

烟气中钾含量对锯屑燃烧过程积灰的影响

徐晓光, 李水清, 熊刚, 李庚达, 宋蔷, 姚强

(清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京市 海淀区 100084)

Influence of Potassium on Ash Deposition During Sawdust Combustion

XU Xiao-guang, LI Shui-qing, XIONG Gang, LI Geng-da, SONG Qiang, YAO Qiang

(Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The investigation on ash deposition during sawdust combustion was performed in a lab-scale down-fired combustor by using an air-cooled temperature-controlled probe. To control the potassium concentration in flue gas, water-washed sawdust was used, and the aqueous solution of potassium acetate was sprayed into the flame zone in order to study the effect of potassium. According to the amount of deposit, the collection efficiency was calculated. The results indicated that potassium concentration in flue gas is a key factor that determines the ash deposition. The higher concentration, the more deposit. The technology of scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray (SEM/EDX) analyses revealed that potassium plays an important role in deposition. The significant increase of deposition tendency can be attributed to the combination of the aluminosilicate with the potassium, which forms the new eutectics with a lower melting temperature. At the same time, the surface growth of potassium on big ash particles surface or the adhesion of submicron potassium oxides to big particles increase their work of adhesion.

KEY WORDS: potassium; sawdust; combustion; ash deposition; collection efficiency

摘要: 基于高温一维下行炉, 以锯屑为燃料开展燃烧过程积灰实验研究。通过水洗处理和喷加雾化溶液的方式控制烟气中钾的含量, 采用自动控温采样枪收集积灰样品。通过积灰量计算出积灰的采集效率, 进而分析烟气中钾浓度与采集效率的相关性。结果显示, 烟气中钾含量是影响积灰倾向的关键因素, 积灰倾向随烟气中钾浓度的增加显著提高。扫描电子显微镜 X 射线能谱(scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray, SEM/EDX)微观分析发现, 烟气中的钾促

进积灰形成的途径主要是: 钾与硅铝酸盐结合形成的低熔点化合物促进了飞灰颗粒间的烧结; 钾在飞灰表面冷凝增加了飞灰的表面黏性。

关键词: 钾; 锯屑; 燃烧; 积灰; 采集效率

0 引言

由于二氧化碳近零排放的优点^[1-2], 生物质逐步成为能源领域研究的热点。生物质由有机物和无机物构成, 其中有机物能够燃烧, 无机物则以灰渣的形式残留下来, 如果灰渣中碱性物质含量高则易在换热器表面沉积形成积灰^[3-5]。积灰较轻时会增大热阻, 降低锅炉效率; 而严重时会造成停炉, 影响机组利用率。

煤中钾主要以长石($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)的形式存在, 活性碱金属钾(如KCl、 K_2SO_4 、 K_2CO_3)含量较少^[6]。相比之下由于钾与植物的新陈代谢密切相关, 生物质中钾很大一部分以活性强的小离子官能团存在, 还有一部分存在于内在矿物中或与有机官能团结合, 这 2 部分钾均可以视为活性碱金属, 此外还有少量以难溶的外在矿物形式存在^[7-8], 这些难溶矿物主要来自燃料收集制备过程中混入的杂质。燃烧过程中, 活性碱金属钾在高温火焰区随挥发分析出进入烟气, 且此时由于焦炭的存在, 燃料灰分中的其他成分不会与活性的钾结合而抑制其析出^[8]。Jacob研究了 6 种生物质燃料在热解条件下钾的析出规律, 发现当温度高于 1 150 °C 时, 燃料中绝大部分钾会析出进气相^[8]。钾析出后最初主要以气相形式存在于烟气中, 随着焦炭的燃尽烟气温度逐渐降低, 在这一过程中钾会发生一系列复杂的物理化学反应^[9]。例如钾会冷凝形成亚微米颗粒相^[10], 此外还会与烟气中的其他物质发生反应, 如硫酸盐化或与 Si、Al 等结合形成共熔物^[11]。燃煤电厂和实验

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目(50711130637)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50711130637).

室燃烧器的积灰研究发现^[12-13], 含有钾的生物质燃料在换热器表面产生的积灰通常分为内外2层: 内层积灰颜色浅、质地均匀且覆盖整个换热器表面; 外层积灰颜色较深, 飞灰粒径较大且主要堆积在换热器的迎风面。钾是积灰内层的主量元素, 其源自烟气中气相钾的冷凝或亚微米含钾颗粒的沉积, 积灰内层形成后改变了采样管表面的性质进而影响飞灰的沉积^[12]。对于外层飞灰, 其主要由冷凝的KCl、K₂SO₄将飞灰颗粒黏接在一起构成, 说明钾也是积灰发展阶段关键影响因素^[12]。综上所述, 碱金属钾在生物质燃料中含量较高且反应活性强, 燃烧中极易挥发进入烟气, 是影响积灰形成的关键因素。

本文基于25 kW一维下行炉进行锯屑的积灰实验研究。与实际锅炉积灰研究相比^[14-15], 一维炉可以更好地控制工况条件, 稳定性高。基于前人的研究工作, 本文选择更高的燃烧温度和采样管温度, 前者保证燃料中钾的充分析出^[8], 后者考虑当前生物质锅炉发展的需要。实验中控制烟气中钾含量的方法是采用雾化系统往炉内喷钾盐溶液, 与已有的研究相比排除了其他物质的干扰^[14-15], 使试验影响因素单一化, 同时保证加入的钾全部进入气相^[16]。实验中对采集的样品从宏观、微观2个角度进行分析, 探讨飞灰的沉积特性。

1 实验介绍

1.1 实验系统

实验在25 kW一维下行炉(图1)上开展, 炉管材质为碳化硅, 最高耐温1 400 °C, 炉管内径150 mm, 高约4 m。积灰采样口位于图1中的P4。实验时, 用液化石油气预热炉体直至温度达到预定工况, 然后通过微量给料机(MFOV-1VO)加入固体燃料, 给料速度约600 g/h。实验时炉内温度分布如

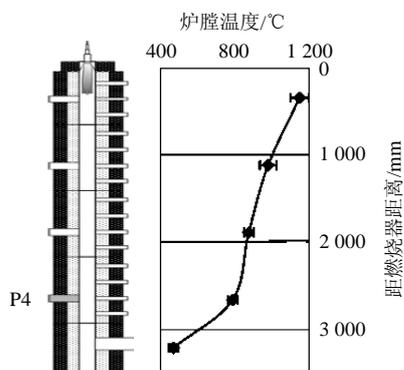


图1 一维下行炉实验系统及炉内温度分布
Fig. 1 Temperature distribution of furnace

图1所示, 火焰区温度约1 150 °C, 积灰采样处温度约为800 °C, 炉膛出口烟气氧含量控制在4%~5%。

1.2 燃料特性

实验选用的生物质燃料为锯屑。为了降低燃料中钾的含量将锯屑在常温下水洗处理。方法是: 常温下按质量比(去离子水: 锯屑)10: 1配置悬浊液并搅拌10 h。之后用真空抽滤装置除去燃料中的水分并在60 °C的环境下干燥。锯屑和水洗后锯屑的灰成分如表1所示。水洗处理后燃料灰分中Si、Al略有下降, 这是由于燃料中一些外在矿物比重较大在水洗过程中沉在容器底部, 在后续的过滤处理时沾污在容器壁面而损失。水洗后, 含量显著降低的元素为K、Na、P和S, 同时不溶于水的元素含量略有上升。

表1 锯屑水洗前后灰成分

Tab. 1 Ash composition of sawdust and washed sawdust %

成分	水洗前	水洗后
SiO ₂	35.22	34.66
Al ₂ O ₃	6.34	6.16
Fe ₂ O ₃	8.22	8.35
CaO	28.37	32.38
MgO	7.33	9.00
TiO ₂	0.51	0.61
MnO	0.51	0.57
SO ₃	1.07	0.42
P ₂ O ₅	2.75	1.72
K ₂ O	8.49	5.44
Na ₂ O	1.19	0.68

化学分馏方法^[7]分析锯屑中钾的赋存形式, 结果如表2所示。

表2 锯屑中钾的赋存形式

Tab. 2 Form of potassium in sawdust %

溶于水	溶于醋酸铵	溶于稀盐酸	残留物
46.60	31.22	3.87	18.31

1.3 烟气中钾含量控制方法

雾化系统利用压缩空气将乙酸钾(CH₃COOK)溶液雾化并喷入火焰高温区。选用乙酸钾是由于除了钾之外, 碳元素和氧元素的存在不会在烟气中引入其他元素的干扰。雾化系统由盐溶液容器、输液管路、压缩空气管路、定压阀、计量泵、雾化喷头(1/8JJ-SS+SUJ11-SS型)等组成。其中雾化喷头为Spraying System公司出品, 空气雾化后液滴的体积中位径(VMD)约为20~200 μm。使用的计量泵为北京卫星制造厂2PB-80型往复柱塞平流泵, 其流量范围为0.1~80 mL/min, 工作压力可达8 MPa, 流量

精度为 $<\pm 1\%$ ，可以对金属盐溶液的给量进行精确控制。实验中，钾的喷加速度分别为 10、20、30g/h。由于以乙酸钾溶液形式喷入，烟气中水蒸气的含量必然也随之增加，为了考察水蒸气含量变化对积灰的影响，进行了单独喷射水溶液的积灰实验。根据表 2，锯屑中约 78%的钾在化学分馏处理中被水或醋酸铵溶液沥出，这 2 部分钾在燃料中以无机盐形式或与有机质化学结合的形式存在，属于高反应性成灰物质，在高温条件下会析出进入气相^[7]。假设燃料中的钾全部进入烟气，估算各工况下烟气中钾的浓度，结果如表 3 所示。

表 3 各工况烟气中钾浓度
Tab. 3 Concentrations of potassium in flue gas

工况	燃料中钾/(g/h)	喷加的钾/(g/h)	烟气量/(m ³ /h)	雾化用气/(m ³ /h)	烟气中钾浓度/(g/m ³)
水洗锯	2.09	0	20.50	0	0.10
锯屑	3.26	0	20.50	0	0.16
锯+水	3.26	0	21.25	0.8	0.14
锯 10K	3.26	10	21.25	0.8	0.59
锯 20K	3.26	20	21.25	0.8	1.03
锯 30K	3.26	30	21.25	0.8	1.47

为了简化标示，水洗后锯屑、锯屑、锯屑喷水、锯屑喷钾(10 g/h)、锯屑喷钾(20 g/h)和锯屑喷钾(30 g/h)6 个工况在图表中分别简化为：水洗锯、锯屑、锯+水、锯 10K、锯 20K和锯 30K。

1.4 采样装置和实验条件

如图 2，采用笔者自行设计的自动控温采样枪采集积灰样品。采样管分为 2 段：固定部和移动部。固定部与采样枪过盈配合不可拆卸，采集的积灰用于成分分析；移动部与采样管为间隙配合可方便取下，样品用于质量称量和形貌分析。固定部表面布置热电偶测量表面温度，为降低接触热阻活动部顶端加工有孔可使热电偶插入。采样管材质为不锈钢。本文实验中，积灰采样时间为 60 min，采样管表面温度控制在 600 ℃。

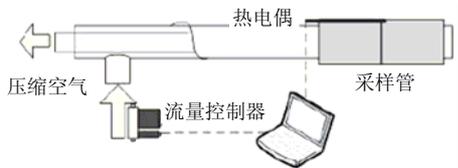


图 2 自动控温积灰采样枪
Fig. 2 Temperature controlled probe

2 结果及分析

2.1 积灰量和采集效率

相同燃烧条件下采集积灰，图 3 列出了 6 种工况的积灰量。每组工况重复实验根据误差选定 2~4

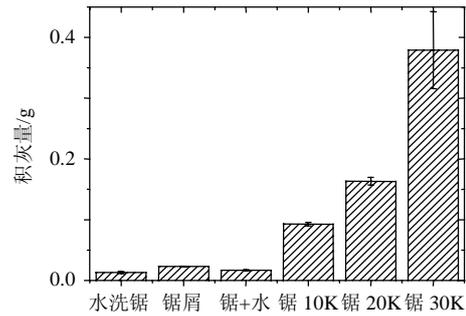


图 3 各燃料对应的积灰量
Fig. 3 Deposition mass

次，图中示出标准差。由图 3 可知，水洗锯屑、锯屑和锯屑喷水 3 种工况积灰量较小，喷加乙酸钾溶液工况积灰量显著增加，且积灰量随烟气中钾浓度的升高而增加。需要考虑燃料供给速度、燃料水分、燃料灰分等都会对积灰量有显著的影响。为了排除这些干扰采用下式(1)将积灰量无量纲化，得到积灰的采集效率 η_{CE} ：

$$\eta_{CE} = \frac{\dot{m}_d / A_p}{(\dot{m}_f X_a + \dot{m}_K) / A_r} \quad (1)$$

式中： \dot{m}_d 为积灰速度； A_p 为采样管垂直于炉管轴线方向的投影面积； \dot{m}_f 为干基燃料给料速度； X_a 为燃料灰分； \dot{m}_K 为钾喷加速度； A_r 为炉膛横截面积。

采集效率的定义为积灰与理论上通过 A_p 成灰物质的质量之比，可以更科学地反应燃料积灰的倾向，6 个工况积灰采集效率的结果如图 4 所示。水洗后锯屑积灰的采集效率减小为原来的 0.62 倍，水洗处理显著降低了燃料积灰的倾向。锯屑喷水工况中采集效率减小为锯屑工况的 0.73 倍，由前人的研究可知烟气中水蒸气浓度的变化对钾析出影响较小^[17]，考虑到水和雾化空气的喷入增大了烟气体积从而降低了钾的浓度，采集效率降低也在预见之中。烟气中喷入乙酸钾溶液工况中积灰的采集效率显著提高，对应钾的喷加速度 10、20、30 g/h采集效率较锯屑工况分别增大 3.18、4.62、9.11 倍。烟

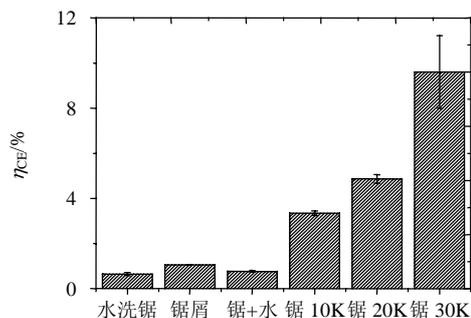


图 4 各燃料对应的采集效率
Fig. 4 Collection efficiency

气中的钾会促进积灰的形成,且随着烟气中钾含量的增大飞灰采集效率升高。

2.2 烟气中钾浓度和采集效率的相关性

如表 2 所示,锯屑燃烧时烟气中钾浓度为 0.16 g/m^3 ,水洗锯屑工况中由于水洗处理后燃料中的钾部分被去除以致烟气中钾的浓度最低为锯屑燃烧时的 0.63 倍,水洗处理除钾外还洗去部分碱金属元素钠,但由于生物质燃料中钾的含量远高于钠,因此水洗过程去除钾的绝对量要明显大于钠。喷水工况中,由于水和雾化空气的混入造成烟气量略有增大,烟气中钾浓度稍稍降低。3 个喷入乙酸钾的工况,烟气中钾的含量显著增加,钾浓度分别为锯屑燃烧时的 3.69、6.44、9.19 倍。分析烟气中钾浓度与积灰采集效率的相关性得出图 5。计算二者之间的 Pearson 相关系数 R , Pearson 乘积矩相关系数通过式(2)定义:

$$R = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (2)$$

式中: X 、 Y 为样本值; n 为样本总数。Pearson 相关系数 R 是范围在 $(-1.0 \sim 1.0)$ 之间的无量纲指数,计算得出烟气中钾浓度与积灰采集效率的 Pearson 相关系数 R 为 0.98,因此烟气中的钾浓度是影响燃料积灰的关键因素。

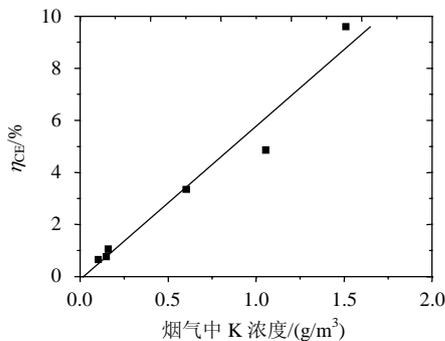


图 5 采集效率与烟气中钾浓度的相关性
Fig. 5 Correlation of collection efficiency and potassium concentration in flue gas

2.3 积灰的宏观形貌

图 6 示出各工况下采样管积灰的形貌。对比水洗处理前后积灰的形貌,水洗后采样管表面积灰分布面积小,说明水洗处理导致烟气中飞灰表面黏性减小。根据燃料灰成分表 1,水洗主要去除了锯屑中的碱金属钾和钠,因此钾和钠的存在起到增加飞灰表面黏性的作用。对比喷水前后的工况,烟气中水蒸气浓度的增加并没有对采样管表面积灰的分布面积产生明显影响,说明水蒸气含量的提高对飞

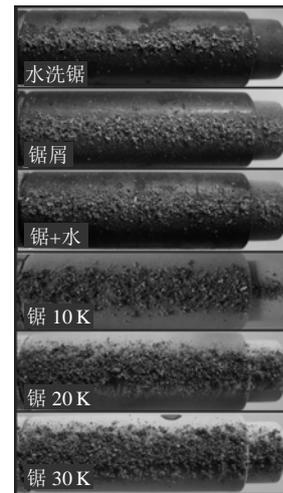


图 6 不同工况下积灰形貌

Fig. 6 Pictures of deposition in different cases

灰的沉积特性没有明显影响。用图像处理软件 ImageJ 分析积灰形貌图^[18-19],发现水蒸气含量提高后,沉积在采样管表面的飞灰平均粒径较喷水前略小。喷加雾化乙酸钾溶液工况中,积灰分布面积显著增加,说明钾的加入提高了飞灰颗粒及采样管的表面黏性,增加了飞灰沉积的倾向。在同样的采样时间和燃烧条件下,随烟气中钾浓度增加积灰的质地更加致密。与未喷加乙酸钾的工况相比,乙酸钾喷入后积灰采样管的表面均匀分布了一层浅色的细小积灰。根据飞灰的沉积位置判断,这层细小飞灰的形成主要来自气相成灰物质的扩散、冷凝及亚微米飞灰的热泳沉积。这说明增加烟气中钾含量会促进气相成灰物质在采样管表面的冷凝及亚微米飞灰在采样管表面的沉积。

2.4 积灰的微观形貌和成分

积灰的微观形貌如图 7,水洗处理后采样管表面沉积的球形飞灰大都独立存在相互黏结的情况较少,同时外观呈絮状的积灰体积较小;而锯屑工况下采样管表面沉积的飞灰相互黏结的概率较前者增大,而且球状飞灰与絮状积灰黏结形成了更大块的聚合物。徐晓光等在先前研究中报道:生物质或煤燃烧过程中由熔融、脱落等超微米颗粒主要贡献了积灰的量,而由蒸发-凝结-成核机制形成的亚微米细颗粒因碱金属含量高,具有较高表面能在积灰过程中起到了黏结剂的作用^[20]。本工作中,相对于水洗处理过的锯屑,未处理的燃料中钾含量更高,在采集温度下甚至保持为液态,这进一步说明烟气中钾会增大飞灰表面黏性,促进成灰物质在采样管表面的沉积。喷水工况下絮状积灰的含量大大减少,推断原因为烟气中水蒸气含量的增加降低了

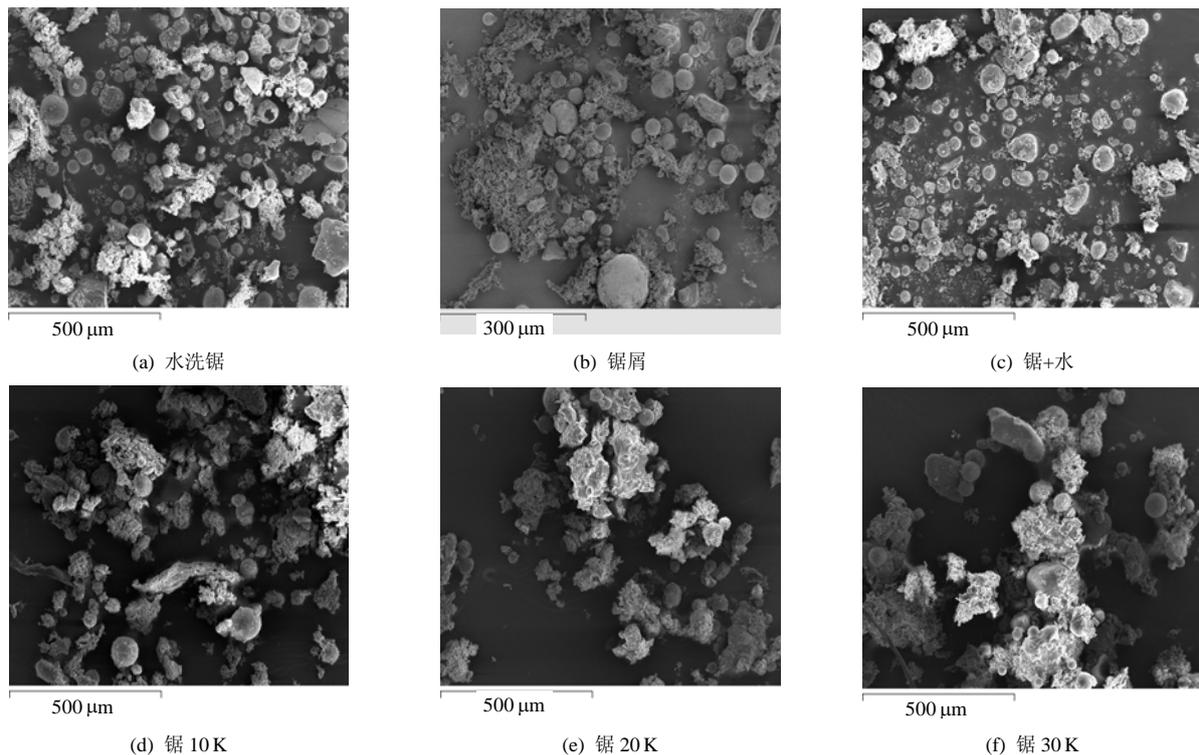


图 7 积灰形貌扫描电镜照片

Fig. 7 Morphology of ash deposition by SEM

烟气中气相钾的分压进而减少了钾的冷凝，抑制了其与硅、铝等物质形成低熔点化合物的过程^[17]。喷加乙酸钾溶液后积灰中聚合体的数量增多，且随着烟气中钾含量的提高形成了更大体积的聚合体，而此时单独的飞灰颗粒基本很难观察到。大体积聚合体的形成使更多的飞灰具有足够的惯性而克服流线的束缚运动到采样管表面。烟气中钾的存在，提高了飞灰的表面黏性，促进飞灰颗粒间及飞灰与采样管间的黏结从而促进了积灰的形成。

利用扫描电子显微镜 X 射线能谱(SEM-EDX)技术结合形貌对积灰成分进行分析。如图 8(a)中 2 颗球形飞灰烧结在一起，据图 8(b)分析点 1、2 处可知 2 颗飞灰的成分类似，除难熔金属元素 Al、Si 外还含有较丰富的碱金属元素 K、Na 和碱土金属元素 Mg、Ca。由于碱性物质含量高，高温条件下这些飞灰经历熔融状态而形成球形。分析颗粒烧结处 3 的成分，钾的含量处于绝对优势地位，此外还含有一定量的 Ca 和 Na，这说明钾会降低成灰物质的熔点促进飞灰颗粒间的烧结。同时钾还通过另一种途径影响积灰的形成，如图 8(c)、(d)所示很多飞灰颗粒黏接在一起，其中颗粒与颗粒的黏接处富集了很多更细小的飞灰。这些飞灰颗粒由于粒径较小，推断主要由高温烟气中的气相成灰物质冷凝形成。

分析其成分发现，其主要构成元素为钾。这说明随着烟气温度降低，以气相存在的钾会在飞灰颗粒表面发生异相凝结，钾凝结后高温下会增加飞灰的表面黏性，好比在飞灰颗粒表面涂上“胶黏剂”，从而促进积灰的形成。

综上由微观形貌和成分分析发现，烟气中的钾盐一方面直接与硅铝等难熔飞灰物质结合从而形成低熔点化合物，使其在高温下易于形成熔融或部分熔融的飞灰；另一方面气相成核的亚微米钾盐颗粒黏附在飞灰表面，或者直接在飞灰表面表面增长从而增加了这些飞灰的表面黏性。这 2 条途径均增加了飞灰的表面黏性，促进积灰的形成。

3 结论

本文基于高温一维下行炉，以锯屑为燃料开展燃烧过程积灰实验研究。主要研究结论如下：

1) 积灰量无量纲化得到采集效率是一种描述积灰倾向性的宏观参数。本文分别通过水洗处理燃料、在火焰区喷加雾化钾盐溶液的方式控制烟气中钾的含量，结果显示本文的实验中积灰采集效率随烟气中钾浓度的提高而增大。

2) 分析采集效率与烟气中的钾浓度的相关性，计算得出 Pearson 相关系数为 0.98，说明烟气中钾

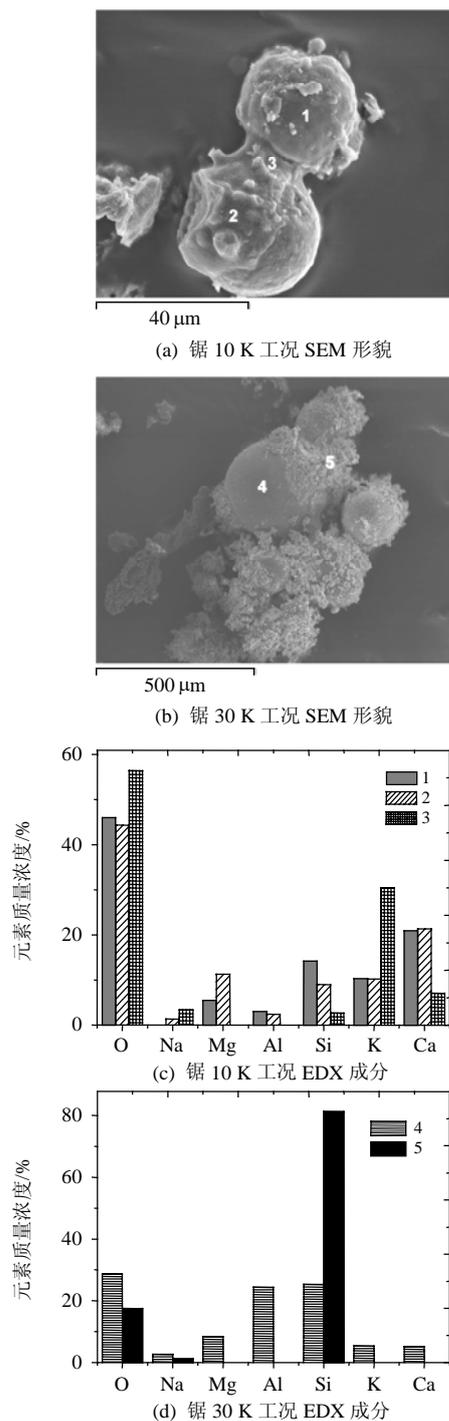


图8 积灰的SEM形貌和EDX成分
Fig. 8 Morphology and composition of deposition by SEM/EDX

浓度是影响积灰的关键因素。

3) 分析积灰的宏观形貌、微观形貌及成分可知烟气中的钾主要增大了飞灰的表面黏性,从而促进了飞灰与飞灰之间的黏结形成更大的聚集体,使更多的颗粒拥有足够的惯性可以运动到采样管表面。同时表面黏性大的飞灰沉积到采样管表面后更易于捕集运动到采样管表面的成灰物质。

4) 烟气中的钾一方面与硅铝等难熔物质结合形成低熔点的化合物从而促进飞灰颗粒间在高温下的烧结;另一方面在气相成核的亚微米钾盐颗粒黏附在飞灰表面,或者直接在飞灰表面表面增长的钾盐颗粒增加了这些飞灰的表面黏性。

参考文献

- [1] 蒲舸, 张力, 辛明道. 王草的热解与燃烧特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 65-69.
Pu Ge, Zhang Li, Xin Mingdao. Experimental study on pyrolysis and combustion characteristic of king grass[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 65-69(in Chinese).
- [2] Loo S V, Koppejan J. Handbook of biomass combustion and cofiring[M]. Netherlands: Twente University Press, 2002: 11-13.
- [3] Baxter L L. Ash deposition during biomass and coal combustion: a mechanistic approach[J]. Biomass and Bioenergy, 1993, 4(2): 85-102.
- [4] Jensen P S, Stenholm M, Hald P. Deposit investigation in straw-fired boilers[J]. Energy and Fuels, 1997, 11(5): 1048-1055.
- [5] Michelsen H P, Larsen O H, Frandsen F J, et al. Deposition of high temperature corrosion in a 10 MW straw fired boiler[J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(3): 95-108.
- [6] 岑可法, 樊建人, 池作和, 等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 12.
- [7] Zevenhoven M. Ash forming matter in biomass[R]. Finland: ABO AKADEMI, 2000.
- [8] Jacob N K, Peter A J, Kim D J. Transformation and release to the gas phase of Cl, K and S during combustion of annual biomass [J]. Energy and Fuels, 2004, 18(5): 1385-1399.
- [9] Bryers R W. Fireside slagging, fouling and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1996, 22(1): 29-120.
- [10] 王泉斌, 徐明厚, 姚洪, 等. 生物质与煤的混烧特性及其对可吸入颗粒物排放的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 7-12.
Wang Quanbin, Xu Minghou, Yao Hong, et al. Co-combustion characteristics of biomass with coal and its effect on inhaled particulate matters emission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 7-12(in Chinese).
- [11] 宁新宇, 李诗媛, 吕清刚, 等. 秸秆类生物质与石煤在流化床中的混烧与黏结机理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 105-110.
Ning Xinyu, Li Shiyuan, Lü Qinggang, et al. Study on co-firing and agglomeration mechanism of stalk biomass and stone coal in fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 105-110(in Chinese).
- [12] Nielsen H P, Baxter L L, Sclippa 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.
- [13] Hansen L A, Nielsen H P, Frandsen F J, et al. Influence of deposit formation on corrosion at a straw-fired boiler[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 64(5): 189-209.
- [14] Heije M W, Madeleine B, Bo L. Distribution of potassium, chlorine

- and sulfur between solid and vapor phases during combustion of wood chips and coal[J]. *Energy and Fuels*, 2003, 17(2): 18-28.
- [15] Miles T R, Baxter L L, Bryers R W, et al. Alkali Deposits found in biomass power plants a preliminary investigation of their extent and nature[R]. USA: Nation Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [16] Hidehiro K, Akira K, Mayumi T, et al. Analysis of the high-temperature cohesion behavior of ash particles using pure silica powders coated with alkali melts[J]. *Energy & Fuels*, 2002, 16(2): 457-461.
- [17] Dayton D C, French R J, Milne T A. Direct observation of alkali vapor release during biomass combustion and gasification.1. application of molecular beam/mass spectrometry to switchgrass combustion[J]. *Energy and Fuels*, 1995, 9(5): 855-865.
- [18] 徐赢, 林伟宁, 梁钦峰, 等. 水冷壁汽化炉熔渣表面形态的几何特征[J]. *化工学报*, 2007, 58(12): 3122-3127.
Xu Ying, Lin Weining, Liang Qinfeng, et al. Geometric characteristics of slag surface in water cooled wall gasifier[J]. *Journal of chemical Industry and Engineering (China)*, 2007, 58(12): 3122-3127(in Chinese).
- [19] Reinking L. Examples of image analysis using imagej. department of biology[R]. USA: Millersville University, 2007.
- [20] 徐晓光, 李水清, 刘洲洋, 等. 锯屑与煤混烧积灰实验研究[C]. 2008 工程热物理年会燃烧分会, 西安, 2008.
Xu Xiaoguang, Li Shuiqing, Liu Zhouyang, et al. Experimental study of ash deposit during co-firing sawdust and coal[C]. 2008 Annual Symposium of Engineering Thermophysics, Combustion Branch, Xi'an, 2008(in Chinese).



徐晓光

收稿日期: 2008-12-27。

作者简介:

徐晓光(1981—), 男, 博士研究生, 从事生物质及煤燃烧过程积灰形成机理研究。

(责任编辑 王庆霞)