

国 VI 直喷汽油机颗粒数量及微观形貌 排气输运演变特性

胡志远, 高鑫舜, 陆张颖, 谭丕强, 楼狄明

(同济大学汽车学院, 上海 201800)

摘要: 开展了某一国 VI 直喷汽油机三元催化转化器(TWC)前、TWC后、汽油机颗粒捕集器(GPF)后 3 个位置的颗粒物采样及微观形貌研究,分析了发动机工况、TWC、GPF 对国 VI 直喷汽油机尾气颗粒数量、粒径分布、微观形貌的影响。结果表明,该直喷汽油机尾气颗粒数量排放整体上呈单峰分布,低转速小负荷工况下,粒径 <23 nm 的颗粒数量较高。随着发动机转速和负荷的增大,峰值粒径向大粒径方向移动。直喷汽油机尾气颗粒物由“核-壳”结构基本碳粒子堆积形成,呈链状、枝状、簇状等结构;负荷增大,颗粒物尺寸略有增大,基本碳粒子重叠度增强,分形维数增大;转速增大,颗粒物尺寸减小,基本碳粒子重叠度减弱,分形维数减小。随着排气输运的进行,颗粒数量逐渐降低;TWC 不影响颗粒的粒径分布形态,颗粒数量净化效率 41.6%~94.2%,对 <23 nm 的小粒径颗粒净化效果较好,低转速小负荷工况的颗粒数量净化效率较高;GPF 的颗粒数量净化效率约 80%,23~100 nm 颗粒数量净化效率较高,对粒径 <10 nm 的颗粒净化作用不大。TWC 和 GPF 不影响颗粒物结构形式, TWC 和 GPF 后颗粒物基本碳粒子重叠度减弱,分形维数减小。

关键词: 直喷汽油机;颗粒物数量;微观形貌;排气输运

中图分类号: TK417

文献标志码: A

Transport Properties of Particle Number, Size Distribution, and Morphology Characteristics of Particulate Matter Emitted from a VI Gasoline Direct Injection Engine

HU Zhiyuan, GAO Xinsun, LU Zhangying,
TAN Piqiang, LOU Diming

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201800, China)

Abstract: Particulate matter (PM) was sampled from three positions of a certain VI gasoline direct injection

(GDI) engine before three-way catalyst (TWC), after TWC, and after gasoline particle filter (GPF). Particle morphology was investigated and influences of working conditions, TWC, GPF on particle number (PN), particle size distribution (PSD), morphology of particles emitted from engine were analyzed. The results show that the PSD of PN emitted from the engine is unimodal, the PN of particles with a diameter less than 23 nm is higher under lower load and engine speed operating condition. With the increase of engine speed and load, the peak particle diameter increases. The PM of the engine is formed by the accumulation of basic carbon particles with a “core-shell” structure and presents chain, branch, cluster, or other structures. With the increase of load, the particle size increases slightly, and both the overlap of basic carbon particles and the fractal dimension increase. While with the increase of engine speed, all these three parameters of size, overlap, and fractal dimension of PM decrease. With the transport processing of exhaust gas, PN is reduced. TWC does not affect PSD, and the purification efficiency of PN is 41.6%~94.2%. It has a good purification effect on small particles with a diameter less than 23 nm, and the purification efficiency at a lower engine speed and load is higher. The purification efficiency of GPF is about 80%. For particles with a diameter of 23~100 nm, the purification efficiency of GPF is high. However, it has little effect on the purification of particles with a diameter less than 10 nm. TWC and GPF do not change the structure of particles, after TWC and GPF, the overlap of basic carbon particles and the fractal dimension decrease.

Keywords: gasoline direct injection; particle number; morphology; exhaust gas transportation

收稿日期: 2022-05-19

基金项目: 上海市自然科学基金(22ZR1463500)

第一作者: 胡志远, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为汽车能源技术与汽车低排放设计技术。

E-mail: huzhiyuan@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)汽油机具有压缩比大、热效率高、燃油经济性好等优点,已成为轻型车主流动力^[1]。GDI汽油机具有缸内局部富燃区^[2]、池火燃烧^[3]等燃烧特性,其颗粒数量排放远高于进气道喷射(port fuel injection, PFI)汽油机,甚至高于装有颗粒捕集器(diesel particle filter, DPF)的柴油机^[4]。同时,GDI汽油机尾气颗粒多为粒径小于100 nm的超细颗粒^[5],对人类健康危害较大^[6]。为降低GDI汽油机尾气颗粒等污染物排放,三元催化转化器(three-way catalyst, TWC)和汽油机颗粒捕集器(gasoline particulate filter, GPF)成为GDI汽油机满足国VI(b)及以上排放法规的必备技术。分析GDI汽油机颗粒数量、粒径分布、微观形貌等随排气输运的演变特性,掌握其演变规律,对GDI汽油机尾气颗粒净化具有重要意义。

国内外学者开展了大量针对GDI汽油机尾气颗粒数量和粒径分布的研究,分析了发动机工况、燃油组分、空燃比、喷油策略、废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)等对颗粒数量和粒径分布的影响。研究发现,GDI汽油机尾气颗粒包括粒径<50 nm的核膜态颗粒和粒径>50 nm的聚集态颗粒^[7],颗粒物粒径分布受工况影响,整体呈双峰分布,20~30 nm和70~100 nm附近的颗粒数量相对较多^[8]。汽车冷起动的颗粒数量排放较高^[9]。发动机外特性下,尾气颗粒排放随转速升高呈先降后升的变化趋势^[10]。低转速工况,尾气颗粒数量随负荷的增加呈先减后增的变化趋势^[11]。掺入正丁醇^[12]、减少汽油的重质芳香烃含量^[13]、提高燃油喷射压力、推迟点火正时^[14]、减小EGR率^[15]均能降低GDI汽油机的尾气颗粒数量排放。TWC、GPF均能降低GDI汽油机的尾气颗粒数量排放。杨凌川^[16]研究表明,GPF的颗粒净化效率约90%,GPF后颗粒粒径分布呈单峰分布。李超^[17]指出,TWC后的颗粒数量与发动机工况密切相关,怠速时核膜态颗粒数量较低,低速小负荷工况核膜态和聚集态颗粒数量浓度均较低,大负荷工况的核膜态颗粒数量较高。GDI汽油机TWC前后的粒径分布形态基本相当^[18],TWC对粒径为4~8 nm的小粒径颗粒有较高的净化效果,净化效率随排气温度的升高而增大^[19]。目前国VI GDI汽油机为降低颗粒物排放,优化喷油控制策略,同时采用净化效率更高的TWC和GPF,但有关国VI GDI汽油机尾气颗粒数量、粒径分布排气输运演变特性,以及尾气颗粒排气输运过程中TWC和GPF对颗粒数量、粒径分布的综合影响研究较少。

随着研究的深入,除颗粒数量和粒径分布外,国内外学者开展了GDI汽油机颗粒物微观形貌研究。结果表明,GDI汽油机尾气颗粒主要呈链状、枝状、环状、簇状等不规则形状^[20]。基本碳粒子由内核和外壳组成的核-壳结构,内核为无定形碳晶结构,外壳为有明显分层的石墨结构。GDI汽油机尾气颗粒微观形貌受多种因素影响,较高的缸内温度和压力能减少颗粒成团^[21]。Potenza等^[22]研究表明,燃油压力增大,GDI汽油机尾气颗粒由单个纳米粒子向由多个碳粒子构成的带状结构转变,颗粒物中由活塞等零件磨损产生的金属晶体含量增加。TWC基本不影响颗粒的分形维数^[23],GPF后颗粒基本粒子直径增大约20%^[24],且GPF前后基本碳粒子峰值粒径随负荷增大的变化规律相反^[25]。但目前有关国VI GDI汽油机尾气颗粒微观形貌排气输运过程的演变特性,以及排气输运过程中TWC和GPF对颗粒微观形貌的耦合影响研究仍为空白。

本文开展某一国VI直喷汽油机颗粒数量、粒径分布及颗粒微观形貌排气输运演变研究,试验研究发动机高/低转速、高/低负荷等不同工况、TWC前、TWC后和GPF后3个位置的颗粒数量、粒径分布、微观形貌、分形维数的排气输运演变特性,解析其排气输运演变规律,为GDI汽油机颗粒控制提供参考依据。

1 试验设备与方案

1.1 试验发动机与燃油

试验发动机为一台面向国VI(b)开发的4缸增压直喷汽油机,其主要参数如表1所示。试验燃油为国VI测试标准油。尾气后处理措施为TWC和GPF,TWC和GPF的主要参数如表2所示。

表1 试验发动机主要参数

Tab.1 Main parameters of test engine

参数	数值
排量/L	1.4
(缸径×行程)/(mm×mm)	74.5×80.0
标定功率/kW	110
最大功率转速/(r·min ⁻¹)	5 000~6 000
最大转矩/(N·m)	250
最大扭矩转速/(r·min ⁻¹)	1 750~3 000
压缩比	10

1.2 试验设备及测点位置

试验设备包括发动机台架控制台、颗粒数量及粒径分布在线测量系统、颗粒物采集系统和颗粒物

表2 TWC和GPF主要参数
Tab.2 Main specifications of TWC and GPF

方式	催化剂种类	载体规格/(cm×cm)	目数
TWC	Pt/Pd/Rh	Φ11.8×10.2	600
GPF	Pd/Rh	Φ13.2×10.2	300

离线分析系统。试验分别在TWC前、TWC后和GPF后3个位置抽取部分尾气,经射流稀释器稀释后通过颗粒物粒径谱仪测量颗粒数量和粒径分布,采样流量为 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。射流稀释器型号为FPS-4000,稀释比为8.21,稀释温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。颗粒物粒径谱仪型号为EEPS-3090,可检测发动机排气中 $5.6\sim 560.0\text{ nm}$ 粒径范围内包含挥发性/半挥发性组分的颗粒数量,覆盖了汽油机颗粒物主要粒径分布区间,广泛用于GDI汽油机尾气颗粒数量和粒径分析^[26]。同时,通过耐高温单通道颗粒采样装置直接

抽取部分尾气进行颗粒物采样,采样介质为Whatman公司直径 90 mm 石英膜,采样流量为 $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。采样前通过马弗炉对石英滤膜在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下灼烧 5 h ,以去除石英膜中的水分和杂质。采集颗粒通过美国FEI公司的Tecnai G2 F20 S-Twin型透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)测量颗粒物微观形貌,测量时先裁剪合适大小的带有颗粒物的滤纸置于无水乙醇震荡皿中,使用超声震荡法对样本预处理,然后将含颗粒的无水乙醇滴至碳膜铜网上,置于白炽灯下烘干,再使用TEM观察颗粒微观形貌特征。Mathis等^[27]研究表明,TEM分析结果和扫描电迁移率粒径谱仪(scanning mobility particle sizer, SMPS)实验室测量结果具有较好的一致性。试验装置示意图如图1所示。

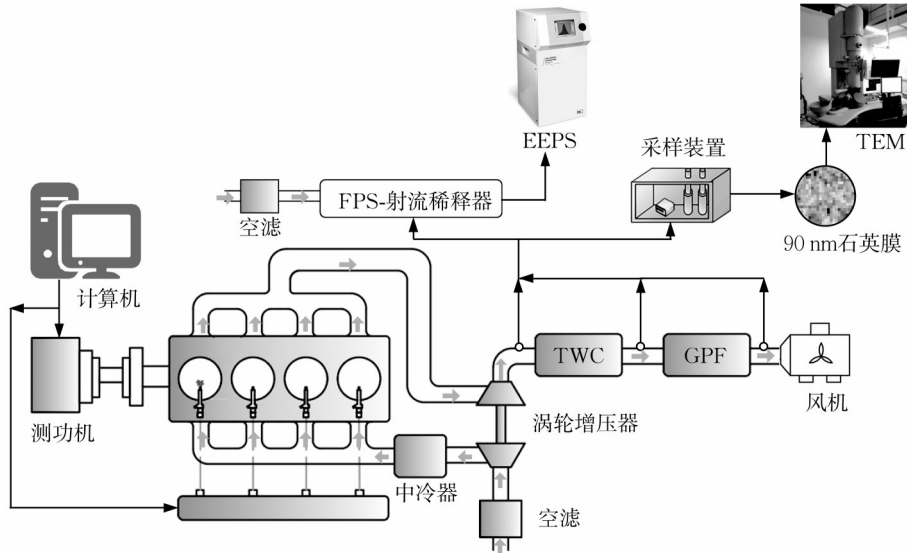


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of experiment setup

1.3 试验工况

研究表明,GDI汽油机在中低转速、中低负荷下,核膜态颗粒物存在极大值^[28]。因此本试验根据转速和平均有效压力(brake mean effective pressure, BMEP)分为4个工况,分别为工况1, $2\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 0.2 MPa ;工况2, $2\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 0.8

MPa ;工况3, $4\ 500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 0.2 MPa ;工况4, $4\ 500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 0.8 MPa 。表3列出了不同工况下发动机主要参数,活塞处于上止点时对应的曲轴转角规定为 $0\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 。试验时,当发动机在某个工况稳定运行 5 min 后开始颗粒数量测量和颗粒物采样,采样时间为 30 min ,重复3次。

表3 不同工况下发动机喷油参数

Tab.3 Main fuel injection specifications of engine under different working conditions

工况	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	平均有效压力/ MPa	喷油压力/ MPa	喷油时刻/ ($^{\circ}\text{CA}$)	喷油持续时间/ ms	过量空气系数	喷油模式
1	2 000	0.2	18	272	0.81	1	单次喷射
2	2 000	0.8	35	269	1.55	1	单次喷射
3	4 500	0.2	19	313	0.87	1	单次喷射
4	4 500	0.8	35	297	1.61	1	单次喷射

2 试验结果与分析

2.1 颗粒物数量

该GDI汽油机不同工况, TWC前、TWC后和GPF后3个位置的颗粒数量排放如表4所示。由表4可见, 相同转速下负荷增大, 颗粒数量排放降低, 低转速小负荷工况的颗粒数量排放较高。这是因为, 一方面, 低转速小负荷工况的缸内燃烧不良, 生成大量的液态/半液态小粒径粒子^[29], 另一方面, 负荷增大, 缸内燃烧温度增加, 利于颗粒的氧化^[30], 颗粒数量排放降低。

表4 GDI汽油机排气输运过程的总颗粒数量排放

Tab.4 Total PN of GDI engine with flow of exhaust

工况	总颗粒数量/(10^{12} (kW·h) ⁻¹)		
	TWC前	TWC后	GPF后
1	5 690.00	332.00	102.00
2	84.00	44.90	5.03
3	551.00	269.00	79.40
4	233.00	136.00	48.60

同时由表4可见, 低负荷工况的颗粒数量随转

速的升高而降低, 中大负荷工况的颗粒数量随转速的升高增加约177%。这是因为, 低负荷时, 转速增加促进空气流动, 利于混合气混合均匀, 燃烧改善, 颗粒数量降低; 高负荷工况, 喷油量增加, 随着转速的增大, 单个冲程经历的时间缩短, 缸内易形成局部浓区域, 颗粒数量增加^[31]。随着排气输运进行, 尾气颗粒流经TWC和GPF后的颗粒数量逐渐降低, TWC对颗粒数量的净化效率为41.6%~94.2%, 低转速小负荷(2 000 r·min⁻¹, 0.2 MPa)工况, 缸内燃烧不良, 生成大量的小粒径颗粒, 而在TWC中, 小颗粒通过扩散作用收集, 在催化剂的协同作用下颗粒物被氧化^[32], 因此TWC对小粒径颗粒的净化效果较好。GPF对颗粒数量的过滤效率为64.2%~88.9%, 高转速中负荷(4 500 r·min⁻¹, 0.8 MPa)工况的排气流速较高, 影响GPF的捕集效率^[33], 过滤效率相对较低。

2.2 粒径分布

为研究颗粒数量排放与发动机工况的关系, 选择“(kW·h)⁻¹”为颗粒数量(particle number, PN)单位。图2为该GDI汽油机不同工况、TWC前、TWC后和GPF后3个位置的颗粒数量排放粒径分布特性。

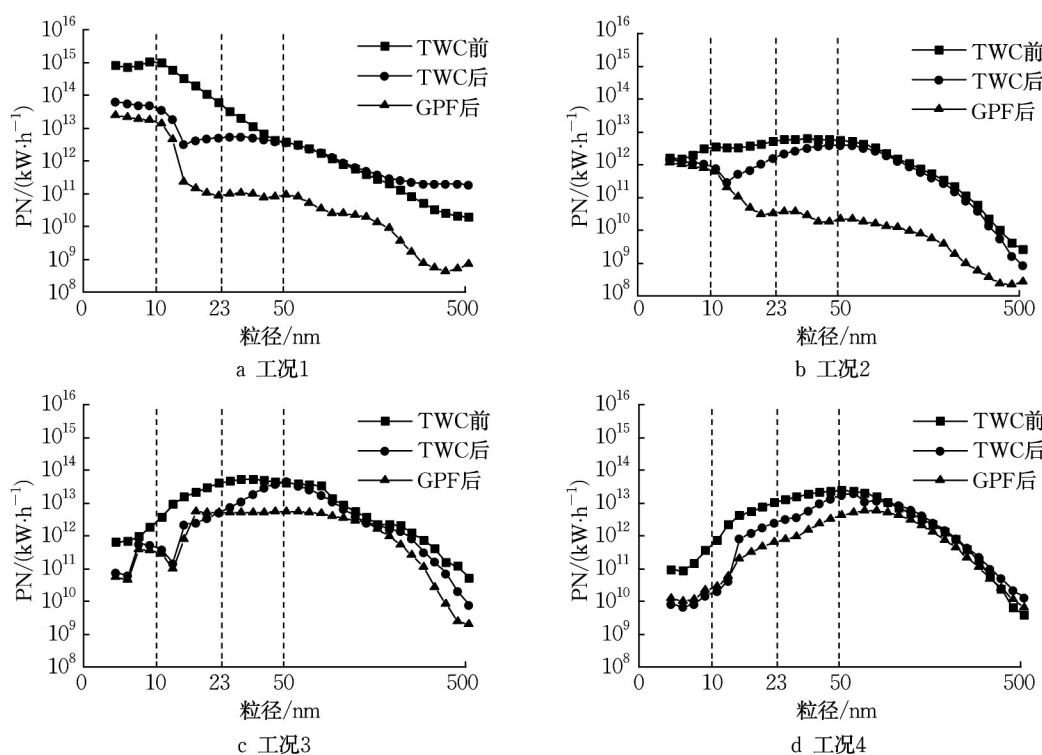


图2 不同工况、采样位置的颗粒数量粒径分布

Fig.2 Particle size distribution in different working conditions and positions

由图2可知, 该国VI GDI汽油机4个试验工况的颗粒数量整体呈单峰分布, 低转速小负荷工况的

峰值粒径为10 nm, 其他工况的峰值粒径为23~60 nm。相同转速, 随着负荷的增大, 颗粒由成核模式

向积聚态颗粒转变^[34],峰值粒径增大。相同负荷,随着转速的增加,峰值粒径亦向大粒径方向移动,核膜态颗粒数量下降,团聚态颗粒数量增加。这是因为,高转速工况排放的颗粒数量增多,有利于聚集体的形成,粒径分布峰值粒径变大^[35]。对于低转速小负荷(2 000 r·min⁻¹,0.2 MPa)工况,由于该工况的缸内温度和压力相对较低,易形成大量的小粒径核膜态颗粒,粒径<23 nm的颗粒数量占比超过95%。

同时由图2可以看出,随着排气运输的进行,TWC前后的粒径分布形态基本不变,粒径<50 nm的核膜态颗粒数量有所降低,5.6~10 nm、10~23 nm两个粒径段的颗粒数量下降明显,粒径>50 nm

的团聚态颗粒数量变化不大。这是因为,小粒径颗粒比表面积相对较大,易被氧化,且TWC对核膜态颗粒的净化效果较好^[19]。低转速小负荷(2 000 r·min⁻¹,0.2 MPa)工况,尾气颗粒流经TWC后,粒径<23 nm的颗粒数量降低超过1个数量级。颗粒流经GPF后,颗粒数量分布形态发生改变,23~100 nm的颗粒数量下降明显,粒径<10 nm的颗粒数量变化不大。

该GDI汽油机4种试验工况,TWC前、TWC后和GPF后3个位置5.6~10 nm、10~23 nm、23~50 nm和50~560 nm不同粒径段的颗粒数量如表5所示。

表5 排气运输过程分粒径段颗粒数量排放

Tab.5 Segmented PN of GDI engine with the flow of exhaust

工况	颗粒数量/(10 ¹² (kW·h) ⁻¹)											
	5.6~10 nm			10~23 nm			23~50 nm			50~560 nm		
	TWC前	TWC后	GPF后	TWC前	TWC后	GPF后	TWC前	TWC后	GPF后	TWC前	TWC后	GPF后
1	3 370.00	220.00	82.80	2 240.00	71.80	18.10	72.40	24.00	0.45	14.30	16.30	0.37
2	7.87	4.86	3.77	22.80	4.91	0.99	29.20	15.70	0.14	24.20	19.40	0.13
3	4.04	1.21	0.85	118.00	16.40	13.60	243.00	103.00	25.04	186.00	151.00	36.80
4	0.67	0.04	0.06	30.40	6.45	1.69	90.20	35.60	8.91	112.00	94.30	37.90

由表5可以看出,随着排气运输的进行,尾气流经TWC后,5.6~10 nm、10~23 nm、23~50 nm和50~560 nm粒径段的颗粒数量分别降低38.2%~94.2%、78.4%~96.8%、46.2%~66.9%和15.8%~19.8%,说明TWC对粒径<23 nm颗粒的净化效果较好。尾气颗粒继续流经GPF后,5.6~10 nm、10~23 nm、23~50 nm和50~560 nm粒径段的颗粒数量分别降低22.4%~62.4%、73.8%~79.8%、75.0%~99.1%和59.8%~99.3%,说明GPF对粒径23~100 nm颗粒的净化效果较好,并且GPF在低转速工况下对粒径>100 nm颗粒物净化效果较好。

2.3 颗粒物微观形貌

尾气颗粒由基本碳粒子在热电泳力、范德华力等作用下,经过碰撞、表面生长、凝结成核、氧化等过程形成^[36]。筛选出TEM图像中碳粒子清晰或重复出现度较高的组织结构作为典型图像分析。该GDI汽油机4种试验工况,TWC前、TWC后和GPF后3个位置的典型颗粒物微观形貌如图3所示。从图3可以看出,该国VI GDI汽油机的尾气颗粒物呈链状、枝状、簇状等结构。基本碳粒子的形貌呈“核-壳”结构,外壳部分有明显的层状碳晶结构,结构有序性强,内核部分为无定形碳晶排列。

通过IMAGE J等图像处理软件对TEM图像进

行处理,测量统计不同工况、不同位置下的基本碳粒子直径。由于颗粒物形状不规则,采用颗粒物不同方向的平均粒径值(费雷特直径)近似,同时采用多次测量取平均值的方法保证测量的准确性,每一工况与位置下各自取约100个基本碳粒子直径。基本碳粒子直径均值随工况、位置的变化如表6所示。

分析图3与表6可知,相同转速,随着负荷的增大,可观察到TWC前的颗粒物尺寸略微增大,深色区域增大,浅色区域减少,基本碳粒子重叠度增强。这是因为,一方面,大负荷的缸内温度较高,氧化作用增强,有利于颗粒物尺寸的减小;另一方面,负荷增大,喷油量增加,大粒径颗粒数量增多,发生相互碰撞概率增大^[21]。相同负荷,随着转速的增加,可观察到TWC前的颗粒物尺寸减小,深色区域减少,浅色区域增加,基本碳粒子重叠度减弱。具体而言,低转速小负荷(2 000 r·min⁻¹,0.2 MPa)工况,可观察到TWC前的颗粒物的基本碳粒子边界不明显,形状不规则,主要为团簇状结构颗粒物。这是因为,该工况的缸内燃烧状态相对较差,尾气中包含较多的未燃碳氢或其他挥发性有机物,导致基本碳粒子缺乏明显的长程有序排列,出现较多的团簇状结构^[37]。高转速中负荷(4 500 r·min⁻¹,0.8 MPa)工况,可观察到TWC前颗粒物中基本大碳粒子重叠部分增多,边界清晰,易形成树枝状、链状的颗粒物。这是因为,

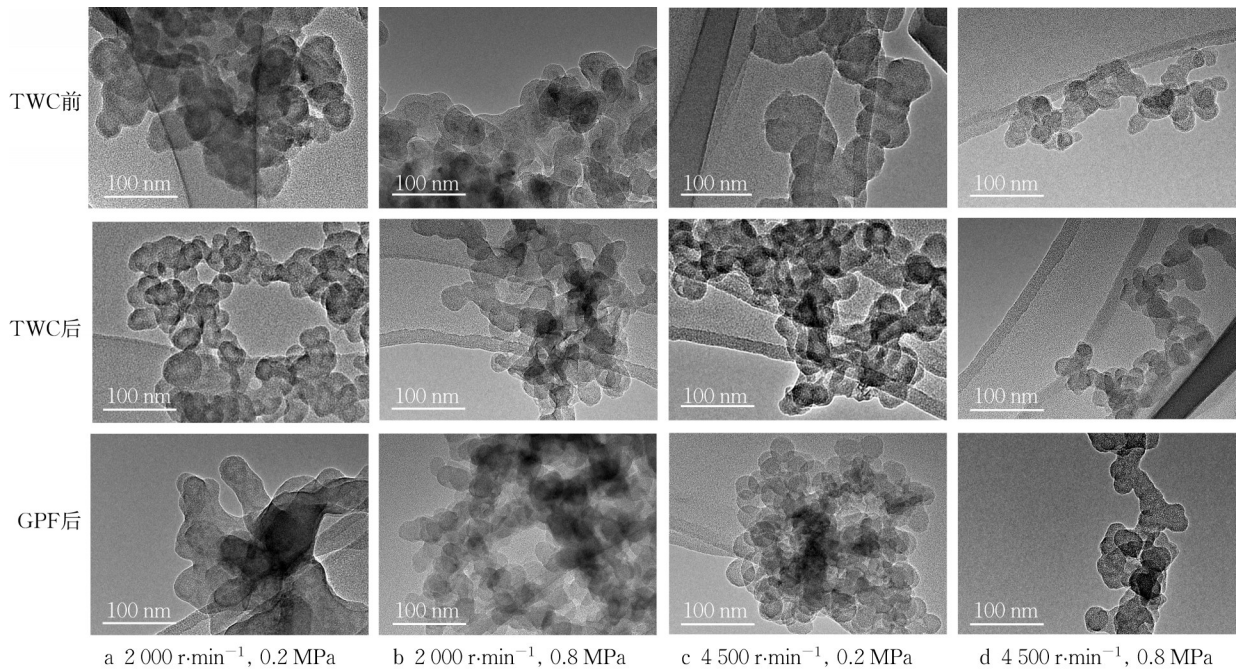


图3 不同工况、采样位置的典型颗粒物微观形貌

Fig.3 Typical particle nanostructure in different working conditions and positions

表6 排气输运过程的颗粒物基本碳粒子直径均值

Tab.6 Changes of average diameter of basic carbon particles under different working conditions with the flow of exhaust gas

工况	颗粒物基本碳粒子直径均值/nm		
	TWC前	TWC后	GPF后
1	36.30	37.85	35.72
2	39.05	39.59	38.99
3	28.87	35.32	33.36
4	31.15	28.15	37.75

这个工况的负荷相对较高,缸内燃烧状态较好,尾气中的未燃碳氢、可溶有机物较少,导致观察到的基本碳粒子形状更规则^[38]。

随着排气输运的进行,尾气颗粒经过TWC后,颗粒物尺寸略微增大,但颗粒物中浅色区域增加,基本碳粒子重叠度减弱,部分基本碳粒子内核层状碳晶结构清晰,说明颗粒物在TWC中发生了一定程度的氧化。颗粒流经GPF后,部分金属组分在颗粒形成的早期就团聚在一起^[39],导致粒径分布峰值变大,GPF后的颗粒物尺寸变大,但GPF前后的颗粒物结构形状变化不明显。同时,GPF后颗粒物中基本碳粒子重叠概率降低,部分基本碳粒子外壳-内核结构消失,形状不规则。

2.4 颗粒物分形维数

分形维数是表示粒子数量与粒子直径间相对关系的宏观量。分形维数越大,微粒结构越紧密,粒子间重叠部分越多;反之,分形维数越小,微粒结构越

疏松,粒子间重叠部分减少。Brasil等^[40]提出的分形维数 D_f 计算方法如下:

$$D_f = (\ln N_p - \ln k_g) (\ln \frac{R_g}{r_p})^{-1} \quad (1)$$

式中: N_p 为颗粒物中所含基本碳粒子的数量; k_g 为结构系数; R_g 为团聚物的回旋半径; r_p 为基本碳粒子的平均半径。

回旋半径 R_g 用团聚颗粒物的最大投影长度 L 间接求得。

$$\frac{L}{2R_g} = 1.50 \pm 0.05 \quad (2)$$

颗粒物中所含有的基本碳粒子数量 N_p 由式(3)求得。

$$N_p = k_a \left(\frac{A_a}{A_p} \right)^{a_a} \quad (3)$$

式中: A_p 为基本碳粒子的投影面积; A_a 为颗粒团聚物的投影面积; k_a 为常量, a_a 为投影面积指数,二者与平均重叠系数 C_{ov} 有关,对应关系如表7所示。

表7 C_{ov} 与 a_a 、 k_a 对应关系

Tab.7 Corresponding relationship between C_{ov} , a_a , and k_a

C_{ov}	k_a	a_a
0	1.10±0.005	1.08±0.003
0.15	1.20±0.005	1.11±0.002
0.25	1.30±0.006	1.13±0.002
0.35	1.44±0.006	1.14±0.002

对同一条件下的颗粒物高倍图进行20~25张图的测量,多次测量取均值,获得如图4所示的对数坐标图,拟合曲线的斜率即为分形维数。

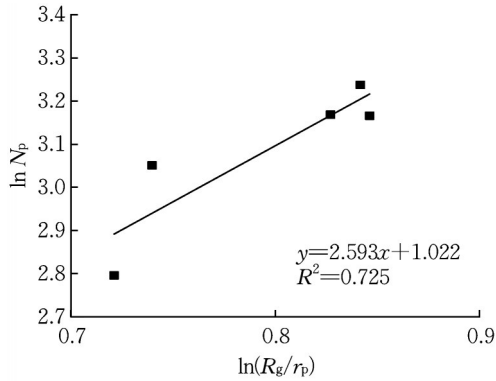


图4 分形维数拟合曲线示意图

Fig.4 Schematic diagram of fitting curve of fractal dimension

该GDI汽油机4种试验工况,TWC前、TWC后和GPF后3个位置的分形维数结果如表8所示,在0.8~1.8之间。相同负荷,颗粒物分形维数随转速增加而减小;相同转速,颗粒物分形维数随负荷的增加而增大;随着排放输运的进行,TWC和GPF后颗粒物的分形维数减小。

表8 排气输运过程的颗粒物分形维数

Tab.8 Changes of particle fractal dimension under different working conditions with the flow of exhaust gas

工况	颗粒物分形维数		
	TWC前	TWC后	GPF后
1	1.66	1.58	1.16
2	1.71	1.60	1.39
3	1.39	1.22	0.84
4	1.58	1.54	1.19

3 结论

论文分析了国VI直喷汽油机排气颗粒在尾气后处理系统输运过程中的颗粒数量、粒径分布及微观形貌变化规律,揭示了TWC、GPF对颗粒物数量、粒径分布及微观形貌的影响,研究结果对VI直喷汽油机后处理系统设计具有较好的参考价值。

(1) GDI汽油机的尾气颗粒数量与其运行工况直接相关。相同转速,颗粒数量随负荷的增大而降低;低负荷工况的尾气颗粒数量随转速的升高而降低;中负荷工况的颗粒数量随转速的升高增加。随着排气输运的进行,尾气中的颗粒数量逐渐降低;

TWC颗粒数量净化效率为41.6%~94.2%,低转速小负荷工况的净化效率较高;GPF颗粒数量净化效率约80.0%,高转速的颗粒净化效率较低。

(2) GDI汽油机的尾气颗粒数量整体呈单峰分布,低转速小负荷工况的峰值粒径为10 nm,其他工况的峰值粒径为23~60 nm;随着发动机转速、负荷的增大,峰值粒径向大粒径方向移动。随着排气输运的进行,TWC后粒径<23 nm的颗粒数量下降明显,但不影响尾气颗粒的粒径分布形态;GPF影响尾气颗粒分布形态,GPF后23~100 nm的颗粒数量下降明显,粒径<10 nm的颗粒数量变化较小。

(3) GDI汽油机的尾气颗粒物由“核-壳”结构基本碳粒子堆积形成,呈链状、枝状、簇状等结构;负荷增大,颗粒物尺寸略增大,基本碳粒子重叠度增强,分形维数增大;转速增大,颗粒物尺寸减小,基本碳粒子重叠度减弱,分形维数减小;随着排气输运的进行,TWC和GPF不影响颗粒物的结构形式;TWC后颗粒物尺寸变化不大,GPF后的颗粒物尺寸减小,TWC和GPF后颗粒物的基本碳粒子重叠度减弱,分形维数减小。

作者贡献声明:

胡志远:论文框架制定,论文撰写、审阅及修改。

高鑫舜:数据处理,图表绘制,论文撰写与修改。

陆张颖:试验开展,数据收集与处理。

谭丕强:论文审阅与修改。

楼狄明:论文审阅与修改。

参考文献:

- [1] 赵伟. 汽车国VI排放法规及颗粒物排放特性分析[J]. 汽车维护与修理, 2021(5): 6.
ZHAO Wei. Analysis of national VI emission regulations of gasoline vehicles and particulate emission characteristics [J]. Auto Maintenance and Repair, 2021(5): 6.
- [2] KITTELSON D, KHALEK I, MCDONALD J, *et al.* Particle emissions from mobile sources: discussion of ultrafine particle emissions and definition [J]. Journal of Aerosol Science, 2022(159): 105881.
- [3] LEE Z, KIM T, PARK S, *et al.* Combustion, and emission characteristics of recent developed direct-injection spark ignition (DISI) engine system with multi-hole type injector [J]. Fuel, 2020(259): 116209.
- [4] 马超, 张潇文, 李倩, 等. 轻型汽油车颗粒物数浓度排放特征研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(5): 547.
MA Chao, ZHANG Xiaowen, LI Qian, *et al.* Characteristics of particle number concentrations from light-duty gasoline vehicles [J]. Environmental Pollution and Control, 2020, 42

- (5): 547.
- [5] AWAD O I, MA X, KAMIL M, *et al.* Particulate emissions from gasoline direct injection engines: a review of how current emission regulations are being met by automobile manufacturers [J]. *Science of the Total Environment*, 2020(718): 137302.
- [6] HACHEM M, LOIZEAU M, SALEH N, *et al.* Short-term association of in-vehicle ultrafine particles and black carbon concentrations with respiratory health in Parisian taxi drivers [J]. *Environment International*, 2021(147): 106346.
- [7] 庄祝跃. 喷射策略和燃料属性对直喷汽油机燃烧和颗粒物排放特性的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2017.
ZHUANG Zhuyue. Effects of injection strategy and fuel property on combustion and particle emission characteristics of gasoline direct injection engine [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [8] YANG Jiacheng, ROTH Patrick, ZHU Hanwei, *et al.* Impacts of gasoline aromatic and ethanol levels on the emissions from GDI vehicles. Part 2: influence on particulate matter, black carbon, and nanoparticle emissions [J]. *Fuel*, 2019(252): 812.
- [9] WEBER C, SUNDVOR I, FIGENBAUM E. Comparison of regulated emission factors of Euro 6 LDV in nordic temperatures and cold start conditions: diesel- and gasoline direct-injection [J]. *Atmospheric Environment*, 2019(206): 208.
- [10] 许丹丹, 张铁臣. GDI发动机颗粒物排放特性研究[J]. *内燃机与配件*, 2017(18): 20.
XU Dandan, ZHANG Tiechen. Study on particulate emission characteristics of GDI engine [J]. *Internal Combustion Engine and Parts*, 2017(18): 20.
- [11] 秦艳红, 胡敏, 李梦仁, 等. 缸内直喷汽油机排放PM_{2.5}的理化特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(5): 1332.
QIN Yanhong, HU Min, LI Mengren, *et al.* Physical and chemical characteristics of PM_{2.5} emissions from gasoline direct injection engine and its influence [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(5): 1332.
- [12] HAN Dong, FAN Yunchu, SUN Zhe, *et al.* Combustion and emissions of isomeric butanol/gasoline surrogates blends on an optical GDI engine[J]. *Fuel*, 2020(272): 117690.
- [13] ZHANG Mengzhu, GE Yunshan, WANG Xin, *et al.* Particulate emissions from direct-injection and combined-injection vehicles fueled with gasoline/ethanol match-blends - effects of ethanol and aromatic compositions [J]. *Fuel*, 2021(302): 121010.
- [14] ZHANG Miaomiao, HONG Wei, XIE Fangxi, *et al.* Combustion, performance and particulate matter emissions analysis of operating parameters on a GDI engine by traditional experimental investigation and Taguchi method [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018(164): 344.
- [15] 石秀勇, 康杨, 倪计民, 等. 直喷汽油机颗粒物生成及排放特性研究进展[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(S1): 144.
SHI Xiuyong, KANG Yang, NI Jimin, *et al.* Research progress in particulate formation mechanism and emission characteristics of gasoline direct injection engine [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(S1): 144.
- [16] 杨凌川. GDI发动机颗粒物排放特性研究[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
YANG Lingchuan. Study on the characteristics of particulate emissions from GDI engine [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [17] 李超. GDI汽油机燃烧条件及三效催化器对颗粒物物化特性影响规律研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
LI Chao. Study on the effect of combustion conditions and three-way catalytic converter on the physicochemical characteristics of particles from GDI engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [18] 钟祥麟, 李君, 李昂. 三元催化器对GDI车辆PM_{2.5}排放的影响[J]. *汽车科技*, 2016(1): 22.
ZHONG Xianglin, LI Jun, LI Ang. Effect of three-way catalytic converter on the PM_{2.5} emission of GDI vehicle [J]. *Auto Sci-tech*, 2016(1): 22.
- [19] LIU Haoye, LI Ziyang, XU Hongming, *et al.* Nucleation mode particle evolution in a gasoline direct injection engine with/without a three-way catalyst converter [J]. *Applied Energy*, 2020(259): 114211.
- [20] 潘锁柱. 缸内直喷汽油机排气微粒物理化学特征的研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
PAN Suozhu. Study on the physicochemical characteristics of exhaust particulates from gasoline direct injection engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [21] SHARMA N, AGARWAL A K. Macroscopic spray characteristics of a gasohol fueled GDI injector and impact on engine combustion and particulate morphology [J]. *Fuel*, 2021(295): 120461.
- [22] POTENZA M, MILANESE M, RISI A. Effect of injection strategies on particulate matter structures of a turbocharged GDI engine [J]. *Fuel*, 2019(237): 413.
- [23] BOGARRA M, HERREROS J M, TSOLAKIS A, *et al.* Influence of on-board produced hydrogen and three way catalyst on soot nanostructure in gasoline direct injection engines [J]. *Carbon*, 2017(120): 326.
- [24] SAFFARIPOUR M, CHAN T W, LIU F, *et al.* Effect of drive cycle and gasoline particulate filter on the size and morphology of soot particles emitted from a gasoline-direct-injection vehicle [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(19): 11950.
- [25] 马志豪, 尹振龙, 杜维新, 等. 金属型GPF对GDI发动机颗粒物微观特性的影响[J]. *内燃机学报*, 2021, 39(2): 130.
MA Zhihao, YIN Zhenlong, DU Weixin, *et al.* Effect of metal GPF on micro characteristics of particulate matters from GDI engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2021, 39(2): 130.
- [26] HU Zhiyuan, LU Zhangying, SONG Bo, *et al.* Impact of test cycle on mass, number and particle size distribution of

- particulates emitted from gasoline direct injection vehicles [J]. *Science of the Total Environment*, 2021(262): 143128.
- [27] MATHIS U, KAEGI R, MOHR M, *et al.* TEM analysis of volatile nanoparticles from particle trap equipped diesel and direct-injection spark-ignition vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(26):4347.
- [28] 许京. GDI汽油机颗粒物排放特性分析及颗粒捕集器技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2017.
XU Jing. Study on particulate emission characteristics of GDI engine and optimization of gasoline particulate filter [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [29] 邓志坤. 缸内直喷汽油机微粒捕集器性能及结构优化的仿真研究[D]. 天津:河北工业大学, 2016.
DENG Zhikun. Simulation to performance and structure optimization of gasoline particulate filter [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [30] 朱伟. 缸内直喷汽油机GPF过滤特性研究[J]. 上海汽车, 2018(6):8.
ZHU Wei. Research of GPF character of in-cylinder direction injection gasoline engine[J]. *Shanghai Auto*, 2018(6):8.
- [31] CHUAHY F D F, MOSES-DEBUSK M, CURRAN S J, *et al.* The effects of distillation characteristics and aromatic content on low-load gasoline compression ignition (GCI) performance and soot emissions in a multi-cylinder engine [J]. *Fuel*, 2021(299): 120893.
- [32] LIU Haoye, LI Ziyang, ZHANG Mengzhu, *et al.* Exhaust non-volatile particle filtration characteristics of three-way catalyst and influencing factors in a gasoline direct injection engine compared to gasoline particulate filter [J]. *Fuel*, 2021(290): 120065.
- [33] 王亚, 李君, 刘宇, 等. 机外净化技术对GDI发动机颗粒排放的影响[J]. 车用发动机, 2016(5): 57.
WANG Ya, LI Jun, LIU Yu, *et al.* Influence of external purification technology on particulate emission of GDI engine [J]. *Vehicle Engine*, 2016(5): 57.
- [34] BENAJES J, GARCÍA A, MONSALVE-SERRANO J, *et al.* Gaseous emissions and particle size distribution of dual-mode dual-fuel diesel-gasoline concept from low to full load [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017(120): 138.
- [35] CATAPANO F, IORIO S D, MAGNO A, *et al.* Effect of fuel quality on combustion evolution and particle emissions from PFI and GDI engines fueled with gasoline, ethanol and blend, with focus on 10~23 nm particles [J]. *Energy*, 2022, 239(B): 122198.
- [36] GONG J, STEWART M L, ZELENYUK A, *et al.* Importance of filter's microstructure in dynamic filtration modeling of gasoline particulate filters (GPFs) : inhomogeneous porosity and pore size distribution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018(338): 15.
- [37] PFAU S A, LA ROCCA A, HAFNER-STATION E, *et al.* Comparative nanostructure analysis of gasoline turbocharged direct injection and diesel soot-in-oil with carbon black [J]. *Carbon*, 2018(139): 342.
- [38] HU Zhiyuan, LU Zhangying, ZHANG Haochen, *et al.* Effect of oxidation temperature on oxidation reactivity and nanostructure of particulate matter from a China VI GDI vehicle [J]. *Atmospheric Environment*, 2021(256): 118461.
- [39] MENG Zhongwei, CHEN Zhao, TAN Jie, *et al.* Regeneration performance and particulate emission characteristics during active regeneration process of GPF with ash loading [J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 248(A): 117114.
- [40] BRASIL A M, FARIAS T L, KOYLU U O, *et al.* A recipe for image characterization of fractal-like aggregates [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, 29(S2): 1275.