第 39 卷第 10 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.39, No.10
2018 年 10 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Oct., 2018

水洗预处理对生物质燃烧积灰特性的影响

靳 熹[1] 龙纪淼[1] 郭 晋[2] 李越胜[3] 邓 磊[1] 车得福[1,3]

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，西安 710049； 2. 广东省特种设备检测研究院，佛山 528251；
3. 广东省特种设备检测研究院顺德检测院，佛山 528300)

摘 要 水洗预处理可有效脱除生物质中的积灰诱导元素钾。本文利用一维沉降炉和积灰采样器，对水洗前后小麦秸秆和玉米秸秆的积灰特性进行了实验研究，选取了四个积灰时间，考察了水洗对积灰质量、积灰率、积灰形貌与元素组成的影响。结果表明，水洗预处理使生物质积灰质量和积灰率大幅降低，凝结/热泳机制与化学反应机制被显著削弱，生物质积灰过程变为非黏性飞灰颗粒的物理堆积。

关键词 生物质；钾；积灰；水洗预处理
中图分类号: TK16 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253–231X(2018)10–2339–07

Effect of Water Washing on Ash Deposition Behaviors during Biomass Combustion

JIN Xi[1] LONG Ji-Miao[1] GUO Jin[2] LI Yue-Sheng[3] DENG Lei[1] CHE De-Fu[1,3]

(1. *State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*
2. *Guangdong Institue of Special Equipment Inspection and Research, Foshan 528251, China;*
3. *Shunde Institute of Inspection, Guangdong Institue of Special Equipment Inspection and Research, Foshan 528300, China*)

Abstract Potassium can be effectively removed by water washing. In this paper, the ash deposition behavior of wheat straw, corn stalk and their water washed samples were studied by a one-dimensional down-fired furnace and a deposit probe. Four sampling time periods were chosen, while the deposit mass, deposit efficiency, deposition morphology and elemental composition were studied. The results indicate that both deposit mass and efficiency decrease significantly after water washing. During combustion of washed biomass fuels, the mechanism of condensation/thermophoresis and chemical reaction are strictly limited, and the ash deposition process becomes physical accumulation of non-viscous fly ash particles.

Key words biomass; potassium; ash deposition; water washing

0 引 言

近年来，全球气候变暖问题日益显著，具有可再生、分布广和 “碳中性” 等特点的生物质能受到人们广泛关注 [1,2]。生物质发电有着广阔的发展前景，受到世界各国青睐 [3]。然而由于生物质燃料普遍具有较高的 K 含量，生物质锅炉的高温对流受热面面临着严重的积灰结渣问题，并伴随有不同程度的高温腐蚀。学者们对生物质锅炉过热器上的积灰，进行了大量的采样与分析，根据其形貌与化学成分推测积灰形成的过程 [4-6]。直接对实炉过热器上的积灰进行采集分析不具有实时性，不能准确掌握积灰的形成过程，因此部分学者在生物质锅炉过热器区域安装渣棒，通过调节渣棒布置位置、壁温等，模拟实际灰渣的沉积过程，并对积灰形貌和成分进行了大量分析总结 [7-10]。然而由于实际生物质锅炉工况不易控制，参数波动大，不适宜对积灰形成机理开展研究 [11,12]。有学者在实验室搭建了变量易精确控制的一维沉降炉系统，针对积灰的单一影响因素进行研究，考察了燃料种类、燃烧温度、管壁温度、积灰时间等因素对积灰过程的影响，并提出了凝结、热泳、惯性撞击、化学反应等控制机制 [13-16]。

已有研究表明，生物质锅炉高温对流受热面积灰诱导元素 K、Cl 和 S 在生物质燃料中主要以水溶性的形式存在 [13,17-19]。因此在生物质送入锅炉燃烧之前，通过水洗预处理的方式降低燃料中的相关

收稿日期：2017-12-27; **修订日期**：2018-09-15
基金项目：国家自然科学基金资助项目 (No.51406147)
作者简介：靳 熹 (1991–)，男，博士研究生，主要从事生物质积灰结渣研究。 **通信作者**：邓 磊，副教授，博士，E-mail: leideng@mail.xjtu.edu.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

积灰诱导元素的含量，将有利于减轻锅炉运行过程中的积灰结渣问题 [20,21]。针对水洗预处理，前人的研究主要关注点在于水洗对生物质燃料特性、热解和燃烧特性、无机元素迁移特性和灰熔融特性的影响 [21-24]。然而，水洗预处理对生物质燃烧过程中积灰特性的影响尚未见报道。本文利用一维沉降炉研究了水洗预处理对两种生物质燃料 (小麦秸秆和玉米秸秆) 燃烧过程中积灰特性的影响，考察分析了水洗前后生物质燃烧室的积灰质量、积灰率、灰的元素组成和微观表面形貌。验证了水洗预处理对减轻生物质锅炉高温对流受热面积灰结渣问题的作用，可为工程实际提供一定的参考。

1 实 验

1.1 样品选取

本文选取了中国北方常见的两种生物质秸秆燃料 (小麦秸秆和玉米秸秆) 作为研究对象。两种燃料均从西安市周边收集。在进行实验之前，先将生物质燃料粉碎、筛分，选取粒径为 150~250 μm 的样品，在 105 °C 下干燥 24 h，随后放置在干燥皿中作为原样备用。生物质水洗样的制备方式如下：将筛选好的干燥生物质以 12.5 g·L^{-1} 的固液比浸没于 30 °C 的去离子水中 3 h，取出后自然滤干，再在 105 °C 下干燥 24 h，之后取出放置于干燥皿中作为生物质水洗样备用。两种生物质原样与水洗样的燃料性质如表 1 所示。

1.2 实验系统与方法

积灰实验系统主要包括配风系统、一维沉降炉、刚玉反应器、积灰采样器、螺旋给料机、温度采集系统等，如图 1 所示。一维沉降炉加热段长度为 3.4 m，最高加热温度可达 1300 °C，刚玉反应器内径为 70 mm。积灰采样器用 310S 不锈钢管加工而成，为 “π” 型结构，布置于刚玉反应器的下部，易于拆卸和取样分析。采样器外径根据斯托克斯数相似原则选取为 10 mm。采样器水平段的长度为 60 mm。在采样器表面布置有热电偶测点，用于管壁温度的实时监测。实验进行时，首先把沉降炉温度升至 1200 °C。将干燥后的生物质燃料样品加入到螺旋给料器中，将给料速率设定为 4 g·min^{-1}。打开风机并根据 1.5 的过量空气系数调节质量流量计至给定气流量。螺旋给料器所送出的生物质燃料在气流的携带下进入到刚玉反应器中进行燃烧。气流携带的飞灰在经过刚玉反应器底部的积灰采样器时，会在采样器上发生沉积。在实验过程中，积灰采样器所在位置烟气温度为 800 °C，采样器壁面

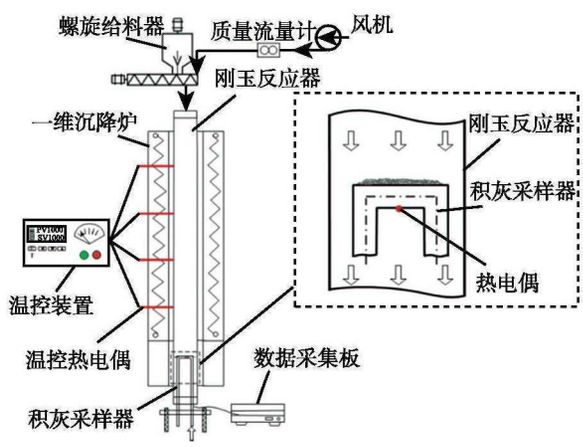


图 1 积灰实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ash deposition experimental system

表 1 生物质样品的燃料性质/%

Table 1 Fuel properties of biomass samples/%

		小麦秸秆	玉米秸秆	水洗小麦秸秆	水洗玉米秸秆
工业分析 (干燥基)	A	6.80	7.09	3.02	4.32
	V	75.29	74.89	83.37	80.95
	FC	17.91	18.02	13.61	14.74
元素分析 (干燥基)	C	44.11	46.18	45.90	46.54
	H	4.97	4.89	5.09	5.10
	O	43.67	40.50	45.72	43.44
	N	0.20	1.09	0.25	0.57
	S	0.25	0.25	0.02	0.02
	Cl	0.183	0.055	0.031	0.024
主要成灰元素含量 (干燥基)	Si	1.22	1.19	2.11	1.20
	Ca	0.39	0.35	0.51	0.31
	Mg	0.11	0.19	0.09	0.14
	Al	0.05	0.11	0.05	0.07
	P	0.04	0.03	0.03	0.02
	K	1.046	1.221	0.124	0.185

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温度设定为 600 °C, 实验时间为分别取为 30、60、90 和 120 min。实验完成后，将采样器取出，对上面的积灰样品进行收集和称重，并利用 SEM-EDS (JEOL JSM-6390A) 对其形貌进行观测，利用 ICP-OES (Perkin Elmer Optima 7000V) 测量积灰中 K、Si、Ca、Mg 和 Al 的含量。

1.3 积灰特性表征参数

仅利用积灰质量来衡量积灰特性是不够全面的，本文还使用积灰率作为表征参数，可消除不同给料率和灰分含量的影响，反映不同燃料积灰特性的差异。积灰率 R_{d} 的表达式：

$$R_{\mathrm{d}} = \frac{m_{\mathrm{d}} S_{\mathrm{c}}}{m_{\mathrm{f}} S_{\mathrm{p}} A_{\mathrm{d}}} \tag{1}$$

式中, m_{d} 为积灰质量 (g); m_{f} 为给入燃料质量 (g); S_{c} 为一维炉的横截面面积 (m^2); S_{p} 为采样器投影面积 (m^2); A_{d} 为干燥基灰分。

2 实验结果与讨论

2.1 积灰质量与积灰率

为了研究燃料水洗预处理前后生物质灰的动态沉积行为，针对两种燃料，本文均选取了四个积灰时间：30、60、90 和 120 min。在本研究实验条件下，除沉积在采样器上的灰外，大部分灰会被烟气携带出反应器，本文还对这部分灰进行了收集，并将其命名为 “底灰”。经测量，各工况下底灰的含碳量均小于 3%，可以认为在反应器内生物质燃料已基本燃尽。图 2 为两种生物质原样和水洗样的积灰实物图 (积灰时间为 60 min)。燃用原样时，采样器上均可以观察到明显的块状积灰产物，积灰具有一定硬度。将采样器翻转 180° 后，积灰依然附着在采样器管壁上不会掉落。采样器背风面与侧面还可以观察到小颗粒飞灰的沉积。而对于两种生物质的水洗样，积灰层都较薄，翻转采样管后较易脱落，且采样器背风面与侧面基本没有沉积物。

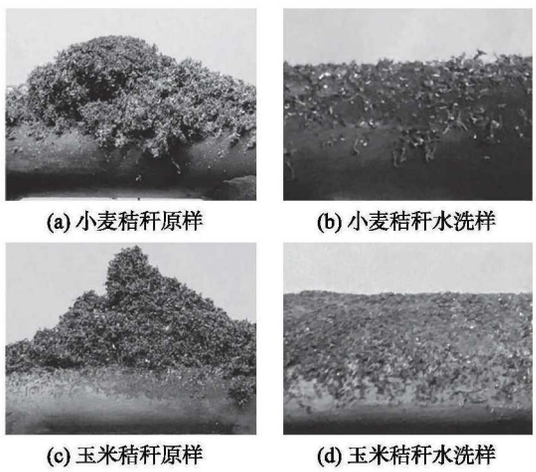


图 2 积灰实物图

Fig. 2 Pictures of deposits on the probes

两种生物质原样积灰质量与积灰率随时间的变化如图 3 所示。可以观察到，在四个积灰时间 (30、60、90 和 120 min) 下，玉米秸秆的积灰质量和积灰率均高于小麦秸秆，表明相比小麦秸秆，玉米秸秆可能有更严重的积灰倾向。通过表 1 可以看出，小麦秸秆的灰分含量低于玉米秸秆，因此小麦秸秆的积灰质量也小于玉米秸秆，而导致玉米秸秆有更高积灰率的原因可能是其相比小麦秸秆有更高的总 K 含量 [25]。根据小麦秸秆和玉米秸秆积灰质量和积灰率的变化趋势，可以看出两种生物质原样的积灰增长过程呈现出 “快 – 慢 – 快 – 慢” 的趋势，这一点与 Li 等的研究结果一致 [16]。小麦秸秆和玉米秸秆水洗样积灰质量与积灰率随时间的变化如图 4 所示。可以发现经过水洗预处理后，两种生物质的积灰行为与原样存在明显的差异。首先，水洗

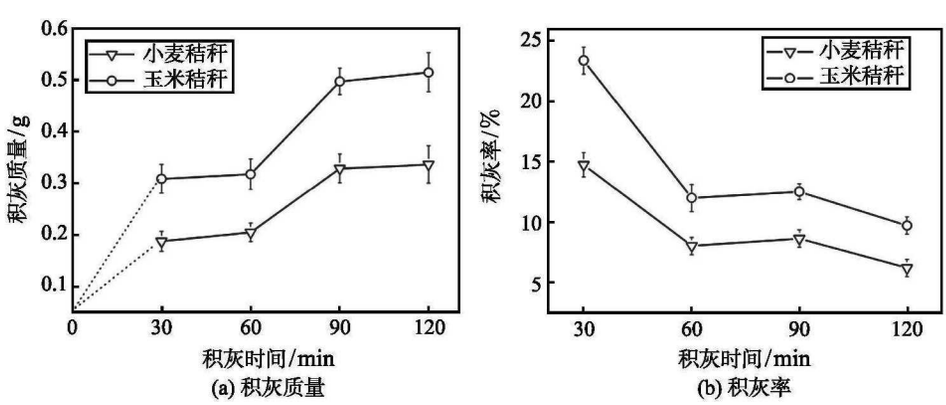


图 3 生物质原样积灰质量与积灰率随积灰的变化

Fig. 3 Deposition mass and efficiency of deposit from raw biomass as a function of sampling time

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

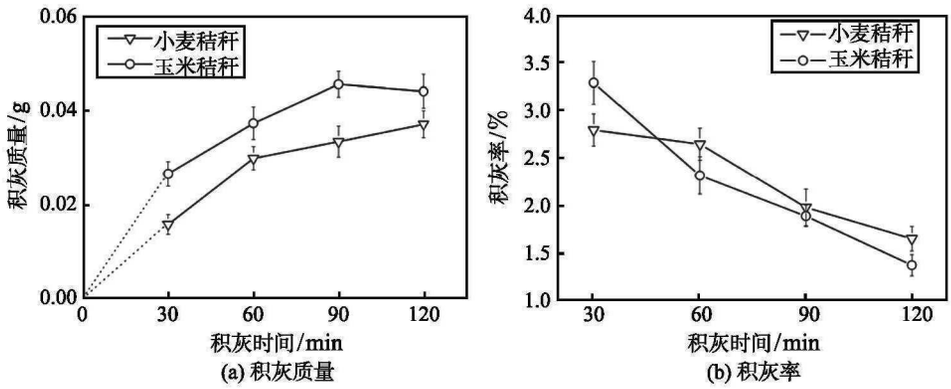


图 4 生物质水洗样积灰质量与积灰率随时间的变化

Fig. 4 Mass and efficiency of deposit from washed biomass as a function of sampling time

样积灰质量显著降低，只有原样积灰质量的约 1/10。其次，两种生物质水洗样的积灰率随着时间逐渐降低，积灰质量的增加也随着时间逐渐变缓并趋于饱和。

2.2 积灰产物元素构成

积灰的元素组成由 ICP-OES 测得。两种生物质原样不同时间下积灰的元素构成如图 5 所示。除了对 30、60、90 和 120 min 四个时间下的积灰进行测试之外，本文还对比分析了底灰的元素组成。从图 5 中可以看出，无论是小麦秸秆还是玉米秸秆，四个时间下的积灰中 K 含量均远高于底灰。凝结/热泳机制是造成这种现象的主要原因，由于本文中管壁温度为 600 °C，而烟气温度为 800 °C，管壁与烟气之间的温度梯度成为了富 K 亚微米颗粒热泳现象与 K 蒸气异相凝结的驱动力。此外，从图 5 中还可以观察到，随着积灰时间的增加，两种生物质原样积灰中 K 的含量也有较为一致的非单调变化趋势：30 min 下，积灰中的 K 含量最高，60 min 时均出现了显著的下降，随后到 90 min 时 K 含量轻微上升，120 min 时又再次下降。积灰中的 Si 含量随时间增加则表现出缓慢增加的趋势，其他元素则没有明显且一致的变化趋势。造成这种现象的主要原因如下：在积灰初始时期，亚微米颗粒的热泳和碱金属蒸气的冷凝为积灰的主导机制，这时候积灰质量与积灰率取决于生物质原样中 K 的含量。在凝结/热泳机制的共同作用下，采样器上会形成富 K 的积灰初始层 [26]。该层具有较高的黏性，使得飞灰颗粒较易在惯性撞击机制下黏附其上，因此在 0~30 min 的时段内，灰层生长速度十分迅速。随着积灰层的逐渐增厚，灰层表面与烟气之间的温度梯度会逐渐减小，凝结/热泳机制也逐步减弱，积灰中 K 含量降低，灰层捕捉飞灰颗粒的能力也会减弱，甚至在颗粒流的冲刷作用下，部分积灰会发生脱落。因此在 30~60 min 的时间段内，积灰质量增加明显减缓。在 60~90 min 时间段内，积灰率和积灰中 K 含量的再次增加可能是由于积灰中的 K 与 Si 反应生成了低熔点硅酸盐，使得灰层处于部分熔融状态，对飞灰的捕集能力再次提高。同时，伴随着积灰的部分脱落，灰层表面温度也会局部降低，冷凝/热泳机制会比上一个时间段略微增强，因此积灰中 K 含量会出现轻微的升高，积灰率也再次提高。而在 90~120 min 的时间段内，在各个机制的共同作用下，积灰会呈现出饱和的趋势。

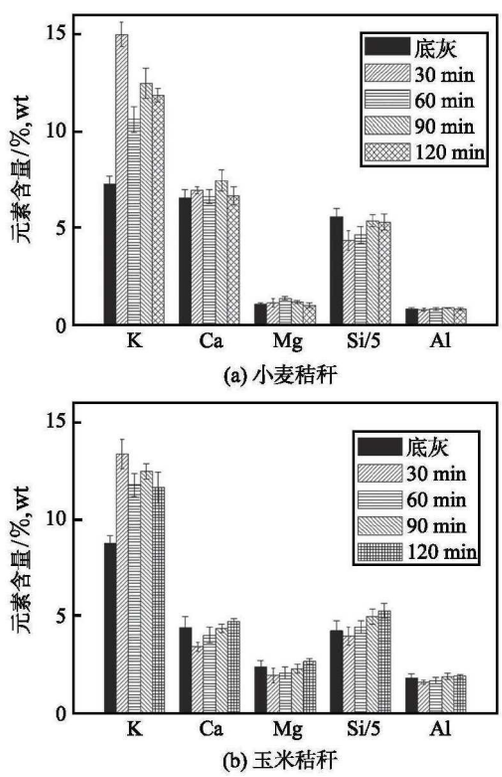


图 5 生物质原样积灰的元素构成

Fig. 5 Element composition of deposit from raw biomass

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

小麦秸秆和玉米秸秆水洗样在不同时间下所得积灰的元素组成如图 6 所示。经过水洗预处理后，不同时间下小麦秸秆和玉米秸秆积灰元素含量与原样相比，发生了十分显著的变化。首先，积灰中 K 的含量大幅度降低，Ca 成为了积灰中除 Si 之外含量最高的元素。根据 Deng 等 [21] 的研究，30 °C 下的水洗预处理对小麦秸秆和玉米秸秆中 K 的脱除率均达到 83% 以上，但对 Ca 和 Si 的脱除却远不及 K 显著，因此水洗预处理后，积灰中 Ca 的含量增加，而 K 含量降到原样积灰中 K 含量的 1/10 以下。其次，随着积灰时间的增加，积灰中 K、Ca、Si 等元素含量的变化均十分不显著，且与底灰中的含量十分接近。由文献 [26] 可知，小麦秸秆中的水溶性 K 盐可能主要是 KCl 和 K_2SO_4 的形式存在，而玉米秸秆中的水溶性 K 盐可能主要是 KCl。经过水洗预处理后，两种生物质中的大部分水溶性盐均会被脱除。在燃烧过程中，烟气中的气相碱金属浓度也远低于燃烧原样时的浓度。因此凝结/热泳机制将会被显著削弱，在采样器管壁上很难形成具有高黏性的积灰初始层。此外，由于灰中 K 含量大大降低，也严重限制了 K 的硅酸盐化反应的发生。失去了 K 的黏结作用，积灰过程变成了无黏性飞灰颗粒在惯性撞击的作用下于采样器迎风面上物理堆积。这种积灰很容易达到饱和状态，因此积灰率灰随着积灰时间的增加逐渐下降。

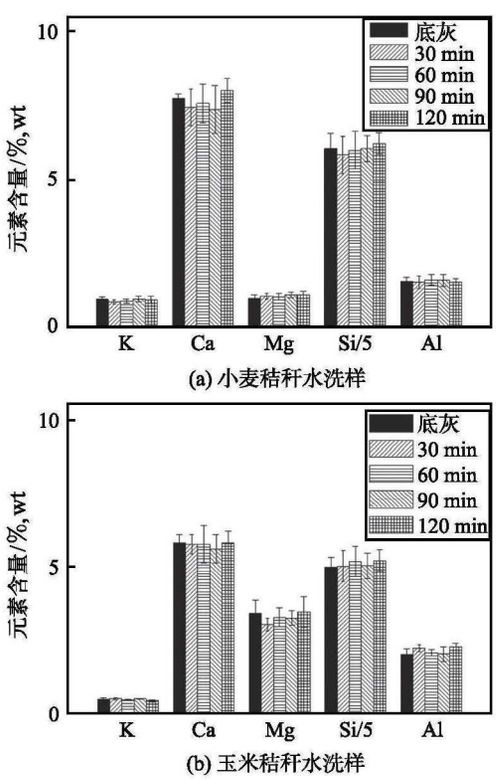
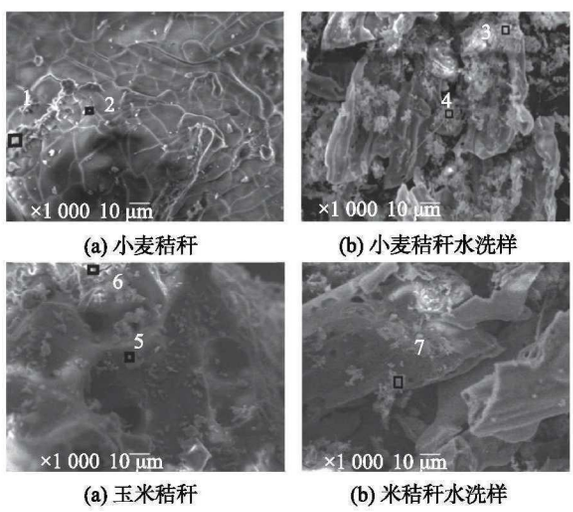


图 6　生物质水洗样积灰的元素构成

Fig. 6　Element composition of deposit from washed biomass

2.3　积灰产物形貌

图 7 为小麦秸秆和玉米秸秆原样与水洗样积灰样品 (60 min) 的 SEM 图像。生物质原样积灰中可以观察到明显的颗粒团聚现象与非晶熔融结构。可以在积灰表面发现明显的晶体颗粒 (点 2 和 5) 和絮状结构 (点 1 和 6)，经 EDS 测定，可以推测点 1 主要由 KCl、K_2SO_4 和 $CaSO_4$ 构成，点 2 和 5 的主要成分是 KCl，点 6 的主要成分为 KCl 和 $K_2Ca_2(SO_4)_3$。KCl 和 K_2SO_4 主要通过碱金属蒸气的凝结与亚微米颗粒的沉积形成，附着在积灰表面的碱金属灰提高其表面黏性，进而提高其捕捉飞灰颗粒的能力。同时 KCl 还可能与积灰中的 Si 反应生成 K 的硅铝酸盐，部分硅铝酸钾熔点较低，会在积灰中部分熔融，因此小麦秸秆和玉米秸秆的原样积灰中观察到明显的非晶熔融结构，灰颗粒黏附在一起，积灰较为致密。



EDS	K	Cl	S	O	Si	Ca	Mg
点 1	10.05	3.16	6.66	49.46	18.01	10.17	0.75
点 2	28.13	14.91	11.23	44.18	0.69	0.12	0.02
点 3	4.42	1.03	6.21	53.78	13.64	15.54	1.69
点 4	3.32	0.28	3.26	56.37	19.52	9.89	2.47
点 5	13.84	11.11	4.53	55.03	6.71	5.77	0.75
点 6	20.21	15.81	4.67	34.14	9.93	7.48	1.66
点 7	2.34	0.47	3.54	47.78	15.2	23.74	4.17
(a)	8.44	4.11	3.31	49.65	25.76	5.83	0.61
(b)	2.48	0.83	1.56	58.6	21.57	9.47	1.34
(c)	11.33	7.15	3.73	50.19	16.19	5.56	1.92
(d)	1.73	0.28	0.33	55.35	24.84	12.48	1.93

图 7　生物质原样和水洗样积灰的微观形貌

Fig. 7　SEM micrograph of deposit from raw and water washed biomass

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

而两种生物质水洗样的积灰则表现出与原样积灰完全不同的形貌。经过水洗预处理后，无论是小麦秸秆还是玉米秸秆，积灰中的灰颗粒均可以看到明显的边缘，也基本观察不到颗粒间的团聚现象和非晶熔融结构。在灰颗粒表面可以观察到絮状结构(点 4) 和亚微米颗粒堆积结构 (点 3 和 7)，经过 EDS 测定可以推测这两种结构主要由碱土金属的化合物构成。

通过对小麦秸秆和玉米秸秆原样与水洗样积灰产物的 SEM-EDS 测试可以得知，碱金属在生物质燃烧过程中，主要通过两种途径促进积灰：第一种途径是在凝结/热泳机制下，碱金属在受热面上沉积形成初始黏性积灰层，大大提高了管壁对受热面的捕捉效率，同时碱金属还会在飞灰颗粒表面或积灰层表面上沉积，增强了灰颗粒之间的黏附现象；第二种途径主要受控于化学反应机制，积灰中的碱金属(如 KCl) 会与灰中的 Si 发生硅酸盐化反应，生成碱金属硅酸盐，部分碱金属硅酸盐熔点较低而出现部分熔融，使得灰颗粒团聚在一起，形成致密的积灰层。而水洗预处理后，由于生物质燃料中的碱金属被有效脱除，无论是凝结/热泳机制，还是化学反应机制均被大大削弱。失去了 KCl 等碱金属的黏结作用，积灰过程转变为非黏性颗粒的物理堆积，很容易达到饱和状态，且积灰较易通过定期吹灰清除。

3 结 论

本文通过一维沉降炉燃烧系统与壁温可控的积灰采样器，选取了 4 个积灰时间，研究了水洗预处理前后玉米秸秆和小麦秸秆燃烧时的积灰特性，得出以下结论：

1) 两种生物质原样的积灰增长过程均呈现出“快 – 慢 – 快 – 慢” 的趋势，积灰初期，热泳/凝结作用较为显著，随后主要是惯性撞击与化学反应的作用；

2) 经过水洗预处理后，小麦秸秆和玉米秸秆的积灰质量和积灰率均大幅降低，且随着积灰时间的增加，积灰质量趋于饱和，积灰率逐渐降低；

3) 经过水洗预处理后，生物质积灰过程中的凝结/热泳机制与化学反应机制被显著削弱，积灰过程转变为非黏性飞灰颗粒的物理堆积。

参 考 文 献

[1] Nieminen M, Veijonen K. Bioenergy Technologies Applied in EU Countries [R]. VTT Project Report, 2005

[2] Saidur R, Abdelaziz E A, Demirbas A, et al. A Review on Biomass As a Fuel for Boilers [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2262–2289

[3] Werther J, Saenger M, Hartge E U, et al. Combustion of Agricultural Residues [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(1): 1–27

[4] Jensen P A, Frandsen F J, Hansen J, et al. SEM Investigation of Superheater Deposits from Biomass-Fired Boilers [J]. Energy & Fuels, 2004, 18(2): 378–384

[5] Jensen P A, Stenholm M, Hald P. Deposition Investigation in Straw-Fired Boilers [J]. Energy & Fuels, 1997, 11(5): 1048–1055

[6] Lapuerta M, Acosta A, Pazo A. Fouling Deposits from Residual Biomass with High Sodium Content in Power Plants [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(8): 5007–5017

[7] Bashir M S, Jensen P A, Frandsen F, et al. Ash Transformation and Deposit Build-up during Biomass Suspension and Grate Firing: Full-scale Experimental Studies [J]. Fuel Processing Technology, 2012, 97: 93–106

[8] Blander M, Pelton A D. The Inorganic Chemistry of the Combustion of Wheat Straw [J]. Biomass and Bioenergy, 1997, 12(4): 295–298

[9] Michelsen H P, Frandsen F, Dam-Johansen K, et al. Deposition and High Temperature Corrosion in a 10 MW Straw Fired Boiler [J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(1-3): 95–108

[10] Valmari T, Kauppinen E I, Kurkela J, et al. Fly Ash Formation and Deposition during Fluidized Bed Combustion of Willow [J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(4): 445–459

[11] 徐晓光. 生物质燃烧过程积灰形成机理的实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009
XU Xiaoguang. Experimental Investigation on the Formation Mechanisms of Ash Deposition during Biomass Combustion [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009

[12] 徐晓光, 李水清, 熊刚, 等. 烟气中钾含量对锯屑燃烧过程积灰的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23): 61–67
XU Xiaoguang, LI Shuiqing, XIONG Gang, et al. Influence of Potassium on Ash Deposition during Sawdust Combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(23): 61–67

[13] Baxter L L, Miles T R, Miles Jr T R, et al. The Behavior of Inorganic Material in Biomass-fired Power Boilers: Field and Laboratory Experiences [J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(1-3): 47–78

[14] Robinson A L, Junker H, Baxter L L. Pilot-Scale Investigation of the Influence of Coal-Biomass Cofiring on Ash Deposition [J]. Energy & Fuels, 2002, 16(2): 343–355

[15] Nielsen H P, Baxter L L, Sclippab G, et al. Deposition of Potassium Salts on Heat Transfer Surfaces in Straw-fired Boilers: a Pilot-scale Study [J]. Fuel, 2000, 79(2): 131–139

[16] Li G, Li S, Xu X, et al. Dynamic Behavior of Biomass Ash Deposition in a 25 kW One-Dimensional Down-Fired Combustor[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(1): 219–227

[17] Keown D M, Favas G, Hayashi Ji, et al. Volatilisation of Alkali and Alkaline Earth Metallic Species during the Pyrolysis of Biomass: Differences Between Sugar Cane Bagasse and Cane Trash [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(14): 1570–1577

[18] Wang X, Si J, Tan H, et al. Nitrogen, Sulfur, and Chlorine Transformations during the Pyrolysis of Straw [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(9): 5215–5221

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[19] Zevenhoven-Onderwater M. Ash-forming Matter in Biomass Fuels [D]. Finland: Åbo Akademi Llniversity, 2002

[20] Deng L, Che D. Chemical, Electrochemical and Spectral Characterization of Water Leachates from Biomass [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(48): 15710–15719

[21] Deng L, Zhang T, Che D. Effect of Water Washing on Fuel Properties, Pyrolysis and Combustion Characteristics, and Ash Fusibility of Biomass [J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 712–720

[22] Di Blasi C, Branca C. The Effects of Water Leaching on the Isothermal Degradation Kinetics of Straw [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000, 39(7): 2169–2174

[23] Mu L, Zhao L, Liu L, et al. Elemental Distribution and Mineralogical Composition of Ash Deposits in a Large-scale Wastewater Incineration Plant: a Case Study [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(25): 8684–8694

[24] Vamvuka D, Sfakiotakis S. Effects of Heating Rate and Water Leaching of Perennial Energy Crops on Pyrolysis Characteristics and Kinetics[J]. Renewable Energy, 2011, 36(9): 2433–2439

[25] Deng L, Ye J, Jin X, et al. Transformation and Release of Potassium during Fixed-bed Pyrolysis of Biomass [J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 91(4): 630–637

[26] Jin X, Ye J, Deng L, et al. Condensation Behaviors of Potassium during Biomass Combustion [J]. Energy & Fuels, 2017, 31(3): 2951–2958

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net