

不同结构芳香烃对柴油燃烧颗粒物理化特性的影响

郭富男, 汪映, 王小琛, 王东兴, 白元启

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了研究不同结构的芳香烃对柴油燃烧颗粒物理化特性的影响规律,开展了掺混苯及四氢萘对高压共轨柴油机排气颗粒物理化特性影响的实验研究。分别采用高分辨率透射电子显微镜(TEM)、拉曼光谱仪(RS)、X射线光电子能谱仪(XPS)及同步热分析仪(TG)研究了不同燃料燃烧颗粒物的微观结构、石墨化程度、表面化学特性及氧化活性。实验结果表明:柴油燃烧颗粒的氧化温度最高,为594.5℃;柴油/四氢萘混合燃料燃烧颗粒物次之,为589.8℃;柴油/苯燃烧微粒的氧化温度最低,为575.8℃。此外,较柴油而言,苯/柴油、四氢萘/柴油燃料燃烧微粒的基本碳粒子直径分别增大了0.411 nm和2.169 nm,并且混合燃料燃烧微粒的D1峰与G峰的面积比与高度比增加, sp^3 杂化的碳原子数量与 sp^2 杂化的碳原子数量的比值变大,这说明掺混芳香烃后,微粒的石墨化程度下降,纳观结构更加无序。

关键词: 柴油颗粒物;芳香烃;微观形貌;表面化学特性;氧化活性

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202011003 **文章编号:** 0253-987X(2020)11-0019-07



OSID 码

Effects of Aromatics with Different Structures on the Physicochemical Properties of Diesel Burning Particulate Matter

GUO Funan, WANG Ying, WANG Xiaochen, WANG Dongxing, BAI Yuanqi

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to reveal the influences of the aromatics with different structures on the physicochemical properties of diesel burning PM this paper studies the effects of aromatics addition on the physicochemical properties of diesel burning PM. Experiments were conducted in a high pressure common-rail diesel engine, and three fuels including pure diesel, diesel/benzene (30% benzene+70% diesel, by vol.) and diesel/tetralin (30% tetralin+70% diesel, by vol.) were used. Burning PM were analyzed by transmission electron microscope (TEM), Raman spectroscopy (RS), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and thermogravimetric analysis (TGA). The experimental results showed that the diesel soot has a highest oxidation temperature of 594.5℃, followed by the diesel/tetralin soot with 589.8℃, while the diesel/benzene soot has a lowest oxidation temperature of 575.8℃. Besides, TEM, RS and XPS results revealed that compared with pure diesel soot, benzene/diesel soot and tetralin/diesel soot have larger mean primary particle diameters which increased 0.411 nm and 2.169 nm respectively, also with higher

收稿日期: 2020-06-01。 作者简介: 郭富男(1995—),男,硕士生;汪映(通信作者),女,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776162);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2020JM-044);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xzy032019002)。

网络出版时间: 2020-07-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200701.1720.008.html>

AD1/AG and ID1/IG, and greater sp³/sp² ratio. These results indicate that burning particle samples from diesel/aromatics mixtures have lower degree of graphitization and more disordered nanostructure.

Keywords: diesel burning particulate matter; aromatics; morphology; surface chemistry; oxidation reactivity

目前,大气污染是人类面临的主要环境污染问题之一,而柴油机排气颗粒物被认为是大气中PM_{2.5}和超细颗粒的主要来源。柴油燃烧颗粒由柴油高温热解及不完全燃烧产生的碳烟,润滑油窜入燃烧室燃烧后的灰烬并吸附排气管中的未燃烃类、水分和硫酸盐组成^[1-2]。研究表明,柴油颗粒捕集器(DPF)可有效去除柴油颗粒物^[3]。然而,随着颗粒在过滤体中的沉积,发动机排气系统的背压增加。为避免颗粒物在DPF中沉积导致柴油机性能下降,需要DPF再生以保持柴油机的工作效率^[4-5]。文献表明DPF再生过程与颗粒氧化活性有关^[6],因此研究柴油燃烧颗粒的氧化活性及其理化特性,对DPF再生控制具有一定的指导意义。柴油中的芳香烃被认为是形成碳烟颗粒前驱物PAHs的重要成分,因此芳香烃对柴油机燃烧和排放特性影响的研究备受关注^[7-8]。Xiao等研究表明,燃料中的甲苯或甲基萘含量越高,发动机燃烧所生成的碳烟也越多,但单环芳香烃与多环芳香烃对发动机燃烧排放的影响并无显著差别^[9]。除颗粒物质量和数量浓度外,不同芳香烃对颗粒物理化特性影响的研究,多集中在火焰燃烧微粒^[10]。Tang等发现,相较于纯丙烷火焰燃烧微粒,甲苯/丙烷混合燃料火焰燃烧微粒的基本碳粒子直径更小,并且团聚更加紧密。这是由于添加芳香烃后,火焰燃烧微粒成核变快,但颗粒基本碳粒子体积增长的速度减慢造成的^[11]。Guerrero Peña等发现,在低转换率(小于30%)下,苯火焰燃烧微粒氧化活性最高,甲苯次之,间二甲苯燃烧微粒最难被氧化,而在高转换率下,3种燃料火焰燃烧微粒氧化活性从高到低的顺序依次为苯>间二甲苯>甲苯^[12]。

由于发动机工作时,缸内燃烧过程更为复杂,且存在火焰与气缸壁面的相互作用以及碳烟颗粒在排气管中的变化,因此发动机排气颗粒物的形成较火焰燃烧微粒更为复杂。Wei和Liu等发现,较纯正庚烷而言,正庚烷/甲苯混合燃料燃烧微粒的石墨化程度较低,且燃烧微粒中基本碳粒子团聚呈链状分布,此外混合燃料燃烧微粒基本碳粒子的平均直径较大^[13-14]。然而,不同结构的芳香烃对柴油机排气

颗粒物理化特性的影响几乎未见报道。

鉴于此,本文利用透射电子显微镜(TEM)、拉曼光谱仪(RS)、X射线光电子能谱仪(XPS)和同步热分析仪(TG),研究柴油分别掺混苯(单环芳香烃,



)和四氢萘(多环芳香烃, )两种不同结构芳香烃的混合燃料燃烧颗粒物的理化特性,结果可为柴油中芳香烃组分优化以及DPF再生控制策略提供一定的理论依据与实际指导。

1 试验装置与方法

1.1 试验燃料及试验台架

由于纯芳香烃无法在柴油机中直接压燃,为研究不同结构芳香烃对柴油机燃烧微粒理化特性的影响,分别在柴油中掺入体积分数为30%的苯和四氢萘,形成柴油/苯、柴油/四氢萘混合燃料,以突出该结构的芳香烃组分的影响。类似的研究方法还可以参考上海交通大学吕兴才教授团队所做工作^[10]。表1给出了柴油、苯、四氢萘的理化性质。

表1 柴油与不同芳香烃燃料的理化特性

燃料	柴油	苯 ^[15]	四氢萘 ^[10]
分子式	C ₁₂ —C ₂₅	C ₆ H ₆	C ₁₀ H ₁₂
十六烷值	52.1		36
密度/(kg·m ⁻³)	826	877	970
运动黏度/(mPa·s)	3.8	0.604	2.05
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	42.5	31.7	40.5
闪点/℃	67.5	-11.6	77

试验发动机为一台四缸涡轮增压高压共轨柴油发动机。测控系统由GW160型电涡流测功机和PowerlinkFC2000控制柜组成。柴油机具体参数及装置示意图见文献[16]。试验工况为2 000 r/min和0.59 MPa。待发动机暖机结束并且在目标工况运转稳定时,开始采集颗粒物。试验过程中,冷却水温和机油温度分别保持在(80±5)℃和(85±2)℃。采样滤膜为Whatman公司生产的石英纤维滤膜(滤膜直径47 mm,型号185-047,用于完成TG、TEM、RS试验)和聚四氟乙烯滤膜(滤膜直径47 mm,型号7582-004,用于完成XPS试验)。为保证试验准确

性,采样前将石英纤维滤膜置于马弗炉中,以 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度焙烧 4 h,然后将滤膜放入自制采样器中采样,采样流量为 30 L/min ,采样过程未经稀释。

1.2 试验方案

采用 JEOL JEM-2100Plus 型透射电子显微镜,以 40 000 倍的放大倍率观察颗粒物微观形貌。尾气颗粒样品预处理的具体方法可参考本课题组前期论文^[16]。使用 Image Pro Plus 6.0 后处理软件对排气微粒的基本碳粒子直径 D_p 进行统计。

采用 HORIBA LabRAM HR Evaluation 型拉曼光谱仪对排气微粒的石墨化程度进行分析。试验过程中的激光源为 He-Ne 激光源,波长为 532 nm ,功率为 3.2 mW ,物镜的放大倍率为 50 倍,扫描时间为 30 s 。本文参考高建兵等所做的工作^[17-18],对一阶拉曼光谱图使用 origin 软件以 4L1G 法,即 D1 峰($1\,350\text{ cm}^{-1}$)、D2 峰($1\,500\text{ cm}^{-1}$)、D4 峰($1\,200\text{ cm}^{-1}$)和 G 峰($1\,580\text{ cm}^{-1}$)采用洛伦兹曲线进行分峰拟合,而 D3 峰($1\,620\text{ cm}^{-1}$)采用高斯曲线进行分峰拟合。

采用 ThermoFisher ESCALAB Xi+ 型 X 射线光电子能谱仪,检测颗粒物的表面化学特性。在进行 XPS 试验前需对颗粒样品进行预处理,具体步骤为:①将带有颗粒的聚四氟乙烯滤膜置于盛有二氯甲烷的容器中超声振荡 30 min ;②将溶液置于转速为 $4\,000\text{ r/min}$ 的离心机中离心 60 min ;③移除包含 SOF 成分的上层溶液;④将得到的微粒放入温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中干燥 60 min ;⑤重复上述步骤 2 次^[19]。微粒全谱扫描时,通能为 100 eV ,步长为 1 eV 。对碳峰 C1s 进行精细谱扫描时,通能为 20 eV ,步长为 0.1 eV 。使用 XPSPeak4.1 软件,以 $G/L=0.5$ 法对 C1s 进行分峰拟合。

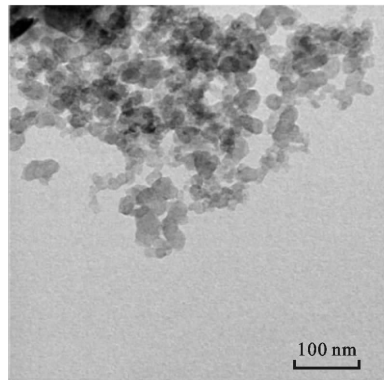
采用 Mettler TGA/DSC3 型同步热分析仪,分析比较不同颗粒物的氧化活性。将 10 mg 带有颗粒物的石英纤维滤膜样品剪碎并置于 Al_2O_3 坩埚中,测量得到 TG 曲线。具体升温步骤为:①以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的升温速率加热到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (反应气为 N_2 ,流量为 100 mL/min);②恒温 30 min ;③以 $5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的降温速率冷却到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$;④以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的升温速率加热到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (反应气切换为空气,流量为 100 mL/min)。

2 结果与讨论

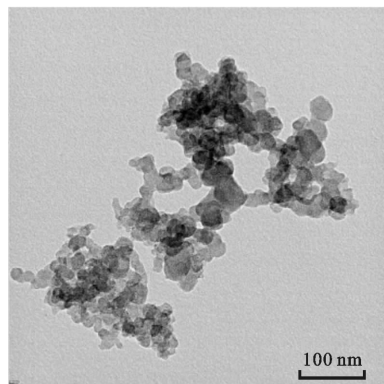
2.1 颗粒物的微观形貌

图 1 给出了 3 种燃料排气颗粒的微观形貌图。

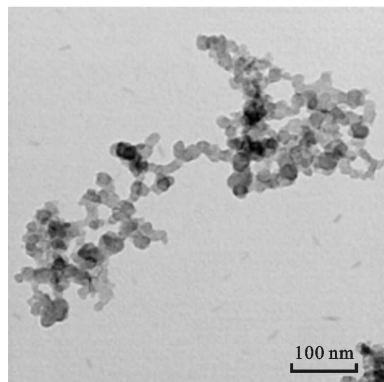
从图中可以看出,不同燃料排气微粒的微观形貌差别很小,均是由数百个近似球状的基本碳粒子团聚和重叠形成的簇状结构。不同的是,较柴油排气微粒而言,混合燃料排气颗粒中包含的基本碳粒子数相对较少,并且更趋于链状结构。类似地,Wei 等研究表明,正庚烷/甲苯混合燃料燃烧微粒的分形维数 D_f 比纯正庚烷燃烧微粒的 D_f 更小,并且微粒呈松散的链状结构^[13]。



(a) 柴油



(b) 柴油/苯

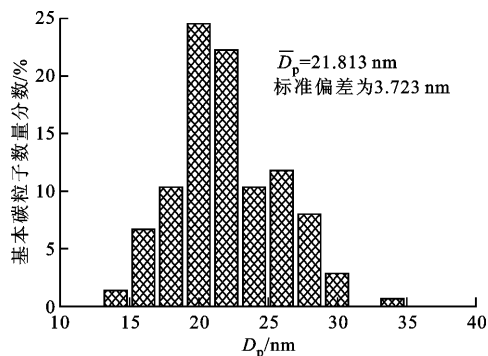


(c) 柴油/四氢萘

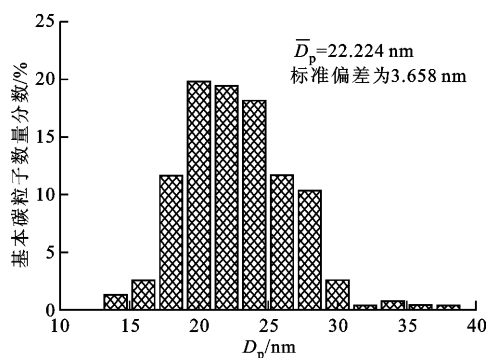
图 1 不同燃料燃烧颗粒物的微观形貌

图 2 为不同燃料燃烧微粒的基本碳粒子的粒径分布图。从图中可以看出,较柴油而言,混合燃料燃

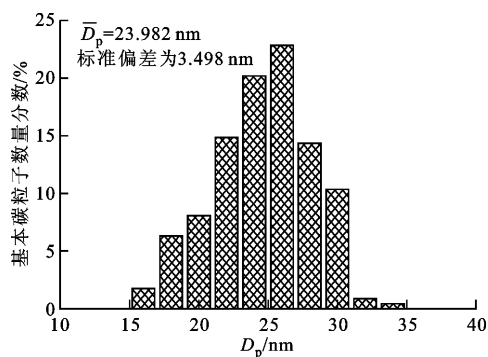
烧微粒中粒径较大的基本碳粒子比例增多,而粒径较小的基本碳粒子比例减少。



(a) 柴油



(b) 柴油/苯



(c) 柴油/四氢萘

图2 不同燃料燃烧颗粒物的基本碳粒子粒径分布图

图2也给出了不同燃料燃烧微粒的平均粒径 $\bar{D}_p$,不同微粒的 $\bar{D}_p$ 从大到小的顺序是柴油/四氢萘>柴油/苯>柴油。相较于柴油而言,柴油/苯、柴油/四氢萘燃烧微粒的 $\bar{D}_p$ 分别增加了0.411 nm和2.169 nm。这是因为混合燃料中含有大量微粒生长所需的芳香烃与类芳香族自由基,因此促进了较大粒径基本碳粒子的生成^[17]。同时,相较于混合燃料而言,柴油的H、C摩尔比更高,燃烧环境中会有更多的H,这些H会产生大量的OH基团,而OH基团会进一步促进燃烧反应的进行,从而导致柴油燃

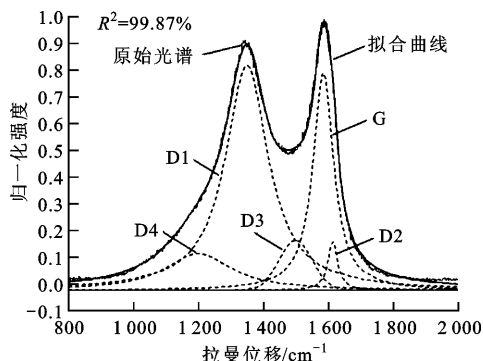
烧微粒的基本碳粒子直径变小^[20]。

较柴油/苯而言,柴油/四氢萘燃烧颗粒物的 $\bar{D}_p$ 更大。这是因为苯的黏度较小(见表1),柴油/苯混合燃料在缸内雾化效果更好并且油气混合更为充分,这样一方面使得碳烟生成量减少,另一方面碳烟的氧化过程更为充分,所以会生成 $\bar{D}_p$ 较小的基本碳粒子^[10,21]。

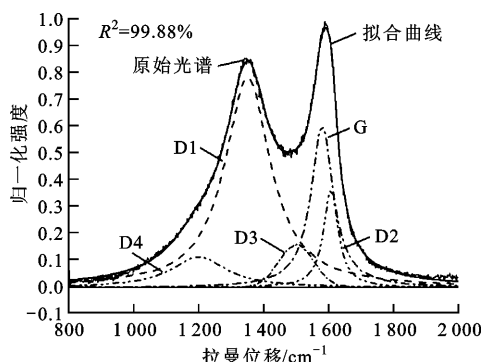
2.2 颗粒物的石墨化程度

图3为3种燃料燃烧微粒的一阶拉曼光谱图。从图中可以看出,3种微粒的一阶拉曼光谱曲线趋势一致。在拟合结果中,位于不同位置的峰分别反映的是石墨晶体中的不同结构特征或不同振动模式^[17]。D峰与G峰的强度、面积与颗粒物的无序程度、石墨化程度紧密相关,所以在本文中使用拉曼光谱中D1峰和G峰的强度比(I_{D1}/I_G)和面积比(A_{D1}/A_G)来表征颗粒结构的无序程度^[22-23]。

图4给出了不同燃烧微粒的 I_{D1}/I_G 和 A_{D1}/A_G 。从图中可以看出,柴油/苯燃烧微粒的 I_{D1}/I_G 最大,柴油/四氢萘次之,而柴油最小。这表明混合燃料燃烧微粒基本碳粒子中位于石墨层边缘的碳原子数量变多。此外,从图中还可以看出,3种微粒 A_{D1}/A_G 的变化趋势与 I_{D1}/I_G 的变化趋势一致,这说明柴油/芳香烃燃烧微粒结构的更加无序。类似地,Jansma等利用TEM发现,相较于芳香烃含量



(a) 柴油



(b) 柴油/苯

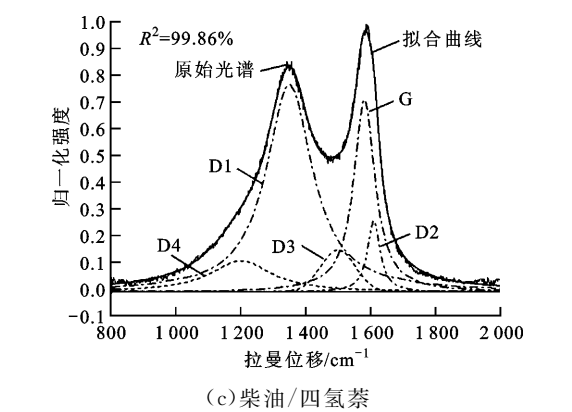


图 3 不同燃料燃烧颗粒物的一阶拉曼光谱及分峰结果

较低的燃料而言,芳香烃含量较高的燃料燃烧产生的微粒石墨化程度更低^[24]。此外,Cadrazco 等发现,相较于只含有直链烷烃的可再生柴油而言,超低硫柴油(ULSD)燃烧微粒具有更大的 A_{D1}/A_G ,这说明芳香烃的加入使得燃烧微粒更加无序^[25]。

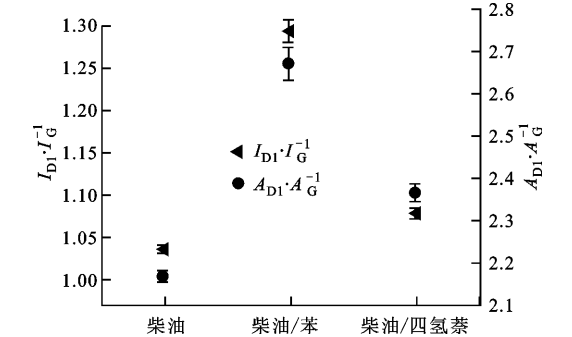


图 4 不同燃料燃烧颗粒物的 I_{D1}/I_G 和 A_{D1}/A_G

2.3 颗粒物的表面化学特性

图 5 给出了 3 种不同燃料燃烧微粒的 XPS 扫描图(200~600 eV)。从图中可以看出,微粒表面成分为碳元素和氧元素。

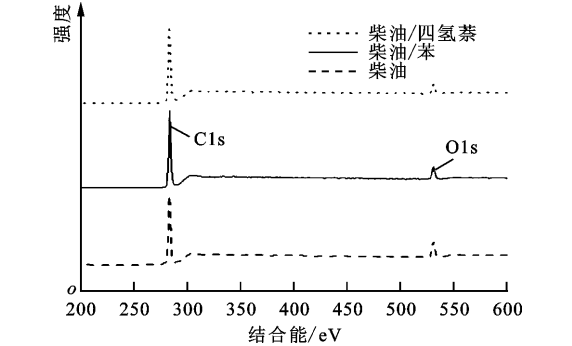


图 5 不同燃料燃烧颗粒物 XPS 扫描图

为得到微粒中碳元素的不同化学价态,需要对碳元素进行高分辨率的精细谱分析。图 6 给出了柴油燃烧颗粒 C1s 精细谱,采用高斯洛伦兹法($G/L=0.5$)将 C1s 在峰位为 286.6、287.7、284.3、285.4

eV 处拟合出 4 个小峰,所对应的分别是 C—OH、C=O、C 原子的 sp^2 杂化和 C 原子的 sp^3 杂化。

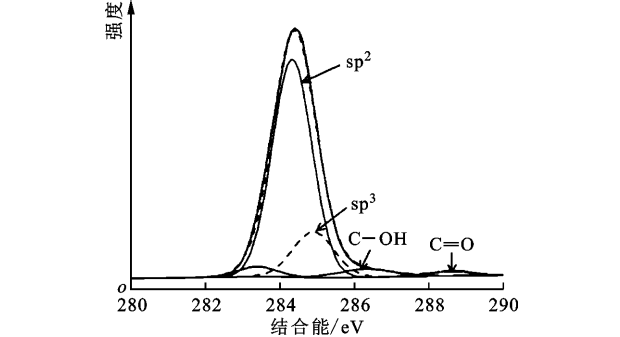


图 6 颗粒物 C1s 精细谱及分峰示意图

图 7 给出了不同排气微粒表面羟基官能团(C—OH)与羰基官能团(C=O)的含量。在本试验工况下,不同颗粒表面的 C—OH 摩尔分数在 2.62%~3.46% 的范围内变化,而 C=O 的摩尔分数在 1.1%~1.34% 的范围内变化。可以看出,颗粒表面 C—OH 的含量明显多于 C=O 的含量。这主要是因为,较 C=O 而言,C—OH 的热稳定性更好,在高温高压环境下 C—OH 的化学键不易断裂,所以 C—OH 含量更高^[26]。但是,颗粒表面 C—OH 及 C=O 含量很低,且不同颗粒之间没有很明显的变化趋势。

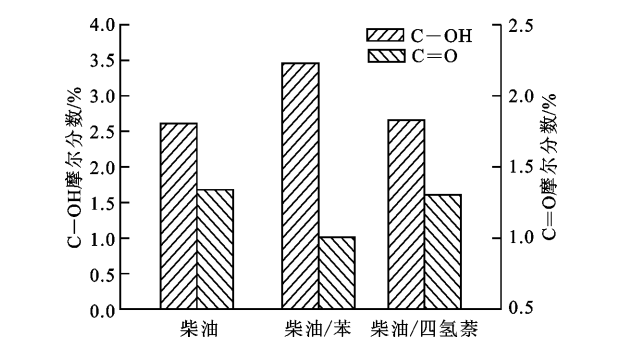


图 7 不同燃料燃烧微粒表面的 C—OH 及 C=O 含量

C 原子有 sp 、 sp^2 、 sp^3 等不同形式的杂化,但通常认为燃烧微粒表面 C 原子的主要杂化形式为 sp^3 和 sp^2 杂化。以 sp^3 与 sp^2 形式杂化的碳原子数量决定着微粒的结构特性,分别代表颗粒结构的无序性和有序性,因此二者比值越大,表示颗粒结构越无序。

通过计算得知,柴油微粒表面以 sp^3 与 sp^2 形式杂化的碳原子数量的比值为 0.298,柴油/苯微粒表面的为 0.334,柴油/四氢萘微粒表面的为 0.31。这是因为混合燃料燃烧微粒的基本碳粒子内具有大量短而弯曲的碳层结构,而绝大部分 sp^3 杂化的碳

原子位于这类碳层结构上。同样地,王林发现较纯正庚烷燃烧微粒而言,甲苯/正庚烷混合燃料燃烧微粒结构更加无序,并且基本碳粒子中含有更多长度较短的碳微晶^[26]。

2.4 颗粒物的氧化活性

在热重试验中,颗粒物随温度升高的质量损失分为两个阶段。第一阶段是反应气为氮气时的质量损失,第二阶段是反应气为空气时的质量损失,分别对应颗粒物中可挥发性有机成分的挥发和颗粒物中碳烟成分的氧化过程。表 2 给出了不同燃料燃烧颗粒中可挥发性有机成分和碳烟成分的占比(质量分数)。

从表 2 中可以看出,柴油燃烧颗粒中可挥发性有机成分占比(质量分数)为 26%,而柴油/苯、柴油/四氢萘燃烧微粒中可挥发性有机成分占比明显增加,分别为 44%和 47.9%。这主要是由于混合燃料燃烧微粒的基本碳粒子直径更大,颗粒物表面吸附了更多的未燃碳氢所导致的^[27]。

表 2 不同颗粒物中可挥发性有机成分和碳烟成分的占比

颗粒物成分	质量分数/%		
	柴油	柴油/苯	柴油/四氢萘
挥发性有机成分	26	44	47.9
碳烟	74	56	52.1

图 8 为不同燃料燃烧微粒在空气氛围下的质量损失曲线。从图中可以看出,混合燃料燃烧微粒的氧化反应向低温区移动。氧化活性代表的是颗粒物被氧化的难易程度,通常用氧化温度 $T_{\max}$ (质量损失最大时所对应的温度)、起燃温度 T_{10} (质量损失 10%所对应的温度)、燃尽温度 T_{90} (质量损失 90%所对应的温度)这 3 个特征温度来表征颗粒物的氧化活性。

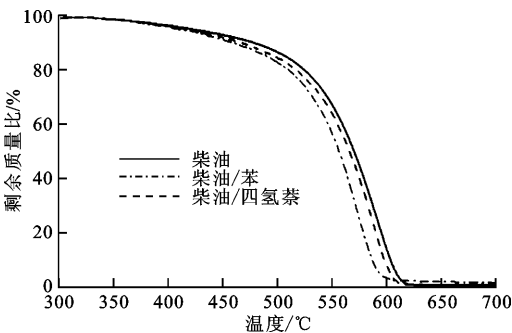


图 8 不同燃料燃烧颗粒物的质量损失曲线

表 3 给出了不同燃料燃烧微粒的 $T_{\max}$ 、 T_{10} 和

T_{90} 。从表中可以看出,3 种特征温度的变化趋势一致,较柴油燃烧微粒而言,混合燃料燃烧微粒的 $T_{\max}$ 、 T_{10} 和 T_{90} 更低。这说明这些微粒在较低温度下开始氧化,且能更快地达到最大的氧化速率,并在更短的时间内完成氧化过程。综合分析表明:混合燃料燃烧微粒的氧化活性更高,并且从表 3 中可以看出,掺混了单环芳香烃的混合燃料燃烧微粒的氧化活性最高。Jansma 等发现,较芳香烃含量低的燃料而言,芳香烃含量高的燃料燃烧产生的微粒石墨化程度低并且氧化活性高^[24]。类似地,Wei 等发现正庚烷/甲苯混合燃料燃烧微粒的活化能比纯正庚烷燃烧微粒的活化能低,即混合燃料燃烧微粒的氧化活性较高^[13]。这是因为柴油掺混芳香烃后,燃烧颗粒物的石墨化程度降低,微粒表面脂肪族官能团(C—H)变多,并且颗粒纳观结构的有序性降低,结构上的变化使得颗粒物更容易与氧气发生氧化反应^[26]。

表 3 不同颗粒物的特征温度 $^{\circ}\text{C}$

特征温度	柴油	柴油/苯	柴油/四氢萘
氧化温度	594.5	575.8	589.8
起燃温度	484.7	465.7	473.4
燃尽温度	603.7	586.9	598.1

大量研究表明,微粒的氧化活性与微粒的可挥发性有机成分含量、微观结构及表面化学特性等有关^[16-17]。在掺混芳香烃后,混合燃料燃烧产生的微粒中可挥发性有机成分增多,对应微粒的氧化温度下降,这意味着混合燃料燃烧微粒的氧化活性增高。同时,前文 2.3 节中提到,柴油、柴油/四氢萘、柴油/苯燃烧微粒表面以 sp^3 与 sp^2 形式杂化的碳原子数量的比值逐渐增大,对应的微粒氧化活性也逐渐增高。分析认为,混合燃料燃烧微粒的纳观结构更加无序,位于碳微晶层边缘的 sp^3 杂化碳原子增加,这些碳原子活性更高,从而使得微粒的氧化活性升高。前文 2.2 节中也提到,柴油、柴油/四氢萘、柴油/苯燃烧微粒的 $I_{\text{DI}}/I_{\text{G}}$ 和 $A_{\text{DI}}/A_{\text{G}}$ 逐渐增大,这说明随着微粒的石墨化程度降低,氧化活性相应升高,但本文中微粒基本碳粒子直径与微粒的氧化活性并无对应关系。

3 结 论

本文在一台高压共轨柴油机上,研究了掺混不同结构芳香烃对柴油机排气微粒氧化活性、石墨化程度、表面化学特性的影响,主要结论如下。

(1)在柴油的基础上,增加芳香烃(尤其是单环芳香烃)的含量会提高颗粒物的氧化活性,对应地,氧化活性越高,DPF 再生所需的温度也就越低。

(2)较纯柴油而言,混合燃料燃烧微粒的基本碳粒子直径更大。同时,混合燃料燃烧颗粒物 A_{DI}/A_G 和 I_{DI}/I_G 增加,表明微粒石墨化程度降低。

(3)不同排气微粒表面的羟基官能团(C—OH)和羧基官能团(C=O)的含量无明显变化。此外,柴油/苯燃烧微粒表面以 sp^3 与 sp^2 形式杂化的碳原子数量的比值最大,柴油/四氢萘次之,纯柴油的最小。这表明混合燃料排气微粒的结构更加无序,并且更容易被氧化。

参考文献:

- [1] SAVIC N, RAHMAN M M, MILJEVIC B, et al. Influence of biodiesel fuel composition on the morphology and microstructure of particles emitted from diesel engines [J]. Carbon, 2016, 104: 179-189.
- [2] SHARMA V, UY D, GANGOPADHYAY A, et al. Structure and chemistry of crankcase and exhaust soot extracted from diesel engines [J]. Carbon, 2016, 103: 327-338.
- [3] GUAN B, ZHAN R, LIN H, et al. Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154: 225-258.
- [4] MÜHLBAUER W, ZÖLLNER C, LEHMANN S, et al. Correlations between physicochemical properties of emitted diesel particulate matter and its reactivity [J]. Combustion and Flame, 2016, 167: 39-51.
- [5] JOHNSON T, JOSHI A. Review of vehicle engine efficiency and emissions [C/OL]// WCX World Congress Experience. [2020-05-25]. DOI: 10.4271/2018-01-0329.
- [6] RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ J, HERNÁNDEZ J J, SÁNCHEZ-VALDEPEÑAS J. Effect of oxygenated and paraffinic alternative diesel fuels on soot reactivity and implications on DPF regeneration [J]. Fuel, 2016, 185: 460-467.
- [7] KUKKADAPU G, KANG D, WAGNON S W, et al. Kinetic modeling study of surrogate components for gasoline, jet and diesel fuels: C7-C11 methylated aromatics [J]. Proceeding of the Combust Institute, 2019, 37(1): 521-529.
- [8] MUELLER C J, CANNELLA W J, BRUNO T J, et al. Methodology for formulating diesel surrogate fuels with accurate compositional, ignition-quality, and volatility characteristics [J]. Energy Fuels, 2012, 26(6): 3284-3303.
- [9] XIAO Z, LADOMMATOS N, ZHAO H. The effect of aromatic hydrocarbons and oxygenates on diesel engine emissions [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part D Journal of Automobile Engineering, 2000, 214(3): 307-332.
- [10] QIAN Y, QIU Y, ZHANG Y H, et al. Effects of different aromatics blended with diesel on combustion and emission characteristics with a common rail diesel engine [J]. Applied Thermal Energy, 2017, 125: 1530-1538.
- [11] TANG Q X, WANG M D, YOU X Q, et al. Effects of fuel structure on structural characteristics of soot aggregates [J]. Combustion and Flame, 2019, 199: 301-308.
- [12] GUERRERO PEÑA G D J, ALREFAAI M M, YANG S Y, et al. Effects of methyl group on aromatic hydrocarbons on the nanostructures and oxidative reactivity of combustion-generated soot [J]. Combustion and Flame, 2016, 172: 1-12.
- [13] WEI J, SONG C L, LV G, et al. A comparative study of the physical properties of in-cylinder soot generated from the combustion of n-heptane and toluene/n-heptane in a diesel engine [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 1939-1946.
- [14] LIU Y, SONG C L, LV G, et al. Surface functional groups and sp^3/sp^2 hybridization ratios of in-cylinder soot from a diesel engine fueled with n-heptane and n-heptane/toluene [J]. Fuel, 2016, 179: 108-113.
- [15] TALIBI M, HELLIER P, LADOMMATOS N. Impact of increasing methyl branches in aromatic hydrocarbons on diesel engine combustion and emissions [J]. Fuel, 2018, 216: 579-588.
- [16] WANG X C, WANG Y, BAI Y Q. Effects of 2, 5-dimethylfuran addition on morphology, nanostructure and oxidation reactivity of diesel exhaust particles [J]. Fuel, 2019, 253: 731-740.
- [17] 郝斌. 不同燃料对柴油机排气颗粒物的影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014: 62-65.
- [18] 高建兵. NTP 作用下的非道路柴油机颗粒物氧化特性及微观结构 [D]. 北京: 北京理工大学, 2017: 76-78.
- [19] WANG L, SONG C L, SONG J O, et al. Aliphatic C—H and oxygenated surface functional groups of diesel in-cylinder soot: characterizations and impact on soot oxidation behavior [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3099-3106.

(下转第 90 页)

- Jilin University (Engineering and Tecnology Edition), 2009, 39(2): 382-387.
- [14] LIU Q, QID, TANG H. Computation of aerodynamic noise of centrifugal fan using large eddy simulation approach, acoustic analogy, and vortex sound theory [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2007, 221(11): 1321-1332.
- [15] 王梦豪, 吴立明, 刘小民, 等. 采用仿鸮翼叶片降低空调用离心风机气动噪声的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 1-7.
- WANG Menghao, WU Liming, LIU Xiaomin, et al. A study on noise reduction of centrifugal fan in air conditioner by using the bionic blade inspired by the owl wing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(6): 1-7.
- [16] AKIRA Y. Statistical derivation of Kolmogorov's-5/3 power law by turbulent-viscosity approach [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1978, 45(3): 1019-1024.
- [17] LI D, LIU X. A comparative study on aerodynamic performance and noise characteristics of two kinds of long-eared owl wing models [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2017, 31(8): 3821-3830.
- [18] WANG M, LIU X. Numerical investigation of aerodynamic and acoustic characteristics of bionic airfoils inspired by bird wing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(11): 4004-4016.
- (编辑 荆树蓉)

(上接第 25 页)

- [20] VELÁSQUEZ M, MONDRAGÓN F, SANTAMARÍA A. Chemical characterization of soot precursors and soot particles produced in hexane and diesel surrogates using an inverse diffusion flame burner [J]. Fuel, 2013, 104: 681-690.
- [21] VERMA P, PICKERING E, JAFARI M Y, et al. Influence of fuel-oxygen content on morphology and nanostructure of soot particles [J]. Combustion and Flame, 2019, 205: 206-219.
- [22] SEONG H J, BOEHMAN A L. Evaluation of Raman parameters using visible Raman microscopy for soot oxidative reactivity [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(3): 1613-1624.
- [23] WANG Y, LIANG X, TANG G, et al. Impact of lubricating oil combustion on nanostructure, composition and graphitization of diesel particles [J]. Fuel, 2017, 190: 237-244.
- [24] JANSMA H, FINO D, UITZ R M, et al. Influence of diesel fuel characteristics on soot oxidation properties [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 51(22): 7559-7564.
- [25] CADRAZCO M, SANTAMARÍA A, AGUDELO J R. Chemical and nanostructural characteristics of the particulate matter produced by renewable diesel fuel in an automotive diesel engine [J]. Combustion and Flame, 2019, 209: 130-142.
- [26] 王林. 不同特性燃料条件下柴油机缸内微粒纳观结构、表面官能团及氧化活性的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012: 117-119.
- [27] WEI L, CHEUNG C S, NING Z. Influence of waste cooking oil biodiesel on the nanostructure and volatility of particles emitted by a direct-injection diesel engine [J]. Aerosol Science and Technology, 2016, 50(9): 893-905.

(编辑 荆树蓉)