

赵文霞, 杨朝旭, 刘 帅, 等. 典型农作物秸秆组成及燃烧动力学分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 921-927.

ZHAO Wen-xia, YANG Zhao-xu, LIU Shuai, et al. Composition and combustion dynamics analysis of typical crop straws[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 921-927.

典型农作物秸秆组成及燃烧动力学分析

赵文霞^{1,2,3}, 杨朝旭^{1,2,3}, 刘 帅^{1,2,3}, 任爱玲^{1,2,3}

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 挥发性有机物与恶臭污染防治国家地方联合工程研究中心, 石家庄 050018; 3. 河北省 VOCs 与恶臭污染防治工程实验室, 石家庄 050018)

摘 要: 为了探讨我国典型区域典型农作物秸秆的组成及燃烧特性, 在典型农作物种植区(河北省和吉林省)选择了三种典型秸秆(小麦秸秆、水稻秸秆和玉米秸秆), 对其进行组分分析(工业分析、元素分析、纤维组成), 借助差热-热重仪对其燃烧动力学特性进行研究。结果表明: 三种秸秆中水稻秸秆灰分和综纤维素含量最高, 小麦秸秆中 S、Hg 含量最高, 其他工业分析(水分、挥发分、固定碳)和元素(C、H、O、N)组成均无明显差异。不同升温速率下, 三种秸秆的 TG 和 DTG 曲线总体趋势相似, 两个明显的失重峰分别对应挥发分的析出和燃烧阶段、固定碳燃烧阶段, 且前者的失重率远高于后者; 同一升温速率下, 三种秸秆在低温燃烧区(挥发分析出和燃烧)的最大失重率由高到低依次为小麦秸秆 > 水稻秸秆 > 玉米秸秆, 而高温燃烧区(固定碳的燃烧)玉米和水稻秸秆的最大失重率没有明显差别, 均高于小麦秸秆。秸秆低温区燃烧和高温区燃烧动力学过程均符合二级燃烧动力学方程。研究表明, 三种秸秆具有高挥发分、低灰分(水稻秸秆除外)、低硫的特点; 秸秆的燃烧失重主要是挥发分的析出和燃烧, 其次是固定碳的燃烧, 而水分蒸发贡献量最少; 快速失重峰形不仅与秸秆的组成有关, 还与挥发分初析温度高低有关; 双组分分阶段反应模型能够科学地描述农作物秸秆的燃烧动力学过程。

关键词: 农作物秸秆; 组成; 热重分析; 燃烧动力学; 最大失重率

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)04-0921-07 doi:10.11654/jaes.2018-0692

Composition and combustion dynamics analysis of typical crop straws

ZHAO Wen-xia^{1,2,3}, YANG Zhao-xu^{1,2,3}, LIU Shuai^{1,2,3}, REN Ai-ling^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. National Joint Local Engineering Research Center for Volatile Organic Compounds and Odorous Pollution Control, Shijiazhuang 050018, China; 3. Hebei VOCs and Odour Pollution Control Engineering Laboratory, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In order to discuss the composition and the combustion characteristics of typical crop straws from a typical region of China, three typical crop straws (wheat straw, rice straw, and corn straw) were chosen from typical crop straw planting areas (Hebei Province and Jilin Province). The compositions (industrial analysis, elemental analysis, and fiber composition) were analyzed and the combustion dynamics characteristics were studied using different heat and a thermogravimetric analyzer. The results showed that the contents of ash and synthetic cellulose of the rice straw were the highest among the three straws, and that the contents of S and Hg of the corn straw were the highest. Other industrial analyses (moisture, volatile matter, and fixed carbon) and element (C, H, O, and N) compositions showed no significant differences. At different heating rates, the overall trends of the TG and DTG curves of the three straws were similar. The two distinct weightlessness peaks corresponded to the precipitation and combustion stage of volatile matter and the combustion stage of fixed carbon, respectively; the weight loss rate of the former was much higher than that of the latter. At the same heating rates, the maximum weight loss rates of the three straws in the low temperature combustion zone (volatile matter precipitation and combustion stage) were from high to low in the order

收稿日期: 2018-05-26 录用日期: 2018-08-14

作者简介: 赵文霞(1973—), 女, 河北张家口人, 教授, 主要从事大气污染控制技术及固体废物资源化利用技术研究。E-mail: kd2010zwx@163.com

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0207907); 河北省自然科学基金项目(E2016208144)

Project supported: National Key Research Program of China(2016YFC0207907); Natural Science Foundation of Hebei Province(E2016208144)

of wheat straw > rice straw > corn straw, while those of the rice straw and corn straw in the high temperature combustion zone (fixed carbon combustion stage) showed no significant difference, and both were higher than that of wheat straw. The combustion process of the straws in the low temperature zone and high temperature zone accorded with the two-stage combustion kinetics equation. The results indicated that the three straws had the characteristics of high volatile matter, low ash (except rice straw), and low sulfur contents. The weight loss of straw combustion was mainly due to volatile matter precipitation and combustion followed by fixed carbon combustion, while the contribution of water evaporation was the least. The peak shape of fast weightlessness was not only related to the composition of straw, but also to the initial precipitation temperature of volatile matter. The two-stage reaction model can scientifically describe the combustion kinetics of crop straws.

Keywords: crop straws; compositions; thermal gravimetric analysis; combustion dynamics; maximum weight loss rate

随着我国环境污染治理力度的加大,国家大力推进煤改气工程,然而进入2017年冬季,华北地区由于采暖期间天然气需求量急剧增加,出现了天然气供给严重短缺现象,继而对国民生计造成了一定的影响。与常规燃料能源(石油、煤炭、天然气)相比,生物质能具有分布广、洁净性及可再生性好等特点^[1]。农作物秸秆作为一种典型的生物质能,在我国产生量巨大。据统计,2015年全国主要农作物秸秆可收集资源量为9.0亿t^[2]。然而由于一些主客观因素,目前我国仍有部分秸秆尚未得到有效利用,由此会引发一系列的环境问题^[3],加快秸秆的资源化利用具有重要的环境和现实意义。

目前我国农作物秸秆的资源化利用方式主要为“五料化”(肥料化、饲料化、燃料化、基料化、原料化)^[2]。秸秆组成是选择资源化利用方式的一个重要依据,而秸秆燃烧特性直接影响秸秆燃料化利用的效果。针对农作物秸秆组成及燃烧特性,国内外已有部分学者开展了相关的研究^[4-6]。研究表明,农作物秸秆组成成分复杂,其工业组成包括水分、挥发分、灰分和固定碳等^[7],化学组成涉及纤维素、半纤维素、木质素、粗蛋白、可溶性糖和粗灰分等^[8]。Hays等^[9]利用燃烧室模拟实验,模拟了水稻与小麦秸秆的露天焚烧。农作物秸秆燃料是通过燃烧将化学能转化为热能的,利用热量的同时产生气体产物和灰分残渣。陈义龙等^[10]采用热重分析方法研究了烟秆、棉秆和玉米秆在不同升温速率下的燃烧特性。司耀辉等^[6]研究了麦秆、稻秆、棉秆及枝条在同一条件下的燃烧特性。田松峰等^[11]研究了玉米秸秆在不同升温速率下的燃烧特性,用双组分分阶段反应模型来描述燃烧过程。尽管如此,有关系统性对比典型农作物种植区域典型农作物(玉米、小麦、水稻)秸秆的组成及燃烧特性方面的研究报道较少。由于我国幅员辽阔,农作物种植面广,且具有明显的地域和季节特点,因此开展典型区域典型农作物秸秆组成与燃烧特性研究具有重要的

理论和现实意义。本文在我国典型农作物种植区(河北省和吉林省)选择了三种典型秸秆(小麦秸秆、水稻秸秆和玉米秸秆),对其进行组分分析(工业分析、元素分析、纤维组成),在此基础上,借助差热-热重仪对其燃烧动力学特性进行研究,以期为我国农作物秸秆合理处置和综合利用提供理论及数据支持。

1 材料及方法

1.1 实验材料及药品

实验用三种典型农作物秸秆,分别为小麦秸秆(河北唐山)、水稻秸秆(吉林通化)和玉米秸秆(河北邯郸)。

实验药品有醋酸、硝酸、硫酸、盐酸、乙醇、乙醚、3,5-二硝基水杨酸、硝酸钙、重铬酸钾、氢氧化钠、葡萄糖标准溶液、碘化钾、硫代硫酸钠,均为分析纯。

1.2 研究方法

1.2.1 秸秆的预处理

首先用剪刀对自然风干的秸秆(小麦秸秆、玉米秸秆、水稻秸秆)进行人工粗破碎,然后采用大功率破碎机(XM-800Y,旭曼公司)对其进行进一步细破碎,所得秸秆粉碎物经40目的标准筛筛分,取筛下物,即粒径小于0.2mm的秸秆粉末样,将其放入电热鼓风干燥箱(控温在40℃以下)中烘干至恒质量,得空气干燥基态的秸秆粉末样,最后将其存放于PE材质密封袋中,置于玻璃干燥器中待用。

1.2.2 秸秆的组成成分测定

秸秆的组成(水分 M_{ad} 、灰分 A_{ad} 、挥发分 V_{ad} 、固定碳 FC_{ad})参考《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012)进行测定^[12];秸秆的元素组成(碳、氢、氧、氮、硫)采用元素分析仪(Vario EL CUBE型,德国Elementar公司)进行测定;汞含量采用原子荧光分光光度计(AFS8300a型,北京吉天仪器有限公司)进行分析测定;纤维组成(纤维素、半纤维素和木质素)采用王金主改进法^[13]进行测定。

1.2.3 秸秆的热重分析

采用差热-热重仪(DTG-60H型,日本岛津)进行燃烧特性研究,该仪器能在高温条件下对微量试样同时进行热重(TG)、差热(DTA)、微商热重(DTG)等技术指标的分析测定。具体方法为:取一定量(一般3~10 mg)经上述预处理后的秸秆放入热重用坩埚(氧化铝材质,规格: φ 6.8 mm $\times$ H 4 mm)中,将坩埚放入热重仪中。选用空气为载气,以一定的升温速率(10、20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和30 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)从30 $^{\circ}\text{C}$ 升温至100 $^{\circ}\text{C}$,并在100 $^{\circ}\text{C}$ 保持10 min,接着升温至700 $^{\circ}\text{C}$,最后自然冷却至室温。

2 结果与讨论

2.1 秸秆组成成分

三种典型农作物秸秆的组成成分测定结果见表1。由表1看出,在空气干燥基态下,三种典型农作物秸秆中的水分、挥发分和固定碳含量均无明显差异,但水稻秸秆中的灰分含量明显高于小麦和玉米秸秆。陕西神木煤具有特低灰、特低硫、特低磷、中高发热量的特点^[14]。三种典型农作物秸秆中挥发分含量远高于神木煤,约为后者的2倍多,显然,这三类农作物秸秆较煤更易燃着且更易燃烧完全。除水稻秸秆外,小麦和玉米秸秆中的灰分含量与神木煤相接近,属于低灰分燃料。此外,三种典型秸秆中固定碳含量明显低于煤,而水分含量明显高于煤,约为后者的3.3~4.0倍。

元素分析结果表明,三种典型农作物秸秆中C、H、O和N元素含量均无明显差异,而S元素含量大小为小麦秸秆>玉米秸秆>水稻秸秆。与神木煤相比,三种农作物秸秆中C元素含量较低,而O元素含量较高,H、N元素含量与神木煤相近,S元素低于后者,其中小麦中S含量与后者相近,说明农作物秸秆具有低硫的特点,能源化利用过程中,对大气环境中SO₂的贡献影响较小。此外,本研究测得三种典型农作物秸秆中Hg含量介于1.10~8.35 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其含量大小为小麦秸秆>玉米秸秆>水稻秸秆。三种秸秆中Hg含量基本处于文献报道的含量范围(1.49~28.44 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

的下限区域^[15],显然三种典型农作物秸秆中Hg元素含量普遍不高。

农作物秸秆主要由植物细胞壁组成,基本成分为纤维素、半纤维素和木质素等,其中纤维素是重要的造纸原料;半纤维素是木浆的主要成分之一,可水解生成木糖等单糖;木质素是一种复杂酚类聚合物,可用作混凝土减水剂、矿粉黏结剂等^[13]。三种典型农作物秸秆中的纤维组成测定结果见表2,其中综纤维素为纤维素和半纤维素的总和。

表2 秸秆中纤维素、半纤维素和木质素组成(%)

Table 2 Composition of cellulose, hemicellulose and lignin in straw(%)

秸秆类型	纤维素类			木质素
	纤维素	半纤维素	综纤维素	
唐山小麦	26.27	25.12	51.39	14.72
吉林水稻	28.40	27.87	56.27	14.20
邯郸玉米	21.98	26.45	48.43	15.81

由表2看出,三种典型农作物秸秆中纤维素含量介于21.98%~28.40%,其中小麦和水稻秸秆明显高于玉米秸秆;半纤维素含量无明显差异,其含量介于25.12%~27.87%;综纤维素含量介于48.43%~56.27%,且水稻秸秆>小麦秸秆>玉米秸秆,总体低于文献报道的测定结果(58.65%~76.98%)^[13,16]。此外,三种秸秆中木质素含量介于14.2%~15.8%,其中玉米秸秆最高,这是由于玉米秸秆的细胞木质化程度更高所致。

2.2 农作物秸秆热重测定结果与分析

三种典型农作物秸秆在不同升温速率(10、20、30 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)下的TG和DTG曲线如图1和图2所示。

由图1看出,不同升温速率条件下,三种典型农作物秸秆的TG和DTG曲线总体趋势相似。TG曲线大致分为三个阶段:第一阶段是水分的蒸发,第二阶段是挥发分的析出和燃烧,第三阶段是固定碳的燃烧,燃烧结束后的残留成分基本上为灰分^[6]。与此相

表1 秸秆的元素分析和工业分析

Table 1 Elemental and industrial analysis of straw

秸秆类型	工业分析/%				元素分析					
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	[C] _{ad} /%	[H] _{ad} /%	[O] _{ad} /%	[N] _{ad} /%	[S] _{ad} /%	[Hg] _{ad} / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
唐山小麦	6.03	9.60	66.60	17.78	41.52	5.76	36.24	0.61	0.24	8.35
吉林水稻	5.20	15.29	63.82	15.69	40.67	5.73	32.30	0.80	0.01	1.10
邯郸玉米	4.99	6.17	72.90	15.94	41.67	5.91	40.53	0.58	0.15	2.98
神木煤 ^[14]	1.48	9.54	30.77	58.21	71.40	4.42	23.28	0.65	0.25	—

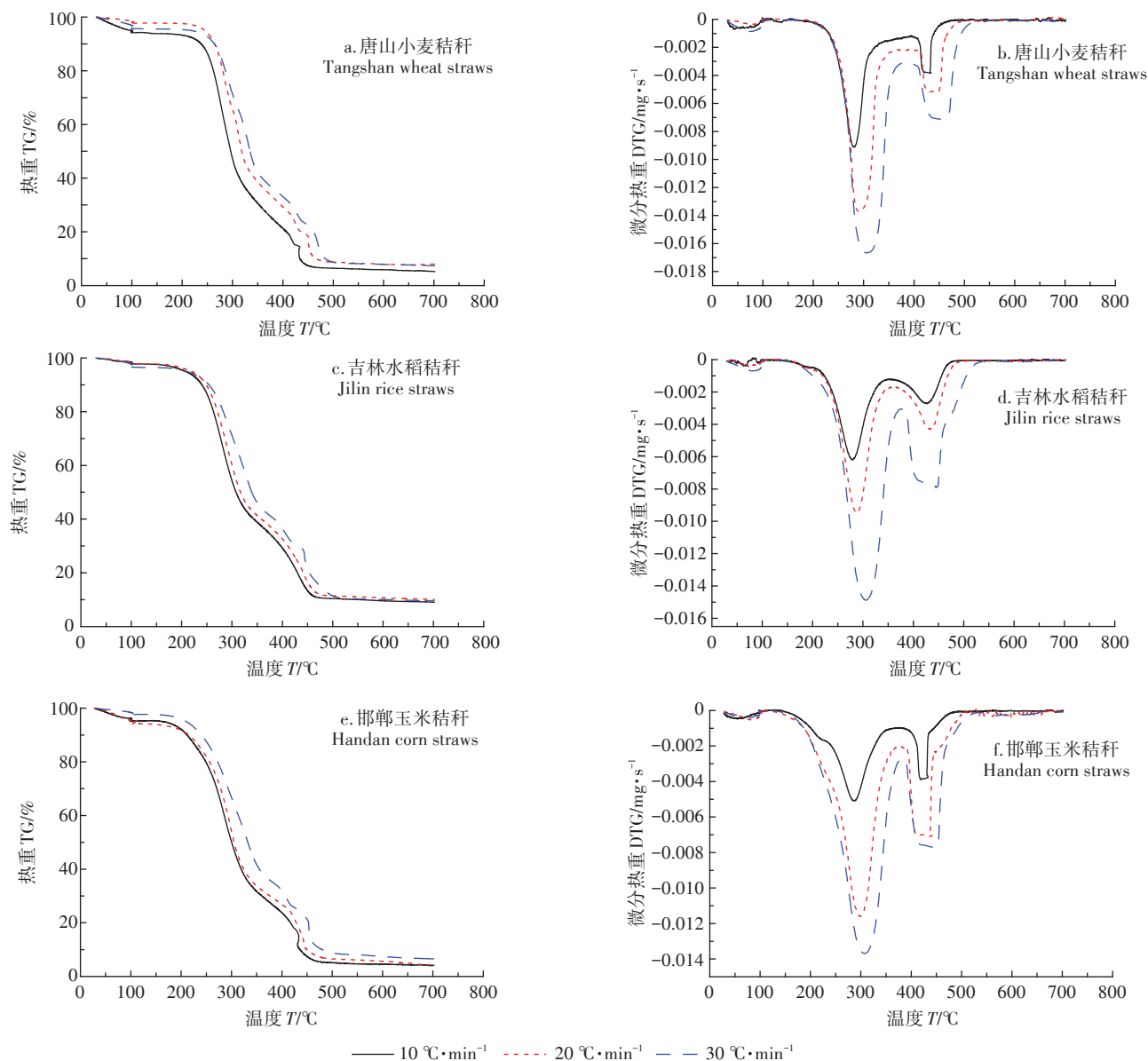


图1 秸秆TG曲线和DTG曲线

Figure 1 Straw TG curves and DTG curves

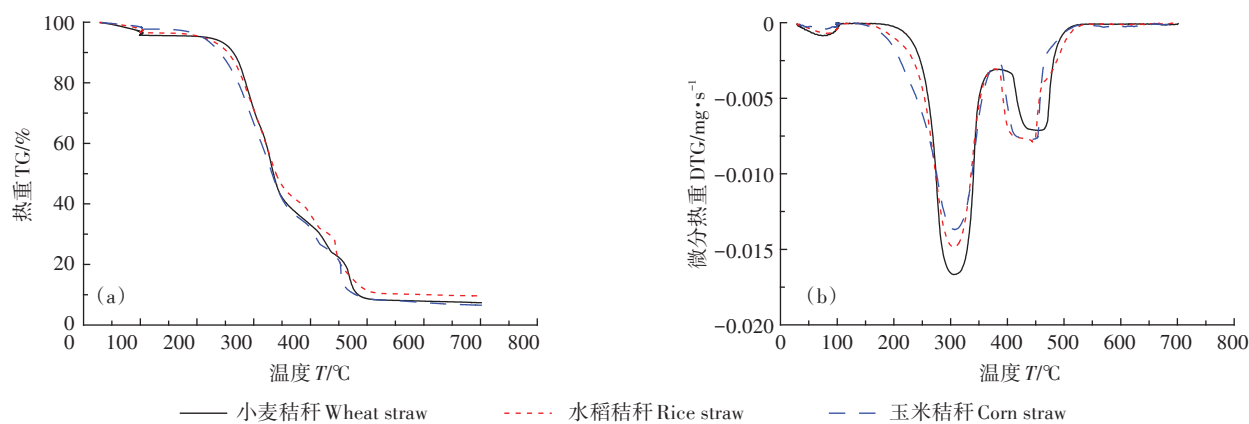


图2 秸秆TG曲线和DTG曲线(30 °C·min⁻¹)

Figure 2 Straw TG curves and DTG curves(30 °C·min⁻¹)

对应,DTG曲线出现两个明显的变化区间,第一个尖锐的失重峰(低温区)为挥发分的析出和燃烧阶段,第二个尖锐的失重峰(高温区)为固定碳燃烧阶段,且前者的失重率明显高于后者,由此表明,对于农作物秸秆燃烧而言,主要是秸秆中挥发分的析出和燃烧,其次是固定碳的燃烧,而水分蒸发贡献量最少,这与前面的工业分析结果相一致(见表1),即三种秸秆中挥发分含量最高,其次是固定碳,而灰分和水分的含量最少。此外,升温速率对秸秆的燃烧特性,尤其挥发分的析出和燃烧具有显著影响。由TG和DTG曲线得到的三种秸秆的燃烧特征温度参数,具体见表3,其中 T_1 为初析温度(即TG线开始下降时直线最末端对应的温度), T_2 为着火温度(即DTA差热曲线第一个燃烧放热峰左侧切线与其基线交点对应的温度), T_3 为燃烬温度(即DTA差热曲线固定碳燃烧完后即第二个燃烧峰后最低点时对应的温度), t 为燃烬所消耗的时间。显然,随着升温速率的增加,三种农作物秸秆的挥发分初析温度降低,着火温度和燃烬温度均向高温方向偏移。其原因在于升温速率过快会造成秸秆内外温差较大,产生热滞后现象,此外,随着升温速率增加,达到相同燃烧程度所消耗的时间缩短,燃烬所消耗的时间越短。同一升温速率下,三种秸秆的挥发分初析温度由低到高依次为玉米秸秆<水稻秸秆<小麦秸秆,着火温度水稻秸秆<玉米秸秆<小麦秸秆,但随后的燃烬温度表现为玉米和水稻秸秆相接近,均高于小麦秸秆。

尽管如此,不同农作物秸秆的热重曲线又各有其特点。对比升温速率为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 下的TG和DTG曲线,由图2可以看出,三种秸秆在低温燃烧区的最大失重率由高到低依次为小麦秸秆>水稻秸秆>玉米秸秆,而在高温燃烧区玉米和水稻秸秆的最大失重率没有明显差别,均高于小麦秸秆。显然,快速失重峰

表3 燃烧特征温度参数

Table 3 Combustion characteristic temperature parameters

秸秆	升温速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	$T_1/^{\circ}\text{C}$	$T_2/^{\circ}\text{C}$	$T_3/^{\circ}\text{C}$	t/min
小麦	10	222.20	268.65	472.28	47.2
	20	212.41	289.94	496.17	24.8
	30	205.30	295.99	520.50	17.3
水稻	10	224.67	255.22	486.79	48.6
	20	213.10	273.57	503.55	25.2
	30	206.83	285.40	527.02	17.6
玉米	10	194.85	267.56	485.71	48.6
	20	188.79	279.91	502.86	25.1
	30	184.68	280.59	523.19	17.4

形不仅与秸秆的组成有关,还与挥发分初析温度高低有关。

2.3 秸秆燃烧动力学分析

采用热重法分析农作物秸秆受热失重过程,可得到如下简单动力学方程^[17]。

$$\frac{da}{dt} = k \cdot f(a) \quad (1)$$

式中: a 为转化率,其表达式为 $a = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_{\infty}}$,其中 m 为样品质量,下标表示反应初始与终止时刻;速率常数 $k = A \exp(-\frac{E}{RT})$,其中 E 为表观活化能, A 为频率因子, R 为气体常数($8.31\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T 为热力学温度。 $f(a)$ 的函数形式取决于反应类型或反应机制。一般可假设函数 $f(a)$ 与温度 T 和时间 t 无关,只与反应程度(转化率) a 有关。对于简单反应,取 $f(a) = (1-a)^n$,其中 n 为指数,无量纲。

又令 $\beta = \frac{dT}{dt}$,代入式(1)得:

$$\frac{da}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp(-\frac{E}{RT}) f(a) = \frac{A}{\beta} \exp(-\frac{E}{RT}) (1-a)^n \quad (2)$$

Coats-Redfern法将式(2)分离变量积分整理并取近似值可得到:

当 $n=1$ 时,

$$\ln[-\frac{\ln(1-a)}{T^2}] = \ln[\frac{AR}{\beta E}(1-\frac{2RT}{E})] - \frac{E}{RT} \quad (3)$$

当 $n \neq 1$ 时,

$$\ln[\frac{1-(1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)}] = \ln[\frac{AR}{\beta E}(1-\frac{2RT}{E})] - \frac{E}{RT} \quad (4)$$

对一般的反应区和大部分的 E 而言, $\frac{2RT}{E} \ll 1$,故

$\ln[\frac{AR}{\beta E}(1-\frac{2RT}{E})]$ 可近似看作常数。因此,当 $n=1$ 时, $\ln[-\frac{\ln(1-a)}{T^2}]$ 对 $1/T$ 作图;当 $n \neq 1$ 时, $\ln[\frac{1-(1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)}]$

对 $1/T$ 作图,若选定的 n 值合适,则能得到一条直线,通过直线斜率 $-\frac{E}{R}$ 和截距 $\ln[\frac{AR}{\beta E}(1-\frac{2RT}{E})]$ 可求 E 和 A 值^[18-19]。

对三种典型农作物秸秆的TG曲线按照低温区和高温区分别进行燃烧动力学模型拟合,并求得相应的燃烧动力学参数(E 、 A),计算结果如表4所示,其中 T_4 为不同燃烧阶段最大失重率对应的温度^[20]。

从表4可以看出,三种典型秸秆处于不同燃烧阶段的最高失重率对应的温度均随着升温速率的增加

而增加,其中处于低温区的第一个燃烧失重峰,即秸秆的挥发分析出和燃烧的温度区间介于200~420℃,该区间最大失重率对应的温度介于299.8~335.4℃,而处于高温区的第二个燃烧失重峰,即固定碳的燃烧温度区间则介于380~550℃,该区间最大失重率对应的温度介于426.6~466.8℃。由拟合结果可以看出,无论秸秆低温区燃烧还是高温区燃烧,当反应级数 $n=2$ 时的线性拟合效果明显优于 $n=1$ 时,由此表明,秸秆低温区燃烧和高温区燃烧动力学过程均符合二级燃烧动力学方程。当反应级数 $n=2$ 时,对于秸秆低温区燃烧阶段,玉米秸秆表观活化能 E 值较低,显然,玉米秸秆更易燃,这是由于玉米秸秆中挥发分含量高于小麦和水稻秸秆(表1),秸秆中挥发分含量越高,燃烧所需的活化能越小,越易燃^[21]。对于秸秆高温区燃烧阶段,小麦秸秆的表观活化能 E 值明显高于水稻和玉米秸秆,这是由于小麦秸秆中固定碳含量高于后两者(表1),秸秆中固定碳含量越高,燃烧所需的活化能越高,越不利于着火和燃烧,难于燃尽。从频率因

子 A 来看,处于高温区的固定碳燃烧反应较低温区的挥发分燃烧剧烈得多。显然,利用双组分分阶段反应模型能够更科学地描述农作物秸秆的燃烧动力学反应过程。

3 结论

(1)三种秸秆的燃烧失重主要是挥发分的析出和燃烧,其次是固定碳的燃烧,而水分蒸发贡献量最少。

(2)三种秸秆在低温燃烧区(挥发分析出和燃烧)的最大失重率由高到低依次为小麦秸秆>水稻秸秆>玉米秸秆,而高温燃烧区(固定碳的燃烧)玉米和水稻秸秆的最大失重率没有明显差别,均高于小麦秸秆。快速失重峰形不仅与秸秆的组成有关,还与挥发分初析温度高低有关。

(3)秸秆低温区燃烧和高温区燃烧动力学过程均符合二级燃烧动力学方程。双组分分阶段反应模型能够科学地描述农作物秸秆的燃烧动力学过程。

表4 秸秆的燃烧动力学参数

Table 4 Combustion kinetic parameters of straws

升温速率/℃·min ⁻¹	秸秆	T_d /℃	温度范围/℃	反应级数	拟合方程	R^2	E /kJ·mol ⁻¹	A /min ⁻¹
20℃/min	小麦	301.2	230~420	$n=1$	$y = -10.920x + 5.383$	0.923	90.7	6.63×10^7
		301.2	230~420	$n=2$	$y = -12.905x + 9.220$	0.960	107.24	6.53×10^{11}
		446.5	420~510	$n=1$	$y = -25.504x + 21.749$	0.854	211.94	1.51×10^{15}
		446.5	420~510	$n=2$	$y = -56.874x + 65.887$	0.979	472.61	4.74×10^{34}
	水稻	299.8	220~380	$n=1$	$y = -13.182x + 10.014$	0.929	109.54	6.16×10^9
		299.8	220~380	$n=2$	$y = -15.386x + 14.490$	0.977	127.86	2.86×10^9
		426.6	380~530	$n=1$	$y = -17.311x + 10.833$	0.898	143.85	1.91×10^{10}
		426.6	380~530	$n=2$	$y = -35.879x + 38.066$	0.984	298.15	2.54×10^{22}
	玉米	300.7	200~390	$n=1$	$y = -9.812x + 3.338$	0.934	81.54	5.81×10^6
		300.7	200~390	$n=2$	$y = -13.580x + 10.590$	0.982	112.85	2.83×10^{10}
		429.4	390~510	$n=1$	$y = -19.606x + 13.795$	0.897	162.93	4.14×10^{11}
		429.4	390~510	$n=2$	$y = -30.095x + 29.314$	0.995	250.1	3.40×10^{18}
30℃/min	小麦	332.9	240~410	$n=1$	$y = -11.078x + 5.232$	0.897	92.06	6.99×10^7
		332.9	240~410	$n=2$	$y = -16.400x + 14.877$	0.967	136.28	1.48×10^{12}
		466.8	410~550	$n=1$	$y = -19.357x + 12.799$	0.891	160.86	2.28×10^{11}
		466.8	410~550	$n=2$	$y = -41.384x + 43.807$	0.975	343.90	1.36×10^{25}
	水稻	335.4	230~390	$n=1$	$y = -11.143x + 5.732$	0.933	92.60	1.16×10^5
		335.4	230~390	$n=2$	$y = -16.359x + 15.467$	0.972	135.94	2.76×10^{12}
		453.4	390~555	$n=1$	$y = -15.173x + 7.388$	0.908	126.09	8.14×10^8
		453.4	390~555	$n=2$	$y = -33.226x + 33.221$	0.964	276.11	2.79×10^{20}
	玉米	330.9	200~400	$n=1$	$y = -8.363x + 1.172$	0.940	69.50	9.48×10^5
		330.9	200~400	$n=2$	$y = -12.003x + 8.254$	0.969	99.74	1.54×10^9
		443.8	400~540	$n=1$	$y = -17.540x + 10.717$	0.893	145.76	2.59×10^{10}
		443.8	400~540	$n=2$	$y = -37.529x + 39.196$	0.966	311.87	1.05×10^{17}

参考文献:

- [1] 高广东. JYL4-75 活塞式生物质燃料压块机的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
GAO Guang-dong. The study and manufacture of JYL4-75 biomass briquetting machine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [2] 农业部新闻办公室. 我国主要农作物秸秆综合利用率超过 80%[J]. 农业机械, 2016(6):31.
Ministry of Agriculture Information Office. The main crops straw stalk comprehensive utilization rate of more than 80%[J]. *Farm Machinery*, 2016(6):31.
- [3] 于彬. 辽宁省秸秆能源化利用对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
YU Bin. Study on countermeasures of straw energy-oriented utilisation in Liaoning Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [4] Hani S H, Ahmad H, Arshad A S, et al. Pyrolysis and combustion kinetics of date palm biomass using thermogravimetric analysis[J]. *Biore-source Technology*, 2012, 118(1):382-389.
- [5] Sahu S G, Sarkar P, Chakraborty N, et al. Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars[J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(3):369-378.
- [6] 司耀辉, 陈汉平, 王贤华, 等. 农业秸秆燃烧特性及动力学分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1):128-132.
SI Yao-hui, CHEN Han-ping, WANG Xian-hua, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of agricultural straw[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2012, 40(1):128-132.
- [7] 牛文娟. 主要农作物秸秆组成成分和能源利用潜力[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
NIU Wen-juan. Physicochemical composition and energy potential of main crop straw and stalk[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [8] 宋卫东, 王教领, 王明友, 等. 江苏省 3 个不同地区水稻秸秆的主要化学成分研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(1):179-181.
SONG Wei-dong, WANG Jiao-ling, WANG Ming-you, et al. Study on main chemical compositions of rice straw in three different areas of Jiangsu Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(1):179-181.
- [9] Hays M D, Fine P M, Geron C D, et al. Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 39(36):6747-6764.
- [10] 陈义龙, 韩旭, 张岩丰. 生物质秸秆燃烧动力学特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(6):804-810.
CHEN Yi-long, HAN Xu, ZHANG Yan-feng. Combustion kinetics property analysis of biomass straw[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2013, 46(6):804-810.
- [11] 田松峰, 罗伟光, 荆有印, 等. 玉米秸秆燃烧过程及燃烧动力学分析[J]. 太阳能学报, 2008(12):125-128.
TIAN Song-feng, LUO Wei-guang, JING You-yin, et al. Combustion process and kinetics analysis of cornstalk[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008(12):125-128.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 28731—2012 固体生物质燃料工业分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 28731—2012 Proximate analysis of solid biofuels[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [13] 王金主, 王元秀, 李峰, 等. 玉米秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的测定[J]. 山东食品发酵, 2010(3):44-47.
WANG Jin-zhu, WANG Yuan-xiu, LI Feng, et al. Determination of cellulose, hemicellulose and lignin in corn stalk[J]. *Shandong Food Ferment*, 2010(3):44-47.
- [14] 杨国荣. 浅议中国神木煤煤质特征及工业利用方向[J]. 煤化工, 1994(4):31-35.
YANG Guo-rong. On the characteristics and industrial utilization of Shenmu coals in China[J]. *Coal Chemical Industry*, 1994(4):31-35.
- [15] 魏文. 中国农村地区生物质燃料燃烧的汞排放研究[D]. 北京: 北京大学, 2012.
WEI Wen. Emission of mercury from biomass fuels burning in rural China[D]. Beijing: Peking University, 2012.
- [16] 陈云, 张喜燕, 雷亚芳, 等. 麦秸的微观构造及化学成分分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(2):179-190.
CHEN Yun, ZHANG Xi-yan, LEI Ya-fang, et al. Microstructure and chemical composition of wheat straw[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)*, 2015, 43(2):179-190.
- [17] Coast A W, Redfern J P. Kinetic parameters from the thermogravimetric data[J]. *Nature*, 1964, 201(1):68-69.
- [18] 刘正光, 张静. 柠条燃烧特性及燃烧动力学研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(9):2611-2618.
LIU Zheng-guang, ZHANG Jing. Study on the combustion characteristics and kinetics of *Caragana korshinskii* Kom.[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(9):2611-2618.
- [19] 何成兵, 黄建国, 孟庆微, 等. 玉米秸秆燃烧过程及燃烧动力学分析[J]. 物理学报, 2013(23):211-217.
HE Cheng-bing, HUANG Jian-guo, MENG Qing-wei, et al. Combustion process and kinetics analysis of cornstalk[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013(23):211-217.
- [20] 王连勇, 孙文强, 蔡九菊. 不同种类生物质的燃烧特性分析[J]. 冶金能源, 2017, 36(增刊2):71-75.
WANG Lian-yong, SUN Wen-qiang, CAI Jiu-ju. Analyze on combustion characteristics of different types of biomass[J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2017, 36(Suppl 2):71-75.
- [21] 张萌. 生物质与低挥发分煤粉共燃特性的试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
ZHANG Meng. Experimental study on the combustion characteristics of low volatile pulverized coal blended with biomass[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016.