

油松对玉米秸秆燃烧特性及结渣特性的影响

王 婷^{1,2}, 刘嘉欣^{1,2}, 刘文鼎^{1,2}, 王 迪^{1,2}, 李 源^{1,2}, 张 静^{1,2}

(1. 山西农业大学农业工程学院, 晋中 030801; 2. 旱作农业机械关键技术与装备山西省重点实验室, 晋中 030801)

摘 要: 针对玉米秸秆燃烧结渣率高的问题, 将少结渣原料油松与玉米秸秆混合燃烧, 采用热重分析结合扫描电子显微镜 (SEM) 及电镜能谱分析, 研究油松的添加对玉米秸秆燃烧特性及结渣特性的影响。结果表明: 油松-玉米秸秆混合燃料在燃烧过程中存在一定的交互作用, 随温度升高由抑制作用向协同作用转变, 再由强协同转为弱协同。当玉米秸秆与油松混合比例为 4:6 时, 整体燃烧特性最佳, 其燃尽温度提高至 475.6 °C, 稳燃指数提高至 $8.9379 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^2 \cdot \text{min})$, 综合燃烧特性指数最高提升至 $0.0929 \times 10^{-8} \text{ mg}^2/(\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$, 在鼓风强度为 0.1 m/s 时, 其结渣率由 56.25% 降至 9.87%, 结渣率下降 82.45%, 灰渣中 Si、Na、K 碱金属元素含量由 46.42% 下降至 29.93%。油松的添加可显著增强玉米秸秆的燃烧特性, 并有效降低结渣率。

关键词: 油松; 玉米秸秆; 生物质燃料; 燃烧特性; 结渣率

中图分类号: S216.2

文献标志码: A

0 引 言

中国作为农业大国, 农作物秸秆具有类型多样、储量充足等特点。数据显示, 2023 年国内秸秆资源化应用水平显著提升, 累计建成秸秆综合利用示范园区达 1600 处, 相关资源转化率稳定维持在 86% 以上^[1]。农作物秸秆因其价格低廉、来源广泛、易于获取等优点而备受青睐。而秸秆通常含有较高碱金属及灰分, 这不仅导致燃烧过程中的灰渣结块问题, 还可能引发污染物排放量的增加^[2]。肖军等^[3]研究表明, 生物质燃料结渣倾向主要由碱金属氧化物引发, 采用水洗、酸浸等预处理技术可降低原料中钾/钠元素活性形态, 显著抑制燃烧系统灰渣沉积。李松阳等^[4]指出水洗去除外部杂质, 酸洗减少玉米秸秆内部碱金属和可溶性盐, 酸洗对硅影响小, 但显著降低灰中钾含量, 并提高灰熔点。于志浩等^[5]发现白云石有助于形成高熔点的 $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$, 有效抑制熔融, 5% 混合比例即有显著抗烧结效果。同时, 白云石在 800~1000 °C 间固钾效果显著。王建伟等^[6]将贝壳、焦油裂解催化添加于自行设计的陶瓷连续蓄热式生物质气化/燃烧供热系统, 有效解决生物质结渣问题, 提高热效率并有效利用余热。

国内外高度关注生物质固体燃料的结渣问题, 研究多聚焦于原料预处理工艺优化^[7]、化学添加剂调控^[8]以及燃烧装置结构改良^[9]等技术路径, 然而针对低结渣特性生物质协同改良玉米秸秆燃烧结渣的研究鲜有报道。基于此, 本文创新性提出将低结渣率油松与玉米秸秆进行混合燃烧, 探讨玉米秸秆与油松混合燃烧对燃烧特性的影响及抑制结渣的潜力, 旨在为减少玉米秸秆固体燃料结渣提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料及方法

试验所需玉米秸秆和油松原料于 2022 年秋季自山西省太谷区采集, 经晾晒后粉碎, 筛分出粒径小于 0.16 mm 的原料。将油松与玉米秸秆分别以 4:6、6:4、8:2 的质量比进行混合, 采用 STA 449 F3 Jupiter 同步热分析仪, 在空气环境、10 K/min 升温速率、风量 50 mL/min、炉温从 50 °C 升至 1150 °C 工况下进行热重分析。采用交互作用指数 RMS (root mean square) 和协同指数 MR (magnification ratio) 对两种原料中碱金属的混燃交互作用进行量化计算。采用日立 SU8020 型场发射扫描电镜 (配备能谱分析系统) 对燃烧结渣实验后的灰渣样品进行微观形貌表征及元素分布解析, 揭示油松与玉米秸秆混合燃烧的结渣机理。

油松、玉米秸秆分别用 PT 和 CS 表示, 混合燃料的命名方式采用“油松简写及比例与玉米秸秆简写及比例”相结合的形式, 如油松与玉米秸秆以 8:2 比例混合, 其混合燃料简写为 PT_8CS_2 。纯生物质原料添加“_{raw}”以示区分。

1.2 混合燃料燃烧性能指标

试验选用着火温度、燃尽温度、稳燃指数、综合燃烧特性指数以及挥发分析出特性指数作为混合燃料的燃烧特性指数。

1.2.1 着火温度

本文采用 TG-DTG 切线法确定, 由于生物质混合燃料的热失重速率 (differential thermogravimetry, DTG) 曲线有两个燃

烧峰,热失重(thermogravimetry, TG)曲线在第二个燃烧峰处切线斜率大导致着火温度误差较大,故本文以第一个燃烧峰确定着火温度。

1.2.2 燃尽温度

燃尽温度是衡量燃料中可燃质燃烧完全程度及燃烧反应终止的关键指标,定义为燃料样品质量损失速率趋于零时对应的温度点,即失重曲线趋于平缓阶段所对应的温度,记作 T_h 。

1.2.3 最大燃烧速率

在 DTG 曲线中燃烧峰的最大值为最大燃烧速率。

1.2.4 稳燃指数

稳燃指数^[10]是评估燃料稳定燃烧性能的重要指标,它直观体现了燃料着火难易度以及着火后的稳定程度。其表达式为:

$$R_w = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}}{T_i T_{\max}} \quad (1)$$

式中: $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}$ ——最大燃烧失重速率,mg/min; T_i ——着火温度,℃; $T_{\max}$ ——最大燃烧失重速率温度,℃。

1.2.5 综合燃烧特性指数

综合燃烧特性指数通过结合燃料的最大燃烧速率、平均燃烧速度、着火温度和燃尽温度来衡量燃料的燃烧特性,是反映燃料着火和燃尽综合性能的重要指标^[11-12]。其表达式为:

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

式中: $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}$ ——平均燃烧失重速率,mg/min; T_h ——燃尽温度,℃。

平均燃烧失重速率 $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}$ 的计算方法为:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}} = \beta \frac{m_i - m_h}{T_h - T_i} \quad (3)$$

式中: β ——热重试验的升温速率,℃/min; m_i ——着火温度所对应的质量,mg。

1.2.6 挥发分析出特性指数

挥发分析出特性指数是衡量燃料燃烧过程中挥发分析出情况的指数,其数值越大,表明挥发分越易析出^[13]。其表达式为:

$$R_v = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}}{T_{\max} \Delta T} \quad (4)$$

式中: ΔT ——挥发分析出区间温度差, $\Delta T = T_{\max} - T_i$,℃。

1.3 燃烧交互作用理论

因原料组分含量差异可能产生交互作用,油松与玉米秸秆的混燃过程复杂^[14]。在燃烧中,碱金属和碱土金属(alkali

and alkaline earth metals, AAEMs)通过催化与非催化机制共同影响混燃交互^[15]。为研究这两种原料中碱金属的混燃交互作用,采用式(5)对微商热重 DTG 曲线进行线性叠加,并通过 Matlab 差值函数得到预测微商热重曲线^[16]。

$$D_{C-M} = w_{s_1} D_{E-s_1} + w_{s_2} D_{E-s_2} \quad (5)$$

式中: D_{C-M} ——混合燃料的预测 D 值,mg/min; w_{s_1} 、 w_{s_2} ——混合燃料中单一原料所占比例; D_{E-s_1} 、 D_{E-s_2} ——混合燃料中单一原料的实验 D 值,mg/min。

为深入探究混合燃料在交互作用过程中的催化与非催化机制的贡献,采用交互作用指数 RMS(式(6))和协同指数 MR(式(7))对其进行量化分析。通过上述量化指标^[17],准确描述混合燃料间的交互作用程度。

$$R = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{E-M}^i - D_{C-M}^i}{D_{C-M}^i} \right)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: D_{E-M} ——混合燃料的实验 D 值,mg/min; N ——实验点数。

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N (D_{E-M}^i - D_{C-M}^i)}{ND_{C-M}^{\text{mean}}} \quad (7)$$

式中: D_{C-M}^{mean} ——混合燃料的预测 D 的平均值,mg/min。

1.4 结渣率测定

结渣率即生物质固体燃料试样在特定鼓风强度下燃烧后,灰分在反应热作用下熔融形成大于 6 mm 颗粒的渣块质量占灰渣总质量的比重。依据 NB/T 34025—2015^[18]生物质固体燃料结渣特性检测方法,分别在 0.1、0.2、0.3 m/s 鼓风强度条件下对玉米秸秆、油松及混合燃料开展结渣率测试,每组实验重复 3 回且数据偏差不大于 5%(绝对值),结果取均值。计算公式为:

$$C_{\text{lin}} = \frac{G_1}{G - G_2} \times 100\% \quad (8)$$

式中: G ——总渣质量,g; C_{lin} ——测定结渣率,%; G_1 ——粒度<6 mm 渣块的质量,g; G_2 ——木炭中灰分质量,g。

2 结果与分析

2.1 燃烧过程分析

玉米秸秆、油松及混合燃料的工业分析及元素分析如表 1 所示,TG 曲线、DTG 曲线如图 1 所示。燃烧过程对于 PT_{raw}、CS_{raw} 以及 PT-CS 混合燃料均可划分为 4 个阶段。PT_{raw} 的燃烧阶段包括:预热干燥阶段(50~280 ℃)、挥发分析出燃烧阶段(280~380 ℃)、固定碳燃烧阶段(380~480 ℃)以及燃尽阶段(480~600 ℃)。SC_{raw} 的燃烧阶段包括:预热干燥阶段(50~250 ℃)、挥发分析出燃烧阶段(250~370 ℃)、固定碳燃烧阶段(370~490 ℃)以及燃尽阶段(490~600 ℃)。至于 PT-CS 混合燃料,其燃烧阶段依次为:预热干燥阶段(50~

230 ℃)、挥发分析出燃烧阶段(230~370 ℃)、固定碳燃烧阶段 (370~450 ℃)以及燃尽阶段(450~600 ℃)。

表 1 玉米秸秆、油松及混合燃料的工业分析与元素分析

Table 1 Industrial analysis and elemental analysis for corn straw , oil pine and mixed fuels

		%				
项目		CS _{raw}	PT _{raw}	PT ₈ CS ₂	PT ₆ CS ₄	PT ₄ CS ₆
工业分析	水分	3.06	3.09	4.08	3.96	4.10
	灰分	5.08	5.65	5.40	4.75	4.54
	挥发分	78.15	76.55	73.21	73.89	74.14
	固定碳	13.71	14.71	17.31	17.40	17.22
元素分析	[C]	45.66	48.24	47.17	46.57	46.54
	[H]	6.17	5.93	5.87	5.85	5.89
	[N]	1.08	0.48	0.44	0.52	0.57
	[S]	0.11	0.36	0.10	0.07	0.06
	[O]	43.21	36.25	36.94	38.28	38.30

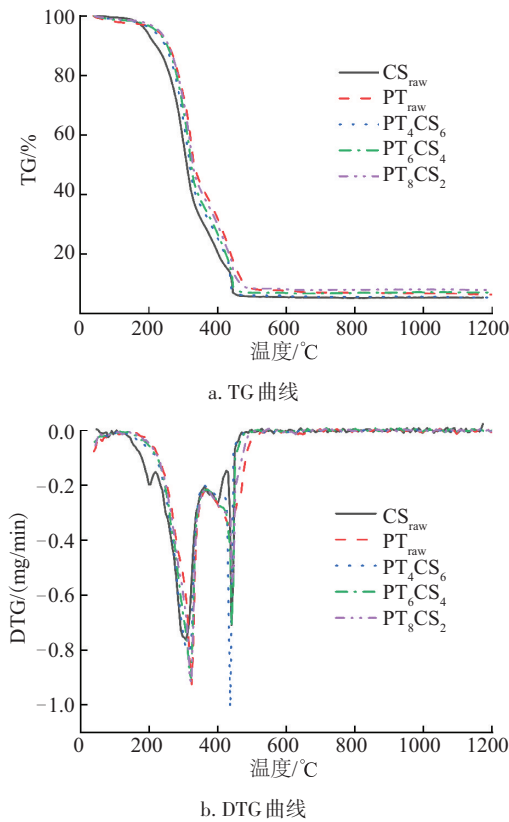


图 1 油松、玉米秸秆及其混合物燃烧TG-DTG曲线

Fig. 1 Combustion TG-DTG curves of oil pine , corn straw and their mixtures

由表 1 可知,CS_{raw} 的灰分含量较高,为 18.64%,再与灰分含量仅为 5.65% 的 PT_{raw} 混合后,其混合燃料 PT-CS 的灰分降至 4.54%~5.40%,灰分的减少降低了热传递的阻力,使得热量能更高效地传递至燃料内部,从而加速水分的蒸发和挥发

分的释放。CS_{raw} 的挥发分含量为 78.15%,其主要由纤维素和半纤维素构成;而 PT_{raw} 的挥发分含量为 76.55%,其则含有更多的木质素衍生物。当两者混合后,CS_{raw} 的低温挥发分首先释放,形成“热解先驱体”,并携带水分一起逸出,从而缩短了干燥时间,导致混合燃料的预热干燥时间相较于 CS_{raw} 及 PT_{raw} 的预热干燥时间更早结束。

由图 1b 可知,在约 200 ℃,玉米秸秆呈现出显著的肩峰现象,这一现象归因于玉米秸秆中半纤维素的热解温度低于纤维素^[19-20],且在进行热重分析的玉米秸秆样本中,半纤维素的含量相对较高,导致半纤维素与纤维素热解过程的双峰叠加形成了肩峰特征^[21]。而 PT-CS 混合燃料中有两个非常显著的燃烧峰。第一个燃烧峰对应于挥发分析出阶段,此时 DTG 曲线与油松单一物质的曲线几乎完全重合,这表明它们在燃烧特性上具有高度的相似性。第二个燃烧峰则对应于固定碳燃烧阶段,在约 400 ℃时,CS_{raw} 显示出明显的肩峰特征,且在 440 ℃时达到该阶段的最大燃烧速率,其燃烧速率显著高于 PT_{raw} 在相同阶段的最大燃烧速率。相比之下,混合燃料在 400 ℃时并未出现肩峰特征,并在 440 ℃达到最大燃烧速率。

2.2 混燃交互作用分析

混合燃料的 DTG 曲线实验值与预测值偏差情况如图 2 所示,将燃烧过程划分为 A、B、C、D 4 个区域。为更全面了解 4 个区域的燃烧特性,计算每个区域的交互作用指数(RMS)和协同指数(MR),结果如图 3 所示。

由图 3b 可知,混合燃料在区域 A 内的 MR 指数小于 0,混合燃料表现出明显的抑制交互作用,且不同混合比例下抑制作用的强弱基本接近,该区域在燃烧反应的着火点附近;而 RMS 指数均约 0.3,图 3a 中区域 A 的点基本重合,表明油

松含量的增加会加剧混燃过程中的抑制作用,但其变化幅度几乎可忽略。

在区域 B 内,MR 指数均小幅大于 0,表明在混燃过程中存在相互之间的协同效应。随着油松含量的增加,这种协同效应的强度逐渐增大,这一现象主要与混燃过程中的非催化机制密切相关。混燃过程中,燃料中氢元素(H)的转移起到至关重要的作用,可显著促进挥发分释放。高氢碳比($R_{H/C}$)的玉米秸秆原料在混燃过程中,氢(H)和羟基(OH)的存在能有效促进油松中大分子有机物侧链的断裂。这一过程不仅有助于挥发分的释放,还能抑制其他自由基的交联和再聚合反应^[22]。PT-CS 混合燃料在区域 C 内 MR 指数均在(0, 0.022)区间范围内,混合燃料的协同作用不显著。

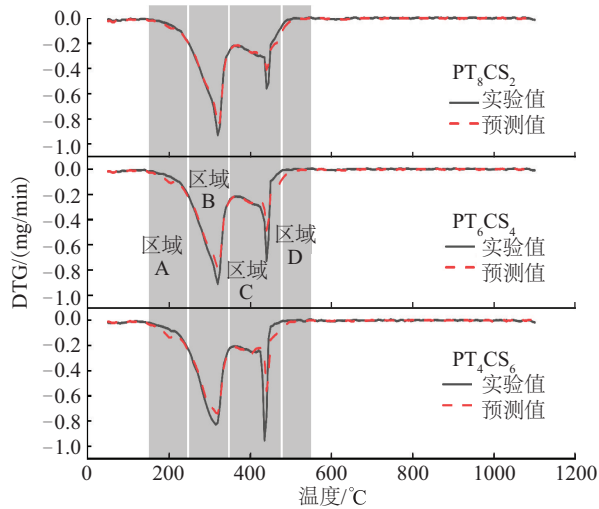
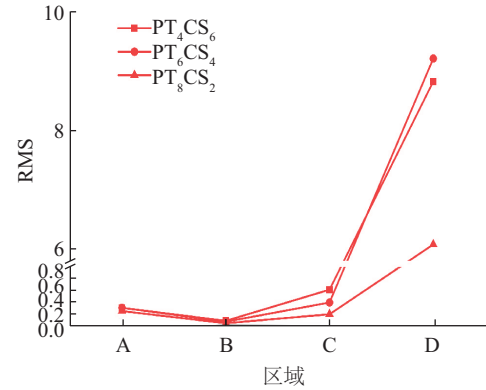


图2 混合燃料的实验值和预测值DTG曲线

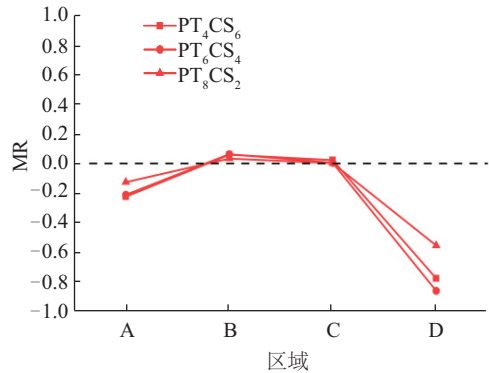
Fig. 2 Experimental and predicted DTG curves for hybrid fuels

在区域 D 内的 RMS 值均远大于其他区域,这表明混合燃料在区域 D 内均有十分强烈的交互作用,然而由 MR 曲线可看出,在区域 D 内各组混合燃料的 MR 值均小于 0,表现为强烈的抑制作用。图 2 与图 3a 表明,RMS 数值虽高但 DTG 曲线几乎重合,原因在于该区域正处于燃尽阶段,尽管实验

数据与预测数据之间存在细微的差值,然而混合燃料的失重速率值在这一阶段趋近于零,导致通过式(6)计算时,微小的差异被过分放大。基于此,本文将不再深入探讨区域 D 内混合燃料的交互作用。



a. RMS 曲线



b. MR 曲线

图3 混合燃料在4个区域内的RMS和MR曲线

Fig. 3 RMS and MR curves of blended fuels in 4 regions

2.3 燃烧特性指数分析

升温速率为 10 K/min 的条件下,对玉米秸秆、油松两种原料及混合燃料进行燃烧性能评估。其着火温度、稳燃指数、综合燃烧特性指数以及挥发分析出特性指数情况如表 2 所示。

表2 燃料燃烧特性指数

Table 2 Combustion characteristic index of fuel

样品	着火温度 $T_i/^{\circ}\text{C}$	稳燃指数 $R_w/$ [$10^{-6}\text{mg}/(\text{K}^2\cdot\text{min})$]	燃尽温度 $T_b/^{\circ}\text{C}$	综合燃烧 特性指数 $S/$ [$10^{-8}\text{mg}^2/(\text{K}^3\cdot\text{min}^2)$]	最大燃烧速率 $(dm/dt)_{\max}/$ (mg/min)	挥发分析出 特性指数 $R_v/$ [$10^{-4}\text{mg}/(\text{K}^3\cdot\text{min})$]
CS_{raw}	253.0	6.9582	475.1	0.0690	0.7760	0.0937
PT_{raw}	282.9	7.8132	524.6	0.0623	1.7734	0.5610
PT_8CS_2	277.9	9.4040	498.6	0.0858	0.8402	0.5994
PT_6CS_4	270.9	9.1668	477.5	0.0929	0.7954	0.5027
PT_4CS_6	262.7	8.9379	475.6	0.1261	1.0249	0.1351

由表 2 可知,油松着火温度(282.9 °C)明显高于玉米秸秆的着火温度(253.0 °C),PT-CS 着火温度稳定在 262.7~277.9 °C 范围内,与油松着火温度接近,且随着油松比例的增加,PT-CS 的着火温度也随之增大,PT₈CS₂着火温度最高为 277.9 °C,相较于玉米秸秆燃料其着火温度高出 24.9 °C,展现出更高的着火温度,这意味着在实际应用中,高着火温度不易被意外点燃,进而提升了其在储存与处理过程中的安全性。混合燃料的燃尽温度稳定在 475.6~498.6 °C,与玉米秸秆的燃尽温度(475.1 °C)接近,相较于油松的燃尽温度(524.6 °C)混合燃料的燃尽温度则低 25~50 °C,且 PT₄CS₆燃尽温度最低为 475.6 °C,较低的燃尽温度意味着混合燃料可在较低的温度下完成燃烧过程,这有助于提高燃烧速率,使得燃料更快速地转化为能量。PT₄CS₆最大燃烧速率的值最高为 1.0249 mg/min,而 PT₆CS₄的最大燃烧速率为 0.7954 mg/min,与玉米秸秆的最大燃烧速率(0.7760 mg/min)相近,较低的最大燃烧速率可减少不完全燃烧,提高燃料的利用率,从而提高能源利用效率。玉米秸秆的稳燃指数为 $6.9582 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^2 \cdot \text{min})$,油松的稳燃指数为 $7.8132 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^2 \cdot \text{min})$,而在混合燃料中 PT₄CS₆的稳燃指数最低为 $8.9379 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^2 \cdot \text{min})$,PT₈CS₂最高为 $9.4040 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^2 \cdot \text{min})$,高稳燃指数的燃料在提高燃烧效率、降低污染物排放、增强燃料适应性等方面均有明显优势。混合燃料中综合燃烧特性指数最低值为 PT₈CS₂,为 $0.0858 \times 10^{-8} \text{ mg}^2/(\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$,最高值为 PT₄CS₆,为 $0.1261 \times 10^{-8} \text{ mg}^2/(\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$,而玉米秸秆的综合燃烧特性指数仅为 $0.0690 \times 10^{-8} \text{ mg}^2/(\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$,混合燃料较玉米秸秆燃料展现出更高的综合燃烧特性指数,高综合燃烧特性指数意味着燃料在燃烧过程中能够更快地达到最大燃烧速率,从而提高了整体的燃烧效率。玉米秸秆的挥发分析出特性指数为 $0.0937 \times 10^{-4} \text{ mg}/(\text{K}^3 \cdot \text{min})$,油松的挥发分析出特性指数为 $0.5610 \times 10^{-4} \text{ mg}/(\text{K}^3 \cdot \text{min})$,混合燃料的挥发分析出特性指数则在 $0.1351 \times 10^{-4} \sim 0.5994 \times 10^{-4} \text{ mg}/(\text{K}^3 \cdot \text{min})$ 范围内,油松含量的增加与挥发分析出特性指数呈现显著正相关性,而该特性指数的优化可有效促进热解反应进程。

油松与玉米秸秆按照 4:6、6:4、8:2 的质量比混合燃烧时,其稳燃指数、综合燃烧特性指数、挥发分析出特性指数均优于玉米秸秆原料。其中油松与玉米秸秆质量比为 8:2 时(PT₈CS₂),着火温度、燃尽温度、稳燃指数及挥发分析出特性指数均为最高,即其综合燃烧性能最佳;油松与玉米秸秆质量比为 6:4 时(PT₆CS₄)次之,各项数据指标虽略低于 PT₈CS₂,但也极为接近;PT₄CS₆虽综合燃烧特性指数最高为 $0.8258 \times 10^{-8} \text{ mg}^2/(\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$,但其挥发分析出特性指数最低仅为 $0.1351 \times 10^{-4} \text{ mg}/(\text{K}^3 \cdot \text{min})$ 。考虑到油松与玉米秸秆质量比为 8:2 的情况下,油松代替玉米秸秆成为燃料的主要成分,已失去改善玉米秸秆结渣性的意义,因此本文选定油松与玉米秸

秆的最佳质量比为 6:4。

2.4 结渣率测定及结渣机理分析

2.4.1 结渣率分析

玉米秸秆、油松及 PT₄CS₆混合燃料的结渣率测定结果如图 4 所示。由图 4 可知,玉米秸秆燃料在鼓风强度为 0.1 m/s 时结渣率为 56.25%,处于强结渣区,在鼓风强度为 0.2、0.3 m/s 时结渣率分别为 58.3%、64.78%,处于中等结渣区域。油松在鼓风强度分别为 0.1、0.2、0.3 m/s 时结渣率分别为 2.22%、13.7%、8.59%,处于弱结渣区。混合燃料在鼓风强度分别为 0.1、0.2、0.3 m/s 时结渣率分别为 9.87%、14.43%、16.19%,处于弱结渣区,油松的添加将玉米秸秆原料的结渣率分别降低 82.45%、75.25%、75.01%,显著降低了玉米秸秆的结渣率。

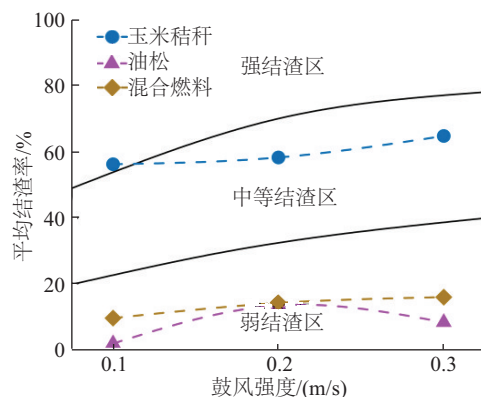


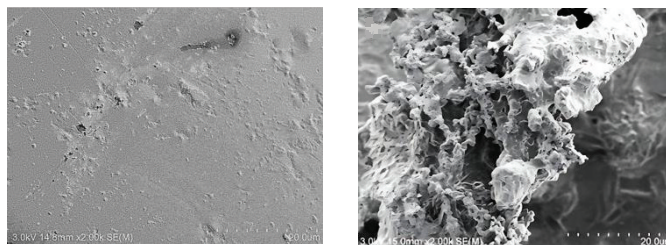
图 4 玉米秸秆、油松以及混合燃料结渣性强度曲线

Fig. 4 Strength curves of corn straw, oil pine and mixed fuel slagging properties

2.4.2 结渣机理分析

将玉米秸秆及油松-玉米秸秆混合燃料置于生物质燃烧炉内进行燃烧试验。燃烧过程中,确保鼓风强度与单次加料量保持恒定,持续约 5 h 后停止添加燃料。待火焰自然熄灭后,关闭燃烧炉并取出底灰,同时监测炉膛受热面热流分布及排烟筒温度场特征。

随机取灰渣样品经 SEM 观测其表面微观形貌特征,如图 5 所示。玉米秸秆燃料底灰结渣现象明显,渣块粘结形成“渣体”,小渣块表面平整光滑,玻璃化程度高,硬度较大,破碎难度较大。灰渣内部结构致密、平整且光滑,孔隙少,说明高温下灰熔化后凝结形成硬度大、结构致密的灰渣,由于灰渣的包裹燃料中心温度难以散发而急剧上升,导致渣块增厚、硬度增大。油松-玉米秸秆混合燃料底灰中有超过 90% 的组分为淡黄色粉末状固体,经筛分处理后有少部分尺寸在 3 mm 以内的渣块。其渣块表面呈现多孔特征与链式拓扑结构,其松散型微结构导致形成的灰渣致密性较低,在轻微外力下即可破坏其形态,有效降低清灰难度。



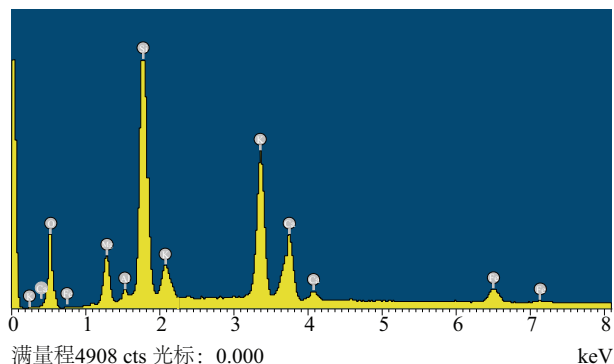
a. 玉米秸秆燃料底灰

b. 混合燃料底灰

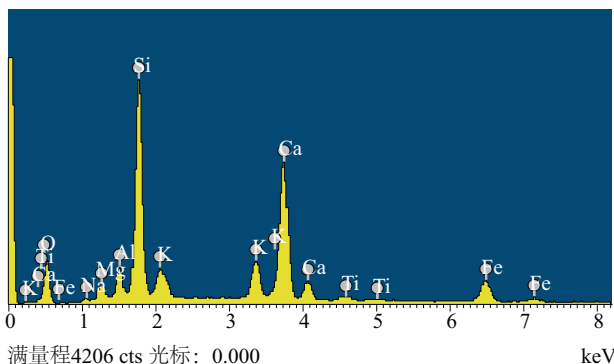
图5 固体燃料灰渣电镜扫描图

Fig. 5 Electron microscope scan of solid fuel ash

电镜能谱分析如图6所示。从图6a及元素对应含量可看出,玉米秸秆灰渣中Si与K元素含量显著约占元素总质量的46.42%,其中K元素占比可达18.98%,而Mg、Ca、Al等元素含量较低。这表明玉米秸秆燃料燃烧后渣块主要由Si、K元素构成,其低熔点特性使得它们在高温下熔融,形成液态物质,随着炉膛温度下降,液态物质凝固成体积较大渣块。从图6b及元素对应含量可知,油松-玉米秸秆混合燃料燃烧后产生的灰渣中硅、钾、钠3种元素的含量为29.93%,而其中的碱金属钾和钠含量仅占5.74%,与玉米秸秆燃料灰渣相比,其含量减少了66%~75%。说明混合油松后能显著减少玉米秸秆燃料中的碱金属成分,有效降低结渣率。



a. 玉米秸秆灰渣



b. 混合燃料灰渣

图6 固体燃料灰渣能谱图

Fig. 6 Solid fuel ash energy spectra

3 结 论

1) 油松-玉米秸秆混合燃料在燃烧过程中存在交互作用,随着温度升高由抑制作用向协同作用转变,再由强协同转为弱协同。油松-玉米秸秆混合燃料较玉米秸秆燃料而言,整体燃烧特性均有提升,当玉米秸秆与油松混合比例为4:6时,其着火温度为270.9℃,燃尽温度提高至477.5℃,最大燃烧速率为0.7954 mg/min,稳燃指数提高约 2×10^{-6} mg/(K²·min),综合燃烧特性指数最高提升至 0.0929×10^{-8} mg²/(K³·min²),挥发分析出特性指数为 0.5027×10^{-4} mg/(K³·min),表明油松的添加可在一定程度上改善玉米秸秆燃料的燃烧性能。

2) 在鼓风强度分别为0.1、0.2、0.3 m/s的情况下,玉米秸秆燃料的结渣率分别为56.25%、58.3%、64.78%,而油松-玉米秸秆混合燃料的结渣率分别为9.87%、14.43%、16.19%。油松的添加将玉米秸秆原料的结渣率分别降低82.45%、75.25%、75.01%,显著降低了玉米秸秆的结渣率。

3) 玉米秸秆燃料灰渣中Si元素和K元素总量占比约46.42%,而油松-玉米秸秆混合燃料灰渣中Si和Na、K碱金属元素含量下降至29.93%,表明添加油松能有效减少玉米秸秆燃料中的碱性金属成分,从而增强其抗结渣特性。

油松作为一种少结渣原料,与玉米秸秆混合燃烧可有效改善玉米秸秆燃料燃烧性能,降低其结渣率。

[参考文献]

- [1] 农业农村部办公厅. 农业农村部办公厅关于做好2023年农作物秸秆综合利用工作的通知:农办科[2023]13号 [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6885403.htm.
General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Development. General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on doing a good job of comprehensive utilisation of crop straw in 2023: Agricultural Office of Science [2023] No. 13 [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6885403.htm.
- [2] 肖瑞瑞,陈雪莉,王辅臣,等. 不同生物质灰的理化特性[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 364-369.
XIAO R R, CHEN X L, WANG F C, et al. The physicochemical properties of different biomass ash [J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(3): 364-369.
- [3] XIAO J, DUAN J C. Studies on co-firing of low-temperature pyrolyzed biomass with coal [C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China, 2010: 1-4.
- [4] 李松阳,刘建坤,陈越,等. 秸秆中钾元素对生物质成灰特性的影响研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1324-1329.
LI S Y, LIU J K, CHEN Y, et al. Study on effect of

- kalium element in straw on ash characteristics of biomass [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2019, 40(5): 1324-1329.
- [5] 于志浩, 金晶, 张瑞璞, 等. 白云石添加剂对稻秆灰熔融特性及固钾能力的影响[J]. *燃料化学学报*, 2020, 48(7): 795-803.
- YU Z H, JIN J, ZHANG R P, et al. Influence of dolomite additive on the ash fusion and potassium fixation characteristics of rice straw [J]. *Journal of fuel chemistry and technology*, 2020, 48(7): 795-803.
- [6] 王建伟, 赵磊磊, 延廷琪. 连续蓄热式生物质气化/燃烧供热系统[J]. *新能源进展*, 2020, 8(1): 49-55.
- WANG J W, ZHAO L L, YAN T Q. Continuous regenerative biomass gasification/combustion heating system [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2020, 8(1): 49-55.
- [7] 董向元, 郭淑青, 王红艳, 等. 稻秆水热碳化过程中碱(土)金属的迁移[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(1): 355-359.
- DONG X Y, GUO S Q, WANG H Y, et al. Releasing behavior of alkali and alkaline earth metals during hydrothermal carbonization(htc) of rice straw [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(1): 355-359.
- [8] 刘兵, 逢明华, 聂永芳, 等. 多因素添加剂对玉米秸秆结渣特性影响的研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(4): 974-978.
- LIU B, PANG M H, NIE Y F, et al. Effect of multiple factors additives on slagging characteristics of corn straw [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2016, 37(4): 974-978.
- [9] 孙康, 陈超, 许玉, 等. 秸秆成型燃料锅炉燃烧机设计及试验研究[J]. *林产化学与工业*, 2014, 34(6): 93-99.
- SUN K, CHEN C, XU Y, et al. Design and experiments study on combustion engine of straw briquettes fuel [J]. *Chemistry and industry of forest products*, 2014, 34(6): 93-99.
- [10] 王雨. 预干燥污泥与煤矸石混燃技术研究[D]. 河北: 河北联合大学, 2014.
- WANG Y. Study on co-combustion technology of pre-dried sludge and coal gangue [D]. Hebei: Hebei United University, 2014.
- [11] 杨桂花, 薛蓝馨, 林兆云, 等. 制浆纤维原料固体废物基颗粒燃料的燃烧性能分析及改善[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 246-254.
- YANG G H, XUE L X, LIN Z Y, et al. Combustion performance of solid waste-based pellet fuel from fiber feedstock waste residues in the pulping process [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(5): 246-254.
- [12] 刘正光, 张静. 柠条燃烧特性及燃烧动力学研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(9): 2611-2618.
- LIU Z G, ZHANG J. Study on the combustion characteristics and kinetics of *Caragana korshinskii* Kom [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2017, 38(9): 2611-2618.
- [13] 蒋绍坚, 王涛, 彭好义, 等. 木质和玉米秸秆成型燃料热重分析与燃烧动力学[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(10): 4312-4318.
- JIANG S J, WANG T, PENG H Y, et al. Thermogravimetric and combustion dynamics of moulding fuel of woodiness and cornstalk [J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2013, 44(10): 4312-4318.
- [14] 庄修政, 宋艳培, 詹昊, 等. 水热污泥与煤在混燃过程中的协同效应特性研究[J]. *燃料化学学报*, 2018, 46(12): 1437-1446.
- ZHUANG X Z, SONG Y P, ZHAN H, et al. Synergistic effects in co-combusting of hydrochar derived from sewage sludge with different-rank coals [J]. *Journal of fuel chemistry and technology*, 2018, 46(12): 1437-1446.
- [15] 曹晋曾, 魏国强, 袁浩然, 等. 生物质热化学转化过程中碱金属分布及迁移特性[J]. *新能源进展*, 2023, 11(3): 228-238.
- CAO J Z, WEI G Q, YUAN H R, et al. Distribution and migration of alkali metals during biomass thermochemical transformation [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2023, 11(3): 228-238.
- [16] 王彦霖, 贾里, 王碧茹, 等. 城市污泥和煤泥混燃过程中交互作用的影响及机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(10): 4174-4184.
- WANG Y L, JIA L, WANG B R, et al. Influence and mechanism of interaction in co-combustion of sewage sludge and coal slime [J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2022, 53(10): 4174-4184.
- [17] WANG Q, ZHAO W Z, LIU H P, et al. Interactions and kinetic analysis of oil shale semi-coke with cornstalk during co-combustion [J]. *Applied energy*, 2011, 88(6): 2080-2087.
- [18] NB/T 34025—2015, 生物质固体燃料结渣性试验方法[S].
- NB/T 34025—2015, Test method for solid biofuel of clinkering property[S].
- [19] NIZAMUDDIN S, SHRESTHA S, ATHAR S, et al. A critical analysis on palm kernel shell from oil palm industry as a feedstock for solid char production [J]. *Reviews in*

- chemical engineering, 2016, 32(5): 489-505.
- [20] FU X, ZHONG Z, XIAO G, et al. Comparative study on pyrolysis characteristics and dynamics of grass biomass[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 199-202.
- [21] 吴江苏, 李焱冰, 于志浩, 等. 碳酸钾和高铁酸钾催化热解中药渣固废的对比实验[J]. 燃料化学学报(中英文), 2023, 51(8): 1114-1125.
- WU J S, LI Y B, YU Z H, et al. Comparative experiments on the catalytic pyrolysis of herb residue by K_2CO_3 and K_2FeO_4 [J]. Journal of fuel chemistry and technology, 2023, 51(8): 1114-1125.
- [22] KRERKKAIWAN S, FUSHIMI C, TSUTSUMI A, et al. Synergetic effect during co-pyrolysis/gasification of biomass and sub-bituminous coal[J]. Fuel processing technology, 2013, 115: 11-18.

INFLUENCE OF OIL PINE ON COMBUSTION CHARACTERISTICS AND SLAGGING CHARACTERISTICS OF CORN STRAW

Wang Ting^{1,2}, Liu Jiabin^{1,2}, Liu Wending^{1,2}, Wang Di^{1,2}, Li Yuan^{1,2}, Zhang Jing^{1,2}

(1. College of Agricultural Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2. Dryland Farm Machinery Key Technology and Equipment Key Laboratory of Shanxi Province, Jinzhong 030801, China)

Abstract: In order to address the problem of high slagging rate of corn straw combustion, mixing oil pine with less slagging feature and corn straw to produce the mixture combustion, using thermogravimetric analysis, SEM scanning and energy spectrometry, the effect of oil pine on the combustion characteristics of corn straw and slagging characteristics is studied. The results show that: there is a certain interaction during the combustion process of the oil pine-corn straw mixed fuel. As the temperature rises, it changes from inhibitory effect to synergistic effect, and then from strong synergistic effect to weak synergistic effect. When the mixing ratio of corn straw and oil pine is 4:6, the overall combustion characteristics are the best, the combustion temperature increases to 475.6 °C, the stable combustion index increases to $8.9379 \times 10^{-6} \text{ mg}/(\text{K}^2 \cdot \text{min})$ and the combined combustion characteristics index increases to $0.0929 \times 10^{-8} \text{ mg}^2/(\text{K}^3 \cdot \text{min}^2)$, and the slagging rate decreases from 56.25% to 9.87% with the blower strength of 0.1 m/s, the slagging rate decreases by 82.45%, and the content of Si and Na, K alkali metal elements in the ash decreases from 46.42% to 29.93%. The addition of oil pine can significantly enhance the combustion characteristics of corn straw and effectively reduce the slagging rate.

Keywords: oil pine; corn straw; biomass fuel; combustion characteristics; slagging rate