

文章编号: 0253-2409(2012)08-0952-06

精制废木屑热解油/柴油新型混合燃料制备实验研究

郑爱军¹, 仲兆平¹, 赵紫默², 李睿¹, 姜小祥³, 赵金笑¹, 刘志超¹

(1. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189;
3. 中国林业科学研究院林产化学工业研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 为提高废木屑热解油品质,使其能够作为发动机燃料使用,提出了一条新的热解油提质路线。首先将热解原油进行基于组分分离的乙醚萃取和化学催化相结合的精制过程,得到精制热解油;其次,利用超声反应器制备了精制热解油/柴油新型混合燃料,以单位体积柴油所溶解的精制油的体积定为 S 值,作为判断乳化效果的准则,考察了不同的影响因素对 S 值的影响。研究表明,乳化剂添加量对 S 值影响较大,在 $V_{\text{精制生物油}}:V_{\text{柴油}}:V_{\text{乳化剂}}=10:30:5$ 条件下,存在最佳的乳化超声操作条件:超声时间、超声电功率、乳化温度分别为 20 min、540 W、50 °C。制备了不同 S 值的乳化燃料,通过对燃料物理指标的分析发现,该燃料性质稳定、燃烧性能优良,有望成为柴油的替代产品。

关键词: 精制热解油; 乳化; 超声作用; 萃取

中图分类号: X785 **文献标识码:** A

Sawdust pyrolysis oil upgrading and blending with diesel

ZHENG Ai-jun¹, ZHONG Zhao-ping¹, ZHAO Zi-mo², LI Rui¹,
JIANG Xiao-xiang³, ZHAO Jin-xiao¹, LIU Zhi-chao¹

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Institute of Chemical Industry of Forest Products, Chinese Academy of Forest, Nanjing 210042, China)

Abstract: A new upgrading method of pyrolysis-oil was proposed to improve the quality of pyrolysis-oil to be an engine fuel. First, the raw pyrolysis-oil was treated by the combination of ether extraction and chemical catalysis. Secondly, the upgrading pyrolysis-oil/diesel blends were prepared by the ultrasonic treatment. The value of S , which is defined as the volume of upgrading pyrolysis-oil dissolved in a unit volume of diesel, was used for evaluating the emulsification of the blends. The results show that the amount of emulsifier plays an important part in the value of S . When the volume ratio of upgrading pyrolysis-oil, diesel and emulsifier equals 10:30:5, the optimal experimental condition is that the ultrasonic time is 20 min, the ultrasonic power is 540 W, the temperature is 50 °C. By analyzing the physical characteristics, the blends are found to be stable and have a good combustion performance, which can be a promising alternative to diesel.

Key words: upgrading pyrolysis-oil; emulsion; ultrasonic; extraction

热解油是生物质或者可燃废弃物在缺氧状态下,高加热速率、短停留时间 (<2 s) 和适宜的温度 (一般 500 °C 左右) 下迅速受热分解并迅速冷凝得到的热化学产物^[1~3]。与化石燃料相比,热解油具有可再生、清洁和安全三大优势,开发生物油资源将有助于中国能源结构的多元化和实现低碳发展,对于促进经济增长、调整产业结构,推动经济和社会的可持续发展意义重大。

废木屑热解油具有高含水量、高黏度、强腐蚀性、低热值等特性,而这些特性阻碍了其作为燃料的应用。但是,热解油可以与其他燃料,如柴油、生物柴油等进行乳化,乳化后燃料的燃烧性能良好,该方

法是一条便捷高效的热解油利用方法。Ikura 等^[4]将离心去除重质组分的热解油与 2#柴油进行乳化,考查了操作条件、乳化剂的添加量对乳化液稳定性的影响。许多研究者^[5~9]分别就生物质热解油跟柴油的乳化行为的不同方面进行了研究,李永军等^[7]还进行了乳化燃料的发动机测试实验。

之前的研究者都是将热解油的全部组分与柴油等燃料进行乳化,但是热解油中的部分组分不适合燃烧,如木质素组分衍生高聚物。后来研究者将热解油跟其他燃料进行部分乳化。Garcia-Perez 将热解油跟生物柴油进行混合乳化。乳化后,乳化液分为生物柴油富集层和热解油富集层,生物柴油富集

收稿日期: 2011-11-03; 修回日期: 2012-02-19。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划, 2011CB201505, 2007CB210208)。

联系作者: 仲兆平(1965-), 教授, Tel: 025-83794744; Fax: 025-83794700; E-mail: zzhong@seu.edu.cn。

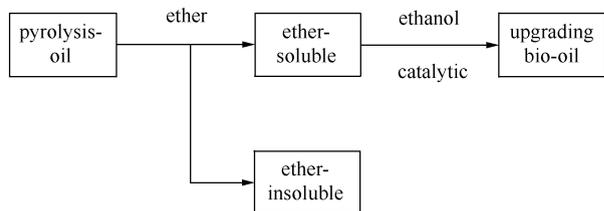
层中的氧化稳定性增强,但是燃烧性能降低^[10]。阮仁祥等^[11]提出以辛醇做乳化剂,对热解油与柴油/汽油的乳化进行了研究,乳化实验实现了对热解油轻质组分与重质组分的有效分离,所制备的乳化燃料酸度低、含水率低、性质稳定、燃烧性能优良。梁伟等^[12]通过超声法制备了热解油水相与柴油乳化的稳定乳化液并进行了热力学分析。姜小祥等^[13]将热解油跟生物柴油进行混合乳化后,制备了一种新型乳化燃料,对该燃料的老化性能、腐蚀性等进行了测试,发现该燃料稳定性强,腐蚀性小。以上研究者对于乳化的研究多数是以热解原油为目标,对精制热解油跟柴油乳化行为进行的研究还比较少。

本实验首先以乙醚作为萃取剂,将废木屑热解原油进行组分分离,将溶于乙醚的部分进行旋转蒸发去除溶剂乙醚得到乙醚可溶物。取乙醚可溶物加入乙醇后进行催化反应得到精制热解油。以正辛醇为乳化剂,将精制热解油和 0#柴油进行乳化,以 S 值作为判断乳化效果的准则。 S 值定义为单位体积柴油中所能溶解的精制油体积^[14]。考察了不同的制备条件,如精制热解油/柴油体积比、乳化剂加入量、超声条件等对 S 值的影响,并且制备了不同 S 值的乳化燃料,对其指标进行了分析说明。

1 实验部分

1.1 精制生物油的制备

本实验所用热解原油由废木屑热解得到,热解原油的精制流程如下:



热解原油和乙醚按体积比 1:2 进行混合,静置 15 min,混合物分为上下两层;取上层液体旋转蒸发后(去除溶剂乙醚)得到乙醚可溶物,其后加入乙醇进行催化反应,固体酸为催化剂,反应温度 70 ℃、反应时间 3 h。将精制热解油进行离心分离(3 500 r/min, 15 min)以去除催化剂。

1.2 乳化实验装置

乳化实验装置示意图见图 1。实验原料为精制热解油、乳化剂正辛醇和 0#柴油。乳化过程如下:首先将乳化剂和 0#柴油按一定的比例加入到反应器中,超声乳化 5 min;然后将热解油按照确定的比

例加入到反应器中,超声乳化 15 min;乳化结束后,将全部乳化液放置在容器中,静置 24 h。最后,乳化液分为两层,上层为富含热解油的柴油层,具有良好的燃烧性能;下层为热解油富集层,多为木质素聚合物。

1.3 测试方法

实验中, S 值的计算公式如下:

$S = (V_2 - V_1) / V \times 100\%$, 其中, V_1 ——乳化前加入的热解油初始体积, mL; V_2 ——乳化后热解油体积, mL; V ——加入的柴油的体积, mL。

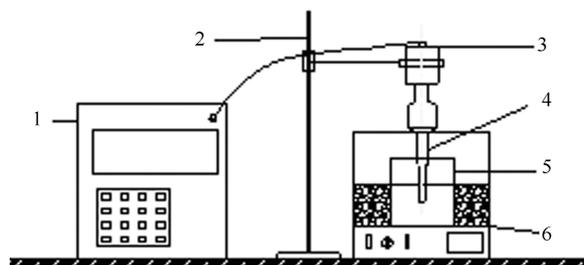


图 1 乳化实验装置示意图

Figure 1 Devices of emulsion

- 1: ultrasonic generator; 2: formwork units;
3: transducer; 4: ultrasonic probe; 5: cup;
6: collector-type magnetic heating stirrer

实验中,测定了不同 S 值乳化液的物理指标。热值由 SDACM 3000 自动量热仪测得,密度由 SYD-1884 石油产品密度实验器测得, pH 值由 CT-6203 防水智能型便携式 pH 计测得,黏度由乌氏玻璃毛细黏度计测得。热解油化学组分由 Agilent 色谱/质谱联用仪(GC-MS, GC: Agilent7890A, MS: Agilent 5975C)测得。

2 结果与讨论

2.1 废木屑热解油精制前后物性指标和化学指标的变化

表 1 为热解油在精制前后的物性指标。比较热解原油和乙醚可溶物发现,可溶物的热值升高到 19.8 MJ/kg,黏度、密度和 pH 值有不同程度的降低。这是由于乙醚萃取时,将大部分水分和大分子木质素聚合物遗留在乙醚不溶物中。由于水分含量的降低,乙醚可溶物的黏度升高,但是同时去除的还有大分子木质素聚合物组分,该组分的去除又可以使热解油的黏度降低,两者共同作用的结果是热解原油经乙醚萃取后,黏度有略微的降低,而其他指标的变化是主要由水分降低引起。

比较精制热解油跟乙醚可溶物发现,精制热解油的热值进一步提升,黏度、密度和 pH 值再次降

低。这两者物性指标的差异主要是由外来组分的加入(乙醇)和化学反应引起,由于化学反应改变了热解油中的部分组分,将羧酸类物质转化为酯类,醛酮类转化为缩醛、缩酮类^[15]。pH值的降低是由加入的固体酸催化剂中酸流失引起的。水分含量有略微的提高,增加的水分来源于酯化反应和缩醛反应产生的水分,但是跟原油相比,其含水量明显降低。

表1 原油、乙醚可溶物、精制油的理化指标

Table 1 Physical indicator of raw pyrolysis-oil, ether-soluble and upgrading pyrolysis-oil

Indicators	Pyrolysis-oil	Ether-soluble	Upgrading pyrolysis-oil
Heat value			
$Q/(MJ \cdot kg^{-1})$	14.3	19.8	22.3
Viscosity			
(25 °C, $\mu/mm^2 \cdot s$)	3.92	3.6	2.11
Density $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.008	0.958	0.927
pH value	3.8	3.1	2.4
Water content $w/\%$	32.52	12.36	14.48

通过GC-MS对原油、乙醚可溶物和精制热解油的化学组分进行了检测,检测结果见图2。

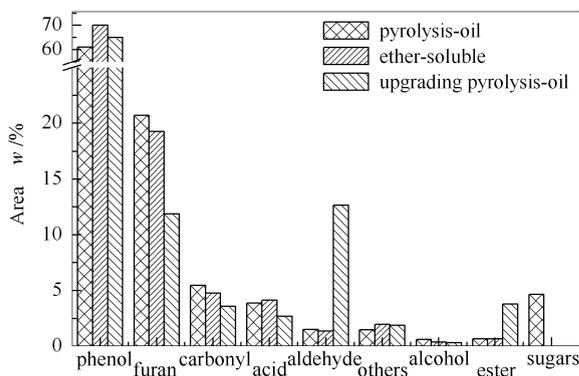


图2 原油、乙醚可溶物和精制油化学组分分布

Figure 2 Distribution of chemical components of raw pyrolysis-oil, ether-soluble and upgrading pyrolysis-oil

由图2可以看出,除糖类外,乙醚可溶物跟原油在化学组成上相差不大。与精制热解油相比,乙醚可溶物中缩醛类、酯类含量有明显的提高,而呋喃类、羰基类和酸类的含量均有不同程度的降低,酚类的含量则变化不明显。

热解原油经过乙醚萃取后,不仅降低了热解油的水分含量,还去除了部分大分子的木质素聚合物,改善了生物油的老化性能,提高了其稳定性。此外,乙醚可溶物加入乙醇进行催化后,使热解油的羧酸类转化为酯类,醛、酮类转化为缩醛、缩酮类,降低了

腐蚀性,进一步提高其稳定性。精制热解油在物性指标和化学组成上均优于热解原油。但是作为燃料使用,精制热解油还达不到要求,因此,将精制油与柴油进行乳化制备了新型混合燃料。

2.2 精制热解油/柴油体积比对S值的影响

表2为不同的精制热解油/柴油体积比(1:3、1:2、1:1、1:0.5)对S值的影响情况。从表2中可以看出,随着精制热解油量的增加,S值增加。精制热解油的量在增加的同时,乙醇等极性物的量也在增加,有机极性物的添加可以降低临界胶束浓度,使得胶团容易生成^[16],乳化量增加,S值增大。此外,在乳化剂添加量一定的情况下,精制热解油组分跟柴油乳化又会存在阈值,在热解油添加量是原来6倍的情况下,S值仅增加3.33%,说明热解油的添加量在低乳化剂浓度下对S值的影响不显著。

表2 精制热解油加入量对S值的影响

Table 2 Effect of amount of upgrading pyrolysis-oil to the value of S

Volume ratio	10:30:2*	15:30:2	30:30:2	60:30:2
S/%	11.67	13.33	14.33	15.00

* order of proportion was: $V_{\text{upgrading pyrolysis-oil}} : V_{\text{diesel}} : V_{\text{emulsifier}}$

2.3 乳化剂添加量对S值的影响

表3为S值随乳化剂添加量的变化。从表3中可以看出,S值随着乳化剂添加量的增加而增加,而且增加幅度较大。当乳化剂的量增加到原来的5倍时,S值增加了近3倍。与表2相比,乳化剂的添加量对S值的影响程度要高于精制热解油添加量的影响。当乳化剂添加量增加时,整个乳化液体系的表面张力降低,精制热解油跟柴油的互溶性增强,S值增大。但是,对于乳化剂的添加量不应是越多越好,应该加以控制。一方面处于经济性的考虑,添加量的增加势必增加乳化液的制备成本;另一方面考虑乳化液的应用效果,如燃烧情况,添加量太大,会覆盖添加精制热解油的燃烧效果。此外,添加过多的乳化剂会影响乳化液的黏度、凝点,致使燃烧时雾化不良等^[17]。

表3 S值随乳化剂添加量的变化

Table 3 Effect of emulsifier amount on the value of S

Volume ratio	10:30:2*	10:30:3	10:30:5	10:30:10
S/%	11.67	13.33	18.33	30.00

* order of proportion was: $V_{\text{upgrading pyrolysis-oil}} : V_{\text{diesel}} : V_{\text{emulsifier}}$

2.4 超声作用以及乳化温度对S值的影响

超声作用时间、超声电功率和乳化温度三者之

间相互影响,因此,以正交试验来确定它们对 S 值的影响以及最优的实验条件组合。每个影响因素选择 4 个水平进行考虑, $V_{\text{精制热解油}}:V_{\text{柴油}}:V_{\text{乳化剂}} = 10:30:5$ 。实验因素及水平选择见表 4。

表 4 正交实验因素选择表

Table 4 Factor selection table of orthogonal

Level	Factors		
	A	B	C
	time t/min	temp. $t/^\circ\text{C}$	power P/W
1	5	30	360
2	10	40	420
3	20	50	480
4	30	60	540

表 5 为正交实验数据表。在表 5 中, T_i 为各因素同一水平实验数据之和, T 为 16 组实验数据之和, x 为各因素同一水平实验数据的平均数。表 5 中数据的方差分析表见表 6。

表 5 正交实验数据表

Table 5 Result of orthogonal

Number	A	B	C	$S/\%$
	time/min	temp. $t/^\circ\text{C}$	power P/W	
1	A1	B1	C1	4.33
2	A1	B2	C2	5.33
3	A1	B3	C3	7.00
4	A1	B4	C4	9.33
5	A2	B1	C4	14.00
6	A2	B2	C3	12.33
7	A2	B3	C2	10.33
8	A2	B4	C1	7.67
9	A3	B1	C2	14.00
10	A3	B2	C1	12.67
11	A3	B3	C4	17.67
12	A3	B4	C3	15.33
13	A4	B1	C3	14.33
14	A4	B2	C4	16.67
15	A4	B3	C1	10.67
16	A4	B4	C2	12.33
T_1	25.99	46.66	35.34	$T=183.99$
T_2	44.33	47.00	41.99	
T_3	59.67	45.67	48.99	
T_4	54.00	44.66	57.67	
x_1	6.50	11.76	8.84	
x_2	11.08	11.75	10.50	
x_3	14.92	11.42	12.25	
x_4	13.5	11.17	14.42	

F 检验结果表明,温度对 S 值的影响不显著,属于不显著因子。而时间和超声电功率对 S 值的影响十分显著,属于显著因子。对于显著因子应该选取最好水平,即平均数最大的水平,对于不显著因子原

则上可以任意选择。结合本实验数据,从表 5 中选出了最佳的组合为 $A_3B_3C_4$,即超声作用时间 20 min,温度 50°C ,超声电功率为 540 W。从实验结果看出,超声作用时间和温度存在最佳值,而超声电功率在一定范围内(0~600 W)越大越好。

表 6 S 值的方差分析表

Factors	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	$F_{0.05(3,3)}$
Time(A)	163.51	3	54.5	389.3	9.28
Temperature(B)	0.84	3	0.28	2.0	
Power(C)	68.71	3	22.9	163.6	
Error	0.83	6	0.14		
Total variation	233.89	15			

随着超声作用时间的延长,有可能将更多的大分子击碎为小分子,从而降低了分子的空间位阻^[18],热解油跟柴油的互溶性增加, S 值增大;作用时间过长会使分散相重新聚集沉降,从而从柴油中析出,因此, S 值有降低的趋势。

超声电功率代表给乳化液的能量输入,当超声作用时间一定时,所输入的能量与超声电功率成正比。因此,在一定的情况下随着超声电功率的增加,加剧了乳化液内部的声空化作用。声空化时气泡急剧崩溃的瞬间产生巨大的能量和速率,促使液体内部剧烈的碰撞,促使乳化液平均粒径的减小,精制热解油跟柴油互溶性增强, S 值增大。

随着乳化温度的升高,乳化液的表面张力降低,当温度达到临界值时,乳化液的表面张力降到最低,部分精制热解油最大程度的溶解到柴油中,此时 S 值最大。当温度超过上述临界温度时,表面吸附的乳化剂将从乳化液中析出,乳化液的稳定受到破坏,部分生物油析出, S 值降低^[10]。此外,温度升高,柴油中易挥发性组分流失严重,热解油中易于老化的物质会黏附在容器的壁面上对乳化液产生不利的影响。

2.5 不同 S 值的乳化燃料的理化性质分析

上面探讨了不同的因素对 S 值的影响,表 7 为超声作用时间 20 min,温度 50°C ,超声电功率为 540 W,精制热解油/柴油体积比 10:30 条件下,不同 S 值($S_1=11.67\%$ 、 $S_2=18.33\%$ 、 $S_3=33.00\%$)的乳化燃料(F_1 、 F_2 、 F_3)理化指标的分析。从作为燃料的角度出发可以看出,乳化燃料的性能明显高于原油和精制生物油,乳化燃料的热值较高接近与柴油,黏度跟精制热解油相比略有增加但是仍然低于发动机燃烧要求的最低值 7 cst,腐蚀性较原油和精

制油相比有较大的提升。此外, S 值越小, 燃料的性质越接近于柴油, 但是低 S 值燃料燃烧时其节油效果要低于较高 S 值的燃料。三种乳化燃料的稳定性是以乳化液的稳定时间作为判断依据, 乳化燃料

F_1 、 F_2 、 F_3 的稳定时间分别为 62、68 和 85 d。总体来看三种不同 S 值的乳化燃料性质稳定, 燃烧性能良好, 是一种优良的新型混合燃料。

表 7 柴油和不同 S 值乳化燃料的物性指标

Table 7 Physical indicator of diesel and emulsions of different value of S

Indicators	Diesel	Emulsified oil F_1	Emulsified oil F_2	Emulsified oil F_3
Heat value $Q/(MJ \cdot kg^{-1})$	42.6	37.2	35.7	34.8
Viscosity (25 °C) $\mu/(mm^2 \cdot s^{-1})$	4.57	3.99	4.06	4.56
Density $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	0.83	0.855	0.862	0.897
pH value	6.8	5.0	4.8	4.7
Volume ratio		10:30:2*	10:30:5	10:30:10
$S/\%$		11.67	18.33	30

the order of proportion was: $V_{\text{upgrading pyrolysis-oil}}:V_{\text{diesel}}:V_{\text{emulsifier}}$

3 结论

废木屑热解油经过基于组分分离的乙醚萃取过程和加入乙醇的化学催化过程, 不仅去除大部分的水分和致使热解油易于老化的大分子木质素聚合物组分, 而且还将热解原油中活性较高的基因和酸性组分转化为稳定的缩醛类物质和酯类物质, 提高了热解的稳定性, 提升了热解油的品质。

以 S 值作为判断乳化效果的准则, 考查了几种影响因素, 精制热解油/柴油体积比、乳化剂用量、超声作用时间、电功率和乳化温度对 S 值的影响。研究表明, 精制热解油/柴油体积比对 S 值影响较小,

乳化剂用量对 S 值影响较大。而且, 在 $V_{\text{精制生物油}}:V_{\text{柴油}}:V_{\text{乳化剂}}=10:30:5$ 条件下, 存在最佳的超声操作条件: 超声作用时间 20 min、电功率 540 W、温度 50 °C。

在精制热解油/柴油体积比保持不变(1:3), 通过改变乳化剂的添加量制备了不同 S 值的乳化燃料, 并对乳化燃料的物理指标进行了测试分析, 从指标值可以看出乳化燃料的燃烧性能明显优于精制热解油, 所制备的乳化燃料热值高、黏度低、腐蚀性低, 是一种品质优良的新型燃料。

参考文献

- [1] 路冉冉, 商辉, 李军. 生物质热解液化制备生物油技术研究进展[J]. 生物质化学工程, 2010, 44(3): 54-58.
(LU Ran-ran, SHANG Hui, LI Jun. Research progress on biomass pyrolysis technology for liquid oil production[J]. Biomass Chemical Engineering, 2010, 44(3): 54-58.)
- [2] DINESH M, CHARLES U P, PHILIP H S. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil; A critical Review[J]. Energy Fuels, 2006, 20(3): 848-889.
- [3] ZHANG Q, CHANG J, WANG T, XU Y. Review of pyrolysis oil properties and upgrading research[J]. Energy Convers Manage, 2007, 48(1): 87-92.
- [4] IKURA M, STANCIULESCU M, HOGAN E. Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel[J]. Biomass Bioenergy, 2003, 24(3): 221-232.
- [5] 张健. 生物油乳化及其乳化液性质的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
(ZHANG Jian. Research on emulsion of bio-oil and its property[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.)
- [6] 张喜梅, 柏雪源, 王丽红, 蔡红珍, 李永军. 生物油/柴油乳化燃料的燃烧特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 271-275.
(ZHANG Xi-mei, BAI Xue-yuan, WANG Li-hong, CAI Hong-zhen, LI Yong-jun. Combustion characteristics of emulsified fuel from bio-oil/diesel[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 271-275.)
- [7] 李永军, 于济业, 柏雪原, 蔡红珍. 柴油机燃烧生物油/柴油乳化燃料的负荷特性[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): s145-s148.
(LI Yong-jun, YU Ji-ye, BAI Xue-yuan, CAI Hong-zhen. Bio-oil/diesel emulsion fuel load characteristics of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Suppl): s145-s148.)
- [8] 王琦, 李信宝, 王树荣, 骆仲浚, 岑可法. 生物质热解生物油与柴油乳化的试验研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 380-384.
(WANG Qi, LI Xin-bao, WANG Shu-rong, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa. Experimental research on emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(3): 380-384.)
- [9] 齐国利, 董芑, 范凤博, 谈和平. 生物质热解油及乳化油特性的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 92-94.
(QI Guo-li, DONG Peng, FAN Su-bo, TAN He-ping. Research on characteristic of biomass pyrolysis oils and emulsion oil[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 92-94.)
- [10] GARCIA-PEREZ M, SHEN J, WANG X S, LI C-Z. Production and fuel properties of fast pyrolysis oil/bio-diesel blends[J]. Fuel Process Technol, 2010, 91(3): 296-305.

- [11] 阮仁祥, 张颖, 朱锡锋. 生物油的分离与乳化研究[J]. 现代化工, 2010, **30**(12): 37-39.
(RUAN Ren-xiang, ZHANG Ying, ZHU Xi-feng. Research on separation and emulsification of bio-oil[J]. Modern Chemical Industry, 2010, **30**(12): 37-39.)
- [12] 梁伟, 王铁军, 张琦, 汪璐, 徐莹, 吴创之. 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.
(LIANG Wei, WANG Tie-jun, ZHANG Qi, WANG Lu, XU Ying, WU Chuang-zhi. 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.)
- [13] 姜小祥, Naoko ELLIS, 仲兆平. 生物油/生物柴油乳化燃料的制备及性质分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, **40**(4): 789-793.
(JIANG Xiao-xiang, Ellis N, ZHONG Zhao-ping. Preparing emulsion of bio-oil/bio-diesel and properties analysis[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2010, **40**(4): 789-793.)
- [14] JIANG X, Ellis N. Upgrading bio-oil through emulsification with biodiesel: Mixture production[J]. Energy Fuels, 2010, **24**(2): 1358-1364.
- [15] 张琦, 常杰, 王铁军, 吴创之, 徐莹, 朱锡锋. 固体酸改质生物油的研究[J]. 燃料化学学报, 2006, **34**(6): 680-684.
(ZHANG Qi, CHANG Jie, WANG Tie-jun, WU Chuang-zhi, XU Ying ZHU Xi-feng. Study on upgrading of bio-oil catalyzed over solid acids[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, **34**(6): 680-684.)
- [16] 吕效平, 李建彤, 韩萍芳. 超声制备微乳化柴油的实验研究[J]. 声学技术, 2006, **25**(5): 436-440.
(LV Xiao-ping, LI Jian-tong, HAN Ping-fang. Emulsion of diesel oil and water with ultrasonic[J]. Technical Acoustics, 2006, **25**(5): 436-440.)
- [17] 高献坤, 李遂亮, 侯瑞娟, 李冠峰, 陈亮, 王导南. 柴油机燃用超声乳化柴油的试验研究[J]. 河南农业大学学报, 2009, **43**(2): 177-181.
(GAO Xian-kun, LI Sui-liang, HOU Rui-juan LI Guan-feng, CHEN Liang, WANG Dao-nan. Experimental research on the diesel engine fueled with emulsified diesel oil[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2009, **43**(2): 177-181.)
- [18] 徐宁, 余锦锦, 韩萍芳, 吕效平. 超声波及乳化剂复配对制备微乳柴油的影响[J]. 化工进展, 2006, **25**(11): 1349-1353.
(XU Ning, SHE Jin-jin, HAN Ping-fang, LV Xiao-ping. Effect of ultrasound and emulsifier on preparation of diesel-water micro-emulsion[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, **25**(11): 1349-1353.)