

# 玉米秸秆成型颗粒高温热解和燃烧特性研究\*

魏博<sup>1</sup>, 陈丽娟<sup>1†</sup>, 阿依谢姆古丽·赛来<sup>1</sup>, 李显<sup>1,2</sup>, 王建江<sup>1</sup>, 刘江山<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 化学化工学院, 新疆煤炭清洁转化与化工过程重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为分析玉米秸秆成型颗粒燃烧过程中挥发分析出阶段的作用及反应温度对成型颗粒燃烧特性的影响, 本文针对成型颗粒设计了等温反应试验系统, 在700~1 000 °C范围内开展成型颗粒高温热解和燃烧实验, 分析不同条件下的失重速率与挥发分析出完成时间. 结果表明: 成型颗粒的高温热解和燃烧均可分为两个阶段, 热解过程第一阶段的挥发分析出致使成型颗粒失重达到70%左右, 剩余焦炭在第二阶段继续加热过程中失重量很小; 燃烧过程第一阶段除挥发分析出外, 表层焦炭也在燃烧, 且产生的高温可加速成型颗粒内部挥发分的析出, 第二阶段为焦炭燃烧. 从700 °C升高至1 000 °C时, 高温热解和燃烧的第一阶段时间分别缩短了47.6%和44.4%, 而燃烧过程中焦炭的燃烧速率提高了约3倍.

**关键词:** 生物质; 成型颗粒; 燃烧; 高温热解; 等温反应

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.11.11.0004

**中图分类号:** TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)06-0685-06

**引文格式:** 魏博, 陈丽娟, 阿依谢姆古丽·赛来, 等. 玉米秸秆成型颗粒高温热解和燃烧特性研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(6): 685-690.

**英文引文格式:** WEI B, CHEN L J, Ayixiemuguli Sailai, et al. Study on high-temperature pyrolysis and combustion characteristics of corn straw briquettes[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(6): 685-690.

## Study on High-Temperature Pyrolysis and Combustion Characteristics of Corn Straw Briquettes

WEI Bo<sup>1</sup>, CHEN Lijuan<sup>1</sup>, Ayixiemuguli Sailai<sup>1</sup>, LI Xian<sup>1,2</sup>, WANG Jianjiang<sup>1</sup>, LIU Jiangshan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coal Clean Conversion & Chemical Engineering Process of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, School of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China;

2. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** To analyse the role of volatile devolatilization process in the briquettes overall combustion process was studied by contrasting the difference in high-temperature pyrolysis process and combustion process at different temperatures, the isothermal reacting experimental system was built. The high-temperature pyrolysis and combustion experiments were carried out in the range of 700~1 000 °C to study the weight loss velocity and devolatilization process time. The results indicated that whether high-temperature pyrolysis or the combustion process of corn straw briquettes could be divided into two stages. The first stage in high-temperature pyrolysis mainly was devolatilization process, and the weight loss reached 70% in whole briquettes. In contrast, the char was heated in the second stage, and the weight loss was very small. Aimed to combustion process, except for volatile devolatilization, a certain amount of char at the outside surface of briquette was also burned during the first stage. In addition, the outside surface char combustion provided heat to enhance the temperature inner of briquettes increasing, and accelerated the devolatilization process. As the reacting temperature increased from 700 °C to 1 000 °C, the reacting times of the first stage in high-temperature pyrolysis and combustion process shortened about 47.6% and 44.4%, the combustion velocity of briquettes char combustion process was increased by about 3 times.

**Key words:** biomass; briquette; combustion; high temperature pyrolysis; isothermal reacting

\* 收稿日期: 2020-11-11

基金项目: 新疆大学博士启动基金(2018).

作者简介: 魏博(1985-), 男, 博士, 副教授, 从事燃烧污染防治领域的研究, E-mail: weiboxju@163.com.

† 通讯作者: 陈丽娟(1973-), 女, 硕士, 讲师, 从事燃烧污染防治领域的研究, E-mail: Ljchenxju@163.com.

## 0 引言

随着节能降碳压力逐年增加,我国调整能源结构、增加可再生能源占比已成为亟待解决的重要问题之一<sup>[1]</sup>.在生物质生长过程中利用光合作用吸收CO<sub>2</sub>,燃烧时释放CO<sub>2</sub>,因此,燃烧生物质代替燃煤可降低CO<sub>2</sub>的排放.而且生物质能源分布广泛、调节性强,是最有潜力的可再生能源之一<sup>[2]</sup>.在各种生物质的利用方式中,生物质燃烧放热设备简单、技术成熟,是目前重要的利用方式之一<sup>[3]</sup>.然而,生物质能源能量密度低、运输成本较高<sup>[4]</sup>,且不同种类生物质中各组分差别很大,对生物质利用设备的设计和运行提出极高的要求<sup>[5]</sup>.为了解决这些问题,将生物质压缩为成型颗粒,可有效提高能量密度,也可通过调整压缩参数或加入添加剂,调整成型颗粒的各项参数,保证其燃烧特性参数的统一.

新疆近10年玉米种植面积持续增长,2017年达到91.89万公顷<sup>[6]</sup>.玉米秸秆的草谷比高,达到1.2~1.3左右<sup>[7]</sup>.若将玉米秸秆作为生物质能源,将大量代替燃煤,降低CO<sub>2</sub>排放.

准确、深入地理解燃料的燃烧特性,是设计燃烧设备、优化运行参数的重要环节<sup>[8]</sup>.分析燃料的燃烧特性,通常对粉状燃料采用热重分析的方法来观察升温过程中燃料氧化过程的失重特性<sup>[9]</sup>,但这种方法无法表达成型颗粒燃烧过程中的传热传质特性. Porteiro等对木质颗粒的燃烧特性进行了研究,发现成型颗粒的燃烧可分为两个阶段:第一阶段主要是挥发分析出与着火;第二阶段主要是焦炭燃烧,同时也建立了计算模型,计算结果与实验结果接近<sup>[10]</sup>.然而,在生物质成型颗粒的燃烧过程中,挥发分析出属于吸热过程<sup>[11]</sup>,由于颗粒内部氧气不足,析出的可燃气体在离开成型颗粒后才会着火<sup>[12]</sup>;而焦炭燃烧则在前期吸热,达到一定温度、存在一定量氧气的条件下才会着火,进而放热,使热量向内部传递<sup>[13]</sup>.对于成型颗粒燃烧挥发分析出的过程中是否存在焦炭同时燃烧、反应温度是如何影响这两个过程,仍需要深入开展研究.

本文以玉米秸秆成型颗粒为研究对象,设计与工业应用吻合的燃烧试验系统,开展成型颗粒的燃烧失重实验.并通过设计反应器,获得相同温度条件下的高温热解特性,深入分析挥发分析出在成型颗粒燃烧过程中所起到的作用,并分析反应温度对成型颗粒燃烧的影响,以期为理解成型颗粒的燃烧过程提供参考.

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

选用新疆奇台县的玉米秸秆破碎至0.2 mm以下、干燥后备用.玉米秸秆的干燥基工业分析如表1.由表1可知,在干燥基条件下,玉米秸秆的水分仅为6.62%,这部分水分均属于内在水分;挥发分含量较高,达到了69.76%;灰分仅为5.53%.

表 1 玉米秸秆的干燥基工业分析(wt.%)  
Tab 1 Proximate analysis as dry basis of corn straw

$M_{ad}$	$V_{ad}$	$A_{ad}$	$FC_{ad}$
6.62	69.76	5.53	18.09

在工业应用过程中,将玉米秸秆破碎的过细,则破碎能耗较高,而破碎的较粗,则不易成型.因此,为了与工程实际吻合,本文将玉米秸秆破碎后选取0.5~1 mm的部分,如图1所示.由图1可知,样品中存在部分丝状秸秆,这是由于采用较大孔径筛分时,这些丝状秸秆也会从网筛中漏下,而这种情况也与工程实际较为吻合.

实验将约3 g玉米秸秆样品置于热压成型机中10 MPa、120 °C条件下压制2 min,制备成型颗粒,用于燃烧与热解试验.压制的成型颗粒为直径30 mm的短圆柱,成型后的密度为0.576 g·cm<sup>-3</sup>.



图 1 玉米秸秆破碎后0.5~1 mm部分  
Fig 1 0.5~1 mm part in crush corn straw powder

## 1.2 研究装置与方法

本文所做的成型颗粒燃烧与热解试验在等温反应试验系统中完成,如图2所示。

等温反应系统由上下贯通的管式炉、温控系统、石英反应器及重量实时称量系统组成。石英反应器分为两种:一种用于开展热解反应;另一种用于开展燃烧反应。其中热解反应器为直径4 cm、长度10 cm的石英管。在石英管顶部侧面对称开两个小孔,挂上挂勾。为了与实际成型颗粒燃烧的工业链条炉更加吻合,将燃烧反应器分为两个区,下区底部封死,防止燃烧过程中灰颗粒掉落影响试验精度;下区侧面和上区底部开若干直径为2 mm的小孔,用于空气通入,经过燃烧后的烟气从上区顶部离开反应器;上区顶部也对称开两个小孔,挂上挂勾。

在开展实验时,首先将天平置于管式炉上方,启动管式炉,加热至目标温度(700 °C、800 °C、900 °C、1 000 °C)后,将石英反应器放入管式炉恒温区保持10 min左右,使石英反应器温度也达到目标温度,并保证天平称量稳定。将成型颗粒从管式炉顶部快速放入石英反应器中,并实时记录成型颗粒的重量变化,通过分析成型颗粒的重量变化来分析其热解与燃烧特性。

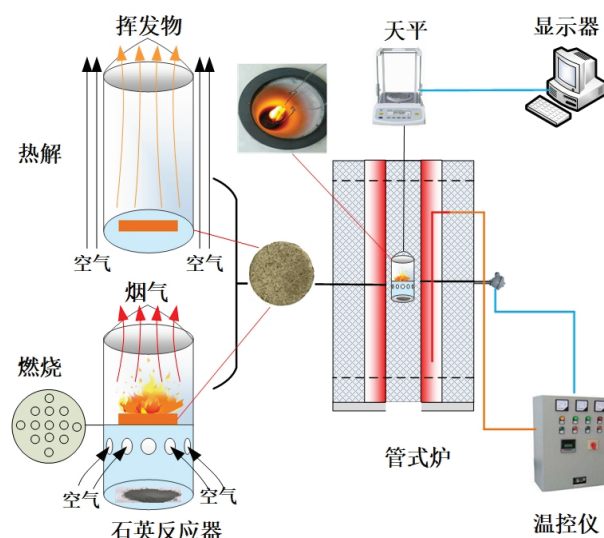


图2 等温反应试验系统

Fig 2 Isothermal reacting experimental system

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 玉米秸秆成型颗粒高温热解特性

玉米秸秆成型颗粒分别在700 °C、800 °C、900 °C、1 000 °C开展高温热解试验,其随时间的失重曲线如图3所示。由图3可知,在700 °C成型颗粒热解时,前期约10 s左右重量缓慢降低后,接近直线下降,直至约125 s时可见到明显的拐点,拐点处重量约为原成型颗粒的25%左右,在125 s以后,失重量很小,直至320 s时,反应残余物重量仍在23%以上。

反应温度升高,成型颗粒的热解失重曲线呈现出近似的趋势,但温度达到800 °C以上时,失重曲线从最开始就呈现出逐渐下降的趋势,拐点所在的时间也提前,拐点处失重量也增加。

由于成型颗粒在破碎前已干燥,水分仅为6.62%,且成型过程的温度达到120 °C,水分对成型颗粒的失重影响较小。在反应温度为700 °C时,炉内辐射传热速度慢,表层吸收热量并升温的速度也相对较慢,因此,挥发分析出的速度稍慢。而表层达到一定温度后,成型颗粒内部主要以导热为主,传热速度加快,且越向成型颗粒中间,每一层中物料量越少,因此,挥发分的析出造成的失重量保持直线下降。当温度升高,辐射传热速度迅速增加,表层加热速度快,在低温下初期的缓慢失重过程消失,代之的是直接快速下降。另一方面,挥发分的析出与反应温度紧密相关,其实质是燃料中碳氢化学键的断裂<sup>[14]</sup>。当温度较低时,断裂的化学键主要以支链小分子为主,而当温度较高时,可使更复杂的长链分子化学键断裂,进而造成更多的挥发物析出<sup>[15]</sup>。因此,温度升高,拐点处的失重率也增加。当挥发分完全析出后,成型颗粒内部剩余部分属于焦炭,重量变化较小。

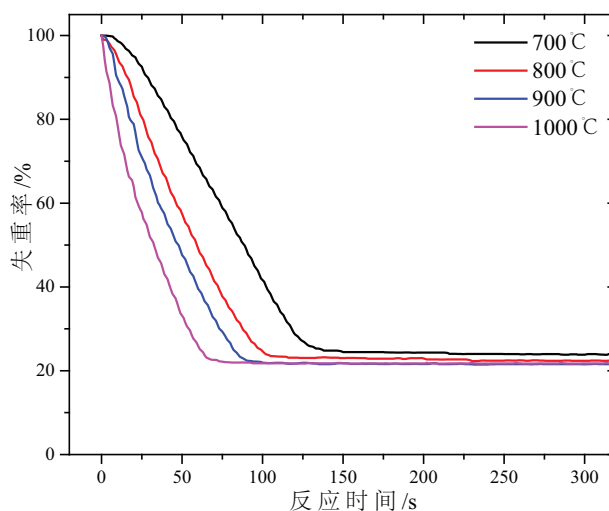


图3 玉米秸秆成型颗粒高温热解特性

Fig 3 High temperature pyrolysis characteristics of corn straw briquettes

## 2.2 玉米秸秆成型颗粒燃烧特性

玉米秸秆成型颗粒分别在700 °C、800 °C、900 °C、1 000 °C开展燃烧试验,获得的成型颗粒随时间的失重曲线如图4所示.由图4可知,不同温度下的燃烧失重特性与高温热解的失重特性在挥发分析出阶段趋势类似,但在后期存在较大差异.在700 °C时,挥发分析出阶段也在前10 s出现了缓慢降低的趋势,而后呈直线下降,在120 s左右出现了较明显的拐点,拐点后重量呈现出缓慢直线降低的趋势,至320 s时反应残余物的重量仍超过20%以上.反应温度升高,失重曲线整体趋势与700 °C时一致,但从开始即呈现出直线下降的趋势,随反应温度升高,拐点处所在的时间减少,拐点后的失重量也逐渐降低.当反应温度为1 000 °C时,拐点对应的的时间仅为50 s左右,直至320 s时的固相残余物的重量仅为反应前的5%左右.

从成型颗粒燃烧失重曲线可知,拐点之前各温度的总体趋势与高温热解接近,而拐点之后,由于氧气参与反应,因此失重曲线下降过程主要是焦炭的燃烧.反应温度升高,在320 s时焦炭的燃烧更加完全.

## 2.3 玉米秸秆成型颗粒高温热解与燃烧特性对比

从图3和图4中可见,高温热解与燃烧在拐点之前失重曲线的趋势保持一致.为了详细分析两个过程之间的关系,深入理解成型颗粒的燃烧过程,将两组曲线进行对比,如图5所示.

将失重曲线按失重速率明显变化处定义为反应过程的拐点,拐点之前为第一阶段,拐点之后为第二阶段.从图5中可见,在700 °C时,第一阶段两个过程在前30 s的趋势接近,但燃烧过程失重速率在30 s以后高于热解过程,热解失重曲线拐点对应的的时间较燃烧失重曲线拐点对应的的时间更长.这说明,在低温燃烧的过程中,成型颗粒内层挥发分析出时,外层已脱离挥发分的焦炭在氧气的参与下已燃烧,燃烧产生的热量加速了成型颗粒内层的温度升高,进而使拐点提前.而第二阶段,由于燃烧反应温度较低,反应速度相对较慢,在320 s时,反应残余物仍超过20%以上.因此,在实际成型颗粒燃烧过程中,反应温度较低时,则需要更长的时间才能将成型颗粒燃烧完全.

当反应温度升高,拐点对应的的时间均相应缩小.在第一阶段燃烧与热解失重曲线之间的区别逐渐缩小,这说明反应温度较高时,辐射传热的速度也增加,传热提供的热量与焦炭燃烧释放的热量逐渐接近.而在第二阶段,反应温度显著影响焦炭的燃烧过程,在温度达到1 000 °C时,最终的反应残余物仅为5%左右.

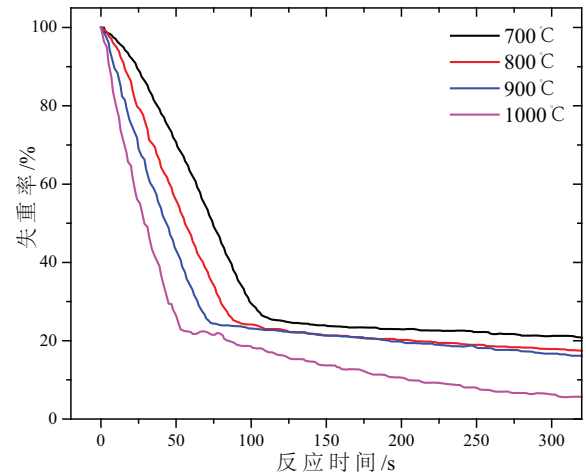


图4 玉米秸秆成型颗粒燃烧特性

Fig 4 Combustion characteristics of corn straw briquettes

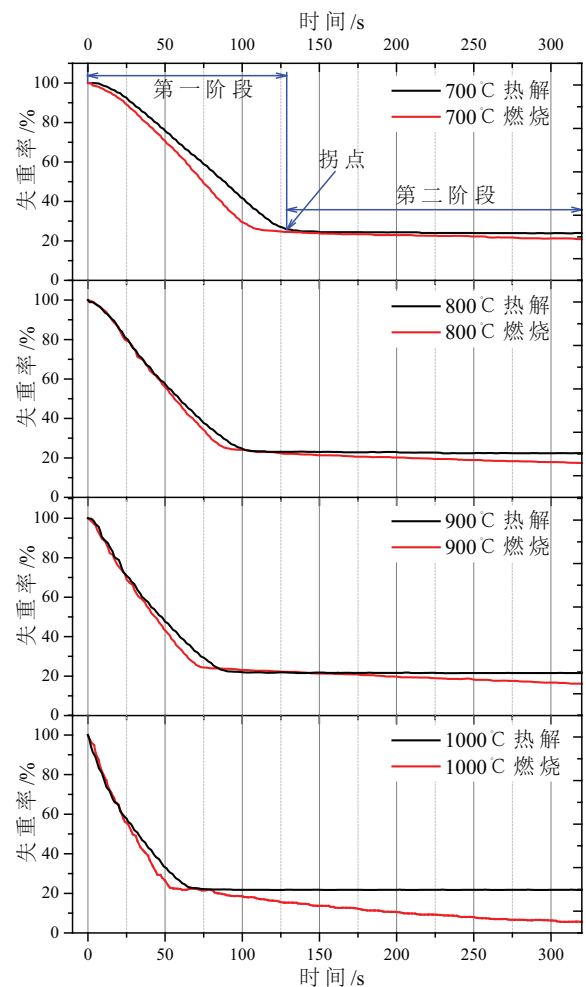


图5 玉米秸秆成型颗粒高温热解与燃烧特性对比

Fig 5 Compare of the high temperature pyrolysis and combustion characteristics of corn straw briquettes

上述结果说明:在实际燃烧过程中,挥发分析出时间较短;提高炉内温度,不但可加速挥发分析出,也是提高焦炭燃烧速度,提高成型颗粒燃烧效率的有效措施之一;但提高温度,也会对挥发分析出产生显著影响,会影响炉内的温度分布。

为了能够准确获得温度对热解、燃烧过程的影响,为燃烧设备的设计提供更加准确的数据,选取各失重曲线对应的拐点处时间、拐点处失重率、第一阶段失重速率、第二阶段失重速率(失重速率假设第一阶段与第二阶段均为直线)作为特征参数进行详细的对比,结果如图6和图7所示。

从图6中可见,热解和燃烧时拐点处对应的时间和失重率均呈现出接近直线降低的趋势。拐点处对应的的时间从700 °C时的124 s和117 s降低至1 000 °C时的65 s和61 s,分别降低了47.6%和44.4%;相应的两个过程拐点处的失重率也从25.32%和25.88%降低至22.39%和22.92%。

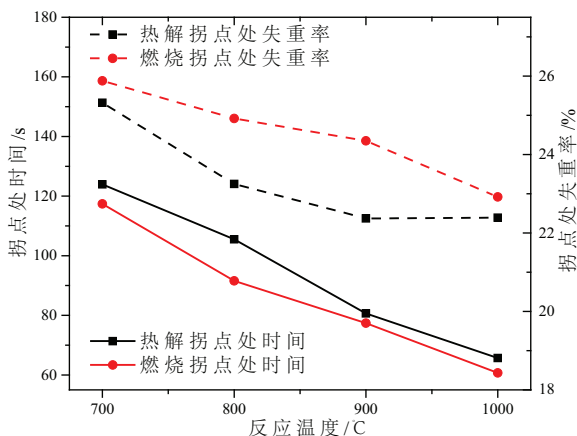


图6 玉米秸秆成型颗粒高温热解与燃烧拐点特征参数  
Fig 6 Characteristic parameter of inflection points in high temperature pyrolysis and combustion process of corn straw briquettes

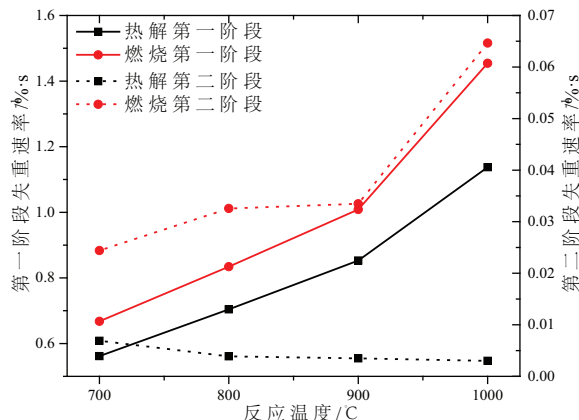


图7 玉米秸秆成型颗粒高温热解与燃烧各阶段失重速率  
Fig 7 Weight loss rate of different stage in high temperature pyrolysis and combustion process of corn straw briquettes

从图7所示的成型颗粒高温热解与燃烧过程第一阶段和第二阶段失重速率可见,700 °C时高温热解和燃烧在第一阶段的失重速率仅为 $0.56\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ,温度升高至900 °C的过程中,第一阶段的失重速率均呈现出直线上升的趋势;温度进一步升高至1 000 °C时,失重速率升高的速度加快,达到了 $1.14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $1.45\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

成型颗粒高温热解第二阶段基本很低,仅为 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 以下,说明焦炭在继续加热的过程中,再持续加热也不会使化学键断裂,析出更多的挥发分。成型颗粒燃烧的第二阶段主要是焦炭的燃烧过程,在700 °C时,其失重速率为 $0.024\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ,温度上升至900 °C的过程中,失重速率升高较少,但达到1 000 °C时,失重速率迅速升高,达到了 $0.065\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ,较700 °C时提高了近3倍。

### 3 结论

为了详细分析成型颗粒燃烧过程中挥发分析出在整个成型颗粒燃烧过程中的作用,验证温度对成型颗粒燃烧的影响,本文针对玉米秸秆成型颗粒在相同温度下开展了高温热解和燃烧过程的研究,获得的结果如下。

(1) 成型颗粒热解过程的失重曲线可分为两个阶段:第一阶段主要是挥发分的析出,是失重的主体阶段;第二阶段是焦炭持续加热造成的化学键断裂造成的失重。温度由700 °C升高至1 000 °C,挥发分全部析出的时间从124 s缩短至65 s,降低了47.6%。

(2) 成型颗粒的燃烧过程失重曲线也可分为两个阶段:第一阶段在挥发分全部析出的同时,成型颗粒表层的焦炭也会燃烧,在低温条件下,表层燃烧释放热量,加速成型颗粒内部升温,加速了燃烧的第一阶段;而高温条件下,炉内向成型颗粒表层传热速率升高,焦炭燃烧对挥发分析出的影响逐渐降低。

(3) 温度对成型颗粒燃烧过程的挥发分析出和焦炭燃烧的速率影响显著,在700 °C升温至1 000 °C的过程中,挥发分的析出时间从117 s缩短至61 s,降低了44.4%,焦炭的燃烧速率提高了约3倍。

**参考文献:**

- [1] 王勇, 王颖. 中国实现碳减排双控目标的可行性及最优路径: 能源结构优化的视角[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4444-4455.  
WANG Y, WANG Y. The feasibility and optimal path for China to achieve dual control of carbon: the perspective of energy structure optimization[J]. China Environmental Science, 2019, 39(10): 4444-4455. (in Chinese)
- [2] 王久臣, 戴林, 田宜水, 等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276-282.  
WANG J C, DAI L, TIAN Y S, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9): 276-282. (in Chinese)
- [3] 陈汉平, 李斌, 杨海平, 等. 生物质燃烧技术现状与展望[J]. 工业锅炉, 2009(5): 1-7.  
CHEN H P, LI B, YANG H P, et al. Current status and prospects of biomass combustion technology[J]. Industrial Boiler, 2009(5): 1-7. (in Chinese)
- [4] 王才威, 张守玉, 姚云隆, 等. 生物质成型炭燃烧特性研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(7): 2014-2020.  
WANG C W, ZHANG S Y, YAO Y L, et al. Study on biomass molding and combustion characteristics of carbon[J]. Acta Energiæ Solaris Sinic, 2019, 40(7): 2014-2020. (in Chinese)
- [5] 卢洪波, 戴惠玉, 马玉鑫. 生物质三组分燃烧特性及动力学分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 186-191.  
LU H B, DAI H Y, MA Y X. Combustion characteristics and dynamic analysis of three biomass components[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(17): 186-191. (in Chinese)
- [6] 新疆统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2017.  
Xinjiang Statistics Bureau. Statistics yearbook of Xinjiang[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007-2017. (in Chinese)
- [7] 彭春艳, 罗怀良, 孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014(3): 14-20.  
PENG C Y, LUO H L, KONG J. Research progress in estimation and utilization of straws resources in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2014(3): 14-20. (in Chinese)
- [8] 马晓龙. 煤质对锅炉设计及运行的影响[J]. 中国电力, 1997(4): 68-69.  
MA X L. Influence of coal quality on boiler design and operation[J]. Electric Power, 1997(4): 68-69. (in Chinese)
- [9] RAEVA A A, DONGARI N, ARTEMYEVA A A, et al. Experimental simulation of trace element evolution from the excluded mineral fraction during coal combustion using GFAAS and TGA-DSC[J]. Fuel, 2014, 124(15): 28-40.
- [10] PORTEIRO J, MIGUEZ J L, GRANADA E, et al. Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(2): 169-175.
- [11] 田红, 吴艳, 尹艳山, 等. 纤维素类草本能源植物燃烧动力学研究[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(4): 335-341.  
TIAN H, WU Y, YIN Y S, et al. Study on combustion dynamics of cellulosic herbaceous energy plants[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(4): 335-341. (in Chinese)
- [12] 张忠孝. 单个大煤焦颗粒非均相着火的研究[J]. 动力工程学报, 2001(2): 1137-1139.  
ZHANG Z X. Study on heterogeneous ignition of single large coke particles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2001(2): 1137-1139. (in Chinese)
- [13] 卢科, 栗晶, 王昱升, 等. 单煤粉颗粒着火特性的激光辅助高速摄像测量[J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(2): 79-84.  
LU K, LI J, WANG Y S, et al. Laser-assisted high-speed camera measurement of ignition characteristics of single coal powder particles[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2019, 25(2): 79-84. (in Chinese)
- [14] GUO X, LIU Z, XIAO Y, et al. The Boltzmann-Monte-Carlo-Percolation (BMCP) model on pyrolysis of coal: the volatiles' reactions[J]. Fuel, 2018, 230(10): 18-26.
- [15] ROLANDO Z, KRISTER S, EMILIA B. Rapid high-temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor[J]. Fuel, 1999, 75(5): 545-550.

责任编辑: 赵新科