doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.035

木屑热解挥发物冷凝特性研究

王明峰[1]　陈志文[1]　蒋恩臣[1]　任永志[1]　韩　平[2]　孙　焱[1]
(1.华南农业大学材料与能源学院，广州 510642；2.东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030)

摘要： 在自行设计的生物质热解挥发物两级冷凝特性参数测试系统上，进行了木屑在450、550、650℃下热解挥发物冷凝特性研究，其中，一级冷凝采用空气作为冷凝介质，二级冷凝采用水作为冷凝介质，计算了表面局部冷凝换热系数，以及冷凝液膜热阻和厚度。结果表明：一级冷凝换热系数随着温度的升高而减小，在热解温度为450℃时达到最大值671.02 $W/(m^2\cdot K)$；二级换热系数随着温度的升高先增大后减小，在热解温度为550℃时达到最大值1.484×10^5 $W/(m^2\cdot K)$。基于冷凝器内壁一维稳态冷凝换热特性，分析了冷凝液膜形成过程，存在3个阶段：液膜形成、液膜积累、液膜流动。在液膜形成和积累阶段，液膜厚度逐渐增大，热阻变大；液膜厚度达到一定程度后，冷凝液产生流动，在液膜流动初期，液膜厚度逐渐减小，热阻变小；在稳定流动期，热阻基本保持稳定。

关键词： 木屑；热解；冷凝特性；换热系数；液膜模型

中图分类号： S216；TQ026　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2017)04-0271-05

Condensation Characteristics of Volatile Matter from Sawdust Pyrolysis

WANG Mingfeng[1]　CHEN Zhiwen[1]　JIANG Enchen[1]　REN Yongzhi[1]　HAN Ping[2]　SUN Yan[1]
(1. *College of Material and Energy*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Pyrolysis is a relatively simple, inexpensive, and robust thermochemical technology for transforming biomass into bio-oil, biochar and syngas. While the intention of slow pyrolysis is to produce mainly charcoal, fast pyrolysis is meant to convert biomass to a maximum quantity of liquids (bio-oil). Biochar can be used with existing infrastructure as a replacement for pulverized coal, bio-oil can be used as a fuel in existing industrial boilers. The pyrolysis of sawdust contains volatile bio-oil and non-condensing gas, so the condensation characteristics are different from those of other simple mixture. Based on the test system of biomass pyrolysis volatile matter condensation characteristic parameter, the experiment of condensation characteristics of pyrolysis volatile was carried out at 450℃, 550℃ and 650℃. The condensation characteristics of volatile matter produced at different pyrolysis temperatures were tested, and the heat transfer coefficient, the thermal resistance and thickness of condensation liquid film were calculated. Based on the one-dimensional heat transfer characteristics of liquid condensation, the condensate film formation process had three stages: formation, accumulation and flow of liquid film. The results showed that the first stage condensation heat transfer coefficient was decreased with the increase of temperature, biomass volatile surface heat transfer coefficient at 450℃ was the highest, which was 671.02 $W/(m^2\cdot K)$; with the increase of temperature, the heat transfer coefficient of the second stage was increased first and then decreased, biomass volatile surface heat transfer coefficient at 550℃ was the highest, which was 1.484×10^5 $W/(m^2\cdot K)$. According to the experimental value and the hypothesis of condensate film, in the film formation and accumulation stage, the film thickness was gradually increased and the thermal resistance was decreased; early in the liquid film flow stage, with the decrease of the film thickness, the thermal resistance was decreased; in the steady flow stage, resistance was remained stable. The research result can provide reference for the on-line collection of bio-oil and the design of bio-oil condenser in continuous pyrolysis equipment.

Key words: sawdust; pyrolysis; condensation characteristics; heat transfer coefficient; liquid film model

---

收稿日期：2016-07-28　修回日期：2016-10-13

基金项目： 科技部农业科技成果转化资金项目(20150237)和广东省科技计划项目(20160221)

作者简介： 王明峰(1982—)，男，讲师，主要从事生物质能利用工程研究，E-mail: wangmingfeng@scau.edu.cn

通信作者： 蒋恩臣(1960—)，男，教授，博士生导师，主要从事生物质能利用工程研究，E-mail: ecjiang@scau.edu.cn

引言

我国生物质能源丰富[1-2]。近几十年来热解被认为是一种很有前景的生物质利用技术[3]。不同的热解条件能够产生不同比例的气、液、固三态产物：其中固体炭可以用作活性剂；含有CO、CO_2、H_2、CH_4及饱和或不饱和烃类化合物等不可凝气体[4]则可以用作工业或者民用燃气；液态生物油可进一步分离和提取，制成燃料油和化工原料，具有很高的利用价值。因此国内外研究人员针对热解装置和液体产物收集技术进行了相关研究，由于生物油主要由各类组分复杂的含氧不饱和烃类衍生物组成[5-10]，目前分离生物油仍主要依靠常规冷凝手段。

分级冷凝是对生物油在线分离的手段之一，有研究人员通过研究水蒸气的冷凝特性来研究生物油的冷凝特性[11-16]，发现冷凝液膜热阻以及不可凝气体热阻影响着冷凝过程，KIRAN等[17-19]通过欧拉方法对生物质快速热解气中11种主要成分的水冷间接接触式冷凝传质过程进行了数值模拟，建立了气液两相的多组分传质模型，结果表明，不同组分在不同冷凝时间的冷凝效率不同。MOHAN等[20-23]研究表明：分级冷凝技术可以有效收集生物油，提高生物油的品质，因此研究生物油在不同冷凝温度区间的冷凝特性，对于有针对性地在线收集生物油有理论和应用价值。

目前，针对生物质热解挥发物冷凝过程机理的研究较少，缺少生物油冷凝基础参数研究，对冷凝过程中不凝气的影响、气液两相传热传质特性问题研究不足。本文针对木屑在不同热解温度下产生的挥发物冷凝特性进行测试，计算冷凝换热系数、冷凝液膜热阻和厚度，为热解挥发物冷凝工艺和装置的设计提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　实验原料

本文使用的生物质木屑原料采自广州市某木材厂，木屑原料进行干燥、粉碎和过30目筛处理后，经工业分析测得其含水率为6.62%，灰分质量分数为5.02%，挥发分质量分数为75.06%，固定碳质量分数为13.31%，量热仪测得其低位热值为15.77 MJ/kg。

1.2　冷凝特性测试装置

热解挥发物冷凝特性测试系统如图1所示，该测试系统主要由连续热解部分、测试管及数据记录部分、冷却水部分和冷凝液处理及排气部分组成。其中，连续热解反应发生装置为华南农业大学生物质能实验室自主研制的变螺距连续热解装置[24]。

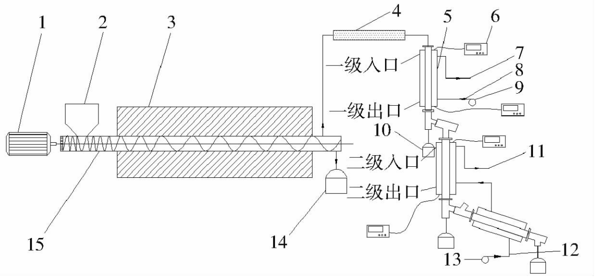


图1　连续热解挥发物冷凝测试系统

Fig.1　Condensation testing system for volatile matter of consecutive pyrolysis

1.输送电动机　2.入料料斗　3.加热炉体　4.粉尘过滤装置　5.保温层　6.温度传感器表头　7.空气出口　8.空气入口　9.气泵　10.取样瓶　11.冷凝水出口　12.冷凝水入口　13.水泵　14.炭箱　15.变螺距螺旋输送器

冷凝测试系统由三级直型冷凝系统组成（Φ29 mm/Φ24 mm），前两级冷凝系统包括内管热解气测试部分、冷凝介质测试部分和温度传感器分布测试与数据采集部分，使用的传感器为K型热电偶，用于测定一、二级冷凝管进出口处（一级入口、一级出口、二级入口、二级出口，分别距离热解气入口0.105、0.32、0.565、0.825 m）的热解气温度、冷凝管内壁温度、冷凝介质温度。

1.3　实验方法

在冷凝测试装置上对木屑进行热解温度为450、550、650℃的冷凝测试实验，处理量为1 kg/h。木屑原料通过连续热解装置热解后，产生的挥发分进入冷凝测试系统冷凝，不可凝气体由尾端排出。一级冷凝以空气作为冷凝介质，二级和三级冷凝则使用冷冻水，其中温度为11℃的冷凝水质量流量为1 200 kg/h，温度25℃，空气质量流量为4.257 kg/h。三级冷凝管的下端出口设置有生物油收集瓶，用以收集液态产物。

1.4　换热系数计算

冷凝系统局部表面换热系数由局部热流密度求出，局部热流密度通过冷却水侧的温度、流量和热流量求出，局部热流密度计算公式为[25]

$$q(x)=\frac{mC}{\pi d_i}\frac{\mathrm{d}T(x)}{\mathrm{d}x} \qquad (1)$$

式中　m——冷凝介质质量流量

C——冷凝介质的比定压热容，J/(kg·K)

T——轴向位置x处测得的水温或气温，℃

d_i——测试管内径，m

局部换热系数计算公式为[26-27]

$$h(x)=\frac{q(x)}{T_b-T_{w,i}} \qquad (2)$$

式中　T_b——内管挥发物温度，℃

$T_{w,i}$——内管内壁温度，℃

1.5　液膜热阻及厚度计算

液膜热阻由热流通量和液膜两侧温度差计算得到[19]，即

$$R=\frac{T_G-T_W}{q(x)} \tag{3}$$

式中　R——冷凝液膜热阻，$m^2 \cdot K/W$

T_G——冷凝管中热解气温度，℃

T_W——冷凝管内壁温度，℃

液膜厚度通过生物油流体热导率和液膜热阻计算得到[28-29]，即

$$d=\lambda R \tag{4}$$

式中　d——有效层流液膜厚度，m

λ——流体热导率，取 0.24 W/(m·K)

2　实验与结果分析

2.1　热解三态产率

热解三态产物产率如表 1 所示。随着热解温度的升高，炭产率减小；不凝气产率升高，在热解温度为 650℃时达到最大值 60.02%；生物油产率则随温度升高先升后降，在 550℃时达到最大值为 42.82%，挥发物含量随热解温度的升高而升高。

表 1　不同热解温度时木屑的产物产率

Tab.1　Three states yield of sawdust pyrolysis　　%

温度/℃	炭	生物油	不凝气
450	37.51	33.05	29.44
550	23.96	42.82	33.22
650	18.83	21.15	60.02

前两级生物油产率如图 2 所示。随着热解温度升高，一级油产率逐渐减小，在热解温度为 650℃时达到最小值 1.72%；二级油产率则呈现先增后减的趋势，在热解温度为 550℃时达到最大值 39.55%。

2.2　换热系数计算结果

3 个不同热解温度下的一、二级表面换热系数如图 3 所示。在 450℃和 550℃时，一级表面换热系数在实验前期波动较大，后期趋近于稳定，650℃时则全程呈现较大波动，这一现象也是木屑三态产物变化的直观表现，650℃挥发物产率最大，且不可凝气体含量最大，产生这种情况可能是单独受到冷凝生物油或者不凝气的影响，也可能是二者的综合影响，同时，450℃和 550℃的一级油产率大于 650℃，因此 450℃和 550℃时液膜更容易趋近稳定流动，维持稳定的局部换热系数；针对二级换热系数，550℃时的二级油产率最大，因此更能形成稳定流动，其局部换热系数相比其他 2 个热解温度下的局部换热系数更趋于稳定，650℃时热解挥发物中含有大量的不可凝气体成分，二级冷凝器中局部换热系数波动情况更严重。木屑热解挥发物冷凝平均局部表面换热系数如图 4 所示。随着热解温度升高，一级换热系数逐渐减小，450℃时为 671.02 $W/(m^2 \cdot K)$，高于 550℃时的 402.89 $W/(m^2 \cdot K)$ 和 650℃时的 380.20 $W/(m^2 \cdot K)$；二级换热系数先增加后减小，550℃时取得最大值 1.484×10^5 $W/(m^2 \cdot K)$，高于 450℃和 650℃的相应值。由此可见，冷凝换热存在最大值，当超过冷凝换热最大值时，继续升温增加热解气的流量，不能对热解气中的可凝成分进行有效的冷凝。

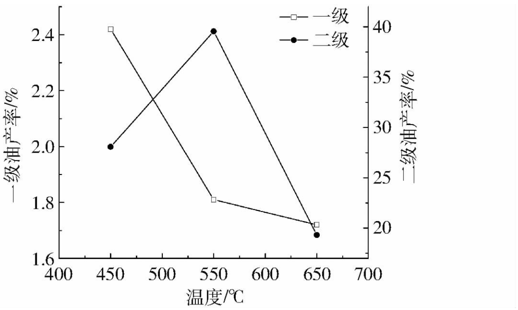


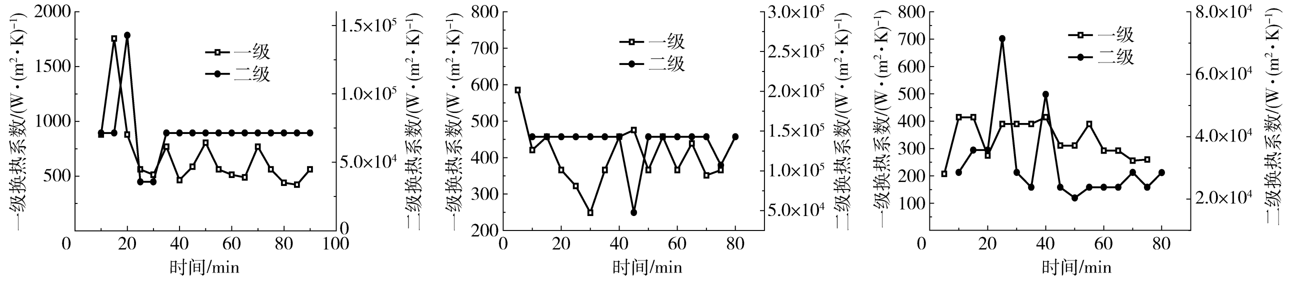
图 2　各级油产率分析

Fig.2　Analysis of oil production at different levels

3　液膜模型及分析

3.1　液膜模型

根据平壁一维稳态传热的结论[19]，忽略液膜可能存在的对流传热以及辐射传热，热解气在冷凝器中冷凝时，首先在壁面上形成液珠，当冷凝量较大



(a) 450℃　(b) 550℃　(c) 650℃

图 3　冷凝器局部表面换热系数

Fig.3　Local surface heat transfer coefficient of condenser

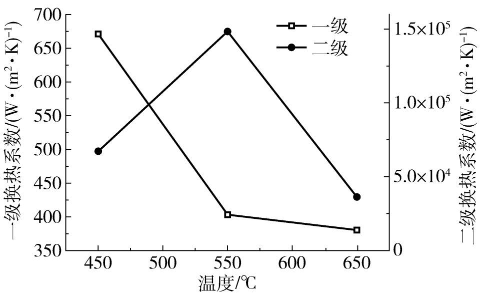


图 4　木屑热解挥发物冷凝平均局部表面换热系数

Fig. 4　Average local surface heat transfer coefficient of sawdust pyrolysis volatiles condensation

时，液珠向下流动积累，最终在壁面上积累形成一层液膜。液膜冷凝过程分为：液膜形成、液膜积累、液膜流动 3 个阶段，如图 5 所示。

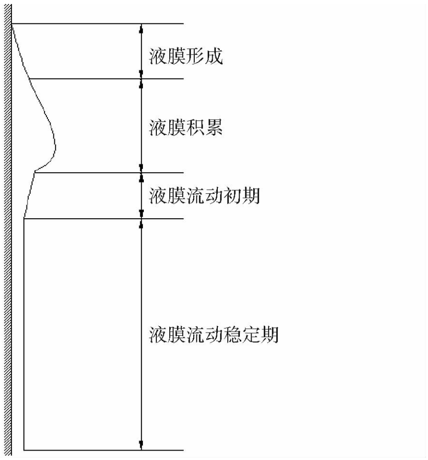
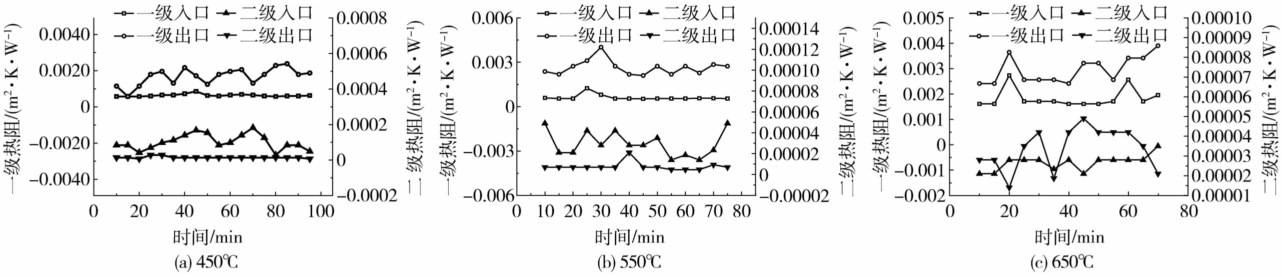


图 5　热解气冷凝液膜形成过程示意图

Fig. 5　Schematic of formation process of pyrolysis gas condensate film

3.2　液膜热阻及厚度计算结果

液膜热阻计算结果如图 6 所示。各个位置的冷凝液膜热阻随着实验的进行呈现波动状态，说明随着热解的进行，热解气中的可凝成分在不断变化，使得同一个位置上的液膜热阻不断变化，液膜厚度也相应不断变化。相同热解温度下，一级出口热阻大出口的冷凝液流量比一级入口冷凝液流量大；二级出口热阻小于二级入口热阻，且更加稳定。二级使用水冷，冷凝效果好，在二级入口处已经有大量液珠的冷凝情况出现，在二级出口时，由于冷凝液流量大，因此流动状态更稳定，热阻也更为稳定。



(a) 450℃　(b) 550℃　(c) 650℃

图 6　不同热解温度下木屑热解挥发物的冷凝液膜热阻

Fig. 6　Thermal resistance of condensation liquid film of sawdust pyrolysis volatiles at different pyrolysis temperatures

液膜热阻随着位置的变化如图 7 所示。木屑热解挥发物在不同热解温度下的冷凝热阻随位置的变化趋势一致，呈现先增加后减小趋势。由式（4）可知，液膜热阻和液膜厚度随位置的变化趋势相同，热阻和厚度增加段对应液膜形成阶段和液膜积累阶段，热阻和厚度减小段对应液膜流动初期。在 650℃时，二级入口液膜热阻为 2.68×10^{-5} m^2·K/W，二级出口为 3.30×10^{-5} m^2·K/W，对应液膜厚度分别为 6.69 μm 和 8.25 μm，热阻近似相等，说明在 650℃时，二级入口和二级出口之间的流动接近液膜流动稳定期。

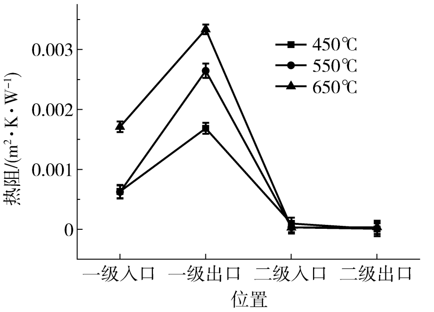


图 7　不同热解温度下木屑热解挥发物的冷凝液膜平均热阻

Fig. 7　Average thermal resistance of condensation liquid film of sawdust pyrolysis volatiles at different pyrolysis temperatures

4　结论

（1）随着热解温度不断升高，冷凝器的一级换热系数减小，在热解温度为 450℃时达到最大值 671.02 W/(m^2·K)，二级换热系数先增后减，550℃时达到最大值 1.484×10^5 W/(m^2·K)。对比一级和二级油产率，与换热系数的变化趋势相同，说明在一定的实验条件下，冷凝器的冷凝能力存在最大值，当热解挥发物流量超过冷凝能力最大值时便无法进行有效的冷凝。

（2）运用本文建立的冷凝液膜模型，对实验值进行计算的结果表明，生物油在冷凝管中的冷凝符合建立的液膜模型，存在液膜形成、液膜积累、液膜流动 3 个阶段。在液膜形成阶段，液膜厚度

开始增加，热阻逐渐变大；在液膜积累阶段，液膜持续变厚，热阻持续变大，直到积累到极限厚度，静止状态开始转为流动状态；在流动初期，液膜厚度逐渐变薄，液膜热阻逐渐变小，距离足够时，流动进入稳定期，液膜厚度基本不变，液膜热阻基本不变。

参 考 文 献

1 谌凡更，欧义芳. 木质纤维原料的热化学液化［J］. 纤维素科学与技术，2000，8（1）：44 – 57.
CHEN Fan'geng, OU Yifang. Thermochemical liquefaction of lignocellulosic materials ［J］. Journal of Cellulose Science and Technology，2000，8（1）：44 – 57.（in Chinese）

2 潘小苏. 林木生物质能源资源潜力评估研究［D］. 北京：北京林业大学，2014.
PAN Xiaosu. Potential evaluation of woody biomass energy ［D］. Bejing：Beijing Forestry University，2014.（in Chinese）

3 林木森，蒋剑春. 生物质快速热解技术现状［J］. 生物质化学工程，2006，40（1）：21 – 26.
LIN Musen，JIANG Jianchun. A review on fast pyrolysis of biomass ［J］. Biomass Chemical Engineering，2006，40（1）：21 – 26.（in Chinese）

4 HORNE P A, WILLIAM P T. Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass ［J］. Fuel，1996，75（9）：1051 – 1059.

5 刘荣厚，张春梅. 我国生物质热解液化技术的现状［J］. 可再生能源，2004（3）：11 – 14.
LIU Ronghou，ZHANG Chunmei. The research status of biomass pyrolysis for liquid product in China［J］. Renewable Energy，2004（3）：11 – 14.（in Chinese）

6 易维明，柏雪源. 利用热等离子体进行生物质液化技术的研究［J］. 山东工程学院学报，2000，14（1）：9 – 12.
YI Weiming，BAI Xueyuan. Biomass liquefaction in a high-temperature plasma jet flow ［J］. Journal of Shangdong Institute of Technology，2000，14（1）：9 – 12.（in Chinese）

7 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（5）：110 – 115.
JIANG Enchen，XIONG Leiming，WANG Mingfeng，et al. Development of biomass pyrolysis volatiles fractional condenser ［J］. Journal of Northeast Agricultural University，2014（5）：110 – 115.（in Chinese）

8 SANTOS R M，SANTOS A O，SUSSUCHI E M，et al. Prolysis of mangaba seed：production and characterization of bio-oil ［J］. Bioresource Technology，2015，196：43 – 48.

9 陈汉平，杨海平，李斌，等. 生物质流化床气化焦油析出特性的研究［J］. 燃料化学学报，2009，37（4）：433 – 437.
CHEN Hanping，YANG Haiping，LI Bin，et al. Evolving characteristics of tar during biaomass fluidized bed gasification ［J］. Journal of Fuel Chemistry and Technology，2009，37（4）：433 – 437.（in Chinese）

10 李艳美，柏雪源，易维明，等. 小麦秸秆热解生物油主要成分分析与残炭表征［J］. 山东理工大学学报：自然科学版，2016，30（1）：1 – 4.
LI Yanmei，BAI Xueyuan，YI Weiming，et al. Analysis on the main chemical components in bio-oil pyrolysis from wheat straw and char characterization ［J］. Journal of Shandong University of Technology：Natural Science Edition，2016，30（1）：1 – 4.（in Chinese）

11 AL-SHAMMARI S B，WEBB D R，HEGGS P. Condensation of steam with and without the presence of non-condensable gases in a vertical tube ［J］. Desalination，2004，169（2）：151 – 160.

12 LEE K Y，KIM M H. Effect of an interfacial shear stress on steam condensation in the presence of a non-condensable gas in a vertical tube ［J］. International Journal of Heat and Mass Transfer，2008，51（21 – 22）：5333 – 5343.

13 MUÑOZ-COBO J L，HERRANZ L，SANCHO J. Turbulent vapor condensation with non-condensable gases in vertical tubes ［J］. Heat Mass Transfer，1996，39（15）：3249 – 3260.

14 DEHBI A，GUENTAY S. A model for the performance of a vertical tube condenser in the presence of non-condensable gases ［J］. Nuclear Engineering and Design，1997，177（1 – 3）：41 – 52.

15 KIM J，LEE Y，AHN H，et al. Condensation heat transfer characteristic in the presence of non-condensable gas on natural convection at high pressure ［J］. Nuclear Engineering and Design，2009，239（4）：688 – 698.

16 李晓伟，吴莘馨，何树延. 含不凝性气体冷凝对流传热传质过程的数值模拟［J］. 工程热物理学报，2013，34（2）：302 – 306.
LI Xiaowei，WU Xinxin，HE Shuyan. Numerical simulation of the heat and mass transfer process of convective condensation with non-condensable gas ［J］. Journal of Engineering Thermophysics，2013，34（2）：302 – 306.（in Chinese）

17 KIRAN Kumar Palla V S，PAPADIKIS K，GU S. Computational modelling of the condensation of fast pyrolysis vapours in a quenching column. Part A：hydrodynamics，heat transfer and design optimization ［J］. Fuel Processing Technology，2015，131：59 – 68.

18 KIRAN Kumar Palla V S，PAPADIKIS K，GU S. Computational modelling of the condensation of fast pyrolysis vapours in a quenching column. Part B：phase change dynamics and column size effects ［J］. Fuel Processing Technology，2015，144：42 – 55.

19 KIRAN Kumar Palla V S，PAPADIKIS K，GU S，et al. A numerical model for the fractional condensation of pyrolysis vapours ［J］. Biomass and Bioenergy，2015，74：180 – 192.

20 MOHAN D，PITTMAN C U，STEELE P H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil：a critical review ［J］. Energy & Fuels，2006，20（3）：848 – 889.

（下转第 **223** 页）

QU Zhongyi, YANG Xiao, HUANG Yongjiang. Analysis and assessment of water-saving project of Hetao irrigation district in Inner Mongolia [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 70 – 76. (in Chinese)

14 SU Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(1): 85 – 99.

15 张娜,屈忠义,杨晓,等. 贝叶斯模型在土壤转换函数中的应用与适应性评价[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):149 – 155. http:∥www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20140225&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 02. 025.

ZHANG Na, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Application and adaptability evaluation of Bayesian model in soil transfer functions [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 149 – 155. (in Chinese)

16 茌伟伟. 基于分布式水温模型的灌区用水效率评价[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.

CHI Weiwei. Water use performance for irrigation area based on distributed hydrological model [D]. Beijing: China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)

17 蔡甲冰,刘钰,白亮亮,等. 低功耗经济型区域墒情实时监测系[J]. 农业工程学报,2015,31(20):88 – 94.

CAI Jiabing, LIU Yu, BAI Liangliang, et al. Low-cost and low-power dissipation system to monitor soil water status inreal time for areal irrigation management [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 88 – 94. (in Chinese)

18 YANG Y T, SHANG S H, JIANG L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 164:112 – 122.

19 BRUTSAERT W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies [J]. Water Resources Research, 1975, 11(5): 742 – 744.

20 CHOUDHURY B J, MONTEITH J L. A four-layers model for the heat budget of homogeneous land surfaces [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, 114(480): 373 – 398.

21 LIU Y, PEREIRA L S, FEMANDO R M. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation [J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1 – 2): 27 – 40.

22 白亮亮,蔡甲冰,刘钰,等. 灌区种植结构时空变化及其与地下水相关性分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,47(9):202 – 211. http:∥www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20160929&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 09. 029.

BAI Liangliang, CAI Jiabing, LIU Yu, et al. Temporal and spatial variation of crop planting structure and its correlation analysis with groundwater in large irrigation area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 202 – 211. (in Chinese)

(上接第 275 页)

21 左武,金保昇,黄亚继,等. 分级冷凝回收城市污泥热解油[J]. 东南大学学报:自然科学版,2013,43(1):125 – 129.

ZUO Wu, JIN Baosheng, HUANG Yaji, et al. Pyrolysis oil retrieving from sewage sludge by fractional condensation [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(1):125 – 129. (in Chinese)

22 张志强,姜翠玉,宋林花,等. 苯乙烯-顺酐共聚物的合成优化及其降黏效果[J]. 化学工业与工程,2012,29(2):9 – 14.

ZHANG Zhiqiang, JIANG Cuiyu, SONG Linhua, et al. Synthesis of styrene vlaleic anhydride copolymer and its effect on viscosity reduction [J]. Chemical Industry and Engineering, 2012, 29(2):9 – 14. (in Chinese)

23 龙潭. 生物质热解气冷凝及生物油燃烧的实验研究与数学模拟[D]. 合肥:中国科学技术大学,2014.

LONG Tan. Experimental research and mathematical simulation of biomass pyrolysis condensation and bio-oil combustion [D]. Hefei: University of Science & Technology China, 2014. (in Chinese)

24 王明峰,蒋恩臣,李伯松,等. 稻壳连续热解特性研究[J]. 太阳能学报,2012,33(1):168 – 172.

WANG Mingfeng, JIANG Enchen, LI Bosong, et al. Study on continious pyrolysis of rice dusk [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(1):168 – 172. (in Chinese)

25 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:370 – 420.

26 蒋恩臣,郭信辉,王明峰,等. 木屑热解挥发物冷凝特性及实验研究[J]. 可再生能源,2015,33(11):1712 – 1716.

JIANG Enchen, GUO Xinhui, WANG Mingfeng, et al. Condensation characteristics and experimental research of sawdust pyrolysis volatiles [J]. Renewable Energy, 2015, 33(11):1712 – 1716. (in Chinese)

27 蒋恩臣,郭信辉,王明峰,等. 油茶壳连续热解挥发物冷凝特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):206 – 210. http:∥www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20150929&flag = 1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 09. 029.

JIANG Enchen, GUO Xinhui, WANG Mingfeng, et al. Condensation characteristic of continuous pyrolysis volatiles of oil-tea camellia shell [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):206 – 210. (in Chinese)

28 钟理,伍钦,马四朋. 化工原理[M]. 北京:高等教育出版社,2008:135 – 212.

29 程文龙,陈静,陶应东,等. 基于连续热力学修正算法的生物油热物性研究[J]. 太阳能学报,2013, 34(2):312 – 317.

CHENG Wenlong, CHEN Jing, TAO Yingdong, et al. Research of bio-oil thermal properties based on the modified method of continuous thermodynamics [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(2):312 – 317. (in Chinese)