

小麦秸秆燃烧过程中碱金属释放特性

李慧君¹, 谢兴运^{1,3}, 赵京^{2,3}, 张玉锋^{2,3}, 魏小林^{2,3}

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003; 2. 中国科学院 力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 生物质作为可再生洁净能源, 在中国能源结构中占据越来越重要的地位。生物质中碱金属元素(主要是K)含量丰富, 是生物质灰的主要成分。由于碱金属无机盐(如KCl)具有较低的熔点, 因此生物质内碱金属极易在燃烧中释放, 此特性给生物质能源的开发及利用带来了严重的技术安全问题。在生物质燃烧过程中, 部分碱金属灰分气态释放后, 易于凝结、吸附并沉积在锅炉炉膛受热表面, 造成玷污、结垢及积灰等问题, 严重影响锅炉的换热, 甚至造成腐蚀。因此, 研究生物质燃烧过程中碱金属元素的释放规律及机理, 将为我国生物质的清洁高效利用提供有力的理论支持, 具有较好的社会经济及学术意义。以小麦秸秆为试验对象, 研究生物质燃烧过程中碱金属的释放特性, 通过水平管式炉及XRD、SEM-EDS等检测手段, 研究了燃烧温度400~900℃碱金属的释放特性。结果表明, 碱金属K主要以水溶性形式存在, 碱土金属Ca、Mg主要以醋酸铵溶及水溶性形式存在。水溶性K主要以KCl、KNO₃、K₂SO₄和K₃PO₄的水合离子或晶体存在。燃烧过程中, 400℃内主要释放有机K及少量无机K, 400~600℃时, K释放主要以KNO₃的无机K为主, 600℃以上时主要以KCl和KNO₃释放。碱土金属Ca和Mg会形成较稳定的化合物, 不易释放。通过对灰渣表面元素富集状况分析可知, K与Cl含量同步变化: 600℃内, K与Cl含量同步增长, 主要因为有较多碱金属化合物以KCl的形式析出; 高于600℃时, 灰渣表面K与Cl含量减少, 主要因为KCl与SiO₂等发生反应或直接以KCl的形式释放。

关键词: 小麦秸秆; 碱金属; 赋存形态; 释放特性

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2019)02-0062-07

Release characteristics of alkali metals during wheat straw burning

LI Huijun¹, XIE Xingyun^{1,3}, ZHAO Jing^{2,3}, ZHANG Yufeng^{2,3}, WEI Xiaolin^{2,3}

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. College of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a renewable and clean energy, biomass will play an increasingly important role in Chinese energy structure. The content of alkali metal elements (mainly K) in biomass is usually relatively rich, and it is the main component of biomass ash. Alkali metals in biomass are easily released in combustion due to the low melting point of alkali metal inorganic salts (for example, KCl), which brings serious technical safety problems to the development and utilization of biomass energy. In the biomass combustion process, partial alkali metal ash is easy to condense, adsorb and deposit on the heated surface of the boiler chamber after the gaseous release, which causes problems such as pollution, scale formation and ash accumulation and seriously affects the heat transfer of the boiler and even causes corrosion. Therefore, the release law and mechanism of alkali metal elements in the process of biomass combustion research will provide strong theoretical support for the clean and efficient utilization of biomass in China, which has good socio-economic and academic significance. In this paper, the release characteristics of alkali metals in the biomass combustion process of wheat straw were studied. The release characteristics of alkali

收稿日期: 2018-12-29; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18122912

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51736010)

作者简介: 李慧君(1964—), 男, 吉林四平人, 教授, 主要研究方向为强化换热及数值计算、燃料燃烧、余热利用。E-mail: hj_li009@sina.com。通讯作者: 魏小林(1967—), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为煤与生物质燃烧、高效清洁利用。E-mail: xlwei@imech.ac.cn

引用格式: 李慧君, 谢兴运, 赵京, 等. 小麦秸秆燃烧过程中碱金属释放特性[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(2): 62-68.

LI Huijun, XIE Xingyun, ZHAO Jing, et al. Release characteristics of alkali metals during wheat straw burning[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 62-68.



移动阅读

metals at the combustion temperature of 400–900 °C were researched through the horizontal tube furnace and XRD, SEM–EDS and other test means. The results show that alkali metal K mainly exists in the form of water soluble, while alkali earth metals Ca and Mg mainly exists in the form of ammonium acetate soluble and water soluble. Water-soluble K mainly exists in hydrated ions or crystals of KCl, KNO_3 , K_2SO_4 and K_3PO_4 . In the combustion process, the main organic K and a small amount of inorganic K release within 400 °C, inorganic potassium in the form of KNO_3 is mainly released within 400–600 °C, KCl and KNO_3 are mainly released above 600 °C. Alkaline earth metals Ca and Mg form relatively stable compounds which are not easy to release. K and Cl contents change synchronously according to the analysis of element enrichment on the ash surface, K and Cl contents grow simultaneously below 600 °C mainly because there are more alkali metal compounds in the form of KCl. K and Cl contents on the surface of ash surface reduce over 600 °C mainly because KCl reacts with SiO_2 , or directly release in the form of KCl.

Key words: wheat straw; alkali metal; occurrence form; release characteristics

0 引言

生物质是一种日渐重视的可再生能源,具有 CO_2 近零排放的特性^[1]。我国拥有种类繁多的生物质资源,仅农作物每年产量达 8 亿 t, 约占生物质资源总量的 50%^[2]。目前我国农作物利用率仅有 30%, 处理后再被利用的生物质资源也仅占 2.6%, 因此我国生物质具有很大的开发潜力^[3]。但生物质中碱金属含量较高, 易出现沾污、积灰、形成烟气走廊及管磨损泄露等问题, 严重影响锅炉的正常运行, 限制了生物质在发电行业的大量应用^[4–7]。

目前, 学者们对生物质及煤中碱金属的燃烧释放特性进行了大量研究。Liao 等^[8]研究了稻秆燃烧过程 K 的迁移行为, 在燃烧初期, 部分 K 随挥发分一同释放, 在 500 °C 以上时, 无机 K 释放到气相中。刘敬等^[9]发现, 准东煤中 Na 在 400 ~ 600 °C 时释放析出最快, 且析出主要发生在燃烧后期。煤燃烧过程中 Na 析出后易与烟气中的 SO_2 或 SO_3 反应生成

低熔点的 Na_2SO_4 , 不仅黏附撞击受热面的颗粒, 且腐蚀受热面^[10]。

现有关于生物质碱金属赋存的研究基本均认为水溶性 K 为碱金属 K 的主要存在形式。但是对于生物质水溶性 K 具体成分构成仍不清晰, 且对燃烧过程碱金属 K 的释放特性还没有广泛认同的结论。本文以鲁西北的小麦秸秆为研究对象, 采用化学分馏试验及 SEM–EDS 研究碱金属 K 的赋存形态及分布特性; 在燃烧温度 400 ~ 900 °C 研究温度对碱金属 K 释放特性的影响。

1 试验

1.1 试验样品

以粒径小于 0.56 mm 的小麦秸秆粉末为试验样品, 其碱(土)金属含量(以灰分计)为: K, 1.938 6 mg/g; Ca, 0.546 6 mg/g; Na, 0.059 4 mg/g; Mg, 0.138 3 mg/g。试验样品的空气干燥基的工业分析和元素分析见表 1。

表 1 小麦秸秆工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of wheat straw

工业分析/%				$Q_{\text{net,ad}}/$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	元素分析/%					
M_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	A_{ad}		C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	Cl_{ad}
2.74	59.32	28.66	9.28	15.73	41.82	5.209	43.45	0.80	0.12	1.053

1.2 试验装置

水平管式炉试验系统如图 1 所示, 系统由氮气罐、空气罐、水平管式炉、温控仪及烟气分析仪等组成, 反应室由直径为 70 mm 的石英管制成, 由电阻丝均匀加热。

1.3 化学分馏试验

采用化学分馏试验测定生物质或煤碱金属的赋存形态。取 2 g 小麦秸秆样品放入去离子水中, 温度设定为 60 °C, 在磁力搅拌器中搅拌 24 h 后用滤纸过滤并定容到 80 mL, 将水洗过滤的残留物干燥

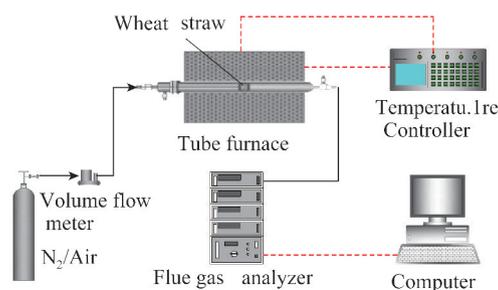


图 1 水平管式炉试验系统

Fig. 1 Experimental system of horizontal tube furnace

到质量恒定并记录数据;将水洗残留物放入 1 mol/L 的醋酸铵溶液中,重复上述步骤;将醋酸铵洗过滤后的残留物放入 1 mol/L 的稀盐酸溶液,重复上述的步骤;最后的残渣用氢氟酸溶解。运用 ICP-AES (电感耦合原子发射光谱仪) 及 IC 离子分析仪对滤液进行定量分析,为防止误差,试验重复 3 次,取平均值。

1.4 燃烧试验

为研究小麦秸秆燃烧过程中温度对碱金属释放迁移的影响,选取燃烧温度为 400~900 °C。将空气通入管式炉 10 min,空气流速为 1 L/min,将管式炉加热到设定温度,迅速将装有 3 g 样品的方舟放入管式炉中,恒温下保持 10 min,保证样品在管式炉内充分燃烧。采用 DX4000 烟气分析仪测量烟气 (CO₂、HCl 等) 含量,10 min 后将样品拉至出口处以 N₂ 为保护气冷却至室温,取出称量收集。

1.5 XRD 及 SEM-EDS 检测

对小麦秸秆热解过程得到的灰渣进行 XRD 检测,扫描方式为 2θ/θ 耦合连续扫描,扫描角度为 5°~80°。XRD 谱图经 Jade 6.0 软件处理分析,从而获得样品的成分、内部原子或分子的结构或形态等。通过对灰渣进行 SEM-EDS 检测,得到灰渣表面化学分布和颗粒结构。

2 结果与分析

2.1 小麦秸秆中碱(土)金属赋存形态

生物质中碱(土)金属可分为水溶性(WS)、醋酸铵溶性(NACS)、酸溶性(HS)及不溶(NS)。小麦秸秆中碱(土)金属赋存形态分布如图 2 所示。小麦秸秆中水溶性 K 和醋酸铵溶性 K 的脱除率分别

为 75.98%、16.08%;水溶性 Na、醋酸铵溶性 Na、酸溶性 Na 的脱除率分别为 42.19%、40.63%、12.5%,说明小麦秸秆碱金属 K 主要以水溶性存在,以醋酸铵溶性存在的 K 占比次之,酸溶和不溶性占比较少;Na 主要以水溶性和醋酸铵溶性存在。小麦秸秆水溶性 Ca、醋酸铵溶性 Ca 的脱除率分别为 27.95%、54.42%;水溶性 Mg、醋酸铵溶性 Mg 的脱除率分别为 38.84%、40.28%,Ca、Mg 酸溶与不溶性含量较少,说明小麦秸秆中 Ca、Mg 主要以醋酸铵溶性与水溶性的形式存在。

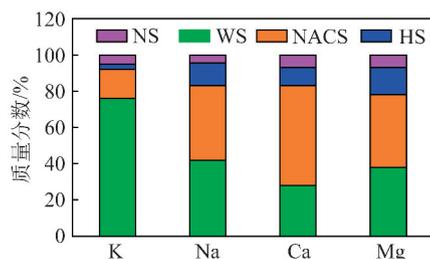


图 2 小麦秸秆中碱(土)金属赋存形态分析

Fig. 2 Analysis of the occurrence form of alkali (earth) metal in wheat straw

小麦秸秆滤液阴阳离子浓度见表 2。阳离子主要以 K⁺、Ca²⁺ 为主,阴离子主要以 Cl⁻、NO₃⁻ 为主。根据溶液电荷守恒计算,小麦秸秆水洗滤液阳离子总电荷数为 13.974 5 mmol/L,阴离子总电荷数为 14.093 9 mmol/L。溶液中阴阳离子电荷基本守恒,阴离子价位略高于阳离子,这是由于仪器精度限制以及测量误差引起的。可认为样品中水溶性 K 主要以 KCl、KNO₃、K₂SO₄、K₃PO₄ 等水合离子或晶体存在,样品中含有较多的硝酸根,主要是由于植物生长时施加钾肥氮肥造成的。

表 2 小麦秸秆滤液阴阳离子浓度

Table 2 Wheat straw washed with water Concentration of cation and anion in filtrate of wheat straw

阳离子含量/(mmol·L ⁻¹)				阴离子含量/(mmol·L ⁻¹)			
K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻
10.160 8	0.298 5	1.159 9	0.597 4	0.712 5	8.205 6	0.214 7	3.819 7

为进一步探究样品中碱金属赋存形态,对小麦秸秆样品进行 SEM-EDS (mapping) 检测,如图 3 所示。

由图 3 可看出,小麦秸秆中元素主要以 C 和 O 元素为主,并存在 Si、K、Ca、Cl、Mg 等微量元素。根据 SEM 结果发现,在小麦秸秆表面同一位置,K、Cl 等元素分布均匀,表明样品中存在 KCl 等无机盐形态,且 KCl 易溶于水。这说明小麦秸秆中大部分 K

元素是以水溶性形态存在并均匀分布在秸秆中,这与化学分馏试验结果一致。同时 K 与 S、Si 在同一位置均匀分布,说明 K 可能与 S、Si 形成碱金属硫酸盐等水合离子/晶体及硅酸盐形态;Ca、Mg 与 S 有部分区域相似,表明存在 CaSO₄、MgSO₄ 等硫酸盐。

2.2 小麦秸秆燃烧过程中碱(土)金属的释放特性

2.2.1 不同温度燃烧特性

400~900 °C 下灰渣的变化状况如图 4 所示。

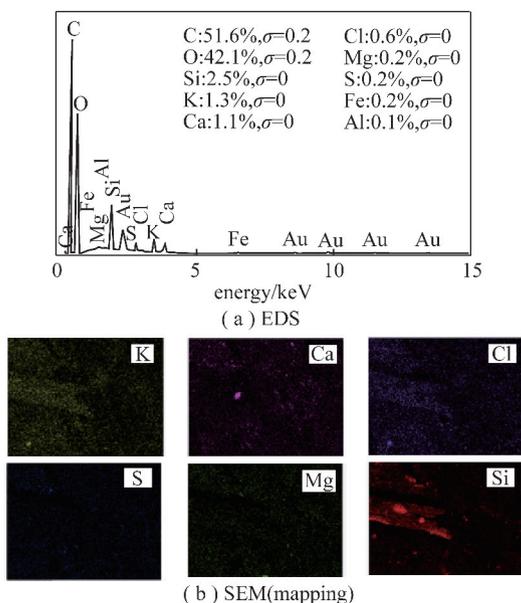


图3 小麦秸秆原样 SEM+EDS 检测

Fig. 3 SEM+EDS detection of wheat straw samples

可以看出,在不同的燃烧温度下得到的灰渣不同。400~500℃时,低温燃烧灰渣呈蓬松状且体积较大;随着温度升高,600℃以上时,灰渣与方舟发生黏连烧结。温度越高,与方舟黏连烧结越严重,灰渣体积越小。

方舟黏连烧结主要是由于样品中的KCl与SiO₂发生反应造成的,其反应式^[11]为

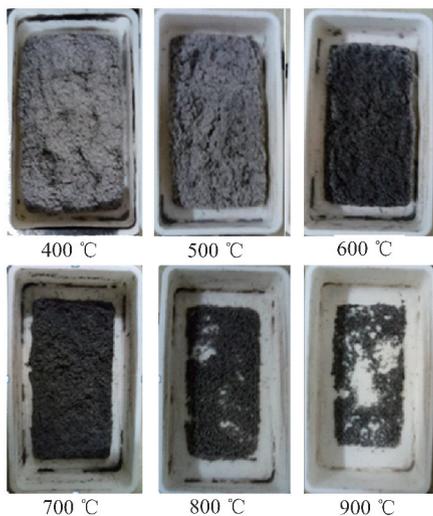
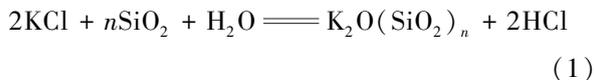


图4 燃烧温度400~900℃时的灰渣

Fig. 4 Ash within combustion temperature of 400~900℃

2.2.2 烟气中HCl体积分数变化

烟气中HCl体积分数随温度的变化如图5所示。小麦秸秆恒温燃烧过程中,400℃时排放的HCl最大浓度为 2101.17×10^{-6} ;400~600℃时

HCl排放浓度变化最大;600℃时排放的HCl最大浓度为 62.91×10^{-6} ,HCl排放规律为先增大再减小。其主要原因^[12]为,400℃时,生物质中碱金属K元素易与有机结构分解产生的有机氯及气相中的水蒸气反应生成大量的HCl,故此时的排放浓度比高温段的大得多。随温度的升高,碱金属以碱金属氯化物的形式析出,Cl参与反应生成的HCl减少,高温下碱金属K大部分以KCl的形式直接蒸发进入气态中。

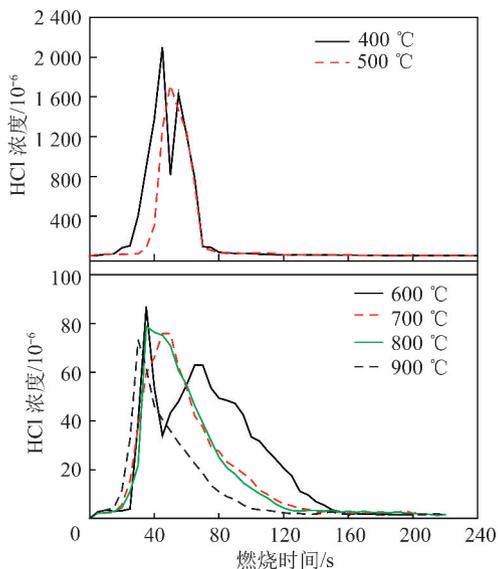


图5 烟气中HCl的体积分数

Fig. 5 Volume fraction of HCl in flue gas

2.2.3 不同燃烧温度下碱(土)金属释放特性

小麦秸秆热解碱(土)金属残留及释放情况如图6所示。由400~900℃进行燃烧成灰试验可以看出,碱金属K的释放量与燃烧温度具有较大的相关性,其各物质的熔点为:KCl,770℃、KNO₃,334℃、K₂SO₄,1069℃、K₃PO₄,1380℃。400℃时,K的释放量达18.88%,大于18.86%(NACS+HS),说明400℃时除了有机K释放外,还有少量无机K释放;600℃时,K的释放量为46.44%,超过KNO₃的熔点,说明除了有机K外,还有大量KNO₃析出;800℃时,K的释放量为53.89%,达到KCl熔点,碱金属K继续析出,固留率减小。由图6可知,Na比K更易随温度的升高进入气相,600℃时Na释放量为63.89%。碱土金属Mg、Ca大多数残留在灰渣中,碱土金属释放量较少,说明Ca和Mg会形成较稳定的、不易挥发的化合物。

2.2.4 燃烧时间及燃烧厚度对碱金属释放的影响

燃烧时间对灰渣中K固留率的影响如图7所示。随着燃烧时间的延长,碱金属K的释放率增大。5min时,碱金属K在灰渣的固留率为

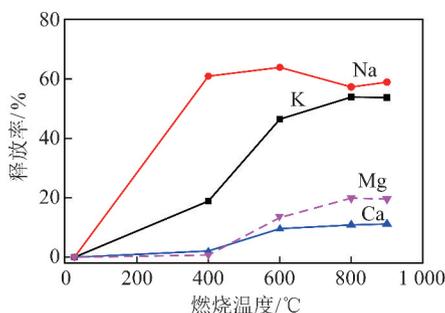


图6 小麦秸秆燃烧过程碱(土)金属释放变化

Fig. 6 Release changes of alkali (earth) metal during wheat straw burning

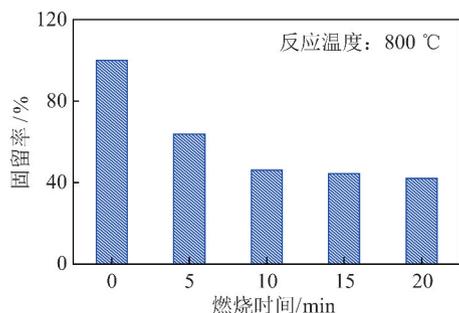


图7 小麦秸秆不同燃烧时间灰渣K的固留率

Fig. 7 Retention rate of ash K of wheat straw in different burning time

63.79% ;10 min 时,碱金属 K 在灰渣的固留率为 46.12%,碱金属 K 释放率在 5~10 min 有较大变化。这主要因为在 5 min 内碱金属 K 的释放析出是由于干燥和燃烧过程中有机结构的裂解和转化。在 10 min 内,除了有机物裂解转化,还有固定碳的燃烧,使 K 以无机盐的形式释放。而燃烧时间大于 10 min,碱金属 K 固留率变化较小,说明在 10 min 内样品基本燃烧完全。

小麦秸秆不同燃烧层厚度灰渣中 K 的固留率如图 8 所示。选择相同器皿,故不同质量的样品代表不同厚度。随着燃烧厚度的增大,灰渣碱金属 K 的固留率增加。说明燃烧层厚度的增大阻碍了碱金属 K 释放到气相中。

2.3 小麦秸秆燃烧样品表面化学和颗粒结构

小麦秸秆在 400、800 °C 燃烧的灰渣 SEM-EDS 图谱如图 9 所示,左侧 SEM 电镜扫描图分别为扫描尺寸为 5 μm 和 50 μm,右图为对灰渣表面元素的能谱分析 EDS 检测。从 SEM 电镜扫描图可看出,400 °C 时燃烧得到的灰渣呈蓬松状,表面微观微粒结构保持了一些样品的纤维结构,样品组织并未完全破坏。随着温度升高,燃烧温度 800 °C 时,灰渣颗粒物理结构完全破坏,纤维结构全部消失。灰渣凝结在一起,表面孔洞呈凹凸状,并附着熔融态混合物,其

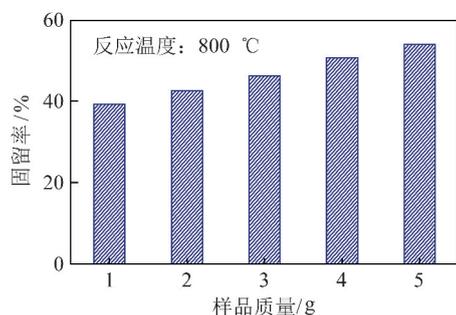


图8 小麦秸秆不同燃烧层厚度灰渣K的固留率

Fig. 8 Retention rate of ash K of wheat straw in different burning layer thickness

结构和石灰石相似,部分部位棱角分明、光滑,与矿石相近。

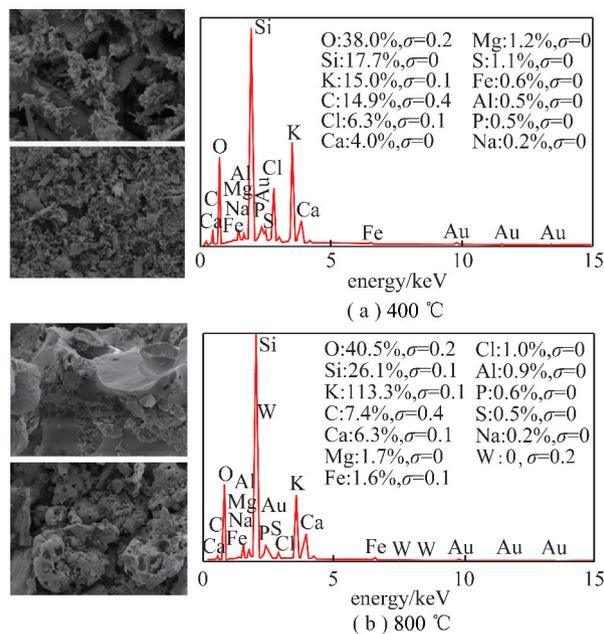


图9 小麦秸秆 400、800 °C 燃烧灰渣的 SEM-EDS 图谱

Fig. 9 SEM-EDS map of wheat straw burning ash at 400 and 800 °C

为保证数据准确,采用 mapping(面扫)。灰渣表面元素中,O 是主要元素。400~800 °C 下,P、Al、Ca、Mg 等元素表面含量变化较小,相对稳定,说明在燃烧中这些元素与氧发生了氧化反应并产生稳定化合物滞留在灰渣中。碱金属 Na 的表面含量极其微量,这主要由于 Na 元素不是植物的必需营养物质。随着燃烧温度升高,灰渣中 Si 表面含量逐步增加,800 °C 时其表面含量达 26.1%,而 O 和 Si 质量分数占比大,说明此时样品的主要成分为 SiO₂ 和硅酸盐。SEM 电镜扫描灰渣出现棱角分明的块状,类似于矿石的物质,其中 SiO₂ 是典型的石英成分。但 Si 含量比 O 占比小,说明小麦秸秆在燃烧中还有其他氧化物产生(K₂O、CaO 等)。在 EDS 图谱中,

不同温度 K 与 Cl 在灰渣颗粒表面含量均大于样品中 K 与 Cl 的比值,主要因为 Cl 元素在燃烧过程具有较强的挥发性,具体挥发形式^[13-14]为:燃烧中的 KCl 与羰基等含氧官能团反应,其中碱金属 K 可与有机官能团绑定,Cl 以 HCl 的形式释放出来。

小麦秸秆不同燃烧温度下灰渣表面 K、Cl 含量的变化如图 10 所示。400 °C 前,灰渣颗粒表面 K 元素含量呈增长趋势,说明碱金属 K 从颗粒内部往外析出,表面富集速率大于释放速率。400 ~ 600 °C,灰渣颗粒表面 K 元素含量几乎不变,说明随着温度升高,释放速率加快。温度高于 600 °C,灰渣颗粒表面 K 元素含量减少,说明在高温下,碱金属 K 从颗粒内部往外析出,表面释放速率大于富集速率。另外,K 和 Cl 的摩尔比大于 1,说明小麦秸秆在不同燃烧温度下得到的灰渣中,不仅有无机盐 KCl,K 还可能以硫酸盐、硅酸盐等形式存在。

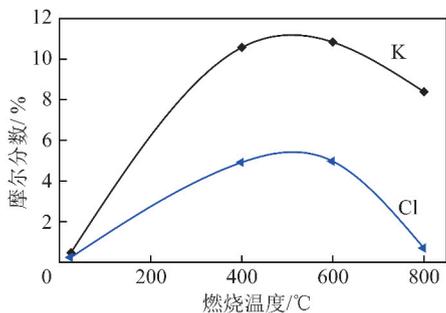
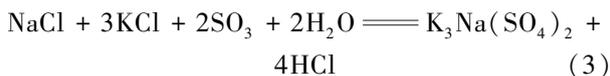


图 10 小麦秸秆不同燃烧温度下灰渣表面 K、Cl 含量

Fig. 10 Contents of K and Cl on the ash surface of wheat straw under different burning temperatures

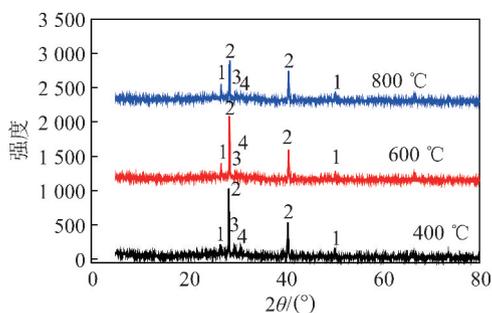
由图 10 可知,K 与 Cl 表面含量变化是同步的。600 °C 前,K 与 Cl 含量同步增长,主要因为有更多的碱金属化合物以 KCl 存在;高于 600 °C 时,灰渣表面 K 与 Cl 表面含量减少,可能因为 KCl 与 SiO₂ 等发生反应或直接以 KCl 的形式释放出去,这在图 11 得到验证。在 XRD 图谱中有 K₃Na(SO₄)₂ 产物,其可能的产生途径^[15]为



3 结 论

1) 小麦秸秆碱金属主要以 K 为主,且主要以水溶性形式存在;Na 主要以水溶性和醋酸铵溶性的形式存在;碱土金属 Ca、Mg 主要以醋酸铵溶性及水溶性的形式存在。水溶性 K 主要以 KCl、KNO₃、K₂SO₄、K₃PO₄ 的水合离子或晶体存在。

2) 400 °C 内主要释放有机 K 及少量无机 K,



1—SiO₂; 2—KCl; 3—K₃Na(SO₄)₂; 4—Mg₂P₂O₇

图 11 小麦秸秆不同燃烧温度的灰渣 XRD 检测
Fig. 11 XRD detection of ash at different burning temperatures of wheat straw

1—SiO₂; 2—KCl; 3—K₃Na(SO₄)₂; 4—Mg₂P₂O₇

400 ~ 600 °C 主要以 KNO₃ 的无机 K 为主释放,600 °C 以上主要以 KCl 与 KNO₃ 释放。碱土金属 Ca 和 Mg 会形成较稳定、不易挥发的化合物。

3) 对碱金属在灰渣表面富集状况分析得,K 与 Cl 含量变化同步。600 °C 前,K 与 Cl 含量同步增长,主要因为有更多的碱金属化合物以 KCl 存在;高于 600 °C 时,灰渣表面 K 与 Cl 表面含量减少,可能因为 KCl 与 SiO₂ 等发生反应或直接以 KCl 的形式释放。

参考文献 (References):

- [1] 王许涛,张百良. 生物质秸秆成型燃料特性分析[J]. 洁净煤技术,2012,18(2):39-42.
WANG Xutao,ZHANG Bailiang. Analysis of characteristics of biomass straw forming fuel[J]. Clean Coal Technology,2012,18(2):39-42.
- [2] 田飞,苟正贵,陈颖. 黔中、黔北地区玉米秸秆再利用调查与分析[J]. 贵州农业科学,2007,35(3):58-60.
TIAN Fei,PEI Zhengui,CHEN Ying. Investigation and analysis of corn straw recycling in Central and Northern Fujian[J]. Journal of Guizhou Agricultural Sciences,2007,35(3):58-60.
- [3] 李忠. 生物质秸秆综合利用现状与对策分析[J]. 中国资源综合利用,2017,35(12):72-74.
LI Zhong. Analysis on the status quo and countermeasures of comprehensive utilization of biomass straw[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2017,35(12):72-74.
- [4] LI G, WANG C, YAN Y. Release and transformation of sodium during combustion of zhundongcoals[J]. Journal of the Energy Institute,2015,29(1):48-56.
- [5] 孙永明,袁振宏,孙振钧. 中国生物质能源与生物质利用现状与展望[J]. 可再生能源,2006,126:78-82.
SUN Yongming, YUAN Zhenhong, SUN Zhenwei. Current status and prospects of biomass energy and biomass utilization in China [J]. Renewable Energy,2006,126:78-82.
- [6] JENKINS B M, BAXTER L L, MILE T R. Combustion properties of biomass[J]. Fuel Process Technology,1998,54:17-46.

- [7] BAXTER L. Ash deposition during biomass and coal combustion: A mechanistic approach[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1993, 4: 85-102.
- [8] LIAO Y F, YANG G. Experimental study on the combustion characteristics and alkali transformation behavior of straw[J]. *Energy Fuels*, 2012, 26(2): 910-916.
- [9] 刘敬, 王智化, 项飞鹏. 准东煤中碱金属的赋存形式及其在燃烧过程中的迁移规律实验研究[J]. *燃料化学学报*, 2014, 42(3): 316-322.
LIU Jing, WANG Zhihua, XIANG Feipeng. Experimental study on the occurrence forms of alkali metals in Zhundong coal and their migration in combustion process[J]. *Journal of Fuel Chemistry*, 2014, 42(3): 316-322.
- [10] 兰泽全. 煤和黑液水煤浆沾污结渣机理及灰沉积动态特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [11] BJORKMAN E, STROMBERG B. Release of chlorine from biomass at pyrolysis and gasification conditions[J]. *Energy Fuels*, 1997, 11: 1026-1032.
- [12] 孟凡华, 杨天华, 孙祥. 生物质燃烧过程中碱金属迁移转化研究进展[J]. *可再生能源*, 2010, 28(5): 111-114.
MENG Fanhua, YANG Tianhua, SUN Xiang. Research progress of alkali metal migration and transformation in biomass combustion process[J]. *Renewable Energy*, 2010, 28(5): 111-114.
- [13] JOHAN Werkelin, BENGT-JOHAN Skrifvars. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels[J]. *Fuel*, 2010, 89: 481-493.
- [14] 杨光. 生物质燃烧过程中碱金属迁移研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [15] BERRUECO C, ESPERANZA E. Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2005, 74(1/2): 245-253.