

DOI: 10.7652/xjtuxb201605012

甲醇/生物柴油燃烧颗粒的结构特征研究

瞿磊¹, 王忠¹, 李瑞娜¹, 李铭迪², 杨丹¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 常熟理工学院汽车工程学院, 215500, 江苏常熟)

摘要: 为探讨甲醇对生物柴油颗粒形成的作用机理, 采用扫描电镜(SEM)与X射线小角散射(SAXS)相结合的方法, 针对颗粒的微观形貌以及孔隙结构, 分析了甲醇对生物柴油燃烧颗粒的散射强度、回转半径、平均半径等参数的影响; 通过引入分形理论, 探明不同甲醇掺混比的生物柴油燃烧颗粒的形态特征。结果表明: SAXS的粒径测量结果与电镜图像上的测试结果具有良好的一致性; 生物柴油燃烧颗粒表面附着较多的未燃可溶有机物, 促进了颗粒间的凝并与生长, 形成的颗粒粒径较大; 随着生物柴油中甲醇掺混比的提高, 燃烧颗粒的散射强度逐渐增强, 回转、平均半径逐渐减小, 通过回转半径求得的B100、BM10、BM20燃烧颗粒的平均半径分别为17、16.4、15.9 nm; 随甲醇掺混比的增加, 颗粒的质量分形维数逐渐增大, 表面分形维数逐渐减小, 生物柴油中掺混甲醇后, 燃烧产生的颗粒结构变得更加紧凑, 质量分布更加均匀。该研究可为在控制NO_x排放的基础上降低柴油机颗粒排放提供参考依据。

关键词: 生物柴油; 甲醇; 颗粒; 小角散射; 结构特征

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)05-0081-06

Structural Characteristics of Methanol/Biodiesel Combustion Particles

QU Lei¹, WANG Zhong¹, LI Ruina¹, LI Mingdi², YANG Dan¹

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

2. Department of Automobile Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu, Jiangsu 215500, China)

Abstract: In order to investigate the effect of methanol on the formation of biodiesel particles, scanning electron microscope (SEM) and X-ray small angle scattering (SAXS) were used to analyze the effects of methanol on the scattering intensity, gyration radius and average radius of biodiesel combustion particles by observing the micro morphology and pore structure of particles. With the introduction of fractal theory, morphological features of biodiesel combustion particles were explored with different mixing ratios of methanol. The results showed that the measurement results of particle size of SAXS were consistent with SEM images. There were a large amount of unburned soluble organic matters adhered on the surface of biodiesel combustion particles. These unburned soluble organic matters could promote the coalescence and growth of particles as well as the formation of large-sized particles. With the increase of methanol composition in biodiesel mixture, the combustion particles' scattering intensity was gradually enhanced, and the gyration radius and average radius were decreased. The average radius of B100, BM10, and BM20 combustion particles were 17 nm, 16.4 nm, and 15.9 nm, respectively by calculating the radius of gyration. With the increase of methanol mixing ratio, the mass fractal

收稿日期: 2015-12-06。 作者简介: 瞿磊(1987—), 男, 博士生; 王忠(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376083, 51506011); 江苏省高校自然科学基金资助项目(13KJA470001)。

网络出版时间: 2016-02-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160225.1205.004.html>

dimension of combustion particles increased gradually, and the surface fractal dimension decreased. Mixing with methanol, the biodiesel led to more compact structure of particles and more uniform mass distribution. This study based on the control of NO_x emissions could provide an approach to reducing diesel particulate emission.

Keywords: biodiesel; methanol; particles; small-angle scattering; structural characteristic

我国是柴油机制造大国,各类柴油机广泛应用于汽车、农业机械、工程机械、船舶及铁路机车等各种配套机械。柴油机消耗了我国 60% 以上的石油资源,石油对外依存度已超过了 55%^[1],已经威胁到我国的能源安全。根据 2014 年防止污染年报统计,柴油车 NO_x 的排放量约占机动车排放总量的 70%,碳烟排放超过 90%^[2]。柴油机排气中的碳烟、 NO_x 和硫化物是产生雾霾的主要原因^[3]。生物柴油作为清洁可再生能源,含有 11% 的氧,能够有效降低柴油机碳烟排放,但 NO_x 排放有所升高;甲醇具有汽化潜热大等特点,在生物柴油中掺混甲醇,可以有效降低柴油机缸内最高燃烧温度,缓解碳烟和 NO_x 之间的权衡关系,达到同时降低碳烟、 NO_x 的效果^[4-5]。喻武等开展了生物柴油/甲醇混合燃料对柴油机燃烧及排放的影响研究,结果表明,在生物柴油中掺混甲醇后,柴油机的放热率峰值增大,燃烧持续期缩短,HC、CO 排放有所增加, NO_x 排放在中小负荷下减小,在高负荷下略有增加,碳烟排放随燃料中的氧浓度增加而逐渐减小^[6]。Anand 等得到了相似的结论,甲醇添加量为 10% 时,热效率最高提高 4.2%,80% 负荷时的碳烟降幅最高达到 96.4%,全负荷时的 NO_x 降幅最高达到 37.3%^[7]。碳烟作为颗粒的主要组成部分,生物柴油中掺混甲醇,对颗粒形成的作用机理具有多重影响,颗粒的生长过程进一步复杂化,易形成与生物柴油燃烧颗粒不同的物理微观结构。国内外学者针对生物柴油燃烧颗粒的状态特征开展了相关研究,谭建伟等采用热重分析仪研究了生物柴油燃烧颗粒组分的变化规律,结果表明生物柴油颗粒中的挥发性组分高于柴油,生物柴油颗粒具有较强的吸附能力^[8]。Tsolakis 等开展了柴油机燃用生物柴油的颗粒形态特征研究,结果表明颗粒主要由球状的基本粒子凝并、聚集而成,柴油颗粒多以链状形式存在,结构较为松散,生物颗粒主要以葡萄状或簇状形式存在,结构排列较为紧凑^[9]。

X 射线小角散射(SAXS)是研究纳米尺度(1~100 nm)物质结构的主要方法之一。通过对小角散射图像进行分析,获得散射体的形状、尺度分布等信

息,可以用于预测柴油机颗粒的孔隙结构及粒径分布。为探讨甲醇对生物柴油燃烧颗粒微观结构的影响,采用扫描电镜与 X 射线小角散射相结合的方法,开展甲醇/生物柴油燃烧颗粒的结构特征研究,针对颗粒的微观形貌以及孔隙结构,分析甲醇对生物柴油燃烧颗粒的散射强度、回转半径、平均半径等参数变化规律的影响;通过引入分形几何思想,采用质量与表面分形来表征不同甲醇掺混比的生物柴油燃烧颗粒的形态,探明生物柴油中添加甲醇对颗粒状态特征的影响。本研究通过燃料重组,以期在控制 NO_x 排放的基础上对颗粒形成的作用机理研究以及为降低柴油机颗粒排放提供参考依据。

1 试验装置及方案

1.1 样品采集

采用缸径为 86 mm 的试验用柴油机进行台架试验,柴油机主要性能参数:压缩比为 19,标定功率、转速为 5.7 kW、3 000 r/min。燃料选用常州卡特新能源公司生产的生物柴油、分析级甲醇,在不改变柴油机的供油提前角、结构参数的前提下,选取 10%、20% 两种甲醇体积掺混比例,在不添加助溶剂的情况下与生物柴油混合,记为 BM10、BM20,并与生物柴油(记为 B100)进行对比。考虑到柴油机的常用工况,在转速为 2 000 r/min、75% 负荷稳定运行时,采用颗粒分级采样装置采集 3 种燃料燃烧的颗粒。采样使用微孔直径为 47 nm 的铝箔滤纸,采样流量为 6 L/min,采样持续时间为 30 min。

1.2 试验装置

将采集的颗粒样品分别进行扫描电镜与 X 射线小角散射试验,探测颗粒的微观形貌与孔隙结构。采用 JSM-7001F 热场发射扫描电子显微镜,对 B100、BM10、BM20 燃烧的颗粒微观结构进行拍摄。主要技术指标:加速电压范围为 0.5~30 kV,分辨率为 1.2 nm,放大倍数范围为 $10 \sim 5 \times 10^5$ 倍。X 射线小角散射试验在上海同步辐射光源(SSRF)X 射线小角散射光束线站(BL16B1)完成。装置的具体参数:贮存环的电子能量为 3.5 GeV,平均束流强度为 60 mA,入射波长 λ 为 0.124 nm。X 射线小角

散射的测量原理如图1所示。柴油机颗粒中存在分布不均匀的电子,当一束波长为 λ 的X射线照射到颗粒上时,会与颗粒上的电子发生相互作用,使照射到颗粒上的X射线束发生偏离,散射X射线与入射X射线的夹角为 θ ,当颗粒呈球形时,探测器上得到一系列呈同心圆的散射图像^[10]。试验时,以3 M胶带为载体,将颗粒封装在厚度为2 mm、直径为5 mm的样品室中,载体到探测器的距离为1 850 mm。采用成像板法检测散射强度,并经空白和样品吸收的校正,采用fit2d、origin等相关软件进行数据处理。

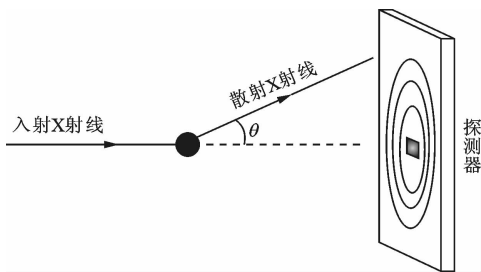


图1 散射原理示意图

在SAXS测试中,散射矢量表示为

$$q = 4\pi\sin\theta/\lambda \quad (1)$$

式中: θ 为散射角; λ 为X射线的入射波长(nm)。

散射强度的计算公式为^[11]

$$I(q) = I_e \langle (\Delta\rho)^2 \rangle V \int_0^\infty \gamma(r) \frac{\sin(qr)}{qr} 4\pi r^2 dr \quad (2)$$

式中: I_e 为电子散射强度; $\langle (\Delta\rho)^2 \rangle$ 为散射体与周围介质之间电子密度涨落的平方均值; V 为X射线照射的颗粒体积(nm^3); $\gamma(r)$ 为电子密度涨落的空间相关函数。

2 试验结果与分析

2.1 颗粒的微观形貌

柴油机燃用B100、BM10、BM20产生的颗粒在扫描电镜下放大13万倍的SEM图像如图2所示。由图2可知,颗粒主要由粒径不等的准球状基本碳粒子堆积而成,形成疏密程度不同的颗粒群。生物

柴油的主要成分为脂肪酸甲酯,官能团结构为 $-\text{OCH}_3$ 、 $-(\text{C}=\text{O})-$,碳原子与氧原子连接时由 $\text{C}-\text{O}$ 单键和 $\text{C}=\text{O}$ 双键组成, $\text{C}=\text{O}$ 双键在高温裂解下需要吸收较高的能量断裂生成活性氧自由基($-\text{O}$),反应初始时,氧化裂解过程所需的时间较长,化学反应速率降低,导致初始缸内燃料无法充分燃烧,颗粒表面附着较多的未燃可溶有机物,导致图像上颗粒的轮廓变得较为模糊,颗粒相互间的黏性作用力增大,出现大量基本碳粒子堆积现象,形成的颗粒粒径较大。随着甲醇掺混比例的增加,颗粒的粒径逐渐减小,在SEM图像上,采用Nano Measurer对单位面积内颗粒的粒径进行统计,继而求得颗粒的平均直径,B100、BM10、BM20的燃烧颗粒平均直径分别为35.32、32.6、31.2 nm。颗粒群的堆积程度随着甲醇掺混比的增加而逐渐加深。

2.2 颗粒孔隙结构

B100、BM10、BM20燃烧颗粒的二维小角散射图像如图3所示,它们之间具有相似性。通过图3中的散射强度比色卡可以看出,环形图像内侧边缘的散射强度最强,外侧边缘的散射强度最弱,从内侧至外侧边缘,散射强度呈现递减趋势。图像中心圆形区域为束流阻挡器造成的阴影,为防止直穿束流损坏探测器,在中心位置采用了圆形束流阻挡器。

依据甲醇/生物柴油不同掺混比燃料燃烧的颗粒,采用fit2d软件,运用扇形数据拾取方法,获得散射强度 I 与散射矢量 q 之间的曲线关系,结果如图4所示。由图4可以看出,当散射矢量 $q < 0.4 \text{ nm}^{-1}$ 时,散射强度随着散射矢量的增加而逐渐减弱,散射强度的递减速率逐渐减小;相同散射矢量时,B100、BM10、BM20燃烧颗粒的散射强度随着甲醇比例的增加而逐渐增强。当 $q > 0.4 \text{ nm}^{-1}$ 时,散射强度随着散射矢量的递增基本不发生变化,此时B100、BM10、BM20燃烧颗粒的散射强度基本保持一致。由文献[12]可知:根据散射矢量的大小可以粗略判断颗粒的形态, $q < 0.15 \text{ nm}^{-1}$ 时为颗粒的凝并状

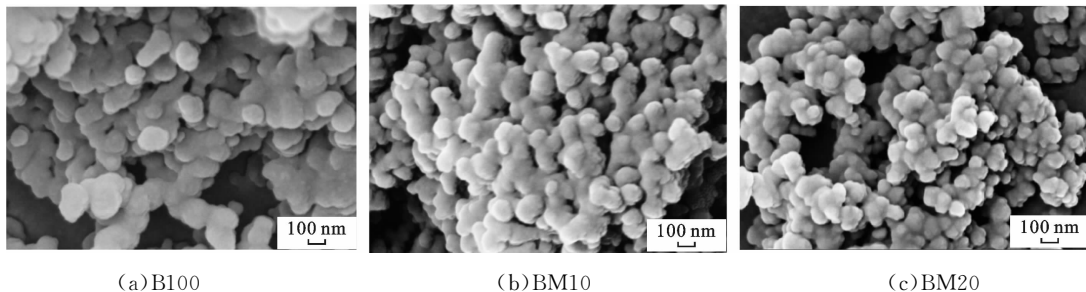


图2 B100、BM10、BM20燃烧颗粒的SEM图像

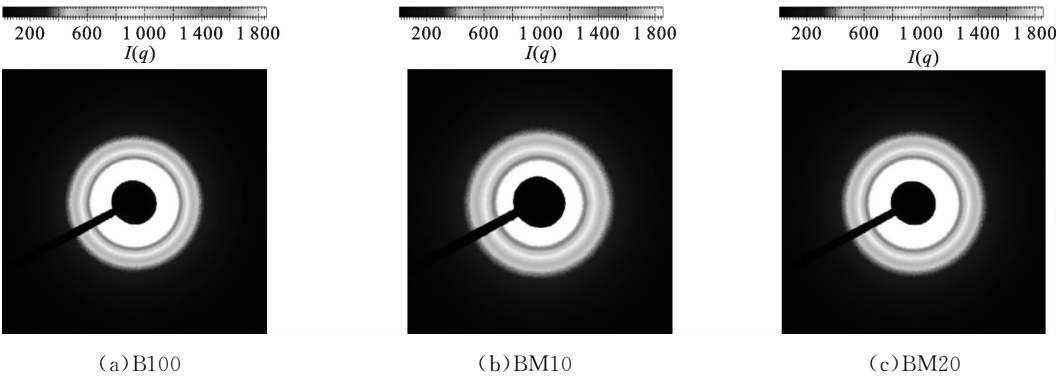


图 3 生物柴油燃烧颗粒的散射图像

态, $0.15 < q < 0.4 \text{ nm}^{-1}$ 时为颗粒的聚合态, $q > 0.4 \text{ nm}^{-1}$ 时为颗粒的最终形成状态;从散射矢量对应的散射强度可以看出,颗粒凝并状态的散射强度最强,而颗粒的最终形成状态的散射强度最弱。

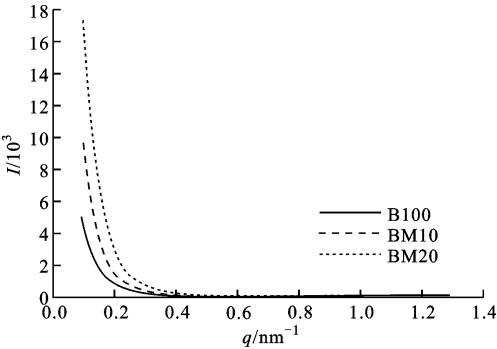


图 4 甲醇/生物柴油燃烧颗粒的小角散射曲线

回转半径指物体微分质量假设的集中点到转动轴间的距离,能够反映物体的大小。运用 Guinier 定律对散射曲线的小角区的直线部分向接近零度角的区域进行外延,求得 q^2 范围为 $q^2 < 0.05 \text{ nm}^{-2}$ 的 Guinier 曲线,如图 5 所示。回转半径通过 Guinier 公式^[13]可得

$$I(q) = I(0)\exp\left(-\frac{1}{3}R_G^2q^2\right) \tag{3}$$

式中: $I(0)$ 为 $q=0$ 时的散射强度; R_G 为散射颗粒的回转半径(nm)。

对式(3)两边求对数,得到直线方程

$$\ln[I(q)] = \ln[I(0)] - \frac{1}{3}R_G^2q^2 \tag{4}$$

图 5 中的 Guinier 曲线具有良好的拟一次线性关系。对图 5 中的颗粒 Guinier 曲线进行拟合,得到与式(4)相关的拟合直线方程,并通过直线方程的斜率求得颗粒的回转半径。柴油机颗粒近似为电子浓度均匀的球体,颗粒平均、回转半径的关系可表示为^[13]

$$R = \left(\frac{5}{3}\right)^{1/2} R_G \tag{5}$$

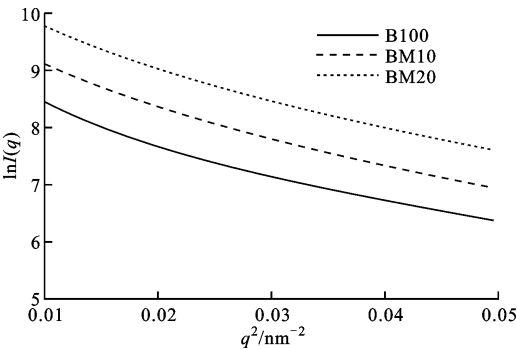


图 5 $q^2 < 0.05 \text{ nm}^{-2}$ 范围内颗粒的 Guinier 曲线

颗粒回转、平均半径的计算结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,随着甲醇掺混比的增加,颗粒的回转、平均半径逐渐减小,燃用 B100、BM10、BM20 产生的颗粒平均半径分别为 17、16.4、15.9 nm,计算结果与扫描电镜测试的结果基本一致。一方面,甲醇具有低十六烷值、高汽化潜热的特点,随着生物柴油中甲醇含量的增加,甲醇气化潜热增加,造成燃烧前缸内的温度相对较低,滞燃期延长,燃烧始点向后推移,大部分燃料在预混燃烧阶段进行燃烧,降低了扩散燃烧阶段的燃油量,从而减少干碳烟的生成,抑制了大粒径颗粒的形成。另一方面,甲醇在高温下裂解生成大量的一O、—OH等活性自由基,能够氧化燃烧过程的中间产物乙烯和乙炔,生成 CO_2 、 H_2O 等物质,减少了颗粒前驱体单环以及多环芳香烃的形成路径,抑制了干碳烟的形成,降低了颗粒的成核概率,颗粒的粒径逐渐减小。

表 1 燃烧颗粒的回转、平均半径 nm

燃料	回转半径	平均半径
B100	13.2	17.0
BM10	12.7	16.4
BM20	12.3	15.9

生物柴油中添加甲醇,对颗粒的团聚程度具有一定影响,采用小角 X 射线散射的方法,依据 SAXS 的测量数据,作出 $\ln[I(q)]-\ln q$ 曲线,获得表征颗粒团聚程度的团粒间隙分形维数的变化关系。通过不同 $\ln q$ 区间获得对应的拟合曲线方程^[14],即

$$\ln[I(q)] = \ln[I(0)] - \beta \ln q \tag{6}$$

依据不同 $\ln q$ 区间的曲线斜率 β ,当 $1 \leq \beta < 3$ 时,颗粒呈质量分形,主要反映颗粒具有不规则的自相似表面特性,分形维数 $D_m = \beta$;当 $3 < \beta < 4$ 时,颗粒呈表面分形,主要反映颗粒质量或密度分布的不规则情况, $D_m = 6 - \beta$ ^[15]。B100、BM10、BM20 燃烧颗粒的 $\ln[I(q)]-\ln q$ 曲线如图 6 所示,曲线在不同 $\ln q$ 区间段存在线性区域,表明颗粒具有分形特征,不同 $\ln q$ 区间段计算得到的分形维数结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,当 $\ln(q \cdot \text{nm})$ 大于 -0.5 或者小于 -1.75 时,颗粒呈现质量分形,随着甲醇掺混比的增加,质量分形维数逐渐增大,表明颗粒体系结构致密性增强,团聚程度逐渐提高;当 $\ln(q \cdot \text{nm})$ 范围在 $(-1.75, -0.5]$ 时,颗粒呈现表面分形,B100、

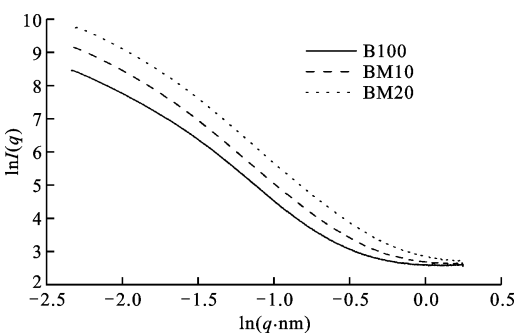


图 6 颗粒的 $\ln[I(q)]-\ln q$ 曲线

BM10、BM20 表面分形维数分别为 2.57、2.38、2.23,随着甲醇掺混比的增加而逐渐减小,表明颗粒外表面变得光滑,表面粗糙度和不规则程度降低。生物柴油中掺混甲醇,造成燃烧产生的颗粒的结构变得更加紧凑,质量分布更加均匀,这主要是因为甲醇分子在高温条件下羟基上的原子易生成微量水分子,促进了颗粒间的黏附作用,颗粒间的黏附力增加,颗粒群堆积现象明显,从而说明,随着甲醇掺混比的增加,颗粒的堆积程度逐渐加大。

表 2 颗粒分形维数统计

燃烧颗粒	$\ln(q \cdot \text{nm})$ 取值范围	β	分形类别	分形维数 D_m
B100	≤ -1.75	2.31	质量分形	2.31
	$(-1.75, -0.50]$	3.43	表面分形	2.57
	> -0.50	0.12~1.26	质量分形	0.12~1.26
BM10	≤ -1.75	2.45	质量分形	2.59
	$(-1.75, -0.50]$	3.62	表面分形	2.38
	> -0.50	0.17~1.85	质量分形	0.17~1.85
BM20	≤ -1.75	2.45	质量分形	2.59
	$(-1.75, -0.50]$	3.77	表面分形	2.23
	> -0.50	0.52~2.47	质量分形	0.52~2.47

3 结 论

本文在试验工况为 2 000 r/min、75% 负荷时,采集了甲醇/生物柴油燃烧颗粒,采用扫描电镜与 X 射线小角散射相结合的方法,分析了颗粒的散射强度、回转半径、平均半径、分形维数等参数的变化规律,探明了生物柴油中添加甲醇对颗粒结构特征的影响。

(1)生物柴油燃烧颗粒表面附着较多的未燃可溶有机物,促进了颗粒间的凝并与生长,形成的颗粒粒径较大。

(2)随着生物柴油中甲醇掺混比的提高,燃烧颗粒的散射强度逐渐增强,回转与平均半径逐渐减小,

通过回转半径求得的 B100、BM10、BM20 燃烧颗粒的平均半径分别为 17、16.4、15.9 nm,计算结果与电镜图像上的颗粒尺度统计具有良好的一致性。

(3)颗粒在 $\ln(q \cdot \text{nm})$ 大于 -0.5 或者小于 -1.75 时,表现为质量分形,随甲醇掺混比的增加,质量分形维数逐渐增大,颗粒粒体系结构致密性增强,团聚程度逐渐提高;颗粒在 $\ln(q \cdot \text{nm})$ 在 $(-1.75, -0.5]$ 时表现为表面分形,并随甲醇掺混比的增加而逐渐减小,这表明颗粒外表面变得光滑,表面粗糙度和不规则程度降低。

参考文献:

[1] 中华人民共和国工业和信息化部. 乘用车燃料消耗量

- 第四阶段标准解读. [EB/OL]. [2015-10-10]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057589/c3616982/content.html>.
- [2] 黄志辉, 陈伟程, 吉喆, 等. 全国机动车污染物排放量 [J]. 环境与可持续发展, 2014(1): 91-96.
HUANG Zhihui, CHEN Weicheng, JI Zhe, et al. The amount of vehicle emission by China vehicle emission [J]. Environment and Sustainable Development, 2014 (1): 91-96.
- [3] 冯谦, 楼狄明, 谭玉强, 等. 催化型 DPF 对车用柴油机气态污染物的影响研究 [J]. 燃料化学学报, 2014, 42(12): 1513-1521.
FENG Qian, LOU Diming, TAN Yuqiang, et al. Effect of catalyzed diesel particulate filter on gaseous emissions from automobile diesel engine [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42 (12): 1513-1521.
- [4] SAYIN C, OZSEZEN A N, CANAKCI M. The influence of operating parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine using methanol-blended-diesel fuel [J]. Fuel, 2010, 89(7): 1407-1414.
- [5] 李瑞娜, 王忠, 侯令川, 等. 小型农用柴油机甲醇/生物柴油燃烧与排放模拟 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2015, 36(2): 136-141.
LI Ruina, WANG Zhong, HOU Lingchuan, et al. Simulation on combustion and emissions of agricultural diesel engine fuelled with methanol/biodiesel [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2015, 36(2): 136-141.
- [6] 喻武, 张志远, 陈财森, 等. 生物柴油/甲醇混合燃料发动机的性能和排放 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29(3): 47-54.
YU Wu, ZHANG Zhiyuan, CHEN Caisen, et al. Performance and emissions of engine fueled with biodiesel/methanol blends [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2015, 29(3): 47-54.
- [7] ANAND K, SHARMA R P, MEHTA P S. Experimental investigations on combustion, performance and emissions characteristics of neat Karanji biodiesel and its methanol blend in a diesel engine [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(1): 533-541.
- [8] 谭建伟, 葛蕴珊, 何超, 等. 基于尺寸分布的生物柴油排气微粒组分研究 [J]. 内燃机工程, 2010, 31(1): 17-20.
TAN Jianwei, GE Yunshan, HE Chao, et al. Research on PM component of diesel engine fueled with biodiesel [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(1): 17-20.
- [9] 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.
- [10] 李立琳, 王忠, 秦先锋, 等. 基于小角 X 散射的生物柴油/柴油颗粒物结构的分析 [J]. 汽车工程, 2014, 36(1): 77-80.
LI Lilin, WANG Zhong, QIN Xianfeng, et al. An analysis on the structure of particulates from biodiesel/diesel fuels based on small-angle X-ray scattering [J]. Automotive Engineering, 2014, 36(1): 77-80.
- [11] DEBYE P, BUECHE A M. Scattering by an inhomogeneous solid [J]. Journal of Applied Physics, 1949, 20(6): 518-525.
- [12] 王向丽, 王忠, 倪培永. 碳烟微观结构的小角射线散射分析 [J]. 内燃机工程, 2013, 34(2): 58-61.
WANG Xiangli, WANG Zhong, NI Peiyong. Soot microstructure analysis by small angle X-ray scattering [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(2): 58-61.
- [13] 孟昭富. 小角 X 射线理论及应用 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995: 5-10.
- [14] 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.
- [15] 宋晓夏, 唐跃刚, 李伟, 等. 基于小角 X 射线散射构造煤孔隙结构的研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 719-724.
SONG Xiaoxia, TANG Yuegang, LI Wei, et al. Pore structure in tectonically deformed coals by small angle X-ray scattering [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 719-724.

(编辑 赵炜 荆树蓉)