

面向欧 VII 的制动磨损颗粒物排放测量方案

马龙^{1,2}, 石秀勇^{1,3*}, 郭海涛², 郇浩², 王伟², 文喆², 张东升¹

1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 堀场(中国)贸易有限公司, 上海 200335;

3. 南昌智能新能源汽车研究院, 江西 南昌 330038

摘要:针对欧 VII 排放标准对制动磨损颗粒物排放提出的新要求, 深入解读欧 VII 排放标准中制动磨损颗粒物限值、测试方法和测试设备要求, 设计面向欧 VII 排放标准的制动磨损颗粒物测试惯量制动台, 系统集成颗粒物测量系统、自动控制系统及机械-电惯量混合模拟技术, 并提出适配不同场地条件的整体实验室布局型式。实际应用结果表明: 该惯性制动台能够准确测量固体颗粒数、总颗粒数、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} , 该设计方案不仅能满足欧 VII 排放标准中制动磨损颗粒物测量要求, 还可以提高测量的准确性, 降低成本, 优化空间。

关键词: 欧 VII 排放标准; 制动磨损颗粒物; 惯量制动台; 非尾气排放

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)03-0019-10

引用格式: 马龙, 石秀勇, 郭海涛, 等. 面向欧 VII 的制动磨损颗粒物排放测量方案[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(3): 19-28.

MA Long, SHI Xiuyong, GUO Haitao, et al. Solutions for measuring brake wear particulate matter emissions under Euro VII Standard[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(3): 19-28.

0 引言

随着全球汽车保有量的持续增长, 机动车相关的排放问题愈发严峻, 各国普遍使用新的尾气后处理技术和实行更严格的排放标准控制尾气排放。车辆排放的尾气污染物, 无论是气态还是颗粒物(particulate matter, PM)排放均已降至极低水平^[1]。相比而言, 非尾气颗粒物的排放问题变得更加突出。根据联合国欧洲经济委员会(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE)的统计, 2023 年非尾气排放产生的颗粒物排放约占车辆使用过程中颗粒物排放总量的 80%, 而 2000 年这一比例约为 40%^[2]。汽车的非尾气颗粒物排放主要来源于制动磨损颗粒物、轮胎磨损颗粒物、路面磨损颗粒物和路面扬尘等, 其中制动磨损颗粒物的质量占比可达 55%^[3]。

汽车制动磨损颗粒物排放严重危害环境。这些颗粒物进入大气后长时间悬浮, 影响大气的能见度, 形成雾霾等恶劣天气。同时, 这些颗粒物也是大气中细颗粒物($PM_{2.5}$)和可吸入颗粒物(PM_{10})的重要来源之一。 $PM_{2.5}$ 能够进入人体呼吸系统, 甚至进入血液循环系统, 对人体健康造成严重威胁; PM_{10} 刺激呼吸道, 引发咳嗽、气喘等症状^[4]。据相关研究, 在城市地区, 汽车制动颗粒排放是 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的重要来源^[5], 加剧了城市空气污染程度。

2022 年 11 月 10 日, 欧盟委员会公布了欧洲第七阶段排放标准(以下简称欧 VII 标准)的提案。该提案不仅涵盖传统尾气排放限值, 还首次对所有车辆的制动磨损和轮胎磨损颗粒物排放设置了限值。欧 VII

收稿日期: 2025-04-27

基金项目: 江西省重点研发计划项目(S20252384)

第一作者简介: 马龙(1988—), 男, 山东莘县人, 同济大学硕士研究生, Horiba 工程师, 主要研究方向为汽车动力系统测试技术, E-mail: long.ma@horiba.com。

* 通信作者简介: 石秀勇(1979—), 男, 山东德州人, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为内燃动力高效清洁燃烧与排放控制、混合动力系统与控制技术, E-mail: shixy@tongji.edu.cn。

标准于 2024 年 5 月 8 日公布,于 5 月 28 日正式生效。中国在构建汽车排放标准体系时,通常借鉴欧洲经验,国一到国六排放标准的制定都参考了欧洲的标准框架、污染物项目及测试方法。因此,针对欧 VII 标准中新增的要求,开展制动磨损颗粒物排放测量方法的研究具有重要的科学意义和应用价值。

1 欧 VII 标准中制动磨损颗粒物排放要求

1.1 排放限值

关于制动磨损颗粒物排放,欧 VII 标准首先对 M_1 和 N_1 类轻型车的制动系统设定了 2029 年底前适用的 PM 排放限值,并为 2030 年以后实施 PM 和 PN 双限值进行了规划,该规划还将扩展至 M_2 、 M_3 类客车及 N_2 、 N_3 类货车。各类车辆的颗粒物排放限值要求如表 1 所示^[6]。

表 1 欧 VII 标准中的制动系统颗粒物排放限值

动力系统类型	标准实施日期	制动系统颗粒物排放限值/($\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$)		
		M_1/N_1 I、II 类	N_1 III 类	M_2/N_2 及 M_3/N_3
电动汽车	标准生效日	3	5	无要求
其他动力类型汽车	2029 年 12 月 31 日	7	11	无要求
电动汽车	2030 年 1 月 1 日	待定	待定	待定
其它动力系统汽车	2034 年 12 月 31 日	待定	待定	待定
所有动力型式汽车	2035 年 1 月 1 日以后	3	待定	待定

和国六 b 排放标准相比,欧 VII 标准首次将制动磨损颗粒物排放 (M_1/N_1 I、II 类车辆的限值为 3 mg/km) 纳入监管,同时引入实际行驶污染物排放 (real driving emissions, RDE) 和延长耐久性要求 (20 万 km),实现了从尾气治理向全链路减排的跨越。电动汽车没有尾气排放,但车质量更大,制动和轮胎磨损的颗粒物排放更高。欧 VII 标准要求,自 2035 年 1 月 1 日后,对于所有动力型式汽车 (M_1/N_1 I 和 II 类),制动系统颗粒物排放限值均为 3 mg/km 。

1.2 测试方法

美国在 1983 年开展了制动磨损颗粒物排放的评估研究工作^[7],加利福尼亚空气资源委员会 (California Air Resources Board, CARB) 也在关注包括制动磨损颗粒物在内的车辆非尾气颗粒物排放。由欧盟、美国、日本等组成的颗粒物测量计划 (Particle Measurement Programme, PMP) 工作组致力于基于惯量制动台的汽车制动排放测试方法研究工作,旨在建立全球统一的汽车制动排放测试规程^[8]。

2023 年, PMP 工作组联合 UNECE 的污染与能源工作组共同制定了《全球技术法规第 24 号:轻型车辆制动排放的实验室测量》(global technical regulation UN GTR No. 24)^[4],要求测量固体颗粒数 (solid particle number, SPN)、总颗粒数 (total particle number, TPN)、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 。2024 年 5 月颁布的欧 VII 标准明确规定对 M_1 、 N_1 类车辆的制动磨损颗粒物排放采用该测试规程和限值。

UN GTR No. 24 基于全球统一轻型车测试规程 (worldwide harmonised light vehicles test procedure, WLTP),提出了 WLTP 制动测试循环,不含浸车时间的 WLTP 制动测试循环如图 1 所示。WLTP 制动测试循环包括 10 个单独的行程,代表不同的驾驶和制动条件;循环总时间为 15 826 s,包含 303 次制动减速事件,总行驶距离为 192 km ,平均速度为 43.7 km/h ,最高速度为 132.5 km/h ,平均制动减速度为 0.97 m/s^2 ,最大制动减速度为 2.18 m/s^2 ,

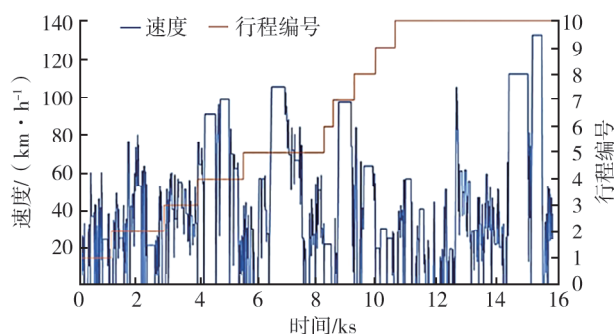


图 1 WLTP 制动测试循环 (不含浸车时间)

平均制动减速持续时间为 5.7 s,最大制动减速持续时间为 15.0 s^[9]。

车辆的制动磨损颗粒物排放测试过程^[9]如图 2 所示。制动磨损颗粒物排放测试包含 3 阶段: 1) 制动器冷却调整阶段,调节冷却空气条件,使制动器温度保持在规定范围内;2) 制动器磨合阶段,重复 5 次 WLTP 制动循环,实现制动排放的稳定性;3) 排放测量阶段,利用一次 WLTP 制动循环,完成 PM 质量测量。

1.3 测试设备

为了进行有效的制动磨损颗粒物排放测试,需要集成多个子系统,确保满足 UN GTR 的要求。

欧Ⅶ标准提出在实验室中进行制动排放测试的示意图如图 3^[9]所示。

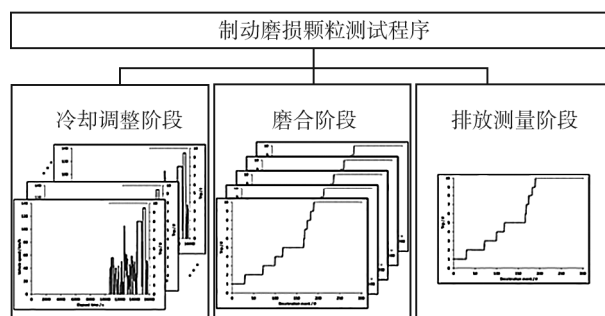


图2 制动磨损颗粒物排放测试过程

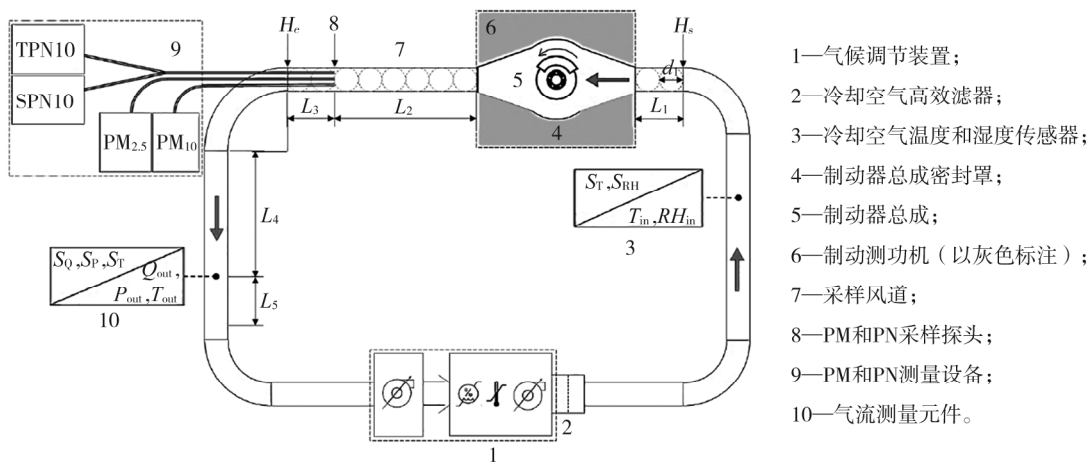


图3 制动磨损颗粒物排放测试实验室示意图

系统配有可变流量风扇、可控制空气温度和空气湿度的气候调节装置 1,该装置可以为测试系统提供经过调节的空气;经过调节的空气通过高效滤器 2 进行过滤,空气的温度、湿度等参数由安装在制动器封闭装置上游传感器 3 采集,然后进入制动器密封装置 4,对制动总成 5 进行吹扫,形成混合有制动颗粒的气溶胶;密封装置末端直接与采样风道 7 相连,在风道末端安装 3 个(或 4 个)采样探头 8,这些采样探头把气溶胶从风道中抽取到颗粒物质量和颗粒物数量测量装置 9 中;安装在采样平面下游的气流测量元件 10 用于测量计算冷却气流的速度、压力和流量等。

2 解决方案

针对制动颗粒物排放,需要设计完全符合 GTR No. 24 要求的设备,测量 SPN、TPN、PM_{2.5}、PM₁₀。惯量制动台可以通过自动控制系统与颗粒物测量设备实时交互,实现测试程序设置、制动工况控制、人机界面编辑、试验数据评估等功能,并生成符合 UN GTR 标准的报告^[10]。

2.1 惯量制动台

惯量制动台结构示意图如图 4 所示。惯量制动台的机械部分安装在隔振底座上,直流电机通过驱动飞轮加速旋转,向制动器测试系统施加可控的转矩载荷;驱动柜为直流电机供电,制动控制器可根据压力、转矩或控制模式驱动测试制动器,还可以提供不同样件测试配套的夹具。测量系统配备了高精度的速度、压力、转矩和温度测量装置,确保测试数据的精准采集。控制系统通过先进的控制算法和软件程序,实现对测试过程的精确掌控与数据采集分析。

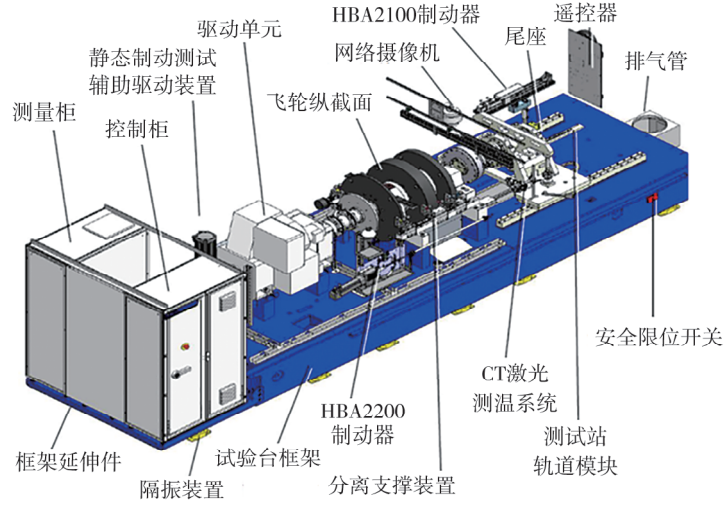


图 4 惯量制动台结构示意图

2.1.1 惯量模拟计算

惯量制动台的关键参数包括制动惯量、最大转速、最大角速度、制动转矩等。

以 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 为单位的制动惯量 J_B 的数值

$$\{J_B\} = \frac{\{m\} b_d \{r_{\text{dyn}}\}^2}{30 \{v_{\text{max}}\}}, \quad (1)$$

式中: $\{m\}$ 为以 kg 为单位的车辆质量 m 的数值, b_d 为制动分配因数, $\{r_{\text{dyn}}\}$ 为以 m 为单位的测功机半径 r_{dyn} 的数值, $\{v_{\text{max}}\}$ 为以 km/h 为单位的车辆最大速度 v_{max} 的数值。

以 r/min 为单位的惯量制动台最大转速 n_{max} 的数值

$$\{n_{\text{max}}\} = \frac{30 \{v_{\text{max}}\}}{\pi \{r_{\text{dyn}}\}}. \quad (2)$$

以 rad/s 为单位的最大角速度 ω 的数值

$$\{\omega\} = 30 \{a_{\text{max}}\} / \{r_{\text{dyn}}\}, \quad (3)$$

式中: $\{a_{\text{max}}\}$ 为以 m/s^2 为单位的最大加速度 a_{max} 的数值。

以 $\text{N} \cdot \text{m}$ 为单位的制动转矩 M_B 的数值

$$\{M_B\} = \{J_B\} \{\omega\}. \quad (4)$$

模拟惯量差

$$\Delta J_{\text{sim}} = \min |J_B - J_{\text{mech}}|, \quad (5)$$

式中: J_{mech} 为机械惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

模拟转矩

$$M_{\text{sim}} = M_B \cdot (1 - J_{\text{mech}}/J_B). \quad (6)$$

模拟工况下电机功率 P_{Motorsim} 的数值

$$\{P_{\text{Motorsim}}\} = \{M_{\text{sim}}\} \{\omega\} = \{M_{\text{sim}}\} \pi \{n_{\text{max}}\} / 30, \quad (7)$$

式中: $\{M_{\text{sim}}\}$ 为以 $\text{N} \cdot \text{m}$ 为单位的 M_{sim} 的数值。

惯量台加速转矩 M_{acc} 的数值

$$\{M_{\text{acc}}\} = \{J_{\text{mech}}\} \{a_v\} / \{r_{\text{dyn}}\}, \quad (8)$$

式中: $\{a_v\}$ 为以 m/s^2 为单位的车辆加速度 a_v 的数值。

加速工况下电机功率 P_{Motoracc} 的数值

$$\{P_{\text{Motoracc}}\} = \{M_{\text{acc}}\} \{\omega\} = \{M_{\text{acc}}\} \pi \{n_{\text{max}}\} / 30. \quad (9)$$

由式(1)~(9)计算的不同车辆的惯量制动台关键参数如表 2 所示。

表2 不同车辆的惯量制动台关键参数计算结果

车辆编号	m/kg	r_{dyn}/m	$v_{\text{max}}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	车轴类型	制动分配比/%	最大减速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$a_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$J_{\text{B}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
1	1 290	0.284	172	后轴	20	12.753	2.104	10
2	1 910	0.307	220	前轴	70	12.753	3.437	63
3	2 920	0.341	230	前轴	70	12.753	4.789	119
4	1 600	0.300	200	后轴	30	12.753	3.500	22

车辆编号	$n_{\text{max}}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$M_{\text{B}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$J_{\text{mech}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	模拟惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$M_{\text{sim}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$P_{\text{Motorsim}}/\text{kW}$	$M_{\text{acc}}/(\text{N}\cdot\text{m})$	$P_{\text{Motoracc}}/\text{kW}$
1	1 606	449	20	10	-472	-79	148	25
2	1 901	2 617	75	12	-523	-104	808	161
3	1 789	4 450	100	19	-746	140	1 404	263
4	1 768	935	20	2	89	17	233	43

2.1.2 惯量模拟系统

惯量制动台采用机械惯量和电惯量模拟联合的混合系统,兼顾机械惯量的物理真实性与电惯量的灵活可控性。相比纯机械飞轮,以电惯量模拟部分替代机械飞轮,可减少物理飞轮的数量和质量,减小设备体积,缩短停机时间;电惯量可通过控制算法快速调整模拟的等效惯量,适应复杂多变的测试需求(如模拟车辆加速或制动时的动态惯量变化);机械惯量提供基础惯量,电惯量叠加扩展范围,可覆盖从极低到极高的惯量需求,避免受限于物理飞轮上限;此外,电惯量模拟的电机可在制动时回收能量并回馈电网,减少纯机械系统因摩擦制动导致的能量浪费。

相比纯电惯量系统,混合系统的机械飞轮提供真实的旋转惯量,避免纯电惯量依赖控制算法可能引入的动态误差(如延迟、高频噪声等);机械惯量作为物理缓冲,可有效抑制因电网波动或控制误差导致的转矩抖动,提高测试稳定性;纯电系统在小惯量模拟区间易因控制参数失配或外部干扰引发超调或振荡,而混合系统以机械惯量为阻尼,可抑制高频振荡,提高系统稳定性。此外,纯电惯量系统需要电机持续输出等效转矩以维持惯量,混合系统中机械飞轮无需持续供电,更适合长时间测试场景。

混合惯量模拟系统中采用直流电机。虽然交流电机结构性能和控制算法已经取得了长足的进步,但直流电机仍然具备以下优势:1)直流电机的线性调速特性使其转速和输入电压或电枢电流成近似线性关系,无需复杂的变频控制即可实现宽范围平滑调速,适合需要频繁调整惯量模拟的场景;2)直流电机的电磁时间常数较小,转矩输出对控制信号的响应速度更快,能够更精准地模拟瞬态惯量变化(如紧急制动时的动态负载);3)直流电机在极低转速下仍能稳定运行(如模拟蠕行工况),可避免交流电机因变频控制导致的转矩波动或过冲问题。

2.1.3 样件适配工装

为适应不同测试场景要求,开发系列适配惯量制动台的工装。针对盘式刹车开发悬臂夹具,其结构与传统夹具对比如图5所示。传统夹具虽然也能完成盘片的摩擦磨损测试,但由于安装和固定方式的局限性,无法真实反映磨损特性。悬臂夹具专为承受轴向拉力设计,可承受新能源车制动能量回收瞬间转矩冲击等高强度循环载荷,有效减少变形风险,保障测试准确性,更真实地反映盘片的实车磨损特性。

为了能够高度还原车辆真实的悬挂系统,开发悬架和车轴测试工装,结构如图6所示。使刹车测试环境无限趋近于实际行车状态,确保测试结果真实可靠,为制动性能评估与改进提供可靠的数据支撑。

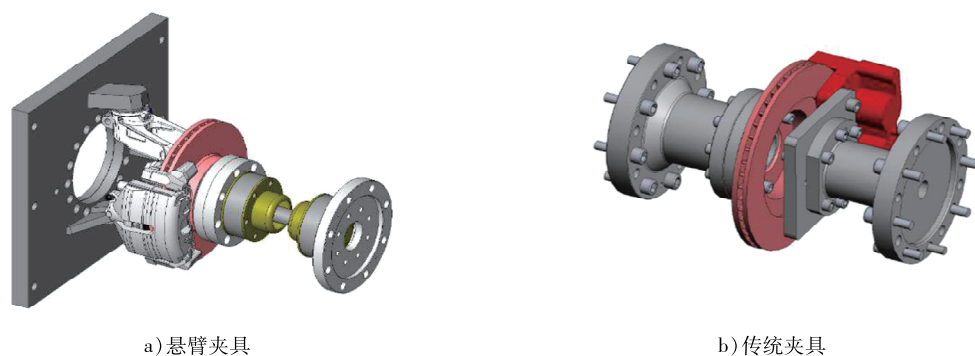


图 5 盘式刹车悬臂夹具与传统夹具结构对比



图 6 悬架和车轴测试工装

2.2 颗粒物测量

2.2.1 制动器总成密封罩

为了保证颗粒物测量的准确性,UN GTR No. 24 要求制动器磨损试验需配备密封罩,密封罩的结构示意图及实物如图 7 所示。

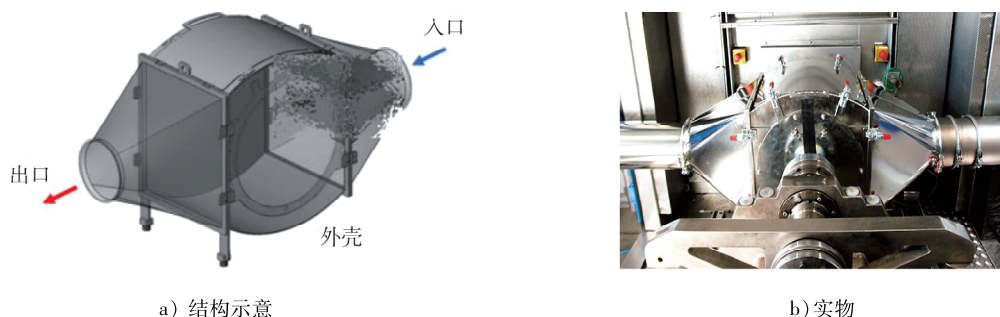


图 7 密封罩结构示意图及实物图

密封罩为密封空间,可有效阻隔外界未经处理的空气,避免其干扰制动组件周围的气流环境,确保测试环境的纯净度;同时,密封罩能引导均匀可控的气流对制动器进行冷却,精准模拟车辆行驶中的散热状况,保障制动系统的性能稳定;此外,密封罩还负责将制动过程中产生的气溶胶输送至采样通道,为精确测量和评估制动器的颗粒物排放情况提供便利。欧Ⅶ排放标准对密封罩的结构尺寸、横截面设计、材料处理及采样测量等要素做了比较详细的规定,旨在建立通用准则,确保系统在制动冷却和颗粒传输效率方面的可比性。

密封罩设计时应有效抑制测试过程中湍流和局部涡旋生成,确保颗粒物随气流被高效传输至采集区域,避免因气流紊乱导致颗粒物在罩内壁或设备表面沉积。结合密封环境下的稳定气流控制,进一步抑

制颗粒物在非目标区域聚集,提高测量数据的准确性和可重复性。密封罩和管路流场优化效果如图8所示。

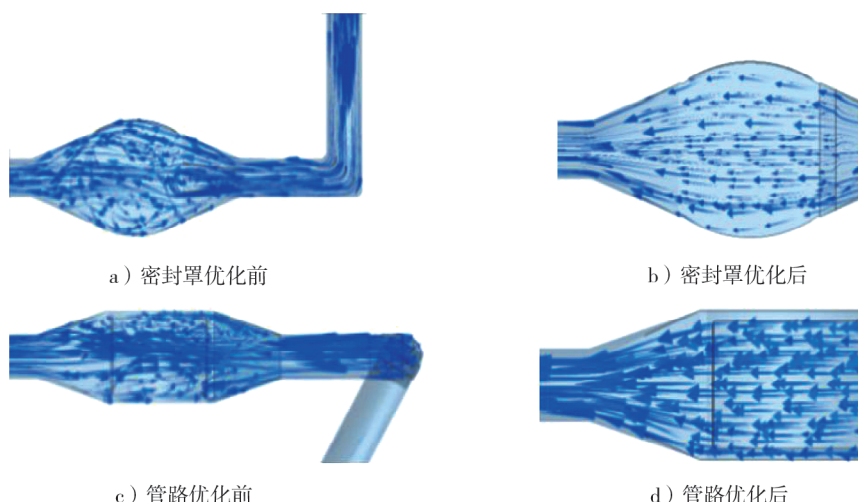


图8 密封罩和管路流场优化效果

2.2.2 PN 测量

借助凝结颗粒计数器 (condensation particle counter, CPC), PN 测量设备可以实现对粒径为 $10\text{ nm} \sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的超细颗粒计数。CPC 的工作原理为:在过饱和蒸汽环境中,颗粒物粒径增大到可通过光学方法检测,通过检测散射光产生的电脉冲并计数,确定颗粒物数量。CPC 工作原理如图9所示。在进入计数器之前,气溶胶在 PN 测量设备主机中进行预处理,保持颗粒状态稳定。

含有颗粒物的样品气体以精确控制的流量经样品入口进入凝结颗粒计数器,通过除水泵去除水分,随后进入加热饱和器,与液体浸湿芯提供的饱和蒸汽混合;然后在冷却冷凝器中,蒸汽过饱和并在颗粒物表面凝结使其粒径增大。粒径增大后的颗粒物进入检测区,被激光二极管发出、经准直和聚焦透镜的激光照射,收集透镜捕获其散射光,由光电探测器将其转换为电脉冲信号。系统通过临界孔、外部真空接口控制流量,同时监测孔板、喷嘴两端压力差和环境压力,最后对电脉冲计数,确定样品中颗粒物数量。

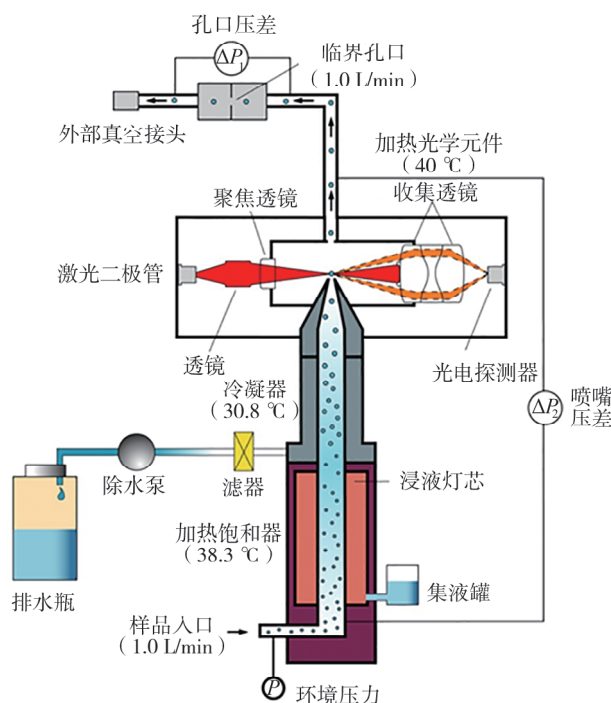


图9 CPC 工作原理

为了扩大测量范围,借助宽范围连续稀释器 (wide range continuous diluter, WCD) 技术,可以实现 $1:1$ 至超 $1\,000:1$ 的宽范围稀释比连续调节,适配不同体积分数的尾气;通过改变补充气流精确控制稀释比,保障测量准确性;采用旁路流设计,有效降低高稀释比条件下小颗粒物的传输损失,实现对含小颗粒气态介质的高精度测量;设备还具备独特的零检查功能,可检测系统泄漏与杂质,确保数据有效、测量可靠^[11]。

设备中还应包含加热催化分离器,在温度为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时将所有挥发性有机成分氧化,仅保留固体颗粒,这些固体颗粒数就是欧Ⅶ排放标准中的测量变量——SPN。通过关闭催化分离器,该设备也能够测量包

2.4 总体布局

将惯量制动台、环境模拟装置、PN/PM 测量设备以及符合标准要求的管路作为整体解决方案统一集成在一个实验室中。在场地允许的情况下,可以把所有设备管路布置在同一层。考虑到已有建成实验室的空间限制,也可以把环境模拟系统放置在二层或钢架结构上。试验室总体布局如图 11 所示。该方案能优化空间利用,确保实验室在不同场地条件下均可高效运行。

实际应用结果表明:设计的惯量制动台可以高度还原不同制动工况,精准计算车速、制动减速率、热负荷等关键参数,精确测量制动颗粒物并自动称量,CPC 可以统计粒径为 $10\text{ nm} \sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的超细颗粒,自动控制系统借助内置算法库处理数据并生成合规报告。作为应对欧Ⅶ制动颗粒物排放测量的主要手段,目前该系统已被 Otto Zimmermann、TOYOTA、TÜV NORD、TMD Friction、Bosch 等多家汽车生产制造企业和知名检测机构采用。



图 11 制动排放颗粒物测量实验室布局

3 结论

欧Ⅶ标准针对制动磨损颗粒物排放所制定的限值与测试要求是汽车排放监管的新方向,本文中提出有效应对该标准的解决方案,为行业应对法规挑战提供有力支撑。

1) 欧Ⅶ标准对 M_1 和 N_1 类轻型车制动系统设定 PM 排放限值,计划 2030 年后实施 PM 和 PN 双限值并扩大适用至 M_2 、 M_3 类客车及 N_2 、 N_3 类货车,尤其针对整车质量较大导致刹车和轮胎磨损颗粒物排放更高的电动汽车等特定车型实施严格限值,对制动磨损颗粒物排放测试涉及的环境模拟装置、滤器、传感器、密封罩、采样风道、测量设备等子系统,以及测试管路的长度、布局和内径都有明确规定,以确保测试规范科学。

2) 惯量制动台采用机械与电惯量混合模拟创新系统,精准计算关键参数,配备适配工装,可高度还原不同制动工况,为汽车制动系统研发检测打下基础。制动器总成密封罩提高测量精准度,PN 测试设备用凝结颗粒计数器和宽范围连续稀释技术精确测量 TPN 和 SPN,PM 设备运用前沿技术满足 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 测量需求,自动称质量系统覆盖颗粒物各个测量环节;自动控制系统作为集成化平台,通过高精度传感器采集参数,联动采样系统测量,借助内置算法库处理数据并一键生成合规报告。

3) 该方案满足欧Ⅶ标准测试要求,可提高测试精度、控制成本和优化空间利用。该技术不仅使汽车制造商及检测机构能够合规满足现行法规标准,更为制动系统的研发迭代与性能优化提供了高置信度数据支撑。

参考文献:

- [1] 王昌钰,李家琛,谭丹,等. 轻型车制动颗粒排放研究现状[J]. 汽车工程,2024,46(5):830-841.
- [2] 邢黎明,贾继霞,张艳红. 大气可吸入颗粒物对环境 and 人体健康的危害[J]. 安阳工学院学报,2009,8(4):48-50.
- [3] 葛蕴珊,谢汶峰,李家琛,等. 不同驾驶循环制动工况下刹车颗粒物排放特性研究[J]. 北京理工大学学报,2025,45(4):402-408.
- [4] UNECE. UNECE adopts groundbreaking regulation introducing methodology to measure particle emissions from cars and vans' braking systems [EB/OL]. (2023-06-21) [2024-01-20]. <https://unece.org/media/transport/Vehicle-Regulations/press/380012>.
- [5] 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.
- [6] 吴春玲,白晓鑫,王明达,等. 欧七排放标准解读及国七排放标准展望[J]. 内燃机,2024,40(4):1-9.

- [7] CHA S, CARTER P, BRADOW R L. Simulation of automobile brake wear dynamics and estimation of emissions [C]// Proceedings of Passenger Car Meeting & Exposition. Detroit, USA: SAE International, 1983: 502–522.
- [8] TERRES A, EBERT V, NOWAK A, et al. Particle measurement programme (PMP) [M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.
- [9] UNECE. Laboratory measurement of brake emissions for light-duty vehicles: UN GTR No. 24 [S/OL]. (2023–07–17) [2024–06–04]. <https://unece.org/transport/documents/2023/07/standards/un-gtr-no24-laboratory-measurement-brake-emissions-light-duty>.
- [10] Horiba Group. Euro 7 test equipment. Euro 7 brake Emissions test equipment. brake test systems [Z/OL]. [2025–01–04]. <https://www.horiba.com/int/automotive/applications/emissions-performance-and-durability/euro7-measurement-solutions/>.
- [11] Horiba Group. Non-exhaust / brake emissions; brake dynamometers test systems for brake emissions measurement [Z/OL]. [2025–03–04]. <https://www.horiba.com/int/automotive/applications/emissions-performance-and-durability/non-exhaust-emissions/>.
- [12] Horiba Group. Product launch; announcement of the new generation of the PFS-ONE system [Z/OL]. [2025–01–04]. https://horiba.sharepoint.com/sites/HE_Portal/SitePages/Announcement-of-the-New-Generation-of-the-PFS-ONE-System.

Solutions for measuring brake wear particulate matter emissions under Euro VII Standard

MA Long^{1,2}, SHI Xiuyong^{1,3*}, GUO Haitao², HUAN Hao², WANG Wei²,
WEN Zhe², ZHANG Dongsheng¹

1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Horiba (China) Trading Co., Ltd., Shanghai 200335, China;

3. Nanchang Automotive Institute of Intelligent and New Energy, Nanchang 330038, China

Abstract: In response to the new requirements of the Euro VII Emission Standard for brake wear particulate matter emissions, the limit values, testing methods, and testing equipment requirements of the Euro VII Emission Standard for brake wear particulate matter are deeply interpreted, a brake inertia test bench for the Euro VII emission standard is designed. The bench integrates particulate matter measurement, automatic control system, and mechanical electric inertia hybrid simulation technology, and proposes an overall laboratory layout that is suitable for different site conditions. The practical application results show that the inertia brake platform can accurately measure the number of solid particles, total particle number $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} . This design scheme not only meets the requirements of Euro VII Emission Standard, but also improves the accuracy of testing, reduces costs, and optimizes space.

Keywords: Euro VII Emission Standard; brake wear particulate matter; inertia brake test bench; non-exhaust emission

(责任编辑:刘丽君)