doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.029

油茶壳连续热解挥发物冷凝特性研究*

蒋恩臣　郭信辉　王明峰　张世军　李世博
(华南农业大学材料与能源学院, 广州 510642)

摘要: 建立了适用于不同热解温度下的热解挥发物冷凝特性测试系统,对油茶壳 400℃、500℃和 600℃连续热解挥发物进行了冷凝特性研究。结果表明油茶壳挥发物的换热系数均随冷凝过程的增加而减小;在入口段中,400℃生物质挥发物的表面换热系数高于 500℃和 600℃的实验值,表明不凝气含量的增加减弱了挥发物的对流换热强度。用 Nusselt、*f* 因子模型进行模型拟合,*f* 因子模型对模拟油茶壳 500℃的热解挥发物的模拟效果较 Nusselt 好,误差值小于 20 W/(m^2·K),Nusselt 模型不适用于挥发物模拟。基于实验值建立的指数衰减曲线方程能模拟 400℃和 500℃油茶壳挥发物冷凝特性,可为冷凝器设计提供换热系数计算的辅助分析。

关键词: 油茶壳　连续热解　挥发物　换热系数　模型拟合
中图分类号: TQ028; S794.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)09-0206-05

Condensation Characteristic of Continuous Pyrolysis Volatiles of Oil-tea Camellia Shell

Jiang Enchen　Guo Xinhui　Wang Mingfeng　Zhang Shijun　Li Shibo
(*College of Materials and Energy*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: The mix volatiles of bio-oil steam and non-condensable gases need to be separated by condenser in the consecutive apparatus. Relevant researches about water steam condensational effect with air or N_2 were carried out by researchers both at home and abroad. It showed that non-condensable gases can distinctly affect condensational process by reducing local heat transfer coefficient. A system of condensational testing tube was built for pyrolysis volatiles at different temperatures. Volatiles of oil-tea camellia produced at 400℃, 500℃ and 600℃ were tested in this system. As a result, local heat transfer coefficients decreased with the increase of condensational process. The values of volatiles at 400℃ were higher than those at 500℃ and 600℃, which showed that the increase of non-condensable gases decreased the heat transfer intensity of volatiles. When experimental data were simulated in Nusselt theoretical model and *f*-factor model, the result showed that compared with the Nusselt theoretical model, *f*-factor model was more suitable for fitting experimental result of oil-tea camellia volatiles produced at 500℃ with the error less than 20 W/(m^2·K). Exponential decay equations can fit the experimental data of volatiles at 400℃ and 500℃, which brought an assistant reference for bio-oil condenser design in consecutive pyrolysis apparatus.

Key words: Shell of oil-tea camellia　Continuous pyrolysis　Volatiles　Heat transfer coefficient　Model fitting

引言

油茶是我国重要的木本油料作物,我国有丰富的油茶资源,栽培面积约 3.671 0^6 hm^2,油茶壳作为油茶果加工茶油的副产物,一般占整个茶果鲜质量的 50% ~60%,在加工以后大多被丢弃浪费,得不

收稿日期: 2015-05-16　修回日期: 2015-06-19
* 科技部农业科技成果转化资金资助项目(2014GB2E000048)和土壤植物机器系统技术国家重点实验室开放课题资助项目(2014-SKL-07)
作者简介: 蒋恩臣,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

到有效利用[1-2]。生物质热解技术通过控制反应温度和升温速率等条件能够得到固、液、气 3 种产物[3]，是油茶壳一种良好的利用途径。

油茶壳中温热解挥发物中包含可凝的生物油和不可凝的可燃气。生物油是一种黑褐色黏稠液体，其成分非常复杂，可以分析出的成分有 100 多种[4]，目前有催化改性、轻质馏分和进一步热分解等利用方式[5-7]。热解产生的可燃气含有 CO、CO_2、H_2、CH_4及饱和或不饱和烃类化合物[8]等不可凝气体。

生物质热解装置冷却分离生物油时需考虑不凝气对冷凝效果的影响，目前对热解挥发物冷凝中不凝气的影响研究较少。国内外研究人员对不可凝的空气、N_2对蒸汽冷凝特性的影响进行了相关研究[9-13]，结果表明当进行纯蒸汽冷凝时，主要热阻来自于冷凝液膜，而含不可凝气体的蒸汽由于气体在液膜附近形成了热阻，减弱了换热强度，导致换热系数减小。此外，国外研究人员基于 Nusselt 液膜理论提出了含不凝气的蒸汽冷凝理论模型和经验公式[9, 12, 14-16]。本文进行油茶壳 3 种温度热解挥发物的冷凝特性研究，建立基于实验值的指数衰减模型，为连续热解冷凝器设计提供换热系数计算的辅助分析。

1　实验原料与方法

1.1　实验原料

实验所用油茶壳原料采自云南省腾冲县，原料粉碎并过 20 目筛，用全自动工业分析仪和量热仪进行工业分析和热值测试，结果如表 1 所示。油茶壳的灰分低，挥发分最高，低位热值为 18.679 MJ/kg，属于热值较高的生物质原料。

1.2　冷凝实验装置

油茶壳热解挥发物冷凝测试装置由连续热解装置和冷凝测试管系统等组成，如图 1 所示，其中连续热解装置为华南农业大学生物质能实验室研制的变螺距连续热解装置[17]，适用于多种生物质原料连续热解。图 2 为连续热解挥发物冷凝测试系统示意图。

表 1　油茶壳工业分析及热值

Tab. 1　Industrial analysis and calorific value of oil-tea camellia shell

参数	含水率/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%	低位热值/(MJ·kg^{-1})
数值	4.95	1.46	75.46	18.13	18.679

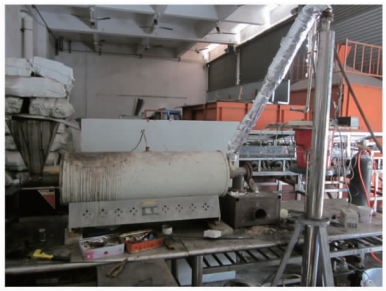


图 1　连续热解挥发物冷凝装置图

Fig. 1　Volatiles condensational apparatus for continuous pyrolysis

冷凝测试管系统由内管部分、外管水套和温度传感器数据采集部分组成，如图 3 所示。测试管由内管和外管组成，内管的材质为 304 不锈钢，外管材质为 201 不锈钢。热解挥发物从内管上端进入，下端排出，冷却水从外管下端泵入，上端排出。冷凝水质量流量为 117 kg/h，冷凝测试管内管内径为 0.041 m，长度为 2 m，内管冷凝面积为 0.258 m^2。

两类温度传感器用于测定内管挥发物温度、水温和内管外壁温度，测内管挥发物温度和测水温的传感器均为 pt100 型热电阻，规格分别为长度 0.02 m、外径 0.003 m 和长度 0.03 m、外径 0.004 m；测内管外壁温度的是点状 K 型热电偶，pt100 型和 K

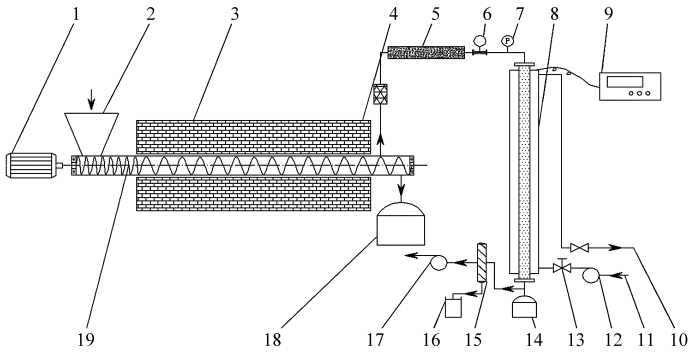


图 2　连续热解挥发物冷凝特性测试系统

Fig. 2　Condensational characteristics testing system for volatile matter of continuous pyrolysis

1. 输送电动机　2. 入料料斗　3. 加热炉体　4. 粉尘过滤　5. 保温层　6. 涡街流量计　7. 压力表　8. 测试管　9. 温度记录仪　10. 冷却水出口　11. 冷却水入口　12. 水泵　13. 调节阀　14. 集液瓶　15. 水汽分离器　16. 水槽　17. 鼓风机　18. 炭箱　19. 变螺距输送绞龙

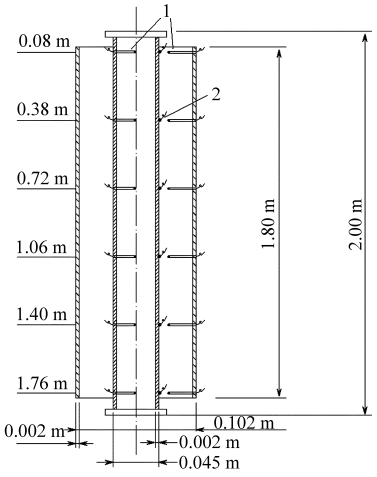


图 3 冷凝特性测试管示意图

Fig. 3 Schematic of condensational characteristics testing tube

1. pt100 型热电阻 2. K 型热电偶

型传感器的精度均为 ±0.1℃。2 种 pt100 型热电阻传感器通过螺纹连接垂直固定于内管和外管的壁面上,K 型传感器用氩弧焊点焊在内管外壁上。3 种温度传感器分布在距管顶部 0.08、0.38、0.72、1.06、1.40、1.76 m 处。

2 实验与结果分析

2.1 热解实验结果

对油茶壳原料进行 400℃、500℃和 600℃热解的冷凝测试实验,油茶壳原料的处理量为 7.7 kg/h。热解固液气三态产率如表 2 所示,由于热解温度的提高,使原料热解深度增加,炭的产率减少;热解温度的升高促进了挥发性产物的二次裂解,使生物油液体产率减少[18];挥发物的二次裂解使得不凝气含量随着热解温度的升高而升高,3 个热解温度的挥发物中不凝气质量分数分别为 28.6%、46.3%和 58.6%。

表 2 油茶壳不同热解温度的三态产率

Tab. 2 Productivities of char, oil and gases at different pyrolysis temperatures

温度/℃	炭产率/%	生物油产率/%	不凝气产率/%
400	32.1	48.5	19.4
500	28.1	38.6	33.3
600	26.6	30.4	43.0

2.2 实验冷凝参数计算方法

实验值局部热流密度通过冷却水侧温度和流量的热流量得出[19],局部热流密度计算公式为

$$q(x) = -\frac{\dot{m}_{cw} C_p}{\pi d_i} \frac{\mathrm{d}T_{cw}(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1}$$

式中 $\dot{m}_{cw}$——冷凝水质量流量,kg/h

C_p——比定压热容,J/(kg·K)

T_{cw}——轴向位置 x 测得的水温,℃

d_i——测试管内径,m

局部表面换热系数计算公式为

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

式中 T_b——内管挥发物温度,℃

$T_{w,i}$——内管内壁温度,℃

其中内管内壁温度通过 K 型热电偶测得的内管外壁温度求出

$$T_{w,i} = T_{w,o} + q(x)\frac{d_o - d_i}{k_{sus}} \tag{3}$$

式中 $T_{w,o}$——内管外壁温度,℃

d_o——内管外直径,m

k_{sus}——304 不锈钢导热系数,W/(m·K)

2.3 冷凝特性参数分析

不同热解温度下的挥发物局部热流密度如图 4 所示,热流密度随轴向距离增加而减小;由于入口处的挥发物温度随热解温度而升高,在 0.2 ~ 1.76 m,热流密度随热解温度而升高。

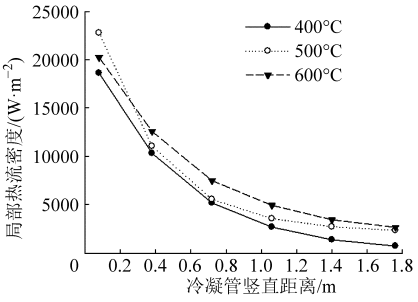


图 4 油茶壳不同温度热解挥发物的局部热流密度

Fig. 4 Local heat flux of oil-tea camellia volatiles shell at different temperatures

局部表面换热系数的实验结果如图 5 所示,油茶壳挥发物同一温度下的换热系数随 x 轴向距离的增加而减小。在 0.08 ~ 0.38 m 段中,400℃油茶壳挥发物的表面换热系数高于 500℃和 600℃的实验值,这表明虽然在入口处挥发物温度随着热解温度的升高而升高,但油茶壳热解挥发物中的不凝气含量也随着温度的升高而增加,不同温度下热解挥发物的不凝气含量增大了入口段表面换热系数的热阻,从而减弱了对流换热强度。在 0.38 ~ 1.76 m 段中,600℃的挥发物的换热系数大于其他温度的值并在 0.72 m 处接近 100 W/(m²·K);在 0.38 ~ 1.76 m 段中,400℃油茶壳挥发物的换热系数低于 500℃和 600℃的值。600℃挥发物在 0.72 m 处出现一个峰值,由于在该处的挥发物温度为 100 ~ 150℃,此温度段的挥发物总的可冷凝量大于其余温度段。

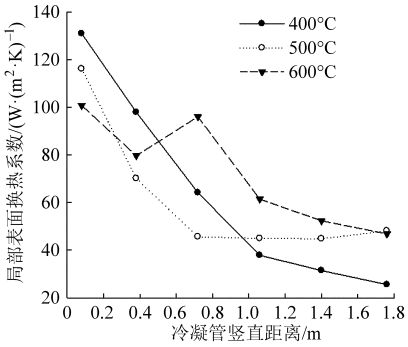


图 5　油茶壳不同温度热解挥发物的局部表面换热系数

Fig. 5　Local heat transfer coefficient of oil-tea camellia volatiles shell at deferent temperatures

3　模型及拟合分析

国外研究人员进行了含不凝气的蒸汽冷凝理论及经验模型的相关研究[9, 11-12, 20]，一般采用 Nusselt 模型[19]或衰变因子 f 经验模型[12]对表面换热系数进行拟合计算。

Nusselt 模型的理论值公式为

$$h_x = \frac{k_l}{\delta} = \left(\frac{g r \rho_l^2 k_l^3}{4 \mu_l \Delta t x}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{4}$$

式中　k_l——液膜导热系数，W/(m·K)

δ——液膜厚度，m

r——汽化潜热，J/kg

ρ_l——冷凝后液体密度，kg/m^3

g——重力加速度，m/s^2

μ_l——液膜动力粘度，Pa/s

Δt——竖直壁面平均温差，℃

衰变因子 f 经验模型计算公式为

$$f = \frac{h_{\exp}}{h_{Nu}} = \tau_{\text{mix}}^{0.3124}(1 - 0.964 W_{nc}^{0.402}) \tag{5}$$

式中　τ_{mix}——剪切力，N/m^2

W_{nc}——不可凝气体含量

$h_{\exp}$——实验计算的换热系数，W/(m^2·K)

h_{Nu}——Nusselt 模型计算的表面换热系数，W/(m^2·K)

该模型适用于 $0.06 < \tau_{\text{mix}} < 46.65$ 以及 $0.038 < W_{nc} < 0.814$。

不同模型对 3 种热解温度下油茶壳的热解挥发物冷凝特性拟合结果如图 6 ~ 8 所示，Nusselt 模型对 3 种热解温度挥发物的模拟值均高于实验值；400℃挥发物的模拟值误差范围为 30% ~ 250%，500℃的挥发物的模拟值误差为 40 W/(m^2·K)，误差为 40% ~ 60%，600℃挥发物的模拟值误差范围为 5% ~ 60%，因此 Nusselt 不适用于油茶壳挥发物冷凝模拟。

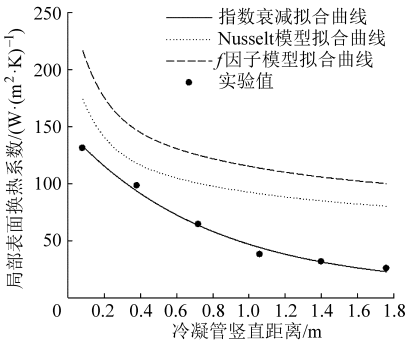


图 6　油茶壳 400℃热解挥发物拟合结果

Fig. 6　Fitting result of oil-tea camellia volatiles shell at 400℃

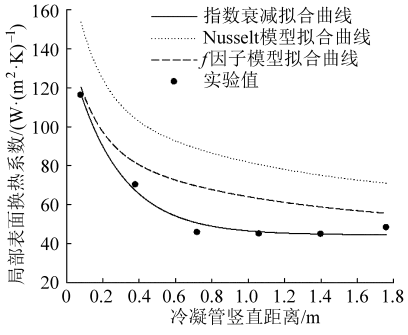


图 7　油茶壳 500℃热解挥发物拟合结果

Fig. 7　Fitting result of oil-tea camellia volatiles shell at 500℃

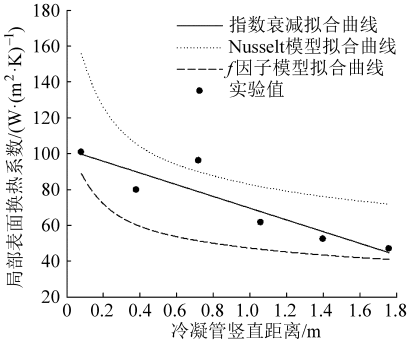


图 8　油茶壳 600℃热解挥发物拟合结果

Fig. 8　Fitting result of oil-tea camellia volatiles shell at 600℃

f 因子模型对 400℃挥发物模拟值大于 Nusselt 值，误差大于 50%；f 因子模型能较好地模拟油茶壳 500℃的值，模拟值平均误差小于 20 W/(m^2·K)，其中轴向距离 0.38 ~ 1.4 m 段的模拟值略高于实验值，其余轴向距离段的模拟值误差小于 5 W/(m^2·K)；f 因子对 600℃模拟值均低于实验值，误差范围为 8% ~ 50%，在 1.06 ~ 1.76 m 误差较小。

模拟结果误差较大的原因是由于 Nusselt 和 f 因子模型所用的介质为蒸汽和 N_2，而本文中的油茶壳热解挥发物成分非常复杂，其冷凝过程不同于单纯的蒸汽和 N_2 混合物，因此误差大，表明 Nusselt 模型和 f 因子模型不适用于油茶壳挥发物的冷凝模拟。

为获得更好的表面换热系数拟合结果，本文采用指数衰减方程对实验值进行拟合，拟合方程为

$$y = y_0 + ae^{-bx} + ce^{-dx} \quad (6)$$

利用指数衰减方程对表面换热系数实验值的拟合如表 3 所示,400℃ 和 500℃ 的挥发物拟合度为 0.992 018 和 0.988 188,拟合效果较好。600℃ 的拟合度为 0.821 346,由于在 0.72 m 处有峰值,拟合效果低于 400℃ 和 500℃。

表 3 指数衰减方程拟合系数

Tab.3 Fitting coefficients of exponential decay equation

温度/℃	y_0	a	b	c	d	R^2
400	0	1.382×10^{2}	1.274	8.155	6.801×10^{-17}	0.992 018
500	0	98.32	3.854	44.41	1.055×10^{-17}	0.988 188
600	-8.631×10^{3}	8.733×10^{3}	3.758×10^{-3}	0	0	0.821 346

4 结论

(1) 油茶壳原料热解挥发物热流密度和换热系数均随冷凝过程的增加而减小。在入口 0.08 ~ 0.38 m 段中,400℃ 生物质挥发物的局部换热系数高于 500℃ 和 600℃ 的实验值,原因是不同温度下热解挥发物的不凝气含量增大了入口段表面换热系数的热阻,从而减弱对流换热强度;在后半段,由于 400℃ 生物质挥发物在前半段冷凝量大,同一冷凝管位置的表面对流换热强度随热解温度升高而升高。

(2) Nusselt 模型不适用于拟合不同温度油茶壳挥发物的冷凝特性;f 因子模型的拟合效果好于 Nusselt 模型,能较好地模拟油茶壳 500℃ 的热解挥发物换热系数值,但不适用于拟合 400℃ 和 600℃ 的实验值。指数衰减曲线方程能较好模拟 400℃ 和 500℃ 油茶壳挥发物冷凝特性,可为连续热解冷凝器设计提供换热系数计算的辅助分析。

参 考 文 献

1 许细薇,蒋恩臣,王明峰,等. 油茶壳热解特性及动力学分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(8): 118 - 123.
Xu Xiwei, Jiang Enchen, Wang Mingfeng, et al. Characteristics and kinetics of camellia oleifera shell pyrolysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8): 118 - 123. (in Chinese)

2 刘跃进,欧日明,陈永忠. 我国油茶产业发展现状与对策[J]. 林业科技开发, 2007, 21(4): 1 - 4.

3 袁振宏,吴创之,马隆龙,等. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1 - 295.

4 边轶,刘石彩,简相坤. 生物质热解焦油的性质与化学利用研究现状[J]. 生物质化学工程, 2011, 45(2): 51 - 55.
Bian Yi, Liu Shicai, Jian Xiangkun. The state art of view of research progress on characteristics and chemical utilization of tar from biomass pyrolysis[J]. Biomass Chemical Engineering, 2011, 45(2): 51 - 55. (in Chinese)

5 许细微. 油茶壳热解特性及其木醋液 Ni 基催化制氢[D]. 广州:华南农业大学, 2011.
Xu Xiwei. Camellia oleifera shell pyrolysis characteristic and hydrogen product from its wood vinegar catalytic cracking by Ni catalysts[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2011. (in Chinese)

6 张全国,张梅峰,刘圣勇,等. 农作物秸秆类生物质焦油燃料利用特性的实验研究[J]. 热科学与技术, 2002, 1(2): 155 - 158.
Zhang Quanguo, Zhang Meifeng, Liu Shengyong, et al. Experimental study of fuel characterist ics of the biomass tar from crop stalk[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2002, 1(2): 155 - 158. (in Chinese)

7 Chhiti Y, Salvador S, Etc J C. Thermal decomposition of bio - oil: focus on the products yields under different pyrolysis conditions [J]. Fuel, 2012, 102: 274 - 281.

8 Horne P A, Williams P T. Influence of temperation on the products from the flash pyrolysis of biomars[J]. Fuel, 1996,75(9): 1051 - 1059.

9 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.

10 Akaki H, Kataoka Y, Murase M. Measurement of condensation heat transfer coefficient inside a vertical tube in the presence of noncondensable gas[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1995, 32(6): 517 - 526.

11 Kuhn S Z, Schrock V E, Peterson P F. An investigation of condensation from steam-gas mixtures flowing downward inside a vertical tube[J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 177(1 - 3): 53 - 69.

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

13 童正明,徐波,李生娟,等. 含不凝性气体的蒸汽在垂直圆管内表面冷凝换热的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2005, 27(2): 120 - 122.
Tong Zhengming, Xu Bo, Li Shengjuan, et al. Experimental study of the condensation of multicomponent vapors inside vertical tubes[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2005, 27(2): 120 - 122. (in Chinese)

(下转第 143 页)

Su Gang, Shi Jianxin, Ge Ju. Measurement the spatial angle of square knotter on the basis of reverse engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6): 81 - 83. (in Chinese)

7 陈龙健,李诚,张安琪,等. 基于逆向工程的 D 型打结器重构与运动仿真[J]. 农业机械学报,2014,45(12):104 - 108,125.
Chen Longjian, Li Cheng, Zhang Anqi, et al. Reconstitution and motion simulation of D-bale knotter based on reverse engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(12):104 - 108,125. (in Chinese)

8 李慧,何进,李洪文,等. 方草捆压捆机打结器空间参数研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 99 - 105.
Li Hui, He Jin, Li Hongwen, et al. Spatial parameters of knotters of square balers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 99 - 105. (in Chinese)

9 李慧, 何进, 李洪文, 等. 基于逆向数据的强制脱扣型方草压捆机打结器[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(6): 1652 - 1658.
Li Hui, He Jin, Li Hongwen, et al. Mandatory strip type knotter for square baler based on reversed data[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(6): 1652 - 1658. (in Chinese)

10 Li Hui, He Jin, Wang Qingjie, et al. Design and experiment of φ-type-knots knotters on Chinese small square balers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(1): 154 - 164.

11 李海涛,熊亚,陈龙健,等. 打结器割绳脱扣机构磨损分析与改进设计[J]. 农业机械学报,2015,46(3):118 - 124.
Li Haitao, Xiong Ya, Chen Longjian, et al. Wear research and improved design of D-knotter wiper mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(3):118 - 124. (in Chinese)

12 Happich G, Harms H H, Lang T. Development of model based loading strategies for agricultural transfer processes[C]// Agricultural Engineering- Land-Technik 2008: Landtechnik Regional and International, 2008: 289 - 294.

13 张绍英, 李海涛, 曹庆和, 等. 双 α 结打结器关键传动机构设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 74 - 79.
Zhang Shaoying, Li Haitao, Cao Qinghe, et al. Design of key transmission mechanism of double-α-knot knotter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 74 - 79. (in Chinese)

14 李双, 尹建军, 李耀明. D 型打结器及其辅助机构的运动特性[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(1):18 - 21.
Li Shuang, Yin Jianjun, Li Yaoming. Kinematic characteristic analysis of D-knotter and its ancillary mechanism [J]. Machine Design and Research, 2011, 27(1):18 - 21. (in Chinese)

15 马晓刚. 自走式方草捆压捆机关键部件优化设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
Ma Xiaogang. Optimal design and experiment on the key parts of self-propelled rectangular baler[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

16 杨莉, 刘贵林, 王振华, 等. 自带传动动力恒频方草捆捡拾压捆机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 147 - 151.
Yang Li, Liu Guilin, Wang Zhenhua, et al. Design and experiment of engine-driven constant frequency rectangular pickup baler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 147 - 151. (in Chinese)

17 布库, 万其号, 李岩, 等. 打结器试验台的设计[J]. 机械设计与制造, 2010, 8(8): 37 - 39.
Bu Ku, Wan Qihao, Li Yan, et al. Design of d knotter test-bench[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, 8(8): 37 - 39. (in Chinese)

(上接第 210 页)

14 Munoz-Cobo J L, Herranz L, Sancho J, et al. Turbulent vapor condensation with noncondensable gases in vertical tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(15): 3249 - 3260.

15 Dehbi A, Guentay S. A model for the performance of a vertical tube condenser in the presence of noncondensable gases[J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 177(1 - 3): 41 - 52.

16 Kim J, Lee Y, Ahn H, et al. Condensation heat transfer characteristic in the presence of noncondensable gas on natural convection at high pressure[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(4): 688 - 698.

17 苏旭林. 生物质连续热解反应装置关键部件研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
Su Xulin. Research of critical components of biomass continual pyrolysis reactor[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)

18 王明峰. 稻壳连续式催化裂解制富氢气体研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2010.
Wang Mingfeng. Study on rich hydrogen content gas production from rice husk continous catalytic pyrolysis[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2010. (in Chinese)

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

20 Kim Y S, Park J W, Song C H. Investigation of the steam-water direct contact condensation heat transfer coefficients using interfacial transport models[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2004, 31(3): 397 - 408.