

文章编号: 0254-0096(2020)05-0211-07

生物质热解油的系统利用及脱水脱酸工艺

杨晓晓^{1,2}, 韩多多^{1,2}, 操 洪^{1,2}, 李 瑞^{1,2}

(1. 北京林业大学 林木生物质材料与能源教育部工程研究中心, 北京 100083;

2. 北京林业大学 林木生物质化学北京市重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 对生物油组成及组分馏程分布进行分析, 基于处理量 1000 kg/h 中试流程设计, 提出以燃料为主线、化学品为增值点的产品系统利用方案。针对生物油分离精制的关键环节——水和酸的分离, 设计 2 种满足不同产品需求的精馏流程, 可得到低酚木醋液产品的两塔方案 and 在此基础上增加粗乙酸产品的三塔方案, 并通过调整各塔产品分割比例和操作压力, 实现塔器间热量耦合, 降低能耗。结果表明: 2 种方案分别可分别节约蒸汽和循环水消耗 40% 和 33%, 得到的木醋液中酚类含量均不超过 0.22%, 可保证农牧用产品的安全性。

关键词: 生物质; 热解; 分离; 热量利用; 流程设计

中图分类号: TQ028; TK6

文献标志码: A

0 引 言

生物质热解液相产物——生物油组分十分复杂, 几乎包含所有种类的含氧有机化合物, 其中大量水和有机酸不仅影响燃烧热值和燃烧性能, 还会腐蚀设备^[1-2], 难以作为燃料直接使用。目前一部分研究集中于对生物油的提质, 如催化加氢、催化裂解、催化酯化、乳化等^[3-6], 并取得了显著效果, 然而这些方法都存在催化剂失活、设备复杂等问题, 限制了其大规模利用。另一部分研究者则致力于单一高附加值化学品的分离, 如左旋葡聚糖^[7]、羟基乙醛^[8]、酚类^[9-10]等, 然而由于生物油成分相对分散, 以单一化学品为目标分离生物油, 存在得率低、成本高等问题。

以多级化学品为目标, 采用分级分离方法, 可实现生物油的有效利用^[11]。生物油含大量不饱和组分, 易发生裂解、聚合反应, 除含量接近 50% 的水和酸外, 其他组分多为弱极性物质, 整个体系呈均一液相, 对分离精制有较高的技术和经济性要求。水和酸性组分的分离是生物油提质的关键, 目前常见的分离方法主要有萃取、离心、蒸馏^[12]、分级冷凝^[13]、柱层析^[14]等, 从流程简单、分离精度高、易于放大角度的考虑, 精馏分离是合适的选择。本文在提出产品系统利用方案的基础上, 针对处理量为 1000 kg/h 的中试流程, 重点分析水和酸的分离, 得到最佳工艺参数, 并通过塔器之间的热量耦合, 节

约能耗。

1 液相产物分析及产品路线设计

本课题组以松木屑为原料, 热解终温 460 °C, 停留时间不超过 2 s, 得到生物油中有机物相对含量为 54%, 水分 46%, 并用 GC-MS 进行分析, 详细数据见文献^[15], 有机物主要组分沸点分布见图 1 (图中含量为相对整个生物油的含量)。沸点区间在 100~180 °C 的物质较多, 主要为酸类、醛类、酮类和其他 (醇类等), 而酚类物质的沸点均在 180~300 °C, 因此完全可利用生物油中不同族类组分沸点分布规律, 设计出相适应的分离方案及下游产品利用路线, 得到具有不同特点和要求的下游产品。

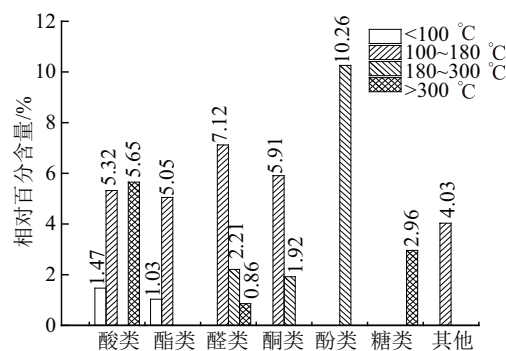


图1 生物油主要有机组分的沸点分布

Fig. 1 Boiling point distribution of organic bio-oil components

收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 北京林业大学热点追踪项目(2017BLRD)

通信作者: 李 瑞(1975—), 男, 博士、副教授, 主要从事生物质热转化方面的研究。bjfu101@126.com

由图 1 分布特点,经前期实验验证,本文提出以精馏分离为主(图 2 所示)的下游产品利用方案,其中利用精馏将其中易于燃烧的部分分离得到燃油粗品,将燃烧性欠佳的酚类等物质分离得到化学品作为利润增值点,同时得到木醋液(富水部分)、粗乙酸及生物沥青,因此低沸点的水、乙酸分离是整个生物油利用的基础环节,分离方案的经济性是整个精制工艺的重要考虑。

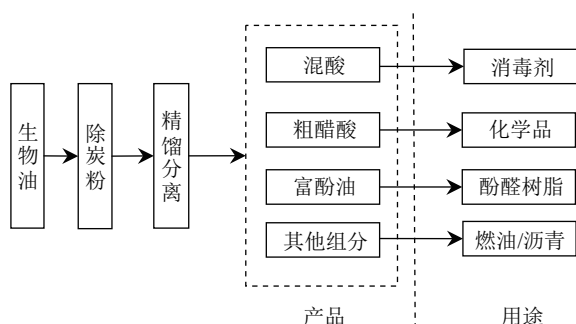


图2 生物油分离及利用方案

Fig. 2 System utilization scheme of bio-oil

目前,木醋液的使用标准和市场化推广尚不成熟,大量企业无法处理热解得到的木醋液,而木醋液应用主要定位于农林业、畜牧业、食品、环境、抑菌等方面,如农药添加剂、土壤改良剂、植物生长促进剂、食品添加剂、脱臭剂和保鲜剂等^[16]。诸多研究对于木醋液中的酚类

组分考虑甚少,酚类物质固然有一定的杀菌消毒作用,但若不控制其浓度也会对环境对人体产生损害^[17]。

根据产品利用方案,本研究的重点是采用以精馏为主的分离方案脱除水和酸过程中考虑到酚类物质对环境和人体的危害,严格控制酚类在脱出馏分中的含量,得到精制无(低)酚木醋液。在实验室间歇精馏得到目标产物的基础上,本文采用化工流程模拟软件对不同工艺路线进行设计计算,根据生物油物系特点及研究重点,对于强极性水、酸与其他极性相对较弱的酚、醛组分之间的气液平衡进行计算,选用 NRTL 热力学方程,如式(1):

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_j x_j \tau_{ji} G_{ji}}{\sum_k x_k G_{ki}} + \sum_j \frac{x_j G_{ij}}{\sum_k x_k G_{kj}} \left(\tau_{ij} - \frac{\sum_m x_m \tau_{mj} G_{mj}}{\sum_k x_k G_{kj}} \right) \quad (1)$$

式中, γ_i ——组分 i 的活度系数; x_i ——组分 i 的摩尔分数; $G_{ij} = \exp(-\alpha_{ij} \tau_{ij})$, $\tau_{ij} = \alpha_{ij} + b_{ij}/T + e_{ij} \ln T + f_{ij} T$, $\alpha_{ij} = c_{ij} + d_{ij}(T - 273.15)$, $d_{ij} = d_{ji} = e_{ij} = e_{ji} = f_{ij} = f_{ji} = 0$, $\tau_{ii} = 0$, $G_{ii} = 1$ 。

生物油中含量 30%~50% 的水分与其他关键组分(主要考虑相近沸点、组分含量及关键分离目标)的非理想性、相互作用及气液平衡规律是精馏计算的基础,本文对 NRTL 方程中交互作用参数进行查阅和回归,详见表 1。

表 1 生物油各关键组分(1)与水(2)的 NRTL 交互作用参数(101.325 kPa)^[18-19]

Table 1 NRTL parameters of key components (1) and H₂O (2) (101.325 kPa)^[18-19]

组分	沸点/℃	相对含量/%	A_{ij}	A_{ji}	B_{ij}	B_{ji}	C_{ij}
乙酸甲酯	57	1.03	22.02	-1.84	-6912.71	1402.52	0.35
甲酸	101	1.47	4.52	-2.59	-1432.08	725.02	0.30
乙酸	118	4.24	-1.98	3.33	609.89	-723.89	0.30
4-羟基-3-甲氧基苯丙酮	126	3.24	-5.28	11.67	1909.60	-2441.97	0.20
糠醛	162	0.64	-5.87	7.11	2335.05	-1265.84	0.30
3-甲基-2-庚酮	167	1.07	0.06	10.00	483.17	-799.55	0.30
苯酚	182	1.99	2.30	-0.54	-879.70	1412.73	0.30
邻甲酚	191	2.92	18.25	-22.10	-6927.36	10000.00	0.30
对羟基苯甲醛	310	1.48	-16.98	12.56	4795.72	1987.24	0.30

注: A_{ij} 、 A_{ji} 、 B_{ij} 、 B_{ji} 和 C_{ij} 分别对应公式中的 a_{ij} 、 a_{ji} 、 b_{ij} 、 b_{ji} 和 c_{ij} ,用来校正 2 种组分之间的相互作用。

2 水、酸分离方案

生物油中水、醋酸及轻沸物占 50%以上比例,水的汽化潜热较大,简单蒸馏脱除水和乙酸不仅能耗大,而

且得到的馏分中酚类含量高,如前文所述,市场推广存在安全性问题,而作为废水处理不但会造成原料损失、降低经济性,还会增加环保压力。在前人将未精制的醋液作为叶面肥、消毒剂的应用探索基础上,本文通过低

成本精制手段得到低酚无毒醋液,以解决富水木醋液市场接受度和下游应用安全问题。本文针对水和酸的分离,根据不同的产品需求,提出 2 种分离方案,通过流程模拟计算,完成整套系统中不同反应器的参数设计与运行参数优化,通过各塔之间的热量耦合,减少工艺中的循环水量和蒸汽量,取得节能的效果,降低热解液相产物下游产品加工的生产成本。

2.1 两塔方案

如工艺流程(图 3)所示,热解液相产物 S101 进入脱轻塔 T101,将一部分水和轻沸物从原料里脱除,塔顶气相经 E103 和 E104 两级冷凝,一部分回流入塔,另一部分 S102 采出,塔釜液 S103 进入醋液塔 T201 后,脱除剩余的水和醋酸,塔釜脱除水和乙酸的物流 S203 作为后续燃料及富酚油原料。

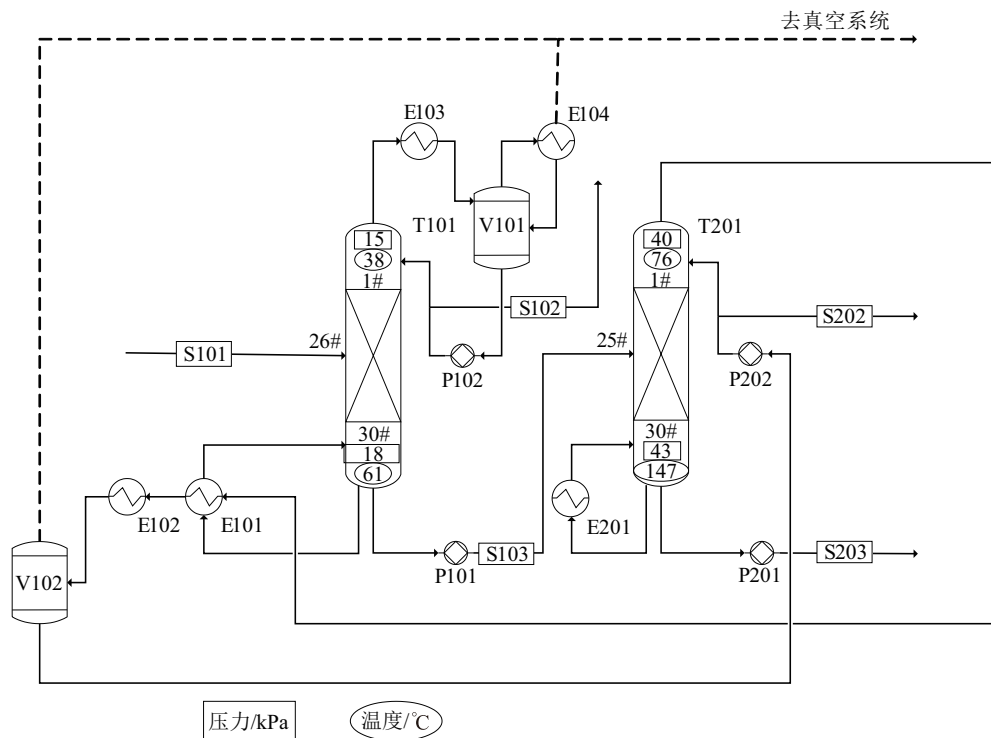


图3 生物油水和酸分离两塔方案工艺流程图
Fig. 3 Two-towers program for separation of water and acid

2 个塔顶产品物流可混合成为乙酸相对含量为 6.90% 的稀醋液(水 77.04%、酯类 1.72%、醛类 6.29%、酮类 5.40%、酚类 0.02%、其他酸类 2.63%),可作为农牧产品叶面肥、土壤改良剂、植物生长剂、畜牧业消毒剂等使用^[20]。吴巧美等^[21]用传统静置法结合乙醚萃取脱水得到热解终温 450 ℃时的精制木醋液,其组成为:酸类 8%、酚类 24%、酮类 22%、醛类 8%、醇类 3%、酯类 4%。隋海清等^[22]利用四级冷凝,将几乎所有有机酸和 80% 以上水分聚集在 0~20 ℃馏分中,但各级馏分仍含有 5% 以上的酚类。贺博^[23]利用分子蒸馏,在 70 ℃、60 Pa 的工况下得到轻质、中质和重质 3 种馏分,虽然能保证酸类组分和左旋葡聚糖分别集中在轻质和重质馏分中,但 3 种馏分中酚类都达到 30%~60%,各馏分醇类和醛类的含量也很接近,需进一步分离才能利用,主要物流组分见表 2。本流程所得稀醋液中酚类含量极

低,这也是本产品方案设计的一个重点考虑,得到无酚低毒的木醋液,为产品推广提供技术保障。另外,前 2 个塔能将水和酸全部分离出去,为后续产品利用和分离提供保障。

表 2 两塔方案各物流组分含量(%)
Table 2 Material composition of two-towers program(%)

物流	水	醋酸	组分			
			<100 ℃	100~180 ℃	180~300 ℃	>300 ℃
S102	64.20	—	7.20	28.40	0.04	—
S202	86.20	11.80	2.00	0.02	—	—
S203	—	0.20	—	40.20	35.90	23.60

在流程设计中,通过调整 T101、T102 操作压力,采用热量耦合手段,将 T201 塔顶蒸汽作为 T101 塔釜再

沸器 E101 的加热蒸汽,再由 E102 冷凝后经泵 P202 一部分回流入塔,一部分采出,整个冷凝过程放出热量 1801 MJ/h,而 E101 需热量 1582 MJ/h,全部由 T201 塔顶蒸汽提供。T201 塔顶采出物流 S202 温度为 76 ℃,T101 塔釜物流 S103 温度为 61 ℃,换热温差为 15 ℃,可有效换热。而如果不进行热量耦合,整个流程约需蒸

汽 2.1 t/h,循环水 111.2 m³/h。相比而言,本流程设计可节约蒸汽 0.8 t/h,循环水 47.9 m³/h,每小时可节约成本 139 ¥,为蒸汽和循环水总成本的 40%。按照产品方案规划和物流 S203 的后续分离模拟,对循环水、低温水、蒸汽和产品价值的初步估算及每吨利润见表 3,富酚油中酚类含量为 62.2%。

表 3 两塔方案成本估算(每吨热解液相产物计)
Table 3 Costs estimation of two-towers (per ton bio-oil)

项目	收入项			消耗项				利润/¥
	木醋液	富酚油	燃油	循环水	低温水	蒸汽	生物油	
数量/t	0.6	0.2	0.2	63.3	2.3	1.3	1.0	
单价/¥	2100.0	5000.0	4700.0	0.3	1.5	150.0	1300.0	1682.6
总价/¥	1260.0	1000.0	940.0	19.0	3.5	195.0	1300.0	

2.2 三塔方案

考虑到木醋液市场波动、增加下游产品的多样性,在两塔方案产品分布基础上增加粗乙酸产品,进行三塔方案设计。如图 4 所示,生物油 S101 进入脱轻塔 T101,将一部分水和轻沸物从原料里脱除,塔顶气相经 E103 和 E104 两步冷凝,一部分回流入塔,另一部分 S102 采出。塔釜液 S103 进入脱水塔 T201 脱除剩余的水,T201 塔顶部分气相 S202 与 T101 塔釜物料换热,经

E101 和 E102 冷凝后,液相一部分回流入塔,一部分采出。塔釜液 S203 进入脱酸塔 T301,将剩余的醋酸分离出来,塔顶得到纯度为 96.7%的粗醋酸产品(见表 4)。2 个塔顶物流 S102 和 S202 混合得到的木醋液乙酸相对含量为 1.13%(水 81.38%、酯类 1.82%、醛类 6.66%、酮类 5.71%、酚类 0.22%、其他酸类 3.05%),塔釜采出物流 S303 作为后续燃料及酚油分离的中间原料,不凝气与来自 E102、E104 的气体一起去真空系统。

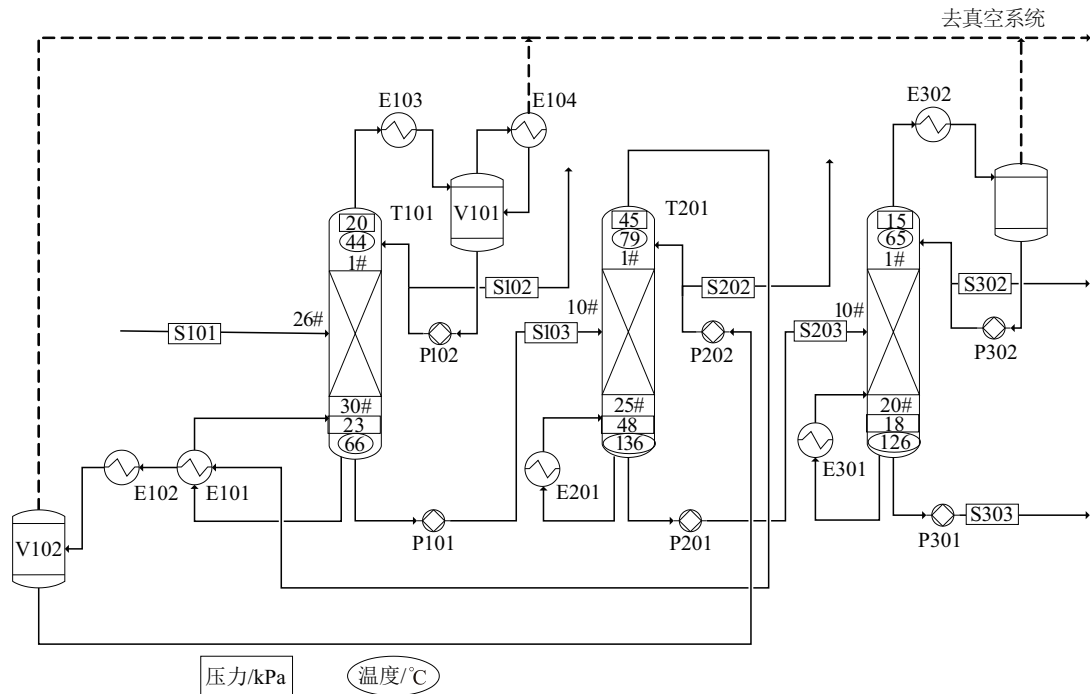


图 4 生物油水和酸分离三塔方案工艺流程图
Fig. 4 Three-towers program for separation of water and acid

表4 三塔方案各物流组分含量(%)						
Table 4 Material composition of three-towers program(%)						
物流	水	醋酸	组分			
			<100 ℃	100~180 ℃	180~300 ℃	>300 ℃
S102	64.4	—	7.0	28.4	0.1	—
S202	94.7	2.0	2.4	0.6	0.3	—
S302	—	96.7	—	3.2	—	—
S303	—	0.1	—	39.9	36.1	23.9

整个冷凝过程放出热量 1801 MJ/h,T101 塔釜再沸

器 E101 需热量 1582 MJ/h,全部由 T201 塔顶蒸汽提供,T201 塔顶采出物流 S202 温度为 79 ℃,T101 塔釜物流 S103 温度为 66 ℃,换热温差为 13 ℃,可有效换热。类似于两塔方案,如果不考虑热量耦合,需蒸汽 2.4 t/h,循环水 123.9 m³/h,本方案节约蒸汽 0.8 t/h,循环水 44.4 m³/h,每小时可节约成本 133 ¥,为蒸汽和循环水总成本的 33%。按照产品方案规划和物流 S303 后续分离模拟,初步成本估算见表 5,富酚油中酚类含量为 63.3%。

表5 三塔方案成本估算(每吨热解液相产物计)									
Table 5 Costs estimation of three-towers (per ton bio-oil)									
项目	收入项				消耗项				利润/¥
	稀醋液	富酚油	燃油	醋酸	循环水	低温水	蒸汽	原料	
数量/t	0.568	0.203	0.192	0.037	79.600	2.500	1.600	1.000	
单价/¥	2000.0	5000.0	4700.0	2300.0	0.3	1.5	150.0	1300.0	1574.0
总价/¥	1136.0	1015.0	902.4	85.1	23.9	3.4	236.8	1300.0	

3 结果与讨论

1)各类有机物按照馏程有规律地富集,可采用精馏为主的分离手段。与其他分离工艺相比,精馏工艺具有分离效率高、易于实现产业化等优点,是实现生物油分级利用的有效途径。

2)2 种方案均得到无酚低毒木醋液产品,粗乙酸及用来加工富酚油和锅炉燃油的馏分,按照生物油成本 1300 ¥/t 计算,两塔方案可得毛利润 1687 ¥,三塔方案还得到 96.7%的醋酸粗品,每吨利润为 1574 ¥。

3)2 种方案得到的木醋液中酚类含量分别为 0.02%和 0.22%,远低于市场木醋液酚类含量,能更为安全地应用于农牧产品生产。

4)通过采用热量耦合,本文 2 种方案分别可节约蒸汽和循环水成本 40%和 33%。

本工作主要模拟生物油的脱水脱酸过程,对后续有有机物分离做简单模拟用于保守的成本估算,这部分的详细工作正在进行。

[参考文献]

[1] ZHANG J, NOTLE M W, SHANKS B H. Investigation of primary reactions and secondary effects from the pyrolysis of different celluloses[J]. ACS sustainable chemistry & engineering, 2014, 2(12): 2820-2830.

[2] 朱锡锋. 生物质热解原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 25-294.

ZHU X F. Principle and technology of biomass pyrolysis [M]. Beijing: Science Press, 2014: 259-294.

[3] 郭祚刚, 王树荣, 朱颖颖, 等. 生物油酸性组分分离精制研究[J]. 燃料化学学报, 2009, 37(1): 49-52.

GUO Z G, WANG S R, ZHU Y Y, et. Separation of acid compounds for refining biomass pyrolysis oil [J]. Journal of fuel chemistry and technology, 2009, 37(1): 49-52.

[4] 郭姝君, 鲁俊祥, 常杰, 等. 联立双氧水氧化和催化酯化生物油提质研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 2020-2026.

GUO S J, LU J X, CHANG J, et al. Catalytic upgrading bio-oil by mean of H₂O₂ oxidation and esterification to improve fuel characteristics[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(7): 2020-2026.

[5] 许细薇, 李治宇, 庄文俞, 等. 超声波与添加醇和乳化剂乳化提质热解生物油研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 320-326.

XU X W, LI Z Y, ZHUANG W Y, et al. Upgrading of bio-oil and its heavy composition by using emulsification [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 320-326.

[6] ZHANG X, CHEN L, KONG W, et al. Upgrading of bio-oil to boiler fuel by catalytic hydrotreatment and esterification in an efficient process[J]. Energy, 2015 (84): 83-90.

[7] 张洪勋, 庄续亮, 杨建州. 自热解油中制备1,6-脱水-β-

- D-吡喃葡萄糖的方法:CN00107956.5[P]. 2000-06-05.
ZHANG H X, ZHUANG X L, YANG J Z. Method for preparing 1, 6-anhydro- β -D-glucopyranose from pyrolyzed oil: CN00107956.5[P]. 2000-06-05.
- [8] STRADAL J A, UNDERWOOD G L. Process for producing hydroxyacetaldehyde: US5252188[P]. 1993.
- [9] 邹勇, 尉芹, 郑冀鲁, 等. 生物油中酚类物质的富集工艺优化研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 226-230.
ZOU Y, WEI Q, ZHENG J L, et al. Optimization of the technology of enriching phenolic components from bio-oil [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 226-230.
- [10] WANG S R, WANG Y R, CAI Q J, et al. Multi-step separation of monophenols and pyrolyticlignins from the water-insoluble phase of bio-oil[J]. Separation & purification technology, 2014, 122(3): 248-255.
- [11] 何寿林, 杨昌炎, 关媛. 生物油分离制备化学品和燃油的研究进展[J]. 现代化工, 2008, 28(s2): 79-84.
HE S L, YANG C Y, GUAN Y. Advance in fractional separation of bio-oil for chemicals and fuel oil[J]. Modern chemical industry, 2008, 28(s2): 79-84.
- [12] WANG Y R, WANG S R, LENG F R, et al. Separation and characterization of pyrolyticlignins from the heavy fraction of bio-oil by molecular distillation[J]. Separation & purification technology, 2015, 152: 123-132.
- [13] 蒋恩臣, 熊磊明, 王明峰, 等. 生物质热解挥发物两级冷凝器的设计[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(5): 110-115.
JIANG E C, XIONG L M, WANG M F, et al. Development of biomass pyrolysis volatiles fractional condenser[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(5): 110-115.
- [14] WANG S R, WANG Y R, LENG F R, et al. Separation and enrichment of catechol and sugars from bio-oil aqueous phase[J]. Bioresources, 2016, 11(1): 1707-1720.
- [15] 田启魁. 生物油萃取分离富酚油及改性脲醛树脂胶粘剂的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
TIAN Q K. Study on urea formaldehyde resin adhesive modified by phenol-oil extracted from bio-oil [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [16] 刘长风, 李敏, 高品一, 等. 木醋液的来源、成分及其应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(1): 28-32.
LIU C F, LI M, GAO P Y, et al. Research progress of source, chemical compositions and application of wood vinegar[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2016, 32(1): 28-32.
- [17] 罗尔伦, 王杰, 黎永乐. 水中酚类化合物的检测方法研究进展[J]. 粮食流通技术, 2017, 3(6): 70-72.
LUO E L, WANG J, LI Y L. Research progress on detection methods of phenolic compounds in water [J]. Modern food, 2017, 3(6): 70-72.
- [18] 钟心泰, 黄延德. 醋酸-甲酸-水体系汽液平衡数据的测定与关联[J]. 化学工程, 1983(5): 66-74.
ZHONG X T, HUANG Y D. Measurement and correlation of vapor - liquid equilibrium data in acetic acid-formic acid-water system [J]. Chemical engineering, 1983(5): 66-74.
- [19] 孙毅, 谢清若, 韦藤幼, 等. 水-乙酸-糠醛三元体系相平衡数据关联与共沸精馏过程模拟[J]. 化工学报, 2011, 62(7): 1800-1807.
SUN Y, XIE Q R, WEI T Y, et al. Correlation of VLE data and azeotropic distillation simulation for furfural-water-acetic acid ternary system[J]. Journal of chemical industry, 2011, 62(7): 1800-1807.
- [20] 周岭, 蒋恩臣, 张强, 等. 木醋液的精制方法及其在农林生产上的应用[J]. 可再生能源, 2007, 25(4): 56-60.
ZHOU L, JIANG E C, ZHANG Q, et al. The wood vinegar refining methods and their application in agricultural and forestry production[J]. Renewable energy resources, 2007, 25(4): 56-60.
- [21] 吴巧美, 张守玉, 候宝鑫, 等. 不同温度下木屑热解制备木醋液实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1534-1541.
WU Q M, ZHANG S Y, HOU B X, et al. Experiment study of wood vinegar production from sawdust under different pyrolysis temperature [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(6): 1534-1541.
- [22] 隋海清, 李攀, 王贤华, 等. 生物质热解气分级冷凝对生物油特性的影响[J]. 化工学报, 2015, 66(10): 4138-4144.
SUI H Q, LI P, WANG X H, et al. Influence on bio-oil by fractional condensation of biomass pyrolysis vapor [J]. CIESC journal, 2015, 66(10): 4138-4144.
- [23] 贺博. 生物油的分级分离和初步改性[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
HE B. Bio-oil fractionation and preliminary modification [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

SYSTEM UTILIZATION OF BIO-OIL AND SEPARATION OF ACID AND WATER

Yang Xiaoxiao^{1,2}, Han Duoduo^{1,2}, Cao Hong^{1,2}, Li Rui^{1,2}

(1. MOE Engineering Research Center of Forestry Biomass Materials and Bioenergy, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Lignocellulosic Chemistry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the design of pilot plant, the composition and the boiling point distribution of the components were analyzed. A utilization scheme of pyrolysis liquid product was proposed. It mainly discussed the removal of water and acid which restrict the large-scale utilization of bio-oil. Two processes were designed for different requirements, and the best operating parameters were obtained. For the large energy consumption of distillation process, the products proportion and operating pressure were adjusted to achieve heat coupling between the towers. The simulation results indicated that both schemes can save about 40% of energy consumption, phenolic content was strictly controlled within 0.22% to ensure the low toxicity of agricultural products.

Keywords: biomass; pyrolysis; seperature; energy utilization; process design