

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-863-07

农村典型固体燃料燃烧热动力学特性研究

章鹏鑫 邓梦思 马荣江 余南阳

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 固体燃料是农村最主要的能源之一, 为研究农村地区典型固体燃料的燃烧特性, 选取包含木头、玉米秸秆、木质颗粒和玉米秸秆颗粒在内的四种生物质燃料和包含烟煤块、烟煤煤球、兰炭和兰炭蜂窝煤在内的四种煤炭燃料进行热动力学分析。结果表明: 八种燃料主要失重过程均发生在挥发分析出燃烧阶段和焦炭燃烧阶段; 生物质燃料在挥发分析出燃烧阶段的活化能大于焦炭燃烧阶段的活化能而煤炭燃料则相反。研究结果可为农村地区固体燃料加工技术和清洁炉具设计提供理论指导。

【关键词】 农村地区; 生物质; 煤炭; 热重分析; 热动力学特性

中图分类号 TK6 文献标识码 A

Study on Thermodynamic Characteristics of Typical Solid Fuels in Rural China

Zhang Pengxin Deng Mengsi Ma Rongjiang Yu Nanyang

(School of mechanical engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Solid fuel is one of the most important energy in rural areas, in order to study the combustion characteristics of typical solid fuels in rural China, four types of biomass fuels including wood, corn straw, wood pellets and corn straw pellets and four types of coal fuels including bituminous coal chunk, bituminous coal briquette, semi-coke and semi-coke honeycomb briquette were selected for thermodynamic analysis. The results showed that the main weight loss processes of the eight fuels occurred in the devolatilization and char combustion phases. The activation energy of biomass fuels in the devolatilization phase are greater than that of char combustion phase, while that of coal fuels are the opposite. This study provides useful information for solid fuel processing technology and clean stove design in rural areas.

【Keywords】 Rural areas; Biomass; Coal; Thermogravimetric analysis; Thermodynamic characteristics

0 引言

伴随我国工业化、信息化、城市化和农业现代化的发展, 农村地区的能源生产与消费成为我国能源战略的重要组成部分。我国农村的生活用能主要为以化石能源为主的商品能和以生物质能为主的非商品能, 2020年农村住宅的商品能耗为2.29亿tce, 其中电力消耗仅占18.49%, 剩余部分主要为煤炭。另外, 以薪柴和秸秆为主的生物质能的消耗

约折合0.9亿tce^[1], 可见固体燃料占据着我国农村能源结构的主要地位。目前农村固体燃料利用方式主要为低效高污染的传统粗放燃烧, 导致农村能耗大、污染物排放高, 形成新的能源环境压力。农村地区家庭固体燃料燃烧是公认的造成环境污染以及区域和全球气候性变化的主要原因之一, 因此亟需探索农村能源的清洁利用策略, 改善农村人居环境。已有研究^[2]表明固体成型燃料相比于原料会减

基金项目: 四川省自然科学基金 (No.2022NSFSC0978, No.2022NSFSC0273);

中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No.2682022CX005)

作者简介: 章鹏鑫 (1999.01-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: pengxinzhang@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 邓梦思 (1992.08-), 女, 博士, 讲师, E-mail: mengsideng@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-07-18

少污染物排放,使得煤炭和生物质的成型燃料也逐渐在农村地区推广。随着“双碳”目标的提出,生物质因其可再生和零碳特性在农村地区清洁的低碳用能规划中得到进一步重视,使生物质成为农村地区替代煤炭的主要固体燃料。因此,认识农村地区典型固体燃料的燃烧特性对于后续燃料加工技术的改进和与之配套的清洁炉具设计具有重要意义。

不同固体燃料由于其成分、结构不同,具有不同的热动力学特性。张雪等^[3]通过对无烟煤、烟煤和褐煤三种不同变质程度的煤进行热重分析,指出含碳量越高的煤种,失重量越小。田红等^[4]使用TG-DTG-DSC联用技术对玉米秆、玉米芯、稻草、龙眼枝、荔枝条及其混合燃料进行了热重试验,发现生物质低温阶段的活化能大于高温阶段的活化能。鱼银虎等^[5]通过对桃木质成型燃料进行不同升温速率的燃烧特性测试分析,发现在空气氛围下,桃木质成型燃料的着火点温度随着升温速率的增大而略向高温偏移,燃烧反应更加集中。已有研究对煤、生物质以及生物质颗粒的单独燃烧过程均有较多的研究,但是缺少对于这些燃料在同一实验条件下的燃烧性能对比研究,并且对于各种燃料燃烧过程中的反应机理研究仍不够充分。

因此,选用木头、玉米秸秆、木质颗粒、玉米秸秆颗粒、烟煤块、烟煤煤球、兰炭和兰炭蜂窝煤作为研究对象,对这八种燃料进行热值、成分及热重分析,探究其燃烧特性参数及热动力学特性的异同,为农村固体燃料尤其是生物质能的合理应用提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 燃料

试验中的燃料样本分别选用农村典型的生物质和煤炭,其中生物质包含农村调研获取的木头、玉米秸秆和从一燃料加工厂购买的木质颗粒和玉米秸秆颗粒,煤炭包含农户购买的烟煤块、烟煤煤球、兰炭和兰炭蜂窝煤。所有燃料在分析前均采用粉碎机粉碎成粒度小于80 μm 的粉末。

1.2 实验设备与条件

1.2.1 热值分析、工业分析与元素分析

对八种燃料粉末进行热值分析、工业分析和元素分析。热值分析采用美国PARR公司生产的型号

为PARR 1281的弹筒式量热仪。工业分析采用德国Eltra公司生产的型号为Thermostep的热重分析仪。碳、氢、氮、氧元素分析采用意大利Eurovector公司生产的型号为EA3000的元素分析仪,硫元素分析采用长沙开元仪器有限公司生产的型号为5E-AS3200B的测硫仪。

1.2.2 热重分析

对八种燃料粉末进行热重分析。热重分析采用德国耐驰仪器公司生产的型号为STA449F3的同步热分析仪,分析气氛为空气气氛,升温程序为10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,终温为1100 $^{\circ}\text{C}$ 。分析结束后获取样品质量随温度变化的热重(TG)曲线和微商热重(DTG)曲线。

1.3 燃烧动力学分析

活化能 E 与指前因子 A 是表征反应特性的两个重要参数,众多研究者已经建立了多种燃烧过程的燃烧动力学,在选取了合适的反应机理的情况下,各种方法均能获得较为准确的 E 和 A ,本文采用Coast-Redfern积分法^[6]来初步选取生物质和煤炭在不同阶段的反应机理,并计算活化能和指前因子,然后基于已选定的反应机理,将其带入MacCallum-Tanner法中进行计算,以验证所选取的机理是否合适。两种方法的计算公式如下所示:

(1) Coast-Redfern积分法:

$$\ln \left[\frac{G(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (1)$$

式中: $G(\alpha)$ 为反应机理,表1中为常见的机理函数; T 为温度, K; A 为指前因子, /min; R 为气体常数, 8.314J/(mol·K); β 为升温速率, 10K/min; E 为活化能, kJ/mol。

在一般的反应温度范围内,活化能 E 的值远大于 RT 的值,所以 $(1-2RT/E) \approx 1$,则式(1)变为:

$$\ln \left[\frac{G(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \right] - \frac{E}{RT} \quad (2)$$

$$\ln Y = \ln \left[\frac{G(\alpha)}{T^2} \right], \quad a = \ln \left(\frac{AR}{\beta E} \right), \quad b = -\frac{E}{R},$$

$X = \frac{1}{T}$,若选择的反应机理合适,则会得到一条直线:

$$Y = a + bX \quad (3)$$

选择能令直线拟合度最高的反应机理为此物质该阶段的最佳反应机理, 并通过所得直线的斜率 b 与截距 a 即可以求出活化能 E 和指前因子 A 。

(2) MacCallum-Tanner法

$$\lg[G(\alpha)] = \lg\left(\frac{AE}{\beta R}\right) - 0.4828E^{0.4357} - \frac{0.449 + 0.217E}{0.001} \frac{1}{T} \quad (4)$$

将通过CR法选择的最佳机理函数带入方程, 类似地令 $Y = \lg[G(\alpha)]$, $a = \lg\left(\frac{AR}{\beta E}\right) - 0.4828E^{0.4357}$, $b = -\frac{0.449 + 0.217E}{0.001}$, $X = \frac{1}{T}$, 若所得的直线具有较好的拟合度, 并且通过斜率截距法计算出来的 E 和 A 的值与通过CR法计算出来的 E 和 A 的值相近, 则认为所选取的机理函数即为此物质该阶段最佳的机理函数。

1.4 热力学参数计算

ΔG , ΔH , ΔS 分别为吉布斯自由能, 焓差和熵差, ΔG 用来决定反应的自发性, 方向以及程度, ΔH 用来描述化学反应过程中反应物和活化络合物之间的能量差, 而 ΔS 用来描述混乱度, 这三个均为热力学分析中重要的参数^[7], 其计算公式如下所示:

$$\Delta G = E + RT_m \ln\left(\frac{K_B T_m}{hA}\right) \quad (5)$$

$$\Delta H = E - RT \quad (6)$$

$$\Delta S = \frac{(\Delta H - \Delta G)}{T_m} \quad (7)$$

式中: T_m 为最大失重速率所对应的温度, K; K_B 为 Boltzman 常量, $1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$; h 为 Plank 常量, $6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 。

表 1 典型的动力学机理方程

Table 1 Typical kinetic mechanism functions

机理	名称	符号	$G(\alpha)$	$f(\alpha)$
	抛物线法则	D1	α^2	$\frac{1}{2}\alpha^{-1}$
	Valensi 方程	D2	$\alpha + (1-\alpha)\ln(1-\alpha)$	$[-\ln(1-\alpha)]^{-1}$
扩散	Jander 方程	D3	$\left[1 - (1-\alpha)^{\frac{1}{3}}\right]^2$	$\frac{3}{2}(1-\alpha)^{\frac{2}{3}} \left[1 - (1-\alpha)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1}$
	G-B 方程	D4	$1 - \frac{2}{3}\alpha - (1-\alpha)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{2}{3} \left[(1-\alpha)^{\frac{1}{3}} - 1\right]^{-1}$
		A4	$[-\ln(1-\alpha)]^{\frac{1}{4}}$	$4(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{3}{4}}$
随机成核和随后生长	Avrami-Erofeev 方程	A3	$[-\ln(1-\alpha)]^{\frac{1}{3}}$	$3(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{2}{3}}$
		A2	$[-\ln(1-\alpha)]^{\frac{1}{2}}$	$2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{1}{2}}$
	Mample 单行法则	A1	$-\ln(1-\alpha)$	$1-\alpha$
自催化反应, 枝状成核	P-T 方程	B1	$\ln\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)$	$\alpha(1-\alpha)$

续表 1 典型的动力学机理方程

机理	名称	符号	$G(\alpha)$	$f(\alpha)$
相边界反应	Mampel Power 法则	R1	α	1
	收缩球状	R3	$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}$	$3(1 - \alpha)^{\frac{2}{3}}$
	收缩圆柱体	R2	$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}$	$2(1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}$
化学反应	二级	F2	$(1 - \alpha)^{-1}$	$(1 - \alpha)^2$
	三级	F3	$(1 - \alpha)^{-2}$	$\frac{1}{2}(1 - \alpha)^3$
	反应级数	RO(n)	$\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{1 - n}$	$(1 - \alpha)^n$

注：其中化学反应中反应级数中的n分别取0.5、2和3。

2 结果与讨论

2.1 热值分析、工业分析与元素分析结果

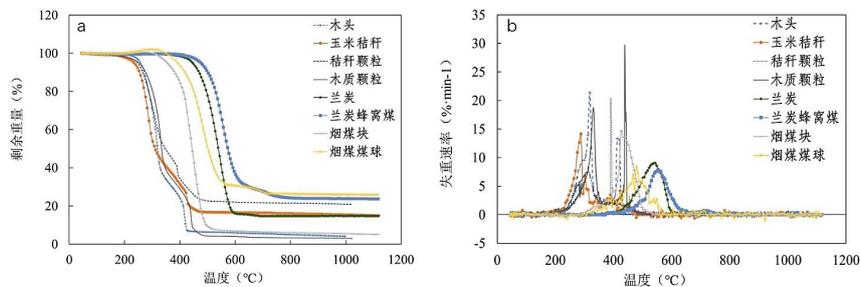
八种燃料的热值分析、工业分析及元素分析结果如表2所示。四种生物质燃料的挥发分含量明显高于四种煤炭，并且其氧元素含量也明显高于煤炭，因此可以合理地预测生物质燃料的着火比煤炭更加容易。煤炭的固定碳含量显著得高于生物质燃

料，这使煤炭的低位发热量高于生物质燃料，但也使煤炭的着火变得困难。木质燃料的低位发热量比玉米秸秆燃料高，这主要是由于前者的含碳量明显比后者高所致。兰炭蜂窝煤和烟煤煤球低位发热量明显低于兰炭和烟煤块，这是由于蜂窝煤和煤球在加工成型过程中会加入较多的固硫剂、粘结剂，使其不可燃的灰分含量高。

表 2 燃料的热值、工业及元素分析

Table 2 Calorific value, industrial and elemental analysis of fuels

燃料	工业分析				元素分析				低位发热量 (kJ/kg)	
	M	V	Aa	FCa	(N)%	(C)%	(H)%	(O)%		
生物质	木头	6.12	76.48	1.21	16.20	0.35	46.83	6.19	39.25	16568
	玉米秸秆	7.52	67.64	8.58	16.27	1.09	40.58	5.75	36.36	14487
	玉米秸秆颗粒	8.10	58.09	19.81	14.00	0.40	33.54	4.66	33.39	13011
	木质颗粒	6.16	76.52	0.65	16.67	0.00	46.30	6.06	40.77	17684
煤炭	烟煤块	11.67	31.48	3.56	53.28	0.51	69.67	4.83	9.46	25860
	烟煤煤球	3.20	31.19	24.11	41.50	1.12	57.79	4.24	9.05	24880
	兰炭	8.15	8.21	7.98	75.65	0.86	79.60	1.55	1.61	25780
	兰炭蜂窝煤	3.14	10.57	22.46	63.84	0.75	69.51	2.22	1.35	23840



(a) 八种燃料的 TG 曲线

(b) 八种燃料的 DTG 曲线

图 1 八种燃料的 TG 和 DTG 曲线

Fig.1 TG and DTG curves of eight fuels

2.2 燃烧特性分析

图1中的(a)和(b)分别为八种燃料的TG曲线和DTG曲线。各种燃料TG曲线的大致趋势类似,但是由于挥发分和固定碳的含量不同,导致燃料燃烧的各特征点对应的温度不一致,所以TG曲线并不重合。根据TG曲线的变化趋势以及DTG曲线中的峰值变化,可将燃料的燃烧过程分为干燥和准备阶段,挥发分析出燃烧阶段,焦炭燃烧阶段和燃尽阶段。

在干燥和准备阶段,燃料主要进行的是水分析出过程以及挥发分析出前的热力准备过程。四种生物质燃料在这一阶段的变化趋势基本相同,而四种煤炭在TG曲线上展现出与生物质燃料不一样的变化,在一个微小的失重之后,四种煤炭都有一个增重过程。试验开始时的微小失重是燃料水分析出导致的,而后面的出现的增重过程是因为煤炭的挥发分较少,析出速率较慢,与此同时水分的析出使得有更多环境中的氧气吸附在燃料上,令燃料的增重速率大于失重速率^[8,9]。生物质燃料由于挥发分较多,挥发分析出的失重速率大于燃料吸附氧气的增重速率,所以没有呈现出增重现象。

燃料的主要燃烧阶段在第二和第三阶段即挥发分析出燃烧阶段和焦炭燃烧阶段。四种生物质燃料在这一阶段的TG图像上呈现出一个由陡峭变平缓再变陡峭的变化过程,对应于DTG曲线上出现的两个峰值,前一个峰值是挥发分大量燃烧导致的快速失重过程,而后一个峰值是焦炭燃烧导致的快速失重过程,因此将两个峰值之间的最低点作为两个阶段的分界点。出现两个峰值的原因是生物质燃料在挥发分燃烧时挥发分快速析出,但是此时的温度不足以使焦炭参与燃烧,而挥发分的含量随着燃烧的进行逐渐减少,所以失重速率逐渐下降,随着温度的升高,焦炭开始参与燃烧,于是失重速率又一次上升并出现第二个峰值。从DTG曲线上发现生物质颗粒燃料在焦炭燃烧阶段的最大失重速率要大于挥发分析出燃烧阶段的最大失重速率,这是因为颗粒燃料在压制成型之后改变了燃料内部的结构

^[10,11],使得部分挥发分的析出变得困难,最终在焦炭燃烧时析出从而在这一阶段会出现较大的失重速率。四种煤炭的TG图像并没有和生物质燃料一样在主要失重阶段呈现出一个斜率变化的过程,而是呈现出单一的快速失重过程,对应于DTG曲线上的单一明显峰值。这是因为煤炭的挥发分含量较少,挥发分的析出缓慢,开始燃烧的温度较高,所以在燃烧时,大量剩余挥发分析出燃烧的同时伴随着部分的焦炭燃烧,而挥发分析出燃烧殆尽,焦炭仍在快速燃烧,使得燃料在整个燃烧阶段的失重速率始终较快,没有明显的变化,所以在煤炭的DTG曲线中只呈现出一个明显峰值。

燃尽阶段起始于燃尽温度而终止于试验结束温度,这一阶段的失重率很小,最终燃料的剩余质量稍高于燃料工业分析中的灰分,这是因为在热重试验中存在着表观增重现象^[12],并且燃料本身的结渣性能也使得存有部分焦炭未被燃烧,对最终样本的剩余质量产生影响,但是最终样本剩余质量与燃料工业分析中的灰分含量相差不大。

2.3 燃烧动力学分析

燃料的主要失重过程发生在挥发分析出燃烧阶段和焦炭燃烧阶段,但是在两个阶段燃烧的主要反应物质并不相同,因此分别对燃料的两个阶段进行动力学分析。通过Coast-Redfern积分法拟合后获得的最佳结果如表3所示。除了木头的焦炭燃烧阶段,其他燃料两个主要燃烧阶段和木头的挥发分析出燃烧阶段拟合后的 R^2 均大于0.9,具有较好的拟合效果,木头焦炭燃烧阶段的 R^2 为0.8685,接近0.9,因此也视为具有较好的拟合效果。在挥发分析出燃烧阶段八种燃料主要的反应机理集中在扩散和化学反应中,其中木头、烟煤块和烟煤煤球属于 $n=3$ 的化学反应,玉米秸秆、玉米秸秆颗粒、木质颗粒、兰炭和兰炭蜂窝煤分属于扩散机理中的不同方程。而焦炭燃烧阶段,玉米秸秆颗粒和四种煤炭燃料一样属于化学反应范畴,只是反应级数有所不同,木头在这一阶段的反应机理属于扩散,秸秆和木质颗粒的反应机理则是属于自催化反应。

表 3 燃料主要失重阶段的机理函数, 活化能和指前因子 (CR 法)

Table 3 Mechanism function, activation energy and pre-exponential factor of main weight loss phases of fuel (CR method)

燃料	挥发分析出燃烧阶段				焦炭燃烧阶段			
	机理	R^2	活化能 E (kJ/mol)	指前因子 A (/min)	机理	R^2	活化能 E (kJ/mol)	指前因子 A (/min)
木头	$n=3$	0.9771	105.75	9.62E+08	D1	0.8685	28.57	8.31E+00
玉米秸秆	D4	0.9817	121.78	6.28E+08	B1	0.9575	40.24	2.24E+02
玉米秸秆颗粒	D3	0.9830	125.59	1.62E+09	$n=2$	0.9882	87.29	6.46E+06
木质颗粒	D2	0.9841	117.34	4.56E+08	B1	0.9376	61.85	1.02E+04
兰炭	D4	0.9368	141.24	1.87E+07	$n=2$	0.9703	231.68	7.45E+14
兰炭蜂窝煤	D1	0.9645	162.66	2.23E+08	$n=3$	0.9824	240.64	1.05E+15
烟煤块	$n=3$	0.9551	120.58	1.82E+08	$n=3$	0.981	367.93	9.85E+26
烟煤煤球	$n=3$	0.9787	128.28	2.6E+08	$n=3$	0.9633	213.71	5.23E+14

使用MacCallum-Tanner法将通过CR法选择的机理函数带入并计算此时的活化能和指前因子, 列于表4中。使用MT法拟合后的结果均有很高的 R^2 值, 并且获得的活化能和指前因子值与用CR法计算的值相差不大, 因此可以认为所选取的反应机理函数适合于解释不同燃料不同阶段的燃烧动力学。在燃料种类方面, 生物质燃料和煤炭燃料之间的活化能具有明显的差距, 除了烟煤块在挥发分析出燃烧阶段以外, 其余煤炭在两个阶段的活化能和烟煤块在焦炭燃烧阶段的活化能均明显高于生物质在对应阶段的活化能, 说明生物质燃料相较于煤炭燃料更容易燃烧, 这印证了前文中的猜测, 出现这种现象主要的原因是生物质燃料拥有更多的挥发分和氧元素而煤炭燃料则拥有更多的碳元素。在两类燃料间还有一个明显的差异是生物质燃料在挥发分析出燃烧阶段的活化能均大于其在焦炭燃烧阶段的活化

能, 而煤炭燃料则表现出相反的现象, 一种可能的解释是生物质在挥发分析出燃烧阶段需要大量热量积累来支持燃烧, 而焦炭的燃烧只需要在较高温度获得少量的热量便可进行^[13]。除了这个原因之外, 挥发分和固定碳的相对含量或许是影响两个阶段活化能的关键因素, 生物质燃料的挥发分含量大于固定碳含量, 因此生物质燃料在挥发分析出燃烧阶段的活化能明显高于焦炭燃烧阶段, 而同理, 正因为煤炭燃料的固定碳含量大于挥发分含量, 从而呈现出相反的结果。在成型燃料与原料的对比中, 可以发现除了烟煤煤球以外, 其他成型燃料的在两个阶段的活化能均要大于原料在两个阶段的活化能, 这是由于在燃料制成成型燃料的过程中改变了燃料原有的结构, 更加紧密的结构使得挥发分的析出变得困难从而需要更多的能量^[11]且在成型过程中添加的一些添加剂也会对此产生一定的影响。

表 4 燃料主要失重阶段的机理函数, 活化能和指前因子 (MT 法)

Table 4 Mechanism function, activation energy and pre-exponential factor of main weight loss phases of fuel (MT method)

燃料	挥发分析出燃烧阶段			焦炭燃烧阶段				
	机理	R^2	活化能 E (kJ/mol)	指前因子 A (/min)	机理	R^2	活化能 E (kJ/mol)	指前因子 A (/min)
木头	$n=3$	0.9437	107.18	1.29E+09	D1	0.9264	31.46	3.15E+01
玉米秸秆	D4	0.9696	125.84	2.70E+09	B1	0.9733	43.40	6.79E+02
玉米秸秆颗粒	D3	0.9853	127.05	2.13E+09	$n=2$	0.9904	91.00	1.43E+07
木质颗粒	D2	0.9862	118.93	6.24E+08	B1	0.9553	75.47	2.60E+04
兰炭	D4	0.9442	144.75	3.74E+06	$n=2$	0.9735	238.94	3.21E+15
兰炭蜂窝煤	D1	0.9682	166.56	4.31E+08	$n=3$	0.9841	249.05	5.49E+15
烟煤块	$n=3$	0.9622	123.54	3.28E+08	$n=3$	0.9822	374.72	4.92E+27
烟煤煤球	$n=3$	0.9822	132.06	5.46E+08	$n=3$	0.9677	220.19	1.91E+15

八种燃料的热力学参数计算见于表5。 ΔG 用于表明反应的自发性, 所有燃料的 ΔG 均大于0, 说明

燃料的燃烧过程不是一个自发过程; ΔH 用于描述反应物与活化络合物之间的能量差, 可以发现所有

燃料的 ΔH 均大于0; ΔS 用于描述系统的无序度,在焦炭燃烧阶段,生物质燃料和煤炭燃料的 ΔS 在符号上相反,说明在这一阶段两种燃料的燃烧反应具有较大的差异,需要进一步研究。

表5 燃料主要失重阶段的热力学参数

Table 5 Thermodynamic parameters of fuel in main weight loss stage

燃料	挥发分析出燃烧阶段			焦炭燃烧阶段		
	ΔH (kJ/mol)	ΔS (kJ/(mol·K))	ΔG (kJ/mol)	ΔH (kJ/mol)	ΔS (kJ/(mol·K))	ΔG (kJ/mol)
木头	100.84	-0.087	152.22	23.65	-0.241	166.27
玉米秸秆	117.11	-0.090	167.73	35.56	-0.213	155.53
玉米秸秆颗粒	120.73	-0.083	169.01	82.42	-0.128	157.57
木质颗粒	112.32	-0.093	168.69	56.83	-0.182	166.98
兰炭	134.45	-0.142	250.10	224.89	0.023	206.01
兰炭蜂窝煤	155.80	-0.102	239.84	233.78	0.026	212.41
烟煤块	114.77	-0.102	186.21	362.12	0.256	182.86
烟煤煤球	122.12	-0.100	196.00	207.55	0.021	192.01

3 结论

通过对不同燃料进行热重分析和燃烧动力学分析,得出了以下结论:

(1) 生物质燃料的挥发分含量和氧元素含量高于煤炭,使其燃烧前析出较多挥发分从而降低着火温度;而煤炭的含碳量高于生物质燃料,使其拥有较高的低位发热量。

(2) 燃料的失重曲线由于燃料成分和微观结构的不同展现出明显的区别。

(3) 生物质燃料在挥发分析出燃烧阶段的活化能均大于焦炭燃烧阶段,而煤炭燃料在挥发分析出燃烧阶段的活化能均小于焦炭燃烧阶段。

(4) 木头,秸秆和兰炭的成型燃料在两个主要失重阶段比原料拥有更高的活化能,烟煤块在挥发分析出燃烧阶段的活化能小于烟煤煤球,而在焦炭燃烧阶段的活化能大于烟煤煤球。

(5) 生物质燃料和煤炭燃料在焦炭燃烧阶段具有明显的区别。

参考文献:

[1] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告 公共建筑专题 2022版[M].北京:中国建筑工业出版社,2022.

[2] Li Qing, Qi Juan, Jiang Jingkun, et al. Significant reduction in air pollutant emissions from household cooking stoves by replacing raw solid fuels with their carbonized products[J]. Science of the Total Environment,2019,650(Pt1):653-660.

[3] 张雪,赵明,白雪峰.几种不同变质程度煤的热重分析研究[J].化学与粘合,2016,38(1):30-35.

[4] 田红,廖正祝.农业生物质燃烧特性及燃烧动力学[J].农业工程学报,2013,29(10):203-212.

[5] 鱼银虎,崔海婷,宋静.桃木质成型燃料燃烧特性研究[J].环境科学导刊,2020,39(6):1-3.

[6] 胡荣祖.热分析动力学[M].北京:科学出版社,2008.

[7] Nie Yazhou, Deng Mengsi, Shan Ming, et al. Evaluating the impact of wood sawdust and peanut shell mixing ratio on co-combustion performance[J]. FUEL, 2022,324.

[8] 刘国伟,董芑,韩亚芬,等.富氧条件下煤燃烧特性的热重分析实验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(1):104-108.

[9] 郑明东,何孝军.动力煤的燃烧性能[J].化工学报,2003,54(3):374-378.

[10] 刘圣勇,赵迎芳,张百良.生物质成型燃料燃烧理论分析[J].能源研究与利用,2002,(6):26-28.

[11] Mian Inamullah, Li Xian, Dacres Omar D, et al. Combustion kinetics and mechanism of biomass pellet[J]. ENERGY, 2020,205.

[12] 马骏,张玲,方超,等.影响热重分析仪测试的几种因素及解决方法探讨[J].实验科学与技术,2013(4):338-340.

[13] Yang Lichun, Pang Qinghai, He Zhijun, et al. Nonisothermal Thermogravimetric Kinetic Investigations on Combustion Behaviors of Concomitant Biomass from Urban Plants[J]. ENERGY AND FUELS, 2019,33(12):12527-12537.