

超声乳化生物油/柴油稳定性的响应面模型与影响因素分析

魏晓莉¹, 沈维政¹, 王述洋², 谭文英², 张爱静¹

(1. 东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北林业大学生物质能技术工程中心, 哈尔滨 150040)

摘 要: 针对生物油替代石化燃油在理化特性及稳定性上的缺陷, 提出超声乳化制取生物油/柴油混合燃油的方法, 采用4因素5水平的通用组合设计与响应面分析方法, 研究超声频率、声功率密度、超声时间和超声激励波形对混合燃油稳定性的影响, 并以浊度值、油珠粒径及析油时间为响应值分别建立二次回归模型, 模型揭示出超声因素对各响应值影响的因子贡献率, 及超声时间、超声频率、声功率密度之间的交互作用对响应面模型的显著性影响关系, 模型决定系数分别为90.39%、90.72%、92.79%, 相对误差分别小于12%、10%、14%。因此, 合理匹配超声参数有利于增加生物油/柴油的乳化效果及稳定性。

关键词: 超声乳化; 稳定性模型; 因素分析; 生物油/柴油

中图分类号: TK6

文献标识码: A

0 引 言

以农林废弃生物质为原料制取生物油具有公认的可再生性^[1], 但与石化燃油相比, 具有低热值、高含氧量、不稳定等缺陷^[2,3], 致使生物油品质低, 难以直接推广应用。虽然可通过催化加氢等精制手段制成燃料油级产品, 但催化精制反应条件苛刻、生产成本低^[4,5]。因此, 从经济和技术角度看, 生物油催化精制的工业应用存在一定困难, 但利用超声空化效应并在乳化剂的配合下将生物油、柴油按一定比例混合乳化, 制成清洁环保的混合燃油(生物油/柴油), 不但有助于提高燃料热值^[6]、改善理化特性, 还能显著改善其稳定性, 并能直接应用于未经改装或稍加改装的普通柴油机上。这使其替代石化燃油在短期内成为可能, 乳化很可能是裂解生物油进入市场的一个有效辅助手段^[2,7]。

超声波作为驱动生物油乳化的外加能量, 对于不同的反应体系一定存在最优的超声反应参数, 但现有研究多集中在乳化剂的选择方面, 对超声因素的考虑局限且存在盲从性^[8-11], 并存在超声作用强度

表征不一、优化结果差异甚远的现象, 更缺乏影响乳化效果的多因素多指标的相关分析。本文在前期乳化体系研究的基础上, 利用自行研制的用于超声参数优化的实验装置, 研究超声频率、声功率密度、超声激励波形、超声时间对乳化油稳定性的影响规律, 并建立多目标值的响应面模型, 以期对超声乳化装置的设计与工作参数选择提供依据。

1 实 验

1.1 实验原料与试剂

实验用生物油是以稻壳、玉米秸秆等农林废弃生物质为原料经高温热解制取的; 柴油市售。实验原料特性如表1所示。

依据研究室前期对生物油/柴油的乳化体系研究发现^[2], 亲水-亲油平衡值 $HLB=5$ 时, 取乳化剂失水山梨醇单油酸酯(Span80)和聚氧乙烯失水山梨醇单油酸酯(Tween80)复配时碳氢分子链相互吸附能力强, 有利于提高乳化稳定性; 以混合醇(甲醇+辛醇)为助乳剂, 用于增强反应过程活性及确保反应

收稿日期: 2016-12-22

基金项目: 中国博士后科学基金(2017M611346); 黑龙江省科学基金(C2018018)

通信作者: 沈维政(1977—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事新能源与环境工程方面的研究。18088785427@sina.cn

表 1 实验原料		
Table 1 Experimental materials		
参数	生物油	柴油
运动粘度(40 ℃)/mm ² ·s ⁻¹	6.45	2.90
闪点/℃	94.0	86.5
密度/g·mL ⁻¹	1.12	0.85
pH值	3.60	6.84
含水率/%	13.00	0.35
[C]/%,wt	54.96	85.62
[H]/%,wt	7.60	13.11
[O]/%,wt	37.23	—
[N]/%,wt	0.15	—

体系均相能力;生物油掺入量过小,起不到降低成本,节能环保的作用;掺量过大,影响混合燃油的稳定性并破坏其燃烧性能,掺入体积比在 10%~30% 范围内,乳化油稳定性相对较好。因此,本实验将超声乳化生物油/柴油的乳化体系设定为:在生物油掺入体积分数小于 30% 的情况下,复配乳化剂 Span80 和 Tween80,且 $HLB=5$,取乳化剂体积分数为 5%,混合醇作为助乳剂取体积分数为生物油体积的 20%,乳化温度为 30 ℃。

主要实验试剂为天津市光复精细化工研究所生产的 Span80($HLB=4.3$)、Tween80($HLB=15$)和哈尔滨市新达化工厂生产的甲醇、辛醇。

1.2 实验仪器

生物油的乳化过程除靠乳化体系来减小表面张力、降低 Laplace 压力、辅助缔合形成界面膜从而增加界面粘度及稳定效果外,还需足够的外加能量来促进乳化形成,提高乳化质量,而液体超声处理所产生的空化效应和界面不稳定性能促进乳化反应的发生。Adewale 等^[12,13]利用动力学模型对影响超声乳化的主要因素进行了探讨。本研究在此基础上,结合乳化气泡运动轨迹特征分析,提取出影响乳化的主要超声因素(超声频率、超声作用强度、超声激励波形和超声时间),并以此为设计依据,设计用于超声参数优化的实验设备——可控参数超声乳化反应仪。实验过程中通过在乳化液中放置水听器(杭州应用声学研究所 RHS-5 标准水听器)接收乳化液中的声信号,经声电转换输至示波器(西化仪科技有限公司 YT15-TDS1002B 型示波器),

以实现超声频率、波形和声压的检测;采用显微镜 DM4000M(德国莱克)、SHZ-D(Ⅲ)型循环水式真空泵(巩义市予华仪器有限公司)、752 型紫外可见分光光度计(上海精密仪器有限公司)、SY-2 型石油密度计(上海医联控温仪器厂)、SYD-265D 型运动粘度测定器(上海恒勤仪器设备)完成乳化油理化特性及稳定性分析测定。

1.3 实验工艺

在恒温水浴中按最佳乳化体系方案配置复合乳化剂并将其与柴油按照预定比例混合,同时将助乳剂按预定比例边搅拌边加入到生物油中进行水浴搅拌,然后将混合液倒入乳化仪器内,通过乳化实验对影响空化效应的超声频率、超声作用强度、反应时间、激励波形等参数进行优化研究,利用响应面法探寻适合该反应体系的最优超声参数,及各参数对乳化稳定性影响的响应规律。实验工艺流程如图 1 所示。

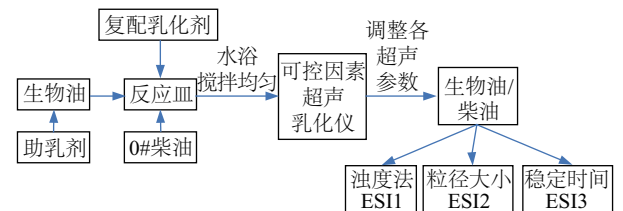


图 1 工艺流程

Fig. 1 Emulsification process

1.4 实验方法

1.4.1 超声检测方法

为探讨各超声因素对乳化油稳定性的响应规律,需在实验过程中对超声频率、超声作用强度、激励波形和超声时间连续调节,以完成超声参数优化实验。超声发生器发出特定频率、功率和波形的电信号,由功率放大器传给超声换能器,超声换能器将电信号转换成功率超声作用于乳化液中,为了检测超声换能器工作状态和转换效率,本文利用水听器接收乳化液中的声信号,经声电转换输至示波器,以实现超声频率、波形和声压的检测,检测原理如图 2 所示,声强 I 可由式(1)计算:

$$I = \frac{U^2}{M^2 \rho c} \quad (1)$$

式中, U ——水听器的开路输出电压, V; M ——水

听器灵敏度; c ——液体中的声速, m/s。

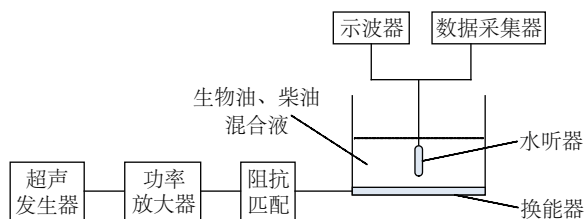


图2 检测原理图

Fig. 2 Detection principle

1.4.2 超声作用强度评定方法

目前,国内外对于生物油超声乳化作用强度评定均用超声功率表示^[7-10],但受超声设备换能器工作特点限制,不同超声设备的能量转换效率各有不同,即使相同的超声输入功率,其真正作用到乳化液内部的辐射声功率也不相同。通常液体超声设备其电声转换效率仅约为40%。除此以外,超声作用对象的体积也是影响超声作用强度的关键因素。因此为准确评估超声作用强度,本文定义声功率密度即容器内单位体积溶液中接收到的辐射声功率的大小,如式(2)所示。

$$\rho_s = \frac{P_a}{V} \quad (2)$$

式中, ρ_s ——声功率密度, W/m^3 ; P_a ——声辐射声功率, W ; V ——超声作用的乳化液体积, m^3 。

声功率密度能体现超声设备和超声作用对象体积这两部分因素对超声作用强度的影响,能更为准确地对超声作用强度进行表述。

1.4.3 乳化稳定性评定方法

目前对于乳化油稳定性的评定方法暂无统一规范,一直以来破乳是用来测定稳定性的一种方法;本文采用浊度法、显微粒径观察法、析油时间3种方法对乳化油稳定性进行综合评定(emulsification stability index, ESI),该方法能克服单一结论的局限性,提高评定乳化油稳定性的准确度。

1.4.4 实验设计

利用单因素实验研究超声频率、声功率密度、超声时间和超声激励波形对乳化油稳定性的影响效能及有效作用区间,经研究发现在同等情况下,超声激励波形为矩形脉冲时乳化效果明显优于正弦波、锯齿波和三角波,超声频率20~60 kHz,声功率密度为2~82 W/L,作用时间 ≤ 15 min时,有利于

乳化反应进行,而各超声因素对乳化稳定性的贡献因子及交互作用影响规律,需进一步利用响应面法优化分析得到,所以本研究通过定义不同占空比的矩形脉冲波,将影响乳化油稳定性的4个超声因素(定义为超声频率、声功率密度、超声时间和矩形脉冲占空比)以及对乳化油稳定性评定的3个指标(浊度值、粒径大小、稳定时间)进行4因素5水平的响应面实验,设计如表2。

表2 响应面实验的因素和水平

Table 2 Factors and levels of design

因素	水平				
	-2	-1	0	1	2
超声频率/kHz	20	30	40	50	60
声功率密度/ $W \cdot L^{-1}$	2	22	42	62	82
超声时间/min	2	5	8	11	14
矩形脉冲占空比	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

1.4.5 数据分析与处理

利用 Design Expert 8.0 软件对实验结果进行实验设计、数据处理与优化分析。

2 结果与分析

2.1 实验方案与结果

根据通用旋转组合进行4因素5水平响应面分析实验方案设计,安排31次实验来进行最佳超声参数优化。表3为响应面实验设计与实验结果。

2.2 响应面法优化分析

利用 Design Expert 8.0 软件对31组实验数据进行分析,通过多元回归拟合分析主要超声因素对混和燃油稳定性的响应规律,并分别建立浊度值、油珠粒径及析油时间与超声频率 X_1 、声功率密度 X_2 、超声时间 X_3 和矩形脉冲占空比 X_4 的二次回归模型 ESI_1 、 ESI_2 、 ESI_3 ,并根据表4回归方程显著性分析可知,稳定性 ESI_1 回归模型项 $P < 0.0001$,说明浊度值与各超声因素回归方程的关系是极其显著的,模型的一次项 X_1 、 X_2 、 X_3 ,交互项 X_1X_3 ,二次项 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 均对 ESI_1 影响显著, X_3^2 对 ESI_1 影响极其显著,保留 $P \leq 0.05$ 的所有对浊度值 ESI_1 的影响项,剔除不显著部分后得到优化的回归方程为式(3),同时,回归模型揭示各超声因素对浊度值的因子贡献率为:超声频率 > 超声时间 > 声功率密度 > 矩形脉冲占空比;

表3 实验设计方案与响应值
Table 3 Experiment design and results

序号	因素			响应值			
	频率/kHz	声功率密度/W·L ⁻¹	超声时间/min	矩形脉冲占空比	浊度值	粒径/μm	析油时间/d
1	-1	-1	-1	-1	62.0	4.60	30
2	1	-1	-1	-1	41.6	5.10	18
3	-1	1	-1	-1	63.0	3.00	39
4	1	1	-1	-1	42.0	3.70	28
5	-1	-1	1	-1	200.0	1.85	33
6	1	-1	1	-1	78.0	3.11	31
7	-1	1	1	-1	210.0	2.65	49
8	1	1	1	-1	114.0	3.52	43
9	-1	-1	-1	1	88.0	4.30	43
10	1	-1	-1	1	61.0	4.68	20
11	-1	1	-1	1	118.0	2.10	56
12	1	1	-1	1	61.0	3.40	24
13	-1	-1	1	1	210.0	3.00	53
14	1	-1	1	1	89.0	3.10	42
15	-1	1	1	1	215.0	2.60	52
16	1	1	1	1	141.0	3.00	48
17	-2	0	0	0	210.0	1.20	55
18	2	0	0	0	78.0	2.11	30
19	0	-2	0	0	17.0	8.05	4
20	0	2	0	0	199.0	3.65	41
21	0	0	-2	0	16.0	9.90	2
22	0	0	2	0	52.0	5.40	30
23	0	0	0	-2	174.0	2.70	47
24	0	0	0	2	210.0	1.30	51
25	0	0	0	0	223.0	1.50	50
26	0	0	0	0	230.2	1.68	55
27	0	0	0	0	210.0	1.65	51
28	0	0	0	0	219.0	1.55	52
29	0	0	0	0	201.0	1.45	52
30	0	0	0	0	208.0	1.40	55
31	0	0	0	0	214.0	1.38	56

将油珠粒径 ESI_2 作为考核指标的回归模型项 $P<0.0001$,说明 ESI_2 与各超声因素回归方程的关系是极其显著的;方程有极高的应用价值;模型一次项 X_2 、 X_3 ,二次项 X_2^2 、 X_3^2 对 ESI_2 影响极其显著,交互项 X_2X_3 影响显著,其余项影响不显著并剔除,模型优化为式(4),回归模型揭示油珠粒径大小主要取决于超声时间和容器内单位体积溶液接收到的辐射声功率的大小;对析油时间 ESI_3 影响极其显著

($P<0.0001$)的因素有 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 ,显著影响的 ESI_3 模型优化后为式(5)。因素为 X_4 ,交互项 X_1X_3 ,其余项影响不显著并剔除,

表4 回归方程显著性分析
Table 4 Significant analysis of regression equation

变量	浊度值(ESI_1)				油珠粒径(ESI_2)				析油时间(ESI_3)			
	平方和 SS	自由度 DF	F值	P值	平方和 SS	自由度 DF	F值	P值	平方和 SS	自由度 DF	F值	P值
模型	153100.00	14	10.750	<0.0001	104.900	14	11.170	<0.0001	6311.42	14	14.700	<0.0001
X_1	20020.91	1	26.370	<0.0001	2.240	1	3.340	0.0864	950.04	1	30.980	<0.0001
X_2	10360.11	1	10.170	0.0057	8.850	1	13.190	0.0022	852.04	1	27.790	<0.0001
X_3	20102.41	1	25.720	0.0001	12.110	1	18.060	0.0006	925.04	1	30.170	<0.0001
X_4	2488.81	1	2.450	0.1374	0.720	1	1.070	0.3163	234.38	1	7.640	0.0138
X_1X_2	112.30	1	0.110	0.7440	0.066	1	0.099	0.7572	1.56	1	0.051	0.8243
X_1X_3	5160.01	1	5.080	0.0386	0.004	1	0.006	0.9401	189.06	1	6.170	0.0245
X_1X_4	24.01	1	0.024	0.8798	0.083	1	0.120	0.7301	95.06	1	3.100	0.0974
X_2X_3	320.41	1	0.310	0.5824	3.230	1	4.820	0.0433	0.56	1	0.018	0.8939
X_2X_4	95.01	1	0.096	0.7603	0.300	1	0.450	0.5133	39.06	1	1.270	0.2757
X_3X_4	276.60	1	0.270	0.6099	0.390	1	0.580	0.4582	7.56	1	0.250	0.6262
X_1^2	10312.72	1	10.140	0.0058	0.420	1	0.620	0.4429	82.44	1	2.690	0.1206
X_2^2	22403.86	1	22.020	0.0002	24.640	1	36.740	<0.0001	1282.86	1	41.840	<0.0001
X_3^2	61805.82	1	60.750	<0.0001	54.320	1	81.000	<0.0001	1980.85	1	64.600	<0.0001
X_4^2	1397.38	1	1.370	0.2584	0.0340	1	0.050	0.8259	0.15	1	0.005	0.9447
顺差	16277.90	16			10.730	16			490.58	16		
拟合	15695.87	10	16.180	0.0014	10.650	10	77.370	<0.0001	458.58	10	8.600	0.0080
错误	582.03	6			0.083	6			32.00	6		<0.0001
总和	169400.00	30			115.630	30			6802.00	30		<0.0001

$$ESI_1 = 215.03 - 33.43X_1 + 20.77X_2 + 33.02X_3 - 17.97X_1X_3 - 18.99X_1^2 - 27.99X_2^2 - 46.49X_3^2$$

(3)

$$ESI_2 = 1.52 - 0.61X_2 - 0.71X_3 + 0.45X_2X_3 + 0.93X_2^2 + 1.38X_3^2$$

(4)

$$ESI_3 = 53 - 6.29X_1 + 5.96X_2 + 6.21X_3 + 3.13X_4 + 3.44X_1X_3 - 6.70X_1^2 - 8.32X_3^2$$

(5)

各模型优化后,浊度值 ESI_1 、油珠粒径 ESI_2 、析油时间 ESI_3 的决定系数分别为 90.39%、90.72%、92.79%,说明各模型可以解释 90%以上响应值变化,预测值与实际值之间具有较高相关性。实验误差较小,因此可用该模型对各响应值进行分析和预测。

2.3 生物油/柴油稳定性的响应面分析

2.3.1 超声因素对生物油/柴油浊度值的影响

由回归方程显著性分析可知,超声时间与超声频率交互作用对浊度值影响显著,如图 3 所示。在声功率密度和矩形脉冲占空比一定的情况下,增加超声时间浊度值明显增大,低频超声更有助于浊度值的提升。在超声作用 8~11 min,超声频率 20~36 kHz 范围内浊度值处于最佳状态,继续增加超声时间和超声频率对浊度值影响不大,甚至出现下降趋势。说明此时反应已接近平衡,这是因为增加超声频率会提高空化阈值从而加大生物油/柴油的乳化难度,超声时间太长,超声空化释放的热量以及功率超声

设备运行的温升会导致反应温度的急剧升高,这些都不利于乳化进行及维持乳化稳定性。

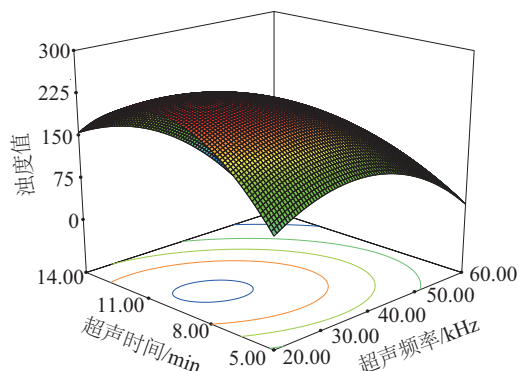


图3 超声时间与超声频率交互作用3D曲面图

Fig. 3 Interaction of ultrasonic time and ultrasonic frequency in 3D model

2.3.2 超声因素对生物油/柴油油珠粒径的影响

依据模型显著性分析结果可知,超声时间对乳化油粒径的因子贡献率最大,超声时间与声功率密度交互作用对油珠粒径 ESI_2 的影响显著如图4所示。

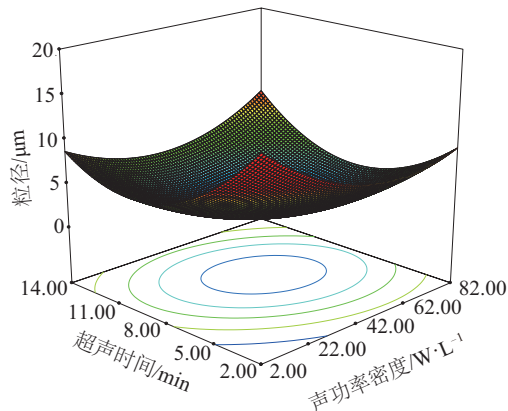


图4 超声时间与声功率密度交互作用3D曲面图

Fig. 4 Interaction of ultrasonic time and density of ultrasonic power in 3D model

如图4所示,超声时间和声功率密度交互作用显著,其等高线呈椭圆形,在矩形脉冲占空比与超声的延长频率一定的情况下,乳化初期油珠粒径随超声时间和声功率密度的增大而逐渐减小。超声时间8~11 min,声功率密度22~62 W/L时,粒径小、数目多且分布较均匀,说明乳化效果最好,但继续延长超声时间和增大声功率密度,粒径减小的趋势会变缓,甚至出现增大,说明超声时间和声功率密度对粒径的贡献均趋于饱和状态。这是因为超声

时间太短,空化不明显,油珠粒径较大,声功率密度小于空化阈值,乳化主要由超声波引起的机械振动形成,乳化油分散不均匀,油珠数量少,而逐步延长超声时间和增大声功率密度,其空化效应增加,成核速率加大,油珠粒径变小,但继续增加声功率密度和延长超声时间,由于空化泡成核时间不可能无限缩短,此时空化泡快速生长效应成为主导,从而导致功率超过82 W/L时制备乳化油粒径开始增大。

2.3.3 超声因素对生物油/柴油析油时间的影响

由回归方程显著性分析可知,超声时间与超声频率交互作用对析油时间影响显著,乳化初期超声作用时间与析油时间呈线性关系,如图5所示。此时由超声作用产生的机械振动是乳化进行的主要原因,继续延长超声作用时间,乳化稳定性的非线性增幅愈发明显,空化效应主导乳化反应,析油时间出现峰值,但随着超声时间的延长,析油时间反而呈缩短趋势,说明延长超声时间对稳定性影响已不显著,此时反应接近平衡。另外,由图5可知,超声频率在20~40 kHz时对乳化促进作用显著,可见对于该乳化反应体系的空化谐振频率一定在此范围内,需进一步利用一定的优化分析方法求得。

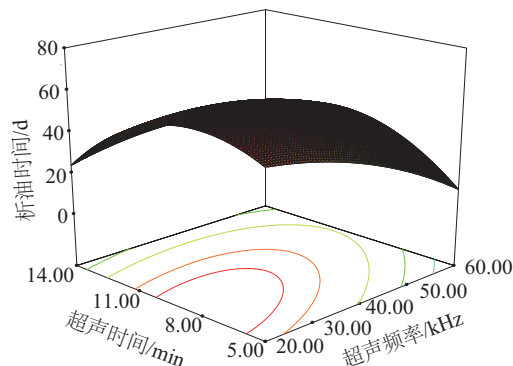


图5 超声时间与超声频率交互作用3D曲面图

Fig. 5 Interaction of ultrasonic time and ultrasonic frequency in 3D model

2.4 模型分析与验证

利用 Design-expert 8.0 的 Optimization 模块进行工艺参数优化,通过调节响应值有效区间,即当浊度法值 ($ESI_1 > 220$)、油珠粒径满足 $1 \mu\text{m} < ESI_2 < 2 \mu\text{m}$ 、析油时间 $ESI_3 > 50 \text{ d}$ 时有利于混和燃油燃烧性及稳定性的提高,并能满足正常生产、运输和销售环节所需的时间及国家车用柴油稳定标准期限,

对各参数进行优化求解,得到各超声因素最优工作参数为 $X_1=27.75$ kHz, $X_2=55.42$ W/L, $X_3=8.8$ min, $X_4=0.8$,此时,模型预测浊度值 $ESI_1=248$,油珠粒径 $ESI_2=1.25$ μm ,析油时间 $ESI_3=60$ d,通过对各参数分析整理并按超声频率 30 kHz、超声功率 56 W/L、超声时间 9 min,矩形脉冲占空比 0.8 来配置各超声参数进行验证,实验重复 3 次,验证结果及误差分析见表 5,预测响应值 ESI_1 、 ESI_2 、 ESI_3 的相对误差分别 12%、10%、14%。

表5 验证结果及误差分析

Table 5 Verification results and error analysis			
响应值	预测值	实测值	相对误差/%
ESI_1	248.00	231.00	6.85
		219.00	11.69
		214.00	13.70
ESI_2	1.25	1.34	7.20
		1.37	9.60
		1.36	8.80
ESI_3	60.00	56.00	6.67
		55.00	8.33
		52.00	13.33

3 结 论

1)提出以“声功率密度”表征超声作用强度,建立以超声频率、声功率密度、超声时间和超声激励波形为优化决策变量,以乳化油的浊度值、油珠粒径及析油时间为响应值的多目标优化模型,模型决定系数分别为 90.39%、90.72%、92.97%,表明各模型可以解释 90%以上响应值变化,模型给出在响应值有效范围内,最优超声参数为超声频率 30 kHz、声功率密度 56 W/L、超声时间 9 min,超声激励波形为矩形脉冲占空比 0.8,相对误差分别小于 12%、10%、14%,预测值和实际值之间具有较高的相关性。

2)通过显著性分析分别得到各超声因素对乳化油浊度值 ESI_1 影响的因子贡献率为:超声频率>超声时间>声功率密度>矩形脉冲占空比,超声时间对乳化油粒径 ESI_2 的因子贡献率最大;声功率密度、超声时间和超声频率对乳化油析油时间 ESI_3 的影响均极其显著。

3)超声空化效应是乳化生物油/柴油的主要作

用机理,当反应容器内声功率密度大于空化阈值时超声频率和超声时间的交互作用对响应面模型有显著性影响。

[参考文献]

[1] 李润东,张 杨,李秉硕,等.玉米秸秆催化液化制备生物油实验研究[J].燃料化学学报,2016,44(1): 69—74.

[1] Li Rundong, Zhang Yang, Li Bingshuo, et al. Hydrothermal catalytic liquefaction of corn stalk for preparation of bio-oil[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(1): 69—74.

[2] 谭文英,许 勇,王述洋.乳化剂及助乳剂提高生物燃油/柴油乳化性能[J].农业工程学报,2013,29(24): 235—243.

[2] Tan Wenying, Xu Yong, Wang Shuyang. Improving emulsifying performance of bio- oil/diesel by emulsion and co-emulsifier[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24) : 235—243.

[3] 吴何来,周劲松,许沧栗,等.超临界乙醇提质生物油的汽油机试验研究[J].浙江大学学报,2015,49(1): 136—144.

[3] Wu Helai, Zhou Jinsong, Xu Cangsu, et al. Experimental research on gasoline engine fueled with bioamass pyrolysis oil upgraded in supercritical ethanol [J]. Journal of Zhejiang University, 2015, 49(1) : 136—144.

[4] 宋 镭,于凤文,王 佳,等.La/P/Ni改性分子筛催化裂解生物油模型化合物[J].农业工程学报,2016,32(1): 284—288.

[4] Song Qiang, Yu Fengwen, Wang Jia, et al. Catalytic pyrolysis of bio- oil model compounds over La/P/Ni modified ZSM-5 [J]. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 284—288.

[5] 赵 欣,李 凯,李 明,等.沉淀法回收生物油高温馏分中的酚类物质[J].燃料化学学报,2016,44(2): 201—208.

[5] Zhao Xin, Li Kai, Li Ming, et al. Separating phenols from high temperature fraction of bio-oil by precipitation [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(2): 201—208.

[6] Martin J A, Mullen C A, Boateng A A. Maximizing the stability of pyrolysis oil/diesel fuel emulsions[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9): 5918—5929.

[7] Karnjanakom S, Guan G Q, Asep B, et al. A green

- method to increase yield and quality of bio-oil: Ultrasonic pretreatment of biomass and catalytic upgrading of bio-oil over meta(Cu, Fe and/or Zn)/ γ - Al_2O_3 [J]. RSC Advances, 2015, 101(5): 83494—83503.
- [8] 梁 伟, 王铁军, 张 琦, 等. 生物质快速热解油水相溶液超声乳化特性[J]. 燃料化学学报, 2009, 37(6): 684—689.
- [8] Liang Wei, Wang Tiejun, Zhang Qi, et al. Ultrasonic emulsification characteristics of aqueous solution of bio-oil from fast pyrolysis of biomass and diesel [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37(6): 684—689.
- [9] 郑爱军, 仲兆平, 赵紫默, 等. 精制废木屑热解油/柴油新型混合燃料制备实验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 40(8): 933—936.
- [9] Zhang Aijun, Zhong Zhaoping, Zhao Zimo, et al. Sawdust pyrolysis oil upgrading and blending with diesel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 40(8): 933—936.
- [10] Ordonez-Santos L E, Pinzon-Zarate L X. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of total carotenoids from peach palm fruit (*Bactris gasipaes*) by-products with sunflower oil using response surface methodology [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 560—566.
- [11] Hajinezhad A, Abedi S, Ghobadian B, et al. Biodiesel production from Norouzak (*Salvia lerifolia*) seeds as an indigenous source of bio fuel in Iran using ultrasound [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 99: 132—140.
- [12] Adewale P, Dumont M J, Ngadi M. Enzyme-catalysed synthesis and kinetics of ultrasonic assisted methanolysis of waste lard for biodiesel production [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 284: 158—165.
- [13] Adewale P, Dumont M J, Ngadi M. Enzyme-catalyzed synthesis and kinetics of ultrasonic-assisted biodiesel production from waste tallow [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 1—9.

STABILITY RESPONSE SURFACE MODEL OF ULTRASONIC EMULSIFIED BIO-OIL/DIESEL AND ANALYSIS OF INFLUENCING FACTORS

Wei Xiaoli¹, Shen Weizheng¹, Wang Shuyang², Tan Wenying², Zhang Aijing¹

(1. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Engineering Center for Biomass Energy Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Aiming at the defects in physical and chemical properties and stability for the bio-oil instead of petrochemical fuel, a method of preparing bio-oil/diesel mixed fuel by ultrasonic emulsification is proposed. The effects of ultrasonic frequency, sound power density, ultrasonic time and ultrasonic excitation waveform on the stability of mixed fuel are studied by a four-factor and five-level universal combination design and response surface analysis method. The secondary regression model is established by using the turbidity value, oil particle size and oil deposition time as the response values. The model reveals the factor contribution rate of the ultrasonic factor to each response value, and the significant influence of the interaction between ultrasonic time, ultrasonic frequency and sound power density on the response surface model, the model determination coefficients are 90.39%, 90.72% and 92.79%, respectively, the relative errors are less than 12%, 10%, and 14%, respectively. Therefore, reasonable matching of ultrasonic parameters is beneficial to increase the emulsification effect and stability of bio-oil/diesel.

Keywords: ultrasonic emulsification; stability model; factor analysis; bio-oil/diesel