

不同比例小麦秸秆与烟煤混燃特性研究

马秋林 杨振东 韩鲁佳 黄光群

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 以小麦秸秆和烟煤为研究对象, 基于同步热分析技术, 研究了小麦秸秆掺混质量分数为 100%、60%、40%、20%、10% 和 0 的动态燃烧特性, 并优化了小麦秸秆与烟煤的掺混比例。研究表明, 烟煤燃料比远大于小麦秸秆, 说明烟煤更利于燃烧。从灰分特性分析, 混燃有利于降低秸秆积灰和结渣风险。从混燃的燃烧速率 (DTG) 曲线可以看出, 随着小麦秸秆质量分数降低, 挥发分阶段燃烧速率由 20.79%/min 逐渐降低为 2.08%/min。小麦秸秆固定碳燃烧阶段最大速率 (40.33%/min) 出现在 419℃。由于烟煤质量比例的增加, 混合燃料热稳定性提高, 固定碳燃烧阶段逐渐向高温方向移动至 525℃, 并在过渡阶段出现 2 个燃烧峰。着火温度随着秸秆添加比例的降低逐渐升高, 秸秆质量分数大于 20% 的着火温度区间为 260~268℃, 此时着火性能相比小麦秸秆并无显著下降。随着秸秆比例降低, 燃尽温度则由 520℃ 缓慢上升至 596℃。从综合燃烧特征指数 (S_N) 分析, 在秸秆质量分数不小于 40% 时, S_N 大于 $3.60 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$, 此时混燃组合可保证较好的燃烧特性。由差时扫描量热 (DSC) 数据分析可知, 小麦秸秆质量分数为 40% 时, 整体放热量为单独烟煤的 84.14%。在提高整体放热量并保证较好燃烧特性的原则下, 与烟煤掺混的小麦秸秆添加 40% 为较优比例。

关键词: 小麦秸秆; 烟煤; 混燃; 比例优化

中图分类号: S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0306-06

Co-combustion Characteristics of Bituminous Coal Blended with Wheat Straw of Different Ratios

MA Qiulin YANG Zhendong HAN Lujia HUANG Guangqun

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking rape straw and anthracite and bituminous coal as the research object, based on the simultaneous thermogravimetric technology, the dynamic characteristics of co-combustion were studied systematically with different mass fractions of wheat straw (100%, 60%, 40%, 20%, 10% and 0) and the ratio was optimized. The results showed that WS was rich in volatile matter with a content of 75.69%, while bituminous coal had the highest fixed carbon content (54.77%). Therefore, the fuel ratio (fixed carbon/volatile) of BTC (1.67) was much larger than that of WS (0.14), indicating that bituminous coal was more conducive to combustion. There was significant difference on co-combustion characteristics under different mass fractions from TG and DTG curves. From DTG curves of co-combustion, it can be seen that as the proportion of wheat straw was decreased, the volatile combustion peak was gradually decreased from 20.79%/min to 2.08%/min (WS10%). The maximum rate of fixed carbon combustion of wheat straw (40.33%/min) appeared at 419℃. The ignition temperature was not significantly improved when the ratio of straw was declined to 10%, which was within 260~268℃, indicating a desirable performance of ignition. While the burn out temperature was significantly improved along with the decrease of straw from 520℃ (WS) to 596℃ (BTC). The comprehensive index (S_N) value was decreased from $8.78 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$ to $1.17 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$ as the straw ratio was decreased, indicating that the combustion performance was gradually weakened. However, the group WS40% with a S_N value of $3.60 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$ can ensure

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-18

基金项目: 教育部创新团队发展计划项目 (IRT-17R1293)

作者简介: 马秋林 (1991—), 女, 博士生, 主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: MqL2014@cau.edu.cn

通信作者: 黄光群 (1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: huangqq@cau.edu.cn

better combustion behavior. From DSC analysis, mixture with 40% proportion of WS can release heat up to 84.14% of BTC's. In summary, based on the evaluation of combustion performance and improving heating value of mixture, the mass fraction of 40% was recommended for wheat straw when blended with bituminous coal for co-combustion.

Key words: wheat straw; bituminous coal; co-combustion; optimal proportion

0 引言

基于环境和能源的双重压力,以及生物质和煤单独利用过程中存在的问题,生物质与煤混燃成为发展趋势^[1-3]。混燃技术既能降低 CO₂ 的排放、缓解能源紧缺,而且也符合国家“十三五”规划对环保的发展要求^[4]。从经济效益方面分析,以年消耗秸秆 1.294 5 × 10⁵ t 规模的混燃热电联产计算,年发电量 1.44 × 10⁸ kW·h,年供热量 4.32 × 10⁵ GJ,年节约标准煤 6.877 × 10⁴ t,具有较好的经济效益^[5]。

据 2017 年国家统计局数据,小麦产量为 1.297 7 × 10⁸ t^[6],由小麦草谷比^[7]折算小麦秸秆当年产量约为 1.772 6 × 10⁸ t。我国农作物秸秆资源的综合利用方式大致为工业原料、畜牧饲料、造肥还田和能源利用^[8]。在燃煤锅炉中添加生物质(如秸秆),能够减少 CO₂、SO₂、NO_x 及其他有害气体的排放^[9]。在已有小麦秸秆与煤混燃的研究中,HCl、SO₂、CO₂ 和 NO_x 排放与挥发分及固定碳燃烧阶段相关联^[10]。

已有文献研究发酵残渣与煤混合燃烧的比例(发酵残渣与煤质量比)为 1/6、1/3、1/2、2/3 和 5/6。结果表明,比例为 2/3 的样品表现出很低的燃尽温度和较好的燃烧特性指数^[11]。然而,秸秆生物质物理化学特性与煤存在显著差异,比如生物质一般热值较低,且存在引起结渣的矿质元素等^[12],导致其利用受到限制。为了通过混燃来高效、环保利用秸秆等生物质能源,应系统进行燃料热特性等相关研究,为小麦秸秆探索更加高效、环保的利用方式。

本文以小麦秸秆和烟煤为研究对象,基于同步热分析技术,研究小麦秸秆在不同掺混比例下与烟煤混燃的燃烧特性,并优化最优比例,以期小麦秸秆环境友好型高效能源化利用提供方法学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与制备方法

所选小麦秸秆样品采集自河北省邯郸市。烟煤产自陕西省神木县。所选小麦秸秆样品参照美国试验材料学会(American Society for Testing Material, ASTM)相关标准方法,经 105℃ 干燥 12 h 后,粉碎并过 20 目筛获得粉末状样品。烟煤样品经粉碎过 60 目筛。所得样品一部分用于工业分析、元素分

析、灰分分析和燃烧试验,一部分备用。

影响秸秆与煤混合燃烧的重要影响因素是混合比例^[10]。本文中小麦秸秆与烟煤掺混比例(小麦秸秆与烟煤质量比)及样品编号分别为:小麦秸秆(WS);60% 小麦秸秆 + 40% 烟煤(WS60%);40% 小麦秸秆 + 60% 烟煤(WS40%);20% 小麦秸秆 + 80% 烟煤(WS20%);10% 小麦秸秆 + 90% 烟煤(WS10%);烟煤(BTC)。

1.2 基础特性测定方法

小麦秸秆以及烟煤工业组成的水分、挥发分以及灰分含量根据标准 ASTM Method D5373 & D4239 测定,固定碳含量由差减法得出。元素分析根据欧盟标准 BS EN 15104:2011 采用 Vario Macro 元素分析仪(德国 Elementar Analysensysteme 公司)测定。采用干法灰化法测定样品中的碱金属以及其他无机元素含量,秸秆样品置于 575℃ 马弗炉中灰化 4 h,而烟煤灰化温度为 815℃。灰化样品化学成分分析采用 ARL DVAN'XP+ 型 X 射线荧光光谱仪(美国 Thermo 公司)测定。

1.3 燃烧试验

采用 SDTQ600 型同步热分析仪(美国 TA 公司)测定分析供试样品热失重和吸放热特性。称取 10 mg 样品置于热天平支架的氧化铝坩埚内,用氮气和氧气的合成气体模拟空气氛围,以恒定升温速率 20℃/min 由室温(20℃)升温至 1 000℃,气流速率为 100 mL/min。得到 3 条曲线: TG 曲线表现样品质量随温度的变化; DTG 曲线表现样品失重速率随温度的变化(即 TG 曲线的一阶导数曲线); DSC 曲线表现样品燃烧过程中的热量变化。

1.4 数据处理方法

将同步热分析仪获取数据导出,运用 Origin 8.6 (美国 OriginLab 公司)软件绘制燃烧特性曲线。燃烧过程的部分特征参数由 TA Universal Analysis 2000 (美国 TA 公司)软件分析得到,其他参数在 Excel 2010 (美国 Microsoft 公司)表格中计算。

2 结果与讨论

2.1 基础特性分析

2.1.1 工业和元素分析

小麦秸秆与烟煤样品的基础特性如表 1 所示。

表1 样品的基础特性

Tab.1 Basic properties of samples used

| 参数 | 小麦秸秆 | 烟煤 |
|---------------|--------------|--------------|
| 干基含水率/% | 5.13 ± 0.65 | 2.71 ± 0.01 |
| 挥发分质量分数(干基)/% | 75.69 ± 0.55 | 32.86 ± 0.01 |
| 灰分质量分数(干基)/% | 8.41 ± 0.21 | 9.66 ± 0.02 |
| 固定碳质量分数/% | 10.77 ± 1.41 | 54.77 ± 0.03 |
| 燃料比 | 0.14 | 1.67 |
| C质量分数(干基)/% | 43.80 ± 0.14 | 76.98 ± 0.60 |
| H质量分数(干基)/% | 3.60 ± 0.04 | 4.27 ± 0.01 |
| N质量分数(干基)/% | 0.87 ± 0.04 | 1.08 ± 0.01 |
| S质量分数(干基)/% | 0.33 ± 0.05 | 0.48 ± 0.02 |
| O质量分数(干基)/% | 42.99 ± 0.54 | 7.53 ± 0.64 |
| 氢碳比 | 0.99 | 0.67 |
| 氧碳比 | 0.74 | 0.07 |

由表1可知,小麦秸秆样品挥发分含量明显高于烟煤,但其固定碳含量是烟煤的约1/5。因而烟煤燃料比(固定碳与挥发分含量比值)远大于小麦秸秆,表明烟煤可燃成分丰富,有利于燃烧。元素组成中小麦秸秆的氢碳比与氧碳比均明显高于烟煤,由于C—C键所含能量高于C—H以及C—O^[13],因此煤能量密度较高。小麦秸秆中N及S含量均低于烟煤,因此混合燃烧有利于减少烟煤单独燃烧产生的NO_x及SO_x。

2.1.2 灰分组成分析

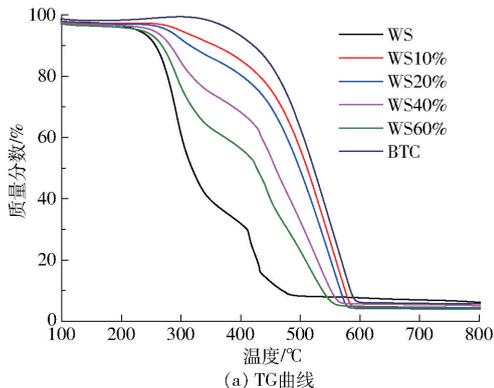
采用目前广泛应用且较为准确的预判经验参数:酸碱比($R_{b/a}$)^[14]和结渣指数(S_R)^[14]对小麦秸秆和烟煤的积灰结渣倾向性进行预判。

酸碱比计算式为

$$R_{b/a} = \frac{\varepsilon_{Fe_2O_3} + \varepsilon_{CaO} + \varepsilon_{MgO} + \varepsilon_{K_2O} + \varepsilon_{Na_2O} + \varepsilon_{P_2O_5}}{\varepsilon_{SiO_2} + \varepsilon_{Al_2O_3} + \varepsilon_{TiO_2}} \quad (1)$$

式中, ε 为下角标所表示物质的质量分数。当 $R_{b/a} < 0.5$,表明燃料的积灰可能性很低;当 $0.5 \leq R_{b/a} \leq 1$,表明燃料存在一定的积灰可能性;当 $R_{b/a} > 1$,表明燃料存在很高的积灰可能性。

结渣指数计算式为



$$S_R = \frac{100\varepsilon_{SiO_2}}{\varepsilon_{SiO_2} + \varepsilon_{Fe_2O_3} + \varepsilon_{CaO} + \varepsilon_{MgO}} \quad (2)$$

当 $S_R > 78$,表明燃料的结渣可能性很低;当 $66.1 \leq S_R \leq 78$,表明燃料存在一定的结渣可能性;当 $S_R < 66.1$,表明燃料存在很高的结渣可能性。小麦秸秆与烟煤的灰分基础组成如表2所示。

表2 样品灰分的基础特性

Tab.2 Basic properties of samples' ash

| 参数 | 小麦秸秆 | 烟煤 |
|---------------------------------------|---------------|--------------|
| K ₂ O质量分数/% | 25.77 ± 0.22 | 0.41 ± 0.02 |
| CaO质量分数/% | 6.36 ± 0.12 | 6.80 ± 0.13 |
| MgO质量分数/% | 4.93 ± 0.11 | 2.33 ± 0.08 |
| SiO ₂ 质量分数/% | 23.90 ± 0.21 | 50.07 ± 0.25 |
| Na ₂ O质量分数/% | 0.30 ± 0.02 | 1.34 ± 0.06 |
| Al ₂ O ₃ 质量分数/% | 1.08 ± 0.05 | 27.78 ± 0.22 |
| Fe ₂ O ₃ 质量分数/% | 0.51 ± 0.03 | 5.02 ± 0.11 |
| P ₂ O ₅ 质量分数/% | 1.83 ± 0.07 | 0.39 ± 0.02 |
| TiO ₂ 质量分数/% | 0.058 ± 0.004 | 0.88 ± 0.04 |
| $R_{b/a}$ | 1.58 | 0.21 |
| S_R | 66.95 | 77.96 |

小麦秸秆灰分中主要无机元素为钾及硅元素,其氧化物质量分数分别达到25.77%和23.9%。而烟煤灰分中主要无机元素为硅及铝元素,其氧化物质量分数分别为50.07%和27.78%。从积灰预判参数 $R_{b/a}$ 以及结渣预判参数 S_R 可以看出,小麦秸秆积灰和结渣可能性极大,而烟煤几乎无积灰和结渣的可能。因此,小麦秸秆与煤混合燃烧可大大降低秸秆单独燃烧产生的积灰及结渣风险。

2.2 燃烧特性分析

2.2.1 混合燃烧动态过程分析

在不同混合比例下,混合燃料燃烧过程的TG和DTG曲线如图1所示。

由图1可知,小麦秸秆燃烧主要分为挥发分燃烧和固定碳燃烧两个阶段。挥发分燃烧主要集中在200~350°C之间,固定碳燃烧易形成尖且窄的失重峰,集中在400~450°C。与已有研究中秸秆生物质

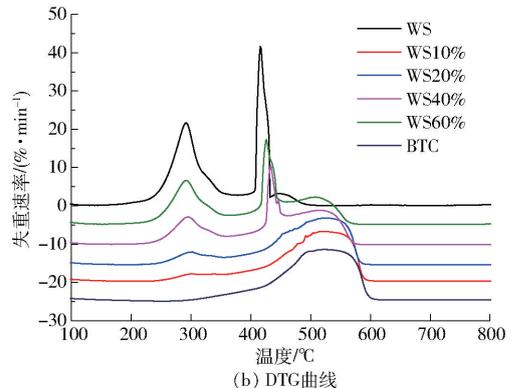


图1 混合燃料的燃烧特性曲线

Fig.1 Combustion characteristics of blended sample

燃烧曲线结果相近^[15]。而单纯煤燃烧时,DTG 曲线表现为单峰,即燃烧主体为固定碳。烟煤的失重峰相比秸秆宽且平滑。烟煤燃烧区间为 300 ~ 600℃。

当小麦秸秆与烟煤掺混时,DTG 曲线结果表明没有出现明显分界的失重峰,过渡过程为明显的肩峰。总结分析不同比例的混合燃料挥发分与固定碳峰值与对应温度,结果如表 3 所示。

表 3 混合燃料燃烧特征参数

Tab. 3 Combustion characteristic parameters of blended samples

| 样品编号 | 挥发分 | | 固定碳 | |
|-------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | 最大燃烧速率/ (%·min ⁻¹) | 对应温 度/℃ | 最大燃烧速率/ (%·min ⁻¹) | 对应温 度/℃ |
| WS | 20.79 | 291 | 40.33 | 419 |
| WS60% | 11.52 | 291 | 22.13 | 425 |
| WS40% | 7.30 | 294 | 20.59 | 432 |
| WS20% | 3.35 | 301 | 12.19 | 524 |
| WS10% | 2.08 | 305 | 12.99 | 520 |
| BTC | | | 13.19 | 525 |

从表 3 可以看出,小麦秸秆与煤掺混对挥发分燃烧的最大速率产生显著影响,而其对应温度并无明显偏移。随着小麦秸秆质量分数的减小,挥发分的燃烧逐渐减弱,最大速率从 20.79%/min 下降到 2.08%/min。小麦秸秆与煤掺混对固定碳燃烧产生了显著影响。小麦秸秆固定碳燃烧阶段最大速率(40.33%/min)出现在 419℃。由于烟煤比例的增加,混合燃料热稳定性提高,固定碳燃烧阶段逐渐向高温方向移动至 525℃,并在过渡阶段出现 2 个燃烧峰。由于燃料的反应活性与峰值温度成反比^[16],添加小麦秸秆提高了混合燃料的反应活性。其对应燃烧速率也呈逐渐下降趋势,由小麦秸秆固定碳的燃烧逐渐转移至烟煤固定碳燃烧方向。

2.2.2 着火、燃尽以及综合燃烧特性分析

本文采用外推法^[17-18]确定着火点温度。图 2 为外推分析方法示意图^[13]。过 DTG 曲线峰值点对温度轴作垂线,其与 TG 曲线交于一点 M 。过 M 点作 TG 曲线的切线,与失重起始平行线交于点 I ,定义为着火温度(T_i)。着火温度是衡量燃料着火性能的主要参数,着火温度越低,燃料越容易燃烧,燃烧性能越好^[19]。同理燃尽点温度也采用外推法确定。

综合燃烧特征指数 S_N ^[20-21]能够全面表征燃料的燃烧特性,数值越高表明燃料越易点燃、易燃尽,燃烧效率越高,计算公式为

$$S_N = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max} \left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_b} \quad (3)$$

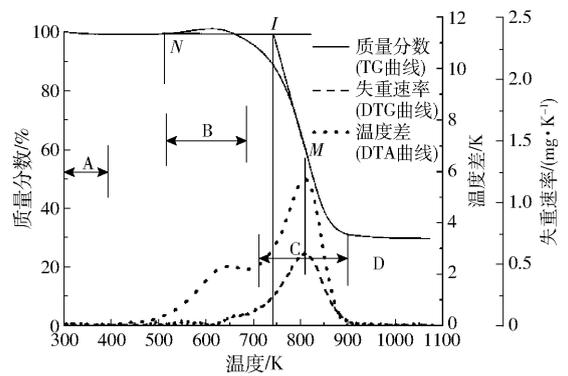


图 2 混合燃料的燃烧着火点、燃尽点分析方法示意图

Fig. 2 Analysis method of ignition and burn out temperature of blended samples

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

$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}$ ——平均燃烧速率, %/min

T_b ——燃尽温度, K

几项乘积全面涵盖了燃烧的主要过程,开始阶段、快速进行阶段和结束阶段的主要特征参数均有体现,全面地反映了燃烧特性。综合燃烧特征指数越大,表明燃烧特性越好。根据 DTG 曲线,计算分析着火点温度、燃尽点温度以及综合燃烧特征指数,如图 3 所示。

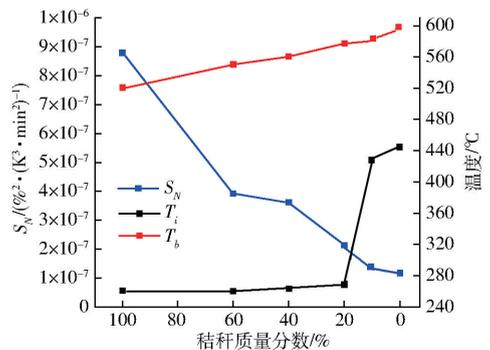


图 3 混合燃料的燃烧着火点、燃尽点及综合特征指数

Fig. 3 Ignition, burn out temperature and S_N of blended samples

由图 3 可知,混合燃料的着火点、燃尽点温度以及综合燃烧特征指数均呈现规律性变化。小麦秸秆质量分数降到 10% 之前,着火点温度并无明显升高,分布在 260 ~ 268℃ 温度范围。说明着火性能在小麦秸秆质量分数 10% 以上无明显下降。小麦秸秆的挥发分在混燃的着火阶段起到重要作用。而单纯煤燃烧的着火点温度在 444℃,表明较难着火。

燃尽温度则随着秸秆质量分数降低由 520℃ 缓慢上升至 596℃,随着烟煤比例增加并不断增加,固定碳含量更高的烟煤占主导地位。整体来看,加入煤延长了燃烧区间,使混合燃料不易燃尽,燃烧过程困难。

对于综合燃烧特征指数,随着小麦秸秆质量分数减小, S_N 逐渐由 $8.78 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$ 下降至 $1.17 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$ 。由于易燃的挥发分含量下降,混合燃料的燃烧性能逐渐降低。在小麦秸秆质量分数大于 20% 时, S_N 均大于 $2.11 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$,在秸秆质量分数不小于 40% 时, S_N 值大于 $3.60 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$,表现出可接受的较好的燃烧特性^[22]。考虑到综合燃烧性能,因此小麦秸秆质量分数不低于 40%,能够保证较好的燃烧性能。已有对不同混合比例小麦秸秆和褐煤研究^[10]表明,混合燃烧可以减少污染性气体的释放,并且混合比例(小麦秸秆与褐煤质量比)2:3 产生的 HCl、SO₂、NO_x 气体最少,与本文从燃烧特性角度评价得出的混合比例相近。

2.3 燃烧过程热量分析

DSC 曲线能够反映混合燃料燃烧过程中热流的变化,如图 4 所示。

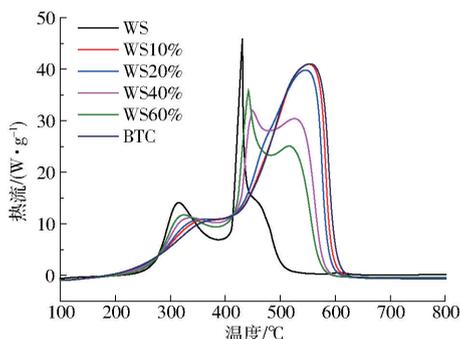


图 4 混合燃料燃烧热流释放曲线

Fig. 4 DSC curves of blended samples

混合燃料燃烧过程中热量变化呈现出与 DTG 曲线相似的规律。随着小麦秸秆质量分数的降低,小麦秸秆挥发分与固定碳对应放热峰逐渐减弱。在秸秆质量分数为 60% 和 40% 时,混合燃料出现 3 个放热峰。由于煤含量增加,混合燃料放热区域向高温方向偏移。主要是由于反应主体由挥发分的气相燃烧转移为固定碳与空气的异相反应^[23]。

由于燃烧过程中质量连续变化,DSC 曲线与时间积分面积可以用来比较不同燃料的放热量^[24]。放热量曲线如图 5 所示。

随着秸秆质量分数的减小,混合燃料释放能量整体呈现升高的趋势。在秸秆质量分数为 20% 时,放热量呈线性剧烈增加趋势,相比单独小麦秸秆增

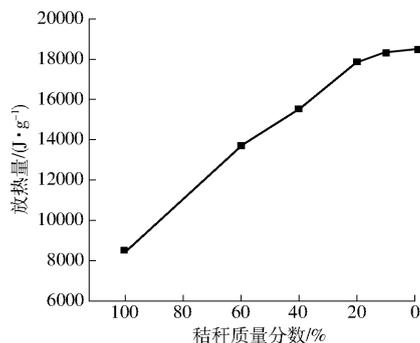


图 5 混合燃料燃烧热量释放曲线

Fig. 5 Heat released during combustion of blended samples

长约 110.16%。而在秸秆质量分数由 20% 降至 0 时,放热量增长趋势平缓,增长约 3.14%。与烟煤相比,小麦秸秆质量分数为 20% 时整体放热量为烟煤的 96.95%。而当小麦秸秆质量分数为 40% 和 60% 时,分别为烟煤的 84.14% 和 74.27%。为保证尽量提高混合燃料的整体放热量,达到烟煤的 80%,推荐小麦秸秆质量分数小于等于 40%。

综上所述,在提高整体放热量并保证较好燃烧特性的原则下,与烟煤掺混的小麦秸秆添加 40% 为较优比例。

3 结论

(1) 随着混合燃料中小麦秸秆质量分数的下降,挥发分燃烧峰值温度无明显移动,固定碳燃烧峰值温度明显向高温区偏移。小麦秸秆质量分数为 60% 和 40% 时,出现明显的过渡肩峰。

(2) 混合燃料的着火点、燃尽点温度以及综合燃烧特征指数均呈现规律性变化。燃尽温度随着秸秆比例降低由 520°C 缓慢上升至 596°C,表明加入煤使燃烧区间延长。随着小麦秸秆质量分数减小,综合燃烧指数不断下降,燃烧性能逐渐降低。在小麦秸秆质量分数大于 20% 时, S_N 均大于 $2.11 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$,在秸秆质量分数不小于 40% 时, S_N 大于 $3.60 \times 10^{-7} \%^2 / (K^3 \cdot \text{min}^2)$,因此,小麦秸秆质量分数不小于 40%,能够保证较好的燃烧性能。

(3) 由于煤含量增加,混合燃料放热区域向高温方向偏移。小麦秸秆质量分数为 40% 时,放热量为烟煤的 84.14%。为保证较好的燃烧特性,与烟煤掺混的小麦秸秆添加 40% 为较优比例。

参 考 文 献

- 1 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国战略性新兴产业研究与发展:生物质能[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- 2 张肖肖,杨冬,张林华. 生物质与煤混燃燃烧特性研究进展[J]. 节能技术,2011,29(6):483-484.
ZHANG Xiaoxiao, YANG Dong, ZHANG Linhua. Research status on combustion characteristics of co-firing of biomass and coal [J]. Energy Conservation Technology, 2011, 29(6): 483-484. (in Chinese)

- 3 焦慧强. 农业生物质混煤燃烧发电技术的研究进展[J]. 绿色科技, 2015(10): 293 - 295.
JIAO Huiqiang. Research progress on power generation technology of co-combustion of agricultural biomass and coal [J]. Journal of Green Science and Technology, 2015(10): 293 - 295. (in Chinese)
- 4 刘国庆, 刘清才, 朱博洪, 等. 松木焦与无烟煤混燃特性及反应动力学[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(5): 11 - 17.
LIU Guoqing, LIU Qingcai, ZHU Bohong, et al. Co-combustion characteristics and reaction kinetics of pine char and anthracite blends[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(5): 11 - 17. (in Chinese)
- 5 宋艳苹. 生物质发电技术经济分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.
SONG Yanping. Technical and economic analyse of biomass power generation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 6 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- 7 ZHOU X, WANG F, HU H, et al. Assessment of sustainable biomass resource for energy use in China[J]. Biomass & Bioenergy, 2011, 35: 1 - 11.
- 8 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87 - 91.
HAN Lujia, YAN Qiaojuan, LIU Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 87 - 91. (in Chinese)
- 9 SAHU S, CHAKRABORTY N, SARKAR P. Coal-biomass co-combustion: an overview[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 575 - 586.
- 10 WANG C, WU Y, LIU Q, et al. Analysis of the behaviour of pollutant gas emissions during wheat straw/coal cofiring by TG - FTIR[J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(5): 1037 - 1041.
- 11 SU W, MA H, WANG Q, et al. Thermal behavior and gaseous emission analysis during co-combustion of ethanol fermentation residue from food waste and coal using TG - FTIR[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 99: 79 - 84.
- 12 HUPA M, KARLSTRÖM O, VAINIO E. Biomass combustion technology development—it is all about chemical details[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(1): 113 - 134.
- 13 MUNIR S, DAOOD S S, NIMMO W, et al. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1413 - 1418.
- 14 CARRILLO M, STAGGENBORG S, PINEDA J. Washing sorghum biomass with water to improve its quality for combustion[J]. Fuel, 2014, 116: 427 - 431.
- 15 GIL M, CASAL D, PEVIDA C, et al. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5601 - 5608.
- 16 LIU Z, BALASUBRAMANIAN R. A comparison of thermal behaviors of raw biomass, pyrolytic biochar and their blends with lignite[J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 371 - 378.
- 17 WANG C, WANG F, YANG Q, et al. Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion[J]. Biomass & Bioenergy, 2009, 33(1): 50 - 56.
- 18 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 Yaohui, CHEN Hanping, WANG Xianhua, 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. (in Chinese)
- 19 葛仕福, 赵培涛, 李扬, 等. 污泥-秸秆衍生固体燃料燃烧特性[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 110 - 116.
GE Shifu, ZHAO Peitao, LI Yang, et al. Combustion characteristics of sewage sludge-straw derived fuel[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(17): 110 - 116. (in Chinese)
- 20 LI L, REN Q, WANG X, et al. TG - MS analysis of thermal behavior and gaseous emissions during co-combustion of straw with municipal sewage sludge[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 118: 449 - 460.
- 21 ZHANG L, DUAN F, HUANG Y. Thermogravimetric investigation on characteristic of biomass combustion under the effect of organic calcium compounds[J]. Bioresource Technology, 2014, 175: 174 - 181.
- 22 PARSHETTI G, QUEK A, BETHA R, et al. TGA - FTIR investigation of co-combustion characteristics of blends of hydrothermally carbonized oil palm biomass (EFB) and coal[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 118: 228 - 234.
- 23 LÓPEZ-GONZÁLEZ D, AVALOS-RAMIREZ A, GIROIR-FENDLER A, et al. Combustion kinetic study of woody and herbaceous crops by thermal analysis coupled to mass spectrometry[J]. Energy, 2015, 90: 1626 - 1635.
- 24 KOK M, ÖZGÜR E. Thermal analysis and kinetics of biomass samples[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 739 - 743.