

# 生物柴油调合燃料在 EGR 氛围下的 燃烧颗粒结构特征分析

瞿磊<sup>1,2</sup>, 王忠<sup>2</sup>, 冯洁<sup>3</sup>, 李守娟<sup>1</sup>

(1.南通职业大学 汽车与交通工程学院, 江苏 南通 226007; 2.江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 3.无锡孚晟检测技术服务有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 以某农用单缸柴油机为研究对象,在 EGR 率分别为 0,15%,30%的条件下,测试其燃用生物柴油调合燃料时的碳烟排放特性,探究 EGR 率对生物柴油调合燃料燃烧颗粒结构特征的影响。研究表明:生物柴油调合燃料可以缓解因引入 EGR 而导致的碳烟排放量升高问题,且大 EGR 率工况下的改善效果更显著;柴油机排放颗粒物的粒径为 20~80 nm,呈正态分布;相同 EGR 率条件下,燃用生物柴油调合燃料形成的颗粒粒径明显减小,且颗粒间的团聚程度增强,颗粒的孔隙率增大,界面层厚度增加;采用 EGR 技术,颗粒群的平均粒径增大,团聚程度增强,颗粒的孔隙率减小,界面层厚度增加;掺混生物柴油及引入 EGR 均会导致形成的颗粒表面粗糙程度和不规则程度有所提高。

**关键词:** 柴油机; 颗粒; 生物柴油; 废气再循环

**中图分类号:** TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)08-1012-07

## 0 引言

单缸柴油机自诞生以来,就与“三农”发展相辅相成,已成为插秧机、微耕机等小型农用机械设备的主要动力源。单缸柴油机在推动我国农业发展的同时消耗了大量的石油资源,排出的氮氧化物、颗粒物等污染物是导致环境污染的主要原因之一<sup>[1,2]</sup>。为顺应环保要求,非道路移动机械排放标准持续升级,对农用单缸柴油机的污染物排放限值的要求也越来越高。如何使单缸柴油机满足排放标准而不会大幅增加使用成本成了当前研究的主要任务。

作为一种重要替代能源,生物柴油可以与柴油按照任意比例混合形成生物柴油调合燃料,在柴油机上直接应用生物柴油调合燃料能够有效减少颗粒物、碳氢化合物、一氧化碳等污染物的排放,尤其在降低颗粒物排放方面具有显著效果<sup>[3]</sup>。废气再循环(Exhaust Gas Recirculation, EGR)技术是将柴油机排放的部分尾气吸入到进气侧参与下一循环燃烧,从而破坏氮氧化物生成的条件,以此降低污染物的排放。将生物柴油与 EGR 技术联合在单缸柴油机上使用,可以促进能源多元化,

降低污染物排放,保护生态环境<sup>[4,5]</sup>。使用生物柴油调合燃料,改变了燃料的物理化学属性;采用 EGR 技术,改变了缸内的燃烧氛围;燃料属性与燃烧氛围的变化均会改变颗粒物的形成与衍化过程,直接影响颗粒物的排放特性、形态、微观结构、理化性质等,并对颗粒捕集器等后处理装置的适应性及捕集效果产生影响。

利用扫描电镜、同步辐射 X 射线小角散射(Small Angle X-ray Scattering, SAXS)等测试技术可以对柴油机排放颗粒群与单颗粒的微观结构与形貌特征进行表征。Tsolakakis A<sup>[6]</sup>对比分析了柴油机分别燃用柴油及生物柴油时形成颗粒的形貌特征,结果表明:燃用柴油时形成的颗粒结构较为松散,主要以链状形式存在;燃用生物柴油时形成的颗粒结构较为紧密,主要以簇状形式存在。王忠<sup>[7]</sup>利用扫描电镜开展了柴油机排气颗粒的微观特征研究,结果表明,排气颗粒吸附 HC 等物质后有助于颗粒间的团聚。李铭迪<sup>[8]</sup>运用同步辐射 X 射线小角散射探究了含氧燃料燃烧颗粒的表面结构特征,结果表明,掺混含氧燃料可使颗粒的界面厚度增加,其中掺混碳酸二甲酯导致颗粒界面厚度的

收稿日期: 2023-05-24。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776089);南通市科技计划项目(JC2021166, JCZ21057);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(21KJD470002);江苏高校“青蓝工程”资助项目。

作者简介: 瞿磊(1987-),男,博士,副教授,主要从事农用柴油机排放控制研究。E-mail: quleystone@163.com

增幅最大,乙醇次之,生物柴油最小。

为深入研究生物柴油调合燃料在 EGR 氛围条件下形成颗粒的特性,本文运用排放测试设备测量柴油机碳烟的排放,并分析其变化规律;运用扫描电镜和同步辐射 X 射线小角散射技术对颗粒团聚体的形貌特征、表面形态以及单颗粒的结构参数等进行测量与分析,探讨生物柴油调合燃料在 EGR 氛围下形成颗粒的结构特征演变规律,以为柴油机后处理装置的适应性及进一步降低颗粒物排放的方法提供依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 碳烟排放特性测试及颗粒采样

利用一台改造的农用单缸柴油机进行碳烟排放特性试验,台架试验装置如图 1 所示。

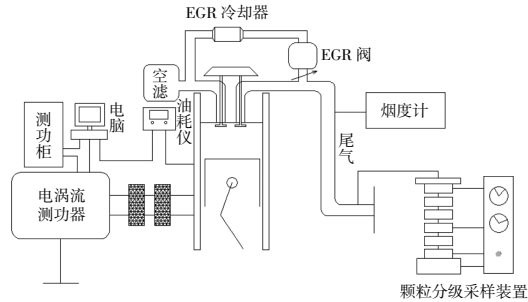


图 1 台架试验装置

Fig.1 Test device of bench

试验用柴油机的具体技术参数:缸径为 86 mm,行程为 70 mm,压缩比为 19;标定转速为 3 000 r/min,标定功率为 5.7 kW;最大扭矩点转速为 1 800 r/min,对应全负荷功率为 3.4 kW。采用外部 EGR 对单缸柴油机进行改装,依据进、排气中的  $\text{CO}_2$  体积分数调节 EGR 率。稳态工况下,EGR 率  $\varphi_{\text{EGR}}$  的计算式为

$$\varphi_{\text{EGR}} = \frac{V_{\text{CO}_2, \text{in}} - V_{\text{CO}_2, \text{air}}}{V_{\text{CO}_2, \text{out}} - V_{\text{CO}_2, \text{air}}} \times 100\% \approx \frac{V_{\text{CO}_2, \text{in}}}{V_{\text{CO}_2, \text{out}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $V_{\text{CO}_2, \text{in}}$  为再循环废气流入进气歧管后的  $\text{CO}_2$  体积分数,%; $V_{\text{CO}_2, \text{out}}$  为排气管中的  $\text{CO}_2$  体积分数,%; $V_{\text{CO}_2, \text{air}}$  为空气中的  $\text{CO}_2$  体积分数,%,由于空气中的  $\text{CO}_2$  体积分数几乎为 0,可以忽略不计。

试验所采用的燃料包括市售常规 0# 柴油和江苏某新能源有限公司提供的生物柴油(主要是利用餐厨等废弃油脂炼制而成)。将 0# 柴油命名为 B0,以 B0 为基础油,添加体积分数为 50% 的生物柴油,配制成生物柴油调合燃料 B50。依据 EGR 技术在柴油机上的实际应用,选用试验工

况:转速为 2 000 r/min,50% 负荷,柴油机分别燃用 B0 和 B50,在 EGR 率分别为 0,15%,30% 的条件下稳定运行 30 min。碳烟是柴油机排放颗粒物的主要组成物质,采用 FBY-201 型烟度计测量柴油机的碳烟排放量。

在距离柴油机排气口 0.5 m 固定位置处,利用颗粒分级采样装置收集上述工况的柴油机排放颗粒物,并将其分别命名为 B0EGR0, B0EGR15%, B0EGR30%, B50EGR0, B50EGR15%, B50EGR30%, 采集后的颗粒密封保存。

### 1.2 颗粒几何特征及微观结构分析

为直观表征柴油机排放颗粒物群的形貌特征,采用 S-4800 型场发射扫描电子显微镜(SEM)对颗粒样品进行测试与分析。测试前需用乙醇溶液清洗颗粒表面的可溶有机物,然后将洗净的颗粒溶液滴至硅片上,自然烘干后进行喷金处理。场发射扫描电子显微镜的分辨率为 1.0 nm,图像可放大  $20 \sim 8 \times 10^5$  倍,加速电压为 0.5~30 kV。

为表征柴油机排放颗粒物的结构特征,利用上海光源 BL16B1 线站 X 射线小角散射试验装置对颗粒样品进行测试。装置的参数设置如下:探测器到颗粒样品的距离为 1 955 mm,贮存环的电子能量为 10 keV,平均束流强度为 230 mA,入射波长为 0.124 nm。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 碳烟排放

烟度是柴油机碳烟排放量的评价参数,烟度值越大,表明碳烟排放量越大。柴油机在不同 EGR 率条件下分别燃用 B0, B50 时的烟度值变化规律如图 2 所示。

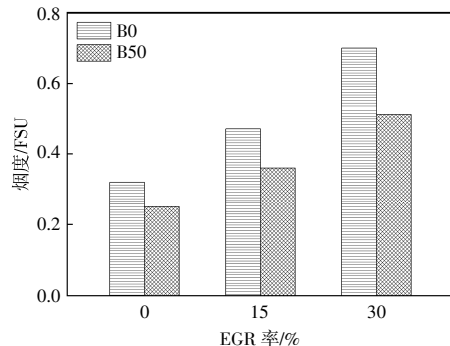


图 2 不同 EGR 率下柴油机燃用 B0, B50 时的碳烟排放  
Fig.2 Soot emission of diesel engine fueled with B0 and B50 under different EGR conditions

从图 2 可以看出:燃用同一燃料时,烟度值随

着EGR 率的增加而逐渐增大,即柴油机的碳烟排放量随着 EGR 率的增加而逐渐增大,且 EGR 率越大,其增长幅度也越大;当燃用 B0 时,与 EGR 率为 0 时相比,EGR 率为 15%和 30%时的烟度值分别增加了 46.9%,118.8%。在相同 EGR 率条件下,与燃用 B0 时相比,燃用 B50 时的烟度值均有所降低,且随着 EGR 率的增大,烟度值降低的幅度有所增加;当 EGR 率分别为 0,15%和 30%时,与燃用 B0 时相比,燃用 B50 时的烟度值分别降低了 21.9%,23.5%,27.1%。生物柴油作为含氧燃料,丰富了可燃混合气的供氧渠道,提高了混合气

的氧浓度,有效促进了燃料的完全燃烧;此外,生物柴油具有良好的着火性能,能够改善因增大 EGR 率而导致的滞燃期延长现象,促使在扩散燃烧阶段形成的碳烟具有充足的时间被氧化,使碳烟排放量降低。因此,采用生物柴油调合燃料可以缓解因引入 EGR 而导致的碳烟排放量升高问题,且大 EGR 率工况下的改善效果更为显著。

### 2.2 颗粒群形貌特征及粒径分布

柴油机排放颗粒群在扫描电子显微镜下放大 8 万倍的微观形貌如图 3 所示。

从图 3 可以看出,不同条件下的颗粒群呈现

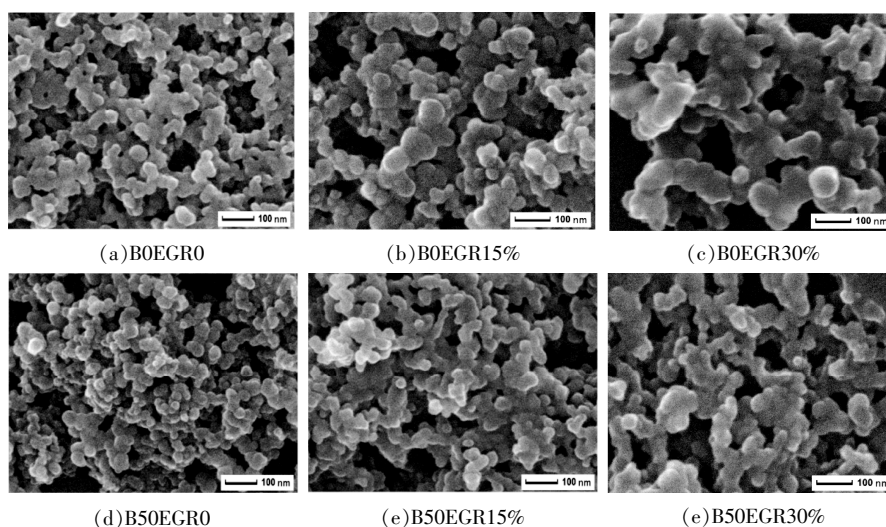


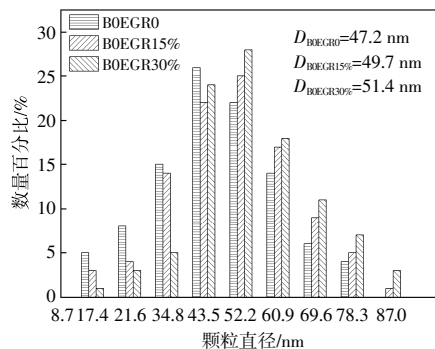
图 3 不同 EGR 率下燃用 B0, B50 时的颗粒 SEM 图像

Fig.3 SEM image of B20, B50 combustion particles with different EGR rates

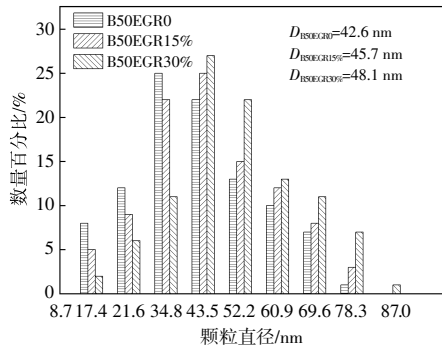
一定的相似性,都是由成百上千个大小不一、近似球状的单个碳颗粒团聚在一起形成形态各异的颗粒群。SEM 图像上存在颗粒颜色深浅不一的现象,主要是由于颗粒发生了堆积,形成疏密程度不同的颗粒群<sup>[9,10]</sup>。在相同 EGR 率条件下,与燃用 B0 时相比,燃用 B50 时形成的颗粒粒径普遍较小,且颗粒间的团聚程度有所增强。这是因为生物柴油是含氧燃料,能够在燃烧过程中促进颗粒的氧化;此外,生物柴油的十六烷值较高,运动粘度较大,导致燃烧持续期有所延长,增加了颗粒被氧化的时间,因此形成的颗粒粒径较小。当燃用相同燃料时,随着 EGR 率的增加,颗粒群的平均粒径增大,团聚程度有所增强。这是因为引入 EGR 会促使缸内燃烧的氧浓度降低,导致碳核的生成量增加,碳核形成颗粒的粒径和数量增加,使得颗粒间碰撞凝并的概率增加,团聚程度增强。

对场发射扫描电子显微镜拍摄的颗粒群进行粒径统计,获得不同 EGR 率条件下柴油机分别燃用 B0, B50 时的颗粒粒径分布,继而得到颗粒的平均粒径  $D$ ,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出:颗粒群的粒径呈正态分布,粒径主要集中在 20~80 nm。当燃用相同燃料时,随着 EGR 率的增加,燃烧形成的颗粒向大粒径方



(a)燃用 B0 时的颗粒粒径分布及平均粒径



(b) 燃用 B50 时的颗粒粒径分布及平均粒径

图 4 不同 EGR 率下燃用 B0, B50 时的颗粒粒径分布及平均粒径

Fig.4 Particle size distribution and average particle size of B0, B50 combustion particles with different EGR rates

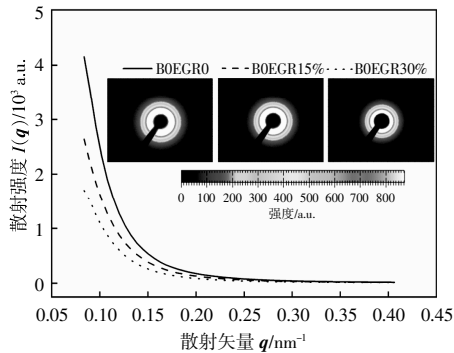
向移动;当燃用 B50 时,在 EGR 率分别为 0,15%,30% 条件下的颗粒平均粒径分别为 42.6,45.7,48.1 nm,这是因为将废气重新引入缸内会使燃烧过程中的氧浓度降低,高温缺氧区域增加,颗粒成核的几率增大,易形成数量较多的碳核,提高了颗粒碰撞凝并的概率,聚积态颗粒数量浓度增加,从而导致颗粒的平均粒径增大。在相同 EGR 率条件下,与燃用 B0 时相比,燃用 B50 时形成的颗粒粒径明显减小,这是因为生物柴油调和燃料提高了燃烧过程中可燃混合气的氧浓度,在燃烧后期加快了颗粒的氧化;此外,与柴油相比,生物柴油的十六烷值较高,运动粘度较大,导致燃烧持续期有所延长,增加了颗粒被氧化的时间,从而导致大粒径颗粒向小粒径颗粒转化。

### 2.3 颗粒表面结构

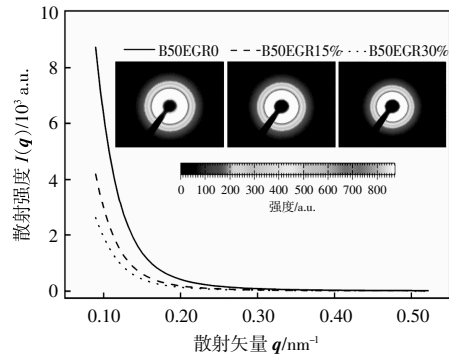
#### 2.3.1 颗粒的散射图像与散射曲线

柴油机排放颗粒物的散射图像及散射曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出,不同条件下形成的颗粒 SAXS



(a) 燃用 B0 时颗粒的散射图像与散射曲线



(b) 燃用 B50 时颗粒的散射图像与散射曲线

图 5 颗粒的散射图像与散射曲线

Fig.5 The scattering images and curves of particle

二维图像具有一定的相似性,均为同心圆分布且呈现各向同性结构,圆环内侧散射强度最大,外侧散射强度最小,而散射强度越大则表明孔隙越丰富<sup>[11]</sup>。柴油机排放颗粒物的孔隙主要是初级碳粒子在碰撞凝并过程中产生的间隙。不同条件下的颗粒散射图像及曲线的差异性表现在圆环的大小及散射强度,这表明不同 EGR 率条件下分别燃用 B0, B50 时形成的颗粒的孔隙率各不相同。由图 5 还可以看出:随着散射矢量的增加,散射强度不断减小,且减小的速率不断增加;当散射矢量相同时,随着 EGR 率的增加,颗粒的散射强度逐渐减弱,即随着 EGR 率的增加,同一粒径下的颗粒的孔隙率逐渐减小;在相同 EGR 率条件下,与燃用 B0 时形成的颗粒相比,燃用 B50 时形成的颗粒散射强度较大,表明燃用生物柴油促进了多孔碳结构的形成,有助于增大颗粒的孔隙率。

#### 2.3.2 颗粒的界面结构

柴油机排放的颗粒物间存在界面层,即为颗粒间的过渡区域。界面厚度  $\sigma$  是反映界面层的参数之一,界面厚度与颗粒间的分离程度有关,颗粒间界面层的存在及界面厚度的大小影响了颗粒的结构特性。根据波罗德(Porod)理论<sup>[12,13]</sup>,界面厚度可以通过 Porod 曲线得到。图 6 为柴油机排放颗粒物的 Porod 曲线。

从图 6 可以看出,当  $q^2$  大于一定值时, Porod 曲线趋于一条直线,通过拟合该直线可以计算得到用于评价颗粒界面结构的参数——界面厚度。颗粒 B0EGR0, B0EGR15%, B0EGR30%, B50EGR0, B50EGR15%, B50EGR30% 的界面厚度分别为 1.92, 1.56, 1.32, 2.38, 2.07, 1.85 nm。在相同 EGR 率

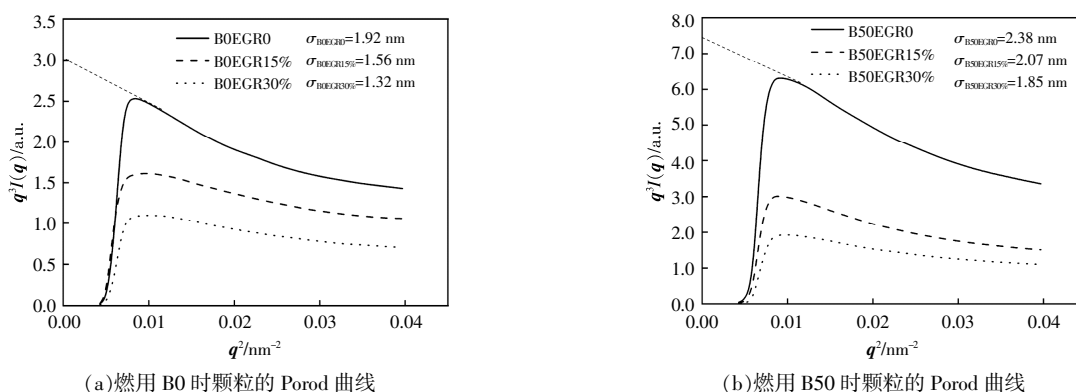


图6 颗粒的 Porod 曲线

Fig.6 The Porod curves of particles

条件下,与燃烧 B0 时形成的颗粒相比,燃烧 B50 时形成的颗粒界面厚度较大,这是因为燃烧 B50 时形成的颗粒粒径有所减小,且颗粒在衍化生长过程中吸附的可溶有机物增加,促进了界面厚度的增大;当燃烧相同燃料时,颗粒的界面厚度随着 EGR 率的增加而逐渐减小。

2.3.3 颗粒的形态特征

柴油机排放的颗粒物具有复杂的形态特征,利用分形理论可以对其形态特征进行量化分析。依据同步辐射小角散射测得的数据,对小角散射强度  $I(q)$  与散射矢量  $q$  计算自然对数,获得  $\ln[I(q)]-\ln(q)$  曲线,由此可以得到表征颗粒形态变化的分形维数<sup>[4]</sup>。通过不同  $\ln(q)$  区间获得对应的拟合曲线方程:

$$\ln[I(q)] = \ln[I(0)] - \beta \ln(q) \quad (2)$$

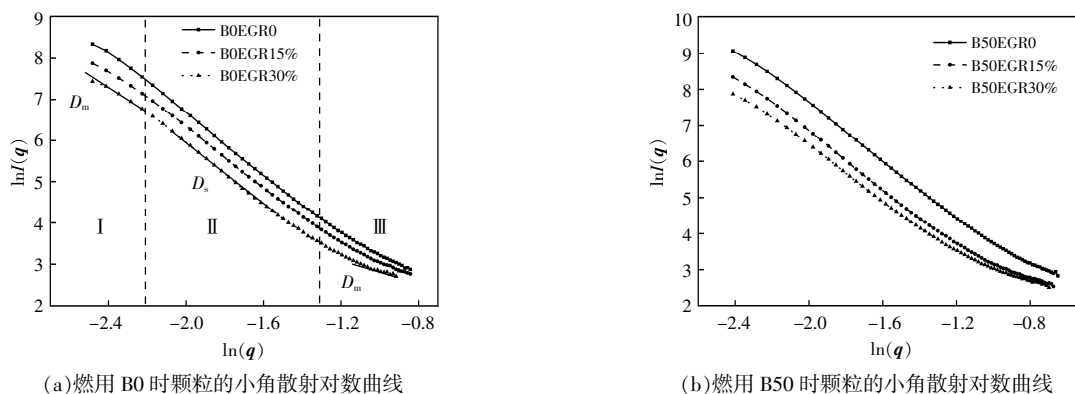


图7 颗粒的小角散射对数曲线

Fig.7 Logarithmic curves of small angle scattering for particles

在区域 II 内计算得到不同条件下颗粒样品的表面分形维数,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出:在相同 EGR 率条件下,表面分形维数随着生物柴油掺混比的增加而增大,

散射曲线在不同  $\ln(q)$  区间存在线性段,通过计算可以到该线性段的斜率  $\beta$ ,依据分形理论<sup>[5]</sup>,每一个线性段的斜率范围即对应一个分形结构:当  $1 \leq \beta < 3$  时,为质量分形,用于表征颗粒质量的不均匀度,此时分形维数  $D_m$  即为  $\beta$ ,且  $D_m$  越大,表明颗粒的质量分布越不均匀;当  $3 < \beta < 4$  时,为表面分形,用于表征颗粒表面的粗糙程度,此时分形维数  $D_s$  即为  $6-\beta$ ,且  $D_s$  越大,颗粒表面越粗糙。

图 7 为柴油机排放颗粒物的散射强度  $I(q)$  与散射矢量  $q$  对应的自然对数曲线。根据所得斜率可以将散射对数曲线划分为 3 个线性区域,在区域 I 和 III(低  $q$  与高  $q$  区间),柴油机排放的颗粒物具有质量分形特性;在区域 II(中  $q$  区间),柴油机排放的颗粒物具有表面分形特性。

与 BOEGRO 颗粒相比,B50EGRO 颗粒的表面分形维数增大了 12.9%,表明柴油中掺混生物柴油会导致排放颗粒物的表面粗糙程度和不规则程度有所提高;当燃烧同一燃料时,颗粒表面分形维数随

表 1 颗粒的表面分形维数  
Table 1 Fractal dimension of the particles

颗粒	BOEGR0	BOEGR15%	BOEGR30%	B50EGR0	B50EGR15%	B50EGR30%
$D_s$	2.24	2.35	2.51	2.53	2.65	2.77

着 EGR 率的增加而逐渐增大,表明采用 EGR 技术后,排放颗粒物的表面粗糙程度也有所提高,这主要是由于将废气重新引入气缸参与燃烧会导致缸内的氧浓度和最高燃烧温度均有所降低,HC 等物质的排放量增加,易在颗粒衍化与生长阶段吸附于颗粒表面,增加了颗粒间的吸附能力,导致颗粒的团簇体积增大,形成表面较为粗糙的颗粒。

### 3 结论

①柴油机的碳烟排放量随着 EGR 率的增加而逐渐增大,且 EGR 率越大,增长速率越快;在相同 EGR 率条件下,与燃用 B0 时相比,燃用 B50 均能使烟度值有不同程度的降低,且 EGR 率越大,烟度值减小的幅度越大。表明采用生物柴油调合燃料可以缓解因引入 EGR 而导致的碳烟排放量升高问题,且大 EGR 率工况下的改善效果更为显著。

②柴油机排放颗粒物在扫描电镜下的微观形态均由近似球状的单个碳颗粒团聚在一起,整体呈现团簇状结构。颗粒群的粒径呈正态分布,粒径主要集中在 20~80 nm。在相同 EGR 率条件下,与燃用 B0 时形成的颗粒相比,燃用 B50 形成的颗粒粒径明显减小,且颗粒间的团聚程度有所增强;当燃用相同燃料时,随着 EGR 率的增加,颗粒群的平均粒径增大,团聚程度增强。

③不同条件下形成颗粒的 SAXS 二维图像具有一定的相似性,均为同心圆分布且呈现各向同性结构。当散射矢量相同时,随着 EGR 率的增加,颗粒的散射强度逐渐减弱,即颗粒的孔隙率逐渐减小;在相同 EGR 率条件下,与燃用 B0 时形成的颗粒相比,燃用 B50 时形成的颗粒散射强度较大,表明燃用生物柴油调合燃料有助于增大颗粒的孔隙率。

④燃用生物柴油调合燃料会导致柴油机排放颗粒物的界面厚度增加,随着 EGR 率的增加,颗粒物的界面厚度呈现逐渐减小的趋势;采用生物柴油调合燃料及 EGR 技术均会导致排放颗粒物的表面分形维数增大,表明颗粒物的粗糙程度和

不规则程度均有所提高。

#### 参考文献:

- [1] 陈梓含,王忠,李瑞娜,等.186F 柴油机柴油/甲醇不同掺烧方式的试验研究 [J]. 可再生能源,2022,40(9): 1137-1143.
- [2] 任哲,卢康博,孙滔,等.正丁醚/柴油混合燃料在单缸柴油机中的燃烧与排放特性研究 [J]. 内燃机工程, 2022,43(4):1-11.
- [3] 毛功平,蒋红坤,王威,等.柴油机燃用低比例小球藻生物柴油-柴油混合燃料的试验研究[J].可再生能源, 2021,39(3):285-293.
- [4] 付悦,郑培.高寒地区单缸柴油机燃用生物柴油的排放研究[J].小型内燃机与车辆技术,2020,49(5):47-49.
- [5] 陈培红,王忠,杨丹,等.甲醇掺混比对甲醇/生物柴油混合燃料燃烧循环变动的影 响 [J]. 可再生能源, 2019,37(12):1757-1763.
- [6] Tsolakis A. Effects on particle size distribution from the diesel engine operating on RME-biodiesel with EGR[J]. Energy Fuels,2006,20(4):1418-1424.
- [7] 王忠,张启霞,刘帅,等.柴油机排气颗粒吸附行为及微观特征[J].内燃机学报,2022,40(5):440-446.
- [8] 李铭迪.含氧燃料颗粒状态特征及前驱体形成机理研究[D].镇江:江苏大学,2014.
- [9] 马志豪,李磊,钞莹,等.柴油机颗粒的微观结构和成分对其氧化活性的影响[J].内燃机学报,2015,33(2): 123-128.
- [10] 沈颖,赵洋,刘帅,等.柴油机颗粒结构特征与氧化特性分析[J].车用发动机,2020(4):70-75.
- [11] 王向丽,王忠,倪培永.碳烟微观结构的小角 X 射线散射分析[J].内燃机工程,2013,34(2):58-61.
- [12] 李志宏,王俊.小角 X 射线散射中 Porod 正偏离的校正[J].化学学报,2000,58(9):168-170.
- [13] 高芳亮,陈宏基,吴忠华,等.聚硅氧烷基纳米多孔薄膜双分形结构的同步辐射小角 X 射线散射分析[J].理化检验:物理分册,2011,47(3):133-136.
- [14] 张健,王忠,何丽娜,等.柴油机排放颗粒物中石墨烯结构分析[J].农业工程学报,2015,31(18):79-84.
- [15] Marli R C, Woignier T, Dieudonn P, et al. Two fractal structures in aerogel [J]. Journal of Non-Crystalline Solids,2001,285(1/3):175-180.

## Analysis on the structural characteristics of combustion particles of biodiesel blended fuel in EGR atmosphere

Qu Lei<sup>1,2</sup>, Wang Zhong<sup>2</sup>, Feng Jie<sup>3</sup>, Li Shoujuan<sup>1</sup>

(1.School of Automotive and Traffic Engineering, Nantong Vocational University, Nantong 226007, China; 2.School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3.Wuxi Fusheng Testing Technology Service Co.,Ltd., Wuxi 214000, China)

**Abstract:** Taking an agricultural single cylinder diesel engine as the research object, the soot emission characteristics of biodiesel blended fuel were tested under the conditions of EGR rates of 0, 15% and 30% , and the influence of EGR rate on the combustion particle structure characteristics of biodiesel blended fuel was explored. The results indicate that biodiesel blended fuel can alleviate the problem of increased soot emissions caused by the introduction of EGR, and the improvement effect is more significant under high EGR rate conditions. The diesel engine exhaust particle size range is mainly between 20 nm and 80 nm, mainly showing normal distribution. Under the same EGR rate conditions, the particle size formed by burning biodiesel blended fuel significantly decreases, and the degree of agglomeration between particles increases, the porosity of particles increases, and the thickness of the interface layer increases. By adopting EGR technology, the average particle size of the particle group increases, the degree of agglomeration increases, the porosity of the particles decreases, and the thickness of the interface layer increases. Mixing biodiesel and introducing EGR can both increase the roughness and irregularity of the formed particles.

**Keywords:** diesel engine; particle; biodiesel; exhaust gas recirculation