

# 生物质在高温下的动态热解及元素析出特性

韩高岩<sup>1</sup>，吕洪坤<sup>1</sup>，熊建国<sup>1</sup>，张明<sup>1</sup>，方昕<sup>1</sup>，童家麟<sup>1</sup>，肖海平<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院电源技术中心，浙江杭州310000；2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院，北京102206)

**摘要：**利用管式炉在800~1200 的温度下对麦草、稻草和元宝煤进行高温热解，并通过红外光谱分析仪和氢气分析仪对析出气体的成分进行测量，研究结果表明：麦草和稻草的NH<sub>3</sub>，HCN，H<sub>2</sub>和主要烷烃气体的析出曲线均呈现为单峰状，其中，H<sub>2</sub>最晚析出且析出时间最长；随着热解温度的升高，麦草和稻草的NH<sub>3</sub>，CH<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>析出量均逐渐减小，H<sub>2</sub>析出量逐渐增大且增速快于元宝煤，当热解温度约为1100 时，麦草和稻草的HCN析出量均达到最大值；当热解温度约为1010 时，稻草的C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>和C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>析出量最大，而麦草的C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>和C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>最大析出量对应的热解温度分别约为1030，1060 ；麦草和稻草析出气体的碳元素质量分数均随着热解温度的升高而逐渐减小，氢元素质量分数在热解温度为1000 时最小，氮元素质量分数在热解温度为900 时最大，麦草析出气体的氧元素质量分数随着热解温度的升高而逐渐增大，而稻草析出气体的氧元素质量分数在热解温度为1000 时最大。

## 0 前言

随着社会的发展，人们对能源的需求越来越大，并且随着化石燃料的逐渐枯竭，可再生能源的利用逐渐引起人们的重视。生物质是一种可再生能源，具有储量大、分布广泛、利用方便等特点。快速热解是生物质能源化利用的一个重要途径。Santiago Septien利用沉降炉研究了生物质在高温下的快速热解特性，研究结果表明：当热解温度为1000 时，热解气体和焦油的生成量占总产物的96%；当热解温度为1200 时，大部分焦油会发生分解；当热解温度为1400 时，CH<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>是最主要的烃类生成物<sup>[1]</sup>。

胡亿

明利用管

式炉对生物质原样

和抽提残渣进行热裂解实验，实验结

果表明，与生物质原样相比，抽提残渣的H<sub>2</sub>

产率上升，CO产率下降，热解焦油

中酚类物质的总量和种类明显多于生物质原样<sup>[2]</sup>

。詹昊通过研究发现，生物质热解的主要含氮污染物是N

H<sub>3</sub>和HCN，并且约50%的氮元素分布在气相中<sup>[3]</sup>

。崔丽在研究中发现，小麦秸秆的主要热解产物为H<sub>2</sub>O，CO<sub>2</sub>，CO，CH<sub>4</sub>

、苯酚和甲酸，随着升温速率的增大，小麦秸秆热解的最大失重温度和起始温度均向高温侧移动<sup>[4]</sup>。

张会

宽通过热解-

气质联用仪研究了葵花秆在

热解温度为300~700 时的热解特性，发现酚类化合物

是除CO<sub>2</sub>外最多的产物，其次为芳烃类化合物，最少的是杂环类物质<sup>[5]</sup>。

目前

，有关生

物质在中低温度下

热解的研究较多，而有关生物质在高

温下的热解特性及元素析出特性的研究较少<sup>[6]-[8]</sup>

。因此，本文以稻草和麦草为研究对象，以元宝煤为对比，研究生物质在高温下热解时的主要气相产物和元素析出特性，从而为生物质高温闪速热解制气提供理论依据。

## 1实验部分

### 1.1实验仪器

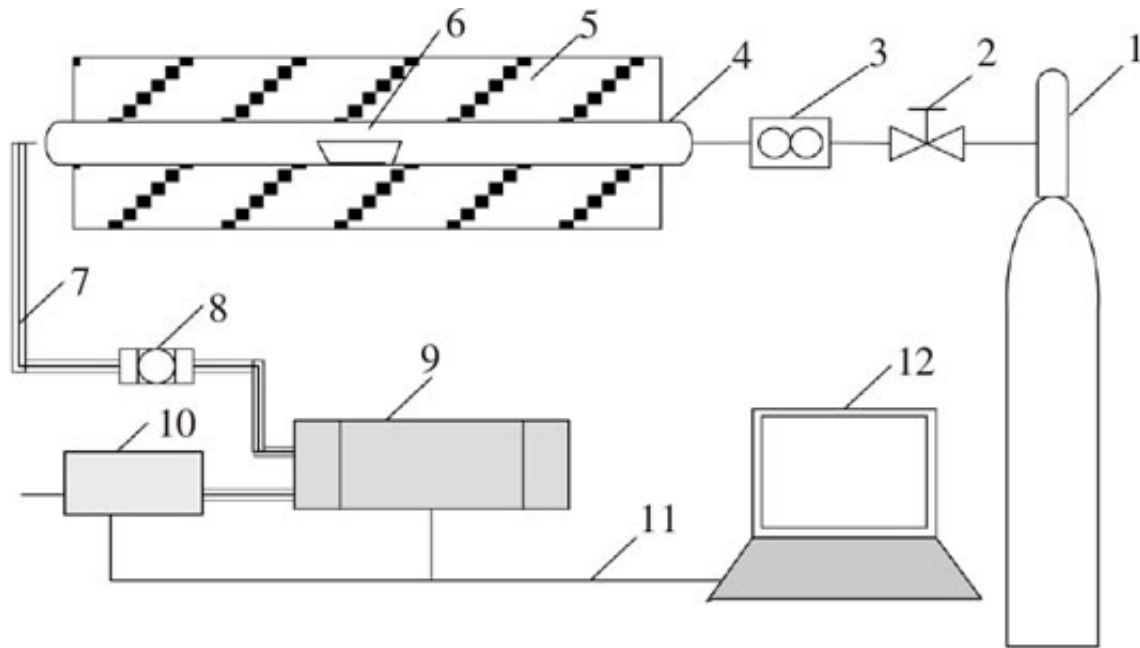


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

1-氩气;2-调节阀;3-流量计;4-石英管;5-管式炉;6-瓷舟;  
7-加热带;8-过滤器;9-气体分析仪;10-氢气分析仪;11-数据  
线;12-计算机。

图1为高温热解实验装置的示意图。从图1可以看出，该实验装置主要由样品加热和气体检测两部分组成。其中，使用YFFK30 × 325/13QK-G型管式炉进行样品加热，通过GasmeterDX4000型气体分析仪和上海英盛生产的电化学式氢气分析仪（用来检测氢气，检测精度为量程的5%）进行气体检测。GasmeterDX4000型气体分析仪是利用傅里叶红外光谱分析的原理对气体进行检测，检测精度为-2%~2%。

### 1.2实验材料

以稻草和麦草作为高温热解的生物质原料，以元宝煤（褐煤）作为对比物质。将麦草、稻草和元宝煤分别研磨成粉末，用60目筛筛选出粒径小于250 μm的颗粒备用。麦草、稻草和元宝煤的元素分析和工业分析结果（空气干燥基）如表1所示。

表 1 试验样品的工业分析和元素分析

Table 1 Industrial and elemental analyses of test samples

试样	工业分析/%				元素分析/%				
	M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	O <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	S <sub>ad</sub>
稻草	11.16	13.33	65.41	10.10	52.13	6.79	40.07	0.79	0.21
麦草	7.19	6.37	75.01	11.43	48.54	6.85	43.80	0.46	0.34
元宝煤	6.14	25.19	32.97	35.70	61.00	4.43	30.54	1.06	2.97

### 1.3 实验方法

将管式炉的氩气流量调节为1200mL/min，为防止析出气体在管式炉后的管道中凝结，将加热带温度设定为180℃。从3种物质的备用粉末中分别取出5份（每份0.1g）放入磁舟中；将管式炉的温度分别设定为800，900，1000，1100，1200℃，当管式炉达到设定温度时，立即将磁舟从石英管前段放入石英反应器中，并立即封盖。气体成分分析数据采集到计算机中，实验后统一处理。

对于每种气体的析出质量，利用气体在线测量的体积浓度与时间的积分并经转化得到，具体的计算式为

$$m = M \sum_{k=1}^{k=i} \left( \frac{\varphi_k}{10\ 000\ 000} \frac{V_k}{60} \frac{t_k}{22.4} \right) \quad (1)$$

式中： $m$  为物质的质量，mg； $M$  为物质的分子量； $\varphi_k$  为物质的体积浓度， $\mu\text{L/L}$ ； $V_k$  为根据实际修正的气体流量，mL/min； $t_k$  为时间间隔，s； $i$  为总测量点数。

### 2 热解气体析出特性

#### 2.1 NH<sub>3</sub>和HCN的析出特性

在热解温度为1100℃的条件下，麦草、稻草和元宝煤的NH<sub>3</sub>和HCN析出曲线如图2所示。

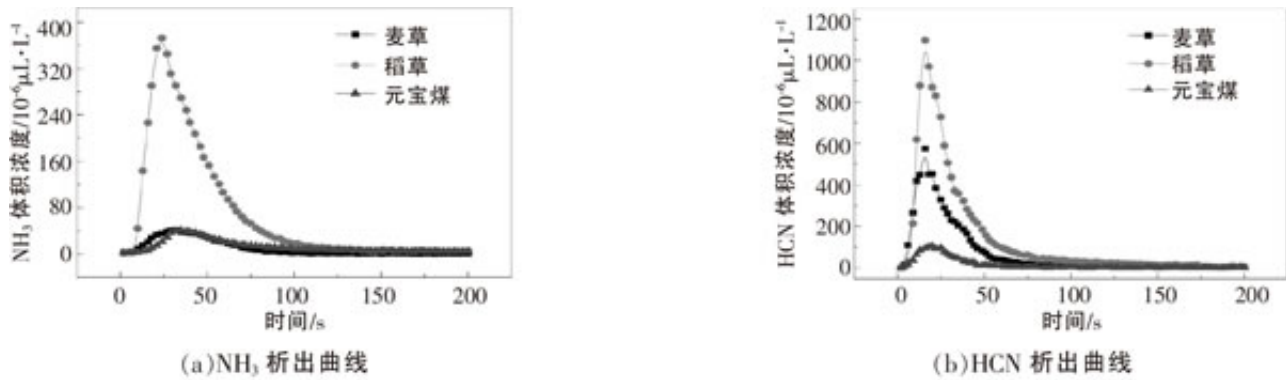


图2 NH<sub>3</sub>和HCN的析出曲线

Fig.2 Precipitation curves of NH<sub>3</sub> and HCN

由图2可知，麦草、稻草和元宝煤的NH<sub>3</sub>和HCN析出曲线均呈现为单峰状，其中，稻草和麦草析出NH<sub>3</sub>的主要过程分别为8~80s，8~120s，析出HCN的主要过程分别为4~70s，4~110s，而元宝煤析出NH<sub>3</sub>和HCN的主要过程分别为15~100s，6~70s。

由此可见，与两种生物质相比，元宝煤开始析出NH<sub>3</sub>的时间较晚，析出HCN的过程时间较短，元宝煤析出NH<sub>3</sub>和HCN的体积浓度也最小。这是因为氮元素在煤中主要以吡咯、季氮和吡啶的形式存在，而在生物质中则以游离态氨基酸或蛋白质的形式存在，煤中氮的赋存态比生物质中稳定，使得元宝煤开始析出NH<sub>3</sub>的时间相对较晚；尽管元宝煤中的氮元素含量较高，但由于煤热解时大部分氮元素保留在焦油中，所以元宝煤析出HCN和NH<sub>3</sub>的体积浓度最小<sup>[3]、[9]</sup>。与稻草相比，麦草析出NH<sub>3</sub>和HCN的过程较快，且析出NH<sub>3</sub>和HCN的体积浓度也小于稻草。这主要是因为稻草的含氮量高于麦草，此外，稻草中的水蒸气含量较高，在热解过程中能够提供较多的H自由基，进而使热解过程中产生的半焦氮转化成NH<sub>3</sub>，同时促进挥发分氮热裂解，生成HCN<sup>[3]、[10]</sup>。

麦草、稻草和元宝煤的NH<sub>3</sub>和HCN析出量随热解温度的变化曲线如图3

所示。由图3可知，随着热解温度的升高，稻草和麦草的NH<sub>3</sub>析出量逐渐减少，而元宝煤的NH<sub>3</sub>析出量变化较小。这是因为随着热解温度的升高，反氨合成反应吸热并促进NH<sub>3</sub>的分解，使得稻草和麦草的NH<sub>3</sub>生成量随着热解温度的升高而逐渐降低。随着热解温度的升高，稻草的HCN析出量呈现出先增大后减小的变化趋势，且增幅明显，而麦草和元宝煤的HCN析出量变化幅度较小，当热解温度为1100℃时，稻草和麦草的HCN析出量最大。这是因为随着热解温度的升高，热解反应速率加快，从而促进非气相氮向气相氮转化，使得HCN的生成量增多，但热解温度过高时，会促使HCN转化为N<sub>2</sub>，从而导致HCN的析出量减小<sup>[11]</sup>。

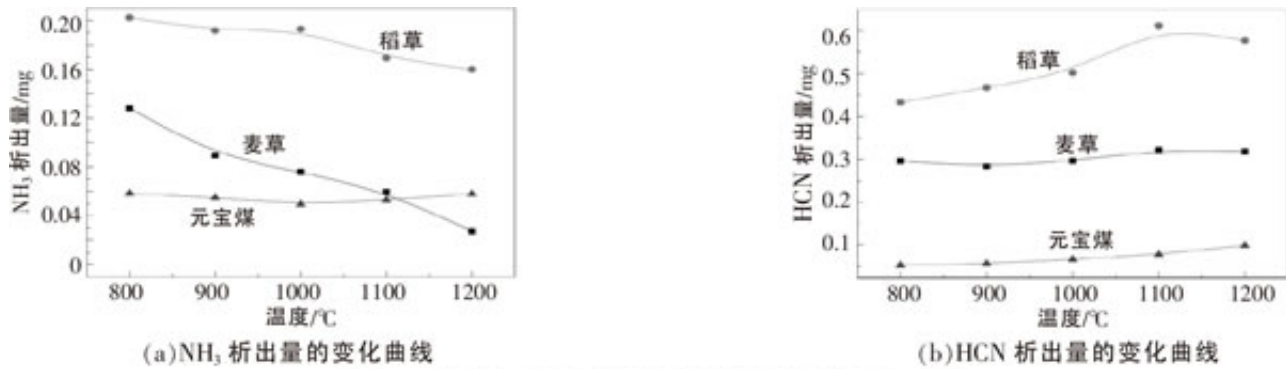


图 3 NH<sub>3</sub> 和 HCN 的析出质量随温度的变化曲线

Fig.3 Mass precipitation curves of NH<sub>3</sub> and HCN with pyrolysis temperature

### 2.2 H<sub>2</sub> 的析出特性

麦草、稻草和元宝煤在热解温度为1100 °C 时的 H<sub>2</sub> 析出曲线以及 H<sub>2</sub> 析出量随热解温度的变化曲线如图4所示。从图4 (a) 可以看出，

麦草、稻草和元宝煤均在27s后开始析出 H<sub>2</sub>，其中，当热解时间为60s左右时，稻草析出 H<sub>2</sub> 的体积浓度达到峰值，当热解时间为88s左右时，麦草析出 H<sub>2</sub> 的体积浓度达到峰值，麦草和稻草析出 H<sub>2</sub> 的体积浓度均大于元宝煤。这是因为元宝煤热解生成的 H<sub>2</sub> 主要来源于

元宝煤的芳香结构和氢

化芳香结构在高温时发生的缩聚脱氢反应，而

稻草和麦草热解生成的 H<sub>2</sub> 主要来源于升温过程中碳与挥发分等物质发生的反应，高温时 C-C 键和 C-H 键的破裂及焦油的继续热裂解也会产生 H<sub>2</sub><sup>[12], [13]</sup>

。由于稻草的挥发性物质含量高于麦草，使得稻草析出 H<sub>2</sub> 的体积浓度早于麦草达到峰值。



图 4 H<sub>2</sub> 的析出曲线以及 H<sub>2</sub> 的析出量随热解温度的变化曲线

Fig.4 Precipitation curves of H<sub>2</sub> and mass precipitation curves of H<sub>2</sub> with pyrolysis temperature

由图4 (b) 可以看出，麦草、稻草和元宝煤的 H<sub>2</sub> 析出量均随着热解温度的升高而逐渐增加，但是，稻草和麦草的 H<sub>2</sub> 析出量随着热解温度的

升高而逐渐增加的幅度明显大于元宝煤。当热

解温度相同时，稻草的 H<sub>2</sub>

析出量略低于麦草，但明显高于元宝煤。这是因为稻草的挥发分含量和氢元素含量均低于麦草而高于元宝煤。

### 2.3 烷烃气体的析出特性

麦草和稻草高温热解产生的主要烷烃气体为 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6$ ，其中， $\text{CH}_4$ 的析出量最多，其次为 $\text{C}_2\text{H}_4$ 。

麦草和稻草在热解温度为1100 时的主要烷烃气体的析出曲线以及主要烷烃气体的析出量随热解温度的变化曲线如图5、6所示。

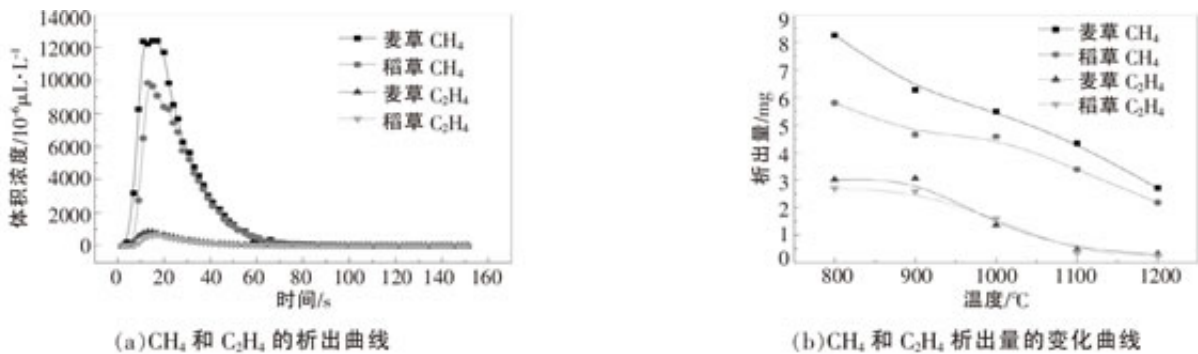


图 5  $\text{CH}_4$  和  $\text{C}_2\text{H}_4$  的析出曲线以及  $\text{CH}_4$  和  $\text{C}_2\text{H}_4$  的析出量随热解温度的变化曲线

Fig.5 Precipitation curves of  $\text{CH}_4$  and  $\text{C}_2\text{H}_4$  and mass precipitation curves of  $\text{CH}_4$  and  $\text{C}_2\text{H}_4$  with pyrolysis temperature

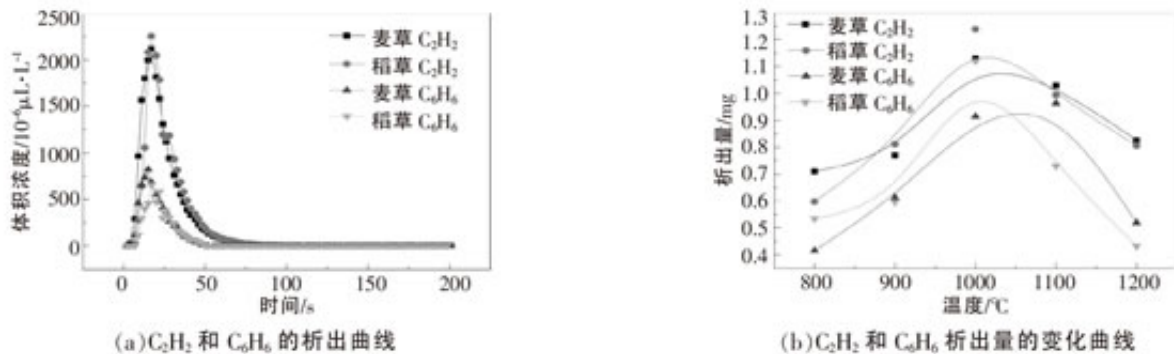


图 6  $\text{C}_2\text{H}_2$  和  $\text{C}_6\text{H}_6$  的析出曲线以及  $\text{C}_2\text{H}_2$  和  $\text{C}_6\text{H}_6$  的析出量随热解温度的变化曲线

Fig.6 Precipitation curves of  $\text{C}_2\text{H}_2$  and  $\text{C}_6\text{H}_6$  and mass precipitation curves of  $\text{C}_2\text{H}_2$  and  $\text{C}_6\text{H}_6$  with pyrolysis temperature

由图5 (a) 可知： $\text{CH}_4$ 和 $\text{C}_2\text{H}_4$ 的析出曲线均呈现为单峰状，麦草和稻草析出 $\text{CH}_4$ 的体积浓度均在15s左右时达到峰值，麦草和稻草均在100s左右时停止析出 $\text{CH}_4$ ；麦草析出 $\text{C}_2\text{H}_4$ 的体积浓度在14s左右达到峰值，而稻草析出 $\text{C}_2\text{H}_4$ 的体积浓度达到峰值的时间约为18s，麦草和稻草均在65s左右时停止析出 $\text{C}_2\text{H}_4$ 。

由图5 (b) 可知，随着热解温度的升高， $\text{CH}_4$ 和 $\text{C}_2\text{H}_4$ 的析出量均逐渐减少。

这可能是由于生物质的羟基含量较高，当热解温度升高时，羟基被释放出来，并与 $\text{CH}_4$ 发生反应，从而使得 $\text{CH}_4$ 的生成量降低； $\text{C}_2\text{H}_4$ 的析出量随着热解温度升高而逐渐减少是因为高温促进了 $\text{C}_2\text{H}_4$ 气体的进一步裂解<sup>[15]</sup>。

由图6 (a) 可知， $\text{C}_2\text{H}_2$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6$ 的析出曲线均呈现为单峰状，麦草和稻草析出 $\text{C}_2\text{H}_2$ 的体积浓度均在18s左右时达到峰值，麦草和稻草均在85s左右时停止析出 $\text{C}_2\text{H}_2$ 。麦草析出 $\text{C}_6\text{H}_6$ 的体积浓度在15s左右时达到峰值，稻草则滞后约3s达到析出 $\text{C}_6\text{H}_6$ 的体积浓度峰值，麦草和稻草均在50s左右时停止析出 $\text{C}_6\text{H}_6$ 。由图6 (b) 可知， $\text{C}_2\text{H}_2$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6$ 的析出量随热解温度的变化曲线均呈现为单峰状，稻草的 $\text{C}_2\text{H}_2$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6$ 析出量均在热解温度约为1010 时最大，而麦草的 $\text{C}_2\text{H}_2$ 和 $\text{C}_6\text{H}_6$ 最大析出量对应的热解温度分别约为1030 和1060 。在一定温度范围内，热解温度的升高会促使生物质的木质素热

解加深和苯环自身发生断裂，进而生成更多的 $C_2H_2$ 和 $C_6H_6$ ；当热解温度过高时， $C_2H_2$ 和 $C_6H_6$ 会发生裂解生成单碳结构的烃类或其他物质，导致 $C_2H_2$ 和 $C_6H_6$ 的析出量随着热解温度的升高而减少。

当热解温度为1100 时，麦草、稻草和元宝煤热解析出的主要气体的质量分数如表2所示。

表 2 1 100 °C时主要热解气体质量分数  
Table 2 The mass fraction of main pyrolysis gas at 1 100 °C %

试样	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HCN	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	苯	苯酚	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	其他
麦草	31.99	15.01	30.90	8.60	4.52	0.04	0.61	1.95	1.83	2.38	0.88	1.29
稻草	29.61	18.11	29.35	8.19	4.35	0.41	1.48	2.41	1.77	2.44	0.86	1.02
元宝煤	39.26	17.60	31.30	3.91	0.80	0.18	0.27	0.88	0.83	0.35	0.21	3.41

由表2可知，麦草和稻草析出的11种气体的总质量分数分别为98.71%和98.98%，而元宝煤析出的11种气体的总质量分数为96.59%，其中，麦草和稻草析出的CH<sub>4</sub>，C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>，C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>，HCN、苯、苯酚和H<sub>2</sub>的总质量分数明显高于元宝煤，而稻草析出的NH<sub>3</sub>和HCN的总质量分数明显高于麦草。

### 3元素析出特性

研究C，H，O，N这4

种元素在生物质热解过程中的析出特性（氮元素的计算仅考虑了NH<sub>3</sub>，HCN和C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>N），结果见表3。

表 3 热解气中各元素的析出质量分数  
Table 3 The mass fraction of each element in the pyrolysis gas

元素	麦草/%					稻草/%				
	800	900	1000	1100	1200	800	900	1000	1100	1200
C	41.86	39.38	35.10	32.58	30.22	35.41	33.43	30.72	30.51	28.41
H	10.88	10.00	9.33	11.16	13.48	10.41	10.14	9.03	10.71	14.68
O	47.53	50.81	57.08	60.22	63.90	53.19	55.12	59.34	56.54	55.81
N	0.70	0.91	0.55	0.48	0.41	0.98	1.31	1.22	1.20	1.11

由表3可知，随着热解温度的升高，麦草和稻草析出气的碳元素质量分数均逐渐减小，这是因为热解温度的升高使得生物质炭中的碳元素含量逐渐增加，而随热解气析出的碳元素含量逐渐减少[16]。麦草和稻草析出气中的氢元素质量分数均随着热解温度的升高而呈现出先减小后增大的变化趋势，当热解温度为1000 时，两者的氢元素质量分数均达到最小值，分别为9.33%和9.03%。

这是因为当热解温度小于1000 时，随着热解温度的升高，CH<sub>4</sub>，C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

的析出量逐渐减少，当热解温度大于1000

时，随着热解温度的升高，H<sub>2</sub>

的析出量快速增大。氧元素析出主要是由于H<sub>2</sub>O，CO<sub>2</sub>

和CO的析出，由于这三种气体的质量最大，使得析出气中的氧元素质量分数也最大。其中，麦草析出气的氧元素质量分数随着热解温度的升高而逐渐增大，而稻草析出气的氧元素质量分数在1000 时达到最大值（59.34%），然后随着热解温度的升高而逐渐降低。氮元素的析出主要是由于N

H<sub>3</sub>，HCN和C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>

N的析

出。麦草和稻

草析出气中的氮元素质量分

数均在900 时达到最大值，分别为0.91%和1.31%，这

是因为C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>

N的析出量在900 时最大，当热解温度低于900 时，

HCN和C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>N的析出量大于NH<sub>3</sub>

的减少量，使得氮元素质量分数增大，当热解温

度高于900 时，NH<sub>3</sub>和C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>N的减少量大于HCN的析出量，使得氮元素质量分数减小。

在不同的热解温度下，碳氧、碳氢和氢氮的析出质量比如图7所示。

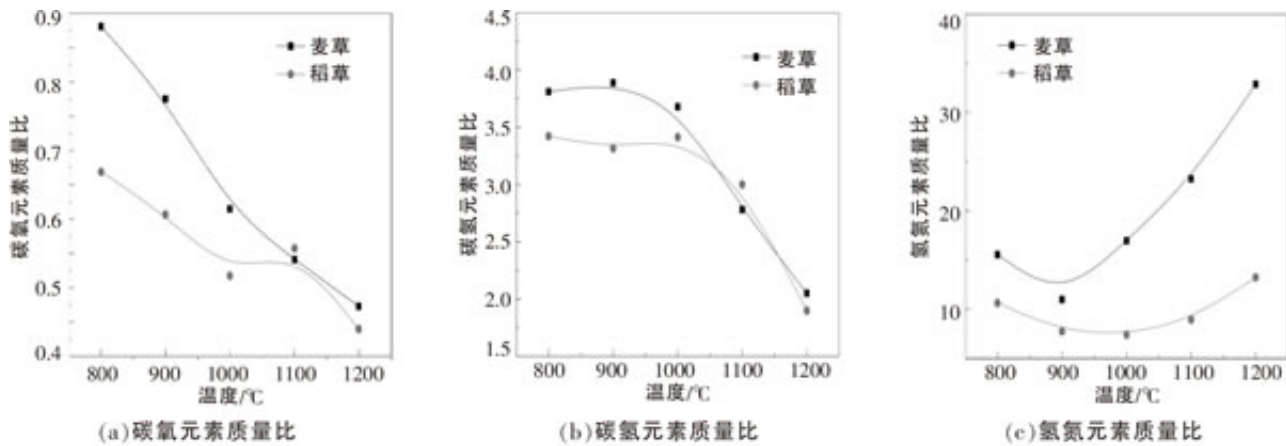


图 7 不同热解温度下碳氧、碳氢和氢氮元素的析出质量比

Fig.7 Mass ratio of C/O, C/H and H/N at different pyrolysis temperature

从图7可以看出，麦草和稻草的碳氧、碳氢元素的质量比均随着热解温度的升高而逐渐减小，而麦草和稻草的氢氮元素质量比均在热解温度约为900 时达到最小值，分别为11.1和7.7。这是因为随着热解温度的升高，烷烃的析出量减少，而CO<sub>2</sub>、CO

的析出量增

多，进而使得碳氧元素

的质量比随着热解温度的升高而减小；虽然烷

烃的析出量减少，但是H<sub>2</sub>

析出量的增加使得热解气中的碳氢

元素的质量比随着热解温度的升高而减小。NH<sub>3</sub>和C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>

N析出量的减少以及烷烃析出量的减少使得氢氮元素的质量比在一定热解温度范围内逐渐减少，当超过一定热解温度后，由于H<sub>2</sub>析出量的迅速增大，使得氢氮元素的质量比迅速增大。

#### 4结论

麦草和稻草的NH<sub>3</sub>、HCN、H<sub>2</sub>

和主要烷烃气体的析出曲线均呈现为单峰状，其中，H<sub>2</sub>开始析出的时间最晚，析出时间也最长。

随着热解温度的升高，稻草和麦草的NH<sub>3</sub>析出量逐渐减少，而元宝煤的NH<sub>3</sub>

析出量变化较小；随着热解温度的升高，稻草的HCN析出量呈现出先增大后减少的变化趋势，当热解温度为1100 时，稻草和麦草的HCN析出量均最大。

麦草、稻草和元宝煤的H<sub>2</sub>

析出量均随着热解温度的升高而逐渐增加，但是，

稻草和麦草的H<sub>2</sub>析出量随着热解温度的升高而逐渐增加的幅度均明显大于元宝煤。

麦草和稻草析出的烷烃类气体主要为CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>和C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>，其中，CH<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

的析出量均随着热解温度的升高而逐渐减少，稻草的C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>和C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>

析出量均在热解温度约为1010 时最大，而麦草的C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>和C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>最大析出量对应的热解温度分别约为1030 和1060 。

麦草和稻草析出气体的碳元素质量分数均随着热解温度的升高而逐渐减少，氢元素质量分数在热解温度为1000 时最小，氮元素质量分数在热解温度为900 时值最大，麦草析出气体的氧元素质量分数随着热解温度的升高而增大，而稻草析出气体的氧元素质量分数在热解温度为1000 时最大。



## 参考文献：

- [1] Santiago Septien, Sylvie Valin, Capucine Dupont, et al. Effect of particle size and temperature on woody biomass fast pyrolysis at high temperature (1 000~1 400 °C)[J]. Fuel, 2012, 97: 202–210.
- [2] 胡亿明, 蒋剑春, 孙云娟, 等. 抽提物的去除对生物质热解的影响研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(3): 358–364.
- [3] 詹昊, 张晓鸿, 阴秀丽, 等. 生物质热化学转化过程含 N 污染物形成研究[J]. 化学进展, 2016, 28(12): 1880–1890.
- [4] 崔丽, 姬登祥, 艾宁, 等. 小麦秸秆热解产物逸出特性 TG-FTIR 研究 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1762–1767.
- [5] 张会宽, 周安宁, 陈福欣, 等. 基于 Py-GC/MS 的葵花秆热解产物组成结构研究 [J]. 可再生能源, 2015, 33(3): 429–434.
- [6] 安杨, 徐静, Arash Tahmasebi, 等. 花生壳和松木屑固定床低温热解特性的实验研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(12): 1886–1890.
- [7] Xinyan He, Zhaoxia Liu, Wenjuan Niu, et al. Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of gas and biochar obtained from pyrolysis of crop residues[J]. Energy, 2017, 15: 746–756.
- [8] 应浩, 余维金, 许玉, 等. 生物质热解与气化制氢研究进展[J]. 现代化工, 2015, 35(1): 53–59.
- [9] 冯志华, 常丽萍, 任军, 等. 煤热解过程中氮的分配及存在形态的研究进展[J]. 煤炭转化, 2000, 23(3): 6–12.
- [10] 李斌, 韩旭, 陈义龙, 等. 不同钙基吸收剂对玉米秸秆热解气化制氢特性的影响 [J]. 可再生能源, 2017, 35(4): 502–507.
- [11] Yuan S, Chen X L, Li W F, et al. Nitrogen conversion under rapid pyrolysis of two types of aquatic biomass and corresponding blends with coal [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(21): 10124–10130.
- [12] 李全新, 袁丽霞. 可再生生物质资源制氢技术的研究进展[J]. 石油化工, 2010, 39(2): 107–115.
- [13] J Solar, I de Marco, B M Caballero, et al. Influence of temperature and residence time in the pyrolysis of woody biomass waste in a continuous screw reactor[J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 95: 416–423.
- [14] Zhongqing Ma, Dengyu Chen, Jie Gu, et al. Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA-FTIR and model-free integral methods [J]. Energy Conversion Management, 2015, 89: 251–259.
- [15] 吕洪坤, 杨卫娟, 周俊虎, 等. 再燃煤粉轻质挥发分动态析出特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 78–85.
- [16] 李飞跃, 汪建飞, 谢越, 等. 热解温度对生物质炭碳保留量及稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 266–170.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/155547.html>