

碘值对生物柴油燃烧颗粒物粒径分布 和碳质组分的影响

杜家益¹, 杨启航¹, 张登攀¹, 王益凡¹, 蒋胜¹, 袁银男²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 苏州大学能源学院, 215006, 江苏苏州)

摘要: 为研究碘值对生物柴油燃烧颗粒物排放特性的影响,采用颗粒物粒径谱仪和碳分析仪对不同原料生物柴油燃烧颗粒物的粒径分布和碳质组分进行分析。结果表明,在发动机最大扭矩转速 2 400 r/min、100% 负荷下,燃用生物柴油最大爆发压力、燃烧温度和燃烧持续期均高于柴油,且碘值越大,燃烧持续期越短。燃用生物柴油可有效降低颗粒物排放,最大降幅达 85%,且颗粒物粒径减小;碘值越大,颗粒物生成数量越多,碘值较大的大豆油甲酯颗粒物排放量是碘值低的地沟油甲酯颗粒物的 5.3 倍。颗粒物碳质组分中有机碳(OC)主要组成是 OC1 和 OC4,其质量占总碳(TC)质量的 60% 以上;元素碳(EC)主要组分是 EC2,其质量占 EC 质量的 50% 以上。柴油颗粒物 OC 和 EC 的质量比 R 为 7.4,生物柴油颗粒物的 R 为 18.2~24.5,且生物柴油碘值越大, R 越大。选用碘值较小的生物柴油,能更有效地降低颗粒物的排放。

关键词: 生物柴油;颗粒物;碘值;粒径分布;碳质组分

中图分类号: TK421.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/jxtxb202105003 **文章编号:** 0253-987X(2021)05-0018-07



OSID 码

Effect of Iodine Value on the Particle Size Distribution and Carbon Component of Three Biodiesels

DU Jiayi¹, YANG Qihang¹, ZHANG Dengpan¹, WANG Yifan¹, JIANG Sheng¹, YUAN Yinnan²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. School of Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract: In order to study the effect of iodine value on the emission characteristics of biodiesel combustion particulate matter, the engine exhaust particle sizer and carbon analyzer were used to analyze the particle size distribution and carbon component of particulate matter from different biodiesels. The results show that the maximum explosion pressure, combustion temperature and combustion duration of three biodiesels are higher than that of diesel at the maximum engine torque speed 2 400 r/min and 100% load. The greater the iodine value is, the shorter the combustion duration becomes. The use of biodiesel can effectively reduce the amount of particulate matter emissions, with a maximum reduction of 85%, and the particle size of biodiesel particles is decreased. The higher the iodine value is, the more the particulate matter is produced. The emission concentration of soybean oil methyl ester particles with larger iodine value is 5.3 times that of waste oil methyl ester particles with lower iodine value. The main components of organic carbon (OC) in the carbonaceous component of particulate matter are OC1

收稿日期: 2020-08-15。 作者简介: 杜家益(1968—),男,副教授;张登攀(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51876133)。

网络出版时间: 2021-02-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210131.1501.002.html>

and OC4, which account for more than 60% of the total carbon (TC). The main component of elemental carbon (EC) is EC2, which accounts for more than 50% of the total EC. The ratio of diesel particulate organic carbon (OC) to elemental carbon (EC) in the carbonaceous component of particulate matter is 7.4, and the biodiesel OC/EC value is 18.2—24.5. The higher the iodine value of biodiesel, the higher the OC/EC value of particulate matter carbon component. Using biodiesel with lower iodine value can reduce particulate matter emission more effectively.

Keywords: biodiesel; particulate matter; iodine value; particle size distribution; carbon component

柴油车辆排放的颗粒物(PM)已经成为大气中颗粒物的重要来源^[1],生态环境部在《中国移动源环境管理年报(2019)》中指出,占汽车保有量 7.9%的柴油货车排放了 84.6%的 PM,柴油车颗粒物排放控制是机动车污染防治的重中之重^[2]。另外,机动车多行驶在人口密集区域,尾气中的颗粒物极大威胁人体健康,还会诱发各种心血管疾病^[3-5]。

降低柴油机颗粒物排放广泛采用电控高压共轨喷射系统与排气后处理的技术路线,另外,燃用清洁代用燃料也是一条经济可行的方法。生物柴油具有清洁可再生的优点,被认为是最具有前景的代用燃料,其颗粒物排放尤其是超细颗粒物排放越来越受到人们的关注。超细颗粒物比表面积大,更容易吸附一些有害物,危害性比一些较大颗粒物更大。楼狄明等研究表明,柴油中掺烧体积分数为 10%的生物柴油可明显降低颗粒物数量浓度^[6]。梅德清等研究发现,生物柴油含氧可在一定程度上减少碳在燃烧过程中缺氧的概率,减少颗粒物排放^[7]。Chuepeng 等在柴油中掺烧体积分数为 30%的菜籽油生物柴油,燃烧颗粒物平均粒径减小 47%^[8]。众多研究表明,掺烧生物柴油时颗粒物的粒径减小^[9-11]。狄亚格等研究发现,掺烧不同比例生物柴油后颗粒物总数较柴油大幅度下降,几何平均粒径减小,烟度降低^[12]。罗坤等研究发现,通过燃用生物柴油可显著降低 PM 和 NO_x 排放^[13]。

柴油机掺烧生物柴油可降低 PM 排放,使颗粒粒径减小的同时也会引起颗粒物组分的变化。柴油机颗粒物的主要成分为碳质组分,一般划分为有机碳(OC)和元素碳(EC)。OC 由未燃燃油、润滑油等成分复杂的有机化合物组成,具有挥发性,对可见光吸收较弱,主要以细颗粒物的形式存在。EC 是不完全燃烧过程中产生的具有类石墨结构和一定热化学稳定性的强吸光物质。石晓燕等研究发现,柴油机燃用含氧燃料时碳质组分 OC 与 EC 的质量比要大于柴油,该比值对颗粒物粒径分布产生直接影

响^[14]。Choi 等研究发现,挥发性有机碳对颗粒物生成和粒径大小产生影响^[15]。陈鬃通过对不同粒径级的碳质组分进行研究发现,颗粒物粒径越小,OC 含量越高^[16]。

目前,关于生物柴油颗粒物粒径分布和碳质组分的研究多从实际应用角度出发,以低比例掺烧为主,但掺烧产生的颗粒物粒径分布和碳质组分 OC 与 EC 的质量比不能真实反映生物柴油燃烧颗粒的排放特性。随着生物柴油的大量应用,有必要对燃用纯生物柴油燃烧颗粒物的碳质组分和粒径分布规律作进一步研究,分析生物柴油之间不饱和度与燃烧和颗粒物排放的关系,为生物柴油发动机的颗粒物检测和排放控制提供技术数据和参考。对此,本文分析了典型原料生物柴油的碘值,开展燃用生物柴油发动机台架试验,研究了碘值对生物柴油颗粒物粒径分布和碳质组分的影响。

1 试验方案和燃油理化性质

1.1 试验设备与方法

试验在满足国 V 排放标准直列四缸柴油机上进行,发动机主要技术参数如表 1 所示。试验设备包括:AVL-622 燃烧分析仪采集气缸压力数据,缸压传感器型号为 AVL-GH14P;美国 TSI 公司的 EEPS

表 1 试验柴油机主要技术参数

Table 1 Main specifications of test diesel engine

名称	数值或属性
发动机型式	直列、四冲程、增压
燃油系统	高压共轨
气缸数	4
缸径×行程/mm×mm	95×100
排量/L	2.83
压缩比	17.5:1
标定功率/kW(转速/(r·min ⁻¹))	75(3 200)
最大转矩/(N·m)(转速/(r·min ⁻¹))	250(1 600~2 800)

3090 粒径谱仪在线测量分析颗粒物粒径;MPS 公司的 MOUDI-110 微孔均匀沉积式多级碰撞采样器采集颗粒物;DIR 公司的 Model 2015 碳分析仪进行离线碳质组分分析。

为了采集足够量的生物柴油燃烧颗粒物,发动机的试验工况固定在最大转矩转速 2 400 r/min、100%负荷,分别燃用大豆油甲酯、棕榈油甲酯、地沟油甲酯和柴油,试验采用等功率法,保持燃用不同燃油时的功率不变。尾气采样点设置在排气后处理装置上游,采样流量为 30 L/min,采样时间 1.5 h。

1.2 试验燃油的理化性质

应用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)测量燃油中各组分含量,测得 3 种生物柴油中脂肪酸甲酯的质量分数如表 2 所示。

表 2 试验燃油中脂肪酸甲酯的质量分数
Table 2 Mass content of fatty acid methyl ester in test fuel

各类甲酯	质量分数/%		
	大豆油	棕榈油	地沟油
C14:0 肉豆蔻酸甲酯	0.49	0	1.78
C16:0 棕榈酸甲酯	18.07	14.13	23.66
C16:1 棕榈油酸甲酯	0.55	0.24	2.15
C18:0 硬脂酸甲酯	6.66	7.18	10.57
C18:1 油酸甲酯	27.20	43.84	29.24
C18:2 亚油酸甲酯	42.57	33.26	29.94
C18:3 亚麻酸甲酯	1.31	0	0.60
C20:0 花生酸甲酯	1.98	0.66	0.48
C20:1 二十碳稀酸甲酯	0.47	0.33	0.78
C22:0 山嵛酸甲酯	0.38	0	0.26
总计	99.86	99.64	99.46
饱和脂肪酸甲酯	27.76	21.97	36.75
不饱和脂肪酸甲酯	72.10	77.67	62.71

碘值是指 100 g 物质所能吸收的碘的质量,用来确定生物柴油的不饱和度,碘值越大,不饱和度越高,其与生物柴油中碳碳双键(C=C)的数量相关,计算方法如下^[17]

$$I = \sum 100 \times \frac{253.81A_i b}{W_i}$$

式中:I 是待求生物柴油的碘值;b 是生物柴油中脂肪酸甲酯中含有的 C=C 双键的数量;W_i 是脂肪酸甲酯的相对分子质量;253.81 是理论上加成一个双键的碘原子的相对分子质量;A_i 是生物柴油中各脂肪酸甲酯的质量分数。

根据表 2 中数据,利用文献[17]的计算方法,对

试验燃油的十六烷值、氧含量和低热值进行计算。利用密度计和旋转数字黏度计测得燃油密度和运动黏度(20℃)。表 3 所示为试验燃料理化特性。

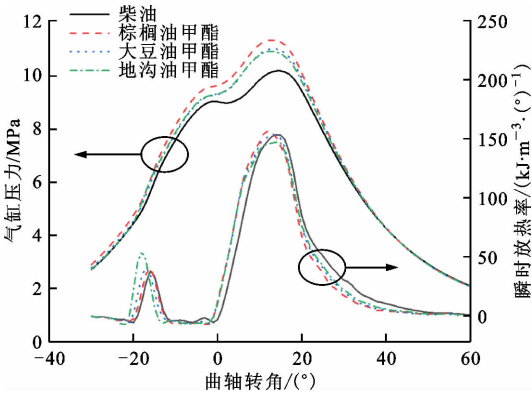
表 3 试验燃油的理化特性

理化特性	大豆油	棕榈油	地沟油	柴油
碘值/g	100.9	95.3	80.8	0
十六烷值	53.20	54.64	57.55	51.00
氧体积分数/%	10.96	10.98	11.08	0
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	37.45	37.25	37.17	43.50
密度/(kg·m ³)	877	875	873	845
运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	5.90	5.83	5.80	3.51

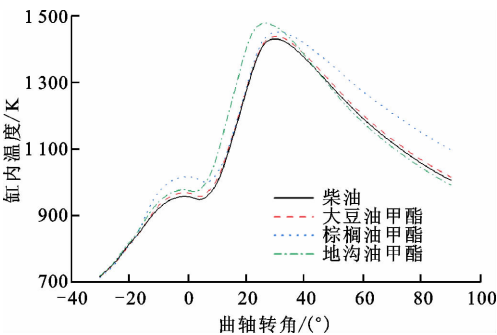
2 试验结果分析

2.1 燃烧特性分析

图 1 所示为 4 种燃料在 2 400 r/min、100%负荷下的燃烧特性曲线。由图 1a 可知:3 种生物柴油的最大爆发压力明显高于柴油,原因是在 100%负荷下,气缸内热力状态改善,油气混合更加均匀;生物柴油热值低,在等功率工况下喷入的燃油更多,缸内可以形成更浓的混合气;此外生物柴油燃烧始点早于柴油,在多方面共同作用下,最大爆发压力高于柴油。由图 1b 可知,生物柴油燃烧缸内温度高于柴



(a) 气缸压力和放热率



(b) 缸内温度

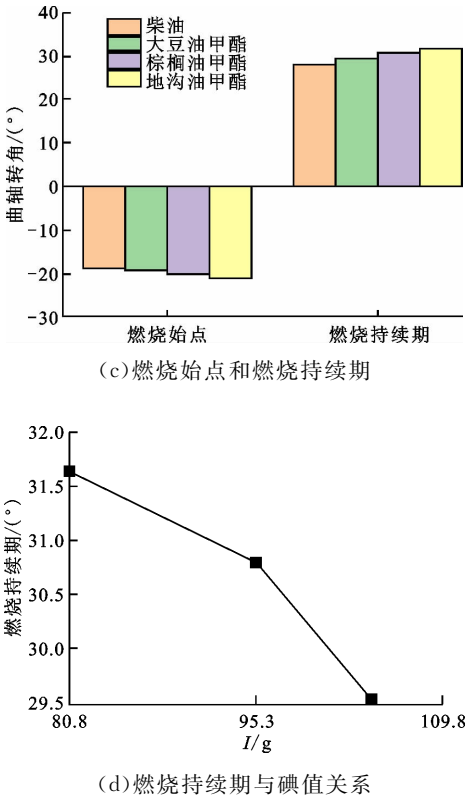


图 1 不同生物柴油燃烧特性曲线

Fig. 1 Combustion characteristic curves of different biodiesel

油。由图 1c 可知,100% 负荷下,3 种生物柴油较柴油燃烧始点明显提前,生物柴油的燃烧持续期大于柴油。由于生物柴油的十六烷值高于柴油,导致滞燃期较柴油短,从而燃烧始点提前。生物柴油的热值低于柴油,循环供油量多于柴油,燃烧持续期增加,表明生物柴油有更高的排气温度和更长的氧化时间。生物柴油的不饱和度因原料不同而不同,C=C 含量越高,滞燃期越长^[18],燃烧持续期越短。由图 1d 可知,碘值越大,燃烧持续期越短,碘值最小的地沟油甲酯燃烧持续期比碘值最大的大豆油甲酯长 7.1%。

2.2 颗粒物粒径分布分析

颗粒物根据其粒径 D_p 的大小可分为核态、聚集态和粗态 3 种形态,其中粒径小于 50 nm 的为核态,50~100 nm 的为聚集态,100~1 000 nm 的为粗态。

图 2 所示为不同燃料燃烧颗粒物总数量浓度。由图可知,燃用生物柴油可以有效地减少颗粒物排放量。生物柴油含氧,燃烧时可以产生 O 和 OH 等含氧自由基,可通过 OH 氧化碳烟或者直接氧化多环芳烃阻止前驱体的形成^[19-20]。生物柴油比柴油有更长的燃烧持续期和更高的燃烧温度,这些条件都

有利于颗粒物的氧化,从而减少颗粒物的排放。相比于柴油,燃用地沟油甲酯最多可降低 85% 的颗粒物排放量。

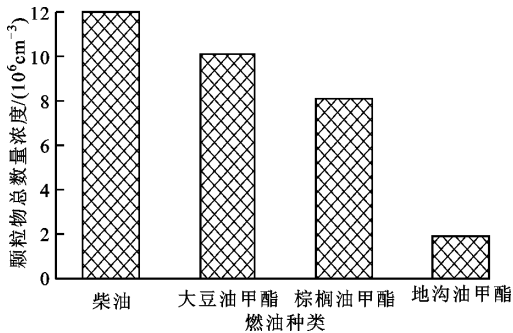


图 2 不同燃油颗粒物总数量浓度

Fig. 2 Total number concentration of different fuel particles

图 3 所示为 2 400 r/min、100% 负荷时颗粒物数量浓度的粒径分布。由图可知,生物柴油颗粒物粒径分布呈现核态和聚集态两种模态,柴油主要以聚集态为主,生物柴油颗粒物粒径较柴油颗粒物有所减小,不同种类生物柴油之间颗粒物排放存在明显差异。在颗粒物数量浓度中,不饱和度最高的大豆油甲酯颗粒物排放量最高,不饱和度最低的地沟油甲酯颗粒物排放量最低。脂肪酸链中双键数目增加会导致颗粒物排放增加^[21],即不饱和度越高,颗粒物生成越多。

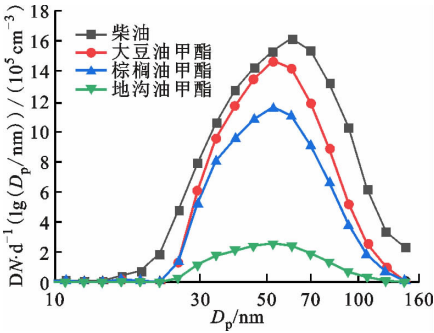


图 3 不同燃油颗粒物数量浓度的粒径分布

Fig. 3 Number concentration of different fuel particles versus particle size

图 4 所示为颗粒物总数量浓度随碘值的变化关系。由图可知,碘值越高,颗粒物数量越多,碘值最大的大豆油甲酯是碘值最小的地沟油甲酯颗粒物排放量的 5.3 倍。燃用碘值较小的生物柴油更有利于降低颗粒物的排放。

2.3 碳质组分分析

对于柴油机颗粒物中的碳质组分研究,常用方法主要有 IMPROVE-A 和 NIOSH 5040 两种^[22]。

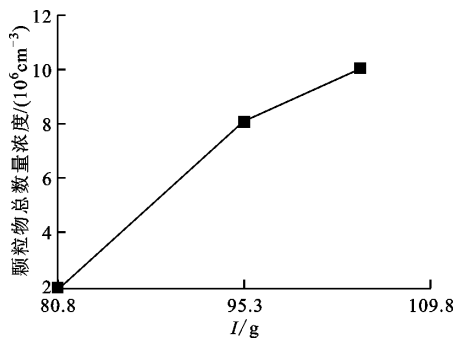


图 4 颗粒物总数量浓度与碘值的关系

Fig. 4 The relationship between the total number concentration of particulate matter and the iodine value

两种方法原理相同,不同之处在于升温程序和运用光学法对裂解碳的校正。IMPROVE-A 方法多用于大气中颗粒物的碳质组分分析,NIOSH 5040 方法主要用于柴油机颗粒物的碳质组分检测。

为真实反映柴油机颗粒物的碳质组分含量,本文选用 DRI Model-2015 型碳分析仪,分析方法选择美国国家职业安全卫生研究所制定的 NIOSH 5040 (Birch,1998)。具体升温程序为 NIOSH 870^[23],参数设定见表 4,其中 He 气为高纯度 He 气,He/O₂ 为高纯度的 He 气中通入体积分数为 2%的 O₂。

表 4 NIOSH 870 分析协议参数

Table 4 NIOSH 870 analysis protocol parameters			
工作氛围	有机碳或元素碳	温度/℃	保持时间/s
He	OC1	310	80
He	OC2	475	80
He	OC3	615	80
He	OC4	870	110+45
He/O ₂	EC1	550	45
He/O ₂	EC2	625	45
He/O ₂	EC3	700	45
He/O ₂	EC4	775	45
He/O ₂	EC5	850	45
He/O ₂	EC6	870	110

图 5 所示为不同燃油颗粒物中碳质组分的质量分数及 OC 与 EC 的质量比 R。由图可知,颗粒物 OC 的主要组成是 OC1 和 OC4,其质量占 TC 的质量超过 60%。OC1~OC4 的沸点依次升高,各组分的质量分数可以表明颗粒物的挥发性大小。柴油颗粒物 OC1 的质量分数为 19%,大豆油甲酯、棕榈油甲酯和地沟油甲酯颗粒物 OC1 的质量分数分别为 25%、30%和 28%,说明生物柴油颗粒物有更多的

挥发性有机碳。这些挥发性有机碳有凝聚在现有颗粒上并形成新颗粒的趋势,从而产生更多的细颗粒物,生物柴油的较低碳烟排放水平有助于减少大型含碳团聚体,所以生物柴油颗粒物粒径偏小。OC4 主要成分为沸点较高难挥发的有机碳,在所有组分中占比最高,柴油颗粒物中 OC4 的质量分数为 44%,3 种生物柴油颗粒物中 OC4 的质量分数均约为 37%。

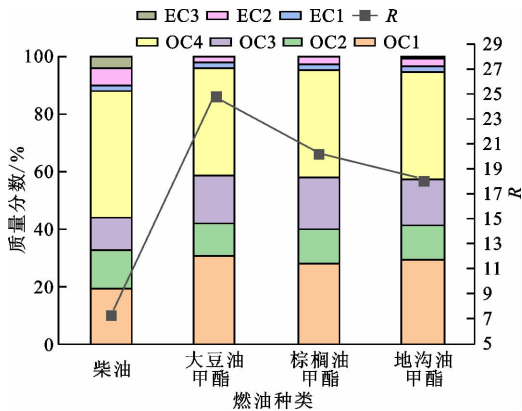


图 5 不同燃油碳质组分的质量分数

Fig. 5 Mass fraction of carbonaceous components of different fuels

根据形成条件不同,EC 的成分分为焦炭(char-EC)和碳烟(soot-EC)两类。char-EC 包括 EC1, soot-EC 包括 EC2 和 EC3。char-EC 主要在燃烧初期气缸内温度较低时由燃油裂解而成,而 soot-EC 则是在高温时由气相碳氢化合物凝结而成,通常在高温缺氧的环境下更容易产生。由图 5 可知,柴油颗粒物中 soot-EC 的质量分数为 83.7%,大豆油甲酯颗粒物、棕榈油甲酯颗粒物和地沟油甲酯颗粒物中 soot-EC 的质量分数分别为 75.9%、60.7%和 51.9%,soot-EC 的质量分数随碘值增大而增大。在高转速满负荷下生物柴油自身含氧,改善了缸内缺氧的状况,抑制了气相的乙炔和芳香烃分子重组,从而减少了 soot-EC 的形成,soot-EC 形成的团聚体也会减少,生物柴油颗粒物粒径较柴油颗粒物减小。

柴油颗粒物碳质组分 OC 占 TC 的质量分数为 88%,EC 占 TC 的质量分数为 12%,R 为 7.4,生物柴油颗粒物 R 为 94%~96%,EC 占 TC 的质量分数为 4%~6%,R 为 18.2~24.5。这与石晓燕结论中含氧燃料颗粒物的 R 小于 5^[14]有较大差异,主要是两者研究所采用分析协议不同,NIOSH 5040 协议相对于 IMPROVE 协议,对 OC 的分割温度提

高,导致 NIOSH 5040 协议的 OC 含量高于 IMPROVE 协议^[24]。生物柴油含氧且十六烷值较高,有利于打断碳链的生长,促进碳烟的氧化,从而抑制 EC 形成,导致生物柴油的 R 大于柴油。

图 6 所示为不同原料生物柴油颗粒物的 R 与碘值的关系,生物柴油碘值越大, R 越大。碘值越大,燃烧持续期越短,燃烧温度低,碳质组分中的 OC 没有充分的时间和足够高的温度氧化,这也导致大豆油甲酯颗粒物中 OC 含量高于另外两种生物柴油。

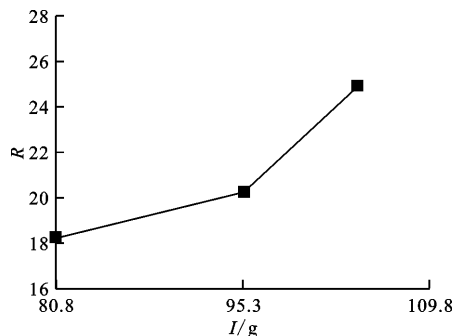


图 6 不同原料生物柴油颗粒物的 R 与碘值的关系

Fig. 6 Relationship between OC/EC value and iodine value

3 结 论

(1)生物柴油最大爆发压力、燃烧温度和燃烧持续期均高于柴油,生物柴油的碘值越大,燃烧持续期越短,碘值最小的地沟油甲酯燃烧持续期比碘值最大的大豆油甲酯长 7.1%。

(2)燃用生物柴油可以降低颗粒物排放量,较柴油最大降幅达 85%,且生物柴油颗粒物粒径减小,碘值越大的生物柴油燃烧颗粒物排放量越高,选取碘值较小的生物柴油更有利于降低颗粒物的排放。

(3)颗粒物碳质组分以 OC 为主,生物柴油颗粒物中 OC1 的含量高于柴油,生物柴油颗粒物含有更多的可溶性有机碳。生物柴油颗粒物 soot-EC 占 EC 的质量分数在 51.9%~75.9%之间,与碘值正相关,柴油颗粒物中 soot-EC 占 EC 的质量分数达到了 83%。柴油颗粒物的 R 为 7.4,生物柴油的 R 为 18.2~24.5,生物柴油的碘值越大, R 越高。

参考文献:

[1] 魏衍举,汪文瑞,黄瑾,等. 柴油机颗粒物可溶有机组分来源研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5): 6-11.
WEI Yanjiu, WANG Wenrui, HUANG Jin, et al.

Study on the origination of soluble organic fractions in diesel engine-out particulate matters [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(5): 6-11.

[2] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2019) [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.

[3] 王健,舒家泽,陈新宇,等. 细颗粒物载带组分与呼吸系统健康的关系 [J]. 中华结核和呼吸杂志, 2013, 36(12): 970-972.
WANG Jian, SHU Jiase, CHEN Xinyu, et al. Chinese journal of tuberculosis and respiratory diseases [J]. Chinese Journal of Tuberculosis and Respiratory Diseases, 2013, 36(12): 970-972.

[4] YOU-NING X U, CONG C, QING-KE L I, et al. Analysis of PM2.5 and PM10 pollution characteristics during heating period in Shenyang [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(7): 121-125.

[5] SILVA R A, ADELMAN Z, FRY M M, et al. The impact of individual anthropogenic emissions sectors on the global burden of human mortality due to ambient air pollution [J]. Environmental Health Perspectives, 2016, 124(11): 1776-1784.

[6] 楼狄明,张久阳,谭丕强,等. 船舶燃用 B10 餐厨废弃油脂制生物柴油排放测试与分析 [J]. 环境工程, 2020, 38(2): 86-90.
LOU Diming, ZHANG Jiuyang, TAN Piqiang, et al. Emission test and analysis of biodiesel produced by ships burning B10 cooking waste oil [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(2): 86-90.

[7] 梅德清,王忠,袁银南,等. 生物柴油在柴油机尾气中的颗粒物特性分析 [J]. 农业工程学报, 2006(12): 113-116.
MEI Deqing, WANG Zhong, YUAN Yinnan, et al. Analysis of particle characteristics of biodiesel in diesel engine exhaust [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2006(12): 113-116.

[8] CHUEPENG S, XU Hongming, TSOLAKIS A, et al. Particulate matter size distribution in the exhaust gas of a modern diesel engine fuelled with a biodiesel blend [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(10): 4280-4289.

[9] POPOVICHEVA O, ENGLING G, LIN Kuanting, et al. Diesel/biofuel exhaust particles from modern internal combustion engines: microstructure, composition, and hygroscopicity [J]. Fuel, 2015, 157: 232-239.

[10] 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): 1046-1054.
- 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): 1046-1054.
- [11] YE Peng, BOEHMAN A L. An investigation of the impact of injection strategy and biodiesel on engine NO_x and particulate matter emissions with a common-rail turbocharged DI diesel engine [J]. Fuel, 2012, 97: 476-488.
- [12] 狄亚格, CHEUNG C S. 生物柴油掺烧比对柴油机颗粒物排放影响的试验研究 [J]. 现代车用动力, 2020 (2): 38-41.
- DI Yage, CHEUNG C S. Experimental study on the effect of biodiesel blending ratio on particulate matter emission of diesel engine [J]. Modern Vehicle Power, 2020(2): 38-41.
- [13] 罗坤, 李耀庭, 黄勇成, 等. 生物油/生物柴油萃取液的燃料物性及发动机燃烧排放特性 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(11): 34-41.
- LUO Kun, LI Yaoting, HUANG Yongcheng, et al. Fuel properties and combustion/emission characteristics of the extracted liquid from bio-oil by biodiesel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53 (11): 34-41.
- [14] 石晓燕, 贺克斌, 张洁, 等. 含氧柴油对柴油机排放及细颗粒物碳质组分的影响 [J]. 环境科学, 2009, 30 (6): 1561-1566.
- SHI Xiaoyan, HE Kebin, ZHANG Jie, et al. Effects of oxygenated fuels on emissions and carbon composition of fine particles from diesel engine [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2009, 30(6): 1561-1566.
- [15] CHOI C, BOWER G, REITZ R. Effects of biodiesel blended fuels and multiple injection on D. I. diesel engine [J]. SAE Transactions, 1997, 106: 388-407.
- [16] 陈鬃. 柴油机颗粒物分形维数与碳组分的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [17] GOPINATH A, SAIRAM K, VELRAJ R, et al. Effects of the properties and the structural configurations of fatty acid methyl esters on the properties of biodiesel fuel: a review [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(3): 357-390.
- [18] VANHOVE G, RIBAUCOUR M, MINETTI R. On the influence of the position of the double bond on the low-temperature chemistry of hexenes [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1065-1072.
- [19] 刘宗鑫. 含氧燃料对柴油机碳质颗粒排放特性影响的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [20] 胡志远, 林建军, 谭丕强, 等. 柴油轿车燃用生物柴油的模式颗粒排放特性 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 937-941.
- HU Zhiyuan, LIN Jianjun, TAN Piqiang, et al. NEDC particle number and size emission characters of a diesel car fueled with biodiesel blends in laboratory [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6): 937-941.
- [21] SCHÖNBORN A, LADOMMATOS N, WILLIAMS J, et al. The influence of molecular structure of fatty acid monoalkyl esters on diesel combustion [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(7): 1396-1412.
- [22] 程远. 含碳气溶胶采样与分析方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [23] BIAN Qijing, ALHARBI B, SHAREEF M M, et al. Sources of $\text{PM}_{2.5}$ carbonaceous aerosol in Riyadh, Saudi Arabia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(6): 3969-3985.
- [24] 黄睿, 谈静, 刘琼玉. $\text{PM}_{2.5}$ 中有机碳/元素碳测定探讨 [J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 11-17.
- HUANG Rui, TAN Jing, LIU Qiongyu. Determination of organic and elemental carbon in fine particulate matters ($\text{PM}_{2.5}$) [J]. Journal of Jiangnan University (Natural Sciences), 2016, 44(1): 11-17.

(编辑 荆树蓉)