

打捆秸秆的燃烧特性和影响因素分析

张 品^{1,2}, 刘圣勇^{1,2}, 王 炯^{1,2}

(1. 河南农业大学农业部可再生能源开放实验室, 郑州 450002; 2. 生物质能源河南省协同创新中心, 郑州 450002)

摘 要: 利用自主设计的实验台研究生物质秸秆打捆燃料的燃烧特性和影响因素。实验结果表明: 生物质秸秆打捆燃料的燃烧是由外向内进行的, 燃烧过程经历水分蒸发、热解、燃烧和燃尽4个阶段; 当给风量为 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 玉米秸秆打捆燃料着火锋面向下传播的速度比向上传播的速度快, 内层传播的速度比外层传播的速度快, 燃烧完全所需的时间较长; 随着风量的增加, 在给风量为 90 、 $110 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下, 着火锋面向上传播的速度超过向下传播的速度, 外层传播的速度超过内层传播的速度, 着火锋面温度随着风量的增加而增大; 继续增大风量, 当给风量为 $130 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 燃烧完全所需的时间最短, 但着火锋面温度峰值有所下降; 同在给风量 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 下, 小麦秸秆打捆燃料由于内部较松散, 其向上、向下、内层着火锋面传播速率和着火锋面温度均高于玉米秸秆打捆燃料。

关键词: 生物质; 秸秆; 燃烧; 锅炉

中图分类号: S216.2

文献标识码: A

0 引 言

随着社会经济的发展, 中国农村居民用能正在发生变化, 农作物秸秆废弃物或常年堆积在农田中, 或就地焚烧, 这样既占用农田又污染环境, 造成了极大的浪费和污染, 尤其是大中城市周围和主要交通干线附近, 秸秆焚烧造成的大气污染不仅对人体健康造成危害, 而且对交通安全构成潜在威胁^[1]。大力开发生物质资源, 加大秸秆综合利用度, 不仅能在一定程度上缓解能源短缺的压力, 而且可减少使用煤、石油等不可再生资源对生态环境保护的负面影响。秸秆燃烧技术利用经济方便、适应性强, 按照秸秆的形态可分为直接散烧、成型燃料燃烧和打捆燃烧。直接散烧时秸秆堆积密度只有 $20\sim 40 \text{ kg}/\text{m}^3$, 不方便运输和存储, 单位体积热能低, 燃烧时费时费力; 成型燃料燃烧是把秸秆粉碎挤压成型后再进行燃烧, 成型燃料密度可达 $800\sim 1100 \text{ kg}/\text{m}^3$, 单位体积的热能虽大, 但在成型燃料生产过程耗费的电力资源为 $90\sim 120 \text{ kWh}/\text{t}$, 生产效率只有 $100\sim 200 \text{ kg}/\text{h}$, 再加上成型机器的维护维修费用, 使成型燃料成本过高。秸秆打捆燃烧技术因其对秸秆的

加工处理简单方便、密度适中 ($80\sim 500 \text{ kg}/\text{m}^3$)、耗能低 ($30 \text{ kWh}/\text{t}$), 形状规整, 能整齐堆积或摞起, 便于运输和存储, 摒弃了直接散烧和成型燃料燃烧的不足, 成为主要发展方向^[2]。丹麦早在 20 世纪 70 年代就已开始燃用整捆秸秆, 经过多年的改造优化, 各类高效率低 CO 排放浓度的生物质锅炉迅速发展起来^[3]。美国、日本等国的生物质捆烧技术也已形成产品系列化, 并得到推广应用^[4]。国外对生物质的层燃燃烧特性有大量研究, 通过小型单元炉对生物质自然堆积进行燃烧实验, 如丹麦的 Vander Lans 等^[5]研究了稻草的燃烧特性, 英国的 Yang 等^[6-8]对水稻、木材等生物质的燃烧特性进行了研究; 立陶宛的 Kavaliauskas 等^[9]对水稻进行处理, 分别对粉碎稻秆、原稻秆和颗粒状的稻秆进行了燃烧实验研究, 但对整捆秸秆燃烧特性的研究很少; 丹麦燃烧研究所的 Bech 等^[10]对 Cigar 燃烧器中的秸秆捆表面燃烧的状态进行了研究; 国内燃烧生物质秸秆打捆燃料的设备较少, 河南农业大学的刘圣勇^[11]于 2010 年设计制造生物质捆烧锅炉, 热效率达 73.13%, 整捆秸秆的燃烧特性更是鲜有研究。本文采用自主设计的实验台对玉米和小麦 2 种打捆秸

收稿日期: 2016-09-08

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503135); 河南省科技创新杰出人才计划(144200510015); 郑州市科技创新团队(131PCXTD588); 河南省基础与前沿技术研究计划(162300410158)

通信作者: 刘圣勇(1964—), 男, 博士、教授, 主要从事生物质能转化利用方面的研究。liushy@vip.sina.com

秆进行燃烧特性和影响因素的分析研究,以期为我国设计秸秆打捆燃料燃烧设备提供理论依据。

1 原理

实验台主要依据秸秆打捆燃料的特性和相关的锅炉设计参数设计而成^[12],该设备可模拟出生物质秸秆打捆燃料在燃烧设备中整捆燃烧的实际燃烧过程,可自主调节燃烧时的不同工况(如不同的过量空气系数等),并能实时监测燃料在各种工况下质量变化规律。本实验秸秆打捆燃料从下部点燃,空气从炉排下方通入,秸秆打捆燃料与空气中的氧气反应,着火与燃烧锋面不断向内部推进,燃料燃烧后变成的灰由清灰口排出。

表1 秸秆打捆燃料样品的元素分析和工业分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of straw bales

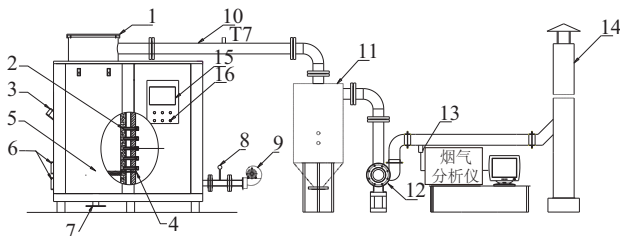
样品	元素分析/%					工业分析/%				发热量
	[C] _{ad}	[H] _{ad}	[N] _{ad}	[S] _{ad}	[O] _{ad}	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	F _{cad}	Q _{net,ad} /kJ·kg ⁻¹
玉米秸秆	42.57	3.82	0.73	0.12	37.86	8.00	6.90	70.70	14.40	15658
小麦秸秆	40.68	5.91	0.65	0.18	35.05	7.13	10.40	63.90	18.57	15740

2.2 实验装置和方法

图1a为自主设计的秸秆打捆燃料燃烧实验台系统,整套系统包括炉体、称重系统、温度测量系统和烟气成分测量系统4部分。图1b为实验台的炉体部分,试验将小麦秸秆和玉米秸秆打捆燃料整捆放进燃烧室内进行燃烧。图2为秸秆打捆燃烧实验台实物及实验台内部实物装置图。

2.2.1 实验台炉体

燃烧室是内径为600 mm的竖直圆筒形,使用厚度为5 mm的0Cr25Ni20Ti钢制成,燃烧室高度1000 mm,内衬有50 mm的高温耐火砖,外层包有厚度为50 mm的石棉保温材料,炉排采用直径为600 mm

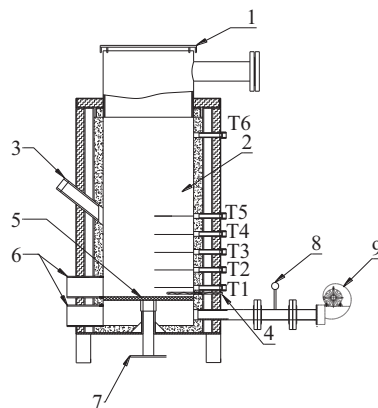


a. 秸秆打捆燃料燃烧实验台系统图

2 实验

2.1 实验原料

实验中选用2种小方捆秸秆打捆燃料,横截面积为36 cm×46 cm的小麦秸秆捆和玉米秸秆捆,小麦秸秆直接捡拾打捆,密度约为80 kg/m³,玉米秸秆先粉碎再打捆,密度约为100 kg/m³。分别参照《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012)、《国家标准煤的元素分析方法》(GB 476—91)和《生物质燃料发热量测量方法》(GB 5186—05),对这2种秸秆打捆燃料的工业分析、元素分析和发热量进行测定,测定结果如表1所示。



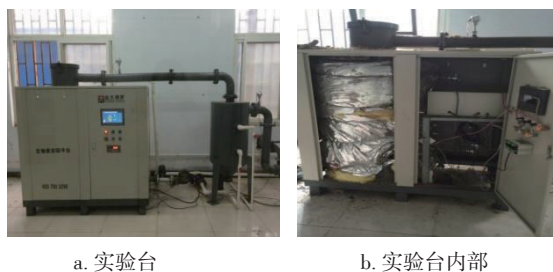
b. 实验台炉体示意图

1. 进料口 2. 燃烧室 3. 观察孔 4. 电加热棒 5. 炉排
6. 清灰口 7. 称重计 8. 空气流量计 9. 鼓风机
10. 排烟管 11. 除尘器 12. 引风机 13. 烟气取样口
14. 烟窗 15. 触屏显示屏 16. 控制开关 T1~T7. 热电偶

图1 秸秆打捆燃料燃烧实验台系统及炉体示意图

Fig. 1 Schematic of combustion test rig for straw bales and furnace

的圆形炉排,由普通钢制成,炉排上有86个通风孔。实验采用电加热棒点燃燃料,电加热棒位于燃料下方炉排上方,燃料被点燃后关闭加热棒。



a. 实验台

b. 实验台内部

图2 实验台现场图片

Fig. 2 Photo of experimental rig

2.2.2 称重系统

炉排与实验台下方的电子天平通过一顶杆连接,在燃烧过程中,秸秆打捆燃料的质量变化能在电子天平上显示。

2.2.3 温度测量系统

在柱形炉体上,沿炉排向上布置 6 个热电偶 ($T_1 \sim T_6$),热电偶 T_6 位于燃烧室上端,用来测量燃烧室炉膛温度,热电偶 T_1 距炉排最近(约 50 mm),热电偶 $T_2 \sim T_5$ 距炉排的距离分别为 150、250、350、450 mm,热电偶 $T_1 \sim T_5$ 可伸缩,能插入生物质打捆燃料内部,测量燃料内部不同位置不同燃烧阶段的温度,热电偶 T_7 位于排烟管上,用于测量烟气温度,热电偶信号经转换模块接入数字采集仪,数字采集仪采集的数据在显示屏显示。

2.2.4 烟气成分测量系统

烟气取样口布置在排烟管道上,烟气经水浴除尘器,进入 QUINTOX-KM9106 综合烟气分析仪,烟气分析测量仪在线测量 O_2 、 CO_2 和 CO 的体积分数,测量精度为 $\pm 5\%$ 。

2.2.5 风机和变频系统

实验中采用鼓风机送风,同时在烟道出口通过引风机引出烟气,采用变频器控制给风量和引风量,以便实现不同的风量和配比方式。

2.3 实验结果分析

2.3.1 燃烧过程中的温度变化

图 3 所示为玉米打捆秸秆在一次风温 28°C 、一次风流量 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,从下点燃燃烧过程中的燃烧温度与时间关系曲线图。炉排上的玉米秸秆打捆燃料高度约为 450 mm。图 3 中给出的是插入打捆燃料内部的 5 个固定高度位置所测量出的温度 $T_1 \sim T_5$ 以及燃烧室炉膛温度 T_6 ,其中热电偶 $T_1 \sim T_4$ 插入到打捆燃料内部的中心线上, T_5 位于燃

料在上表面的中心位置。

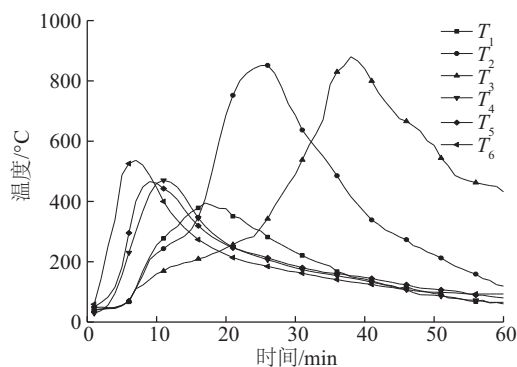


图3 玉米秸秆打捆燃料燃烧过程不同高度温度随时间的变化图

Fig. 3 Temperature versus time at different

height from grate during combustion of corn straw bales

从图 3 可看出,打捆燃料的燃烧过程是由外向内进行,由于打捆燃料体积较大,外表面与空气充分接触,打捆秸秆着火后,燃料表面可燃物迅速被引燃,大量挥发分析出,挥发分在短时间内迅速燃烧,放热量剧增,燃烧室内温度 T_6 迅速升高并达到峰值。外层燃料先着火燃烧,秸秆打捆燃料上表面温度 T_5 最先上升,挥发分以及焦炭的燃烧所产生的热量不断向中心传递,着火锋面从外表面向内传递,由于一次风的作用,下层的挥发分有部分在上层燃烧,距炉排 350 mm 处的 T_4 开始上升并达到最大值,而离炉排较近(50 mm 处)的 T_1 由于一次风的冷却作用,上升较慢,峰值温度也不高。当着火锋面到达热电偶 $T_1 \sim T_5$ 位置时, $T_1 \sim T_5$ 达到最大值之后着火锋面向内传递, $T_1 \sim T_5$ 所测温度随后缓慢降低。产生这种现象的原因是:燃烧锋面通过后,热电偶附近燃料燃烧反应速度降低,产热量减少;温度低的炉壁从炉膛内部吸热;与中心燃料进行热交换,致使温度降低^[5]。燃烧锋面继续向中心传递,距炉排 150 mm 处的 T_2 和 250 mm 处的 T_3 开始上升,达到峰值后缓慢下降。

通过图 4 可见,秸秆打捆燃料燃烧过程经历水分蒸发、热解、燃烧和燃尽 4 个阶段。第 1 个过程是干燥过程,秸秆打捆燃料被点燃后,燃料表面可燃物迅速着火燃烧,进行可燃气体和 O_2 的放热化学反应,产生的热量不断向内层传递,当温度接近 100°C 时打捆秸秆中的水分开始蒸发,从高温区域传递到低温区域的热量被用来供给

水分蒸发所需的热量,燃料中的水分在 100 ℃等值线处干燥完毕,用时约 7 min。打捆燃料燃烧的第 2 个过程是挥发分析出过程,在打捆燃料完成干燥阶段后,温度继续升高,当干燥的打捆燃料温度上升到约 280 ℃时开始析出挥发分,此时打捆秸秆外层所传递的热量被用来提供秸秆热解析出挥发分所需要热量。处于燃料中心距炉排距离 250 mm 的 T3 位置热解开始,热解开始的温度曲线与蒸发曲线相距距离较远,说明燃料外层的热量还未传递到中心,燃料中心升温较慢,而燃料中心两端的热解开始的温度曲线与蒸发曲线相距较近,这些区域干燥物料温升非常快。

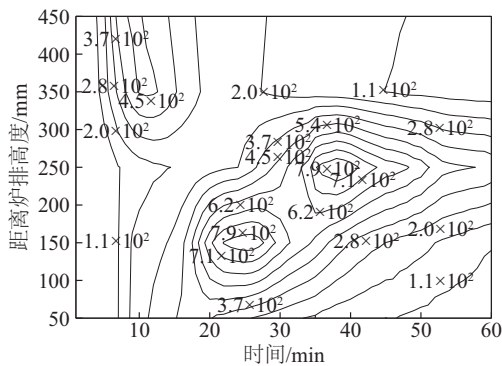


图4 玉米秸秆打捆燃料内部温度分布等值线图
Fig. 4 Temperature distribution measured inside fuel versus time

热解开始之后,温升梯度进一步加大,主要是由于大量气体挥发分析出,并迅速着火燃烧,打捆燃料燃烧的第 3 个过程是挥发分着火燃烧过程,挥发分燃烧产生的热量不断聚积,通过热传递和热辐射向燃料内部扩散,内部燃料挥发分析出,继续与 O₂ 混合燃烧,放出热量,使打捆燃料内部温度快速上升。打捆燃料燃烧的第 4 个过程是焦炭燃烧燃尽过程,剩下的焦炭被挥发分包围,炉膛中的 O₂ 接触不到焦炭表面,焦炭很难燃烧,随着挥发分的燃

烧,焦炭被加热到较高的温度,一旦与 O₂ 接触,就发生燃烧反应,等值线图上有 2 个明显的高温区,距炉排 150 mm 处的 T₂ 和 250 mm 处的 T₃ 分别在第 26 分钟和第 38 分钟达到最高温度 851.5 ℃和 880.0 ℃,这是由于在燃料燃烧后期未燃尽焦炭大量累积,焦炭在富氧状态下急速燃烧形成此处的高温区。随着焦炭的燃烧,不断产生灰分,温度开始缓慢下降。以上 4 个燃烧过程实际上是连续交叉进行的,4 个燃烧阶段相互影响^[13]。

实验假设 300 ℃为每层燃料开始着火温度,相邻 2 个热电偶之间的距离除以 2 个热电偶温度达到 300 ℃时的所用时间即为着火锋面传播速率,热电偶测量出的最高温度为该燃料层的实际着火锋面温度,实验从最下面一层燃料着火开始,当烟气中的 O₂ 浓度回到 20.5%时,燃烧过程结束。

燃料内部相邻 2 个热电偶之间的距离 ΔL 为:

$$\Delta L = L_1 - L_2 \tag{1}$$

式中, L ——热电偶距离炉排的距离, mm。

相邻 2 个热电偶温度达到 300 ℃的时间间隔 $\Delta t^{300\text{℃}}$ 为:

$$\Delta t^{300\text{℃}} = t_1^{300\text{℃}} - t_2^{300\text{℃}} \tag{2}$$

式中, $t^{300\text{℃}}$ ——热电偶温度达到 300 ℃所用的时间, s。

着火锋面速率 v_f (mm/s):

$$v_f = \Delta L / \Delta t^{300\text{℃}} \tag{3}$$

在一次风流量 110 m³/h 的条件下,玉米打捆秸秆内部相邻热电偶达到 300 ℃所需的时间间隔以及各段内着火锋面传播速率如表 2 所示。各热电偶着火锋面温度如表 3 所示。由表 2 可知,在一次风流量 110 m³/h 条件下,着火锋面向上传播的速度比向下传播的速度快,着火锋面在外层传播速度比内层传播速度快。

表 2 相邻热电偶间达到 300 ℃所用的时间以及各段内着火锋面传播速率

Table 2 Time required when adjacent thermocouples reach 300 ℃ and propagation speed of fire frontal

速度类型	向上传播速度 v_{\uparrow}		向下传播速度 v_{\downarrow}		外层传播速度 $v_{\text{外}}$		内层传播速度 $v_{\text{内}}$	
位置	T1—T2	T2—T3	T4—T3	T5—T4	T1—T2	T5—T4	T2—T3	T4—T3
时间间隔/s	120	560	900	240	120	240	560	900
着火锋面速率/mm·s ⁻¹	0.83	0.18	0.11	0.42	0.83	0.42	0.18	0.11
平均值	0.51		0.27		0.63		0.29	

表3 各热电偶着火锋面温度

Table 3 Temperature of fire frontal under different thermo-element

热电偶位置	T1	T2	T3	T4	T5
着火锋面温度/℃	395.1	851.5	880	470.3	466

2.3.2 燃烧过程中燃料质量的变化

图5所示为玉米打捆秸秆在一次风温 18℃、一次风流量 110 m³/h 条件下,从下点燃燃烧过程中燃料质量变化的曲线图。从图5可看出,打捆燃料燃烧时,燃料质量随时间的延长不断减少。开始阶段,由于打捆燃料水分蒸发和挥发分析出,质量损失较快,这与图4玉米秸秆打捆燃料内部温度分布等值线图相吻合,到约 7 min 时燃料水分蒸发完毕,10 min 时除燃料中心大部分挥发分析出,随着燃烧的进行,挥发分析出减少,焦炭开始燃烧,失重损失越来越小。焦炭燃尽过程,质量损失更加缓慢,直至最后几乎达到一个定值,完成整个燃烧反应过程。

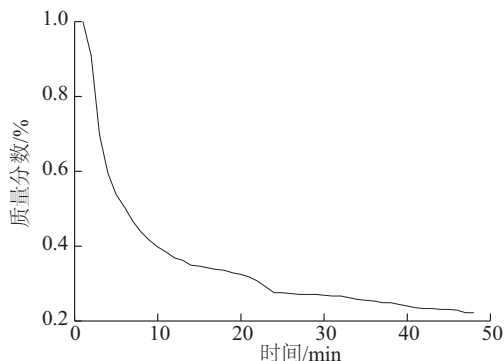


图5 质量随时间的变化

Fig. 5 Weight change along with time

2.3.3 燃烧过程中烟气的变化

图6所示为玉米打捆秸秆在一次风温 18℃、一次风流量 110 m³/h 条件下,从下点燃燃烧过程中烟气成分的变化。从图6可看出,打捆秸秆被点燃后,挥发分在短时间内迅速析出燃烧,在 7 min 时,烟气中的 O₂ 浓度快速降到约 5%,CO₂ 浓度升至约 15%,CO 浓度升至约 3%,10 min 后,CO 浓度迅速下降约 1%,CO₂ 浓度也逐渐下降,O₂ 浓度开始回升。随着焦炭燃烧反应完全结束,O₂ 浓度继续上升。在 30 min 后,O₂ 浓度恢复到接近开始值(20%),在 60 min 后,O₂ 浓度恢复到开始值(20.5%),CO₂ 和 CO 浓度回到 0%,整个燃烧过程结束。

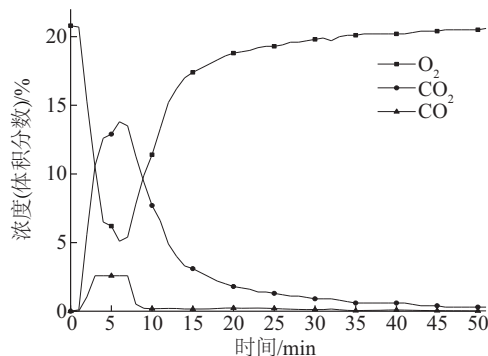


图6 烟气随时间的变化

Fig. 6 Gases change along with time

2.3.4 一次风风量对秸秆打捆燃料燃烧特性的影响

给风量对秸秆打捆燃料的燃烧速率、燃尽时间、炉膛温度和着火锋面温度等燃烧特性有重要影响。本实验采用 4 种给风量(70、90、110、130 m³/h),分析不同风量在着火锋面传播过程、挥发分析出燃烧及焦炭燃烧过程中的影响。图7为玉米打捆秸秆在 4 种风量条件下燃烧过程中内部温度、质量时间曲线。图8为小麦打捆秸秆在 4 种风量条件下燃烧过程中燃料内部温度、质量时间曲线。由图7可看出,在 4 种不同风量条件下,燃料内部温度的分布曲线形状相似,燃烧过程所需时间却有很大差异,这是因为不同的给风量导致着火锋面传播速率变化。图8为不同风量下玉米打捆秸秆内部温度 T₃ 的变化情况。当一次风风量为 70 m³/h 时,T₃ 上升缓慢,69 min 时温度达到峰值 394℃;当一次风风量为 90 m³/h 时,T₃ 在 45 min 时达到峰值 625.6℃;当一次风风量增加到 110 m³/h 时,T₃ 达到峰值的时间进一步缩短,且温度升至 880℃;当一次风加大到 130 m³/h 时,T₃ 温度达到峰值的时间缩至 20 min,但峰值温度有所下降。给风量越大,燃料燃烧完全所用的时间越短。玉米秸秆打捆燃料在低给风量 70 m³/h 时,供氧量不足,靠近炉排处的 T1 位置最先供氧,并且燃料是从下方开始点燃,使其温度较高,高温燃料在富氧条件下迅速燃烧,T₁ 最先升温达到峰值,热量逐渐向上传递,由于大部分 O₂ 已被底层的燃料用掉,上层燃料在 O₂ 不足条件下燃烧,燃烧速度降低,T₃ 升温缓慢,着火锋面温度未达到 300℃,整体燃烧温度偏低,燃尽过程长,燃

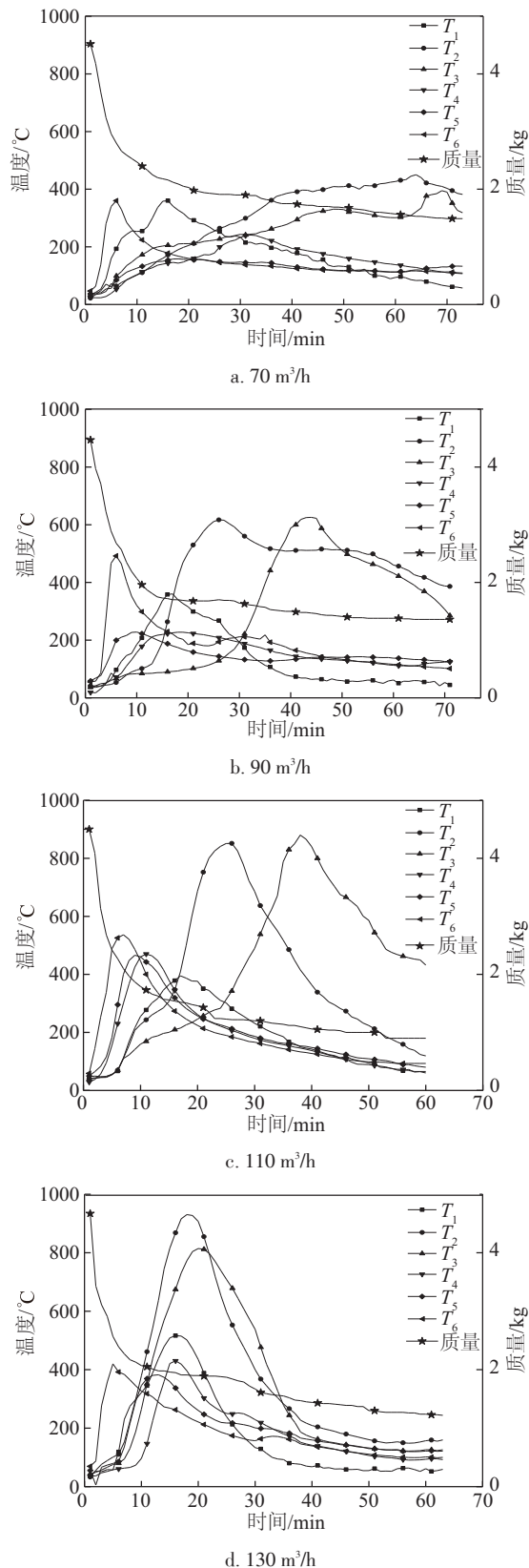


图7 不同风量下玉米秸秆打捆燃料温度、质量时间曲线
Fig. 7 Temperature and weight versus time during combustion of corn straw bales under different flow rate

料中心温度下降缓慢, T_2 和 T_3 能保持较长时间的高温; 玉米秸秆打捆燃料在高给风量 $130 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, $T_1 \sim T_5$ 几乎同时达到着火峰值温度, 燃烧锋面传播速度快, 燃烧完全所用的时间缩短, 在燃烧后期燃尽阶段, 由于高给风量的冷却作用, 产生的热量被很快带走, 燃料温度下降较快。

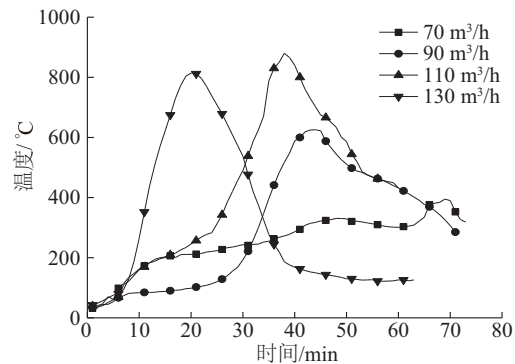


图8 玉米打捆秸秆内部温度 T_3 在不同风量下的变化
Fig. 8 Changes of T_3 in corn straw bales under different flow rate

小麦秸秆打捆燃料类似于玉米打捆燃料, 如图9、图10所示。从图9可看出, 随着给风量的增加, 小麦秸秆打捆燃料着火锋面传播速度加快, 燃烧完全所用的时间缩短, 但高给风量的冷却作用会带走热量, 所以着火锋面温度 $T_1 \sim T_5$ 有所降低。从图10可看出, 小麦打捆秸秆内部温度 T_3 随着一次风风量的增大达到峰值的时间不断缩短, 而当一次风风量为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, T_3 峰值最大, 可见小麦秸秆打捆燃料更适合在低给风量条件下燃烧。

图11是根据公式计算得到的玉米秸秆打捆燃料着火锋面向上、向下、外层、内层平均传播速率的关系。图12是着火锋面温度与给风量之间的关系。由图11可看出, 随着给风量的增大, 各着火锋面传播速率也增大, 这是由于给风量的增大提高了 O_2 浓度, 使析出的挥发分更充分燃烧, 释放更多的热量, 加快了中心燃料的干燥速率和热解速率, 从而相应增大了着火锋面传播速率。当给风量为 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 玉米秸秆打捆燃料着火锋面向下传播的速度比向上传播的速度快, 内层传播的速度比外层传播的速度快。给风量为 90 、 110 、 $130 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 情况正好相反, 这是由于给风是从炉排下方供入, 靠近炉排的燃料 O_2 越充足, 着火锋面向上传递的速度越快, 当给风量不足时, 燃料燃烧速度慢、时间长,

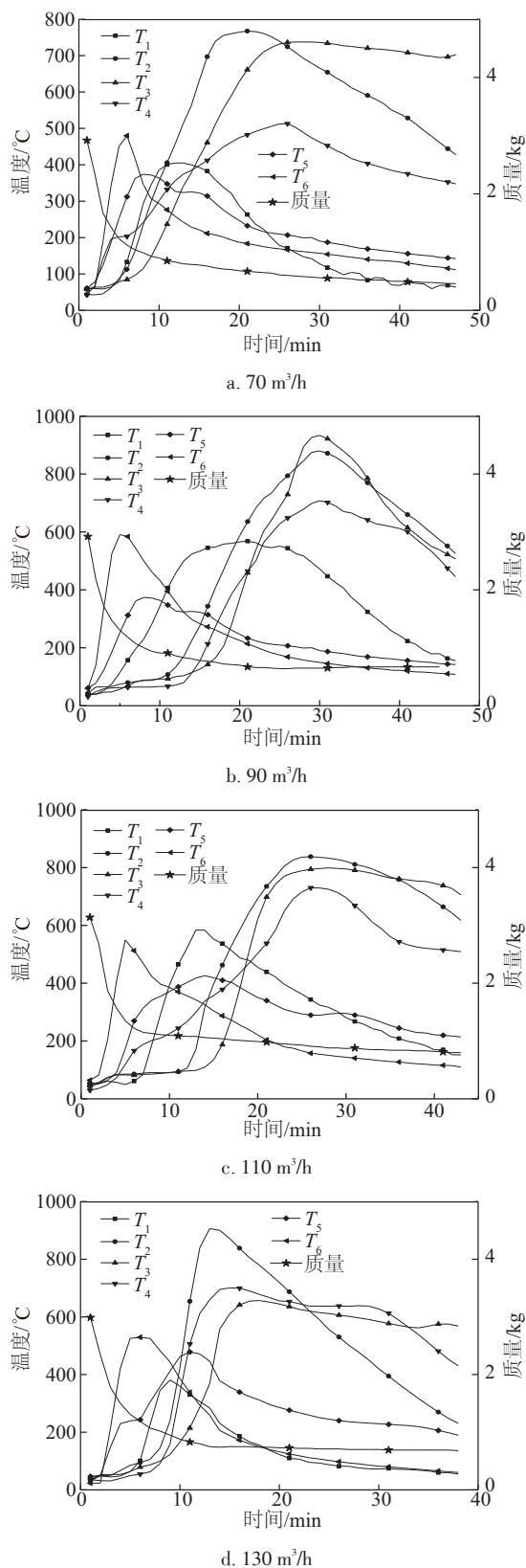


图9 不同风量下小麦秸秆打捆燃料温度、质量时间曲线

Fig. 9 Temperature and weight versus time during combustion of wheat straw bales under different flow rate

外层燃料燃烧不断向内层燃料传递热量,内层燃料逐渐析出水分和挥发分,做好燃烧准备,一旦着火立即燃烧,所以当给风量为 70 m³/h 时,出现内层传播的速度比外层传播的速度快的现象。从图 12 可看出,给风量为 130 m³/h 时,除 T2 外其他热电偶测得的温度均有所下降,这是由于过剩的空气以对流的形式带走了一部分热量,从而导致锋面温度峰值的减小。

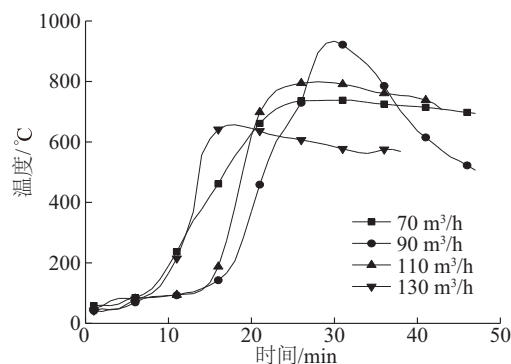
图 10 小麦打捆秸秆内部温度 T_3 在不同风量下的变化

Fig. 10 Changes of T_3 in wheat straw bales under different flow rate

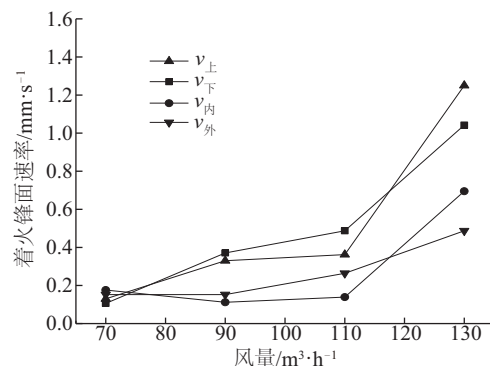


图 11 风量与着火锋面传播速率的关系

Fig. 11 Influence of air flow on propagation speed of fire frontal

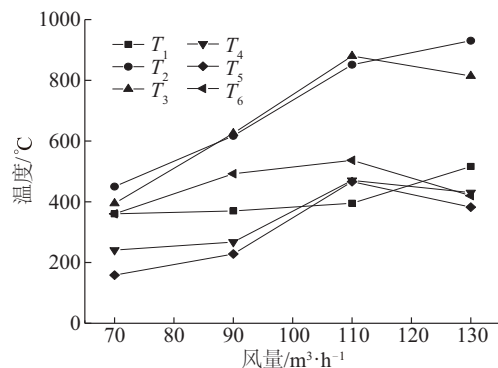


图 12 风量和着火锋面温度的关系

Fig. 12 Influence of air flow on temperature of fire frontal

2.3.5 燃料种类对打捆燃烧的影响

分别采用小麦秸秆打捆燃料和玉米秸秆打捆燃料进行燃烧实验,分析不同种类的打捆燃料在燃烧过程中的燃烧情况。图 13 为玉米和小麦秸秆打捆燃料在 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 的给风量下的着火锋面传播速率对比图。图 14 为 2 种燃料在 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 的给风量下的着火锋面温度的对比图。

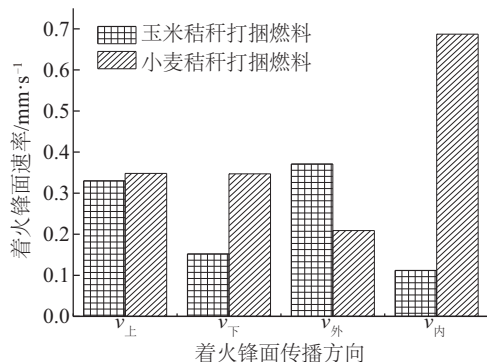


图 13 着火锋面传播速率

Fig. 13 Propagation speed of fire frontal

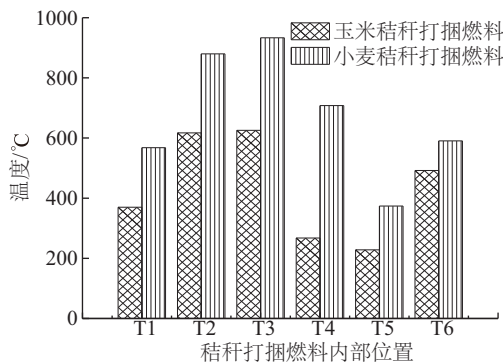


图 14 着火锋面温度

Fig. 14 Temperature of fire frontal

由图 13 可看出,小麦秸秆打捆燃料向上、向下、内层燃烧的平均速度均比玉米秸秆打捆燃料燃烧的速度快,这是由于小麦秸秆打捆燃料比玉米秸秆打捆燃料的密度低,小麦秸秆打捆燃料内部较松散,松散的内部更易于热量传递^[9]。这可能跟打捆方式不同有关,玉米秸秆在打捆前需进行粉碎,粉碎的秸秆挤压打捆后孔隙率较小,而小麦秸秆是直接打捆,秸秆之间互相缠绕,易造成较大的孔隙率,较大的孔隙率使燃料内部的 O_2 分布较均匀,从而加速了着火过程;小麦秸秆打捆燃料外层燃烧的平均速度比玉米秸秆打捆燃料燃烧的速度慢,这是由于玉米秸秆的高挥发分使玉米秸秆的着火性能有

所改善。由图 14 看出,小麦秸秆打捆燃料的各着火锋面温度均比玉米秸秆高,虽然玉米秸秆打捆燃料挥发分含量较高,提高了燃料的着火性能,但小麦秸秆打捆燃料内部松散、孔隙率较高,导致小麦打捆秸秆向上、向下、内层着火锋面传播速率和着火锋面温度均高于玉米秸秆打捆燃料。

3 结 论

1) 秸秆打捆燃料被点燃后,表面可燃物迅速被引燃,由外向内进行燃烧,其燃烧过程分为 4 个阶段:①预热干燥阶段,此阶段燃料的内部水分被蒸发出来;②热分解阶段,燃料在这个阶段发生热解,析出挥发分;③挥发分燃烧阶段,析出的挥发分与 O_2 反应进行燃烧;④焦炭燃烧和燃尽阶段。

2) 不同给风量条件下,秸秆打捆燃料内部的温度曲线形状相似,燃烧完全所需的时间不同,对于玉米秸秆打捆燃料来说,着火锋面传播速率随给风量的增大而增大,当给风量为 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,玉米秸秆打捆燃料着火锋面向下传播的速度比向上传播的速度快,内层传播的速度比外层传播的速度快,燃烧完全所需的时间较长。随着风量的增大,在给风量为 90 、 $110 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,火锋面向上传播的速度超过向上传播的速度,外层传播的速度超过内层传播的速度,着火锋面温度随风量的增大而升高,继续增大风量,当给风量为 $130 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,燃烧完全所需的时间最短,但着火锋面温度峰值有所减小。

3) 2 种不同种类的秸秆打捆燃料,同在 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 风量下,挥发分含量较少、内部较为松散的小麦秸秆打捆燃料向上、向下、内层燃烧的平均速度比玉米秸秆打捆燃料燃烧的速度快,各着火锋面温度也比玉米秸秆高,小麦秸秆打捆燃料内部松散,较高的孔隙率加速了着火过程。

[参考文献]

- [1] 田跃辉. 秸秆焚烧的危害与其综合利用[J]. 农村实用科技信息, 2013, (7): 54—54.
- [1] Tian Yuehui. The harm and comprehensive utilization of straw burning[J]. Rural Practical Scientific Information, 2013, (7): 54—54.
- [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] Kristensen E F, Kristensen J K. Development and test of small- scale batch- fired straw boilers in Denmark [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 26(6): 561—569.
- [4] Repic B, Dakic D, Djurovic D, et al. Development of a boiler for large straw bales combustion, paths to sustainable energy[M]. Croatia: In Tech Europe, 2010.
- [5] Van der lans R P, Pedersen L T, Jesen A, et al. Modelling and experiments of straw combustion in a grate furnace[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 19(3): 199—208.
- [6] Yang Y B, Sharifi V N, Swithenbank J. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviors of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds[J]. Fuel, 2004, 83(11): 1553—1562.
- [7] Yang Y B, Ryu C, Khor A, et al. Fuel size effect on pinewood combustion in a packed bed[J]. Fuel, 2005, 84(16): 2026—2038.
- [8] 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(8): 1039—1046.
- [9] Kavaliauskas A. Straw combustion in a packed bed[D]. Lithuanian: Lithuanian Energy Institute, 2004.
- [10] Bech N, Wolff L, Germann L. Mathematical modeling of straw bale combustion in cigar burners[J]. Energy & Fuels, 1996, 10(2): 276—283.
- [11] 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.
- [11] Liu Shengyong, Bai Bing, Liu Xiaoer, et al. Design and study of biomass bales combustion boiler [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(12): 1527—1531.
- [12] 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—266.
- [12] Liu Enhai, Liu Shengyong, Bai Bing, et al. Development of dynamic model of cornstalk bale combustion [J]. Transactions o the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24): 218—266.
- [13] 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
- [13] Su Chaojie. Study on microstructure and combustion mechanism of biomass briquettes combustion [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2007.

ANALYSIS OF COMBUSTION CHARACTERISTICS AND INFLUENCE FACTORS OF BALED STALK

Zhang Pin^{1,2}, Liu Shengyong^{1,2}, Wang Jiong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Renewable Energy of Ministry of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Henan Province Collaborative Innovation Center of Biomass Energy, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The research on combustion characteristics and influential factors of baled biomass straw fuel was conducted by applying an independently designed test bench. The results show that the burning of baled biomass straw fuel is carried out from the outside to the inside, the combustion process passes through four stages: water evaporation, pyrolysis, combustion and burnout. When the air supply is 70 m³/h, the fire front face of the baled corn stalk fuel spreads faster toward the lower side than the upward propagation, the inner layer propagates faster than the outer layer, and the burnout takes longer time. With the increase of air supply, such as 90, 110 m³/h, the upward propagation speed of the fire front face exceeds the downward propagation speed, the propagation speed of the outer layer is faster than that of the inner layer, and the temperature of the fire front face increases as the air supply increases. When the air supply continues to increase, the air supply is 130 m³/h, and the time required for burnout is the shortest, but the peak temperature of the fire front face decreases; Under the same air supply volume of 90 m³/h, as the inner part of the baled wheat straw fuel is looser, and its upward, downward and inner layer fire front face propagation speed and the temperature of fire front face are higher than the baled corn stalk fuel.

Keywords: biomass; stalk; combustion; boiler