

玉米秸秆打捆燃烧特性研究

王 炯^{1,2}, 刘圣勇^{1,2}, 张 品^{1,2}, 远 方^{1,2}, 鲁 杰^{1,2}, 刘婷婷¹

(1. 河南农业大学生物质能源河南省协同创新中心, 郑州 450002; 2. 农业部农村可再生能源新材料与装备重点实验室, 郑州 450002)

摘 要: 采用热重-微分热重(TG-DTG)联用技术对玉米秸秆散烧、打捆、成型3种燃烧方式进行热重分析,通过计算分析得出打捆燃料燃烧特性指数,并与散烧和成型燃烧相对比。试验结果表明:捆烧与散烧和成型燃烧过程都经历水分蒸发、挥发分析出、固定碳的燃烧和燃尽4个阶段;由于打捆燃料具有独特的尺寸结构,不利于传热传质的进行,其挥发分的析出峰值时间滞后;打捆燃料挥发分不易析出,析出过程较为平稳,维持较长时间;打捆燃料燃烧后期固定碳的燃烧存在更为显著的峰值点;通过自主设计捆烧试验台对热重试验结果进行实验验证,其结果具有相似性。最后将打捆燃料燃烧特性与生物质锅炉供风系统设计相结合,采用分段式供风,提出一种新型锅炉供风系统设计思路。

关键词: 打捆; 燃烧; 反应动力学; 分段送风

中图分类号: S216

文献标识码: A

0 引 言

目前,秸秆燃烧利用方式主要有悬浮燃烧、传统散烧、打捆燃烧、致密成型燃烧4种燃烧方式^[1]。这4种燃烧方式中,悬浮燃烧秸秆不易运储,传统散烧效率低,成型燃烧耗能高,秸秆打捆燃烧是秸秆能源化利用总成本最低、从收集到燃烧前期加工处理过程能耗最少、对环境影响最小的技术,对于秸秆类生物质,打捆燃烧将是最有发展前景的燃烧方法^[2]。

田 红等^[3]对散状秸秆做了大量热重燃烧动力学特性分析,认为其燃烧过程主要分为水分析出阶段、挥发分析出与燃烧阶段、固定碳燃烧和燃尽阶段4个阶段,表现在热重燃烧曲线中主要为挥发分析出燃烧和固定碳燃烧两个阶段,此外还发现秸秆散状燃烧后期稳定性较差,需吸收热量才能维持燃烧,不宜单独燃烧。王翠苹等^[4]对3种不同的生物质成型燃料进行了热重分析,明确了影响颗粒燃料燃烧适应性的主导因素是挥发分的析出和燃烧速率。

秸秆打捆后密度适中(80~500 kg/m³),外观具有较大尺寸,截面积约为36 cm×46 cm,其燃烧过程与燃烧特性与其他燃烧方式有较大差别。丹麦早在20世纪70年代已开展对秸秆打捆燃料燃烧

研究,其捆烧技术处于世界领先水平,各类捆烧设备也迅速发展^[5,6],而中国对于秸秆打捆燃料的燃烧特性以及相应的打捆燃烧锅炉设备研究较少,因此对于秸秆打捆燃烧的燃烧特性较模糊,打捆燃烧锅炉设计理论依据不具体^[7]。本研究对玉米秸秆散烧、捆烧和成型燃烧3种燃烧方式进行热重试验,着重对捆烧进行燃烧特性分析,并将捆烧与散烧和成型燃烧相对比,找出其燃烧特性与散烧和成型燃烧的不同,并通过自主设计的捆烧实验台进行实验验证。最后将打捆燃料的燃烧特性与锅炉供风系统设计有机结合,提出新型供风系统设计思路,使打捆燃料更加清洁高效燃烧,以期为今后生物质锅炉供风系统的设计提供理论依据。

1 试验材料、设备与方法

1.1 试验材料

试验所用玉米秸秆取自河南农业大学农学实验田,工业分析采用江苏双城分析仪器有限公司生产的(MAC-100)全自动工业分析仪,元素分析采用意大利EuroVector(EA3000)元素分析仪,分析结果如表1所示。

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 秸秆高效清洁捆烧技术与装备研究(201503015); 河南省基础与前沿研究(122300410086); 河南省重点科技攻关项目(13210221048)

通信作者: 刘圣勇(1964—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事可再生能源工程方面的研究。liushy@vip.sina.com

表1 玉米秸秆的工业分析与元素分析
Table 1 Proximate and ultimate analysis of corn straw

样品	工业分析/%wt,ad				元素分析/%wt,ad					发热量 $Q_{\text{net}}, \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	[C]	[H]	[O]	[N]	[S]	
玉米秸秆	8.00	6.90	70.70	14.40	42.57	3.82	37.86	0.73	0.12	15658

1.2 试验方法和仪器设备

本研究热重分析采用美国 TA 公司生产的 STDQ600 热分析仪,该仪器可进行热重法(TG)、差热重量法(DTG)以及差示扫描量热法(DSC)的同步热分析。试验前将玉米秸秆通过磨粉机研磨,使用分样筛分离,得到粒径度小于 100 目的试验样品,置于干燥箱中,在 105 ℃下干燥 2 h。干燥后用天津拓普公司生产的 FW-4A 型压片机,选用 0.5 和 24.0 atm 制取不同密度的燃料,以模拟打捆和成型燃料密度和燃烧过程。试验气氛选用空气,气体流量 80 mL/min,试验采用非等温法升温法进行加热,从室温开始,升温速率 20 ℃/min,终温 600 ℃。通过热重分析仪自动记录试样质量随温度和时间 的变化过程,采用 Origin 软件对数据进行处理,分析计算各试样燃烧特性指数。

1.3 捆烧实验台

实验台依据秸秆打捆燃料的特性和相关锅炉设计参数设计而成^[8],图 1 为实验台炉体部分,在炉膛内,沿炉排向上依次布置 6 个可伸缩热电偶(1#~6#,对应的测点温度为 $T_1 \sim T_6$),能插入打捆燃料内部不同深度,测量燃料内部不同位置不同燃烧阶段

的温度。热电偶 1#~5#插入打捆燃料的中心线上,在不同的高度分别插入 225、170、115、65、15 mm 不同深度。

2 燃烧特性指数

2.1 着火温度 T_e

着火温度 T_e 反映燃料点火的难易程度以及活化能的高低,数值越小,表明燃料越易点火。从 DTG 曲线挥发分析出峰值点作垂线与 TG 曲线交于一点,过该交点作 TG 曲线的切线,从 TG 曲线失重起始点作横轴平行线,切线与平行线的交点对应的温度即为着火温度 T_e ^[9]。

2.2 挥发分析出特性 R_v

挥发分析出特性 R_v ($\% / (\text{min} \cdot \text{K}^2)$)^[10],反映燃料中挥发分析出的难易程度,数值越大表明其析出性能越好,计算公式为:

$$R_v = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}}{T_{\max} \Delta T}$$

(1)

式中, $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}$ ——挥发分析出速率最大值, %/min;
 T_{\max} ——挥发分析出速率最大时所对应的温度, K;
 ΔT ——挥发分析出起始点到析出速率最大时的温度区间跨度, K。

2.3 可燃特性指数 C_r

可燃特性指数 C_r ^[11]反映燃料燃烧前期的燃烧性能,数值越大表明可燃性越好。

$$C_r = \frac{\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\max}}{T_e^2}$$

(2)

式中, $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\max}$ ——最大燃烧速率, %/min; T_e ——着火温度, K。

2.4 燃尽特性指数 N

燃尽特性 N ^[12]综合考察着火和燃烧稳定性对燃料燃尽的影响, N 值越大表明燃料的燃尽性能越好。

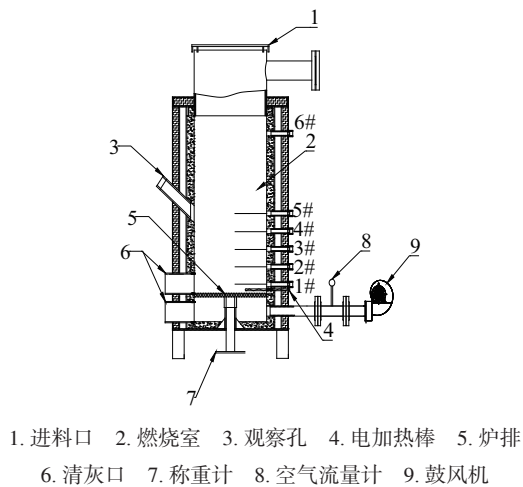


图1 实验台炉膛示意图
Fig. 1 Schematic of furnace

$$N = \frac{f_1 \cdot f_2}{t_0} \quad (3)$$

式中, f_1 ——燃料初始燃尽率; f_2 ——燃料后期燃尽率; t_0 ——燃尽时间, 即燃料从失重开始到燃尽率达到 98% 的时间。

2.5 综合燃烧特性指数 S

综合燃烧特性指数 S [13] 能全面反映燃料的着火和燃尽性能, S 值越大说明燃料的综合燃烧特性越好, 越有利于燃料的燃烧。

$$S = \frac{\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\max} \left(\frac{dw}{dt}\right)_{\text{mean}}}{T_e^2 T_0} \quad (4)$$

式中, $\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\max}$ ——最大燃烧速率, %/min;

$\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\text{mean}}$ ——燃料燃烧全过程平均燃烧速率, %/min;

T_0 ——燃尽温度, K。

3 试验结果与分析

3.1 玉米秸秆不同燃烧方式热重 TG 特性曲线

玉米秸秆 3 种燃烧方式下 TG 曲线如图 2 所示。通过玉米秸秆热重试验 TG 曲线可看出: 玉米秸秆无论采用哪种燃烧方式, 都大致符合生物质燃烧四段式理论。在 200 °C 之前为水分析出阶段, 由于试验前已对试验材料进行烘干, 因此在水分析出阶段差别不大; 在挥发分析出、固定碳的燃烧和燃尽阶段, 3 种燃烧方式下的 TG 曲线斜率, 即燃料燃烧速率存在较大差异。这是由于不同燃烧方式燃料的存在形态不同, 其传热传质过程不同, 造成燃料燃烧过程出现差异。

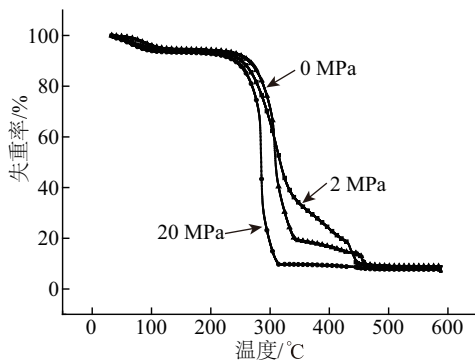


图2 TG 曲线

Fig. 2 TG graph

3.2 玉米秸秆不同燃烧方式热重 DTG 特性曲线

为更清晰观察燃烧过程的不同, 引入 DTG 曲线, 如图 3 所示。通过玉米秸秆热重试验 DTG 曲线可看出: 玉米秸秆 3 种燃烧方式下, 挥发分的析出与固定碳的燃烧峰值出现温度点存在明显不同, 挥发分析出峰值点的高低也有显著差异: 成型燃烧 > 散烧 > 捆烧; 挥发分析出的温度和时间范围也不相同: 捆烧 > 散烧 > 成型燃烧。这与燃料的尺寸结构有关, 有关学者认为成型高压过程破坏了秸秆纤维素结构, 更有利于挥发分的析出, 而打捆燃料密度大于散烧, 内部空隙率却小于散烧, 不利于挥发分的析出; 相同质量下捆烧燃料尺寸大, 不利于传热传质的进行, 捆烧燃料挥发分的析出维持了较大范围; 固定碳燃烧阶段, 捆烧出现更为显著的波峰。这是由于在燃烧后期, 打捆燃料外形尺寸结构突然坍塌, 更有利于传热传质的进行, 固定碳的燃烧骤然加剧, 出现显著波峰。

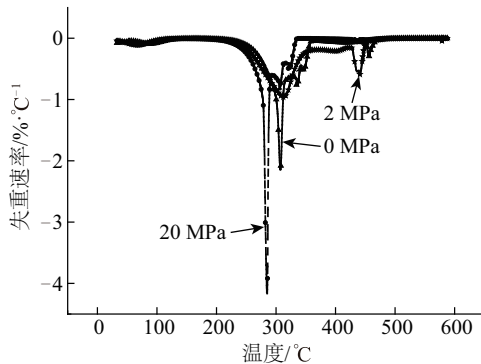


图3 DTG 曲线

Fig. 3 DTG graph

3.3 着火温度与分析

通过对着火温度作图可看出: 玉米秸秆在 3 种燃烧方式下的着火温度: 成型燃烧 > 散烧 > 捆烧。这与 3 种燃烧方式下燃料的尺寸结构和挥发分析出速率有关。从图 4 可看出, 打捆燃料挥发分析出维持较宽的时间范围, 变化速率比较缓慢, 保持一个平稳的增长速率, 而成型燃烧和散烧, 挥发分析出速率增长较快, 在较短时间内完成挥发分析出。同时, 散烧燃料内部孔隙率极大, 有利于热量在燃料内部的传递和挥发分的析出, 打捆燃料的尺寸和孔隙率均大于成型燃料, 不利于热量向内部传

递和挥发分向外析出。由于打捆燃料独特的尺寸结构,其挥发分析出比成型和散烧维持更长的时间,保持稳定平缓的析出速率。反映在图 4 中即为捆烧的 TG 曲线切线斜率较小,捆烧比散烧和成型燃烧的着火温度低,拥有更加良好的着火性能。

3 种燃烧方式下的燃烧特性指数通过表 2 可更加直观地看出打捆燃料的挥发分析出特性指数明显低于散烧和成型燃烧。分析认为:打捆燃料的密度和尺寸结构不利于传热传质的进行,热量向内传递和挥发分向外传递的速率均受到影响,造成打捆燃料挥发分析出较慢;打捆燃料的可燃特性和综合燃烧特性指数有所下降,燃尽特性介于散烧和成型燃烧两者之间。可见,打捆燃料在集合散烧和成型燃料优点的同时,也集合了 2 种燃烧方式的缺点,其密度和尺寸结构不利于打捆燃料燃烧的进行,在捆烧锅炉设计中,应对供风系统进行独特设计以适应其燃烧方式。

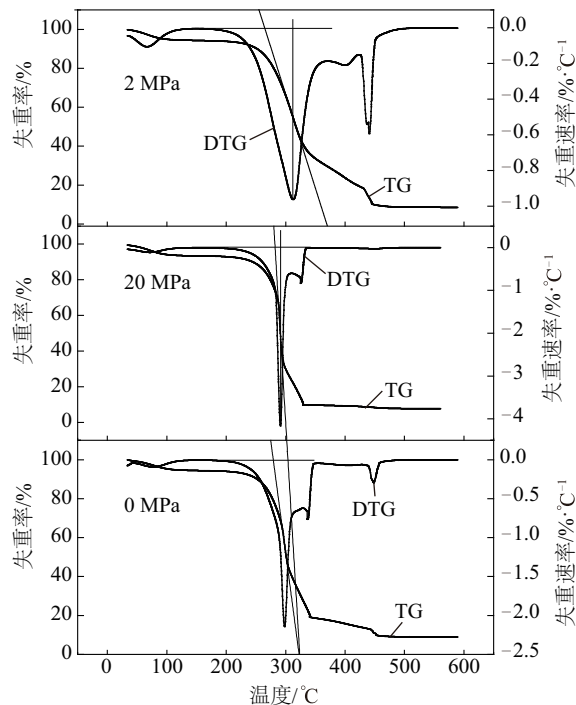


图4 3种燃烧方式着火温度

Fig. 4 Ignition temperature in three combustion modes

表2 玉米秸秆3种燃烧方式燃烧特性参数

Table 2 Combustion characteristic of three types of combust of corn straw

燃烧方式	着火温度 T_i/K	挥发分析出特性 $R_i \times 10^{-3}/K^{-2} \cdot \min^{-1}$	可燃特性指数 $C_i \times 10^{-4}/K^{-2} \cdot \min^{-1}$	燃尽特性指数 $N \times 10^{-3}/\min^{-1}$	燃尽时间 t_0/\min	综合燃烧特性指数 $S \times 10^{-8}/K^{-3} \cdot \min^{-2}$
散烧	552.28	1.0717	2.2781	2.8020	23.75	1.3539
打捆	537.95	0.3250	0.9593	4.1377	23.00	0.6190
成型	555.35	2.7112	4.0995	8.2418	22.75	2.6586

3.4 捆烧实验台实验验证结果与分析

通过图 5 可见: T_1 、 T_2 和 T_3 的温度峰值点滞后于 T_4 和 T_5 , 当 T_5 温度上升至约 280 °C 时挥发分开始析出, 此时从打捆燃料外层传递到内部的热量用来提供内部水分蒸发所需的热量。 T_1 热解温度曲线与蒸发曲线相距较远, 由于打捆燃料热量向内传递较慢, 当外层燃料固定碳开始燃烧时, 燃料内部挥发分继续析出, 并维持较长时间, 挥发分的析出与固定碳的燃烧交互影响^[14], 这与前面热重试验结果相吻合; 燃烧后期, 打捆燃料外形尺寸坍塌, 燃料内部高温焦炭骤然暴露于富氧环境中, 发生猛烈燃烧。温度分布图中 T_1 在燃烧后期有一个明显的高温区, 这与前面热重试验中, 打捆燃料燃烧后期固

定碳燃烧出现显著波峰相吻合。

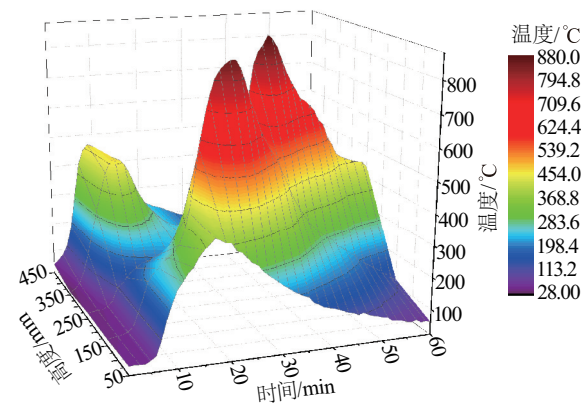


图5 打捆燃料内部温度分布

Fig. 5 Temperature distribution measured inside the fuel vs. time

4 结 论

论文通过对玉米秸秆 3 种燃烧方式进行热重分析和自制实验台实验验证,明确打捆燃烧的燃烧特性与燃烧过程,主要结论如下:

1)通过热重 TG-DTG 曲线可看出,打捆燃料挥发分析出峰值点滞后于散烧和成型燃烧,其挥发分析出时间也较散烧和成型燃烧方式维持更长时间,峰值点高度低于散烧和成型燃烧。由于其独特的尺寸结构,打捆燃料挥发分的析出与固定碳的燃烧交互影响作用更为明显,外层燃料固定碳的燃烧和内部燃料挥发分的析出同时进行,逐步向内扩散燃烧。

2)随着燃烧的进行,打捆燃料燃烧后期固定碳燃烧出现更为显著的波峰。在燃烧后期打捆燃料外形尺寸结构突然坍塌,内部高温焦炭暴露于外界富氧环境中,出现猛烈燃烧,其固定碳的燃烧阶段比散烧和成型燃烧方式更为显著。

3)打捆燃料挥发分析出特性、可燃特性指数、可燃特性指数相比散烧和成型燃烧都有所降低,说明打捆燃料在综合成型燃烧和散烧优点的同时,也综合了二者的缺点,其独特的尺寸结构也使得打捆燃料燃烧状况下降。

4)由试验结果可知,一次风对打捆燃料的燃烧至关重要,根据试验结论将打捆燃料燃烧特性与供风系统设计相结合,可采用分段式供风。在捆烧初期水分蒸发和挥发分析出阶段,燃烧不稳定,所需风量、风速不宜过大,一次风采用风仓均匀布风;在燃烧中期,为强化打捆燃料内部传热传质,采用高速喷嘴供风,将一次风以高速吹入打捆燃料内部;在燃烧后期,打捆燃料外形尺寸坍塌,飞灰现象严重,采用风仓布风,使残留炭燃烧殆尽。

[参考文献]

- [1] 赵 军,王述洋.我国生物质能资源与利用[J].太阳能学报,2008,29(1):90—94.
- [1] Zhao Jun, Wang Shuyang. Bio-energy resource and its utilization in China[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008, 29(1): 90—94.
- [2] 白 冰.玉米秸秆捆烧动力学特性研究[D].郑州:河南农业大学,2010.
- [2] Bai Bing. Study of cornstalk bales combustion kinetics [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010.
- [3] 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.
- [3] Tian Hong, Liao Zhengzhu. Combustion characteristics and combustion kinetics of agriculture biomass [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 203—212.
- [4] 王翠苹,李定凯,王凤印,等.生物质成型颗粒燃料燃烧特性的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(10):174—177.
- [4] Wang Cuiping, Li Dingkai, Wang Fengyin, et al. Experimental study on the combustion characteristics of biomass pellets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 174—177.
- [5] Kristensen E F, Kristensen J K. Development and test of small-scale batch-fired straw boilers in Denmark[J]. Biomass & Bioenergy, 2004, 26(6): 561—569.
- [6] Ryu C, Yang Y B, Khor A, et al. Effect of fuel properties on biomass combustion (Part I): Experiments-fuel type, equivalence ratio and particle size[J]. Fuel, 2006, 85(7-8): 1039—1046.
- [7] 刘圣勇,白 冰,刘小二,等.生物质捆烧锅炉的设计与研究[J].太阳能学报,2010,31(12):1527—1531.
- [7] Liu Shengyong, Bai Bing, Liu Xiaor, et al. Design and study of biomass bales combustion boiler [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(12): 1527—1531.
- [8] 刘恩海,刘圣勇,白 冰,等.玉米秸秆打捆燃料燃烧动力学模型[J].农业工程学报,2013,29(24):218—226.
- [8] Liu Enhai, Liu Shengyong, Bai Bing, et al. Development of dynamic model of cornstalk bale combustion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24): 218—226.
- [9] 顾利锋,陈晓平,赵长遂,等.城市污泥和煤混燃特性的热重分析法研究[J].热能动力工程,2003,18(6):561—563.
- [9] Gu Lifeng, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Study of the characteristics of mixed burning of municipal sewage sludge and coal by a thermogravimetric method [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2003, 18(6): 561—563.
- [10] 张全国,马孝琴,刘圣勇,等.金属化合物对煤矸石燃烧动力学特性的影响[J].环境科学学报,1999,19(1):72—76.
- [10] Zhang Quanguo, Ma Xiaoqin, Liu Shengyong, et al.

- Study on kinetic characteristics in combustion process of gangue[J]. Journal of Environmental Science, 1999, 19(1): 72—76.
- [11] 王玉召, 李江鹏. 生物质与煤混燃的燃烧特性实验研究[J]. 锅炉技术, 2010, 41(5): 72—74.
- [11] Wang Yuzhao, Li Jiangpeng. Experiment to co-combustion characteristics of biomass and coal [J]. Boiler Technology, 2010, 41(5): 72—74.
- [12] 聂其红, 孙绍增, 李争起, 等. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(1): 72—76.
- [12] Ni Qihong, Sun Shaozeng, Li Zhengqi, et al. Thermogravimetric analysis on the combustion characteristics of brown coal blends[J]. Journal of Combustion Science & Technology, 2001, 7(1): 72—76.
- [13] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [13] Sun Xuexin. Combustion test technology and method of coal fired boiler [M]. Beijing: Electric Power Press of China, 2002.
- [14] 苏超杰. 生物质致密成型燃料微观结构分析及其燃烧机理研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.
- [14] Su Chaojie. Study on microstructure and combustion mechanism of biomass briquettes combustion [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2007.

STUDY ON COMBUSTION CHARACTERISTICS OF BALED CORN STALK

Wang Jiong^{1,2}, Liu Shengyong^{1,2}, Zhang Pin^{1,2}, Yuan Fang^{1,2}, Lu Jie^{1,2}, Liu Tingting¹

(1. Henan Province Collaborative Innovation Center of Biomass Energy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Key Laboratory of New Materials and Facilities for Rural Renewable Energy of Ministry of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The thermogravimetry-differential thermogravimetry (TG-DTG) technique is used to carry out thermogravimetric analysis of the scattered, baled and forming three combustion methods of corn stalk. The index of combustion characteristics of the baled fuel is obtained through calculation and analysis, and compared with the scattered burning and forming combustion. The test results show that baled, scattered and forming combustion processes experience four stages of water evaporation, volatile matter release, fixed carbon combustion and burnout. The heat transfer and mass transfer of baled corn stalk are obstructed due to its large size, the release peak time of its volatile matter is lagged behind, the volatile matter of baled fuel is not easy to release, but the release of the volatile matter is more stable and lasts longer. There is a more significant peak point in the combustion of fixed carbon in the late stage of baled fuel combustion; the results of thermogravimetric experiment are verified by the self - designed test platform for baled combustion, which provides the similar results. Finally, the combustion characteristics of the baled fuel are combined with the design of the biomass boiler air supply system, and the segmented air supply is adopted, a new design idea of air supply system for boiler is proposed.

Keywords: bale; combustion; reaction kinetics; segmented air supply