

DOI: 10.19666/j.rlfed.202408185

# 掺烧煤矸石对减轻生物质燃烧 结渣性能的影响

朱愉洁<sup>1</sup>, 韩元<sup>1</sup>, 柳少卿<sup>2</sup>, 贾相如<sup>2</sup>

(1.内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2.内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010080)

**[摘要]** 生物质含有较多碱金属元素, 在燃烧过程中会产生较严重的结渣问题; 煤矸石是一种大宗固体废弃物, 迫切需要对其进行资源化利用。为解决生物质燃烧结渣和煤矸石利用问题, 使用煤矸石作为添加剂, 将其与葵花秸秆混合燃烧。采用热重分析(TG-DTG)、电感耦合等离子体光谱发生仪(ICP-AES)、灰熔融点测定仪等测试手段对燃烧后的灰样进行理化特性分析, 考察温度、配比对混合燃料燃烧性能和结渣的影响。研究表明: 在葵花秸秆燃烧过程中, 加入少量的煤矸石, 葵花秸秆灰中的碱金属含量明显升高, 并更多地转化为高熔点的硅铝酸盐固定在灰样中, 进入气相的碱金属含量减少, 从而降低燃烧的结渣倾向; 同时葵花秸秆会降低煤矸石的着火点温度和燃尽温度, 从而促进煤矸石的燃烧, 二者协同作用明显; 当煤矸石添加质量分数为20%时, 燃料的可燃性指数达到 $9.36 \times 10^{-4} \%/(\text{min} \cdot ^\circ\text{C})$ , 综合燃烧特性指数达到 $42.6 \times 10^{-7} \%/(\text{min}^2 \cdot ^\circ\text{C}^3)$ , 燃烧性能最佳, 软化温度达到1470 $^\circ\text{C}$ , 极大地降低了结渣倾向。

**[关键词]** 葵花秸秆; 煤矸石; 混合燃烧; 结渣; 熔融特性

**[引用本文格式]** 朱愉洁, 韩元, 柳少卿, 等. 掺烧煤矸石对减轻生物质燃烧结渣性能的影响[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 61-67. ZHU Yujie, HAN Yuan, LIU Shaoqing, et al. Effect of coal gangue blending on mitigating slagging performance of biomass combustion[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 61-67.

## Effect of coal gangue blending on mitigating slagging performance of biomass combustion

ZHU Yujie<sup>1</sup>, HAN Yuan<sup>1</sup>, LIU Shaoqing<sup>2</sup>, JIA Xiangru<sup>2</sup>

(1.Inner Mongolia Power Research institute Branch, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China;

2.School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China)

**Abstract:** Biomass contains a high content of alkali metal elements, which can cause serious slagging problems during the combustion process. Coal gangue is a kind of bulk solid waste, and its resource utilization is an urgent need. In order to solve the problem of biomass combustion slagging and coal gangue utilization, coal gangue was used as an additive and mixed with sunflower straw for combustion. Physical and chemical characterization of the burned ash samples were carried out using thermogravimetric analysis (TG-DTG), inductively coupled plasma spectrometry (ICP-AES), and ash melting point tester. The effects of temperature and ratio on the combustion performance and slagging of mixed fuels were also investigated. The research results show that, during the combustion of sunflower straw, the addition of a small amount of gangue significantly increased the alkali metal content in the ash. More of these metals were converted into high-melting-point silica-aluminates, which were fixed in the ash samples, while the gaseous alkali metal content decreased. As a result, the tendency for slagging during combustion was reduced. At the same time, the sunflower straw reduced the ignition point and burnout

收稿日期: 2024-08-07 网络首发日期: 2025-01-20

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司2023年院自筹(一批)科技项目(2023-ZC-11)

Supported by: Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd. Inner Mongolia Power Research Institute Branch 2023 Self-raised (Batch) Science and Technology Project (2023-ZC-11)

第一作者简介: 朱愉洁(1983), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力环保技术监督和技术开发, nmdkzyj@sina.cn.

通信作者简介: 贾相如(1970), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为固体废弃物处理与资源化, jxr0818@imut.edu.cn.

temperature of the gangue, thereby promoting its combustion. The synergistic effect was obvious. When the proportion of coal gangue was 20%, the flammability index of the fuel reached  $9.36 \times 10^{-4} \%/(\text{min} \cdot ^\circ\text{C})$ , and the comprehensive combustion characteristics index reached  $42.6 \times 10^{-7} \%/(\text{min}^2 \cdot ^\circ\text{C}^3)$ . The combustion performance was optimal, with a softening temperature of  $1\ 470\ ^\circ\text{C}$ , and the tendency for slagging was significantly reduced.

**Key words:** sunflower straw; coal gangue; co-combustion; slagging; melting characteristics

能源供应始终是人类社会发展的重要课题, 人类社会的运行离不开能源利用, 每次能源革命都会给人类的生活方式带来巨大变化<sup>[1]</sup>。目前, 许多国家宣布减少温室气体排放, 并预计在 2050—2060 年实现“零碳排放”或“碳中和排放”<sup>[2]</sup>。生物质作为一种清洁能源, 具有极大的开发潜力, 然而生物质直接作为燃料燃烧将排放大量的污染气体, 且会导致严重的炉内积灰和结渣问题<sup>[3]</sup>。中国是世界上最大的煤炭开采国, 在煤炭的开采过程中会产生大量煤矸石 (CG) 废弃物。煤矸石的堆积造成了地下水污染、土壤污染、空气污染等一系列环境问题, 同时产生极大的资源浪费<sup>[4]</sup>。基于上述原因, 煤矸石和生物质如何高效利用已成为学者们重视和研究的问题, 如能将煤矸石和生物质制备成混合燃料, 不仅能极大缓解我国能源紧缺问题, 在节能环保的同时还具有很高的经济效益。郝松涛等<sup>[5]</sup>进行生物质与煤矸石不同混合配比的燃烧实验, 在所有混合试样中, 煤矸石掺混比为 20% 时, 混合燃料的质量变化速率、可燃性指数和综合燃烧特性指数最大。Zhou 等人<sup>[6]</sup>研究煤矸石和生物质混烧过程中的热特性和微量元素特征, 随着生物质含量的增加, 混合物的着火性能、热反应性和气体污染物排放表现出不同的特征。赵亚斌等<sup>[7]</sup>使用葵花秸秆、玉米秸秆、煤矸石进行不同比例的混合燃烧试验, 随着生物质比例的增加, 失重率增加, 混合样的质量变化速率增加, 当煤矸石掺混比为 20% 时, 活化能降低明显。王新华<sup>[8]</sup>研究煤矸石掺混木屑的燃烧特性, 木屑掺混的越多, 样品挥发分和固定碳含量越高, 燃料着火延迟越短, 燃烧性能越好。Liu 等人<sup>[9]</sup>使用煤矸石和稻草混烧, 研究不同质量比混合下 K 的迁移、灰结渣特性和  $\text{SO}_2$  排放特性, 发现燃烧释放的  $\text{SO}_2$  和煤矸石固有的莫来石与石英对 K 迁移有协同作用, 协同效应与 CG 和稻草的配比有关。通过研究煤矸石和生物质的混合燃烧特性发现, 煤矸石和生物质存在协同效应, 不仅可以降低气体污染物排放, 还可以提高燃料的燃烧性能<sup>[10]</sup>。

目前, 煤矸石与生物质混合燃烧的研究大多关注燃烧性能的提高, 较少关注煤矸石对生物质结渣

的影响。本文进行了葵花秸秆与煤矸石混合燃烧实验, 探究煤矸石和生物质混合燃烧特性, 并通过分析燃料的灰熔融特性研究不同配比、燃烧温度下煤矸石对抑制生物质结渣效果的影响, 并明确其抑制结渣机理。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验选用的葵花秸秆 (SS) 是华北平原地区的主要经济农作物, 在农业废弃物中具有较高碱金属含量和氯元素含量, 有一定的代表性。实验用煤矸石 (CG) 来自内蒙古鄂尔多斯某煤矿。SS 与 CG 的工业分析和元素分析见表 1。

表 1 试样的工业分析和元素分析 单位:  $w_{ad}/\%$   
Tab.1 Industrial analysis and elemental analysis of samples

样品	工业分析/%				元素分析/%				
	M	A	V	FC	C	H	O	N	S
CG	0.97	57.00	20.90	22.35	19.99	1.89	19.60	0.47	1.30
SS	8.98	4.16	60.64	8.23	42.52	5.18	20.58	0.50	0.09

对实验所用的 SS 和 CG 燃烧后的灰样进行无机元素质量分数分析测定, 结果见表 2。SS 中碱金属元素和 Cl 元素含量较高, 这些是造成生物质在燃烧过程中结渣的主要元素。CG 中含有较多的 Al、Si 元素, 这些是 CG 可以减轻生物质燃烧结渣倾向的关键元素。

表 2 试样无机元素质量分数 单位:  $w/\%$   
Tab.2 Mass fractions of inorganic elements in the samples

试样	Mg	Na	K	Al	Si	P	S	Cl	Ca	O
CG	0.310	0.230	0.100	28.460	13.930	1.980	0.510	0.010	0.050	54.410
SS	4.010	1.270	6.090	0	0.140	9.120	3.895	5.640	5.850	63.980

### 1.2 葵花秸秆与煤矸石混合燃烧实验

CG 与 SS 混合燃烧实验在管式炉燃烧系统上进行。基于实验设计的合理性, 选取 CG 添加量低、中、高 3 个范围, 有助于观察 CG 添加量对生物质燃烧性能的影响。按照不同添加比例 (质量分数

10%、20%、30%) 称取生物质粉末与 CG 粉末, 采用机械搅拌器搅拌均匀, 得到混合样品。用电子天平称量混合均匀的样品 10 g, 均匀地平铺于瓷舟中, 送入管式炉中。实验先将炉温以 40 °C/min 升温速率升至 250 °C, 保温 30 min 后, 继续升温至设定温度 (600、700、800、900 °C), 恒温灼烧 2 h。不同方法制备的灰样可以用 CXSY-Z 表示, 例如添加 20% 的 CG 在 800 °C 燃烧制备的灰样可以表示为 C2S8-800。

### 1.3 煤矸石与葵花秸秆灰熔融特性影响实验

根据中国国家标准《固体生物质燃料灰熔融性测定方法》(GB/T 30726—2014), 将灰样制备成标准灰锥并在智能灰熔点测定仪中测定灰样的特征熔融温度: 初始变形温度 (DT)、软化温度 (ST)、半球温度 (HT) 和流动温度 (FT) [11]。将灰样研磨至粒径小于 0.106 mm, 取 1~2 g 灰样放在玻璃板上, 将灰样铲入灰锥模中挤压成型, 于 60 °C 下干燥, 将干燥之后的灰锥放置于灰锥托板上, 最后放入刚玉舟中 [12]。在刚玉舟中央放置 5~6 g 石墨粉, 将刚玉管缓慢推入智能灰熔点测定仪的刚玉管中心, 启动测定仪, 开始加热。当炉温低于 700 °C 时, 升温速率为 15~20 °C/min; 超过 700 °C 时, 升温速率为 4~6 °C/min, 通气速度为 800~1 000 mL/min。每隔 1 min 进行 1 次摄像, 随时观察灰锥的形态变化, 记录灰锥的 4 个熔融特征温度。

### 1.4 分析方法

采用 TG-DTG 方法描述混合样燃烧特性的参数, 具体各项参数有着火温度  $T_i$ 、最大失重速率  $DTG_{max}$ 、燃尽温度  $T_h$ 、平均燃烧速率  $V_{mean}$ 、可燃性指数  $C$ 、综合燃烧特性指数  $S$  等 [13-14]。

平均燃烧速率  $V_{mean}$ 、可燃性指数  $C$ 、综合燃烧特性指数  $S$  可用公式表示为:

$$V_{mean} = \frac{(w_1 - w_2)}{t} \quad (1)$$

$$C = \frac{(d_a / d_t)_{max}}{T_i^2} \quad (2)$$

$$S = \frac{(d_w / d_t)_{max} (d_w / d_t)_{mean}}{(T_i^2 T_e)} \quad (3)$$

式中:  $w_1$  为样品着火前的质量, mg;  $w_2$  为样品在燃尽温度时对应的质量, mg;  $t$  为样品从着火到燃尽温度时所用的时间, min;  $(d_a / d_t)_{max}$  为样品的最大失重速率, %/min;  $(d_w / d_t)_{max}$  为样品最大燃烧速率, %/min;  $(d_w / d_t)_{mean}$  为样品平均燃烧速率, %/min;  $T_i$  为样品着火点温度, °C;  $T_e$  为样品燃尽温度, °C。

使用扫描电子显微镜 (SEM) 对灰样的微观形貌进行分析测试; 使用电感耦合等离子光谱发生仪 (ICP-AES) 对灰样进行消解处理测定灰样中碱金属元素的含量; 使用 X 射线衍射分析仪 (XRD) 对灰样的物相进行检索, 从分子层面解释引起生物质积灰结渣和腐蚀问题的原因; 采用 5E-AF4000 型智能灰分熔融测定仪对样品进行灰熔融温度测试 [14]。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 煤矸石与葵花秸秆混合燃烧特性

在升温速率为 20 °C/min 条件下, 煤矸石 CG 以 0、10%、20%、30% 比例与葵花秸秆 SS 混合掺烧, 混合物记为 SS、C1S9、C2S8、C3S7, 实验的 TG 和 DTG 曲线如图 1 所示。根据燃烧实验法, 在炉内直接点燃样品, 通过观察燃烧现象, 发现生物质可以改善燃烧稳定性, 减少结渣现象。通常情况下, 固体燃料的燃烧过程可以分为 3 个阶段, 按照发生顺序依次为水分蒸发、挥发释放以及焦炭燃烧 [15]。

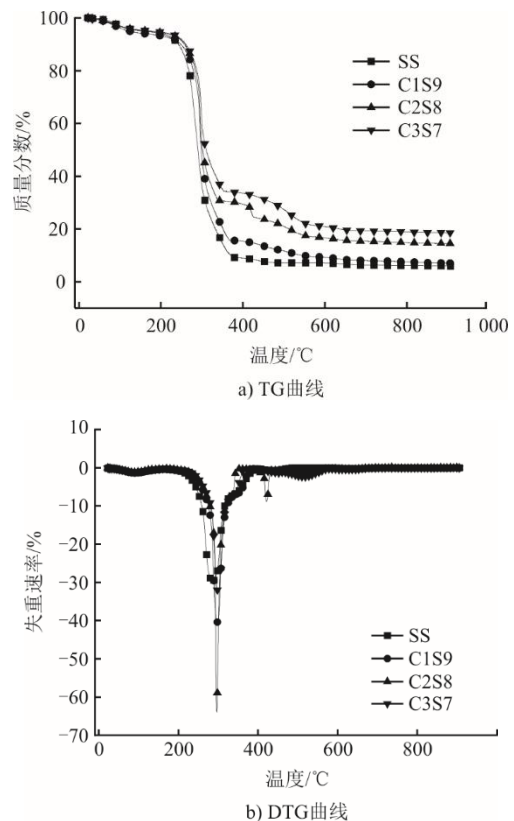


图1 CG与SS不同配比燃烧TG、DTG曲线  
Fig.1 TG and DTG curves of different proportions of coal gangue and sunflower straw burning

由图1可见: 随着CG配比的增加, 混合试样燃烧后剩余质量比也呈现依次降低趋势; 在DTG曲线上, 不同配比的混合试样均在约96.5、299.0、

422.0 °C 出现 3 个较明显失重峰点, 其中第 2 个失重峰值点较大。DTG 曲线上第 1 个失重峰为脱水失重阶段, 温度范围在 0~171 °C, 此时, 混合试样内部水吸热蒸发导致失重<sup>[16]</sup>; 第 2 个失重峰为挥发分析出燃烧阶段, 温度范围在 171~335 °C, 在此阶段混合试样中生物质成分内的纤维素、半纤维素以及部分木质素受热分解释放挥发分和 CG 内受热析出的挥发分发生燃烧, 此处燃烧反应为混合样整个燃烧阶段最主要的过程<sup>[17]</sup>; 第 3 个失重峰为固定碳燃烧阶段, 温度范围在 335~900 °C, 此阶段混合试样中剩余木质素和固定碳发生着火及燃烧, 由于此混合试样中 SS 半纤维素和纤维素分解温度略有差异且半纤维含量较低等特殊性质, 导致此混合实验 DTG 燃烧曲线的高温阶段未出现较为明显的侧峰出现, 这也是第 3 阶段失重峰并不明显的主要原因<sup>[18]</sup>。

对 CG 与 SS 混合试样燃烧过程中燃烧特性进行计算, 结果见表 3。将不同配比的混合试样燃烧参数与图 1 进行对比分析可知, CG 中加入生物质后着火点温度明显降低, 燃尽温度有所升高。这是由于生物质中含有大量纤维素、半纤维素以及木质素, 纤维素和半纤维素在低温区的挥发分燃烧阶段失重速率较大, 木质素则在高温区的焦炭燃烧阶段失重速率较大, 而半纤维素与纤维素热解析出较多的挥发分燃烧, 提供给着火温度较高的 CG 中挥发析出着火需要的热量<sup>[19]</sup>。与 CG 单独燃烧相比, 添加 SS 后, 混合试样综合燃烧特性指数得到了很大提高, SS 质量分数为 80% 时, 混合样综合燃烧特性指数最高。综上, 将 CG 与 SS 混合燃烧后, 能够有效提高 CG 综合燃烧性能, CG 质量分数为 20% 时效果最明显。

表 3 CG 与 SS 不同比例混合燃烧特征参数  
Tab.3 Characteristic parameters of co-combustion of coal gangue and sunflower straw

样品	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_e/^\circ\text{C}$	$V_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{\text{DTGmax}}/^\circ\text{C}$	$V_{\text{mean}}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$C/(\times 10^4 \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$S/(\times 10^7 \cdot \text{min}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-3})$
CG	453.6	675.6	6.490	514.5	2.3	0.32	1.09
C1S9	253.1	718.2	40.400	275.5	4.0	6.30	35.00
C2S8	261.2	747.7	63.890	273.6	3.4	9.36	42.60
C3S7	259.1	754.1	32.390	277.1	3.2	4.82	20.50

## 2.2 掺烧煤矸石对葵花秸秆结渣特性的影响

### 2.2.1 K、Na 固定率

SS 添加 0、10%、20%、30% 质量分数的 CG 后在燃烧温度为 600、700、800、900 °C 时制得的生物质灰样, 采用 ICP-AES 测定其 K、Na 质量分数, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 不同温度下 SS 灰样中 K、Na 的质量分数随 CG 添加比例增加的变化趋势大致相近。随着燃烧温度的升高, 灰样中 K、Na 质量分数随之减少, 这是因为温度的升高, 会促进碱金属元素的气相释放。尤其在 800 °C 以后, 灰样中 K、Na 元素的气相释放速率增加, 灰中固定的碱金属元素质量分数减少<sup>[20]</sup>。随着 CG 添加比例的增大, 灰样中 K、Na 质量分数随之增大, 这是由于 CG 的加入与 SS 中 K、Na 碱金属元素反应生成碱金属硅铝酸盐, 从而富集在灰中, 达到提高灰样固 K、Na 的效果, 并在 CG 添加比为 20% 时, 固定效果最好。CG 添加比为 30% 时, 固定效果下降, 可能是由于 CG 质量分数的增加, 碱土金属元素会优先与 Si、Al 组分结合, 抑制了碱金属的固定, 从而以气相的形式释放<sup>[21]</sup>。

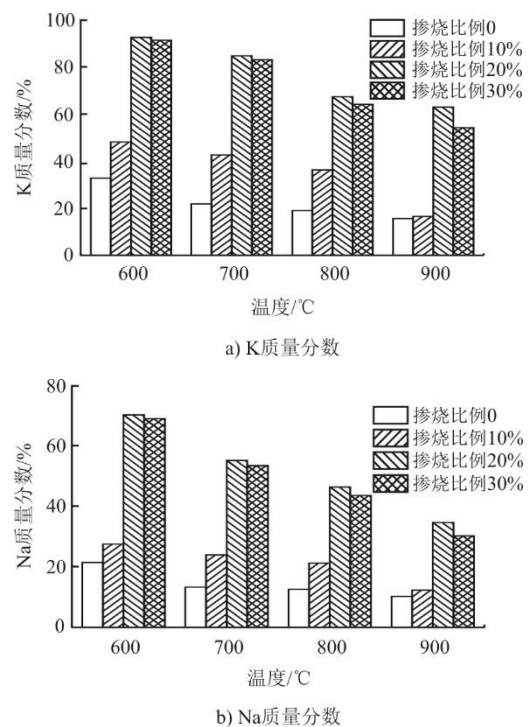


图 2 不同温度和 CG 掺烧比例下 SS 灰的 K、Na 固定率  
Fig.2 K/Na fixation rates of sunflower straw ash at different temperatures and blending ratios

2.2.2 物相分析

取添加不同比例 CG 的 SS 在燃烧温度为 600、700、800、900 °C 时制得的生物质灰样，采用 XRD 测定其物相如图 3 所示。

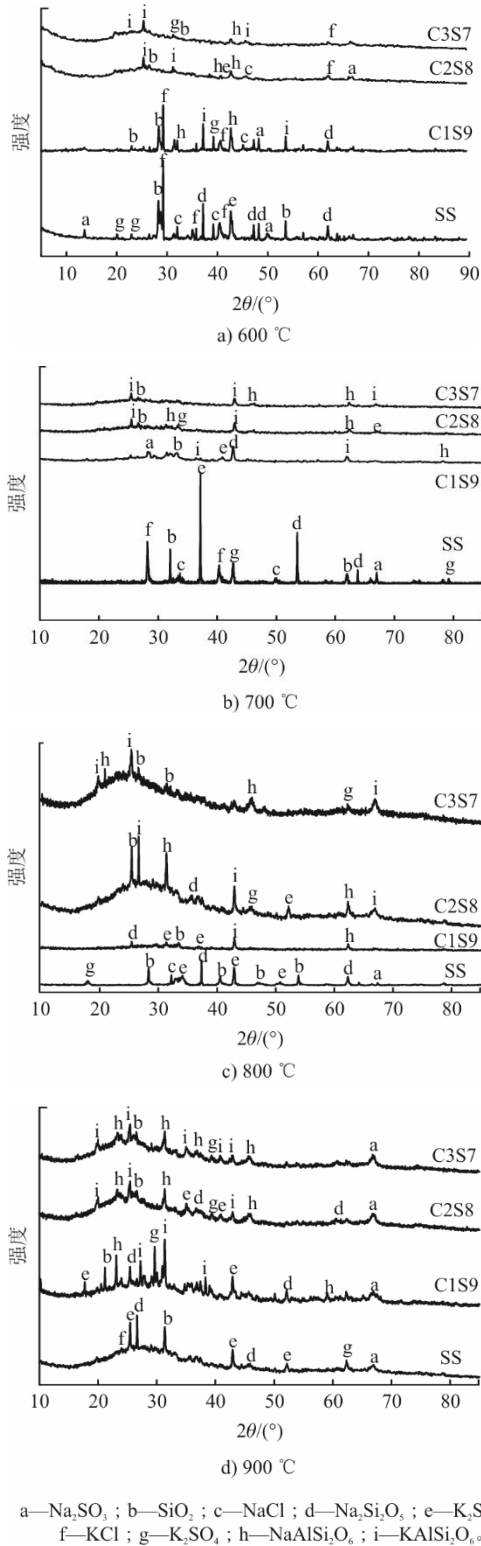


图3 不同温度下 CG 与 SS 混烧灰 XRD 物相图谱  
Fig.3 XRD patterns of coal gangue and sunflower straw mixed burning ash at different temperatures

由图 3a)可见，当温度为 600 °C 时，SS 燃烧灰样中存在较强的 KCl 等碱金属氯化物衍射峰。当添加 CG 后，灰样中碱金属氯化物衍射峰强度相对降低，反观灰中出现了碱金属硅铝酸盐衍射峰，并且其强度随 CG 添加比例的增加而升高，说明 CG 的加入与 SS 中碱金属反应生成了性质更为稳定，熔点更高的碱金属硅铝酸盐<sup>[22]</sup>。当温度为 700 °C 时 (图 3b)，SS 燃烧灰样中出现了碱金属硅酸盐的较强衍射峰，碱金属氯化物衍射峰强度继续下降；当添加 10%~30%CG 后，可以发现灰样中碱金属硅酸盐衍射峰强度逐渐下降，而碱金属硅铝酸盐衍射峰强度急剧上升，说明加入 CG 后碱金属元素被大量富集在灰中并以更稳定、更高熔点的硅铝酸盐形式存在。当温度达到 800 °C、900 °C 时 (图 3c)、图 3d)，SS 灰样中均未表现出碱金属氯化物衍射峰，仅呈现碱金属硅酸盐、碱金属硫酸盐以及 SiO<sub>2</sub> 等衍射峰，这表明碱金属氯化物一部分受热释放进入气相，另外一部分转变为其他物质形式存在于灰中<sup>[9]</sup>；当添加 20%CG 后灰样中碱金属硅铝酸盐衍射峰强度最高；当 CG 添加比例达到 30% 时，KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 的峰强度降低，碱金属硅铝酸盐的含量降低。这是因为过量的 CG 导致碱土金属元素优先与 Al、Si 元素反应生成碱土金属硅铝酸盐，抑制了碱金属硅铝酸盐的形成。随着 CG 添加比例的增加，不同温度下碱金属硅酸盐衍射峰的强度均表现出逐渐下降的趋势直至完全消失。因此，掺烧 CG 可以改善 SS 灰熔融特性，从而达到减轻结渣、烧结趋势的效果。

2.2.3 微观形貌分析

将添加不同配比 CG 的 SS 燃烧温度为 800 °C 下制得的生物质灰样研磨后，利用 SEM 将其放大到 5 000 倍，其微观形貌如图 4 所示。由图 4 可见：800 °C 时 SS 单独燃烧结渣程度较为严重，灰样颗粒间已经出现明显的熔融团聚现象，当添加不同比例 CG 后，SS 燃烧结渣现象整体得到改善；当 CG 添加剂比例为 10% 时，灰样呈云状结构分布，部分灰颗粒表面多细孔，但此时依旧有较多光滑熔融颗粒附着于灰样中，表明此添加比例下，SS 燃烧结渣被抑制效果较小；当 CG 添加比例增加到 20% 时，灰样呈现无定形态蜂窝状结构，并且其表面附着了部分絮状颗粒，这是由于高温下，CG 中高岭石受热转变为偏高岭石，偏高岭石是一种有效的碱金属捕获成分<sup>[23]</sup>，能够更好地捕集 SS 中的碱金属，减轻

结渣；当 CG 添加剂比例达到 30% 时，SS 灰样呈现四散分布的大小不均颗粒状，颗粒间也未熔融粘连，此时 SS 燃烧结渣问题已得到明显改善。

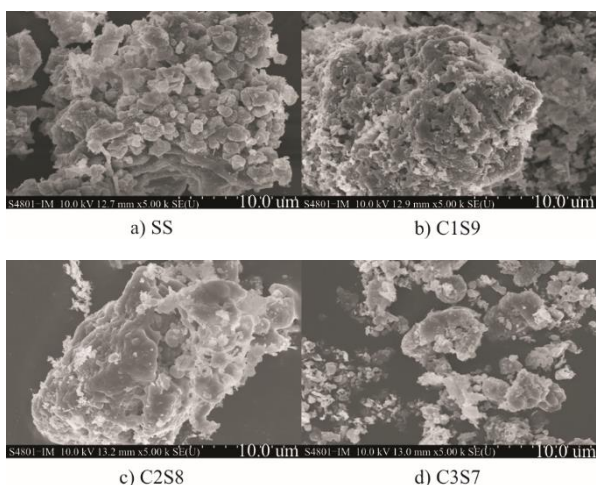


图 4 800 °C 下不同 CG 添加比例下 SS 的灰样微观形貌  
Fig.4 The microscopic morphologies of sunflower straw ash samples with different coal gangue addition ratios at 800 °C

### 2.3 煤矸石与生物质混合燃烧的灰熔融温度

由 XRD 图可知，当温度达到 800 °C 后，碱金属氯化物由于受热开始转变为气相，灰分中碱金属含量会随着温度的升高而减小<sup>[24]</sup>。为了降低由此造成的生物质灰熔融特征温度的测定误差，选择 800 °C 成灰制成灰锥，测得 SS 灰以及 CG 与 SS 混烧灰熔融特征温度，结果见表 4、图 5。参照煤结渣判断标准，当煤的软化温度 ST 低于 1 260 °C 时，判定煤灰在锅炉受热面会发生严重结渣倾向。根据表 4 数据显示，本文选用的 SS 属于严重结渣范围。SS 中 K 元素含量较高，并且熔融温度较低。

表 4 不同配比 CG 与 SS 混燃灰熔融特征温度 单位：°C  
Tab.4 Melting characteristic temperatures of coal gangue and sunflower straw co-combustion ash with different mixing ratios

样品	灰熔融特征温度			
	初始变形温度 DT	软化温度 ST	半球温度 HT	流动温度 FT
SS	1 240	1 250	1 270	1 360
C1S9	1 360	1 380	1 420	1 520
C2S8	1 430	1 470	1 500	1 560
C3S7	1 420	1 450	1 480	1 530

适量添加质量分数为 10%~30% 的 CG 后，对 SS 灰中的特征温度有较为明显的影响。当 CG 质量分数从 0~10% 时，熔融温度上升速率相对最快，这是因为在添加 CG 后，低熔点的碱金属硅酸盐在氧

化铝的作用下会转变为高熔点的碱金属硅铝酸盐，灰熔融温度得到提高<sup>[25]</sup>。当 CG 质量分数从 10% 增加到 20% 时，灰熔融温度上升速率降低，并在质量分数 20% 时达到最高温度，DT 为 1 430 °C、ST 为 1 470 °C、HT 为 1 500 °C、FT 为 1 560 °C。当 CG 质量分数从 20% 增加到 30% 时，SS 灰熔融温度开始呈缓慢下降趋势，这是因为无机元素增加，会优先与 Si、Al 组分结合，降低碱金属硅铝酸盐的含量，从而导致灰熔融温度降低。综上，加入 CG 后灰熔融温度明显大幅提升，尤其以 20% 比例加入 CG 对灰熔融温度提升最大，这说明 CG 掺烧对 SS 燃烧结渣具有很好的抑制效果，并且以 20% 掺烧比例抑制结渣效果最优。

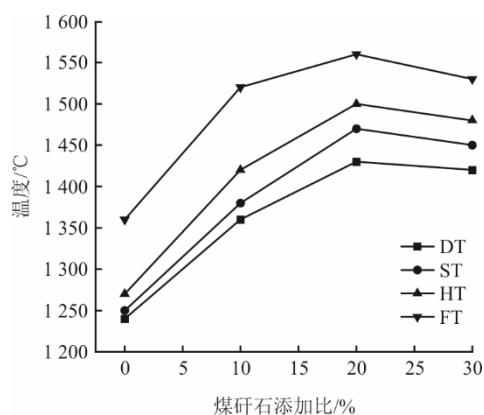


图 5 CG 质量分数对 SS 灰熔融温度影响  
Fig.5 Effect of coal gangue mass fraction on ash fusion temperature of sunflower straw

## 3 结 论

1) CG 加入 SS 中混合燃烧，能够有效降低 CG 燃料着火点温度，同时复合燃料的可燃性指数和综合燃烧性能有一定提高。

2) 随着 CG 添加比例的增加，碱金属元素以高熔点碱金属硅铝酸盐的形式被固定在灰样中，灰样中 K、Na 元素质量分数明显增加，灰样的熔融面逐渐减少，灰样熔融结渣程度得到有效缓解和抑制。

3) 随着温度升高，灰样中 K、Na 元素质量分数逐渐降低，这是因为温度升高，会促进气相碱金属元素释放。通过 XRD 可以得出，灰样中 K、Na 元素在 800 °C 以后开始以气相的形式释放。

### [参 考 文 献]

- [1] G Z H, LIU S Y, WENG W B, et al. Alkali metal release in thermochemical conversion of biomass and coal: Optical measurements and modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, 100: 101-131.
- [2] HAO X J, YAO P, YU R Z, et al. Insight into the influence of water leaching on ash fusion behavior and

- alkali metal migration for corn and rice straw[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 110: 101362.
- [3] 杨国芳, 贾相如. 生物质与煤矸石混烧研究综述[J]. 工业加热, 2018, 47(5): 1-4.  
YANG Guofang, JIA Xiangru. A review of biomass and gangue mixed combustion research[J]. Industrial Heating, 2018, 47(5): 1-4.
- [4] LI J Y, WANG J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117946.
- [5] 郝松涛, 宋长忠, 贾相如, 等. 烘焙生物质与煤矸石混合燃烧特性及协同作用分析[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(增刊 2): 375-381.  
HAO Songtao, SONG Changzhong, JIA Xiangru, et al. Analysis of combustion characteristics and synergistic effect of baked biomass mixed with gangue[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(Suppl.2): 375-381.
- [6] ZHOU C C, LIU G J, FANG T, et al. Investigation on thermal and trace element characteristics during co-combustion biomass with coal gangue[J]. Bioresource Technology, 2015, 175: 454-462.
- [7] 赵亚斌, 贾相如, 杨国芳, 等. 生物质与煤矸石混烧特性及动力学特征[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(增刊 1): 161-165.  
ZHAO Yabin, JIA Xiangru, YANG Guofang, et al. Characterization and dynamics of biomass and gangue mixing[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(Suppl.1): 161-165.
- [8] 王新华. 煤矸石及其掺混生物质木屑的燃烧特性实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 1.  
WANG Xinhua. Experimental study on combustion characteristics of gangue and its blended biomass wood chips[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019, 2019: 1
- [9] LIU L, REN S, YANG J, et al. Experimental study on K migration, ash fouling/slugging behaviors and CO<sub>2</sub> emission during co-combustion of rice straw and coal gangu[J]. Energy, 2022, 251: 123950.
- [10] 金康华, 章康, 季银飞, 等. 煤与生物质中高温共热解特性研究[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 39-45.  
JIN Kanghua, ZHANG Kang, JI Yinfei, et al. Characterization of medium and high temperature co-pyrolysis of coal and biomass[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 39-45
- [11] 石文举, 颜井冲, 白进, 等. 高碱煤灰渣结渣倾向及过程[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(7): 140-147.  
SHI Wenju, YAN Jingchong, BAI Jin, et al. Slagging tendency and process of high alkali coal ash slag[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(7): 140-147
- [12] 王翠萍, 赵发宝. 煤质分析及煤化工产品检测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1.  
WANG Cuiping, ZHAO Fabao. Coal quality analysis and coal chemical product testing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 1.
- [13] 郝松涛, 宋长忠, 贾相如, 等. 烘焙温度对玉米秸秆与煤矸石混合燃烧特性的影响[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(增刊 2): 266-271.  
HAO Songtao, SONG Changzhong, JIA Xiangru, et al. Effect of baking temperature on combustion characteristics of corn stover mixed with gangue[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(Suppl.2): 266-271.
- [14] 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 Zhihao, JIN Jing, ZHANG Ruipu, et al. Effects of dolomite additives on the melting characteristics and potassium-solidifying capacity of rice straw ash[J]. Journal of Fuel Chemistry, 2020, 48(7): 795-803.
- [15] EVELINE R K, CINTIA M, OZAIR S, et al. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75: 603-608.
- [16] 高佳佳, 覃建果, 魏小林, 等. 新型低煤份生物质混合燃料燃烧特性实验[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 61-67.  
GAO Jiajia, QIN Jianguo, WEI Xiaolin, et al. Experiments on combustion characteristics of new low-coal biomass blended fuel[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 61-67
- [17] 蒲飏, 张力, 王炯, 等. 生物质与煤矸石混烧特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(2): 333-335.  
PU Ge, ZHANG Li, WANG Jiong, et al. Experimental study on the mixing characteristics of biomass and gangue[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(2): 333-335.
- [18] 马辉, 汪海洋, 韩辉, 等. 多种生物质与煤掺混燃烧特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 167-172.  
MA Hui, WANG Chaoyang, HAN Hui, et al. Combustion characterization of various biomass and coal blends[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 167-172.
- [19] 王廷旭, 方庆艳, 马仑, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下生物质三组分的燃烧特性[J]. 煤炭转化, 2017, 40(6): 71-77.  
WANG Tingxu, FANG Qingyan, MA Lun, et al. Combustion characteristics of biomass three components under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere[J]. Coal Conversion, 2017, 40(6): 71-77.
- [20] 周巍, 王浩帆, 熊晟熙, 等. 煤与生物质耦合燃烧的协同效应[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(2): 279-287.  
ZHOU Wei, WANG Haofan, XIONG Shengxi, et al. Synergistic effect of coupled combustion of coal and biomass[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(2): 279-287.
- [21] 周骏, 刘倩, 钟文琪, 等. 生物质混煤燃烧过程中钾的迁移转化规律[J]. 燃料化学学报, 2020, 48(8): 929-936.  
ZHOU Jun, LIU Qian, ZHONG Wenqi, et al. Migration and transformation of potassium during combustion of biomass-blended coal[J]. Journal of Fuel Chemistry, 2020, 48(8): 929-936.
- [22] 黄顺进, 张丽, 颜井冲, 等. 高碱煤与煤矸石掺烧 SO<sub>2</sub> 和 NO 减排及结渣抑制研究[J]. 化工学报, 2022, 73(12): 5581-5591.  
HUANG Shunjin, ZHANG Li, YAN Jingchong, et al. SO<sub>2</sub> and NO emission reduction and slagging inhibition of high alkali coal blended with gangue[J]. Journal of Chemical Engineering, 2022, 73(12): 5581-5591.
- [23] NIU Y Q, TAN H Z, HUI S E. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 52: 1-61.
- [24] 胡云鹏, 程世庆, 孙鹏, 等. 生物质及其与煤掺烧的灰熔融特性研究[J]. 热力发电, 2011, 40(10): 8-12.  
HU Yunpeng, CHENG Shiqing, SUN Peng, et al. Study on the ash melting characteristics of biomass and its blending with coal[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(10): 8-12.
- [25] JIA X R, CHENG Z B, YUN F, et al. Investigation of coal gangue on mitigating slagging of wheat straw[J]. Solid Fuel Chemistry, 2023, 57(7): 502-512.

(责任编辑 杨嘉蕾)