

缸内直喷型汽油车起动机况颗粒组分排放特性

胡志远¹, 宋博¹, 胡雷², 史勳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: 以一辆国 V 排放均质燃烧模式缸内直喷型(GDI)汽油车为研究对象, 分析了该 GDI 汽油车 25 °C 冷机起动、25 °C 热机起动、5 °C 冷机起动等不同起动条件下 GB18352.5—2013 I 型试验的颗粒质量、数量排放及组分特性。结果表明: 该车产生的颗粒物质量、数量排放受起动条件的影响较大, 5 °C 冷机起动的颗粒物质量、数量较高; 颗粒排放的碳质组分中有机碳约为总碳排放的 81%, 25 °C 热机起动有机碳与元素碳比例变化不大, 5 °C 冷机起动有机碳比例降低 15%; 颗粒可溶性有机物(SOF)组分主要以脂肪酸和烷烃为主, 25 °C 热机起动 SOF 组分变化不大, 5 °C 冷机起动多环芳烃(PAHs)比例增大 24 倍; 脂肪酸主要是 C_{16:0} 和 C₁₈, 受冷、热机起动和环境温度变化影响较小; 烷烃主要是 C₂₄H₅₀、C₂₅H₅₂、C₂₆H₅₄ 和 C₂₇H₅₆, 受冷、热机起动影响不大, 受环境温度变化影响较大; PAHs 主要是中环和高环芳烃, 受冷、热机起动和环境温度变化的影响均较大。

关键词: 缸内直喷型汽油车; 起动机况; 颗粒物; 有机碳; 元素碳; 可溶性有机物(SOF)

中图分类号: U467.1⁺2

文献标志码: A

Effects of Start Conditions on the Composition of Particle Emissions from a Gasoline Direct Injection Vehicle

HU Zhiyuan¹, SONG Bo¹, HU Lei², SHI Xu²

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Motor Vehicle Inspection Certification & Technology Innovation Center Co. Ltd, Shanghai 201805, China)

Abstract: Based on a stoichiometric gasoline direct injection (GDI) vehicle certified to China V emission standards, the particulate mass, particulate number, and the composition of particle emissions during New European driving cycle (NEDC) with different start conditions (cold start at 25 °C, hot start at 25 °C and cold start at 5 °C) was investigated. The results show that particulate mass, number and compositions are significantly affected by start conditions i. e.

the GDI vehicle bring higher particulate mass and number emission when cold start at 5 °C, 81 percent of total carbon (TC) is organic carbon (OC) when cold start at 25 °C, OC percentage changes little when hot start, but decreases 15 percent at 5 °C. Soluble organic fractions (SOF) are mainly composed of fatty acids and alkanes, SOF components change little when hot start, but PAHs fractions increase 24 times at 5 °C; Fatty acids are mainly composed of C_{16:0} and C₁₈, start conditions and ambient temperature have little effect on fatty acids components; Alkane are mainly composed of C₂₄H₅₀、C₂₅H₅₂、C₂₆H₅₄ and C₂₇H₅₆, alkane components change little when hot start, but change greatly at 5 °C; PAHs are mainly composed of middle-ring PAHs and high-ring PAHs, and these fractions changed greatly when hot start at 25 °C and cold start at 5 °C.

Key words: gasoline direct injection vehicles; start conditions; particle; organic carbon; elemental carbon; soluble organic fractions(SOF)

大气气溶胶中的有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(element carbon, EC)组分与大气颗粒物污染密切相关^[1]。源解析表明, 城市大气中的 OC 和 EC 主要来自机动车尾气颗粒物排放^[2-3]。研究表明, 人们对汽油车颗粒排放对大气颗粒物污染的贡献率可能估计不足^[4], 虽然汽油车颗粒物质量排放比柴油车少一个数量级, 但其颗粒数量排放并不能忽视^[5]。缸内直喷型(gasoline direct injection, GDI)汽油车直接将燃油喷入气缸, 在降低油耗的同时产生相对较高的颗粒物排放^[6]。汽油车排放的颗粒物主要由有机碳和元素碳组成^[7], 与大气颗粒物污染密切相关, 因此研究缸内直喷型汽油车的颗粒物组分具有重要的现实意义。

国外学者对汽油车颗粒物排放组分特性已开展相关研究。Short 等^[8]和 Karavalakis 等^[9]比较了缸

收稿日期: 2016-04-17

基金项目: 上海市科委攻关计划(15DZ1205503)

第一作者: 胡志远(1970—), 男, 副教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为汽车清洁替代燃料及排放污染物控制。

E-mail: huzhiyuan@tongji.edu.cn

内直喷汽油车、进气道喷射汽油车、混合动力汽车的颗粒物 OC、EC 排放特性,分析了颗粒物 EC 含量与燃油芳香烃含量,以及颗粒物水溶性有机物(water-soluble organic mass, WSOM)含量与燃油烷烃含量的关联性. Storey 等^[10]研究了不同燃烧模式的 GDI 汽油车燃用乙醇汽油的颗粒排放特性. Wei 等^[11]研究了不同测试循环对汽油车颗粒碳质组分特性的影响. 国内学者对汽油车颗粒排放研究主要集中在颗粒数量及粒径分布方面^[5,12-14],对颗粒组分研究较少,只有徐晓辉等^[15-16]分析了汽油车、摩托车使用无铅汽油的颗粒物组分及毒性特征,张志红等^[17]分析了汽油车颗粒物的多环芳烃等组分,骆路胜等^[18]研究了国 IV 汽油车颗粒物的多环芳烃组分,有关 GDI 汽油车颗粒物碳质组分、可溶性有机物组分的研究

未见报道.

本文以一辆国 V 排放 GDI 汽油车为研究对象,进行 25 °C 冷机起动、5 °C 冷机起动、25 °C 热机起动等不同试验条件的 GB18352. 5—2013 I 型试验,研究该 GDI 汽油车不同起动工况的颗粒物质量、数量以及有机碳、元素碳、可溶性有机物组分排放特性.

1 试验方案

1.1 试验样车与燃油

试验样车为一辆整备质量 1 390 kg,满足国 V 排放,排量 1.4 L 的 GDI 汽油车,搭载水冷直列四缸、涡轮增压、均质燃烧模式缸内直喷汽油机. 试验用油为市售国 V 95 号汽油,主要理化指标见表 1.

表 1 试验燃油主要理化指标

Tab.1 Properties and characteristics of fuels

密度/ (g · cm ⁻³)	辛烷值	硫含量/ (mg · kg ⁻¹)	初馏点 /°C	终馏点 /°C	烷烃体积 分数/%	烯烃体积 分数/%	芳香烃体积 分数/%
0.761	96.4	3	36.7	196.6	40.4	11.4	39.1

1.2 试验设备与方案

试验在德国 WEISS 公司环境舱中进行,温度控制精度 ±1 °C;采用德国 SCHENCK 底盘测功机模拟行驶阻力,精度 ±0.5%. 试验过程中,采用 DEKATI 公司的射流稀释器(fine particle sampler-4000, FPS-4000)对车辆尾气进行稀释,稀释比 8.21,稀释温度 120 °C,然后利用单通道颗粒采集装置对颗粒进行采样,采样介质为直径 47 mm 的石英膜. 利用 DRI2001A 型有机碳/元素碳分析仪根据 IMPROVE (interagency monitoring of protected visual environment) 分析协议的热光反射法(thermal optical reflection, TOR)分析采集颗粒的碳质组分,利用 AGILENT 公司的气相色谱-质谱联用仪(7890GC/5975MSD)分析由超声洗脱法分离采集颗粒的可溶性有机组分(soluble organic fractions, SOF)组分. 采用滤纸称重法测量颗粒质量,日本 HORIBA 公司的 MEXA-2000 型固态颗粒计数系统(solid particle counting system, SPCS)测量 23 nm~2.5 μm 粒径范围内的固态颗粒数量排放. 25 °C、5 °C 冷机起动试验在车辆浸车至少 6 h 后进行,25 °C 热机起动试验在冷机起动试验后 30 min 进行.

试验运行工况为 GB18352. 5—2013《轻型汽车污染物排放限值及测试方法(中国第五阶段)》I 型试验循环. 试验循环全程 1 180 s,由 1 部(市区运转循

环)和 2 部(市郊运转循环)组成,1 部由 4 个相同的持续时间为 195 s 的 ECE-15 循环单元组成,分布称为 ECEI、ECEII、ECEIII 和 ECEIV 循环单元,每个循环单元的平均车速为 19 km · h⁻¹,理论行驶距离 1.013 km, ECEI 包含车辆起动工况. 2 部由一个持续时间为 400 s 的郊区运转循环组成,平均车速为 62.6 km · h⁻¹,理论行驶距离 6.955 km,最大车速 120 km · h⁻¹.

2 试验结果与分析

2.1 颗粒物排放特性

图 1 为该 GDI 汽油车 GB18352. 5—2013 I 型试验 25 °C 冷、热机起动、5 °C 冷机起动工况的颗粒物质量、数量排放因子.

由图 1 可知,该 GDI 汽油车 GB18352. 5—2013 I 型试验颗粒物质量、数量排放受起动条件的影响较大,与 25 °C 冷机起动比较,25 °C 热机起动工况的颗粒物质量、数量排放因子分别降低 22.2% 和 34.5%;5 °C 冷机起动的颗粒物质量、数量分别增大 12% 和 63.3%.

图 2 为该 GDI 汽油车 GB18352. 5—2013 I 型试验 25 °C 冷、热机起动、5 °C 冷机起动工况的颗粒数量排放累积特性. 可见,该车 25 °C 冷机、热机起动、5 °C 冷机起动工况 ECEI 循环单元颗粒数量排放累积

量分别为 2.84×10^{12} 个、 6.11×10^{11} 个和 6.37×10^{12} 个,分别占整个循环颗粒排放累积量的 36.2%、12% 和 49.8%,颗粒数量排放累积受起动条件的影响较大。

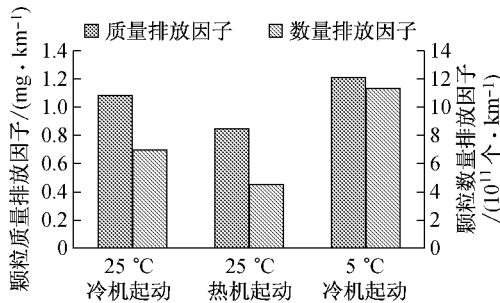


图 1 不同起动工况的颗粒排放特性

Fig. 1 Characters of particle emissions in different start conditions

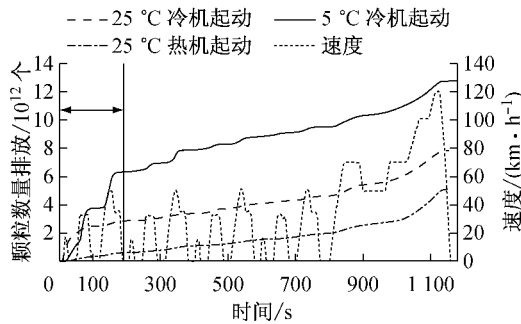


图 2 不同起动工况颗粒数量累积排放

Fig. 2 Cumulative particle number emissions in different start conditions

2.2 有机碳/元素碳组分

图 3 为该 GDI 汽油车 GB18352.5—2013 I 型试验 25 °C 冷、热机起动、5 °C 冷机起动工况的颗粒物排放中的 OC、EC 组分占总碳质组分的质量分数 (w_{OC} 、 w_{EC})。

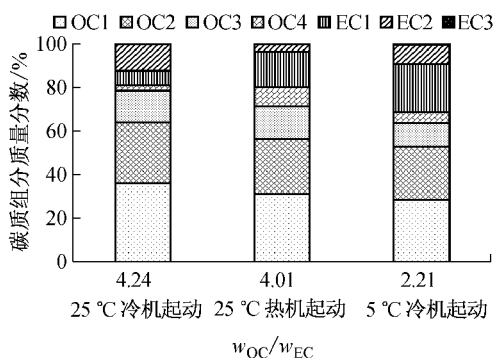


图 3 不同起动工况颗粒物碳质组分

Fig. 3 Carbonaceous component of particle emissions in different start conditions

由图 3 可知,该 GDI 汽油车 GB18352.5—2013

I 型试验颗粒物排放碳质组分主要是 OC,约为总碳 (total carbon, TC) 的 81%,与 Wei 等^[11]的研究结果相近,同时与我国城市大气环境中 PM_{2.5} 的 w_{OC}/w_{EC} 质量浓度比相近^[19]。颗粒组分中的 OC 主要是由 OC1、OC2 和 OC3 组成, $w_{OC1} + w_{OC2} + w_{OC3}$ 质量之和约为 OC 总质量的 97%。颗粒组分中的 EC 主要由 EC1 和 EC2 组成,EC3 含量几乎为零。

与 25 °C 冷机起动比较,25 °C 热机起动 TC 的 w_{OC}/w_{EC} 基本不变,OC1 和 OC2 的质量分数减小约 10%,OC4 质量分数增大约 3.7 倍,EC1 质量分数增大约 2.4 倍,EC2 质量分数减小 70%。这是因为,与直喷柴油机类似,热机起动时,发动机机体和缸内温度较高,排气温度高,使得分子质量相对较小的 OC1、OC2 组部分成为气态,不能被滤膜采集。同时,部分 OC1、OC2 组分在排气管中继续反应生成分子质量相对较大的物质^[20]。热机起动对 EC 的生成产生两方面的影响:一方面,热机起动,机体和缸内温度高,壁面油膜蒸发快,油气混合更均匀,不利于 EC 的生成;另一方面,热机起动,进气温升大,进气充量减少,有利于 EC 的生成。二者综合作用,使得 TC 中 EC 的质量分数基本不变。同时,热机起动时部分 EC2 在某些金属元素(如 Cu、Zr、Mn 等)的催化下被氧化为 EC1^[21],导致 EC2 质量分数减少,EC1 质量分数增大。

与 25 °C 冷机起动比较,5 °C 冷机起动 TC 中的 OC 质量分数减小约 15%,OC1、OC2、OC3 和 EC2 的质量分数分别减小 20%、15%、25% 和 25%,OC4 和 EC1 质量分数分别增大 2.2 倍和 3.2 倍。这是因为,5 °C 冷机起动,进气温度低导致缸内燃烧温度相对较低,不完全燃烧的燃料增多,使得 EC 的生成量增大,OC 质量分数下降。Han 等^[22]研究表明,相对较低的燃烧温度利于燃料裂解生成 char-EC(EC1),不利于 soot-EC(EC2 和 EC3)的生成,EC 中 EC1 质量分数增大,EC2 质量分数减少。

2.3 可溶性有机组分

图 4 为该 GDI 汽油车 GB18352.5—2013 I 型试验 25 °C 冷机、热机起动、5 °C 冷机起动的颗粒物排放中可溶性有机物组分特性。

由图 4 可知,该 GDI 汽油车 GB18352.5—2013 I 型试验颗粒物 SOF 排放受试验条件的影响较大。25 °C 冷机起动颗粒物排放中的 SOF 为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$,约为颗粒物总质量排放的 20.5%;25 °C 热机起动的 SOF 排放为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$,约为颗粒物总质量排放的 14.9%;5 °C 冷机起动的 SOF 排放为

$0.04 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$, 约为颗粒物总质量排放的 3.5%。

颗粒中的可溶性有机物组分主要包括脂肪酸、烷烃和多环芳烃三类。图 5 为该 GDI 汽油车 GB18352.5—2013 I 型试验 25 °C 冷机、热机起动、5 °C 冷机起动的颗粒物 SOF 排放中脂肪酸、烷烃和多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 组分特性。

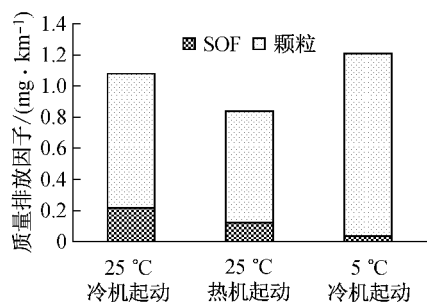


图 4 不同起动工况颗粒 SOF 质量排放

Fig. 4 SOF mass emission factor in different start conditions

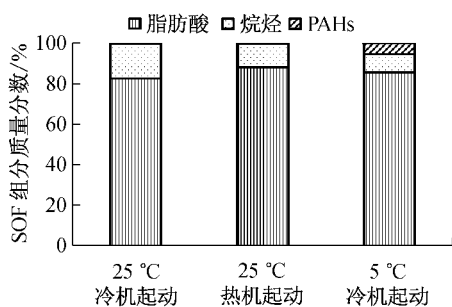


图 5 不同起动工况的 SOF 组分

Fig. 5 SOF components in different start conditions

由图 5 可知, 该 GDI 汽油车 GB18352.5—2013 I 型试验颗粒物排放中的 SOF 组分主要是脂肪酸, 约为 SOF 组分的 82.1%; PAHs 的质量分数最小, 约为 SOF 的 0.2%。与 25 °C 冷机起动比较, 25 °C 热机起动时, 由于机体温度高, 壁面油膜蒸发快, 颗粒的 SOF 组分中脂肪酸质量分数增大 7%, PAHs 质量分数则基本不变。与 25 °C 冷机起动比较, 5 °C 冷机起动时, 颗粒 SOF 组分中的脂肪酸质量分数略有增大, 烷烃质量分数减小约 51%, PAHs 质量分数增大到约 5.5%, 增大了 24 倍。这可能是因为, 5 °C 冷机起动, 进气温度低导致缸内燃烧温度相对较低, 使得相对分子质量较大的 PAHs 未被氧化即排出机外。

2.3.1 脂肪酸

颗粒中的脂肪酸中含氧, 稳定性差, 易被氧化和降解, 对人类危害不大。图 6 为该 GDI 汽油车 GB18352.5—2013 I 型试验 25 °C 冷、热机起动、5 °C

冷机起动时各脂肪酸组分的质量分数。可见, GDI 汽油车颗粒物 SOF 组分中的脂肪酸主要由 C16 和 C18 组成, C16, C18 的质量之和约为脂肪酸总量的 92%。冷、热机起动和环境温度对脂肪酸组分影响不大。同时, 颗粒物的脂肪酸组分中, 奇数碳原子脂肪酸排放量小于其相邻的偶数碳原子脂肪酸, 这可能是因为偶数碳原子脂肪酸的空间对称性更好, 更难被氧化。

2.3.2 烷烃

颗粒中烷烃的生物毒性会对人体呼吸系统, 神经系统和皮肤等产生危害。图 7 为该 GDI 汽油车 GB18352.5—2013 I 型试验 25 °C 冷机、热机起动、5 °C 冷机起动时各烷烃组分的质量分数。

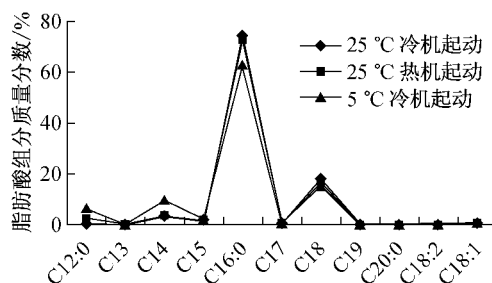


图 6 不同起动工况的脂肪酸组分

Fig. 6 Fatty acids components in different start conditions

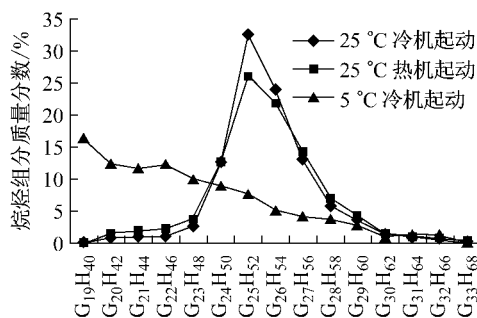


图 7 不同起动工况的烷烃组分

Fig. 7 Alkane components in different start conditions

由图 7 可知, 25 °C 冷机、热机起动该 GDI 汽油车颗粒物中的烷烃组分排放量呈单峰分布形态, 以 $C_{24}H_{50}$ 、 $C_{25}H_{52}$ 、 $C_{26}H_{54}$ 和 $C_{27}H_{56}$ 组分为主, 其质量和约为烷烃总量的 82%。热机起动对颗粒烷烃组分影响不大, 只有 $C_{25}H_{52}$ 减小 20%。5 °C 冷机起动时, 各烷烃组分比例随碳原子数的增大而减小, 与 25 °C 冷机、热机起动时烷烃的分布形式差异巨大。这可能是因为, 部分烷烃组分是燃烧过程中的中间产物, 受缸内燃烧温度影响较大。

2.3.3 多环芳烃

颗粒物 SOF 组分中的 PAHs 含量较少, 但其具

有致癌、致畸和致突变的危害,是颗粒 SOF 组分研究的重点. 环数相近的 PAHs 具有相近的理化特性,据此可将 PAHs 分为 2~3 环的小分子量 PAHs (low molecular weight, LMW-PAHs)、4 环的中等分子量 PAHs (medium molecular weight, MMW-PAHs) 和 5 环以上的高分子量 PAHs (high molecular weight, HMW-PAHs).

表 2 为该 GDI 汽油车 GB18352.5-2013 I 型试验 25 °C 冷机、热机启动、5 °C 冷机启动时各 PAHs 组分的质量分数. 可见,该 GDI 汽油车 GB18352.5-2013 I 型试验 PAHs 组分中,高环芳烃质量分数大于中环芳烃质量分数,大于低环芳烃质量分数,这与 Marr 等^[23]研究结果类似,与柴油机以四环以下的 PAHs 为主^[23-24]不同. 这可能是因为汽油的芳香烃含量大于柴油,且汽油机的燃烧温度较高,二者共同作用使得更多的低环芳烃热缩聚形成高环芳烃,导致汽油机的高环芳烃的排放相对较高^[23-24].

表 2 不同启动工况的 PAHs 组分

PAHs 种类	25 °C 冷机 启动	25 °C 热机 启动	5 °C 冷机 启动	环数
萘	0.077	0.125	0.035	2
蒽	0.030	0.034	0.003	3
芴	0.005	0.007	0.002	3
菲	0.069	0.081	0.022	3
醋菲	0.006	0.004	0.011	3
荧蒽	0.063	0.069	0.039	4
芘	0.073	0.114	0.065	4
苯并[ghi]荧蒽	0.031	0.007	0.089	5
苯并(a)蒽	0.052	0.055	0.060	4
II	0.075	0.066	0.060	4
苯并(b+k)荧蒽	0.193	0.162	0.150	5
苯并(e)芘	0.065	0.053	0.059	5
苯并(a)芘	0.014	0.010	0.006	5
二萘嵌苯	0.003	0	0	5
蒽并蒽	0.031	0.019	0.078	6
1,3,5-三苯基苯	0.016	0.015	0.003	4
茚并(123-cd)芘	0.098	0.068	0.169	6
苯并(ghi)芘	0.062	0.054	0.039	6
二苯并(a,h)蒽	0.014	0.027	0.013	5
六苯并苯	0.025	0.028	0.099	7
∑LMW-PAHs	0.187	0.253	0.074	
∑MMW-PAHs	0.277	0.320	0.226	
∑HMW-PAHs	0.536	0.427	0.700	
总量	1	1	1	

与 25 °C 冷机启动比较,25 °C 热机启动排放的 PAHs 中低环芳烃和中环芳烃质量分数分别增大 36% 和 15%,高环芳烃质量分数减小 20%. 这是因为热机启动时缸内燃烧温度高使得低环芳烃热缩聚形成的高环芳烃又发生氢化或缩聚反应生成大分子

量的物质,其中部分将转化为碳粒^[23]. 与 25 °C 冷机启动比较,5 °C 冷机起排放的 PAHs 中低环芳烃和中环芳烃质量分数分别减小 70% 和 20%,高环芳烃质量分数增大 31%. 这可能是因为,与 5 °C 下 PAHs 质量分数增大的原因类似,5 °C 冷机启动时,进气温度低导致燃烧温度降低,热缩聚生成的高环芳烃被氧化的可能性减少.

3 结论

(1)GDI 汽油车 GB18352.5-2013 I 型试验颗粒物质量、数量排放受启动条件的影响较大.

(2)GDI 汽油车排放的颗粒物中的碳质组分主要是有机碳 OC,约为总碳 TC 的质量分数 81%. OC 中 OC1,OC2 和 OC3 约为 OC 的质量分数 97%. 同一环境温度冷、热机启动 TC 中 w_{OC}/w_{TC} 变化不大,低温环境启动 TC 中 OC 的比例降低 15%.

(3)GDI 汽油车排放的颗粒物中 SOF 组分主要是脂肪酸和烷烃. 同一环境温度冷、热机启动对 SOF 组分影响较小,低温环境启动 PAHs 比例增大 24 倍;

(4)GDI 汽油车排放的 SOF 中的脂肪酸主要是 C16:0 和 C18,受冷、热机启动和环境温度影响较小;烷烃主要是 C₂₄H₅₀、C₂₅H₅₂、C₂₆H₅₄ 和 C₂₇H₅₆,受冷、热机启动影响不大,受环境温度变化影响较大;PAHs 主要是中环和高环芳烃,受热机启动和环境温度变化的影响较大.

参考文献:

- [1] 谭吉华,赵金平,段菁春,等. 广州典型灰霾期有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境污染与防治,2009,31(3):105. TAN Jihua, ZHAO Jinping, DUAN Jingchun, et al. Characteristics of organic carbon and elemental carbon during a typical haze episode in Guangzhou[J]. Environmental Pollution and Control,2009,31(3):105.
- [2] 张仁健,石磊,刘阳. 北京冬季 PM₁₀ 中有机碳与元素碳的高分辨率观测及来源分析[J]. 中国粉体技术,2007,13(6):1. ZHANG Renjian, SHI Lei, LIU Yang. High resolution observation and source identification of carbonaceous aerosols in PM₁₀ in Beijing in winter[J]. China Powder Science and Technology,2007,13(6):1.
- [3] 曹军骥,李顺诚,李杨,等. 2003 年秋冬季西安大气中有机碳和元素碳的理化特征及其来源解析[J]. 自然科学进展,2005,15(12):1460. CAO Junji, LI Shuncheng, LI Yang, et al. Characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric aerosol and their sources in Xi'an in the autumn of 2003[J]. Progress in

- Nature Science, 2005, 15(12):1460.
- [4] Gertler A W. Diesel vs. gasoline emissions: Does PM from diesel or gasoline vehicles dominate in the US? [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(13):2349.
- [5] 胡志远, 李金, 谭丕强, 等. 汽车轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性[J]. 环境科学, 2012, 33(12):4181.
HU Zhiyuan, LI Jin, TAN Piqiang, *et al.* Research on NEDC ultrafine particle emission characters of a port fuel injection gasoline car[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012, 33(12):4181.
- [6] Su J, Lin W, Sterniak J, *et al.* Particulate matter emission comparison of spark ignition direct injection (SIDI) and port fuel injection (PFI) operation of a boosted gasoline engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2014, 136(9):V001T04A002.
- [7] Fulper C R, Sandeep K, Baldauf R W, *et al.* Methods of characterizing the distribution of exhaust emissions from light-duty, gasoline-powered motor vehicles in the U. S. fleet. [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2010, 60(11):1376.
- [8] Short D Z, Vu D, Durbin T D, *et al.* Components of particle emissions from light-duty spark-ignition vehicles with varying aromatic content and octane rating in gasoline [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(17):10682.
- [9] Karavalakis G, Short D Z, Vu D, *et al.* Evaluating the effects of aromatics content in gasoline on gaseous and particulate matter emissions from SI-PFI and SI-DI vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11):7021.
- [10] Storey J M, Barone T L, Thomas J F, *et al.* Exhaust particle characterization for lean and stoichiometric DI vehicles operating on ethanol-gasoline blends [C/CD] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2012: 2012-01-0437.
- [11] Wei Q, Akard M, Porter S, *et al.* The effect of drive cycles on PM emission characteristics from a gasoline vehicle [C/CD] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE International, 2009: 2009-01-1119.
- [12] 柳光洋. 缸内直喷汽油机轿车微粒排放特性研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
LIU Guangyang. Research on particulate matter emission characteristics from a GDI vehicle[D]. Jilin: Jilin University, 2014.
- [13] 王凤滨, 张丹, 包俊江, 等. 不同起动工况下的国IV 汽油车排放试验研究[C] // 2009 中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2009: 330-334.
WANG Fengbin, ZHANG Dan, BAO Junjiang, *et al.* Experiment study on the emission with stage IV gasoline vehicles during the different start test cycles [C] // Proceedings of SAE-China Congress 2009. Beijing: China Machine Press, 2009: 330-334.
- [14] 解难, 李昌, 胡月昆, 等. 环境温度对缸内直喷汽油车颗粒物排放特性的影响[J]. 车用发动机, 2015(2):49.
XIE Nan, LI Chang, HU Yuekun, *et al.* Effects of ambient temperature on characteristics of particulate matter from a gasoline direct injection vehicle[J]. Vehicle Engine, 2015(2):49.
- [15] 徐晓辉, 袁东, 叶舜华. 无铅汽油车排出颗粒物组分分析[J]. 中国卫生工程学, 2003, 2(1):5.
XU Xiaohui, YUAN Dong, YE Shunhua. The component analysis of automotive exhaust particles with unleaded gasoline [J]. Chinese Journal of Public Health Engineering, 2003, 2(1):5.
- [16] 徐晓辉, 叶舜华, 袁东. 无铅汽油尾气颗粒物组分及其毒性研究[J]. 上海环境科学, 2002(5):285.
XU Xiaohui, YE Shunhua, YUAN Dong. Study on components in automotive exhaust particulate of unleaded gasoline and its toxicity[J]. Shanghai Environment Sciences, 2002(5):285.
- [17] 张志红, 杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析[J]. 中国公共卫生, 2001, 17(7):47.
ZHANG Zhihong, YANG Wenmin. Analysis on chemical components in particulates of gasoline-fueled engine exhaust [J]. China Public Health, 2001, 17(7):47.
- [18] 骆路胜, 高俊华, 张仲荣. 汽油车排气颗粒物中多环芳香烃的实验研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(10):947.
LUO Lusheng, GAO Junhua, ZHANG Zhongrong. An experimental study on PAHs in exhaust particulate matter from gasoline vehicles[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(10):947.
- [19] CAO Junji, SHEN Zhenxing, Chow J C, *et al.* Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities. [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, 62(10):1214.
- [20] 王桂华, 刘云岗, 李国祥. 废气冷却对柴油机微粒组分的影响[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7):8.
WANG Guihua, LIU Yungang, LI Guoxiang. Effect of diesel exhaust temperature on particulate fractions of emissions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7):8.
- [21] Zhu C S, Chen C C, Cao J J, *et al.* Characterization of carbon fractions for atmospheric fine and nanoparticle in a highway tunnel, Taiwan [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(23):266.
- [22] Han Y M, Lee S C, Cao J J, *et al.* Spatial distribution and seasonal variation of char-EC and soot-EC in the atmosphere over China [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(38):6066.
- [23] Marr L C, Kirchstetter T W, Harley R A, *et al.* Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Motor Vehicle Fuels and Exhaust Emissions [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(18):3091.
- [24] 张文美. 现代柴油机燃烧过程中微粒及多环芳香烃变化规律的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
ZHANG Wenmei. Studies on the particulate characteristics and PAHs during combustion progress of modern diesel engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.