

怠速起停对汽油车油耗及颗粒数量排放的影响

胡志远^{1*}, 付佳铭¹, 韩维维², 全轶枫² (1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上海机动车检测认证技术研究中心有限公司, 上海 201805)

摘要: 以一辆配置怠速起停系统的国 V 缸内直喷汽油车为研究对象, 使用底盘测功机试验系统、全流稀释采样系统和固态颗粒计数系统, 试验研究怠速起停对缸内直喷汽油车油耗与颗粒数量排放的影响, 并分析起动温度、试验循环等因素的影响。结果表明, NEDC 循环车辆冷机起动时, 车辆怠速起停系统开启的百公里油耗降低了 5.1%, 颗粒数量排放升高了 16.7%; 车辆热机起动, 怠速起停开启产生的百公里油耗降幅增大到 7.3%, 颗粒数量排放升幅减小至 9.3%; WLTC 循环热机起动, 车辆怠速起停系统开启的百公里油耗降幅减少到 1.7%, 颗粒数量排放升幅减少到 6.2%。怠速起停有利于降低汽车的百公里油耗, 但不利于缸内直喷汽油车颗粒数量排放的控制。

关键词: 怠速起停; 缸内直喷汽油车; 油耗; 颗粒数量; 起动温度; 循环

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)03-1016-07

Study on the effect of idle start-stop technology on fuel consumption and particle number emission of GDI vehicle. HU Zhi-yuan^{1*}, FU Jia-ming¹, HAN Wei-wei², QUAN Yi-feng² (1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Motor Vehicle Inspection Certification & Tech Innovation Center Co., Ltd, Shanghai, 201805, China). *China Environmental Science*, 2020, 40(3): 1016~1022

Abstract: In this paper, a gasoline direct injection (GDI) vehicle certified to meet China V emission standard equipped with idle start-stop system was taken as the research object. By using the chassis dynamometer test system, the full-flow dilution sampling system and the particle number measurement system, the paper aimed to study the effect of idle start-stop system on fuel consumption and particle number emission of GDI vehicles, as well as the effect of start temperature and testing cycles. The results showed that the fuel consumption of the test GDI vehicle with idle start-stop system on decreased by 5.1% and the emission of particles number increased by 16.7% under the NEDC cold-start condition. In the case of warm-start, the fuel consumption decreased by 7.3% and the emission of particles number increased by 9.3%. Under WLTC warm-start condition, the fuel-saving effect of idle start-stop system was less notable, when fuel consumption only decreased by 1.7% and the emission of particles number also just increased by 6.2%. The idle start-stop system was beneficial to lower fuel consumption, while it was not conducive to the control of the particle number emission.

Key words: idle start-stop technology; GDI vehicle; fuel consumption; particle number emission; start temperature; testing cycle

随着汽车保有量的快速增长和城市一体化进程的加快, 汽车成为我国大气颗粒物的重要来源^[1]。据测算, 在我国深圳、北京、上海等人口密集城市, 汽车等移动源对环境 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率接近或超过 30%^[2]。缸内直喷汽油车直接将燃油喷入气缸, 其产生的颗粒数量排放比进气道喷射汽油车高 1 个数量级^[3], 这些颗粒物以 100nm 以下超细颗粒物为主^[4-6], 具有更大的比表面积和更强的穿透能力, 对人体危害很大^[7]。另一方面, 随着汽车保有量的快速增长, 城市交通拥堵日益加剧, 车辆怠速占比越来越高^[8], 汽车怠速排放污染物对城市大气环境影响越来越大^[9], 采取措施降低汽车怠速油耗和排放成为研究热点。

怠速起停是一种在车辆等红灯怠速时自动关闭发动机, 在车辆起步时自动快速起动发动机的技术,

可有效降低车辆的燃油消耗和 CO_2 排放^[10]。研究发现, 怠速起停系统开启时, 微混电动车 NEDC 循环油耗降低 3%~6%, CO 、 HC 、 NO_x 等污染物排放降低 5%~20%^[11]; 天然气公交车中国典型城市公交循环的燃气成本降低 0.518 元/km, HC 、 NO_x 和颗粒物排放分别降低 32%、44%和 36%^[12]。美国、德国等纷纷对车辆怠速关闭发动机做出建议或强制规定^[13], 怠速起停技术在世界范围内得到广泛应用。但是, 发动机起动时, 其转速、进气道压力剧烈变化, 起动过程瞬态特性更加突出, 不利于燃烧及排放控制^[14], 发动机频繁起停对车辆污染物排放产生不利影响^[15]。而

收稿日期: 2019-08-02

基金项目: 上海汽车工业科技发展基金资助项目(1750)

* 责任作者, 副教授, huzhiyuan@tongji.edu.cn

且,怠速停机会造成排气管及催化器温度降低,催化器转化率下降,发动机再次启动时排放恶化^[16].柴油混合动力公交客车起停开启时中国典型城市公交循环的 CO₂、CO、HC、NO_x 污染物排放降低,PM 排放增加,且在发动机关闭和启动时均出现瞬时峰值^[17].启动工况是缸内直喷汽油车颗粒排放的主要生成工况^[18-19],怠速起停对缸内直喷汽油车油耗及颗粒数量排放影响研究未见报道.

本文以一辆配置怠速起停系统的国 V 缸内直喷汽油车为研究对象,使用底盘测功机试验系统、全流稀释采样系统和固态颗粒计数系统,研究怠速起停对缸内直喷汽油车油耗及颗粒数量排放的影响,并分析启动温度、试验循环等因素的影响,综合评价怠速起停技术对缸内直喷汽油车油耗和颗粒数量排放的影响.

1 材料与方法

1.1 试验车辆及设备

试验样车为配备怠速起停系统的缸内直喷汽油车,满足国 V 排放标准,主要技术参数如表 1 所示.

表 1 试验车辆主要技术参数
Table 1 Main technique parameters of test vehicle

项目	参数
整车整备质量(kg)	1365
长×宽×高(mm)	4537×1834×1682
发动机功率(kW)	96
发动机排量(L)	1395
发动机额定转速(r/min)	6500
怠速转速(r/min)	750±100
怠速起停系统开启冷却液温度(℃)	>48
怠速起停系统开启电池电量(SOC/%)	>60

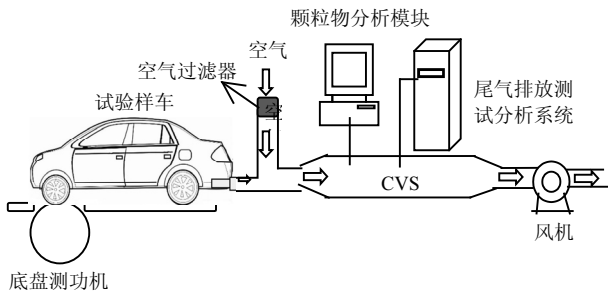


图 1 试验系统示意
Fig.1 Schematic diagram of test system

试验设备包括 4WD VULCAN EMS-CD48L 双

轴四驱底盘测功机试验系统, MEXA-7400LE 尾气采样分析系统, 全流稀释采样系统 CVS-7200, MEXA-2000SPCS 固态颗粒计数系统等,试验系统示意图如图 1 所示.

1.2 试验方案及循环

油耗测试根据 GB/T 19233-2008《轻型汽车燃料消耗量试验方法》^[20]进行,排放测试根据 GB 18352.5-2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》^[21]进行.试验时,分别将车辆怠速起停系统设置为开启或关闭状态,每次试验重复 2 次,到两次试验结果的平均进行分析.

GB19233-2008 和 GB 18352.5-2013 规定的测试循环均为新欧洲驾驶循环(NEDC),随着汽车排放和油耗法规的加严,GB18352.6-2016《轻型汽车污染物排放限值及测试方法(中国第六阶段)》^[22]将试验循环调整为全球轻型车统一测试循环(WLTC),下一阶段油耗法规征求意见稿 GB 19578《乘用车燃料消耗量限值》^[23]也对试验循环进行了相应调整.因此,本次试验同时选择 NEDC 和 WLTC 循环.NEDC 和 WLTC 循环时间-速度曲线如图 2 所示.

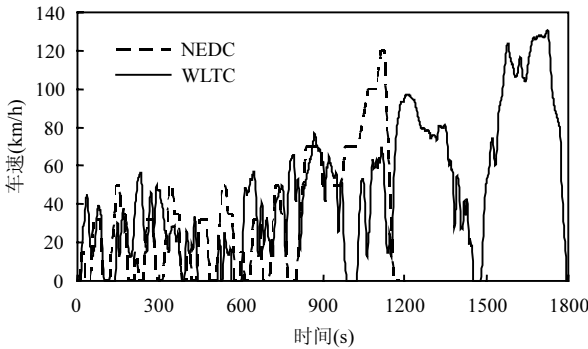


图 2 NEDC、WLTC 循环时间-速度曲线
Fig.2 Velocity-time curves of NEDC and WLTC

由图 2 可见,NEDC 循环持续 1180s,由 4 个城区工况和 1 个郊区工况组成,包括怠速、加速、匀速和减速 4 种行驶模式,怠速时间 280s,占循环总时间的 23.7%.WLTC 循环持续 1800s,由低速段、中速段、高速段和超高速段 4 个特征工况组成,怠速时间占循环总时间的 12.6%.NEDC 和 WLTC 循环工况特征如表 2 所示由表 2 可见,与 NEDC 循环比较,WLTC 循环的最高车速由 NEDC 循环的 120km/h 增大至 131.3km/h,最大加速度由 NEDC 循环的 1.04m/s² 增大至 1.67m/s²,WLTC 循环的瞬态性更强,怠速比例

降低,工况覆盖范围更广.

表 2 NEDC 和 WLTC 循环工况特征
Table 2 Operating characteristics of NEDC and WLTC

项目	NEDC	WLTC
运行时间(s)	1180	1800
运行里程(km)	11.04	23.25
最高车速(km/h)	120.0	131.3
平均速度(km/h)	33.6	46.5
最大加速度(m/s ²)	1.04	1.67
怠速比例(%)	23.7	12.6
怠速次数(次)	14	9

2 结果及分析

2.1 怠速起停对车辆油耗及颗粒数量排放的影响

表 3 为试验车辆在 GB19233-2008^[20]和 GB 18352.5-2013^[21]规定的 NEDC 循环和冷机状态下怠速起停功能开启、关闭时车辆油耗和污染物排放结果.由表 3 可见,试验车辆所有污染物满足国 V 法规限值,怠速起停开启时车辆油耗降低 5.1%,HC、CO、NO_x 和 PM 排放分别降低 3.2%、14.5%、10.5%和 14.2%,颗粒数量(PN)排放升高 16.7%.

表 3 试验车辆怠速起停开启/关闭的油耗与排放
Table 3 Fuel consumption and pollutants emission of test vehicle under idle start-stop on/off operating mode

项目	怠速起停(关)	怠速起停(开)	国 V 限值
油耗(L/100km)	6.33	6.01	
HC(g/km)	0.031	0.030	0.10
CO(g/km)	0.310	0.265	1.00
NO _x (g/km)	0.019	0.017	0.06
PM(mg/km)	0.667	0.572	4.5
PN(个/km)	4.95×10 ¹¹	5.78×10 ¹¹	

NEDC 循环包括怠速(车辆速度 $v=0$,加速度 $a=0$)、加速(车辆速度 $v>0$,加速度 $a>0$)、匀速(车辆速度 $v>0$,加速度 $a=0$)和减速(车辆速度 $v>0$,加速度 $a<0$)4 种行驶模式.为进一步分析怠速起停对车辆油耗和颗粒数量排放的影响,基于试验得到的油耗和排放瞬态数据,分别累加得到怠速、加速、匀速和减速 4 种行驶模式下怠速起停开启和关闭时的油耗和排放.

$$S = \sum s_i \tag{1}$$

式中: S 为车辆怠速、加速、匀速、减速某种行驶的

油耗(或排放), s_i 为车辆某种行驶模式的瞬态油耗(或瞬态排放).

由图 3(a)可见,怠速起停开启, NEDC 循环车辆怠速行驶模式的油耗降低 57.7%.这是因为,怠速起停系统开启时,当冷却液温度等满足起停功能开启阈值后,车辆怠速时自动关闭发动机,不消耗燃料并产生排放,车辆怠速油耗和排放降低^[24].同时由图 3(a)可见,NEDC 循环车辆加速、减速和匀速 3 种行驶模式,怠速起停功能开启、关闭对车辆油耗的影响较小.因此,车辆怠速行驶模式油耗降低是导致其 NEDC 循环油耗降低的主要原因.

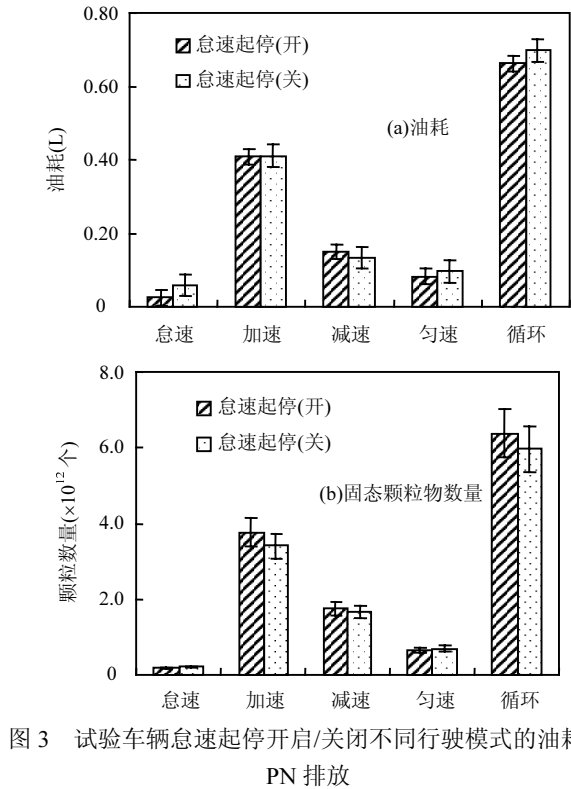


图 3 试验车辆怠速起停开启/关闭不同行驶模式的油耗及 PN 排放
Fig.3 Fuel consumption and particle number emission of different driving condition of test vehicle under idle start-stop on/off operating mode

由图 3(b)可见,怠速起停开启时,一方面,车辆 NEDC 循环怠速行驶模式 PN 排放减少 3.75×10^{10} 个.另一方面,怠速起停功能开启时车辆加速行驶模式 PN 排放增加 3.67×10^{11} 个,加速行驶模式 PN 增加量超过怠速行驶模式 PN 排放降低量,导致怠速起停开启时车辆 PN 排放增加.已有研究表明空间浓混合气的不完全燃烧与壁面油膜的池火燃烧是缸内直喷汽油机产生颗粒的主要诱因^[25-26].当发动机重新起

动时,其转速、进气道压力剧烈变化,起动过程瞬态特性突出,易形成较浓的空间混合气,混合气不完全燃烧比例升高,颗粒排放增加^[15].

怠速起停功能开启、关闭时试验车辆 NEDC 循环前 300s 的瞬态 PN 排放如图 4 所示.

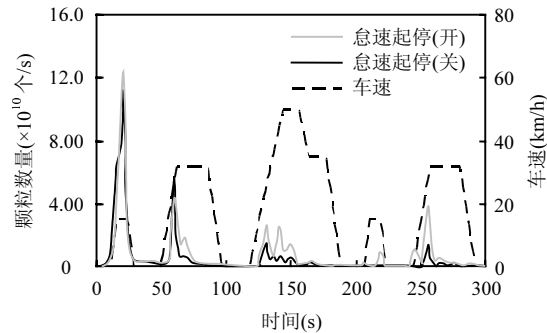


图 4 试验车辆怠速起停开启/关闭 NEDC 循环前 300s 瞬态 PN 排放

Fig.4 Transient particle number emission of test vehicle during 0~300s of NEDC under idle start-stop on/off operating mode

图 5 为车辆 NEDC 循环冷机起动,冷却液温度满足怠速起停系统开启阈值后(循环开始 70s),车辆以不同的加速度起步加速行驶产生的 PN 排放.由图 5 可见,怠速起停开启时,车辆以不同的加速度起步加速行驶产生的 PN 排放高于怠速关闭状态.随着加速度的减小,加速时间的增长,怠速起停对加速行驶模式 PN 增加的影响减弱.

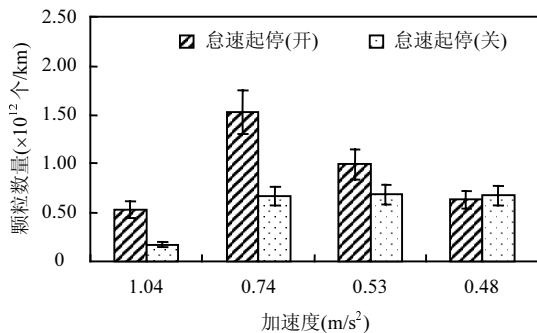


图 5 试验车辆怠速起停开启/关闭 NEDC 循环不同加速起步的 PN 排放

Fig.5 Particle number emission of test vehicle at different start acceleration driving condition of NEDC under idle start-stop on/off operating mode

2.2 起动温度对车辆怠速起停油耗及 PN 排放的影响

GB19233-2008^[20]和 GB 18352.5-2013^[21]规定的车辆温度状态为冷机状态,而车辆实际使用中怠速起停系统开启时,车辆在等红灯时自动关闭发动机,车辆再次起步时,自动快速起动的发动机为热机状态.为考察起动温度对车辆怠速起停油耗及 PN 排放的影响,在冷机起动试验结束 30min 后,进行热机起动怠速起停开启、关闭试验.

表 4 冷/热机起动怠速起停开启/关闭油耗与 PN 排放

Table 4 Fuel consumption and particle number emission of test vehicle cold/warm-start condition under idle start-stop on/off operating mode

项目	怠速起停(关)	怠速起停(开)
冷机油耗(L/100km)	6.33	6.01
冷机 PN(个/km)	4.95×10^{11}	5.78×10^{11}
热机油耗(L/100km)	5.88	5.46
热机 PN(个/km)	3.65×10^{11}	3.95×10^{11}

由表 4 可见, NEDC 循环热机起动的油耗低于冷机起动,怠速起停对车辆油耗降低效果变好,由冷机状态的 5.1%增大到 7.3%.同时,热机起动的 PN 排放低于冷机起动,怠速起停开启对车辆 PN 排放增加的影响幅度变小,由冷机起动的 16.7%减小到 9.3%.这是因为车辆热机起动时,循环开始时发动机冷却液温度即高于怠速起停功能开启阈值,车辆怠速时即自动关闭发动机,怠速起停系统工作比(成功实现怠速停机的时间比例)增大,怠速模式油耗和 PN 排放低于冷机起动.

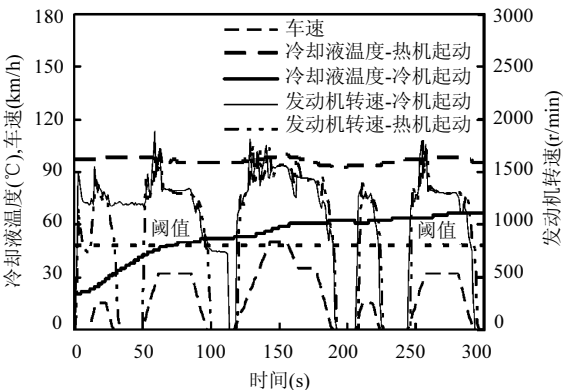


图 6 怠速起停开启试验车辆冷、热机起动 NEDC 循环前 300s 发动机转速与冷却液温度变化曲线

Fig.6 Engine speed, coolant temperature of test vehicle during 0~300s of NEDC at cold/warm-start condition under idle start-stop on operating mode

由图 6 可见,车辆冷机起动时,车辆起动后冷却液温度逐渐升高,起动 70s 后才高于怠速起停功能开启阈值($>48^{\circ}\text{C}$),NEDC 第二个怠速段(96~116s)怠速时才自动关闭发动机,即发动机转速降为零.NEDC 循环第一个怠速段(28~48s),虽然车辆处于怠速行驶模式,由于此时的冷却液温度低于怠速起停开启阈值,发动机转速不为零.车辆热机起动时,循环开始时发动机冷却液温度即高于怠速起停功能开启阈值,只要车辆处于怠速行驶模式,发动机即自动关闭,转速降为零,车辆热机起动怠速起停系统工作比增大,怠速模式油耗和 PN 排放较低.

另一方面,颗粒生成量与怠速时发动机的热力状态有关.车辆热机起动时发动机的热力状态较好,其喷油量及喷油策略和冷机起动不同,混合气燃烧质量较差导致颗粒生成量增加的可能性减少.首先,车辆冷机起动时因燃烧室温度较低、壁面油膜的蒸发量小,池火燃烧加剧^[27],颗粒生成量增加;同时由于此时的负荷较低而传热量较大使燃气温度下降,对颗粒的氧化能力减弱,颗粒排放增加.第二,车辆冷机起动后,为缩短三效催化器的升温时间,使其尽快起燃,常采用推迟点火或混合气分层二次喷油策略,颗粒累积数量较多^[28-29].第三,车辆热机起动时,发动机和三元催化的温度较高,发动机频繁起/停对车辆污染物排放产生的不利影响减弱^[15].以上因素综合作用导致车辆热机起动 PN 排放降低,怠速起停对车辆 PN 排放增加的影响幅度变小.

2.3 测试循环对车辆怠速起停油耗及 PN 排放的影响

为考察测试循环对车辆怠速起停油耗及颗粒数量排放的影响,在 NEDC 循环热机起动试验结束 30min 后,进行了 WLTC 循环热机起动怠速起停开启、关闭试验.

表 5 车辆 NEDC 和 WLTC 循环热机起动怠速起停开启/关闭的油耗与 PN 排放

Table 5 Fuel consumption and particle number emission of test vehicle warm-start condition during NEDC and WLTC under idle start-stop on/off operating mode

项目	怠速起停(关)	怠速起停(开)
NEDC 油耗(L/100km)	5.88	5.46
NEDC PN(个/km)	3.65×10^{11}	3.95×10^{11}
WLTC 油耗(L/100km)	5.99	5.89
WLTC PN(个/km)	5.91×10^{11}	6.27×10^{11}

由表 5 可见,与 NEDC 循环比较,试验车辆 WLTC 循环的油耗增加.怠速起停关闭,车辆热机起动的百公里油耗由 NEDC 循环的 5.88L/100km 增加到 WLTC 循环的 5.99L/100km,增加了 1.9%;怠速起停开启,车辆热机起动的百公里油耗由 NEDC 循环的 5.46L/100km 增加到 WLTC 循环的 5.89L/100km,增加了 8.4%,怠速起停开启产生的节油效果由 NEDC 循环的 7.3%减少到 WLTC 循环的 1.7%.这是因为,WLTC 循环的怠速比例为 12.6%,远低于 NEDC 循环的 23.7%,怠速起停开启的节油效果降低.另外,WLTC 循环的瞬态性较强,导致车辆的燃料消耗增加,怠速油耗占循环油耗的比例降低,进一步削弱了怠速起停对车辆的节油效果.相关研究结果显示,在我国城区交通状况下,怠速起停技术可以实现 5%~10%的节油率^[30],可参照美国等制定基于 WLTC 循环的怠速起停循环外油耗奖励法规,综合评价怠速起停技术的节能效果.图 7 为试验车辆 NEDC 循环和 WLTC 循环热机起动,怠速起停开启和关闭时车辆怠速、加速、减速与匀速 4 种行驶模式的油耗.其中,WLTC 循环的燃油消耗量约为 NEDC 循环的约 2.1 倍,怠速油耗占循环油耗的比例(2.5%)远低于 NEDC 循环的 7.1%.

对比表 5,怠速起停关闭,车辆热机起动的 PN 排放由 NEDC 循环的 3.65×10^{11} 个/km 增加到 WLTC 循环的 5.91×10^{11} 个/km,增加了 1.62 倍;怠速起停开启,车辆热机起动 PN 排放由 NEDC 循环的 3.95×10^{11} 个/km 增加到 WLTC 循环 6.27×10^{11} 个/km,增加了 1.57 倍,怠速起停对车辆 PN 排放增加幅度变小,由 NEDC 循环的 9.3%减少为 WLTC 循环的 6.2%.这是因为,WLTC 循环瞬态性更强,加速行驶模式产生的 PN 排放增加.而且,WLTC 超高速工况也产生大量的 PN 排放^[31],怠速起停对车辆 PN 排放增加幅度变小.图 8 为试验车辆 NEDC 循环和 WLTC 循环热机起动,怠速起停开启和关闭时车辆怠速、加速、减速与匀速 4 种行驶模式的 PN 排放.

由图 8 可见,WLTC 循环产生的 PN 排放总量约为 NEDC 循环的 3.3 倍.怠速起停关闭状态,怠速模式产生的 PN 排放占循环 PN 总排放的比例(0.7%)远低于 NEDC 循环的 3.6%,怠速起停对车辆 PN 排放增加的贡献变小.

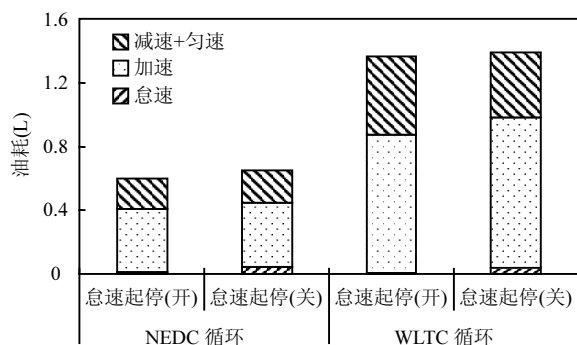


图7 试验循环对车辆怠速起停油耗的影响

Fig.7 Effect of driving cycles on fuel consumption of test vehicle under idle start-stop on/off operating mode

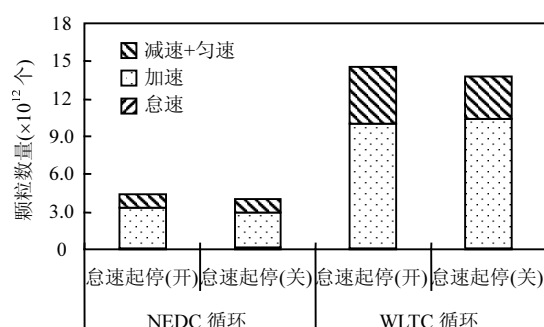


图8 试验循环对车辆怠速起停 PN 排放的影响

Fig.8 Effect of driving cycles on particle number emission of test vehicle under idle start-stop on/off operating mode

3 结论

3.1 NEDC 循环冷机起动,试验车辆怠速起停开启的百公里油耗降低 5.1%,HC、CO、NO_x 和 PM 排放分别降低 3.2%、14.5%、10.5%和 14.2%,但 PN 排放升高 16.7%。怠速起停开启时车辆加速行驶模式导致的 PN 排放增加量大于发动机怠速停机带来的 PN 排放减少量是缸内直喷汽油车怠速起停开启时 PN 升高的主要原因。

3.2 与冷机起动相比,试验车辆 NEDC 循环热机起动的油耗和 PN 排放降低,怠速起停油耗改善效果由冷机起动 5.1%增大到热机起动的 7.3%;PN 排放升高幅度由冷机起动的 16.7%减小到热机起动和 9.3%。

3.3 与 NEDC 循环热机起动相比,试验车辆 WLTC 循环热机起动的油耗消耗量和 PN 排放分别增加约 2.1 倍和 1.6 倍,怠速起停节油效果由 NEDC 循环的 7.3%减少到 WLTC 循环的 1.7%;PN 排放升高幅度由 NEDC 循环的 9.3%减少为 WLTC 循环的 6.2%。

参考文献:

- [1] Wu Y, Zhang S, Hao J, et al. On-road vehicle emissions and their control in China: A review and outlook [J]. Science of The Total Environment, 2017,574:332-349.
- [2] 中国机动车环境管理年报(2018) [EB/OL]. 北京:中华人民共和国生态环境部, <http://dqhj.mee.gov.cn/jdchjgl/zhgltd/201806/P020180604354753261746.pdf>. China mobile source environmental management annual report (2018) [EB/OL]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's of China, <http://dqhj.mee.gov.cn/jdchjgl/zhgltd/201806/P020180604354753261746.pdf>.
- [3] 付海超,李昕晏,王建海,等.GDI 与 PFI 汽油车微粒排放特性的试验研究 [J]. 汽车工程, 2014,(10):1163-1170. Fu H C, Li X M, Wang J H, et al. An experimental study on particulate emission characteristics of GDI and PFI vehicles [J]. Automotive Engineering, 2014,(10):1163-1170.
- [4] 樊筱筱,蒋靖坤,张强,等.轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 [J]. 环境科学, 2016,37(10):3743-3749. Fan X X, Jiang J K, Zhang Q, et al. Number concentration and size distribution of particles Emitted by light-duty gasoline vehicles [J]. Environmental Science, 2016,37(10):3743-3749.
- [5] 宋博,胡雷,全铁枫,等.缸内直喷汽油车 WLTC 颗粒物排放试验研究 [J]. 汽车技术, 2017,(6):24-28. Song B, Hu L, Quan Y F, et al. Experimental study on characteristics of particulate emission from a GDI vehicle under WLTC [J]. Automobile Technology, 2017,(6):24-28.
- [6] 胡雷,全铁枫,宋博,等.满足国六排放的缸内直喷汽油车污染物排放特性试验研究 [J]. 环境科学学报, 2018,38(9):117-123. Hu L, Quang Y F, Song B, et al. Experimental investigation on emission characteristics from a gasoline direct injection light-duty vehicle certified to meet China VI regulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(9):117-123.
- [7] Chen R, Hu B, Liu Y, et al. Beyond PM_{2.5}: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects, 2016:S0304416516300745.
- [8] 邢宇.汽车怠速启停及能量管理系统研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2015. Xing Y, Study on vehicle idling start-stop and energy management system [D]. Xu Zhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [9] 吴国磊,罗毅,李玺尧.怠速下机动车气体污染物排放水平研究 [J]. 价值工程, 2014,(28):284-285. Wu G L, Lou Y, Li X Y. Study on emission level of motor vehicle gaseous pollutants at idle speed [J]. Value Engineering, 2014,(28):284-285.
- [10] Fonseca N, Jesús C, Manuel V. Influence of the stop/start system on CO₂ emissions of a diesel vehicle in urban traffic [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011,16(2):194-200.
- [11] 李聪聪,陈强,喻凡,等.一种微混电动车起停系统及其对车辆性能影响的分析 [J]. 汽车工程, 2012,34(10):878-884. Li C C, Chen Q, Yu F, et al. A start-stop system for micro-HEV and the analysis on its effects on vehicle performance [J]. Automotive

- Engineering, 2012,34(10):878-884.
- [12] 许广举,李铭迪,陈庆樟.等.怠速起停控制模式重型气电混合动力客车的能耗与排放特征 [J]. 汽车工程, 2016,38(7):805-808.
- Xu G J, Li M D, Chen Q Z, et al. Energy consumption and emission characteristics of heavy duty gas hybrid electric bus with idle start-stop control mode [J]. Automotive Engineering, 2016,38(7):805-808.
- [13] 刘 凯,何 仁,黄大星.汽车怠速停止和起动系统研究现状及发展趋势 [J]. 轻型汽车技术, 2008,(11/12):26-31.
- Liu K, He R, Huang D X. Research status and development trend of automobile idle Start-stop system [J]. Light Vehicles, 2008,(11/12): 26-31.
- [14] 于 水,董光宇,高 原,等.基于循环分析的发动机快速起动瞬态燃烧特性 [J]. 内燃机学报, 2008,26(5):404-409.
- Yu S, Dong G Y, Gao Y, et al. Characteristics of combustion and emissions during engine transient quick cranking start based on cycle-by-cycle analysis [J]. Transactions of CSICE, 2008,26(5):404-409.
- [15] 于 水.混合动力汽车汽油机起动工况瞬态燃烧和排放特性研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- Yu S. The study of characteristics of transient combustion and emissions during gasoline engine start for HEV application [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [16] 梁海波.混合动力 Start/Stop 控制策略对整车排放影响的研究 [J]. 内燃机工程, 2008,29(2):15-19.
- Liang H B. Study on Influence of Start/Stop Control Strategy of HEV on Vehicle Emission [J]. Chinese Internal combustion Engine Engineering, 2008,29(2):15-19.
- [17] 陈绍刚,李孟良,徐 达,等.基于 PEMS 的混合动力客车发动机启动/停止对排放影响的研究 [J]. 汽车工程, 2010,32(3):198-202.
- Chen S G, Li M L, Xu D, et al. A study on the influence of start/stop of hybrid electric bus engine On its emissions based on PEMS [J]. Automotive Engineering, 2010,32(3):198-202.
- [18] 胡志远,宋 博,全铁枫,等.GDI 汽油车 NEDC 循环颗粒物排放特性 [J]. 汽车技术, 2016,(8):625-631.
- Hu Z Y, Song B, Quan Y F, et al. Particulate matter emissions characteristics from a gasoline direct injection vehicles under new european driving cycle [J]. Automobile Technology, 2016,(8):625-631.
- [19] 胡志远,宋 博,胡 雷,等.缸内直喷型汽油车起动工况颗粒组分排放特性 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017,45(2):261-266.
- Hu Z Y, Song B, Hu L, et al. Effects of start conditions on the composition of particle emissions from a gasoline direct injection vehicle [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017,45(2): 261-266.
- [20] GB/T 19233-2008 轻型汽车燃料消耗量试验方法 [S].
- GB/T 19233-2008 Measurement methods of fuel consumption for light-duty vehicles [S].
- [21] GB 18352.5-2013 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段) [S].
- GB 18352.5-2013 Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (China5) [S].
- [22] GB18352.6-2016 轻型汽车污染物排放限值及测试方法(中国第六阶段) [S].
- GB 18352.6-2016 Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (China 6) [S].
- [23] GB 19578-XXXX 乘用车燃料消耗量限值(征求意见稿) [S].
- GB 19578-XXXX Fuel consumption limits for passenger cars (exposure draft) [S].
- [24] 许 楠.直喷汽油机直接起停技术的研究 [D]. 长春:吉林大学, 2009.
- Xu N. Research on direct start & stop system based on gasoline direct injection (GDI) engine [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [25] Stojkovic B D, Fansler T D, Drake M C, et al. High-speed imaging of OH* and soot temperature and concentration in a stratified-charge direct-injection gasoline engine [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005,30(2):2657-2665.
- [26] Velji A, Yeom K, Wagner U, et al. Investigations of the formation and oxidation of soot inside a direct injection spark ignition engine using advanced laser-techniques [J]. Sae Technical Papers, 2010,(4):S295.
- [27] 赵世峰.直喷汽油机冷起动工况壁面油膜特性及其对碳烟排放的影响研究 [D]. 太原:中北大学, 2016.
- Zhao S F. Properties of Oil Film and Its Effects on Soot Emission under the Cold Start Condition of Direct Injection Gasoline Engine [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [28] 董 伟,宋佰达,邱立涛,等.直喷汽油机暖机过程中两次喷射比例对燃烧和排放的影响 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2018,48(6):132-138.
- Dong W, Song B D, Qiu L T, et al. Effect of fuel ratio of two injections on combustion and emissions in warm-up process of gasoline direct injection [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018,48(6):132-138.
- [29] Seo J, Kim H Y, Park S, et al. Experimental and Numerical Simulations of Spray Impingement and Combustion Characteristics in Gasoline Direct Injection Engines under Variable Driving Conditions [J]. Flow Turbulence & Combustion, 2015,96(2):1-25.
- [30] 钱国刚.轻型乘用车在中国的怠速起停循环外油耗测试评价 [J]. 汽车安全与节能学报, 2015,6(2):171-178.
- Qian G G. Off-cycle fuel consumption test and evaluation on start-stop light duty vehicles in China [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2015,6(2):171-178.
- [31] 赵心语,宋 博,胡志远,等.缸内直喷汽油车国 V、国 VI 工况污染物排放特性 [J]. 环境工程, 2018,36(S1):28-33.
- Zhao X Y, Song B, Hu Z Y, et al. Emission characteristics of gasoline direct injection light-duty vehicles based on China V and China VI operating condition [J]. Environmental Engineering, 2018,36(S1):28-33.

作者简介: 胡志远(1970-),男,河北安国人,副教授,博士,主要研究方向为汽车能源技术及汽车低排放设计技术.发表论文 100 余篇。