

生物柴油光学常数的双光程法实验测量

王程超^{1,2} 李兴灿² 谭建宇¹ 刘林华^{1,2*}

¹哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 山东 威海 264209

²哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 生物柴油光学常数在其成分的定量定性分析、与柴油的混合水平判断以及辐射吸热机理研究等方面具有重要应用。基于射线迹法推导得到光学玻璃-生物柴油-光学玻璃三层平板结构的双光程法透射率模型, 实验测量了300~2500 nm波段内生物柴油光学常数随温度的变化规律。实验结果表明, 在20℃~60℃温度范围内, 生物柴油折射率随温度的升高而线性减小, 吸收指数受温度影响较弱; 吸收光谱在1200、1390、1750、2150和2300 nm处出现明显的吸收峰, 其形成原因主要为C—H键的倍频以及各原子团伸缩振动的和频作用; 生物柴油吸收峰与普通植物油吸收峰的峰值位置基本相同, 但数值大小有所区别。

关键词 光谱学; 光学常数; 双光程法; 生物柴油; 反演模型

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.051206

Experimental Measurement of Optical Constant of Biodiesel by Double Optical Pathlength Transmission Method

Wang Chengchao^{1,2} Li Xingcan² Tan Jianyu¹ Liu Linhua^{1,2}

¹School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

²School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The optical constant of biodiesel plays an important role in quantitatively and qualitatively analyzing its individual constituent, judging the mixed level with diesel fuel, and studying the intrinsic mechanism of radiation transfer. Transmittance model of the three-layer-plate structure (optical glass - biodiesel - optical glass) is derived based on the ray trace method. Experimental measurement by double optical pathlength transmission method is conducted to study the temperature dependence of optical constant of biodiesel in the spectral range from 300 nm to 2500 nm. The results show that the refractive index of biodiesel decreases linearly with temperature increasing from 20℃ to 60℃, but the absorption index is less affected. Moreover, five main absorption peaks of biodiesel are observed at 1200, 1390, 1750, 2150 and 2300 nm, which are due to overtones and combinations of C—H stretching vibration of various chemical groups. Compared with ordinary vegetable oil, absorption peaks of the biodiesel exhibit the same locations but different amplitudes.

Key words spectroscopy; optical constant; double optical pathlength transmission method; biodiesel; inverse model

OCIS codes 120.4530; 300.6340; 300.6540; 300.6550

1 引言

随着人类能源需求的日益增加, 世界能源危机和环境问题日渐突出, 液态燃油等能源的匮乏已成为本世纪中叶即将面临的巨大挑战, 因此获取清洁的可再生能源势在必行。生物柴油作为一种生物质能源, 以餐饮废油、油料作物、微藻等水生微生物油脂以及动物油脂为原料油, 与甲醇等醇类经酯交换反应获得。生物柴油

收稿日期: 2014-12-04; 收到修改稿日期: 2014-12-31; 网络出版日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(51336002)、创新研究群体科学基金(IRT0914)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0152)

作者简介: 王程超(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事液体热物性的实验测量及第一性原理计算等方面的研究。

E-mail: 14B902026@hit.edu.cn

导师简介: 谭建宇(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计算辐射学、航天器热控制等方面的研究。

E-mail: tanjianyu@hitwh.edu.cn

*通信联系人。E-mail: lhliu@hit.edu.cn

以其易生物降解、环保清洁且可以直接应用于现有柴油发动机等优点,成为一种良好的液态燃油替代物。

生物柴油在紫外、可见光及红外光谱区间属于具有光谱选择性的半透明介质。对生物柴油近红外波段吸收特性的研究^[1]多用于生物柴油成分的定量和定性分析,以在生产制备过程中及时准确地测定脂肪酸单甘酯、二甘酯等中间产物和副产物甘油的含量,保证生物柴油的产率及品质;此研究还可用于判断生物柴油与普通柴油的混合水平^[2],以确保机用混合柴油符合国家规范及混合标准。生物柴油的吸收系数、介电函数和反射率等辐射物理性质参数是其光学常数的函数,可由光学常数间接得到。生物柴油光学常数是柴油燃烧室内液滴蒸发、雾化和燃烧过程的分析模拟,也是生物柴油燃烧机制研究必不可少的基础参数。

目前,获得物质光学常数的方法主要为理论计算和实验测量。理论计算方法包括经典分子动力学模拟和第一性原理计算^[3]。该方法对于晶格结构相对确定的固体的光学常数研究具有很大优势,而对于分子间相互作用较为复杂的液体而言,实现较为困难。液体光学常数主要通过实验测量的方式获得,测量液体光学常数的方法包括衰减全反射(ATR)方法、透射比与Kramers-Kronig(KK)关系结合法^[4-5]、双光程法、椭圆法^[6]及其他方法^[7-8]。自1985年以来,Bertie课题组^[9]应用环形ATR装置测量了液苯、甲苯及水等液体的吸收光谱,采用EXPABS2K程序计算吸收指数 κ 值,进而应用KK关系反推得到折射率 n 值。联立KK色散关系式求解反问题模型,该方法目前应用广泛,但求解过程较为繁琐,并且只适用于波段较宽、吸收较强的情况。双光程法测量原理简单,通过联立两种不同光学路径长度的透射率方程,反演得到液体光学常数。双光程法所采用的三层平板结构透射率模型基于射线踪迹法推导得到,是一种区别于以往透射率方程的全新模型。对于液体吸收较弱的紫外、可见光及近红外波段(计算得到此波段生物柴油吸收系数 $\alpha < 30 \text{ cm}^{-1}$)的研究,该方法有很大优势。虽然国内外学者在液体光学常数实验测量方面取得了显著成果^[4-9],但对生物柴油光学性质及其温度依赖性的研究却很少开展。

本文采用双光程法研究生物柴油光学特性随波长及温度的变化规律。以两种不同光学路径长度(即生物柴油厚度)测得的透射光谱为基础数据,反演计算在300~2500 nm波长区间以及三种不同温度(20 °C, 40 °C和60 °C)条件下生物柴油的光学常数分布,分析折射率和吸收指数随温度的变化规律,并与植物油及文献中普通柴油的吸收特性进行比对分析。

2 实验方法

2.1 双光程法

图1为双光程法的测量原理图。第一层和第三层为厚度为 $L_1=L_3=1.2 \text{ mm}$ 的二氧化硅光学玻璃,第二层为厚度为 L_2 的生物柴油。平行光垂直入射到光学玻璃1的左侧面,光束通过光学玻璃-生物柴油-光学玻璃的三层平板结构最终进入探测器。根据菲涅耳定律,两层介质 i 和 $j(i, j=0, 1, 2, 3)$ 之间的界面反射率为

$$r_{ij} = \frac{(n_j - n_i)^2 + (\kappa_j - \kappa_i)^2}{(n_j + n_i)^2 + (\kappa_j + \kappa_i)^2}, \quad (1)$$

式中 n_i 和 κ_i 是介质 i 的光学常数,吸收系数 $\alpha_i = 4\pi\kappa_i/\lambda$,界面透射率 $t_{ij} = 1 - r_{ij}$ 。考虑该三层平板系统内界面间的多次反射效应^[10],基于射线踪迹法推导得到系统总透射率为

$$T_\lambda = \frac{I_2}{I_0} = \left[\frac{t_{01}t_{12} \exp(-\alpha_1 L_1)}{1 - r_{10}r_{12} \exp(-2\alpha_1 L_1)} \right] \left[\frac{t_{23}t_{30} \exp(-\alpha_3 L_3)}{1 - r_{32}r_{30} \exp(-2\alpha_3 L_3)} \right] \exp(-\alpha_2 L_2) \times \left\{ 1 - \left[r_{23} + \frac{t_{23}t_{32}r_{30} \exp(-2\alpha_3 L_3)}{1 - r_{32}r_{30} \exp(-2\alpha_3 L_3)} \right] \left[r_{21} + \frac{t_{21}t_{12}r_{10} \exp(-2\alpha_1 L_1)}{1 - r_{12}r_{10} \exp(-2\alpha_1 L_1)} \right] \exp(-2\alpha_2 L_2) \right\}^{-1}. \quad (2)$$

根据(2)式,系统总透射率 T_λ 是光学玻璃与生物柴油光学常数和厚度的函数:

$$T_\lambda = f(n_1, n_2, n_3; \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3; L_1, L_2, L_3), \quad (3)$$

式中各层厚度 L_1, L_2, L_3 ,以及光学玻璃的光学常数均已知,透射率由椭圆仪测量得到,因此(3)式中只有生物柴油光学常数 n_2, κ_2 两个未知数。测量两种不同生物柴油厚度 L_2 和 L'_2 情况的系统透射率,联立即可求得给定波长下的 n_2 和 κ_2 。生物柴油的光学常数采用粒子群算法(PSO)进行优化,目标函数定义如下:

$$f_\lambda = (T_\lambda - T_{\lambda, \text{EXP}})^2 + (T'_\lambda - T'_{\lambda, \text{EXP}})^2, \quad (4)$$

式中 T_λ 和 T'_λ 表示两个不同厚度 L_2 和 L'_2 、波长 λ 时计算所得透射率, $T_{\lambda, \text{EXP}}$ 和 $T'_{\lambda, \text{EXP}}$ 是对应的实验测量值,收

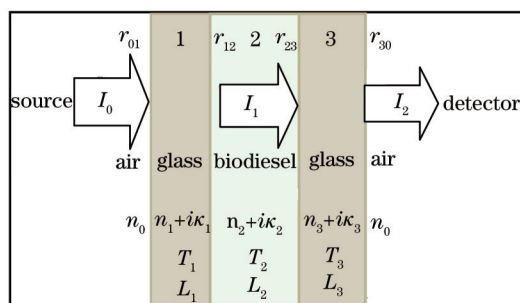


图1 双光程法原理图

Fig.1 Schematic diagram of double optical pathlength transmission method

敛标准设为 $f_t < 10^{-6}$ 。

2.2 实验测量

实验中使用椭偏仪的光源和探测器(V-VASE椭偏仪, J. A. Woollam公司, 美国)进行生物柴油光学常数的双光程法测量。实验设备如图2所示。不同于以往的椭偏方法和双光程法, 生物柴油透射光谱为椭偏仪氙光源和HS-190单色仪产生的单色光, 透过光学玻璃-生物柴油-光学玻璃的三层平板结构, 由硅和钢砷化镓(InGaAs)探测器探测得到; 透射率模型基于射线踪迹法直接推导得到, 考虑了界面间的多次反射效应。实验用生物柴油由重庆捷焜科技发展有限公司提供, 为地沟油生产得到, 具体检测参数如表1所示。表1数据显示, 110 °C时生物柴油的氧化安定时间为1.6 h, 闪点为137.5 °C, 说明生物柴油高温易老化。实验中生物柴油的最高测量温度是60 °C, 温度间隔取为20 °C, 透射光谱波长分辨率为10 nm。

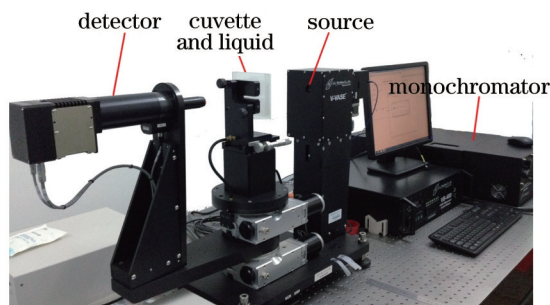


图2 实验测量设备布置图

Fig.2 Experimental setup of measuring equipment

由于生物柴油在紫外、可见光和近红外波段吸收强度差距较大, 选取合适厚度的比色皿可获得更为有效的系统透射率, 将有助于提高双光程法的计算精度。对生物柴油厚度作如下选择: 300~1000 nm 光谱区间, 厚度选择 $L_2=2$ cm 和 $L'_2=5$ cm; 对于1000~2500 nm 的近红外波段, 厚度选择 $L_2=3$ mm 和 $L'_2=5$ mm。

表1 生物柴油基本参数

Table 1 Basic parameters of biodiesel

	Unit	Result
Density at 20 °C	kg /m ³	880.0
Moisture	% (mass fraction)	0.031
Acid value	mg KOH /g	0.77
90% distilled temperature	°C	342.9
Flash point	°C	137.5
Cold filter plugging point	°C	2
Oxidation stability at 110 °C	h	1.6
Cetane number		52.6

2.3 实验误差分析

为准确评估实验测量误差, 每组数据均进行三次测量, 测量误差 ΔT_λ 由椭偏仪直接给出, 三组透射光谱的平均值记为 $T_{\lambda, \text{EXP}}$ 。生物柴油光学常数是系统总透射率(测量误差 $\Delta T_{\lambda, \text{EXP}}$ 和 $\Delta T'_{\lambda, \text{EXP}}$)、光学玻璃光学常数

(误差分别为 $\Delta n_{1,\lambda}$, $\Delta n_{3,\lambda}$; $\Delta \kappa_{1,\lambda}$, $\Delta \kappa_{3,\lambda}$)以及光学玻璃和生物柴油厚度(测量误差 $\Delta L_{1-3} = 0.1 \text{ mm}$)的函数:

$$n_{2,\lambda} = f_1(n_{1,\lambda}, n_{3,\lambda}; \kappa_{1,\lambda}, \kappa_{2,\lambda}, \kappa_{3,\lambda}; L_1, L_2, L_2', L_3; T_{\lambda, \text{EXP}}, T'_{\lambda, \text{EXP}}), \quad (5)$$

$$\kappa_{2,\lambda} = f_2(n_{1,\lambda}, n_{2,\lambda}, n_{3,\lambda}; \kappa_{1,\lambda}, \kappa_{3,\lambda}; L_1, L_2, L_2', L_3; T_{\lambda, \text{EXP}}, T'_{\lambda, \text{EXP}}). \quad (6)$$

采用基于微积分近似理论的误差分析方法^[11]对生物柴油光学常数的计算误差进行分析,折射率 $n_{2,\lambda}$ 的误差值 $\Delta n_{2,\lambda}$ 由(7)式计算得到,偏导数采用具有二阶精度的中心差格式进行简化计算:

$$(\Delta n_{2,\lambda})^2 = \sum_i \left(\frac{\partial n_{2,\lambda}}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right)^2, \quad (7)$$

$$\frac{\partial n_{2,\lambda}}{\partial x_i} \approx \frac{n_{2,\lambda}(x_i + \delta x_i) - n_{2,\lambda}(x_i - \delta x_i)}{2\delta x_i}, \quad (8)$$

式中 x_i 遍历(5)式右侧所有的因变量。吸收指数 $\kappa_{2,\lambda}$ 的误差求解方法与折射率相同,计算得到误差值将在结果图中标出。

3 结果与讨论

应用V-VASE椭圆偏振仪进行生物柴油光学常数的研究,测量得到图1所示三层平板系统在20℃、40℃和60℃三个不同温度时的透射率。测量结果显示,300~1000 nm波段内透射率随温度升高而降低,但在1000~2500 nm的近红外波段则无太大变化,说明在20℃~60℃的温度范围内,温度对可见光波段的透射率影响较大,对近红外波段影响较小。

3.1 折射率

观察(1)、(2)式发现,由于所研究波段范围内光学玻璃和生物柴油的吸收指数均在 10^{-3} 量级以下,界面反射率 r_{ij} 和透射率 t_{ij} 主要受折射率 n_i ($i=0,1,2,3$) 影响。吸收指数 κ_i 对透射率的影响体现于 $\exp(-\alpha_i L_i)$ 中。多次计算结果表明,吸收指数主要受系统总透射率的影响,对光学玻璃折射率的反应灵敏度很小,而生物柴油折射率对光学玻璃折射率的选值则异常敏感。

图3为不同温度时生物柴油折射率随波长的变化曲线,随着波长增大,折射率相应减小。图4为590、1500和2100 nm波长下生物柴油折射率随温度的变化曲线,根据文献[12]中40℃、590 nm的生物柴油折射率与求解透射方程组得到的折射率进行对比,说明生物柴油折射率的计算结果基本可靠。在20℃~60℃的温度范围内,折射率随温度升高呈减小趋势,并大致满足线性关系式 $n(\lambda, T) = -3.67 \times 10^{-4} T + n(\lambda, 20^\circ \text{C})$ 。

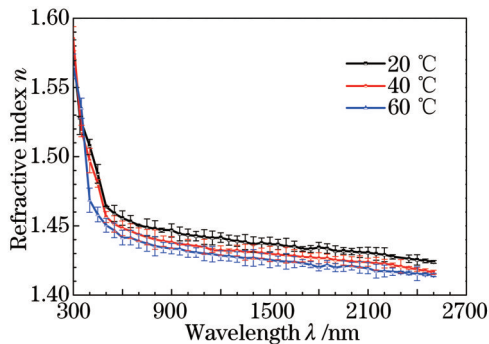


图3 20℃、40℃和60℃时生物柴油折射率随波长的变化

Fig.3 Refractive index of biodiesel as a function of wavelength at 20℃, 40℃ and 60℃

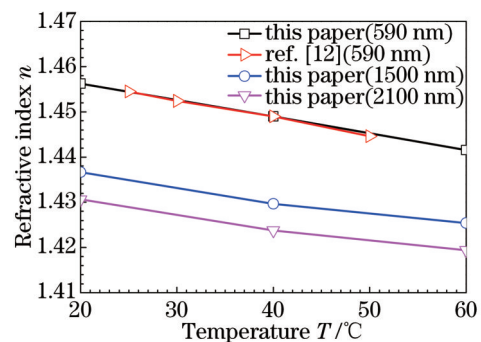


图4 590、1500和2100 nm波长时生物柴油折射率随温度的变化

Fig.4 Refractive index of biodiesel as a function of temperature at the wavelength of 590, 1500 and 2100 nm

3.2 吸收指数

生物柴油通常是由植物油及餐饮废油中的脂肪酸甲酯和甲醇等醇类进行酯交换反应制备得到,反应方程式如图5所示,式中 $\text{CH}_3\text{—O—CO—R}_{1-3}$ 为生物柴油基本分子式, R_{1-3} 为 C14~C18(包括0~3个双键),表示各种不同类型的脂肪酸。由分子式可知,生物柴油中主要包括甲基— CH_3 —,亚甲基— CH_2 —,羧基— O—CO— —和乙炔基— CH=CH— —等官能团,且红外波段的吸收峰值主要表征各官能团内化学键的倍频和和频振动。

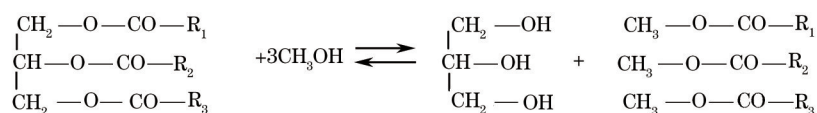


图5 生物柴油酯交换反应

Fig.5 Ester exchange reaction scheme for biodiesel production

图6为不同温度下生物柴油吸收指数随波长的变化曲线。整体看来,吸收强度向长波方向呈增加趋势,符合近红外吸收光谱的一般规律。如图6所示,对于300~500 nm的紫外-可见光波段和1700~2500 nm的近红外波段,研究范围内温度对生物柴油吸收指数的影响不明显。500~1700 nm波段的吸收谷值存在一定差异,1100 nm前后各温度吸收曲线发生交叉;1200~1700 nm波段内,随温度升高,由于热膨胀等效应,生物柴油密度减小,吸收指数相应减小;而对于500~1000 nm的波段,温度升高时吸收指数增大。

生物柴油在300~2500 nm波段内主要包括5个吸收峰:1200、1390、1750、2150和2300 nm。1200 nm左右的吸收峰表征甲基中C—H键的二级倍频伸缩振动;1390 nm左右的吸收峰为亚甲基中C—H键的伸缩振动与C—H键弯曲振动模式的和频峰,同Fernaneds等^[13]给出的1208 nm和1391 nm结果吻合良好;1750 nm的吸收峰主要由甲基和亚甲基官能团中C—H键的一级倍频伸缩振动导致;表示乙炔基内C—H键的伸缩振动同C=O键伸缩振动的联合作用的吸收峰峰值在2150 nm左右;2300 nm的吸收峰则表征甲基和亚甲基官能团内C—H键的伸缩振动同其他振动模式的和频峰^[1]。由此可知,该波段内所有的吸收峰值均为C—H键的倍频以及各原子团伸缩振动的和频作用所致。

对生物柴油吸收特性的研究多用于生物柴油成分的定量定性分析,以在生产制备过程中及时准确地确定酯交换反应是否进行完全,保证生物柴油的产率及品质。图7为生物柴油同大豆油吸收指数的对照图,由于分子中含有的基本官能团相同,二者在300~2500 nm波段内的吸收峰位置基本相同,个别峰的吸收强度存在差异。如图7中插图所示,表征甲基和亚甲基内C—H键的伸缩振动同其他振动模式的和频峰处(2300 nm),生物柴油吸收峰明显高于大豆油;而表征乙炔基C—H键的伸缩振动同其他振动模式联合作用的吸收峰(1750 nm)则略小于大豆油,此区别在判断生物柴油制备过程中是否反应完全和生物柴油品质方面具有重要应用。

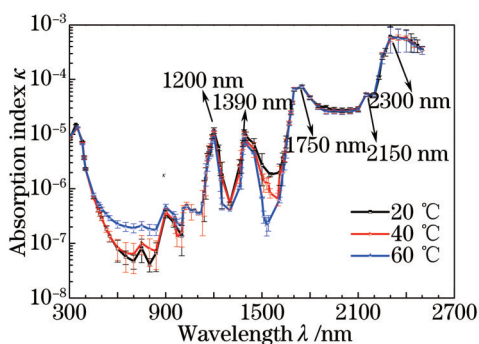


图6 20 °C、40 °C和60 °C时生物柴油吸收指数对照

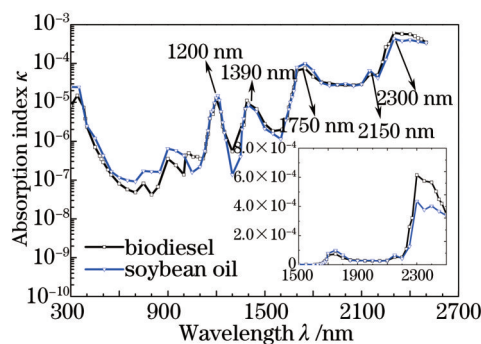
Fig.6 Comparison of absorption index κ of biodiesel at 20 °C, 40 °C and 60 °C

图7 20 °C时生物柴油同大豆油吸收指数对照

Fig.7 Comparison of absorption index κ of biodiesel and soybean oil at 20 °C

面具有重要应用。

由于生物柴油存在低温流动性较差、溶解性强(直接使用可能引起加油站系统或发动机供油系统某些橡胶件发生溶胀)等缺点,目前生物柴油多与普通柴油混配使用。混合油的吸收系数常被用于判断生物柴油同普通柴油的混合水平,以确保机用混合柴油符合国家规范及混合标准。图8为生物柴油、Zawadzki等^[14-16]应用光谱分光计测量得到的以植物废油为原料的生物柴油和普通柴油的可见光吸收系数,以及普通柴油近红外吸收系数的对照,说明双光程法反演模型计算得到的生物柴油吸收系数的可信度较高。可见光及近红外波段生物柴油的吸收系数高于普通柴油,这种区别为生物柴油和普通柴油以不同比例混合时混合物吸收系数和混合比例的分析提供了依据。

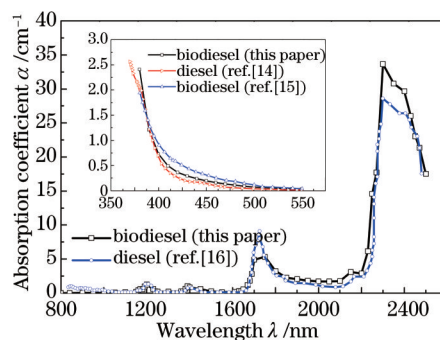


图8 可见光及近红外波段生物柴油吸收系数同文献结果对照

Fig.8 Comparison of the absorption coefficient of biodiesel and the results obtained in the references within the visible and near-infrared spectral range

4 结 论

利用双光程法测量了温度区间 20 °C~60 °C, 波长范围 300~2500 nm 内生物柴油在两种不同光学路径长度的透射光谱, 应用界面间多次反射的光学常数反演模型及 PSO 算法求解得到生物柴油的光学常数, 得到以下结论:

1) 所研究波段内生物柴油折射率随着温度的升高而线性减小, 吸收指数受温度影响较小, 吸收强度向长波方向呈增加趋势;

2) 1200~1700 nm 波段内, 随温度升高吸收指数相应减小; 而在 500 ~ 1000 nm 波段内, 吸收指数随温度升高略有增大; 所有的吸收峰均为 C—H 键的倍频以及各原子团(甲基、亚甲基和乙炔基)伸缩振动的和频作用所致;

3) 将生物柴油吸收指数同普通植物油对照, 吸收峰位置基本相同, 位置在 2300 nm 左右的吸收峰明显高于植物油; 对照文献中普通柴油的吸收系数发现, 可见光及近红外波段生物柴油的吸收系数高于普通柴油, 这种区别对柴油和生物柴油以不同比例混合时混合物吸收系数和混合比例的分析具有重要作用。

参 考 文 献

- 1 Kong Cuiping, Chu Xiaoli, Du Zexue, *et al.*. Prediction of main chemical compositions in biodiesel by near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2010, 38(6): 805-810.
孔翠萍, 褚小立, 杜泽学, 等. 近红外光谱方法预测生物柴油主要成分[J]. 分析化学, 2010, 38(6): 805-810.
- 2 Pontes M J, Pereira C F, Pimentel M F, *et al.*. Screening analysis to detect adulteration in diesel/biodiesel blends using near infrared spectrometry and multivariate classification[J]. Talanta, 2011, 85(4): 2159-2165.
- 3 Zhang Chunhong, Zhang Zhongzheng, Deng Yongrong, *et al.*. First principle study on electronic structure and optical properties of b-FeSi₂ with doping rare earth (Y, Ce)[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0116001.
张春红, 张忠政, 邓永荣, 等. 稀土(Y、Ce)掺杂 b-FeSi₂ 光电性质的第一性原理研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0116001.
- 4 Keefe C D, Gillis E A. Temperature dependence of the optical properties of liquid benzene in the infrared between 25 °C and 50 °C[J]. Spectrochimica Acta, Part A, 2008, 70(3): 500-509.
- 5 Zhai Congcong, Han Xueyun, Peng Yufeng, *et al.*. Research on light transmission characteristics of some inorganic salts in seawater[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 010101.
翟聪聪, 韩雪云, 彭玉峰, 等. 海水中不同盐分水溶液对光的透射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 010101.
- 6 Liu Jia, Huang Haiqing, Bai Yan, *et al.*. Influence of liner polarization light on the measurement of water absorption coefficient[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0601003.
刘 佳, 黄海清, 白 雁, 等. 不同线偏振光对水体吸收系数测量的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0601003.
- 7 Luo Wenquan, Feng Guoying, Du Yongzhao. Refraction index measurement of transparent liquid by single-element interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508005.
罗文全, 冯国英, 杜永兆. 基于分光棱镜干涉法测量透明液体折射率[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508005.
- 8 Li Nan, Chen Qifeng, Li Yusong, *et al.*. Experimental investigation of seawater refractive index based on shading effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121202.

- 李楠, 陈琦峰, 李玉松, 等. 基于遮光效应的海水折射率测量实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121202.
- 9 Bertie J E, Apelblat Y, Keefe C D. Infrared intensities of liquids XXV: Dielectric constants, molar polarizabilities and integrated intensities of liquid toluene at 258 °C between 4800 and 400 cm^{-1} [J]. J Mol Struct, 2005, 750: 78-93.
- 10 Zhang Z M. Nano Microscale Heat Transfer[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2007: 334-335.
- 11 Hughes I G, Hase T P A. Measurements and Their Uncertainties: A Practical Guide to Modern Error Analysis[M]. Cambridge: Oxford University Press, 2010: 37-44.
- 12 Geacai S, Nita I, Iulion O, *et al.*. Refractive indices for biodiesel mixtures[J]. UPB Sci Bull, Series B, 2012, 74(4): 149-160.
- 13 Fernandes D D S, Gomes A A, da Costa G B, *et al.*. Determination of biodiesel content in biodiesel/diesel blends using NIR and visible spectroscopy with variable selection[J]. Talanta, 2011, 87: 30-34.
- 14 Zawadzki A, Shrestha D, He B. Use of a spectrophotometer for biodiesel quality sensing[C]. 2005 ASAE Annual International Meeting, Tampa, 2005: 053133.
- 15 Zawadzki A, Shrestha D S. Biodiesel feedstock and blend level sensing using visible light spectra and neural network[J]. Trans Abase, 2009, 52(2): 539-542.
- 16 de Lira L F B, de Vasconcelos F V C, Pereira C F, *et al.*. Prediction of properties of diesel/biodiesel blends by infrared spectroscopy and multivariate calibration[J]. Fuel, 2010, 89(2): 405-409.

栏目编辑: 吴秀娟