

# 生物质和高硫劣质煤混烧灰熔融特性研究

蒲舸, 谭波

(低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400030)

## Study on Fusion Characteristics of Ash Produced by Co-combustion Biomass and High-sulfur Low Grade Coal

PU Ge, TAN Bo

(Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400030, China)

**ABSTRACT:** The study about co-combustion characteristics of biomass and coal has been paid more attention by the domestic and foreign scholars. Fusion characteristics of ash produced by co-combustion biomass and high-sulfur low grade coal were researched. Ash melting point temperature was measured. The process of ash melting was studied by the method of thermogravimetry-differential scanning calorimetry (TG- DSC). The results of experiments show that ash melting point temperature drop when co-firing biomass. With the increase of biomass co-combustion ratio, ash melting point temperature drop more obviously. Because the ash content of biomass is much less than high-sulfur low grade coal, ash melting point temperature of co-combustion ash is mainly affected by coal ash. Because the differences of constituent parts and contents of ash, the TG-DSC curves of coal ash and biomass ash in the experimental temperature range are quite different. When biomass co-combustion ratio is low, TG-DSC curves basically reflect fusion characteristics of coal ash. With the increase of biomass co-combustion proportion, the influence of biomass on TG-DSC curves become obviously.

**KEY WORDS:** biomass; high-sulfur low grade coal; co-combustion; fusion characteristics; the method of thermogravimetry-differential scanning calorimetry(TG- DSC)

**摘要:** 对生物质和煤混烧特性的研究受到国内外学者的广泛重视。对生物质与高硫劣质煤混烧灰的熔融特性进行研究, 测量了灰熔点, 并利用热重-差示扫描量热(thermogravimetry-differential scanning calorimetry, TG-DSC)方法对灰的熔融过程进行研究。实验结果表明, 混烧生物质能降低灰熔点, 生物质混烧比例越高, 灰熔点下降幅度越大。由于生物质中灰分含量远小于高硫劣质煤, 混烧灰的灰熔点温度主要受煤灰的影响。由于灰的组成成分及其含量的差异, 煤

灰、生物质灰在实验温度范围, TG-DSC 曲线有较大差异。在低混烧比时, 混烧灰的 TG-DSC 曲线基本体现煤灰的熔融特性。随着混烧比例的提高, TG-DSC 曲线上生物质的影响变得明显。

**关键词:** 生物质; 高硫劣质煤; 混烧; 熔融特性; 热重-差示扫描量热分析方法

## 0 引言

生物质能是太阳能以化学能形式贮存在生物中的一种能量形式, 生物质具有种类繁多、资源丰富、低 S、低 N 及 CO<sub>2</sub> 近零排放的优点。生物质中碱金属和氯元素含量较高, 单独燃烧灰熔点低, 易结渣并腐蚀受热面。煤灰中 Si、Al 等难熔物质含量较高, 生物质和煤混烧有利于降低燃烧过程中结渣的可能性<sup>[1-2]</sup>。

生物质和煤混烧灰渣的熔融特性直接影响其燃烧利用, 这方面的研究受到国内外学者的广泛重视。董信光等<sup>[3]</sup>研究表明混烧灰分的熔融特征温度整体上随生物质配比的增加呈下降趋势, 且 Cl、K 元素的含量对其有较大影响。Yuanjing Zheng 等<sup>[4]</sup>、D.Vamvuka 等<sup>[5]</sup>对混烧灰的成分及含量变化进行了研究, 分析了 K、Cl、Si 等元素的存在形式及生成途径。S.Arvelakis 等<sup>[6]</sup>研究了生物质和煤混烧后灰成分与黏度的关系, 结果表明灰中碱金属、Ca、Mg 的存在使灰熔点降低, 而 Si 则使灰熔融温度上升。目前研究结果表明, 随混烧生物质、煤的种类不同, 其灰渣特性有较大差异。

我国高硫煤储量较高<sup>[7]</sup>, 与生物质混烧可降低污染物排放, 有利于高硫煤的燃烧利用。本文在测

定灰熔点温度的基础上, 对不同生物质和高硫劣质煤的混烧灰样进行了失重-微分热重分析(thermogravimetry-differential thermogravimetry analysis, TG-DSC)分析, 重点研究了生物质种类与混烧比对灰熔融特性的影响, 并分析了引起灰熔融特性变化的原因。

## 1 实验样品及方法

### 1.1 实验样品

实验用生物质为我国产量丰富的小麦秆、棉花秆、玉米秆, 煤样为重庆中梁山高硫劣质煤。实验样品的工业分析及含硫量的测定是依据 GB/T212—2008、GB/T214—2007 进行的, 见表 1。

表 1 实验样品工业分析及含量硫量

Tab. 1 Proximate analysis and sulfur contents of sample %

样品名称	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	M <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	S <sub>d</sub>
煤	50.63	16.80	1.63	30.94	3.42
小麦秆	9.40	65.42	9.56	15.62	0.32
玉米秆	7.79	68.99	7.90	15.32	0.24
棉花秆	3.63	70.56	7.90	17.91	0.23

生物质样与煤样均用粉碎机粉碎并用 80 目筛子筛选, 按生物质样与煤样质量比 1:9、2:8、3: 7、4:6 这 4 个比例混合后依照 GB/T212—2008 要求制备灰样。

煤灰成分依据 GB/T1574—2007 测定, 数据见表 2。

表 2 煤灰成分表

Tab. 2 Composition of coal ash %

样品	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	其他
煤灰	49.52	31.76	5.65	5.28	0.43	0.69	1.69	4.98

生物质灰成分含量随生物质不同而略有差异, 但同一地域同种生物质灰成分不会有太大差别, 本文生物质样与文献[8]生物质样取自相同产地, 故采用文献[8]中灰成分数值, 见表 3。

表 3 生物质灰成分表

Tab. 3 Composition of biomass ash %

样品	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
小麦秆	1.93	5.89	0.00	19.72	1.46	7.12
玉米秆	3.88	34.39	2.20	23.48	4.63	5.05
棉花秆	9.19	21.41	1.20	2.51	14.39	8.67

样品	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他
小麦秆	21.43	35.14	5.82	0.00	1.49
玉米秆	4.73	9.83	10.77	0.55	0.40
棉花秆	3.24	19.19	19.89	0.00	0.31

## 1.2 实验方法

灰熔点的测量依据 GB/T219—2008 煤灰熔融性的测定方法, 使用 HR-3A 灰熔融温度测定仪进行, 仪器温度显示分辨率为 1 °C, 测温误差为±3 °C。

将带灰锥的托板置于刚玉舟上并徐徐推入炉内, 至灰锥位于高温带且紧邻电偶热端, 加热后随时观察灰锥的形态变化并记录 4 个特征温度: 变形温度 DT、软化温度 ST、半球温度 HT、流动温度 FT。每个样品重复测量 3 次, 使用算数平均值作为其特征温度。

热分析实验的实验装置为德国 NETZSCH 公司 STA409PC 型同步热分析仪可以同时对待试样的热重(TG)及差示扫描量热(DSC)进行分析, 仪器 TG 分辨率为±0.2 μg, DSC 分辨率为 0.1μW。实验气氛为空气, 流量为 50mL/min, 升温速率为 10 °C/min。每个样品重复测量 2 次, 确保其较好的重复性。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 生物质与煤混烧灰的灰熔点结果分析

3 种生物质和高硫劣质煤混合灰样熔融温度随配比的变化趋势图如图 1 所示。

由图 1 可见, 高硫劣质煤灰的 4 个特征温度均较高, 其流动温度高达 1 498 °C, 同时软化温度和流动温度之差较小, 灰样一旦出现软化和变形, 很快会发生熔融。其主要原因是煤灰中酸性成分 SiO<sub>2</sub> 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量高, 二者之和超过 80%, 而碱性成分 CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、MgO、等含量较低, 总共不到 14%, 而酸性成分的灰熔点普遍高于碱性成分。

不同生物质与高硫劣质煤混烧灰的特征温度均低于煤灰特征温度, 随实验灰样中生物质含量的增加, 软化温度和流动温度之差有增大趋势。同时, 生物质灰在混合灰中的含量越高, 灰熔融温度则越低。这是由于, 灰中碱性矿物质 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、MgO 等通常起降低灰熔融温度的作用, 特别是 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 熔点低, 易与其他氧化物生成低熔点共熔体, 其质量分数增减对熔融性温度升降影响较大<sup>[9-10]</sup>, 生物质灰中碱性矿物质含量较高(见表 3), 导致混合灰的灰熔融温度下降。由于生物质含灰量远小于高硫劣质煤灰含量(见表 1), 因此灰熔融温度的下降幅度较小。

在灰的 4 个特征温度中, 变形温度的变化趋势

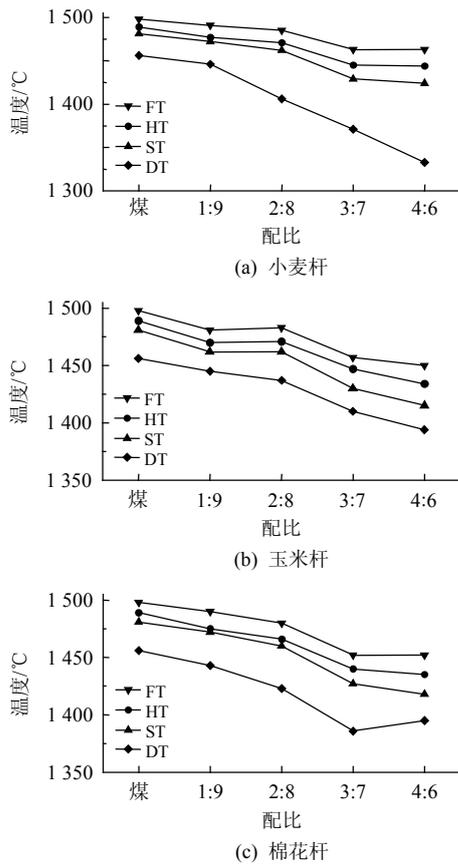


图1 不同生物质与高硫劣质煤混烧灰的灰熔点曲线  
 Fig.1 Ash fusion temperature curves of co-combustion different biomass and high-sulfur low grade coal

最明显，且生物质种类的不同，变形温度的下降幅度也不相同。与变形温度相比，混烧灰的软化温度与流动温度下降幅度均较低，且受生物质种类的影响较小。这是因为生物质灰中易熔物熔化后会在液相凹处产生一个负压，使灰样内部固体颗粒之间因毛细管压力作用而相互靠拢<sup>[11]</sup>，从而产生变形，小麦杆灰中易熔物在3种生物质灰样含量最高，其与高硫劣质煤混烧灰的变形温度相比下降程度也最大。高硫劣质煤中加入生物质后会使灰熔融温度下降，但由于煤灰中不熔矿物质的“骨架”作用和生物质的低含灰率，导致混烧灰的软化温度与流动温度下降幅度并不明显，即混烧灰的灰熔点温度主要受煤灰的影响。

2.2 生物质灰、煤灰的 TG-DSC 曲线分析

图2—5 是不同生物质灰、高硫劣质煤灰的 TG-DSC 曲线。

由图 2—5 可以看出，由于灰组成成分及其含量的差异，煤灰、生物质灰在实验温度范围 TG-DSC 曲线有较大差异，灰样不同失重段的失重量与温度

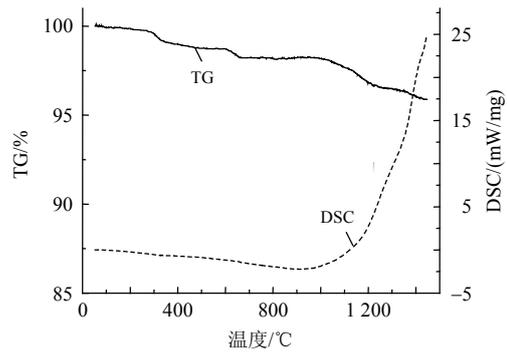


图2 高硫劣质煤灰 TG-DSC 曲线  
 Fig.2 TG-DSC curves of high-sulfur low grade coal ash

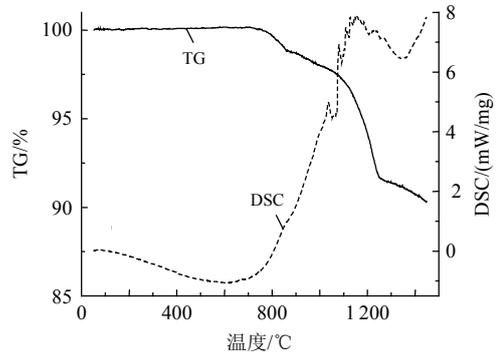


图3 小麦杆灰 TG-DSC 曲线  
 Fig.3 TG-DSC curves of wheat straw ash

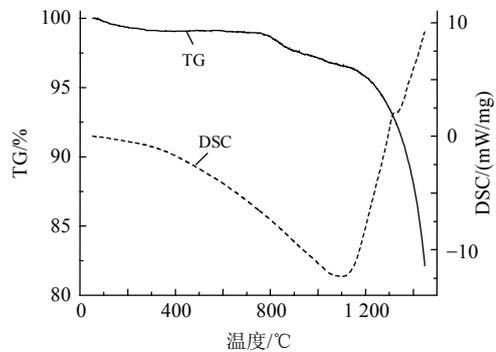


图4 玉米杆灰 TG-DSC 曲线  
 Fig.4 TG-DSC curves of corn stalk ash

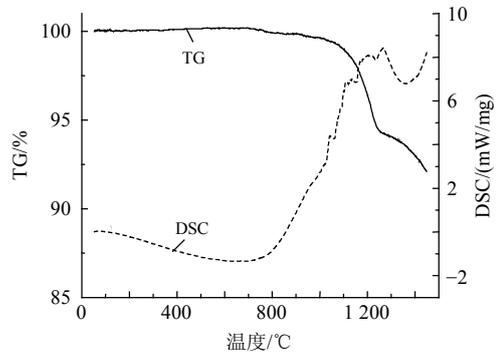


图5 棉花杆灰 TG-DSC 曲线  
 Fig.5 TG-DSC curves of cotton stalk ash

范围见表 4。

表 4 生物质灰和高硫劣质煤灰 TG 曲线数据  
Tab. 4 TG curve dates of ash of biomass and high-sulfur low grade coal

灰样	第一失重段		第二失重段		第三失重段	
	温度范围/℃	失重量/%	温度范围/℃	失重量/%	温度范围/℃	失重量/%
煤灰	255~429	0.96	612~687	0.46	1013~1263	1.56
小麦秆灰	712~863	1.30	863~1251	7.17	1251~1427	1.15
玉米秆灰	100~303	0.68	734~1116	2.42	1116~1443	13.44
棉花秆灰	727~773	0.17	955~1292	5.61	1292~1442	1.88

高硫劣质煤灰主要有 3 个不同程度的失重段, 温度范围分别为: 255~429℃、612~687℃、1013~1263℃。第一失重段是煤灰中部分 CaO 吸收空气中的水分所形成的 Ca(OH)<sub>2</sub> 在加热过程中失去结构水所致, 第二、三个失重段则与碳酸盐、硫酸盐的分解温度相对应<sup>[12-13]</sup>。高温下煤灰的熔融过程十分复杂, 有研究发现当温度升至 1150℃ 以上时, 灰中会出现一种耐热复合物相无水硫铝酸钙 3CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub>(C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S), 其在 1400℃ 以上才会分解<sup>[14-15]</sup>, 使煤灰在实验后期仍呈失重趋势。煤灰的 DSC 曲线在 920℃ 时偏离原来走向, 开始向上走, 但由于灰中 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等耐熔物质含量较高, 使得煤灰在实验温度范围内只表现出吸热状态, 并未形成完整的吸热峰<sup>[16]</sup>。高硫劣质煤灰 DSC 曲线所反映的稳定性, 说明其灰熔融温度较高, 这与高硫劣质煤灰熔点温度的测定结果一致。

小麦秆灰的 TG 曲线有 3 个连续的失重台阶, 起始温度为 712℃, 在 863~1251℃ 时的失重量最大, 为 7.17%。且此温度范围内的 DSC 曲线为多个吸热峰的叠加, 表明一个吸热过程尚未结束, 另一个吸热过程便开始了。生物质灰中的金属化合物会随温度的升高而蒸发, 特别是 K<sub>2</sub>O 受温度影响较大, 从 900℃ 开始, 其含量随温度升高则明显下降<sup>[17-18]</sup>。从小麦秆灰成分可知, 其灰中碱金属、硫元素、氯元素含量较高, 由此推断小麦秆灰的失重应是碳酸盐、硫酸盐及碱金属蒸发共同作用的结果。另外, 在 650~684℃ 温度区间内, 小麦秆灰有一微弱吸热峰且无重量变化, 说明此时小麦秆灰已有熔融现象发生, 这是由于灰中矿物质间还会发生复杂的物理、化学反应, 生成低熔点物质, 如 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaCl 等<sup>[19]</sup>。

玉米秆灰中碱土金属含量较高, 可吸附空气中

的水形成 Ca(OH)<sub>2</sub> 等物质, 使其在 100~303℃ 范围内有一微弱失重。玉米秆灰的失重主要发生在 1116~1443℃, 失重量为 13.44%, 但此温度范围内的 DSC 曲线只有 1 个微弱的吸热峰。

棉花秆灰与小麦秆灰的 TG-DSC 曲线相似, 在 955~1292℃ 时的失重量最大, 为 5.61%, 此温度范围内的 DSC 曲线为几个吸热峰相连。从表 3 可知, 棉花秆灰中碱金属、氯元素含量比小麦秆灰低, 使其失重量较小。

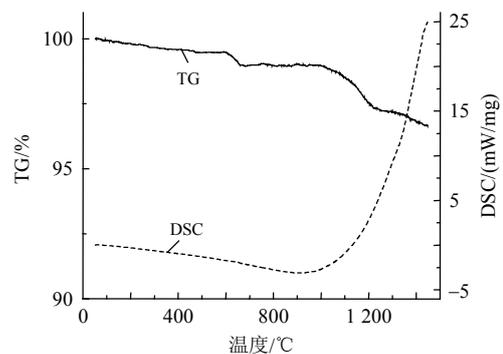
另外, 小麦秆灰、棉花秆灰随温度的升高出现了烧结<sup>[8]</sup>, 阻碍了灰中金属化合物的蒸发, 玉米秆灰中碱金属含量虽然最小, 失重量却最大, 表现在 TG 曲线上, 就是小麦秆灰、棉花秆灰在 1200℃ 后, 其失重量明显减小。

### 2.3 混烧灰的 TG-DSC 曲线分析

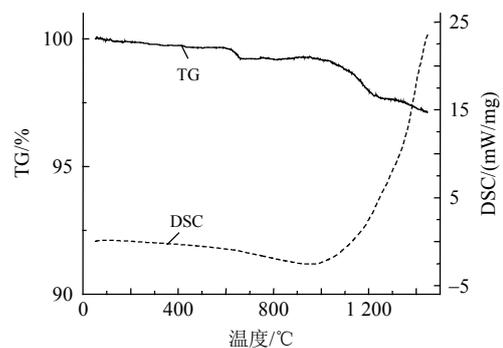
3 种生物质和高硫劣质煤不同混合比混烧灰的 TG-DSC 曲线如图 6—7 所示。

对比图 2 高硫劣质煤灰的 TG-DSC 曲线可以看出, 混烧灰与煤灰的 TG-DSC 曲线走势相似, 这是由于生物质灰在混烧灰中所占比例较小, 也使得 3 种生物质与煤混烧灰的加热失重趋势大体相同, 具体数据见表 5。

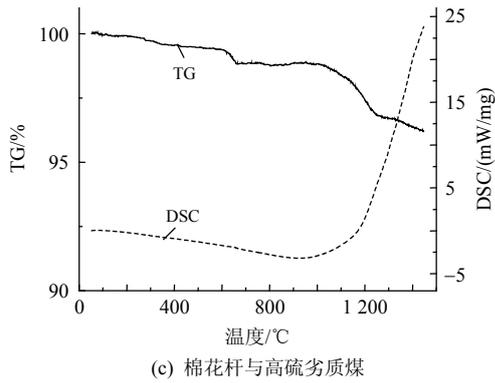
由图 6—7 可见, 生物质和高硫劣质煤的混烧灰与单一煤灰的 TG 曲线略有不同, 只出现了 2 个



(a) 小麦秆与高硫劣质煤

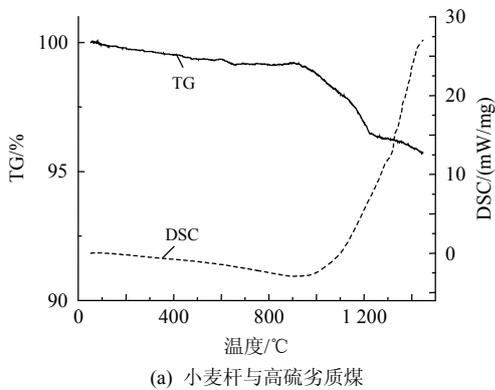


(b) 玉米秆与高硫劣质煤

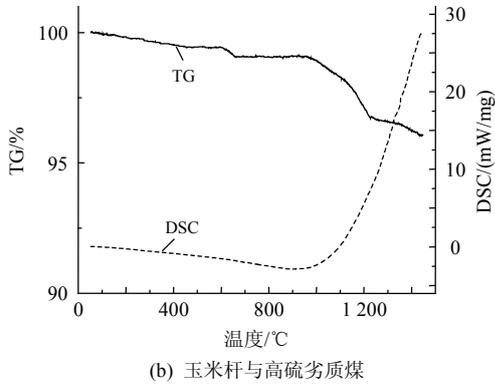


(c) 棉花秆与高硫劣质煤

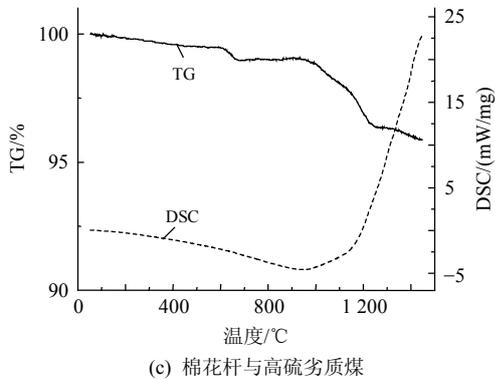
图 6 不同生物质与高硫劣质煤 2:8 混烧灰 TG-DSC 曲线  
Fig. 6 TG-DSC curves of blend ash of co-combustion different biomass and high-sulfur low grade coal with 2:8



(a) 小麦秆与高硫劣质煤



(b) 玉米秆与高硫劣质煤



(c) 棉花秆与高硫劣质煤

图 7 不同生物质与高硫劣质煤 4:6 混烧灰 TG-DSC 曲线  
Fig. 7 TG-DSC curves of blend ash of co-combustion different biomass and high-sulfur low grade coal with 4:6

表 5 生物质和高硫劣质煤混烧灰 TG 曲线数据  
Tab. 5 TG curve dates of blend ash of co-combustion biomass and high-sulfur low grade coal

生物质	灰样 配比	第一失重段		第二失重段	
		温度范围/°C	失重量/%	温度范围/°C	失重量/%
小麦秆	2:8	598~666	0.49	1 028~1 229	1.50
	4:6	598~660	0.22	889~1 229	2.73
玉米秆	2:8	610~667	0.39	1 034~1 226	1.37
	4:6	590~663	0.36	953~1 232	2.31
棉花秆	2:8	604~664	0.54	990~1 259	1.91
	4:6	612~689	0.47	994~1 254	2.66

失重段, 随生物质含量的增大, 第一失重段的失重量呈下降趋势, 第二失重段的失重量则表现为上升趋势, 且失重段的起始温度有前移趋势。由 2.2 节分析可知, 混烧灰的第一失重段是灰中碳酸盐分解的结果, 第二失重段则是硫酸盐和碱金属盐分解造成的。同时, 生物质中的碱金属可与煤中的 Si、Al 等物质发生化学反应, 生成碱硅酸盐或碱铝硅盐, 从而减少了碱金属的蒸发<sup>[20]</sup>, 使得混烧灰的失重量与灰比间不成比例。

生物质和高硫劣质煤混烧灰的 DSC 曲线与单一煤灰走势相似, 但混烧灰 DSC 曲线随混烧灰中生物质含量的增大, 出现微弱的吸热峰, 且与生物质灰 DSC 曲线中吸热峰相对应。由于生物质灰含量远小于煤灰含量(见表 1), 混烧灰中耐熔物含量相对较高, 没有出现与生物质灰中类似的吸热峰, 混烧灰更多体现了煤灰的熔融特性。

随生物质含量的增加, 混烧灰中的助熔物也相对提高, 使混烧灰的 DSC 曲线出现了微弱的吸热峰, 表明混烧灰熔融温度随生物质含量增大有下降趋势。

### 3 结论

1) 生物质和高硫劣质煤混烧可降低灰熔点温度, 生物质含量越高, 灰熔点温度越低。在灰的 4 个特征温度中, 混烧灰的变形温度受生物质的影响最大, 且生物质种类的不同, 变形温度的下降幅度也不相同。由于生物质中灰分含量远小于高硫劣质煤, 灰熔点温度下降幅度较小, 混烧灰的灰熔点温度主要受煤灰的影响。

2) 由于灰组成成分及其含量的差异, 煤灰、生物质灰在实验温度范围 TG-DSC 曲线有较大差异。不同生物质灰的 TG-DSC 曲线略有差异, 曲线

的变化与灰中碱金属、氯元素等物质的含量有关, 同时受自身灰熔融特性的影响。

3) 由于生物质中灰分含量远小于高硫劣质煤, 在低混烧比时, 混烧灰的 TG-DSC 曲线基本体现煤灰的熔融特性。随着混烧比例的提高, TG-DSC 曲线上生物质的影响变得明显。

## 参考文献

- [1] Khan A A, de Jong W, Jansens P J, et al. Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(1): 21-50.
- [2] Mischa Theis, Bengt-Johan Skrifvars, Mikko Hupa, et al. Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: deposition rates[J]. *Fuel*, 2006, 85(7-8): 1125-1130.
- [3] 董信光, 李荣玉, 刘志超, 等. 生物质与煤混燃的灰分特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(26): 118-124. Dong Xinguang, Li Rongyu, Liu Zhichao, et al. Investigation on the ash characteristic during co-firing of coal and biomass[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(26): 118-124(in Chinese).
- [4] Yuanjing Zheng, Peter Arendt Jensen, Anker Degn Jensen, et al. Ash transformation during co-firing coal and straw[J]. *Fuel*, 2007, 86(7-8): 1008-1020.
- [5] Vamvuka D, Pitharoulis M, Alevizos G, et al. Ash effects during combustion of lignite/biomass blends in fluidized bed[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(12): 2662-2671.
- [6] Arvelakis S, Folkedahl B, Dam-Johansen K, et al. Studying the melting behavior of coal, biomass, and coal/biomass ash using viscosity and heated stage XRD data[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(3): 1329-1340.
- [7] 罗隽飞, 李文华, 姜英, 等. 中国煤中硫的分布特征研究[J]. *煤炭转化*, 2005, 28(3): 14-18. Luo Yunfei, Li Wenhua, Jiang Ying, et al. Distribution of sulfur in coals of china[J]. *Coal Conversion*, 2005, 28(3): 14-18(in Chinese).
- [8] 殷炳毅. 生物质混煤的灰熔融特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2008. Yin Bingyi. Study on the ash fusion property of biomass and coal blending[D]. Jinan: Shandong University, 2008(in Chinese).
- [9] 戴爱军, 杜彦学, 谢欣馨. 煤灰成分与灰熔融性关系研究进展[J]. *煤化工*, 2009, 143(4): 16-19. Dai Aijun, Du Yanxue, Xie Xinxin. Research progress on the relationship between coal ash components and ash fusion character[J]. *Coal Chemical Industry*, 2009, 143(4): 16-19(in Chinese).
- [10] 牛艳青, 谭厚章, 王学斌, 等. 辣椒秆灰熔融特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(11): 68-72. Niu Yanqing, Tan Houzhang, Wang Xuebin, et al. Fusion characteristic of capsicum stalks ash[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(11): 68-72(in Chinese).
- [11] 兰泽全, 曹欣玉, 赵显桥, 等. 水煤浆混合灰熔融特性试验研究[J]. *热力发电*, 2003(4): 13-16. Lan Zequang, Chao Xinyu, Zhao Xianqiao, et al. Test and research of fusion property for ash mixtures from coal-water slurry[J]. *Thermal Power Generation*, 2003(4): 13-16(in Chinese).
- [12] 邓芙蓉, 杨建国, 赵虹. 利用 TG-DSC 方法研究煤灰熔融特性[J]. *煤炭科学技术*, 2005, 33(2): 46-49. Deng Furong, Yang Jianguo, Zhao Hong. Study on coal ash fusion characteristics with TG-DSC method[J]. *Coal Science and Technology*, 2005, 33(2): 46-49(in Chinese).
- [13] 杨建国, 邓芙蓉, 赵虹, 等. 煤灰熔融过程中的矿物演变及其对灰熔点的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(17): 122-126. Yang Jianguo, Deng Furong, Zhao Hong, et al. Mineral conversion of coal-ash in fusing process and the influence to ash fusion point[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(17): 122-126(in Chinese).
- [14] 陈玉爽, 张忠孝, 乌晓江, 等. 配煤对煤灰熔融特性影响的实验与量化研究[J]. *燃料化学学报*, 2009, 37(5): 521-525. Chen Yushuang, Zhang Zhongxiao, Wu Xiaojiang, et al. Quantum chemistry calculation and experimental study on coal ash fusion characteristics of blend coal[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2009, 37(5): 521-525(in Chinese).
- [15] 赵改菊, 谢峻林, 路春美, 等. 高温固硫物相硫铝酸钙的生成过程研究[J]. *燃料化学学报*, 2006, 34(6): 665-669. Zhao Gaiju, Xie Junlin, Lu Chunmei, et al. Study on formation process of sulphoaluminate calcium during high temperature desulfuration[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2006, 34(6): 665-669(in Chinese).
- [16] 刘志, 杨建国, 赵虹. 配煤煤灰熔融特性的热分析研究[J]. *电站系统工程*, 2006, 22(3): 4-6. Liu Zhi, Yang Jianguo, Zhao Hong. Study on ash fusion

- process of blended coal by TG-DSC[J]. Power System Engineering, 2006, 22(3): 4-6(in Chinese).
- [17] Thy P, Jenkins B M, Grundvig S, et al. High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes[J]. Fuel, 2006, 85(5-6): 783-795.
- [18] Keigo Matsumoto, Keiji Takeno, Toshimitsu Ichinose, et al. Behavior of alkali metals as the carbonate compounds in the biomass char obtained as a byproduct of gasification with steam and oxygen at 900~1000 °C [J]. Energy Fuels, 2010, 24(3): 1980-1986.
- [19] Marek Pronobis. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations[J]. Biomass and Bioenergy, 2005, 28(4): 375-383.
- [20] Doshi V, Vuthaluru H B, Korbee R, et al. Development of a modeling approach to predict ash formation during co-firing of coal and biomass[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(9): 1148-1156.



蒲舸

收稿日期: 2010-12-23。

作者简介:

蒲舸(1969), 男, 副教授, 博士, 研究方向为清洁燃烧及环境保护, pujiayi@163.com;

谭波(1973), 男, 硕士研究生, 研究方向为清洁燃烧及环境保护。

(责任编辑 张媛媛)