN_{10} 瞬态排放 (含热浸阶段)

至 1.824 也有低至 0.821 m/s^2 ,这也说明制动初速度对制动减速度的影响大于制动减速度。此外,通过分析单一制动事件中 PN_{10} 排放峰值出现时间与制动开始时间的关系,发现在此试验中, PN_{10} 排放峰值出现时间一般会比制动开始时间延迟 250 s 左右。

表 5 WLTP-Brake 循环中 PN_{10} 瞬态排放超过 $1 \times 10^4 \text{ \#}/\text{cm}^3$ 的制动事件

制动事件号	制动初速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	制动末速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	制动减速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
106	98.37	0	1.822
136	105.19	90.39	1.028
171	96.93	73.28	0.821
233	104.98	95.39	0.888
290	111.98	56.11	1.724
295	132.49	34.0	1.824

5 结论

本研究在基于重型制动惯量台构建的制动排放测试系统,分别采用 AVL M. O. V. E. PM-PEMS iX 494 和 AVL489 测试了试验制动鼓在 CHTC-LT、C-WTVC、WLTP-Brake 和 WLTP 循环下的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PN_{10} 排放,得出如下结论。

(1) 制动鼓在不同测试循环下的平均制动初始/终了温度存在较大差异,最高制动终了温度基本上均出现在循环中最大制动初速度对应的制动事件中。

(2) 制动鼓的 PM 排放并不比想象中的少,因此其制动磨损颗粒物排放控制与制动盘一样需要引起重视。WLTP-Brake 循环下的制动鼓 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子可达 1.67 mg/km ,对于装配试验制动鼓的车辆其

PM_{2.5}排放因子为6.68 mg/km,已相当接近当前版本的欧七提案中对于纯电动以外轻型车的制动PM₁₀排放限值(7 mg/km)。

(3) 不同测试循环下制动PM_{2.5}、PN₁₀排放因子的变化趋势与各循环制动初速度累积频率中值的分布规律较为接近,且制动PN₁₀瞬态排放最高值出现在测试循环中最大制动初速度的制动事件中,因此可以得出制动初速度对制动颗粒物排放的影响明显大于平均制动减速度、平均制动间隔时间等制动特征参数的结论。

参考文献

- [1] TIMMERS V, ACHTEN P. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2016, 134: 10-17.
- [2] CHEN J, LI W, ZHANG H, et al. Mining urban sustainable performance: GPS data-based spatio-temporal analysis on on-road braking emission [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 270: 122489.
- [3] LIU Y, CHEN H, LI Y, et al. Exhaust and nonexhaust emissions from conventional and electric vehicles: a comparison of monetary impact values [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 331: 129965.
- [4] RODOVALHO E, DE TOMI G. Reducing environmental impacts via improved tyre wear management [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 1419-1427.
- [5] 付家祺,王婷,毛洪钧. 机动车尾气和非尾气排放多环芳烃及其衍生物的影响因素研究进展 [J]. 工程科学学报, 2023, 45(5): 863-873.
FU J Q, WANG T, MAO H J. Research progress on the influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons and derivatives from vehicle exhaust and non-exhaust emissions [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(5): 863-873.
- [6] European Commission. Non-exhaust traffic related emissions-brake and tyre wear PM [R]. JRC Science and Policy Reports, 2014.
- [7] GRIGORATOS T, MARTINI G. Brake wear particle emissions: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 22: 12491-12504.
- [8] WAHLSTROM J, GVENTSADZE D, OLANDER L, et al. A pin-on-disc investigation of novel nanoporous composite-based and conventional brake pad materials focussing on airborne wear particles [J]. Tribology International, 2011, 44: 1838-1843.
- [9] BRESSAN J D, DAROS D P, SOKOLOWSKI A, et al. Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205: 353-359.
- [10] FEDERICI M, ALEMANI M, MENAPACE C, et al. A critical comparison of dynamometer data with pin-on-disc data for the same two friction material pairs—a case study [J]. Wear, 2019, 424: 40-47.
- [11] HAMATSCHEK C, HESSE D, AUGSBURG K, et al. Comparison of the particle emission behaviour of automotive drum and disc brakes [C]. 12th International Munich Chassis Symposium 2021. 2022: 541-563.
- [12] SCHAUER J J, LOUGH G C, SHAFER M M. Characterization of metals emitted from motor vehicles [J]. Health Effects Institute, 2006, 133: 1-76.
- [13] KWAK J, KIM H, LEE J, et al. Characterization of nonexhaust coarse and fine particles from on-road driving and laboratory measurements [J]. Science of the Total Environment, 2013, 458: 273-282.
- [14] Passenger car-measurement method for brake wear particle emissions: JASO C470:2020 [S]. 2020.
- [15] ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2023/4. Proposal for a new UN GTR on laboratory measurement of brake emissions for light-duty vehicles [Z]. 2022.
- [16] GRABIEC T, STEVEN H, GRIGORATOS T. A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions [J]. Wear, 2018, 414: 219-226.
- [17] VASILJEVIC S, GLIOVI J, STOJANOVIC B, et al. The analysis of the influential parameters that cause particles formation during the braking process: a review [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2022, 236(1): 31-48.
- [18] 郝艳召,邓顺熙,邱兆文,等. 机动车非尾气颗粒物排放研究 [J]. 汽车工程, 2015, 37(2): 145-154.
HAO Y Z, DENG S X, QIU Z W, et al. A research on the non-exhaust particulate emissions of motor vehicles [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(2): 145-154.
- [19] 马尧,张喆,刘晓东. 不同工况下汽车制动磨损颗粒物排放特征研究 [J]. 中国汽车, 2023(2): 32-38.
MA Y, ZHANG Z, LIU X D. Study on particulate emission characteristics of automobile braking wear under different test cycles [J]. China Auto, 2023(2): 32-38.
- [20] SANDERS P G, XU N, DALKA T M, et al. Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37: 4060.
- [21] ZUM HAGEN F H F, MATHISSEN M, GRABIEC T, et al. On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions [J]. Atmospheric Environment, 2019, 217: 116943.
- [22] ALEMANI M, WAHLSTRÖM J, OLOFSSON U. On the influence of car brake system parameters on particulate matter emissions [J]. Wear, 2018, 396: 67-74.
- [23] BEJI A, DEBOUDT K, KHARDI S, et al. Nonexhaust particle emissions under various driving conditions: implications for sustainable mobility [J]. Transportation Research Part D-Transport and Environment, 2020, 81: 102290.
- [24] LIU Y, CHEN H, YIN C, et al. PM10 prediction for brake wear of passenger car during different test driving cycles [J]. Chemosphere, 2022, 305: 135481.

(下转第341页)

- dynamic vibration absorbers[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 99: 297-307.
- [10] 杜甫, 毛明, 陈轶杰, 等. 基于动力学模型与参数优化的ISD悬架结构设计及性能分析[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(6): 59-65.
- DU F, MAO M, CHEN Y J, et al. Structure design and performance analysis of inerter-spring-damper suspension structure based on dynamic model and parameter optimization [J]. *Journal of Vibration & Shock*, 2014, 33(6): 59-65.
- [11] ZHANG X L, ZHU J, NIE J, et al. Analysis of inertance and damping double-skyhook control strategies for a semi-active device combining an adjustable inerter and damper [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(10).
- [12] HU Y L, CHEN M Z Q, SUN Y H. Comfort-oriented vehicle suspension design with skyhook inerter configuration [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 405: 34-47.
- [13] 张丽霞, 李宁斐, 梁冠群, 等. 阻尼连续可调半主动悬架平滑天棚控制策略研究[J]. *噪声与振动控制*, 2023, 43(2): 169-173, 184.
- ZHANG L X, LI N F, LIANG G Q, et al. Research on the smooth skyhook control strategy for damping continuously adjustable semi-active suspension [J]. *Noise and Vibration Control*, 2023, 43(2): 169-173, 184.
- [14] 王越, 刘夫云, 邓聚才, 等. 半主动悬架SH-LQR阻尼控制策略仿真研究[J]. *噪声与振动控制*, 2022, 42(3): 68-72, 79.
- WANG Y, LIU F Y, DENG J C, et al. Simulation study on the SH-LQR damping control strategy for semi-active suspension [J]. *Noise and Vibration Control*, 2022, 42(3): 68-72, 79.
- [15] 王海涛, 董新民, 王建刚. 分数阶控制理论及其在飞机俯仰控制中的应用[J]. *飞行力学*, 2011, 29(5): 44-48.
- WANG H T, DONG X M, WANG J G. Fractional order control theory and its applications in aircraft longitudinal control [J]. *Flight Dynamic*, 2011, 29(5): 44-48.
- [16] 吴光强, 黄焕军, 叶光湖. 基于分数阶微积分的汽车空气悬架半主动控制[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 19-25.
- WU G Q, HUANG H J, YE G H. Semi-active control of automotive air suspension based on fractional order calculus [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 19-25.
- [17] 李健, 杨建, 柴星, 等. 车辆半主动悬架分数阶天棚阻尼控制器设计[J]. *机械研究与应用*, 2018, 31(5): 140-144.
- LI J, YANG J, CHAI X, et al. Design of fractional-order skyhook damping controller for vehicle semi-active suspension [J]. *Mechanical Research and Application*, 2018, 31(5): 140-144.
- [18] 王勇, 季明珠, 张步云. 分数阶惯容悬架动态特性研究[J]. *噪声与振动控制*, 2023, 43(1): 12-18.
- WANG Y, JI M Z, ZHANG B Y. Research on dynamic characteristics of fractional-order inerter suspension [J]. *Noise and Vibration Control*, 2023, 43(1): 12-18.
- [19] 常宇健, 田沃沃, 金格, 等. 基于分数阶 $PI^{\alpha}D^{\mu}$ 的非线性分数阶主动控制悬架研究[J]. *燕山大学学报*, 2020, 44(6): 575-580.
- CHANG Y J, TIAN W W, JING G, et al. Research on nonlinear fractional-order active control suspension based on fractional-order $PI^{\alpha}D^{\mu}$ controller [J]. *Journal of Yanshan University*, 2020, 44(6): 575-580.
- [20] 薛定宇. 分数阶微积分学与分数阶控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- XUE D Y. *Fractional calculus and fractional-order control* [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [21] 吴志成, 陈思忠, 杨林, 等. 基于有理函数的路面不平度时域模型研究[J]. *北京理工大学学报*, 2009, 29(9): 795-798.
- WU Z C, CHEN S Z, YANG L, et al. Research on time-domain model of road roughness based on rational function [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(9): 795-798.
- [22] 杨晓峰, 颜龙, 沈钰杰, 等. 新型机电惯容器抗振性能仿真与实验研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2022, 42(2): 343-349, 411.
- YANG X F, YAN L, SHEN Y J, et al. Simulation and experimental study on anti-vibration performance of new mechatronic inerter [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 42(2): 343-349, 411.

(上接第308页)

- [25] LIU Y, WU S, CHEN H, et al. Brake wear induced PM10 emissions during the world harmonised light-duty vehicle test procedure-brake cycle [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 361: 132278.
- [26] 刘笃优, 马尧, 门正宇, 等. 汽车制动磨损颗粒物排放特征与影响因素[J]. *汽车工程学报*, 2020, 10(5): 342-349.
- LIU D Y, MA Y, MEN Z Y, et al. Emission characteristics and influential factors of vehicle brake wear particulate matter [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2020, 10(5): 342-349.
- [27] DUBOKA C, TODOROVIC J, ARSENIC Ž. Application of an inertia dynamometer to check braking performance against theoretical predictions [C]. 6th International Heavy Vehicles Seminar, Christchurch, New Zealand, 1996.
- [28] 肖叶龙, 成煜, 赵火平, 等. 制动磨损源大气颗粒物排放的研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(6): 1290-1304.
- YE X L, CHENG Y, ZHAO H P, et al. Airborne brake wear particle emissions: a review [J]. *Tribology*, 2022, 42(6): 1290-1304.