

插电式混动汽车多工况排放及能耗特性试验研究

常包虎, 解骐远, 刘果莹, 罗明婧

中汽研汽车检验中心(广州)有限公司, 排放节能试验研究部, 广东 广州

收稿日期: 2026年8月4日; 录用日期: 2026年9月6日; 发布日期: 2026年9月18日

摘要

为系统研究插电式混合动力汽车(PHEV)在不同行驶工况及环境条件下的排放与能耗特性, 本文以某款国六插电式混动SUV为试验对象, 设计了一套多维度工况测试矩阵开展测试。试验同步采集了WLTC与CLTC-P标准循环工况下的污染物排放量与能量消耗量, 并计算单位里程CO₂排放强度。此外, 针对急加速工况与低温冷启动工况, 探究了动力电池大倍率放电与发动机高负载协同工作时的PM/NO_x排放峰值特性, 并分析了低温冷启动工况下THC排放与暖风系统能耗特性。结果表明: WLTC工况下各污染物排放均低于CLTC-P, 但能耗高于后者; 急加速工况下, 发动机峰值转速可达4138 r/min, 并且PM和NO_x均会出现排放峰值; 低温冷启动阶段前400 s的THC排放占测试循环总排放的80%以上。

关键词

插电式混合动力汽车, WLTC, CLTC-P, 颗粒物排放, 低温冷启动

Research on the Emissions and Energy Consumption Characteristics of Plug-In Hybrid Electric Vehicles under Various Operating Conditions

Baohu Chang, Qiyuan Xie, Guoying Liu, Mingjing Luo

Emissions and Energy Efficiency Testing Research Department, China Automotive Research Institute Vehicle Inspection Center (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: August 4, 2026; accepted: September 6, 2026; published: September 18, 2026

文章引用: 常包虎, 解骐远, 刘果莹, 罗明婧. 插电式混动汽车多工况排放及能耗特性试验研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(9): 1478-1486. DOI: 10.12677/aep.2026.169149

Abstract

To systematically investigate the emission and energy consumption characteristics of a plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) under different driving cycles and environmental conditions, this paper takes a China-VI compliant PHEV SUV as the test subject and designs a multi-dimensional operating condition test matrix for conducting experiments. During the tests, pollutant emissions and energy consumption are simultaneously collected under the WLTC and CLTC-P standard driving cycles, and the CO₂ emission intensity per kilometer is calculated. In addition, this study investigates the peak emission characteristics of PM and NO_x during high-rate discharge of the power battery and coordinated high-load engine operation under hard acceleration and low-temperature cold-start conditions, and analyzes the THC emissions and heating system energy consumption during low-temperature cold starts. The results show that under the WLTC cycle, all pollutant emissions are lower than those under the CLTC-P cycle, but energy consumption is higher. During hard acceleration, the engine peak speed can reach 4138 r/min, with both PM and NO_x exhibiting emission peaks. In the low-temperature cold-start phase, THC emissions within the first 400 seconds account for more than 80% of the total emissions over the test cycle.

Keywords

Plug-In Hybrid Electric Vehicles, WLTC, CLTC-P, Particulate Matter Emissions, Cold Start at Low Temperatures

Copyright © 2026 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

插电式混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)兼具纯电动汽车环保高效与传统燃油车长续航里程的双重优势,被认为是当前最具竞争力的新能源汽车技术路线之一。然而,PHEV 多动力源、多工作模式的特点使其排放与能耗特性较传统车辆更为复杂[1]。发动机在 PHEV 运行过程中频繁启停,加之冷启动、急加速等瞬态工况的存在,导致污染物排放特性呈现显著的瞬态变化特征[2]。

在标准测试工况方面,GB/T 19753-2021《轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法》¹规定能量消耗量测试可选用 WLTC (World Light Vehicle Test Cycle)和 CLTC-P (China Light-Duty Vehicle Test Cycle-Passenger)两种工况。已有研究表明,不同工况下 PHEV 的排放与能耗表现存在显著差异。在 WLTC 城市、WLTC 完整循环及 CLTC-P 三种工况下,WLTC 城市循环的 CO、THC、NMHC 和 NO_x 排放最高,WLTC 完整循环排放最低,CLTC-P 居中。WLTC 工况下的综合油耗约为 CLTC-P 完整循环的 1.25 倍[3]。

在瞬态工况方面,PHEV 在急加速等高负荷工况下,发动机与电机协同工作,燃烧相位大幅滞后,颗粒物排放急剧升高。PHEV 还会出现高能启动,峰值转速与负荷都会达到较高的水平[4]。低温冷启动阶段,由于三元催化器尚未达到起燃温度,相比于常温冷启动测试,THC 排放尤为突出[5]。

综上,现有研究多聚焦于单一工况条件下的 PHEV 排放特性,缺乏对多维度工况的系统研究。本文以某款国六插电式混动 SUV 为研究对象,通过设计多维度工况测试矩阵测试方案,系统研究 PHEV 在不同工况条件下的排放与能耗特性,以期 PHEV 能量管理策略优化和排放控制提供理论依据与数据支撑。

¹<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=0944C24D417D5EAD3CA659EDF1DB363F>

2. 试验方案

2.1. 试验车辆

试验选用某款符合国六排放标准的插电式混合动力 SUV 作为研究对象。车辆搭载 1.5 L 涡轮增压缸内直喷汽油发动机，匹配永磁同步电机与三元锂动力电池。动力系统采用 P2 并联式混动构型，具备电量消耗(CD)与电量保持(CS)两种工作模式。车辆主要技术参数如表 1 所示。

Table 1. Key technical specifications of the vehicle

表 1. 车辆主要技术参数

参数	整备质量	排量	发动机最大功率	电机功率	动力电池容量	混动构型
数值	1850 kg	1.5 L	110 kW	80 kW	18.5 kWh	P2 并联式

2.2. 试验设备

主要测试设备包括以下设备，详细设备参数见表 2：

- ① 底盘测功机：用于模拟车辆道路行驶阻力，具备瞬态工况加载能力；
- ② 高低温排放环境舱：可实现-40℃至+60℃的温度调节范围，湿度可控；
- ③ 排放分析系统：采用定容采样(CVS)系统配合分析仪器，包括：化学发光检测器(CLD)分析 NO_x 浓度；氢火焰离子化检测器(FID)分析 THC 浓度；非分散红外分析仪(NDIR)分析 CO 浓度；
- ④ 颗粒物测量系统：采用滤膜称重法测量 PM 质量浓度，采用凝结核粒子计数器(CPC)配合挥发性颗粒物去除器(VPR)测量 PN 数量浓度；
- ⑤ 功率分析仪：实时采集动力电池电压、电流，计算电能消耗率；
- ⑥ 油耗仪：采用碳平衡法或质量法测量燃油消耗率。

Table 2. List of equipment parameters

表 2. 设备参数表

名称	厂家	型号
底盘测功机	AIP	AIP-CDM 48M 4-WD
排气分析仪	Horiba	MEXA-ONE-C1-OV
稀释采样系统 CVS	Horiba	DLT-1230
颗粒计数系统	AVL	AVL APC 489
环境仓	ETS	8000 × 8000 × 5500 mm
充电设备	TGOOD	TCDZ-DC0.7/120
功率分析仪	HIOKI	PW3390

2.3. 多维度工况测试矩阵设计

标准循环工况测试

试验依据 GB/T 19753-2021²标准要求，分别在 WLTC 和 CLTC-P 两种标准循环工况下进行测试，循环测试曲线见图 1。

²同脚注 1。

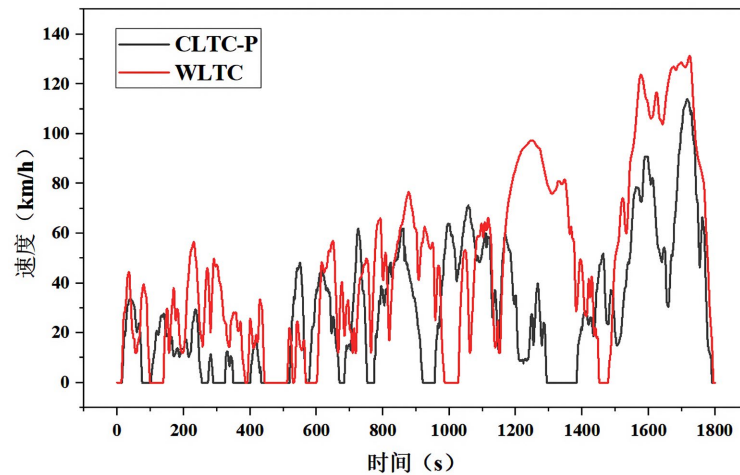


Figure 1. CLTC-P/WLTC speed-time curve diagram

图 1. CLTC-P/WLTC 速度 - 时间曲线图

测试分为两种模式，PHEV 能耗和排放测试流程如图 2 所示：

电量消耗(CD)模式：动力电池初始电量(SOC)处于较高水平(>90%)，试验持续至电量消耗模式终止条件满足；

电量保持(CS)模式：动力电池 SOC 处于平衡区间(约 25%~35%)，发动机与电机协同工作以维持 SOC 稳定。

每种工况 - 模式组合重复测试 3 次，取平均值作为最终结果。

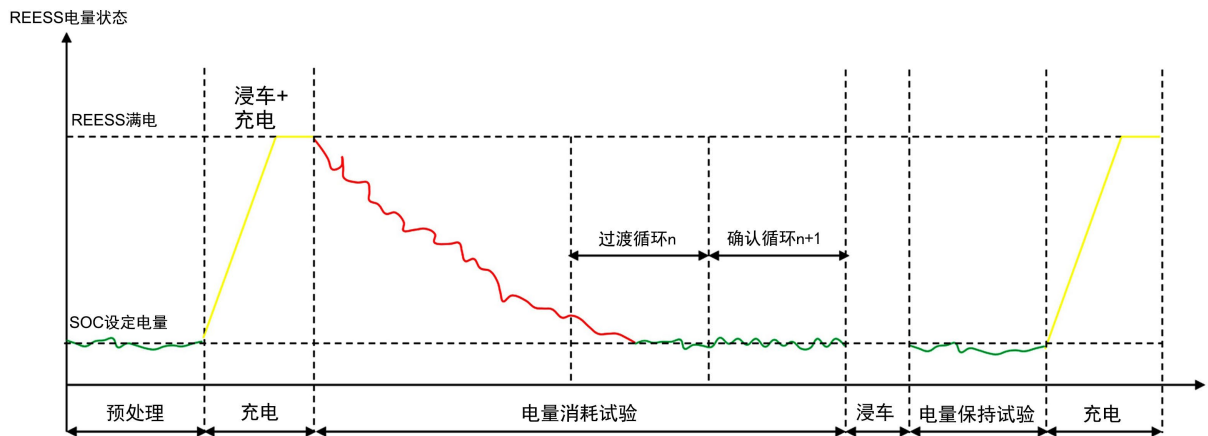


Figure 2. Test process diagram

图 2. 测试流程示意图

3. 结果与分析

3.1. 标准循环工况排放与能耗对比

3.1.1. WLTC 与 CLTC-P 工况特征差异

WLTC 与 CLTC-P 在工况动力学特征上存在显著差异。WLTC 包含低速、中速、高速和超高速四个速度段，最高车速达 131 km/h，具有较高的平均速度和加速度。CLTC-P 则基于中国实际道路行驶数据开发，包含低速、中速和高速三段，平均速度较低但怠速比例更高。这种工况动力学差异直接影响了 PHEV

的发动机工作点分布和能量管理策略。

3.1.2. 污染物排放对比

依据 GB 18352.6-2016 [6]中附录 CE 中的污染物排放量计算方法，在每个测试循环中分别用排气分析仪采集并分析尾管排气中各污染物的浓度，并计算得到 CS 模式下和 CD 模式下各污染物排放量，最后计算各污染物综合排放量，计算结果如表 3 所示。试验结果表明，在相同测试条件下，WLTC 完整循环的综合污染物排放量小于 CLTC-P，具体而言：

- **CO 排放：**冷启动加浓喷油和催化器低温导致 CO 转化效率极低，WLTC 低速段工况变化最激烈，CO 排放最高；CLTC-P 循环中高速段燃烧充分、催化器高效工作，CO 排放最低。WLTC 循环中高速段燃烧充分、催化器高效工作，CO 排放最低。
- **THC 排放：**CLTC-P 工况的 THC 排放高于 WLTC，尤其在循环初期(冷启动阶段)差异更为显著。
- **NMHC 排放：**WLTC 低速段为冷启动，发动机为快速启动会加浓喷油，而此时三元催化器温度低，尚未达到工作温度(起燃温度)，这导致大量未经转化的碳氢化合物(包括 NMHC)直接排放，使其排放量最高；CLTC-P 循环虽然也包含冷启动，但其更高的低速段占比(37.4%)和怠速比例(22.1%)导致发动机在更多时间内处于低效、不稳定的燃烧状态，同样会产生大量 NMHC，使其排放量显著高于 WLTC 完整循环。而 WLTC 循环包含更多中高速工况，发动机燃烧更充分，且较高的排气温度能使三元催化器保持高效工作，从而有效转化 NMHC，使其排放量最低。
- **NO_x 排放：**WLTC 循环的 NO_x 排放约为 CLTC-P 的 0.75~0.85 倍。这主要归因于 WLTC 循环较高的平均车速使发动机更多工作于高效区间，燃烧温度较高有利于 NO_x 的生成与后处理系统的转化。
- **PM 排放：**WLTC 循环的 PM 排放约为 CLTC-P 的 0.65~0.80 倍。CLTC-P 较高的怠速比例和频繁的加减速导致发动机更多工作于非稳态工况，缸内燃烧不充分，颗粒物生成量增加。

Table 3. WLTC urban, CLTC-P, and WLTC pollutant emissions
表 3. WLTC 城市、CLTC-P、WLTC 污染物排放量

污染物排放量	WLTC 城市段(低)	CLTC-P (全阶段)	WLTC 完成循环
CO (g/km)	0.82	0.45	0.32
THC (g/km)	0.075	0.052	0.041
NMHC (g/km)	0.065	0.042	0.034
NO _x (g/km)	0.128	0.102	0.081
PM (mg/km)	6.3	5.1	3.9
PN (#/km)	5.8×10^{11}	4.2×10^{11}	3.1×10^{11}

3.1.3. 能耗与碳排放强度

根据 GB/T 19753-2021³的计算方法分别计算 CS 模式下和 CD 模式下的油耗和电耗，接着根据 GB/T 37340-2019 [7]中简单折算法计算得到 PHEV 的综合能耗值 FC_{tot}。从表 4 中可以看出，在燃油消耗率方面，CLTC-P 工况下的油耗约为 WLTC 完整循环的 1.05 倍。这一差异主要源于两方面：其一，CLTC-P 的低速段比例更高，发动机更多工作于低效区；其二，CLTC-P 频繁的怠速 - 加速切换导致发动机启停次数增加，每次启动均伴随额外的燃油消耗。在电能消耗率方面，两种工况的差异更为显著。WLTC 循环的超高速段(>120 km/h)使电机工作于高转速区间，电驱动系统效率下降，电能消耗率升高。CLTC-P 最高

³同脚注 1。

车速较低，电驱动系统更多工作于高效区间。

Table 4. CLTC-P and WLTC energy consumption and CO₂ emissions
表 4. CLTC-P、WLTC 能耗和 CO₂ 排放量

能耗和 CO ₂ 排放	CLTC-P (全阶段)	WLTC 完整循环
CS 油耗(L/100 km)	5.875	6.161
CD 电耗(kWh/km)	186.806	239.495
综合能耗(L/100 km)	8.044	8.941
CS-CO ₂ (g/km)	138.196	145.012
CD-CO ₂ (g/km)	2.578	3.523
综合 CO ₂ (g/km)	2.246	3.932

此外，按照《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》[6]规定的 CO₂ 计算方法，计算单位里程 CO₂ 排放量(碳排放强度)：

- **WLTC 循环：**综合碳排放强度约为 3.523 g/km (CD 模式)和 145.012 g/km (CS 模式)；
- **CLTC-P 循环：**综合碳排放强度约为 2.578 g/km (CD 模式)和 138.196 g/km (CS 模式)。

WLTC 循环较高的车速虽然降低了污染物排放，但更高的行驶阻力导致能耗增加，进而使碳排放强度升高。

3.2. 急加速工况瞬态排放特性

3.2.1. 发动机高能启动过程

急加速工况下，PHEV 的发动机控制单元(ECU)根据油门踏板深度、车速及电池 SOC 等因素决策发动机的启动与负荷分配。急加速工况发动机转速/负荷 - 时间曲线图如图 3 所示，可见在全油门急加速过程中，发动机峰值转速可达 4138 r/min，峰值负荷可达 1.73 MPa，同时还会造成缸内温度分布不均和局部过浓区的形成。

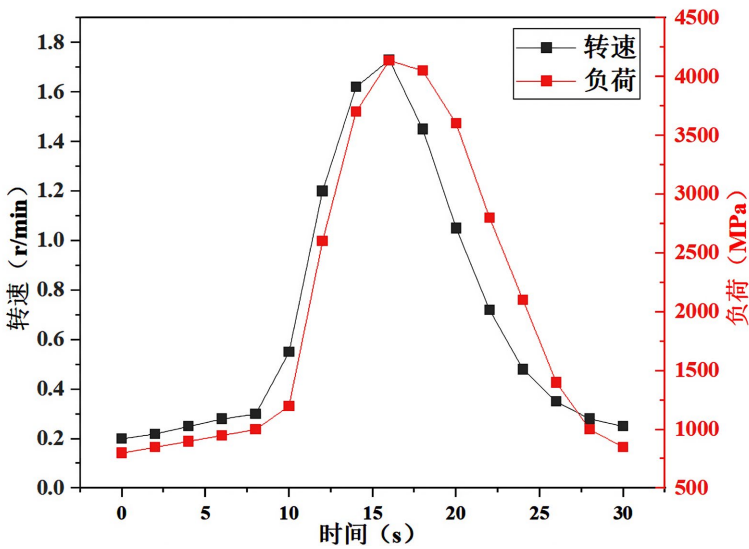


Figure 3. Engine speed/load versus time curve for rapid acceleration conditions
图 3. 急加速工况发动机转速/负荷 - 时间曲线图

3.2.2. PM/NO_x 排放峰值

急加速过程中, PM 与 NO_x 排放呈现显著的瞬态峰值特征如图 4 所示。

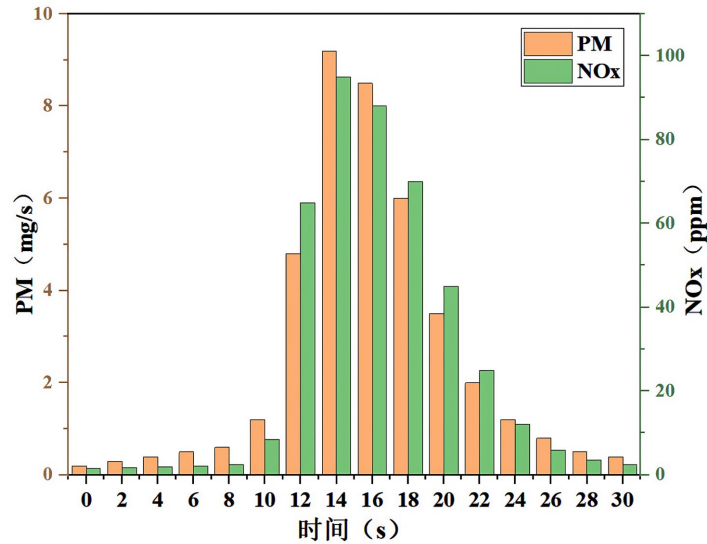


Figure 4. PM/NO_x versus time bar chart for rapid acceleration conditions
图 4. 急加速工况 PM/NO_x-时间柱状图

- PM 排放: 在急加速初期(发动机冷启动后的前 10~20 s), PM 排放浓度可达稳态工况的 5~10 倍。这主要是因为冷启动时发动机缸壁温度低, 燃油雾化不良, 加之高负荷下的高喷油量, 导致局部过浓区增多, 碳烟生成量急剧增加。
- NO_x 排放: 急加速过程中 NO_x 排放同样出现峰值, 但峰值出现时间略滞后于 PM (约在加速开始后 5~10 s)。这是由于 NO_x 的生成需要较高的缸内温度, 而缸内温度的升高需要一定的热惯性时间。

3.3. 低温冷启动阶段排放与能耗关联性

3.3.1. 预热阶段 THC 排放时序特征

低温冷启动(-7℃)条件下, 发动机预热阶段(0~450 s)的 THC 排放呈现明显的时序分布特征。

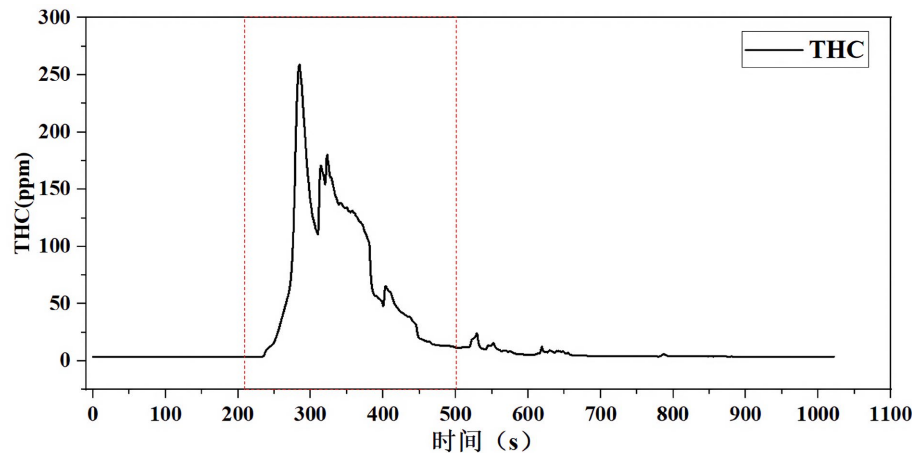


Figure 5. THC emissions versus time curve at low-temperature conditions
图 5. 低温工况 THC 排放量 - 时间曲线图

在启动后的前 30 s 内，由于缸内温度极低，燃油雾化和蒸发严重不良，加之三元催化器尚未达到起燃温度(约 250℃~300℃)，THC 排放浓度达到峰值。随着发动机运行时间的延长，缸壁温度和冷却液温度逐渐升高，燃油雾化改善，THC 排放逐步下降。

试验结果如图 5 所示，前 450 s 的 THC 污染物排放量为 2156 mg，整个测试循环的 THC 排放量为 2572 mg，可见，低温冷启动条件下前 450 s 的 THC 排放约占整个测试循环 THC 总排放的 80%以上。这一比例远高于常温启动条件下的相应数值，凸显了低温环境对 PHEV 排放的严峻挑战。

3.3.2. 暖风系统能耗特征

低温环境下，PHEV 的座舱加热主要依靠 PTC (Positive Temperature Coefficient)电加热器。测试结果如表 5 所示，可见，在-7℃环境温度下，PTC 工作经历了快速升温、过渡升温和保温维持三个阶段，快速升温阶段，PTC 功率开到最大以供座舱内温度快速爬升，过渡升温阶段维持中等的加热功率继续升温，等温度达到设定温度时，保持恒定的加热功率以维持座舱温度保持恒定。将乘员舱温度从-7℃加热至 22℃并维持恒定，三个阶段的暖风系统功率逐渐减小，PTC 加热器的平均功率约为 4.78 kW。

Table 5. Energy consumption table for the heating system under low-temperature conditions
表 5. 低温工况下暖风系统能耗表

阶段	时间范围(s)	PTC 功率(kW)	阶段时长(s)	暖风系统能耗(kWh)	备注
快速升温	0~200	10	200	0.56	最大功率快速升温
过渡升温	200~500	5	300	0.416	降低功率继续升温
保温维持	500~1120	2	620	0.517	维持 22℃恒温
整个测试循环	0~1120	4.78 (加权平均)	1020	1.354	平均功率

4. 结论

本文以某款国六插电式混动 SUV 为研究对象,通过多维度工况测试矩阵方案设计,系统研究了 PHEV 在不同行驶工况及环境条件下的排放与能耗特性，主要结论如下：

(1) **标准工况对比：**WLTC 完整循环的污染物排放(NO_x, PM, THC)低于 CLTC-P，但能耗(燃油消耗率与电能消耗率)高于后者。WLTC 工况下的综合能耗约为 CLTC-P 完整循环的 1.12 倍。WLTC 循环的 CS 模式下碳排放强度为 145 g CO₂/km，CLTC-P 为 138.2 g CO₂/km。

(2) **急加速工况：**急加速工况下 PHEV 发动机峰值转速可达 4138 r/min，峰值负荷可达 1.73 MPa，PM 和 NO_x 排放会出现明显的峰值。高负荷/高转速运行区间(>2800 r/min 或>80%负荷)的 PM 和 NO_x 排放尤为显著。

(3) **低温冷启动工况：**在-7℃低温冷启动条件下，前 450 s 的 THC 排放占整个 WLTC 循环 THC 总排放的 80%以上。暖风系统(PTC 加热器)平均功率消耗为 4.78 kW，整个测试循环暖风系统能耗约占总电能消耗的 15%左右。

本文研究了多工况下插电式混合动力汽车的排放及能耗特性，为 PHEV 的优化设计、为政府制定能耗补贴或税收政策，以及为消费者选择最适合其驾驶习惯的车型提供更具体的量化建议。

参考文献

[1] 周定武, 雷艳, 仇滔, 陈则句. 增程式和插电式混合动力车辆排放特性分析[J]. 中南工业大学学报, 2025, 56(10): 4164-4172.
[2] 聂彦鑫, 张永生, 康征, 等. 插电式混合动力汽车工况能耗及排放特性研究[J]. 汽车技术, 2013(10): 8-13.

- [3] 王跃龙, 刘磊, 刘启, 等. 插电式混合动力车型 WLTC 与 CLTC-P 工况的能耗及排放对比[J]. 北京汽车, 2024(1): 16-20.
- [4] 谭贵坤, 李雁飞. 并联式 PHEV 高能启动过程的燃烧及排放特性研究[C]//中国内燃机学会. 交通能源与智能动力大会论文集. 2022: 9.
- [5] Yang, F., Zhong, C.Z. and Li, C. (2021) Research on the Effect of Different Test Cycles on Low Temperature Emissions and Fuel Consumption of Light Plug-In Hybrid Cars. *E3S Web of Conferences*, **268**, Article 01028.
- [6] 生态环境部. GB 18352.6-2016 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.
- [7] GB/T 37340-2019 电动汽车能耗折算方法[S/OL].
<https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=59FFD3D8B126FD2D44F79251566145B1>, 2019-03-25.