



生物质烘焙处理的能量平衡分析

叶扬天, 陈红红, 卢平*

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

摘要: 基于烘焙过程分析, 建立了生物质烘焙处理的能量平衡计算方法, 结合固定床烘焙实验结果, 研究了烘焙温度和保温时间对杨树枝烘焙特性、烘焙所需热及 3 种烘焙产物能量分布的影响, 探讨了杨树枝烘焙处理的能量平衡。结果表明, 烘焙温度是影响生物炭得率、热值和能量分布的主要因素, 随烘焙温度提高, 杨树枝炭得率显著降低, 液体产物和气体产物逐渐增加, 杨树枝炭和不凝气体产物的热值显著增加, 而液体产物热值变化不大。烘焙产物中, 杨树枝炭的能量显著高于液体和气体的能量。随烘焙温度升高, 杨树枝烘焙的能量平衡率先快速升高后趋于平稳, 在温度 225 °C、保温时间 30 min 的条件下, 烘焙可获得 64.0% 的杨树枝炭, 能量平衡率约为 2.5, 烘焙所得液体和气体产物的燃烧热完全能满足杨树枝烘焙能量自给的需要。

关键词: 生物质; 烘焙; 生物炭; 能量分布; 能量平衡

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2018)03-0575-07

Analysis of Energy Balance during Biomass Torrefaction

Yangtian YE, Honghong CHEN, Ping LU*

(School of Energy & Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

Abstract: Calculation method of energy balance during biomass torrefaction was established based on the analysis of biomass torrefaction process. According to the results of polar branch (PB) torrefaction in a fixed bed reactor, the effect of torrefaction temperature and holding time on characteristics of torrefied products (PB biochar, liquid product and gaseous product), heat requirement and energy distribution during torrefaction were studied. The energy balance of PB torrefaction was also discussed. The results indicated that torrefaction temperature was a key influence factor on biochar mass yield, heating value and energy distribution. The mass yield of PB biochar decreased significantly and mass yields of liquid and gaseous products increased gradually with increasing torrefaction temperature. At the same time, the heating values of PB biochar and gaseous product increased, and the heating value of liquid product had no remarkable change correspondingly. The energy of PB biochar was significant higher than that of liquid and gaseous products. The energy balance ratio of PB torrefaction showed a tendency of increase first and then to be stable with increasing torrefaction temperature. 64.0% of biochar mass yield can be obtained through PB torrefaction at the temperature of 225 °C and the holding time of 30 min, and the relevant energy balance ratio was 2.5. At this condition, the heat produced from combustion of gaseous and liquid products could completely meet the requirement of energy self-supported during PB torrefaction.

Key words: biomass; torrefaction; biochar; energy distribution; energy balance

1 前言

生物质能资源丰富, 种类繁多, 形式多样, 占世界能源总消耗的 14%, 具有低硫、低氮、高挥发分、高灰焦活性、零 CO₂ 净排放等特点, 在能源利用和环境保护方面具有独特的优势。生物质亲水性强、含水量大、含氧量高、可磨性较差、热值与能量密度低、易腐烂、不

宜长时间储存等缺点限制了其规模化利用^[1-3]。

生物质烘焙是在低温(200~300 °C)、缺氧和较低加热速率(小于 50 °C/min)条件下对生物质进行热化学处理的方法, 是一种有效的热化学预处理方法, 能使生物质中的纤维素、半纤维素和木质素发生一定程度的热解炭化, 有效脱除生物质中的水分和轻质挥发分, 并生成大量的固体产物(生物炭)及一定量冷凝液体(生物油、水汽

收稿日期: 2017-09-12, 修回日期: 2017-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51476079); 江苏省前瞻性联合研究项目(编号: BY2015001-01)

作者简介: 叶扬天(1993-), 男, 江西省九江市人, 硕士研究生, 热能工程专业, E-mail: yt441807982@163.com; 卢平, 通讯联系人, Tel: 025-85481124, E-mail: luping@njnu.edu.cn.

引用格式: 叶扬天, 陈红红, 卢平. 生物质烘焙处理的能量平衡分析. 过程工程学报, 2018, 18(3): 575-581.

Ye Y T, Chen H H, Lu P. Analysis of Energy Balance during Biomass Torrefaction (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 575-581, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217337.

等)和不凝气体(CO , CO_2 和 CH_4 等)^[3,4]. 生物炭不仅保留了生物质原有的低硫氮、高灰焦活性和零 CO_2 净排放等特点,还具有热值和能量密度高、疏水性强、可磨性好、不腐烂、适宜长时间储存和长距离运输等优点,可广泛应用于热解、气化、发电、供热、烟气净化和土壤改良等领域^[5-10].

农林生物质烘焙特性受生物质种类、热解温度、停留时间、热解速率、颗粒粒径、热解气氛等因素影响. Bourgois 等^[11]利用固定床反应器研究了松木屑的烘焙特性,结果表明烘焙可显著提高生物炭的热值和能量密度,改变生物炭的化学组成和结构,使其具有良好的疏水性. Bridgeman 等^[12]认为烘焙温度是影响生物质降解的重要因素,200~300℃下半纤维素被广泛热解炭化,而纤维素与木质素结构只发生了有限的脱挥发分和炭化. Matali 等^[13]用水平管式炉烘焙,随温度提高,木质和非木质两种农业废弃物的烘焙程度逐渐加深,固定碳含量和热值不断提高, H/C 和 O/C 摩尔比逐渐降低. Rousset 等^[14]认为半纤维素是生物质中最具反应活性的聚合物,烘焙过程中其质量损失较显著,烘焙时间对生物质失重和降解的影响比烘焙温度的影响小. Prins 等^[15]利用热重分析仪和小型固定床研究了柳树枝、落叶松和稻草等生物质的烘焙动力学及热解产物特性,认为烘焙与不同气化方式组合是提高生物质气化效率的有效途径. 王贵军等^[16]研究表明,烘焙所得生物炭便于储存运输及磨粉用于气流床气化和煤粉混燃.

目前对生物质烘焙的研究主要集中于生物质种类、烘焙温度和停留时间等对烘焙产物特性(如生物炭的热值、能量密度、可磨性和疏水性等)及烘焙过程动力学

的影响,而对烘焙过程能量分布及其平衡研究较少. Bergman^[17]研究认为,烘焙后在生物质能量损失约 10% 的条件下,1 t 生物质可产生约 0.7 t 生物炭,生物炭的热值和能量密度显著提高,约为生物质原料的 1.3~1.8 倍,烘焙过程中释放热解气(包括生物油、可燃不凝气体)的燃烧热可满足生物质烘焙所需能量. 陈登宇等^[18]用固定床热解装置研究了烘焙温度对玉米秸秆热解产物产率、品质和能量分布的影响,结果表明,烘焙对提高 CH_4 和 H_2 产率有一定促进作用,可燃气的热值逐渐增大,对生物炭的化学组分影响不大,但随生物炭产率增大,其能量产率逐渐增大. 烘焙预处理可改善生物油的品质,提高可燃气的热值,增大生物质炭的能量产率. 生物质含大量水分,原料升温、水分蒸发释放及生物质热裂解都需消耗能量,是吸热过程,且烘焙过程中生物质结构和组成也在不断变化,给确定生物质烘焙所需热量及分析能量平衡带来难度. 文献^[19,20]研究了生物质烘焙过程对吸热量的影响,但未涉及整个过程及能量平衡. 有必要进一步研究烘焙过程的能量分布及平衡.

本工作用固定床烘焙杨树枝,结合 DSC 及烘焙产物热值分析,研究了烘焙条件对杨树枝烘焙产物能量分布及能量平衡的影响,旨在为生物质烘焙操作参数确定和烘焙装置设计提供参考.

2 实验

实验用杨树枝(Poplar Branch, PB)取自江苏省扬中市,其工业分析、元素分析和热值测定结果如表 1 所示. 烘焙前用铡草机等设备将其破碎成约 10 mm 的颗粒,置于恒温电热鼓风干燥箱内在 45℃ 下烘干至恒重.

表 1 杨树枝的工业分析、元素分析结果和热值

Table 1 Proximate and ultimate analysis results and low heating value of poplar branch

Proximate analysis/wt% (ad)				Ultimate analysis/wt% (ad)				Low heating value,	
Moisture	Volatile	Fixed carbon	Ash	C	H	O	N	S	$Q_{\text{net,ad}}/(\text{MJ/kg})$
6.28	77.70	14.51	1.51	45.00	4.11	41.92	0.60	0.58	16.81

实验用固定床烘焙实验装置由立式电加热管式炉、气体供应系统、生物质加料仓、固定床反应器、温度测量与控制系统、生物油和热解气收集装置组成^[21]. 固定床反应器内径为 51 mm,有效加热高度为 300 mm. 实验时,待炉温达到设定烘焙温度(200~300℃),通入 N_2 排出固定床中的空气,将约 50 g 生物质样品迅速投入固定床反应器中,保温 10~40 min. 液体产物(生物油和水)和不凝气体(CO_2 , CO , CH_4 , H_2 和 N_2 等)分别用液体收集罐和采气袋收集. 固体和液体产物用天平称重,不凝气体产物质量则由差减法获得. 不凝气体组分采用 VARIO PLUS 气体分析仪(德国 MRU 公司)离线分析.

不同烘焙条件下所得固体产物(生物炭)以 PB- T/τ 表示,如 PB-300/30 代表在烘焙温度 $T=300^\circ\text{C}$ 、保温时间 $\tau=30$ min 下得到的杨树枝炭.

3 烘焙的能量平衡及其计算

3.1 烘焙产物及能量的计算

生物质烘焙过程的能量平衡如图 1 所示. 生物质烘焙时,单位质量生物质原料在一定热输入(烘焙热 E_{in})条件下转化为固体产物(生物炭)、液体产物(生物油、水)和不凝气体 3 种产物,与之对应,单位质量生物质原料的能量(E_{in})分别转化为固体、液体和不凝气体的能量(E_{s} ,

E_l 和 E_g , kJ/kg), 其值可由下式计算:

$$E_i = X_i Q_i, \quad (1)$$

其中, 下标 i 分别代表生物炭(s)、液体(l)和不凝气体(g), X_i 为 3 种产物的得率(wt%), Q_i 为 3 种产物的热值(kJ/kg). 其中 Q_s 可采用氧弹法直接测定, 进而根据式(1)得到生物炭的能量 E_s . 不凝气体和液体产物统称为热解气.

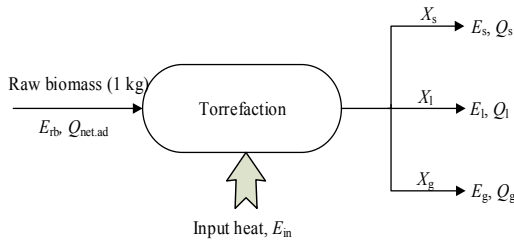


图1 生物质烘焙过程质量和能量平衡示意图

Fig.1 Schematic of energy distribution of biomass torrefaction

(1) 不凝气体能量的计算

生物质烘焙的气体产物主要是 CO_2 , CO 和少量 CH_4 及微量 H_2 ^[15,16], 因此, 计算 E_g 时可忽略 H_2 的影响:

$$E_g = 10.11 m_{\text{CO}} + 50.02 m_{\text{CH}_4}, \quad (2)$$

其中, 10.11 和 50.02 分别为 CO 和 CH_4 的热值(kJ/g), m_{CO} 和 m_{CH_4} 分别为单位质量生物质烘焙产生的不凝气体中 CO 和 CH_4 的质量(g/kg), 计算如下:

$$m_{\text{CO}} = n_{\text{CO}} M_{\text{CO}} = 28 n \varphi_{\text{CO}} = 28 \times \frac{1000 X_g}{\bar{M}} \varphi_{\text{CO}}, \quad (3)$$

$$m_{\text{CH}_4} = n_{\text{CH}_4} M_{\text{CH}_4} = 16 n \varphi_{\text{CH}_4} = 16 \times \frac{1000 X_g}{\bar{M}} \varphi_{\text{CH}_4}, \quad (4)$$

其中, n 为单位质量生物质烘焙产生的不凝气体(CO , CO_2 和 CH_4)量(mol/kg), n_{CO} 和 n_{CH_4} 分别为单位质量生物质烘焙产生的不凝气体中 CO 和 CH_4 的摩尔数(mol/kg), φ_{CO} 和 φ_{CH_4} 分别为不凝气体中 CO 和 CH_4 的体积分数(vol%), M_{CO} 和 M_{CH_4} 分别为 CO 和 CH_4 的分子量, \bar{M} 为烘焙产生的不凝气体的平均分子量, 可根据不凝气体的体积分数和分子量计算得到, $\bar{M} = (28 \varphi_{\text{CO}} + 44 \varphi_{\text{CO}_2} + 16 \varphi_{\text{CH}_4}) / 100$.

(2) 液体产物能量的计算

烘焙的液体产物为粘稠的棕黑色油状液体, 含大量水分(约 15wt%~35wt%), 给热值测定带来一定困难. 矫常命等^[22]以无水乙醇为助燃剂, 用量热仪测定了混合液体燃料的热值, 通过式(5)计算液体产物的低位发热量 Q_l (MJ/kg), 由式(1)得单位质量生物质烘焙所得液体产物的能量 E_l (kJ/kg).

$$Q_l = [(Q_m - Q_e w_1) / (1 - w_1)] - 25(w_{\text{H}_2\text{O}} + 9w_{\text{H}_2}), \quad (5)$$

其中, Q_m 为液体产物与无水乙醇混合物的热值(MJ/kg, 由量热仪测定), Q_e 为无水乙醇的热值(29.7 MJ/kg), w_1 为无水乙醇的含量(约 20wt%), $w_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 w_{H_2} 分别为液体产物中氢和水含量(wt%), 通过液体燃料的元素分析及氢质量平衡得到^[23].

3.2 生物质烘焙热的计算

由图 1 可以看出, 生物质烘焙必须输入一定热量. 一般而言, 生物质烘焙所需的烘焙热 E_{in} 由水分蒸发热 $E_{\text{H}_2\text{O}}$ (kJ/kg)、干生物质升温显热 E_{db} (kJ/kg)和生物质热解热 E_{py} 三部分组成, 即 $E_{\text{in}} = E_{\text{H}_2\text{O}} + E_{\text{db}} + E_{\text{py}}$, 其中,

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = c_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{ad}} \Delta T + M_{\text{adr}}, \quad (6)$$

$$E_{\text{db}} = c_b m_{\text{db}} \Delta T = c_b (1 - M_{\text{ad}}) \Delta T / 100, \quad (7)$$

式中, $c_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的比热容[4.2 kJ/(kg·°C)], M_{ad} 为生物质的含水率(wt%), $\Delta T = T(\text{烘焙温度}) - T_0$ (室温 20 °C), r 为水的气化潜热(2257.6 kJ/kg), $c_b = 5.714 \times 10^{-3} (T + 273) - 0.857$ ^[24] 为生物质的比热容[kJ/(kg·°C)], m_{db} 为干生物质的量(kg/kg).

用 Diamond 热重-差示扫描量热仪(TG-DSC, 美国 Perkin-Elmer 公司)测定生物质热解过程中热流率随时间的变化, 积分得单位质量生物质的热解热 E_{py} (kJ/kg)^[19,20].

3.3 生物质烘焙的能量平衡分析

生物质烘焙所需热量可采用外部供热和烘焙热解气燃烧供热两种途径提供. 烘焙热解气燃烧供热(自供热烘焙)即利用烘焙过程所产热解气(生物油、可燃的不凝气)的燃烧热提供烘焙所需热量, 不仅节约能源, 且可提高烘焙系统的热效率. 因此, 烘焙所产热解气的燃烧热能否满足自供热烘焙所需是研究的问题之一. 本研究采用能量平衡率 η_b 表征生物质烘焙过程的自供热能力:

$$\eta_b = (E_l + E_g) / E_{\text{in}} = \eta_{\text{bg}} + \eta_{\text{bl}}, \quad (8)$$

其中, η_{bg} 和 η_{bl} 分别为气体和生物油的能量平衡率, $\eta_b \geq 1$ 时烘焙产生的热解气燃烧热可满足烘焙所需热量, 即能量可自给; $\eta_b < 1$ 时热解气燃烧热不能满足烘焙所需热量, 需提供一定的外部热量.

4 结果与讨论

4.1 烘焙对生物炭质量得率和热值的影响

表 2 为不同烘焙温度和停留时间下杨树枝炭的质量得率、热值和能量的实验结果. 由表可以看出, 在相同保温时间(30 min)下, 烘焙温度由 200 °C 提高到 300 °C, 杨树枝炭的得率由 85.6wt% 下降到 31.4wt%, 并呈先快

速下降后逐渐趋于平稳的趋势，热值由 18.98 MJ/kg 上升到 26.45 MJ/kg，增加了 7.47 MJ/kg；在相同烘焙温度 (250℃)下，杨树枝炭得率随保温时间增加稍有降低，由 10 min 时的 53.3%降至 40 min 时的 44.1%，降幅不大，热值由 22.76 MJ/kg 升至 24.57 MJ/kg，仅增加了 1.81 MJ/kg. 表明烘焙温度对生物质烘焙过程中生物炭质量得率和热值的影响显著强于保温时间的影响，与

Bridgeman 等^[12]的结果较一致，他们认为烘焙温度是影响生物质热降解的重要因素，烘焙温度 200~300℃下，半纤维素被广泛热解炭化，而纤维素与木质素结构只发生有限的脱挥发分和炭化，且伴随脱羧基和羰基反应，生物炭中的氧含量显著减低，生成了大量水分、CO₂ 和 CO 及较多的含氧碳水化合物. 本研究着重讨论烘焙温度对烘焙过程能量分布及能量平衡的影响.

表 2 杨树枝炭的质量得率、热值和能量的实验结果

Table 2 Experimental results of mass yield, low heating value and energy of torrefied poplar branch					
Temperature, $T/^\circ\text{C}$	Holding time, τ/min	Mass yield, $X_\text{g}/\text{wt}\%$	Low heating value, $Q_{\text{net,ad}}/(\text{MJ}/\text{kg})$		Energy, $E_\text{g}/(\text{MJ}/\text{kg})$
200	30	85.6	18.89		16.17
225	30	64.0	20.46		13.09
250	30	44.6	23.91		10.66
275	30	41.2	25.06		10.32
300	30	31.4	26.45		8.31
250	10	53.3	22.76		12.13
250	20	48.5	23.26		11.28
250	40	44.1	24.57		10.84

表 3 杨树枝烘焙过程中气体产物得率、组分与能量

Table 3 Mass yield, component and energy of gas product during PB torrefaction							
Temperature, $T/^\circ\text{C}$	Holding time, τ/min	Mass yield, $X_\text{g}/\text{wt}\%$	Component/vol%			Average molecular weight of non-condensable gas, \bar{M}	Energy, $E_\text{g}/(\text{kJ}/\text{kg})$
			CO	CO ₂	CH ₄		
200	30	10.4	28.51	67.87	3.62	43.66	297.2
225	30	12.0	38.41	56.29	5.30	41.33	499.3
250	30	12.6	35.67	58.39	5.94	41.62	511.5
275	30	17.0	35.25	58.59	6.16	41.63	709.1
300	30	26.2	33.84	54.66	11.50	40.19	1394.4

表 4 液体产物的得率、组分、热值和能量

Table 4 Mass yield, component, heating value and energy of liquid product during PB torrefaction									
Temperature, $T/^\circ\text{C}$	Holding time, τ/min	Mass yield, $X_\text{l}/\text{wt}\%$	Component/wt% (ar)					Heating value, $Q_\text{l}/(\text{MJ}/\text{kg})$	Energy, $E_\text{l}/(\text{kJ}/\text{kg})$
			C	H	N	O	Moisture		
200	30	4.0	28.96	7.996	0.740	26.52	35.78	7.78	311.2
225	30	24.0	27.27	8.366	1.266	25.41	37.69	8.61	2066.4
250	30	42.8	29.71	8.189	1.605	42.99	17.51	10.83	4635.2
275	30	41.4	29.92	8.392	1.895	37.31	22.48	10.20	4222.8
300	30	42.4	28.60	8.271	1.372	25.73	36.03	9.80	4155.2

4.2 烘焙温度对气体产物及其能量的影响

杨树枝烘焙过程中气体产物得率、组分与能量如表 3 所示，保温时间为 30 min. 由表可以看出，热解气体产物主要为 CO、CO₂ 和 CH₄，未检测到 H₂. 随烘焙温度升高，气体产物量得率逐渐增加，且在 200~250℃间变化较小，而在 250~300℃范围内上升较显著，由 12.6wt% 增加到 26.2wt%. CO 浓度变化较小，基本约为 30vol%，而 CH₄ 浓度变化较大，300℃下显著提升，达 11.5vol%，与 Prins^[15]的结果基本一致. 根据不凝气体产物的得率和组分，按式(2)~(4)计算可得不同温度下单位质量生物质烘焙所得不凝气体的能量，结果见表 3. 可知随烘焙温度提高，气体产物能量显著提高，300℃下杨树枝烘焙气体产物的热值是 200℃下的 4.7 倍.

4.3 烘焙温度对液体产物及其能量的影响

表 4 为烘焙过程中液体产物的得率、组分、热值和能量. 由表可知，液体产物的得率随烘焙温度升高而增加，在 200~250℃范围内增加较显著，烘焙温度大于 250℃时基本约为 42wt%. 液体产物中 C、H 和 N 含量变化不大，而氧和水分含量变化较大，分别为 25.41wt%~42.99wt%和 17.51wt%~36.03wt%. 基于上述结果，按式(5)和(6)可分别得液体产物的热值和能量，见表 4. 由表可知，杨树枝烘焙所得液体产物的热值变化不显著，为 7.78~10.83 MJ/kg. 随液体产物得率增加，单位质量杨树枝烘焙所得液体产物的能量呈先快速增加后逐渐趋于平稳的趋势，温度大于 250℃时达 4000 kJ/kg 以上，显著大于相同条件下气体产物的能量.

4.4 烘焙温度对杨树枝烘焙热的影响

烘焙将生物质原料中的能量转移到生物炭、液体产物和气体产物中,但同时由于水分蒸发释放、生物质裂解等需消耗能量,因此生物质烘焙是吸热过程.图 2 为用 TG-DSC 分析所得杨树枝的 DSC 曲线,杨树枝量为 5.27 mg,高纯氮气流量为 100 mL/min,升温速率为 20℃

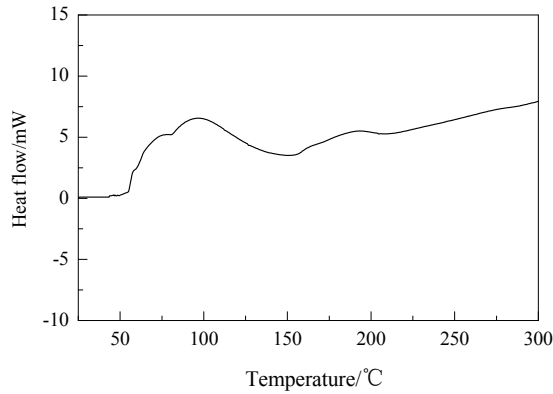


图 2 杨树枝的 DSC 曲线
Fig.2 DSC curve of poplar branch

/min.由图可知,温度小于 50℃时热流几乎没有变化;随温度升高,杨树枝的吸热量逐渐增加,在约 100℃出现第 1 个吸热峰,主要是水分蒸发吸热所致.温度进一步提高,杨树枝热解吸热量呈先降低后逐步升高的趋势,为杨树枝中的半纤维素等组分热解所致^[25].对曲线分段积分,可得不同终温下单位质量杨树枝的热解热 E_{py} ,见表 5.

根据式(6)和(7)并结合表 1,可计算出不同烘焙温度下杨树枝的水分蒸发热 E_{H_2O} 和干生物质升温显热 E_{db} ,见表 5.由表可知,随烘焙温度升高,杨树枝烘焙的热解热、水分蒸发吸热和干生物质升温显热均呈上升趋势,其中热解热和干生物质升温显热增加较明显,且热解热稍高于干生物质升温显热,使杨树枝的烘焙热随温度升高而增加.烘焙温度由 200℃升至 300℃时,烘焙热由 896.5 kJ/kg 升至 1613.6 kJ/kg,增加了约 80%,且在 300℃下烘焙热约为其低位发热量(16.81 MJ/kg)的 10%.上述结果表明,烘焙温度是影响生物质烘焙热的主要因素,生物质烘焙的能量消耗不大,为生物质烘焙能量自给提供了条件.

表 5 不同烘焙温度下杨树枝的烘焙热

Energy /(kJ/kg)	Torrefaction temperature/℃				
	200	225	250	275	300
Pyrolysis heat of PB, E_{py} /(kJ/kg)	395.8	472.4	558.4	656.1	763.7
Evaporative heat of H_2O , E_{H_2O} /(kJ/kg)	189.3	195.8	202.4	209.0	215.6
Sensible heat of dry biomass, E_{db} /(kJ/kg)	311.4	382.1	459.4	543.5	634.3
Heat requirement of biomass torrefaction, E_{in} /(kJ/kg)	896.5	1050.3	1220.2	1408.6	1613.6

表 6 杨树枝烘焙过程能量分布与能量平衡

Item	Torrefaction temperature/℃				
	200	225	250	275	300
Gas product energy, E_g /(kJ/kg)	297.2	499.4	572.6	709.2	1394.5
Liquid product energy, E_l /(kJ/kg)	311.2	2066.4	4635.2	4222.8	4155.2
Solid product energy, E_s /(MJ/kg)	16.17	13.09	10.66	10.32	8.31
Total energy of three products, E_t /(MkJ/kg)	16.78	15.66	15.87	15.26	13.86
Gas and liquid products energy, (E_g+E_l) /(kJ/kg)	608.4	2565.8	5146.8	4932	5549.7
Heat requirement of biomass torrefaction, E_{in} /(kJ/kg)	896.5	1050.3	1220.2	1408.6	1613.6
Energy balance ratio in the torrefaction, η_b	0.68	2.44	4.22	3.50	3.44
Energy balance ratio of gas product, η_{bg}	0.33	0.48	0.47	0.50	0.86
Energy balance ratio of liquid product, η_{bl}	0.35	1.97	3.80	3.00	2.58
Energy yield of solid product, η_s	0.962	0.779	0.634	0.614	0.494
Energy yield of total products, η_t	0.998	0.932	0.944	0.908	0.825

4.5 烘焙温度对能量分布与能量平衡的影响

表 6 为不同烘焙温度下杨树枝烘焙产物能量、烘焙热及能量平衡率等的计算结果.可以看出,烘焙后杨树枝原有的热值转移到杨树枝炭、液体产物和不凝气体中,且杨树枝炭的能量显著大于另外两种烘焙产物,表明烘焙过程具有很好的提升生物质能量密度的作用.同时,随烘焙温度提高,3 种烘焙产物能量的总和(E_t)呈逐

渐降低的趋势,由 200℃下的 16.78 MJ/kg 降低到 300℃下的 13.86 MJ/kg,与杨树枝原料的热值相比最大降幅仅为 17.6%,表明杨树枝烘焙不仅不会显著降低烘焙产物的能量,而且有利于获得高能量密度的杨树枝炭.进一步分析可知,随烘焙温度提高,烘焙所得液体和气体产物的能量之和(E_g+E_l)呈先快速增加后趋于平稳的趋势,且液体产物的能量显著高于气体产物.

图3为烘焙温度对杨树枝能量平衡的影响,其生物炭能量得率 η_s 和烘焙产物总能量得率 η_t 分别为生物炭能量(E_s)或烘焙产物总能量(E_t)与杨树枝低位发热量($Q_{\text{net,ad}}$)之比,即 $\eta_s=E_s/Q_{\text{net,ad}}$, $\eta_t=E_t/Q_{\text{net,ad}}$ 。由图可以看出,随烘焙温度升高,能量平衡率(η_b)先快速升高后趋于平稳,且 $\eta_b=1$ 对应的烘焙温度约为205℃,300℃下 η_b 基本约为3.5;同时,烘焙所得气体的能量平衡率在0.33~0.86之间,均小于1。 η_s 和 η_t 均随烘焙温度升高而逐渐减低, η_s 下降速度显著大于 η_t ,且在 $\eta_b=1$ 条件下 $\eta_t \approx 0.9$ 。表明一方面较低的烘焙温度(205℃)和较少的烘焙热解气(约10%)就可满足烘焙的能量平衡;另一方面,较高的烘焙温度能使生物质热解过程更剧烈,释放出更多挥发分,从而为烘焙过程能量自给创造了更好的条件,但生物炭的质量得率和能量得率显著降低。综合考虑生物炭质量得率、能量得率及烘焙装置传热、热气燃烧效率和系统散热等因素,建议烘焙装置设计的 $\eta_b \approx 2.5$ 。杨树枝在烘焙温度约225℃下, $\eta_b \approx 2.5$,烘焙能获得64.0%的生物炭,热解气燃烧热完全可满足烘焙热所需,可实现杨树枝烘焙的能量自给。

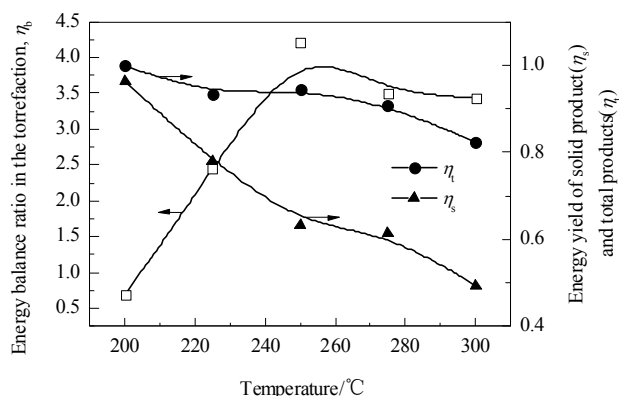


图3 烘焙温度对能量平衡的影响

Fig.3 Effect of temperature on energy balance

5 结论

基于烘焙过程分析,建立了生物质烘焙的能量平衡计算方法,结合固定床烘焙产物分析结果,研究了烘焙温度和保温时间对杨树枝烘焙特性、烘焙所需热及烘焙产物能量分布的影响,得到如下结论:

(1) 烘焙温度是影响杨树枝烘焙产物分布和杨树枝炭特性的重要因素,随烘焙温度提高,杨树枝炭得率显著降低,热值逐渐提高,液体产物和气体产物逐渐增加。

(2) 随烘焙温度提高,杨树枝热解热、水分吸热和生物质吸热均呈上升趋势,且热解热和升温显热增加更

显著。

(3) 随烘焙温度提高,烘焙气中CO浓度变化不大,而CH₄浓度迅速增加,使烘焙气体产物热值显著提高,300℃下气体产物热值是200℃下的4.7倍。液体产物的热值变化不显著,为7.78~10.83 MJ/kg。随液体产物得率增加,其热值在热解气中所占比例快速提高。

(4) 烘焙将杨树枝能量转移到生物炭、液体和气体产物中,且生物炭的能量显著大于液体和气体产物。随烘焙温度升高,能量平衡率先快速升高后趋于平稳,能量平衡时的烘焙温度约为205℃。烘焙温度225℃下炭得率为64.0%,能量平衡率约为2.5,完全能满足杨树枝烘焙能量自给需要。

参考文献:

- [1] Herbert G M J, Krishnan A U. Quantifying Environmental Performance of Biomass Energy [J]. Renewable Sustainable Energy Rev., 2016, 59: 292–308.
- [2] Gross R, Leach M, Bauen A. Progress in Renewable Energy [J]. Environ. Int., 2003, 29(1): 105–122.
- [3] Du S W, Chen W H, Lucas J A. Pretreatment of Biomass by Torrefaction and Carbonization for Coal Blend Used in Pulverized Coal Injection [J]. Bioresour. Technol., 2014, 161: 333–339.
- [4] Chew J J, Doshi V. Recent Advances in Biomass Pretreatment—Torrefaction Fundamentals and Technology [J]. Renewable Sustainable Energy Rev., 2011, 15(8): 4212–4222.
- [5] Chen W H, Peng J, Bi X T. A State-of-the-art Review of Biomass Torrefaction, Densification and Applications [J]. Renewable Sustainable Energy Rev., 2015, 44: 847–866.
- [6] 车庆丰, 梅艳阳, 杨晴, 等. 烘焙对生物质催化热解产物特性的影响研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(8): 2027–2032.
- [7] Che Q F, Mei Y Y, Yang Q, et al. Effect of Torrefaction on Characteristics of Catalytic Pyrolysis Product of Biomass [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(8): 2027–2032.
- [8] 刘华敏, 马明国, 刘玉兰. 预处理技术在生物质热化学转化中的应用 [J]. 化学进展, 2014, 26(1): 203–213.
- [9] Liu H M, Ma M G, Liu Y L. Applications of Pretreatment in Biomass Thermo-chemical Conversion Technology [J]. Progress in Chemistry, 2014, 26(1): 203–213.
- [10] Nunes L J R, Matias J C O, Catalão J P S. A Review on Torrefied Biomass Pellets as a Sustainable Alternative to Coal in Power Generation [J]. Renewable Sustainable Energy Rev., 2014, 40: 153–160.
- [11] Deng J, Wang G J, Kuang J H, et al. Pretreatment of Agricultural Residues for Co-gasification via Torrefaction [J]. J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2009, 86(2): 331–337.
- [12] Bach Q V, Skreiberg Ø. Upgrading Biomass Fuels via Wet Torrefaction: A Review and Comparison with Dry Torrefaction [J]. Renewable Sustainable Energy Rev., 2016, 54: 665–677.
- [13] Bourgois J, Guyonnet R. Characterization and Analysis of Torrefied Wood [J]. Wood Sci. Technol., 1988, 22(2): 143–155.
- [14] Bridgeman T G, Jones J M, Shield I, et al. Torrefaction of Reed Canary Grass, Wheat Straw and Willow to Enhance Solid Fuel Qualities and Combustion Properties [J]. Fuel, 2008, 87(6): 844–856.

- [13] Matali S, Rahman N A, Idris S S, et al. Lignocellulosic Biomass Solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction [J]. *Procedia Eng.*, 2016, 148: 671–678.
- [14] Rousset P, Davrieux F, Macedo L, et al. Characterisation of the Torrefaction of Beech Wood Using NIRS: Combined Effects of Temperature and Duration [J]. *Biomass Bioenergy*, 2011, 35(3): 1219–1226.
- [15] Prins M J. Thermodynamic Analysis of Biomass Gasification and Torrefaction [D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2005: 27–50.
- [16] 王贵军, 罗永浩, 邓剑, 等. 生物质的低温热解预处理实验研究 [J]. *科学通报*, 2011, 56(36): 3451–3457.
Wang G J, Luo Y H, Deng J, et al. Pretreatment of Biomass by Torrefaction [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(36): 3451–3457.
- [17] Bergman P C A. Combined Torrefaction and Pelletisation: The TOP Process [R]. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), Unit ECN Biomass, ECN Report: ECN-C-05-073. 2005.
- [18] 陈登宇, 张鸿儒, 刘栋, 等. 烘焙预处理对秸秆热解产物品质及能量分布的影响 [J]. *太阳能学报*, 2017, 38(2): 565–570.
Chen D Y, Zhang H R, Liu D, et al. Effect of Torrefaction Pretreatment on Properties of Pyrolysis Product and Energy Distribution of Corn Stalk [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2017, 38(2): 565–570.
- [19] 何芳, 徐梁, 柏雪源, 等. 生物质热解过程吸热量 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27(3): 237–241.
He F, Xu L, Bai X Y, et al. Heat Requirement of Biomass Pyrolysis [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2006, 27(3): 237–241.
- [20] 胡晨, 吴晋沪, 方云明. 基于差示扫描量热技术的生物质低温烘焙过程吸热量研究 [J]. *可再生能源*, 2010, 28(6): 40–44.
Hu C, Wu J H, Fang Y M. DSC Based Study on the Heat Requirement for Biomass Torrefaction [J]. *Renewable Energy Resources*, 2010, 28(6): 40–44.
- [21] 王秦超, 卢平, 黄震, 等. 生物质低温热解炭化特性的实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(增刊1): 121–126.
Wang Q C, Lu P, Huang Z, et al. Experimental Study on Low Temperature Pyrolysis of Biomass [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(S1): 121–126.
- [22] 矫常命, 何芳. 玉米秸秆热解液体产物热值的测定 [J]. *山东理工大学学报:自然科学版*, 2006, 20(2): 11–13.
Jiao C M, He F. Heating Value Determination of Liquid Product from Corn Stalk Pyrolysis [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Science & Technology)*, 2006, 20(2): 11–13.
- [23] 龙潭. 生物质热解气冷凝及生物油燃烧的实验研究与数值模拟 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014: 29–41.
Long T. Experimental Research and Numerical Simulation of Condensation of Pyrolysis Gas and Combustion of Bio-oil [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014: 29–41.
- [24] 陈群, 庞任重, 陈熙, 等. 热解过程中生物质半焦比热容的测定 [J]. *燃料化学学报*, 2014, 42(9): 1040–1046.
Chen Q, Pang R Z, Chen X, et al. Determination of Specific Heat Capacity of Biomass Char during Pyrolysis [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2014, 42(9): 1040–1046.
- [25] Rousset P, Aguiar C, Labbe N, et al. Enhancing the Combustible Properties of Bamboo by Torrefaction [J]. *Bioresour. Technol.*, 2011, 102: 8225–8231.