

烘焙对农业秸秆燃烧特性的影响

朱波, 陈汉平, 杨海平, 陈应泉, 王贤华, 张世红

(煤燃烧国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Influence of Torrefaction on the Property of Agricultural Straw Combustion

ZHU Bo, CHEN Hanping, YANG Haiping, CHEN Yingquan, WANG Xianhua, ZHANG Shihong

(State Key Laboratory of Coal Combustion(Huazhong University of Science &Technology Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: In order to catch the influence of torrefaction on biomass combustion and the mechanism, the weight loss behavior and heat releasing property of torrefaction biomass samples was investigated using thermal analysis and differential scanning calorimetry with rice straw and cotton stalk as typical biomass samples. The results show that the combustion process of straw including dehydration, volatile and fixed carbon combustion, and after the torrefaction treatment, the ignition point is shifted to lower temperature. and the combustion take place much fully and quickly, furthermore, the heat release of combustion improved as the torrefaction temperature increased. Meanwhile, the kinetics and combustion mechanism of torrefied straw were discussed using adopting non-isothermal integral method. It is observed that the volatile combustion process of rice straw was an first order reaction, and rice straw is mainly caused by volatile combustion, the activation energy of cotton stalk is higher, and mainly attributed to the fixed carbon combustion. Torrefaction pretreatment can improve the combustion characteristics of agricultural straw sharply.

KEY WORDS: torrefaction; straw; combustion characteristics; kinetics.

摘要: 为了探究烘焙对生物质燃烧特性以及燃烧机制的影响,研究了不同烘焙条件下典型秸秆的燃烧失重特性和放热行为。选择棉秆和稻秆为主要研究对象,采用热重分析仪与差热扫描量热仪连用分析了秸秆的燃烧特性。实验结果表明:秸秆燃烧过程主要包括脱水、挥发分和固定碳燃烧,经

烘焙处理后,秸秆的着火温度明显降低,燃烧更为充分,并且燃烧放热量随着烘焙温度的提高而进一步加大。采用非等温积分法分析了烘焙秸秆的热动力学特性和燃烧机制,发现稻秆的挥发分燃烧过程为1级反应,稻秆主要为挥发分的燃烧,棉秆的活化能较高,并且主要是固定碳的燃烧。农业秸秆烘焙预处理对其燃烧特性的改善有明显的作用。

关键词: 烘焙; 秸秆; 燃烧特性; 热动力学

0 引言

由于对化石能源的过度依赖,全球经济的可持续发展面临着能源短缺、环境恶化的严峻挑战。生物质能因其数量巨大、环境友好及CO₂零排放等特性,近年来成为各国的研究重点^[1-2]。生物质直燃技术是大规模高效清洁利用生物质能的一种重要方式,也是目前适合我国国情的生物质高效利用途径之一。

由于生物质自身的堆密度小、水分大、能量密度低以及不易储存等缺点^[3-5],限制了其更为高效的利用,而采用烘焙技术可有效改善其自身品质^[6-7]。Phanphanich等^[8]研究了烘焙对林业废弃物可磨性的影响,发现经烘焙后其可磨性得到明显改善,粉碎耗能为23~78 kW·h/t,与烟煤相当,而粉碎1t木屑原样所需能量为237kW·h Prins等^[9-10]研究了柳枝、落叶松等木屑的燃烧特性,发现烘焙后其排烟量明显减少;Arias等^[11]进行了烘焙前后生物质的燃烧动力学研究,Bridgeman等^[12]也对此进行了相关研究。作为农业大国,我国每年都有大量的农业秸秆废弃物,预计到2015年将有9亿吨秸秆产量,其中1/2可能源化利用。然而有关农业秸秆的烘焙以及相关燃烧特性的研究还很少开展,而农业秸秆

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2007CB210202); 国家自然科学基金项目(50930006, 50806027)。

Project Supported by The National Basic Research Program of China (973 Program)(2007CB210202); National Natural Science Foundation of China (50930006, 50806027).

的烘焙过程直接影响着其燃烧特性。

本文选择我国典型的农业废弃物——稻秆和棉秆，采用热重-微分热重-差示扫描量热仪(thermogravimetric-differential thermogravimetric-differential scanning calorimetry, TG-DTG-DSC)方法对不同温度和时间下固定床烘焙产物进行燃烧失重和放热特性分析，并对其反应热动力学进行了研究，为进一步研究烘焙工艺，建立合理的烘焙和燃烧相结合的技术提供理论依据。

1 实验样品和实验方法

1.1 实验样品

生物质样品为湖北当地的稻秆和棉秆，采用

230、260、290℃对其进行固定床烘焙处理，停留时间分别为30和60min。烘焙产物经研磨、筛分后选择小于100目的进行燃烧特性实验。烘焙前后生物质样品的工业分析(西班牙Las Navas公司，型号：SDTGA-2000)和元素分析(德国Vario公司，型号：EL-2)结果如表1所示，并采用Friedl等^[13]总结的计算方法得到秸秆在干燥基下的HHV计算结果。从表中可知原样中N、S含量很低，可有效降低SO₂、NO_x等气体的生成。经低温烘焙后秸秆的固定碳含量都有明显提高，而O含量明显降低，发热量也有大幅度的提升，有利于秸秆的能源化利用。

表1 烘焙生物质样品的基本物性参数

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of torrefied biomass samples

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ad}}/(\text{MJ/kg})$
	M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	O^*	
棉秆原样	4.66	74.96	4.59	15.79	46.07	7.06	0.61	0.34	41.33	15.78
棉秆 230℃, 30 min	0.93	67.46	5.28	26.33	48.97	6.69	0.65	0.33	38.08	19.82
棉秆 260℃, 30 min	0.70	63.72	6.20	29.38	53.06	6.34	0.67	0.34	33.39	21.56
棉秆 290℃, 30 min	0.48	57.53	7.34	34.65	62.63	5.26	0.86	0.30	23.61	24.85
棉秆 260℃, 60 min	0.65	62.32	6.45	30.58	54.48	6.30	0.64	0.32	31.81	22.18
稻秆原样	5.04	82.12	7.74	5.10	39.52	6.24	1.16	0.14	45.20	15.78
稻秆 230℃, 30 min	2.27	77.55	10.66	9.52	41.32	5.14	1.07	0.13	41.68	16.68
稻秆 260℃, 30 min	1.51	72.50	13.06	12.93	43.89	5.03	1.02	0.11	36.89	17.55
稻秆 290℃, 30 min	1.01	62.77	18.61	17.61	47.22	4.29	1.12	0.09	28.67	18.57
稻秆 260℃, 60 min	1.41	69.34	14.84	14.41	44.25	4.98	1.23	0.10	34.60	17.70

注：*O含量由差减法计算得到；ad—空气干燥基。

1.2 实验仪器

烘焙前后秸秆的燃烧特性实验采用德国NETZSCH公司STA-409C型热综合分析仪(TG-DTG)，同时采用差热扫描量热仪分析燃烧过程中秸秆的热失重特性与燃烧放热行为。本实验选取样品量约10mg，从室温以20℃/min升至800℃至燃烧结束，工作气氛为压缩空气，气体流量100mL/min。

1.3 热动力学分析方法

根据质量作用定律，实验过程中升温速率一定，则可知反应速率与温度遵循阿累尼乌斯定律，根据所采用实验条件，生物质燃烧动力学计算采用如下方程^[14]：

$$\ln[F(\alpha)] = -(E/(RT)) + \ln(AR/(\beta E)) \quad (1)$$

$$F(\alpha) = -\ln(1-\alpha)/T^2, \quad n=1 \quad (2)$$

$$F(\alpha) = \{1 - (1-\alpha)^{1-n}\} / (1-n)T^2, \quad n \neq 1 \quad (3)$$

式中： $\alpha=(w_0-w)/(w_0-w_\infty)$ ，为生物质转化率； β 为升温速率，本实验为20℃/min； n 为反应级数； E 为燃烧反应的活化能，kJ/mol； A 为指前因子， min^{-1} ； R 指理想气体常数，8.314J/(mol·K)。

若 n 与燃烧反应级数一致， $\ln(F(\alpha)) \sim 1/T$ 图形为一条直线，则可从直线的斜率和截距计算出样品燃烧的 E 和 A 。在实验过程中假设多个不同的反应级数： $n=0、1、2$ 和 3 ，通过上述方程计算动力学参数活化能 E 和指前因子 A ，采用最佳拟合原则确定反应级数^[15]。

2 实验结果与讨论

2.1 烘焙前后秸秆燃烧TG-DTG分析

秸秆燃烧TG和DTG曲线如图1-4所示。从图中可以看出秸秆的燃烧过程主要包括以下3个阶

段：1) 从室温~200 °C，TG 曲线没有明显的失重，主要是预热干燥阶段，秸秆中的水分受热汽化逸出；2) 200~320 °C，2 种秸秆燃烧 DTG 曲线失重速率明显增加，主要是挥发分析出及其燃烧阶段，物料受热后，较低分子量的挥发分首先达到着火温度后生成燃烧火焰，同时也加快了更多挥发分的燃烧，相应 DTG 曲线出现第 1 个峰值(稻秆 63%/min, 285 °C；棉秆 97%/min, 276 °C)，而后进入过渡阶段，失重速率迅速下降，稻秆燃烧 DTG 曲线有 2 个完全分离的失重峰，过渡段有明显的停留时间，而棉秆的挥发分燃烧更为剧烈，在相同的时间间隔内(0.33 s)，失重速率提高了 15%；3) 320~500 °C 为固定碳的燃烧阶段。在过渡阶段后，秸秆中挥发分燃烧过程使得秸秆中的固定碳表面缓慢氧化后开始迅速燃烧，形成 DTG 曲线中的第 2 个峰值(稻秆 6%/min, 345 °C)，而棉秆挥发分和固定碳燃烧分峰不是特别明显，说明两者燃烧过程连接比较紧密，这主要是由于棉秆中挥发分较难析出且燃烧缓慢，

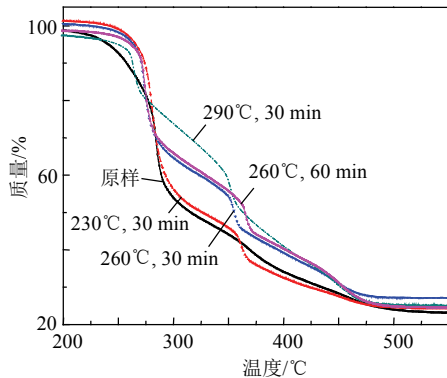


图 1 不同条件烘焙前后稻秆燃烧 TG 曲线

Fig. 1 TG curve of rice straw combustion in different torrefaction conditions

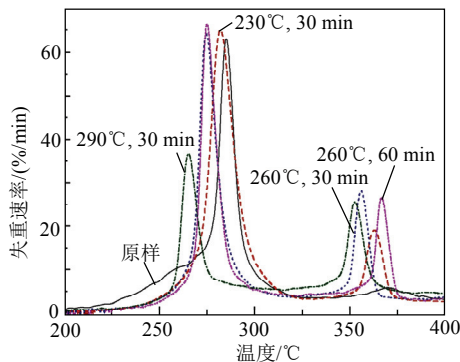


图 2 不同条件烘焙前后稻秆燃烧 DTG 曲线

Fig. 2 DTG curve of rice straw combustion in different torrefaction conditions

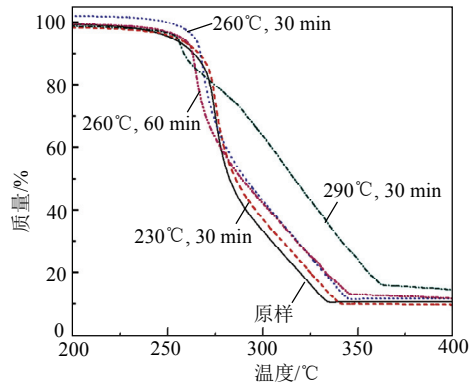


图 3 不同条件烘焙前后棉秆燃烧 TG 曲线

Fig. 3 TG curve of cotton stalk combustion in different torrefaction conditions

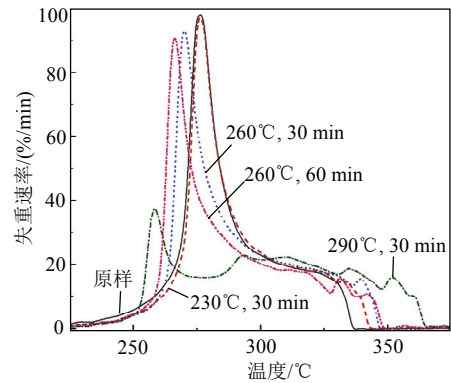


图 4 不同条件烘焙前后棉秆燃烧 DTG 曲线

Fig. 4 DTG curve of cotton stalk combustion in different torrefaction condition

当挥发分燃烧尚未结束时固定碳就开始燃烧(330 °C左右)。随着温度的继续升高(>500 °C)，生物质样品无明显失重，主要是其存在的矿物质的分解，这也和其他学者的研究一致^[16]。其中挥发分在燃烧过程中析出温度低、速度快，并能释放大量的热量，一般能提供总热量的 70%^[17]。

经烘焙处理后，可以发现秸秆的燃烧特性发生了明显的改善，燃烧温度明显降低，且随着烘焙温度的提高，秸秆最大失重峰对应的温度逐渐降低(约 20 °C)，这主要是由于烘焙后秸秆的表面结构在热力作用下被破坏，整体的聚合度降低，表面松散程度加大，使得其更易燃烧，燃烧温度更低。

值得注意的是，烘焙温度对于秸秆燃烧特性有着明显的作用：当烘焙温度<260 °C时，秸秆样品的挥发分燃烧失重峰并未有太大的改变，而稻秆的固定碳燃烧失重峰值快速增大(原样：6%/min；烘焙样，230 °C，30 min：27%/min)，这主要是因为稻秆在烘

焙后固定碳含量增大,其分子内的碳骨架结构更为分散,使得燃烧迅速,失重速率加大,此时其挥发分含量减少缓慢,而棉秆的固定碳燃烧则基本不变。然而随着烘焙温度的继续升高(260~290 °C),秸秆挥发分燃烧失重峰值明显降低,这主要是因为烘焙过程中秸秆中半纤维大部分以含氧有机碳氢化合物挥发析出,而使得秸秆样品中挥发分含量明显降低,从而导致秸秆燃烧过程中挥发分的析出燃烧对应的失重速率有一定的降低^[18-20]。固定碳峰值虽缓慢减少,但其所对应的燃烧放热面积则有所增大,而且烘焙后棉秆的固定碳燃尽温度明显提高(原样: 335 °C; 290 °C, 30 min: 365 °C),这可能是由于烘焙使得棉秆的固定碳含量显著提高,且焦炭结构较为致密,使得固定碳燃烧较为缓慢,相应的燃尽温度提高。而当烘焙时间延长为 60 min,稻秆固定碳的失重峰较 30 min 时明显后移,2 个峰值之间的过渡阶段加长,说明烘焙时间延长使得秸秆内含氧官能团的脱氧缩合程度增大,而使得固定碳的结构更为致密,而导致秸秆燃烧困难,所对应最大失重峰温度也明显提高。然而烘焙时间的延长对棉秆固定碳燃烧无明显影响,这可能是因为棉秆结构较致密,较低烘焙温度下烘焙时间的延长对其结构影响不大,这与其表 1 结果一致。

2.2 烘焙前后秸秆燃烧 DSC 分析

秸秆样品燃烧的 DSC 曲线如图 5—6 所示。秸秆原样在燃烧初始阶段出现负值(稻秆: -1.4 mW/mg, 95 °C; 棉秆: -2.0 mW/mg, 110 °C),表明此时为吸热反应,主要是由于低温下(<150 °C)水分的蒸发和低馏分物质热分解所需要的热量,而由于烘焙过程使得秸秆的水分和部分小分子物质已经析出,因此烘焙秸秆样品无明显吸热。

随着温度的升高,秸秆样品开始着火燃烧,出现了明显的放热,且其放热曲线与其燃烧失重速率特性一致。烘焙前后稻秆呈现出明显的双峰结构,这主要因为秸秆样品内挥发分析出燃烧并伴随着大量热量产生,而随着温度的进一步提高固定碳开始着火燃烧,同时释放大量的热量,而 2 个阶段有明显的过渡阶段,从而形成 2 个放热峰。而棉秆由于结构致密,挥发分的析出燃烧与固定碳燃烧峰重合,从而表现为一个大的放热峰。经过烘焙预处理

后, DSC 曲线呈现出整体向低温段偏移的趋势,2 种秸秆的放热峰值均不同程度的提升(稻秆: 13 mW/mg, 290 °C, 30 min; 棉秆: 20 mW/mg, 290 °C, 30 min),且随着烘焙温度的提高其放热面积进一步加大,最大的温差峰值出现在固定碳的燃烧阶段,这主要是由于烘焙后固定碳含量升高而挥发分的量有一定的降低,因此使得高温段的放热量逐渐高于低温段。

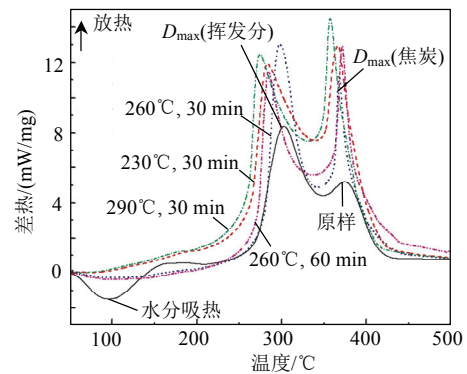


图 5 不同条件烘焙前后稻秆燃烧 DSC 曲线
Fig. 5 DSC curve of rice straw combustion in different torrefaction conditions

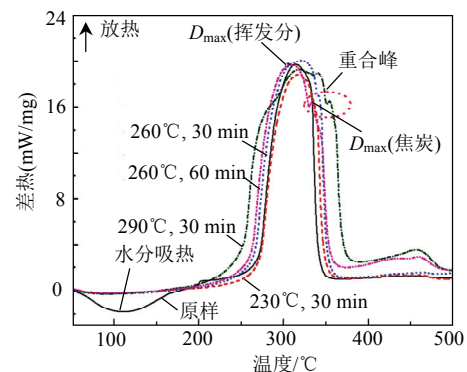


图 6 不同条件烘焙前后棉秆燃烧 DSC 曲线
Fig. 6 DSC curve of cotton stalk combustion in different torrefaction conditions

2.3 秸秆燃烧动力学分析

秸秆燃烧过程的动力学分析结果见表 2 所示。本文着重分析秸秆燃烧段的热动力学特性,分别对其低温燃烧段和高温燃烧段进行不同反应级数分析,选择拟合度较佳的结果。对稻秆而言,其燃烧主要集中在 240~460 °C,而棉秆的燃烧失重主要发生在 240~350 °C 之间,且随烘焙时间和温度的不同而稍有升高。

秸秆燃烧低温段活化能均小于高温段(低温段: 约 100 kJ/mol, 高温段: 150 kJ/mol)说明挥发分比

固定碳容易燃烧, 而烘焙后秸秆燃烧所需活化能都有一定的升高, 且随着烘焙温度的升高和烘焙时间的加长而明显增加, 这主要是因为烘焙过程不仅使得秸秆内的固定碳含量明显提高, 并且其内部结构也更为复杂和致密, 从而使得其着火燃烧需要更多的能量, 而导致秸秆燃烧活化能提高, 同时秸秆结构复杂, 燃烧过程也更加复杂, 使得反应级数也有

一定的增加。

棉杆的活化能比稻秆稍高, 说明其燃烧反应较为困难, 这主要是由于棉杆结构紧密, 挥发分不易析出, 导致燃烧反应较难进行, 这也和前面的热重分析结果一致。从反应级数可知棉杆燃烧主要为 3 级反应, 而稻秆的挥发分燃烧主要为 1 级反应, 而固定碳燃烧为 3 级反应。

表 2 农业秸秆燃烧动力学参数

Tab. 2 Kinetic parameters of agricultural straw combustion

样品	温度区间/℃	反应级数	活化能 $E/(kJ/mol)$	指前因子 A/min^{-1}	拟合度 R	失重率/%
稻秆原样	240~291	1	65.97	2.02×10^4	0.987 9	37.41
	291~460	3	103.57	24.11	0.984 3	30.61
230 ℃, 30 min	242~290	3	91.61	3.67×10^3	0.984 6	37.87
	290~460	3	221.59	3.14×10^{23}	0.970 7	35.57
260 ℃, 30 min	240~283	1	241.06	1.03×10^{18}	0.990 5	28.57
	283~460	3	215.55	2.36×10^{15}	0.983 1	41.39
290 ℃, 30 min	240~289	1	104.41	1.11×10^3	0.977 1	20.41
	289~460	3	90.79	2.64×10^4	0.978 5	48.43
260 ℃, 60 min	240~290	1	154.13	72.11	0.979 6	29.37
	290~460	3	73.45	1.03×10^9	0.970 2	39.68
棉秆原样	240~325	3	236.16	6.58×10^{17}	0.991 6	80.94
230 ℃, 30 min	240~325	3	209.61	1.26×10^{15}	0.988 5	77.43
260 ℃, 30 min	240~280	1	167.38	4.70×10^{12}	0.989 5	40.29
	280~325	3	159.40	2.53×10^{10}	0.993 0	36.02
290 ℃, 30 min	260~325	3	106.65	6.61×10^4	0.995 7	45.43
260 ℃, 60 min	240~325	3	191.68	2.04×10^{13}	0.980 7	72.76

3 结论

本文主要采用热重分析仪与差式量热扫描仪联用对烘焙秸秆的燃烧特性与燃烧机制进行深入的分析, 主要结论归纳如下:

1) 烘焙后农业秸秆的含碳量和发热量显著提高, 水分和含氧量明显降低, 挥发分含量随着烘焙温度的提高降低较为明显, 能量密度也得到了大幅提升, 有利于后续规模化利用及产物品质的提升。

2) 农业秸秆的燃烧主要经历脱水、挥发分析出燃烧和固定碳燃烧 3 个阶段, 烘焙后秸秆固定碳含量提高, 其中稻秆的固定碳燃烧失重更为迅速, 着火温度提前, 棉杆固定碳燃尽温度提高, 同时放热量也明显增大。

3) 烘焙前后秸秆的燃烧特性均遵循燃烧动力学基本方程, 稻秆燃烧活化能小于棉杆, 棉杆燃烧主要为 3 级反应, 而稻秆的挥发分燃烧过程为 1 级反应, 烘焙过程使得秸秆燃烧的活化能和反应级数

均有不同程度的提高。

参考文献

- [1] 陈祎, 段佳, 林鹏, 等. 氧量对典型生物质燃烧特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 43-48. Chen Yi, Duan Jia, Lin Peng, et al. Effect of oxygen concentration on combustion characteristics of typical biomass materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 43-48(in Chinese).
- [2] 张睿智, 罗永浩, 刘春元, 等. 生物质气化再燃技术中焦油的利用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (17): 98-103. Zhang Ruizhi, Luo Yonghao, Liu Chunyuan, et al. Utilization of tar in biomass gasification reburning process[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30 (17): 98-103(in Chinese).
- [3] Demirbas A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005,

- 31(2): 171-192.
- [4] Zulfiqar M, Moghtaderi B, Wall T F. Flow properties of biomass and coal blends[J]. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87(4): 281-288.
- [5] 王德元. 生物质能利用系统综合评价研究[D]: 华中科技大学, 2008.
Wang Deyuan. Study on the comprehensive evaluation about the biomass energy systems[D]. *Huazhong University of Science and Technology*, 2008.
- [6] Deng J, Wang G J, Kuang J H, et al. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, 86(2): 331-337.
- [7] Prins M J, Ptasincki K J, Janssen F. More efficient biomass gasification via torrefaction[J]. *Energy*, 2006, 31(15): 3458-3470.
- [8] Phanphanich M, Mani S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 1246-1253
- [9] Prins M J, Ptasincki K J, Janssen F. Torrefaction of wood: Part 2. analysis of products[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, 77(1): 35-40.
- [10] Prins M J, Ptasincki K J, Janssen F. Torrefaction of wood: Part 1. weight loss kinetics[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, 77(1): 28-34.
- [11] Arias B, Pevida C, Feroso J, et al. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass[J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(2): 169-175.
- [12] 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] Friedl A, Padouvas E, Rotter H, et al. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 544(1-2): 191-198.
- [14] 杨海平, 陈汉平, 晏蓉, 等. 油棕废弃物热解的 TG-FTIR 分析[J]. *燃料化学学报*, 2006, 34(3): 309-314.
Yang Haiping, Chen Hanping, Yan Rong, et al. TG-FTIR analysis of palm oil wastes pyrolysis[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2006, 34(3): 309-314(in Chinese).
- [15] 文丽华, 王树荣, 骆仲决, 等. 生物质的多组分热裂解动力学模型[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2005, 39(2): 247-252.
Wen Lihua, Wang Shurong, Luo Zhongyang, et al. Multicomponent kinetic model of biomass pyrolysis [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2005, 39(2): 247-252(in Chinese).
- [16] Skodras G, Grammelis P, Basinas P, et al. Pyrolysis and combustion characteristics of biomass and waste-derived feedstock[J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2006, 45(11): 3791-3799.
- [17] 李琦芬, 任建兴, 潘卫国, 等. 秸秆类生物质燃烧结渣与沉积倾向分析[J]. *上海电力学院学报*, 2007, 23(4): 333-336.
Li Qifen, Ren Jianxing, Pan Weiguang, et al. Tendency of straw biomass burning slags and deposits[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2007, 23(4): 333-336(in Chinese).
- [18] 赵辉, 周劲松, 曹小伟, 等. 生物质烘焙预处理对气流床气化的影响[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(12): 1578-1586.
ZhaoHui, Zhou Jinsong, Cao Xiaowei, et al. Torrefaction impact on biomass entrained flow gasification[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2008, 29(12): 1578-1586(in Chinese).
- [19] Couhert C, Salvador S, Commandre J M. Impact of torrefaction on syngas production from wood[J]. *Fuel*, 2009, 88(11): 2286-2290.



朱波

收稿日期: 2011-01-06。

作者简介:

朱波(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为生物质热化学转化利用, zhubo19850505@163.com;

杨海平(1977), 女, 副教授, 主要从事生物质及固体废弃物的资源化利用研究, 本文通讯作者, yhp2002@163.com。

(责任编辑 王庆霞)