

燃用生物柴油国V公交车的颗粒排放与微观形貌

胡志远¹, 罗军¹, 林骠骑¹, 谭丕强¹, 楼狄明¹, 王忠²

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 以一辆国V柴油公交车为研究对象, 试验研究了该车燃用不同比例废弃油脂制生物柴油-柴油混合燃料在中国典型城市公交循环(CCBC)下颗粒物质量、颗粒数量、粒径分布与颗粒微观形貌特征。结果表明: 随着生物柴油比例的增加, 排放的尾气颗粒物质量和固态颗粒数量减小; 燃用生物柴油的尾气颗粒典型微观结构与柴油的类似, 由多个准球状基本碳粒子堆积而成, 呈链状、枝状等不规则结构; 与燃用柴油的相比, 燃用生物柴油的尾气颗粒基本碳粒子粒径较小, 分形维数较大, 空间结构更紧密; 燃用生物柴油的尾气颗粒在团聚处更易被氧化, 颗粒的分形维数和基本碳粒子直径随着氧化进行而增大; 燃用柴油的尾气颗粒的氧化主要以最外壳边界碳层湮灭为主, 颗粒分形维数、基本碳粒子直径随着氧化进行而减小。

关键词: 国V柴油公交车; 废弃油脂制生物柴油; 颗粒; 排放; 微观形貌

中图分类号: U467.1⁺9

文献标志码: A

Emission Characteristics and Microscopic Morphology of Particles from China V Diesel Bus Fueled with Biodiesel Blends

HU Zhiyuan¹, LUO Jun¹, LIN Biaoqi¹, TAN Piqiang¹, LOU Diming¹, WANG Zhong²

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A diesel bus certified to meet China V emission standards is selected as the research object to explore the mass, number, size distribution and microscopic morphology of particles by fueled with different used cooking oil (UCO) biodiesel blends during China typical city bus driving cycle (CCBC) experimentally. The results show that the mass and the number of particles emitted from the diesel bus decrease

as the mixing ratio of the UCO biodiesel increases, and the typical microscopic morphology of particles by fueled with biodiesel blends is similar to that by fueled with diesel. The particles consist of dozens of quasi-spherical basic carbon particles, mainly in irregular shapes such as chain and branch. Moreover, the particles by fueled with biodiesel blends have smaller basic carbon particle size, larger fractal dimension and more compact spatial structure than those by fueled with diesel. In the process of oxidation, the particles by fueled with biodiesel blends are easier to be oxidated at agglomerating area, and the fractal dimension and the average size of basic carbon particles increase with the oxidation. However, the oxidation mainly occurs at the outermost carbon layer of the particles by fueled with diesel, and the fractal dimension and the average size of basic carbon particles decrease.

Key words: China V diesel bus; used cooking oil (UCO) based biodiesel; particles; emission; microscopic morphology

机动车排放的一次颗粒物和二次颗粒物占我国重点城市群大气颗粒物的约30%^[1], 是雾霾的重要成因之一^[2]。柴油机尾气颗粒排放数量比汽油机高30~100倍, 占我国机动车颗粒排放总量的93%以上^[3]。因此, 采取措施降低柴油车尾气颗粒排放十分必要, 也是目前的研究热点。

我国柴油公交车保有量约为12.06万辆, 占公交车总量的17.4%^[4]。目前柴油公交车仍是中小城市的主要交通工具之一。受到城市路网密集和行驶要求的限制, 公交车处于频繁的制动、加速、减速和怠速行驶工况^[5], 相当一部分时间是在低速大扭矩下行驶, 从而排放大量的颗粒, 是中小城市大气颗粒的重要来源之一^[6]。生物柴油是一种清洁、可持续

收稿日期: 2020-12-24

基金项目: 上海市科委科技攻关计划(18DZ1202802); 车用生物燃料技术国家重点实验室开放课题(2013010)

第一作者: 胡志远(1970—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为汽车能源技术、汽车低排放设计技术。

E-mail: huzhiyuan@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

的车用替代燃料,具有润滑性好、可再生性好、十六烷值高等特点^[7]。公交车燃用生物柴油能有效降低尾气颗粒排放^[8]。然而,生物柴油与柴油燃烧排放的颗粒特性、微观结构、多环芳烃组成等存在差异^[9],因此研究燃用生物柴油公交车的尾气颗粒排放特性及微观形貌非常必要。

国内外学者以发动机为研究对象,开展了生物柴油对柴油机尾气颗粒排放特性及微观形貌的影响研究,分析了生物柴油对柴油机尾气颗粒物质量和颗粒数量^[10-11]、粒径分布^[12]、颗粒微观形貌^[13]、分形维数以及氧化活性^[14]的影响。结果表明:燃用生物柴油柴油机排放的颗粒质量显著降低^[15],粒径较燃用柴油的更小^[16],生物柴油尾气颗粒团聚程度更高,颗粒基本碳粒子堆积更为密集^[17];生物柴油掺混比的增加导致柴油机尾气颗粒石墨化程度减弱、无定形结构增加,从而氧化活性变强^[18]。

以车辆为研究对象,开展生物柴油对柴油车尾气颗粒排放特性及微观形貌影响研究,可更好地反映实际行驶过程中车辆的颗粒排放特性,因此受到国内外学者的关注。例如,楼狄明等分析了生物柴油公交车尾气颗粒数量与粒径分布特性^[19],胡志远等分析了生物柴油公交车尾气颗粒碳质组分^[20]、可溶性有机物^[21]特性,有关燃用生物柴油车辆尾气颗粒的微观形貌特征未见报道。

以一辆国V柴油公交车为研究对象,在重型底盘测功机上运行中国典型城市公交循环(CCBC),

分析燃用柴油、体积比为20%的废弃油脂制生物柴油-柴油混合燃料以及100%废弃油脂制生物柴油公交车尾气颗粒物质量、颗粒数量、粒径分布与颗粒微观形貌特征,讨论氧化温度对车辆尾气颗粒微观形貌的影响,以综合评价废弃油脂制生物柴油对国V柴油公交车尾气颗粒排放特征、微观形貌及氧化特性的影响。

1 试验方案

1.1 试验样车与燃油

试验样车为一辆满足国V排放标准的柴油公交车,安装高压共轨六缸增压中冷柴油机,试验车辆主要技术参数如表1所示。试验燃料为国V柴油(B0)、按20%体积比混合的废弃油脂制生物柴油-国V柴油混合燃料(B20)、100%废弃油脂制生物柴油(BD100)。B0、B20和BD100的主要理化指标如表2所示。

表1 试验车辆主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of test vehicle

项目	技术参数
长×宽×高/(mm×mm×mm)	11 995×2 530×3 150
轴距/mm	5 945
排量/L	8.8
整车质量/kg	11 900
额定功率/kW	192
最大扭矩/(N·m)	1 100
后处理装置	SCR

表2 试验燃油理化指标

Tab.2 Main physical and chemical indexes of test fuel

油品	20℃密度/(kg·m ⁻³)	20℃运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	C质量分数/%	H质量分数/%	O质量分数/%	S质量分数/%
B0	834.2	5.22	85.34	13.12	1.54	8.4×10 ⁻⁴
B20	844.9	5.24	83.72	12.67	3.61	8.1×10 ⁻⁴
BD100	876.8	5.38(40℃)	76.46	11.90	11.64	4.6×10 ⁻⁴

1.2 试验装置与方案

试验设备包括MAHA-AIP重型底盘测功机、Semtech-Ecostar车载尾气分析仪、芬兰Dekeati公司的细颗粒取样稀释系统FPS-4000、美国TSI公司的EEPS3090颗粒物粒径谱仪、管式炉、美国FEI公司的场发射透射电子显微镜。试验装置示意图如图1所示。

试验时将公交车固定在底盘测功机上,根据车辆最大总质量的70%加载,通过滑行确定阻力系数,重复3次。试验循环为CCBC,循环运行时间为1 314 s,行驶里程为5.89 km,平均时速为16.16 m·h⁻¹。CCBC的发动机工况以低速低转矩为主,能够

较好地反映中国典型城市公交车的实际道路行驶工况^[22]。试验时驾驶员根据司机助屏幕显示的车速-时间曲线驾驶车辆,车辆速度误差区间为该时刻目标车速的±3 km·h⁻¹,然后通过实际驾驶循环与理论循环的相关性系数(>0.95)判断试验的有效性。试验时利用Semtech-Ecostar车载尾气分析仪测量颗粒物质量与固态颗粒数量,同时利用FPS-4000射流稀释器抽取部分尾气,稀释比8.21,稀释温度120℃。经过FPS-4000射流稀释器稀释后的尾气一部分进入颗粒采集系统,采样介质为直径47 mm的石英滤膜,另一部分进入EEPS3090颗粒物粒径谱仪分析颗粒数量和粒径分布。将通过颗粒采集系

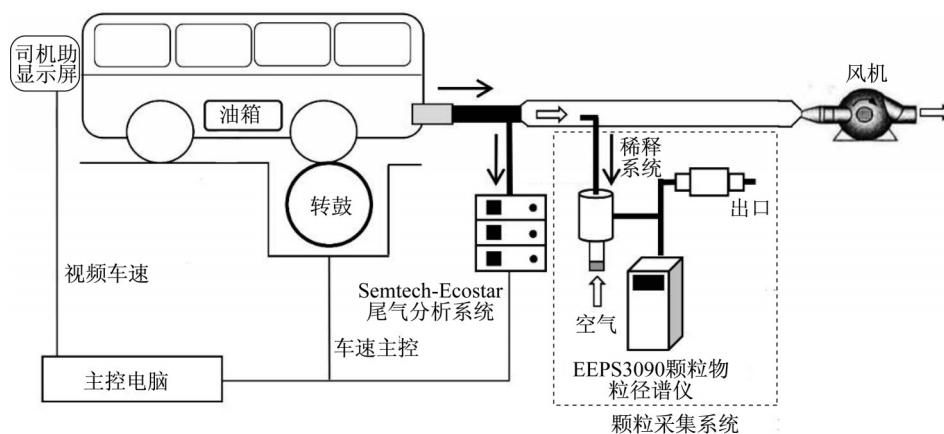


图1 试验测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

统采集到的颗粒样本送入管式炉,在特定温度氧化后形成不同氧化程度的颗粒样本。利用透射电子显微镜对不同氧化程度的颗粒样本进行微观形貌分析。首先使用超声振荡法对样本预处理,然后将含颗粒的无水乙醇滴至碳膜铜网,置于白炽灯下烘干,最后使用场发射透射电子显微镜观察颗粒微观形貌特征。

2 结果及分析

2.1 颗粒物质量、颗粒数量及粒径分布

燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车排放的尾气颗粒物质量、23~2 500 nm 固态颗粒数量如表3所示。

表3 燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车排放的尾气颗粒物质量及颗粒数量

Tab.3 Particulate mass and particle number from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100

油品	颗粒物质量/(g·km ⁻¹)	颗粒数量/(10 ¹³ km ⁻¹)
B0	0.028	7.303
B20	0.024	6.197
BD100	0.017	4.519

由表3可见,燃用生物柴油国V柴油公交车的尾气颗粒物质量和固态颗粒数量降低。随着生物柴油混合比例的增加,尾气颗粒物质量、固态颗粒数量降低幅度增大。这是因为:一方面生物柴油着火性较好的特点有利于燃油的缸内燃烧,减少了燃油裂解的可能性;另一方面,由表2可知,生物柴油的O质量分数为11.64%,高于石化柴油的1.54%,对燃烧起到促进作用^[23]。

燃用B0、B20、BD100国V柴油公交车的尾气颗粒粒径分布如图2所示。由图2可见,燃用B0、B20、BD100国V柴油公交车在CCBC下尾气颗粒排放数量呈双峰分布形态,在10 nm和60 nm附近出现峰值,100 nm以下的超细颗粒占总颗粒数量的90%以上,该结果与赵杰等^[24]得到的粒径分布结果一致。与柴油比较,生物柴油可以显著降低公交车尾气颗粒中直径大于60 nm的积聚态颗粒数量,但导致直径小于23 nm的核膜态颗粒数量增加。B0、B20、BD100排放的尾气颗粒中23 nm以下颗粒数量分别占总颗粒数量的35.49%、37.13%和48.69%。这是因为:一方面生物柴油氧含量更高,降低了缸内燃烧出现局部缺氧区域的可能性,燃烧更完全;另一方面,生物柴油的硫元素含量更低,生成的颗粒中表面硫酸盐含量更低,导致60 nm以上的聚积态颗粒排放数量减小,23 nm以下的颗粒排放数量增加。

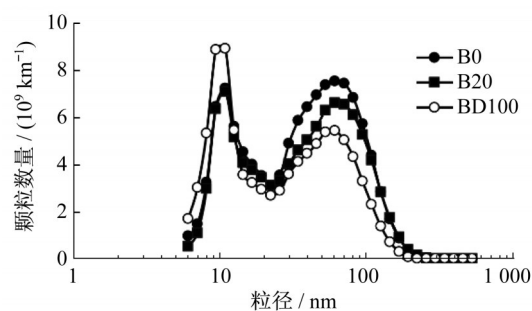


图2 燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒粒径分布

Fig.2 Size distribution of particles from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100

2.2 颗粒典型微观形态特征

图3为燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车

的尾气颗粒典型微观形貌特征。

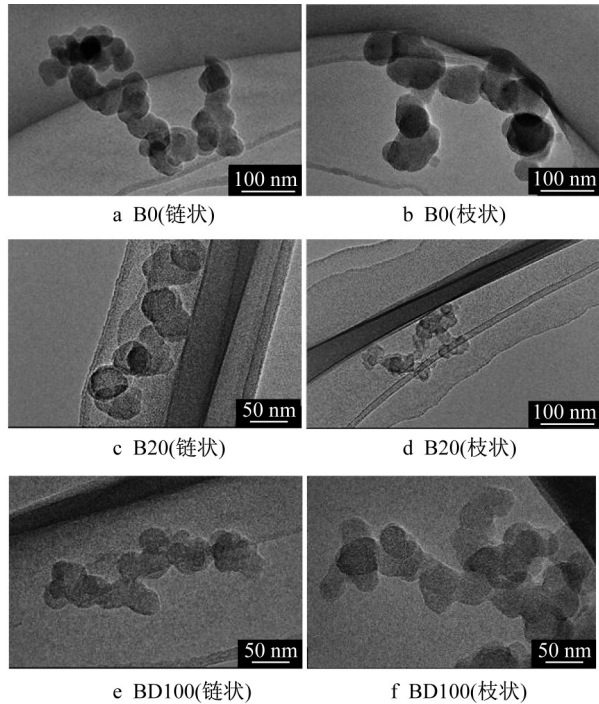


图3 燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒典型微观形貌

Fig.3 Typical microscopic morphology of particles from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100

由图3可见,燃用BD100国V柴油公交车尾气颗粒典型微观形貌与燃用B0的类似,由多个准球状的基本碳粒子堆积而成,主要呈链状(见图3e)、枝状(见图3f)等形态,基本碳粒子排列与结合具有无规则与无序性^[25]。B0燃烧排放的尾气颗粒基本碳粒子大而稀疏,部分基本碳粒子之间出现重叠团聚现象,重叠区域具有清晰的外壳边界(见图3a);BD100燃烧排放的尾气颗粒基本碳粒子团聚程度更高,部分碳粒子之间出现明显的黏连现象,缺乏明显的边界(见图3e),与张宇等^[17]通过发动机台架试验得到的研究结果基本一致;B20燃烧排放的尾气颗粒基本碳粒子团聚程度介于B0和BD100之间,基本碳粒子重叠区域的边界大致清晰可见。

颗粒的分形维数可反映其几何结构的不规则性以及颗粒团聚体中基本碳粒子间疏密程度,分形维数越大,颗粒的结构越紧密,组成颗粒的基本碳粒子之间重叠度越高^[26]。根据Farias的研究,颗粒团聚体分形维数 D_f 的计算式如下所示^[27]:

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

式中: k_g 为结构系数; R_g 为颗粒回旋半径; r_p 为基本碳粒子平均半径; D_f 为分形维数; N_p 为颗粒中所含基本碳粒子数量。

利用得到的颗粒透射电子显微镜图像,可提取颗粒回旋半径 R_g 和基本碳粒子数量 N_p ^[28],基本碳粒子平均半径 r_p 可通过图像处理提取。燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车的尾气颗粒分形维数如表4所示。

表4 燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒分形维数

Tab.4 Fractal dimension of particles from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100

油品	分形维数
B0	1.80
B20	1.85
BD100	1.87

由表4可见,随着生物柴油混合比例的增加,颗粒分形维数增大,这表明燃用生物柴油生成的颗粒几何结构更加紧密,团聚程度更高,与瞿磊等^[29]得到的柴油机颗粒分形维数结论一致。这是因为,生物柴油尾气颗粒中含有较多的可溶性有机组分,对基本碳粒子及其他颗粒有黏连强化作用,颗粒团聚体与基本碳粒子之间的结合更加紧密^[30]。

2.3 基本碳粒子微观形态特征

燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车的尾气颗粒基本碳粒子微观结构如图4所示。由图4可见,燃用柴油和生物柴油国V柴油公交车的尾气颗粒由多环芳烃高温氧化形成,基本碳粒子内部结构较为相似,为典型的内核和外壳结构。内核存在许多无定形长度较短、曲率较大的微晶;外壳微晶长度较大,类似于石墨片层状。内核与外壳间的边界由微晶曲向弹性应变大于晶体自由能时产生^[31]。燃用BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子平均粒径为27.57 nm,小于燃用B20的29.08 nm和燃用B0的35.75 nm,与郝斌^[32]的研究结果基本一致。这是因为,生物柴油的十六烷值较高,滞燃期短,在相同工况下颗粒的后期氧化时间较长,基本碳粒子平均粒径减小。

图5为国V柴油公交车燃用B0、B20和BD100的尾气颗粒基本碳粒子粒径分布。

由图5可见,燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子直径呈单峰分布,粒径分布范围为10~62 nm,14~42 nm的基本碳粒子占77%以上,与Lapuerta等^[33]得到的柴油机尾气颗粒

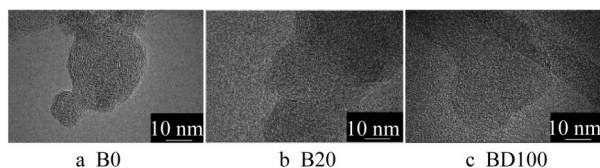


图4 燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子微观结构

Fig.4 Microstructure of basic carbon particles from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100

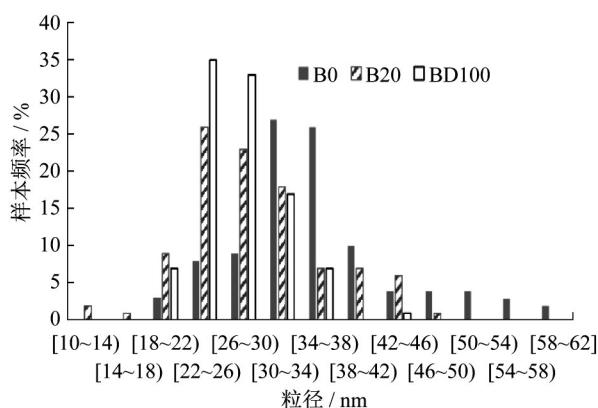


图5 燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子粒径分布

Fig.5 Size distribution of basic carbon particles from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100

基本碳粒子粒径分布结果相似。随着生物柴油混合比例的增加,基本碳粒子峰值粒径向小粒径移动,与前文EPCS3090颗粒物粒径谱仪得到的结果一致。

2.4 氧化对柴油公交车尾气颗粒微观特征的影响

柴油公交车颗粒氧化过程中,其分形维数、基本碳粒子结构等特征发生变化。图6为燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒氧化过程中的分形维数变化情况。由图6可见,公交车燃用BD100的尾气颗粒分形维数随着氧化温度的升高而增加,燃用B0的尾气颗粒分形维数随着氧化温度的升高而降低,燃用B20的尾气颗粒分形维数呈先增大后减小的变化趋势。这是因为,燃用柴油的尾气颗粒基本碳粒子为单核结构,燃用生物柴油的尾气颗粒基本碳粒子为多核结构^[25]。燃用B0的尾气颗粒氧化过程多以外壳边界碳层湮灭为主,重叠区域面积减少,团聚程度下降,从而分形维数减小;燃用BD100的尾气颗粒的氧化多以边界碳层衔接处氧化为主,基本碳粒子出现一定程度的融合,团聚程度增强,从而分形维数增加。燃用B20的尾气颗粒,生物

柴油的引入导致颗粒表面的挥发性有机物增加,颗粒间的黏附作用力加强,未氧化的颗粒分形维数相较于燃用B0的更高。随着氧化温度升高,氧化程度上升,挥发性有机物最先被氧化,导致颗粒的氧化主要以碳层衔接与黏连处的氧化形式为主,基本碳粒子之间出现融合趋势,分形维数增大。当氧化温度继续升高后,颗粒表面的挥发性有机物完全氧化,主要氧化形式转变为基本碳粒子外壳边界碳层的湮灭,基本碳粒子的团聚程度减少,颗粒之间黏连程度减少,从而表现为分形维数减小。

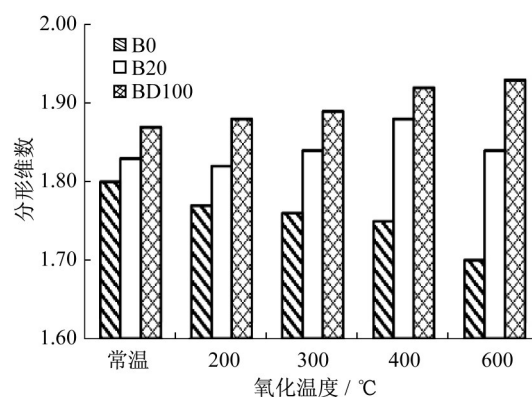


图6 不同氧化温度下燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒分形维数

Fig.6 Fractal dimension of particles from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100 at different oxidation temperatures

在氧化过程中颗粒的结构变化主要是由基本碳粒子的碰撞凝结、表面生长以及氧化湮灭共同作用的^[34]。分析颗粒基本碳粒子不同氧化程度的结构变化可反映燃用不同油品国V柴油车尾气颗粒的演变历程。燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒氧化过程中基本碳粒子微观形貌如图7所示。

由图7可见,燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子微观结构差别不大。燃用柴油的尾气颗粒基本碳粒子主要呈无定形结构,燃用生物柴油的尾气颗粒基本碳粒子呈典型内核外壳结构的比例相对较高,更倾向于产生规则的圆球状基本碳粒子。这可能是由于燃用生物柴油的尾气颗粒包含更高比例的可溶性有机组分,强化了与其他微粒和基本碳粒子之间的黏结作用,再逐渐形成三维的球状粒子。

综合图7和图4可见,在燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子氧化过程中,3种燃料形成的颗粒从发动机排出后再次处于高温环境时,颗粒的表面迅速成长并将其他碳粒子包裹于

内部,仍保持着内部含有漩涡状的多核结构(见图7i,j,k)。随着氧化温度的升高,颗粒基本碳粒子的氧化程度上升,相较于图4中未氧化的基本碳粒子形貌,3种燃料形成的颗粒基本碳粒子氧化后的形貌存在显著差异。燃用B0的尾气颗粒在氧化过程中形成了长而平直的石墨化碳层结构,主要分布于碳粒子边界(见图7j),Wal等^[35]的试验表明,颗粒氧化过程中一旦呈现了石墨化结构,其基本碳粒子微观结构就难以进一步发生改变,颗粒在后期氧化过程中变化不大;燃用B20的尾气颗粒氧化后的团聚程度有所上升(见图7e),而且出现了比较明显的碳粒子融合趋势(见图7k);燃用BD100的尾气颗粒在中等氧化程度时(300℃、400℃)表现出显著的基本碳粒子融合现象(见图7i),在氧化末期出现了大直径的基本碳粒子(见图7l),这是基本碳粒子融合后的结果。

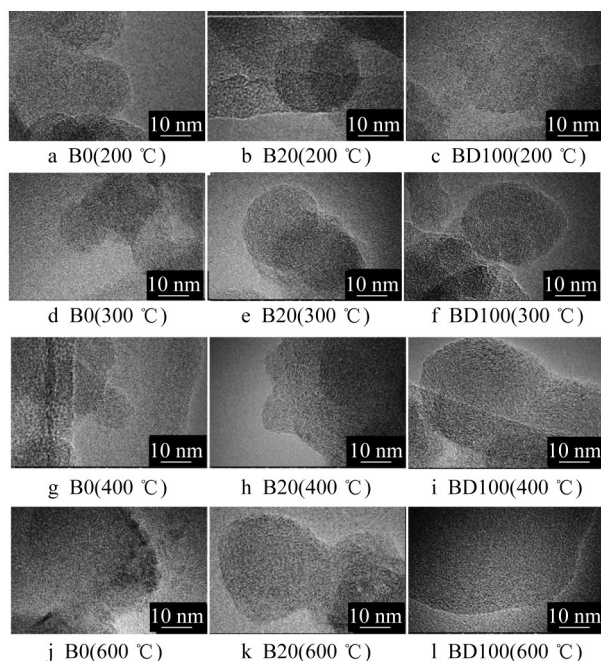


图7 不同氧化温度下燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子微观结构

Fig.7 Microstructure of basic carbon particles from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100 at different oxidation temperatures

燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子不同氧化温度下的平均粒径如图8所示。由图8可见,与颗粒分形维数及微观形貌的变化趋势类似,随着氧化的进行,柴油尾气颗粒基本碳粒子平均粒径减小,燃用BD100的尾气颗粒基本碳粒子平均粒径增大,燃用B20的尾气颗粒基本碳粒子平均粒径呈先增大后减小的变化趋势。这是因

为,随着氧化温度的升高,燃用B0的尾气颗粒基本碳粒子开始氧化,外部碳层逐渐湮灭,甚至出现了较难氧化的石墨化碳层结构,并且基本碳粒子的分散分布不利于碰撞融合,氧化过程中基本碳粒子粒径减小;燃用BD100的尾气颗粒首先从碳层衔接处开始氧化,氧化过程中基本碳粒子碰撞结合,导致基本碳粒子粒径增大;随着氧化过程的进行,燃用B20的尾气颗粒基本碳粒子从碰撞融合逐渐过渡到外部碳层的湮灭,基本碳粒子粒径先增大后减小。

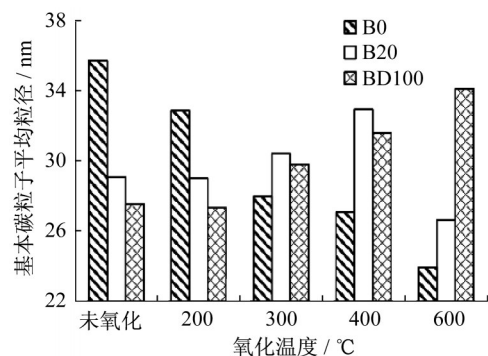


图8 不同氧化温度下燃用B0、B20和BD100国V柴油公交车尾气颗粒基本碳粒子平均粒径

Fig.8 Average size of basic carbon particles from China V diesel bus fueled with B0, B20 and BD100 at different oxidation temperatures

3 结论

(1)随着生物柴油混合比例增加,国V柴油公交车排放的尾气颗粒中核膜态颗粒数量增大,积聚态颗粒数量减少,颗粒物质量及固态颗粒排放数量降低。

(2)燃用生物柴油国V柴油公交车尾气颗粒典型微观结构与燃用柴油的类似,由多个准球状的基本碳粒子组成,主要为链状、枝状等不规则结构;燃用生物柴油的尾气颗粒更倾向于产生规则的圆球状基本碳粒子,基本碳粒子平均粒径较小,分形维数较大,颗粒几何结构更紧密。

(3)燃用B0国V柴油公交车尾气颗粒的氧化主要以外壳边界碳层湮灭为主,燃用BD100的尾气颗粒的氧化主要以衔接处碳层氧化为主。随着氧化温度升高,燃用B0的尾气颗粒分形维数和基本碳粒子平均粒径降低;燃用BD100的尾气颗粒分形维数和基本碳粒子平均粒径增大;燃用B20的尾气颗粒分形维数和基本碳粒子随氧化温度的升高呈先增大后减小的变化趋势。

作者贡献说明:

胡志远:制定研究方案,指导试验人员开展试验。
 罗军:试验操作,试验数据分析。
 林骠骑:试验操作。
 谭丕强:论文修改。
 楼狄明:论文修改。
 王忠:论文修改。

参考文献:

- [1] 李佳璇. 浅析机动车尾气与煤炭燃烧对我国雾霾的影响[J]. 广州化工, 2020, 48(14):120.
 LI Jiakuan. Influence of motor vehicle exhaust and coal combustion on Chinese haze[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(14):120.
- [2] 张方娟, 杨东红, 许颖, 等. 汽车尾气排放与雾霾天气的相关性研究[J]. 河南科技, 2020(5):146.
 ZHANG Fangjuan, YANG Donghong, XU Ying, *et al.* Research on the correlation between automobile exhaust emission and haze weather [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2020(5):146.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国环境状况公报[EB/OL]. [2020-06-02]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkqb/202006/P020200602509464172096.pdf>.
 Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China ecological environment status bulletin 2019 [EB/OL]. [2020-06-02]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkqb/202006/P020200602509464172096.pdf>.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 2019 年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2020(6):86.
 Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2019 [J]. Finance & Accounting for Communications, 2020(6):86.
- [5] 涂先库. 城市公交柴油化面临的排放问题及对策[J]. 宁波工程学院学报, 2005(4):31.
 TU Xianku. Emission problems and controlling measures of urban bus dieselization [J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2005(4):31.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年中国移动源环境管理年报: 第 I 部分 机动车排放情况[J]. 环境保护, 2020, 48(16):47.
 Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China mobile source environmental management annual report in 2020: Part I the situation of vehicle emission [J]. Environmental Protection, 2020, 48(16):47.
- [7] 赵光辉, 佟华芳, 李建忠, 等. 生物柴油产业开发现状及应用前景[J]. 化工中间体, 2013, 10(2):6.
 ZHAO Guanghui, TONG Huafang, LI Jianzhong, *et al.* Industrial development status and application prospects of biodiesel[J]. Chemical Intermediate, 2013, 10(2):6.
- [8] TOMPKINS B T, SONG H, BITTLE J, *et al.* Biodiesel later-phased low temperature combustion ignition and burn rate behavior on engine torque[R]. Detroit: SAE, 2012.
- [9] 吴刚, 江国和, 杨智远, 等. 燃用生物柴油对柴油机颗粒生成和排放特性研究进展[J]. 环境科学研究, 2019, 32(11):1809.
 WU Gang, JIANG Guohe, YANG Zhiyuan, *et al.* Particulate matter generation and emission characteristics of diesel engine fueled by biodiesel [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(11):1809.
- [10] 楼狄明, 孔德立, 强蓄, 等. 国V 柴油机燃用柴油/生物柴油排放性能试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9):25.
 LOU Diming, KONG Deli, QIANG Qiang, *et al.* Emission experiment on a Chinese V diesel engine fueled with diesel/biodiesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):25.
- [11] DI I S, MAGNO A, MANCARUSO E, *et al.* Effect of diesel/RME blend on particle emissions from a diesel engine for quadricycle vehicle[R]. Detroit: SAE, 2014.
- [12] CHIATTI G, CHIAVOLA O, PALMIERI F. Impact of waste cooking oil in biodiesel blends on particle size distributions from a city-car engine [J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 91:262.
- [13] BORHMAN A L, SONG J, ALAM M. Impact of biodiesel blending on diesel soot and the regeneration of particulate filters [J]. Energy & Fuels, 2005, 19(5):1857.
- [14] 张小玉, 马志豪, 马凡华, 等. 生物柴油掺混比例对柴油机颗粒排放微观特性的影响[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(2):179.
 ZHANG Xiaoyu, MA Zhihao, MA Fanhua, *et al.* Influence of biodiesel/diesel blends proportions on emission particle microscopic characteristics of diesel engines [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3(2):179.
- [15] 周小强. 柴油机燃用调合生物柴油颗粒物排放特性的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
 ZHOU Xiaoqiang. Study on emission characteristics of particulate matter emitted from diesel engine fueled with blending biodiesel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [16] 赵小明. 低掺烧比生物柴油排放及颗粒物理化特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
 ZHAO Xiaoming. Experimental studies on emission and the physicochemical characteristics of particulates for diesel engine with low proportion biodiesel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [17] 张宇, 王忠, 李瑞娜, 等. 柴油机燃用不同燃料颗粒微观形貌与氧化特性分析[J]. 车用发动机, 2019(6):58.
 ZHANG Yu, WANG Zhong, LI Ruina, *et al.* Analysis of on micro-morphology and oxidation characteristics of particles for diesel engine fueled with different fuels [J]. Vehicle Engine, 2019(6):58.
- [18] 杜家益, 常真真, 张登攀, 等. EGR 对生物柴油颗粒物微观结构及官能团的影响[J]. 内燃机学报, 2020, 38(2):140.
 DU Jiayi, CHANG Zhenzhen, ZHANG Dengpan, *et al.*

- Influence of EGR on microcosmic structure and functional groups of particulate matters out of a diesel-biodiesel blend engines[J]. Transactions of CSICE, 2020, 38(2):140.
- [19] 楼狄明, 赵成志, 徐宁, 等. 不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性[J]. 环境科学, 2017, 38(6):2301.
LOU Diming, ZHAO Chengzhi, XU Ning, *et al.* Emission characteristics of particulate matter from diesel buses meeting different China emission standards fueled with biodiesel [J]. Environmental Science, 2017, 38(6):2301.
- [20] 胡志远, 章昊晨, 谭丕强, 等. 国V公交车燃用生物柴油的颗粒物碳质组分排放特性[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8):2921.
HU Zhiyuan, ZHANG Haochen, TAN Piqiang, *et al.* Emission of carbonaceous components from a bus fueled with waste cooking oil based biodiesel blends [J]. China Environmental Science, 2018, 38(8):2921.
- [21] 胡志远, 章昊晨, 谭丕强, 等. 生物柴油公交车颗粒物可溶有机组分和多环芳烃排放[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7):1046.
HU Zhiyuan, ZHANG Haochen, TAN Piqiang, *et al.* Emission characteristics of soluble organic fraction and polycyclic aromatic hydrocarbons from a diesel bus fueled with waste cooking oil-based biodiesel blends [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(7):1046.
- [22] 高章. 基于底盘测功机的公交车整车排放和油耗测试研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
GAO Zhang. Research of the test for complete-vehicle emission and fuel consumption of the bus by chassis-dynamometer [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [23] UTLU Z, KOCAK M S. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions [J]. Renew Energy, 2008, 33(8): 1936.
- [24] 赵杰, 韩维维, 胡志远. 燃用生物柴油公交车的颗粒物排放特性[J]. 内燃机与配件, 2019(22):36.
ZHAO Jie, HAN Weiwei, HU Zhiyuan. Emission characteristics of particulate matter from buses fueled with biodiesel [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019 (22):36.
- [25] 夏群, 杜家益, 张登攀, 等. 调合生物柴油发动机颗粒物氧化特性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(6):1824.
XIA Qun, DU Jiayi, ZHANG Dengpan, *et al.* Research on oxidative characteristics of particulate matter emitted from diesel/biodiesel engine [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(6):1824.
- [26] 李铭迪, 赵琛, 许广举, 等. 柴油/碳酸二甲酯燃烧颗粒的微观结构和分形特征[J]. 环境科学研究, 2016, 29(6):900.
LI Mingdi, ZHAO Chen, XU Guangju, *et al.* Microstructure and fractal characteristic analysis of particulate matter from diesel/DMC combustion [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(6): 900.
- [27] 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.
- [28] KOEYLE U, XING Y, ROSNER D E. Fractal morphology analysis of combustion-generated aggregates using angular light scattering and electron microscope images [J]. Langmuir, 1995, 11/12:4848.
- [29] 瞿磊, 王忠, 李瑞娜, 等. 甲醇/生物柴油燃烧颗粒的结构特征研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5):81.
QU Lei, WANG Zhong, LI Ruina, *et al.* Structural characteristics of methanol/biodiesel combustion particles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5):81.
- [30] ZHU J, LEE K O, YOZGATLIGIL A, *et al.* Effects of engine operating conditions on morphology, microstructure, and fractal geometry of light-duty diesel engine particulates [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2):2781.
- [31] HURT R H, CRAWFORD G P, SHIM H S. Equilibrium nanostructure of primary soot particles [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(2):2539.
- [32] 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.
HAO Bin. Effect of fuel identity on the exhaust particles from diesel engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [33] LAPUERTA M, MARTOS F J, HERREROS J M. Effect of engine operating conditions on the size of primary particles composing diesel soot agglomerates [J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(4):455.
- [34] WANG H. Formation of nascent soot and other condensed-phase materials in flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1):41.
- [35] WAL R L V, TOMAESK A J. Soot nanostructure: dependence upon synthesis conditions [J]. Combustion & Flame, 2004, 136(2):129.