

DOI: 10.7652/xjtuxb202003018

生物柴油微观喷雾的灰色关联分析

叶丽华¹, 刘天宇¹, 朱世林¹, 施爱平²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 江苏大学农业装备工程学院, 212013, 江苏镇江)

摘要: 为探究影响生物柴油雾化性能的主次因素,对 B100(棕榈油生物柴油)、N10(生物柴油的体积分数为 90%,正丁醇的体积分数为 10%)和 N20(生物柴油的体积分数为 80%,正丁醇的体积分数为 20%)的雾化特性进行了试验研究。采用定容弹高速摄影与多普勒粒子分析仪测量系统研究了 3 种燃油在不同喷孔直径、喷油压力及背压下的微观雾化特性,分析了雾化油滴的轴向速度和索特平均直径 D_{SMD} 的变化趋势,并在此基础上通过灰色关联理论,计算得到了正丁醇掺混比、喷孔直径、喷油压力及背压对生物柴油 D_{SMD} 的影响程度。结果表明:随着正丁醇掺混比的增加,雾化油滴的轴向速度与 D_{SMD} 都有所减小,B100 的 D_{SMD} 从轴向长度 5 mm 处的 106.74 μm 降低到轴向长度 70 mm 处的 57.98 μm ;随喷孔直径和背压减小、喷射压力增大,3 种生物柴油的 D_{SMD} 均呈下降趋势,雾化质量得到改善。通过 D_{SMD} 的灰色关联计算,得到正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力和背压与 D_{SMD} 之间的关联度分别为 0.507 2、0.755 8、0.607 7 和 0.789 5,说明背压对 D_{SMD} 的影响最大,喷孔直径与喷射压力次之,正丁醇掺混比对 D_{SMD} 的影响最小。

关键词: 生物柴油;喷雾;高速摄影;索特平均直径;灰色关联分析

中图分类号: TK421.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0143-07

Micro-Spraying Characteristics of Biodiesel Based on Grey Correlation Analysis

YE Lihua¹, LIU Tianyu¹, ZHU Shilin¹, SHI Aiping²

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

2. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: To explore the primary and secondary factors affecting the atomization performance of biodiesel, the micro-atomization characteristics of B100 (palm oil biodiesel), N10 (90% biodiesel plus 10% n-butanol in volume) and N20 (80% biodiesel plus 20% n-butanol in volume) at different orifice diameters, injection pressures and back pressures were studied by high speed photography and phase Doppler particle analyzer (PDPA) measurement system. The axial velocity of the oil droplets and the variation trend of the Sauter mean diameter (D_{SMD}) were analyzed. Based on the grey correlation theory, the order of four influencing factors on D_{SMD} of biodiesel was calculated. The results showed that the D_{SMD} of B100 decreased from 106.74 μm at the axial length of 5 mm to 57.98 μm at the axial length of 70 mm; the axial velocity and D_{SMD} of the oil droplet decreased with the percentage of n-butanol. With the increase of the injection pressure and the decrease of the back pressure and the orifice diameter, the D_{SMD} of the biodiesel showed a downward trend and the atomization quality was improved. According to the gray

收稿日期: 2019-06-30。 作者简介: 叶丽华(1974—),女,副教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0701002);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYCX18_2247);江苏高校品牌专业建设工程资助项目。

网络出版时间: 2019-12-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191205.1520.016.html>

确测量运动粒子相关特性的分析系统^[13]。本文的 PDPA 分析系统使用 320 mW 氩离子水冷激光器,激光分为两种波长,分别为 488.0 和 514.5 nm,所用透镜的焦距为 500 mm。其主要工作过程为:从发射探头发射的激光通过透镜照射到喷雾油滴上,散射后的光进入接收探头并转化为电信号,PDPA 信号处理器对其中的有效信号进行筛选,由此计算出喷雾油滴的粒径和速度等信息。其中 D_{SMD} 的计算公式为

$$D_{SMD} = \frac{\sum_{i=D_{min}}^{D_{max}} D_i^3}{\sum_{i=D_{min}}^{D_{max}} D_i^2} \tag{1}$$

式中 D_i 表示第 i 个油滴的直径。

PDPA 系统测量点的分布如图 2 所示。由于近喷孔区域油滴流动及破碎较为复杂,因此测量点在离喷孔较近的区域分布较为密集,当离喷孔较远时,测量点的分布较为稀疏^[14]。轴线上划分为 7 个测量点,轴向距离为 0 处即喷孔端面,若将第 1 个测量点设置在喷孔处,其轴向距离接近于 0,考虑到其中的微小误差,本研究将轴向上第 1 个测量点设置在距离喷孔 5 mm 处,且前两个测量点之间的距离为 5 mm,最后两个测量点之间的距离为 20 mm。测量点呈左右对称分布,整个喷雾场内设置 27 个测量点。本文试验中粒径和速度的测量精度均为 5%。

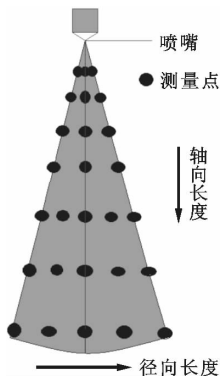


图 2 测量点分布图

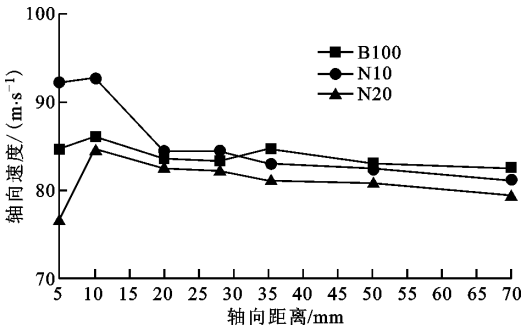
试验选用单孔喷嘴,喷孔直径分别为 0.20、0.25、0.30 mm,喷射压力分别为 15、30、45 MPa,背压分别为 1、2、3 MPa,喷射脉宽为 1.5 ms。定容弹内的介质为氮气,温度为 296 K。分别对 B100、N10 和 N20 进行试验,为缩小误差,每种工况条件下对燃油测试 3 次,取其平均值。

2 试验结果与分析

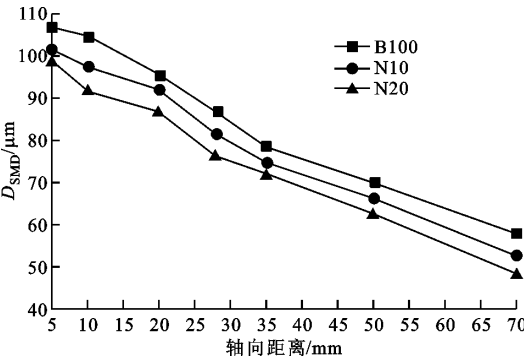
2.1 生物柴油掺混正丁醇的雾化性能

图 3 展示了 B100、N10、N20 在不同轴向距离

下的雾化性能,其中喷孔直径为 0.20 mm、喷射压力为 15 MPa、背压为 3 MPa。从图 3a 可以看出,3 种燃油的轴向速度都呈现先增大后减小的趋势。这是因为每次喷油过后喷油压力室内会有上一次的残存燃油,当喷油再次开始后这些残存燃油会先喷出,但后续燃油还没有跟上,不能产生持续的推动力来推动残存燃油,此时就造成这部分燃油经过测量点时的速度较小,而当后续燃油跟上时,持续的推动力会增加燃油的速度,最后这些高速运动的油滴随着空气阻力的作用速度逐渐减小,所以 B100、N10 和 N20 的轴向速度在不同程度上都出现了先增大后减小的趋势。前人关于生物柴油雾化特性的研究中,其轴向速度的变化也出现了类似的结果^[15-16]。在轴向距离的前 30 mm 处,3 种燃油的轴向速度并没有随着掺醇比例的增加而单方面升高或者降低,是因为近喷孔区域湍动能较高,油滴运动较为复杂,导致油滴之间的速度差异较大,所以规律不明显。当轴向距离在 35~70 mm 之间时,轴向速度波动较小,呈现出了明显的变化规律,在此距离内 N10 与 N20 的轴向速度均低于 B100,且 N20 的轴向速度更小。这是因为掺混正丁醇之后,生物柴油的密度降低,导致雾化后油滴的质量降低,从而减小了油滴的动能和速度。从图 3b 可以看出,B100、N10、N20 的



(a)对轴向速度的影响



(b)对索特平均直径的影响

图 3 正丁醇对生物柴油雾化的影响

D_{SMD} 随着轴向距离的增加呈减小趋势,且随着正丁醇添加比例的增加 D_{SMD} 更小,其中 B100 的 D_{SMD} 从轴向长度 5 mm 处的 106.74 μm 降低到轴向长度 70 mm 处的 57.98 μm , N10 与 N20 的 D_{SMD} 分别从 101.51 和 99.06 μm 降低到 52.75 和 48.58 μm 。这是由于当生物柴油添加正丁醇之后,其黏度及密度得到改善,且表面张力较低,所以油滴破碎所需的能量较小,更易破碎形成较小直径或体积的油滴^[17],较低的密度以及体积形成较小的质量,从而导致其惯性力及动能较低,所以其轴向速度较生物柴油小,且随着正丁醇添加比例的增加,这种效果越明显,符合图 3a 中轴向速度的变化。

2.2 索特平均直径的变化

图 4 为 3 种燃油的 D_{SMD} 在不同喷孔直径、不同喷射压力及背压下的变化图。从图 4a 可以看出,随着背压的增加,B100、N10 和 N20 的 D_{SMD} 都得到提高。这是由于当喷射压力不变时,随着背压的增加,喷嘴进出口的压差逐渐减小,导致燃油在喷嘴内的湍动能减小,从而降低了油滴在喷孔处的初始湍动能和初始速度,使得油滴的破碎程度降低,粒径变大;同时,背压的增加提高了定容室内环境气体的密度,当喷雾油滴在其中运动时所受的空气阻力与滞止压力增加,降低了油滴在运行过程中的速度,且油滴在破碎过程中难以避免地出现油滴与油滴之间的碰撞,在这种高环境密度的空间中,初始速度较低的油滴碰撞更易融合成大油滴,从而使其 D_{SMD} 增加^[18]。当背压不变时,随着喷射压力的增加,3 种燃油的 D_{SMD} 出现降低的趋势。这是由于随着喷射压力的增加,油滴的初始速度增加,具有更高的湍动能,使得油滴更不稳定,难以维持自身形态而破碎,且较高的速度使得油滴与油滴之间的碰撞更加剧烈,更易形成较小的油滴,同时较高的速度更容易带动周围的空气运动,增加了油滴与空气之间的卷吸,更有利于油滴的破碎^[19]。从图 4b 与图 4c 中也可

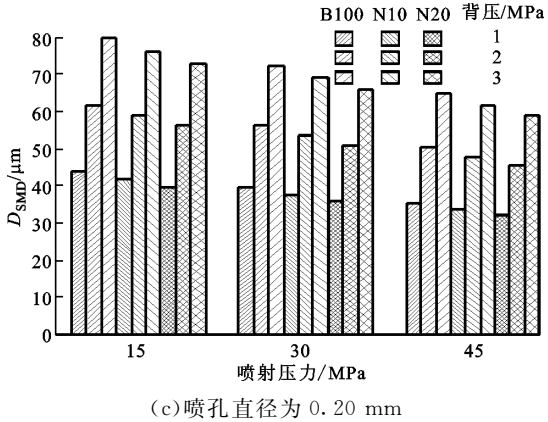
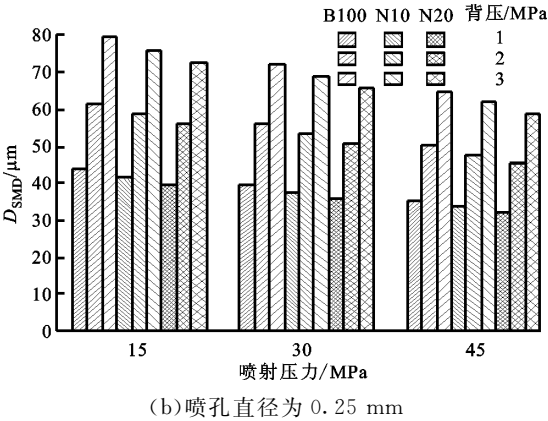


图 4 喷孔直径、喷射压力和背压对索特平均直径的影响

观察到相同的现象,但与 0.3 mm 孔径时相比,孔径为 0.25 和 0.20 mm 时 D_{SMD} 更小。这是由于较小的孔径导致了湍动能所在的空间减小,相比于大孔径,其湍动能的区域更集中,运动更剧烈,油滴的形态更不稳定,所以 D_{SMD} 更低。这与前人的研究^[20]相符。

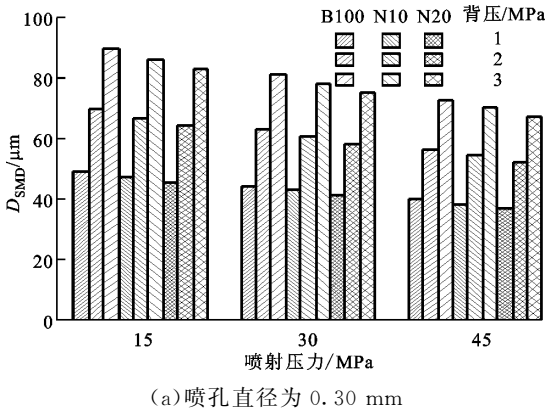
3 灰色关联分析

3.1 D_{SMD} 灰色关联分析步骤

灰色关联分析是一种成功应用于农学、医学、管理和商业领域中的多因素统计方法^[21-24],本文用此方法分析多因素对生物柴油 D_{SMD} 的影响程度,具体步骤如下。

步骤 1 数据矩阵化并确定参考序列。设试验中影响因素共有 m 个,这些影响因素在各工况下共有 n 种组合方式,可以形成如下矩阵

$$\begin{matrix} X(k) = \\ \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_m(k) \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \cdots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$



参考序列可以是所有数据列中的最优值或者最劣值,也可以根据研究的目的来确定。本文研究目的是探索正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力及背压对生物柴油雾化后 D_{SMD} 的影响,因此以 D_{SMD} 的数据作为参考数据列,正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力及背压则为比较序列。比较序列见式(2),参考序列为

$$\mathbf{X}_0(k) = [x_0(1) \quad x_0(2) \quad \cdots \quad x_0(n)] \quad (3)$$

步骤2 对原始数据进行归一化。由于原始数据之间的单位并不一致,各个数据产生的影响无法进行直接比较,所以采用均值化的归一化方法对原始数据进行处理。该方法既可以消除量纲和数量级的影响,又能够保留各个变量的差异程度^[25],公式如下

$$\left. \begin{aligned} x'_i(k) &= x_i(k) / \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k) \right) \\ i &= 0, 1, 2, \cdots, m \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

步骤3 计算各比较序列与参考序列对应元素的绝对差值

$$|x'_0(k) - x'_i(k)|, \quad i = 1, 2, \cdots, m \quad (5)$$

步骤4 计算关联系数

$$\begin{aligned} \xi_i(k) &= (\min_{i=1}^m \min_{k=1}^n |x'_0(k) - x'_i(k)| + \\ &\rho \max_{i=1}^m \max_{k=1}^n |x'_0(k) - x'_i(k)|) / (|x'_0(k) - x'_i(k)| + \\ &\rho \max_{i=1}^m \max_{k=1}^n |x'_0(k) - x'_i(k)|) \end{aligned} \quad (6)$$

步骤5 分辨系数的确定原则。由式(6)可知,当

$$\max_{i=1}^m \max_{k=1}^n |x'_0(k) - x'_i(k)| \gg |x'_0(k) - x'_i(k)| \text{ 时,}$$

$\xi_i(k)$ 主要受到最大值的影响,导致各关联系数之间的差距非常微小,数值都接近于1,降低了可信度,此时分辨系数 ρ 应该取较小的数值来降低最值的影响,避免关联系数过于接近。

当 $\max_{i=1}^m \max_{k=1}^n |x'_0(k) - x'_i(k)|$ 较小时,即失去了对 $\xi_i(k)$ 的调控作用,此时 ρ 应该取较大值,记

$$\Delta_{\max} = \max_{i=1}^m \max_{k=1}^n |x'_0(k) - x'_i(k)| \quad (7)$$

$$\Delta_v = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |x'_0(k) - x'_i(k)| \quad (8)$$

$$\epsilon_{\Delta} = \frac{\Delta_v}{\Delta_{\max}} \quad (9)$$

当 $\frac{1}{\epsilon_{\Delta}} > 3$ 时, $\rho = 1.5\epsilon_{\Delta}$, 当 $0 \leq \frac{1}{\epsilon_{\Delta}} \leq 3$ 时, $\rho = 2\epsilon_{\Delta}$ 。

步骤6 计算不确信度

$$U(X_i) = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n \xi_i^q(k) \right)^{1/q} \quad (10)$$

步骤7 计算关联度

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (11)$$

3.2 D_{SMD} 与影响因素之间的关联度

本试验中将正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力和背压4种参数排列组合共有81种工况,以在81种工况下测得的 D_{SMD} 作为参考序列为矩阵第一行,后面4行依次为正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力和背压的数值,以其作为比较序列,共组成5行81列的矩阵,通过式(4)对其归一化后得到如下矩阵

$$\left. \begin{aligned} &\begin{bmatrix} x'_0(k) \\ x'_1(k) \\ x'_2(k) \\ x'_3(k) \\ x'_4(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0(k)n / \sum_{k=1}^n x_0(k) \\ x_1(k)n / \sum_{k=1}^n x_1(k) \\ x_2(k)n / \sum_{k=1}^n x_2(k) \\ x_3(k)n / \sum_{k=1}^n x_3(k) \\ x_4(k)n / \sum_{k=1}^n x_4(k) \end{bmatrix} = \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} 0.919\ 6 & 1.299\ 6 & 1.679\ 6 & 0.833\ 5 & \cdots & 1.061\ 4 & 0.513\ 3 & 0.732\ 6 & 0.950\ 5 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & \cdots & 2.000\ 0 & 2.000\ 0 & 2.000\ 0 & 2.000\ 0 \\ 1.200\ 0 & 1.200\ 0 & 1.200\ 0 & 1.200\ 0 & \cdots & 0.800\ 0 & 0.800\ 0 & 0.800\ 0 & 0.800\ 0 \\ 0.500\ 0 & 0.500\ 0 & 0.500\ 0 & 1.000\ 0 & \cdots & 1.000\ 0 & 1.500\ 0 & 1.500\ 0 & 1.500\ 0 \\ 0.500\ 0 & 1.000\ 0 & 0.500\ 0 & 0.500\ 0 & \cdots & 1.500\ 0 & 0.500\ 0 & 1.000\ 0 & 1.500\ 0 \end{bmatrix}$$
$$n = 81$$

将上述数据代入式(5)后得到 $\Delta_{\max} = 1.679\ 6$, $\Delta_v = 0.416\ 9$, 满足 $\frac{1}{\epsilon_{\Delta}} > 3$, 所以 $\rho = 1.5\epsilon_{\Delta} = 0.37$. 将分辨系数与各影响因素的 $|x'_0(k) - x'_i(k)| (i=1, 2,$

$$\begin{bmatrix} \xi_1(k) \\ \xi_2(k) \\ \xi_3(k) \\ \xi_4(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.404\ 4 & 0.324\ 5 & 0.270\ 9 & 0.428\ 4 & \cdots & 0.399\ 5 & 0.295\ 7 & 0.330\ 0 & 0.373\ 0 \\ 0.691\ 1 & 0.864\ 4 & 0.566\ 1 & 0.630\ 9 & \cdots & 0.706\ 0 & 0.686\ 3 & 0.904\ 8 & 0.807\ 4 \\ 0.598\ 7 & 0.438\ 6 & 0.346\ 1 & 0.791\ 0 & \cdots & 0.912\ 7 & 0.387\ 6 & 0.448\ 8 & 0.532\ 3 \\ 0.598\ 7 & 0.676\ 7 & 0.778\ 1 & 0.652\ 7 & \cdots & 0.588\ 0 & 0.981\ 9 & 0.701\ 2 & 0.532\ 3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过式(10)计算得到正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力和背压与 D_{SMD} 之间的不确信度分别为 0.060 5、0.085 1、0.069 8 和 0.088 7, 其中式(10)中 q 取值为 2。由计算结果可知, 虽然喷孔直径和背压的不确信度略高于正丁醇掺混比和喷射压力, 但总体相差不大, 且 4 种影响因素的不确信度均处于较低的水平, 这证明了灰色关联系数及关联度的准确性与可靠性。通过式(11)得到正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力和背压与 D_{SMD} 之间的关联度分别为 0.507 2、0.755 8、0.607 7 和 0.789 5, 如图 5 所示。由图可以看出, 背压与 D_{SMD} 的关联度最高, 说明背压对 D_{SMD} 影响最大, 喷孔直径与 D_{SMD} 的关联度仅次于背压, 对 D_{SMD} 影响也较高, 喷射压力对 D_{SMD} 的影响与背压和喷孔直径相比较低, 正丁醇掺混比与 D_{SMD} 的关联度最小, 说明其对 D_{SMD} 的影响最低。这说明机械工艺和运行工况的改善对生物柴油喷雾质量的影响大于燃料理化特性的改善, 将其适当的结合可以更好地改善生物柴油的雾化质量。

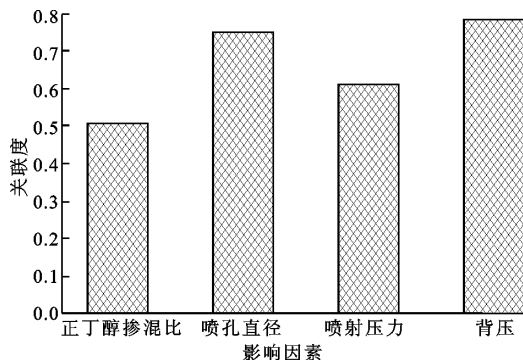


图 5 各影响因素与 D_{SMD} 之间的关联度分布

4 结 论

(1) 随着正丁醇掺混比的增加, N10 和 N20 的索特平均直径相比于生物柴油逐渐减小, 油滴轴向速度略微下降。

(2) 随着喷孔直径的降低、喷射压力的增加和背压的降低, B100、N10 和 N20 的索特平均直径都有所减小, 雾化效果得到改善。

3, 4) 的值代入式(6)后, 得到正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力和背压 4 种参数与 D_{SMD} 之间的关联系数矩阵如下

(3) 通过灰色关联分析, 得到正丁醇掺混比、喷孔直径、喷射压力和背压与 D_{SMD} 之间的关联度分别为 0.507 2、0.755 8、0.607 7 和 0.789 5, 表明背压是影响雾化质量的最主要因素, 喷孔直径和喷射压力次之, 正丁醇掺混比的影响最小。受加工技术与安全性能的限制, 机械工艺和运行工况的改善都存在各自的极限, 因此将其与燃油理化性质的优化适当地结合, 可以更好地改善生物柴油的雾化质量。

参考文献:

- [1] NEJAD A S, ZAHEDI A R. Optimization of biodiesel production as a clean fuel for thermal power plants using renewable energy source [J]. *Renewable Energy*, 2018, 119: 365-374.
- [2] NONGBE M C, EKO T, EKO L, et al. Biodiesel production from palm oil using sulfonated graphene catalyst [J]. *Renewable Energy*, 2017, 106: 135-141.
- [3] MARDHIAH H H, ONG H C, MASJUKI H H, et al. A review on latest developments and future prospects of heterogeneous catalyst in biodiesel production from non-edible oils [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 1225-1236.
- [4] RAJA N N. Analysis of performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with different types of biodiesel: a review study [J]. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 2014, 3(5): 389-393.
- [5] HYUNKYU S, CHANGSIK L. A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 1601-1620.
- [6] KALAM M A, MASJUKI H H. Biodiesel from palm oil: an analysis of its properties and potential [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2002, 23(6): 471-479.
- [7] HE B Q. Advances in emission characteristics of diesel engines using different biodiesel fuels [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 570-586.
- [8] CHEIKH K, SARY A, KHALED L, et al. Experimental assessment of performance and emissions maps

- for biodiesel fueled compression ignition engine [J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 320-329.
- [9] SUBRAMANIAN K A, LAHANE S. Comparative evaluations of injection and spray characteristics of a diesel engine using karanja biodiesel-diesel blends [J]. *International Journal of Energy Research*, 2013, 37 (6): 582-597.
- [10] JIA T M, YU Y S, LI G X. Experimental investigation of effects of super high injection pressure on diesel spray and induced shock waves characteristics [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 85: 399-408.
- [11] 杨康康, 李昕昕, 李俊鸽, 等. 醇类-生物柴油混合燃料喷雾特性的试验 [J]. *内燃机学报*, 2016, 34(3): 260-267.
- YANG Kangkang, LI Xinxin, LI Junge, et al. Experiment on spray characteristics of alcohol and biodiesel blends [J]. *Transactions of CSICE*, 2016, 34 (3): 260-267.
- [12] 周磊, 徐春龙, 韩君, 等. 柴油机高压及微孔径下燃油雾化特性的数值研究: I 模型参数的选取 [J]. *车用发动机*, 2011(5): 6-11.
- ZHOU Lei, XU Chunlong, HAN Jun, et al. Numerical study on fuel spray characteristic for diesel engine under high pressure and micro-hole: I Selection of model parameters [J]. *Vehicle Engine*, 2011(5): 6-11.
- [13] WANG Z, JIANG C, XU H, et al. Macroscopic and microscopic characterization of diesel spray under room temperature and low temperature with split injection [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 142: 71-85.
- [14] 郭恒杰, 李雁飞, 徐宏明, 等. 基于三维 PDPA 的旋流式 GDI 喷油器喷雾特性 [J]. *内燃机学报*, 2015 (4): 335-341.
- GUO Hengjie, LI Yanfei, XU Hongming, et al. Spray characteristics of swirl-type GDI injector using 3D-PDPA [J]. *Transactions of CSICE*, 2015(4): 335-341.
- [15] DENG W, ZHANG X, WANG H, et al. Dispersion characteristics of biodiesel spray droplets in top-blown injection smelting process [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2018, 126: 168-177.
- [16] 叶丽华, 刘天宇, 施爱平. 适宜溶气量改善生物柴油/柴油混合燃油雾化质量 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (6): 222-228.
- YE Lihua, LIU Tianyu, SHI Aiping. Suitable dissolved gas improving atomization quality of biodiesel/diesel mixed fuel [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 222-228.
- [17] SUH H K, LEE C S. A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 1601-1620.
- [18] CHEN S K, LEFEBVRE A H, ROLLBUHLER J. Influence of ambient air pressure on effervescent atomization [J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2015, 9 (1): 10-15.
- [19] AGARWAL A K, DHAR A, GUPTA J G, et al. Effect of fuel injection pressure and injection timing on spray characteristics and particulate size-number distribution in a biodiesel fuelled common rail direct injection diesel engine [J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 212-221.
- [20] ZHUANG Z, KUANG J, YONG X J, et al. Effect of liquid-phase pore diameters on atomization performance of spraying nozzles in MTP reactor [J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2016, 41(6): 78-83.
- [21] SHAN C, WEI Y, ZHANG Y, et al. Grey correlation degree analysis on main traits of soybean varieties in Heilongjiang Province [J]. *Soybean Science*, 2009, 28 (5): 945-948.
- [22] WANG K, REN S, QIAN S, et al. Grey relational analysis of benefit of surgical management for abdominal aortic aneurysm [J]. *International Surgery*, 2014, 99(2): 189-194.
- [23] LIN S M. Associating DEA with grey relational analysis for performance assessment of management competencies in logistic industry [J]. *Journal of Statistics and Management Systems*, 2010, 13(5): 1117-1130.
- [24] COSKON H, PEKKAYA M. Determining of stock investments with grey relational analysis [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(8): 9186-9195.
- [25] 李闯. 基于无量纲化的缸盖结构参数多目标等权敏感性分析 [D]. 太原: 中北大学, 2017: 46-51.

(编辑 荆树蓉)